

การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์

CURRENT CONTROL FEEDBACK APPROACH OF PV
EMULATOR

มาลี พัฒน์ช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์

CURRENT CONTROL FEEDBACK APPROACH OF PV
EMULATOR

มาลี พัฒน์ช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

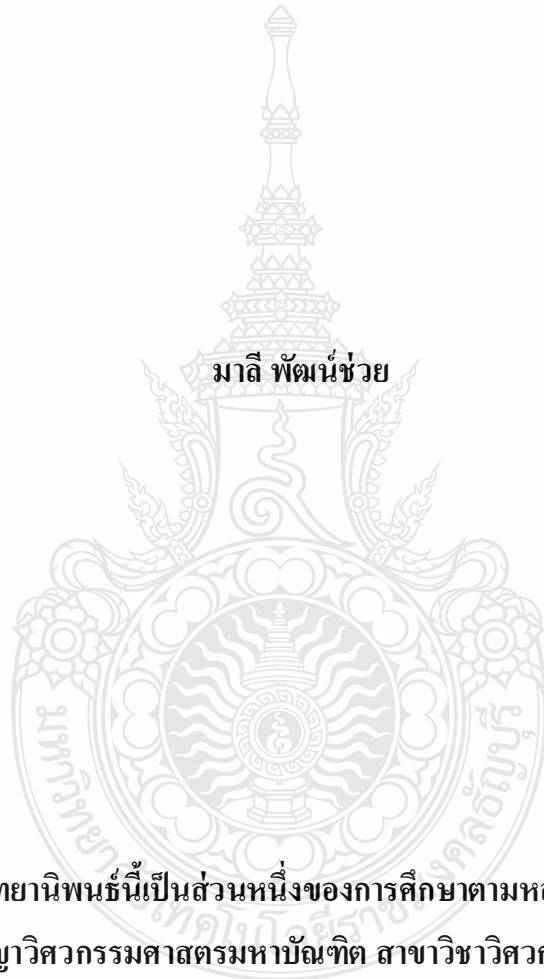
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์
แสงอาทิตย์



มาลี พัฒน์ช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์
แสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์
แสงอาทิตย์

Current Control Feedback Approach of Photovoltaic Simulator

ชื่อ - นามสกุล นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.

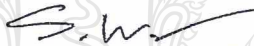
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญยั้ง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์, วศ.ค.)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 9 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์
แสงอาทิตย์

Current Control Feedback Approach of Photovoltaic Simulator

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญยั้ง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์, วศ.ค.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 9 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ แต่เนื่องจากการต้นทุนพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดปัญหาในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาระบบการควบคุมการแปลงผันกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สามารถใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบในงานวิจัยแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ ส่วนแรกทำการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่น SOLAREX MSX-60 ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นๆ และ ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีความถี่สวิตซ์ซึ่ง 5.5 กิโลเฮิร์ต พร้อมทั้งการเชื่อมต่อสัญญาณผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล STM32F4 เพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิสถานะแวดล้อม เป็นต้น โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ในบทความนี้จึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการป้อนกลับสามารถประยุกต์ใช้การประยุกต์แบบ PID Controller โดยให้ประสิทธิภาพของผลการจำลองการป้อนกลับมีค่าการเบี่ยงเบนจากกราฟคุณสมบัติที่อ้างอิง

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม

Thesis Title	Current Control Feedback Approach of Photovoltaic Simulator
Name-Surname	Ms. Malee Patchouy
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

The photovoltaic (PV) system is a highly popular renewable energy source due to its energy-friendly environment. However, because of its high costs, it may result in difficulties in development and experiments of laboratory photovoltaic converter systems.

This thesis was designed and based on a real time PV model. The design was divided into two main parts. The first part was a mathematical modeling of a PV cell from SOLAREX MSX-60 series using MATLAB/Simulink program. It was utilized into a study of the characteristics of the PV cell and the effects of any variables to the behavior of the PV itself. The second part was to build a DC buck converter with a switching frequency of 5.5 kHz. The converter could provide a suitable output voltage and current in practice according to a PV that modeled in the MATLAB/Simulink program using a proper interfacing board, such as STM32F4.

This paper presented the simulation of PV panels in the current and output voltage caused by changing of parameters such as ambient temperature, solar irradiance, etc. by using the MATLAB/Simulink program. The solar cells were typically of non-linear behavior. The research was conducted to analyze the solar system to create a simulation of practical in-time (Real-Time PV Simulator) by applying DC converter (DC Buck Converter) with the property of a voltage source. Therefore it is necessary to have a feedback control. Additionally, the model of the solar cell was created using a mathematical equation to consider the electrical characteristics of the solar cell. Then, it was examined how feedback control system model and characteristic of I-V curve altered the ability to work effectively and closely to the reference of the I-V curve. The input method could be applied to both methods of the PID controller.

Keywords: photovoltaic module, solar irradiance, value of environmental temperature

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบป้อนกลับสำหรับระบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ แต่เนื่องจากการต้นทุนพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดปัญหาในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาระบบการควบคุมการแปลงผันกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สามารถใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบในงานวิจัยแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ ส่วนแรกทำการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่น SOLAREX MSX-60 ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นๆ และ ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีความถี่สวิตซ์ซึ่ง 5.5 กิโลเฮิร์ต พร้อมทั้งการเชื่อมต่อสัญญาณผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล STM32F4 เพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิสถานะแวดล้อม เป็นต้น โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ในบทความนี้จึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการป้อนกลับสามารถประยุกต์ใช้การประยุกต์แบบ PID Controller โดยให้ประสิทธิภาพของผลการจำลองการป้อนกลับมีค่าการเบี่ยงเบนจากกราฟคุณสมบัติที่อ้างอิง

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม

Thesis Title	Current Control Feedback Approach of Photovoltaic Simulator
Name-Surname	Ms. Malee Patchouy
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

The photovoltaic (PV) system is a highly popular renewable energy source due to its energy-friendly environment. However, because of its high costs, it may result in difficulties in development and experiments of laboratory photovoltaic converter systems.

This thesis was designed and based on a real time PV model. The design was divided into two main parts. The first part was a mathematical modeling of a PV cell from SOLAREX MSX-60 series using MATLAB/Simulink program. It was utilized into a study of the characteristics of the PV cell and the effects of any variables to the behavior of the PV itself. The second part was to build a DC buck converter with a switching frequency of 5.5 kHz. The converter could provide a suitable output voltage and current in practice according to a PV that modeled in the MATLAB/Simulink program using a proper interfacing board, such as STM32F4.

This paper presented the simulation of PV panels in the current and output voltage caused by changing of parameters such as ambient temperature, solar irradiance, etc. by using the MATLAB/Simulink program. The solar cells were typically of non-linear behavior. The research was conducted to analyze the solar system to create a simulation of practical in-time (Real-Time PV Simulator) by applying DC converter (DC Buck Converter) with the property of a voltage source. Therefore it is necessary to have a feedback control. Additionally, the model of the solar cell was created using a mathematical equation to consider the electrical characteristics of the solar cell. Then, it was examined how feedback control system model and characteristic of I-V curve altered the ability to work effectively and closely to the reference of the I-V curve. The input method could be applied to both methods of the PID controller.

Keywords: photovoltaic module, solar irradiance, value of environmental temperature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตลอดจนเสนอแนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และประสบการณ์จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นตลอดจน นายบริพัทธ์ อมรพิทักษ์วัฒนา มา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาตลอดจน เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องคณะวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และวิธีการในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดามารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานค้นคว้าฉบับนี้จะเป็นประโยชน์หรับผู้ที่สนใจศึกษาหากวิทยานิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

มาลี พัฒน์ช่วย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตลอดจนเสนอแนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และประสบการณ์จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นตลอดจน นายบริพัทธ์ อมรพิทักษ์วัฒนา มา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาตลอดจน เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องคณะวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และวิธีการในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดามารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานค้นคว้าฉบับนี้จะเป็นประโยชน์หรับผู้ที่สนใจศึกษาหากวิทยานิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

มาลี พัฒน์ช่วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	15
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 หลักการทำงาน.....	17
2.2 เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์	17
2.3 โครงสร้างของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์	19
2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน.....	32
2.8 ระบบควบคุมแบบ PID.....	40
2.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink	48
2.10 บอร์ดควบคุม (STM32F407VGT6).....	53
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	69
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	70
3.2 การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	71
3.3 การออกแบบสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	76
3.4 การออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน.....	77
3.5 การออกแบบวงจรภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง.....	82
3.6 จัดสร้างและประกอบวงจรส่วนต่างๆให้เป็นระบบ.....	84
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	87
4.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	87
4.2 ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	118
5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปราย.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
บรรณานุกรม.....	121
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก การจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	125
ภาคผนวก ข คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และ INSTRUMENT ACCURACY LIMITS.....	134
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	175

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID.....	47
ตารางที่ 2.2 การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols.....	47
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ SolarEX รุ่น MSX 60.....	73
ตารางที่ 3.2 Block คำเนนการต่างๆใน Simulink.....	74
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร.....	78
ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60.....	93
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).....	97
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=500\text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).....	103
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$).....	108
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$).....	113
ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง.....	120



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน.....	19
รูปที่ 2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)	21
รูปที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)	21
รูปที่ 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cell)	22
รูปที่ 2.5 แบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์	23
รูปที่ 2.6 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V curve	24
รูปที่ 2.7 กราฟ I-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	25
รูปที่ 2.8 กราฟ P-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	26
รูปที่ 2.9 กราฟ I-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	27
รูปที่ 2.10 กราฟ P-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	28
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์.....	29
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ.....	30
รูปที่ 2.13 วงจรทอนระดับแรงดัน.....	32
รูปที่ 2.14 การทำงานของสวิตช์ (q).....	32
รูปที่ 2.15 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q นำกระแส.....	33
รูปที่ 2.16 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q ไม่นำกระแส.....	35
รูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ(บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(ล่าง).....	36
รูปที่ 2.18 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก.....	39
รูปที่ 2.19 การควบคุมระบบ.....	40
รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	41
รูปที่ 2.21 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	42
รูปที่ 2.22 ระบบควบคุมหลายตัวแปร.....	42
รูปที่ 2.23 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	43
รูปที่ 2.24 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	44
รูปที่ 2.25 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบปิด.....	46
รูปที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานใน Simulink Library Browser.....	48
รูปที่ 2.28 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink.....	49
รูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อระหว่าง block ของ Simulink.....	49
รูปที่ 2.30 กลุ่ม block ของ Source.....	50
รูปที่ 2.31 กลุ่ม block ของ Sinks.....	50
รูปที่ 2.32 กลุ่ม block ของ Math Operations.....	51
รูปที่ 2.33 กลุ่ม block ของ Signal Routing	51
รูปที่ 2.34 แสดงหน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา.....	52
รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส STM32F4 STM32F407VGT6.....	54
รูปที่ 2.36 การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟสรุ่น STM32F407VGT6.....	54
รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส (STM32F407VGT6).....	55
รูปที่ 2.38 การเปลี่ยน Directories บนหน้าต่างโปรแกรม MATLAB.....	57
รูปที่ 2.39 ตั้งค่าการใช้งาน Target Setup block สำหรับบอร์ด STM32F4.....	58
รูปที่ 2.40 ตัวอย่าง Model ไฟกระพริบและหน้าต่างเจดิสแสดงค่า Sample Time ของ Block.....	58
รูปที่ 2.41 หน้าต่างโปรแกรมเชื่อมต่อคอดโทรลเลอร์สำเร็จ.....	59
รูปที่ 2.42 Target Setup บนหน้าต่าง Simulink Library Browser.....	60
รูปที่ 2.43 โครงสร้างของการจำลอง PV.....	62
รูปที่ 2.44 คุณลักษณะขาออกของ PV อาร์เรย์.....	62
รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรม แบบ P & O MTP.....	63
รูปที่ 2.46 การควบคุมด้วยวงจรมีแรงดันแบบ step up.....	64
รูปที่ 2.47 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองแบบพันเวลา.....	65
รูปที่ 2.48 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม.....	66
รูปที่ 2.49 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย.....	69
รูปที่ 3.2 แผนรูปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	71
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	72
รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	77
รูปที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	78
รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแส ACS712-05.....	82
รูปที่ 3.8 วงจรภาคควบคุมของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	83
รูปที่ 3.9 สัญญาณพัลส์ขั้วเบดของไอจีบีที ที่ดีวีไอซีเกิดเป็น 10% ความถี่สวิตช์ 10 kHz.....	83
รูปที่ 3.10 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) และวงจรมอดดูเลตความกว้างพัลส์.....	84
รูปที่ 3.11 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออก.....	85
รูปที่ 3.12 STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	85
รูปที่ 3.13 รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	86
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า I_S ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า R_S ต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	89
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของค่า λ ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	90
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของค่า λ ต่อ I-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	92
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของค่า λ ต่อ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	92
รูปที่ 4.8 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	93
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	95
รูปที่ 4.10 ลำดับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	95
รูปที่ 4.11 การป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 วงจรการป้อนกลับกระแสในวงจรแอมป์เซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ชนิดมีการควบคุมแบบ พี ไอ ดี	96
รูปที่ 4.13 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	99
รูปที่ 4.14 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	100
รูปที่ 4.15 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$)	101
รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี	101
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	105
รูปที่ 4.18 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	105
รูปที่ 4.19 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	106
รูปที่ 4.20 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี.....	106
รูปที่ 4.21 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	110
รูปที่ 4.22 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	110
รูปที่ 4.23 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	111
รูปที่ 4.24 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	111
รูปที่ 4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	115
รูปที่ 4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	115
รูปที่ 4.27 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	116
รูปที่ 4.28 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี.....	116

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	15
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 หลักการทำงาน.....	17
2.2 เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์	17
2.3 โครงสร้างของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์	19
2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน.....	32
2.8 ระบบควบคุมแบบ PID.....	40
2.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink	48
2.10 บอร์ดควบคุม (STM32F407VGT6).....	53
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	69
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	70
3.2 การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	71
3.3 การออกแบบสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	76
3.4 การออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน.....	77
3.5 การออกแบบวงจรภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง.....	82
3.6 จัดสร้างและประกอบวงจรส่วนต่างๆให้เป็นระบบ.....	84
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	87
4.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	87
4.2 ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	118
5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปราย.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
บรรณานุกรม.....	121
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก การจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	125
ภาคผนวก ข คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และ INSTRUMENT ACCURACY LIMITS.....	134
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	175

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID.....	47
ตารางที่ 2.2 การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols.....	47
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ SolarEX รุ่น MSX 60.....	73
ตารางที่ 3.2 Block คำเนนการต่างๆใน Simulink.....	74
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร.....	78
ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60.....	93
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$).....	97
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=500\text{W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$).....	103
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$).....	108
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=500\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$).....	113
ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจากผลการทดลอง.....	120



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน.....	19
รูปที่ 2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)	21
รูปที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)	21
รูปที่ 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cell)	22
รูปที่ 2.5 แบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์	23
รูปที่ 2.6 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V curve	24
รูปที่ 2.7 กราฟ I-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	25
รูปที่ 2.8 กราฟ P-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	26
รูปที่ 2.9 กราฟ I-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	27
รูปที่ 2.10 กราฟ P-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	28
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์.....	29
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ.....	30
รูปที่ 2.13 วงจรทอนระดับแรงดัน.....	32
รูปที่ 2.14 การทำงานของสวิตช์ (q).....	32
รูปที่ 2.15 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q นำกระแส.....	33
รูปที่ 2.16 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q ไม่นำกระแส.....	35
รูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ(บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(ล่าง).....	36
รูปที่ 2.18 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก.....	39
รูปที่ 2.19 การควบคุมระบบ.....	40
รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	41
รูปที่ 2.21 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	42
รูปที่ 2.22 ระบบควบคุมหลายตัวแปร.....	42
รูปที่ 2.23 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	43
รูปที่ 2.24 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	44
รูปที่ 2.25 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบปิด.....	46
รูปที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานใน Simulink Library Browser.....	48
รูปที่ 2.28 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink.....	49
รูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อระหว่าง block ของ Simulink.....	49
รูปที่ 2.30 กลุ่ม block ของ Source.....	50
รูปที่ 2.31 กลุ่ม block ของ Sinks.....	50
รูปที่ 2.32 กลุ่ม block ของ Math Operations.....	51
รูปที่ 2.33 กลุ่ม block ของ Signal Routing	51
รูปที่ 2.34 แสดงหน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา.....	52
รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเทอร์เฟซ STM32F4 STM32F407VGT6.....	54
รูปที่ 2.36 การ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น STM32F407VGT6.....	54
รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์การ์ดอินเทอร์เฟซ (STM32F407VGT6).....	55
รูปที่ 2.38 การเปลี่ยน Directories บนหน้าต่างโปรแกรม MATLAB.....	57
รูปที่ 2.39 ตั้งค่าการใช้งาน Target Setup block สำหรับบอร์ด STM32F4.....	58
รูปที่ 2.40 ตัวอย่าง Model ไฟกระพริบและหน้าต่างเจดิสแสดงค่า Sample Time ของ Block.....	58
รูปที่ 2.41 หน้าต่างโปรแกรมเชื่อมต่อคอด โทรลเลอร์สำเร็จ.....	59
รูปที่ 2.42 Target Setup บนหน้าต่าง Simulink Library Browser.....	60
รูปที่ 2.43 โครงสร้างของการจำลอง PV.....	62
รูปที่ 2.44 คุณลักษณะขาออกของ PV อาร์เรย์.....	62
รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรม แบบ P & O MTP.....	63
รูปที่ 2.46 การควบคุมด้วยวงจรมัดแปลงแรงดันแบบ step up.....	64
รูปที่ 2.47 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองแบบพันเวลา.....	65
รูปที่ 2.48 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม.....	66
รูปที่ 2.49 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย.....	69
รูปที่ 3.2 แผนรูปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	71
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	72
รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	77
รูปที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	78
รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแส ACS712-05.....	82
รูปที่ 3.8 วงจรภาคควบคุมของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	83
รูปที่ 3.9 สัญญาณพัลส์ขั้วเบดของไอจีบีที ที่ดีวีไอซีเกิดเป็น 10% ความถี่สวิตช์ 10 kHz.....	83
รูปที่ 3.10 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) และวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	84
รูปที่ 3.11 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออก.....	85
รูปที่ 3.12 STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	85
รูปที่ 3.13 รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	86
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า I_s ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า R_s ต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	89
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของค่า λ ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	90
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของค่า λ ต่อ I-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	92
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของค่า λ ต่อ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	92
รูปที่ 4.8 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	93
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	95
รูปที่ 4.10 ลำดับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา.....	95
รูปที่ 4.11 การป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 วงจรการป้อนกลับกระแสในวงจรแอมป์เซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ชนิดมีการควบคุมแบบ พี ไอ ดี	96
รูปที่ 4.13 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	99
รูปที่ 4.14 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	100
รูปที่ 4.15 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$)	101
รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี	101
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	105
รูปที่ 4.18 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	105
รูปที่ 4.19 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 25^\circ\text{C}$).....	106
รูปที่ 4.20 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี.....	106
รูปที่ 4.21 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	110
รูปที่ 4.22 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	110
รูปที่ 4.23 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	111
รูปที่ 4.24 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี ($250\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	111
รูปที่ 4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	115
รูปที่ 4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	115
รูปที่ 4.27 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W/m}^2, 50^\circ\text{C}$).....	116
รูปที่ 4.28 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย สำหรับสาขาบ้านและที่อยู่อาศัย สาขาเกษตรกรรม สาขาธุรกิจการค้า และขนส่ง มีการใช้พลังงานสูงขึ้นทุกปี โดยการใช้พลังงานในปี พ.ศ.2558 เพิ่มขึ้นจากปี 2557 ในสาขาบ้านและที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.8 ส่วนสาขาธุรกิจเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.0 มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากปีก่อน ทั้งภาคธุรกิจ ที่อยู่อาศัย โรงพยาบาล ร้านค้าปลีก ซึ่งการใช้พลังงานในการผลิตไฟฟ้า ในช่วง 11 เดือนของ ปี 2558 พบว่า มีการใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 69.7 ของการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด ส่วนหนึ่งของก๊าซที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น นำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นแนวทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติ

จากที่รัฐบาลมีนโยบายให้ใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยให้เพิ่มมากขึ้น กระทรวงพลังงานจึงได้มียุทธศาสตร์พลังงานโดยกำหนดนโยบายด้านพลังงานทดแทน และให้การสนับสนุนงานค้นคว้าพัฒนา วิจัยที่ใช้เทคโนโลยีด้านพลังงานเช่น ไฮโดรเจน และเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้รองรับการพัฒนาการใช้งานและการผลิตโดยทำทั้งในระดับการต่อยอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และในระดับที่คิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มาจากภูมิปัญญาคนไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ สร้างเทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ [1]

ประเทศไทยตั้งอยู่ในคาบสมุทรมอินโดจีน ใกล้เส้นศูนย์สูตรที่ตำแหน่งระหว่างเส้นรุ้งที่ 5° เหนือ ถึง 22° เหนือ และเส้นแวง 96° ตะวันออก ถึง 106° ตะวันออก จึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ของประเทศไทยโดยเฉลี่ยประมาณ 18.2MJ/m² ต่อวัน (5.05kWh/m² ต่อวัน) [2] หากประเทศไทยสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ส่องลงมาบนพื้นที่ของประเทศไทยเพียงหนึ่งในร้อยส่วนของพื้นที่ทั้งหมดจะสามารถผลิตพลังงานเทียบเท่าการใช้ถ่านหินประมาณ 8 ล้านตันต่อปี[1]

ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อดีตรงที่ใช้ต้นทุนการผลิตสูง ทั้งในเรื่องของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การติดตั้ง และมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลมาทำการทดลอง ความไม่สม่ำเสมอของแสง และอุณหภูมิที่สูงต่ำที่ต่างกันจากดวงอาทิตย์ในแต่ละวัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถที่จะใช้ประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยสามารถจ่ายโหลดได้

จริง หรือใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเป็นเกิดความสะดวกโดยที่สามารถทดลองได้ในทุกช่วงเวลา อีกทั้งยังลดการใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาสูง เช่น เครื่องมือวัดพลังงานแสงอาทิตย์ หรือไพรานอมิเตอร์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้
2. เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
3. เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมค่าความถี่ไซเคิลของวงจรแปลงแรงดันระดับ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การศึกษาผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ผลของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากใช้การวัดจริงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือวัดหลายประเภท เช่น ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ใช้วัดค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์, มัลติมิเตอร์ใช้วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์ ตัวต้านทานและเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่แผงเซลล์ก็มีความจำเป็นในการศึกษาและวิจัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) อุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) แรงดันไฟฟ้าด้านออกขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage; V_{OC}) กระแสไฟฟ้าด้านออกขณะลัดวงจร (Short circuit current; I_{SC}) จำนวนเซลล์ที่นำมาต่อแบบขนานและแบบอนุกรม (number of parallel cells and number of series cells) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลของไดโอด เป็นต้น แล้วจึงพัฒนาให้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่สามารถจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้โหลดได้จริง สามารถศึกษาคุณลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ให้เหมาะสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานหรือพัฒนาระบบควบคุมในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 60W โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

2. สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามคุณลักษณะของโซลาร์เซลล์โดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน ซึ่งควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าขาออก โดยใช้หลักการควบคุมควิตซ์ไซเคิลผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4)

3. เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่ใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ศึกษาการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น

ก. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ข. ศึกษาคุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณความเข้มแสง ผลของอุณหภูมิ, ความต้านทาน, แรงดันขณะเปิดวงจร, กระแสขณะลัดวงจร และกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ค. ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการใช้งาน และการเขียนโปรแกรมเพื่อการออกแบบและวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์

ง. ศึกษาการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC Converter) เพื่อการสร้างสัญญาณจริง (Real-time) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง

1.5.3 การจำลองและออกแบบวงจรสำหรับคุณสมบัติการจ่ายกำลังงานขาออก

ก. กำหนดสมการตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ข. ออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ค. ออกแบบสร้างวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า

ง. ออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบที่โหลดเชิงเส้น

1.5.4 ขั้นตอนการทดลอง

ก. จำลองการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ข.เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ กับคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต (Typical Electrical Characteristic of PV Module)

ค.ทดสอบคุณลักษณะการจ่ายกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงกับแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ง.ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดแบบเชิงเส้น

1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตามผลขั้นตอนการทดลอง

1.5.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ มีขนาดไม่เกิน 60 W
2. การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองกำหนดค่าคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)
3. การควบคุมอัตราการจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบเวลาจริงนี้ ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
2. มีความรู้ความเข้าใจในผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรไดโอด, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
3. มีความรู้ความเข้าใจ เชื่อมต่อแบบจำลองกับการ์ดอินเตอร์เฟส STM32F4
4. มีความรู้ความเข้าใจ ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter)
5. มีความรู้ความเข้าใจ ต่อยุทธวิธีทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
6. มีความสะดวกในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาระบบควบคุมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน ประกอบไปด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ส่งผลผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทอนระดับแรงดัน การใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบและอุปกรณ์ควบคุม และการทบทวนบทความที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง หรืออีกนัยหนึ่งคือแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบ (เรียกว่า อิเล็กตรอน) และประจุบวก (เรียกว่า โฮล) ซึ่งอยู่ในภายใน โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ โดยโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นนี้จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไหลไปที่ขั้วบวก ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้า (เช่น หลอดไฟ มอเตอร์ เป็นต้น) ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิดกระแสตรง ดังนั้น ถ้าต้องการจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

2.2 เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

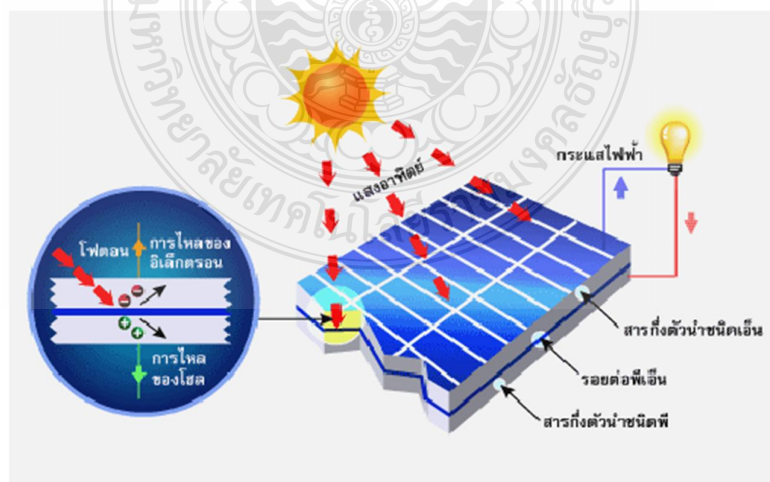
กระบวนการผลิตไฟฟ้า แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมาจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 จึงมีการรูปที่ ระเบิดุษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลเลอไรด์ (Cadmium

Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติที่เรียกว่า " ผลของโฟโตโวลตาอิก " (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1839 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Alexander Edmond Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีแสงมาตกกระทบและ ในปี ค.ศ.1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสาร Selenium ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยใช้สาร Selenium และสารรูปที่ ระกอบของ Cuprous oxide และเมื่อในปี ค.ศ.1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction) โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown junction เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนช่วยในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์จนกระทั่งในปี ค.ศ.1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของผลึกซิลิกอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ แต่ในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพ[4] และการลดต้นทุนตัวโครงสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงมีการขยายการใช้งานเป็นวงกว้าง เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง และ ไฟฟ้าที่ได้นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ในขณะที่ใช้งาน เพียงแค่ติดตั้งไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที และทำงานได้โดยไม่ต้องสร้างเสียงรบกวน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ขณะทำงานจึงไม่มีปัญหาด้านการสึกหรอหรือต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือต้นทุนการติดตั้งสูง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาผลิต โดยทั่วไปประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์

2.3 โครงสร้างของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกได้แก่ซิลิคอน ซึ่งถูกได้จากแร่ควอตซ์ และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก สารซิลิคอนบริสุทธิ์ปกติจะมีความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำมากเพราะอิเล็กตรอนไม่มีการเคลื่อนที่ในบอนด์ แต่เมื่อใช้วิธีการโด๊ป (Doping) โดยสารโบรอน จะทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพราะ โบรอนจะทำหน้าที่เป็นตัวเป็นตัวพาประจุ (Charge Carrier) ซึ่งเป็นประจุบวกคือไม่มีอิเล็กตรอน แต่จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่า Gaps หรือ โฮล (holes) ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจับคู่ด้วยในโครงสร้างของรูปที่ ผลึกเมื่อผ่านขบวนการนี้แล้ว เรียกว่า P-type การโด๊ปอีกแบบหนึ่งใช้สารฟอสฟอรัส (Phosphorous) สารซิลิคอนที่ผ่านขบวนการโด๊ปนี้แล้ว เรียกว่า N-type ซึ่งหมายความว่าฟอสฟอรัสจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอนหรือประจุลบ

ซิลิคอนเกือบทั้งหมดในเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่เป็น P-type ในขณะที่ผิวส่วนหน้าของเซลล์ด้านที่แสงตกกระทบจะเป็นเพียงชั้นบางๆแบบ N-type รอยต่อที่อยู่ระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า PN junction ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์เพราะจะเป็นบริเวณที่มีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่าน และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่าง junction ในส่วนของสารซิลิคอนที่เป็น N-type นั้นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ซิลิคอนส่วนที่เป็น P-type มีส่วนที่เรียกว่า โฮล คือส่วนที่อิเล็กตรอนขาดหายไป (Electron space) สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน เมื่อประจุอิสระเหล่านี้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ PN junction จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างรอยต่อบนสารกึ่งตัวนำก็จะเกิดการผลิตประจุอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้นอย่างมากมาย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็คือการเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน[18]

ในการการผลิตเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดได้มีการปรับปรุงที่ รับปรุงใน 2 ลักษณะคือ ทำให้หน้าสัมผัสเชื่อมติดกับผิวหน้าของเซลล์เพื่อที่จะรวบรวมประจุโดยไม่มีกรบดบังแสงที่มาตกกระทบมากนัก และสุดท้ายคือ การเคลือบสารลดการสะท้อนที่ด้านหน้าของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง คุณสมบัติเด่นของสารเคลือบแสงอาทิตย์แบบซิลิคอนคือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 0.5V มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถ้ามีการป้องกันความชื้นที่ดี

2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุที่นำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่วนมากจะเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากและมีราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานแล้วในเชิงพาณิชย์แบ่งได้ 3 ชนิดดังต่อไปนี้

2.4.1 ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Mono-Crystalline) การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.99%) มาหลอมละลายในเตา Induction Furnace ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ พร้อมใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับกันเป็นผลึกด้วย Seed ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่ แล้วจึงดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอมด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึกจะได้แท่งยาวเป็นรูปที่ ทรงกระบอกคุณรูปของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆด้วยลวดตัดเพชร (wire Cut) เรียกว่า เวเฟอร์ ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรและขีดความเรียบของผิว จากนั้นก็นำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น PN junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสออกไปใช้งาน โดยที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบ ส่วนผิวล่างจะเป็นขั้วบวก ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเคลือบฟิล์มที่ผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง หลังจากนั้นจะนำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ และใช้ซิลิโคน และอีวีเอ (Ethelele Vinyl Acetate) ช่วยป้องกันความชื้น[5]

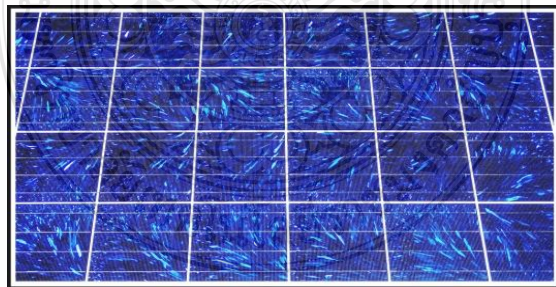
ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มากขึ้นและนำมาต่อขนานเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน ไฟฟ้า 15-17% สามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นกว้าง โดยมีประสิทธิภาพดีในช่วงความยาวคลื่นยาวของแสงอาทิตย์แต่มีราคาแพง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

2.4.2 ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมโดยวิธีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมใส่สารเจือปน **Boron** เพื่อทำให้เกิด **P-type** แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโทนสีที่แตกต่างกันซึ่งจะเกิดจากผลึกเล็กหลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวม[5] ดังรูปที่ 2.3 ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือมีสีเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ส่วนกรรมวิธีผลิตเซลล์ที่เหลือจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว โดยมีค่าประมาณ **12-15%** และสามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นที่กว้าง



รูปที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

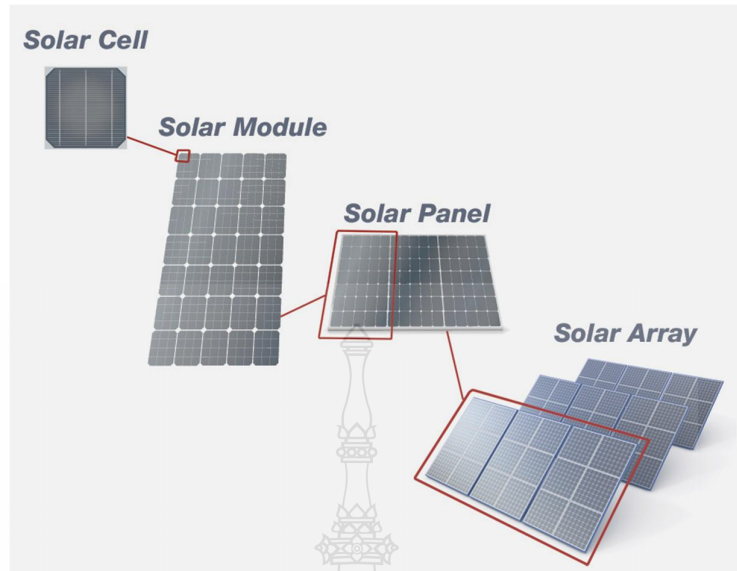
2.4.3 ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cells)

เป็นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 0.5-1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลข ซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 6-8% [4] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cell)[19]

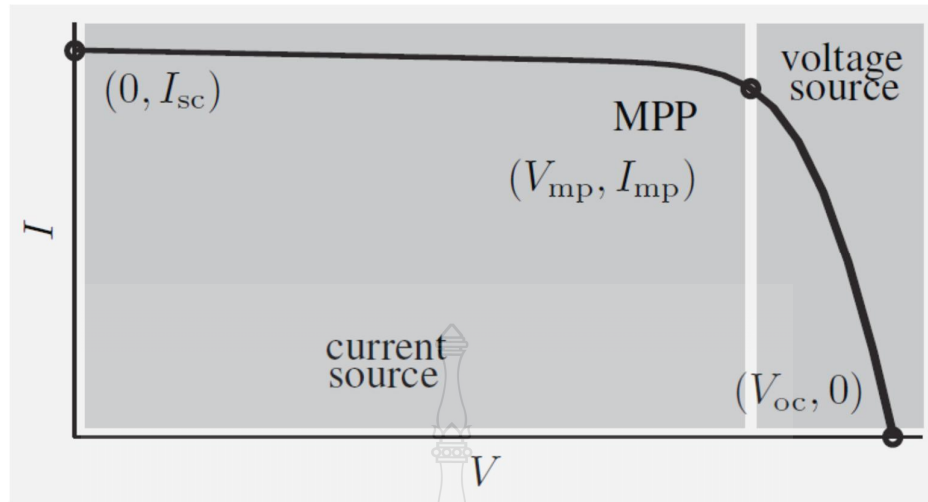
โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะให้กระแสตรงจรรูปที่ ประมาณ 10-20 mA และสามารถให้แรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดประมาณ 0.6-0.7 V ดังนั้นการใช้งานโซลาร์เซลล์จะไม่นำมาใช้งานเพียงเซลล์เดียว (Cell) เนื่องจากให้กำลังไฟฟ้าน้อย จึงนำเซลล์มาต่อขนานกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น หรือถ้าต้องการแรงดันสูงก็นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน เรียกว่าโมดูล (Module) และหากนำโมดูลมาต่อรวมกันอีกจะเรียกว่า อาร์เรย์ (Array) ซึ่งจะสามารถให้พิกัดกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ [20]

2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ **I-V curve** ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย (**I**) หมายถึง กระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวตั้ง และ (**V**) หมายถึงแรงดันไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวนอน ที่อุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้าง **I-V curve** ได้โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการต่อโหลด เรียกว่า **Open circuit voltage (V_{oc})** จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด $V_{oc}, 0$ จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสจนถึงค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร ที่จุดนี้จะให้ค่ากระแสสูงสุด เรียกว่า **Short circuit current (I_{sc})** ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่จุด $0, I_{sc}$ จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทุกจุดที่ทดสอบจะเกิดเป็น **I-V curve** ขึ้น ดังรูปที่ 2.6

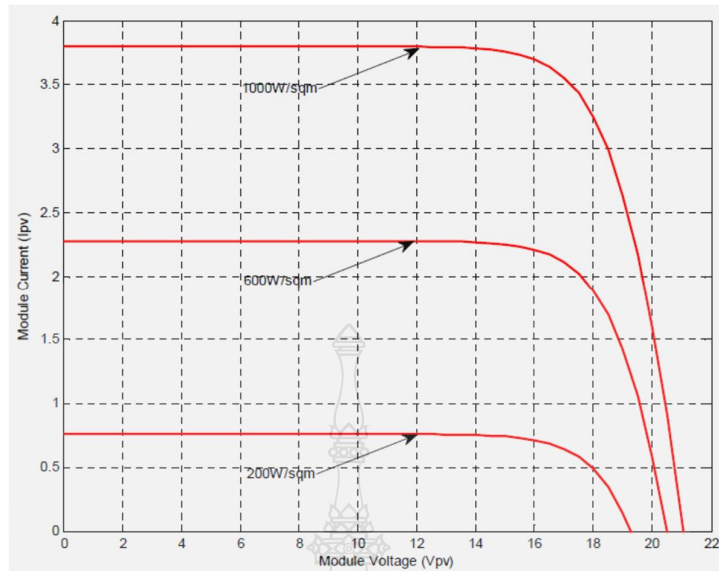


รูปที่ 2.6 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V curve[16]

ดังนั้นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอยู่ 2 ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ นอกจากนั้นอาจมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลกระทบ เช่น โหลดที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ลักษณะการบังเงา อาจรวมไปถึงชนิดและการต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.5.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ตามความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มแสง นั่นคือหากความเข้มแสงมีค่าสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 2.7 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.8 ความเข้มแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือความเข้มแสงที่วัดได้บนพื้นโลกในสภาวะอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆบังและวัดที่ระดับน้ำทะเลในขณะที่รับแสงจากดวงอาทิตย์ 1.5AM และความเข้มแสงจะมีค่า 1000 W/m^2

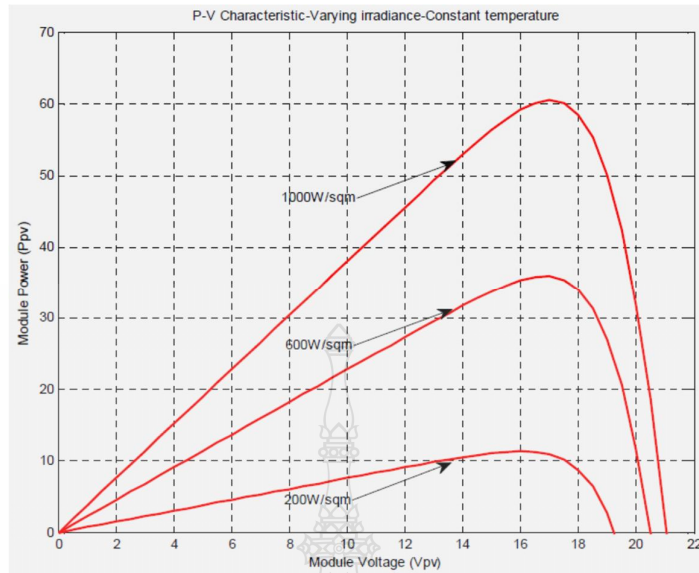


รูปที่ 2.7 กราฟ I-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง[17]

ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1) [6]

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \times \lambda \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25°C (A)
 - K_i คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร (A/°C)
 - T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ (Kevin)
 - λ คือ ความเข้มแสง (kW/m²)



รูปที่ 2.8 กราฟ P-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง[17]

2.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมิค่าสูงขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจร (Open circuit voltage ;V_{oc}) ที่ 21V ณ.อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ. อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีโหลด ลดลง 0.525V จะเหลือเพียง 20.475V เท่านั้น[23] จากสมการไดโอดในอุดมคติที่บรรยายคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพีเอ็นตลอดช่วงกว้างของกระแสและแรงดัน สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.2)

$$I = I_S(t) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

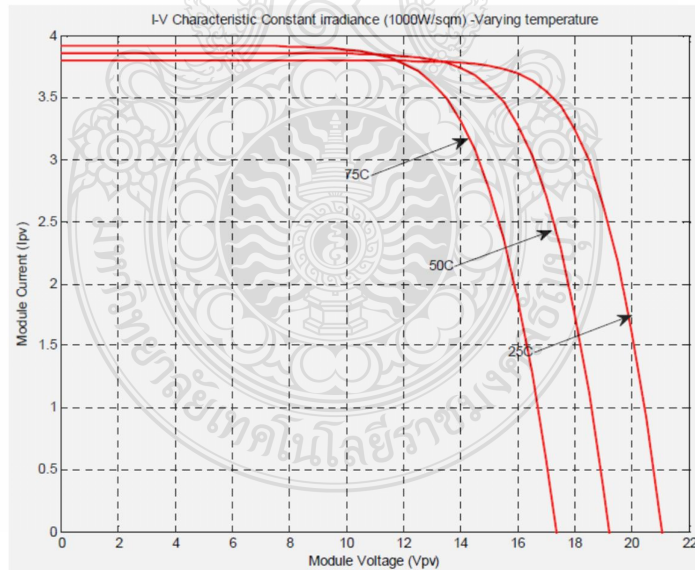
เมื่อ I_S คือ Cell 's reverse saturation current of diode (A)
 V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V)

ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไปอัสกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)[6]

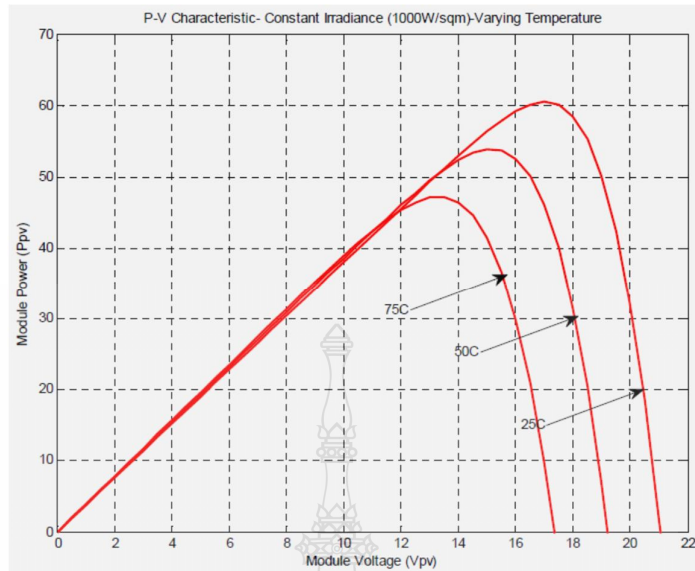
$$I_S(t) = I_S \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ E_g คือ Band gap energy of semiconductor
 V_t คือ Thermal voltage at room temperature
 T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin)
 T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ (Kelvin)
 N คือ Ideal factor

จากสมการที่ 2.3 อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 2.9 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 กราฟ I-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง[17]



รูปที่ 2.10 กราฟ P-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง [17]

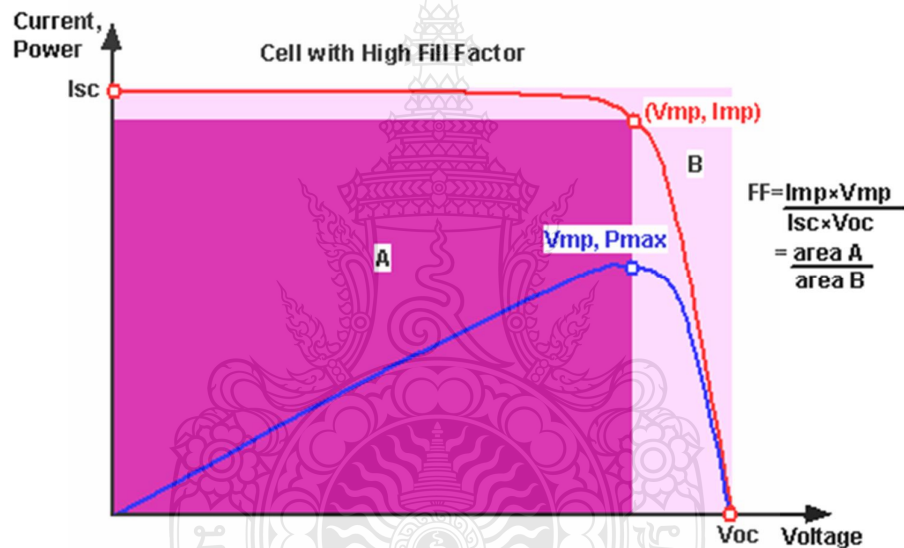
ในการพิจารณาคคุณลักษณะทางกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องเกี่ยวข้องกับดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{OC}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดขณะเปิดวงจรหรือเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าสูงมาก โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงในรูปที่ ลอการิทึม (Logarithm)
2. กระแสขณะลัดวงจร (I_{SC}) เป็นค่ากระแสที่วัดจากการลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่ากระแสของเซลล์เมื่อภาระทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยที่ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์
3. กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
4. กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) เป็นค่ากระแสที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
5. แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดทางไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังงานสูงสุด

6. ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรดังรูปที่ 2.17 ค่าฟิลล์แฟกเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะแสดงว่า โซลาร์เซลล์ มีคุณภาพมากหรือน้อย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [3]

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.4)$$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าฟิลล์แฟกเตอร์เข้าใกล้ 1 เพื่อที่จะทำงาน (Operation point) ใกล้กับจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์[21]

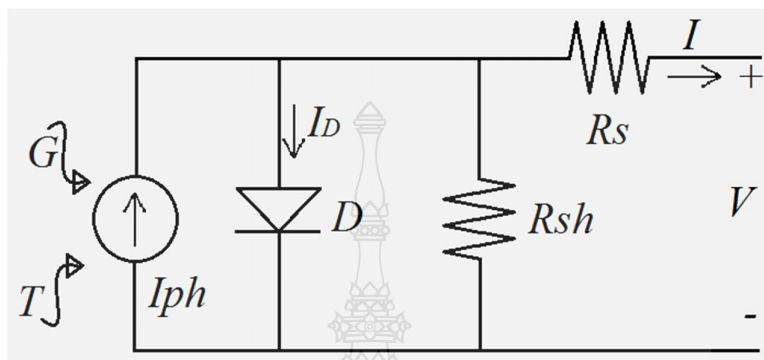
7. ประสิทธิภาพสูงสุด (η_m) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[5]

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.5)$$

เมื่อ P_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์ได้รับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะต้องแทนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

วงจรเทียบเท่าอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส ในแบบคู่ขนานกับไดโอด การส่งออกของกระแส เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานแสงอาทิตย์ (โฟตอน) ที่กระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์ (photo current; I_{ph}) ในช่วงไม่มีแสง เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ทำงาน นั่นคือมันจะทำงานเป็นรอยต่อ P-N ของไดโอด มันจะผลิตทั้งในปัจจุบันแรงดันไฟฟ้าไม่ได้ แต่ถ้าได้รับการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายภายนอก (แรงดันขนาดใหญ่) มันสร้างกระแสไดโอด (I_d) ที่เรียกว่ากระแสไดโอด (D) หรือกระแสรั่ว ไดโอดจะกำหนดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติจะประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ต่อขนานกับไดโอด และค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นและความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อกับขั้วต่อภายนอก ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบเซลล์แสงอาทิตย์ [4] ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังดันออกสูงสุดลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [22]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + I.R_s)}{N.K.T} - 1 \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	I	คือ กระแสที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ (A)
	I _s	คือ ค่ากระแสรั่วในสถานะอิ่มตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด (A)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10 ⁻¹⁹ (ev)
	N	คือ ค่า Ideal factor
	K	คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.3806504×10 ⁻²³ (J/Kelvin)
	T	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin)
	V	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด (V)
	R _s	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์ (Ω)
	R _{sh}	คือ ความต้านทานขนานของเซลล์ (Ω)

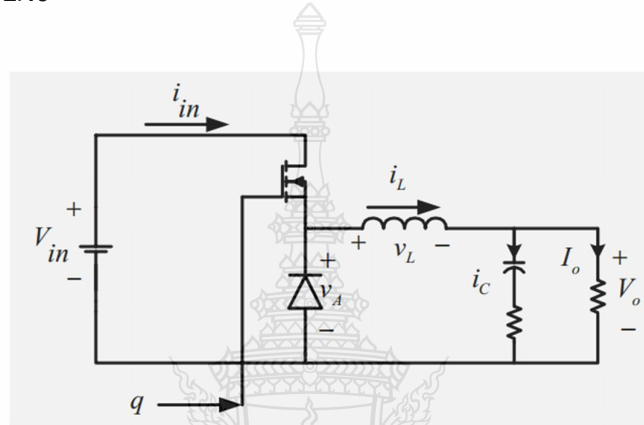
แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดัน ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (2.6) ในเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติโดยทั่วไปสันนิษฐานว่า R_s และ R_{sh} มีค่าเท่ากับศูนย์ [18] ดังนั้นหากไม่คิดผลของ R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (2.7) [6]

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left[e^{\frac{qV}{NKT N_s}} - 1 \right] \quad (2.7)$$

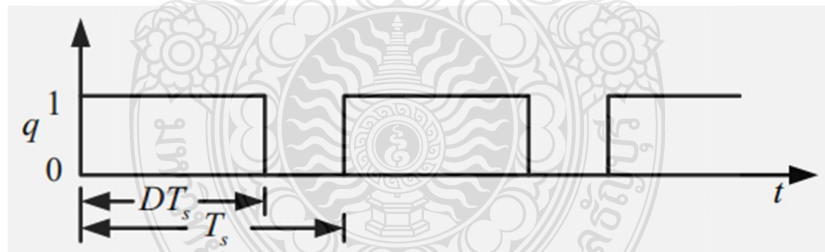
เมื่อ	n _p	คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน
	n _s	คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน [5]

วงจรทอนระดับแรงดันไฟตรง หรือวงจร **Buck Converter** เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระเพื่อมจากสัญญาณควบคุม จึงนิยมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (**Low pass Filter**) แบบวงจร **LC** ทางด้านขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไฟตรงมากๆ ลักษณะวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรทอนระดับแรงดัน



รูปที่ 2.14 การทำงานของสวิตช์ (q)

โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้ 2 สถานะคือดังรูปที่ 2.14 คือ สถานะแรกในขณะที่สวิตช์นำกระแส ($q = ON$) และสถานะที่ 2 สวิตช์หยุดนำกระแส ($q = OFF$) โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัวกำหนดให้

1.รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะเหมือนกัน ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.8)$$

2. ค่าแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ผลรวมค่าผลคูณของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-second) เป็นศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(t) dt = 0 \quad (2.9)$$

3. ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์

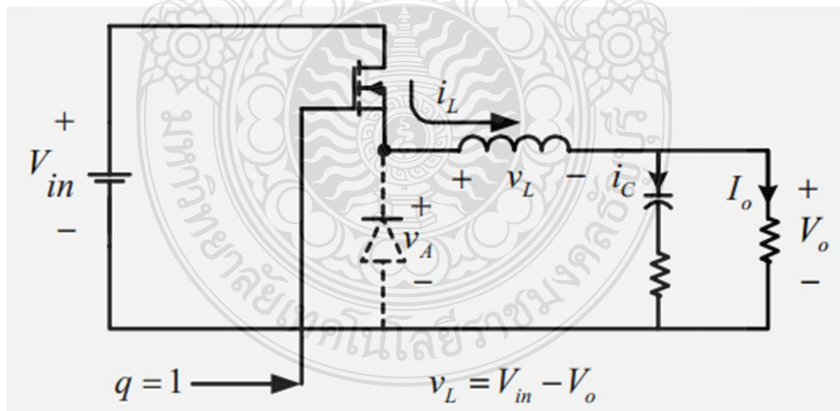
$$i_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.10)$$

4. กำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก (พิจารณาวงจรทำงานเป็นแบบอุดมคติ)

$$P_{in} = P_o \quad (2.11)$$

2.7.1 สภาวะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์นำกระแสดังรูปที่ 2.15 ไดโอดจะได้รับการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) กระแสจึงไหลผ่านจากแหล่งจ่ายไปยังตัวเหนี่ยวนำได้โดยตรง โดยที่กระแสส่วนหนึ่งแยกไหลผ่านตัวเก็บประจุและอีกส่วนหนึ่งไหลผ่านโหลด จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q นำกระแส

$$-V_{in} + V_L + V_o = 0 \quad (2.12)$$

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.14)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.15)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{(V_{in} - V_o)DT}{L} \quad (2.16)$$

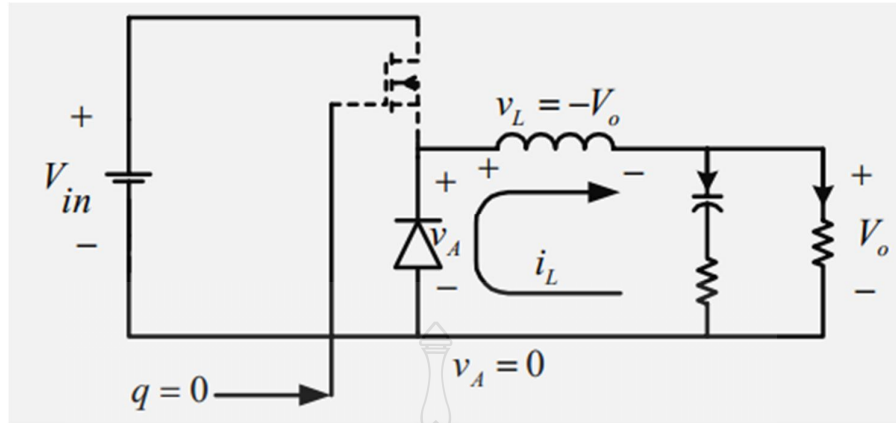
$\Delta i_{L,on}$ หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

2.7.2 สภาวะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสดังรูปที่ 2.16 ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward Bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.16 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q ไม่นำกระแส

ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันเข้าวงจรเป็นศูนย์ $dt = (1-D)T$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.19)$$

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{-V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.20)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2.16) และ (2.20) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.21)$$

$$\left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT + \left[- \left(\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \right] = 0 \quad (2.22)$$

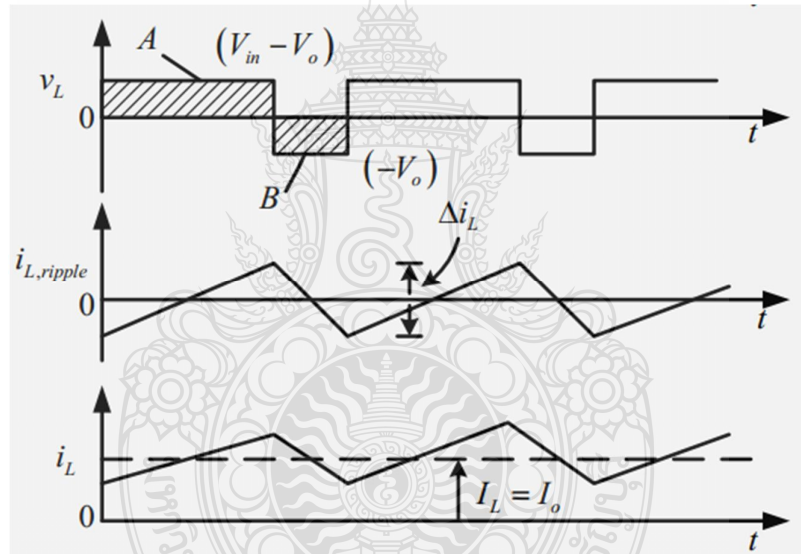
$$V_{in}D - V_oD - V_o + V_oD = 0 \quad (2.22A)$$

ดังนั้นจะได้อัตราขยายแรงดัน

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.23)$$

2.7.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่จะทำให้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้



รูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ(บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(ล่าง)

ดังนั้นจะสามารถกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดและสูงสุดคือ

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.24)$$

$$I_{L,max} = I_L + \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{L} (1-D)T \right) \quad (2.25)$$

$$I_{L,max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \quad (2.26)$$

$$I_{L,min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.27)$$

$$I_{L,min} = I_L - \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{L} (1-D)T \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.29)$$

ดังนั้น

$$I_{L,min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \quad (2.30)$$

สมมุติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังในสมการที่ (2.30)

$$I_{L,min} = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.31)$$

$$\left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0$$

$$\frac{1}{R} = \frac{(1-D)}{2Lf}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

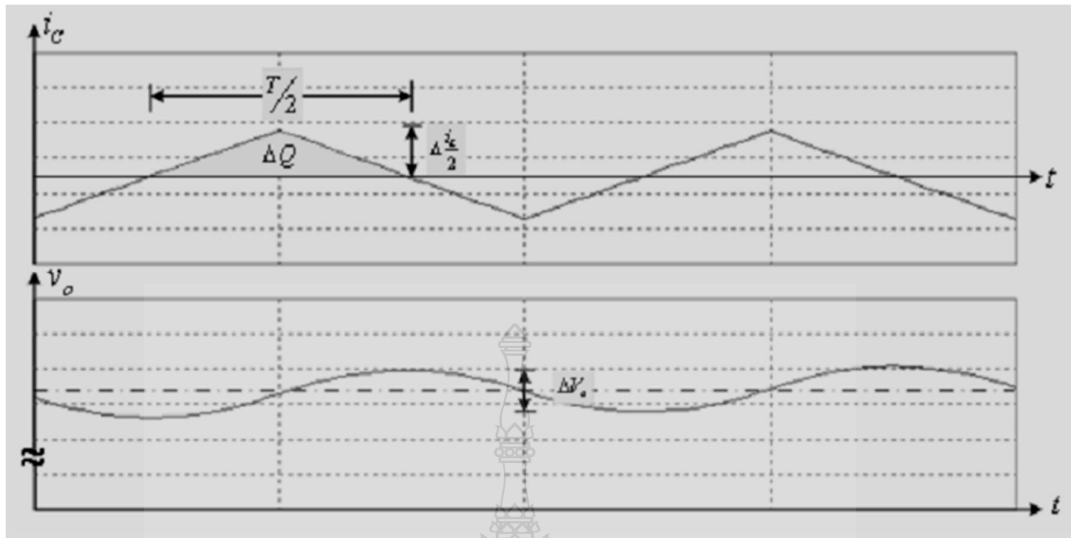
$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.32)$$

และ

$$f = \frac{(1-D) \times R}{2 \times L_{min}} \quad (2.33)$$

2.7.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราเคลื่อนที่ของแรงดันด้านออก

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta Q = C \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.34)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8}$$

(2.35)

แทนค่าสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.36)$$

แทนค่าสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.36 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T \quad (2.37)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2}{8C} \left(\frac{1}{L}\right) (1-D) \quad (2.38)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.39)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้หนึ่ง หรือการเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ หรือเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.8 ระบบควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative)[10]

ระบบควบคุม (Control System) คือ การนำส่วนประกอบหลายๆส่วนมาต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบ และทำการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพทำให้สามารถประหยัดพลังงาน เวลา และอื่นๆ ได้ ในขณะที่ได้ผลลัพธ์ออกมาได้ตามต้องการ ถูกต้อง ในการศึกษาของระบบควบคุม จะมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีการป้อนกลับ (Feedback Theory) และในการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น โดยจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต หรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่จะควบคุมสามารถแทนที่ได้ด้วยบล็อก (Block) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบแทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต

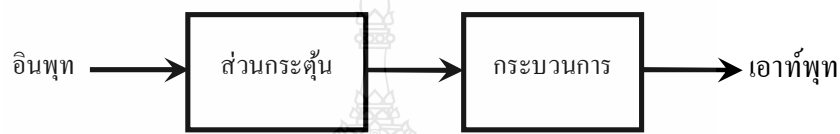


รูปที่ 2.19 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System) และ แบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

2.8.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System)

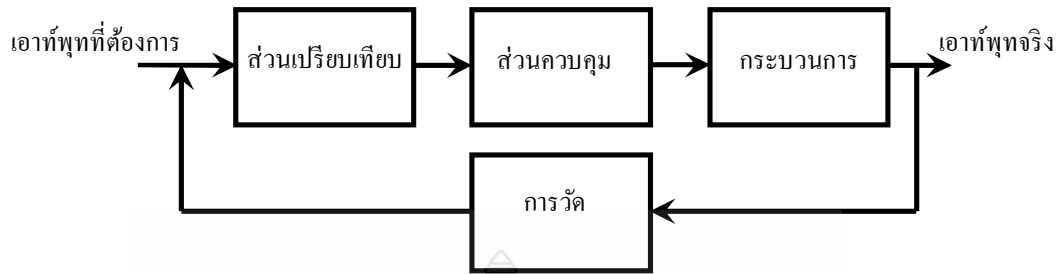
เป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุม (Controller) หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามความต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณาลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบเปิด

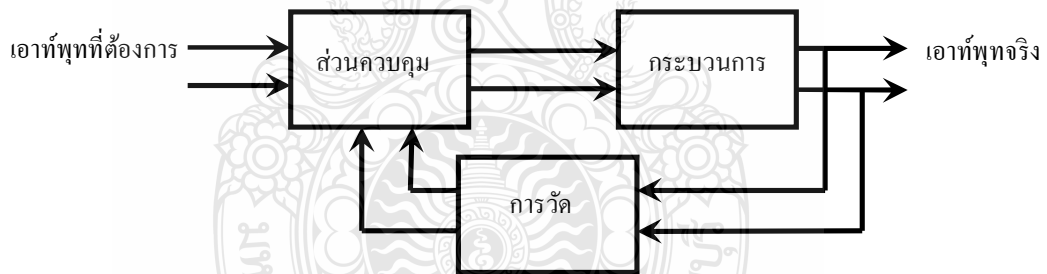
2.8.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิด คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่จะทราบค่าเอาต์พุตได้จะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อทราบค่าเอาต์พุตแล้วมักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นจะได้ว่าค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.21 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมยังเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

2.8.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (Mathematical Model of System)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นที่นิยมที่เพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุม พฤติกรรมของระบบ นิยมที่จะอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ เนื่องจากระบบทั่วไปไม่เป็นระบบเชิงเส้น (Nonlinear System) ดังนั้นในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) เพื่อให้สามารถแก้สมการเหล่านั้นได้ด้วยการใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของเอาต์พุตและอินพุตของระบบ การรูปที่ ระยุกต์การแปลงลาปลาซเข้ากับสมการอนุพันธ์ ผลจากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ไปอยู่ในโดเมนความถี่เมื่อถูกจัดรูปที่

อย่างเหมาะสม ก็จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราเรียกกันว่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

$$\begin{aligned}
 & a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\
 & = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad , (n \geq m) \\
 \text{Transfer function} = G(s) &= \frac{L[\text{output}]}{L[\text{input}]} \quad \text{Zero initial condition} \\
 &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}
 \end{aligned}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของ Buck converter โหมดกระแสต่อเนื่องได้จาก สมการ 2.40

$$G_p(s) = V_s \frac{1}{(LC)s^2 + \left(\frac{L}{R}\right)s + 1} \quad (2.40)$$

2.8.4 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม (u) จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด (e) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของ ระบบที่ต้องการควบคุม แผนรูปบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.23 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

สมการ คือ

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.41)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่าเกนสัดส่วน ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) คือลดค่าความผิดพลาดของระบบ โดย สามารถตอบสนองกับค่าสัญญาณความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด

2.8.5 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีรูปแบบสมการ คือ

$$u(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2.42)$$

เมื่อ K_I คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล แผนรูปบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

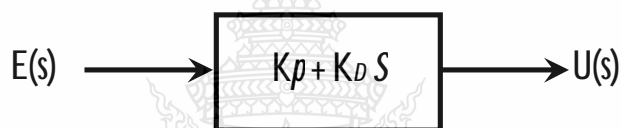
จากรูปแบบการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม $u(t)$ จะมีค่ามากโดยที่สัญญาณความผิดพลาด $e(t)$ มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณการควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ต่างกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วยการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ เช่น ในกรณีระบบเป็นอันดับที่หนึ่ง และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Controller) แล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง

2.8.6 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีรูปที่ แบบสมการ คือ

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.43)$$

เมื่อ K_D คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งเรียกว่าตัว ควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์หรือ (PD-controller) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ ร่วมกับอินทิกรัลก็จะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลหรือ (PI-controller) และถ้าใช้ตัวควบคุม แบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เรียกว่า (PID-controller)

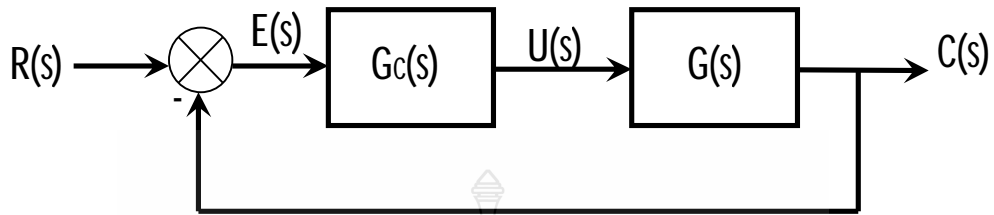


รูปที่ 2.25 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรรูปมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นั้นเป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fluctuate) ค่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชัน (slope) ของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงค่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรรูปได้

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller)

พิจารณาระบบควบคุมแบบปิด



รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบปิด

PID controller ประกอบด้วย 3 เทอม คือ Proportion, Integral และ Derivative จากสมการ 2.41, 2.42 และ 2.43 ได้เป็น

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.44)$$

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.45)$$

การแปลงลาปลาซของสมการ 2.44 และ 2.45 จะเป็นดังสมการ 2.46 และ 2.47

$$U(S) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right) \cdot E(s) \quad (2.46)$$

$$G(S) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right) \cdot E(s) = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (2.47)$$

ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของ PID คอนโทรลเลอร์ จะมีผลลัพธ์ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID

ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID				
พารามิเตอร์	Rise time	Overshoot	Settling time	Error at equilibrium
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ถูกกำจัด
K_d	นานมาก (ลดลงหรือเพิ่มขึ้น น้อยมาก)	ลดลง	ลดลง	ไม่มี

การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols จะเริ่มด้วยการเซตค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ จากนั้นจะเพิ่มค่า K_p ไปจนถึงค่า K_c (Critical Gain) ระบบจะเริ่มแกว่ง ให้วัดคาบของการแกว่ง P_c และให้ใช้ตารางข้างล่างเพื่อหาค่า Gain อื่นๆ

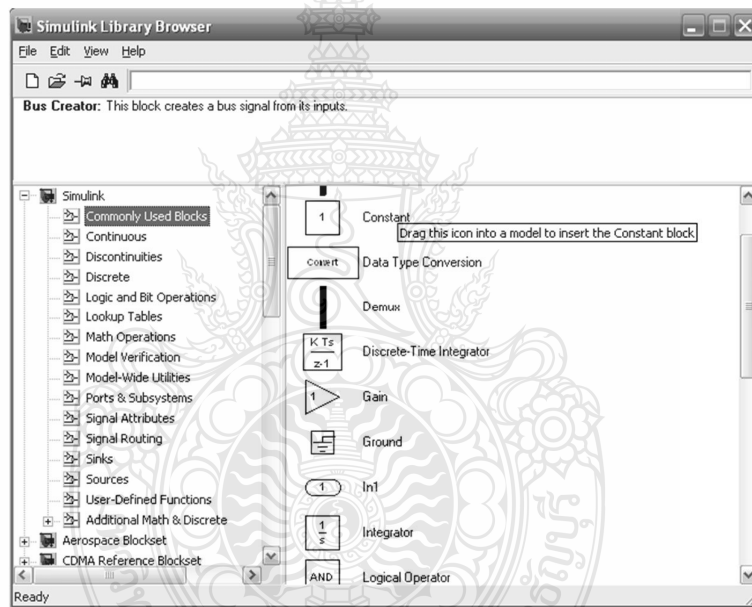
ตารางที่ 2.2 การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols

วิธี Ziegler-Nichols			
Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.50 K_c$	-	-
PI	$0.45 K_c$	$1.2 K_p / P_c$	-
PID	$0.60 K_c$	$2 K_p / P_c$	$K_p P_c / 8$

การปรับแต่งด้วยซอฟต์แวร์ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในปัจจุบัน จะใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณและปรับแต่งค่า Gain โดยซอฟต์แวร์จะทำการเก็บข้อมูล สร้างโมเดลและคำนวณค่า Gain ให้โดยอัตโนมัติ

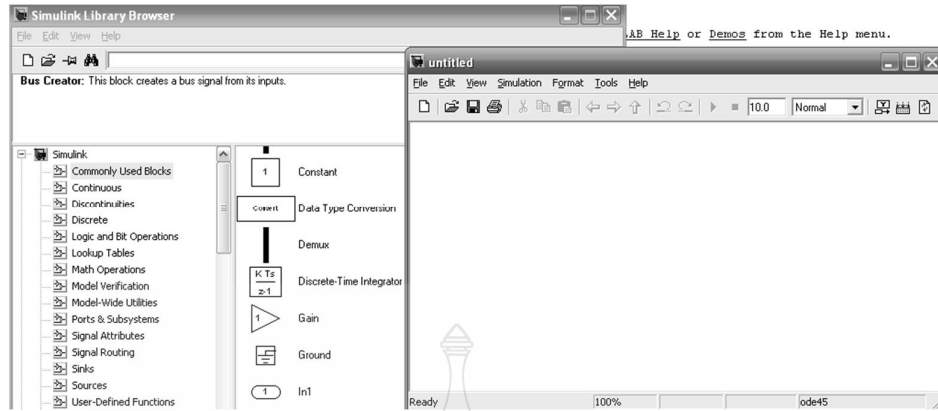
2.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink

โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง, การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ, การใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์รูปที่แบบต่างๆ เป็นต้น ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปที่แบบของ block Diagram เป็นหลักทำให้มีความง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้ Building Blocks ที่มีมาให้จาก Simulink Library Browser ดังรูปที่ 2.32

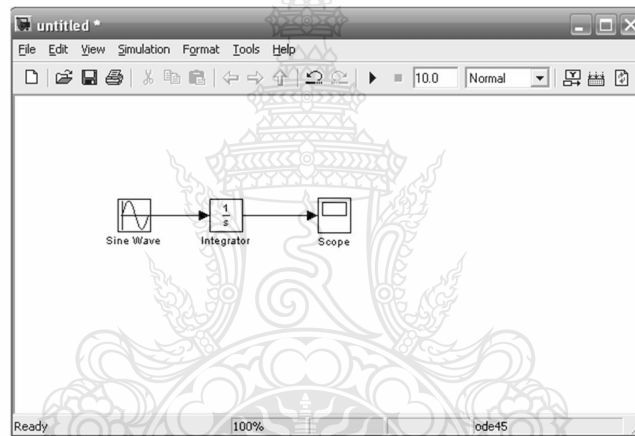


รูปที่ 2.27 บล็อกโคอะแกรมพื้นฐานใน Simulink Library Browser

ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ และส่งผ่านสัญญาณ ข้อมูลจาก block หนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีก block หนึ่งโดยผ่านเส้นเชื่อมต่อกัน โดยที่สามารถดูผลลัพธ์ของข้อมูลได้หลายลักษณะทั้ง Oscilloscope หรือ Display โดยสามารถเลือกจากในส่วนของ Sink ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink

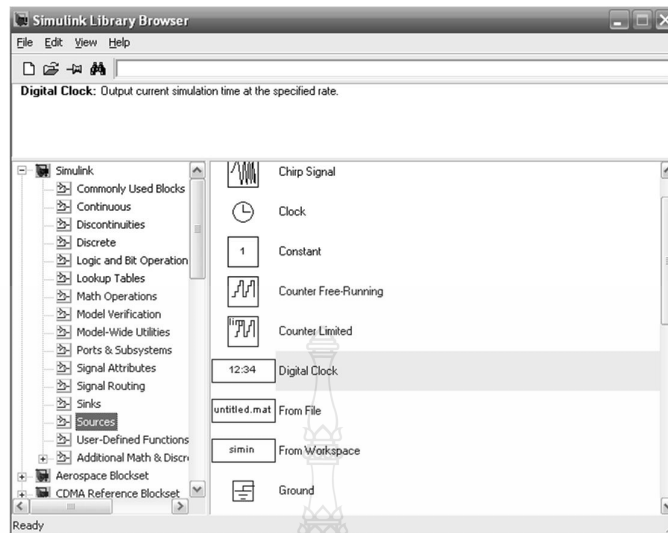


รูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อระหว่าง block ของ Simulink

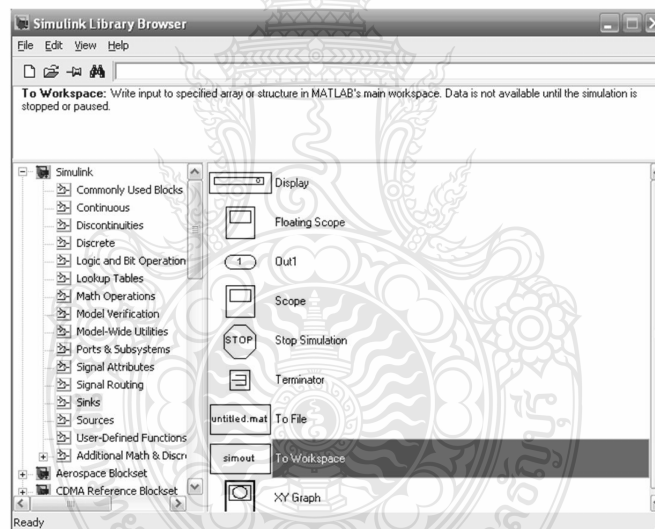
2.9.1 กลุ่มของ block พื้นฐานใน Simulink

ก. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และแหล่งแสดงสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มของ Source ที่กำหนดมาให้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant), แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator), แหล่งกำเนิดสัญญาณรูปที่ไซน์ (Sine Wave) หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักใช้เพื่อจับเวลาการจำลองปัญหาเป็นต้น ดังรูปที่ 2.30 กลุ่มของ Sinks เป็นกลุ่มที่จะใช้สำหรับเก็บข้อมูล (To Workspace) และแสดงผลของการแก้ปัญหา (Scope, Display) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.31



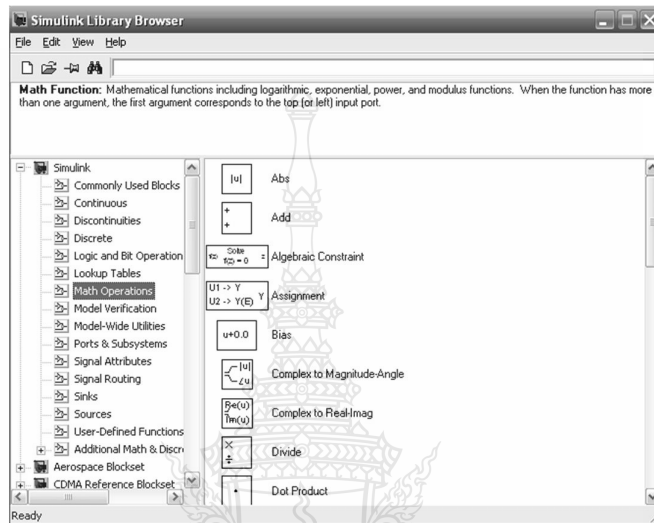
รูปที่ 2.30 กลุ่ม block ของ Source



รูปที่ 2.31 กลุ่ม block ของ Sinks

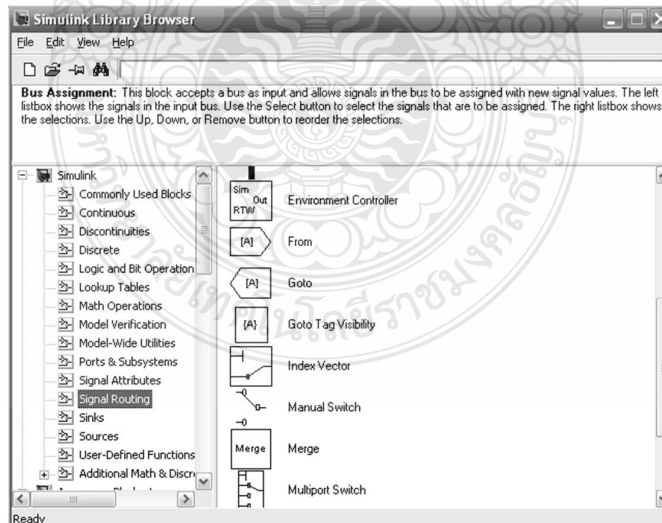
ข. การดำเนินการทางคณิตศาสตร์(Math Operations)

กลุ่ม **Math Operations** มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น การบวก(Add) ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Math Function) การคูณตัวแปร (Gain) เป็นต้น



รูปที่ 2.32 กลุ่ม block ของ Math Operations

ค. ทางเดินสัญญาณ(Signal Routing)

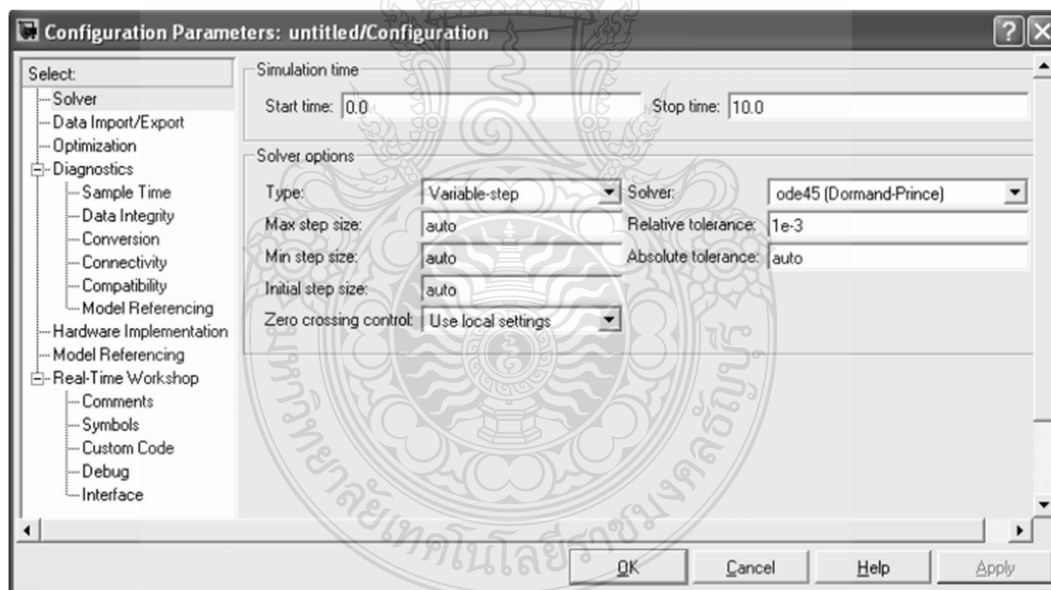


รูปที่ 2.33 กลุ่ม block ของ Signal Routing

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นต้องมีการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่ง **block** ในกลุ่มนี้เป็นประเภท **GOTO, FROM, Multiplexing** จะทำให้แผนภูมิมีความเป็นระเบียบมากขึ้นดังรูปที่ 2.33

2.9.2 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาในคอมพิวเตอร์นั้น มีข้อสังเกตที่ต้องพึงระวัง คือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาในการจำลองปัญหา เช่นคอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที ทำให้ระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจไม่ตรงกันในการจำลองปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ **Step Size** มีค่าไม่คงที่ (**Variable Step Size**) ค่า **Step Size** ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ **Step Size** มีค่าคงที่ (**Fixed Step Size**) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ ดังรูปที่ 2.34



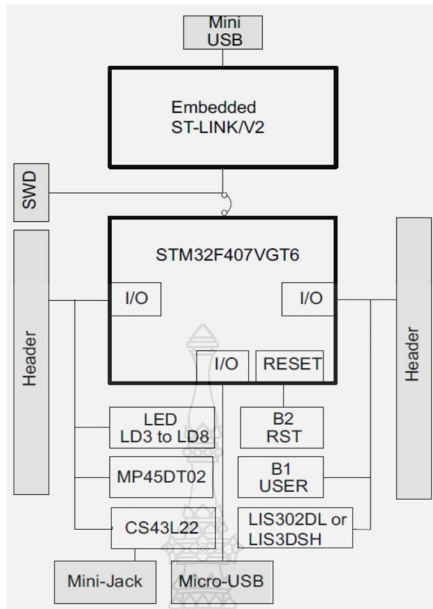
รูปที่ 2.34 แสดงหน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

2.10 บอร์ดควบคุม (STM32F407VGT6)

บอร์ดควบคุมทำหน้าที่เชื่อมต่อแบบจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับกระบวนการจริง โดยผ่าน **block sets** และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบด้วยเวลาจริง การ์ดอินเทอร์เฟซประกอบด้วยจำนวนช่อง **A/D, D/A, PWM, Digital I/O** และ **Encoder** ซึ่งใช้สำหรับระบบควบคุม เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเวกเตอร์ การควบคุมแขนกลและการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อนเป็นต้น และระบบยังจำเป็นต้องใช้โมดูลแปลงสัญญาณที่เรียกว่า **Analog to Digital Converter (ADC)** ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อสามารถประมวลผลได้ด้วยดิจิทัลคอมพิวเตอร์ รวมถึงโมดูลแปลงสัญญาณที่เรียกว่า **Digital to Analog Converter (DAC)** ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกการใช้งานอนาล็อกกับ การ์ดอินเทอร์เฟซ **STM32F407VGT6**

การ์ดอินเทอร์เฟซ **STM32F4** มีลักษณะเด่นดังนี้

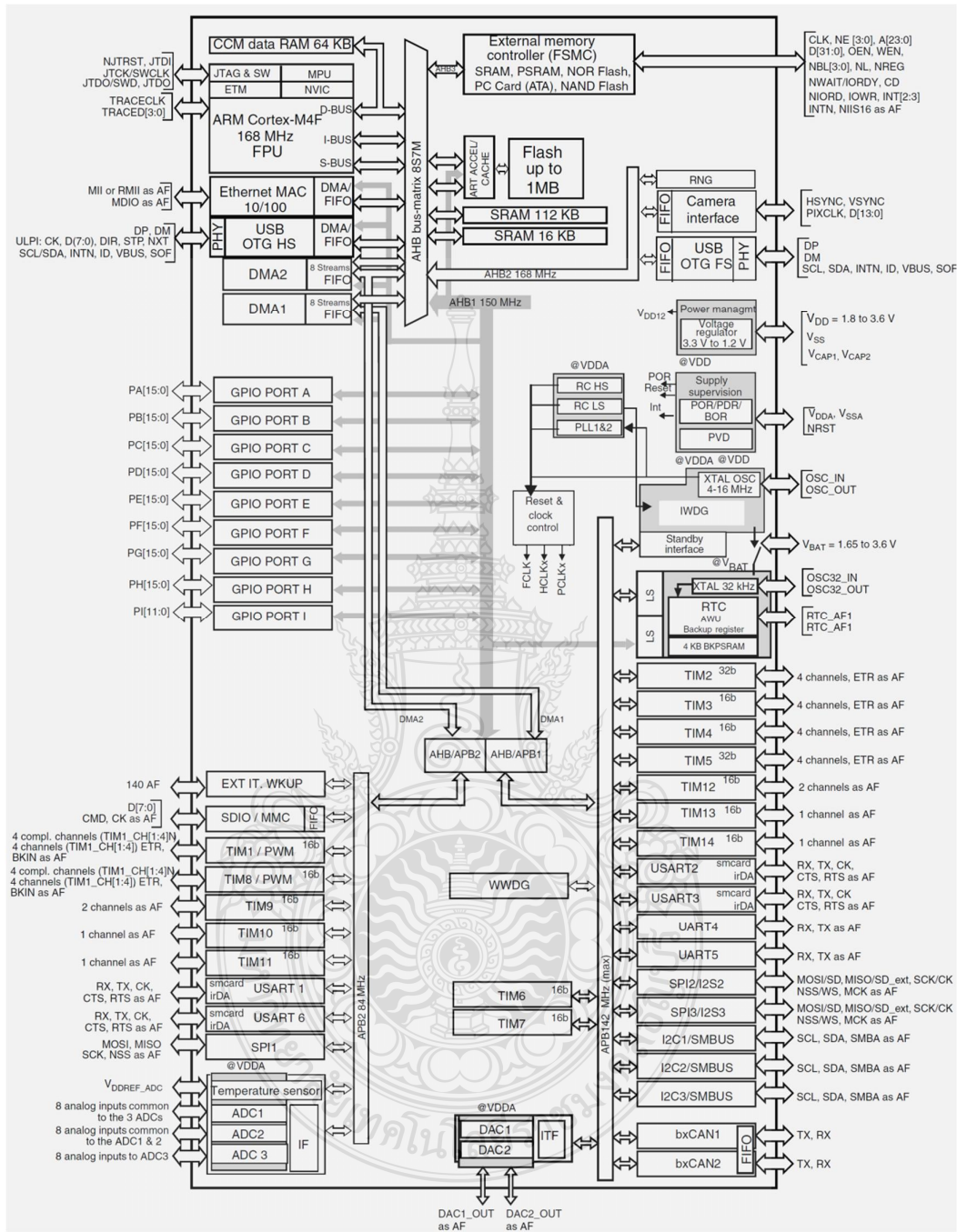
- เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (**real-time**) ผ่านทางช่อง **USB** ของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และ **Mini USB** ของการ์ดอินเทอร์เฟซ
- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ **STM32F407VGT6** แบบ **32 bit** มีหน่วยความจำขนาด **1 Mb** มี **SRAM** ขนาด **192 Kb** ในตัวถังแบบ **LQFP** ขนาด **100** ขา
- มีชุดวงจร **ST-Link** รวมอยู่ในบอร์ด ใช้สำหรับการ **Download** และ **Debug** โปรแกรม โดยจะมี **Jumper** ให้เลือกใช้งานร่วมกับบอร์ดอื่นได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต **USB** หรือสามารถเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟภายนอกขนาด **3.3V** หรือ **5V** ได้
- มี **LED** เพื่อใช้ทดสอบหรือทดลองเขียนโปรแกรม 4 ดวง คือ
 - ก. **LD3** สีส้ม ต่ออยู่กับพอร์ต **PD13**
 - ข. **LD4** สีเขียว ต่ออยู่กับพอร์ต **PD12**
 - ค. **LD5** สีแดง ต่ออยู่กับพอร์ต **PD14**
 - ง. **LD6** สีน้ำเงิน ต่ออยู่กับพอร์ต **PD15**
- มีสวิตช์กดติดป้อนยดับ **2** ตัว คือ
 - ก. สวิตช์ **Reset** ใช้สำหรับตั้งค่าการทำงานของบอร์ด **STM32F4** ให้เริ่มทำงานใหม่
 - ข. สวิตช์ **User** (สีฟ้า) ใช้ทดสอบหรือทดลองเขียนโปรแกรมโดยต่ออยู่กับพอร์ต **PA0**
- ขาอินพุตและเอาต์พุต (**GPIO**) ของ **CPU** จะต่อออกมาที่ **Header** ทางด้านข้างของบอร์ด เพื่อความสะดวกในการใช้งาน



รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส STM32F407VGT6



รูปที่ 2.36 การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟสรุ่น STM32F407VGT6



รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส (STM32F407VGT6)

2.10.1 การเชื่อมต่อการ์ดอินเทอร์เฟซ (STM32F407VGT6) และทดสอบการเชื่อมต่อ ST-Link

เป็นชุดพัฒนา MICROCONTROLLER ขนาด 32 BIT ราคาประหยัด ของบริษัท ST ในตระกูลใหม่ STM32 ARM CORTEX-M4F โดยในบอร์ดจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ชุด ST-LINK/V2 ใช้ในการ DOWNLOAD และ DEBUG ไปยัง MCU TM32F407VGT6 ที่อยู่ในบอร์ดผ่านทาง PORT USB

ส่วนของ ST-LINK/V2 ใช้ MCU เบอร์ STM32F103 มาเป็นตัวเชื่อมต่อการทำงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทาง USB PORT

- สามารถทำการ IN-CIRCUIT DEBUG และ PROGRAM กับตัว MCU STM32F4 ที่อยู่บนบอร์ดได้

- ขั้วต่อ 6 PIN SWD ต่อออกใช้งาน DEBUG และ PROGRAM ใต้นอกบอร์ด

ส่วนบอร์ดใช้งาน STM32F4

- ใช้ MCU เบอร์ STM32F407VGT6, 32 BIT ARM CORTEX-M4F 1MB FLASH, 192KB RAM, LQFP100 TYPE

- ตัวบอร์ดสามารถใช้ไฟ +5V จากขั้วต่อ USB หรือจาก POWER 5V ภายนอกใต้นการใช้งาน

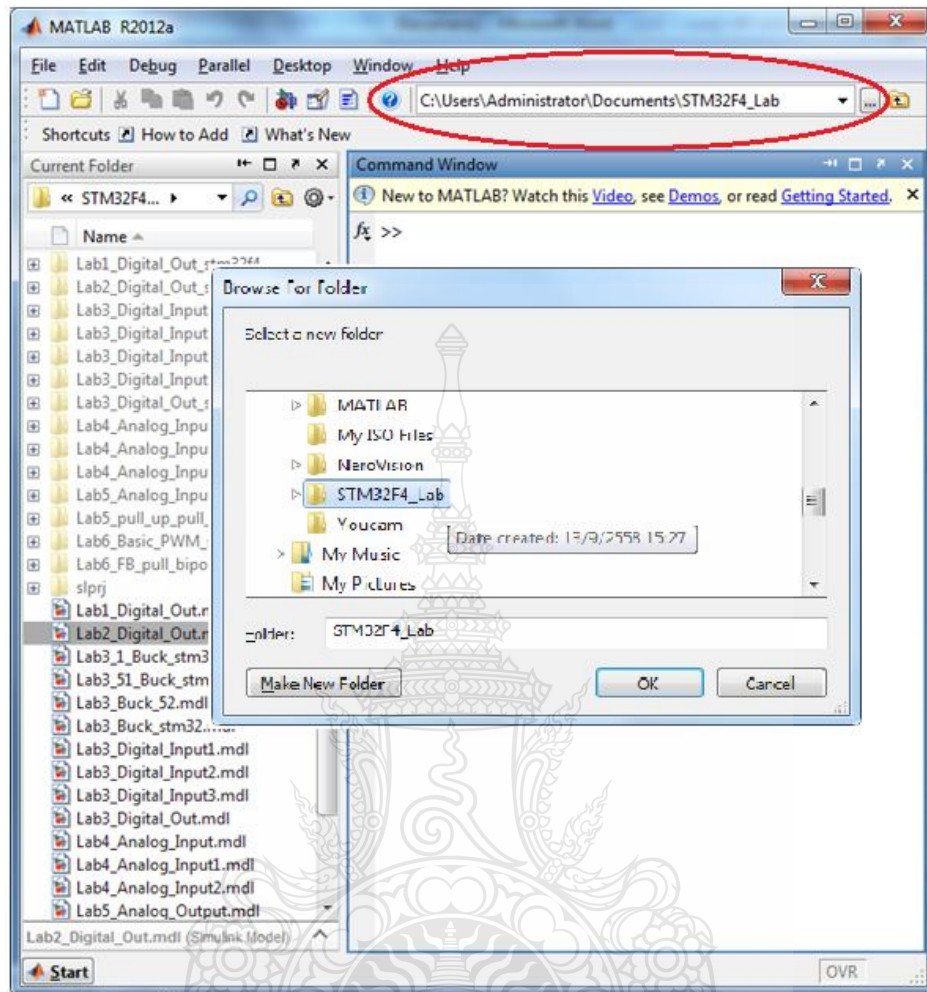
- มีส่วน 3-AXIS ACCELEROMETER เบอร์ LIS302DL อยู่บนบอร์ด

- มีส่วน DIGITAL MICROPHONE เบอร์ MP45DT02 อยู่บนบอร์ด

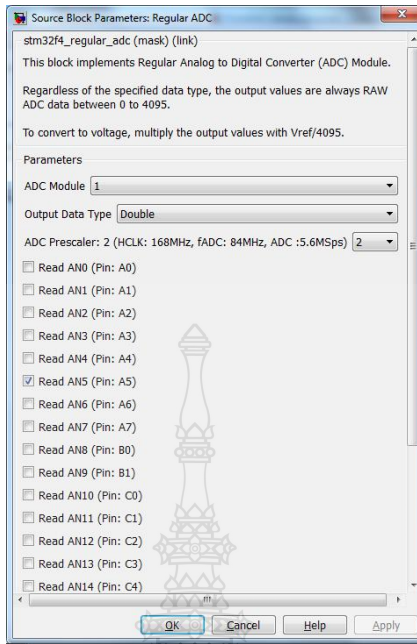
- USB OTG FS พร้อมขั้วต่อ MICRO-AB

- ตัวบอร์ดทำเป็นขั้วต่อแบบ PIN HEADER ใต้ PCB 25 x 2 จำนวน 2 ชุด

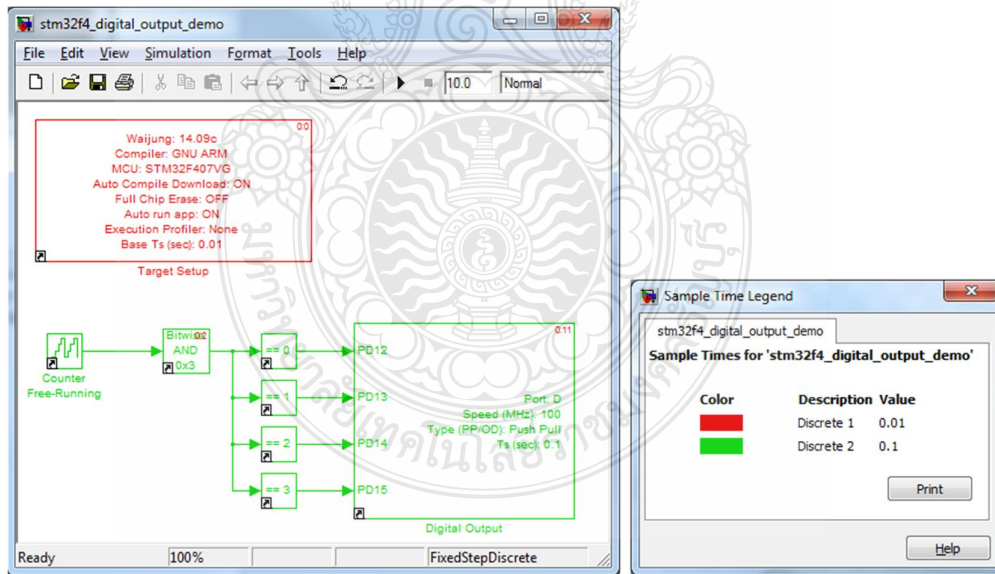
Waijung Blockset เป็น Blockset ใช้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยบริษัท เอเมจิน จำกัด ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ในแบบของ Simulink Blockset ทำให้การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 2.38 การเปลี่ยน Directories บนหน้าต่างโปรแกรม MATLAB

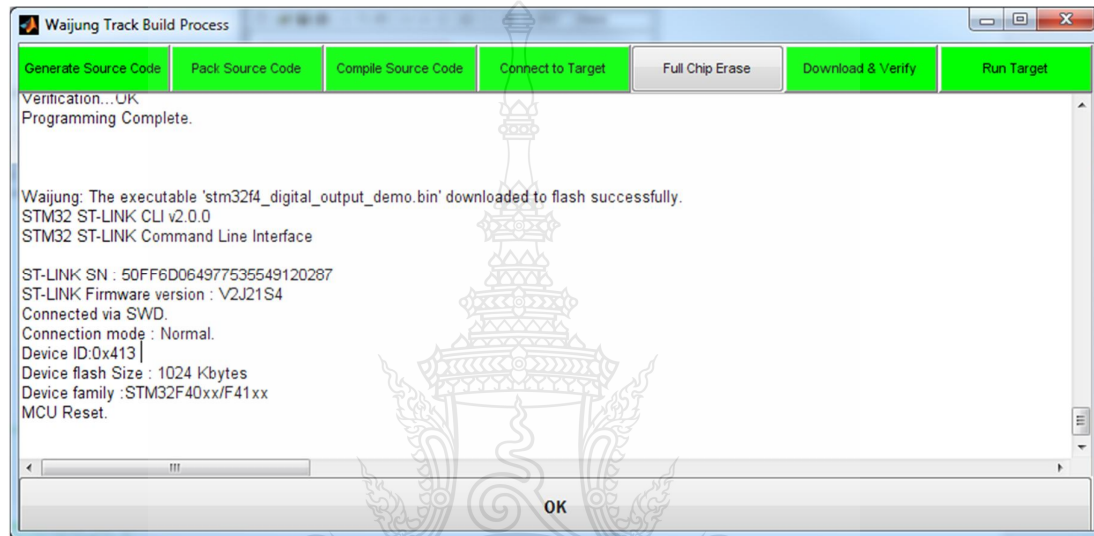


รูปที่ 2.39 ตั้งค่าการใช้งาน Target Setup block สำหรับบอร์ด STM32F4



รูปที่ 2.40 ตัวอย่าง Model ไฟกระพริบและหน้าต่างแสดงค่า Sample Time ของ Block

ทำการ **Build mode** (เพื่อ **Compile** และ **Download**) ลงในบอร์ด **STM32F4** โดยกดปุ่ม **Ctrl+B** โปรแกรม **Matlab Simulink** จะสร้าง **Source** ไฟล์ หลังจากนั้น **Waijung** จะ **compile** **source** ไฟล์เหล่านั้นด้วย **C Compiler** ให้เป็น **Binary** หรือ **Hex** ไฟล์ เมื่อ **Compile** เสร็จสิ้น **Waijung** จะ **download** **Binary** ไฟล์ ลงในบอร์ด **STM32F4** ผ่าน **ST-Link** โดยอัตโนมัติ หน้าต่าง **Waijung Track Build process** จะแสดงผลการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน ดังรูปที่ 2.41



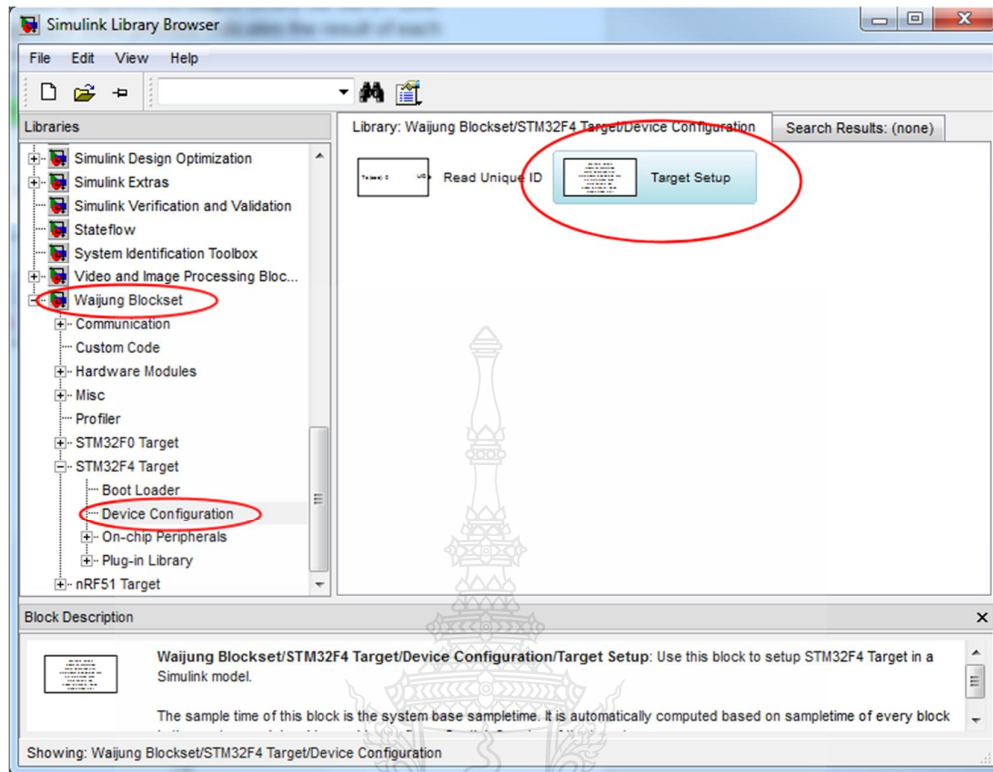
รูปที่ 2.41 หน้าต่างโปรแกรมเชื่อมต่อคอลโทรลเลอร์สำเร็จ

หลังจากขั้นตอน **Build** และ **Download** การเชื่อมต่อกับบอร์ดสำเร็จสิ้นดังรูปที่ 2.41 บอร์ดจะเริ่มการทำงาน โดยสังเกตได้จากหลอดไฟ **LED** ทั้ง 4 จะติดเป็นลำดับ และถอดหรือต่อ **ST-Link** กับบอร์ด เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการ **Auto Compile and Download** แล้วก็สามารถทำได้

2.10.2 เริ่มสร้างหน้าต่างใหม่

ไปบนหน้าต่าง **Simulink Library browser** เลือกเมนู **File -> new model** เพื่อเริ่มต้นสร้างหน้าต่าง **model** ใหม่ บันทึกไฟล์และเปลี่ยน **Current Directory** ไปยังตำแหน่งที่ไฟล์บันทึกอยู่

วาง **"Target Setup Block"** สำหรับ **STM32F4** ลงในหน้าต่าง **model** (**Target Setup Block** อยู่ใน **Simulink library: Waijung Blockset/STM32F4 Target/Device Configuration**)



รูปที่ 2.42 Target Setup บนหน้าต่าง Simulink Library Browser

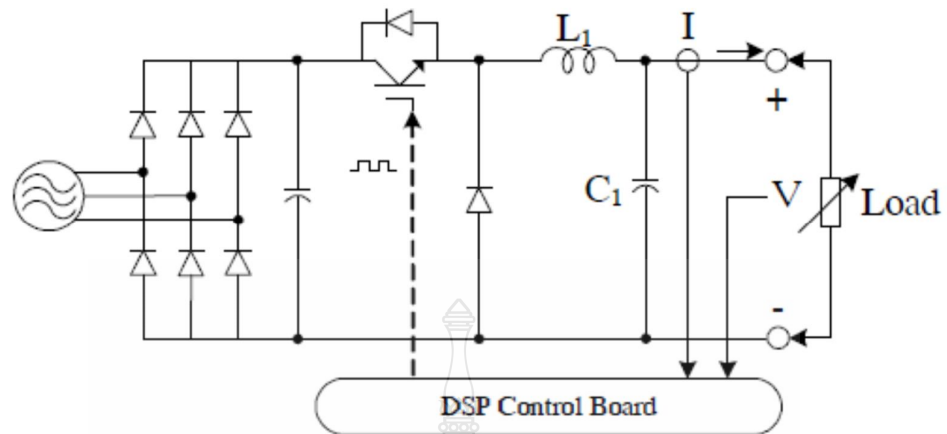
- บันทึกไฟล์ model อีกครั้ง จากนั้น Update model โดยกดปุ่ม Ctrl+D (2 ครั้ง) เพื่อให้ Waijung ตั้งค่าการใช้งานครั้งแรก และปรับ Sample time ของ Block ให้ถูกต้อง หมายถึง ยังไม่มีการ Build model ในขั้นตอน Update model
- ออกแบบ Model ตามที่เราต้องการ
- เริ่ม Update Diagram, Incremental Build model เพื่อเริ่มต้นการใช้งานบอร์ด FiO2 หรือ STM32F4

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

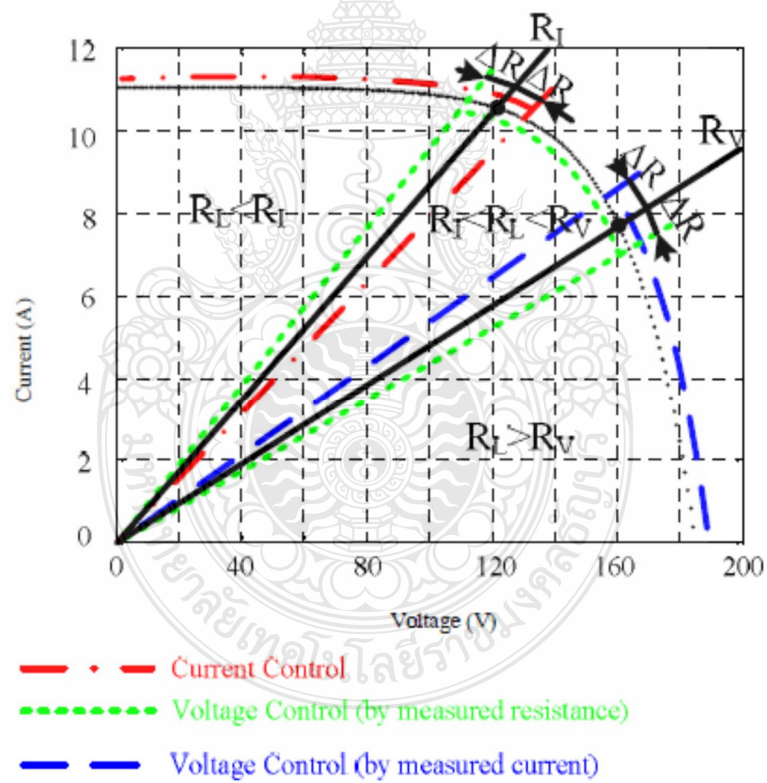
จากการทบทวนบทความงานวิจัยด้านการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีหลายงานที่นำเสนอถึงวิธีการศึกษาผลกระทบของปริมาณแสง, อุณหภูมิ และความต้านทาน ต่อคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีในแต่ละงานต่างมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปดังนี้

2.11.1 “A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator” โดย Yuan. Li¹, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, and Dichen Liu[11]

งานวิจัยนี้แนะนำเสนอ กลยุทธ์การควบคุมแบบไฮบริดสำหรับการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ซึ่งเป็นการเลียนแบบคุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) ภายใต้ความแตกต่างกันของอุณหภูมิและโหลด การฉายรังสีได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเส้นโค้ง I-V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่ในงานวิจัยนี้ให้การสนใจ และตามวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้า ทำให้คุณลักษณะเอาต์พุตของ PV มีความแตกต่างกันของ วิธีการที่นำเสนอการควบคุมแบบไฮบริด แบ่งคุณลักษณะ IV ของ PV อาร์เรย์ออกเป็นสามส่วนจากการจำลองการทำงานของ PV โดยการวัดแรงดัน และกระแสเอาต์พุต จากชุดจำลองหน่วยควบคุมซึ่งอยู่บนพื้นฐาน TMS320LF2407 DSP ทำการคำนวณและควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสตามลำดับ ชุดต้นแบบขนาด 2 กิโลวัตต์ที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบกับโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้ และโหลดไฟฟ้าคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการจำลอง PV ทำให้การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกราฟคุณลักษณะ IV ซึ่งยิ่งไปกว่านั้นจากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ ยังทำให้เข้าใกล้จุดสูงสุดในระบบ PV ดังรูปที่ 2.43 และ 2.44



รูปที่ 2.43 โครงสร้างของการจำลอง PV



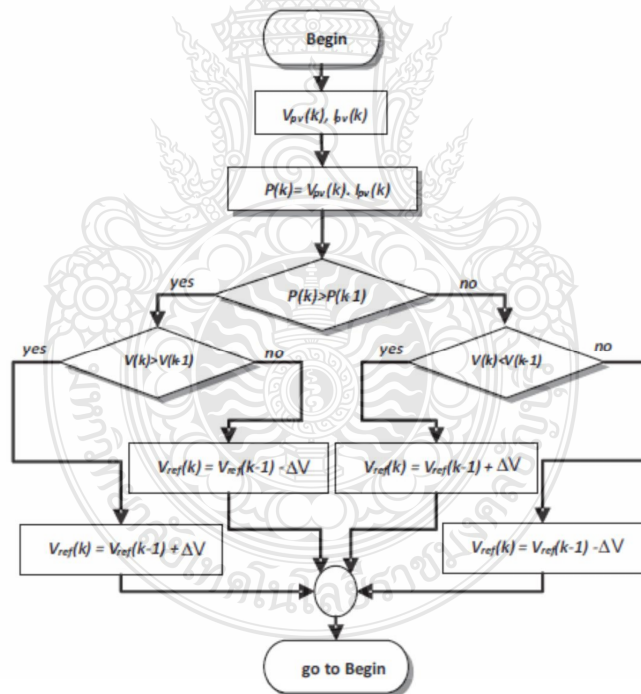
รูปที่ 2.44 คุณลักษณะขาออกของ PV อาร์เรย์

2.11.2 “A Fuzzy PD-PI Control Strategy to Track the Voltage References of Photovoltaic Arrays” โดย Nilton E. M. Moçambique, Ricardo Q. Machado, Vilma A. Oliveira [12]

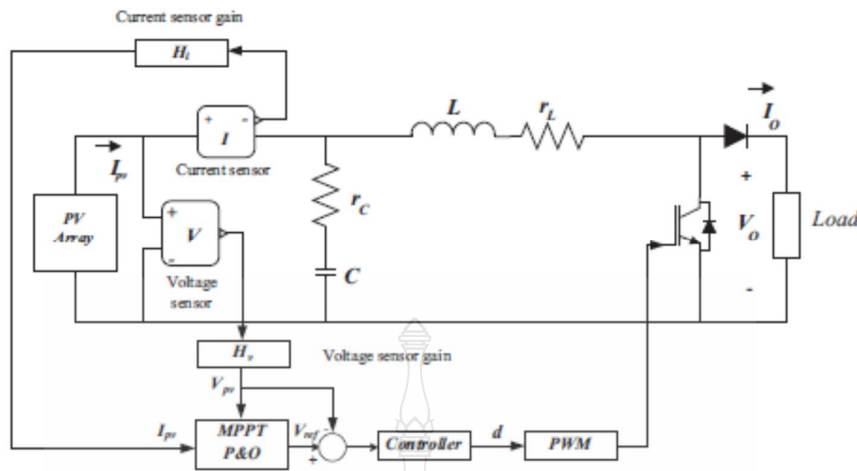
ในบทความนี้นำเสนอ พีซี PD รวมทั้งโครงสร้างตัวควบคุม PI สำหรับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวควบคุมจะติดตามแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดโดยทำรบกวนระบบและสังเกต หรือ P&O (perturb and observe) ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)

ข้อเสียเปรียบหลักของอัลกอริทึม P & O MPPT คือ ที่จุดสถานะคงตัว การทำงานแกว่งไปมารอบๆจุดพลังงานสูงสุด (เอ็มพีพี) กฎการควบคุมการป้อนกลับที่นำเสนอในบทความนี้ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน P & O MPPT มาติดตามตัวอ้างอิงสำหรับ PV อาร์เรย์ ทำการเชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณ DC to DC จำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ว่าสรุปแวดล้อมแตกต่างกันมีไว้เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการ

โดยมีขั้นตอนพื้นฐานดังรูปที่ 2.45 และ step up converter with control ดังรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรม แบบ P & O MTPP



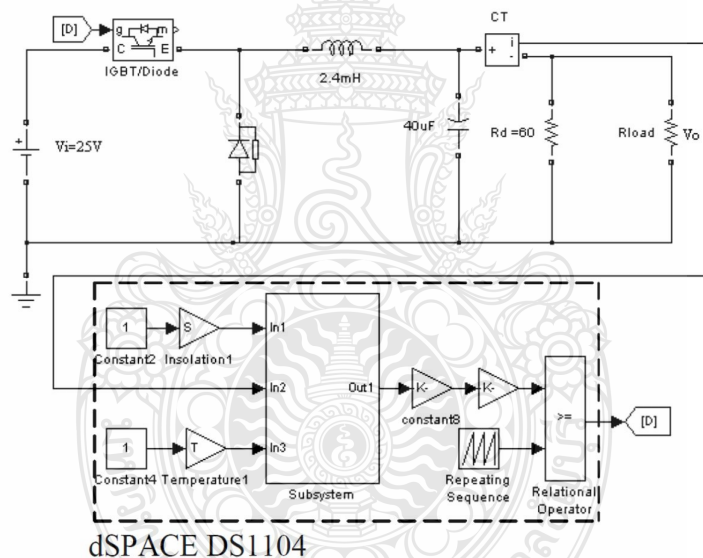
รูปที่ 2.46 การควบคุมด้วยวงจรแปลงแรงดันแบบ step up

2.11.3 “Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module Under the Single Diode Model”, D. Impreeda and W. Subsingha [13]

บทความเป็นการนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง อุณหภูมิ ตัวแปรไดโอด ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่า หากเซลล์มีมีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูง จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูงขึ้น ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงจะเป็นจะเป็นสัดช่วยโดยตรงต่อกระแสขาออกของของเซลล์แสงอาทิตย์

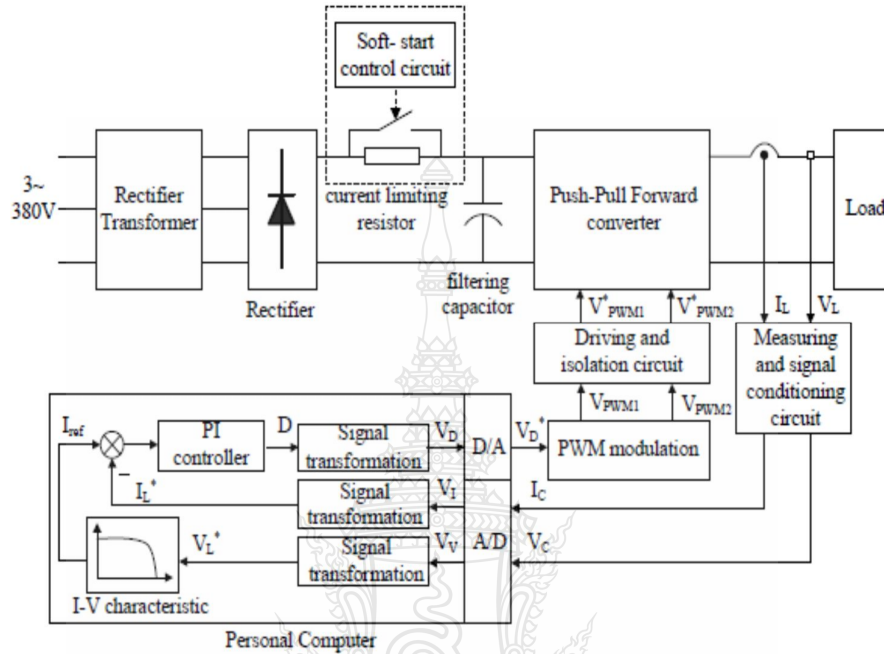
ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ อันที่จะทำให้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ (*i-v curve*) เกิดความผันผวน ความเข้มแสง อุณหภูมิ ตัวแปรไดโอด ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงป้อนกลับสัญญาณ **output** ของ *i-v* ขอนำเสนอการจำลองแบบสัญญาณเสมือนจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม **MATLAB/Simulink** และการ์ดอินเทอร์เฟซ **dSPACE DS1101** ในศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้จะใช้ร่วมกับการป้อนกลับสัญญาณขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบอนาล็อก แบบดิจิทัล แบบพีเอสซี แบบนิวรอน หรือแบบอื่นๆที่สามารถทำให้ระบบป้อนกลับได้

ข้อดีคือ ทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์หลายตัวแปร และทำการทดลองจ่ายโหลดจริง แต่ยังมีข้อจำกัดงานอยู่บางส่วนคือ กราฟคุณลักษณะ **I-V** จากการทดลองที่ได้ยังไม่เรียบเมื่อเทียบกับกราฟที่อ้างอิง



รูปที่ 2.47 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองแบบทันเวลา

2.11.4 “Design and Simulation of Digital PV Simulator Based on Push-Pull Forward Converter” โดย Zhang Jike, Wang Shengtie [14]

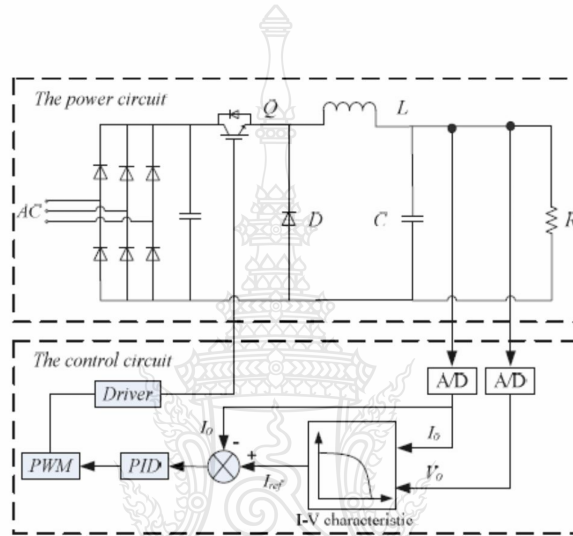


รูปที่ 2.48 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม

เซลล์แสงอาทิตย์แบบดิจิทัล (PV) จำลองที่นำเสนอ โดยบทความนี้ได้รับการออกแบบบนพื้นฐานของ Push-Pull forward converter (PPF) โครงสร้างหลักและหลักการควบคุมแบบดิจิทัล การจำลอง PV ดิจิตอล จะมีพฤติกรรมทางไฟฟ้าคล้ายกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสรูปแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้ สะดวกในการดำเนินการทดสอบระบบการผลิตพลังงานของ PV และตรวจสอบการดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลาย และไม่ต้องขึ้นอยู่กับสรูปแวดล้อม หรือราคาไม่แพงมาก และระบบขนาดใหญ่ คุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มของแสงแดด และอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีการจำลองภายใต้ MATLAB/Simulink ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของเอาต์พุตของการจำลอง PV มีความสอดคล้องกับที่เกิดขึ้นจริง PV ในบทความนี้เป็น การวางรากฐานที่สำคัญ สำหรับการใช้งานของ PV ที่เกิดขึ้นจริง และการจำลอง

ข้อดีใช้ digital PV และ digital control ง่ายในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ใช้จำลองเป็นระบบจำลองขนาดใหญ่ได้ ส่วนข้อดีของงาน ยังเป็นเพียงการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไม่ได้นำมาทดสอบจ่ายโหลดจริง IV curve จากการจำลอง ยังไม่ราบเรียบเมื่อเทียบกับ IV curve ที่อ้างอิง วิธีการยังยุ่งยาก และซับซ้อน

2.11.5 “A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method” โดย Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho[15]



รูปที่ 2.49 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม

สำหรับการวิจัยที่ดีขึ้นและการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบสำหรับการจำลองไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ บนพื้นฐานของ DC-DC converter และ DSP ตัวควบคุม กลไกการควบคุมที่มีอยู่บนพื้นฐานของความแม่นยำมากขึ้น วิธีการคำนวณควบคุมโหมคปัจจุบันร่วมกับวิธีตารางมองขึ้นใหม่ ด้วยกลยุทธ์การควบคุมใหม่นี้จำลอง PV สามารถนำมาใช้ในการจำลองลักษณะการส่งออกประเภทไดอาร์เรย์ PV ภายใต้สรูปการทำงานที่แตกต่างกันเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงได้รับการสร้างและทดสอบกับตัวแปร โหลดตัวต้านทานและ โหลดพลังงานอย่างต่อเนื่องเช่นกัน การทดลองผลแสดงให้เห็นว่าการส่งออกของลักษณะจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีความสอดคล้องกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงและจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถเปลี่ยนได้อย่างราบรื่นกับกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve)

ข้อดี ใช้สำหรับจำลองของ PV ใดๆก็ได้ ภายใต้การทำงานที่แตกต่างกัน และ นำค่ากระแสขาออกมา feedback ด้วย PID control มีการจำลองใน hardware ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำมาทดสอบจ่าย โหลดจริง ข้อด้อยคือ IV curve จากการจำลองยังไม่ราบเรียบเมื่อเทียบกับ IV curve ที่อ้างอิง

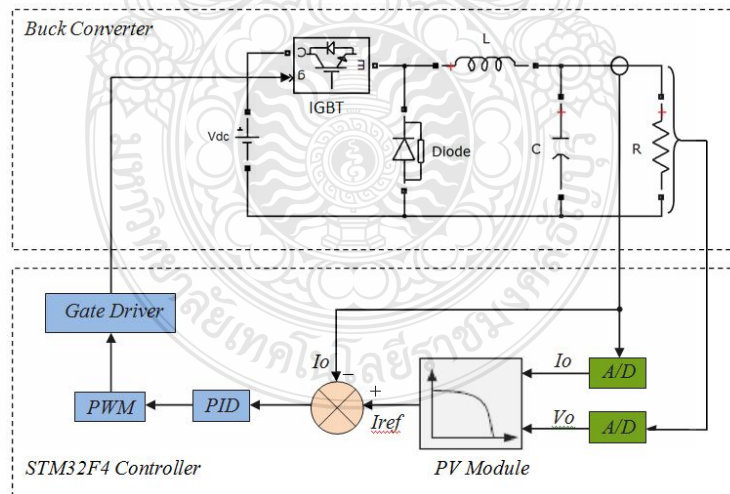
สรุปในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพารามิเตอร์ใน ต่างๆ ที่มีผลกระทบโดยตรง และ โดยอ้อมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ของวงจร สมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญนำไปใช้ในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองคุณลักษณะสัญญาณของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (เสมือนจริง) โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันและกระแสขาออกให้สอดคล้องกับกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ **I-V curve** โดยการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยการ์ดอินเทอร์เฟซเพื่อส่งไปคำนวณหาค่าแรงดัน ควบคุมด้วยโปรแกรม **MATLAB/Simulink** โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ **PWM** ได้ค่าดีวีดีไซเกิลเพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ **IGBT** ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดันเป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในบทนี้จะขอกล่าวถึงการออกแบบในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และส่วนของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อกับการ์ดอินเทอร์เฟซ เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการควบคุมการป้อนกลับแบบพีไอดี สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานและการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน การใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink และการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส

ขั้นตอนที่ 2: ออกแบบและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้สมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นใช้แบบจำลองดังกล่าวพัฒนาเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

ขั้นตอนที่ 3: เปรียบเทียบผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต โดยเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อเพิ่มความแม่นยำและน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

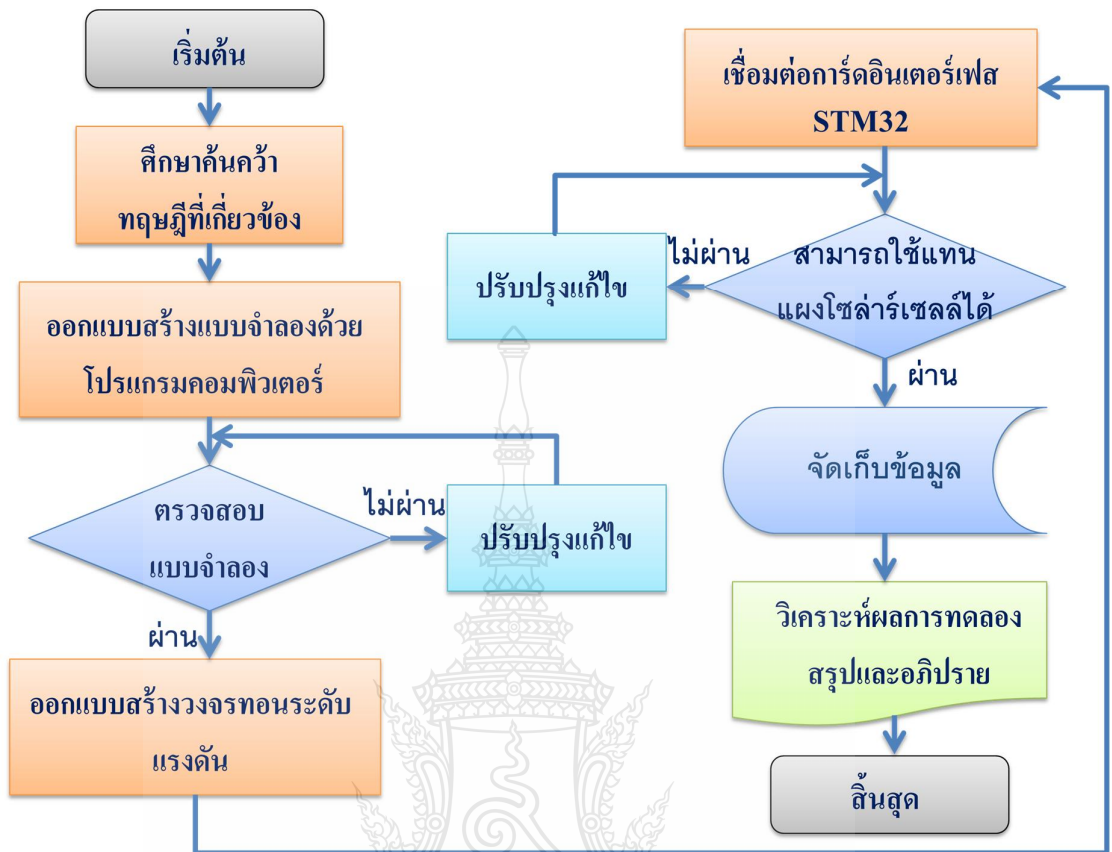
ขั้นตอนที่ 4: ออกแบบและสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณ (signal condition) เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 5: ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

ขั้นตอนที่ 6: เชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟสเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะไปควบคุมค่าดีวี่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าดีวี่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของไอจีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับเป็นไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 7: เปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และกับเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

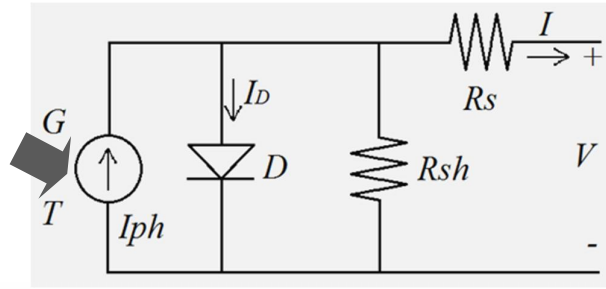
ขั้นตอนที่ 8: วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนรูปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV cell) นั้น สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB R2012a ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการตอบสนองความต้องการทางด้านการจำลองระบบได้ดี สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น M-File, Simulink, GUI เป็นต้น และโปรแกรม MATLAB/ Simulink ยังสามารถเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อการควบคุมระบบให้เป็นสัญญาณจริง(Real-time) ได้อีกด้วย โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ Block ต่างๆในส่วนของ Simulink ในการสร้างแบบจำลองซึ่งแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยถูกสร้างให้เป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SolarEx รุ่น MSX60 ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 60W โดยใช้ค่า Open circuit voltage (V_{oc}) เป็น 21.1V, Short circuit current (I_{sc}) เป็น 3.8A, Temperature coefficient of Short circuit current (K_i) เป็น $3\text{mA}/^\circ\text{C}$, Temperature coefficient of Open circuit voltage (K_v) เป็น $-73\text{mV}/^\circ\text{C}$ ดังตารางที่ 3.1 ส่วนค่าตัวแปรของไดโอด (Ideal factor & Reverse saturation current of diode), ค่าความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ (Solar irradiance), ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance), ค่าความต้านทานขนาน (Shunt resistance) และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) นั้นจะกำหนดให้เป็นตัวแปรหลักในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อค่าตัวแปรต่างๆข้างต้นมีการเปลี่ยนแปลงไป

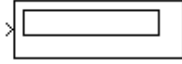







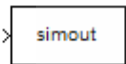

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ SolarEX รุ่น MSX 60[3]

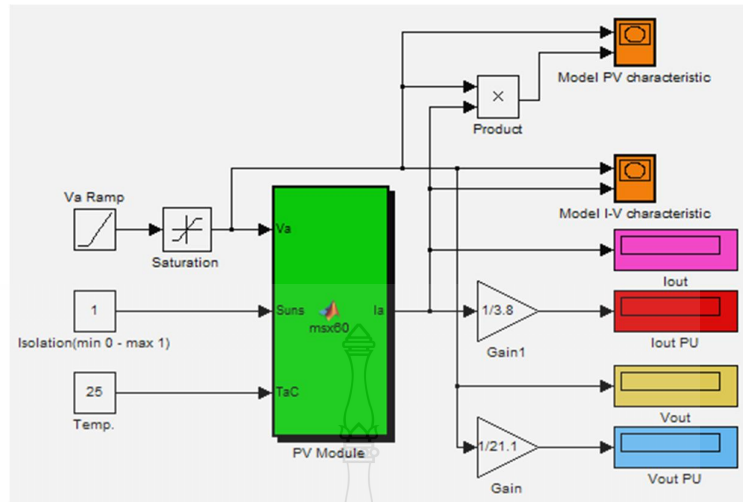
SolarEx MSX60 Specifications (1kW/m², 25°C)

<i>Characteristics</i>	<i>Spec.</i>
<i>Typical peak power (P_m)</i>	<i>60 W</i>
<i>Voltage at peak power (V_{mp})</i>	<i>17.1 V</i>
<i>Current at peak power (I_{mp})</i>	<i>3.5 A</i>
<i>Short-circuit current (I_{sc})</i>	<i>3.8 A</i>
<i>Open-circuit voltage (V_{oc})</i>	<i>21.1 V</i>
<i>Temperature coefficient of open-circuit voltage (β)</i>	<i>- 73mV/°C</i>
<i>Temperature coefficient of short-circuit current (α)</i>	<i>3mA/°C</i>
<i>Approximate effect of temperature on power</i>	<i>- 0.38W/°C</i>

ในการออกแบบสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากนำสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ในบทที่ 2 ไปเขียนสมการเป็น m file ใน MATLAB/Simulink พบว่าเมื่อค่าตัวแปรเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำให้มีผลกระทบต่อค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมี 5 ตัวแปรหลักคือ กระแสที่สร้างขึ้นจากแสง (I_{ph}) ผลของไดโอดได้แก่ค่า Ideal factor (N) มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับโครงสร้างการผลิตของเซลล์และค่ากระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0) ตามลำดับ ค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก (R_s) และการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ (R_{sh}) สำหรับโปรแกรม MATLAB ในส่วน Simulink ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการข้างต้นเพื่อศึกษาผลกระทบของทั้ง 4 ตัวแปรแรกนั้นได้ประกอบขึ้นจาก Block ชนิดเครื่องมือวัดและการแสดงผล Block ในส่วนของการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ทำงานเชื่อมโยงกันรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Block ดำเนินการต่างๆใน Simulink

สัญลักษณ์	รายละเอียด
 <p>Display</p>	การแสดงผลข้อมูลเป็นตัวเลข
 <p>Scope</p>	การแสดงผลสัญญาณบนออสซิลโลสโคป
 <p>Constant</p>	ค่าคงที่
 <p>Gain</p>	การคูณอินพุตด้วยค่าที่กำหนด
 <p>Product</p>	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาคูณกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
	การบวกหรือลบอินพุตที่เข้ามา ผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
 <p>Add</p>	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาบวกกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
 <p>Saturation</p>	กำหนดขีดจำกัดบนและล่างในสัญญาณอินพุต
 <p>simout To Workspace</p>	เมื่อต้องการพื้นที่ทำงานบล็อกสัญญาณอินพุตและเขียน ข้อมูลสัญญาณ ไปยังพื้นที่ทำงาน MATLAB
 <p>MATLAB Function</p>	สำหรับการใช้งานในรูปแบบของ Simulink และการสร้างรหัส สำหรับ Simulink Coder

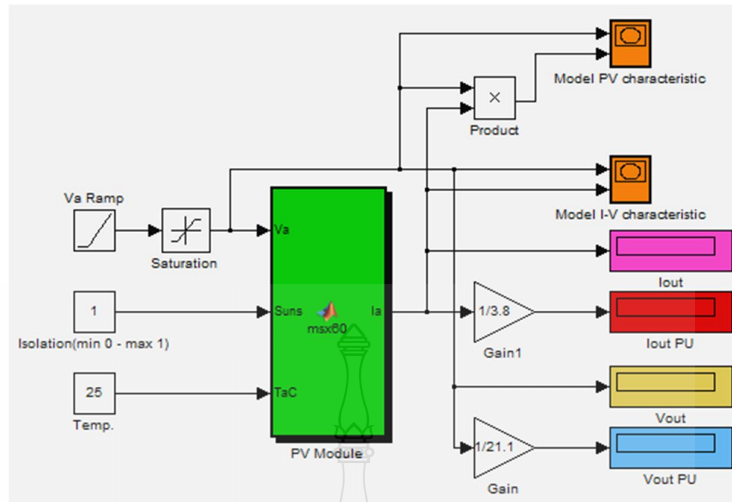


รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 เป็นการนำ block ต่างๆ ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ในตารางที่ 3.2 นำมาต่อเชื่อมโยงกัน โดยส่วนของ PV module สร้างสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ค่าความต้านทานอนุกรม, ผลของไดโอด และค่าความต้านทานขนานได้ในการศึกษาทำโดยการเปรียบเทียบเมื่อค่าต่างๆดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไป แล้วจะส่งผลกระทบต่อ การจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น

3.3 การออกแบบสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

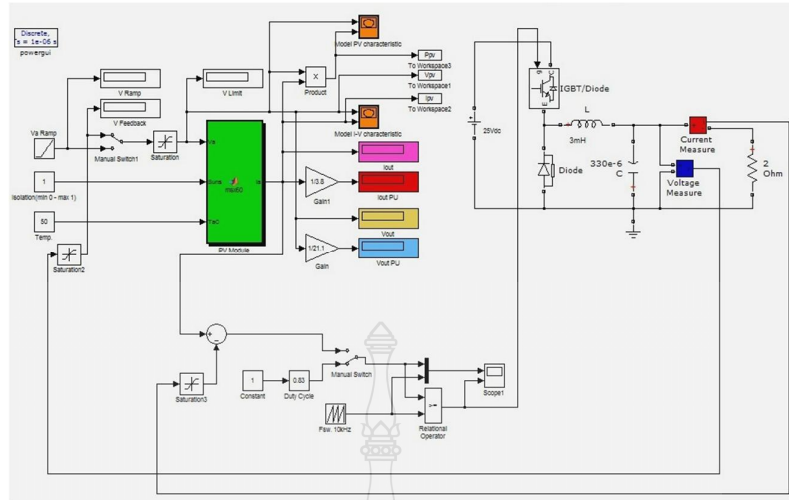
เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.5-0.8V ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งานโดยตรง โดยทั่วไปจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมกันเพื่อทำให้ได้ค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่เหมาะสมในการใช้งาน เรียกว่าโมดูล (PV Module) การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนั้นได้นำแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้วมาเพิ่มจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม (n_s) เป็นจำนวน 36 เซลล์ ส่วนจำนวนทางขนาน (n_p) ยังคงเป็นจำนวน 1 ทางขนาน เพราะจากการต่อเพิ่มจำนวนเซลล์อนุกรมนั้นทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น จึงมีผลให้สามารถตัดผลของความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ออกไปได้ เพื่อให้การสร้างแบบจำลองมีความสะดวกและง่ายมากขึ้นตามสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ซึ่งแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังในรูปที่ 3.4 และ 3.5 นั้นจะให้ผลของกราฟกระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออก (I-V Curve) และกราฟกำลัง-แรงดันไฟฟ้าขาออก (P-V Curve) ตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในลำดับขั้นต่อไปนำค่าที่ได้จากแบบจำลองซึ่งได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m), แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ที่ Standard Testing Condition (STC; ความเข้มแสง $1000W/m^2$ อุณหภูมิ $25^\circ C$) ไปเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 ในตารางที่ 3.1 เพื่อตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนและแก้ไขความถูกต้องของแบบจำลองให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.5 จึงสามารถใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของเซลล์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งในเรื่องผลกระทบของระดับของปริมาณแสงอาทิตย์ ผลกระทบของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ ผลกระทบของตัวแปรไดโอดและตัวแปรอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง (Real-time) ในหัวข้อถัดไปอีกด้วย



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 การออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้วงจรถอนระดับแรงดัน

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรถอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับคาร์ดิเตอร์เฟส โดยมีหลักการการทำงานคือใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transducer; CT) ตรวจจับกระแสขาออกของวงจรถอนระดับแรงดันแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าส่งไปยังคาร์ดิเตอร์เฟสเพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อก (analog) ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ซึ่งสัญญาณดิจิทัลดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าดีไซเคิล (Duty cycle) ด้วยแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้ว ค่าดีไซเคิลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำไปขับเกตไอจีบีที (IGBT) ให้วงจรถอนระดับแรงดันจ่ายแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้สามารถนำไปจ่ายโหลดได้จริง โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์, ค่าอุณหภูมิที่แผงเซลล์, ค่าตัวแปรไดโอดและจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมได้โดยการเปลี่ยนที่แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถใช้เพื่อการพัฒนาาระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

3.4.1 การออกแบบวงจรทอนระดับแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
<i>Input Voltage</i>	25 V
<i>Output Voltage</i>	7V - 22V
<i>Switching freq.</i>	5.5 kHz
<i>Load Resistance</i>	3Ω - 61Ω
<i>Power Output</i>	60 W
<i>Ripple ratio</i>	1%

3.4.1.1 คำนวณค่าดิวตี้ไซเคิล

กำหนดแรงดันขาออกเป็น 7V ($V_{in} = 25V$) ที่แรงดัน 7V คำนวณค่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= \frac{V_o}{V_{in}} \\ &= \frac{7}{25} = 0.28 \end{aligned}$$

ที่แรงดัน 22V คำนวณค่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= \frac{V_o}{V_{in}} \\ &= \frac{22}{25} = 0.88 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิลอยู่ระหว่าง 0.28 ถึง 0.88

3.4.1.2 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด (L_{min})

$$\begin{aligned} L_{min} &= \frac{(1-D) \times R}{2f} \\ &= \frac{(1-0.28) \times 10}{2 \times 5.5 \times 10^3} = 0.65mH \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าความเหนี่ยวนำไม่น้อยกว่าสิบเท่าของ L_{min} โดยเลือกใช้ $L = 6.5 mH$ (ที่ $R = 10$ โอห์ม)

3.4.1.3 คำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 1%

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \\
 &= \frac{1-0.28}{8 \times 6.5 \times 10^{-3} \times (5.5 \times 10^3)^2 \times 0.01} \\
 &= 45.77 \mu F
 \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าตัวเก็บประจุมากกว่าที่คำนวณประมาณสิบเท่า คือตั้งแต่ $457.7 \mu F$ ขึ้นไป ในบทความนี้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ $470 \mu F$

การออกแบบหาขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับนั้น ที่ค่าแรงดันขาออกเป็น $7V$ นั้นค่าความต้านทานโหลดจะมีค่าประมาณ 3Ω ซึ่งจะกำหนดให้วงจรทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{L,\max} &= \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \\
 &= \frac{7}{2} + \frac{7}{2} \left(\frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{6.5 \times 10^{-3}} \right) = 3.538 A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{L,\min} &= \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \\
 &= \frac{7}{2} - \frac{7}{2} \left(\frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{6.5 \times 10^{-3}} \right) = 3.461 A
 \end{aligned}$$

จากค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดข้างต้น แสดงว่าวงจรทอนระดับแรงดันนั้นทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง (Continuous Current Conduction Mode) ตามที่กำหนด

3.4.1.4 การเลือกใช้อิโอบีที

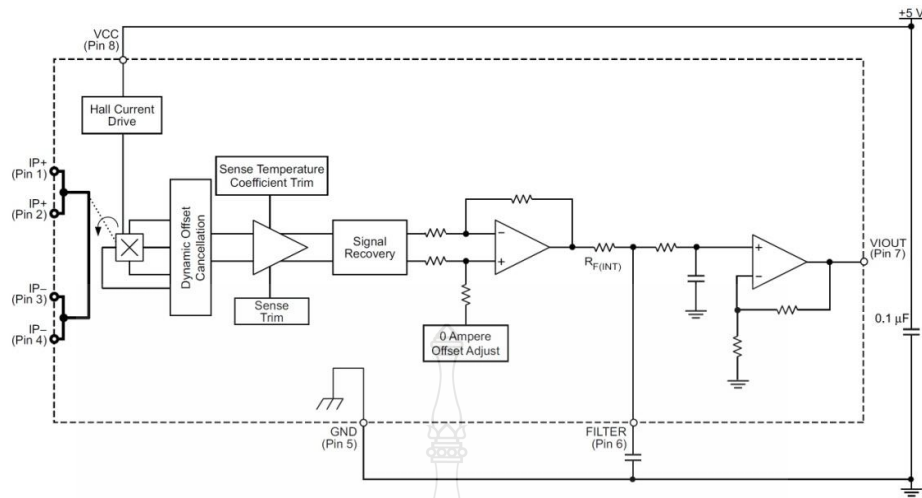
ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรถอนระดับแรงดันกำหนดตามพิกัดกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ **60W** แรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้คือ **25V** และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าสูงสุด **3.5A** ดังนั้นจึงเลือกใช้อิโอบีที เบอร์ **IRG4BC40K ultra-fast IGBT** แบบ **n-channel** ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ที่ **600V** และรับกระแสไฟฟ้าได้ **25A** และใช้ค่าแรงดันพัลส์ขับเคลื่อน $V_{GE}=15V$

3.4.1.5 การเลือกใช้อิโอดกำลัง

การเลือกพิกัดกระแสของไดโอดกำลังนั้นกำหนดจากกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจรถอนระดับแรงดันเป็น **3.5A** และค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น **25V** ดังนั้นเพื่อรักษาความปลอดภัยเท่ากับ **2.0** เท่า เพราะฉะนั้นกระแสของไดโอดจะได้เท่ากับ $3.5 \times 2.0 = 7A$ จึงเลือกใช้อิโอดกำลังเบอร์ **MUR460 Super-Fast Recovery Rectifier Diode** ซึ่งสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง **40A**

3.4.2 การออกแบบวงจรถวนตรวจจับกระแสขาออก

อุปกรณ์ตรวจจับกระแส (**Current Transducer**) นั้นทำหน้าที่ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรถวนระดับแรงดันจากนั้นเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยต่อตัวต้านทานเข้าไปที่ส่วนขาออกเพื่อส่งไปเข้ายังอุปกรณ์อินเตอร์เฟซการ์ดเพื่อไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ **IGBT** ต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ โมดูลวัดกระแสไฟฟ้า (**Current Sensor**) รุ่น **ACS712** ของบริษัท **Allegro** สามารถใช้แรงดันไฟเลี้ยง **VCC** ในช่วง **4.5V** ถึง **5.5V** และสามารถทนได้สูงสุด **8V** วัดกระแสได้สองทิศทางคือ (**AC** และ **DC**) และให้แรงดันเอาต์พุต **Vout** แบบเชิงเส้น มีค่า **output sensitivity** ในช่วง **66 mV/A** ถึง **185 mV/A** ถ้าไม่มีกระแสไหลจะได้ **Vout** เท่ากับ $VCC/2$ ถ้ามีกระแสไหลในทางบวก จะทำให้ **Vout** เพิ่มขึ้นสูงกว่า $VCC/2$ และถ้ามีกระแสไหลในทางลบ จะทำให้ **Vout** ลดลงต่ำกว่า $VCC/2$ ตัว **IC** เบอร์ ตัวไอซีมีขา **filter** สำหรับต่อตัวเก็บประจุเพิ่ม เพื่อใช้งานร่วมกับตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในตัวไอซี และทำหน้าที่เป็นวงจรถวน (**low-pass RC filter**) สำหรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต

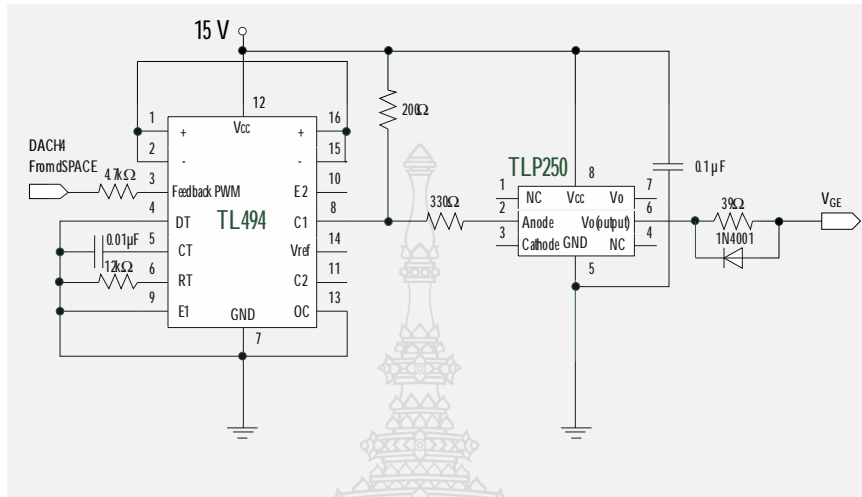


รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแส ACS712-05

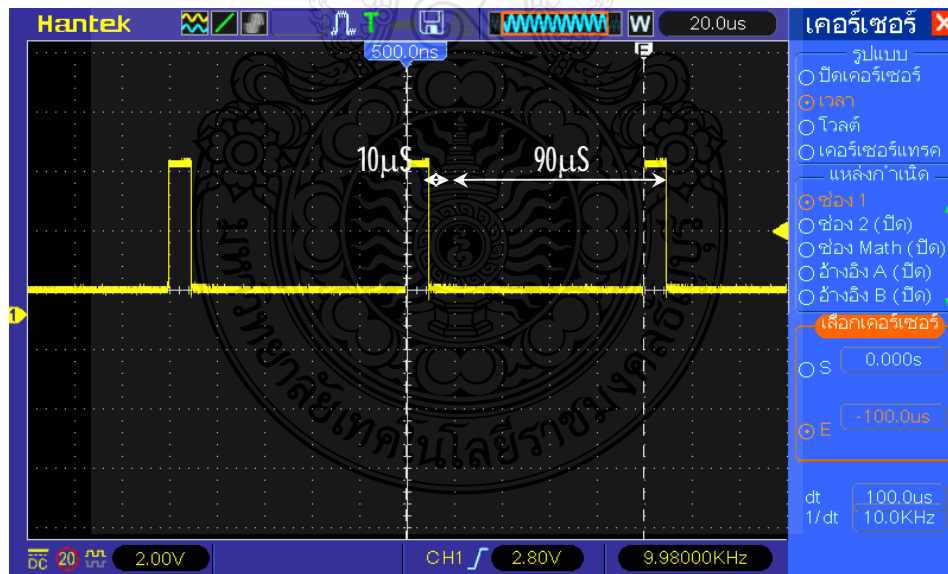
3.5 การออกแบบวงจรภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง

วงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลัง บอร์ดควบคุม STM32F4 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างความถี่ในการสวิตช์และค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้ โดยในกำหนดความถี่ที่เลือกใช้งานคือ 7.5kHz ซึ่งในการออกแบบวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุม วัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลัง จะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญด้วยกันคือ ส่วนแรก บอร์ดควบคุม STM32F4 เป็น วงจรที่ใช้กำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ที่ใช้ 5.5kHz ได้ โดยสัญญาณนี้จะถูกเลือกใช้ให้ส่งออกไปทางขา PA8 และสามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้ โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก STM32F4 นี้เกิดจากการตรวจจับค่ากระแสขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแล้วแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D) ส่งเข้าไปคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ผลที่ได้คือค่าแรงดันไฟฟ้าตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไฟฟ้าขาออก สัญญาณดิจิตอลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A) ส่งผ่านตัวต้านทาน 4.7kΩ มาเข้าขาที่ 3 ของไอซี TL494 เพื่อเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จากขา 5 ผลของการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองส่งผลให้สามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้นั่นเอง จากนั้นสัญญาณพัลส์จากขา 8 ของไอซี TL494 จะถูกส่งไปเข้าขา 2 ของไอซีเบอร์ TLP250 ก่อนที่จะนำไปขับเกตไอจีบีที เพื่อขยายสัญญาณให้ได้ 15VDC และเป็นการแยกการเชื่อมต่อระหว่างวงจรถ่ายทอดและวงจรควบคุมอีกด้วยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของวงจรถ่ายทอด สัญญาณพัลส์ขับ

เกตของไอจีบีทีจะได้จากขา 6 ของไอซีเบอร์ TLP250 วงจรภาคควบคุมวงจรถอนระดับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรภาคควบคุมของวงจรถอนระดับแรงดัน

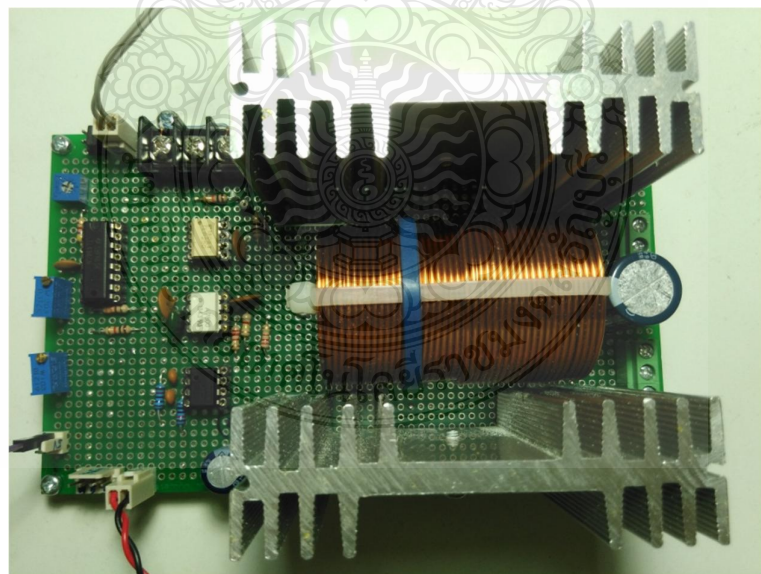


รูปที่ 3.9 สัญญาณพัลส์ขับเกตของไอจีบีที ที่คิวดีไซเคิลเป็น 10% ความถี่สวิตซ์ 10 kHz

ในรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณพัลส์ซับเกตที่ออกจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 2.8V ที่ความถี่ 10kHz แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณพื้นเลื้อยและสัญญาณจาก STM32F4 ของ ไอซี TL494 เพื่อกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ซับเกต และสัญญาณพัลส์ซับเกตที่ออกจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 2.8V ที่ความถี่ 10kHz

3.6 จัดสร้างและประกอบวงจรส่วนต่างๆให้เป็นระบบ

จากในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถนำมาจัดสร้างองค์ประกอบต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบต้นเวลาได้ดังนี้คือ วงจรภาคกำลัง โดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดันทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออกและแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งค่าอินพุตเข้าสู่การ์ดิอินเทอร์เฟซ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ซับเกตทำหน้าที่กำหนดค่าความถี่ของพัลส์ซับเกตที่เหมาะสมให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าตรงตามคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้บอร์ด STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.12 รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงองค์ประกอบของระบบทั้งหมด และลำดับการทำงานที่ใช้เพื่อการทดสอบเก็บข้อมูลต่างๆทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบต้นเวลา



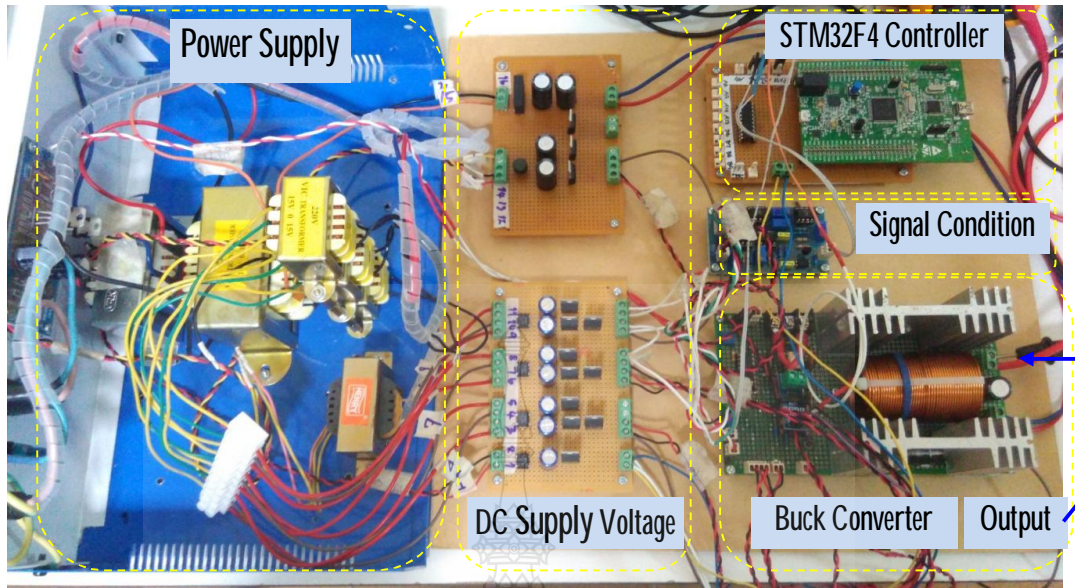
รูปที่ 3.10 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) และวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์



รูปที่ 3.11 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าออก



รูปที่ 3.12 STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.13 รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

สรุปในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากทฤษฎี และสมการที่เกี่ยวข้องจากบทที่ 2 รวมทั้งการออกแบบภาคควบคุม วงจรภาคกำลัง โดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน และการเลือกใช้อุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาได้ และนำไปใช้ในการทดลองในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของตัวแปรทั้ง 5 ต่อกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และในส่วนสุดท้ายจะเป็นผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา โดยมีลำดับขั้นการทำทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของตัวแปรเช่น

- ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)
- ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)
- ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิ (λ : Solar irradiance and T : Cell Temperature)

2. ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- ผลของความเข้มแสงแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60

3. ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติ

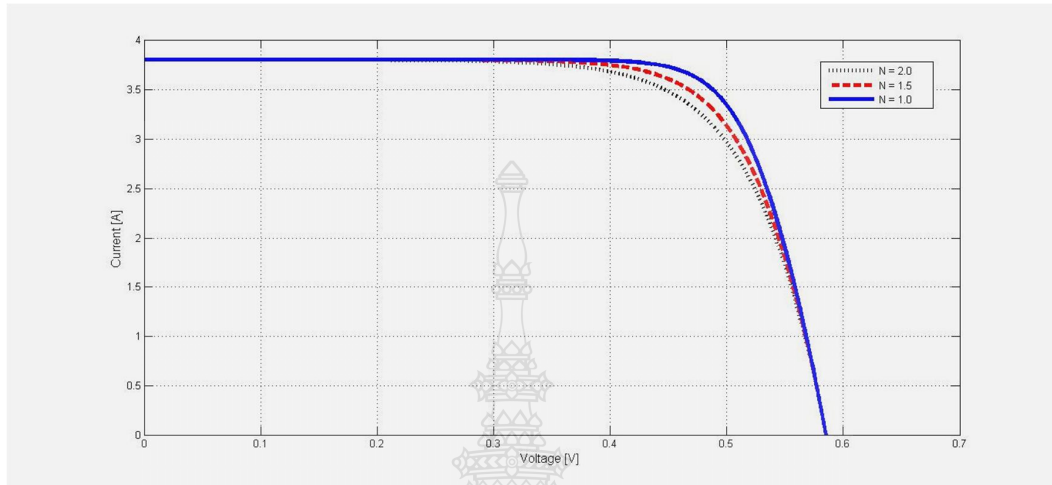
- ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดไม่มีการควบคุม
- ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดมีการควบคุมการป้อนกลับ

กระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี

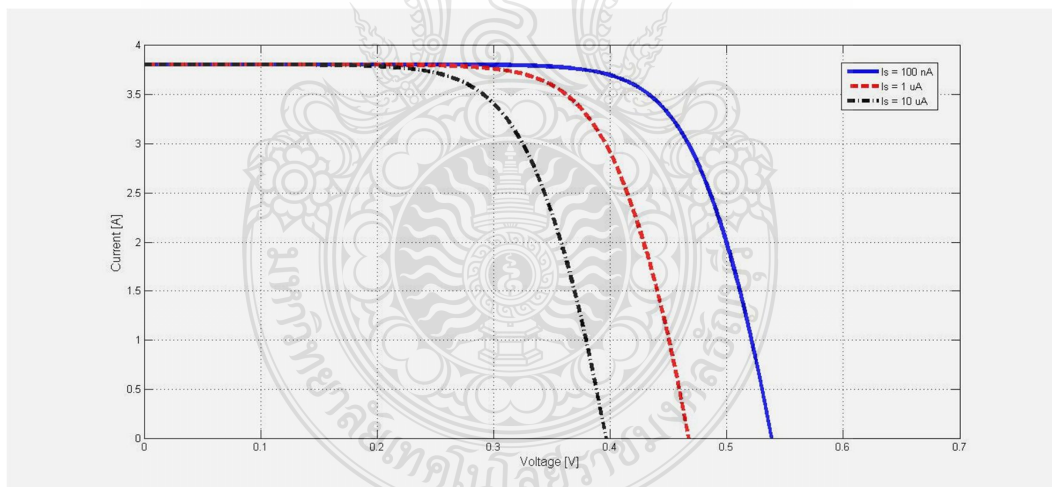
4.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3 สามารถจำลองผลกระทบของตัวแปรต่างๆทางไฟฟ้า ได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลของไดโอดและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



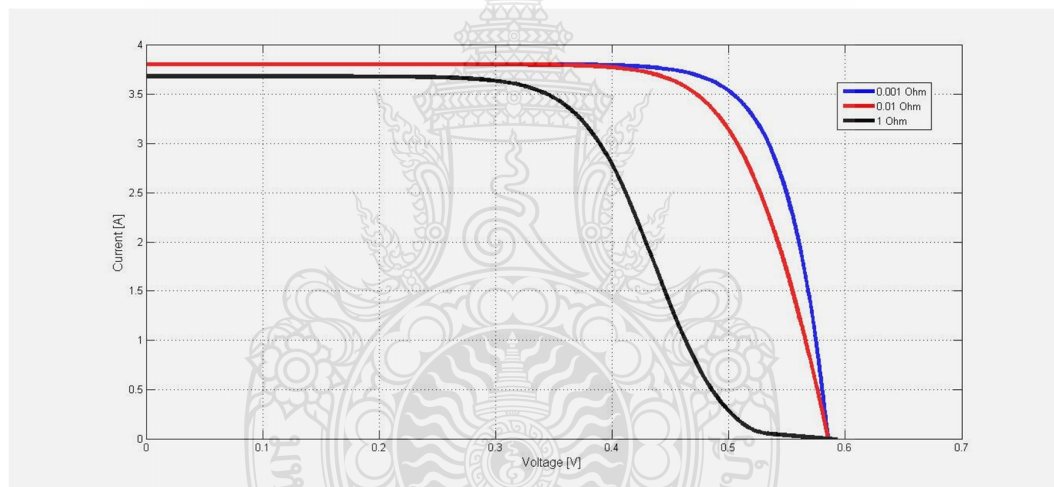
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า I_s ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ค่า N และ I_s เป็นผลจากไดโอด โดยโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน ค่า N มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเซลล์ เมื่อค่า N มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าน้อยสู่ค่ามากขึ้นคือจาก 1.0, 1.5 และ 2.0 จะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์

แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามรูปที่ 4.1 ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ารั่วในสภาวะอิ่มตัวขณะจ่ายไปอัสกลับหรือค่า I_s ที่มากขึ้นจาก 100nA, 1 μ A ถึง 10 μ A ตามรูปที่ 4.2 มีผลทำให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามลำดับ

4.1.2 ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)

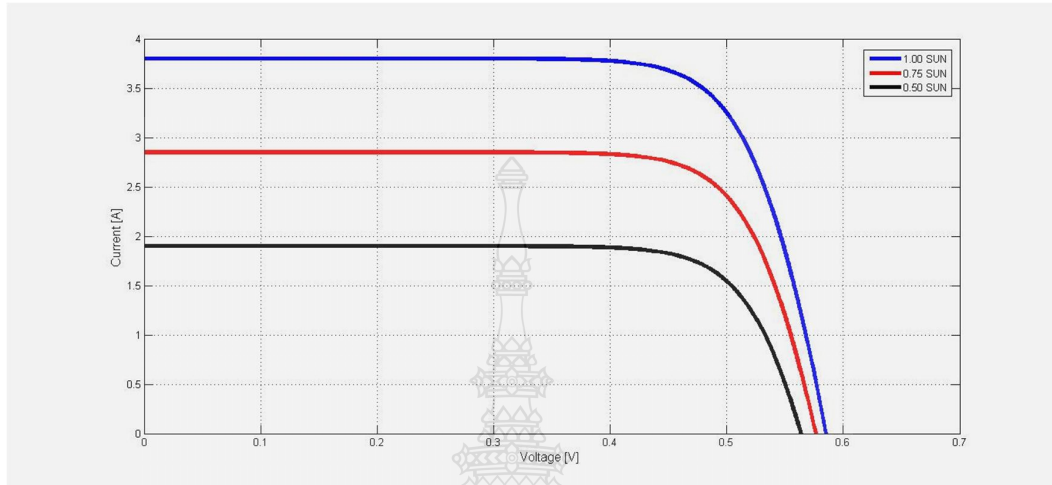
ค่า R_s เป็นค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับค่าความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [22] เมื่อ R_s มีค่า 0.001 Ω และ 0.01 Ω จะทำให้กราฟคุณลักษณะ (I-V Curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงเป็นตามกราฟคุณลักษณะของเซลล์ แต่เมื่อ R_s มีค่ามากขึ้นเป็น 1 Ω กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า R_s ต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

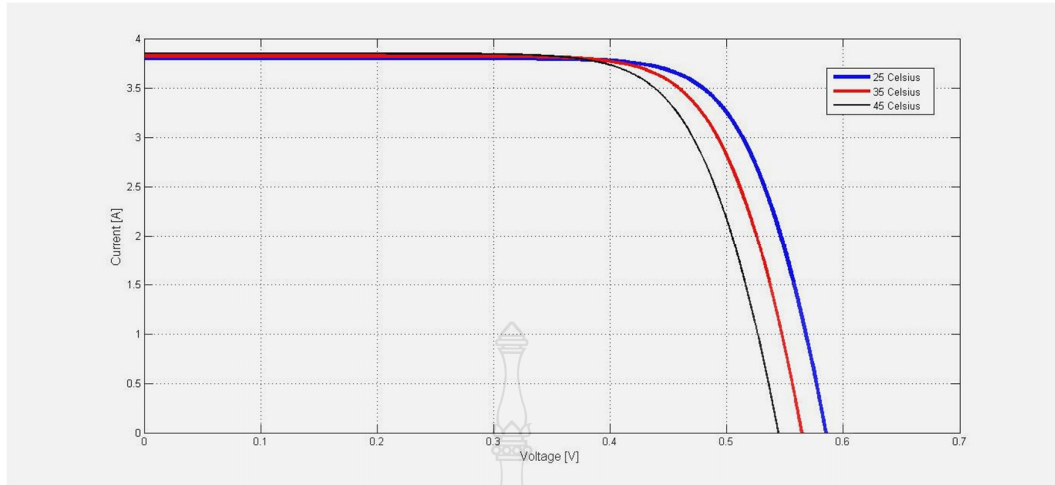
ส่วนค่าความต้านทานทั้งสองคือ R_s และ R_{sh} นั้นเป็นการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบของเซลล์ [22] เมื่อ R_{sh} มีค่าลดลงคือ 1 Ω , 0.01 Ω และ 0.001 Ω มีผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร [15] ทำให้กราฟกระแส-แรงดันมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมแต่ไม่มากนักโดยความต้านทานต้องมีค่ามากจึงจะเห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง แต่ PV module คือการรวมตัวกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ (ละเลย R_s , R_{sh})[6] ดังสมการที่ 2.6 ในบทที่ 2

4.1.3 ผลของความเข้มแสง (λ : Solar irradiance) และอุณหภูมิ (T : Cell Temperature)



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของค่า λ ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

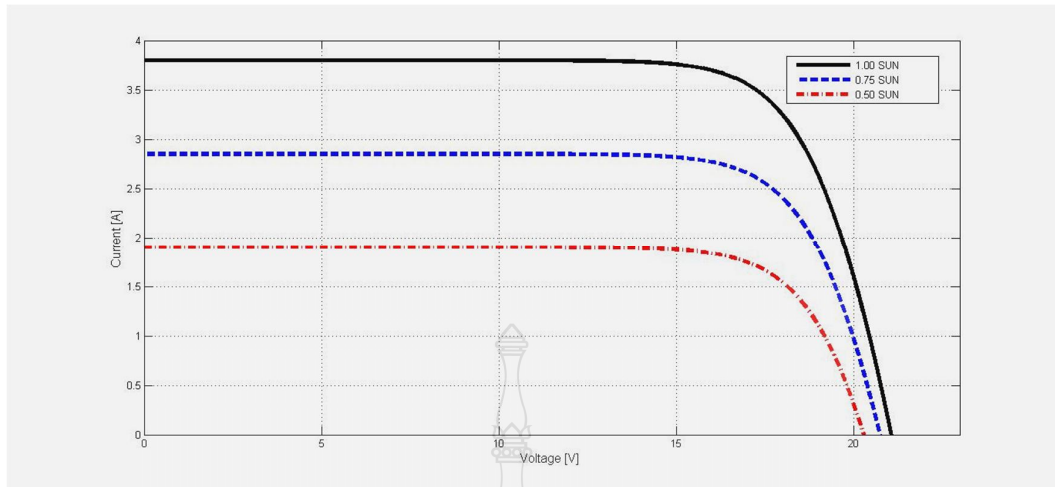
ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนด I_{sc} เป็น 3.8A ที่ STC (ความเข้มแสง 1000W/m^2 , อุณหภูมิ 25°C และ AM เป็น 1.5) ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสงเป็น 1.00SUN, 0.75 SUN และ 0.50 SUN ($T=25^\circ\text{C}$) ได้ผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ดังรูปที่ 4.4 ส่วนอุณหภูมิของแผงเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นตาม แต่ไม่มากนัก ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ 25°C , 35°C และ 45°C ($\lambda=1000\text{W/m}^2$) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 4.5 ดังนั้นในการติดตั้งใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิโดยรอบของเซลล์ด้วย



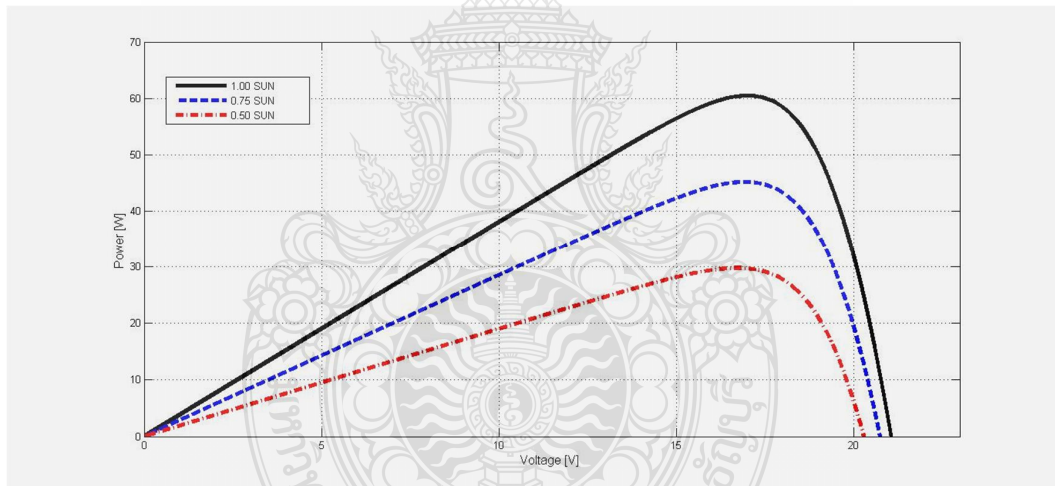
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2 ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

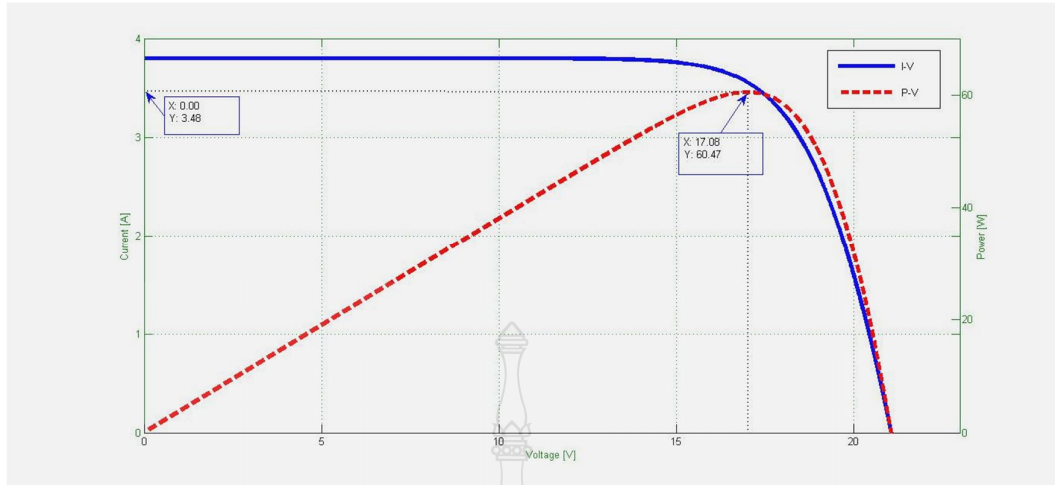
ในหนึ่งแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดจากความจำเป็นต้องเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้นนั้น มีวัตถุประสงค์มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกันตามความต้องการใช้งาน ในการจำลองได้นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์เพื่อเพิ่มขนาดแรงดัน และจำนวนทางขนานเป็น 1 ได้ผลกราฟ I-V curve ตามรูปที่ 4.6 และกราฟ P-V curve รูปที่ 4.7 ส่วนรูปที่ 4.8 เป็นกราฟของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในตารางที่ 4.1 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 0.78% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 0.12% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 0.57% ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เชื่อมต่อกับการ์ดอินเทอร์เฟซเพื่อสร้างสัญญาณจริงต่อไป



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของค่า λ ต่อ I-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของค่า λ ต่อ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.8 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60

Value	MSX-60	Simulation	Error
P_{max} (W)	60.0	60.47	0.78%
V_{mp} (V)	17.1	17.08	0.12%
I_{mp} (A)	3.5	3.48	0.57%

4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสมการเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนที่อยู่ใน STM32F4 controller จะทำหน้าที่คำนวณแรงดันอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าตัวที่ไซเคิลให้กับวงจรทอนระดับแรงดัน (BUCK Converter) โดยใช้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์เป็นสัญญาณอินพุตให้ STM32F4 controller

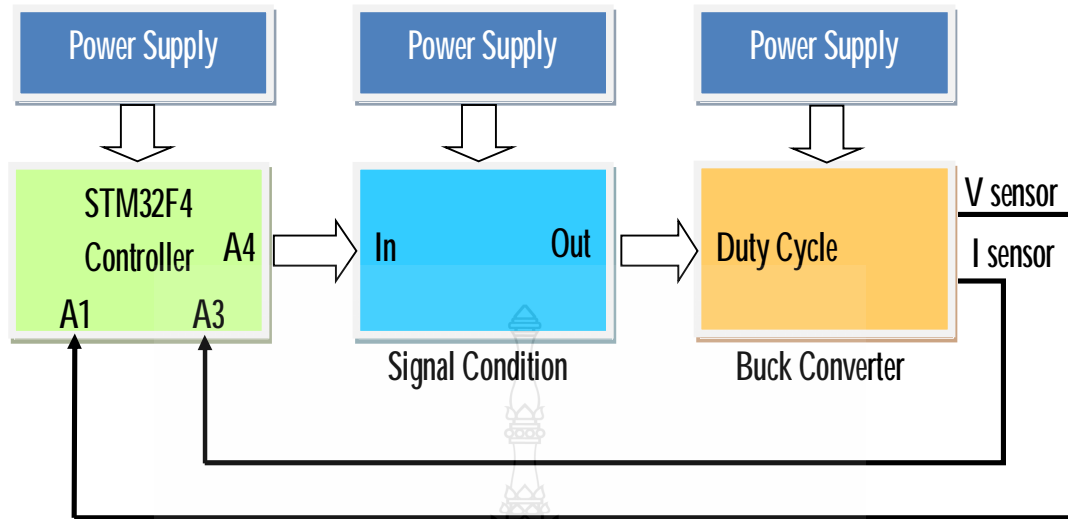
4.3.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

ก. Power Supply (25Vdc, 15Vdc, 5Vdc)	6 ชุด
ข. STM32F4 Controller Board	1 บอร์ด
ค. Converter N2 Controller Board	1 บอร์ด
ง. Computer (Note Book)	1 เครื่อง
จ. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง	1 แผง
ฉ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 325Ω , 1.2A	1 ตัว
ช. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 170Ω , 1.7A	1 ตัว
ซ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 15Ω , 5.5A	1 ตัว
ฅ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 500Ω , 6A	1 ตัว
ญ. คิวติคอล ออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง
ฎ. คิวติคอลมัลติมิเตอร์	2 เครื่อง

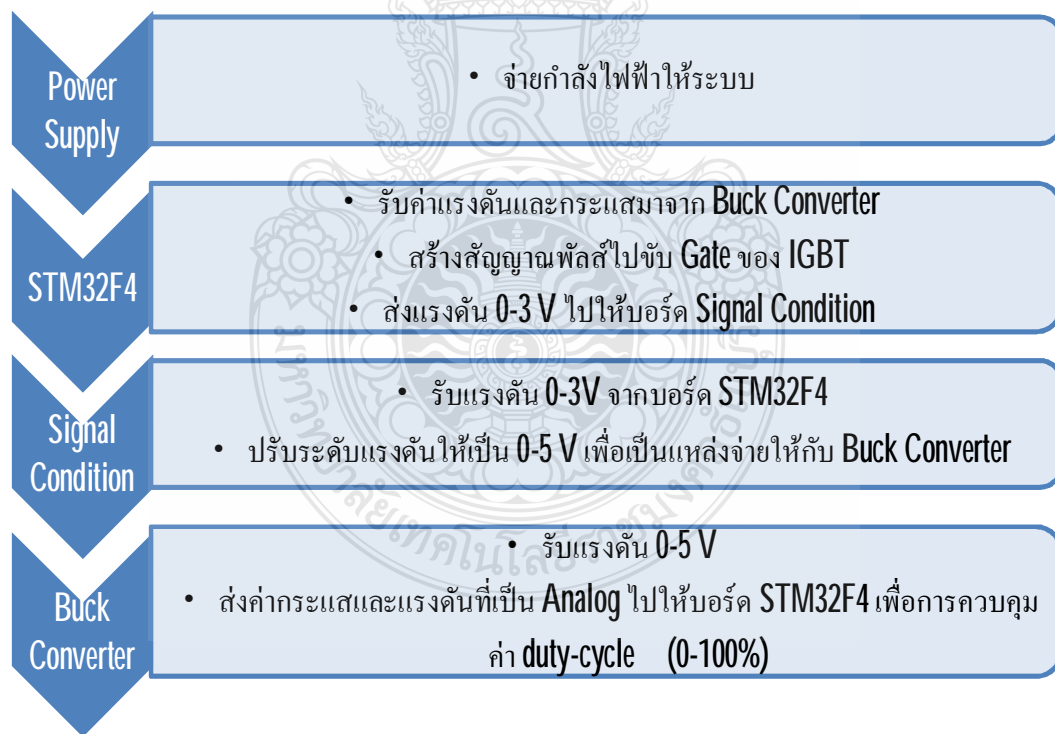
4.3.2 วงจรการทดลอง

การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันสมัยขั้นตอนดังต่อไปนี้

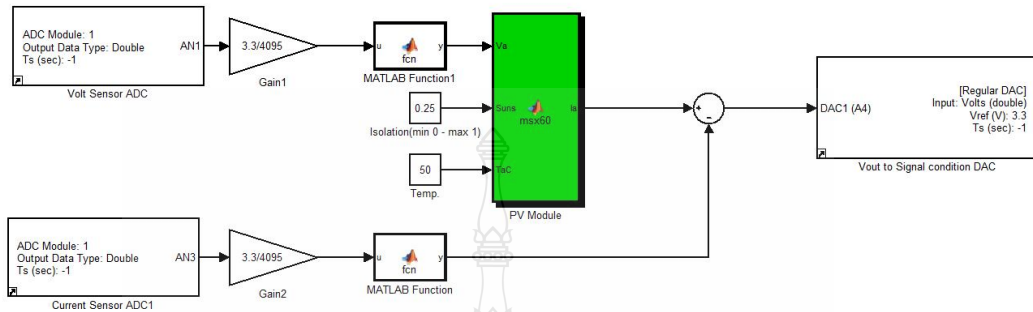
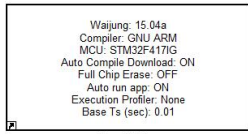
- เชื่อมต่อวงจรภาคกำลัง ภาคควบคุมและ โหลดตัวต้านทาน
- เชื่อมต่อ โปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เข้ากับชุดควบคุม
- เปิดแบบจำลอง **MATLAB/Simulink** เลือก **folder STM32F4** เลือก **file** ที่เขียนไว้สำหรับการทดลองแล้วทำการ **Update** และ **Built** ลงในบอร์ด **STM32F4**
- ปรับค่าความต้านทานเพื่อกำหนดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก
- บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออก
- เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- สรุปผลการทดลอง



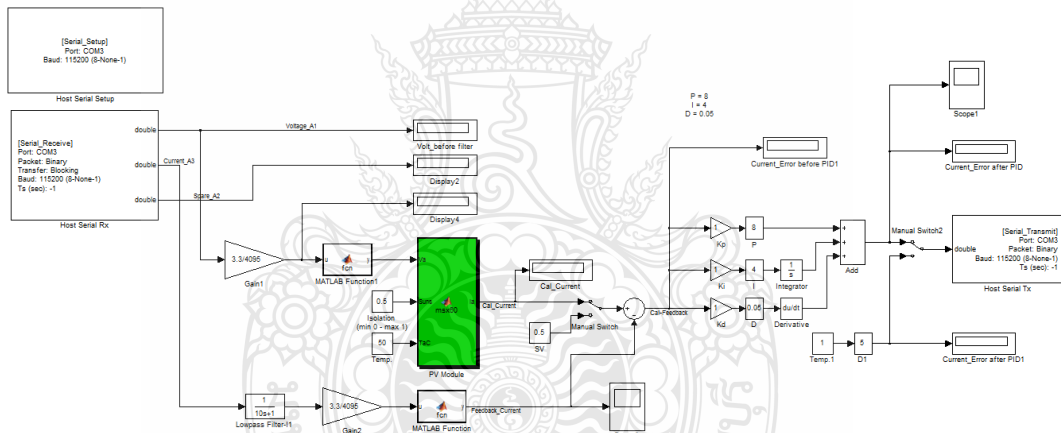
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา



รูปที่ 4.10 ลำดับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา



รูปที่ 4.11 การป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง



รูปที่ 4.12 วงจรการป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ชนิดมีการควบคุมแบบ พี ไอ ดี

4.3.3 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $250W/m^2$ อุณหภูมิ $25^{\circ}C$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า $7\Omega-27\Omega$ เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าจากการจำลอง การเปลี่ยนค่าความต้านทานทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ถูกส่งไปคำนวณค่าดีวีไอไซเคิลและขั้วเกตไอจีบีที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ STM32F4 controller) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	0.95	6.65	7.15	0.92	6.58	7.03	0.95	6.68	2.14	3.16	1.08	0.43	0.00	0.43
7.5	0.95	7.13	7.50	0.92	6.90	7.51	0.95	7.13	0.00	3.16	3.16	0.13	0.00	0.13
8.0	0.95	7.60	8.00	0.92	7.36	8.02	0.95	7.62	0.00	3.16	3.16	0.25	0.00	0.25
8.5	0.95	8.08	8.52	0.92	7.84	8.49	0.95	8.07	0.24	3.16	2.93	0.12	0.00	0.12
9.0	0.95	8.55	9.05	0.92	8.33	9.01	0.95	8.56	0.56	3.16	2.62	0.11	0.00	0.11
9.5	0.95	9.03	9.59	0.91	8.73	9.52	0.95	9.04	0.95	4.21	3.30	0.21	0.00	0.21
10.0	0.95	9.50	9.93	0.91	9.04	10.03	0.94	9.43	0.70	4.21	4.88	0.30	1.05	0.76
10.5	0.95	9.98	10.48	0.91	9.54	10.52	0.94	9.89	0.19	4.21	4.39	0.19	1.05	0.86
11.0	0.95	10.45	11.05	0.91	10.06	11.03	0.94	10.37	0.45	4.21	3.78	0.27	1.05	0.78
11.5	0.95	10.93	11.39	0.91	10.36	11.50	0.94	10.81	0.96	4.21	5.13	0.00	1.05	1.05
12.0	0.95	11.40	11.97	0.91	10.89	11.99	0.94	11.27	0.25	4.21	4.45	0.08	1.05	1.14
12.5	0.95	11.88	12.32	0.91	11.21	12.53	0.94	11.78	1.44	4.21	5.59	0.24	1.05	0.82

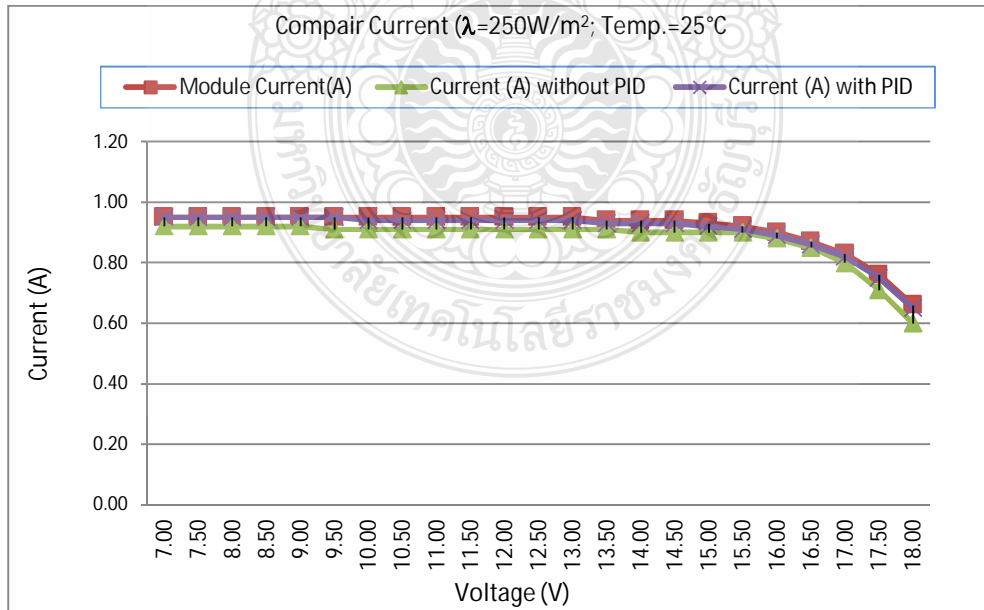
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	0.95	12.35	13.27	0.91	12.08	13.02	0.94	12.24	2.08	4.21	2.22	0.15	1.05	0.90
13.5	0.94	12.69	13.62	0.91	12.39	13.51	0.93	12.56	0.89	3.19	2.33	0.07	1.06	0.99
14.0	0.94	13.16	13.98	0.90	12.58	14.00	0.93	13.02	0.14	4.26	4.39	0.00	1.06	1.06
14.5	0.94	13.63	14.60	0.90	13.14	14.49	0.93	13.48	0.69	4.26	3.60	0.07	1.06	1.13
15.0	0.93	13.95	14.97	0.90	13.47	15.02	0.92	13.82	0.20	3.23	3.42	0.13	1.08	0.94
15.5	0.92	14.26	15.70	0.90	14.13	15.53	0.91	14.13	1.29	2.17	0.91	0.19	1.09	0.90
<u>16.0</u>	<u>0.90</u>	<u>14.40</u>	<u>16.16</u>	<u>0.88</u>	<u>14.22</u>	<u>16.00</u>	<u>0.89</u>	<u>14.24</u>	1.00	2.22	1.24	0.00	1.11	1.11
16.5	0.87	14.36	16.62	0.85	14.13	16.52	0.86	14.21	0.73	2.30	1.59	0.12	1.15	1.03
17.0	0.83	14.11	17.14	0.80	13.71	17.02	0.82	13.96	0.82	3.61	2.82	0.12	1.20	1.09
17.5	0.76	13.30	17.48	0.71	12.41	17.48	0.75	13.11	0.11	6.58	6.69	0.11	1.32	1.43
18.0	0.66	11.88	17.90	0.60	10.74	17.99	0.65	11.69	0.56	9.09	9.60	0.06	1.52	1.57

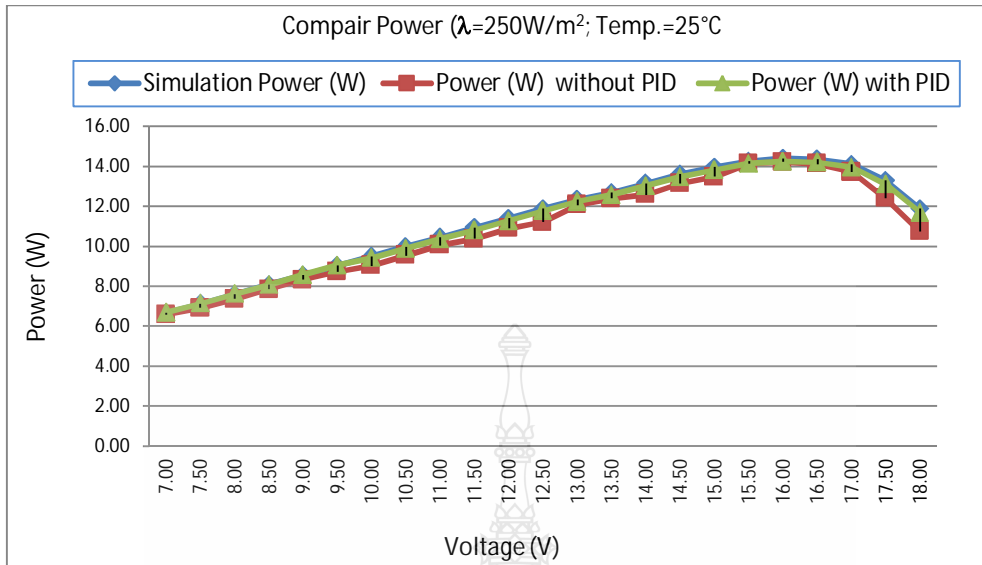
ในตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 14.40W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.0V กระแสไฟฟ้า 0.90A

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 14.22W ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.16V กระแสไฟฟ้า 0.88A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.24% ของแรงดันไฟฟ้า 1.0% และของกระแสไฟฟ้า 2.22%

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 14.24W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.00V กระแสไฟฟ้า 0.89A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.11% ของแรงดันไฟฟ้า 0.0% และของกระแสไฟฟ้า 1.11%

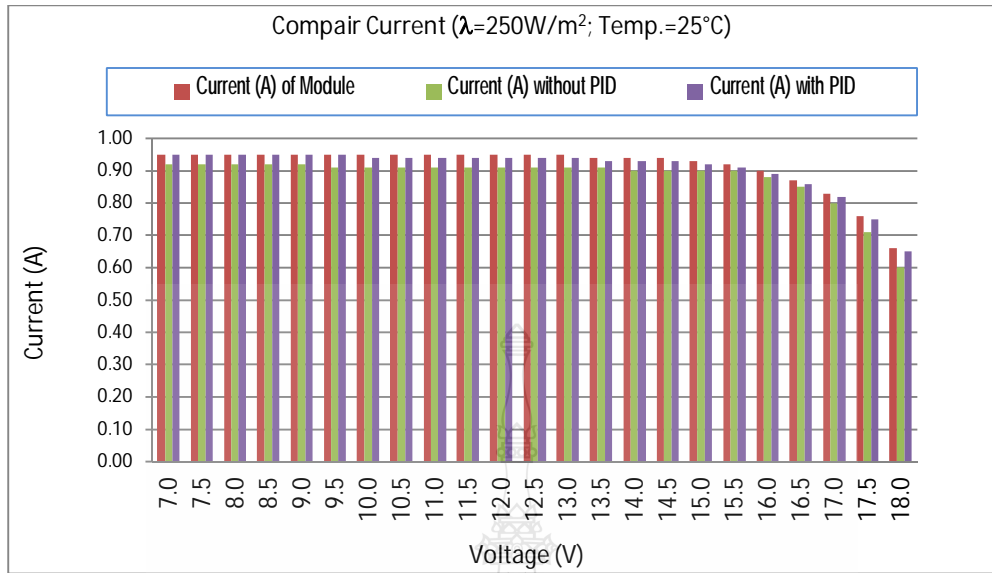


รูปที่ 4.13 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 25°C)

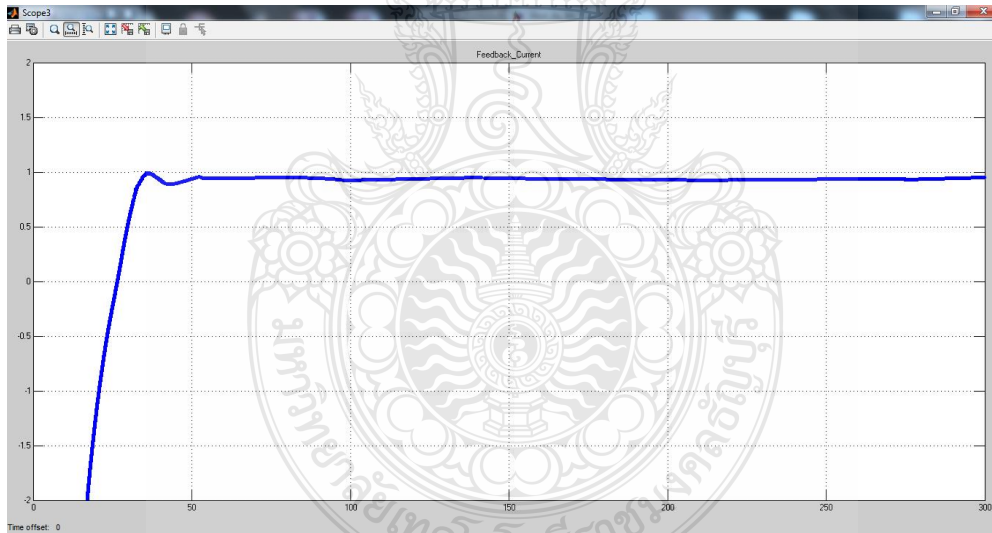


รูปที่ 4.14 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)

จากตารางที่ 4.2 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V-18V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พีไอ ดี ดังรูปที่ 4.13 ส่วนรูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)



รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับและที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.16 เป็น

ตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.94A อันเกิดจากการทดลองที่ 14 โหลด ที่ ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

4.3.4 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า 3Ω - 61Ω เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.3 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 29.75W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17V กระแสไฟฟ้า 1.75A ($\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 28.20W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.99V กระแสไฟฟ้า 1.66A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 5.20% ของแรงดันไฟฟ้า 0.06% และของกระแสไฟฟ้า 5.20%

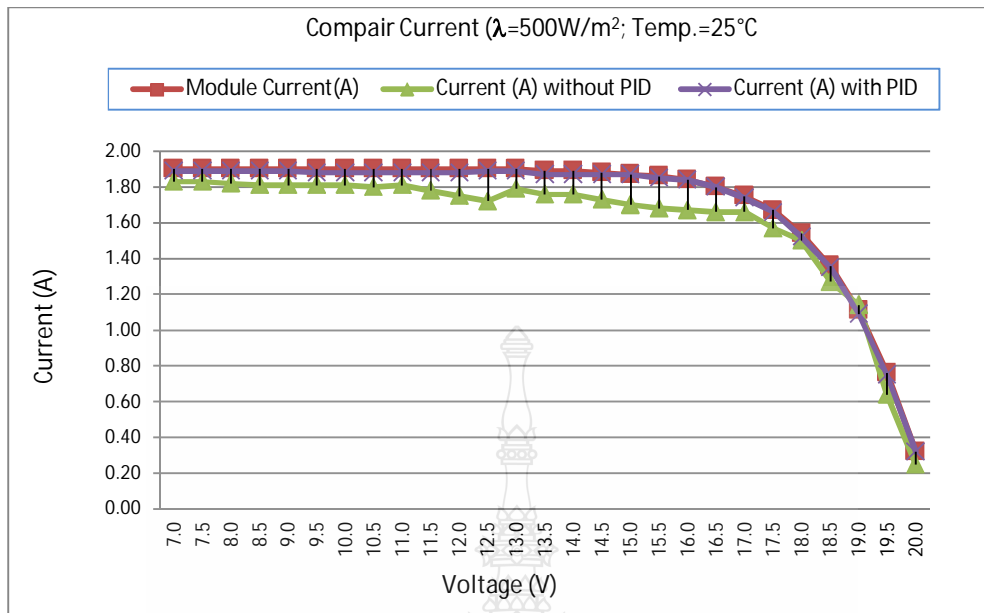
การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 29.60W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17.01V กระแสไฟฟ้า 1.74A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.51% ของแรงดันไฟฟ้า 0.12% และของกระแสไฟฟ้า 0.57%

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันทีที่ $\lambda=500 \text{ W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$

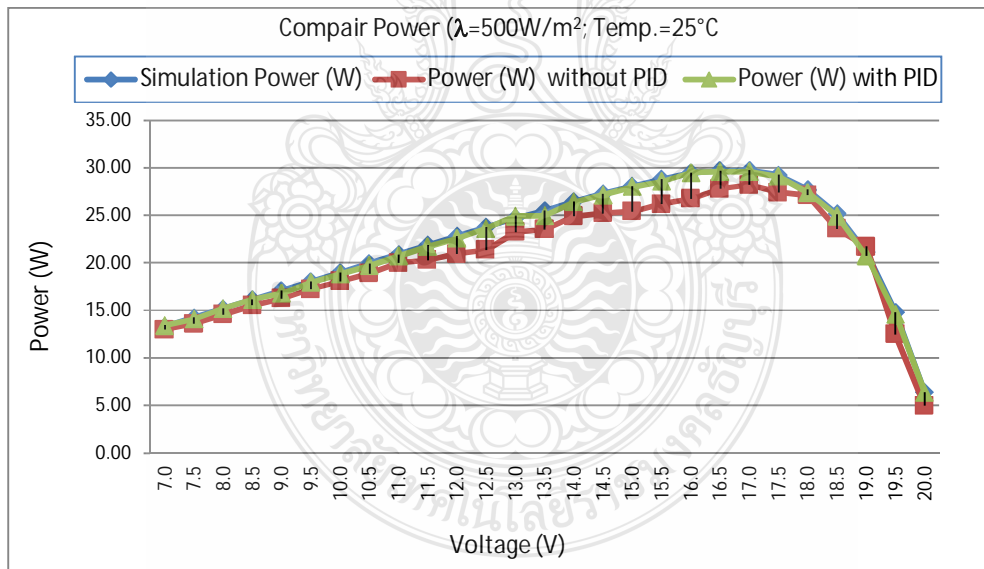
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	1.90	13.30	7.09	1.83	12.97	7.10	1.89	13.42	1.29	-3.68	-2.45	1.43	-0.53	0.89
7.5	1.90	14.25	7.43	1.83	13.60	7.45	1.89	14.08	-0.93	-3.68	-4.58	0.27	-0.53	-1.19
8.0	1.90	15.20	8.01	1.82	14.58	8.03	1.89	15.18	0.12	-4.21	-4.09	0.25	-0.53	-0.15
8.5	1.90	16.15	8.58	1.81	15.53	8.54	1.89	16.14	0.94	-4.74	-3.84	-0.47	-0.53	-0.06
9.0	1.90	17.10	8.97	1.81	16.24	8.89	1.89	16.80	-0.33	-4.74	-5.05	-0.89	-0.53	-1.74
9.5	1.90	18.05	9.51	1.81	17.21	9.55	1.88	17.95	0.11	-4.74	-4.64	0.42	-1.05	-0.53
10.0	1.90	19.00	9.99	1.81	18.08	10.01	1.88	18.82	-0.10	-4.74	-4.83	0.20	-1.05	-0.95
10.5	1.90	19.95	10.50	1.80	18.90	10.49	1.88	19.72	0.00	-5.26	-5.26	-0.10	-1.05	-1.15
11.0	1.90	20.90	11.05	1.81	20.00	11.03	1.88	20.74	0.45	-4.74	-4.30	-0.18	-1.05	-0.78
11.5	1.90	21.85	11.40	1.78	20.29	11.54	1.88	21.70	-0.87	-6.32	-7.13	1.23	-1.05	-0.71
12.0	1.90	22.80	11.97	1.75	20.95	12.00	1.88	22.56	-0.25	-7.89	-8.12	0.25	-1.05	-1.05
12.5	1.90	23.75	12.42	1.72	21.36	12.49	1.89	23.61	-0.64	-9.47	-10.05	0.56	-0.53	-0.61
13.0	1.90	24.70	13.00	1.79	23.27	13.20	1.89	24.95	0.00	-5.79	-5.79	1.54	-0.53	1.00
13.5	1.89	25.52	13.35	1.76	23.50	13.35	1.87	24.96	-1.11	-6.88	-7.91	0.00	-1.06	-2.16

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=500 \text{ W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)	ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี				
	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
14.0	1.89	26.46	14.14	1.76	24.89	14.13	1.87	26.42	1.00	-6.88	-5.95	-0.07	-1.06	-0.14
14.5	1.88	27.26	14.58	1.73	25.22	14.52	1.87	27.15	0.55	-7.98	-7.47	-0.41	-0.53	-0.39
15.0	1.87	28.05	14.94	1.70	25.40	14.97	1.87	27.99	-0.40	-9.09	-9.45	0.20	0.00	-0.20
15.5	1.86	28.83	15.59	1.68	26.19	15.45	1.85	28.58	0.58	-9.68	-9.15	-0.90	-0.54	-0.86
16.0	1.84	29.44	16.00	1.67	26.72	16.02	1.84	29.48	0.00	-9.24	-9.24	0.12	0.00	0.12
16.5	1.80	29.70	16.73	1.66	27.77	16.44	1.80	29.59	1.39	-7.78	-6.49	-1.73	0.00	-0.36
17.0	1.75	29.75	16.99	1.66	28.20	17.01	1.74	29.60	-0.06	-5.14	-5.20	0.12	-0.57	-0.51
17.5	1.67	29.23	17.45	1.57	27.40	17.51	1.66	29.07	-0.29	-5.99	-6.26	0.34	-0.60	-0.54
18.0	1.54	27.72	18.07	1.50	27.11	18.02	1.52	27.39	0.39	-2.60	-2.22	-0.28	-1.30	-1.19
18.5	1.36	25.16	18.55	1.27	23.56	18.47	1.35	24.93	0.27	-6.62	-6.37	-0.43	-0.74	-0.90
19.0	1.11	21.09	19.04	1.14	21.71	19.01	1.09	20.72	0.21	2.70	2.92	-0.16	-1.80	-1.75
19.5	0.76	14.82	19.52	0.64	12.49	19.50	0.75	14.63	0.10	-15.79	-15.70	-0.10	-1.32	-1.32
20.0	0.32	6.40	19.85	0.25	4.96	19.92	0.32	6.37	-0.75	-21.88	0.00	0.35	0.00	-0.40



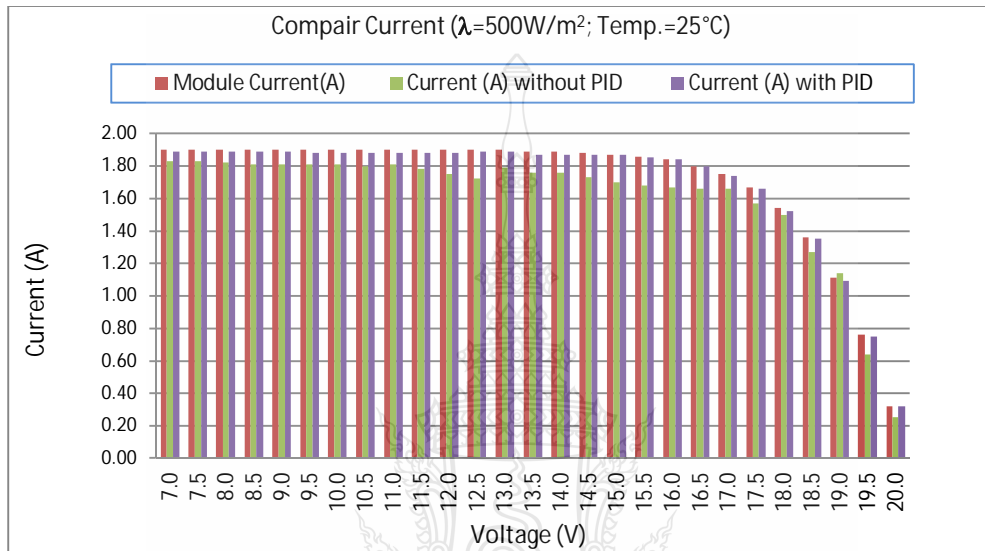
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)



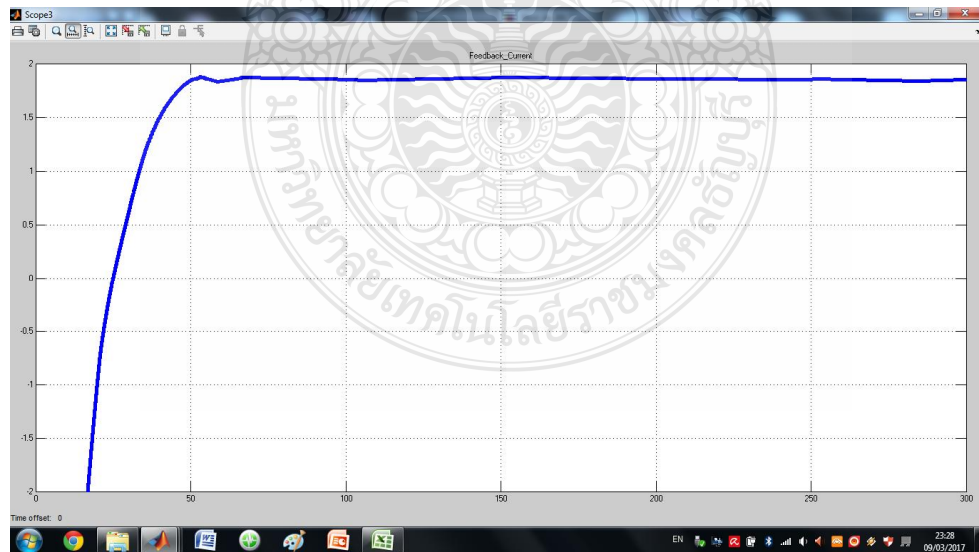
รูปที่ 4.18 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)

จากตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V-20V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.17 ส่วนรูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง (500W/m², 25°C)



รูปที่ 4.20 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 1.88A อันเกิดจากการทดลองที่ 6 โอคัม ที่ ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

4.3.5 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า 3Ω - 27Ω เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.4 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 14.4W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.0V กระแสไฟฟ้า 0.99A ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=50^{\circ}\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 14.22W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.16V กระแสไฟฟ้า 0.88A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.24% ของแรงดันไฟฟ้า 1.0% และของกระแสไฟฟ้า 2.22%

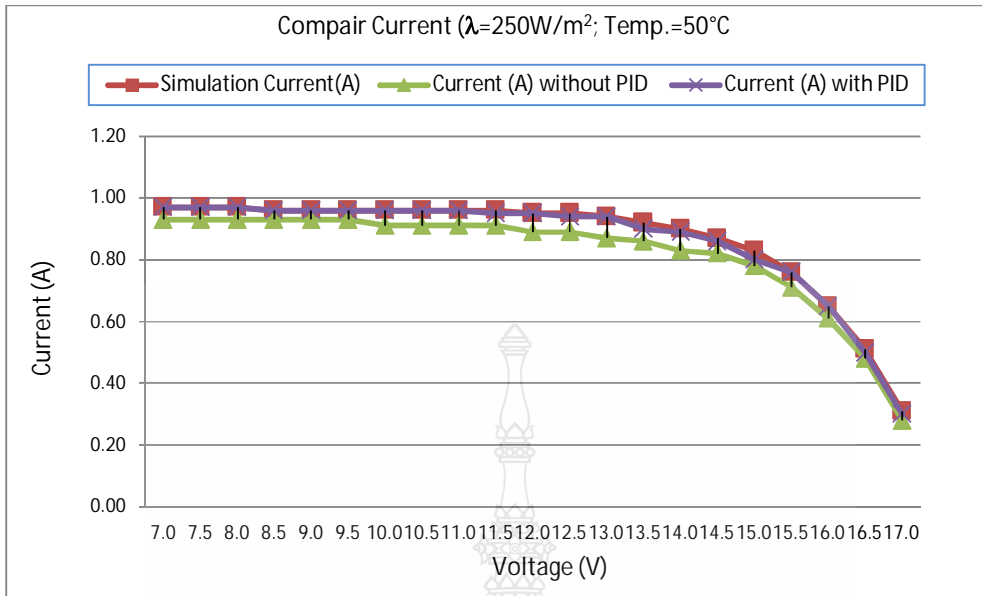
การทดลองในทางปฏิบัติที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 29.60W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17.01V กระแสไฟฟ้า 1.74A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.11% ของแรงดันไฟฟ้า 0.0% และของกระแสไฟฟ้า 1.11%

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาที่ $\lambda=250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$

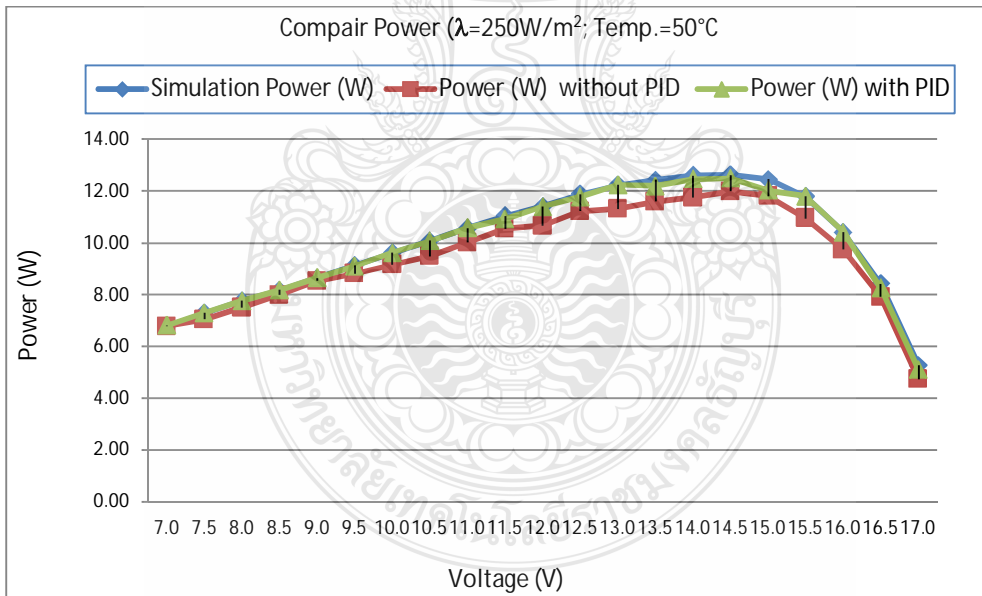
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	0.97	6.79	7.29	0.93	6.78	7.03	0.97	6.82	4.14	-4.12	-0.15	0.43	0.00	0.43
7.5	0.97	7.28	7.57	0.93	7.04	7.52	0.97	7.29	0.93	-4.12	-3.23	-0.66	0.00	0.27
8.0	0.97	7.76	8.06	0.93	7.50	8.00	0.97	7.76	0.75	-4.12	-3.40	-0.74	0.00	0.00
8.5	0.96	8.16	8.59	0.93	7.99	8.51	0.96	8.17	1.06	-3.12	-2.10	-0.93	0.00	0.12
9.0	0.96	8.64	9.16	0.93	8.52	9.01	0.96	8.65	1.78	-3.12	-1.40	-1.64	0.00	0.11
9.5	0.96	9.12	9.48	0.93	8.82	9.48	0.96	9.10	-0.21	-3.12	-3.33	0.00	0.00	-0.21
10.0	0.96	9.60	10.07	0.91	9.16	10.01	0.96	9.61	0.70	-5.21	-4.54	-0.60	0.00	0.10
10.5	0.96	10.08	10.42	0.91	9.48	10.49	0.96	10.07	-0.76	-5.21	-5.93	0.67	0.00	-0.10
11.0	0.96	10.56	10.99	0.91	10.00	11.01	0.96	10.57	-0.09	-5.21	-5.29	0.18	0.00	0.09
11.5	0.96	11.04	11.59	0.91	10.55	11.49	0.95	10.92	0.78	-5.21	-4.47	-0.86	-1.04	-1.13
12.0	0.95	11.40	11.97	0.89	10.65	12.00	0.95	11.40	-0.25	-6.32	-6.55	0.25	0.00	0.00
12.5	0.95	11.88	12.60	0.89	11.21	12.52	0.94	11.77	0.80	-6.32	-5.57	-0.63	-1.05	-0.89

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบที่ $\lambda=250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	0.94	12.22	13.00	0.87	11.31	13.02	0.94	12.24	0.00	-7.45	-7.45	0.15	0.00	0.15
13.5	0.92	12.42	13.47	0.86	11.58	13.54	0.90	12.19	-0.22	-6.52	-6.73	0.52	-2.17	-1.88
14.0	0.90	12.60	14.15	0.83	11.74	14.00	0.89	12.46	1.07	-7.78	-6.79	-1.06	-1.11	-1.11
<u>14.5</u>	<u>0.87</u>	<u>12.62</u>	<u>14.61</u>	<u>0.82</u>	<u>11.98</u>	<u>14.52</u>	<u>0.86</u>	<u>12.49</u>	0.76	-5.75	-5.03	-0.62	-1.15	-1.01
15.0	0.83	12.45	15.14	0.78	11.81	15.02	0.80	12.02	0.93	-6.02	-5.15	-0.79	-3.61	-3.49
15.5	0.76	11.78	15.42	0.71	10.95	15.52	0.76	11.80	-0.52	-6.58	-7.06	0.65	0.00	0.13
16.0	0.65	10.40	15.95	0.61	9.73	16.00	0.65	10.40	-0.31	-6.15	-6.45	0.31	0.00	0.00
16.5	0.51	8.42	16.50	0.48	7.92	16.50	0.50	8.25	0.00	-5.88	-5.88	0.00	-1.96	-1.96
17.0	0.31	5.27	16.88	0.28	4.73	17.03	0.30	5.11	-0.71	-9.68	-10.31	0.89	-3.23	-3.06



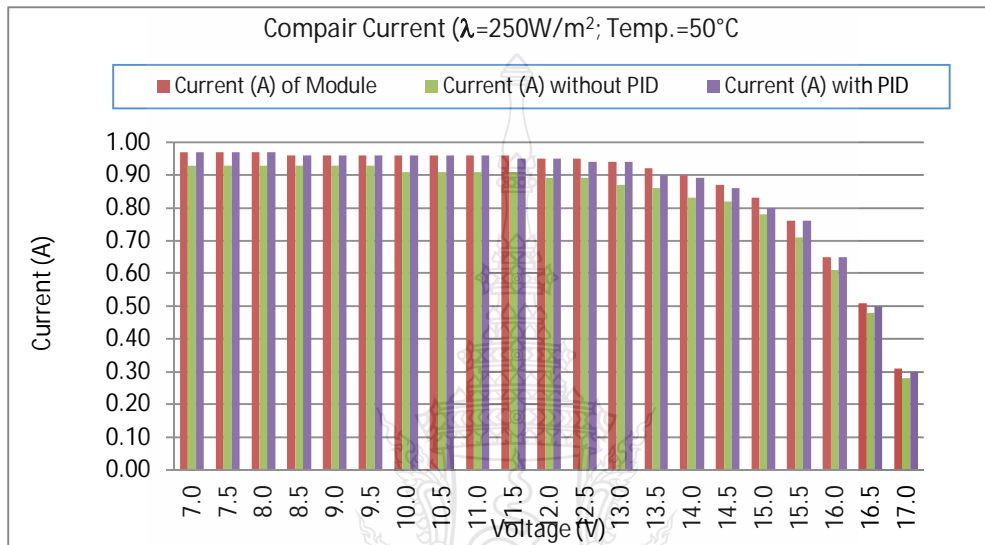
รูปที่ 4.21 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)



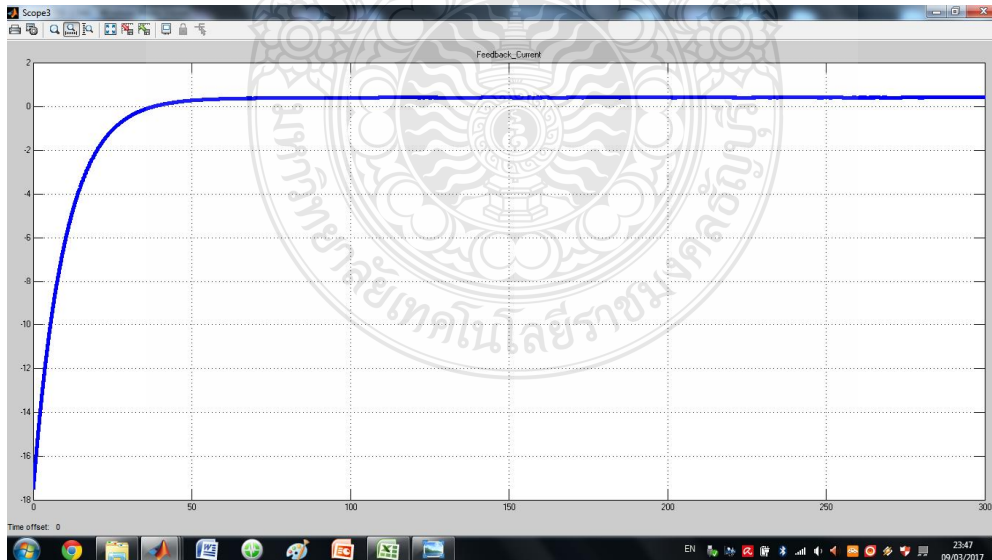
รูปที่ 4.22 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)

จากตารางที่ 4.4 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V-17V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.21 ส่วนรูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)



รูปที่ 4.24 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี (250W/m^2 , 50°C)

รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.24 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรทอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.3A อันเกิดจากการทดลองที่ 55 โห้หม ที่ ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

4.3.6 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า $3\Omega-45\Omega$ เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.5 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 26.33W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15.0V กระแสไฟฟ้า 1.76A ($\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 25.49W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15.64V กระแสไฟฟ้า 1.63A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.53% ของแรงดันไฟฟ้า 0.9% และของกระแสไฟฟ้า 2.4%

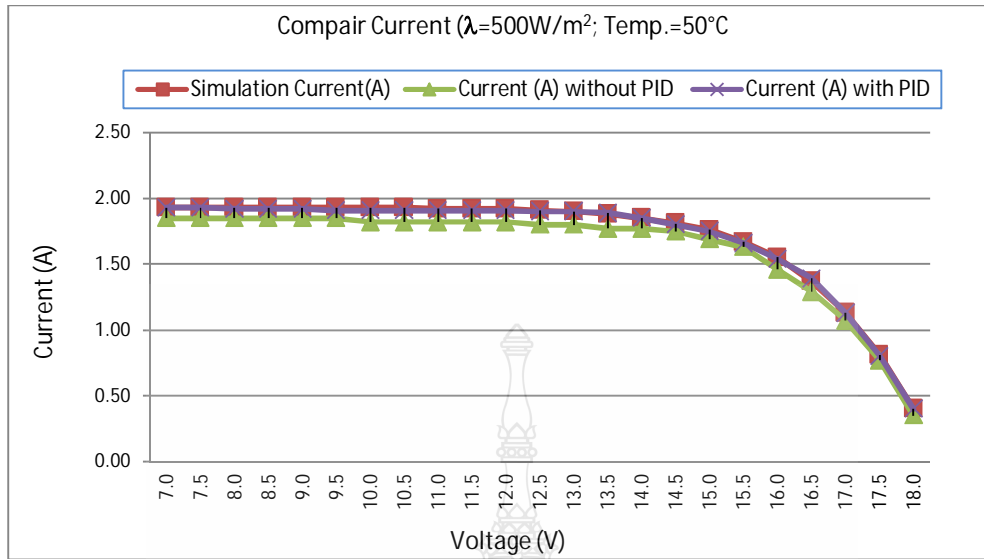
การทดลองในทางปฏิบัติที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 26.23W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 14.99V กระแสไฟฟ้า 1.75A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.37% ของแรงดันไฟฟ้า 0.07% และของกระแสไฟฟ้า 0.57%

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันทีที่ $\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$

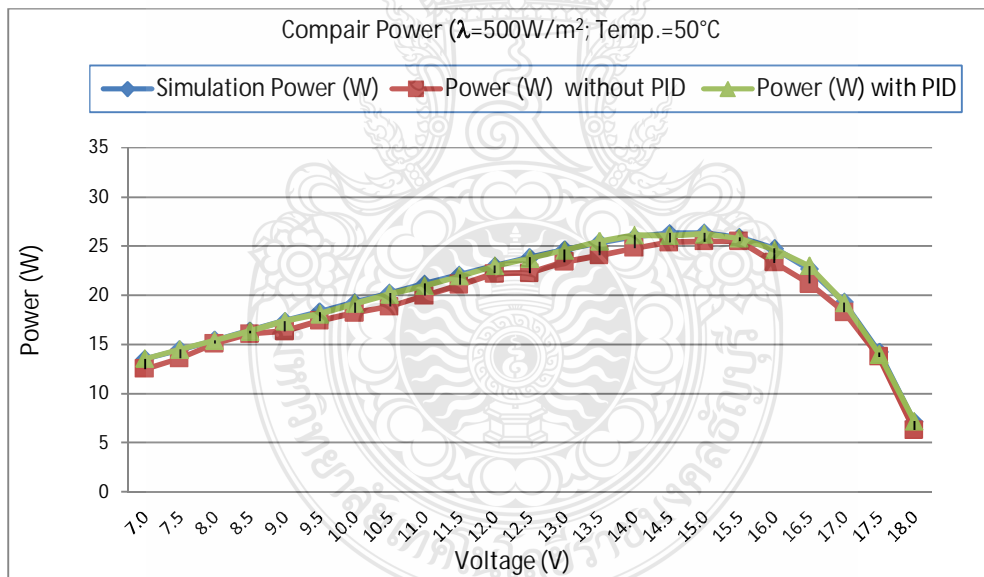
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	1.93	13.5	6.76	1.85	12.51	7.02	1.93	13.55	-3.43	-4.15	-7.36	0.29	0.00	0.36
7.5	1.93	14.47	7.33	1.85	13.56	7.51	1.93	14.49	-2.27	-4.15	-6.29	0.13	0.00	0.17
8.0	1.93	15.43	8.14	1.85	15.06	8.02	1.92	15.40	1.75	-4.15	-2.40	0.25	-0.52	-0.20
8.5	1.93	16.4	8.70	1.85	16.10	8.50	1.92	16.32	2.35	-4.15	-1.86	0.00	-0.52	-0.49
9.0	1.93	17.36	8.82	1.85	16.32	9.04	1.92	17.36	-2.00	-4.15	-6.01	0.44	-0.52	-0.02
9.5	1.93	18.32	9.41	1.85	17.41	9.48	1.91	18.11	-0.95	-4.15	-4.98	-0.21	-1.04	-1.16
10.0	1.93	19.27	10.01	1.82	18.22	10.03	1.91	19.16	0.10	-5.70	-5.46	0.30	-1.04	-0.58
10.5	1.93	20.22	10.35	1.82	18.84	10.53	1.91	20.11	-1.43	-5.70	-6.84	0.29	-1.04	-0.53
11.0	1.92	21.15	10.96	1.82	19.95	10.98	1.91	20.97	-0.36	-5.21	-5.69	-0.18	-0.52	-0.84
11.5	1.92	22.08	11.57	1.82	21.06	11.48	1.91	21.93	0.61	-5.21	-4.63	-0.17	-0.52	-0.69
12.0	1.92	22.98	12.19	1.82	22.19	12.02	1.91	22.96	1.58	-5.21	-3.46	0.17	-0.52	-0.09
12.5	1.91	23.84	12.37	1.80	22.27	12.48	1.90	23.71	-1.04	-5.76	-6.60	-0.16	-0.52	-0.54

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันทีที่ $\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	1.90	24.65	12.99	1.80	23.38	12.94	1.90	24.59	-0.08	-5.26	-5.14	-0.46	0.00	-0.26
13.5	1.88	25.35	13.59	1.77	24.05	13.47	1.89	25.46	0.67	-5.85	-5.11	-0.22	0.53	0.43
14.0	1.85	25.93	14.01	1.77	24.80	14.11	1.85	26.10	0.07	-4.32	-4.37	0.79	0.00	0.67
14.5	1.81	26.29	14.51	1.75	25.39	14.47	1.80	26.05	0.07	-3.31	-3.41	-0.21	-0.55	-0.93
<u>15.0</u>	<u>1.76</u>	<u>26.33</u>	15.07	1.69	25.47	<u>14.99</u>	<u>1.75</u>	<u>26.23</u>	0.47	-3.98	-3.27	-0.07	-0.57	-0.37
15.5	1.67	25.89	<u>15.64</u>	<u>1.63</u>	<u>25.49</u>	15.53	1.66	25.78	0.90	-2.40	-1.53	0.19	-0.60	-0.43
16.0	1.55	24.77	15.98	1.46	23.33	16.01	1.54	24.66	-0.12	-5.81	-5.81	0.06	-0.65	-0.46
16.5	1.37	22.67	16.39	1.29	21.14	16.52	1.39	22.96	-0.67	-5.84	-6.74	0.12	1.46	1.29
17.0	1.13	19.28	17.08	1.07	18.28	17.02	1.13	19.23	0.47	-5.31	-5.21	0.12	0.00	-0.25
17.5	0.81	14.22	17.81	0.77	13.71	17.49	0.80	13.99	1.77	-4.94	-3.56	-0.06	-1.23	-1.60
18.0	0.40	7.13	18.00	0.35	6.30	18.03	0.40	7.21	0.00	-12.50	-11.64	0.17	0.00	1.15



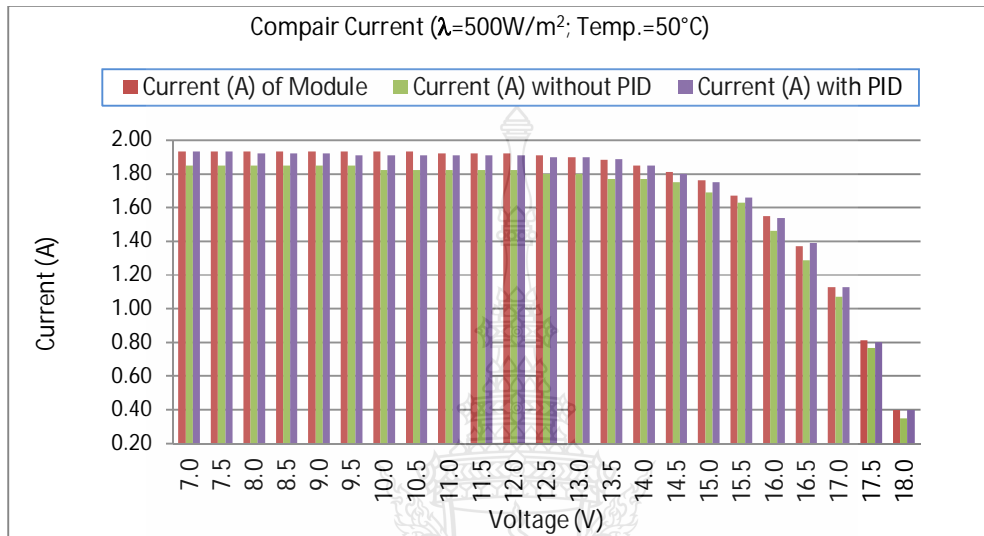
รูปที่ 4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 50°C)



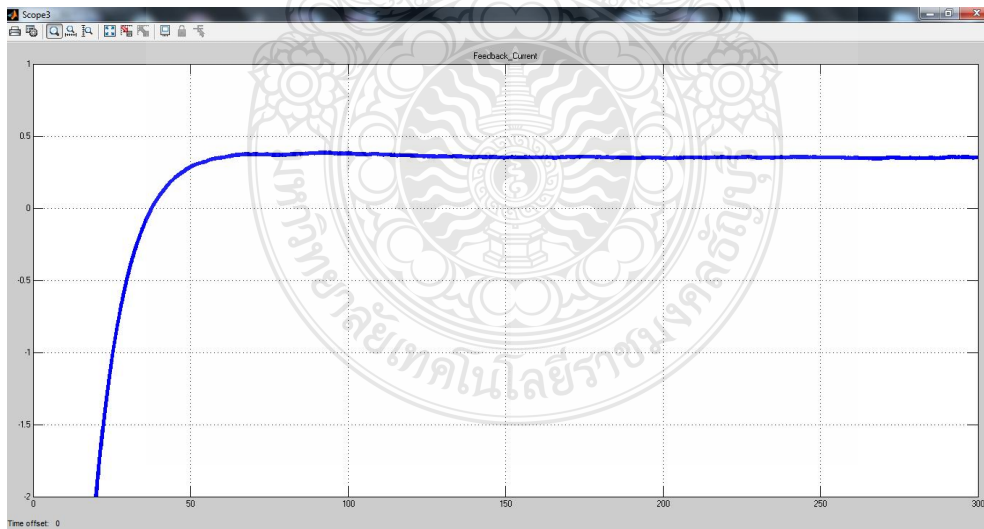
รูปที่ 4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 50°C)

จากตารางที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V - 18V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแส

แบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.25 ส่วนรูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W}/\text{m}^2$, 50°C)



รูปที่ 4.28 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.28 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.4A อันเกิดจากการทดลองที่ 45 โอคัม ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C

สรุปในบทที่ 4 เป็นการทดลองและบันทึกผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งหมดสี่การทดลองด้วยกันคือ

- 1) ที่ความเข้มแสง $250\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 25°C
- 2) ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 25°C
- 3) ที่ความเข้มแสง $250\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C
- 4) ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C

ซึ่งทั้งในการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วยเปรียบเทียบกระแสการจ่ายภาระโหลดตั้งแต่ 3-61 โอคัม ที่ไม่มีการควบคุมและมีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าแบบ พี ไอ ดี และผลของทั้งหมดสรุปอยู่ในบทที่ 5

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมและการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นค่าความเข้มแสง (Solar Irradiance) อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Cell Temperature), Ideal Factor, ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด (Reverse Saturation), กระแสไดโอด (Diode Current), ความต้านทานอนุกรม (Series Resistance), ต้านทานขนาน (Shunt Resistance) โดยการนำสมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มาสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการเขียนในรูปแบบของ m file โปรแกรม MATLAB/Simulink ใช้สำหรับศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว จากการทดลองในบทที่ 4 ทำให้มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆข้างต้น มากยิ่งขึ้น ส่วนที่สอง สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้สร้างไว้ในส่วนแรกด้วยการเชื่อมต่อผ่านทางการ์ดอินเทอร์เฟส (STM32F4 controller) ศึกษาทั้งชนิดที่ไม่มีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด และชนิดมีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดแบบ พี ไอ ดี ซึ่งผลจากการทดลองที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ พี ไอ ดี นั้น พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าจากระบบที่มีระบบการควบคุมการป้อนกลับกระแส มีค่าเข้าใกล้เคียงกับค่าจากผู้ผลิตตลอดช่วงของการทดลอง ทำให้ระบบการจ่ายโหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพโดยรวมใกล้เคียงกับค่าจากผู้ผลิต ทั้งยังทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดมีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเกณฑ์ดี จึงสรุปผลของการวิจัยจากทั้งสองส่วนข้างต้น ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่า Ideal Factor (N) ที่มากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น ค่า Reverse Saturation Current of Diode (I_s) ที่มากขึ้นทำให้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลง นั่นคือค่าผลของไดโอด (N, I_s) มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่า Series

Resistance (R_s) ที่มากขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมลดลงและค่า Shunt Resistance (R_{sh}) ที่น้อยลงก็ทำให้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลง ด้วย ซึ่งค่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่ดี ต้องทำให้ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นคือกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับกำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเข้าใกล้เคียง 1 หรือสามารถทำงานได้ 100%

สำหรับความเข้มของแสงอาทิตย์ Solar Irradiance (λ) จะเป็นตัวกำหนดกระแสของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงมาก กระแสไฟฟ้าขาออกของเซลล์ก็จะมากด้วย ส่วนค่าอุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Cell Temperature) จะเป็นผลกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ โดยแรงดันจะแปรผกผันกับอุณหภูมิกล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิที่รอยต่อสูงขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง

5.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดไม่มีการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกและมีการควบคุมการป้อนกลับป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออก แบบ พี ไอ ดี

ระบบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัญญาณจริงนั้นได้เลือกใช้วงจรภาคกำลังเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ที่ความถี่สวิตช์ 5.5 kHz ส่วนภาคควบคุมนั้นจะเป็นการควบคุมการมอดูเลตความกว้างพัลส์ให้ได้เหมาะสมกับกระแสไฟฟ้าขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้การปรับค่าที่โหลดตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ด้วยหลักการตรวจจับกระแสขาออกแล้วส่งไปยังอินเทอร์เฟซการ์ดเพื่อคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และ STM32F4 คอลโทลเลอร์ ซึ่งระบบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัญญาณจริงที่ไม่มีการควบคุมการ ค่ากระแสโหลดที่ได้จากการทดลองจะมีค่ากระแสไฟฟ้าคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองที่สร้างจากโปรแกรมก่อนข้างสูง ดังปรากฏในตารางที่ 5.1 ส่วนที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ตัวควบคุมจะตรวจสอบค่ากระแสที่รับเข้าแล้วชดเชยค่ากระแส จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากระแสกับแบบจำลอง ตัวควบคุมนี้จะปรับค่ากระแสให้ใกล้เคียงกับค่าที่จุดอ้างอิง (set point) ของแบบจำลอง แล้วส่งค่ากระแสที่ปรับแล้วไปให้กับวงจรทอนแรงดันเพื่อทำการจ่ายให้กับโหลดต่อไป จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกกับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่ผ่านการควบคุมแบบ พี ไอ ดี แล้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ จากการทดสอบ อ่านและบันทึกค่ากระแสและแรงดัน ด้วยบอร์ดประมวลผล Converter N2 เป็นตัวช่วย ซึ่งบอร์ดนี้ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเชื่อมโยงการรับส่งสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนของวงจรทอนแรงดันกับคอมพิวเตอร์ แล้วแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงเสมือนกับการแสดงผลจากออสซิลโลสโคป ซึ่งค่าที่ได้เป็นแบบทันทีเวลา (real time) สามารถใช้แทนออสซิลโลสโคปได้ ซึ่งผล

การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ในกรณีแรกเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และอุณหภูมิ เป็นดังตารางที่ 5.1 จากผลการทดลองและนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 4 พบว่าผลการทดลองและการจำลอง มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และส่วนของการ ควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของโพลด มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ซึ่งอยู่ผลอยู่ในเกณฑ์ดี มาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ใช้ทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง โดยสามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาและพัฒนารวมทั้งส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทนต่อไป

ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจากผลการทดลอง

ค่าความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ค่าความคลาดเคลื่อนชนิด ไม่มีการควบคุม			*ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดมีการ ควบคุมแบบ พี ไอ ดี ใน Current Control Loop		
		Voltage (%)	Current (%)	Power (%)	Voltage (%)	Current (%)	Power (%)
250	25	0.32	-3.93	-3.62	0.11	-0.83	-0.72
250	50	0.51	-5.57	-5.09	-0.21	-0.73	-0.64
500	25	0.06	-6.77	-5.88	0.06	-0.72	-0.65
500	50	-0.07	-5.09	-5.10	0.07	-0.36	-0.23

* Measurement accuracy for current up to 5A at Range 5kHz up to 20kHz $\pm 3.5\%$ refer to CTL Decision sheet no. DSH254E

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง และวิธีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ และ/หรืออุณหภูมิ ซึ่งพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง แต่จากผลโดยรวมยังพบค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระบบ หากจะศึกษาและพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้ อาจเพิ่มวิธีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมการป้อนกลับแบบอื่นๆ เพื่อให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโพลดได้เต็มร้อยเปอร์เซ็นต์ หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ราคาประหยัดแต่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการลดต้นทุน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย สำหรับสาขาบ้านและที่อยู่อาศัย สาขาเกษตรกรรม สาขาธุรกิจการค้า และขนส่ง มีการใช้พลังงานสูงขึ้นทุกปี โดยการใช้พลังงานในปี พ.ศ.2558 เพิ่มขึ้นจากปี 2557 ในสาขาบ้านและที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.8 ส่วนสาขาธุรกิจเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.0 มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากปีก่อน ทั้งภาคธุรกิจ ที่อยู่อาศัย โรงพยาบาล ร้านค้าปลีก ซึ่งการใช้พลังงานในการผลิตไฟฟ้า ในช่วง 11 เดือนของ ปี 2558 พบว่า มีการใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 69.7 ของการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด ส่วนหนึ่งของก๊าซที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น นำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นแนวทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติ

จากที่รัฐบาลมีนโยบายให้ใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยให้เพิ่มมากขึ้น กระทรวงพลังงานจึงได้มียุทธศาสตร์พลังงานโดยกำหนดนโยบายด้านพลังงานทดแทน และให้การสนับสนุนงานค้นคว้าพัฒนา วิจัยที่ใช้เทคโนโลยีด้านพลังงานเช่น ไฮโดรเจน และเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้รองรับการพัฒนาการใช้งานและการผลิตโดยทำทั้งในระดับการต่อยอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และในระดับที่คิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มาจากภูมิปัญญาคนไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ สร้างเทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ [1]

ประเทศไทยตั้งอยู่ในคาบสมุทรมอินโดจีน ใกล้เส้นศูนย์สูตรที่ตำแหน่งระหว่างเส้นรุ้งที่ 5° เหนือ ถึง 22° เหนือ และเส้นแวง 96° ตะวันออก ถึง 106° ตะวันออก จึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ของประเทศไทยโดยเฉลี่ยประมาณ $18.2\text{MJ}/\text{m}^2$ ต่อวัน ($5.05\text{kWh}/\text{m}^2$ ต่อวัน) [2] หากประเทศไทยสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ส่องลงมาบนพื้นที่ของประเทศไทยเพียงหนึ่งในร้อยส่วนของพื้นที่ทั้งหมดจะสามารถผลิตพลังงานเทียบเท่าการใช้ถ่านหินประมาณ 8 ล้านตันต่อปี[1]

ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อดีตรงที่ใช้ต้นทุนการผลิตสูง ทั้งในเรื่องของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การติดตั้ง และมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลมาทำการทดลอง ความไม่สม่ำเสมอของแสง และอุณหภูมิที่สูงต่ำที่ต่างกันจากดวงอาทิตย์ในแต่ละวัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้ สามารถที่จะใช้ประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยสามารถจ่ายโหลดได้

จริง หรือใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดความสะดวกโดยที่สามารถทดลองได้ในทุกช่วงเวลา อีกทั้งยังลดการใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาสูง เช่น เครื่องมือวัดพลังงานแสงอาทิตย์ หรือไพรานอมิเตอร์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้
2. เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
3. เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมค่าความถี่ไซเคิลของวงจรแปลงแรงดันระดับ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การศึกษาผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ผลของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากใช้การวัดจริงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือวัดหลายประเภท เช่น ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ใช้วัดค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์, มัลติมิเตอร์ใช้วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์ ตัวต้านทานและเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่แผงเซลล์ก็มีความจำเป็นในการศึกษาและวิจัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) อุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) แรงดันไฟฟ้าด้านออกขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage; V_{OC}) กระแสไฟฟ้าด้านออกขณะลัดวงจร (Short circuit current; I_{SC}) จำนวนเซลล์ที่นำมาต่อแบบขนานและแบบอนุกรม (number of parallel cells and number of series cells) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลของไดโอด เป็นต้น แล้วจึงพัฒนาให้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่สามารถจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้โหลดได้จริง สามารถศึกษาคุณลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ให้เหมาะสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานหรือพัฒนาระบบควบคุมในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 60W โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

2. สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามคุณลักษณะของโซลาร์เซลล์โดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน ซึ่งควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าขาออก โดยใช้หลักการควบคุมควิตซ์ไซเคิลผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4)

3. เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่ใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ศึกษาการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น

ก. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ข. ศึกษาคุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณความเข้มแสง ผลของอุณหภูมิ, ความต้านทาน, แรงดันขณะเปิดวงจร, กระแสขณะลัดวงจร และกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ค. ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการใช้งาน และการเขียนโปรแกรมเพื่อการออกแบบและวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์

ง. ศึกษาการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC Converter) เพื่อการสร้างสัญญาณจริง (Real-time) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง

1.5.3 การจำลองและออกแบบวงจรสำหรับคุณสมบัติการจ่ายกำลังงานขาออก

ก. กำหนดสมการตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ข. ออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ค. ออกแบบสร้างวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า

ง. ออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบที่โหลดเชิงเส้น

1.5.4 ขั้นตอนการทดลอง

ก. จำลองการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ข.เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ กับคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต (Typical Electrical Characteristic of PV Module)

ค.ทดสอบคุณลักษณะการจ่ายกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงกับแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ง.ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดแบบเชิงเส้น

1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตามผลขั้นตอนการทดลอง

1.5.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ มีขนาดไม่เกิน 60 W
2. การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองกำหนดค่าคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)
3. การควบคุมอัตราการจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบเวลาจริงนี้ ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F4)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
2. มีความรู้ความเข้าใจในผลกระทบของความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวแปรไดโอด, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
3. มีความรู้ความเข้าใจ เชื่อมต่อแบบจำลองกับการ์ดอินเตอร์เฟส STM32F4
4. มีความรู้ความเข้าใจ ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter)
5. มีความรู้ความเข้าใจ ต่อวงจรทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
6. มีความสะดวกในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาระบบควบคุมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, รายงาน ไฟฟ้าของประเทศ ไทย 2557
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ความเข้มแสง และ ศักยภาพเชิง พลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศ อ้างอิงจาก:
<http://www.dede.go.th/dede/index.php>
- [3] M.C. Di Piazza, M. Luna, G. Petrone, G. Spagnuolo, "About the Identification of the Single-Diode Model Parameters of High-Fill-Factor Photovoltaic Modules" IEEE, 2015, pp.85-91
- [4] A. Bilsalam J. Haema, I. Boonyaroonate and V. Chunkag, "Simulation and Study of Photovoltaic Cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load" 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea, pp.3033-3036
- [5] บุญยัง ปลั่งกลาง, "Photovoltaic Systems" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [6] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri, "Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification" INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 3, 2010, pp.487-500
- [7] Pilin Junsangsri and Fabrizio Lombardi. 2010 "Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model" 25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp.240-248
- [8] Wanchai Subsingha. 2008, Power Electronic (Academic book), Thailand. RMUTT Printing
- [9] ชานัญฤทธิ ธาราสันติสุข, MATLAB/Simulink for real-time control system with DS1104 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [10] จิระพล ศรีเสริฐผล, "Controller Design" อ้างอิง :
eng.sut.ac.th/me/box/2_55/425440/Controller_Design2_55.pdf
- [11] Yuan. Li1, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, and Dichen Liu1 "A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator" IEEE, 2009, pp.899-903

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Nilton E. M. Moçambique, Ricardo Q. Machado, Vilma A. Oliveira, "A Fuzzy PD-PI Control Strategy to Track the Voltage References of Photovoltaic Arrays", 2011, 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) Santiago, Chile, December 19-21, 2011, pp.1162-1167
- [13] D. Impreeda and W. Subsingha, "Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module Under the Single Diode Model", 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012, pp. 118-122
- [14] Zhang Jike, Wang Shengtie, "Design and Simulation of Digital PV Simulator Based on Push Pull Forward Converter" 2012, IEEE
- [15] Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho, "A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method" 2013, International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, 2013, Busan, Korea, pp.2128- 2131
- [16] Panchal Mandar Rajubhai, Dileep Kumar, "Modeling and Simulation of Photovoltaic Array with PMDC Motor in MATLAB/SIMULINK" International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 4 Issue 01, January-2015, pp.498-501
- [17] M. Abdulkadir, A. S. Samosir and A. H. M. Yatim, "MODELING AND SIMULATION BASED APPROACH OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN SIMULINK MODEL" VOL. 7, NO. 5, MAY 2012, ISSN 1819-6608, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, ©2006-2012 Asian Research Publishing Network (ARPN), pp.616-623
- [18] อ้างอิง : www.solar-greenpower.com
- [19] อ้างอิง : www.cleantechinvestor.com
- [20] อ้างอิง : <http://etap.com/renewable-energy/photovoltaic-101.htm>
- [21] อ้างอิง : <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
- [23] Ho Lee Min-Jung Lee, Se-Na Lee, Hwa-Chun Lee, Hae-Kon Nam, Sung-Jun Parkn "Development of Photovoltaic Simulator based on DC-DC Converter", INTELEC 09 M 31st International Telecommunications Energy Conference, 18-22 October 2009, Incheon, Korea



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน ประกอบไปด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ส่งผลผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทอนระดับแรงดัน การใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบและอุปกรณ์ควบคุม และการทบทวนบทความที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง หรืออีกนัยหนึ่งคือแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบ (เรียกว่า อิเล็กตรอน) และประจุบวก (เรียกว่า โฮล) ซึ่งอยู่ในภายใน โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ โดยโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นนี้จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไหลไปที่ขั้วบวก ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้า (เช่น หลอดไฟ มอเตอร์ เป็นต้น) ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิดกระแสตรง ดังนั้น ถ้าต้องการจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

2.2 เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

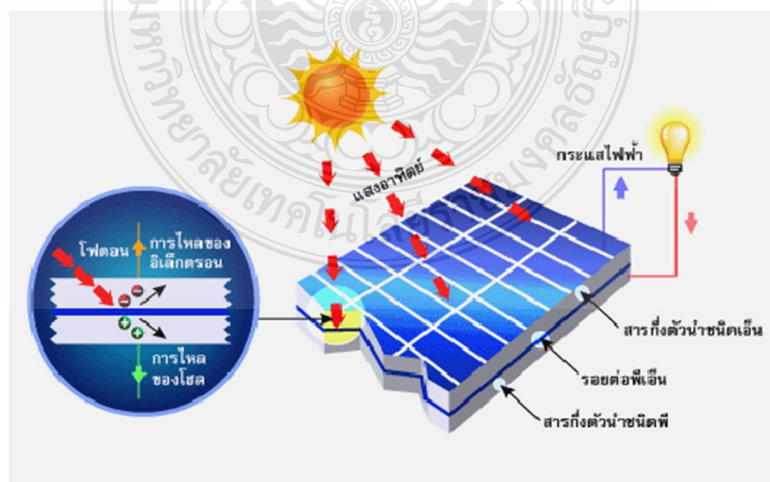
กระบวนการผลิตไฟฟ้า แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมาจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 จึงมีการรูปที่ ระเบิดุษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลเลอไรด์ (Cadmium

Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติที่เรียกว่า " ผลของโฟโตโวลตาอิก " (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1839 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Alexander Edmond Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีแสงมาตกกระทบและ ในปี ค.ศ.1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสาร Selenium ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยใช้สาร Selenium และสารรูปที่ ระกอบของ Cuprous oxide และเมื่อในปี ค.ศ.1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction) โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown junction เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนช่วยในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์จนกระทั่งในปี ค.ศ.1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของผลึกซิลิกอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ แต่ในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพ[4] และการลดต้นทุนตัวโครงสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงมีการขยายการใช้งานเป็นวงกว้าง เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง และ ไฟฟ้าที่ได้นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ในขณะที่ใช้งาน เพียงแค่ติดตั้งไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที และทำงานได้โดยไม่ต้องสร้างเสียงรบกวน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ขณะทำงานจึงไม่มีปัญหาด้านการสึกหรอหรือต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือต้นทุนการติดตั้งสูง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาผลิต โดยทั่วไปประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์

2.3 โครงสร้างของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกได้แก่ซิลิคอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตซ์ และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก สารซิลิคอนบริสุทธิ์ปกติจะมีความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำมากเพราะอิเล็กตรอนไม่มีการเคลื่อนที่ในบอนด์ แต่เมื่อใช้วิธีการโด๊ป (Doping) โดยสารโบรอน จะทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพราะ โบรอนจะทำหน้าที่เป็นตัวเป็นตัวพาประจุ (Charge Carrier) ซึ่งเป็นประจุบวกคือไม่มีอิเล็กตรอน แต่จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่า Gaps หรือ โฮล (holes) ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจับคู่ด้วยในโครงสร้างของรูปที่ ผลึกเมื่อผ่านขบวนการนี้แล้ว เรียกว่า P-type การโด๊ปอีกแบบหนึ่งใช้สารฟอสฟอรัส (Phosphorous) สารซิลิคอนที่ผ่านขบวนการโด๊ปนี้แล้ว เรียกว่า N-type ซึ่งหมายความว่าฟอสฟอรัสจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอนหรือประจุลบ

ซิลิคอนเกือบทั้งหมดในเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่เป็น P-type ในขณะที่ผิวส่วนหน้าของเซลล์ด้านที่แสงตกกระทบจะเป็นเพียงชั้นบางๆแบบ N-type รอยต่อที่อยู่ระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า PN junction ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์เพราะจะเป็นบริเวณที่มีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่าน และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่าง junction ในส่วนของสารซิลิคอนที่เป็น N-type นั้นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ซิลิคอนส่วนที่เป็น P-type มีส่วนที่เรียกว่า โฮล คือส่วนที่อิเล็กตรอนขาดหายไป (Electron space) สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน เมื่อประจุอิสระเหล่านี้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ PN junction จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างรอยต่อบนสารกึ่งตัวนำก็จะเกิดการผลิตประจุอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้นอย่างมากมาย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็คือการเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ที่ทำจากซิลิคอน[18]

ในการการผลิตเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดได้มีการปรับปรุงที่ รับปรุงใน 2 ลักษณะคือ ทำให้หน้าสัมผัสเชื่อมติดกับผิวหน้าของเซลล์เพื่อที่จะรวบรวมประจุโดยไม่มีกรบดบังแสงที่มาตกกระทบมากนัก และสุดท้ายคือ การเคลือบสารลดการสะท้อนที่ด้านหน้าของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง คุณสมบัติเด่นของสารเคลือบแสงอาทิตย์แบบซิลิคอนคือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 0.5V มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถ้ามีการป้องกันความชื้นที่ดี

2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุที่นำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่วนมากจะเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากและมีราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานแล้วในเชิงพาณิชย์แบ่งได้ 3 ชนิดดังต่อไปนี้

2.4.1 ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Mono-Crystalline) การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.99%) มาหลอมละลายในเตา Induction Furnace ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ พร้อมใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับกันเป็นผลึกด้วย Seed ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่ แล้วจึงดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอมด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึกจะได้แท่งยาวเป็นรูปที่ ทรงกระบอกคุณรูปของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆด้วยลวดตัดเพชร (wire Cut) เรียกว่า เวเฟอร์ ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรและขีดความเรียบของผิว จากนั้นก็นำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น PN junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสออกไปใช้งาน โดยที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบ ส่วนผิวล่างจะเป็นขั้วบวก ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเคลือบฟิล์มที่ผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง หลังจากนั้นจะนำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ และใช้ซิลิโคน และอีวีเอ (Ethelele Vinyl Acetate) ช่วยป้องกันความชื้น[5]

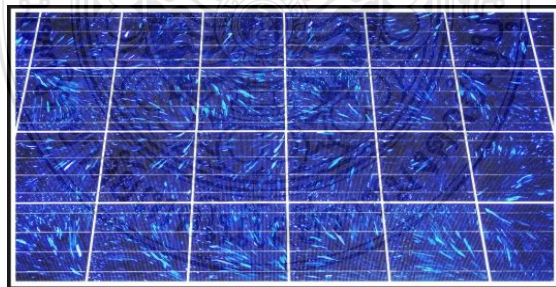
ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มากขึ้นและนำมาต่อขนานเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน ไฟฟ้า 15-17% สามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นกว้าง โดยมีประสิทธิภาพดีในช่วงความยาวคลื่นยาวของแสงอาทิตย์แต่มีราคาแพง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells)

2.4.2 ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมโดยวิธีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมใส่สารเจือปน **Boron** เพื่อทำให้เกิด **P-type** แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโทนสีที่แตกต่างกันซึ่งจะเกิดจากผลึกเล็กหลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวม[5] ดังรูปที่ 2.3 ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือมีสีเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ส่วนกรรมวิธีผลิตเซลล์ที่เหลือจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว โดยมีค่าประมาณ **12-15%** และสามารถตอบสนองในแถบความยาวคลื่นที่กว้าง



รูปที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Cells)

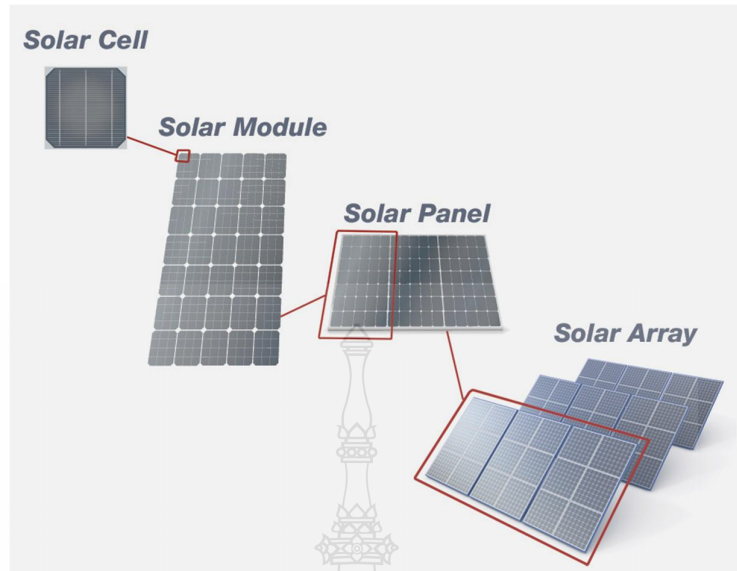
2.4.3 ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cells)

เป็นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปที่ พลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 0.5-1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลข ซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 6-8% [4] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cell)[19]

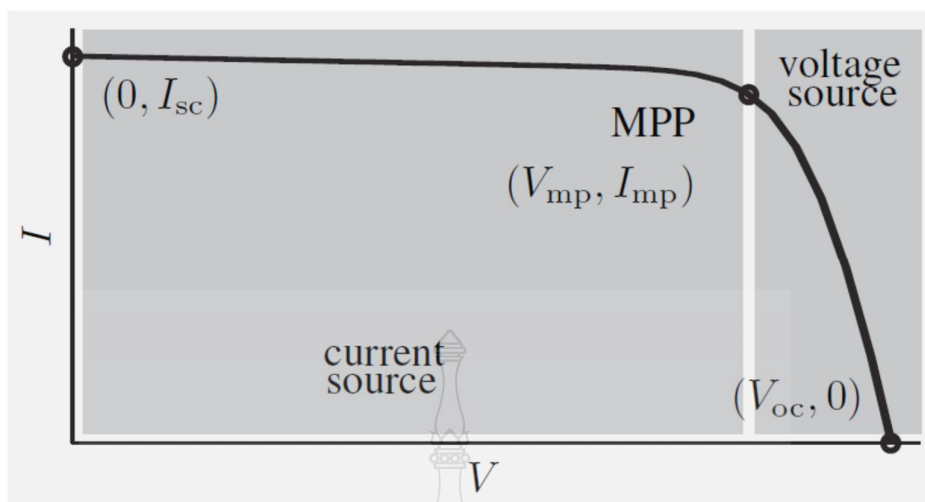
โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะให้กระแสตรงจรรูปที่ ประมาณ 10-20 mA และสามารถให้แรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดประมาณ 0.6-0.7 V ดังนั้นการใช้งานโซลาร์เซลล์จะไม่นำมาใช้งานเพียงเซลล์เดียว (Cell) เนื่องจากให้กำลังไฟฟ้าน้อย จึงนำเซลล์มาต่อขนานกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น หรือถ้าต้องการแรงดันสูงก็นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน เรียกว่าโมดูล (Module) และหากนำโมดูลมาต่อรวมกันอีกจะเรียกว่า อาร์เรย์ (Array) ซึ่งจะสามารถให้พิกัดกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบการต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ [20]

2.5 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ **I-V curve** ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย (**I**) หมายถึงกระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวตั้ง และ (**V**) หมายถึงแรงดันไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวนอน ที่อุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้าง **I-V curve** ได้โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการต่อโหลด เรียกว่า **Open circuit voltage (V_{oc})** จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด $V_{oc}, 0$ จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสจนถึงค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร ที่จุดนี้จะให้ค่ากระแสสูงสุด เรียกว่า **Short circuit current (I_{sc})** ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่จุด $0, I_{sc}$ จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทุกจุดที่ทดสอบจะเกิดเป็น **I-V curve** ขึ้น ดังรูปที่ 2.6

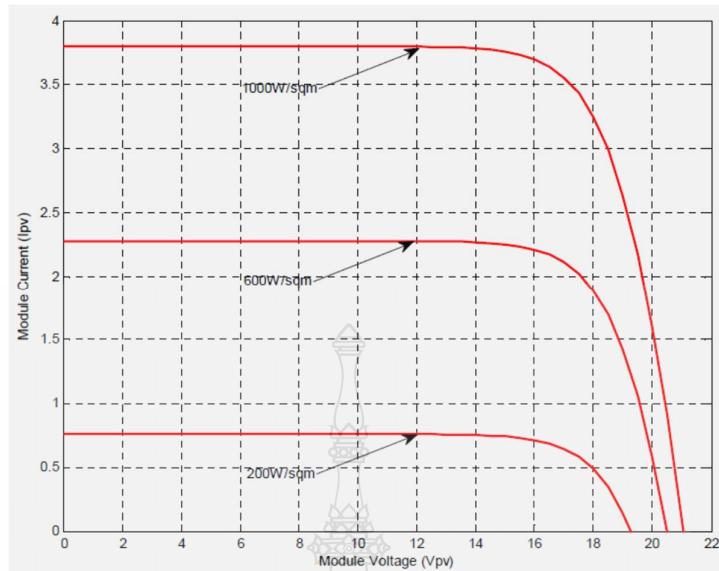


รูปที่ 2.6 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V curve[16]

ดังนั้นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอยู่ 2 ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ นอกจากนั้นอาจมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลกระทบ เช่น โหลดที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ลักษณะการบังเงา อาจรวมไปถึงชนิดและการต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.5.1 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ตามความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มแสง นั่นคือหากความเข้มแสงมีค่าสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 2.7 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.8 ความเข้มแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือความเข้มแสงที่วัดได้บนพื้นโลกในสภาวะอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆบังและวัดที่ระดับน้ำทะเลในขณะที่รับแสงจากดวงอาทิตย์ 1.5AM และความเข้มแสงจะมีค่า 1000 W/m^2

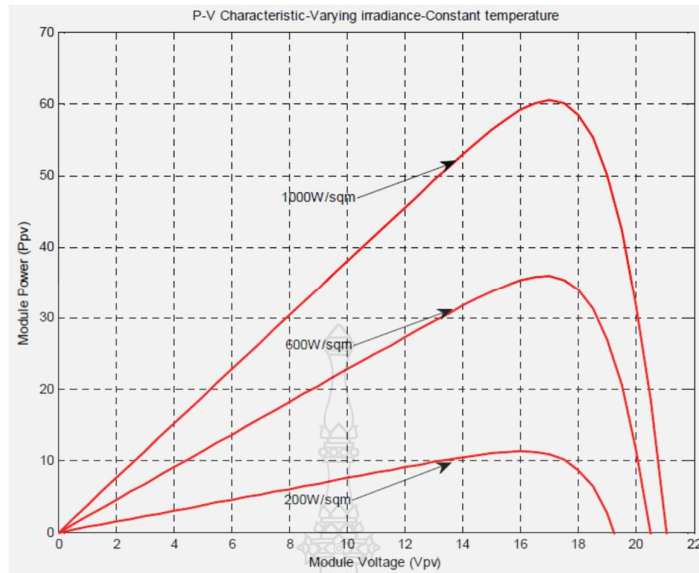


รูปที่ 2.7 กราฟ I-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง[17]

ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1) [6]

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \times \lambda \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25°C (A)
 - K_i คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร (A/°C)
 - T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ (Kevin)
 - λ คือ ความเข้มแสง (kW/m²)



รูปที่ 2.8 กราฟ P-V เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง[17]

2.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมิค่าสูงขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจร (Open circuit voltage ;V_{oc}) ที่ 21V ณ.อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ. อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีโหลด ลดลง 0.525V จะเหลือเพียง 20.475V เท่านั้น[23] จากสมการไดโอดในอุดมคติที่บรรยายคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพีเอ็นตลอดช่วงกว้างของกระแสและแรงดัน สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.2)

$$I = I_S(t) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

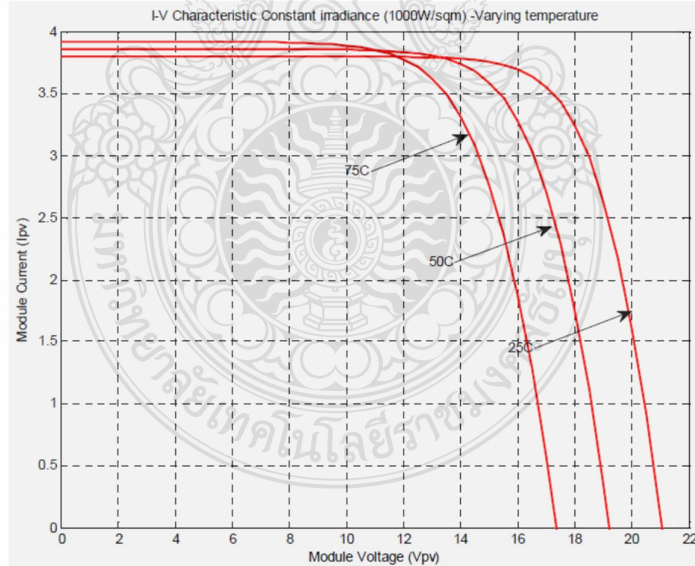
เมื่อ I_S คือ Cell 's reverse saturation current of diode (A)
 V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V)

ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไปอัสกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)[6]

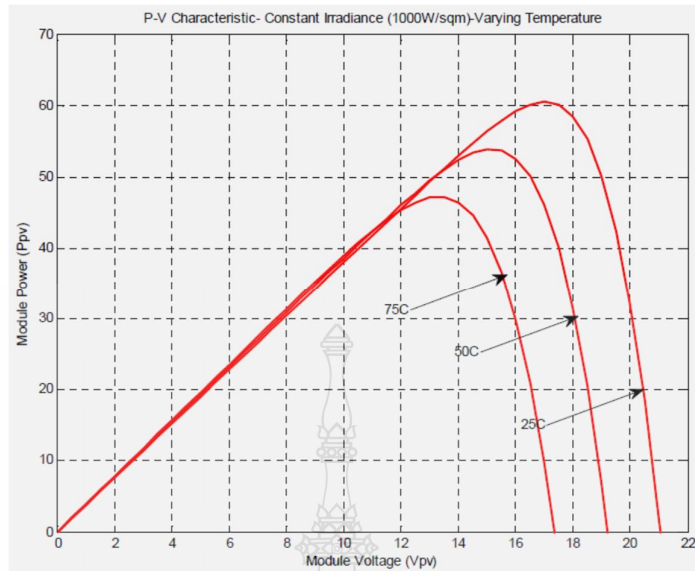
$$I_S(t) = I_S \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ E_g คือ Band gap energy of semiconductor
 V_t คือ Thermal voltage at room temperature
 T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin)
 T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ (Kelvin)
 N คือ Ideal factor

จากสมการที่ 2.3 อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง ได้ผลกราฟกระแส-แรงดันตามรูปที่ 2.9 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 กราฟ I-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง[17]



รูปที่ 2.10 กราฟ P-V เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง [17]

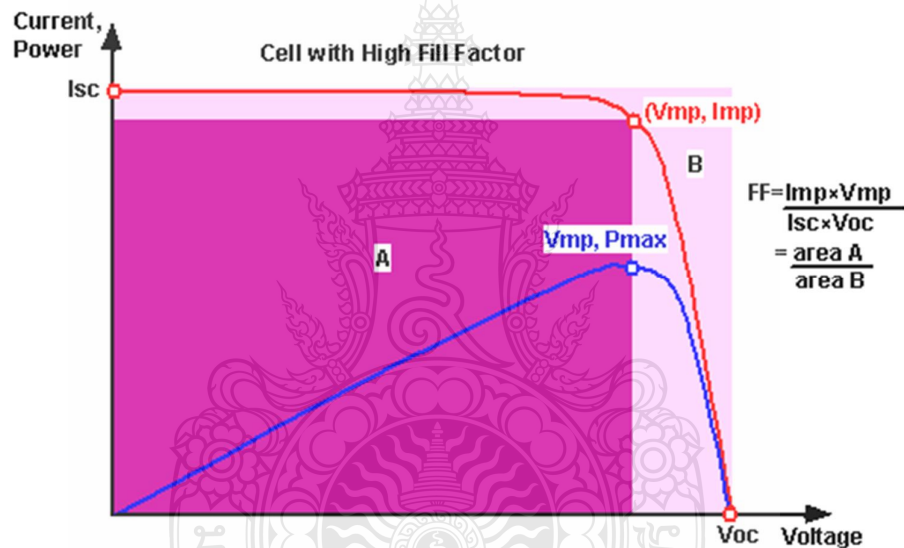
ในการพิจารณาคคุณลักษณะทางกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องเกี่ยวข้องดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{OC}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดขณะเปิดวงจรหรือเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าสูงมาก โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงในรูปที่ ลอการิทึม (Logarithm)
2. กระแสขณะลัดวงจร (I_{SC}) เป็นค่ากระแสที่วัดจากการลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่ากระแสของเซลล์เมื่อภาระทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยที่ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์
3. กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
4. กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) เป็นค่ากระแสที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
5. แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดทางไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังงานสูงสุด

6. ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรดังรูปที่ 2.17 ค่าฟิลล์แฟกเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะแสดงว่า โซลาร์เซลล์ มีคุณภาพมากหรือน้อย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [3]

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.4)$$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าฟิลล์แฟกเตอร์เข้าใกล้ 1 เพื่อที่จะทำงาน (Operation point) ใกล้กับจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์[21]

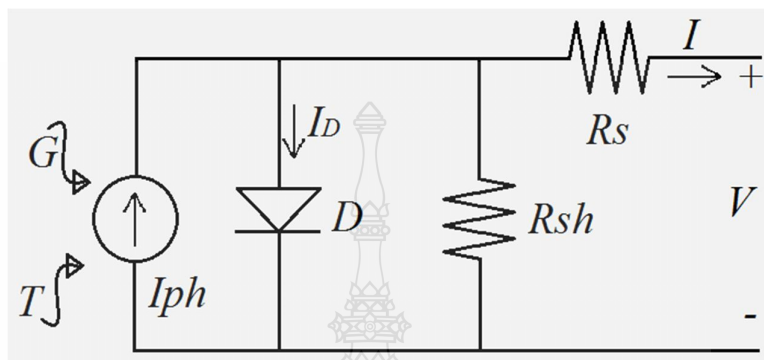
7. ประสิทธิภาพสูงสุด (η_m) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[5]

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.5)$$

เมื่อ P_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์ได้รับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะต้องแทนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

วงจรเทียบเท่าอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส ในแบบคู่ขนานกับไดโอด การส่งออกของกระแส เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานแสงอาทิตย์ (โฟตอน) ที่กระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์ (photo current; I_{ph}) ในช่วงไม่มีแสง เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ทำงาน นั่นคือมันจะทำงานเป็นรอยต่อ P-N ของไดโอด มันจะผลิตทั้งในปัจจุบันแรงดันไฟฟ้าไม่ได้ แต่ถ้าได้รับการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายภายนอก (แรงดันขนาดใหญ่) มันสร้างกระแสไดโอด (I_d) ที่เรียกว่ากระแสไดโอด (D) หรือกระแสดาร์ก ไดโอดจะกำหนดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติจะประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ต่อขนานกับไดโอด และค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นและความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อกับขั้วต่อภายนอก ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบเซลล์แสงอาทิตย์ [4] ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังดันออกสูงสุดลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [22]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + I.R_s)}{N.K.T} - 1 \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	I	คือ กระแสที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ (A)
	I _s	คือ ค่ากระแสรั่วในสถานะอิ่มตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด (A)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10 ⁻¹⁹ (ev)
	N	คือ ค่า Ideal factor
	K	คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.3806504×10 ⁻²³ (J/Kelvin)
	T	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin)
	V	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด (V)
	R _s	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์ (Ω)
	R _{sh}	คือ ความต้านทานขนานของเซลล์ (Ω)

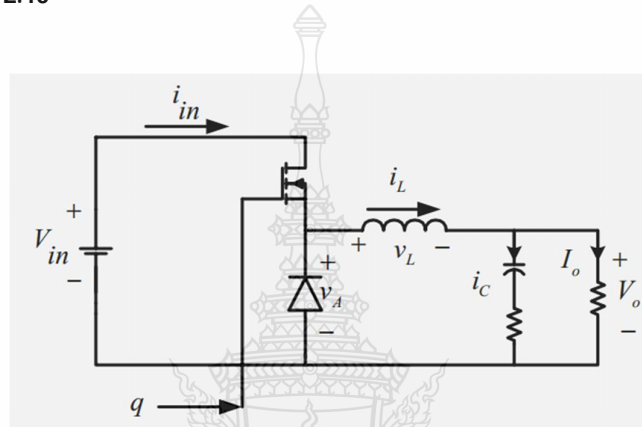
แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดัน ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (2.6) ในเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติโดยทั่วไปสันนิษฐานว่า R_s และ R_{sh} มีค่าเท่ากับศูนย์ [18] ดังนั้นหากไม่คิดผลของ R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (2.7) [6]

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left[e^{\frac{qV}{NKT N_s}} - 1 \right] \quad (2.7)$$

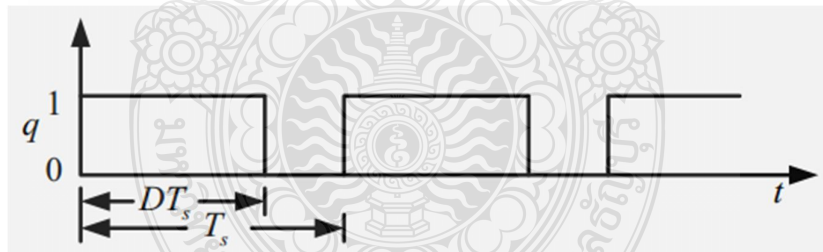
เมื่อ	n _p	คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน
	n _s	คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน [5]

วงจรทอนระดับแรงดันไฟตรง หรือวงจร **Buck Converter** เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระเพื่อมจากสัญญาณควบคุม จึงนิยมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (**Low pass Filter**) แบบวงจร **LC** ทางด้านขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไฟตรงมากๆ ลักษณะวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรทอนระดับแรงดัน



รูปที่ 2.14 การทำงานของสวิตช์ (q)

โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้ 2 สถานะคือดังรูปที่ 2.14 คือ สถานะแรกในขณะที่สวิตช์นำกระแส ($q = ON$) และสถานะที่ 2 สวิตช์หยุดนำกระแส ($q = OFF$) โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัวกำหนดให้

1.รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะเหมือนกัน ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.8)$$

2. ค่าแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ผลรวมค่าผลคูณของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-second) เป็นศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(t) dt = 0 \quad (2.9)$$

3. ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์

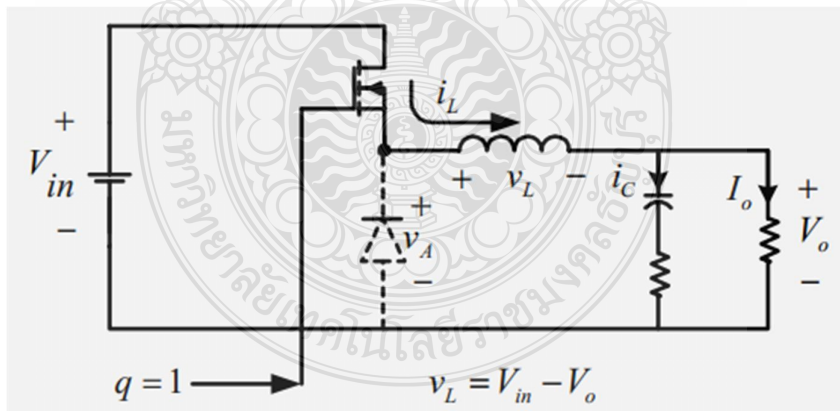
$$i_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.10)$$

4. กำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก (พิจารณาวงจรทำงานเป็นแบบอุดมคติ)

$$P_{in} = P_o \quad (2.11)$$

2.7.1 สภาวะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์นำกระแสดังรูปที่ 2.15 ไดโอดจะได้รับการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) กระแสจึงไหลผ่านจากแหล่งจ่ายไปยังตัวเหนี่ยวนำได้โดยตรง โดยที่กระแสส่วนหนึ่งแยกไหลผ่านตัวเก็บประจุและอีกส่วนหนึ่งไหลผ่านโหลด จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q นำกระแส

$$-V_{in} + V_L + V_o = 0 \quad (2.12)$$

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.14)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.15)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{(V_{in} - V_o)DT}{L} \quad (2.16)$$

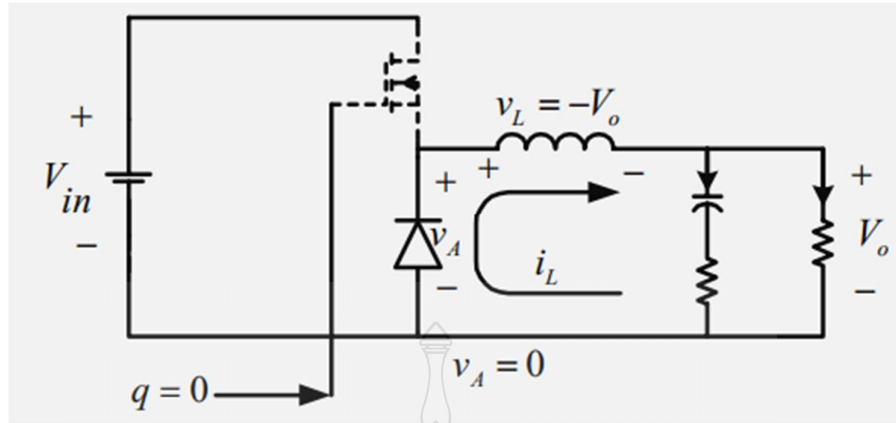
$\Delta i_{L,on}$ หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

2.7.2 สภาวะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสดังรูปที่ 2.16 ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward Bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.16 วงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ q ไม่นำกระแส

ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันเข้าวงจรเป็นศูนย์ $dt = (1-D)T$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.19)$$

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{-V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.20)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2.16) และ (2.20) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.21)$$

$$\left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT + \left[- \left(\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \right] = 0 \quad (2.22)$$

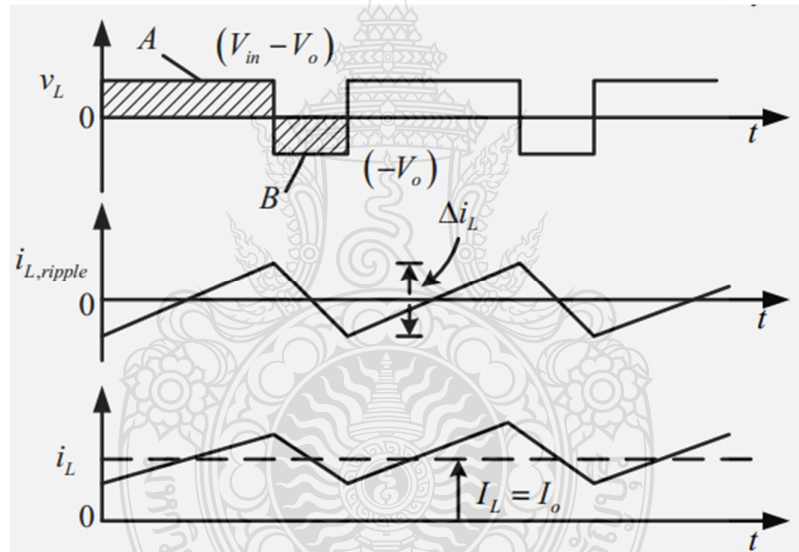
$$V_{in}D - V_oD - V_o + V_oD = 0 \quad (2.22A)$$

ดังนั้นจะได้อัตราขยายแรงดัน

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.23)$$

2.7.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่จะทำให้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้



รูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ(บน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(ล่าง)

ดังนั้นจะสามารถกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดและสูงสุดคือ

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.24)$$

$$I_{L,max} = I_L + \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{L} (1-D)T \right) \quad (2.25)$$

$$I_{L,max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \quad (2.26)$$

$$I_{L,min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.27)$$

$$I_{L,min} = I_L - \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{L} (1-D)T \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.29)$$

ดังนั้น

$$I_{L,min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \quad (2.30)$$

สมมุติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังในสมการที่ (2.30)

$$I_{L,min} = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.31)$$

$$\left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0$$

$$\frac{1}{R} = \frac{(1-D)}{2Lf}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

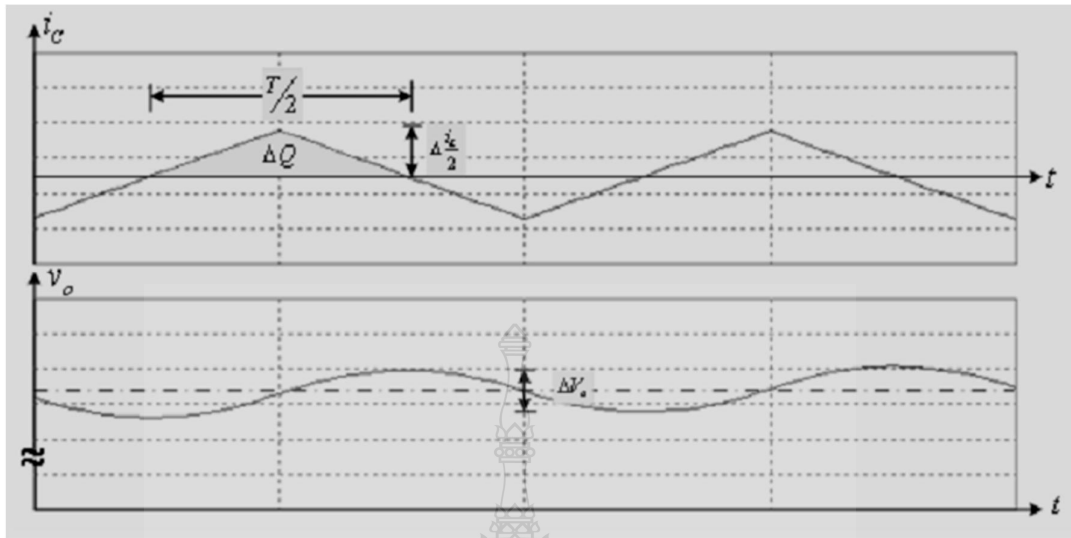
$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.32)$$

และ

$$f = \frac{(1-D) \times R}{2 \times L_{min}} \quad (2.33)$$

2.7.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราเคลื่อนที่ของแรงดันด้านออก

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta Q = C \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.34)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8}$$

(2.35)

แทนค่าสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.36)$$

แทนค่าสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.36 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T \quad (2.37)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2}{8C} \left(\frac{1}{L}\right) (1-D) \quad (2.38)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.39)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้หนึ่ง หรือการเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ หรือเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.8 ระบบควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative)[10]

ระบบควบคุม (Control System) คือ การนำส่วนประกอบหลายๆส่วนมาต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบ และทำการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพทำให้สามารถประหยัดพลังงาน เวลา และอื่นๆ ได้ ในขณะที่ได้ผลลัพธ์ออกมาได้ตามต้องการ ถูกต้อง ในการศึกษาของระบบควบคุม จะมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีการป้อนกลับ (Feedback Theory) และในการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น โดยจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต หรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่จะควบคุมสามารถแทนที่ได้ด้วยบล็อก (Block) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบแทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต

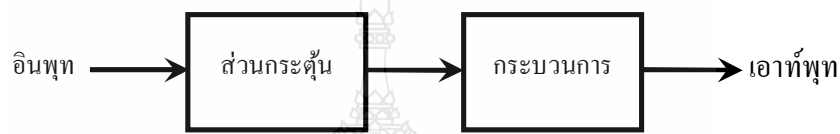


รูปที่ 2.19 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System) และ แบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

2.8.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System)

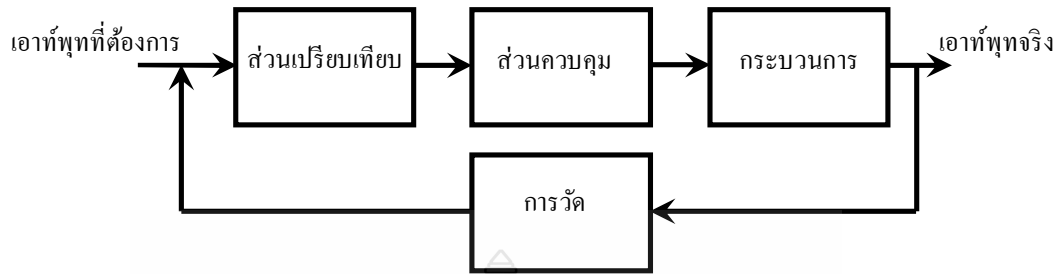
เป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุม (Controller) หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามความต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณาลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบเปิด

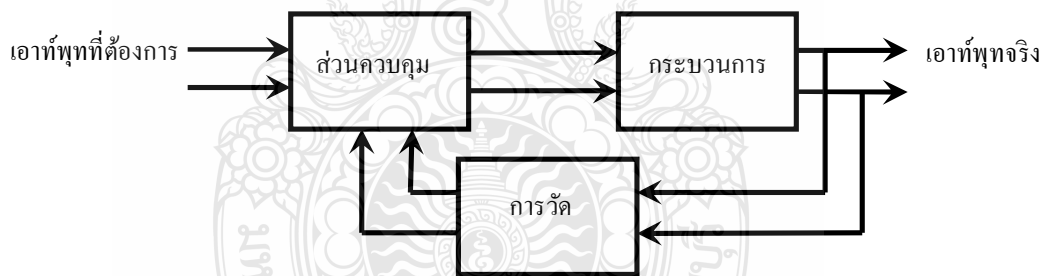
2.8.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิด คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่จะทราบค่าเอาต์พุตได้จะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อทราบค่าเอาต์พุตแล้วมักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นจะได้ว่าค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.21 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมยังเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

2.8.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (Mathematical Model of System)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นที่นิยมที่เพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุม พฤติกรรมของระบบ นิยมที่จะอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ เนื่องจากระบบทั่วไปไม่เป็นระบบเชิงเส้น (Nonlinear System) ดังนั้นในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) เพื่อให้สามารถแก้สมการเหล่านั้นได้ด้วยการใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของเอาต์พุตและอินพุตของระบบ การรูปที่ ระยุกต์การแปลงลาปลาซเข้ากับสมการอนุพันธ์ ผลจากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ ไปอยู่ใน โดเมนความถี่เมื่อถูกจัดรูปที่

อย่างเหมาะสม ก็จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราเรียกกันว่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

$$\begin{aligned}
 & a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\
 & = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad , (n \geq m) \\
 \text{Transfer function} = G(s) &= \frac{L[\text{output}]}{L[\text{input}]} \quad \text{Zero initial condition} \\
 &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}
 \end{aligned}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของ Buck converter โหมดกระแสต่อเนื่องได้จาก สมการ 2.40

$$G_p(s) = V_s \frac{1}{(LC)s^2 + \left(\frac{L}{R}\right)s + 1} \quad (2.40)$$

2.8.4 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม (u) จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด (e) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของ ระบบที่ต้องการควบคุม แผนรูปบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.23 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

สมการ คือ

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.41)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่าเกนสัดส่วน ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) คือลดค่าความผิดพลาดของระบบ โดย สามารถตอบสนองกับค่าสัญญาณความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด

2.8.5 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีรูปแบบสมการ คือ

$$u(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2.42)$$

เมื่อ K_I คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล แผนรูปบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

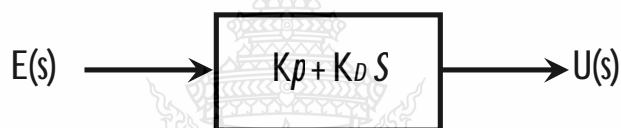
จากรูปแบบการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม $u(t)$ จะมีค่ามากโดยที่สัญญาณความผิดพลาด $e(t)$ มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณการควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ต่างกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วยการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ เช่น ในกรณีระบบเป็นอันดับที่หนึ่ง และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Controller) แล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง

2.8.6 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีรูปที่แบบสมการ คือ

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.43)$$

เมื่อ K_D คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งเรียกว่าตัว ควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์หรือ (PD-controller) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ ร่วมกับอินทิกรัลก็จะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลหรือ (PI-controller) และถ้าใช้ตัวควบคุม แบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เรียกว่า (PID-controller)

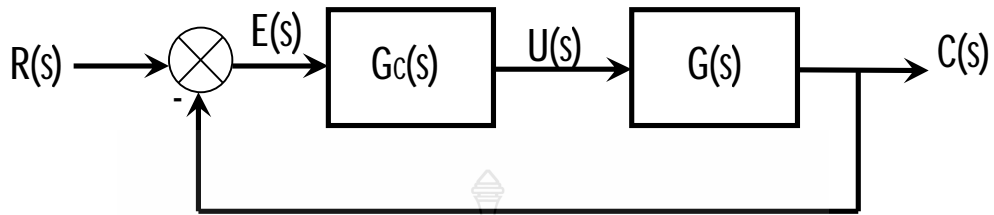


รูปที่ 2.25 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรรูปมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นั้นเป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fluctuate) ค่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชัน (slope) ของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงค่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรรูปได้

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller)

พิจารณาระบบควบคุมแบบปิด



รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบปิด

PID controller ประกอบด้วย 3 เทอม คือ Proportion, Integral และ Derivative จากสมการ 2.41, 2.42 และ 2.43 ได้เป็น

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.44)$$

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.45)$$

การแปลงลาปลาซของสมการ 2.44 และ 2.45 จะเป็นดังสมการ 2.46 และ 2.47

$$U(S) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right) \cdot E(s) \quad (2.46)$$

$$G(S) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right) \cdot E(s) = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (2.47)$$

ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของ PID คอนโทรลเลอร์ จะมีผลลัพธ์ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID

ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID				
พารามิเตอร์	Rise time	Overshoot	Settling time	Error at equilibrium
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ถูกกำจัด
K_d	นานมาก (ลดลงหรือเพิ่มขึ้น น้อยมาก)	ลดลง	ลดลง	ไม่มี

การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols จะเริ่มด้วยการเซตค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ จากนั้นจะเพิ่มค่า K_p ไปจนถึงค่า K_c (Critical Gain) ระบบจะเริ่มแกว่ง ให้วัดคาบของการแกว่ง P_c และให้ใช้ตารางข้างล่างเพื่อหาค่า Gain อื่นๆ

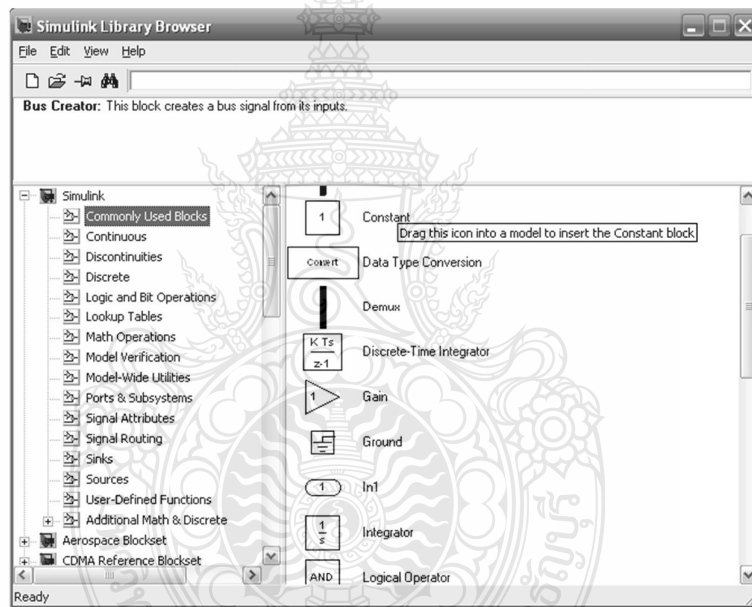
ตารางที่ 2.2 การปรับแต่งด้วยวิธี Ziegler-Nichols

วิธี Ziegler-Nichols			
Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.50 K_c$	-	-
PI	$0.45 K_c$	$1.2 K_p / P_c$	-
PID	$0.60 K_c$	$2 K_p / P_c$	$K_p P_c / 8$

การปรับแต่งด้วยซอฟต์แวร์ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในปัจจุบัน จะใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณและปรับแต่งค่า Gain โดยซอฟต์แวร์จะทำการเก็บข้อมูล สร้างโมเดลและคำนวณค่า Gain ให้โดยอัตโนมัติ

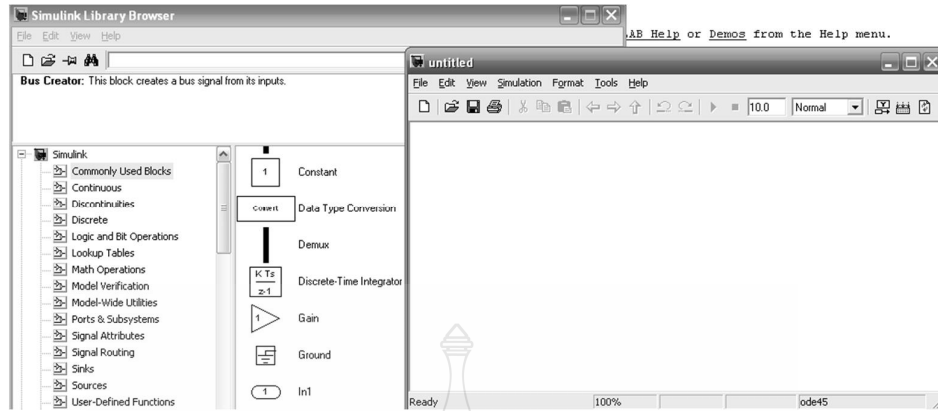
2.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink

โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง, การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ, การใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์รูปที่แบบต่างๆ เป็นต้น ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปที่แบบของ block Diagram เป็นหลักทำให้มีความง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้ Building Blocks ที่มีมาให้จาก Simulink Library Browser ดังรูปที่ 2.32

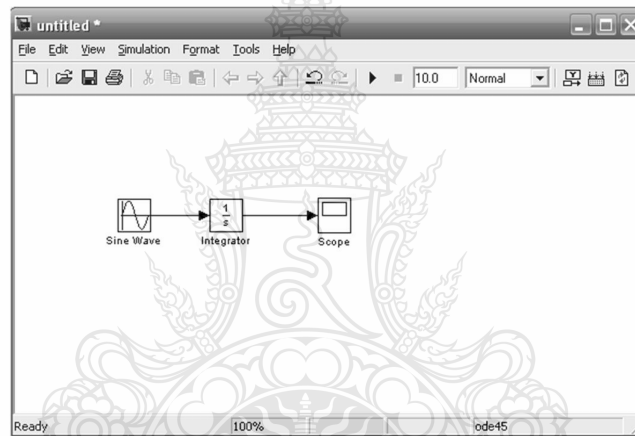


รูปที่ 2.27 บล็อกโคอะแกรมพื้นฐานใน Simulink Library Browser

ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ และส่งผ่านสัญญาณ ข้อมูลจาก block หนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีก block หนึ่งโดยผ่านเส้นเชื่อมต่อกัน โดยที่สามารถดูผลลัพธ์ของข้อมูลได้หลายลักษณะทั้ง Oscilloscope หรือ Display โดยสามารถเลือกจากในส่วนของ Sink ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink

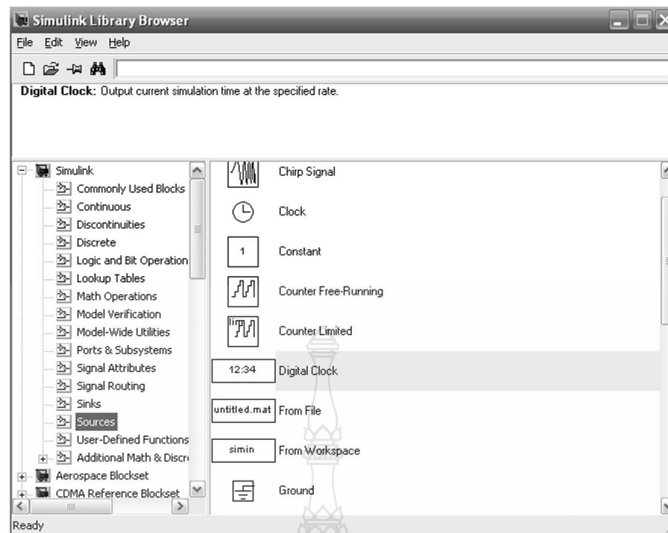


รูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อระหว่าง block ของ Simulink

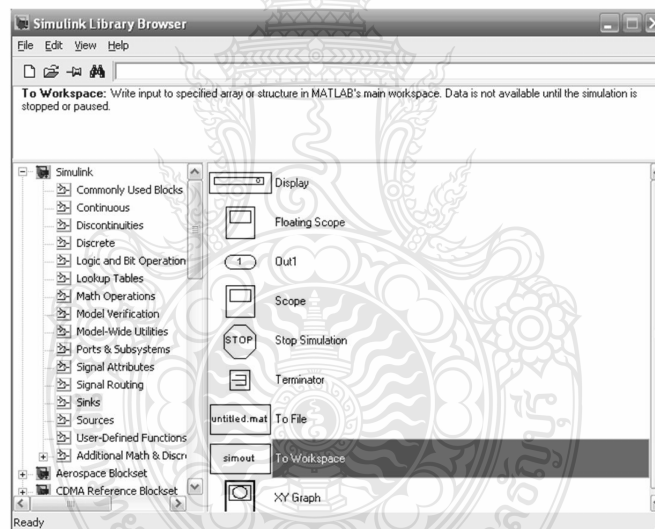
2.9.1 กลุ่มของ block พื้นฐานใน Simulink

ก. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และแหล่งแสดงสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มของ Source ที่กำหนดมาให้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant), แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator), แหล่งกำเนิดสัญญาณรูปที่ไซน์ (Sine Wave) หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักใช้เพื่อจับเวลาการจำลองปัญหาเป็นต้น ดังรูปที่ 2.30 กลุ่มของ Sinks เป็นกลุ่มที่จะใช้สำหรับเก็บข้อมูล (To Workspace) และแสดงผลของการแก้ปัญหา (Scope, Display) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.31



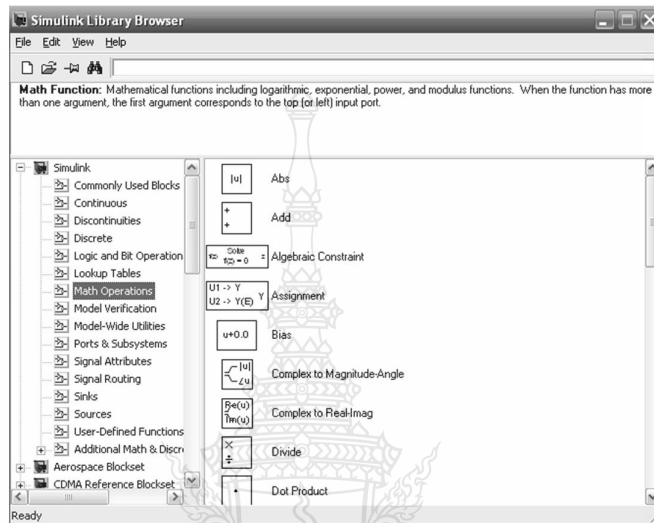
รูปที่ 2.30 กลุ่ม block ของ Source



รูปที่ 2.31 กลุ่ม block ของ Sinks

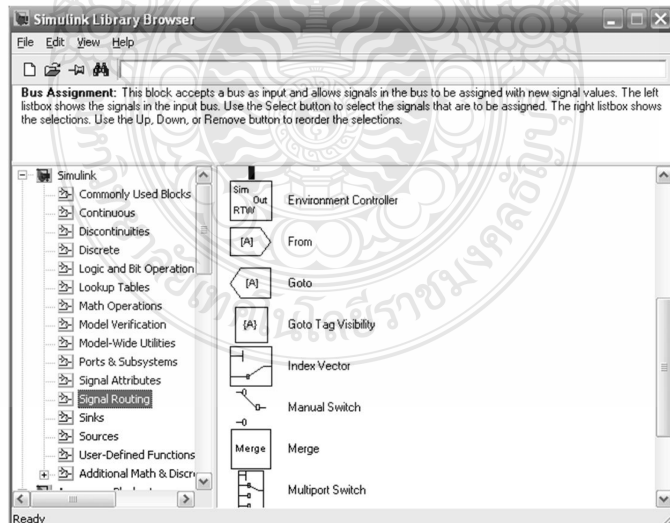
ข. การดำเนินการทางคณิตศาสตร์(Math Operations)

กลุ่ม **Math Operations** มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น การบวก(Add) ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Math Function) การคูณตัวแปร (Gain) เป็นต้น



รูปที่ 2.32 กลุ่ม block ของ Math Operations

ค. ทางเดินสัญญาณ(Signal Routing)

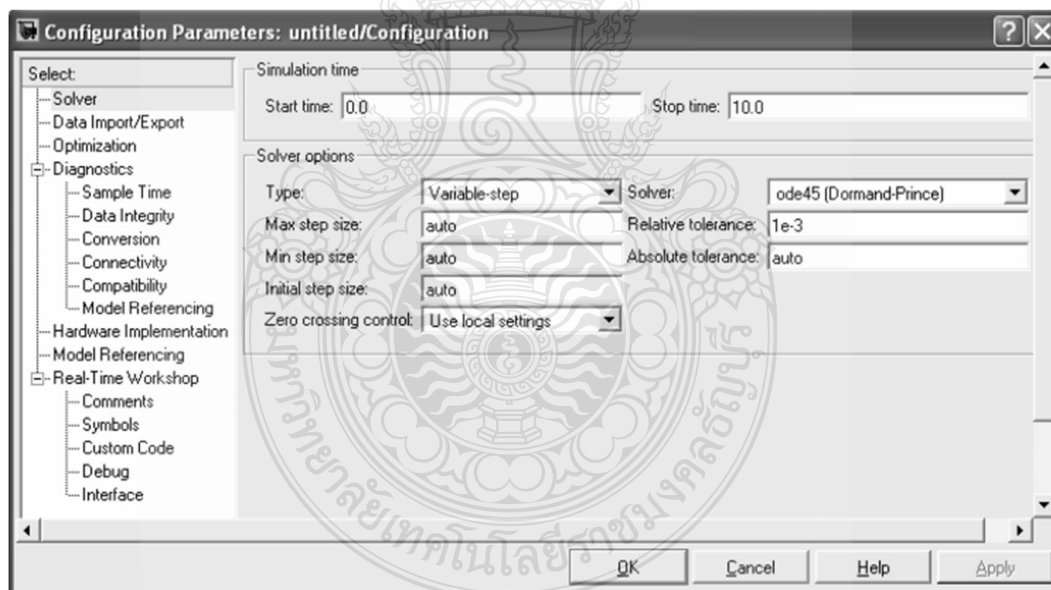


รูปที่ 2.33 กลุ่ม block ของ Signal Routing

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นต้องมีการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่ง **block** ในกลุ่มนี้เป็นประเภท **GOTO, FROM, Multiplexing** จะทำให้แผนภูมิมีความเป็นระเบียบมากขึ้นดังรูปที่ 2.33

2.9.2 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาในคอมพิวเตอร์นั้น มีข้อสังเกตที่ต้องพึงระวัง คือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาในการจำลองปัญหา เช่นคอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที ทำให้ระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจไม่ตรงกันในการจำลองปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ **Step Size** มีค่าไม่คงที่ (**Variable Step Size**) ค่า **Step Size** ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ **Step Size** มีค่าคงที่ (**Fixed Step Size**) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ ดังรูปที่ 2.34



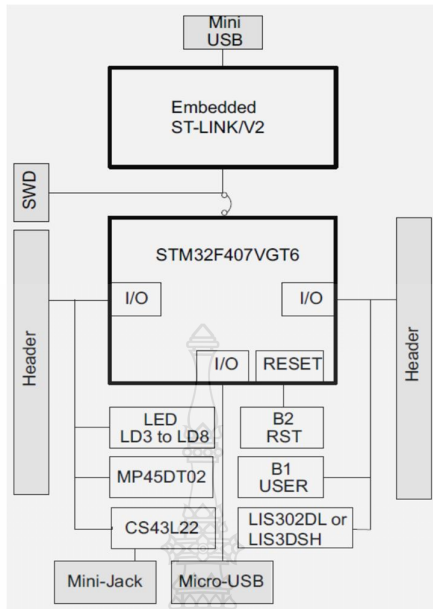
รูปที่ 2.34 แสดงหน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

2.10 บอร์ดควบคุม (STM32F407VGT6)

บอร์ดควบคุมทำหน้าที่เชื่อมต่อแบบจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับกระบวนการจริง โดยผ่าน **block sets** และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบด้วยเวลาจริง การ์ดอินเทอร์เฟซประกอบด้วยจำนวนช่อง **A/D, D/A, PWM, Digital I/O** และ **Encoder** ซึ่งใช้สำหรับระบบควบคุม เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเวกเตอร์ การควบคุมแกนกลและการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อนเป็นต้น และระบบยังจำเป็นต้องใช้โมดูลแปลงสัญญาณที่เรียกว่า **Analog to Digital Converter (ADC)** ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อสามารถประมวลผลได้ด้วยดิจิทัลคอมพิวเตอร์ รวมถึงโมดูลแปลงสัญญาณที่เรียกว่า **Digital to Analog Converter (DAC)** ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกการใช้งานอนาล็อกกับ การ์ดอินเทอร์เฟซ **STM32F407VGT6**

การ์ดอินเทอร์เฟซ **STM32F4** มีลักษณะเด่นดังนี้

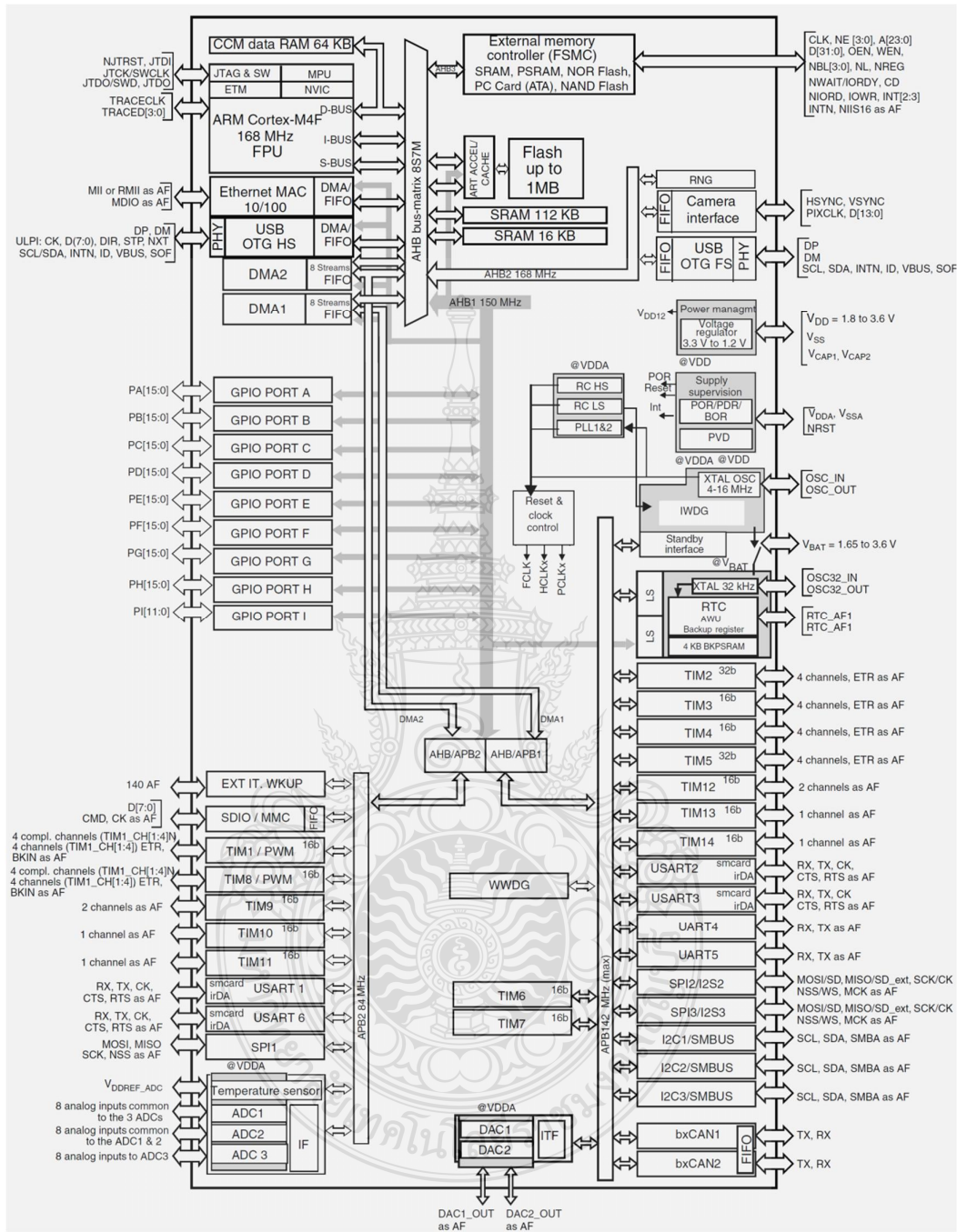
- เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (**real-time**) ผ่านทางช่อง **USB** ของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และ **Mini USB** ของการ์ดอินเทอร์เฟซ
- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ **STM32F407VGT6** แบบ **32 bit** มีหน่วยความจำขนาด **1 Mb** มี **SRAM** ขนาด **192 Kb** ในตัวถังแบบ **LQFP** ขนาด **100** ขา
- มีชุดวงจร **ST-Link** รวมอยู่ในบอร์ด ใช้สำหรับการ **Download** และ **Debug** โปรแกรม โดยจะมี **Jumper** ให้เลือกใช้งานร่วมกับบอร์ดอื่นได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต **USB** หรือสามารถเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟภายนอกขนาด **3.3V** หรือ **5V** ได้
- มี **LED** เพื่อใช้ทดสอบหรือทดลองเขียนโปรแกรม **4 ดวง** คือ
 - ก. **LD3** สีส้ม ต่ออยู่กับพอร์ต **PD13**
 - ข. **LD4** สีเขียว ต่ออยู่กับพอร์ต **PD12**
 - ค. **LD5** สีแดง ต่ออยู่กับพอร์ต **PD14**
 - ง. **LD6** สีน้ำเงิน ต่ออยู่กับพอร์ต **PD15**
- มีสวิตช์กดติดป้อนยดับ **2 ตัว** คือ
 - ก. สวิตช์ **Reset** ใช้สำหรับตั้งค่าการทำงานของบอร์ด **STM32F4** ให้เริ่มทำงานใหม่
 - ข. สวิตช์ **User** (สีฟ้า) ใช้ทดสอบหรือทดลองเขียนโปรแกรมโดยต่ออยู่กับพอร์ต **PA0**
- ขาอินพุตและเอาต์พุต (**GPIO**) ของ **CPU** จะต่อออกมาที่ **Header** ทางด้านข้างของบอร์ด เพื่อความสะดวกในการใช้งาน



รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส STM32F407VGT6



รูปที่ 2.36 การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟสรุ่น STM32F407VGT6



รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์การ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส (STM32F407VGT6)

2.10.1 การเชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟส (STM32F407VGT6) และทดสอบการเชื่อมต่อ ST-Link

เป็นชุดพัฒนา MICROCONTROLLER ขนาด 32 BIT ราคาประหยัด ของ บริษัท ST ในตระกูลใหม่ STM32 ARM CORTEX-M4F โดยในบอร์ดจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุด ST-LINK/V2 ใช้ในการ DOWNLOAD และ DEBUG ไปยัง MCU TM32F407VGT6 ที่อยู่ใน บอร์ด ผ่านทาง PORT USB

ส่วนของ ST-LINK/V2 ใช้ MCU เบอร์ STM32F103 มาเป็นตัวเชื่อมต่อการทำงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทาง USB PORT

- สามารถทำการ IN-CIRCUIT DEBUG และ PROGRAM กับตัว MCU STM32F4 ที่อยู่บนบอร์ดได้

- ขั้วต่อ 6 PIN SWD ต่อออกใช้งาน DEBUG และ PROGRAM ใต้นอกบอร์ด

ส่วนบอร์ดใช้งาน STM32F4

- ใช้ MCU เบอร์ STM32F407VGT6, 32 BIT ARM CORTEX-M4F 1MB FLASH, 192KB RAM, LQFP100 TYPE

- ตัวบอร์ดสามารถใช้ไฟ +5V จากขั้วต่อ USB หรือจาก POWER 5V ภายนอกได้ในการใช้งาน

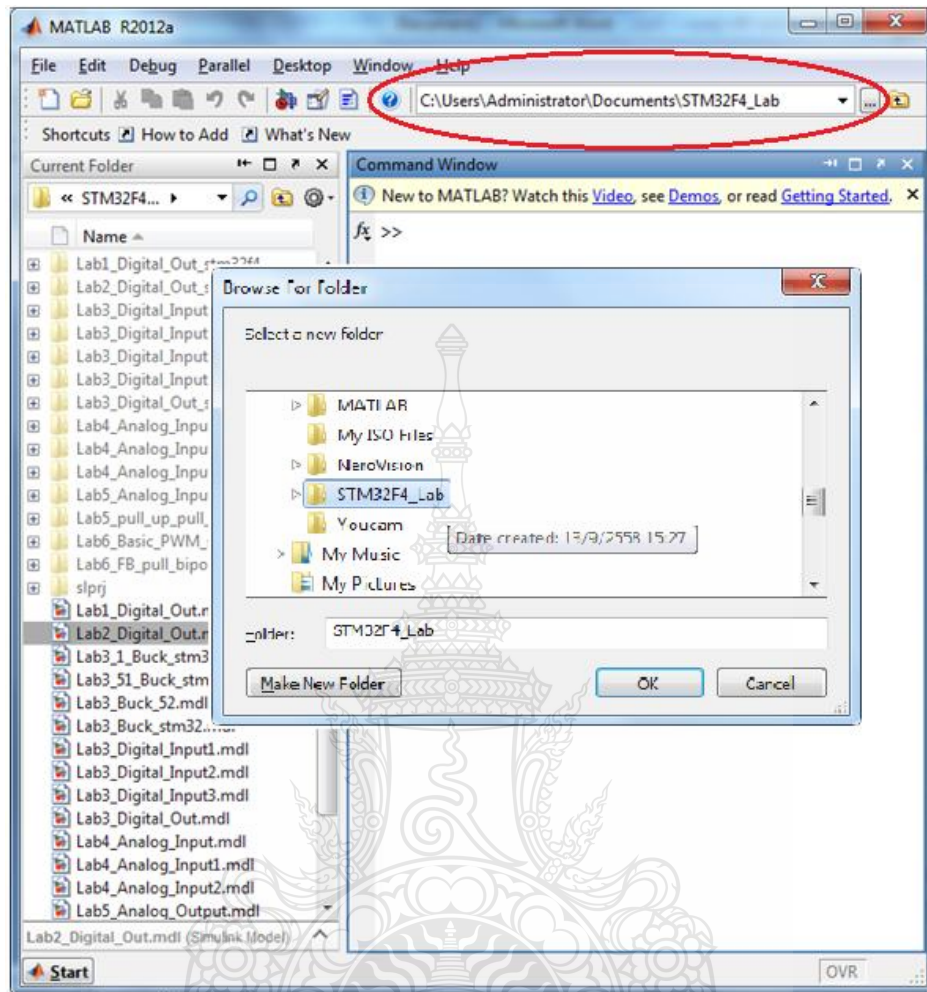
- มีส่วน 3-AXIS ACCELEROMETER เบอร์ LIS302DL อยู่บนบอร์ด

- มีส่วน DIGITAL MICROPHONE เบอร์ MP45DT02 อยู่บนบอร์ด

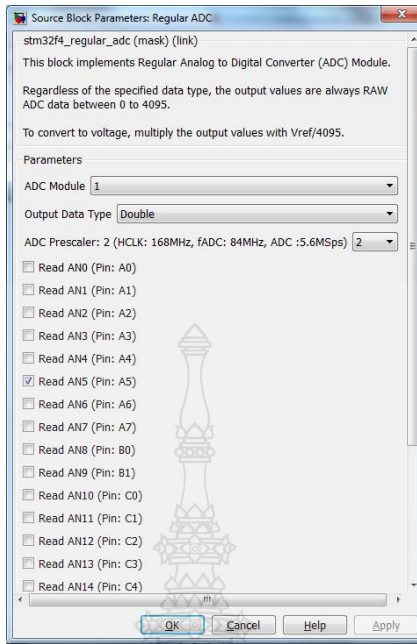
- USB OTG FS พร้อมขั้วต่อ MICRO-AB

- ตัวบอร์ดทำเป็นขั้วต่อแบบ PIN HEADER ใต้ PCB 25 x 2 จำนวน 2 ชุด

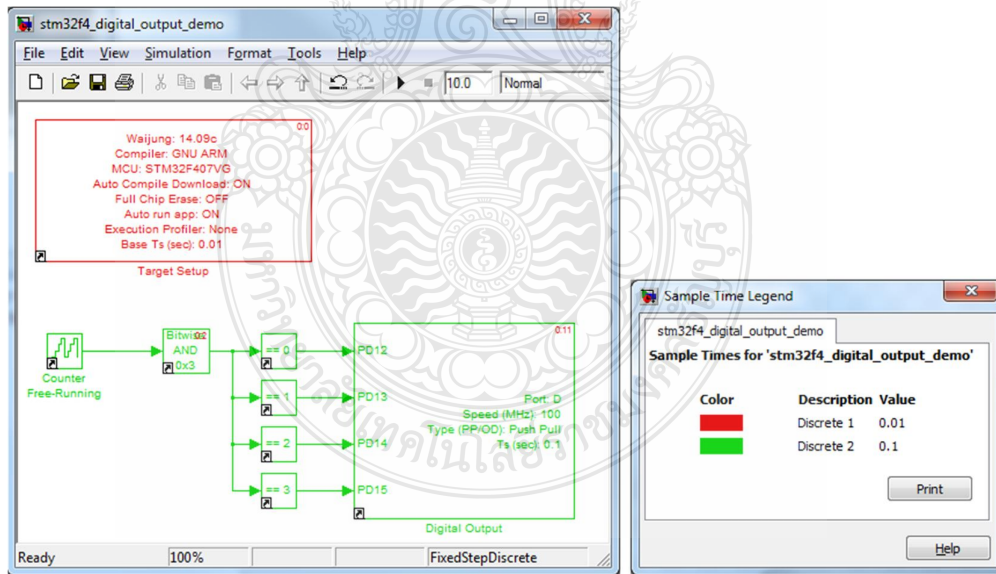
Waijung Blockset เป็น Blockset ใช้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยบริษัท เอเมจิน จำกัด ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ในแบบของ Simulink Blockset ทำให้การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 2.38 การเปลี่ยน Directories บนหน้าต่างโปรแกรม MATLAB

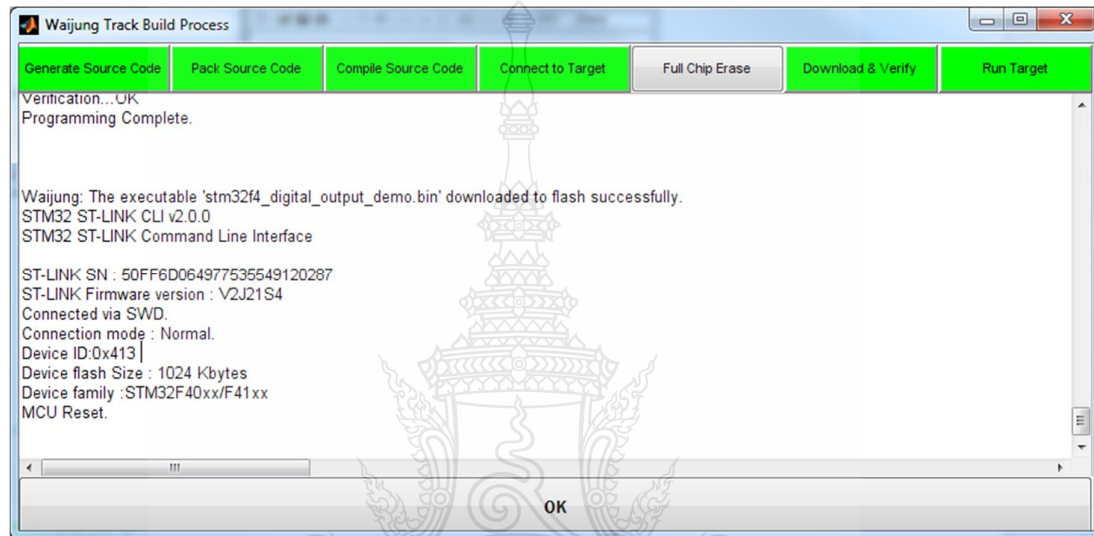


รูปที่ 2.39 ตั้งค่าการใช้งาน Target Setup block สำหรับบอร์ด STM32F4



รูปที่ 2.40 ตัวอย่าง Model ไฟกระพริบและหน้าต่างแสดงค่า Sample Time ของ Block

ทำการ **Build mode** (เพื่อ **Compile** และ **Download**) ลงในบอร์ด **STM32F4** โดยกดปุ่ม **Ctrl+B** โปรแกรม **Matlab Simulink** จะสร้าง **Source** ไฟล์ หลังจากนั้น **Waijung** จะ **compile** **source** ไฟล์เหล่านั้นด้วย **C Compiler** ให้เป็น **Binary** หรือ **Hex** ไฟล์ เมื่อ **Compile** เสร็จสิ้น **Waijung** จะ **download** **Binary** ไฟล์ ลงในบอร์ด **STM32F4** ผ่าน **ST-Link** โดยอัตโนมัติ หน้าต่าง **Waijung Track Build process** จะแสดงผลการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน ดังรูปที่ 2.41



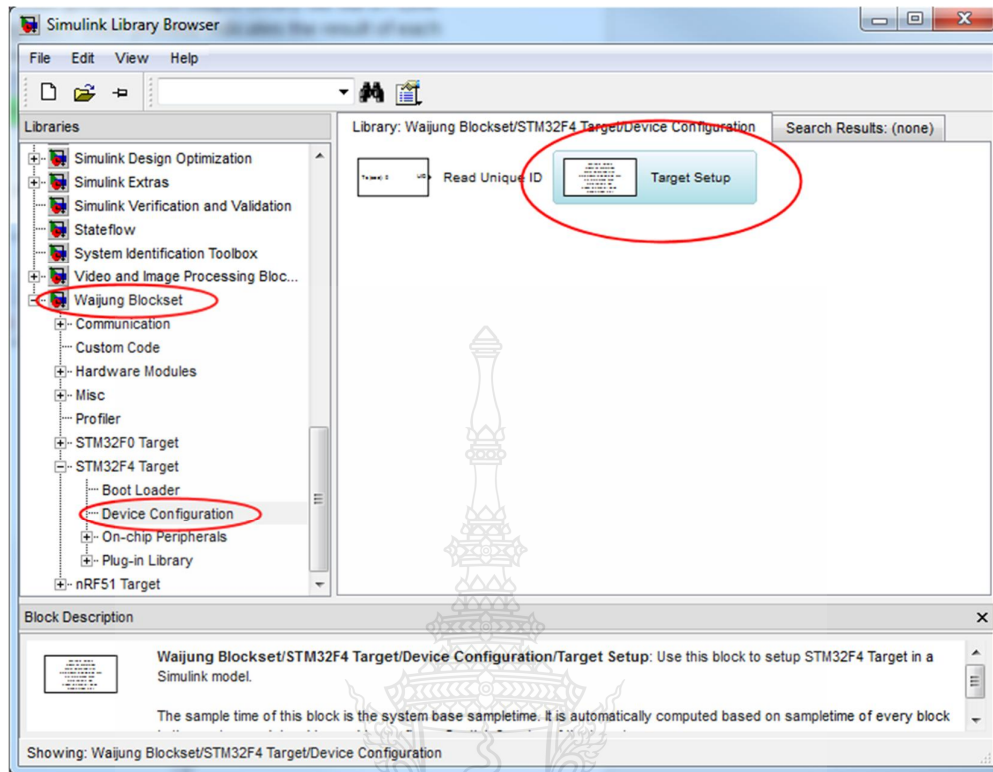
รูปที่ 2.41 หน้าต่างโปรแกรมเชื่อมต่อคอลโทรลเลอร์สำเร็จ

หลังจากขั้นตอน **Build** และ **Download** การเชื่อมต่อกับบอร์ดสำเร็จสิ้นดังรูปที่ 2.41 บอร์ดจะเริ่มการทำงาน โดยสังเกตได้จากหลอดไฟ **LED** ทั้ง 4 จะติดเป็นลำดับ และถอดหรือต่อ **ST-Link** กับบอร์ด เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการ **Auto Compile and Download** แล้วก็สามารถทำได้

2.10.2 เริ่มสร้างหน้าต่างใหม่

ไปบนหน้าต่าง **Simulink Library browser** เลือกเมนู **File -> new model** เพื่อเริ่มต้นสร้างหน้าต่าง **model** ใหม่ บันทึกไฟล์และเปลี่ยน **Current Directory** ไปยังตำแหน่งที่ไฟล์บันทึกอยู่

วาง **"Target Setup Block"** สำหรับ **STM32F4** ลงในหน้าต่าง **model** (**Target Setup Block** อยู่ใน **Simulink library: Waijung Blockset/STM32F4 Target/Device Configuration**)



รูปที่ 2.42 Target Setup บนหน้าต่าง Simulink Library Browser

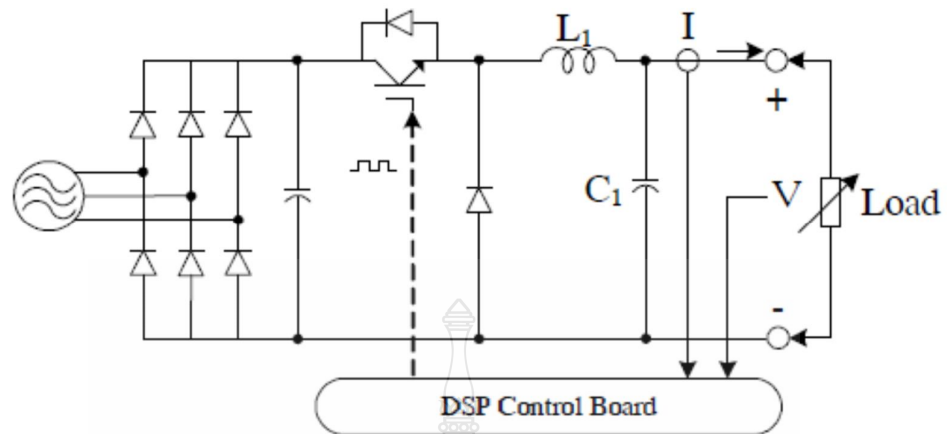
- บันทึกไฟล์ model อีกครั้ง จากนั้น Update model โดยกดปุ่ม Ctrl+D (2 ครั้ง) เพื่อให้ Waijung ตั้งค่าการใช้งานครั้งแรก และปรับ Sample time ของ Block ให้ถูกต้อง หมายถึง ยังไม่มีการ Build model ในขั้นตอน Update model
- ออกแบบ Model ตามที่เราต้องการ
- เริ่ม Update Diagram, Incremental Build model เพื่อเริ่มต้นการใช้งานบอร์ด FiO2 หรือ STM32F4

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

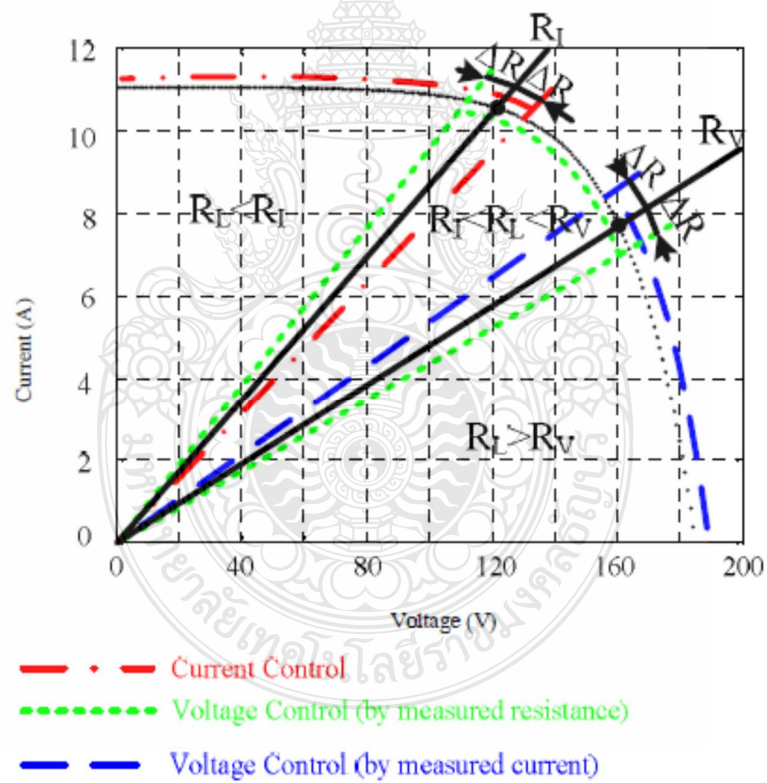
จากการทบทวนบทความงานวิจัยด้านการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีหลายงานที่นำเสนอถึงวิธีการศึกษาผลกระทบของปริมาณแสง, อุณหภูมิ และความต้านทาน ต่อคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีในแต่ละงานต่างมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปดังนี้

2.11.1 “A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator” โดย Yuan. Li¹, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, and Dichen Liu[11]

งานวิจัยนี้แนะนำเสนอ กลยุทธ์การควบคุมแบบไฮบริดสำหรับการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ซึ่งเป็นการเลียนแบบคุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) ภายใต้ความแตกต่างกันของอุณหภูมิและโหลด การฉายรังสีได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเส้นโค้ง I-V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่ในงานวิจัยนี้ให้การสนใจ และตามวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้า ทำให้คุณลักษณะเอาต์พุตของ PV มีความแตกต่างกันของ วิธีการที่นำเสนอการควบคุมแบบไฮบริด แบ่งคุณลักษณะ IV ของ PV อาร์เรย์ออกเป็นสามส่วนจากการจำลองการทำงานของ PV โดยการวัดแรงดัน และกระแสเอาต์พุต จากชุดจำลองหน่วยควบคุมซึ่งอยู่บนพื้นฐาน TMS320LF2407 DSP ทำการคำนวณและควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสตามลำดับ ชุดต้นแบบขนาด 2 กิโลวัตต์ที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบกับโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้ และโหลดไฟฟ้าคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการจำลอง PV ทำให้การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกราฟคุณลักษณะ IV ซึ่งยิ่งไปกว่านั้นจากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ ยังทำให้เข้าใกล้จุดสูงสุดในระบบ PV ดังรูปที่ 2.43 และ 2.44



รูปที่ 2.43 โครงสร้างของการจำลอง PV



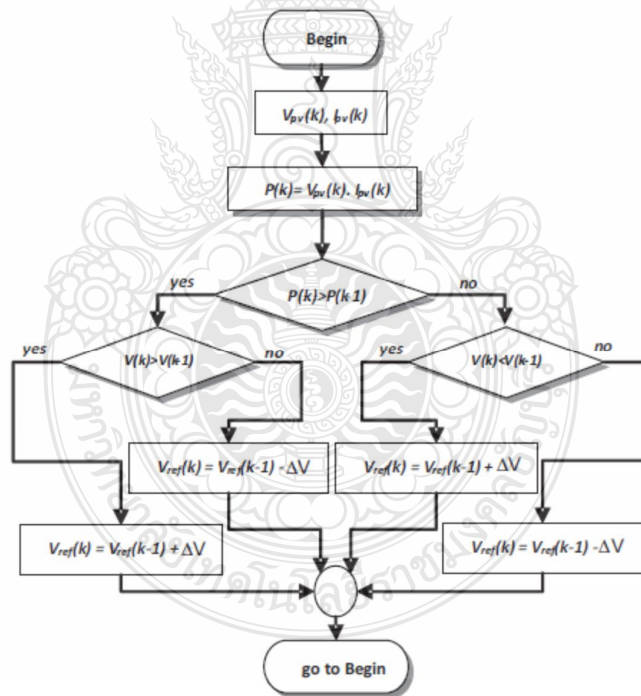
รูปที่ 2.44 คุณลักษณะขาออกของ PV อาร์เรย์

2.11.2 “A Fuzzy PD-PI Control Strategy to Track the Voltage References of Photovoltaic Arrays” โดย Nilton E. M. Moçambique, Ricardo Q. Machado, Vilma A. Oliveira [12]

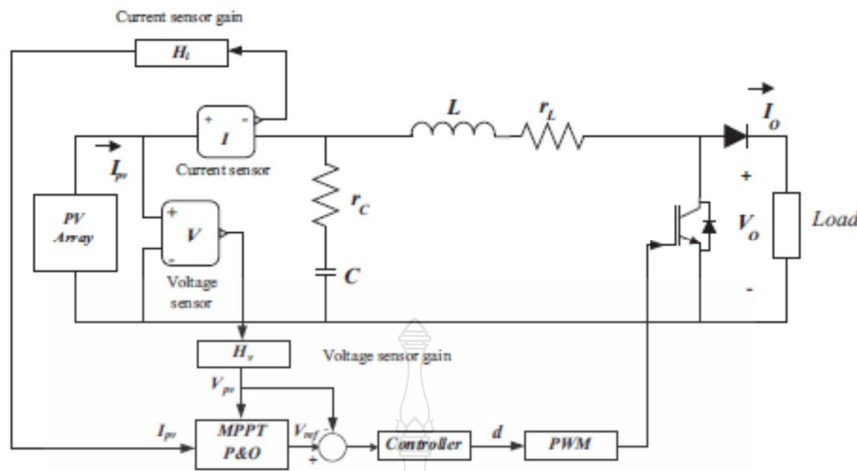
ในบทความนี้นำเสนอ พีซี PD รวมทั้งโครงสร้างตัวควบคุม PI สำหรับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวควบคุมจะติดตามแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดโดยทำรบกวนระบบและสังเกต หรือ P&O (perturb and observe) ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)

ข้อเสียเปรียบหลักของอัลกอริทึม P & O MPPT คือ ที่จุดสถานะคงตัว การทำงานแกว่งไปมารอบๆจุดพลังงานสูงสุด (เอ็มพีพี) กฎการควบคุมการป้อนกลับที่นำเสนอในบทความนี้ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน P & O MPPT มาติดตามตัวอ้างอิงสำหรับ PV อาร์เรย์ ทำการเชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณ DC to DC จำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ว่าสลับเวดล้อมแตกต่างกันมีไว้เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการ

โดยมีขั้นตอนพื้นฐานดังรูปที่ 2.45 และ step up converter with control ดังรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรม แบบ P & O MTPP



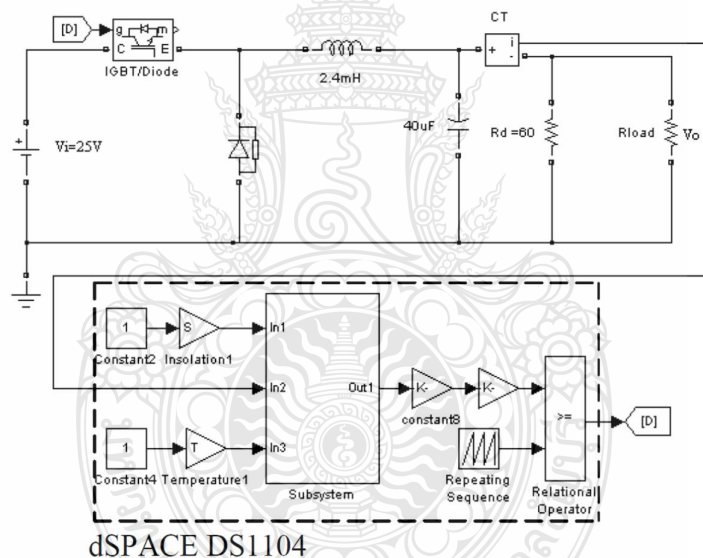
รูปที่ 2.46 การควบคุมด้วยวงจรแปลงแรงดันแบบ step up

2.11.3 “Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module Under the Single Diode Model”, D. Impreeda and W. Subsingha [13]

บทความเป็นการนำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง อุณหภูมิ ตัวแปรไดโอด ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ในรูปแบบทันเวลา (Real-times) เพื่อนำไปประยุกต์เชื่อมต่อกับวงจรแหล่งจ่ายจริงด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางพาณิชย์ ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย จากการทดสอบแบบจำลองพบว่า หากเซลล์มีมีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำและค่าความต้านทานขนานที่สูง จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูงขึ้น ตัวแปรไดโอดและอุณหภูมิทำงานของเซลล์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงจะเป็นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสขาออกของของเซลล์แสงอาทิตย์

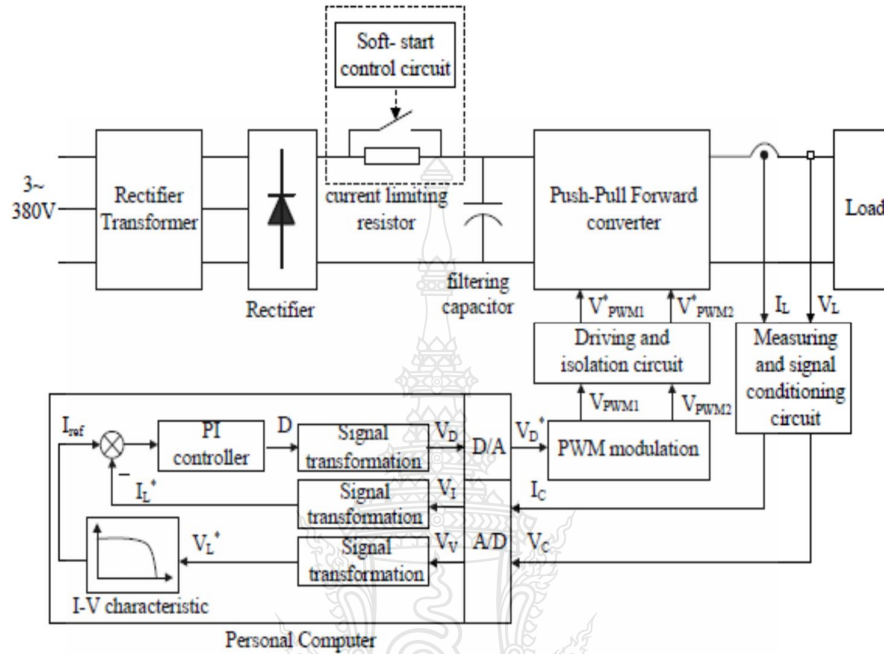
ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ อันที่จะทำให้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ (*i-v curve*) เกิดความผันผวน ความเข้มแสง อุณหภูมิ ตัวแปรไดโอด ความต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงป้อนกลับสัญญาณ **output** ของ *i-v* ขอนำเสนอการจำลองแบบสัญญาณเสมือนจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม **MATLAB/Simulink** และการ์ดอินเทอร์เฟซ **dSPACE DS1101** ในศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้จะใช้ร่วมกับการป้อนกลับสัญญาณขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบอนาล็อก แบบดิจิทัล แบบพีเอสซี แบบนิรอน หรือแบบอื่นๆที่สามารถทำให้ระบบป้อนกลับได้

ข้อดีคือ ทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์หลายตัวแปร และทำการทดลองจ่ายโหลดจริง แต่ยังมีข้อจำกัดงานอยู่บางส่วนคือ กราฟคุณลักษณะ **I-V** จากการทดลองที่ได้ยังไม่เรียบเมื่อเทียบกับกราฟที่อ้างอิง



รูปที่ 2.47 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองแบบทันเวลา

2.11.4 “Design and Simulation of Digital PV Simulator Based on Push-Pull Forward Converter” โดย Zhang Jike, Wang Shengtie [14]

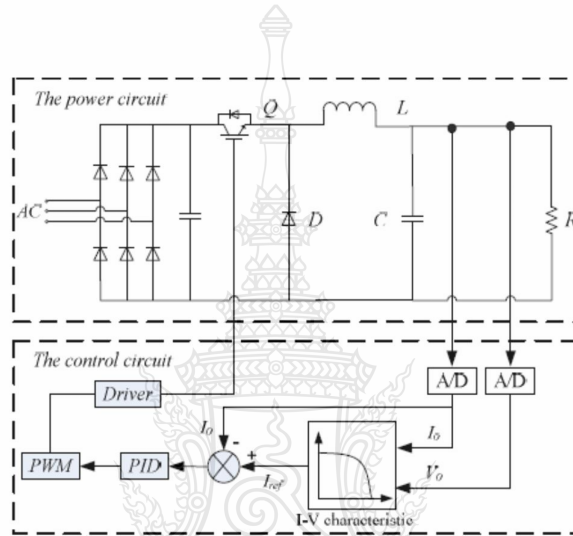


รูปที่ 2.48 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม

เซลล์แสงอาทิตย์แบบดิจิทัล (PV) จำลองที่นำเสนอ โดยบทความนี้ได้รับการออกแบบบนพื้นฐานของ Push-Pull forward converter (PPF) โครงสร้างหลักและหลักการควบคุมแบบดิจิทัล การจำลอง PV ดิจิตอล จะมีพฤติกรรมทางไฟฟ้าคล้ายกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสรูปแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้ สะดวกในการดำเนินการทดสอบระบบการผลิตพลังงานของ PV และตรวจสอบการดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลาย และไม่ต้องขึ้นอยู่กับสรูปแวดล้อม หรือราคาไม่แพงมาก และระบบขนาดใหญ่ คุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มของแสงแดด และอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีการจำลองภายใต้ MATLAB/Simulink ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของเอาต์พุตของการจำลอง PV มีความสอดคล้องกับที่เกิดขึ้นจริง PV ในบทความนี้เป็น การวางรากฐานที่สำคัญ สำหรับการใช้งานของ PV ที่เกิดขึ้นจริง และการจำลอง

ข้อดีใช้ digital PV และ digital control ง่ายในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ใช้จำลองเป็นระบบจำลองขนาดใหญ่ได้ ส่วนข้อดีของงาน ยังเป็นเพียงการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไม่ได้นำมาทดสอบจ่ายโหลดจริง IV curve จากการจำลอง ยังไม่ราบเรียบเมื่อเทียบกับ IV curve ที่อ้างอิง วิธีการยังยุ่งยาก และซับซ้อน

2.11.5 “A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method” โดย Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho[15]



รูปที่ 2.49 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม

สำหรับการวิจัยที่ดีขึ้นและการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบสำหรับการจำลองไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ บนพื้นฐานของ DC-DC converter และ DSP ตัวควบคุม กลไกการควบคุมที่มีอยู่บนพื้นฐานของความแม่นยำมากขึ้น วิธีการคำนวณควบคุมโหมคปัจจุบันร่วมกับวิธีตารางมองขึ้นใหม่ ด้วยกลยุทธ์การควบคุมใหม่นี้จำลอง PV สามารถนำมาใช้ในการจำลองลักษณะการส่งออกประเภทไดอาร์เรย์ PV ภายใต้สรูปการทำงานที่แตกต่างกันเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงได้รับการสร้างและทดสอบกับตัวแปร โหลดตัวต้านทานและ โหลดพลังงานอย่างต่อเนื่องเช่นกัน การทดลองผลแสดงให้เห็นว่าการส่งออกของลักษณะจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีความสอดคล้องกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงและจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถเปลี่ยนได้อย่างราบรื่นกับกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve)

ข้อดี ใช้สำหรับจำลองของ PV ใดๆก็ได้ ภายใต้การทำงานที่แตกต่างกัน และ นำค่ากระแสขาออกมา feedback ด้วย PID control มีการจำลองใน hardware ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำมาทดสอบจ่าย โหลดจริง ข้อด้อยคือ IV curve จากการจำลองยังไม่ราบเรียบเมื่อเทียบกับ IV curve ที่อ้างอิง

สรุปในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพารามิเตอร์ใน ต่างๆ ที่มีผลกระทบโดยตรง และ โดยอ้อมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ของวงจร สมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญนำไปใช้ในบทที่ 3 ต่อไป





ภาคผนวก ก

การจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink



ก.1 ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SolarEX รุ่น MSX-60

ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ SolarEX รุ่น msx60

```
function Ia = msx60(Va,Suns,TaC)
k      = 1.38e-23;
q      = 1.60e-19;
A      = 1.2;
Vg     = 1.12;
Ns     = 36;
T1     = 273 + 25;
Voc_T1 = 21.06 /Ns;
Isc_T1 = 3.80;
T2     = 273 + 75;
Voc_T2 = 17.05 /Ns;
Isc_T2 = 3.92;
TaK    = 273 + TaC;
TrK    = 273 + 25;

Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;
a      = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1 * 1/(T2 - T1);
Iph    = Iph_T1 * (1 + a*(TaK - T1));
Vt_T1  = k * T1 / q;
Ir_T1  = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2  = Isc_T2 / (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b      = Vg * q/(A*k);
Ir     = Ir_T1 * (TaK/T1).^(3/A) .* exp(-b.*(1/TaK - 1/T1));
X2v    = Ir_T1/(A*Vt_T1) * exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
```



```

dVdl_Voc = - 1.15/Ns / 2;
Rs      = - dVdl_Voc - 1/X2v;
Vt-Ta  = A * 1.38e-23 * TaK / 1.60e-19;
f(Ia)   = Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1) = 0;
Vc      = Va/Ns;
Ia      = zeros(size(Vc));
for j   = 1:5;
Ia      = Ia - (Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1)) / (-1 - (Ir.*(
exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1)).*Rs./Vt-Ta);
end

```



ก.2 คำอธิบายรายละเอียด m file สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SOLAREX รุ่น msx60 และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมเดิม (BP Solar's รุ่น SX60 และ SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12)

ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ SOLAREX รุ่น msx60 ใช้งานฟังก์ชันโดยการกำหนดค่าแรงดันอาร์เรย์, ความเข้มของแสง และอุณหภูมิ จะได้ค่ากระแสออกมา เช่น ค่าแรงดันอาร์เรย์เท่ากับ 5 V ความเข้มของแสงเท่ากับ 0.8 Sun และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จะได้เป็น $I_a = \text{msx60}(5,0.8,30)$

ข้อสังเกตฟังก์ชันนี้จะสามารถกำหนดค่าความเข้มของแสงได้ไม่เกิน 1 Sun (1000 W/m²)

function $I_a = \text{msx60}(V_a, \text{Suns}, T_aC)$

- I_a คือ กระแสอาร์เรย์ (array current)
- V_a คือ แรงดันอาร์เรย์ (array voltage)
- Suns คือ ความเข้มของแสง (num of Suns: 1 Sun = 1000 W/m²)
- T_aC คือ อุณหภูมิใช้งาน หน่วย องศาเซลเซียส

ค่าคงที่พื้นฐาน

k ค่าคงที่ Boltzman's = $1.38e^{-23}$

q ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน = $1.60e^{-19}$

% จากค่าคงที่ต่อไปนี้ จะใช้ในการคำนวณโดยการตั้งสมมุติฐานที่ 1000 W/m²

- | | |
|--|--|
| <p>$A = 1.2;$
เป็น</p> <p>$V_g = 1.12;$
ชนิด</p> <p>$N_s = 36;$</p> | <p>% ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของ ไดโอด กำหนดให้เป็น 2 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด crystalline และถ้าเป็น amorphous ให้กำหนดน้อยกว่า 2</p> <p>% ค่า band gap voltage, กำหนดให้เป็น 1.12 V เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็น crystalline, และกำหนดให้เป็น 1.75 V เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิด amorphous</p> <p>% จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในอาร์เรย์ (number of series connected cells (diodes))</p> |
|--|--|

$T1 = 273 + 25;$ % ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการคำนวณ
 $Voc_T1 = 21.1 /Ns;$ % ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด (open circuit voltage per cell at temperature T1)
 $Isc_T1 = 3.80;$ % ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด (short circuit current per cell at temp T1)
 $T2 = 273 + 75;$ % ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ
 $Voc_T2 = 17.05 /Ns;$ % ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด (open circuit voltage per cell at temperature T2)
 $Isc_T2 = 3.92;$ % ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด (short circuit current per cell at temp T2)
 $TaK = 273 + TaC;$ % อุณหภูมิใช้งานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (array working temp)
 $TrK = 273 + 25;$ % อุณหภูมิอ้างอิง (reference temp)

% เมื่อแรงดันอาร์เรย์ (Va) มีค่าเป็น 0 ค่ากระแสที่ได้จากแสง (Iph_T1) จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด

% ค่าคงที่ a คืออัตราส่วนระหว่างกระแสขณะลัดวงจรและค่าอุณหภูมิ

$Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;$ %
 $a = (Isc_T2 - Isc_T1) / Isc_T1 * 1 / (T2 - T1);$ %
 $Iph = Iph_T1 * (1 + a * (TaK - T1));$ %
 $Vt_T1 = k * T1 / q;$ % ค่าคงที่ Boltzman's คูณด้วย ค่าอุณหภูมิต่ำสุด แล้วหารด้วย ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน

$Ir_T1 = Isc_T1 / (\exp(Voc_T1 / (A * Vt_T1)) - 1);$
 $Ir_T2 = Isc_T2 / (\exp(Voc_T2 / (A * Vt_T1)) - 1);$
 $b = Vg * q / (A * k);$
 $Ir = Ir_T1 * (TaK / T1)^{(3/A)} * \exp(-b * (1 / TaK - 1 / T1));$
 $X2v = Ir_T1 / (A * Vt_T1) * \exp^{(Voc_T1 / (A * Vt_T1))};$
 $dVdl_Voc = - 1.15 / Ns / 2;$ % ค่า dV/dI ที่ ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรต่อเซลล์

% ค่าที่ได้จากกราฟคุณสมบัติของผู้ผลิต%

$R_s = -dV/dI_{Voc} - 1/X_{2v};$

% หาค่าความต้านทานอนุกรมต่อเซลล์(series resistance per cell)

$V_t T_a = A * 1.38e^{-23} * T_a K / 1.60e^{-19};$

% หาค่าแรงดันที่ขั้วที่อุณหภูมิใช้งาน = ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของไดโอด * ค่าคงที่ Boltzman's * อุณหภูมิใช้งานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ / ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน

% กำหนดค่า I_a จากฟังก์ชัน $f(I_a)$ นั่นคือ $f(I_a) = I_{ph} - I_a - I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1) = 0;$

% จากนั้นหาค่าด้วยวิธี Newton's method จาก $I_{a2} = I_{a1} - f(I_{a1})/f'(I_{a1})$

$V_c = V_a / N_s;$

$I_a = \text{zeros}(\text{size}(V_c));$

for j=1:5;

$I_a = I_a - (I_{ph} - I_a - I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1)) / (-1 - (I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1)) * R_s / V_t T_a);$

end

ในกรณีที่ต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นอื่นนอกเหนือจากที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้จะยกตัวอย่างในการนำมาเปรียบเทียบหากเปลี่ยนแปลงเซลล์ ซึ่งที่จะนำมาแสดงการเปรียบเทียบเพิ่มเติมอีกจำนวนสองรุ่นคือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท BP Solar's รุ่น SX60 เซลล์เป็น Silicon ที่มีเซลล์อนุกรมกัน 36 เซลล์ ซึ่งมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นดังนี้

คุณลักษณะทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท BP Solar's รุ่น SX60

<i>Electrical Characteristics</i>	<i>BP Solar's model SX 60</i>
<i>Maximum power (Pmax)</i>	<i>60W</i>
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	<i>16.8V</i>
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	<i>3.56A</i>
<i>Guaranteed minimum Pmax</i>	<i>55W</i>
<i>Short-circuit current (Isc)</i>	<i>3.87A</i>
<i>Open-circuit voltage (Voc)</i>	<i>21.0V</i>
<i>Temperature coefficient of Isc</i>	<i>(0.065±0.015)%/°C</i>
<i>Temperature coefficient of Voc</i>	<i>-(80±10)mV/°C</i>
<i>Temperature coefficient of power</i>	<i>-(0.5±0.05)%/°C</i>
<i>NOCT³</i>	<i>47±2°C</i>

2. เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12 เซลล์เป็น Silicon Monocrystalline ที่มีเซลล์อนุกรมกัน 36 เซลล์ ซึ่งมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นดังนี้

คุณลักษณะทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12

<i>Electrical Characteristics</i>	<i>Sunstore model 60/12</i>
<i>Maximum power (Pmax)</i>	60W
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	17.64V
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	3.40A
<i>Guaranteed minimum Pmax</i>	58.2W
<i>Short-circuit current (Isc)</i>	3.60A
<i>Open-circuit voltage (Voc)</i>	21.16V
<i>Temperature coefficient of Isc</i>	0.05A%/°C
<i>Temperature coefficient of Voc</i>	- 0.35V%/°C
<i>Temperature coefficient of power</i>	- 0.45W%/°C
<i>NOCT</i>	46±2°C

จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ในบทที่ 2 ที่นำไปเขียนสมการคำนวณเป็น m file ใน MatLab/Simulink เพื่อพล็อตกราฟให้เป็นไปตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรุ่นนั้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากโรงงานผู้ผลิตมีความแตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำค่า Specification ที่ได้ไปแทนลงสมการ m file ใน MatLab/Simulink ซึ่งตัวแปลที่จะทำให้มีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของเซลล์เปลี่ยนแปลง เป็นดังต่อไปนี้

- A : ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของไดโอด กำหนดให้เป็น 2 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิด crystalline และถ้าเป็น amorphous ให้กำหนดน้อยกว่า 2
- Voc_T1 : ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด
- Isc_T1 : ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด
- Voc_T2 : ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด
- Isc_T2 : ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด
- Rs : หาค่าความต้านทานอนุกรมต่อเซลล์
- T1 , T2 : ค่าอุณหภูมิต่ำสุด, สูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

Specifications of Solar cell (1kW/m², 25°C)

<i>Parameters</i>	<i>SolarEx MSX60</i>	<i>BP Solar's model SX 60</i>	<i>Sunstore model 60/12</i>
<i>Typical peak power (Pm)</i>	<i>60 W</i>	<i>60 W</i>	<i>60 W</i>
<i>Voltage at peak power (Vmp)</i>	<i>17.1 V</i>	<i>16.8 V</i>	<i>17.64 V</i>
<i>Current at peak power (Imp)</i>	<i>3.5 A</i>	<i>3.56 A</i>	<i>3.40 A</i>
<i>Short-circuit current (Isc)</i>	<i>3.8 A</i>	<i>3.87 A</i>	<i>3.60 A</i>
<i>Open-circuit voltage (Voc)</i>	<i>21.1 V</i>	<i>21.0 V</i>	<i>21.16 V</i>
<i>Temperature coefficient of open-circuit voltage (β)</i>	<i>-73mV/°C</i>	<i>-(80±10)mV/°C</i>	<i>-0.35V%/°C</i>
<i>Temperature coefficient of short-circuit current (α)</i>	<i>3mA/°C</i>	<i>(0.065±0.015)%/°C</i>	<i>0.05A%/°C</i>
<i>Approximate effect of temperature on power</i>	<i>-0.38W/°C</i>	<i>-(0.5±0.05)%/°C</i>	<i>-0.45W%/°C</i>



ภาคผนวก ข

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และ INSTRUMENT ACCURACY LIMITS



ข.1 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex-MSX-60

MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules



The MSX-64 and -60 are among the most powerful of Solarex's Megamodule™ series, a product line which is the culmination of nearly three decades of extensive research in polycrystalline silicon photovoltaics. With over 3 amperes of current at peak power, these modules offer the most cost-effective package in the industry, and charge batteries efficiently in virtually any climate.

These modules may be used in single-module arrays or deployed in multiple-module arrays, wired in series/parallel combinations as required to meet current and voltage requirements. They are engineered under Solarex's IntegraSystem™ system integration concept, which ensures full compatibility with other Solarex subsystems and components (support hardware, regulators, etc.) and easy system assembly. As single-module arrays, they may be mounted on a variety of surfaces using optional kits or by means of user-fabricated support hardware. Solarex also offers hardware for supporting multiple-module arrays.

These modules are well-suited for virtually all applications where photovoltaics are a feasible energy source, including telecommunications systems, pumping and irrigation, cathodic protection, remote villages and clinics, and aids to navigation.

Individually Tested, Labeled and Warranted

As part of the final inspection procedure, every MSX module is tested in a solar simulator and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions. Furthermore, the MSX-64 and -60 are covered by our industry-leading limited warranty, which guarantees:

- that no module will generate less than its guaranteed minimum P_{max} when purchased;
- at least 80% of the guaranteed minimum P_{max} for twenty years.

Contact Solarex's Marketing Department for full terms and limitations of this unparalleled warranty.

Reliable and Versatile

The Megamodule series has proved its reliability at thousands of installations in every climate on Earth. Among the features that contribute to its versatility:

Dual Voltage Capability

These modules consist of 36 polycrystalline silicon solar cells electrically configured as two series strings of 18 cells each. The strings terminate in the junction box on the module back. Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration in the field by moving leads in the junction box. This design also allows instal-

lation of bypass diodes on 18-cell strings, which can improve reliability and performance in systems with nominal voltage 24V and above.

High-Capacity Multifunction Junction Box

The size of the junction box (25 cubic inches, 411cc) and its six-terminal connection block allow most system array connections to be made right in the J-box. The box also can accommodate bypass or blocking diodes or a small regulator, which can save the expense and labor of additional boxes. The box is raintight (IP54 rated) and accepts 1/2" nominal or PG13.5 conduit or cable fittings. The standard terminals accept wire as large as AWG #10 (6mm²); an optional terminal block accepts wire up to AWG #4 (25mm²).

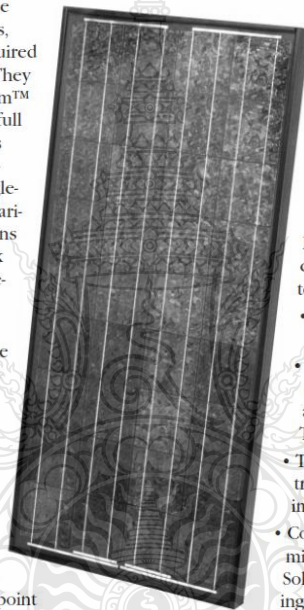
Proven Materials and Construction

Megamodule materials reflect Solarex's quarter-century of experience with solar modules and systems installed in virtually every climate on Earth.

- Polycrystalline silicon solar cells: efficient, attractive, stable.
- Modules are rugged and weatherproof: cell strings are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and tempered glass with a durable Tedlar backsheet.
- Tempered glass superstrate is highly light-transmissive (low iron content), stable, and impact-resistant.
- Corrosion-resistant, bronze-anodized extruded aluminum frame is strong, attractive, compatible with Solarex mounting hardware and most other mounting structures.

Options

- Blocking and bypass diodes
- Solarstate™ charge regulator
- Protective aluminum backplate



More than 20 years ago, Solarex made the first polycrystalline silicon solar cell, advancing photovoltaics beyond the first-generation monocrystalline technology developed for electronics. Developed specifically for photovoltaics, polycrystalline silicon is used in Solarex's Mega™ series to provide a wide range of attractive, efficient modules. They require substantially less energy to manufacture and generate substantially more energy per rated watt than other crystalline silicon modules.

Safety Approved

MSX-60 and -64 modules are listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Group C & D hazardous locations.



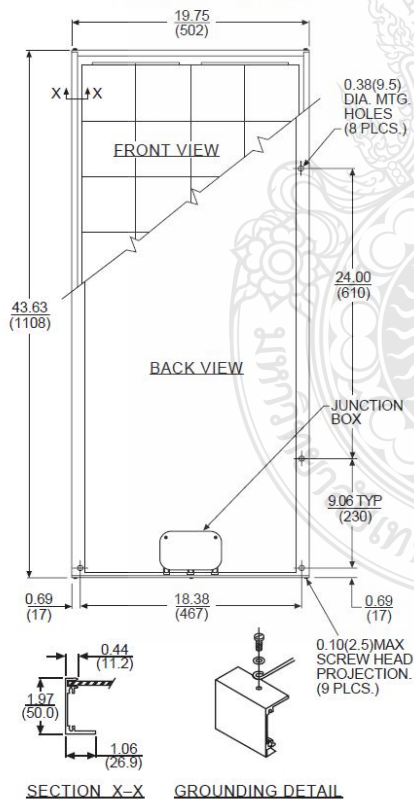
Quality Certified

These modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories to demanding specifications, and comply with IEC 1215, IEEE 1262 and CEC 503 test requirements, including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of one-inch (25mm) hail at terminal velocity;
- 2700 VDC frame/cell string isolation test;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- simulated wind loading of 125 mph (200 kph).

Mechanical Characteristics

Weight: 15.9 pounds (7.2 kg)
Dimensions: Dimensions in brackets are in millimeters
 Unbracketed dimensions are in inches
 Overall tolerances ±1/8" (3mm)



Typical Electrical Characteristics¹

	MSX-64	MSX-60
Maximum power (P _{max})	64W	60W
Voltage @ P _{max} (V _{mp})	17.5V	17.1V
Current @ P _{max} (I _{mp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P _{max}	62W	58W
Short-circuit current (I _{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....-(80±10)mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065±0.015)%/°C...	
Temperature coefficient of power	.....-(0.5±0.05)%/°C...	
NOCT ²	..... 47±2°C	

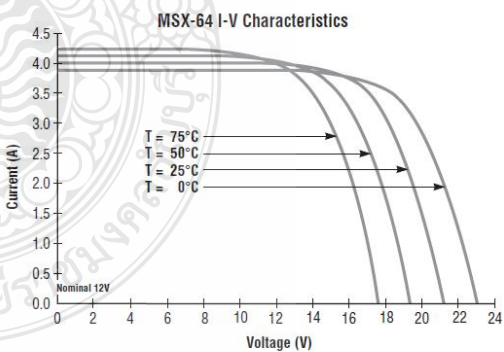
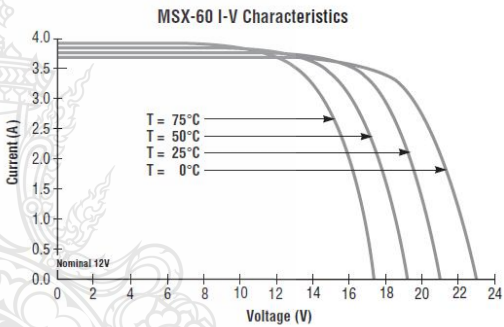
NOTES:

(1) These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in a solar simulator at Standard Test Conditions (STC), which are:

- illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;
- cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).

Operating characteristics in sunlight may differ slightly. To determine the characteristics of modules in 6V configuration, divide the 12V voltage characteristics by 2 and multiply current characteristics by 2. Power values are unchanged.

(2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.



[Download MSX-60 I-V XLS](#)

[Download MSX-64 I-V XLS](#)

[Download CAD](#)

VARIABLES AFFECTING PERFORMANCE

The performance of typical MEGA SX-64 and -60 modules is described by the I-V curves and electrical characteristics table on the next page. Each module's actual, tested output characteristics are printed on its label.

The current and power output of photovoltaic modules are approximately proportional to illumination intensity. At a given intensity, a module's output current and operating voltage are determined by the characteristics of the load. If that load is a battery, the battery's internal impedance will dictate the module's operating voltage. An I-V curve is simply all of a module's possible operating points (voltage/current combinations) at a given cell temperature and light intensity. Increases in cell temperature increase current but decrease voltage.

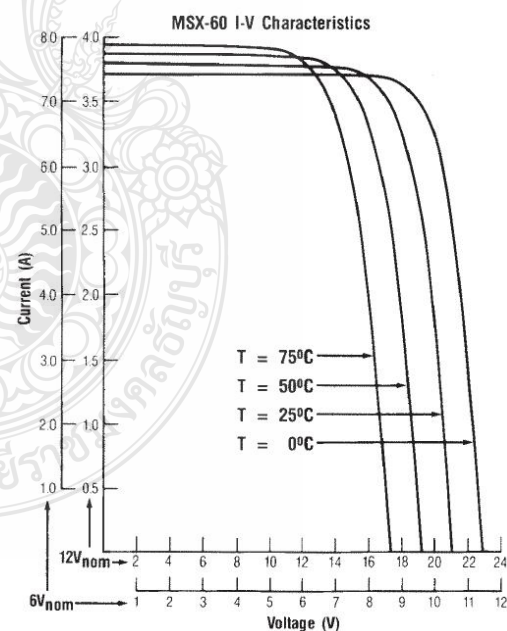
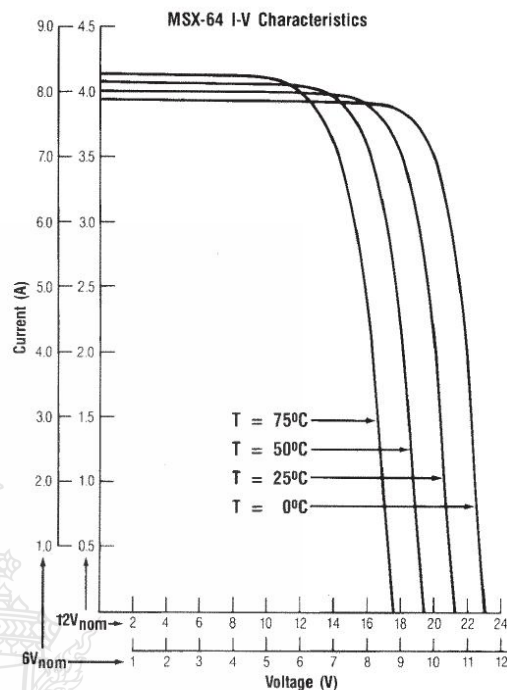
TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾

	12 VOLT CONFIGURATION ⁽²⁾	
	MSX-64	MSX-60
Typical peak power (P_p)	64W	60W
Voltage @ peak power (V_{pp})	17.5V	17.1V
Current @ peak power (I_{pp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum peak power	62W	58W
Short-circuit current (I_{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....$-(80 \pm 10)$ mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065 ± 0.015) %/°C....	
Approximate effect of temperature on power	.....$-(0.5 \pm 0.05)$ %/°C....	
NOCT ⁽³⁾ 49°C.....	

Notes:

- (1) These data represent the performance of typical modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made at Standard Test Conditions (STC), which are:
 - Illumination of 1 kW/m^2 (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5
 - Cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).
- (2) Electrical characteristics of modules wired in the nominal 6V configuration may be found by using the 6V scales on the I-V curves. For more exact values, divide the 12V voltage characteristics in the table by 2 and multiply the 12V current characteristics by 2. Power values are unchanged.
- (3) Under nearly all climatic conditions, the solar cells in an operating module are hotter than the ambient temperature, a fact which must be considered when reading module data. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indication of this temperature rise, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C , solar irradiation of 0.8 kW/m^2 , and average wind speed of 1 m/s .

I-V CHARACTERISTICS

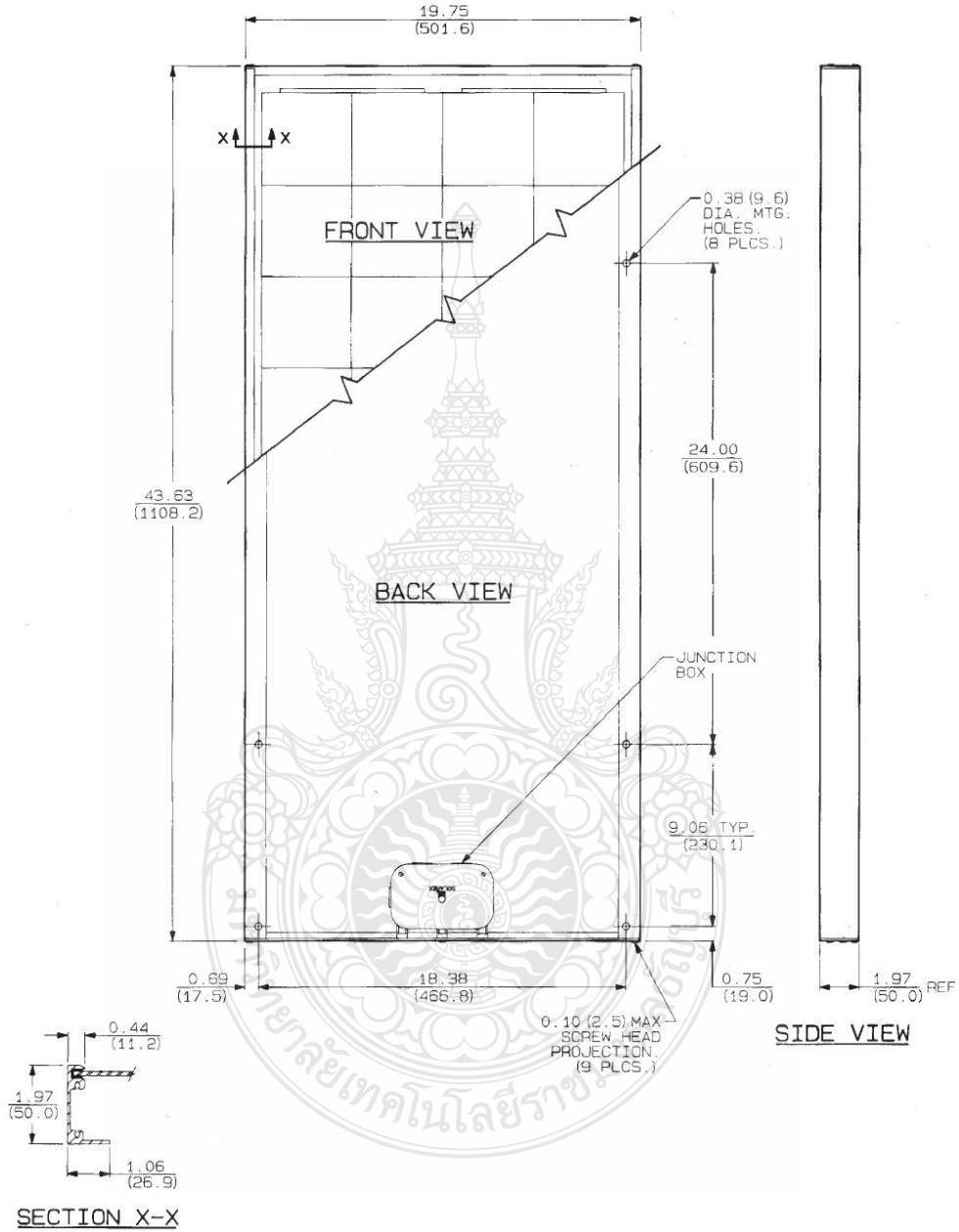


MECHANICAL CHARACTERISTICS

MEGA SX-64 and -60 are mechanically identical, differing only in electrical output.

Weight: 15.9 pounds (7.2 kg)

Dimensions: Dimensions in brackets are in millimeters
Unbracketed dimensions are in inches



ข.2 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BP Solar's รุ่น SX60



BP SX 60

60-Watt
Multicrystalline Photovoltaic Modules

BP Solar's SX series provides cost-effective photovoltaic power for general use, operating DC loads directly or, in an inverter-equipped system, AC loads. With 60 watts of nominal maximum power, the BP SX 60 is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its 36 series-connected cells charge batteries efficiently in virtually any climate.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of this module's construction and materials:

- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies;
- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass.



Clear Anodized Universal Frame

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

High-Capacity Versatile Junction Box

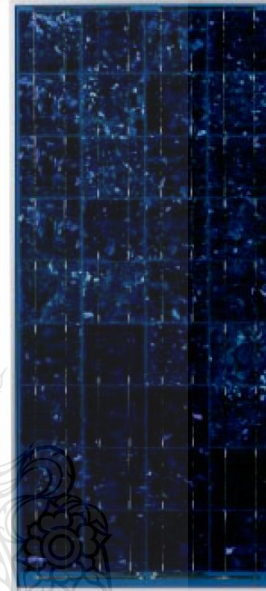
The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box. Options include:

- blocking and bypass diodes;

- oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
 - Solarstate™ charge regulator.
- Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TUV Rheinland as Class II equipment for use in systems with voltage up to 1000 VDC;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant with the requirements of IEC 61215, including:
 - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
 - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
 - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
 - a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
 - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).



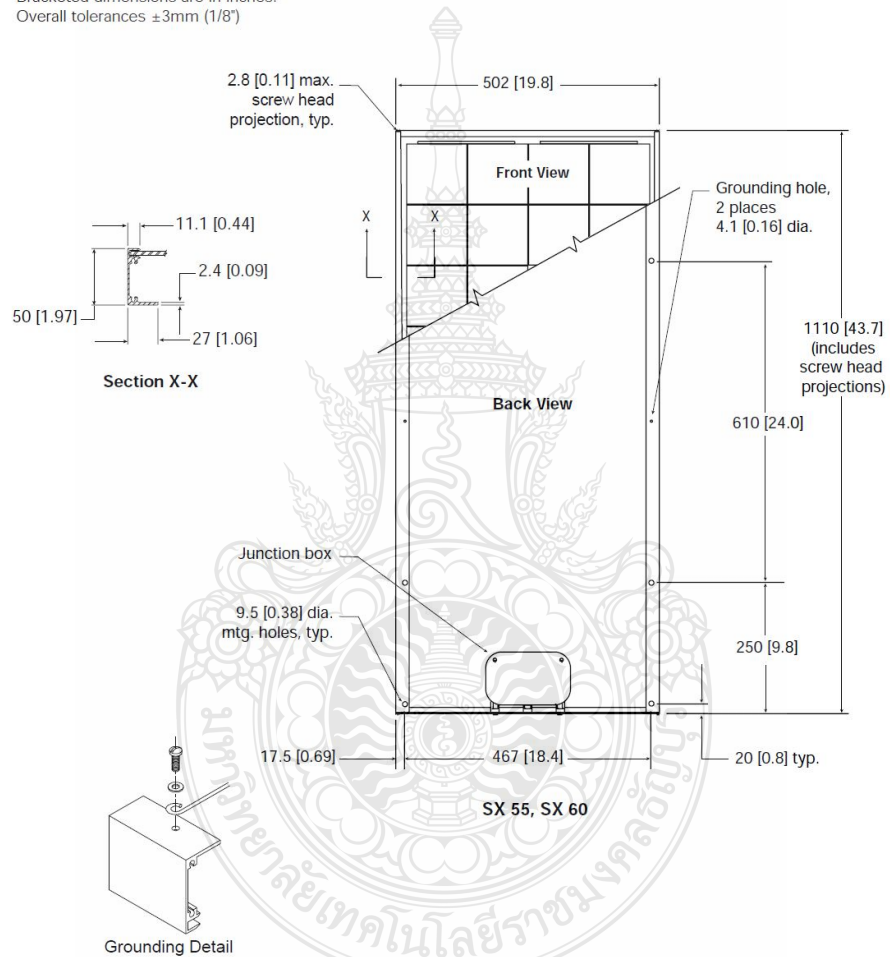
BP SX 60



Mechanical Characteristics

Weight
7.2 kg (15.9 pounds)

Dimensions
Unbracketed dimensions are in millimeters.
Bracketed dimensions are in inches.
Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ ($1/8"$)



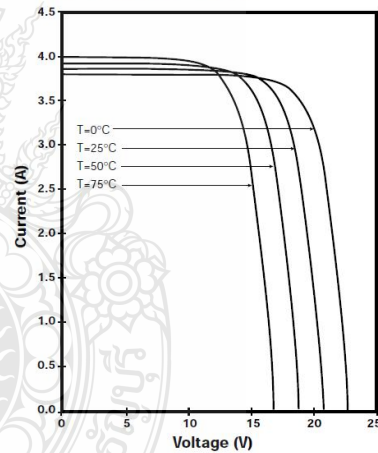
Electrical Characteristics¹

	BP SX 60	BP SX 55 ⁴
Maximum power (P_{max}) ²	60W	55W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	16.8V	16.5V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.33A
Guaranteed minimum P_{max}	55W	50W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.69A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.0V	20.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum series fuse rating	20A	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	

Notes

- These data represent the performance of typical modules in 12V configuration as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
 - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max} .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1m/s.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the SX 55 is assembled using cells of slightly lower power than the SX 60.

BP SX 60 I-V Curves



ข.3 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12

SUNSTORE
SOLAR POWER SOLUTIONS

Sunstore Monocrystalline 12v 60w Solar Panel



MONO

Rigorous quality control to meet highest international factory manufacturing standards including MCS, CE and ISO

High performance under low light conditions (cloudy days, mornings and evenings)

High Cell efficiency of 17%

Tested to withstand snow loads of 200kg /sqm

Highly transparent low iron tempered glass with enhanced stiffness and impact resistance

Unique frame design with high mechanical strength for easy installation

Advanced encapsulation material with multiplayer sheet lamination to provide efficient protection from the severest environmental conditions

5 Years warranty of quality and workmanship
20 Years warranty of power output

Local UK technical support and warehousing with rapid response time.

Electrical Data @ STC

Peak Power Watts- P_{MAX} (WP)
Power Output Tolerance- P_{MAX} (%)
Maximum Power Voltage- V_{MAX} (V)
Maximum Power Current- I_{MP} (A)
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)
Short Circuit Current- I_{SC} (A)
Module Efficiency η_m (%)

Sunstore 60/12

60
+/- 3%
17.64
3.40
21.16
3.60
12.3

Temperature Ratings

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) 46°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)
Temperature Coefficient of P_{MP} -0.45%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC} -0.35%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC} 0.05%/°C

Values at Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C)

Mechanical Data

Solar cells Monocrystalline
Cells orientation 36 cells
Module dimension 899 x 537 x 35mm
Weight 5.8kg
Glass High transparency solar glass 3.2mm (0.13inches)
Frame Anodized aluminium alloy
J-Box IP 65 rated
Cables/Connector Photovoltaic Technology cable 4.0mm² 340mm, MC4 Connectors

Registered office // 125 Findon Road, Worthing, BN14 0BQ
Registered No. 7814446 Cardiff

SUNSTORE
125 FINDON ROAD,
WORTHING,
WEST SUSSEX,
BN14 0BQ

T // 01903 213141
E // info@sunstore.co.uk
W // www.sunstore.co.uk

๗.4 CTL DECISION SHEET DSH251E FOR INSTRUMENT ACCURACY LIMITS (DSH251E)



IEC System for Conformity Testing and Certification
of Electrotechnical equipment and Components

CTL DECISION SHEET

Standard(s):	Subclause(s):	No.	Year
Generality		DSH 251E	2014
Category:			
General			
Subject:	Key words:	Developed by	Approved at
Measurement accuracy	- Measuring range - Accuracy - Instrument - Leakage (touch) current	WG1-WG4	2015 CTL Plenary Meeting

Instrument Accuracy Limits

Measurement values stated in a CB Test Report shall be made with instruments with accuracies within the limits stated below. These values apply unless more stringent requirements are given in the reference standard.

<u>Parameter</u>	<u>Range</u>	<u>Instrument accuracy of Measuring Range</u>
Voltage - Up to 1000 V	up to 1 kHz	± 1,5%
	1 kHz up to 5 kHz	± 2%
	5 kHz up to 20 kHz	± 3%
	20 kHz and above	± 5%
	dc up to 20 kHz	± 3%
- 1000 V and above	20 kHz and above	± 5%
Current - Up to 5 A	dc up to 60 Hz	± 1,5%
	above 60 Hz up to 5 kHz	± 2,5%
	5 kHz up to 20 kHz	± 3,5%
	20 kHz and above	± 5%
	dc up to 5 kHz	± 2,5%
- Above 5 A	5 kHz up to 20 kHz	± 3,5%
	20 kHz and above	± 5%
Leakage (Touch) current ¹	50 Hz up to 60 Hz	± 3,5%
	greater 60 Hz up to 5 kHz	± 5%
	greater 5 kHz up to 100 kHz	± 10%
	greater 100 kHz up to 1 MHz	under consideration
Power (50/60 Hz)	up to 3 kW	± 3%
	above 3 kW	± 5%
Power Factor (50/60 Hz)		± 0,05



**IEC System for Conformity Testing and Certification
of Electrotechnical equipment and Components**

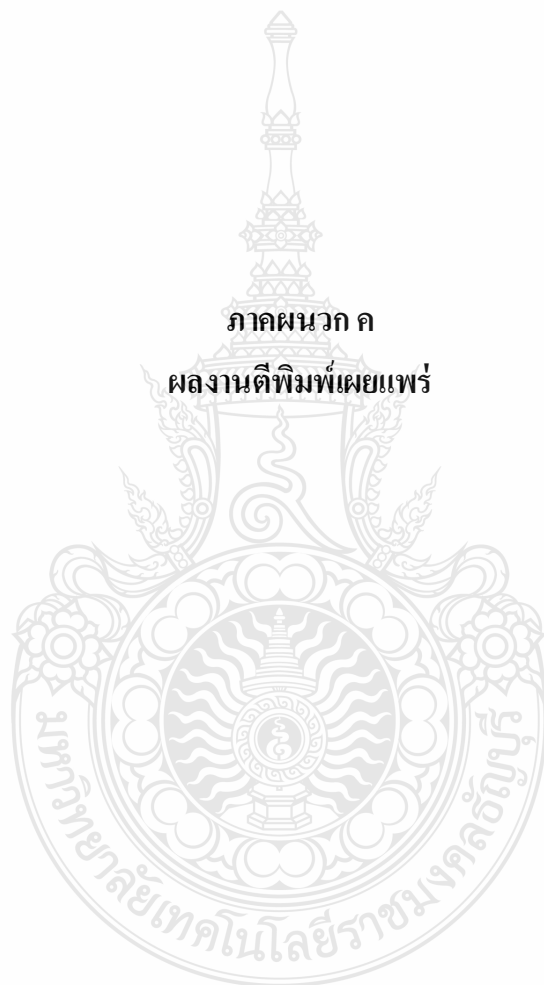
<u>Parameter</u>	<u>Range</u>	<u>Instrument accuracy of Measuring Range</u>
<i>Frequency</i>	up to 10 kHz	± 0,2%
<i>Resistance</i>	1 mΩ up to 100 mΩ and above 1 MΩ up to 1 TΩ above 1 TΩ for all other cases	± 5% ± 10% ± 3%
<i>Temperature</i> ^{2, 3}	- 35°C to below 100° C 100° C up to 500° C below - 35°C	± 2°C ± 3% ± 3°C
<i>Time</i>	10 ms up to 200 ms 200 ms up to 1 s 1 s and above	± 5% ± 10 ms ± 1%
<i>Linear dimensions</i>	up to 1 mm 1 mm up to 25 mm 25 mm and above	± 0,05 mm ± 0,1 mm ± 0,5%
<i>Mass</i>	above 10 g and up to 100 g 100 g up to 5 kg 5 kg and above	± 1% ± 2% ± 5%
<i>Force</i>	for all values	± 6%
<i>Mechanical energy</i>	for all values	± 10%
<i>Torque</i>		± 10%
<i>Angles</i>		± 1 degree
<i>Relative humidity</i>	30% to 95% RH	± 6% RH
<i>Barometric air pressure</i>		± 10 kPa
<i>Gas & fluid pressure</i>	for static measurement	± 5%

1 The stated tolerances apply to the total tolerance of the leakage (touch) current circuit and metering Instrument. Refer to CTL-OP 113 "Leakage (Touch) Current Measurement Instruments".

2 Thermocouple not included in the Instrument accuracy of measuring range. Thermocouples type "K", "T" and "J", premium grade, are recommended.
Switching power supplies present an electrically noisy environment for test instrumentation. When measuring temperatures on and within switching power supplies, thermocouples are in the immediate vicinity or in intimate contact with component sources of the electrical noise. Type J thermocouples are made of material that is magnetic. Type K thermocouples are made of material that is slightly magnetic. Type T thermocouples are made of non magnetic materials. As a result Type T thermocouples are affected less by the high frequency magnetic fields present and give more accurate results.

3 Not for measurements related to relative humidity.

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ก.1 Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control

**12th Eco-Energy and Materials
Science and Engineering Symposium**

11-14th June 2015 Peace Laguna resort&Spa,Ao Nang, Krabi, Thailand

- Energy Technology
- Environmental and Social Impact
- Nuclear Technology
- Smart Innovations For Future Life
- Material Technology
- Energy Economic and Management
- Railway Engineering

Co-organized by

Sponsored by

Conference Program of 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering

11th June 2015			
13.00-16.00		Registration (G floor)	
17.00-18.00		EMSES committee meeting	
18.00-20.00		Welcome party (Ballroom)	
12th June 2015			
9.00-9.30		Opening Ceremony (Ballroom)	
9.30-10.30	Keynote speaker: Prof. Dr. Koichi Miura: Developing New Technologies for Utilizing Low Rank Coals and Biomass Wastes in Asian Countries Introduction of a Japan-Thailand SATREPS Project		
Coffee break			
10.30-10.45			
ROOM			
10.45-12.00	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Energy Technology	Nuclear Technology
Paper ID	IN05, MT47, MT70, MT74, MT30, MT76	IN13, ET02, ET26, ET27, ET29, ET30	IN01, MT19, MT28, MT09, MT48, MT53
Chair	Prof. Dr. Hiroyuki Hamada	Asst. Prof. Dr. Terdkiat Lumpeteprakam	Dr. Nathabhat Pankong
Co-Chair	Dr. Anin Memon	Asst. Prof. Dr. Annoiy Reungwaree	Dr. Chatchai Veerantisakul
12.00-13.00		Lunch	
13.00-15.00	Ballroom	Energy Technology	Thai-Japan SATREPS I
Paper ID	IN03, MT31, MT15, MT16, MT17, MT18	ET14, ET15, ET16, ET19, ET20	IN15, MT91, SI09, ET06, MT64
Chair	Assoc. Prof. Dr. Jisutomu Ito	Asst. Prof. Dr. Wanchai Subsingha	Prof. Dr. Koichi Miura
Co-Chair	Dr. Narongchai O-Chareon	Asst. Prof. Dr. Boonyang Plangklang	Asst. Prof. Dr. Nakorn Worusuwanarak
15.00-15.15		Break	
15.15-17.00	Material Technology	Energy Technology	Material Technology
Paper ID	IN07, IN16, MT22, MT23, MT72, MT24	ET01, ET03, ET04, ET07, ET11	IN10, MT37, MT39, MT41, MT42, MT43
Chair	Dr. Hiroyuki Inoya	Dr. Winai Jampeng	Dr. Tomoko Ota
Co-Chair	Asst. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree	Dr. Sataporn Thongwilk	Dr. Anin Memon
18.00-22.00		Banquet	
13th June 2015			
	Ballroom	Peach hall	Library
9:00-10:30	Material Technology	Material Technology	Material Technology
Paper ID	IN11, MT45, MT49, MT50, MT51, MT58	IN12, MT54, MT59, MT60, MT61, MT62	IN14, MT71, MT67, MT90, MT10, MT13
Chair	Asst. Prof. Dr. Ken Miyata	Prof. Dr. Toshiyazu Umamura	Asst. Prof. Dr. Manit Nithitanakul
Co-Chair	Dr. Narongchai O-Chareon	Asst. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree	Dr. Natee Srisawat
10:30-10:45		Coffee break	
10:45-12:15	Material Technology	Material Technology	Thai-Japan SATREPS II
Paper ID	IN02, MT78, MT79, MT81, MT65	IN06, MT86, MT26, MT27, MT29, MT77	MT92, ET17, MT34, MT69, MT93, MT68, MT94
Chair	Asst. Prof. Dr. Kazushi Yamada	Dr. Hisanori Ando	Prof. Dr. Katsuyasu Sugawara
Co-Chair	Dr. Supaporn Thumsoorn	Dr. Kiyooki Ishimoto	Asst. Prof. Dr. Nakorn Worusuwanarak
12.15-13.30		Lunch	
13.30-14.30		Closing ceremony	

*E-Proceeding will be uploaded on www.emses.org

List of Reviewers:

Prof. Dr. Tetsuo TEZUKA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Hideki YAMANE, KIT, Japan
Prof. Dr. Asami NAKAI, KIT, Japan
Prof. Dr. Hiroyuki HAMADA, KIT, Japan
Prof. Dr. Yew Wei LEONG, NUS, Singapore
Prof. Dr. Hideaki OHGAKI, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO, TU, Thailand
Prof. Dr. Shiro SAKA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Hitomi OHARA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Young S. CHAI, Korea
Prof. Dr. Nipon TANGTHAM, KU, Thailand
Prof. Dr. Masayoshi OKUBO, Kobe Uni, Japan
Prof. Dr. Somchai WONGWISES, Thailand
Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN, UQ, Australia
Prof. Dr. Yukio OGATA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Takaguki SAKAI, Tokushima University, Japan
Prof. Dr. Yuichi ANADA, Hokkaido Info. Uni., Japan
Prof. Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP, KMUTT, Thailand
Prof. Dr. Per B. ZETTERLUND, UNSW, Australia
Prof. Dr. Kawee SRIKULKIT, CU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY, IIT-Madras, India
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN, IPUOP, USA
Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES, KMITL, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI, Japan
Assoc. Prof. Dr. Kaan KERDCHEUN, RMOTI, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT, SWU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA, Nakaoga, Japan
Assoc. Prof. Dr. Yuttana KAMSUWAN, CMU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN, IPU, USA
Assoc. Prof. Dr. Suriyon TANSURIYAVONG
Assoc. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI, KMUTNB, Thailand
Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIKAK, KU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Supakit SUTTIRUENGWONG, SU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Vallop PHUPA, RMUTP, Thailand
Asst. Prof. Dr. Pramook UNAHALEKHAKA, RMUTSB, Thailand
Asst. Prof. Dr. Arthit SODE-YOME, EGAT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Wirachai ROYNARIN, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Jakkree SRINONCHAT, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Uthen KAMNAN, RMUTL, Thailand
Asst. Prof. Dr. Cattariya SUWANNASRI, KMUTNB, Thailand
Asst. Prof. Somchai BIANSONGNERN, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonyang PLANGKLANG, RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sivakorn ANGTHONG, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Supakij SUTTIRUENGWONG, SU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO, KU, Thailand
Dr. Toshikazu UMEMURA, Plaisir and, KIT, Japan
Dr. Tomoko OTA, Chuo Business, Japan
Dr. Hiroyuki INOYA, KIT, Japan
Dr. Ryo MARUI, Marui Textile Machinery Co., Ltd., Japan
Dr. Masayuki OKOSHI, KIT, Japan
Dr. Masatoshi IJI, NEC, Japan
Dr. Sei-ichi AIBA, Japan
Dr. Pinit SRITHORN, RMUTI, Thailand
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL, RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG, RMUTT, Thailand
Dr. Sataporn THONGWIK, RMUTT, Thailand
Dr. Prusayon NINTANAVONGSA, RMUTT, Thailand
Dr. Surawut CHUANGCHOTE, KMUTT, Thailand
Dr. Sorapong PAVASUPREE, RMUTT, Thailand
Dr. Natee SRISAWAT, KMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG, RMUTT, Thailand
Dr. Supaporn THOMSORN, RMUTT, Thailand
Dr. Kulwadee SANGSANO, RMUTT, Thailand
Dr. Thirawat MUEANSICHA, RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON, RMUTT, Thailand
Dr. Werarak LAOONGCHAN, RMUTT, Thailand
Dr. Meng jing, RMUTT, Thailand
Tetsuo KIKUCHI, ToyuGiken, Japan
Toshi SUGAHARA, Maruhachi Corporation, Japan
Takanori KITAMURA, Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan
Takanori NEGORO, Negoro Sangyo Co., Ltd., Japan
Takashi FURKAWA, Hishiken Co., Ltd., Japan



CONTENT

ET26	A Comparative Study of Sinusoidal PWM and Third Harmonic Injected PWM Reference Signal on Five Level Diode Clamp Inverter <i>Wanchai Subsingha*, Chaiwat Pangpun</i>	70
ET27	Design and analysis three phase three level diode-clamped of grid connected inverter <i>Purached Juntamon and W. Subsingha</i>	75
ET28	Design and Low Power Test of Pulse Forming Network for Klystron Modulator at Chiang Mai University <i>J. Saisut^{1,2*}</i>	78
ET29	Analysis of Output Power Impact on PV Rooftop System under Different Installation Positions by PSCAD <i>N. Thanomsat, B. Plangklang</i>	81
ET30	Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control <i>Malee Patchouy and Wanchai Subsingha</i>	86

Material Technology

MT01	Synergistic effect of fillers and APP on mechanical properties and flame retardancy of recycled PET composites <i>Supaphorn Thumsorna, b, Jian Jun Liuc Wiranphat Thodsaratpreeyakul^b, Takanori Negorob, Hiroyuki Inoya^b, Masayuki Okoshi^b, Hiroyuki Hamada^b</i>	94
MT09	Chitosan Coating on Biodegradable Film Modified Surfaces by Corona Treatment <i>Supachai Sanga and Nattakarn Hongsrphan</i>	99
MT10	Mechanical Enhancement of Poly(Butylene Succinate) with Commercial Synthetic Fibers <i>Alongkorn Popanna and Nattakarn Hongsrphan</i>	104
MT11	Preparation of Papers for 12 th EMSES 2015 Conference Flameretardancy of Bio-Base Plastics <i>Masayuki Okoshi, Supaphom Thumson, Hiroyuki Hamada</i>	110
MT13	The self-cleaning and photocatalytic properties of TiO ₂ and TiO ₂ doped with SnO ₂ thin films preparation by sol-gel method <i>Nipon Maneechot and Weerachai Sangchay</i>	113

Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control

Malee Patchouy and Wanchai Subsingha*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110
*Corresponding Author: E-mail: wanchai.s@en.rmutt.ac.th

Abstract— In this article, mathematical model of PV model is investigated in order to study the affection in irradiance, temperature, parameters to the PV's output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator. By which, PV simulator is utilized by DC converter circuit with a current feedback control. This may be useful if is possible to implementing into a real world PV simulator. In this paper, PV simulator is modelled using MATLAB/Simulink program, which is composed of DC converter and a proper controlscheme. From the simulation results, it can be observed that I-V relationship of the PV simulator is quite the same as of such PV mathematical model. This means that, it is possible to build a real PV simulator in commercial in a further work.

Keywords— PV model, PV simulator, DC Converter, Feedback control.

1. INTRODUCTION

PV (Photo Voltaic) cell is the devices that convert photons into electric potential in PN silicon junction or other material [1]. PV system is a popular renewable energy source due to their energy-friendly environment [2]. However, its high costs may cause the difficulties in development and experiments for laboratory. Mean by that, practical PV simulator which emulates output characteristics of PV module through a real converter circuit can be used in replacement of an actual PV module in laboratory scale.

2. PV MODEL

Mathematical model

The equivalent circuit of PV is a current source parallels with a diode and resistances as shown in Fig. 1. When PV exposed to the sunlight, a current which is proportional to the solar irradiance is produced [3].

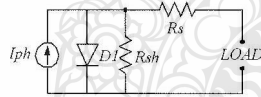


Fig. 1 Single diode PV model

The circuit of Fig 1 is described by Shottky diode equations incorporated with diode quality factor in account of the recombination effects in space-charge region [3]. The currents equations of PV cell are given by (1) to (3).

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ e^{\left(\frac{V + IR_s}{NKT} \right)} - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I \cdot (T - T_{ref})) \cdot \lambda \quad (2)$$

$$I_s(t) = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\left(\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{NKT} \right)} \quad (3)$$

Where I_{ph} is photon current, R_s , R_{sh} are series and shunt resistance, N is ideal diode factor, K is Boltzman constant, q is electron charge and I_s is reverse saturation current of diode, K_I is short-circuit current temperature coefficient of PV's cell, I_{sc} is short circuit (SC) current of cell, λ is solar

irradiance, E_g is band gap energy of semiconductor and V_t is ambient temperature voltage. By consideration, The behaviour of PV cells are described by I_{ph} , N , I_s , R_s and R_{sh} . In which, these parameter depend on solar irradiance (λ) and temperature (T) [1].

However PV module is a congregation of PV cells. So, V-I relationship of PV module (neglecting R_s , R_{sh}) is given in (4) [1], where n_s and n_p are number of series and shunt cells in PV module.

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left(e^{\left(\frac{qV}{NKT n_s} \right)} - 1 \right) \quad (4)$$

• **Fill factor (FF)**: SC current and OC (open circuit) voltage, which are maximum current and voltage of PV cell. By theory, the product of these values is the maximum power of PV cell [3]. *FF* is defined as the ratio of actual maximum obtainable power, ($V_m \cdot I_m$) to the theoretical power, ($I_{sc} \cdot V_{oc}$). It is given as[3].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

• **Maximum efficiency (η)**: is the ratio of maximum output power to the input power [4].

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (6)$$

3. SIMULATION MODEL OF PV MODULE

3.1. Mathematical model

The Solarex MSX60 PV module was chosen to do a PV model. It provides 60 W. of nominal max. power, and it has 36 polycrystalline silicon cells in series connecting. The specifications are shown in Table 1 [5].

Table 1. Typical electrical characteristic of MSX-60

Solarex MSX60 Specifications (1kW/m ² , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (P _m)	60 W
Voltage at peak power (V _m)	17.1 V
Current at peak power (I _m)	3.5 A
Short-circuit current (I _{sc})	3.8 A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.1 V
Temp. coefficient of OC voltage (β)	-73mV/°C
Temp. coefficient of SC current (α)	3mA/°C
Approx. power by temp.	-0.38W/°C

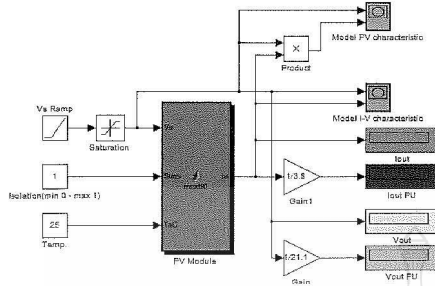


Fig. 2 Simulink model of PV Module

The model of the PV module was implemented using a MATLAB/Simulink program. The model parameters are evaluated during execution using the equations listed on the previous section. The program, calculate the current and voltage, using typical electrical parameter of the module: $I_{sc}=3.8A$, $V_{oc}=21.1V$, $\beta=3mA/^{\circ}C$, $\alpha=-73mV/^{\circ}C$, $N=1.2$, $I_s=100nA$ and the variables Irradiation (λ) Temperature (T). The PV model is implemented and shown in Figure 2.

3.1. Simulation Results of PV Cell/Module

PV Cell

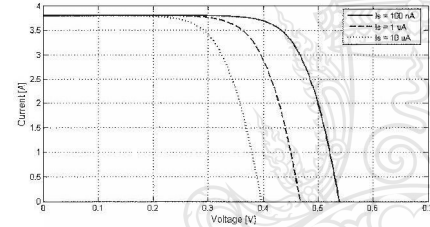


Fig. 3(a). IV curve of PV cell correspond on I_s

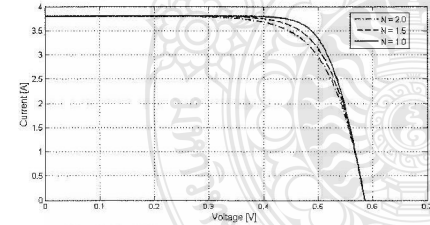


Fig. 3(b). IV curve of PV cell correspond on N

Fig.3(a) shows I-V curve of PV cell for the reverse saturation current of diode (I_s) at 100nA, 1 μ A, and 10 μ A. It is seen that increasing of I_s affect on decreasing of V_{oc} (open circuit voltage). Fig 3(b) shows I-V curve of PV cell for the ideal factor (N) at 1.0, 1.5 and 2.0. It can be observed that increasing N affects on increasing V_{oc} .

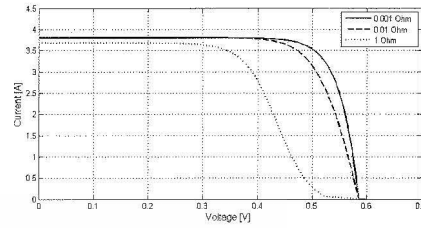


Fig. 4 IV curve of PV cell correspond on R_s

Fig 4(a) shows I-V curve of PV cell for the values of R_s at 1m Ω , 0.01 Ω and 1 Ω . It is seen that increasing R_s affect on decreasing Fill factor (FF). The shunt resistance R_{sh} is inversely related with shunt leakage current to the ground. In general, the PV efficiency is insensitive to the variation in R_{sh} which can be assumed to approach infinity without leakage current[7]

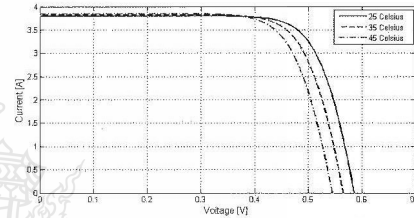


Fig. 5(a). IV curve of PV cell on varying $T(^{\circ}C)$

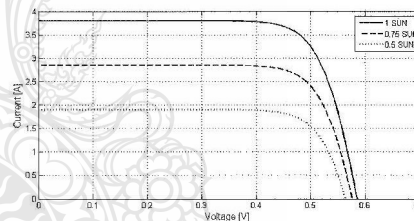


Fig. 5(b). IV curve of PV cell on varying λ

From Fig. 5(a) and Fig.5(b) it found that increasing of working temperature, I_{sc} will increases. In another ways, increasing output current will leads to decreasing of PV output voltage, which PV output power always decrease at higher temperature. On the other hand, from Fig.5, the increasing of solar irradiance, I_{sc} of PV will be increased, and the maximum output power may increasing. This means that open-circuit voltage is logarithmically depend on solar irradiance, and the short-circuit current is directly proportional to the radiant intensity.

PV Module

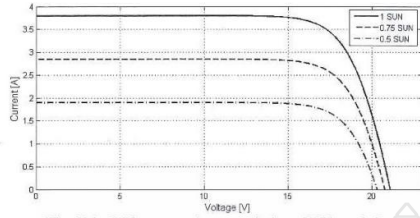


Fig.6(a). I-V output characteristics of PV module

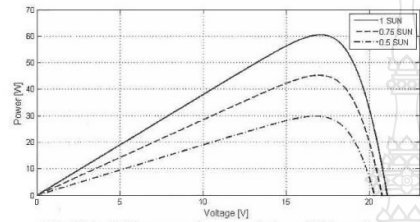


Fig.6(b). P-V output characteristics of PV module

In PV module, there is one path available for conduction current due to PV cells that connected in series, therefore $n_p = 1$. The number of PV cell that connected in series in this PV module here is 36, hence n_s is 36. Therefore, the simulation result the I-V and P-V curve of a PV module are shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b) respectively.

Table 3 shows the comparison between the simulation result of PV module model and its electrical characteristics (MSX60). It found that the error is acceptable thresholds and the simulation result the I-V and P-V curve of a PV module are shown in Fig. 7

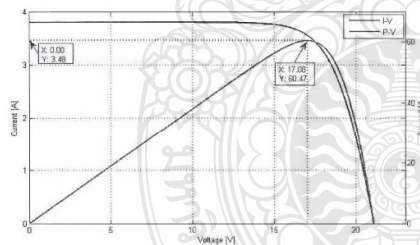


Fig.7. Simulation result the I-V and P-V curve of a PV module

Table 3. Error of PV module model

	MSX-60	Simulation	Error
P_m (W)	60.0	60.47	0.78%
V_m (V)	17.1	17.08	0.12%
I_m (A)	3.5	3.48	0.57%

4. SIMULATION OF PV SIMULATOR

4.1 Simulation Model

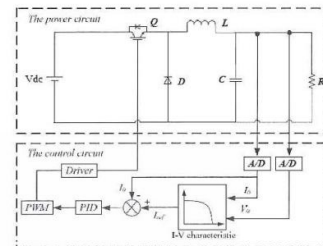


Fig.8 Block diagram of proposed PVsimulator

A photovoltaic simulator that emulates the output characteristics of photovoltaic modules can be used in replacement of an actual photovoltaic modules [6]. The PV simulator is mainly consists of a DC buck converter and a control system which is using dsp board implementation. A current transducer (CT) was used to detect the output PV module's current and then sent back to the DSP controller board in order to calculate PWM triggering signal for IGBT of the DC converter.

In the further works, real time hardware has to be accomplished in order to produce external output aspect following the I-V characteristics of such PV modules.

However, in this paper, PV simulator is modelled using MATLAB/Simulink program. By which, PV simulator that consisted of a DC buck converter and a proper feedback control scheme as shown in Fig. 9.

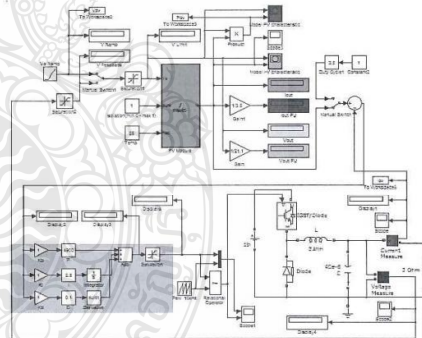


Fig.9. DC buck converter and a PID feedback control scheme

4.2 Simulation Results

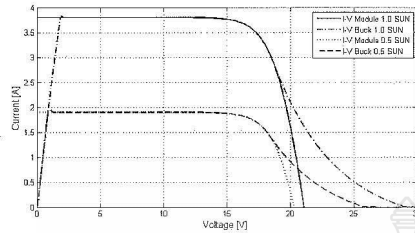


Fig.9 I-V curve of PV module under different solar irradiance (T=25°C) compared PV based DC-DC Converter

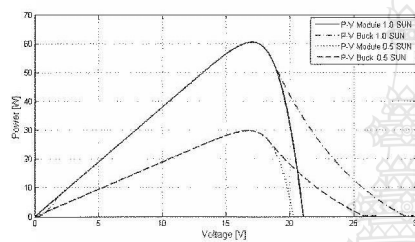


Fig.10 P-V curve of PV module under different solar irradiance (T=25°C) compared PV based DC-DC Converter

The output voltage of the DC converter based PV simulator in this paper is designed to be adjusted from 7V to 22V. In order to test the DC converter based PV simulator, an adjustable resistor (Rload) is used by changing the value of resistor from 2Ω to 49Ω. As shown in Fig. 9 is I-V curve of PV module under different solar irradiance 25°C compared PV based DC-DC Converter and Fig. 10, Comparing P-V curve, the mathematical model of the PV with the DC converter based PV simulator it show that I-V curve of the PV simulator via DC converter is this paper is well matching with the of MSX60 PV module except the small part of voltage control zone of PV experimental curve need to be adjustment to the I-V curve with particularly in both different solar irradiance and the temperature are same.

5. CONCLUSIONS

This paper presents a PV simulator which mainly consists of a buck converter and digital controller controlled by a personal computer. According to the application requirement, the hardware of the PV simulator is designed. Based on design in this paper the output characteristics of PV module working under variable sunshine intensity or temperature are simulated. The simulation results confirm that the PV simulator designed in this paper is well matching with the actual PV module except the small part of voltage control zone of PV experimental curve need to be adjustment and the work done in this paper important to experimental foundation for the actual application of PV.

REFERENCES

[1] Savita Nema, R.K.Nema and Gayatri Agnihotri. 2010. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/

module/ array and their experimental verification. In *International Journal of ENERGY AND ENVIRONMENT*. Volume 1, Issue 3 , pp. 487-500.

[2] A. bilsalam, J. Haema, I. Boonyaroonate and V.Chunkag. 2011. Simulation and study of Photovoltaic cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load. In *8th International Conference on Power Electronic –ECCE Asia*. The Shilla Jeju, Korea, May 30–June 3, pp. 3033-3036.

[3] Pilin Junsangri and Fabrizio Lombardi. 2010. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In *25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, pp. 240-248.

[4] Francisco M. Gonzalez-Longatt. 2005. Model of Photovoltaic Module in Matlab™. In *II CIBELEC*.

[5] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su. 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCEC. san Francisco, USA, October 22-24*.

[6] Qingrong Zeng, Pinggang Song and Liuchen Chang . 2002. A PHOTOVOLTAIC SIMULATOR BASED ON DC CHOPPER. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. pp.257-261.

[7] Huan-Liang Tsai. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. In *H.-L. Tsai / Solar Energy 84 (2010) 1318–1326*.

ค.2 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11
11st Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT)
วันที่ 17-19 มิถุนายน 2558
ณ โรงแรมบางเลน เออร์โท อิมพีวีสลอรี่

จัดการประชุมโดย
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ร่วมกับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน

รศ.ดร. อติศักดิ์ นาถกรณกุล

รศ.ดร. ศิริชัย เทพทา

รศ.ดร.ณัฐ ภาศยปนนท์

รศ.ดร.มานะ อมรกิจบำรุง

ผศ.ดร. นริศ ประทีนทอง

ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร

ผศ.ดร. เก้ากัญญา สุดประเสริฐ

ผศ.ดร.จิรพรรณ เตียรณีสวรรณ

ผศ.ดร.กุสกาภา กุบาฮา

ผศ.ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี

ผศ.ดร.พัฒนาะ รักความสุข

ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.ดลเดช ตั้งตระการพงษ์

ผศ.ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก

ผศ.ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย

ผศ.ดร.สมชาย มณีวรรณ

ผศ.ดร.ศิรินุช จินดารักษ์

ผศ.ดร.สุชาติ แยมเม่น

ผศ.ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์

ผศ.ดร.วราภรณ์ รัตตพงษ์สิทธิ์

ผศ.ดร.ธีระชัย บงการณ

ดร.พัลลภ มณีโชติ

ดร.ทงศักดิ์ โนไชยา

ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.วราเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี

ดร.นรรัตน์ วัฒนมงคล

ดร.โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ

รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.สรรพวรช วิทยาชัย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.รจนา ประไพพ

ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร. จิบดีนทร์ แสงสว่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผศ.ดร.ยุทธนา กั้นทะพะเยา

มหาวิทยาลัยพะเยา

ดร.วิชเนียรณ เจริญวัฒน์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ผศ.ดร.วราเชษฐ์ ตรุทัศน์วินท์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ผศ.ดร. สุภาภรณ์ สุดประเสริฐ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธียนนท์

ผศ.ดร. ประสาน สลัดดีเรื่องศักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผศ.ดร.วิรัชชัย โรยณรินทร์

ผศ.ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง



คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.พานิช อินต๊ะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ธีระชาติ พรทิบูลย์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาน

มหาวิทยาลัยทักษิณ

ผศ.ดร. จอมภพ แววงศ์ดี

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์

ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

อ.มานิตย์ กุ๋จนพัฒน์



รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
RE-1-27	ภาณุพันธ์ ศรีสมบูรณ์, มาโนช ผดุงเวียง และมานะ อมรกิจบำรุง สมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็กกรณีใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง วชิญญ วรณพรหม และอนุชาล เพิ่มสุวรรณ	181
RE-1-28	ยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตของชุมชนกลางหมีน อำเภอกอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ สุพัฒน์ชัย โพธิ์แก้ว	190
RE-1-29	การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยสภาวะเมทานอลเหนือจุดวิกฤต เจษฎา สุขสัมพันธ์, อากาศรณ์ สกุลการเวก, วิทยา ปั้นสุวรรณ, กางปัญญา สุวรรณสุขโข และชนากานต์ เพิ่มฉลาด	200
RE-1-31	การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา มาลี พัฒนช่วย และวันชัย ทวีชัยสิงห์	209
RE-1-32	โรงเรือนอบแห้งแผ่นยางพาราโดยใช้เตาหมักเครื่องเก่าเครื่องเก่าเป็นแหล่งความร้อน นำพน พิพัฒน์ใหญ่ชัย, มงคล มีแสง, สันหวัจน์ ทองแดง, จริญญา มงคลชัย และบัญชา ถิ่นเลิศ	215
RE-1-33	การศึกษาสมรรถนะทางเทคนิคระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศบ้านหลังคา ขนาด 3.6 กิโลวัตต์ กรณีห้องฟ้าแจ่มใสด้วยเทคนิคการจำแนกแฟร็กทัล ธีระศักดิ์ สมศักดิ์, สาคร จำปาศิม และจิตตฤทธิ ทองปรอน	223
RE-1-35	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์รังสีแสงอาทิตย์ ด้วย Levenberg-Marquardt Algorithm จักรพันธ์ นันทพันธุ์กุล และบุญยั้ง ปลั่งกลาง	232
RE-1-37	ผลของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ออัตราการอบแห้งซึ่งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ประทีป ทิพย์ประชา, บุญญัตติ นิยมवास และบรรเจิด ไปฏกรัตน์	238
RE-1-38	การเปรียบเทียบผลของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากน้ำมันพืชใช้แล้ว (HiBD) และเชื้อเพลิงดีเซล เชิงพาณิชย์ (CD) ที่มีต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลพิษของรถยนต์ คุณิต วัฒนวิเชียร, ประสพโชค โพธิ์กุล และพรหมรักษา กุทธิประเสริฐสมณี	244
RE-1-40	อิทธิพลของอัตราส่วนของความเร็วอากาศในแอล-วาล์ว ความเร็วอากาศ และปริมาณเบตที่มีผลต่อ พฤติกรรมการไหลของอนุภาคภายในเตาเผาใหม่แบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน ธนศ อุทัยศรี และสุนิรัตน์ พุกตะ	255
RE-1-41	การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับพืชน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ สุนัดดา ไชยสิทธิ์, จำเนียร ชมภู และวนิดา สืบสายพรพรหม	263
RE-1-42	การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันไก่ผสม น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงในอัตราส่วน 95:5 คุณานนต์ ศักดิ์กำปัง, ตั้งแสง ยนต์สถิตย์กุล และมนตรี พิลาชัย	273
RE-1-43	คุณสมบัติน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไพโรซิซจากของเหลือจากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงและน้ำมันดีเซล รินลดา สิริแสงสว่าง, เพชรสยาม สิงห์ทอง และอนุวัฒน์ วรณรัตน์	281



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา
REAL-TIME PHOTOVOLTAIC SIMULATOR USING CURRENT FEEDBACK CONTROL

มาลี พัฒน์ชัย¹ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์^{1,*}

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*ผู้ติดต่อ E-mail: wanchai.spen.rmutt.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3420, เบอร์โทรสาร 02-549-3422

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสถานะแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำสู่การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป การจำลองทำโดยใช้วงจรแปลงแรงดันดีซี (DC Converter) ร่วมกับวิธีควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปได้ที่ความคิดเห็นว่าจะมีประโยชน์ต่อการดำเนินการในจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในโลกแห่งความเป็นจริง ในบทความนี้ใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ในการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันดีซี และการควบคุมที่เหมาะสม จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) จากการจำลอง เป็นไปในทางเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหมายความว่า เป็นไปได้ที่จะสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริงในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำหลัก : แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV model), จำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator), แปลงแรงดันดีซี (DC Converter), การควบคุมการป้อนกลับ (Feedback control).

Abstract

In this article, mathematical model of PV model is investigated in order to study the affection in irradiance, temperature, parameters to the PV's output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator. By which, PV simulator is utilized by DC converter circuit with a current feedback control. This may be useful if is possible to implementing into a real world PV simulator. In this paper, PV simulator is modeled using MATLAB/Simulink program, which is composed of DC converter and a proper control scheme. From the simulation results, it can be observed that I-V relationship of the PV simulator is quite the same as of such PV mathematical model. This means that, it is possible to build a real PV simulator in commercial in a further work.

Keywords: PV model, PV simulator, DC Converter, Feedback control.



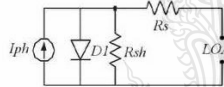
1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photo Voltaic cell) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงโฟตอนเป็นศักย์ไฟฟ้าในรอยต่อ PN ซิลิกอนหรือวัสดุอื่นๆ [1] ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม [2] แต่ค่าใช้จ่ายที่สูงอาจทำให้เกิดความยากลำบากในการพัฒนาและการทดลองในห้องปฏิบัติการ หมายความว่า การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ จำลองคุณลักษณะการส่งออกด้านเอาท์พุท PV โมดูล ผ่านวงจรแปลงแรงดัน DC/DC สามารถนำมาใช้แทนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในงานจริงในห้องปฏิบัติการได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับไดโอดและตัวต้านทานขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1. เมื่อ PV สัมผัสกับแสงแดดก็จะผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจะเป็นสัดส่วนกับรังสีแสงอาทิตย์ [3]



รูปที่ 1 วงจรของ PV แบบไดโอดเดียว

วงจรของรูปที่ 1 รูปที่ 1 อธิบายโดยสมการไดโอด (Schottky) ร่วมกับปัจจัยคุณภาพของไดโอดในส่วนของผลกระทบของการนำมารวมกับขอบเขตของช่องว่าง(space-charge) [3] สมการกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะได้จาก (1) ถึง (3).

$$I = I_{ph} - I_s \cdot e^{\left(\frac{V+IR_s}{NKT}\right)} - 1 - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_L(T - T_{ref})) \cdot \lambda \quad (2)$$

$$I_s(T) = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1\right) \frac{E_g}{NkV_t}} \quad (3)$$

เมื่อ I_{ph} คือกระแสโฟตอน, R_s , R_{sh} คือตัวต้านทานอนุกรมและตัวต้านทานขนาน, N คือ ideal factor

ของไดโอด, K คือค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K, q คือ ค่าการจ่ายอิเล็กตรอน 1.602×10^{-19} คุลอมบ์, I_s คือกระแสไบอัสของไดโอด, K_L คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์, I_{sc} คือกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์, λ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์, E_g คือพลังงานที่มีช่องว่างของเซมิคอนดักเตอร์, V_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิโดยรอบ จากการพิจารณาลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะอธิบายโดย I_{ph} , N , และ R_{sh} ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับรังสีแสงอาทิตย์ (λ) และอุณหภูมิ (T) [1]

แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์คือการรวมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (4) (ละเลย R_s , R_{sh}) [1], เมื่อ N_s และ N_p คือจำนวนอนุกรม และขนานเซลล์ของ PV module

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left(e^{\left(\frac{qV}{NKT_n}\right)} - 1 \right) \quad (4)$$

• **ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF)** กระแสลัดวงจรและแรงดันลัดวงจร ซึ่งเป็นกระแสและแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ FF เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [3]

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

• **ประสิทธิภาพสูงสุด (η)** เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [4]

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (6)$$

3. การจำลองรูปแบบการ PV MODULE

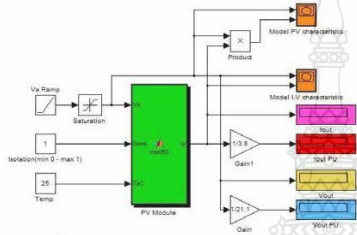
3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Solarex MSX60 ถูกเลือกให้เป็นทำแบบจำลอง มีขนาดการใช้พลังงานสูงสุด 60 วัตต์ และมี 36 เซลล์ ในชุดการเชื่อมต่อรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 [5].



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแผงโซลาร์เซลล์โมเดลรุ่น MSX-60

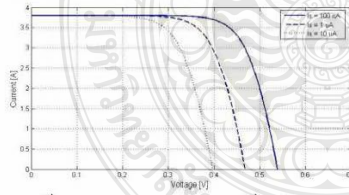
Solarex MSX60 Specifications (1kW/m ² , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (P _m)	60 W
Voltage at peak power (V _m)	17.1 V
Current at peak power (I _m)	3.5 A
Short-circuit current (I _{sc})	3.8 A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.1 V
Temp. coefficient of OC voltage (β)	-73mV/°C
Temp. coefficient of SC current (α)	3mA/°C
Approx. power by temp.	-0.38W/°C



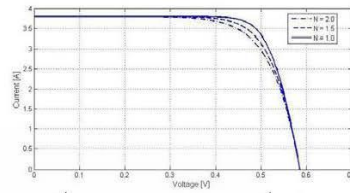
รูปที่ 2 แบบจำลอง Simulink ของ PV โมดูล

รูปแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้ในการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB / Simulink การทดลองโดยใช้สมการที่ระบุก่อนหน้านี้ MATLAB / Simulink เป็นโปรแกรมคำนวณค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า โดยพารามิเตอร์ทั่วไปของโมดูลคือ $I_{sc} = 3.8A$, $V_{oc} = 21.1V$, $\beta = 3mA/°C$, $\alpha = -73mV/°C$, $N = 1.2$, $I_s = 100nA$ และในการจำลอง PV โมดูลทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของความเข้มแสงอาทิตย์ (λ) และอุณหภูมิ (T) ดังรูปที่ 2

3.2 ผลการจำลองของเซลล์และโมดูลแสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cell)

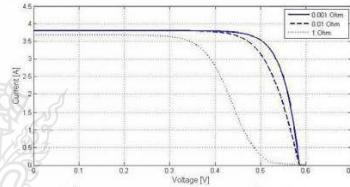


รูปที่ 3 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า I_s



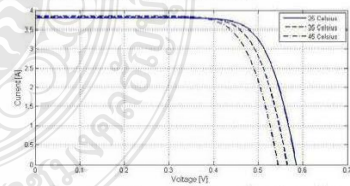
รูปที่ 3 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า N

รูปที่ 3 (ก) แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_s) ที่ 100nA, 1uA และ 10uA จะเห็นได้ว่าการเพิ่มของ I_s มีผลกระทบต่อ Voc รูปที่ 3 (ข) แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อค่า N ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 สามารถที่ตั้งข้อสังเกตว่าไม่มีผลกระทบต่อแรงดันลัดวงจร (Voc)



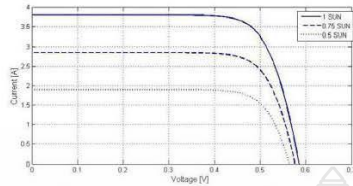
รูปที่ 4 I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า R_s

รูปที่ 4 แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ 1mΩ, 0.01Ω และ 1Ω สามารถที่ตั้งข้อสังเกตว่ามีผลกระทบต่อการลดลงของค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ส่วนความต้านทานขนาน (Rsh) คือตัวที่ทำให้เกิดกระแสไฟรั่วลงกราวด์ โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีผลกระทบต่อจากความต้านทานขนาน ดังนั้นจึงสมมติให้มีค่าเป็นอนันต์และไม่มีการแส่วลงกราวด์ [7]



รูปที่ 5 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า T (°C)

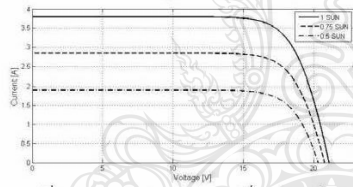




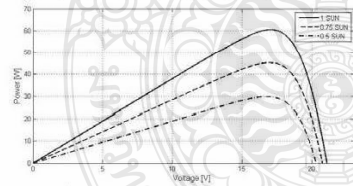
รูปที่ 5 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า λ

รูปที่ 5 (ก) และ รูปที่ 5 (ข) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำงาน จะทำให้เพิ่มค่ากระแส Isc และในอีกทางหนึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแส Isc จะส่งผลให้แรงดันและกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วยเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และในทางกลับกันจากรูปที่ 5 การเพิ่มขึ้นของรังสีแสงอาทิตย์ จะทำให้ Isc ของ PV เพิ่มขึ้น และกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax) อาจเพิ่มขึ้นด้วย นั่นหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ขึ้นอยู่กับรังสีแสงอาทิตย์และกระแสลัดวงจรโดยตรงและเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง

3.3 แบบจำลอง PV โมดูล



รูปที่ 6 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า $T (^{\circ}C)$

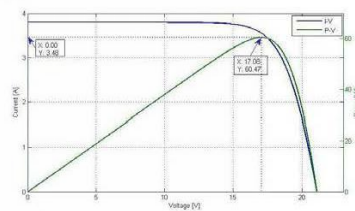


รูปที่ 6 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า λ

ใน PV โมดูล นี้คือส่วนหนึ่งที่ใช้ได้สำหรับการนำกระแสเนื่องมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เชื่อมต่อในชุดอนุกรม ดังนั้น $NP = 1$ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่

เชื่อมต่อในชุดอนุกรมใน PV โมดูล 36 ดังนั้น $N_s = 36$ ส่งผลให้กราฟ I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์จากการจำลองจะแสดงในรูป 6 (ก) และรูป 6 (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองของโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์และลักษณะไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ MSX60 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่เกณฑ์ยอมรับ และมีผลการจำลองกราฟ I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 7



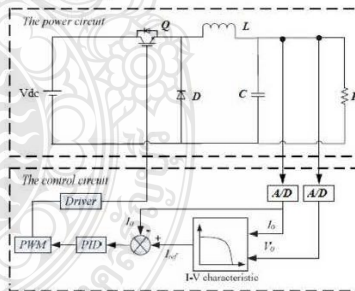
รูปที่ 7 กราฟผลการจำลอง I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน

	MSX-60	Simulation	Error
P_m (W)	60.0	60.47	0.78%
V_m (V)	17.1	17.08	0.12%
I_m (A)	3.5	3.48	0.57%

4. การจำลอง

4.1 แบบจำลอง



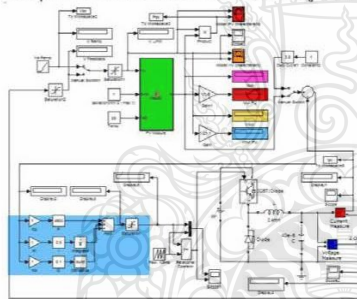
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของการจำลอง PV



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการจำลองลักษณะการส่งออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในการเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริง [6] การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันดีซี และระบบควบคุมที่ใช้การทำงานกับบอร์ดควบคุม DSP ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส (CT) ที่นำมาใช้ในการตรวจจับกระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วส่งกลับไปยังบอร์ดควบคุม DSP เพื่อคำนวณสร้างสัญญาณความถี่พัลส์ไปทริก IGBT ของวงจรแปลงแรงดันดีซี

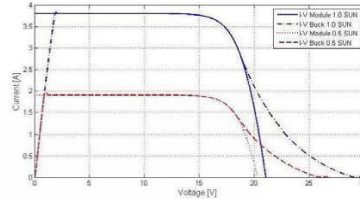
งานในลำดับถัดไป คือนำมาใช้ร่วมกับฮาร์ดแวร์จริง เพื่อเปรียบเทียบการส่งออกของกำลังไฟฟ้า ที่มีต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว

การจำลองในบทความนี้ จะเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink และเครื่องมือที่ใช้จำลองประกอบกับวงจรแปลงแรงดันดีซีและแบบการควบคุมการป้อนกลับที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 9

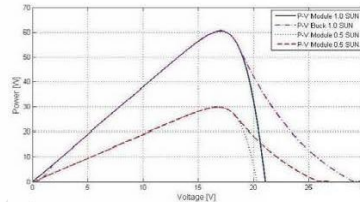


รูปที่ 9 แบบวงจรการควบคุม

4.2 ผลการจำลอง



รูปที่ 10 เส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสีแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน (T = 25°C)



รูปที่ 11 เส้นโค้ง P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสีแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน (T = 25°C)

แรงดันขาออกของวงจรแปลงแรงดันดีซี จากการจำลอง PV ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบโดยการปรับค่าแรงดันจาก 7V ถึง 22V และตัวต้านทานปรับ (Load) ปรับจาก 2Ω ถึง 49Ω ในรูป 9 เป็นเส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสีแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน แต่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับวงจรแปลงแรงดันดีซี และรูปที่ 10 เปรียบเทียบโค้ง PV, จำลองทางคณิตศาสตร์ของ PV กับผ่านวงจรแปลงแรงดันดีซี กับการจำลอง PV แสดงให้เห็นว่ากราฟ I-V ของการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับผลจากค่าที่ผ่านมาจากวงจรแปลงแรงดันดีซี ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60 ในบทความนี้ผลจากการจำลองได้เส้นโค้งกราฟที่เหมือนกัน ยกเว้นส่วนเล็ก ๆ ของของเส้นโค้ง ในบริเวณการควบคุมส่วนแรงดันไฟฟ้า จะต้องมีการปรับเส้นโค้ง I-V และ P-V ด้วย ของทั้งสองค่ารังสีแสงอาทิตย์แตกต่างกันและอุณหภูมิเดียวกัน



5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลอง PV ส่วนหลักๆ ประกอบด้วยแปลงแรงดัน DC-DC และควบคุมดิจิทัลควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การออกแบบตามการประยุกต์ใช้อาร์ตเวิร์คของแบบจำลอง PV การออกแบบบทความนี้เป็นศึกษาลักษณะการส่งเอาร์ทัพทของโมดูล PV ที่ทำงานภายใต้ตัวแปรความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ การจำลองยืนยันได้ว่าผลจากการจำลองและโมเดล MSX60 ในบทความนี้ผลจากการจำลองได้เส้นโค้งกราฟที่จับคู่เป็นอย่างดี ยกเว้นส่วนเล็ก ๆ ของของเส้นโค้ง ในบริเวณการควบคุมส่วนแรงดันไฟฟ้า จะต้องมีการปรับเส้นโค้ง I-V และ P-V ด้วย ของทั้งสองค่ารังสีแสงอาทิตย์แตกต่างกันและอุณหภูมิเดียวกัน

การทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ บทความนี้ต้องการการปรับแต่ง และงานที่ทำในบทความนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทดลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงของเซลล์แสงอาทิตย์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Savita Nema, R.K.Nema and Gayatri Agnihotri. 2010. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/ module/ array and their experimental verification. In International Journal of ENERGY AND ENVIRONMENT. Volume 1, Issue 3, pp. 487-500.
- [2] A. bilsalam, J. Haema, I. Boonyaroonate and V.Chunkag, 2011. Simulation and study of Photovoltaic cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load. In 8th International Conference on Power Electronic-ECCE Asia, The Shilla Jeju, Korea, May 30-June 3, pp. 3033-3036.
- [3] Pilin Junsangsrri and Fabrizio Lombardi. 2010. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In 25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 240-248.
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt. 2005. Model of Photovoltaic Module in MatlabTM. In II CIBELEC .
- [5] Huan-Liang Tsai, Gi-Siang Tu, and Yi-Jie Su. 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCEC. san Francisco, USA, October 22-24.
- [6] Qingrong Zeng, Pinggang Song and Liuchen Chang . 2002. A PHOTOVOLTAIC SIMULATOR BASED ON DC CHOPPER. In Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. pp.257-261.
- [7] Huan-Liang Tsai. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. In H.-L. Tsai / Solar Energy 84 (2010) 1318-1326.



ค.3 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ ฟัซซี่ ลอจิก ชนิดทันเวลา
(Real-time Photovoltaic Simulator using PID and Fuzzy Logic Control)

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
The 7th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-7)
"ตามรอยพ่อ ถ่ายทอดวิถีต้นแบบ พลังงานทดแทนสู่ชุมชน"

ผลงานทางวิชาการ 7 สาขา
CP ไฟฟ้าชุมชน
CT ความร้อนชุมชน
CF เชื้อเพลิงชุมชน
ES การประหยัดพลังงาน
EN สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน
IR นวัตกรรมพลังงานทดแทน
EM การจัดการพลังงานในชุมชน

12-14 พฤศจิกายน 2557
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย กำหนดให้มีการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 (The 7th Thailand Renewable Energy for Conference: TREC-7) ระหว่างวันที่ 12 – 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่แวดวงวิชาการ และแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ด้านการวิจัย อีกทั้งเป็นการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยร่วมกับเครือข่ายการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภายนอก

ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนี้

1. คณะกรรมการอำนวยการ ประกอบด้วย

- | | |
|--|---------------------|
| 1. อธิการบดี | ประธานกรรมการ |
| 2. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย | กรรมการ |
| 3. นายกลสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| 4. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ | กรรมการ |
| 5. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย | กรรมการ |
| 6. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา | กรรมการและเลขานุการ |
| 7. รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาฝ่ายส่งเสริมงานวิจัย | ผู้ช่วยเลขานุการ |

2. คณะกรรมการพิจารณาบทความ ประกอบด้วย

- | | | |
|---------------------|----------------|------------------------------------|
| 1. รศ.ดร.สิงห์ทอง | พัฒนเศรษฐานนท์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 2. รศ.ทัศนีย์ | สิงห์เจริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 3. ผศ.ดร.เกษมชนม์ | ภูมิภักดีพิชญ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 4. ผศ.ดร.บุญยั้ง | ปลั่งกลาง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 5. ผศ.ดร.บุญยฤทธิ | ประสาทแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 6. ผศ.ดร.พัฒนาพล | มีนา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 7. ผศ.ดร.วารุณี | อริยวิริยนันท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 8. ผศ.ดร.วิรัชชัย | โรบนรินทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 9. ผศ.ดร.สรพงษ์ | ภาสุปรีดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 10. ผศ.ดร.สุรจิตร์ | พระเมือง | มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย |
| 11. ผศ.ดร.จักษิ | ศรีนนท์ฉัตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 12. ผศ.ดร.อำนาจ | เรืองวารีย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 13. ผศ.ดร.บัณฑิต | กฤตาคม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 14. ผศ.ดร.เจนศักดิ์ | เอกบูรณะวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 15. ผศ.ดร.วิทยา | พวงสมบัติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 16. ผศ.ดร.กนกอร | หัสโรค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |

17. ผศ.ดร.โลรัตน์	มงคลมะไฟ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
18. ดร.สำเนียง	องสุพันธ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
19. ดร.สันติ	ไทยยีนวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
20. ดร.กิตติศักดิ์	วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
21. ดร.จักรกฤษ	ศรีละออ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
22. ดร.ธนิต	เรืองรุ่งชัยกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
23. ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
24. ดร.พิสิษฎ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
25. ดร.มนต์ชัย	พินิจจิตรสมุทร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
26. ดร.รวิภา	ยงประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
27. ดร.วรจิตต์	เศรษฐพรพงศ์	สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
28. ดร.วราจิต	พยอม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
29. ดร.ศักดิ์ชาย	เพ็ชรตรา	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
30. ดร.ศุภกิจ	รวศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
31. ดร.สัทธยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
32. ดร.สุรชัย	จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
33. ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
34. ดร.อำพล	อภาธนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
35. ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
36. ดร.ประสพโชค	ให้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
37. ดร.มนตรี	สมตุลยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
38. ดร.ฐปณี	รัตน์ถาวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
39. อาจารย์วราคม	วงศ์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
40. อาจารย์อดิสร	ถมยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
41. อาจารย์บัญญัติ	นิยมवास	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
42. อาจารย์วุฒิศาสตร์	โชคเกื้อ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
43. อาจารย์สิทธิ์ชัย	บุญปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญ

สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน (IR)			หน้า
O-IR01	การออกแบบและติดตั้งระบบเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับบ้านลอยน้ำในประเทศไทย	กฤษกรก สุกข์ ฌ อญญา	476
O-IR02	เครื่องต้นน้ำแบบเหนี่ยวนำ	เพชร หลงสมบุญ	483
O-IR03	เครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	กฤษฎา ทองงาม	490
O-IR04	การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบโมังค์ลมที่มีแผงรับรังสีสองชั้นสำหรับอบแห้งมันฝรั่ง	ณัฐพล ศรีสิทธิโคกุล	496
O-IR05	การอบแห้งใบเตยหอมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม	กิริติ เกิดศิริ	502
O-IR06	ปั๊มลมไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้แหล่งจ่าย 2 ระบบ	จักรวัฒน์ สักใจ	507
O-IR07	แบบจำลองความเข้มแสงของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	ธีรภัทร ทวีวงศ์	514
O-IR08	คุณลักษณะจำเพาะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีการเติมธาตุบุกบนท่ออะลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์	อวัช สุวีรังษ์	521
O-IR09	การเชื่อมต่อโลหะโดยใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ	ชัยรัตน์ หงษ์ทอง	527
O-IR10	การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ พีซีซี ลอจิกชนิดทันเวลา	มาลี ทัศนชัย	533
O-IR11	นวัตกรรมการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบออกไซด์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้ง	กรกฎ นิยมสัตย์	539
O-IR12	การพัฒนาโรงอบแห้งสับประคโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์รวม	อัญชมา อุประกุล	545
O-IR13	การพัฒนาห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กเพื่อใช้อบแห้งในวิสาหกิจชุมชน	ปรีชา ศรีประกาศการ	549
O-IR14	การสังเคราะห์และที่สุกนเอกลักษณะสารอินทรีย์ชนิดใหม่เพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	เทอดเกียรติ แก้วพวง	553
O-IR15	การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองห้องนำแสงสว่างใช้กับอาคาร	รณกร เทพวงษ์	558
O-IR16	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อม	ธนศ โขยชนะ	565
O-IR17	การออกแบบตู้อบแห้งข้าวแต๋นแบบลดร้อนขนาดเล็กสำหรับวิสาหกิจชุมชนโดยใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง	ภัคดี สิทธิฤทธิ์กวี	571
O-IR18	การศึกษาการใช้ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์	รุ่งเพชร ก่องนอก	577
O-IR19	Solar Concrete Wall Collector	V. Veng	584
O-IR20	การพัฒนาเครื่องเติมอากาศพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	นิธิตัน ชูสกุล	592
O-IR21	การสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ ขนาดกำลังการผลิตไม่ต่ำกว่า 4,000 วัตต์ จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบซิงโครนัสที่เหลือทิ้ง	ชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล	598
O-IR22	Smart Solar Farm Concept and Implementation for Improving Photovoltaic Power Generation	Chanwit Boonchuy	605
O-IR23	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งมะเดื่อฝรั่งแบบใช้ปั๊มความร้อน	ศรีธร อุปคำ	612
O-IR24	การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการสันดาป	จุไรรัตน์จินดา อรรถนิตย์	620
O-IR25	การผลิตกำลังจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลตัวระบบคอมพิวเตอร์	พงษ์ศักดิ์ คงชน	626
O-IR26	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก	โชติวัฒน์ ศุภรัตนกุล	634
O-IR27	การศึกษาเชิงทดลองหันทันบกัณฑ์ลมแค้นตั้งแบบใบปรับมุมพิชชีได้ด้วยกลไกแบบ 4 ชั้น	ไมตรี พลสงคราม	642
O-IR28	ผลกระทบของสภาวะการทำงานและมุมใบกังหันที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลมอุปวีง	กิตติ นิลมิ่ง	650
O-IR29	การศึกษาวิเคราะห์การทำงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW โดยโปรแกรม MATLAB	ชวลิต เท็งสุขกุล	656
O-IR30	การผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ด้วยระบบไพโรไลซิสชนิดแก๊สหมุนวนปิด	ปรีชา ชันติโกมล	663
P-IR31	เครื่องคัดแยกและนับผลมะนาวแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน	สุรินทร์ แหมงงาม	669
P-IR32	พลังงานทดแทนสำหรับการใช้งานเอนกประสงค์	นุกูล สุวรรณชาติ	675
P-IR33	การพัฒนาเครื่องดูดและหัวดูดปฏิภูลจากบ่อปลาเรนโบว์เทราท์	ศรีธร อุปคำ	683
P-IR34	เครื่องผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยหลักการของ PWM	เลรี ชีนอารมย์	690
P-IR35	การทดสอบประสิทธิภาพและผลกระทบต่อลักษณะปลายใบกัณฑ์ลมในท่อโมังค์ขนาดเล็ก	ชาคริต จินลอย	



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ ฟัซซี่ ลอจิก ชนิดทันเวลา
Real-time Photovoltaic Simulator using PID and Fuzzy Logic Control

มาลี พันธ์ช่วย^{1*} และ วันชัย ทรัพย์สิงห์¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

E-mail: lee_eei@hotmail.com; wanchai.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม เป็นต้น โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ทั้งนี้บทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณารูปคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการป้อนกลับสามารถใช้งานได้ทั้งแบบ PID Control และ Fuzzy Logic Control

คำสำคัญ: ค่าความเข้มแสง, ค่าอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม

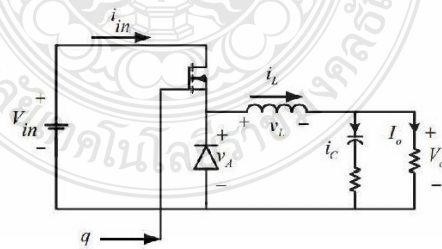
1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน คือพลังงานไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ยังไม่คงที่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ บทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณารูปคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน

วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง หรือวงจร Buck Converter เป็นวงจรที่ให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า หรือ กระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่ากระแสขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระพือจากสัญญาณควบคุม ตัวเก็บประจุซึ่งต่ออยู่กับโหลดจะเป็นตัวลดแรงดันกระพือที่ขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไปตรงมากๆ ลักษณะของวงจรทอนระดับแรงดัน และการทำงานเป็นดังภาพ



รูปที่ 1 วงจรทอนระดับแรงดัน

สมการคำนวณค่าตัวชี้เซลล์ได้จาก



$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \tag{1}$$

สมการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็ก(L_{min}) ได้จาก

$$L_{min} = \frac{(1-D) \cdot R}{2f} \tag{2}$$

สมการคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่น ได้จาก

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \tag{3}$$

1.2 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบฟีดแบ็ค

วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 วิธีคือ

1.2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (open Loop Control system) เป็นการใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา

1.2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System) จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็ได้ว่าค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ โดยการเลือกใช้เลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม

1.2.3 การควบคุมแบบ พี ไอ ดี หรือ PID controller แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ

1.2.3.1 Proportional model of Control (P-control) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน โดยการเพิ่มค่าอัตราขยาย (Gain) ให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลการตอบสนองที่ไวขึ้น

1.2.3.2 Integral Mode of Control (I-Control) หรือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสม และสามารถขจัด steady state error ได้

1.2.3.3 Derivative Mode of Control (D-Control) หรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ในระบบวงปิด ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

1.2.3.4 การปรับแต่ง parameters ของ P, PI หรือ PID มี 2 ลักษณะดังนี้

Open Loop จะได้ว่าค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	1/RL	---	---
PI	0.9/RL	L/0.3	---
PID	1.2/RL	2L	0.5L

Closed Loop จะได้ว่าค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	0.5/Kcr	---	---
PI	0.45/Kcr	1/1.2Pcr	---
PID	0.6/Kcr	0.5Pcr	0.125Pcr

Kcr: Critical Gain หรือ Ultimate Gain : Ku

จาก PID Transfer function ค่าดังควบคุมที่ใช้ในการปรับระบบของการจำลองนี้คือ

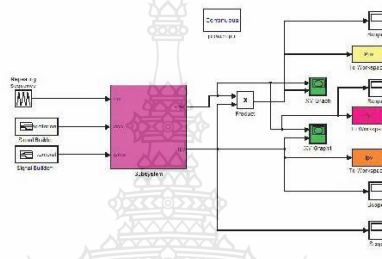
Kp=0.2; Ki=0.5; Kd=0.3



3. การทดสอบ

ทำการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ PWM ได้ค่าตัวชี้เซลล์เพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ IGBT ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดัน เป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนคือวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อการดิ้นเตอร์เพลส เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทั้งหมดดังรูปที่ 3

3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

แรงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำลองได้โดยสมการไดโอดในอุดมคติ ดังสมการ (4)

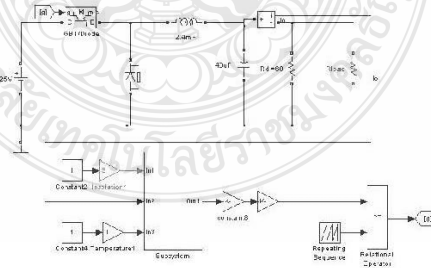
$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + I \cdot R_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (4)$$

ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ ได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการ (5)

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_t (T - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (5)$$

ผลกระทบจากอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้น สามารถเขียนได้ดังสมการ (6)

$$I = I_s (T) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (6)$$



รูปที่ 3 แรงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

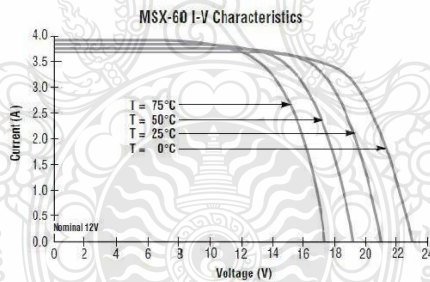


Typical Electrical Characteristics of Photovoltaic Modules Solarex model MSX60	
Electrical Characteristics	Specification
Maximum power (Pmax)	60 W
Voltage @ Pmax (Vmp)	17.1V
Current @ Pmax (Imp)	3.5A
Guaranteed minimum Pmax	58W
Short-circuit current (Isc)	3.8A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	-(80±10)mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current	(0.065±0.015)%/°C
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	47±2°C

3.2 ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

เชื่อมต้องจระเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะควบคุมค่าตัวดิโอะของสัญญาณพัลส์ซึ่งเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าตัวดิโอะของสัญญาณพัลส์ซึ่งเกิดของไอซีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับแรงดันไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

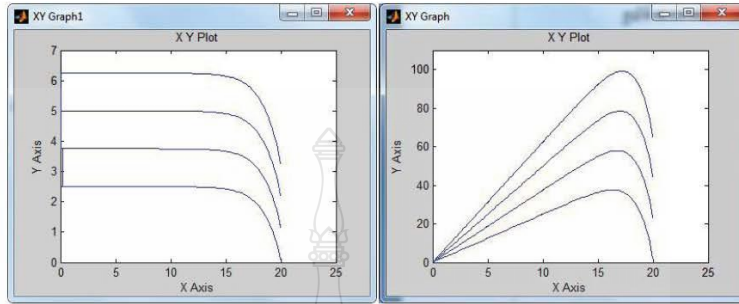
ทดสอบเปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิแตกต่างกันกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60

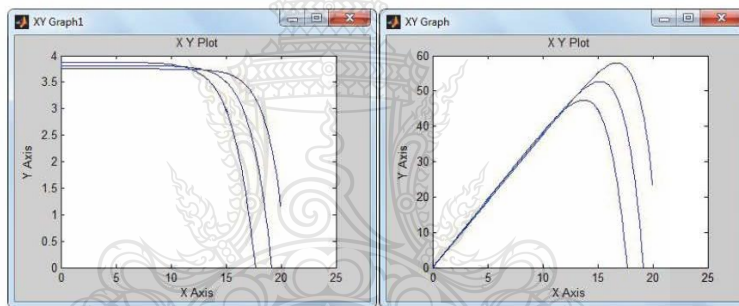


ผลการทดลอง ในรูปที่ 5 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5 กราฟ I-V curve เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มแสง และอุณหภูมิคงที่

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มแสงที่ได้ค่าความเปลี่ยนแปลงของกราฟคุณลักษณะของ p-v ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟ P-V curve เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

	MSX60	Simulations	Deviation	Target
Pmax (W)	60.0	57.9	3.5%	± 5%
Vmax (V)	21.1	20.0	5.2%	± 5%
Imax (A)	3.8	3.75	1.3%	± 5%

4. สรุปผล

จากการจำลองค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ และจำลองการทำงานด้วย MATLAB/Simulink เพื่อให้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ I-V curve ในการจำลองให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุดนั้น จากผลการจำลองนี้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับกราฟที่อ้างอิง เป็นที่พอใจ แต่ในงานวิจัยนี้ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในการพัฒนาการวิจัยต่อไป คือทำการจำลองการป้อนกลับด้วยวิธีผ่านชุด Hardware และใช้วิธีการป้อนกลับวิธีการอื่นมาเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้ผลจำลองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด เช่น การนำ Fuzzy Logic Control มาใช้ เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

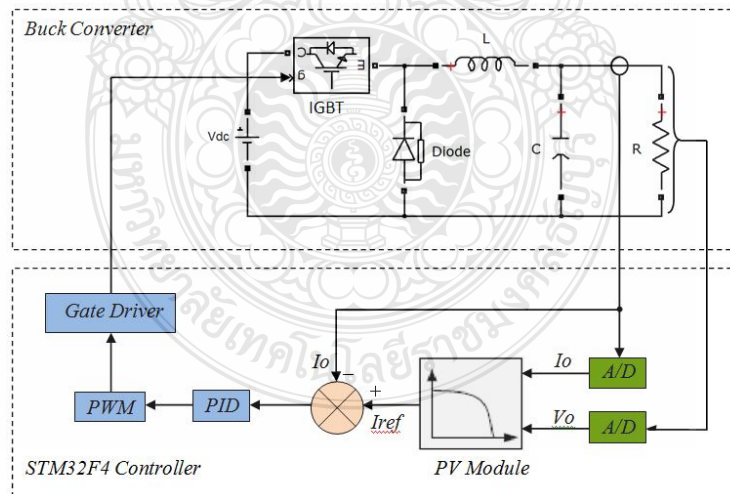
- [1] Hayrettin CAN "Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink" Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk.J Elec Eng & Comp Sci (2013) 21: 301 -308, 2013
- [2] M. Abdulkadir, A. S. Samsir and A. H. M. Yatim "MODELING AND SIMULATION BASED APPROACH OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN SIMULINK MODEL" ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 7, NO. 5, MAY 2012, pp 616-623
- [3] Samer Alsadi, Basim Alsayid "Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm" International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, Issue 6, December 2012, ISSN: 2277-3754, pp 80-85
- [4] Geoff Walker "EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL" pp
- [5] เดชนิตอร อิมปริดา, วันชัย ททรัพย์สิงห์ "Real-time Simulation using Mathematical model of Photovoltaic Cell/Module" การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, ENETT8-RE09 1/8-8/8, 2555
- [6] R.Raja, L.Udhaya kumar, S.Rakesh kumar "FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY SIMULATOR" R.Raja et al. / International Journal of Engineering and Technology (IJET), ISSN : 0975-4024, Vol 5 No 2, Apr-May 2013, pp 1625-1630



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองคุณลักษณะสัญญาณของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (เสมือนจริง) โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันและกระแสขาออกให้สอดคล้องกับกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ **I-V curve** โดยการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟสเพื่อส่งไปคำนวณหาค่าแรงดัน ควบคุมด้วยโปรแกรม **MATLAB/Simulink** โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ **PWM** ได้ค่าดีวีดีไซเกิลเพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ **IGBT** ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดันเป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในบทนี้จะขอกล่าวถึงการออกแบบในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และส่วนของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างส่วนประกอบของงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการควบคุมการป้อนกลับแบบพีไอดี สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานและการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน การใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink และการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส

ขั้นตอนที่ 2: ออกแบบและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้สมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นใช้แบบจำลองดังกล่าวพัฒนาเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

ขั้นตอนที่ 3: เปรียบเทียบผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต โดยเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อเพิ่มความแม่นยำและน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

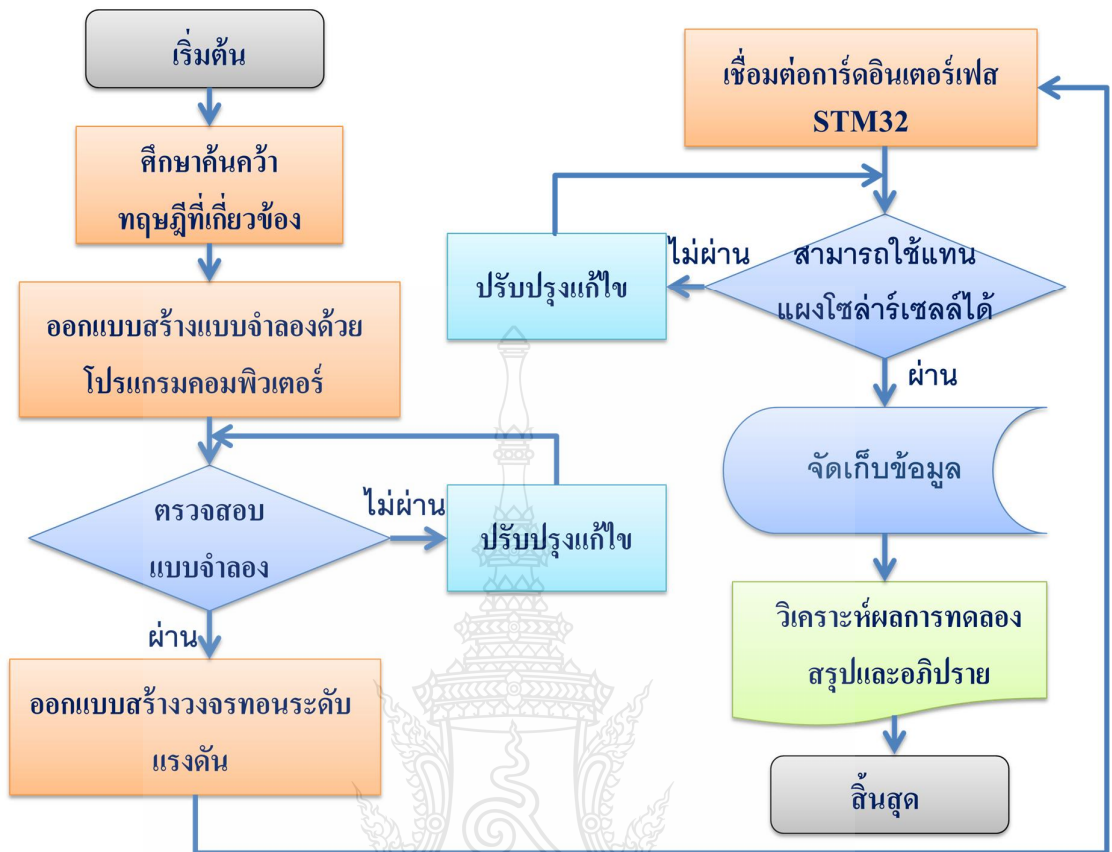
ขั้นตอนที่ 4: ออกแบบและสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณ (signal condition) เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 5: ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

ขั้นตอนที่ 6: เชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟสเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะไปควบคุมค่าดีวี่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าดีวี่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของไอจีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับเป็นไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 7: เปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และกับเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

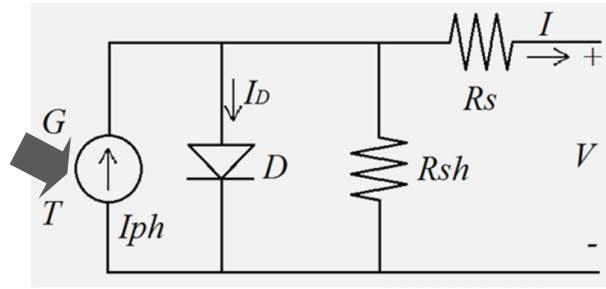
ขั้นตอนที่ 8: วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนรูปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV cell) นั้น สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB R2012a ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการตอบสนองความต้องการทางด้านการจำลองระบบได้ดี สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น M-File, Simulink, GUI เป็นต้น และโปรแกรม MATLAB/ Simulink ยังสามารถเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อการควบคุมระบบให้เป็นสัญญาณจริง(Real-time) ได้อีกด้วย โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ Block ต่างๆในส่วนของ Simulink ในการสร้างแบบจำลองซึ่งแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยถูกสร้างให้เป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการจำลองได้ใช้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SolarEx รุ่น MSX60 ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 60W โดยใช้ค่า Open circuit voltage (V_{oc}) เป็น 21.1V, Short circuit current (I_{sc}) เป็น 3.8A, Temperature coefficient of Short circuit current (K_i) เป็น $3\text{mA}/^\circ\text{C}$, Temperature coefficient of Open circuit voltage (K_v) เป็น $-73\text{mV}/^\circ\text{C}$ ดังตารางที่ 3.1 ส่วนค่าตัวแปรของไดโอด (Ideal factor & Reverse saturation current of diode), ค่าความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ (Solar irradiance), ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance), ค่าความต้านทานขนาน (Shunt resistance) และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ (Cell Temperature) นั้นจะกำหนดให้เป็นตัวแปรหลักในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อค่าตัวแปรต่างๆข้างต้นมีการเปลี่ยนแปลงไป

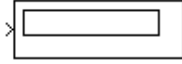







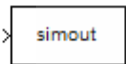

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ SolarEX รุ่น MSX 60[3]

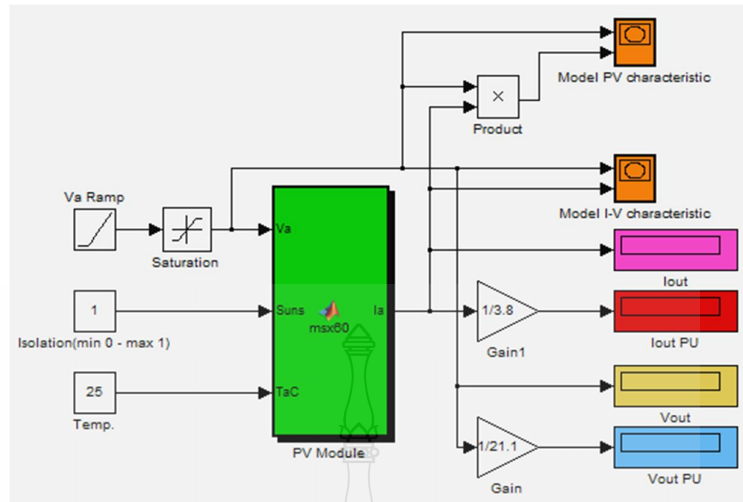
SolarEx MSX60 Specifications (1kW/m², 25°C)

<i>Characteristics</i>	<i>Spec.</i>
<i>Typical peak power (P_m)</i>	<i>60 W</i>
<i>Voltage at peak power (V_{mp})</i>	<i>17.1 V</i>
<i>Current at peak power (I_{mp})</i>	<i>3.5 A</i>
<i>Short-circuit current (I_{sc})</i>	<i>3.8 A</i>
<i>Open-circuit voltage (V_{oc})</i>	<i>21.1 V</i>
<i>Temperature coefficient of open-circuit voltage (β)</i>	<i>- 73mV/°C</i>
<i>Temperature coefficient of short-circuit current (α)</i>	<i>3mA/°C</i>
<i>Approximate effect of temperature on power</i>	<i>- 0.38W/°C</i>

ในการออกแบบสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากนำสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ในบทที่ 2 ไปเขียนสมการเป็น m file ใน MATLAB/Simulink พบว่าเมื่อค่าตัวแปรเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำให้มีผลกระทบต่อค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมี 5 ตัวแปรหลักคือ กระแสที่สร้างขึ้นจากแสง (I_{ph}) ผลของไดโอดได้แก่ค่า Ideal factor (N) มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับโครงสร้างการผลิตของเซลล์และค่ากระแสไบอัสอิมิต์ย้อนกลับ (I_0) ตามลำดับ ค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก (R_s) และการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ (R_{sh}) สำหรับโปรแกรม MATLAB ในส่วน Simulink ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการข้างต้นเพื่อศึกษาผลกระทบของทั้ง 4 ตัวแปรแรกนั้นได้ประกอบขึ้นจาก Block ชนิดเครื่องมือวัดและการแสดงผล Block ในส่วนของการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ทำงานเชื่อมโยงกันรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Block ดำเนินการต่างๆใน Simulink

สัญลักษณ์	รายละเอียด
 <p>Display</p>	การแสดงผลข้อมูลเป็นตัวเลข
 <p>Scope</p>	การแสดงผลสัญญาณบนออสซิลโลสโคป
 <p>Constant</p>	ค่าคงที่
 <p>Gain</p>	การคูณอินพุตด้วยค่าที่กำหนด
 <p>Product</p>	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาคูณกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
	การบวกหรือลบอินพุตที่เข้ามา ผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
 <p>Add</p>	การรับอินพุตเข้ามา 2 ค่ามาบวกกันผลลัพธ์มี 1 เอาท์พุท
 <p>Saturation</p>	กำหนดขีดจำกัดบนและล่างในสัญญาณอินพุต
 <p>simout To Workspace</p>	เมื่อต้องการพื้นที่ทำงานบล็อกสัญญาณอินพุตและเขียน ข้อมูลสัญญาณ ไปยังพื้นที่ทำงาน MATLAB
 <p>MATLAB Function</p>	สำหรับการใช้งานในรูปแบบของ Simulink และการสร้างรหัส สำหรับ Simulink Coder

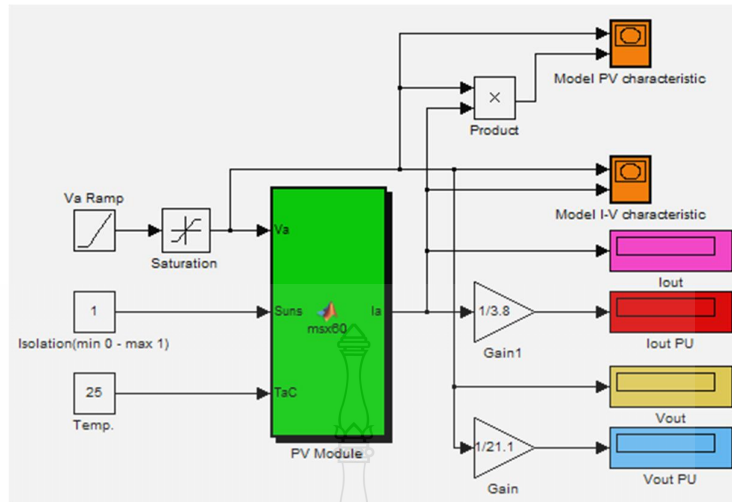


รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 เป็นการนำ block ต่างๆ ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ในตารางที่ 3.2 นำมาต่อเชื่อมโยงกัน โดยส่วนของ PV module สร้างสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ค่าความต้านทานอนุกรม, ผลของไดโอด และค่าความต้านทานขนานได้ในการศึกษาทำโดยการเปรียบเทียบเมื่อค่าต่างๆดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไป แล้วจะส่งผลกระทบต่อ การจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น

3.3 การออกแบบสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

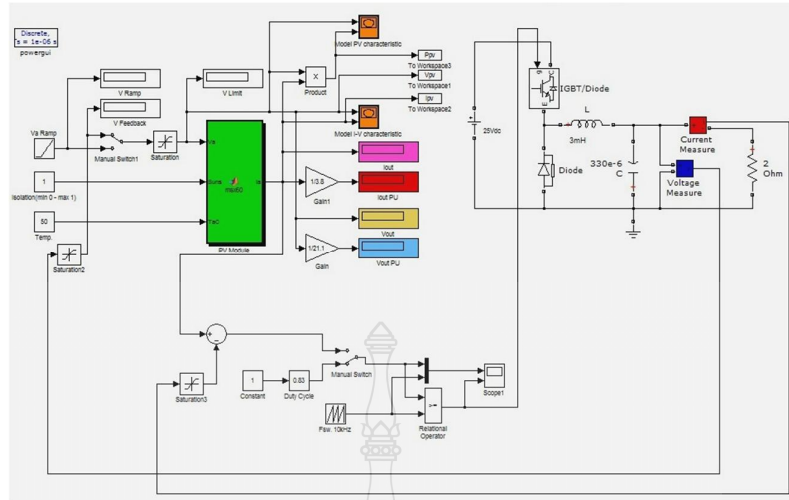
เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.5-0.8V ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งานโดยตรง โดยทั่วไปจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมกันเพื่อทำให้ได้ค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่เหมาะสมในการใช้งาน เรียกว่าโมดูล (PV Module) การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนั้นได้นำแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้วมาเพิ่มจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม (n_s) เป็นจำนวน 36 เซลล์ ส่วนจำนวนทางขนาน (n_p) ยังคงเป็นจำนวน 1 ทางขนาน เพราะจากการต่อเพิ่มจำนวนเซลล์อนุกรมนั้นทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น จึงมีผลให้สามารถตัดผลของความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ออกไปได้ เพื่อให้การสร้างแบบจำลองมีความสะดวกและง่ายมากขึ้นตามสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ซึ่งแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังในรูปที่ 3.4 และ 3.5 นั้นจะให้ผลของกราฟกระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออก (I-V Curve) และกราฟกำลัง-แรงดันไฟฟ้าขาออก (P-V Curve) ตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในลำดับขั้นต่อไปนำค่าที่ได้จากแบบจำลองซึ่งได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m), แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ที่ Standard Testing Condition (STC; ความเข้มแสง $1000W/m^2$ อุณหภูมิ $25^\circ C$) ไปเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 ในตารางที่ 3.1 เพื่อตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนและแก้ไขความถูกต้องของแบบจำลองให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.5 จึงสามารถใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของเซลล์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งในเรื่องผลกระทบของระดับของปริมาณแสงอาทิตย์ ผลกระทบของอุณหภูมิที่แผงเซลล์ ผลกระทบของตัวแปรไดโอดและตัวแปรอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง (Real-time) ในหัวข้อถัดไปอีกด้วย



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 การออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้วงจรถอนระดับแรงดัน

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรถอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับคาร์ดิเตอร์เฟส โดยมีหลักการการทำงานคือใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transducer; CT) ตรวจจับกระแสขาออกของวงจรถอนระดับแรงดันแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าส่งไปยังคาร์ดิเตอร์เฟสเพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อก (analog) ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ซึ่งสัญญาณดิจิทัลดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าดีไซเคิล (Duty cycle) ด้วยแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้ว ค่าดีไซเคิลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำไปขับเกตไอจีบีที (IGBT) ให้วงจรถอนระดับแรงดันจ่ายแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงนี้สามารถนำไปจ่ายโหลดได้จริง โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์, ค่าอุณหภูมิที่แผงเซลล์, ค่าตัวแปรไดโอดและจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมได้โดยการเปลี่ยนที่แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถใช้เพื่อการพัฒนาาระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

3.4.1 การออกแบบวงจรทอนระดับแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรทอนระดับแรงดันเป็นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
<i>Input Voltage</i>	25 V
<i>Output Voltage</i>	7V - 22V
<i>Switching freq.</i>	5.5 kHz
<i>Load Resistance</i>	3Ω - 61Ω
<i>Power Output</i>	60 W
<i>Ripple ratio</i>	1%

3.4.1.1 คำนวณค่าดิวตี้ไซเคิล

กำหนดแรงดันขาออกเป็น 7V ($V_{in} = 25V$) ที่แรงดัน 7V คำนวณค่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= \frac{V_o}{V_{in}} \\ &= \frac{7}{25} = 0.28 \end{aligned}$$

ที่แรงดัน 22V คำนวณค่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= \frac{V_o}{V_{in}} \\ &= \frac{22}{25} = 0.88 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิลอยู่ระหว่าง 0.28 ถึง 0.88

3.4.1.2 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด (L_{min})

$$\begin{aligned} L_{min} &= \frac{(1-D) \times R}{2f} \\ &= \frac{(1-0.28) \times 10}{2 \times 5.5 \times 10^3} = 0.65mH \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าความเหนี่ยวนำไม่น้อยกว่าสิบเท่าของ L_{min} โดยเลือกใช้ $L = 6.5 mH$ (ที่ $R = 10$ โอห์ม)

3.4.1.3 คำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 1%

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \\
 &= \frac{1-0.28}{8 \times 6.5 \times 10^{-3} \times (5.5 \times 10^3)^2 \times 0.01} \\
 &= 45.77 \mu F
 \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกค่าตัวเก็บประจุมากกว่าที่คำนวณประมาณสิบเท่า คือตั้งแต่ $457.7 \mu F$ ขึ้นไป ในบทความนี้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ $470 \mu F$

การออกแบบหาขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับนั้น ที่ค่าแรงดันขาออกเป็น $7V$ นั้นค่าความต้านทานโหลดจะมีค่าประมาณ 3Ω ซึ่งจะกำหนดให้วงจรทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{L,\max} &= \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \\
 &= \frac{7}{2} + \frac{7}{2} \left(\frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{6.5 \times 10^{-3}} \right) = 3.538 A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{L,\min} &= \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left(\frac{(1-D)T}{L} \right) \\
 &= \frac{7}{2} - \frac{7}{2} \left(\frac{(1-0.28) \times 10^{-4}}{6.5 \times 10^{-3}} \right) = 3.461 A
 \end{aligned}$$

จากค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดข้างต้น แสดงว่าวงจรทอนระดับแรงดันนั้นทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง (Continuous Current Conduction Mode) ตามที่กำหนด

3.4.1.4 การเลือกใช้อิโอบีที

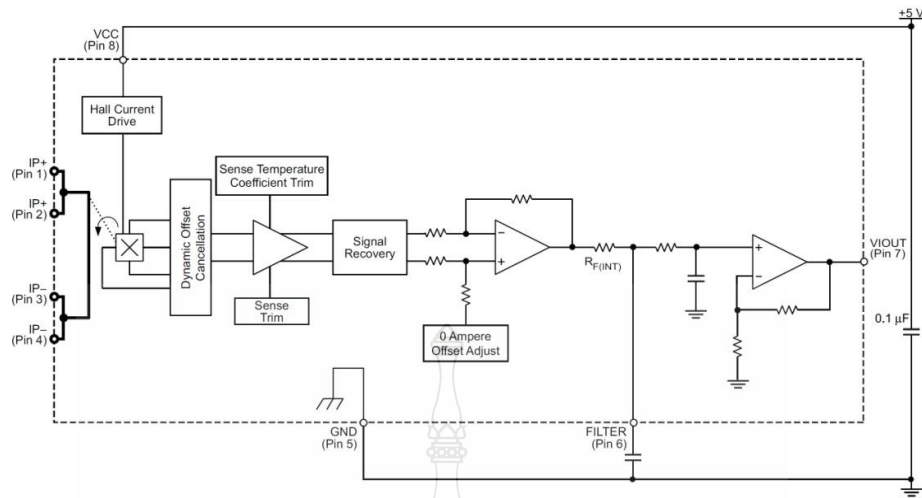
ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรถอนระดับแรงดันกำหนดตามพิกัดกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ **60W** แรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้คือ **25V** และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าสูงสุด **3.5A** ดังนั้นจึงเลือกใช้อิโอบีที เบอร์ **IRG4BC40K ultra-fast IGBT** แบบ **n-channel** ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ที่ **600V** และรับกระแสไฟฟ้าได้ **25A** และใช้ค่าแรงดันพัลส์ขับเคลื่อน $V_{GE}=15V$

3.4.1.5 การเลือกใช้อิโอดกำลัง

การเลือกพิกัดกระแสของไดโอดกำลังนั้นกำหนดจากกระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจรถอนระดับแรงดันเป็น **3.5A** และค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น **25V** ดังนั้นเพื่อรักษาความปลอดภัยเท่ากับ **2.0** เท่า เพราะฉะนั้นกระแสของไดโอดจะได้เท่ากับ $3.5 \times 2.0 = 7A$ จึงเลือกใช้อิโอดกำลังเบอร์ **MUR460 Super-Fast Recovery Rectifier Diode** ซึ่งสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง **40A**

3.4.2 การออกแบบวงจรถวนตรวจจับกระแสขาออก

อุปกรณ์ตรวจจับกระแส (**Current Transducer**) นั้นทำหน้าที่ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรถวนระดับแรงดันจากนั้นเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยต่อตัวต้านทานเข้าไปที่ส่วนขาออกเพื่อส่งไปเข้ายังอุปกรณ์อินเตอร์เฟซการ์ดเพื่อไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ **IGBT** ต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ โมดูลวัดกระแสไฟฟ้า (**Current Sensor**) รุ่น **ACS712** ของบริษัท **Allegro** สามารถใช้แรงดันไฟเลี้ยง **VCC** ในช่วง **4.5V** ถึง **5.5V** และสามารถทนได้สูงสุด **8V** วัดกระแสได้สองทิศทางคือ (**AC** และ **DC**) และให้แรงดันเอาต์พุต **Vout** แบบเชิงเส้น มีค่า **output sensitivity** ในช่วง **66 mV/A** ถึง **185 mV/A** ถ้าไม่มีกระแสไหลจะได้ **Vout** เท่ากับ $VCC/2$ ถ้ามีกระแสไหลในทางบวก จะทำให้ **Vout** เพิ่มขึ้นสูงกว่า $VCC/2$ และถ้ามีกระแสไหลในทางลบ จะทำให้ **Vout** ลดลงต่ำกว่า $VCC/2$ ตัว **IC** เบอร์ ตัวไอซีมีขา **filter** สำหรับต่อตัวเก็บประจุเพิ่ม เพื่อใช้งานร่วมกับตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในตัวไอซี และทำหน้าที่เป็นวงจรถวน (**low-pass RC filter**) สำหรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต

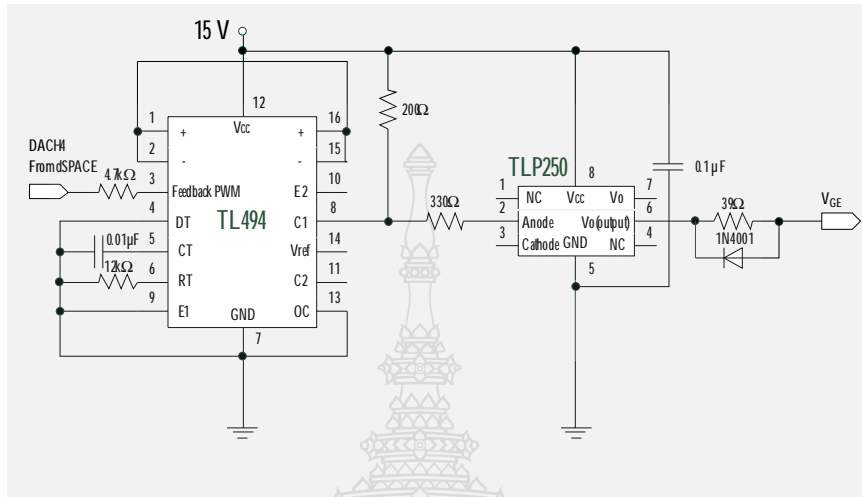


รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแส ACS712-05

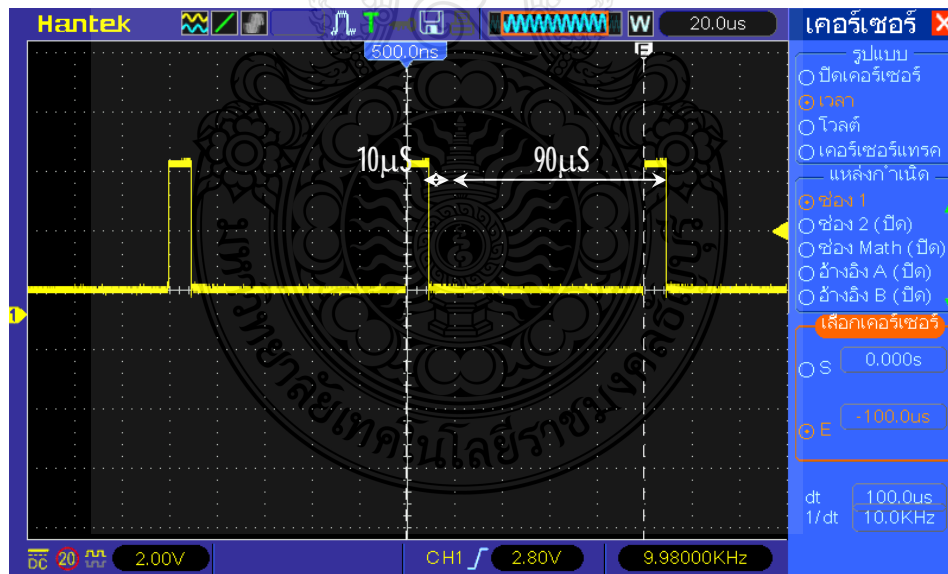
3.5 การออกแบบวงจรภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลัง บอร์ดควบคุม STM32F4 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างความถี่ในการสวิตช์และค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ได้ โดยในกำหนดความถี่ที่เลือกใช้งานคือ 7.5kHz ซึ่งในการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุม วัฏจักรการทำงานของสวิตช์ภาคกำลัง จะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญด้วยกันคือ ส่วนแรก บอร์ดควบคุม STM32F4 เป็น วงจรที่ใช้กำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ที่ใช้ 5.5kHz ได้ โดยสัญญาณนี้จะถูกเลือกใช้ให้ส่งออกไปทางขา PA8 และสามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้ โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก STM32F4 นี้เกิดจากการตรวจจับค่ากระแสขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแล้วแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D) ส่งเข้าไปคำนวณในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ผลที่ได้คือค่าแรงดันไฟฟ้าตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไฟฟ้าขาออก สัญญาณดิจิตอลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A) ส่งผ่านตัวต้านทาน 4.7kΩ มาเข้าขาที่ 3 ของไอซี TL494 เพื่อเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จากขา 5 ผลของการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองส่งผลให้สามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้นั่นเอง จากนั้นสัญญาณพัลส์จากขา 8 ของไอซี TL494 จะถูกส่งไปเข้าขา 2 ของไอซีเบอร์ TLP250 ก่อนที่จะนำไปขับเกตไอจีบีที เพื่อขยายสัญญาณให้ได้ 15VDC และเป็นการแยกการเชื่อมต่อระหว่างวงจรถูกกำลังและวงจรถูกควบคุมอีกด้วยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของวงจรถูกควบคุม สัญญาณพัลส์ขับ

เกตของไอจีบีทีจะได้จากขา 6 ของไอซีเบอร์ TLP250 วงจรภาคควบคุมวงจรถอนระดับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรภาคควบคุมของวงจรถอนระดับแรงดัน

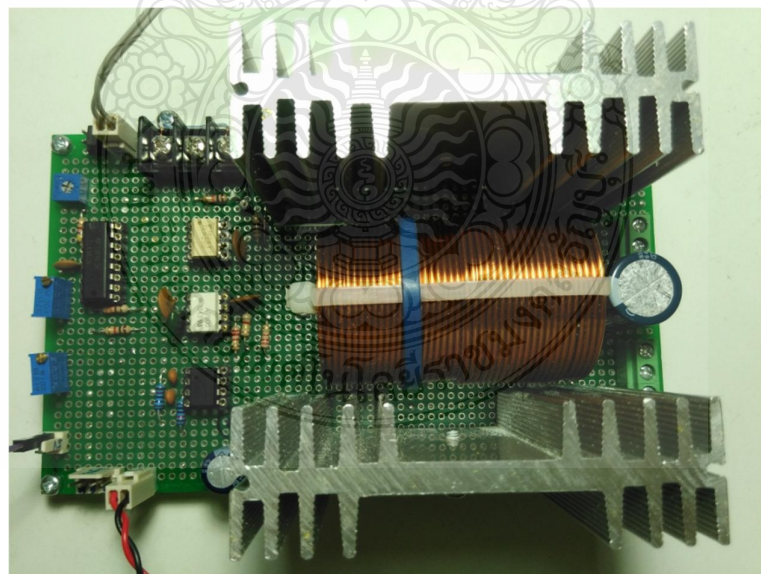


รูปที่ 3.9 สัญญาณพัลส์ขับเกตของไอจีบีที ที่คิวดีไซเคิลเป็น 10% ความถี่สวิตซ์ 10 kHz

ในรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณพัลส์ซับเกตที่ออกจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 2.8V ที่ความถี่ 10kHz แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณพื้นเลื้อยและสัญญาณจาก STM32F4 ของไอซี TL494 เพื่อกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ซับเกต และสัญญาณพัลส์ซับเกตที่ออกจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 2.8V ที่ความถี่ 10kHz

3.6 จัดสร้างและประกอบวงจรส่วนต่างๆให้เป็นระบบ

จากในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถนำมาจัดสร้างองค์ประกอบต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบต้นเวลาได้ดังนี้คือ วงจรภาคกำลัง โดยใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดันทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออกและแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งค่าอินพุตเข้าสู่การ์ดิอินเทอร์เฟซ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ซับเกตทำหน้าที่กำหนดค่าความถี่ของพัลส์ซับเกตที่เหมาะสมให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าตรงตามคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้บอร์ด STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.12 รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงองค์ประกอบของระบบทั้งหมด และลำดับการทำงานที่ใช้เพื่อการทดสอบเก็บข้อมูลต่างๆทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบต้นเวลา



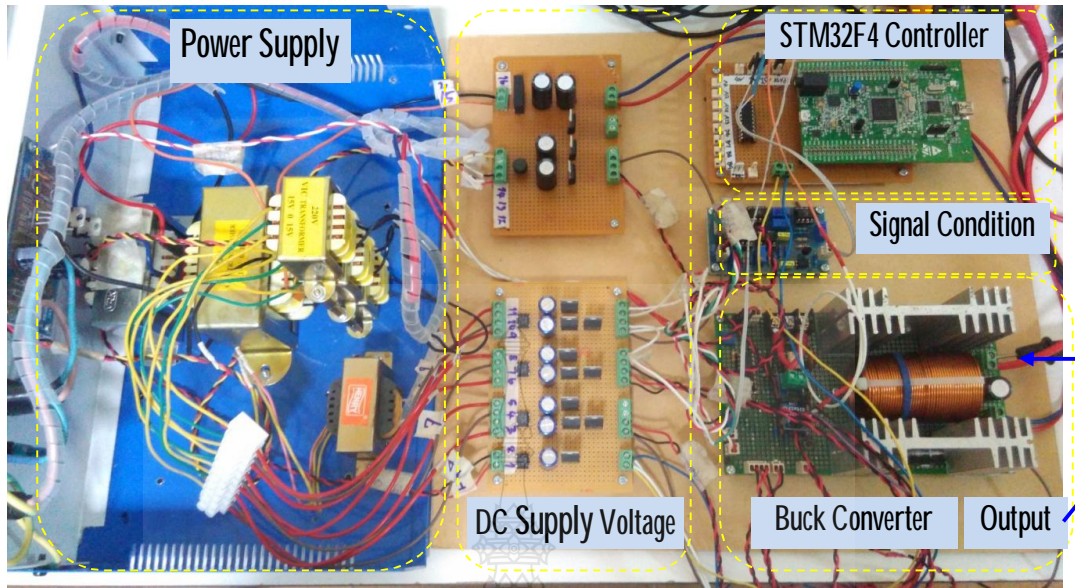
รูปที่ 3.10 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) และวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์



รูปที่ 3.11 วงจรส่วนตรวจจับกระแสไฟฟ้าออก



รูปที่ 3.12 STM32F4 ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.13 รายละเอียดส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

สรุปในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากทฤษฎี และสมการที่เกี่ยวข้องจากบทที่ 2 รวมทั้งการออกแบบภาคควบคุม วงจรภาคกำลัง โดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน และการเลือกใช้อุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาได้ และนำไปใช้ในการทดลองในบทที่ 4 ต่อไป

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย
วัน เดือน ปีเกิด 5 สิงหาคม 2512
ที่อยู่ 264/122 หมู่ที่ 1 ตำบลลำผักกูด อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2543
ประวัติการทำงาน ผู้ช่วยผู้จัดการ TUV SUD (THAILAND) LIMITED พ.ศ. 2546 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 081 268 9596
อีเมล lee_eei@hotmail.com



บทที่ 4

ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของตัวแปรทั้ง 5 ต่อกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงผลการจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และในส่วนสุดท้ายจะเป็นผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา โดยมีลำดับขั้นการทำทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของตัวแปรเช่น

- ผลของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)
- ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)
- ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิ (λ : Solar irradiance and T : Cell Temperature)

2. ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- ผลของความเข้มแสงแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60

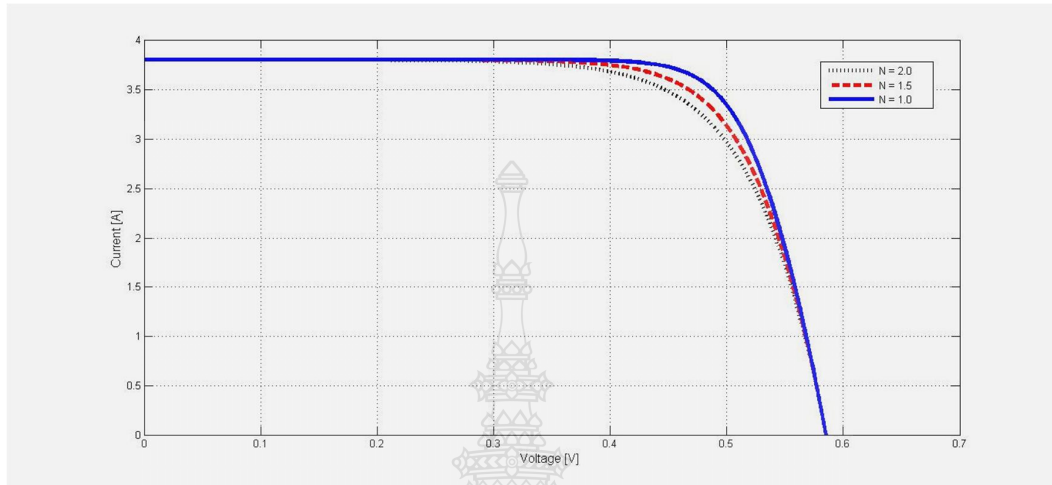
3. ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติ

- ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดไม่มีการควบคุม
- ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดมีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี

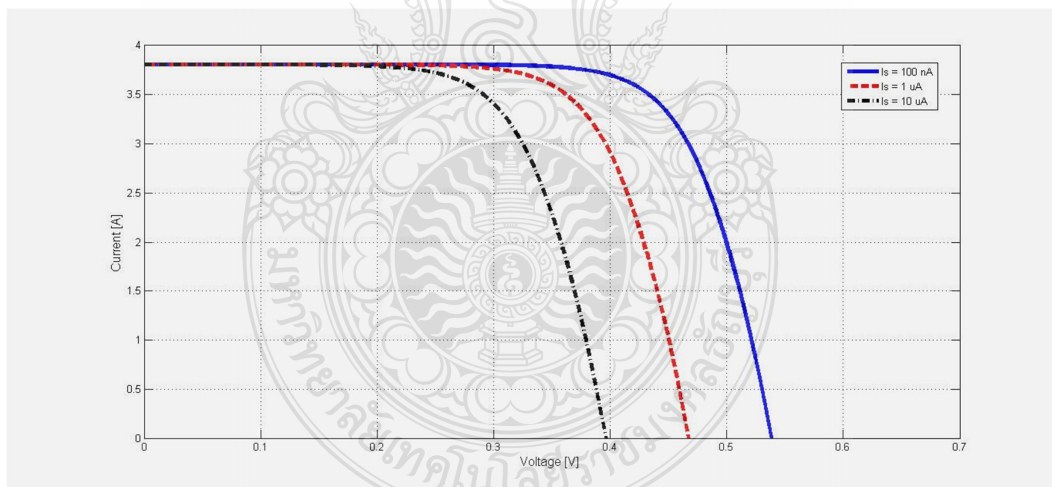
4.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3 สามารถจำลองผลกระทบของตัวแปรต่างๆทางไฟฟ้า ได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลของไดโอดและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (Ideal factor and Reverse saturation current of diode)



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า N ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



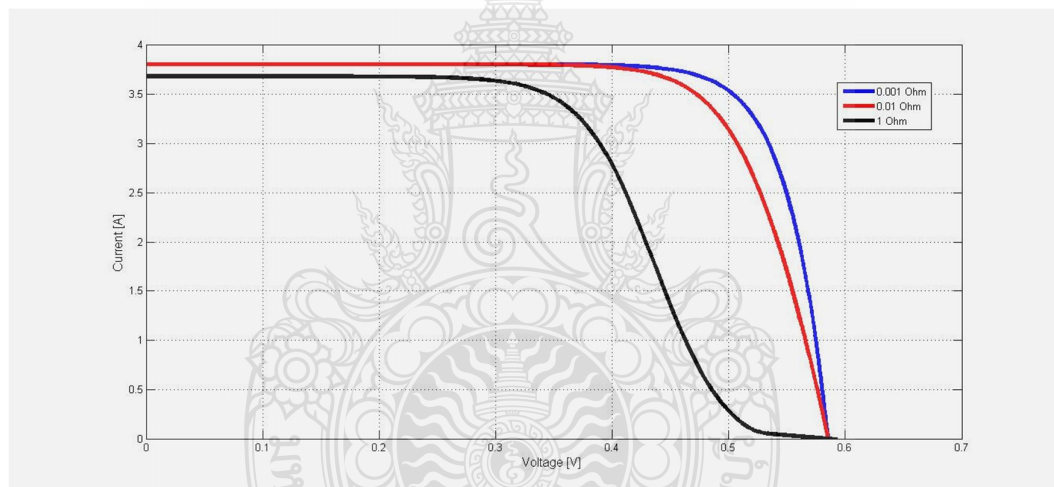
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า I_s ต่อแรงดันขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ค่า N และ I_s เป็นผลจากไดโอด โดยโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน ค่า N มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเซลล์ เมื่อค่า N มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าน้อยสู่ค่ามากขึ้นคือจาก 1.0, 1.5 และ 2.0 จะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออก และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์

แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามรูปที่ 4.1 ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ารั่วในสภาวะอิ่มตัวขณะจ่ายไปอัสกลับหรือค่า I_s ที่มากขึ้นจาก 100nA, 1 μ A ถึง 10 μ A ตามรูปที่ 4.2 มีผลทำให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามลำดับ

4.1.2 ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)

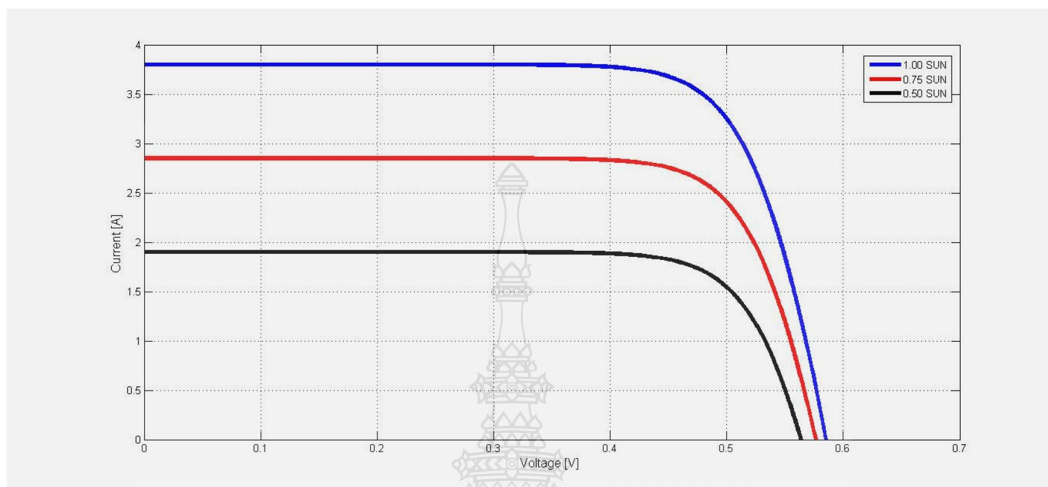
ค่า R_s เป็นค่าความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นรวมกับค่าความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอก [22] เมื่อ R_s มีค่า 0.001 Ω และ 0.01 Ω จะทำให้กราฟคุณลักษณะ (I-V Curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงเป็นตามกราฟคุณลักษณะของเซลล์ แต่เมื่อ R_s มีค่ามากขึ้นเป็น 1 Ω กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า R_s ต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

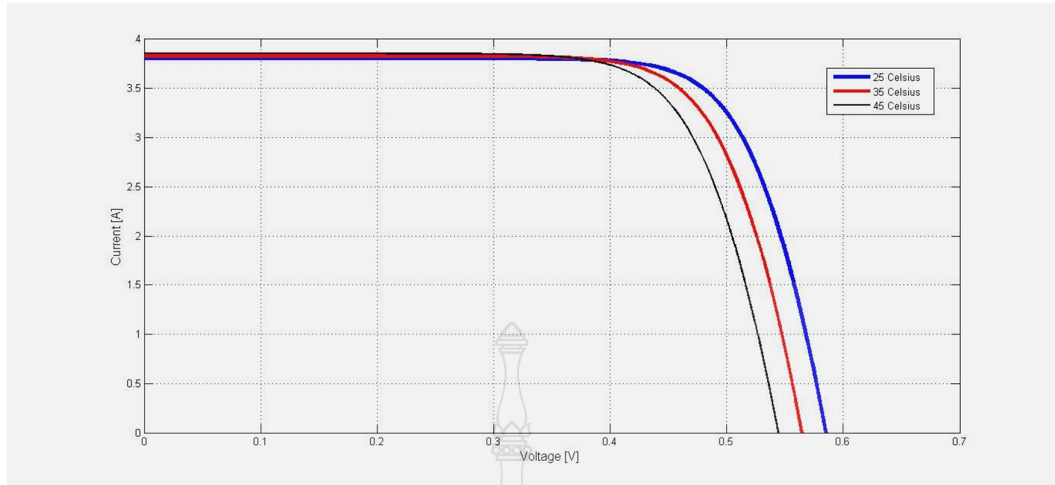
ส่วนค่าความต้านทานทั้งสองคือ R_s และ R_{sh} นั้นเป็นการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบของเซลล์ [22] เมื่อ R_{sh} มีค่าลดลงคือ 1 Ω , 0.01 Ω และ 0.001 Ω มีผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร [15] ทำให้กราฟกระแส-แรงดันมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมแต่ไม่มากนักโดยความต้านทานต้องมีค่ามากจึงจะเห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง แต่ PV module คือการรวมตัวกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ (ละเลย R_s , R_{sh})[6] ดังสมการที่ 2.6 ในบทที่ 2

4.1.3 ผลของความเข้มแสง (λ : Solar irradiance) และอุณหภูมิ (T : Cell Temperature)



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของค่า λ ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

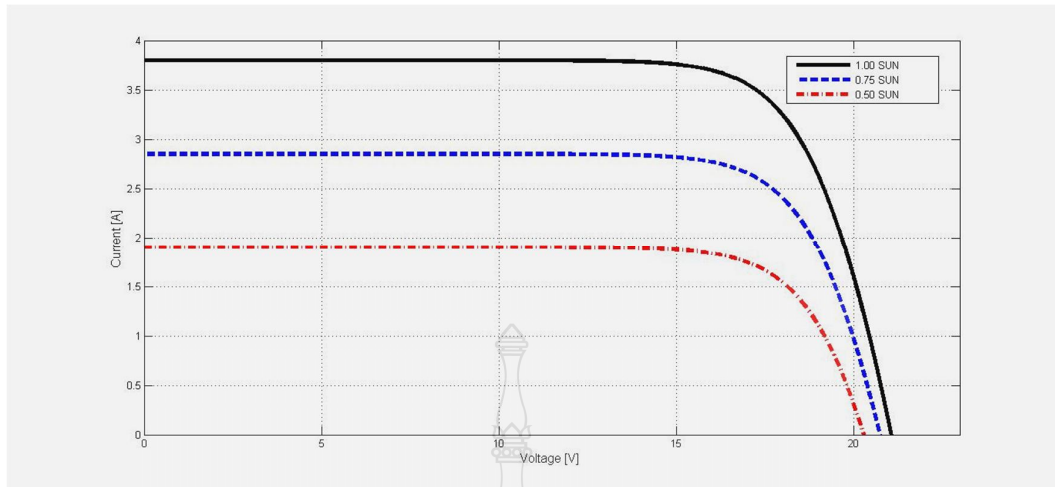
ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนด I_{sc} เป็น 3.8A ที่ STC (ความเข้มแสง 1000W/m^2 , อุณหภูมิ 25°C และ AM เป็น 1.5) ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสงเป็น 1.00SUN, 0.75 SUN และ 0.50 SUN ($T=25^\circ\text{C}$) ได้ผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ดังรูปที่ 4.4 ส่วนอุณหภูมิของแผงเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นตาม แต่ไม่มากนัก ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ 25°C , 35°C และ 45°C ($\lambda=1000\text{W/m}^2$) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันขาออกจะลดลงได้ผล I-V curve ตามรูปที่ 4.5 ดังนั้นในการติดตั้งใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิโดยรอบของเซลล์ด้วย



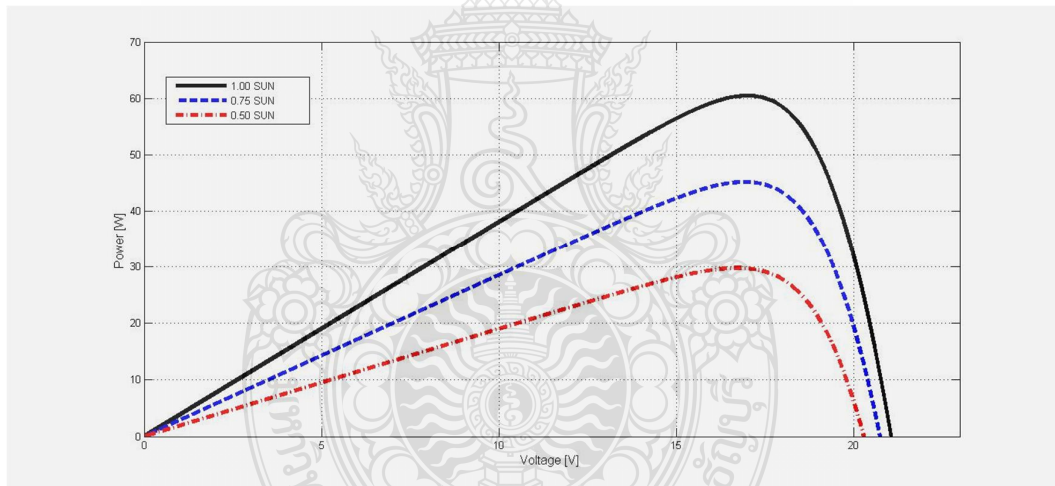
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อกราฟต่อกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2 ผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

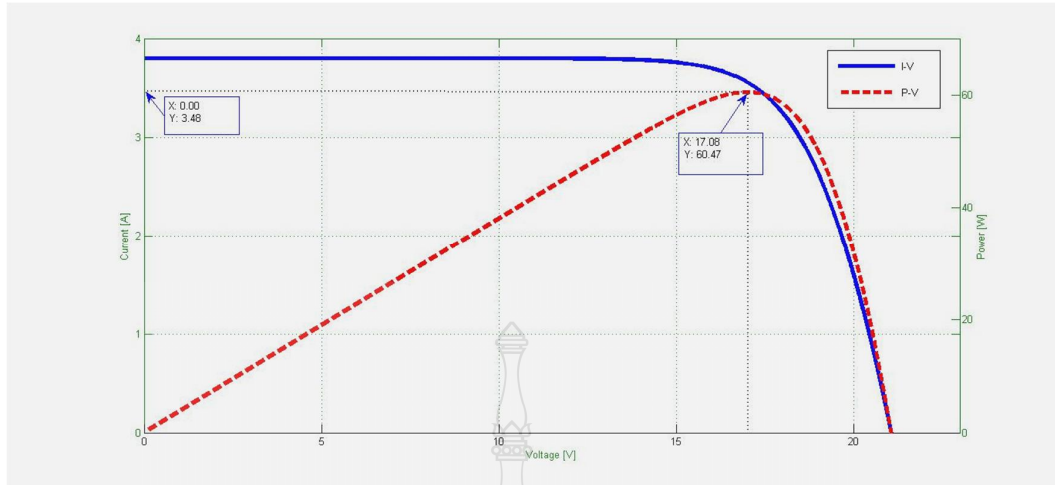
ในหนึ่งแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดจากความจำเป็นต้องเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้นนั้น มีวัตถุประสงค์มีความเหมาะสมและสะดวกในการใช้งานทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานและอนุกรมกันตามความต้องการใช้งาน ในการจำลองได้นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์เพื่อเพิ่มขนาดแรงดัน และจำนวนทางขนานเป็น 1 ได้ผลกราฟ I-V curve ตามรูปที่ 4.6 และกราฟ P-V curve รูปที่ 4.7 ส่วนรูปที่ 4.8 เป็นกราฟของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในตารางที่ 4.1 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลกับค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex รุ่น MSX60 โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงดังนี้ ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 0.78% ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า 0.12% และความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 0.57% ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟสเพื่อสร้างสัญญาณจริงต่อไป



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของค่า λ ต่อ I-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของค่า λ ต่อ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.8 จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าคุณลักษณะ SolarEx รุ่น MSX60

Value	MSX-60	Simulation	Error
P_{\max} (W)	60.0	60.47	0.78%
V_{mp} (V)	17.1	17.08	0.12%
I_{mp} (A)	3.5	3.48	0.57%

4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสมการเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนที่อยู่ใน STM32F4 controller จะทำหน้าที่คำนวณแรงดันอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าตัวที่ไซเคิลให้กับวงจรทอนระดับแรงดัน (BUCK Converter) โดยใช้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์เป็นสัญญาณอินพุตให้ STM32F4 controller

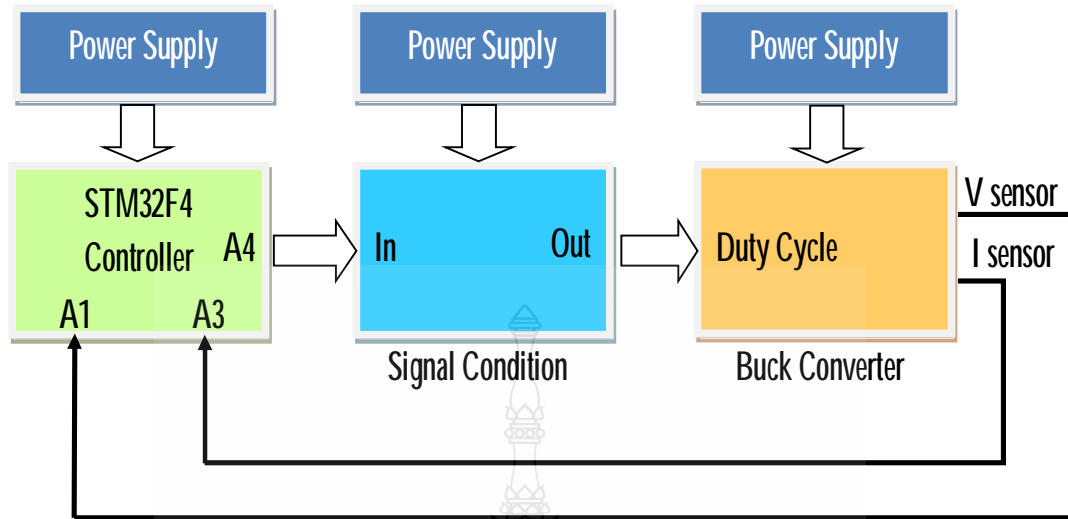
4.3.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

ก. Power Supply (25Vdc, 15Vdc, 5Vdc)	6 ชุด
ข. STM32F4 Controller Board	1 บอร์ด
ค. Converter N2 Controller Board	1 บอร์ด
ง. Computer (Note Book)	1 เครื่อง
จ. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง	1 แผง
ฉ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 325Ω , 1.2A	1 ตัว
ช. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 170Ω , 1.7A	1 ตัว
ซ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 15Ω , 5.5A	1 ตัว
ฅ. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 500Ω , 6A	1 ตัว
ญ. คิวติคอล ออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง
ฎ. คิวติคอลมัลติมิเตอร์	2 เครื่อง

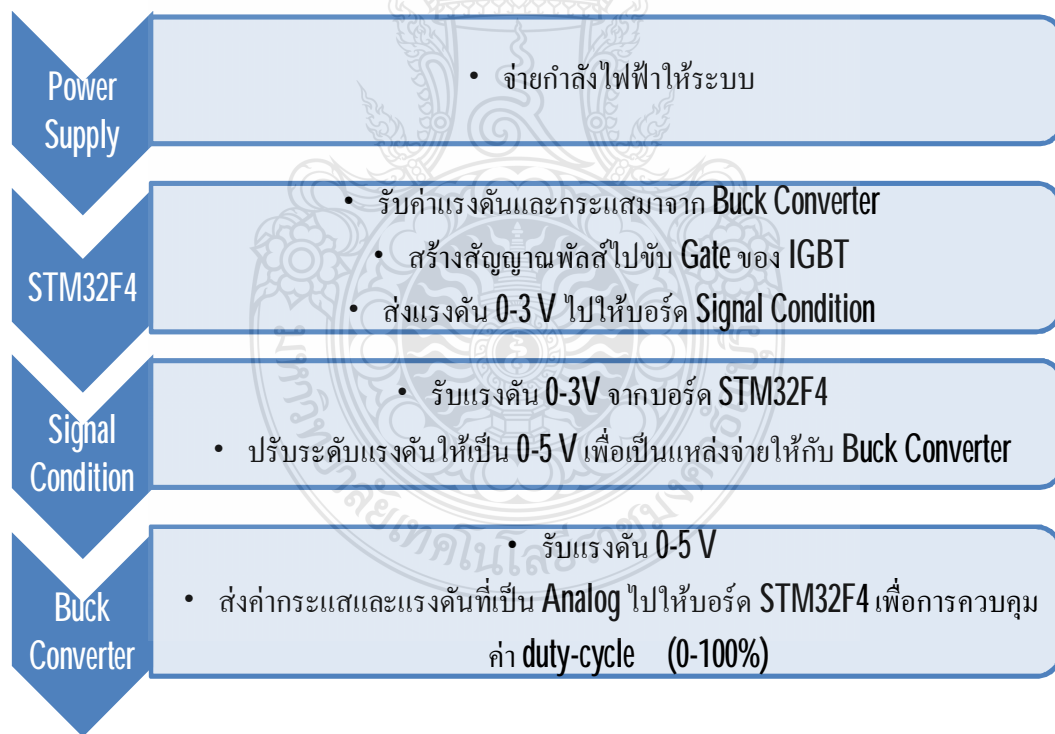
4.3.2 วงจรการทดลอง

การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันสมัยขั้นตอนดังต่อไปนี้

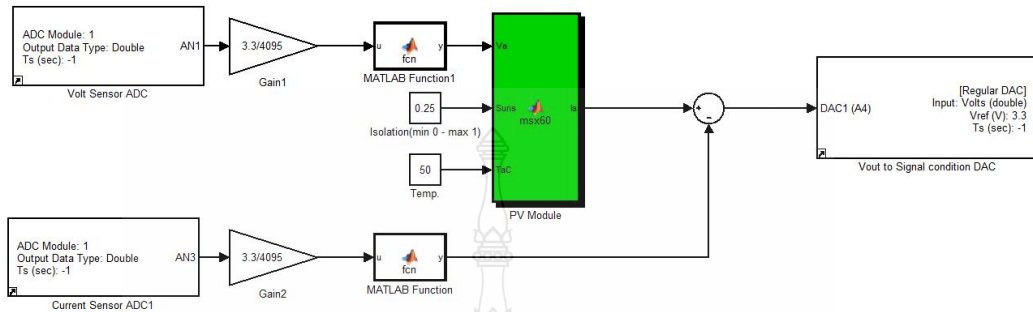
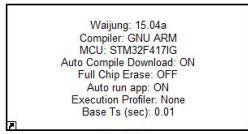
- เชื่อมต่อวงจรภาคกำลัง ภาคควบคุมและ โหลดตัวต้านทาน
- เชื่อมต่อ โปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เข้ากับชุดควบคุม
- เปิดแบบจำลอง **MATLAB/Simulink** เลือก **folder STM32F4** เลือก **file** ที่เขียนไว้สำหรับการทดลองแล้วทำการ **Update** และ **Built** ลงในบอร์ด **STM32F4**
- ปรับค่าความต้านทานเพื่อกำหนดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออก
- บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออก
- เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- สรุปผลการทดลอง



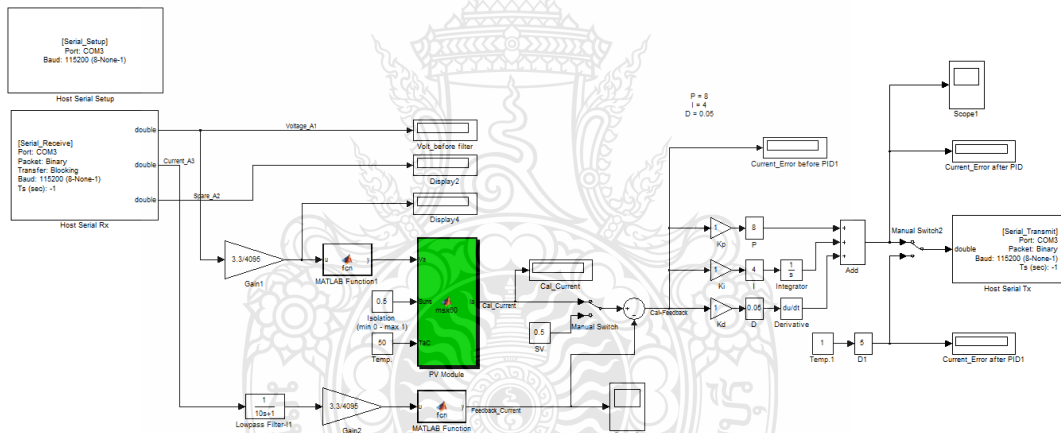
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา



รูปที่ 4.10 ลำดับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา



รูปที่ 4.11 การป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง



รูปที่ 4.12 วงจรการป้อนกลับกระแสในวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริง ชนิดมีการควบคุมแบบ พี ไอ ดี

4.3.3 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง $250W/m^2$ อุณหภูมิ $25^{\circ}C$

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า $7\Omega-27\Omega$ เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าจากการจำลอง การเปลี่ยนค่าความต้านทานทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ถูกส่งไปคำนวณค่าดีวีไอไซเคิลและขับเคลื่อนไอจีบีที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ STM32F4 controller) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	0.95	6.65	7.15	0.92	6.58	7.03	0.95	6.68	2.14	3.16	1.08	0.43	0.00	0.43
7.5	0.95	7.13	7.50	0.92	6.90	7.51	0.95	7.13	0.00	3.16	3.16	0.13	0.00	0.13
8.0	0.95	7.60	8.00	0.92	7.36	8.02	0.95	7.62	0.00	3.16	3.16	0.25	0.00	0.25
8.5	0.95	8.08	8.52	0.92	7.84	8.49	0.95	8.07	0.24	3.16	2.93	0.12	0.00	0.12
9.0	0.95	8.55	9.05	0.92	8.33	9.01	0.95	8.56	0.56	3.16	2.62	0.11	0.00	0.11
9.5	0.95	9.03	9.59	0.91	8.73	9.52	0.95	9.04	0.95	4.21	3.30	0.21	0.00	0.21
10.0	0.95	9.50	9.93	0.91	9.04	10.03	0.94	9.43	0.70	4.21	4.88	0.30	1.05	0.76
10.5	0.95	9.98	10.48	0.91	9.54	10.52	0.94	9.89	0.19	4.21	4.39	0.19	1.05	0.86
11.0	0.95	10.45	11.05	0.91	10.06	11.03	0.94	10.37	0.45	4.21	3.78	0.27	1.05	0.78
11.5	0.95	10.93	11.39	0.91	10.36	11.50	0.94	10.81	0.96	4.21	5.13	0.00	1.05	1.05
12.0	0.95	11.40	11.97	0.91	10.89	11.99	0.94	11.27	0.25	4.21	4.45	0.08	1.05	1.14
12.5	0.95	11.88	12.32	0.91	11.21	12.53	0.94	11.78	1.44	4.21	5.59	0.24	1.05	0.82

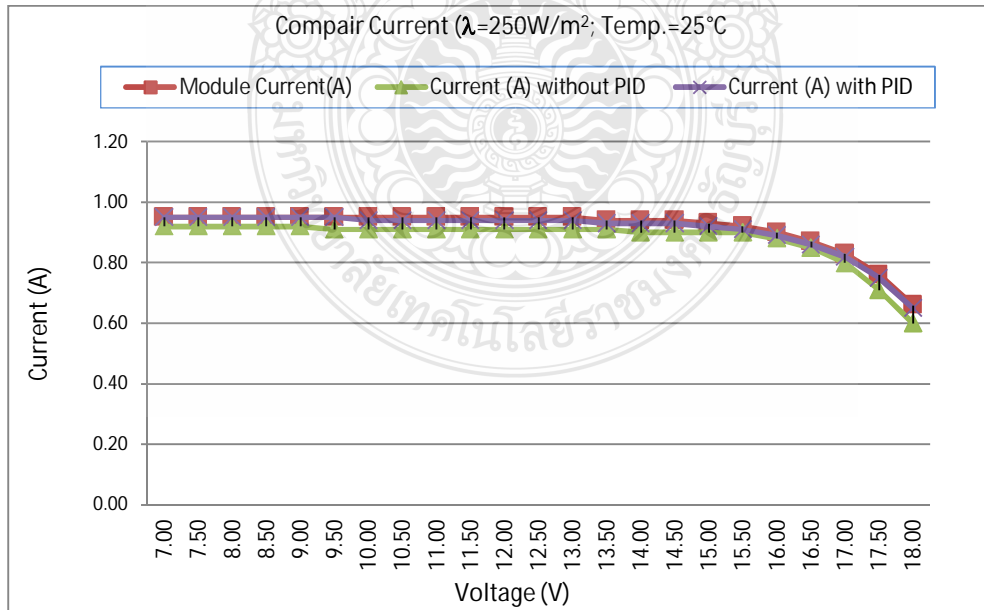
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	0.95	12.35	13.27	0.91	12.08	13.02	0.94	12.24	2.08	4.21	2.22	0.15	1.05	0.90
13.5	0.94	12.69	13.62	0.91	12.39	13.51	0.93	12.56	0.89	3.19	2.33	0.07	1.06	0.99
14.0	0.94	13.16	13.98	0.90	12.58	14.00	0.93	13.02	0.14	4.26	4.39	0.00	1.06	1.06
14.5	0.94	13.63	14.60	0.90	13.14	14.49	0.93	13.48	0.69	4.26	3.60	0.07	1.06	1.13
15.0	0.93	13.95	14.97	0.90	13.47	15.02	0.92	13.82	0.20	3.23	3.42	0.13	1.08	0.94
15.5	0.92	14.26	15.70	0.90	14.13	15.53	0.91	14.13	1.29	2.17	0.91	0.19	1.09	0.90
<u>16.0</u>	<u>0.90</u>	<u>14.40</u>	<u>16.16</u>	<u>0.88</u>	<u>14.22</u>	<u>16.00</u>	<u>0.89</u>	<u>14.24</u>	1.00	2.22	1.24	0.00	1.11	1.11
16.5	0.87	14.36	16.62	0.85	14.13	16.52	0.86	14.21	0.73	2.30	1.59	0.12	1.15	1.03
17.0	0.83	14.11	17.14	0.80	13.71	17.02	0.82	13.96	0.82	3.61	2.82	0.12	1.20	1.09
17.5	0.76	13.30	17.48	0.71	12.41	17.48	0.75	13.11	0.11	6.58	6.69	0.11	1.32	1.43
18.0	0.66	11.88	17.90	0.60	10.74	17.99	0.65	11.69	0.56	9.09	9.60	0.06	1.52	1.57

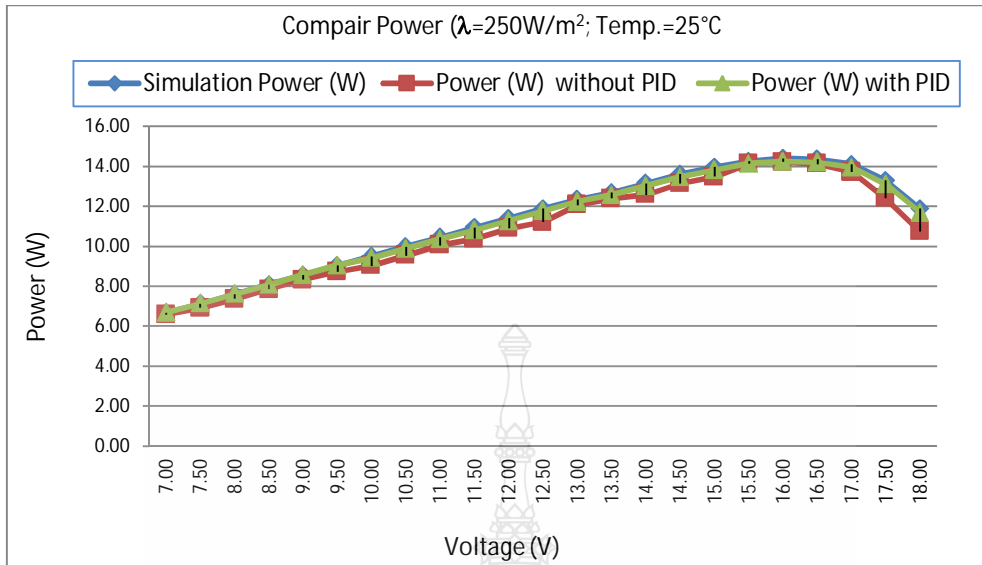
ในตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลา ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 14.40W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.0V กระแสไฟฟ้า 0.90A

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 14.22W ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.16V กระแสไฟฟ้า 0.88A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.24% ของแรงดันไฟฟ้า 1.0% และของกระแสไฟฟ้า 2.22%

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 14.24W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.00V กระแสไฟฟ้า 0.89A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.11% ของแรงดันไฟฟ้า 0.0% และของกระแสไฟฟ้า 1.11%

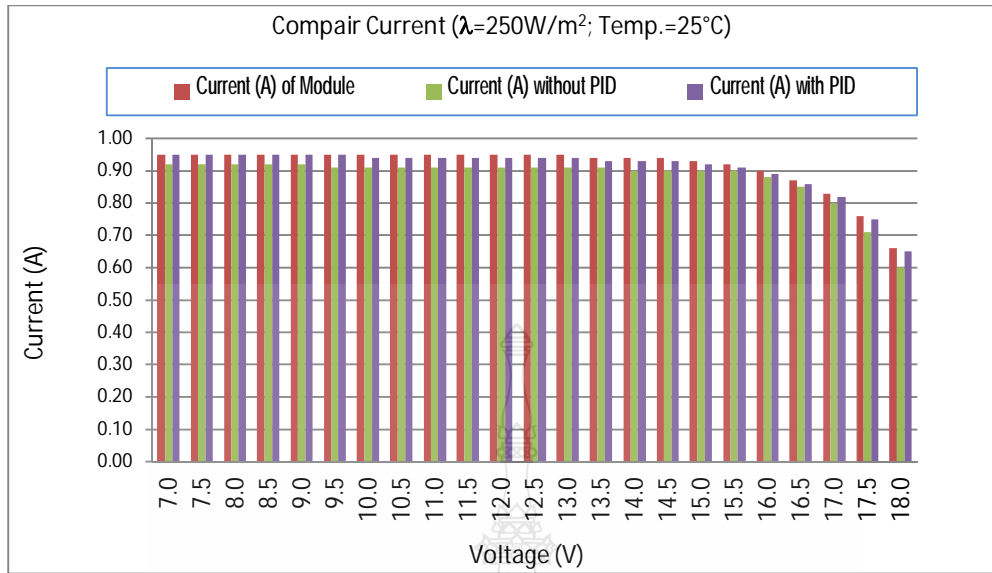


รูปที่ 4.13 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 25°C)

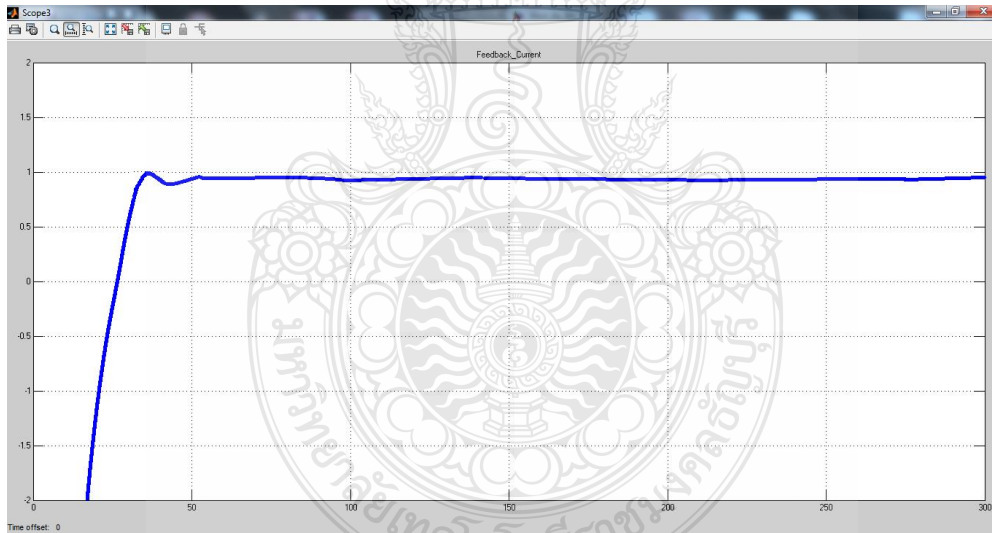


รูปที่ 4.14 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)

จากตารางที่ 4.2 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V - 18V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พีไอ ดี ดังรูปที่ 4.13 ส่วนรูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($250\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)



รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับและที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.16 เป็น

ตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.94A อันเกิดจากการทดลองที่ 14 โหลด ที่ ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

4.3.4 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า 3Ω - 61Ω เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.3 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 29.75W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17V กระแสไฟฟ้า 1.75A ($\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 28.20W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.99V กระแสไฟฟ้า 1.66A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 5.20% ของแรงดันไฟฟ้า 0.06% และของกระแสไฟฟ้า 5.20%

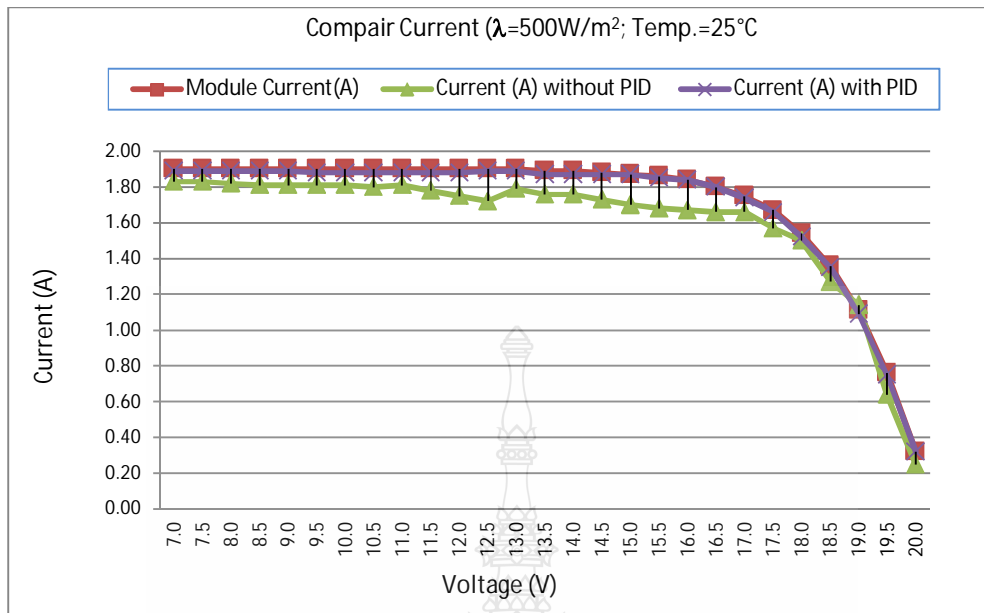
การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 29.60W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17.01V กระแสไฟฟ้า 1.74A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.51% ของแรงดันไฟฟ้า 0.12% และของกระแสไฟฟ้า 0.57%

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาที่ $\lambda=500 \text{ W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$

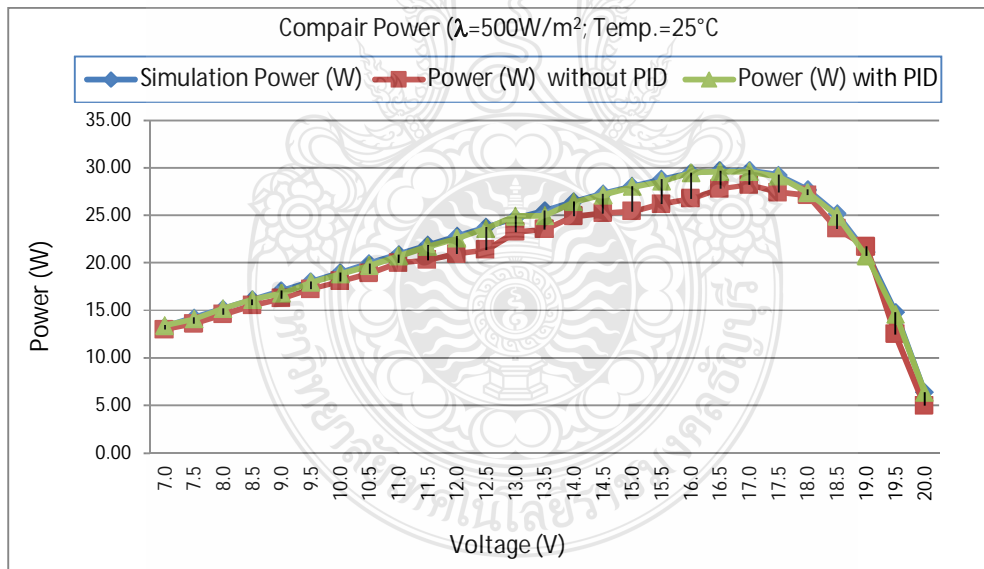
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	1.90	13.30	7.09	1.83	12.97	7.10	1.89	13.42	1.29	-3.68	-2.45	1.43	-0.53	0.89
7.5	1.90	14.25	7.43	1.83	13.60	7.45	1.89	14.08	-0.93	-3.68	-4.58	0.27	-0.53	-1.19
8.0	1.90	15.20	8.01	1.82	14.58	8.03	1.89	15.18	0.12	-4.21	-4.09	0.25	-0.53	-0.15
8.5	1.90	16.15	8.58	1.81	15.53	8.54	1.89	16.14	0.94	-4.74	-3.84	-0.47	-0.53	-0.06
9.0	1.90	17.10	8.97	1.81	16.24	8.89	1.89	16.80	-0.33	-4.74	-5.05	-0.89	-0.53	-1.74
9.5	1.90	18.05	9.51	1.81	17.21	9.55	1.88	17.95	0.11	-4.74	-4.64	0.42	-1.05	-0.53
10.0	1.90	19.00	9.99	1.81	18.08	10.01	1.88	18.82	-0.10	-4.74	-4.83	0.20	-1.05	-0.95
10.5	1.90	19.95	10.50	1.80	18.90	10.49	1.88	19.72	0.00	-5.26	-5.26	-0.10	-1.05	-1.15
11.0	1.90	20.90	11.05	1.81	20.00	11.03	1.88	20.74	0.45	-4.74	-4.30	-0.18	-1.05	-0.78
11.5	1.90	21.85	11.40	1.78	20.29	11.54	1.88	21.70	-0.87	-6.32	-7.13	1.23	-1.05	-0.71
12.0	1.90	22.80	11.97	1.75	20.95	12.00	1.88	22.56	-0.25	-7.89	-8.12	0.25	-1.05	-1.05
12.5	1.90	23.75	12.42	1.72	21.36	12.49	1.89	23.61	-0.64	-9.47	-10.05	0.56	-0.53	-0.61
13.0	1.90	24.70	13.00	1.79	23.27	13.20	1.89	24.95	0.00	-5.79	-5.79	1.54	-0.53	1.00
13.5	1.89	25.52	13.35	1.76	23.50	13.35	1.87	24.96	-1.11	-6.88	-7.91	0.00	-1.06	-2.16

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบหันเวลาที่ $\lambda=500 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
14.0	1.89	26.46	14.14	1.76	24.89	14.13	1.87	26.42	1.00	-6.88	-5.95	-0.07	-1.06	-0.14
14.5	1.88	27.26	14.58	1.73	25.22	14.52	1.87	27.15	0.55	-7.98	-7.47	-0.41	-0.53	-0.39
15.0	1.87	28.05	14.94	1.70	25.40	14.97	1.87	27.99	-0.40	-9.09	-9.45	0.20	0.00	-0.20
15.5	1.86	28.83	15.59	1.68	26.19	15.45	1.85	28.58	0.58	-9.68	-9.15	-0.90	-0.54	-0.86
16.0	1.84	29.44	16.00	1.67	26.72	16.02	1.84	29.48	0.00	-9.24	-9.24	0.12	0.00	0.12
16.5	1.80	29.70	16.73	1.66	27.77	16.44	1.80	29.59	1.39	-7.78	-6.49	-1.73	0.00	-0.36
17.0	1.75	29.75	16.99	1.66	28.20	17.01	1.74	29.60	-0.06	-5.14	-5.20	0.12	-0.57	-0.51
17.5	1.67	29.23	17.45	1.57	27.40	17.51	1.66	29.07	-0.29	-5.99	-6.26	0.34	-0.60	-0.54
18.0	1.54	27.72	18.07	1.50	27.11	18.02	1.52	27.39	0.39	-2.60	-2.22	-0.28	-1.30	-1.19
18.5	1.36	25.16	18.55	1.27	23.56	18.47	1.35	24.93	0.27	-6.62	-6.37	-0.43	-0.74	-0.90
19.0	1.11	21.09	19.04	1.14	21.71	19.01	1.09	20.72	0.21	2.70	2.92	-0.16	-1.80	-1.75
19.5	0.76	14.82	19.52	0.64	12.49	19.50	0.75	14.63	0.10	-15.79	-15.70	-0.10	-1.32	-1.32
20.0	0.32	6.40	19.85	0.25	4.96	19.92	0.32	6.37	-0.75	-21.88	0.00	0.35	0.00	-0.40



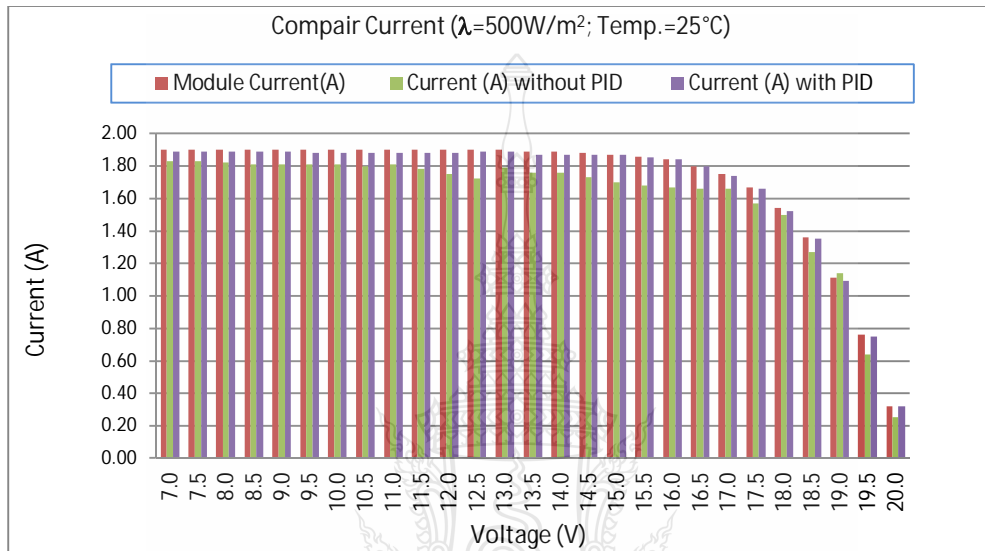
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 25°C)



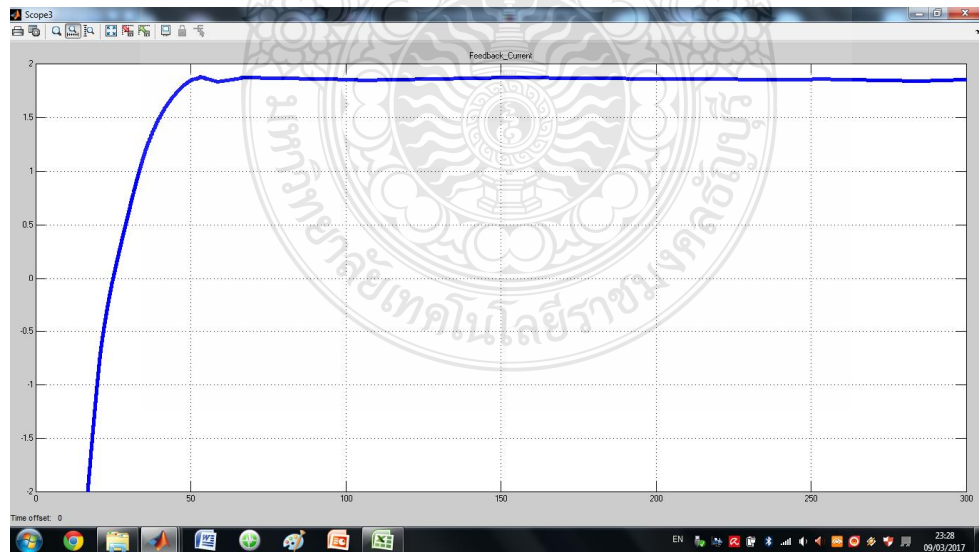
รูปที่ 4.18 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 25°C)

จากตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V-20V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.17 ส่วนรูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง (500W/m², 25°C)



รูปที่ 4.20 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 1.88A อันเกิดจากการทดลองที่ 6 โอคัม ที่ ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 25°C

4.3.5 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า 3Ω - 27Ω เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.4 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 14.4W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.0V กระแสไฟฟ้า 0.99A ($\lambda=250\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 14.22W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.16V กระแสไฟฟ้า 0.88A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.24% ของแรงดันไฟฟ้า 1.0% และของกระแสไฟฟ้า 2.22%

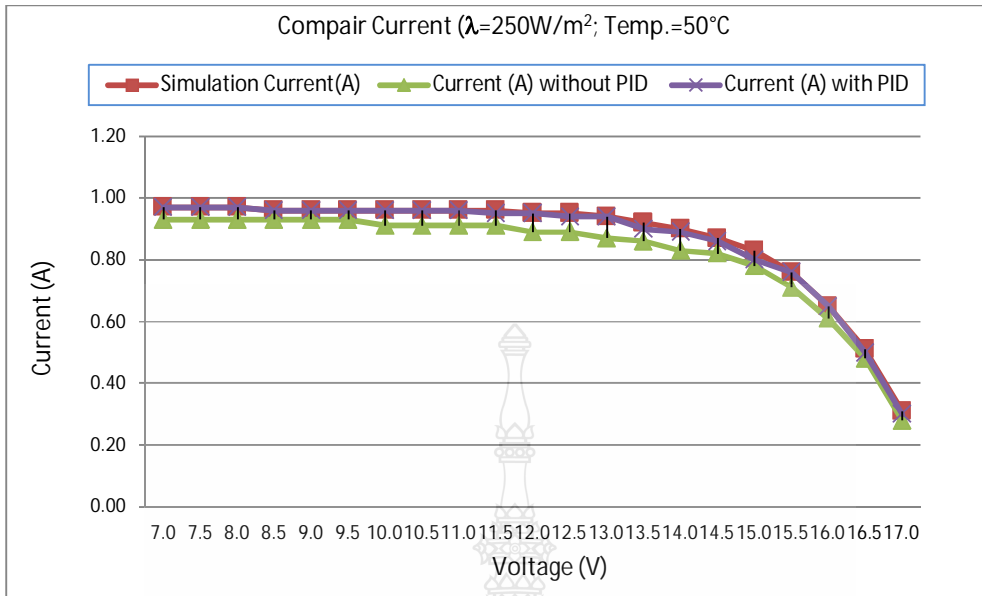
การทดลองในทางปฏิบัติที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 29.60W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 17.01V กระแสไฟฟ้า 1.74A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.11% ของแรงดันไฟฟ้า 0.0% และของกระแสไฟฟ้า 1.11%

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันทีที่ $\lambda=250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$

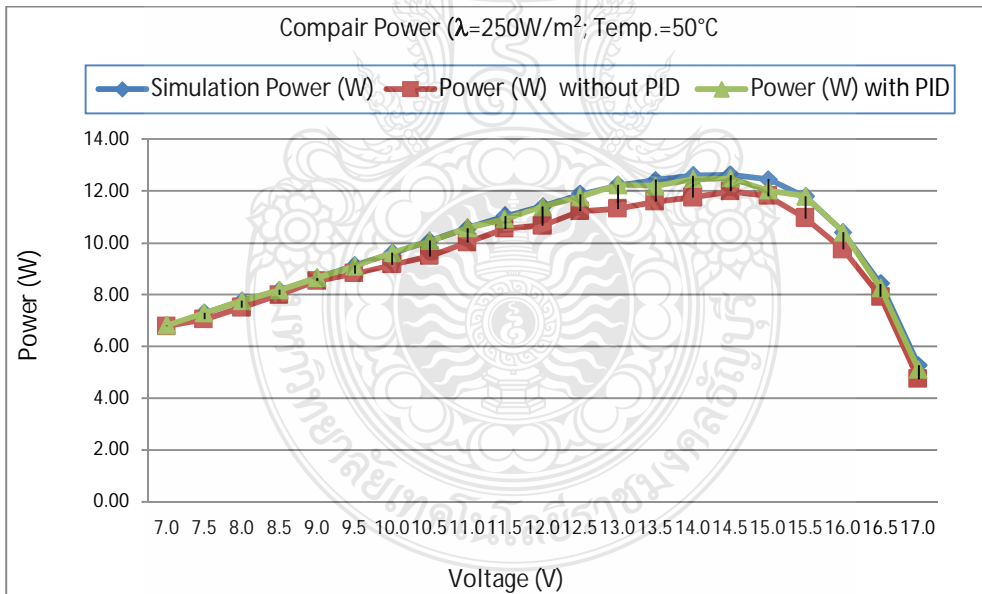
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	0.97	6.79	7.29	0.93	6.78	7.03	0.97	6.82	4.14	-4.12	-0.15	0.43	0.00	0.43
7.5	0.97	7.28	7.57	0.93	7.04	7.52	0.97	7.29	0.93	-4.12	-3.23	-0.66	0.00	0.27
8.0	0.97	7.76	8.06	0.93	7.50	8.00	0.97	7.76	0.75	-4.12	-3.40	-0.74	0.00	0.00
8.5	0.96	8.16	8.59	0.93	7.99	8.51	0.96	8.17	1.06	-3.12	-2.10	-0.93	0.00	0.12
9.0	0.96	8.64	9.16	0.93	8.52	9.01	0.96	8.65	1.78	-3.12	-1.40	-1.64	0.00	0.11
9.5	0.96	9.12	9.48	0.93	8.82	9.48	0.96	9.10	-0.21	-3.12	-3.33	0.00	0.00	-0.21
10.0	0.96	9.60	10.07	0.91	9.16	10.01	0.96	9.61	0.70	-5.21	-4.54	-0.60	0.00	0.10
10.5	0.96	10.08	10.42	0.91	9.48	10.49	0.96	10.07	-0.76	-5.21	-5.93	0.67	0.00	-0.10
11.0	0.96	10.56	10.99	0.91	10.00	11.01	0.96	10.57	-0.09	-5.21	-5.29	0.18	0.00	0.09
11.5	0.96	11.04	11.59	0.91	10.55	11.49	0.95	10.92	0.78	-5.21	-4.47	-0.86	-1.04	-1.13
12.0	0.95	11.40	11.97	0.89	10.65	12.00	0.95	11.40	-0.25	-6.32	-6.55	0.25	0.00	0.00
12.5	0.95	11.88	12.60	0.89	11.21	12.52	0.94	11.77	0.80	-6.32	-5.57	-0.63	-1.05	-0.89

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบที่ $\lambda=250\text{W/m}^2, T=50^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	0.94	12.22	13.00	0.87	11.31	13.02	0.94	12.24	0.00	-7.45	-7.45	0.15	0.00	0.15
13.5	0.92	12.42	13.47	0.86	11.58	13.54	0.90	12.19	-0.22	-6.52	-6.73	0.52	-2.17	-1.88
14.0	0.90	12.60	14.15	0.83	11.74	14.00	0.89	12.46	1.07	-7.78	-6.79	-1.06	-1.11	-1.11
<u>14.5</u>	<u>0.87</u>	<u>12.62</u>	<u>14.61</u>	<u>0.82</u>	<u>11.98</u>	<u>14.52</u>	<u>0.86</u>	<u>12.49</u>	0.76	-5.75	-5.03	-0.62	-1.15	-1.01
15.0	0.83	12.45	15.14	0.78	11.81	15.02	0.80	12.02	0.93	-6.02	-5.15	-0.79	-3.61	-3.49
15.5	0.76	11.78	15.42	0.71	10.95	15.52	0.76	11.80	-0.52	-6.58	-7.06	0.65	0.00	0.13
16.0	0.65	10.40	15.95	0.61	9.73	16.00	0.65	10.40	-0.31	-6.15	-6.45	0.31	0.00	0.00
16.5	0.51	8.42	16.50	0.48	7.92	16.50	0.50	8.25	0.00	-5.88	-5.88	0.00	-1.96	-1.96
17.0	0.31	5.27	16.88	0.28	4.73	17.03	0.30	5.11	-0.71	-9.68	-10.31	0.89	-3.23	-3.06



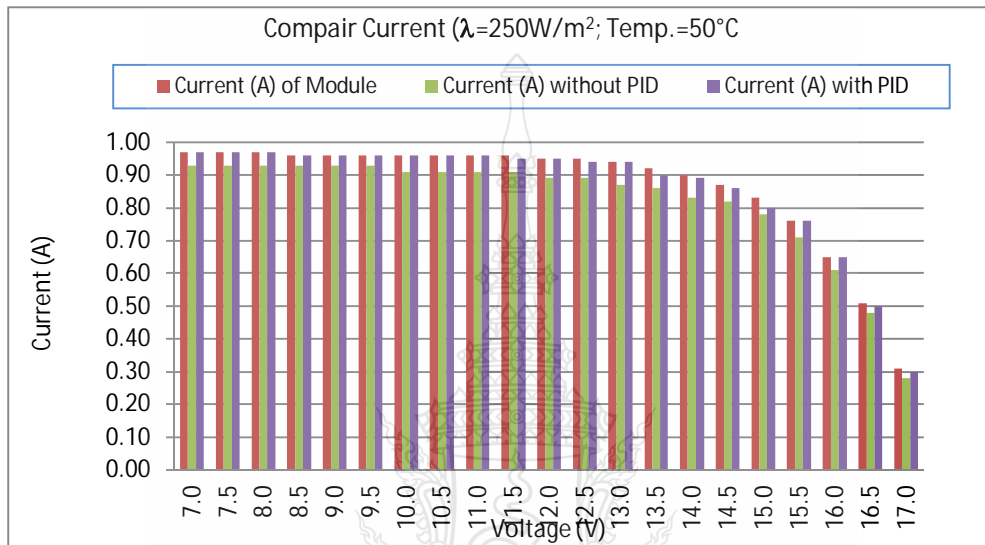
รูปที่ 4.21 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)



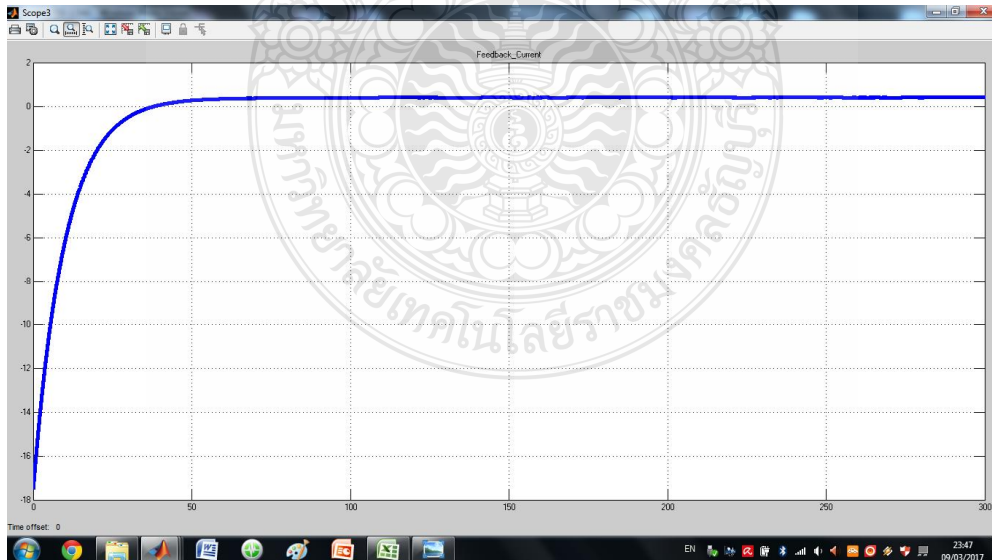
รูปที่ 4.22 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)

จากตารางที่ 4.4 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V - 17V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.21 ส่วนรูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง (250W/m^2 , 50°C)



รูปที่ 4.24 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี (250W/m^2 , 50°C)

รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.24 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรทอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.3A อันเกิดจากการทดลองที่ 55 โห้หม ที่ ความเข้มแสง 250W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

4.3.6 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสง 500W/m^2 อุณหภูมิ 50°C

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานระหว่างค่า $3\Omega-45\Omega$ เพื่อให้ค่าในตารางที่ 4.5 ในช่องผลของการจำลองพบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ 26.33W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15.0V กระแสไฟฟ้า 1.76A ($\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$)

การทดลองในทางปฏิบัติที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 25.49W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 15.64V กระแสไฟฟ้า 1.63A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.53% ของแรงดันไฟฟ้า 0.9% และของกระแสไฟฟ้า 2.4%

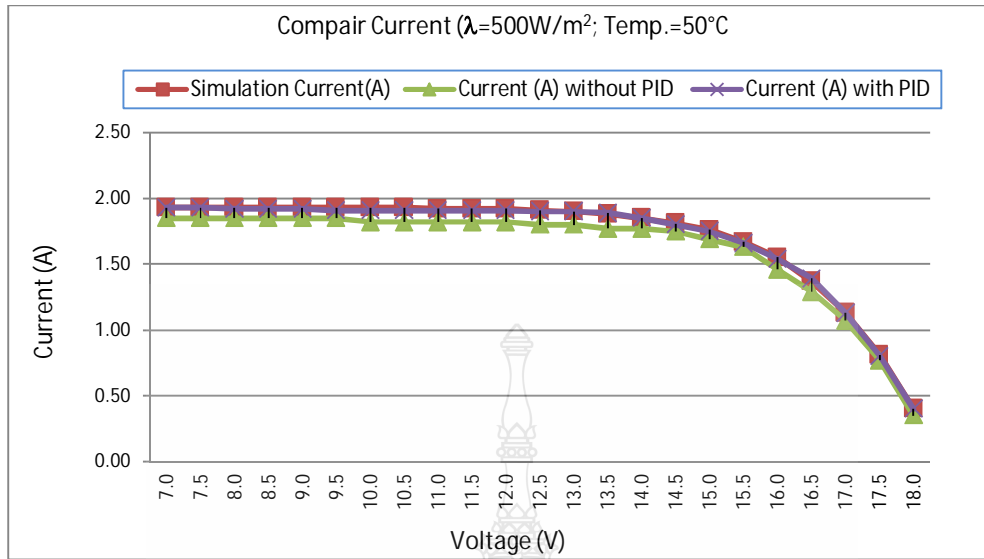
การทดลองในทางปฏิบัติที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี พบว่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่า 26.23W เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 14.99V กระแสไฟฟ้า 1.75A ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองดังนี้เทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่จำลองของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.37% ของแรงดันไฟฟ้า 0.07% และของกระแสไฟฟ้า 0.57%

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันทีที่ $\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$

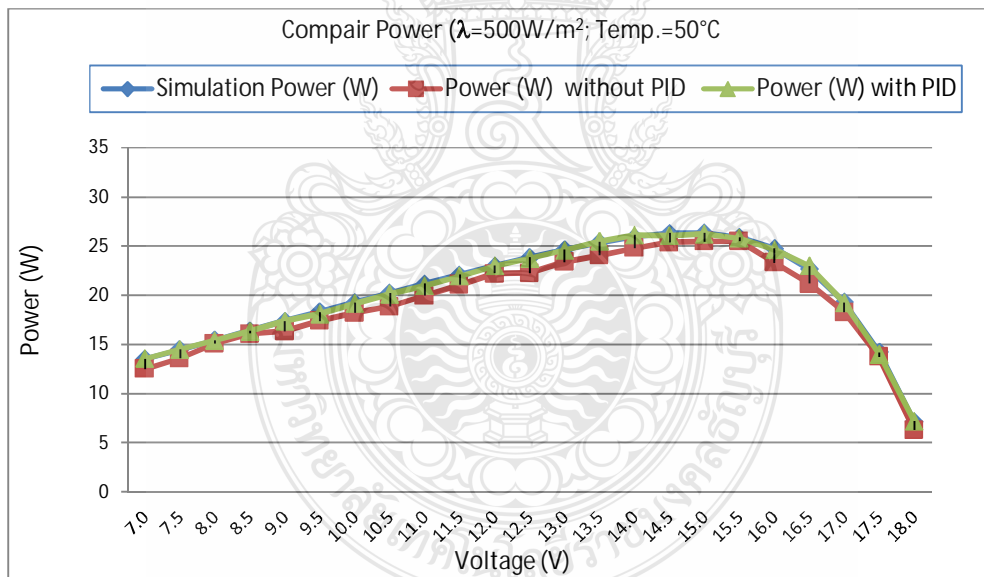
ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
7.0	1.93	13.5	6.76	1.85	12.51	7.02	1.93	13.55	-3.43	-4.15	-7.36	0.29	0.00	0.36
7.5	1.93	14.47	7.33	1.85	13.56	7.51	1.93	14.49	-2.27	-4.15	-6.29	0.13	0.00	0.17
8.0	1.93	15.43	8.14	1.85	15.06	8.02	1.92	15.40	1.75	-4.15	-2.40	0.25	-0.52	-0.20
8.5	1.93	16.4	8.70	1.85	16.10	8.50	1.92	16.32	2.35	-4.15	-1.86	0.00	-0.52	-0.49
9.0	1.93	17.36	8.82	1.85	16.32	9.04	1.92	17.36	-2.00	-4.15	-6.01	0.44	-0.52	-0.02
9.5	1.93	18.32	9.41	1.85	17.41	9.48	1.91	18.11	-0.95	-4.15	-4.98	-0.21	-1.04	-1.16
10.0	1.93	19.27	10.01	1.82	18.22	10.03	1.91	19.16	0.10	-5.70	-5.46	0.30	-1.04	-0.58
10.5	1.93	20.22	10.35	1.82	18.84	10.53	1.91	20.11	-1.43	-5.70	-6.84	0.29	-1.04	-0.53
11.0	1.92	21.15	10.96	1.82	19.95	10.98	1.91	20.97	-0.36	-5.21	-5.69	-0.18	-0.52	-0.84
11.5	1.92	22.08	11.57	1.82	21.06	11.48	1.91	21.93	0.61	-5.21	-4.63	-0.17	-0.52	-0.69
12.0	1.92	22.98	12.19	1.82	22.19	12.02	1.91	22.96	1.58	-5.21	-3.46	0.17	-0.52	-0.09
12.5	1.91	23.84	12.37	1.80	22.27	12.48	1.90	23.71	-1.04	-5.76	-6.60	-0.16	-0.52	-0.54

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบทันเวลาที่ $\lambda=500\text{W/m}^2$, $T=50^\circ\text{C}$ (ต่อ)

ค่าจากการแบบจำลอง (Simulation)			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ ไม่มีการควบคุม			ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ มี พี ไอ ดี			ความคลาดเคลื่อน (Error) ไม่มีการควบคุม			ความคลาดเคลื่อน (Error) แบบมี พี ไอ ดี		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(%)	I(%)	P(%)	V(%)	I(%)	P(%)
13.0	1.90	24.65	12.99	1.80	23.38	12.94	1.90	24.59	-0.08	-5.26	-5.14	-0.46	0.00	-0.26
13.5	1.88	25.35	13.59	1.77	24.05	13.47	1.89	25.46	0.67	-5.85	-5.11	-0.22	0.53	0.43
14.0	1.85	25.93	14.01	1.77	24.80	14.11	1.85	26.10	0.07	-4.32	-4.37	0.79	0.00	0.67
14.5	1.81	26.29	14.51	1.75	25.39	14.47	1.80	26.05	0.07	-3.31	-3.41	-0.21	-0.55	-0.93
<u>15.0</u>	<u>1.76</u>	<u>26.33</u>	15.07	1.69	25.47	<u>14.99</u>	<u>1.75</u>	<u>26.23</u>	0.47	-3.98	-3.27	-0.07	-0.57	-0.37
15.5	1.67	25.89	<u>15.64</u>	<u>1.63</u>	<u>25.49</u>	15.53	1.66	25.78	0.90	-2.40	-1.53	0.19	-0.60	-0.43
16.0	1.55	24.77	15.98	1.46	23.33	16.01	1.54	24.66	-0.12	-5.81	-5.81	0.06	-0.65	-0.46
16.5	1.37	22.67	16.39	1.29	21.14	16.52	1.39	22.96	-0.67	-5.84	-6.74	0.12	1.46	1.29
17.0	1.13	19.28	17.08	1.07	18.28	17.02	1.13	19.23	0.47	-5.31	-5.21	0.12	0.00	-0.25
17.5	0.81	14.22	17.81	0.77	13.71	17.49	0.80	13.99	1.77	-4.94	-3.56	-0.06	-1.23	-1.60
18.0	0.40	7.13	18.00	0.35	6.30	18.03	0.40	7.21	0.00	-12.50	-11.64	0.17	0.00	1.15



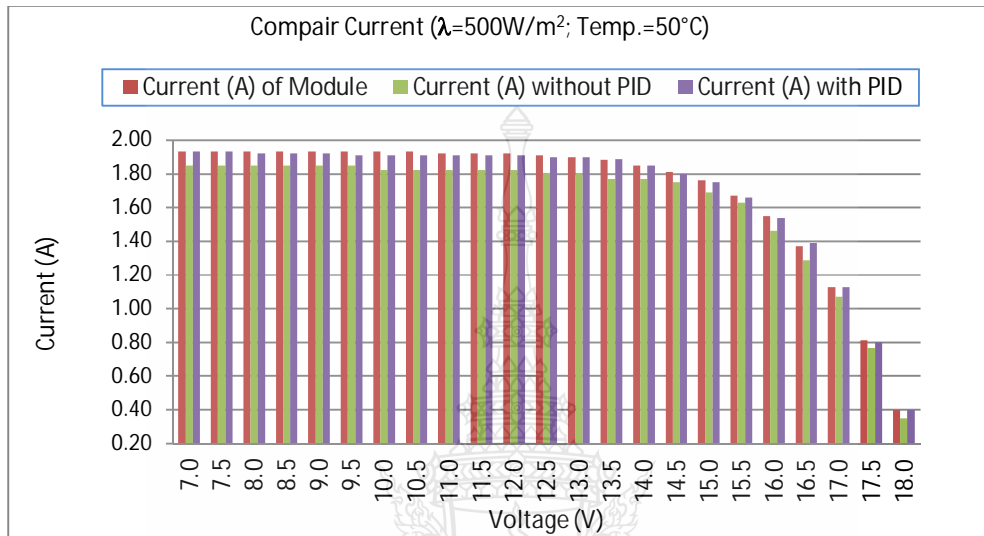
รูปที่ 4.25 กราฟ I-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 50°C)



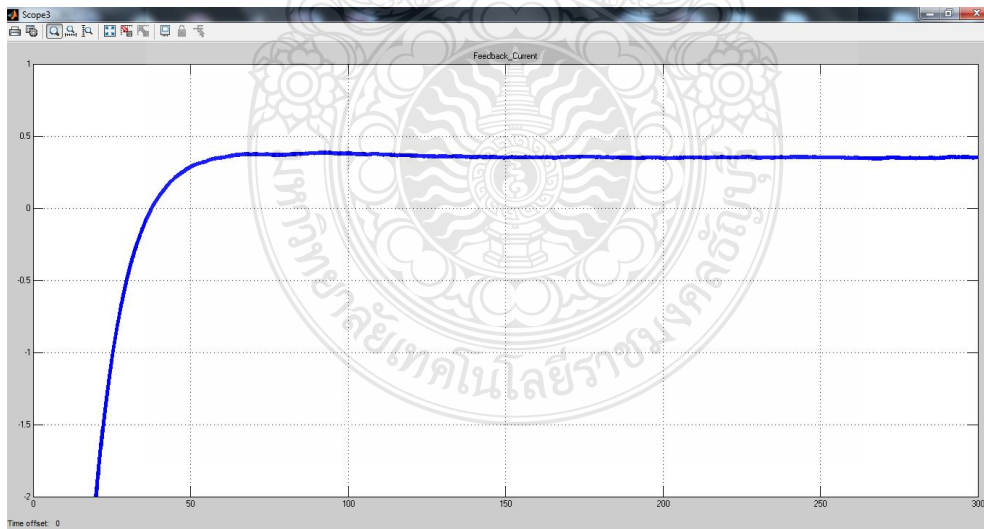
รูปที่ 4.26 กราฟ P-V Curve ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง (500W/m^2 , 50°C)

จากตารางที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำลองและค่าที่ทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 7V - 18V ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าจากผลของแบบจำลอง (Simulation) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบควบคุมการป้อนกลับ และมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแส

แบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 4.25 ส่วนรูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ กำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เส้นสีแดง สีเขียว และสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-กำลังไฟฟ้า ของจากการจำลอง กระแสจากการทดลองแบบไม่มีการควบคุม และ มีการควบคุมการป้อนกลับกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 กราฟผลต่างของกระแสระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง ($500\text{W}/\text{m}^2$, 50°C)



รูปที่ 4.28 สัญญาณที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันแบบ พี ไอ ดี

รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าของการ Simulation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากระแสที่ไม่มีมีระบบควบคุมการป้อนกลับ และที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี และรูปที่ 4.28 เป็นตัวอย่างของการแสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าออกจากวงจรตอนระดับแรงดันแบบมีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกแบบ พี ไอ ดี 0.4A อันเกิดจากการทดลองที่ 45 โอคัม ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C

สรุปในบทที่ 4 เป็นการทดลองและบันทึกผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งหมดสี่การทดลองด้วยกันคือ

- 1) ที่ความเข้มแสง $250\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 25°C
- 2) ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 25°C
- 3) ที่ความเข้มแสง $250\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C
- 4) ที่ความเข้มแสง $500\text{W}/\text{m}^2$ อุณหภูมิ 50°C

ซึ่งทั้งในการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วยเปรียบเทียบกระแสการจ่ายภาระโหลดตั้งแต่ 3-61 โอคัม ที่ไม่มีการควบคุมและมีการควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าแบบ พี ไอ ดี และผลของทั้งหมดสรุปอยู่ในบทที่ 5

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมและการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นค่าความเข้มแสง (Solar Irradiance) อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Cell Temperature), Ideal Factor, ค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด (Reverse Saturation), กระแสไดโอด (Diode Current), ความต้านทานอนุกรม (Series Resistance), ต้านทานขนาน (Shunt Resistance) โดยการนำสมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มาสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการเขียนในรูปแบบของ m file โปรแกรม MATLAB/Simulink ใช้สำหรับศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว จากการทดลองในบทที่ 4 ทำให้มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆข้างต้น มากยิ่งขึ้น ส่วนที่สอง สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วงจรทอนระดับแรงดันทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้สร้างไว้ในส่วนแรกด้วยการเชื่อมต่อผ่านทางการ์ดอินเทอร์เฟส (STM32F4 controller) ศึกษาทั้งชนิดที่ไม่มีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด และชนิดมีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดแบบ พี ไอ ดี ซึ่งผลจากการทดลองที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ พี ไอ ดี นั้น พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าจากระบบที่มีระบบการควบคุมการป้อนกลับกระแส มีค่าเข้าใกล้เคียงกับค่าจากผู้ผลิตตลอดช่วงของการทดลอง ทำให้ระบบการจ่ายโหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพโดยรวมใกล้เคียงกับค่าจากผู้ผลิต ทั้งยังทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดมีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเกณฑ์ดี จึงสรุปผลของการวิจัยจากทั้งสองส่วนข้างต้น ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่า Ideal Factor (N) ที่มากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น ค่า Reverse Saturation Current of Diode (I_s) ที่มากขึ้นทำให้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลง นั่นคือค่าผลของไดโอด (N, I_s) มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่า Series

Resistance (R_s) ที่มากขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมลดลงและค่า Shunt Resistance (R_{sh}) ที่น้อยลงก็ทำให้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลง ด้วย ซึ่งค่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่ดี ต้องทำให้ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นคือกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับกำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเข้าใกล้เคียง 1 หรือสามารถทำงานได้ 100%

สำหรับความเข้มของแสงอาทิตย์ Solar Irradiance (λ) จะเป็นตัวกำหนดกระแสของโซลาร์เซลล์ถ้าความเข้มแสงมาก กระแสไฟฟ้าขาออกของเซลล์ก็จะมากด้วย ส่วนค่าอุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Cell Temperature) จะเป็นผลกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ โดยแรงดันจะแปรผกผันกับอุณหภูมิกล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิที่รอยต่อสูงขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง

5.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปฏิบัติชนิดไม่มีการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกและมีการควบคุมการป้อนกลับป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออก แบบ พี ไอ ดี

ระบบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัญญาณจริงนั้นได้เลือกใช้วงจรภาคกำลังเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ที่ความถี่สวิตซ์ 5.5 kHz ส่วนภาคควบคุมนั้นจะเป็นการควบคุมการมอดูเลตความกว้างพัลส์ให้ได้เหมาะสมกับกระแสไฟฟ้าขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้การปรับค่าที่โหลดตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ด้วยหลักการตรวจจับกระแสขาออกแล้วส่งไปยังอินเทอร์เฟซการ์ดเพื่อคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และ STM32F4 คอลโทลเลอร์ ซึ่งระบบการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัญญาณจริงที่ไม่มีการควบคุมการ ค่ากระแสโหลดที่ได้จากการทดลองจะมีค่ากระแสไฟฟ้าคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองที่สร้างจากโปรแกรมก่อนข้างสูง ดังปรากฏในตารางที่ 5.1 ส่วนที่มีการควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ตัวควบคุมจะตรวจสอบค่ากระแสที่รับเข้าแล้วชดเชยค่ากระแส จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากระแสกับแบบจำลอง ตัวควบคุมนี้จะปรับค่ากระแสให้ใกล้เคียงกับค่าที่จุดอ้างอิง (set point) ของแบบจำลอง แล้วส่งค่ากระแสที่ปรับแล้วไปให้กับวงจรทอนแรงดันเพื่อทำการจ่ายให้กับโหลดต่อไป จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกกับกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันที่ผ่านการควบคุมแบบ พี ไอ ดี แล้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ จากการทดสอบ อ่านและบันทึกค่ากระแสและแรงดัน ด้วยบอร์ดประมวลผล Converter N2 เป็นตัวช่วย ซึ่งบอร์ดนี้ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเชื่อมโยงการรับส่งสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนของวงจรทอนแรงดันกับคอมพิวเตอร์ แล้วแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงเสมือนกับการแสดงผลจากออสซิลโลสโคป ซึ่งค่าที่ได้เป็นแบบทันทีเวลา (real time) สามารถใช้แทนออสซิลโลสโคปได้ ซึ่งผล

การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบ พี ไอ ดี ในกรณีแรกเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และอุณหภูมิ เป็นดังตารางที่ 5.1 จากผลการทดลองและนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 4 พบว่าผลการทดลองและการจำลอง มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และส่วนของการ ควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าขาออกของโพลด มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ซึ่งอยู่ผลอยู่ในเกณฑ์ดี มาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ใช้ทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง โดยสามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาและพัฒนารวมทั้งส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทนต่อไป

ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจากผลการทดลอง

ค่าความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ค่าความคลาดเคลื่อนชนิด ไม่มีการควบคุม			*ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดมีการ ควบคุมแบบ พี ไอ ดี ใน Current Control Loop		
		Voltage (%)	Current (%)	Power (%)	Voltage (%)	Current (%)	Power (%)
250	25	0.32	-3.93	-3.62	0.11	-0.83	-0.72
250	50	0.51	-5.57	-5.09	-0.21	-0.73	-0.64
500	25	0.06	-6.77	-5.88	0.06	-0.72	-0.65
500	50	-0.07	-5.09	-5.10	0.07	-0.36	-0.23

* Measurement accuracy for current up to 5A at Range 5kHz up to 20kHz \pm 3.5% refer to CTL Decision sheet no. DSH254E

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง และวิธีการป้อนกลับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ และ/หรืออุณหภูมิ ซึ่งพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง แต่จากผลโดยรวมยังพบค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระบบ หากจะศึกษาและพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้ อาจเพิ่มวิธีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมการป้อนกลับแบบอื่นๆ เพื่อให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโพลดได้เต็มร้อยเปอร์เซ็นต์ หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ราคาประหยัดแต่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการลดต้นทุน

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, รายงาน ไฟฟ้าของประเทศ ไทย 2557
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ความเข้มแสง และ ศักยภาพเชิง พลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศ อ้างอิงจาก:
<http://www.dede.go.th/dede/index.php>
- [3] M.C. Di Piazza, M. Luna, G. Petrone, G. Spagnuolo, "About the Identification of the Single-Diode Model Parameters of High-Fill-Factor Photovoltaic Modules" IEEE, 2015, pp.85-91
- [4] A. Bilsalam J. Haema, I. Boonyaroonate and V. Chunkag, "Simulation and Study of Photovoltaic Cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load" 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea, pp.3033-3036
- [5] บุญยัง ปลั่งกลาง, "Photovoltaic Systems" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [6] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri, "Matlab/simulink based of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification" INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 3, 2010, pp.487-500
- [7] Pilin Junsangsri and Fabrizio Lombardi. 2010 "Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model" 25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp.240-248
- [8] Wanchai Subsingha. 2008, Power Electronic (Academic book), Thailand. RMUTT Printing
- [9] ชานุกฤทธิ์ ชาราสันติสุข, MATLAB/Simulink for real-time control system with DS1104 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [10] จิระพล ศรีเสริฐผล, "Controller Design" อ้างอิง :
eng.sut.ac.th/me/box/2_55/425440/Controller_Design2_55.pdf
- [11] Yuan. Li1, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, and Dichen Liu1 "A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator" IEEE, 2009, pp.899-903

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Nilton E. M. Moçambique, Ricardo Q. Machado, Vilma A. Oliveira, "A Fuzzy PD-PI Control Strategy to Track the Voltage References of Photovoltaic Arrays", 2011, 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) Santiago, Chile, December 19-21, 2011, pp.1162-1167
- [13] D. Impreeda and W. Subsingha, "Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module Under the Single Diode Model", 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012, pp. 118-122
- [14] Zhang Jike, Wang Shengtie, "Design and Simulation of Digital PV Simulator Based on Push Pull Forward Converter" 2012, IEEE
- [15] Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho, "A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method" 2013, International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, 2013, Busan, Korea, pp.2128- 2131
- [16] Panchal Mandar Rajubhai, Dileep Kumar, "Modeling and Simulation of Photovoltaic Array with PMDC Motor in MATLAB/SIMULINK" International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 4 Issue 01, January-2015, pp.498-501
- [17] M. Abdulkadir, A. S. Samosir and A. H. M. Yatim, "MODELING AND SIMULATION BASED APPROACH OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN SIMULINK MODEL" VOL. 7, NO. 5, MAY 2012, ISSN 1819-6608, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, ©2006-2012 Asian Research Publishing Network (ARPN), pp.616-623
- [18] อ้างอิง : www.solar-greenpower.com
- [19] อ้างอิง : www.cleantechinvestor.com
- [20] อ้างอิง : <http://etap.com/renewable-energy/photovoltaic-101.htm>
- [21] อ้างอิง : <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
- [23] Ho Lee Min-Jung Lee, Se-Na Lee, Hwa-Chun Lee, Hae-Kon Nam, Sung-Jun Parkn "Development of Photovoltaic Simulator based on DC-DC Converter", INTELEC 09 M 31st International Telecommunications Energy Conference, 18-22 October 2009, Incheon, Korea





ภาคผนวก ก

การจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink



ก.1 ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SolarEX รุ่น MSX-60

ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ SolarEX รุ่น msx60

```
function Ia = msx60(Va,Suns,TaC)
k      = 1.38e-23;
q      = 1.60e-19;
A      = 1.2;
Vg     = 1.12;
Ns     = 36;
T1     = 273 + 25;
Voc_T1 = 21.06 /Ns;
Isc_T1 = 3.80;
T2     = 273 + 75;
Voc_T2 = 17.05 /Ns;
Isc_T2 = 3.92;
TaK    = 273 + TaC;
TrK    = 273 + 25;

Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;
a      = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1 * 1/(T2 - T1);
Iph    = Iph_T1 * (1 + a*(TaK - T1));
Vt_T1  = k * T1 / q;
Ir_T1  = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2  = Isc_T2 / (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b      = Vg * q/(A*k);
Ir     = Ir_T1 * (TaK/T1).^(3/A) .* exp(-b.*(1/TaK - 1/T1));
X2v    = Ir_T1/(A*Vt_T1) * exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
```

```

dVdl_Voc = - 1.15/Ns / 2;
Rs      = - dVdl_Voc - 1/X2v;
Vt-Ta  = A * 1.38e-23 * TaK / 1.60e-19;
f(Ia)   = Iph - Ia - Ir.* ( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1) = 0;
Vc      = Va/Ns;
Ia      = zeros(size(Vc));
for j   = 1:5;
Ia      = Ia - (Iph - Ia - Ir.* ( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1)) / (-1 - (Ir.*
exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) - 1)).*Rs./Vt-Ta);
end

```



ก.2 คำอธิบายรายละเอียด m file สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SOLAREX รุ่น msx60 และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมเดิม (BP Solar's รุ่น SX60 และ SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12)

ฟังก์ชันจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ SOLAREX รุ่น msx60 ใช้งานฟังก์ชันโดยการกำหนดค่าแรงดันอาร์เรย์, ความเข้มของแสง และอุณหภูมิ จะได้ค่ากระแสออกมา เช่น ค่าแรงดันอาร์เรย์เท่ากับ 5 V ความเข้มของแสงเท่ากับ 0.8 Sun และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จะได้เป็น $I_a = \text{msx60}(5,0.8,30)$

ข้อสังเกตฟังก์ชันนี้จะสามารถกำหนดค่าความเข้มของแสงได้ไม่เกิน 1 Sun (1000 W/m²)

function $I_a = \text{msx60}(V_a, \text{Suns}, T_aC)$

- I_a คือ กระแสอาร์เรย์ (array current)
- V_a คือ แรงดันอาร์เรย์ (array voltage)
- Suns คือ ความเข้มของแสง (num of Suns: 1 Sun = 1000 W/m²)
- T_aC คือ อุณหภูมิใช้งาน หน่วย องศาเซลเซียส

ค่าคงที่พื้นฐาน

k ค่าคงที่ Boltzman's = $1.38e^{-23}$

q ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน = $1.60e^{-19}$

% จากค่าคงที่ต่อไปนี้ จะใช้ในการคำนวณโดยการตั้งสมมุติฐานที่ 1000 W/m²

- | | |
|--|--|
| <p>$A = 1.2;$
เป็น</p> <p>$V_g = 1.12;$
ชนิด</p> <p>$N_s = 36;$</p> | <p>% ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของ ไดโอด กำหนดให้เป็น 2 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด crystalline และถ้าเป็น amorphous ให้กำหนดน้อยกว่า 2</p> <p>% ค่า band gap voltage, กำหนดให้เป็น 1.12 V เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็น crystalline, และกำหนดให้เป็น 1.75 V เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิด amorphous</p> <p>% จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในอาร์เรย์ (number of series connected cells (diodes))</p> |
|--|--|

$T1 = 273 + 25;$ % ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการคำนวณ
 $Voc_T1 = 21.1 /Ns;$ % ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด (open circuit voltage per cell at temperature T1)
 $Isc_T1 = 3.80;$ % ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด (short circuit current per cell at temp T1)
 $T2 = 273 + 75;$ % ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ
 $Voc_T2 = 17.05 /Ns;$ % ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด (open circuit voltage per cell at temperature T2)
 $Isc_T2 = 3.92;$ % ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด (short circuit current per cell at temp T2)
 $TaK = 273 + TaC;$ % อุณหภูมิใช้งานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (array working temp)
 $TrK = 273 + 25;$ % อุณหภูมิอ้างอิง (reference temp)

% เมื่อแรงดันอาร์เรย์ (Va) มีค่าเป็น 0 ค่ากระแสที่ได้จากแสง (Iph_T1) จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด

% ค่าคงที่ a คืออัตราส่วนระหว่างกระแสขณะลัดวงจรและค่าอุณหภูมิ

$Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;$ %
 $a = (Isc_T2 - Isc_T1) / Isc_T1 * 1 / (T2 - T1);$ %
 $Iph = Iph_T1 * (1 + a * (TaK - T1));$ %
 $Vt_T1 = k * T1 / q;$ % ค่าคงที่ Boltzman's คูณด้วย ค่าอุณหภูมิต่ำสุด แล้วหารด้วย ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน

$Ir_T1 = Isc_T1 / (\exp(Voc_T1 / (A * Vt_T1)) - 1);$
 $Ir_T2 = Isc_T2 / (\exp(Voc_T2 / (A * Vt_T1)) - 1);$
 $b = Vg * q / (A * k);$
 $Ir = Ir_T1 * (TaK / T1)^{(3/A)} * \exp(-b * (1 / TaK - 1 / T1));$
 $X2v = Ir_T1 / (A * Vt_T1) * \exp^{(Voc_T1 / (A * Vt_T1))};$
 $dVdl_Voc = - 1.15 / Ns / 2;$ % ค่า dV/dI ที่ ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรต่อเซลล์

% ค่าที่ได้จากกราฟคุณสมบัติของผู้ผลิต%

$R_s = -dV/dI_{Voc} - 1/X_{2v};$

% หาค่าความต้านทานอนุกรมต่อเซลล์(series resistance per cell)

$V_t T_a = A * 1.38e^{-23} * T_a K / 1.60e^{-19};$

% หาค่าแรงดันที่ขั้วที่อุณหภูมิใช้งาน = ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของไดโอด * ค่าคงที่ Boltzman's * อุณหภูมิใช้งานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ / ค่าคงที่ประจุอิเล็กตรอน

% กำหนดค่า I_a จากฟังก์ชัน $f(I_a)$ นั่นคือ $f(I_a) = I_{ph} - I_a - I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1) = 0;$

% จากนั้นหาค่าด้วยวิธี Newton's method จาก $I_{a2} = I_{a1} - f(I_{a1})/f'(I_{a1})$

$V_c = V_a / N_s;$

$I_a = \text{zeros}(\text{size}(V_c));$

for j=1:5;

$I_a = I_a - (I_{ph} - I_a - I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1)) / (-1 - (I_r * (\exp((V_c + I_a * R_s) / V_t T_a) - 1)) * R_s / V_t T_a);$

end

ในกรณีที่ต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นอื่นนอกเหนือจากที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้จะยกตัวอย่างในการนำมาเปรียบเทียบหากเปลี่ยนแปลงเซลล์ ซึ่งที่จะนำมาแสดงการเปรียบเทียบเพิ่มเติมอีกจำนวนสองรุ่นคือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท BP Solar's รุ่น SX60 เซลล์เป็น Silicon ที่มีเซลล์อนุกรมกัน 36 เซลล์ ซึ่งมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นดังนี้

คุณลักษณะทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท BP Solar's รุ่น SX60

<i>Electrical Characteristics</i>	<i>BP Solar's model SX 60</i>
<i>Maximum power (Pmax)</i>	<i>60W</i>
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	<i>16.8V</i>
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	<i>3.56A</i>
<i>Guaranteed minimum Pmax</i>	<i>55W</i>
<i>Short-circuit current (Isc)</i>	<i>3.87A</i>
<i>Open-circuit voltage (Voc)</i>	<i>21.0V</i>
<i>Temperature coefficient of Isc</i>	<i>(0.065±0.015)%/°C</i>
<i>Temperature coefficient of Voc</i>	<i>-(80±10)mV/°C</i>
<i>Temperature coefficient of power</i>	<i>-(0.5±0.05)%/°C</i>
<i>NOCT³</i>	<i>47±2°C</i>

2. เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12 เซลล์เป็น Silicon Monocrystalline ที่มีเซลล์อนุกรมกัน 36 เซลล์ ซึ่งมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นดังนี้

คุณลักษณะทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12

<i>Electrical Characteristics</i>	<i>Sunstore model 60/12</i>
<i>Maximum power (Pmax)</i>	60W
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	17.64V
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	3.40A
<i>Guaranteed minimum Pmax</i>	58.2W
<i>Short-circuit current (Isc)</i>	3.60A
<i>Open-circuit voltage (Voc)</i>	21.16V
<i>Temperature coefficient of Isc</i>	0.05A%/°C
<i>Temperature coefficient of Voc</i>	- 0.35V%/°C
<i>Temperature coefficient of power</i>	- 0.45W%/°C
<i>NOCT</i>	46±2°C

จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.7 ในบทที่ 2 ที่นำไปเขียนสมการคำนวณเป็น m file ใน MatLab/Simulink เพื่อพล็อตกราฟให้เป็นไปตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรุ่นนั้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากโรงงานผู้ผลิตมีความแตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำค่า Specification ที่ได้ไปแทนลงสมการ m file ใน MatLab/Simulink ซึ่งตัวแปลที่จะทำให้มีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของเซลล์เปลี่ยนแปลง เป็นดังต่อไปนี้

- A : ค่าแฟกเตอร์คุณภาพของไดโอด กำหนดให้เป็น 2 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิด crystalline และถ้าเป็น amorphous ให้กำหนดน้อยกว่า 2
- Voc_T1 : ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด
- Isc_T1 : ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด
- Voc_T2 : ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด
- Isc_T2 : ค่ากระแสขณะลัดวงจรที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด
- Rs : หาค่าความต้านทานอนุกรมต่อเซลล์
- T1 , T2 : ค่าอุณหภูมิต่ำสุด, สูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

Specifications of Solar cell (1kW/m², 25°C)

<i>Parameters</i>	<i>SolarEx MSX60</i>	<i>BP Solar's model SX 60</i>	<i>Sunstore model 60/12</i>
<i>Typical peak power (P_m)</i>	<i>60 W</i>	<i>60 W</i>	<i>60 W</i>
<i>Voltage at peak power (V_{mp})</i>	<i>17.1 V</i>	<i>16.8 V</i>	<i>17.64 V</i>
<i>Current at peak power (I_{mp})</i>	<i>3.5 A</i>	<i>3.56 A</i>	<i>3.40 A</i>
<i>Short-circuit current (I_{sc})</i>	<i>3.8 A</i>	<i>3.87 A</i>	<i>3.60 A</i>
<i>Open-circuit voltage (V_{oc})</i>	<i>21.1 V</i>	<i>21.0 V</i>	<i>21.16 V</i>
<i>Temperature coefficient of open-circuit voltage (β)</i>	<i>-73mV/°C</i>	<i>-(80±10)mV/°C</i>	<i>-0.35V%/°C</i>
<i>Temperature coefficient of short-circuit current (α)</i>	<i>3mA/°C</i>	<i>(0.065±0.015)%/°C</i>	<i>0.05A%/°C</i>
<i>Approximate effect of temperature on power</i>	<i>-0.38W/°C</i>	<i>-(0.5±0.05)%/°C</i>	<i>-0.45W%/°C</i>



ภาคผนวก ข

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และ INSTRUMENT ACCURACY LIMITS



ข.1 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarex-MSX-60

MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules



The MSX-64 and -60 are among the most powerful of Solarex's Megamodule™ series, a product line which is the culmination of nearly three decades of extensive research in polycrystalline silicon photovoltaics. With over 3 amperes of current at peak power, these modules offer the most cost-effective package in the industry, and charge batteries efficiently in virtually any climate.

These modules may be used in single-module arrays or deployed in multiple-module arrays, wired in series/parallel combinations as required to meet current and voltage requirements. They are engineered under Solarex's IntegraSystem™ system integration concept, which ensures full compatibility with other Solarex subsystems and components (support hardware, regulators, etc.) and easy system assembly. As single-module arrays, they may be mounted on a variety of surfaces using optional kits or by means of user-fabricated support hardware. Solarex also offers hardware for supporting multiple-module arrays.

These modules are well-suited for virtually all applications where photovoltaics are a feasible energy source, including telecommunications systems, pumping and irrigation, cathodic protection, remote villages and clinics, and aids to navigation.

Individually Tested, Labeled and Warranted

As part of the final inspection procedure, every MSX module is tested in a solar simulator and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions. Furthermore, the MSX-64 and -60 are covered by our industry-leading limited warranty, which guarantees:

- that no module will generate less than its guaranteed minimum P_{max} when purchased;
- at least 80% of the guaranteed minimum P_{max} for twenty years.

Contact Solarex's Marketing Department for full terms and limitations of this unparalleled warranty.

Reliable and Versatile

The Megamodule series has proved its reliability at thousands of installations in every climate on Earth. Among the features that contribute to its versatility:

Dual Voltage Capability

These modules consist of 36 polycrystalline silicon solar cells electrically configured as two series strings of 18 cells each. The strings terminate in the junction box on the module back. Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration in the field by moving leads in the junction box. This design also allows instal-

lation of bypass diodes on 18-cell strings, which can improve reliability and performance in systems with nominal voltage 24V and above.

High-Capacity Multifunction Junction Box

The size of the junction box (25 cubic inches, 411cc) and its six-terminal connection block allow most system array connections to be made right in the J-box. The box also can accommodate bypass or blocking diodes or a small regulator, which can save the expense and labor of additional boxes. The box is raintight (IP54 rated) and accepts 1/2" nominal or PG13.5 conduit or cable fittings. The standard terminals accept wire as large as AWG #10 (6mm²); an optional terminal block accepts wire up to AWG #4 (25mm²).

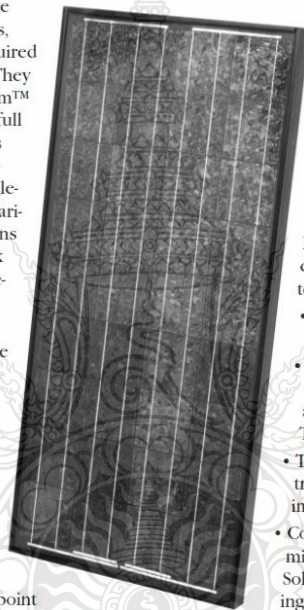
Proven Materials and Construction

Megamodule materials reflect Solarex's quarter-century of experience with solar modules and systems installed in virtually every climate on Earth.

- Polycrystalline silicon solar cells: efficient, attractive, stable.
- Modules are rugged and weatherproof: cell strings are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and tempered glass with a durable Tedlar backsheet.
- Tempered glass superstrate is highly light-transmissive (low iron content), stable, and impact-resistant.
- Corrosion-resistant, bronze-anodized extruded aluminum frame is strong, attractive, compatible with Solarex mounting hardware and most other mounting structures.

Options

- Blocking and bypass diodes
- Solarstate™ charge regulator
- Protective aluminum backplate



More than 20 years ago, Solarex made the first polycrystalline silicon solar cell, advancing photovoltaics beyond the first-generation monocrystalline technology developed for electronics. Developed specifically for photovoltaics, polycrystalline silicon is used in Solarex's Mega™ series to provide a wide range of attractive, efficient modules. They require substantially less energy to manufacture and generate substantially more energy per rated watt than other crystalline silicon modules.

Safety Approved

MSX-60 and -64 modules are listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Group C & D hazardous locations.



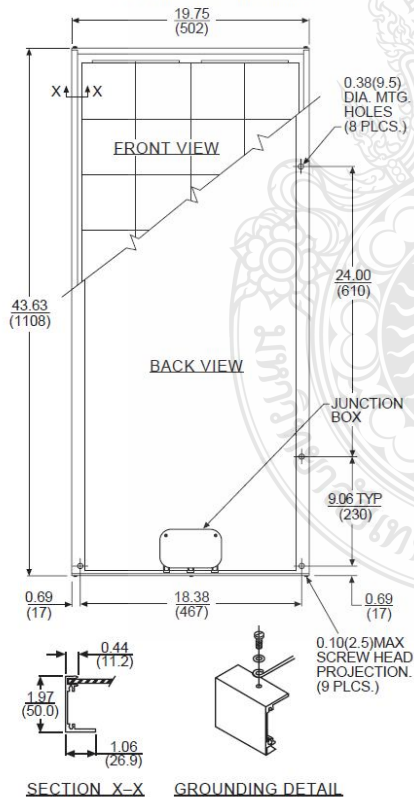
Quality Certified

These modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories to demanding specifications, and comply with IEC 1215, IEEE 1262 and CEC 503 test requirements, including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of one-inch (25mm) hail at terminal velocity;
- 2700 VDC frame/cell string isolation test;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- simulated wind loading of 125 mph (200 kph).

Mechanical Characteristics

Weight: 15.9 pounds (7.2 kg)
Dimensions: Dimensions in brackets are in millimeters
 Unbracketed dimensions are in inches
 Overall tolerances ±1/8" (3mm)



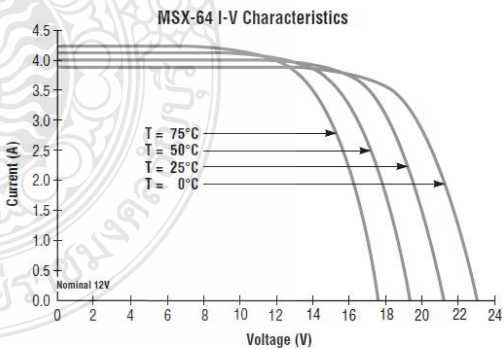
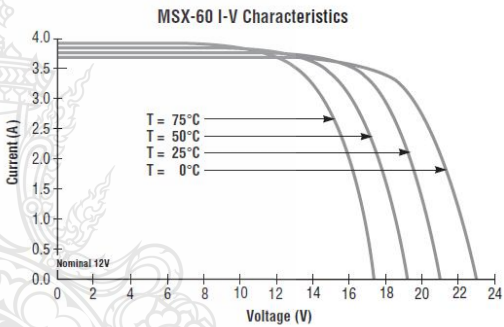
Typical Electrical Characteristics¹

	MSX-64	MSX-60
Maximum power (P _{max})	64W	60W
Voltage @ P _{max} (V _{mp})	17.5V	17.1V
Current @ P _{max} (I _{mp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P _{max}	62W	58W
Short-circuit current (I _{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....-(80±10)mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065±0.015)%/°C...	
Temperature coefficient of power	.....-(0.5±0.05)%/°C...	
NOCT ²	..... 47±2°C	

NOTES:
 (1) These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in a solar simulator at Standard Test Conditions (STC), which are:
 • illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;
 • cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).

Operating characteristics in sunlight may differ slightly. To determine the characteristics of modules in 6V configuration, divide the 12V voltage characteristics by 2 and multiply current characteristics by 2. Power values are unchanged.

(2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.



[Download MSX-60 I-V XLS](#)

[Download MSX-64 I-V XLS](#)

[Download CAD](#)

VARIABLES AFFECTING PERFORMANCE

The performance of typical MEGA SX-64 and -60 modules is described by the I-V curves and electrical characteristics table on the next page. Each module's actual, tested output characteristics are printed on its label.

The current and power output of photovoltaic modules are approximately proportional to illumination intensity. At a given intensity, a module's output current and operating voltage are determined by the characteristics of the load. If that load is a battery, the battery's internal impedance will dictate the module's operating voltage. An I-V curve is simply all of a module's possible operating points (voltage/current combinations) at a given cell temperature and light intensity. Increases in cell temperature increase current but decrease voltage.

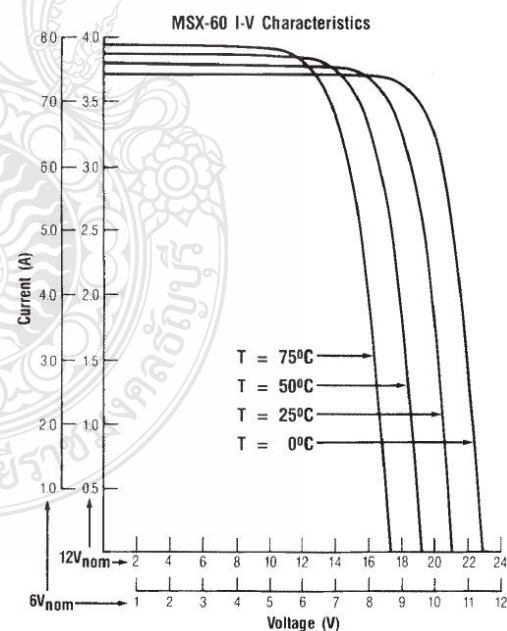
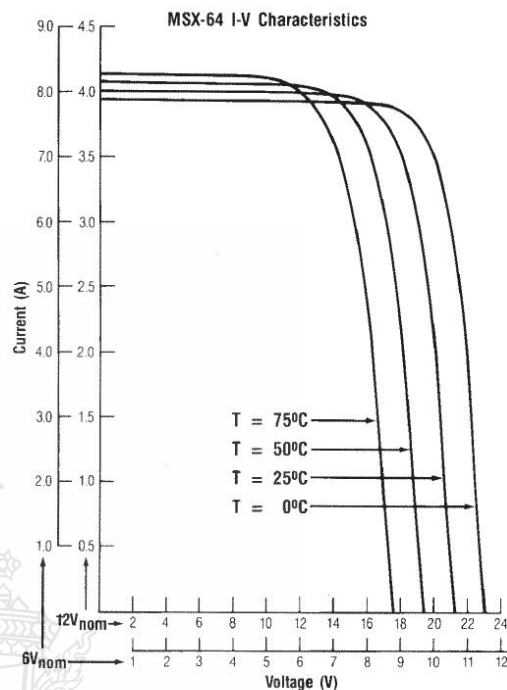
TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾

	12 VOLT CONFIGURATION ⁽²⁾	
	MSX-64	MSX-60
Typical peak power (P_p)	64W	60W
Voltage @ peak power (V_{pp})	17.5V	17.1V
Current @ peak power (I_{pp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum peak power	62W	58W
Short-circuit current (I_{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	.....$-(80\pm 10)$ mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current	.....(0.065 ± 0.015) %/°C....	
Approximate effect of temperature on power	.....$-(0.5\pm 0.05)$ %/°C....	
NOCT ⁽³⁾ 49°C.....	

Notes:

- (1) These data represent the performance of typical modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made at Standard Test Conditions (STC), which are:
 - Illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5
 - Cell temperature of 25°C or as otherwise specified (on curves).
- (2) Electrical characteristics of modules wired in the nominal 6V configuration may be found by using the 6V scales on the I-V curves. For more exact values, divide the 12V voltage characteristics in the table by 2 and multiply the 12V current characteristics by 2. Power values are unchanged.
- (3) Under nearly all climatic conditions, the solar cells in an operating module are hotter than the ambient temperature, a fact which must be considered when reading module data. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indication of this temperature rise, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and average wind speed of 1 m/s.

I-V CHARACTERISTICS

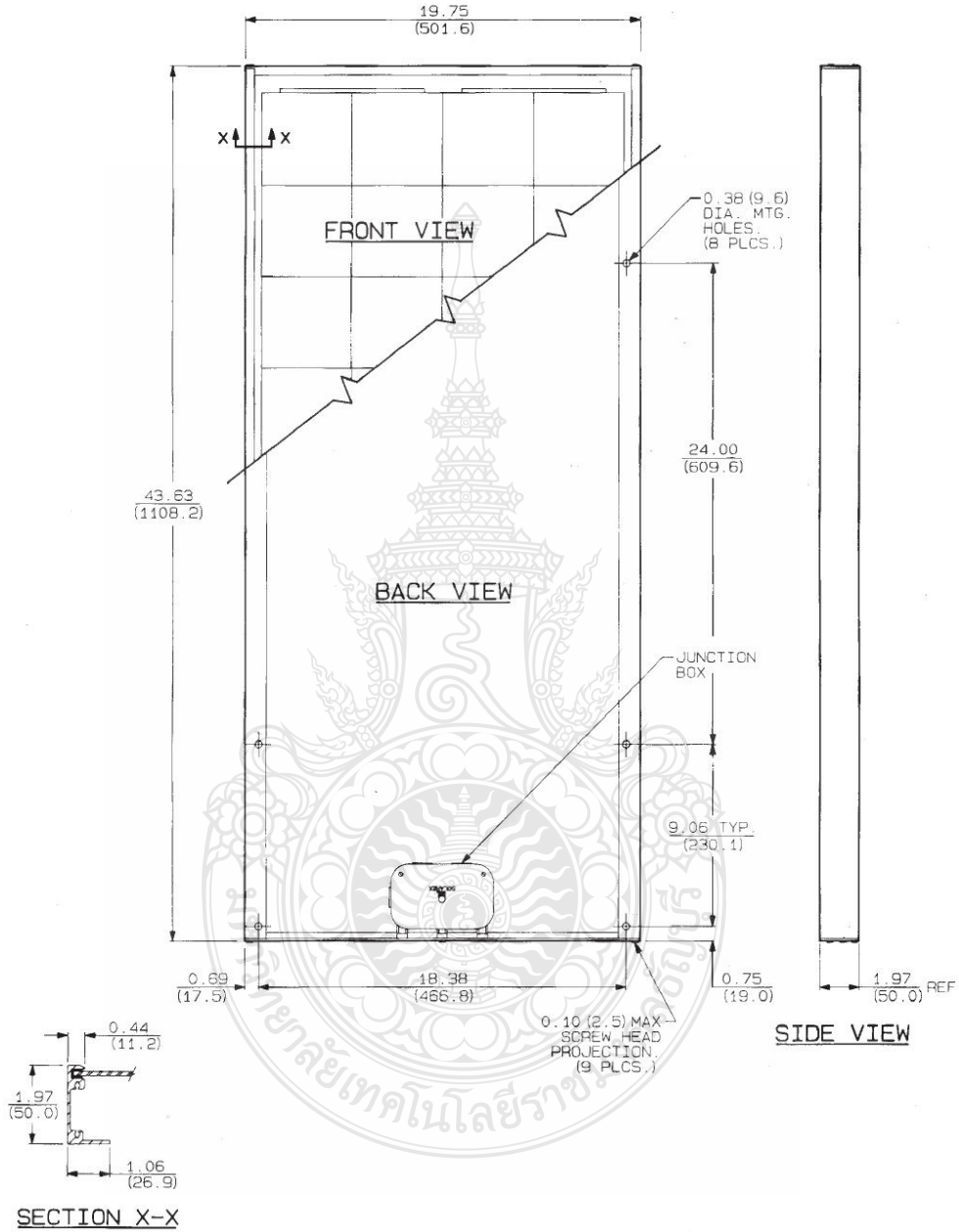


MECHANICAL CHARACTERISTICS

MEGA SX-64 and -60 are mechanically identical, differing only in electrical output.

Weight: 15.9 pounds (7.2 kg)

Dimensions: Dimensions in brackets are in millimeters
Unbracketed dimensions are in inches



ข.2 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BP Solar's รุ่น SX60



BP SX 60

60-Watt
Multicrystalline Photovoltaic Modules

BP Solar's SX series provides cost-effective photovoltaic power for general use, operating DC loads directly or, in an inverter-equipped system, AC loads. With 60 watts of nominal maximum power, the BP SX 60 is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its 36 series-connected cells charge batteries efficiently in virtually any climate.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of this module's construction and materials:

- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies;
- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass.



Clear Anodized Universal Frame

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

High-Capacity Versatile Junction Box

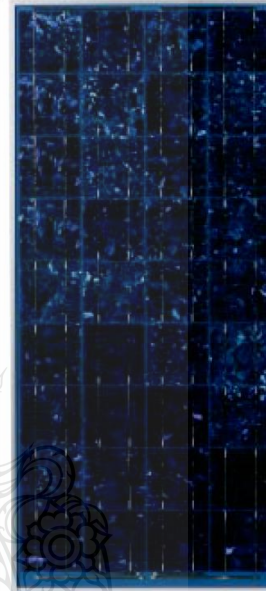
The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box. Options include:

- blocking and bypass diodes;

- oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
 - Solarstate™ charge regulator.
- Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TUV Rheinland as Class II equipment for use in systems with voltage up to 1000 VDC;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant with the requirements of IEC 61215, including:
 - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
 - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
 - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
 - a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
 - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).



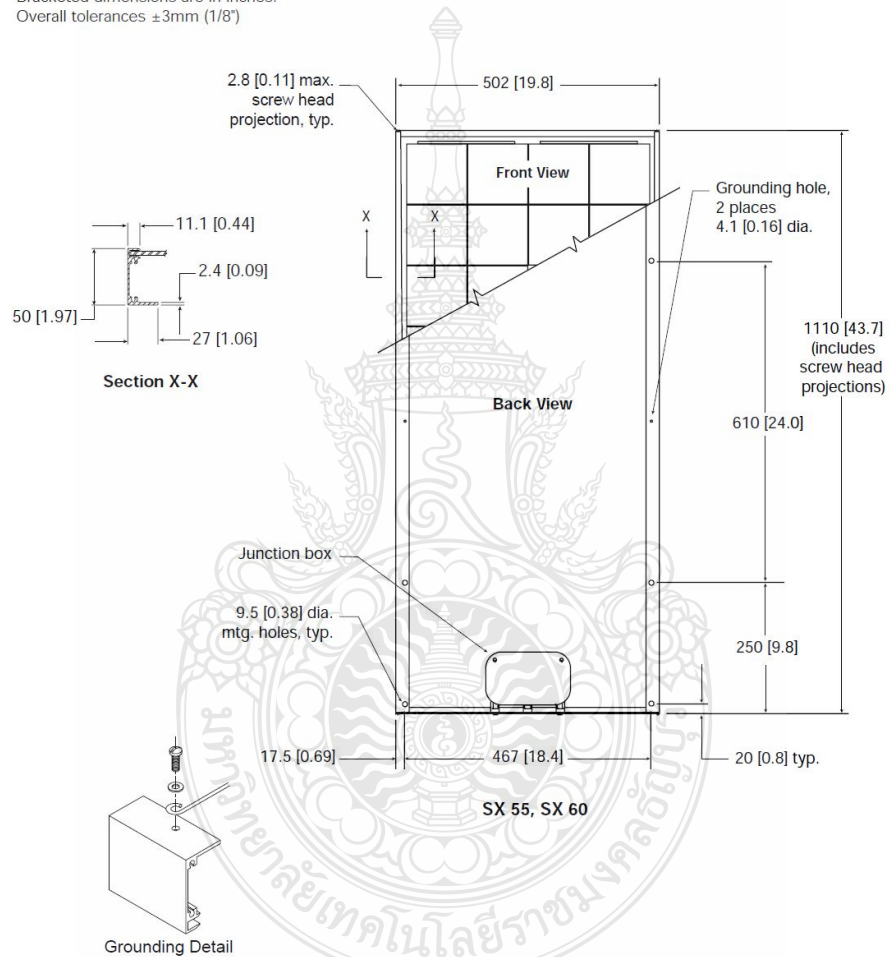
BP SX 60



Mechanical Characteristics

Weight
7.2 kg (15.9 pounds)

Dimensions
Unbracketed dimensions are in millimeters.
Bracketed dimensions are in inches.
Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ ($1/8"$)



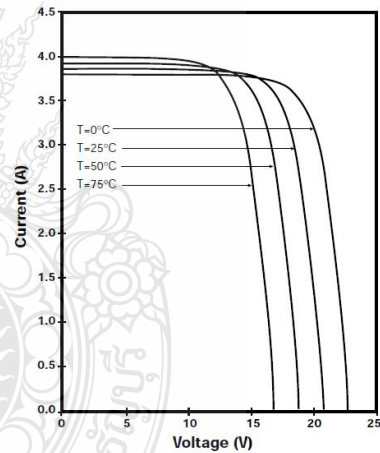
Electrical Characteristics¹

	BP SX 60	BP SX 55 ⁴
Maximum power (P_{max}) ²	60W	55W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	16.8V	16.5V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.33A
Guaranteed minimum P_{max}	55W	50W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.69A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.0V	20.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum series fuse rating	20A	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	

Notes

- These data represent the performance of typical modules in 12V configuration as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
 - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max} .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1m/s.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the SX 55 is assembled using cells of slightly lower power than the SX 60.

BP SX 60 I-V Curves



ข.3 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SUNSTORE รุ่น Sunstore 60/12



Sunstore Monocrystalline 12v 60w Solar Panel



MONO

Rigorous quality control to meet highest international factory manufacturing standards including MCS, CE and ISO

High performance under low light conditions (cloudy days, mornings and evenings)

High Cell efficiency of 17%

Tested to withstand snow loads of 200kg /sqm

Highly transparent low iron tempered glass with enhanced stiffness and impact resistance

Unique frame design with high mechanical strength for easy installation

Advanced encapsulation material with multiplayer sheet lamination to provide efficient protection from the severest environmental conditions

5 Years warranty of quality and workmanship
20 Years warranty of power output

Local UK technical support and warehousing with rapid response time.

Electrical Data @ STC	Sunstore 60/12	Temperature Ratings	
Peak Power Watts- P_{MAX} (WP)	60	Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	46°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)
Power Output Tolerance- P_{MAX} (%)	+/- 3%	Temperature Coefficient of P_{MP}	- 0.45%/°C
Maximum Power Voltage- V_{MAX} (V)	17.64	Temperature Coefficient of V_{OC}	- 0.35%/°C
Maximum Power Current- I_{MP} (A)	3.40	Temperature Coefficient of I_{SC}	0.05%/°C
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	21.16		
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	3.60		
Module Efficiency η_m (%)	12.3		

Values at Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C)

Mechanical Data	
Solar cells	Monocrystalline
Cells orientation	36 cells
Module dimension	899 x 537 x 35mm
Weight	5.8kg
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13inches)
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP 65 rated
Cables/Connector	Photovoltaic Technology cable 4.0mm ² 340mm, MC4 Connectors

Registered office // 125 Findon Road, Worthing, BN14 0BQ
Registered No. 7814446 Cardiff

SUNSTORE
125 FINDON ROAD,
WORTHING,
WEST SUSSEX,
BN14 0BQ

T // 01903 213141
E // info@sunstore.co.uk
W // www.sunstore.co.uk

๗.4 CTL DECISION SHEET DSH251E FOR INSTRUMENT ACCURACY LIMITS (DSH251E)



IEC System for Conformity Testing and Certification
of Electrotechnical equipment and Components

CTL DECISION SHEET

Standard(s):	Subclause(s):	No.	Year
Generality		DSH 251E	2014
Category:			
General			
Subject:	Key words:	Developed by	Approved at
Measurement accuracy	- Measuring range - Accuracy - Instrument - Leakage (touch) current	WG1-WG4	2015 CTL Plenary Meeting

Instrument Accuracy Limits

Measurement values stated in a CB Test Report shall be made with instruments with accuracies within the limits stated below. These values apply unless more stringent requirements are given in the reference standard.

<u>Parameter</u>	<u>Range</u>	<u>Instrument accuracy of Measuring Range</u>
Voltage - Up to 1000 V	up to 1 kHz	± 1,5%
	1 kHz up to 5 kHz	± 2%
	5 kHz up to 20 kHz	± 3%
	20 kHz and above	± 5%
	dc up to 20 kHz	± 3%
- 1000 V and above	20 kHz and above	± 5%
Current - Up to 5 A	dc up to 60 Hz	± 1,5%
	above 60 Hz up to 5 kHz	± 2,5%
	5 kHz up to 20 kHz	± 3,5%
	20 kHz and above	± 5%
	dc up to 5 kHz	± 2,5%
- Above 5 A	5 kHz up to 20 kHz	± 3,5%
	20 kHz and above	± 5%
Leakage (Touch) current ¹	50 Hz up to 60 Hz	± 3,5%
	greater 60 Hz up to 5 kHz	± 5%
	greater 5 kHz up to 100 kHz	± 10%
	greater 100 kHz up to 1 MHz	under consideration
Power (50/60 Hz)	up to 3 kW	± 3%
	above 3 kW	± 5%
Power Factor (50/60 Hz)		± 0,05



**IEC System for Conformity Testing and Certification
of Electrotechnical equipment and Components**

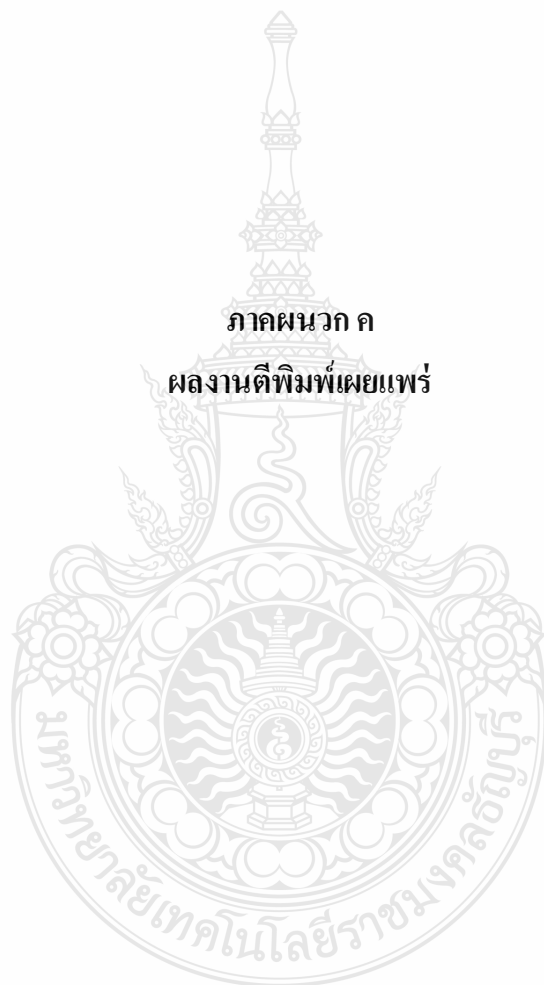
<u>Parameter</u>	<u>Range</u>	<u>Instrument accuracy of Measuring Range</u>
<i>Frequency</i>	up to 10 kHz	± 0,2%
<i>Resistance</i>	1 mΩ up to 100 mΩ and above 1 MΩ up to 1 TΩ above 1 TΩ for all other cases	± 5% ± 10% ± 3%
<i>Temperature</i> ^{2, 3}	- 35°C to below 100° C 100° C up to 500° C below - 35°C	± 2°C ± 3% ± 3°C
<i>Time</i>	10 ms up to 200 ms 200 ms up to 1 s 1 s and above	± 5% ± 10 ms ± 1%
<i>Linear dimensions</i>	up to 1 mm 1 mm up to 25 mm 25 mm and above	± 0,05 mm ± 0,1 mm ± 0,5%
<i>Mass</i>	above 10 g and up to 100 g 100 g up to 5 kg 5 kg and above	± 1% ± 2% ± 5%
<i>Force</i>	for all values	± 6%
<i>Mechanical energy</i>	for all values	± 10%
<i>Torque</i>		± 10%
<i>Angles</i>		± 1 degree
<i>Relative humidity</i>	30% to 95% RH	± 6% RH
<i>Barometric air pressure</i>		± 10 kPa
<i>Gas & fluid pressure</i>	for static measurement	± 5%

1 The stated tolerances apply to the total tolerance of the leakage (touch) current circuit and metering Instrument. Refer to CTL-OP 113 "Leakage (Touch) Current Measurement Instruments".

2 Thermocouple not included in the Instrument accuracy of measuring range. Thermocouples type "K", "T" and "J", premium grade, are recommended.
Switching power supplies present an electrically noisy environment for test instrumentation. When measuring temperatures on and within switching power supplies, thermocouples are in the immediate vicinity or in intimate contact with component sources of the electrical noise. Type J thermocouples are made of material that is magnetic. Type K thermocouples are made of material that is slightly magnetic. Type T thermocouples are made of non magnetic materials. As a result Type T thermocouples are affected less by the high frequency magnetic fields present and give more accurate results.

3 Not for measurements related to relative humidity.

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ก.1 Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control

**12th Eco-Energy and Materials
Science and Engineering Symposium**

11-14th June 2015 Peace Laguna resort&Spa,Ao Nang, Krabi, Thailand

- Energy Technology
- Environmental and Social Impact
- Nuclear Technology
- Smart Innovations For Future Life
- Material Technology
- Energy Economic and Management
- Railway Engineering

Co-organized by

Sponsored by

Conference Program of 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering

11 th June 2015			
13.00-16.00	Registration (G floor)		
17.00-18.00	EMSES committee meeting		
18.00-20.00	Welcome party (Ballroom)		
12 th June 2015			
9.00-9.30	Opening Ceremony (Ballroom)		
9.30-10.30	Keynote speaker: Prof. Dr. Koichi Miura: Developing New Technologies for Utilizing Low Rank Coals and Biomass Wastes in Asian Countries Introduction of a Japan-Thailand SATREPS Project		
10.30-10.45	Coffee break		
13 th June 2015			
10.45-12.00	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Energy Technology	Nuclear Technology
Paper ID	IN05, MT47, MT70, MT74, MT30, MT76	IN13, ET02, ET26, ET27, ET29, ET30	IN01, MT19, MT28, MT09, MT48, MT53
Chair	Prof. Dr. Hiroyuki Hamada	Asst. Prof. Dr. Terdkiat Lumpeteprakam	Dr. Nathabhat Pankong
Co-Chair	Dr. Anin Memon	Asst. Prof. Dr. Annoiy Reungwaree	Dr. Chatchai Veerantisakul
12.00-13.00	Lunch	Lunch	
13.00-15.00	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Energy Technology	Nuclear Technology
Paper ID	IN03, MT31, MT15, MT16, MT17, MT18	ET14, ET15, ET16, ET19, ET20	IN04, SI04, MT08, MT21, MT88, MT89, MT80
Chair	Assoc. Prof. Dr. Jisutomu Ito	Asst. Prof. Dr. Wanchai Subsingha	Prof. Dr. Koichi Miura
Co-Chair	Dr. Narongchai O-Chareon	Asst. Prof. Dr. Boonyang Plangklang	Asst. Prof. Dr. Nakorn Worasuwannarak
15.00-15.15	Break	Break	
15.15-17.00	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Energy Technology	Nuclear Technology
Paper ID	IN07, IN16, MT22, MT23, MT72, MT24	ET01, ET03, ET04, ET07, ET11	IN10, MT37, MT39, MT41, MT42, MT43
Chair	Dr. Hiroyuki Inoya	Dr. Winai Jampeng	Dr. Tomoko Ota
Co-Chair	Asst. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree	Dr. Sataporn Thongwilk	Dr. Anin Memon
18.00-22.00	Banquet	Banquet	
13 th June 2015			
9.00-10.30	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Material Technology	Material Technology
Paper ID	IN11, MT45, MT49, MT50, MT51, MT58	IN12, MT54, MT59, MT60, MT61, MT62	IN14, MT71, MT67, MT90, MT10, MT13
Chair	Asst. Prof. Dr. Ken Miyata	Prof. Dr. Toshiyazu Umamura	Asst. Prof. Dr. Manit Nithitanakul
Co-Chair	Dr. Narongchai O-Chareon	Asst. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree	Dr. Natee Srisawat
10.30-10.45	Coffee break	Coffee break	
10.45-12.15	Ballroom	Peach hall	Library
	Material Technology	Material Technology	Material Technology
Paper ID	IN02, MT78, MT79, MT81, MT65	IN06, MT86, MT26, MT27, MT29, MT77	IN08, ET23, ET28, ET24
Chair	Asst. Prof. Dr. Kazushi Yamada	Dr. Hisanori Ando	Prof. Dr. Hiroshi Ito
Co-Chair	Dr. Supaporn Thumsoorn	Dr. Kiyooki Ishimoto	Asst. Prof. Dr. Sommai Pivsa-Art
12.15-13.30	Lunch	Lunch	
13.30-14.30	Closing ceremony	Closing ceremony	

*E-Proceeding will be uploaded on www.emses.org

List of Reviewers:

Prof. Dr. Tetsuo TEZUKA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Hideki YAMANE, KIT, Japan
Prof. Dr. Asami NAKAI, KIT, Japan
Prof. Dr. Hiroyuki HAMADA, KIT, Japan
Prof. Dr. Yew Wei LEONG, NUS, Singapore
Prof. Dr. Hideaki OHGAKI, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO, TU, Thailand
Prof. Dr. Shiro SAKA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Hitomi OHARA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Young S. CHAI, Korea
Prof. Dr. Nipon TANGTHAM, KU, Thailand
Prof. Dr. Masayoshi OKUBO, Kobe Uni, Japan
Prof. Dr. Somchai WONGWISES, Thailand
Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN, UQ, Australia
Prof. Dr. Yukio OGATA, Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Takaguki SAKAI, Tokushima University, Japan
Prof. Dr. Yuichi ANADA, Hokkaido Info. Uni., Japan
Prof. Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP, KMUTT, Thailand
Prof. Dr. Per B. ZETTERLUND, UNSW, Australia
Prof. Dr. Kawee SRIKULKIT, CU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY, IIT-Madras, India
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN, IPUOP, USA
Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES, KMITL, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI, Japan
Assoc. Prof. Dr. Kaan KERDCHEUN, RMOTI, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT, SWU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA, Nakaoga, Japan
Assoc. Prof. Dr. Yuttana KAMSUWAN, CMU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN, IPU, USA
Assoc. Prof. Dr. Suriyon TANSURIYAVONG
Assoc. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI, KMUTNB, Thailand
Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIKAK, KU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Supakit SUTTIRUENGWONG, SU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Vallop PHUPA, RMUTP, Thailand
Asst. Prof. Dr. Pramook UNAHALEKHAKA, RMUTSB, Thailand
Asst. Prof. Dr. Arthit SODE-YOME, EGAT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Wirachai ROYNARIN, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Jakkree SRINONCHAT, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Uthen KAMNAN, RMUTL, Thailand
Asst. Prof. Dr. Cattariya SUWANNASRI, KMUTNB, Thailand
Asst. Prof. Somchai BIANSONGNERN, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonyang PLANGKLANG, RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sivakorn ANGTHONG, RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Supakij SUTTIRUENGWONG, SU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO, KU, Thailand
Dr. Toshikazu UMEMURA, Plaisir and, KIT, Japan
Dr. Tomoko OTA, Chuo Business, Japan
Dr. Hiroyuki INOYA, KIT, Japan
Dr. Ryo MARUI, Marui Textile Machinery Co., Ltd., Japan
Dr. Masayuki OKOSHI, KIT, Japan
Dr. Masatoshi IJI, NEC, Japan
Dr. Sei-ichi AIBA, Japan
Dr. Pinit SRITHORN, RMUTI, Thailand
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL, RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG, RMUTT, Thailand
Dr. Sataporn THONGWIK, RMUTT, Thailand
Dr. Prusayon NINTANAVONGSA, RMUTT, Thailand
Dr. Surawut CHUANGCHOTE, KMUTT, Thailand
Dr. Sorapong PAVASUPREE, RMUTT, Thailand
Dr. Natee SRISAWAT, KMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG, RMUTT, Thailand
Dr. Supaporn THOMSORN, RMUTT, Thailand
Dr. Kulwadee SANGSANO, RMUTT, Thailand
Dr. Thirawat MUEANSICHA, RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON, RMUTT, Thailand
Dr. Werarak LAOONGCHAN, RMUTT, Thailand
Dr. Meng jing, RMUTT, Thailand
Tetsuo KIKUCHI, ToyuGiken, Japan
Toshi SUGAHARA, Maruhachi Corporation, Japan
Takanori KITAMURA, Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan
Takanori NEGORO, Negoro Sangyo Co., Ltd., Japan
Takashi FURKAWA, Hishiken Co., Ltd., Japan



CONTENT

ET26	A Comparative Study of Sinusoidal PWM and Third Harmonic Injected PWM Reference Signal on Five Level Diode Clamp Inverter <i>Wanchai Subsingha*, Chaiwat Pangpun</i>	70
ET27	Design and analysis three phase three level diode-clamped of grid connected inverter <i>Purached Juntamon and W. Subsingha</i>	75
ET28	Design and Low Power Test of Pulse Forming Network for Klystron Modulator at Chiang Mai University <i>J. Saisut^{1,2*}</i>	78
ET29	Analysis of Output Power Impact on PV Rooftop System under Different Installation Positions by PSCAD <i>N. Thanomsat, B. Plangklang</i>	81
ET30	Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control <i>Malee Patchouy and Wanchai Subsingha</i>	86

Material Technology

MT01	Synergistic effect of fillers and APP on mechanical properties and flame retardancy of recycled PET composites <i>Supaphorn Thumsorna, b, Jian Jun Liuc Wiranphat Thodsaratpreeyakul^b, Takanori Negorob, Hiroyuki Inoya^b, Masayuki Okoshi^b, Hiroyuki Hamada^b</i>	94
MT09	Chitosan Coating on Biodegradable Film Modified Surfaces by Corona Treatment <i>Supachai Sanga and Nattakarn Hongsrphan</i>	99
MT10	Mechanical Enhancement of Poly(Butylene Succinate) with Commercial Synthetic Fibers <i>Alongkorn Popanna and Nattakarn Hongsrphan</i>	104
MT11	Preparation of Papers for 12 th EMSES 2015 Conference Flameretardancy of Bio-Base Plastics <i>Masayuki Okoshi, Supaphom Thumson, Hiroyuki Hamada</i>	110
MT13	The self-cleaning and photocatalytic properties of TiO ₂ and TiO ₂ doped with SnO ₂ thin films preparation by sol-gel method <i>Nipon Maneechot and Weerachai Sangchay</i>	113

Real-time Photovoltaic Simulator using current feedback control

Malee Patchouy and Wanchai Subsingha*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110
*Corresponding Author: E-mail: wanchai.s@en.rmutt.ac.th

Abstract— In this article, mathematical model of PV model is investigated in order to study the affection in irradiance, temperature, parameters to the PV's output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator. By which, PV simulator is utilized by DC converter circuit with a current feedback control. This may be useful if is possible to implementing into a real world PV simulator. In this paper, PV simulator is modelled using MATLAB/Simulink program, which is composed of DC converter and a proper controlscheme. From the simulation results, it can be observed that I-V relationship of the PV simulator is quite the same as of such PV mathematical model. This means that, it is possible to build a real PV simulator in commercial in a further work.

Keywords— PV model, PV simulator, DC Converter, Feedback control.

1. INTRODUCTION

PV (Photo Voltaic) cell is the devices that convert photons into electric potential in PN silicon junction or other material [1]. PV system is a popular renewable energy source due to their energy-friendly environment [2]. However, its high costs may cause the difficulties in development and experiments for laboratory. Mean by that, practical PV simulator which emulates output characteristics of PV module through a real converter circuit can be used in replacement of an actual PV module in laboratory scale.

2. PV MODEL

Mathematical model

The equivalent circuit of PV is a current source parallels with a diode and resistances as shown in Fig. 1. When PV exposed to the sunlight, a current which is proportional to the solar irradiance is produced [3].

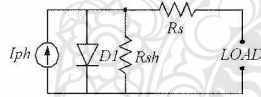


Fig. 1 Single diode PV model

The circuit of Fig 1 is described by Shottkey diode equations incorporated with diode quality factor in account of the recombination effects in space-charge region [3]. The currents equations of PV cell are given by (1) to (3).

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ e^{\left(\frac{V + IR_s}{NKT} \right)} - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I \cdot (T - T_{ref})).\lambda \quad (2)$$

$$I_s(t) = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\left(\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{NKT} \right)} \quad (3)$$

Where I_{ph} is photon current, R_s , R_{sh} are series and shunt resistance, N is ideal diode factor, K is Boltzman constant, q is electron charge and I_s is reverse saturation current of diode, K_I is short-circuit current temperature coefficient of PV's cell, I_{sc} is short circuit (SC) current of cell, λ is solar

irradiance, E_g is band gap energy of semiconductor and V_t is ambient temperature voltage. By consideration, The behaviour of PV cells are described by I_{ph} , N , I_s , R_s and R_{sh} . In which, these parameter depend on solar irradiance (λ) and temperature (T) [1].

However PV module is a congregation of PV cells. So, V-I relationship of PV module (neglecting R_s , R_{sh}) is given in (4) [1], where n_s and n_p are number of series and shunt cells in PV module.

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left(e^{\left(\frac{qV}{NKT.n_s} \right)} - 1 \right) \quad (4)$$

• **Fill factor (FF)**: SC current and OC (open circuit) voltage, which are maximum current and voltage of PV cell. By theory, the product of these values is the maximum power of PV cell [3]. *FF* is defined as the ratio of actual maximum obtainable power, ($V_m \cdot I_m$) to the theoretical power, ($I_{sc} \cdot V_{oc}$). It is given as[3].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (5)$$

• **Maximum efficiency (η)**: is the ratio of maximum output power to the input power [4].

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (6)$$

3. SIMULATION MODEL OF PV MODULE

3.1. Mathematical model

The Solarex MSX60 PV module was chosen to do a PV model. It provides 60 W. of nominal max. power, and it has 36 polycrystalline silicon cells in series connecting. The specifications are shown in Table 1 [5].

Table 1. Typical electrical characteristic of MSX-60

Solarex MSX60 Specifications (1kW/m ² , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (P _m)	60 W
Voltage at peak power (V _m)	17.1 V
Current at peak power (I _m)	3.5 A
Short-circuit current (I _{sc})	3.8 A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.1 V
Temp. coefficient of OC voltage (β)	-73mV/°C
Temp. coefficient of SC current (α)	3mA/°C
Approx. power by temp.	-0.38W/°C

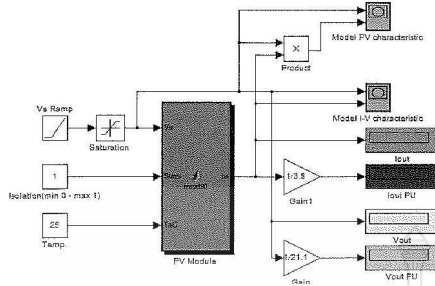


Fig. 2 Simulink model of PV Module

The model of the PV module was implemented using a MATLAB/Simulink program. The model parameters are evaluated during execution using the equations listed on the previous section. The program, calculate the current and voltage, using typical electrical parameter of the module: $I_{sc}=3.8A$, $V_{oc}=21.1V$, $\beta=3mA/^{\circ}C$, $\alpha=-73mV/^{\circ}C$, $N=1.2$, $I_s=100nA$ and the variables Irradiation (λ) Temperature (T). The PV model is implemented and shown in Figure 2.

3.1. Simulation Results of PV Cell/Module

PV Cell

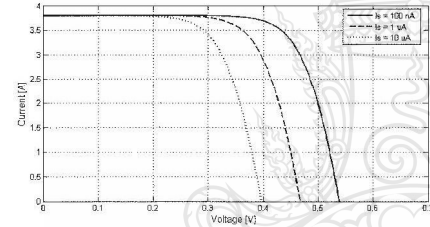


Fig. 3(a). IV curve of PV cell correspond on I_s

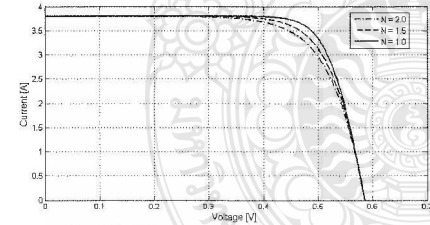


Fig. 3(b). IV curve of PV cell correspond on N

Fig.3(a) shows I-V curve of PV cell for the reverse saturation current of diode (I_s) at 100nA, 1 μ A, and 10 μ A. It is seen that increasing of I_s affect on decreasing of V_{oc} (open circuit voltage). Fig 3(b) shows I-V curve of PV cell for the ideal factor (N) at 1.0, 1.5 and 2.0. It can be observed that increasing N affects on increasing V_{oc} .

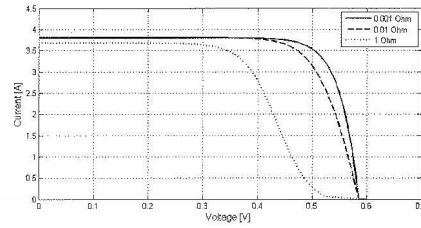


Fig. 4 IV curve of PV cell correspond on R_s

Fig 4(a) shows I-V curve of PV cell for the values of R_s at 1m Ω , 0.01 Ω and 1 Ω . It is seen that increasing R_s affect on decreasing Fill factor (FF). The shunt resistance R_{sh} is inversely related with shunt leakage current to the ground. In general, the PV efficiency is insensitive to the variation in R_{sh} which can be assumed to approach infinity without leakage current[7]

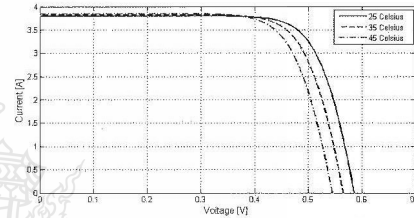


Fig. 5(a). IV curve of PV cell on varying $T(^{\circ}C)$

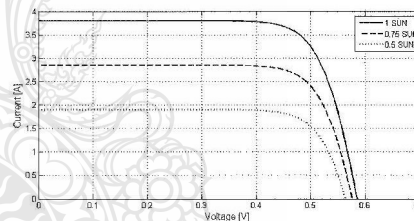


Fig. 5(b). IV curve of PV cell on varying λ

From Fig. 5(a) and Fig.5(b) it found that increasing of working temperature, I_{sc} will increases. In another ways, increasing output current will leads to decreasing of PV output voltage, which PV output power always decrease at higher temperature. On the other hand, from Fig.5, the increasing of solar irradiance, I_{sc} of PV will be increased, and the maximum output power may increasing. This means that open-circuit voltage is logarithmically depend on solar irradiance, and the short-circuit current is directly proportional to the radiant intensity.

PV Module

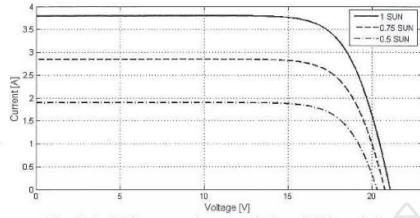


Fig.6(a). I-V output characteristics of PV module

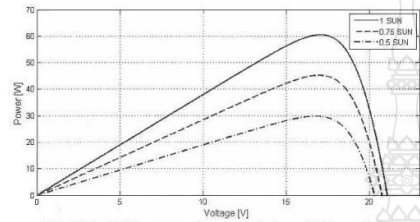


Fig.6(b). P-V output characteristics of PV module

In PV module, there is one path available for conduction current due to PV cells that connected in series, therefore $n_p = 1$. The number of PV cell that connected in series in this PV module here is 36, hence n_s is 36. Therefore, the simulation result the I-V and P-V curve of a PV module are shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b) respectively.

Table 3 shows the comparison between the simulation result of PV module model and its electrical characteristics (MSX60). It found that the error is acceptable thresholds and the simulation result the I-V and P-V curve of a PV module are shown in Fig. 7

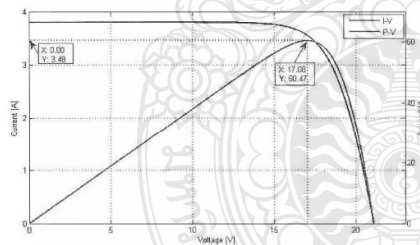


Fig.7. Simulation result the I-V and P-V curve of a PV module

Table 3. Error of PV module model

	MSX-60	Simulation	Error
P_m (W)	60.0	60.47	0.78%
V_m (V)	17.1	17.08	0.12%
I_m (A)	3.5	3.48	0.57%

4. SIMULATION OF PV SIMULATOR

4.1 Simulation Model

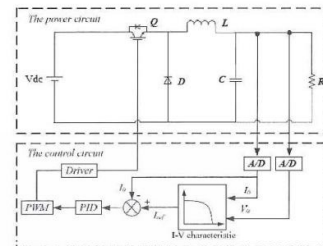


Fig.8 Block diagram of proposed PVsimulator

A photovoltaic simulator that emulates the output characteristics of photovoltaic modules can be used in replacement of an actual photovoltaic modules [6]. The PV simulator is mainly consists of a DC buck converter and a control system which is using dsp board implementation. A current transducer (CT) was used to detect the output PV module's current and then sent back to the DSP controller board in order to calculate PWM triggering signal for IGBT of the DC converter.

In the further works, real time hardware has to be accomplished in order to produce external output aspect following the I-V characteristics of such PV modules.

However, in this paper, PV simulator is modelled using MATLAB/Simulink program. By which, PV simulator that consisted of a DC buck converter and a proper feedback control scheme as shown in Fig. 9.

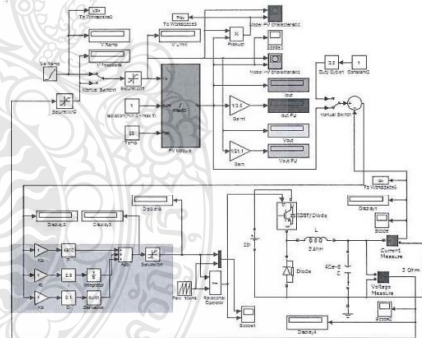


Fig.9. DC buck converter and a PID feedback control scheme

4.2 Simulation Results

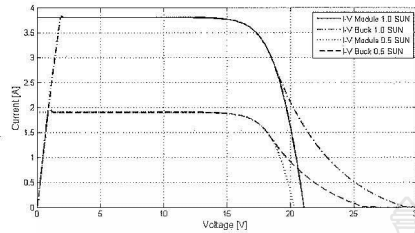


Fig.9 I-V curve of PV module under different solar irradiance (T=25°C) compared PV based DC-DC Converter

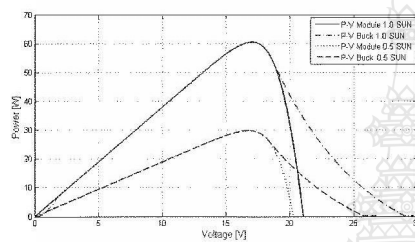


Fig.10 P-V curve of PV module under different solar irradiance (T=25°C) compared PV based DC-DC Converter

The output voltage of the DC converter based PV simulator in this paper is designed to be adjusted from 7V to 22V. In order to test the DC converter based PV simulator, an adjustable resistor (Rload) is used by changing the value of resistor from 2Ω to 49Ω. As shown in Fig. 9 is I-V curve of PV module under different solar irradiance 25°C compared PV based DC-DC Converter and Fig. 10, Comparing P-V curve, the mathematical model of the PV with the DC converter based PV simulator it show that I-V curve of the PV simulator via DC converter is this paper is well matching with the of MSX60 PV module except the small part of voltage control zone of PV experimental curve need to be adjustment to the I-V curve with particularly in both different solar irradiance and the temperature are same.

5. CONCLUSIONS

This paper presents a PV simulator which mainly consists of a buck converter and digital controller controlled by a personal computer. According to the application requirement, the hardware of the PV simulator is designed. Based on design in this paper the output characteristics of PV module working under variable sunshine intensity or temperature are simulated. The simulation results confirm that the PV simulator designed in this paper is well matching with the actual PV module except the small part of voltage control zone of PV experimental curve need to be adjustment and the work done in this paper important to experimental foundation for the actual application of PV.

REFERENCES

[1] Savita Nema, R.K.Nema and Gayatri Agnihotri. 2010. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/

module/ array and their experimental verification. In *International Journal of ENERGY AND ENVIRONMENT*. Volume 1, Issue 3 , pp. 487-500.

[2] A. bilsalam, J. Haema, I. Boonyaroonate and V.Chunkag. 2011. Simulation and study of Photovoltaic cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load. In *8th International Conference on Power Electronic –ECCE Asia*. The Shilla Jeju, Korea, May 30–June 3, pp. 3033-3036.

[3] Pilin Junsangri and Fabrizio Lombardi. 2010. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In *25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, pp. 240-248.

[4] Francisco M. Gonzalez-Longatt. 2005. Model of Photovoltaic Module in Matlab™. In *II CIBELEC*.

[5] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su. 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCEC, san Francisco, USA, October 22-24*.

[6] Qingrong Zeng, Pinggang Song and Liuchen Chang . 2002. A PHOTOVOLTAIC SIMULATOR BASED ON DC CHOPPER. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. pp.257-261.

[7] Huan-Liang Tsai. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. In *H.-L. Tsai / Solar Energy 84 (2010) 1318–1326*.

ค.2 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11
11st Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT)
วันที่ 17-19 มิถุนายน 2558
ณ โรงแรมบางเลน เออร์โท อิมพีวีสลอรี่

จัดการประชุมโดย
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ร่วมกับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน

รศ.ดร. อติศักดิ์ นาถกรณกุล

รศ.ดร. ศิริชัย เทพทา

รศ.ดร.ณัฐ ภาศยปนนท์

รศ.ดร.มานะ อมรกิจบำรุง

ผศ.ดร. นริศ ประทีนทอง

ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร

ผศ.ดร. เก้ากัญญา สุดประเสริฐ

ผศ.ดร.จิรพรรณ เตียรณีสวารณ

ผศ.ดร.กุสภานา ภูปาฮา

ผศ.ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี

ผศ.ดร.พัฒนาะ รักความสุข

ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.ดลเดช ตั้งตระการพงษ์

ผศ.ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก

ผศ.ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย

ผศ.ดร.สมชาย มณีวรรณ

ผศ.ดร.ศิริวิษุ จินดารักษ์

ผศ.ดร.สุชาติ แยมเม่น

ผศ.ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์

ผศ.ดร.วราภรณ์ รัตตพงษ์สิทธิ์

ผศ.ดร.ธีระชัย บงการณ

ดร.พัลลภ มณีโชติ

ดร.ทงศักดิ์ โนไชยา

ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.วราเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี

ดร.นรรัตน์ วัฒนมงคล

ดร.โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ

รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.สรรพพรรษ วิทยาชัย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.รจนา ประไพพ

ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร. จิบดีนทร์ แสงสว่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผศ.ดร.ยุทธนา กั้นทะพะเยา

มหาวิทยาลัยพะเยา

ดร.วิชเนศวรณ เจริญวัฒน์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ผศ.ดร.วรศิษฐ์ ทรูทัศน์วินท์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตน์เดโช

ผศ.ดร. สุภาภรณ์ สุดประเสริฐ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธยานนท์

ผศ.ดร. ประสาน สลัดดีเรื่องศักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ภฤชนันท์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผศ.ดร.วิรัชย์ ไรยนต์รินทร์

ผศ.ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง



คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.พานิช อินต๊ะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ธีระชาติ พรทิบูลย์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาน

มหาวิทยาลัยทักษิณ

ผศ.ดร. จอมภพ แววศักดิ์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์

ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

อ.มานิตย์ กุ๋จนพัฒน์



รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
RE-1-27	ภาณุพันธ์ ศรีสมบูรณ์, มาโนช ผดุงเวียง และมานะ อมรกิจบำรุง สมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็กกรณีใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง วชิญญ วรณพพรหม และอนุชาล เพิ่มสุวรรณ	181
RE-1-28	ยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตของชุมชนกลางหมีน อำเภอกอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ สุพัฒน์ชัย โพธิ์แก้ว	190
RE-1-29	การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยสภาวะเมทานอลเหนือจุดวิกฤต เจษฎา สุขสัมพันธ์, อากาศรณ์ สกุลการะเวก, วิทยา ปั้นสุวรรณ, กางปัญญา สุวรรณสุขโข และชนากานต์ เพิ่มฉลาด	200
RE-1-31	การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา มาลี พัฒน์ช่วย และวันชัย ทวีชัยสิงห์	209
RE-1-32	โรงเรือนอบแห้งแผ่นยางพาราโดยใช้เตาหมักเครื่องเก่าเครื่องเก่าเป็นแหล่งความร้อน นำพน พิพัฒน์ใหญ่ชัย, มงคล มีแสง, สันหวัจน์ ทองแดง, จริญญา มงคลชัย และบัญชา ถิ่นเลิศ	215
RE-1-33	การศึกษาสมรรถนะทางเทคนิคระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์แบบเชื่อมต่อบนระบบจำหน่ายบนหลังคา ขนาด 3.6 กิโลวัตต์ กรณีห้องฟ้าแจ่มใสด้วยเทคนิคการจำแนกแฟร็กทัล ธีระศักดิ์ สมศักดิ์, สาคร จำปาศิม และจิตตฤทธิ ทองปรอน	223
RE-1-35	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์รังสีแสงอาทิตย์ ด้วย Levenberg-Marquardt Algorithm จักรพันธ์ นันทพันธุ์กุล และบุญยั้ง ปลั่งกลาง	232
RE-1-37	ผลของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ออัตราการอบแห้งซึ่งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ประทีป ทิพย์ประชา, บุญญัตติ นิยมवास และบรรเจิด ไปฏกรัตน์	238
RE-1-38	การเปรียบเทียบผลของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากน้ำมันพืชใช้แล้ว (HIBD) และเชื้อเพลิงดีเซล เชิงพาณิชย์ (CD) ที่มีต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลพิษของรถยนต์ คูมินดี อัดวินวิเชียร, ประสพโชค โพธิ์กุล และพรหมรักษา กุทธิประเสริฐสมณี	244
RE-1-40	อิทธิพลของอัตราส่วนของความเร็วอากาศในแอล-วาล์ว ความเร็วอากาศ และปริมาณเบตที่มีผลต่อ พฤติกรรมการไหลของอนุภาคภายในเตาเผาใหม่แบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน ธนศ อุทัยศรี และสุนิรัตน์ พุกตะ	255
RE-1-41	การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับพืชน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ สุนัดดา ไชยสิทธิ์, จำเนียร ชมภู และวนิดา สืบสายพรพรหม	263
RE-1-42	การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันไก่ผสม น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงในอัตราส่วน 95:5 คุณานนต์ ศักดิ์กำปัง, ตั้งแสง ยนต์สถิตย์กุล และมนตรี พิลาชัย	273
RE-1-43	คุณสมบัติน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไพโรลิสจากของเหลือจากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงและน้ำมันดีเซล รินลดา สิริแสงสว่าง, เพชรสยาม สิงห์ทอง และอนุวัฒน์ วรณรัตน์	281



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การควบคุมการป้อนกลับกระแสแบบทันเวลา
REAL-TIME PHOTOVOLTAIC SIMULATOR USING CURRENT FEEDBACK CONTROL

มาลี พัฒน์ชัย¹ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์^{1,*}

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*ผู้ติดต่อ E-mail: wanchai.spen.rmutt.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3420, เบอร์โทรสาร 02-549-3422

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสถานะแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำสู่การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป การจำลองทำโดยใช้วงจรแปลงแรงดันดีซี (DC Converter) ร่วมกับวิธีควบคุมการป้อนกลับกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปได้ที่ความคิดเห็นว่าจะมีประโยชน์ต่อการดำเนินการในจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในโลกแห่งความเป็นจริง ในบทความนี้ใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ในการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันดีซี และการควบคุมที่เหมาะสม จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) จากการจำลอง เป็นไปในทางเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหมายความว่า เป็นไปได้ที่จะสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริงในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำหลัก : แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV model), จำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator), แปลงแรงดันดีซี (DC Converter), การควบคุมการป้อนกลับ (Feedback control).

Abstract

In this article, mathematical model of PV model is investigated in order to study the affection in irradiance, temperature, parameters to the PV's output power. It will lead to analyse and develop the PV simulator. By which, PV simulator is utilized by DC converter circuit with a current feedback control. This may be useful if is possible to implementing into a real world PV simulator. In this paper, PV simulator is modeled using MATLAB/Simulink program, which is composed of DC converter and a proper control scheme. From the simulation results, it can be observed that I-V relationship of the PV simulator is quite the same as of such PV mathematical model. This means that, it is possible to build a real PV simulator in commercial in a further work.

Keywords: PV model, PV simulator, DC Converter, Feedback control.



1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photo Voltaic cell) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงโฟตอนเป็นศักย์ไฟฟ้าในรอยต่อ PN ซิลิกอนหรือวัสดุอื่นๆ [1] ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม [2] แต่ค่าใช้จ่ายที่สูงอาจทำให้เกิดความยากลำบากในการพัฒนาและการทดลองในห้องปฏิบัติการ หมายความว่า การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ จำลองคุณลักษณะการส่งออกด้านเอาท์พุท PV โมดูล ผ่านวงจรแปลงแรงดัน DC/DC สามารถนำมาใช้แทนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในงานจริงในห้องปฏิบัติการได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับไดโอดและตัวต้านทานขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1. เมื่อ PV สัมผัสกับแสงแดดก็จะผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจะเป็นสัดส่วนกับรังสีแสงอาทิตย์ [3]



รูปที่ 1 วงจรของ PV แบบไดโอดเดียว

วงจรของรูปที่ 1 รูปที่ 1 อธิบายโดยสมการไดโอด (Schottky) ร่วมกับปัจจัยคุณภาพของไดโอดในส่วนของผลกระทบของการนำมารวมกับขอบเขตของช่องว่าง(space-charge) [3] สมการกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะได้จาก (1) ถึง (3).

$$I = I_{ph} - I_s \cdot e^{\left(\frac{V+IR_s}{NKT}\right)} - 1 - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_L(T - T_{ref})) \cdot \lambda \quad (2)$$

$$I_s(T) = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1\right) \frac{E_g}{NkV_t}} \quad (3)$$

เมื่อ I_{ph} คือกระแสโฟตอน, R_s , R_{sh} คือตัวต้านทานอนุกรมและตัวต้านทานขนาน, N คือ ideal factor

ของไดโอด, K คือค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K, q คือ ค่าการจ่ายอิเล็กตรอน 1.602×10^{-19} คูลอมบ์, I_s คือกระแสไบอัสของไดโอด, K_L คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์, I_{sc} คือกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์, λ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์, E_g คือพลังงานที่มีช่องว่างของเซมิคอนดักเตอร์, V_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิโดยรอบ จากการพิจารณาลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะอธิบายโดย I_{ph} , N , และ R_{sh} ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับรังสีแสงอาทิตย์ (λ) และอุณหภูมิ (T) [1]

แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์คือการรวมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (4) (ละเลย R_s , R_{sh}) [1], เมื่อ N_s และ N_p คือจำนวนอนุกรม และขนานเซลล์ของ PV module

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{qV}{NKT_n}\right)} - 1 \right) \quad (4)$$

• **ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF)** กระแสลัดวงจรและแรงดันลัดวงจร ซึ่งเป็นกระแสและแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ FF เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [3]

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

• **ประสิทธิภาพสูงสุด (η)** เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [4]

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (6)$$

3. การจำลองรูปแบบการ PV MODULE

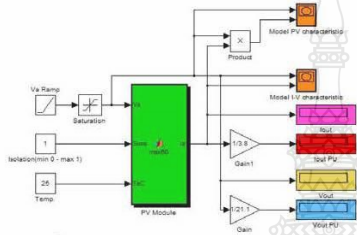
3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Solarex MSX60 ถูกเลือกให้เป็นทำแบบจำลอง มีขนาดการใช้พลังงานสูงสุด 60 วัตต์ และมี 36 เซลล์ ในชุดการเชื่อมต่อรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 [5].



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแผงโซลาร์เซลล์รุ่น MSX-60

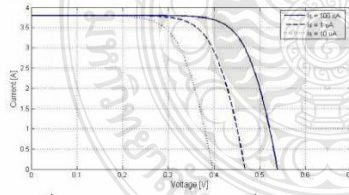
Solarex MSX60 Specifications (1kW/m ² , 25°C)	
Characteristics	SPEC
Typical peak power (P _m)	60 W
Voltage at peak power (V _m)	17.1 V
Current at peak power (I _m)	3.5 A
Short-circuit current (I _{sc})	3.8 A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.1 V
Temp. coefficient of OC voltage (β)	-73mV/°C
Temp. coefficient of SC current (α)	3mA/°C
Approx. power by temp.	-0.38W/°C



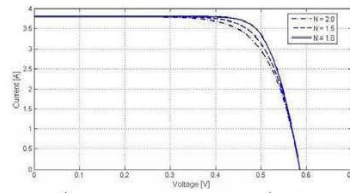
รูปที่ 2 แบบจำลอง Simulink ของ PV โมดูล

รูปแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้ในการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB / Simulink การทดลองโดยใช้สมการที่ระบุก่อนหน้านี้ MATLAB / Simulink เป็นโปรแกรมคำนวณค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า โดยพารามิเตอร์ทั่วไปของโมดูลคือ $I_{sc} = 3.8A$, $V_{oc} = 21.1V$, $\beta = 3mA/°C$, $\alpha = -73mV/°C$, $N = 1.2$, $I_s = 100nA$ และในการจำลอง PV โมดูลทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของความเข้มแสงอาทิตย์ (λ) และอุณหภูมิ (T) ดังรูปที่ 2

3.2 ผลการจำลองของเซลล์และโมดูลแสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cell)

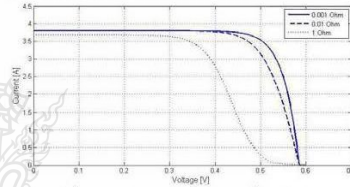


รูปที่ 3 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า I_s



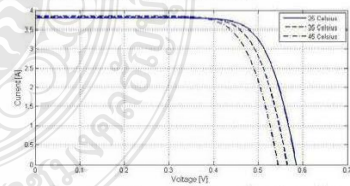
รูปที่ 3 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า N

รูปที่ 3 (ก) แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_s) ที่ 100nA, 1uA และ 10uA จะเห็นได้ว่าการเพิ่มของ I_s มีผลกระทบต่อ Voc รูปที่ 3 (ข) แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อค่า N ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 สามารถที่ตั้งข้อสังเกตว่าไม่มีผลกระทบต่อแรงดันลัดวงจร (Voc)



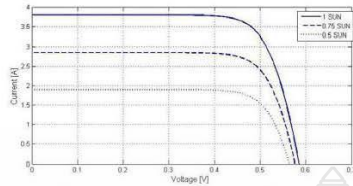
รูปที่ 4 I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า R_s

รูปที่ 4 แสดง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ 1mΩ, 0.01Ω และ 1Ω สามารถที่ตั้งข้อสังเกตว่ามีผลกระทบต่อการลดลงของค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ส่วนความต้านทานขนาน (R_{sh}) คือตัวที่ทำให้เกิดกระแสไฟรั่วลงกราวด์ โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีผลกระทบต่อจากความต้านทานขนาน ดังนั้นจึงสมมติให้มีค่าเป็นอนันต์และไม่มีการแส่วลงกราวด์ [7]



รูปที่ 5 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า T (°C)

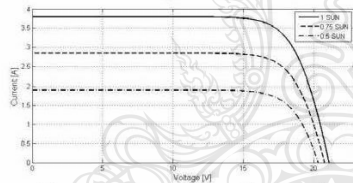




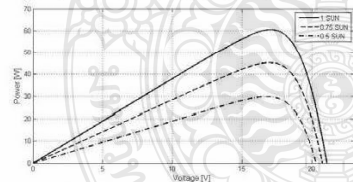
รูปที่ 5 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า λ

รูปที่ 5 (ก) และ รูปที่ 5 (ข) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำงาน จะทำให้เพิ่มค่ากระแส Isc และในอีกทางหนึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแส Isc จะส่งผลให้แรงดันและกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วยเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และในทางกลับกันจากรูปที่ 5 การเพิ่มขึ้นของรังสีแสงอาทิตย์ จะทำให้ Isc ของ PV เพิ่มขึ้น และกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax) อาจเพิ่มขึ้นด้วย นั่นหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ขึ้นอยู่กับรังสีแสงอาทิตย์และกระแสลัดวงจรโดยตรงและเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง

3.3 แบบจำลอง PV โมดูล



รูปที่ 6 (ก) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า $T (^{\circ}C)$

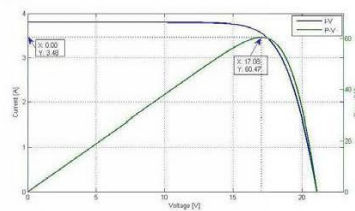


รูปที่ 6 (ข) I-V Curve ต่อการเปลี่ยนค่า λ

ใน PV โมดูล นี้คือส่วนหนึ่งที่ใช้ได้สำหรับการนำกระแสเนื่องมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เชื่อมต่อในชุดอนุกรม ดังนั้น $NP = 1$ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่

เชื่อมต่อในชุดอนุกรมใน PV โมดูล 36 ดังนั้น $N_s = 36$ ส่งผลให้กราฟ I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์จากการจำลองจะแสดงในรูป 6 (ก) และรูป 6 (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองของโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์และลักษณะไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ MSX60 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่เกณฑ์ยอมรับ และมีผลการจำลองกราฟ I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 7



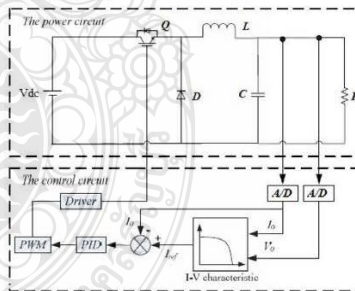
รูปที่ 7 กราฟผลการจำลอง I-V และ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน

	MSX-60	Simulation	Error
P_m (W)	60.0	60.47	0.78%
V_m (V)	17.1	17.08	0.12%
I_m (A)	3.5	3.48	0.57%

4. การจำลอง

4.1 แบบจำลอง



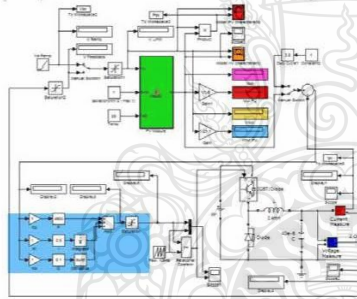
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของการจำลอง PV



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการจำลอง ลักษณะการส่งออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในการ เปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริง [6] การ จำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยวงจร แปลงแรงดันดีซี และระบบควบคุมที่ใช้การทำงานกับ บอร์ดควบคุม DSP ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส (CT) ที่นำมาใช้ในการตรวจจับกระแสเอาต์พุตของเซลล์ แสงอาทิตย์ แล้วส่งกลับไปยังบอร์ดควบคุม DSP เพื่อ คำนวณสร้างสัญญาณความถี่พัลส์ที่เซลล์ไปทริก IGBT ของวงจรแปลงแรงดันดีซี

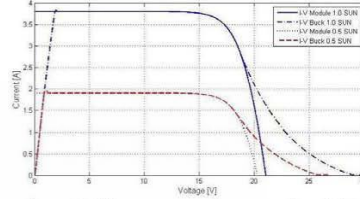
งานในลำดับถัดไป คือนำมาใช้ร่วมกับฮาร์ดแวร์ จริง เพื่อเปรียบเทียบการส่งออกของกำลังไฟฟ้า ที่มี ต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังกล่าว

การจำลองในบทความนี้ จะเป็นการจำลองโดยใช้ โปรแกรม MATLAB / Simulink และเครื่องมือที่ใช้ จำลองประกอบกับวงจรแปลงแรงดันดีซีและแบบการ ควบคุมการป้อนกลับที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 9

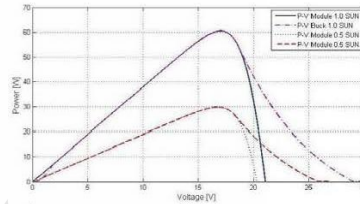


รูปที่ 9 แบบวงจรการควบคุม

4.2 ผลการจำลอง



รูปที่ 10 เส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสี แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน (T = 25°C)



รูปที่ 11 เส้นโค้ง P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสี แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน (T = 25°C)

แรงดันขาออกของวงจรแปลงแรงดันดีซี จากการ จำลอง PV ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบโดยการ ปรับค่าแรงดันจาก 7V ถึง 22V และตัวต้านทานปรับ (Load) ปรับจาก 2Ω ถึง 49Ω ในรูป 9 เป็นเส้น โค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้รังสีแสงอาทิตย์ที่ แตกต่างกัน แต่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับวงจรแปลงแรงดันดีซี และรูปที่ 10 เปรียบเทียบโค้ง PV, จำลองทางคณิตศาสตร์ของ PV กับผ่านวงจรแปลงแรงดันดีซี กับการจำลอง PV แสดง ให้เห็นว่ากราฟ I-V ของการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ กับผลจากค่าที่ผ่านมาจากวงจรแปลงแรงดันดีซี ของ เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60 ในบทความนี้ผลจากการ จำลองได้เส้นโค้งกราฟที่เหมือนกัน ยกเว้นส่วนเล็ก ๆ ของของเส้นโค้ง ในบริเวณการควบคุมส่วน แรงดันไฟฟ้า จะต้องมีการปรับเส้นโค้ง I-V และ P-V ด้วย ของทั้งสองค่ารังสีแสงอาทิตย์แตกต่างกันและ อุณหภูมิเดียวกัน



5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลอง PV ส่วนหลักๆ ประกอบด้วยแปลงแรงดัน DC-DC และควบคุมดิจิทัลควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การออกแบบตามการประยุกต์ใช้อาร์ตเวิร์กของแบบจำลอง PV การออกแบบบทความนี้เป็นศึกษาลักษณะการส่งเอาร์ทัพทของโมดูล PV ที่ทำงานภายใต้ตัวแปรความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ การจำลองยืนยันได้ว่าผลจากการจำลองและโมเดล MSX60 ในบทความนี้ผลจากการจำลองได้เส้นโค้งกราฟที่จับคู่เป็นอย่างดี ยกเว้นส่วนเล็ก ๆ ของของเส้นโค้ง ในบริเวณการควบคุมส่วนแรงดันไฟฟ้า จะต้องมีการปรับเส้นโค้ง I-V และ P-V ด้วย ของทั้งสองค่ารังสีแสงอาทิตย์แตกต่างกันและอุณหภูมิเดียวกัน

การทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ บทความนี้ต้องการการปรับแต่ง และงานที่ทำในบทความนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทดลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงของเซลล์แสงอาทิตย์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Savita Nema, R.K.Nema and Gayatri Agnihotri. 2010. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/ module/ array and their experimental verification. In International Journal of ENERGY AND ENVIRONMENT. Volume 1, Issue 3, pp. 487-500.
- [2] A. bilsalam, J. Haema, I. Boonyaroonate and V.Chunkag, 2011. Simulation and study of Photovoltaic cell Power Output Characteristics With Buck Converter Load. In 8th International Conference on Power Electronic-ECCE Asia, The Shilla Jeju, Korea, May 30-June 3, pp. 3033-3036.
- [3] Pilin Junsangsrri and Fabrizio Lombardi. 2010. Time/Temperature Degradation of Solar Cells under the Single Diode Model. In 25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 240-248.
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt. 2005. Model of Photovoltaic Module in MatlabTM. In II CIBELEC .
- [5] Huan-Liang Tsai, Gi-Siang Tu, and Yi-Jie Su. 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCEC. san Francisco, USA, October 22-24.
- [6] Qingrong Zeng, Pinggang Song and Liuchen Chang . 2002. A PHOTOVOLTAIC SIMULATOR BASED ON DC CHOPPER. In Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. pp.257-261.
- [7] Huan-Liang Tsai. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. In H.-L. Tsai / Solar Energy 84 (2010) 1318–1326.



ค.3 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ ฟัซซี่ ลอจิก ชนิดทันเวลา
(Real-time Photovoltaic Simulator using PID and Fuzzy Logic Control)

**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7**
The 7th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-7)

"ตามรอยพ่อ ถ่ายทอดวิถีต้นแบบ พลังงานทดแทนสู่ชุมชน"

ผลงานทางวิชาการ 7 สาขา
CP ไฟฟ้าชุมชน
CT ความร้อนชุมชน
CF เชื้อเพลิงชุมชน
ES การประหยัดพลังงาน
EN สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน
IR นวัตกรรมพลังงานทดแทน
EM การจัดการพลังงานในชุมชน

RMUTR

12-14 พฤศจิกายน 2557
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย กำหนดให้มีการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 (The 7th Thailand Renewable Energy for Conference: TREC-7) ระหว่างวันที่ 12 – 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่แวดวงวิชาการ และแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ด้านการวิจัย อีกทั้งเป็นการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยร่วมกับเครือข่ายการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภายนอก

ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนี้

1. คณะกรรมการอำนวยการ ประกอบด้วย

- | | |
|--|---------------------|
| 1. อธิการบดี | ประธานกรรมการ |
| 2. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย | กรรมการ |
| 3. นายกลสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| 4. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ | กรรมการ |
| 5. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย | กรรมการ |
| 6. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา | กรรมการและเลขานุการ |
| 7. รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาฝ่ายส่งเสริมงานวิจัย | ผู้ช่วยเลขานุการ |

2. คณะกรรมการพิจารณาบทความ ประกอบด้วย

- | | | | |
|-----|-----------------|----------------|------------------------------------|
| 1. | รศ.ดร.สิงห์ทอง | พัฒนเศรษฐนันท์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 2. | รศ.ทัศนีย์ | สิงห์เจริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 3. | ผศ.ดร.เกษมชนม์ | ภูมิภักดีพิชญ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 4. | ผศ.ดร.บุญยั้ง | ปลั่งกลาง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 5. | ผศ.ดร.บุญยฤทธิ | ประสาทแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 6. | ผศ.ดร.พัฒนาพล | มีนา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 7. | ผศ.ดร.วารุณี | อริยวิริยนันท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 8. | ผศ.ดร.วิรัชชัย | โรบนรินทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 9. | ผศ.ดร.สรพงษ์ | ภาสุปรีดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 10. | ผศ.ดร.สุรจิตร์ | พระเมือง | มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย |
| 11. | ผศ.ดร.จักษิ | ศรีนนท์ฉัตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 12. | ผศ.ดร.อำนาจ | เรืองวารีย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 13. | ผศ.ดร.บัณฑิต | กฤตาคม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 14. | ผศ.ดร.เจนศักดิ์ | เอกบูรณะวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 15. | ผศ.ดร.วิทยา | พวงสมบัติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 16. | ผศ.ดร.กนกอร | หัสโรค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |

17. ผศ.ดร.โลรัตน์	มงคลมะไฟ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
18. ดร.สำเนียง	องสุพันธ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
19. ดร.สันติ	ไทยยีนวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
20. ดร.กิตติศักดิ์	วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
21. ดร.จักรกฤษ	ศรีละออ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
22. ดร.ธนิต	เรืองรุ่งชัยกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
23. ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
24. ดร.พิสิษฎ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
25. ดร.มนต์ชัย	พินิจจิตรสมุทร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
26. ดร.รวิภา	ยงประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
27. ดร.วรจิตต์	เศรษฐพรรค	สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
28. ดร.วราจิต	พยอม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
29. ดร.ศักดิ์ชาย	เพ็ชรตรา	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
30. ดร.ศุภกิจ	รวศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
31. ดร.สัทธยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
32. ดร.สุรชัย	จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
33. ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
34. ดร.อำพล	อภาธนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
35. ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
36. ดร.ประสพโชค	ให้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
37. ดร.มนตรี	สมตุลยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
38. ดร.ฐปณี	รัตนถาวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
39. อาจารย์วราคม	วงศ์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
40. อาจารย์อดิสร	ถมยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
41. อาจารย์บัญญัติ	นิยมवास	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
42. อาจารย์วุฒิศาสตร์	โชคเกื้อ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
43. อาจารย์สิทธิ์ชัย	บุญปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญ

สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน (IR)			หน้า
O-IR01	การออกแบบและติดตั้งระบบเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับบ้านลอยน้ำในประเทศไทย	กฤษกร กุศล ฌ อญญา	476
O-IR02	เครื่องต้นน้ำแบบเหนี่ยวนำ	เพชร หลงสมบุญ	483
O-IR03	เครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	กฤษฎา ทองงาม	490
O-IR04	การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบโมังค์ลมที่มีแผงรับรังสีสองชั้นสำหรับอบแห้งมันฝรั่ง	ณัฐพล ศรีสิทธิ์โคกกุล	496
O-IR05	การอบแห้งใบเตยหอมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม	กิริติ เกิดศิริ	502
O-IR06	ปั๊มลมไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้แหล่งจ่าย 2 ระบบ	จักรวัฒน์ สักใจ	507
O-IR07	แบบจำลองความเข้มแสงของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	ธีรภัทร ทวีวงศ์	514
O-IR08	คุณลักษณะจำเพาะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีการเติมธาตุบุกบนท่ออะลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์	อวัช สุวีระงษ์	521
O-IR09	การเชื่อมต่อโลหะโดยใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ	ชัยรัตน์ หงษ์ทอง	527
O-IR10	การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ พีซีซี ลอยจิกชนิดทันเวลา	มาลี ทัศนชัย	533
O-IR11	นวัตกรรมการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้ง	กรกฎ นิยมสัจย์	539
O-IR12	การพัฒนาโรงอบแห้งสับปะรดโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์รวม	อัญชมา อุประกุล	545
O-IR13	การพัฒนาห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กเพื่อใช้อบแห้งในวิสาหกิจชุมชน	ปรีชา ศรีประกาศการ	549
O-IR14	การสังเคราะห์และที่สุกนเอกลักษณะสารอินทรีย์ชนิดใหม่เพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	เทอดเกียรติ แก้วทอง	553
O-IR15	การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองห้องนำแสงสว่างใช้กับอาคาร	รณกร เทพวงษ์	558
O-IR16	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อม	ธนศ โขยชนะ	565
O-IR17	การออกแบบตู้อบแห้งข้าวแต๋นแบบลดขนาดเล็กสำหรับวิสาหกิจชุมชนโดยใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง	ภัคดี สิทธิฤทธิ์กวี	571
O-IR18	การศึกษาการใช้ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์	รุ่งเพชร ก่องนอก	577
O-IR19	Solar Concrete Wall Collector	V. Veng	584
O-IR20	การพัฒนาเครื่องเติมอากาศพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	นิธิตัน ชูสกุล	592
O-IR21	การสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ ขนาดกำลังการผลิตไม่ต่ำกว่า 4,000 วัตต์ จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบซิงโครนัสที่เหลือทิ้ง	ชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล	598
O-IR22	Smart Solar Farm Concept and Implementation for Improving Photovoltaic Power Generation	Chanwit Boonchuy	605
O-IR23	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งมะเดื่อฝรั่งแบบใช้ปั๊มความร้อน	ศรีธร อุปคำ	612
O-IR24	การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการสันดาป	จูไรรัตน์จินดา อรรถนิตย์	620
O-IR25	การผลิตกำลังจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลด้วยระบบคอมพิวเตอร์	พงษ์ศักดิ์ คงชน	626
O-IR26	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก	โชติวัฒน์ ศุภรัตนกุล	634
O-IR27	การศึกษาเชิงทดลองหัตถ์กับกังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมพิทช์ได้ด้วยกลไกแบบ 4 ชั้น	ไมตรี พลสงคราม	642
O-IR28	ผลกระทบของสภาวะการทำงานและมุมใบกังหันที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลมอุปวีง	กิตติ นิลมิ่ง	650
O-IR29	การศึกษาวิเคราะห์การทำงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW โดยโปรแกรม MATLAB	ชวลิต เท็งสุกุล	656
O-IR30	การผลิตด้านและน้ำส้มควินไม้ด้วยระบบไฟโรไลซิสชนิดแก๊สหมุนวนปิด	ปรีชา ชันติโกมล	663
P-IR31	เครื่องคัดแยกและนับผลมะนาวแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน	สุรินทร์ แหมงงาม	669
P-IR32	พลังงานทดแทนสำหรับการใช้งานเอนกประสงค์	นุกูล สุวรรณชาติ	675
P-IR33	การพัฒนาเครื่องดูดและหัวดูดปฏิกลจากบ่อปลาเรนโบว์เทราท์	ศรีธร อุปคำ	683
P-IR34	เครื่องผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยหลักการของ PWM	เลรี ชีนอารมย์	690
P-IR35	การทดสอบประสิทธิภาพและผลกระทบต่อลักษณะปลายใบกึ่งหันลมในท่อโมังค์ขนาดเล็ก	ชาคริต จินลอย	



การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการป้อนกลับแบบ พี ไอ ดี และ ฟัซซี่ ลอจิก ชนิดทันเวลา
Real-time Photovoltaic Simulator using PID and Fuzzy Logic Control

มาลี พันธ์ช่วย^{1*} และ วันชัย ทรัพย์สิงห์¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

E-mail: lee_eei@hotmail.com; wanchai.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม เป็นต้น โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ ทั้งนี้บทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณากราฟคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการป้อนกลับสามารถใช้งานได้ทั้งแบบ PID Control และ Fuzzy Logic Control

คำสำคัญ: ค่าความเข้มแสง, ค่าอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม

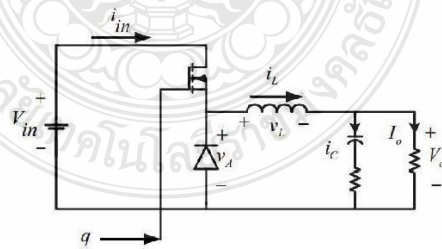
1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน คือพลังงานไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ยังไม่คงที่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบจำลองเชิงปฏิบัติแบบทันเวลา (Real-Time PV Simulator) โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบวงจรทอนแรงดัน (DC Buck Converter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับ บทความนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณากราฟคุณลักษณะต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงพิจารณาวิธีการควบคุมป้อนกลับของระบบจำลองเพื่อให้ได้กราฟคุณสมบัติในการทำงานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน

วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง หรือวงจร Buck Converter เป็นวงจรที่ให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าต่ำกว่าแรงดันขาเข้า หรือ กระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่ากระแสขาเข้า และเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกมีการกระพือจากสัญญาณควบคุม ตัวเก็บประจุซึ่งต่ออยู่กับโหลดจะเป็นตัวลดแรงดันกระพือที่ขาออก เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนและเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเป็นไปตรงมากๆ ลักษณะของวงจรทอนระดับแรงดัน และการทำงานเป็นดังภาพ



รูปที่ 1 วงจรทอนระดับแรงดัน

สมการคำนวณค่าตัวชี้เซลล์ได้จาก



$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \tag{1}$$

สมการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็ก(L_{min}) ได้จาก

$$L_{min} = \frac{(1-D) \cdot R}{2f} \tag{2}$$

สมการคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่น ได้จาก

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \tag{3}$$

1.2 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบฟีดแบ็ค

วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 วิธีคือ

1.2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (open Loop Control system) เป็นการใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา

1.2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System) จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็ได้ว่าค่าเอาท์พุทของระบบเป็นไปตามต้องการ โดยการเลือกใช้เลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม

1.2.3 การควบคุมแบบ พี ไอ ดี หรือ PID controller แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ

1.2.3.1 Proportional model of Control (P-control) หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน โดยการเพิ่มค่าอัตราขยาย (Gain) ให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำได้ผลการตอบสนองที่ไวขึ้น

1.2.3.2 Integral Mode of Control (I-Control) หรือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสม และสามารถขจัด steady state error ได้

1.2.3.3 Derivative Mode of Control (D-Control) หรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ในระบบวงปิด ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

1.2.3.4 การปรับแต่ง parameters ของ P, PI หรือ PID มี 2 ลักษณะดังนี้

Open Loop จะได้ว่าค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	1/RL	---	---
PI	0.9/RL	L/0.3	---
PID	1.2/RL	2L	0.5L

Closed Loop จะได้ว่าค่าของตัวควบคุม P, PI, PID ตามตาราง

	Kp	Ti	Td
P	0.5/Kcr	---	---
PI	0.45/Kcr	1/1.2Pcr	---
PID	0.6/Kcr	0.5Pcr	0.125Pcr

Kcr: Critical Gain หรือ Ultimate Gain : Ku

จาก PID Transfer function ค่าดังควบคุมที่ใช้ในการปรับระบบของการจำลองนี้คือ

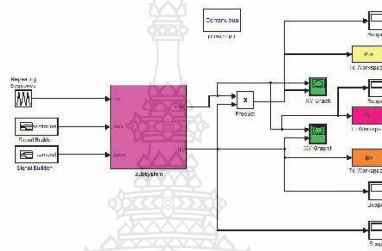
Kp=0.2; Ki=0.5; Kd=0.3



3. การทดสอบ

ทำการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยสัญญาณควบคุมจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนะล็อกไปสู่วงจรสร้างสัญญาณแบบ PWM ได้ค่าตัวชี้เซลล์เพื่อนำไปขับเคลื่อนการทำงานของ IGBT ในวงจรทอนระดับแรงดันให้ได้ค่าคุณลักษณะของกระแส แรงดัน เป็นไปตามการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบในส่วนของซอฟต์แวร์ โดยโครงสร้างงานวิจัยชิ้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนคือวงจรทอนระดับแรงดันที่มีการทำงานเชื่อมต่อการดิ้นเตอร์เฟส เพื่อนำไปสู่การสร้างสัญญาณจริงที่เหมาะสมในการทดสอบการจ่ายโหลด ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทั้งหมดดังรูปที่ 3

3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

แรงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำลองได้โดยสมการไดโอดในอุดมคติ ดังสมการ (4)

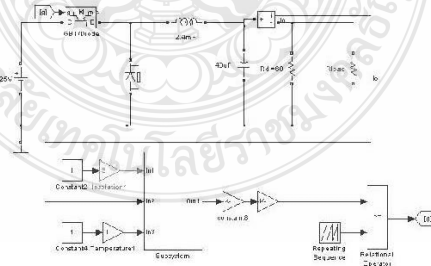
$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + I \cdot R_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (4)$$

ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์ ได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการ (5)

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_t (T - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (5)$$

ผลกระทบจากอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้น สามารถเขียนได้ดังสมการ (6)

$$I = I_s (T) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (6)$$



รูปที่ 3 แรงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองใช้หลักการของวงจรทอนระดับแรงดัน

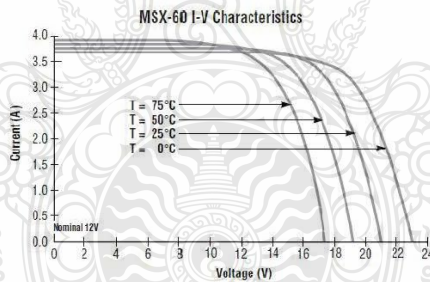


Typical Electrical Characteristics of Photovoltaic Modules Solarex model MSX60	
Electrical Characteristics	Specification
Maximum power (Pmax)	60 W
Voltage @ Pmax (Vmp)	17.1V
Current @ Pmax (Imp)	3.5A
Guaranteed minimum Pmax	58W
Short-circuit current (Isc)	3.8A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	-(80±10)mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current	(0.065±0.015)%/°C
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	47±2°C

3.2 ออกแบบและสร้างวงจรทอนระดับแรงดัน โดยการนำกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองมาเป็นตัวคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับแรงดัน

เชื่อมต้องจระเข้ากับวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะควบคุมค่าตัวดิโอะของสัญญาณพัลส์ซึ่งเกิดของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกโดยใช้การปรับค่าตัวดิโอะของสัญญาณพัลส์ซึ่งเกิดของไอซีบีที เพื่อให้การจ่ายกำลังของวงจรทอนระดับแรงดันไปตามคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

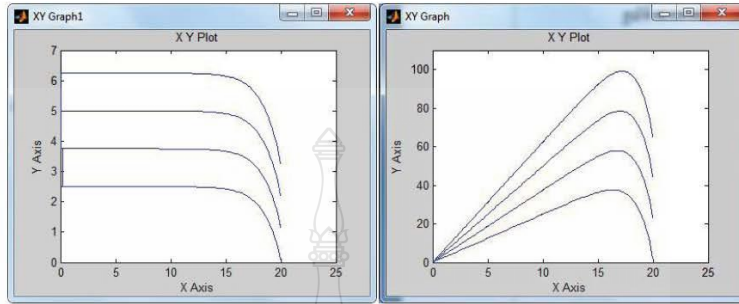
ทดสอบเปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิแตกต่างกันกับแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น MSX60

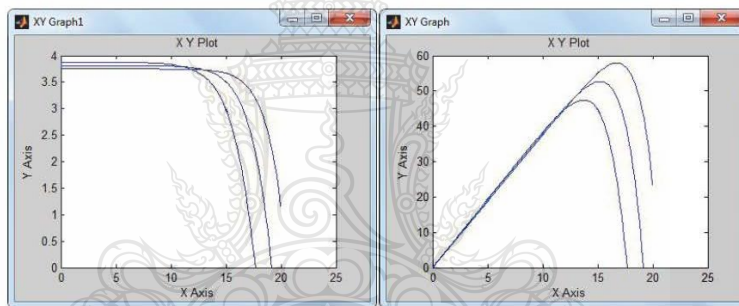


ผลการทดลอง ในรูปที่ 5 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5 กราฟ I-V curve เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มแสง และอุณหภูมิคงที่

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มแสงที่ได้ค่าความเปลี่ยนแปลงของกราฟคุณลักษณะของ p-v ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟ P-V curve เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

	MSX60	Simulations	Deviation	Target
Pmax (W)	60.0	57.9	3.5%	± 5%
Vmax (V)	21.1	20.0	5.2%	± 5%
Imax (A)	3.8	3.75	1.3%	± 5%

4. สรุปผล

จากการจำลองค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ และจำลองการทำงานด้วย MATLAB/Simulink เพื่อให้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ I-V curve ในการจำลองให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุดนั้น จากผลการจำลองนี้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับกราฟที่อ้างอิง เป็นที่พอใจ แต่ในงานวิจัยนี้ ส่วนการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในการพัฒนาการวิจัยต่อไป คือทำการจำลองการป้อนกลับด้วยวิธีผ่านชุด Hardware และใช้วิธีการป้อนกลับวิธีการอื่นมาเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้ผลจำลองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงมากที่สุด เช่น การนำ Fuzzy Logic Control มาใช้ เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] Hayrettin CAN "Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink" Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk.J Elec Eng & Comp Sci (2013) 21: 301 -308, 2013
- [2] M. Abdulkadir, A. S. Samsir and A. H. M. Yatim "MODELING AND SIMULATION BASED APPROACH OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN SIMULINK MODEL" ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 7, NO. 5, MAY 2012, pp 616-623
- [3] Samer Alsadi, Basim Alsayid "Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm" International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, Issue 6, December 2012, ISSN: 2277-3754, pp 80-85
- [4] Geoff Walker "EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL" pp
- [5] เดชนิตอร อิมปริดา, วันชัย ททรัพย์สิงห์ "Real-time Simulation using Mathematical model of Photovoltaic Cell/Module" การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, ENETT8-RE09 1/8-8/8, 2555
- [6] R.Raja, L.Udhaya kumar, S.Rakesh kumar "FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY SIMULATOR" R.Raja et al. / International Journal of Engineering and Technology (IJET), ISSN : 0975-4024, Vol 5 No 2, Apr-May 2013, pp 1625-1630



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวมาลี พัฒน์ช่วย
วัน เดือน ปีเกิด 5 สิงหาคม 2512
ที่อยู่ 264/122 หมู่ที่ 1 ตำบลลำผักกูด อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2543
ประวัติการทำงาน ผู้ช่วยผู้จัดการ TUV SUD (THAILAND) LIMITED พ.ศ. 2546 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 081 268 9596
อีเมล lee_eei@hotmail.com

