

การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยใช้โมเดลการควบคุม
แบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

THE CONTROL OF THREE PHASE INVERTER
USING PREDICTIVE CURRENT CONTROL MODEL

เฉลิม จินาทุน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

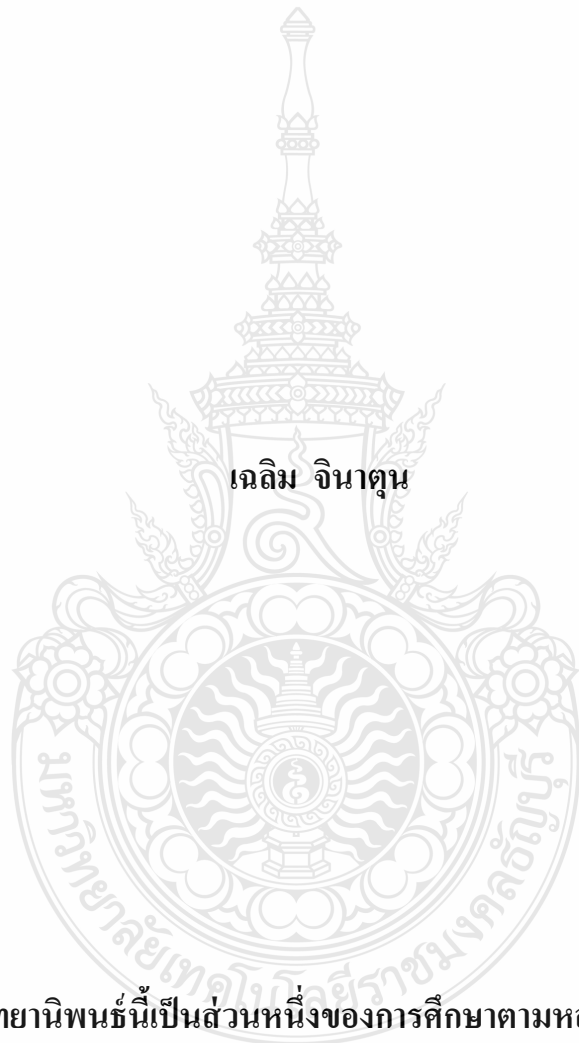
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยใช้โมเดลการควบคุม
แบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



เฉลิม จินาคุน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยใช้โมเดลการควบคุม
แบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า
The Control of Three Phase Inverter
Using Predictive Current Control Model


ชื่อ - นามสกุล นายเฉลิม จินาคุน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.

ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

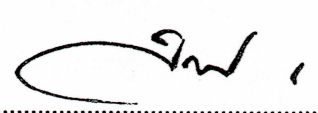

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์ เกตุจ้อย, Dr.-Ing.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยใช้โมเดลการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า
ชื่อ - นามสกุล	นายเฉลิม จินาคุน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ การควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส โดยใช้โมเดลการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ โดยมีหลักการสร้างอัลกอริทึมเพื่อควบคุมการทำงานโดยการวัดสัญญาณกระแส พร้อมประมวลผลและทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาถัดไป (+1) ทั้งนี้โดยการทดสอบการทำงานด้วยระบบจำลองร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink จะนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อสร้างตัวควบคุมต้นแบบโดยการประยุกต์ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery

การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ที่ความถี่ขาออก 50 Hz โดยความถี่สวิตช์ที่ 1,600 Hz สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าขาออก 3 เฟส ผ่านชุดกรองความถี่แบบ Low-Pass filter ซึ่งมี L ขนาด 10 mH และ R ขนาด 0.5 Ω ทั้งนี้ระบบได้รับการทดสอบกับโหลดที่พิกัดไม่เกิน 1 kW

ผลการจำลองระบบ กระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าความเพี้ยน (THD) น้อยกว่า 5% ที่ขนาดกระแสขาออกโดยประมาณ 5 แอมแปร์ ขณะขับโหลดสูงสุดไม่เกิน 1 kW ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 98 % อย่างไรก็ตามในเชิงปฏิบัติวงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงการมีประสิทธิภาพที่พอใช้ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีค่า 81.6 % ค่าความเพี้ยน (THD) ขณะปฏิบัติ 4.364%

คำสำคัญ: การควบคุมแบบทำนายค่ากระแส อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ
ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

Thesis Title	The Control of Three Phase Inverter Using Predictive Current Control Model
Name – Surname	Mr. Chalerm Jinatun
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

This research aimed to present the control of the three phase voltage source inverter using Predictive Current Control Model to control a three phase two level inverter. The algorithm of MPC control scheme was done to measure the simultaneous current signal including predicting the next sampling current flow ($t + 1$). This concept was experimented by using MATLAB/Simulink software package. This would result in the implement of STM32F4Discovery microcontroller board construction.

The simulation model operated by MATLAB/Simulink showed the operational system of 3-phase 2-level inverter with the output frequency of 50 Hz controlled by the switching frequency at 1,600 Hz. The simulation model also produced the output voltage through the Low-Pass filter in which L was 10 mH and R was 0.5 Ω . The model was experimented by RL load with ≤ 1 kW.

The simulation result showed that the output current of 5 A with the 1 kW rate load had the THD_i less than 5%. That meant it had 98% efficiency. However, the practical use of inverter showed the maximum efficiency at 81.6 % with 4.364% THD_i.

Keywords: predictive current control, three phase two level inverter, microcontroller board

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง และข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์และคณะกรรมการสอบเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจน เพื่อนและรุ่นพี่คณะวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และวิธีการในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานค้นคว้าฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจศึกษา หากวิทยานิพนธ์นี้บกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เฉลิม จินาตุน

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.....	15
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	15
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	16
1.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	16
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ.....	18
2.2 ทฤษฎีการแปลงแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	22
2.3 เทคนิควิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive Current Control).....	26
2.4 ระบบควบคุมของหน่วยประมวลผลกลาง.....	30
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 หลักการทำงานของโครงการวิจัยโดยสังเขป.....	42
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	44
3.3 สมการเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน.....	45
3.4 การแปลงแกนและการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง.....	48
3.5 สมการแบบจำลองโหลดและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ.....	52
3.6 Predictive Current Control : MPC	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 ผลการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์	58
3.8 สมการและค่า THD ของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	64
3.9 การออกแบบระบบกำลังและระบบควบคุมในงานวิจัย	66
บทที่ 4 ผลการวิจัย	85
4.1 ผลการทดลองการทำงานด้านฮาร์ดแวร์.....	86
4.2 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้ากับโหลดความต้านทานคงที่	92
4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องต้นแบบและแบบจำลองด้วย MATLAB/Simulink.....	96
บทที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	97
5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	121

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สถานะการสวิตช์และสมการเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุต	21
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์การสร้างสัญญาณขั้วเกิดและเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้า	47
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	58
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลองกับเครื่องต้นแบบ.....	86
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ.....	96



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างรวมของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์.....	15
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	19
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลจากสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง.....	20
รูปที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าบนแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ.....	21
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของระบบการแปลงแกน.....	22
รูปที่ 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์การแปลงแกน $abc - \alpha\beta$	23
รูปที่ 2.6 ผลลัพธ์การแปลงแกน $abc - \alpha\beta$	23
รูปที่ 2.7 แบบจำลองการแปลงแกน $abc - dq$	24
รูปที่ 2.8 ผลลัพธ์การแปลงแกน $abc - dq$	24
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมการแปลงรูปสัญญาณ.....	25
รูปที่ 2.10 ผลลัพธ์การแปลงสัญญาณ $\alpha\beta$ เป็นสัญญาณ 3 เฟส abc	26
รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมแบบทำนายค่า	26
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์.....	28
รูปที่ 2.13 บอร์ดประมวลผล STM32F4 Discovery	31
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมทางด้านฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผล STM32F4Discovery.....	32
รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมหน่วยประมวลผลการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG.....	33
รูปที่ 2.16 หน้าต่างโปรแกรม STM32 ST-LINK Utility กับ ST-LINK ฮาร์ดแวร์.....	34
รูปที่ 2.17 STM32 ST-LINK Utility ติดต่อสื่อสารกับ STM32F4Discovery บอร์ด	35
รูปที่ 2.18 การอัปเดตเฟิร์มแวร์ให้กับ ST-LINK Hardware	35
รูปที่ 2.19 ลิงค์ดาวน์โหลดโปรแกรม Waijung Blockset	36
รูปที่ 2.20 การติดตั้ง Waijung Blockset ใน MATLAB/Simulink.....	37
รูปที่ 2.21 หน้าต่างแสดงสถานะการติดตั้ง Waijung Blockset ที่เสร็จสมบูรณ์.....	37
รูปที่ 2.22 Waijung Blockset ได้ดำเนินการติดตั้งลงในไลบรารีของ Simulink.....	38
รูปที่ 3.1 โครงสร้างแสดงส่วนประกอบงานวิจัย.....	41
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมควบคุมการทำงานแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

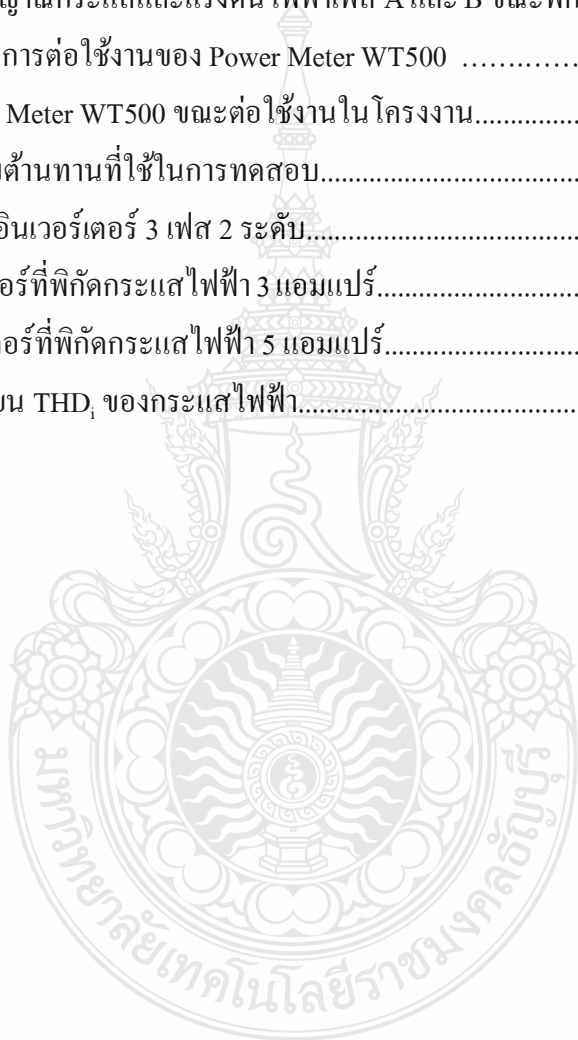
	หน้า
รูปที่ 3.3 แนวคิดสมการที่ใช้ในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า.....	43
รูปที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย	44
รูปที่ 3.5 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน	45
รูปที่ 3.6 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน	46
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแรงดันเอาต์พุต 3 เฟส ของอินเวอร์เตอร์	47
รูปที่ 3.8 แบบจำลองการแปลงแกน abc เป็นสัญญาณ $\alpha\beta$	50
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสัญญาณจาก abc เป็นสัญญาณ $\alpha\beta$	50
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง	51
รูปที่ 3.11 เอาต์พุตแบบจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่และการแปลงแกน	52
รูปที่ 3.12 หลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า	54
รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมการทำงานของแบบจำลองการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	55
รูปที่ 3.14 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสสองระดับ	59
รูปที่ 3.15 อัลกอริทึมการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	60
รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก	61
รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟสของอินเวอร์เตอร์	61
รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมเกต	63
รูปที่ 3.19 ผลการวัดเอาต์พุตสัญญาณค่าความถี่ฮาร์มอนิกกระแสไฟฟ้า.....	65
รูปที่ 3.20 ผลการวัดเอาต์พุตสัญญาณค่าความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า.....	65
รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออก.....	66
รูปที่ 3.22 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า LA25-NP	67
รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมการต่อวงจรของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า	67
รูปที่ 3.24 วงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณกระแสไฟฟ้า	68
รูปที่ 3.25 ผลลัพธ์การปรับขนาดและยกระดับสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	70
รูปที่ 3.26 วงจรภาคตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส	70
รูปที่ 3.27 การอินเตอร์เฟสบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery	71
รูปที่ 3.28 บล็อกไดอะแกรมภาครับสัญญาณอินพุต	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.29 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	72
รูปที่ 3.30 วงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX	73
รูปที่ 3.31 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX	74
รูปที่ 3.32 บอร์ดอินเวอร์เตอร์ STK554U3XX	74
รูปที่ 3.33 วงจรสมมูลภายในของวงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX	75
รูปที่ 3.34 วงจรการต่อใช้งาน วงจรรวม STK554U3xx	76
รูปที่ 3.35 ตำแหน่งขั้ววงจรรวม STK554U3xx	76
รูปที่ 3.36 ไดอะแกรมการทำงานรวมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส	77
รูปที่ 3.37 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	78
รูปที่ 3.38 รายละเอียดคุณสมบัติวงจรรวม STK554U3xx	79
รูปที่ 3.39 วงจรสมมูลการต่อใช้งานบอร์ดวงจรรวม STK554U3xx	79
รูปที่ 3.40 อุปกรณ์กรองสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออก.....	80
รูปที่ 3.41 ภาคการตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบ	81
รูปที่ 3.42 โหลดความต้านทานไฟฟ้า	81
รูปที่ 3.43 ส่วนประกอบของวงจรฮาร์ดแวร์การควบคุม.....	82
รูปที่ 3.44 หน้าต่างการติดตั้งซอฟต์แวร์ด้วย Waijung Track Build Process	83
รูปที่ 3.45 การทดสอบการควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	84
รูปที่ 3.46 การทดสอบขณะมีภาระ โหลดที่พิกัด.....	84
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงตำแหน่งการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า.....	85
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากไดอะแกรมการทำงานรวมของระบบ	86
รูปที่ 4.3 สัญญาณขั้วเกิด	87
รูปที่ 4.4 Dead time ของสัญญาณขั้วเกิด	87
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเฟสของอินเวอร์เตอร์	88
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไลน์ของอินเวอร์เตอร์	88
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A และเฟส B ขณะ $i_{ref} = 2 A$	89
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส A และเฟส B ขณะ $i_{ref} = 2 A$	89

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A และเฟส B ขณะพิกัดกระแสโหลด 3 A.....	90
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B ขณะพิกัดกระแสโหลด 2 A	90
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B ขณะพิกัดกระแสโหลด 3 A	91
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมการต่อใช้งานของ Power Meter WT500	92
รูปที่ 4.13 ภาพ Power Meter WT500 ขณะต่อใช้งานในโรงงาน.....	92
รูปที่ 4.14 โหลดความต้านทานที่ใช้ในการทดสอบ.....	93
รูปที่ 4.15 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ.....	93
รูปที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์.....	94
รูปที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	94
รูปที่ 4.18 ค่าความเพี้ยน THD _i ของกระแสไฟฟ้า.....	95



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

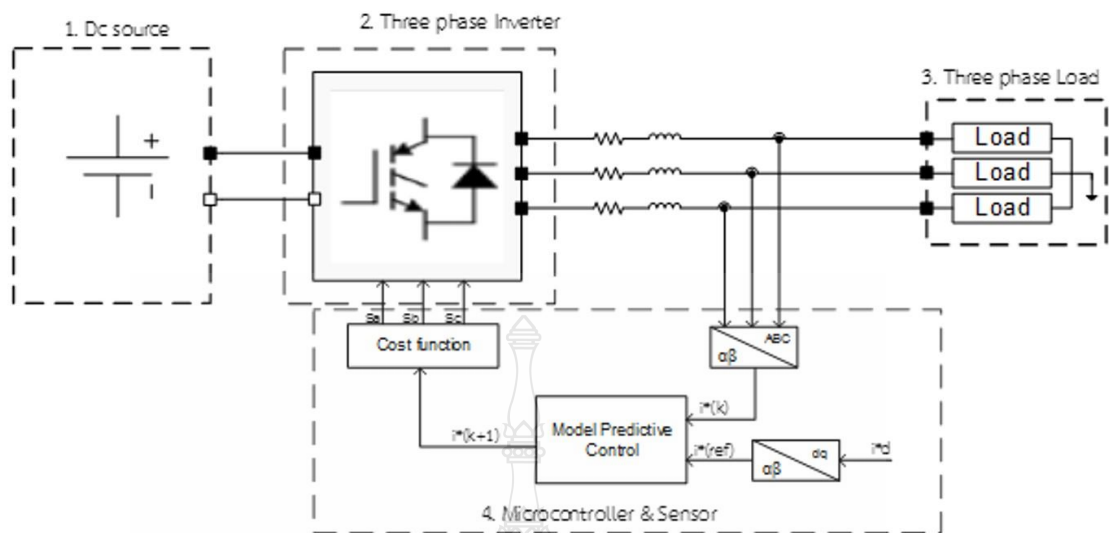
อุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในงานควบคุมทั่วไป และสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลม หรืออื่นๆ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าทางเลือกที่กำลังเป็นที่นิยม และมีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ระดับร้อยวัตต์ถึงระดับเมกะวัตต์ [1] การทำงานหลักที่สำคัญของระบบพลังงานทดแทนก็คือ อุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้า หรือ อินเวอร์เตอร์ มีความจำเป็นและเป็นตัวกลางสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ อย่างเช่นอุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้า (Voltage source current control inverter : VSCCI) สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี [2] คือ การควบคุมแบบ Hysteresis , การควบคุมแบบ Ramp comparison และ การควบคุมแบบ Predictive current control ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ต่างมีข้อได้เปรียบที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคการควบคุมร่วมกับเทคโนโลยีทางการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing) ที่มีความสามารถในการประมวลผลที่รวดเร็ว เทคนิควิธีการการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากการคำนวณล่วงหน้ามีความแม่นยำในการประมวลผลการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากระบบที่วัดได้ สามารถสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีความรวดเร็วแม่นยำมากยิ่งขึ้น

การนำเสนอระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสามเฟส โดยระบบควบคุมด้วยเทคนิควิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าร่วมกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ที่มีความสามารถในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า [3] สามารถควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแสจากระบบ เพื่อทำการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาล่วงหน้าของระบบจากการทำการวัด และคำนวณหาพารามิเตอร์ของกระแสไฟฟ้าที่เวลา $t+1$ เพื่อทำการประมาณค่าจากเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ในแต่ละเวกเตอร์ที่มีแรงดันเอาท์พุทที่แตกต่างกันจนครบทุกเวกเตอร์ และสร้างสัญญาณสวิตซ์ให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่มีสวิตช์และถูกต้องเหมาะสมกับระบบการทำงานตรงตามสถานะของการทำงานที่ถูกต้องตรงกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องจากการคำนวณ เหมาะสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจากการศึกษาพบว่าเทคนิคและวิธีการควบคุมแบบทำนายค่าล่วงหน้า มีความยุ่งยาก

ในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ใช้งานจริง เป็นภาระในการคำนวณเพื่อทำนายค่าลู่หน้าของตัวประมวลผลที่ต้องใช้ความรวดเร็วในการทำงาน ประสิทธิภาพได้ไม่ดิ่งนักหากมีการเปลี่ยนของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้นำมาคำนวณของระบบ และใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่สูง เพื่อทำนายค่าและควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า [4] แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการวัดและประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มีการนำเทคนิคและวิธีการคำนวณทำนายค่ากระแสไฟฟ้ามารวมกับ การควบคุมการขับเคลื่อนไฟฟ้า การแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน ด้วยวิธีการที่ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ทำให้ผลตอบสนองที่ได้เป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง [5]-[10] โดยนำเสนอข้อดีในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ควบคุมระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าแบบทางตรง (Direct torque control : DTC) [11] , ควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า หรือควบคุมแบบทางอ้อม (Field oriented control : FOC) [12] , อินเวอร์เตอร์หลายระดับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid connected inverter) [13]-[15] เทคนิคและวิธีการคำนวณการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า จึงเป็นสิ่งที่มีความน่าสนใจในจุดเด่นของการควบคุมดังกล่าว

จากข้อดีของระบบควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่อธิบายไว้ในขั้นต้น การให้ความสนใจในการพัฒนาเทคนิคการควบคุมมาประยุกต์ใช้งาน และเพื่อควมมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมและแนวโน้มในการใช้งานมากขึ้น ด้วยการศึกษาเทคนิคการควบคุม เพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้าลู่หน้าด้วยอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับควบคุม อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน เพื่อให้สามารถลดความยุ่งยากที่จะช่วยเติมเต็มการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน [16] โดยมีการทำงานในการตอบสนองของระบบโดยรวม ภายใต้สภาวะของระบบที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และให้ผลตอบสนองการทำงานที่รวดเร็ว

จากรูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างรวมของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสามเฟสสองระดับแรงดันที่เพื่อนำเสนอการศึกษาการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน ด้วยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการศึกษาทดลอง และสร้างอุปกรณ์ต้นแบบจากการจำลองการทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery และ Waijung Blockset สำหรับใช้ในการทดสอบระบบควบคุมที่ทำการศึกษาออกแบบ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างรวมของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ความถี่ขาออก 50 เฮิรตซ์ พิกัดกระแสไม่เกิน 3 แอมแปร์ ด้วยหลักการทำงานนำค่ากระแส

1.2.2 เพื่อศึกษา และออกแบบการประยุกต์ใช้งานตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ด้วยวิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การศึกษาและสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน โดยใช้วิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าด้วยบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery ร่วมกับ Waijung Blockset ลดความยุ่งยากซับซ้อน ในการประยุกต์ใช้งานของระบบการควบคุม โดยหลักการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันเพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาถัดไป ($t+1$) โดยฟังก์ชันการหาค่าสัมบูรณ์จากความแตกต่างของกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และ

สามารถใช้ในการกำหนดตำแหน่งสถานะของการทำงานของสวิตซ์ที่เหมาะสมให้กับอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงานได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 จำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบทำนายค่า โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบกับโหลด มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าไม่เกิน 200 โวลต์ 5 A

1.4.2 ออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ขนาดพิกัดกำลัง 1 kW ด้วยวิธีการควบคุมกระแสแบบทำนายค่า โดยการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด STM32F4Discovery

1.4.3 วัดและทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ร่วมกับโหลด RL ขนาดพิกัดไม่เกิน 1 kW

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

1.5.2 ออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ร่วมกับวิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.5.3 วัดรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุทกระแสและแรงดันไฟฟ้า จากเทคนิคการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

1.5.4 สร้างเครื่องต้นแบบ (Prototype) วงจรตรวจวัดสัญญาณอินพุท อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และศึกษาการควบคุมอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ

1.5.5 ทดลอง ตรวจวัดสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส รูปคลื่นสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับและทดลองการต่อโหลดทดลอง

1.5.6 สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ศึกษาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ด้วยวิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

1.6.2 ได้ทำการศึกษาและทำการทดสอบการประยุกต์ใช้งานการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด STM32F4 Discovery

1.6.3 ได้ทดสอบการทำงานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ด้วยโหลด RL ที่มีขนาดพิกัดไม่เกิน 1 kW



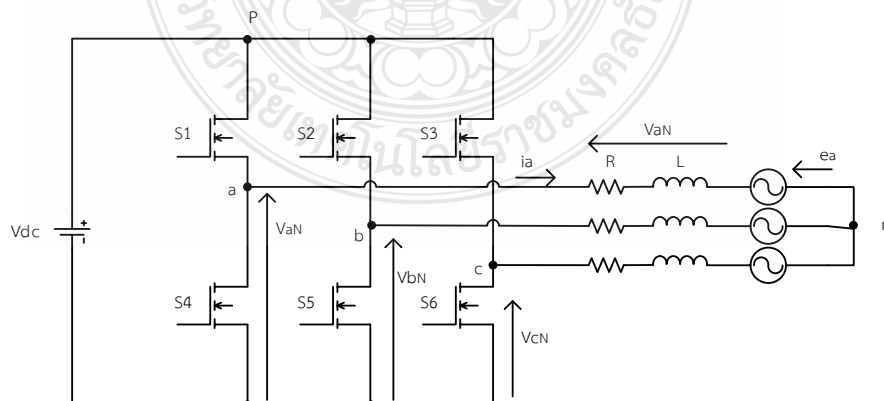
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ออกแบบและทำการทดลอง ทั้งในส่วนของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ทำการทดลองกับอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับโหลดหรือภาระในระบบไฟฟ้าสามเฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า จากการสืบค้นงานวิจัยและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาและการออกแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

2.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ

การแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) หรือเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ สำหรับการใช้งานสามารถจำแนกได้เป็นกลุ่มงานตามลักษณะการใช้งานต่างเช่น งานขับเคลื่อนระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรม การเครื่องต้นกำลังสำหรับระบบขนส่งหรือการลำเลียง ด้านการปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลัง ด้านอุปกรณ์เครื่องใช้สำหรับที่พักอาศัย และด้านพลังงานทดแทน [17] เป็นต้น โดยมีลักษณะ โครงสร้างการทำงานของวงจรพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2 แสดงพื้นฐานการทำงานในเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง IGBT-Diode Bridge



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามเฟส แสดงดังรูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบไปด้วย สวิตช์กำลังจำนวน 6 ตัว แบ่งเป็นเฟสละ 2 ตัว ทำงานแบบตรงกันข้ามกันของในแต่ละเฟส เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรในขณะที่ทำงานของสวิตช์กำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์ซึ่งจะประกอบไปด้วย S1-S6 เมื่อ แทนการทำงานด้วยสมการต่อไปนี้

ถ้า

$$\begin{aligned} S_a &= \begin{cases} 1 & S_1 \text{ is On \& } S_4 \text{ is Off} \\ 0 & S_1 \text{ is Off \& } S_4 \text{ is On} \end{cases} \\ S_b &= \begin{cases} 1 & S_2 \text{ is On \& } S_5 \text{ is Off} \\ 0 & S_2 \text{ is Off \& } S_5 \text{ is On} \end{cases} \\ S_c &= \begin{cases} 1 & S_3 \text{ is On \& } S_6 \text{ is Off} \\ 0 & S_3 \text{ is Off \& } S_6 \text{ is On} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 สามารถกำหนดเอาต์พุตของแรงดัน ไฟฟ้าระหว่างเฟสกับนิวทรัล (phase to neutral) ได้เป็น

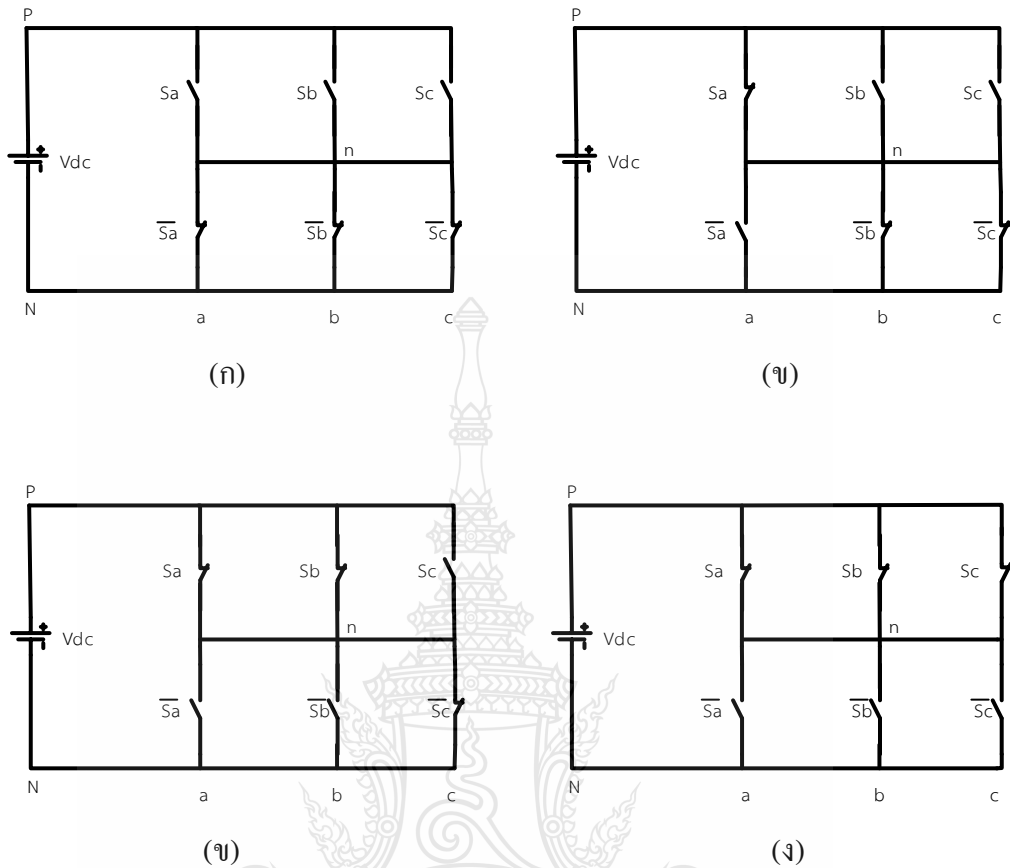
$$\begin{aligned} V_{aN} &= S_a V_{dc} \\ V_{bN} &= S_b V_{dc} \\ V_{cN} &= S_c V_{dc} \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ V_{dc} คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

จากสมการที่ 2.2 พิจารณาผลรวมของเวกเตอร์ของแรงดันเอาต์พุตจะได้เป็น

$$V = \frac{2}{3} (V_{aN} + aV_{bN} + a^2V_{cN}) \quad (2.3)$$

โดยที่ $a = e^{j2\pi/3}$ เนื่องจากมุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 120 องศา ทางไฟฟ้า จากสมการที่ 2.3 และสามารถแสดงวงจรสมมูลในการกำหนดค่าการสวิตซ์ซึ่งของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3 จากการกำหนดค่าสถานะของการทำงานของวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดันดังรูปที่ 2.2 (ก) – 3(ง)

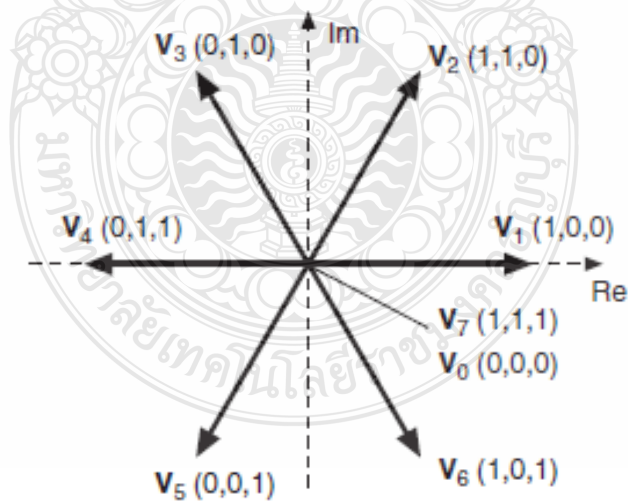


รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลจากสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง

จากรูปที่ 2.2 (ก) – 2.2 (ง) เป็นการกำหนดสถานะการทำงานของสวิตซ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แทนด้วยการทำงานแบบลอจิกมีสถานะเป็น (0,0,0) , (1,0,0) , (1,1,0) และ (1,1,1) ตามลำดับ ทำให้สามารถทราบสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งเราสามารถกำหนดลำดับขั้นตอนสถานะการทำงานของ สามารถสรุปสถานะของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและเวกเตอร์ของแรงดันแสดงตามตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.3 แสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าบนแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

ตารางที่ 2.1 สถานะการสวิตช์และสมการเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุต

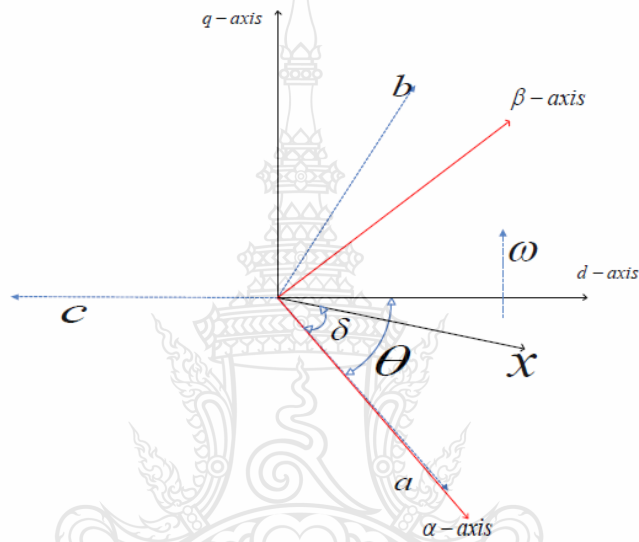
S_a	S_b	S_c	Voltage vector V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = (2/3)*V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = ((1/3)*V_{dc}) + (j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$
0	1	0	$V_3 = ((-1/3)*V_{dc}) + (j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$
0	1	1	$V_4 = (2/3)*V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = V_2 = ((1/3)*V_{dc}) - (j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$
1	0	1	$V_6 = V_3 = ((-1/3)*V_{dc}) - (j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$
1	1	1	$V_7 = 0$



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าบนแกนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ [13]

2.2 ทฤษฎีการแปลงแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ทฤษฎีการแปลงแกนประกอบไปด้วย การแปลงระบบพิกัด abc เป็นกรอบพิกัดอ้างอิง $\alpha\beta$ และการแปลงระบบพิกัด abc เป็นระบบพิกัดกรอบอ้างอิง dq เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการแปลงแกนเพื่อใช้ในการแปลงแกนค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง แรงดันไฟฟ้าของระบบที่ใช้ในการคำนวณ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.4 [18]

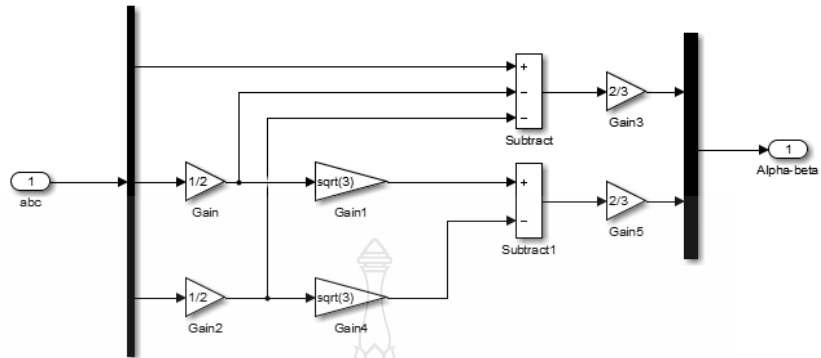


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของระบบการแปลงแกน

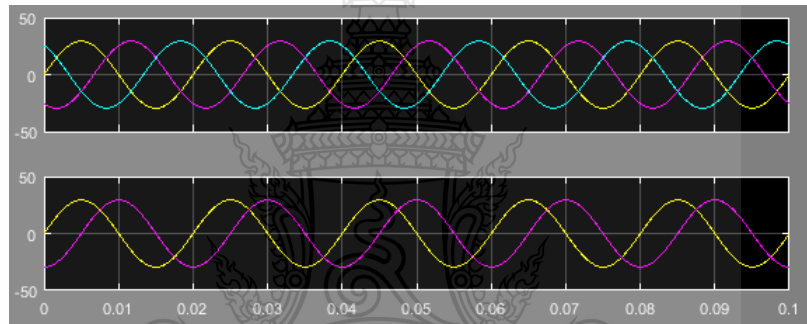
2.2.1 การแปลงแกน $\alpha\beta$ กำหนดให้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปในระบบสามเฟส $v_{abc} = [v_a v_b v_c]^T$ สามารถทำการแปลงแกนให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ $[v_d v_q]^T$ ของกรอบอ้างอิงแกนหมุน โดยเทคนิคการแปลงแกนด้วยทฤษฎี Clarke Transform ให้อยู่ในรูปแบบสองเฟสดังสมการที่ 4.12

$$v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} v_{abc} = T_{\alpha\beta} abc$$

(2.4)



รูปที่ 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์การแปลงแกน abc - $\alpha\beta$



รูปที่ 2.6 ผลลัพธ์การแปลงแกน abc - $\alpha\beta$

2.2.2 การแปลงแกน Park Transformation ให้อยู่ในรูปองค์ประกอบของไฟฟ้า กระแสตรงดังสมการ 2.5

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} = T_{dq} v_{\alpha\beta} \quad (2.5)$$

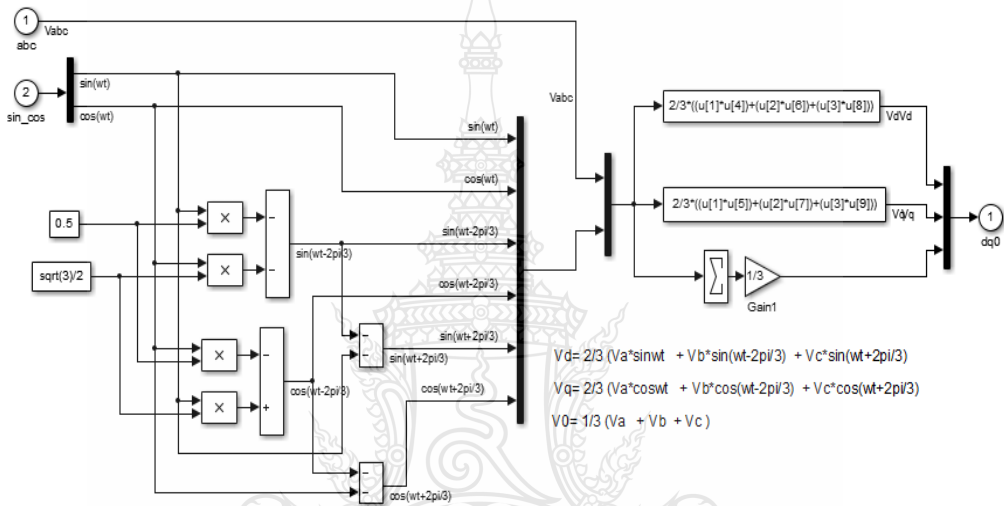
สำหรับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos \theta_g \\ E \cos \theta_g - \frac{2\pi}{3} \\ E \cos \theta_g + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

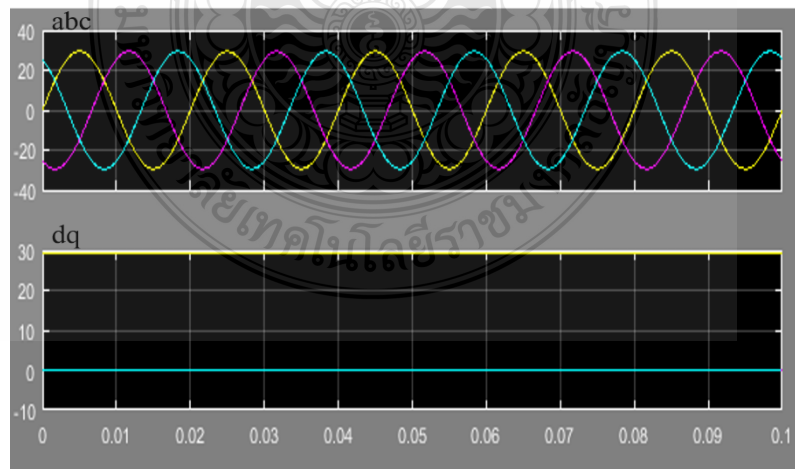
นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta - \theta_g) \\ E \sin(\theta - \theta_g) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $[V_d \ V_q]^T$ คือ เวกเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสตรง V_d และ V_q แสดงดังรูปที่ 2.7 และแสดงเอาต์พุตจากการแปลงแกน แสดงดังรูปที่ 2.8

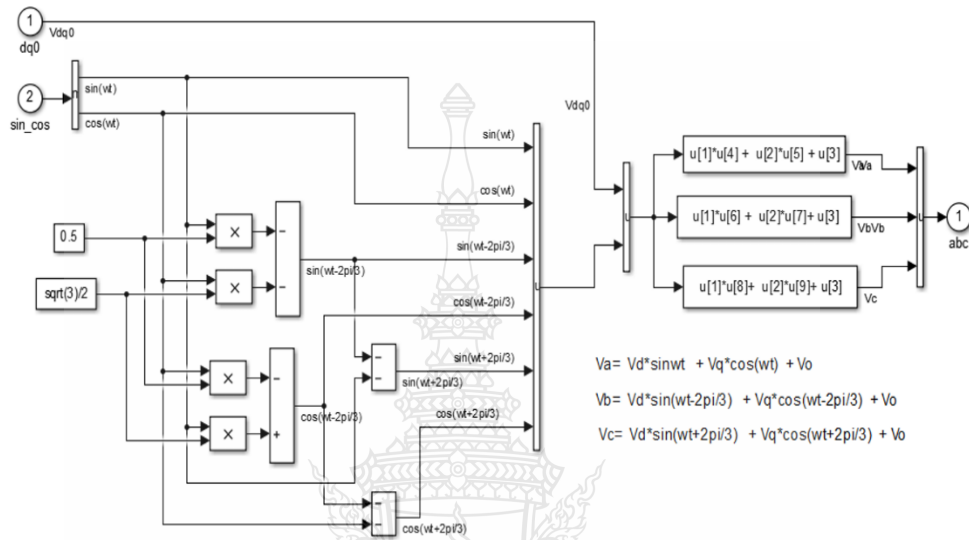


รูปที่ 2.7 แบบจำลองการแปลงแกน abc – dq

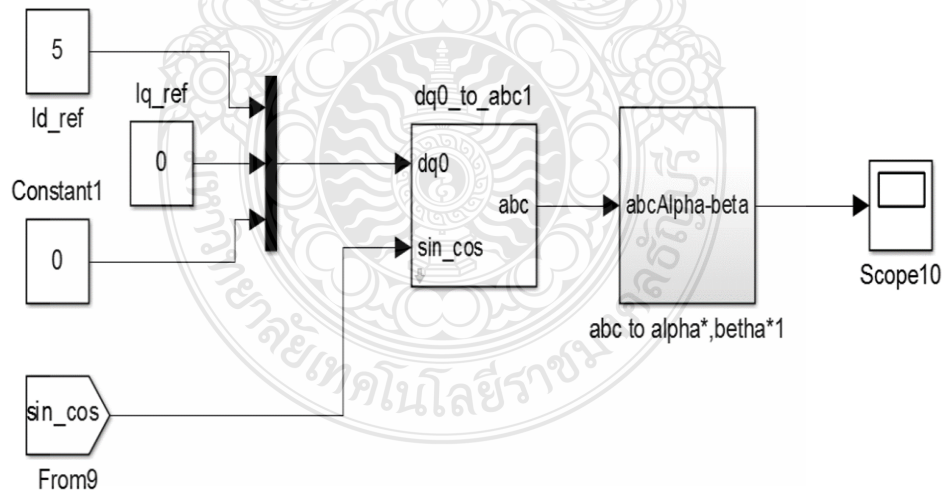


รูปที่ 2.8 ผลลัพธ์การแปลงแกน abc – dq

การแปลงแกนในระนาบ abc- dq และ abc – $\alpha\beta$ ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้ว ยังสามารถแปลงแกนกลับให้อยู่ในระนาบเดิมได้โดยไม่ทำให้เวกเตอร์เปลี่ยนแปลงทิศทางไปจากเดิม แสดงดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

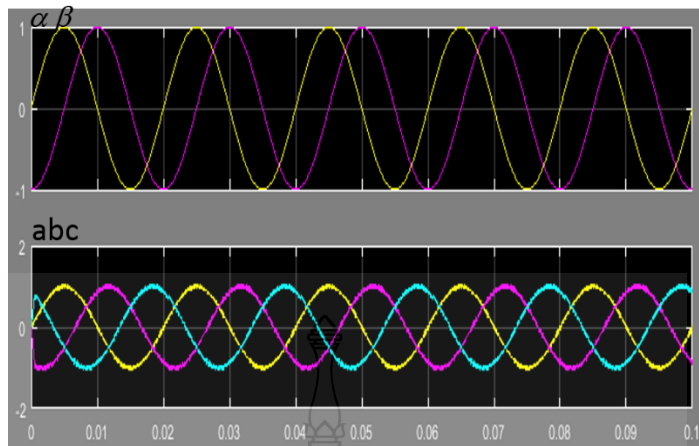


(ก)



(ข)

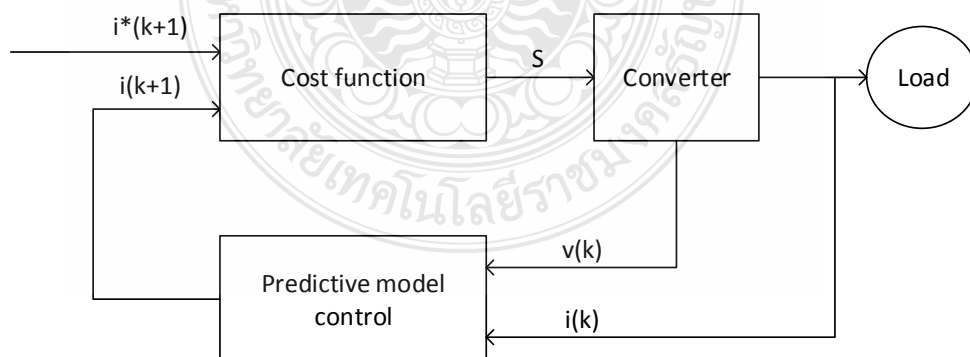
รูปที่ 2.9 บล็อกโคโอะแกรมการแปลงรูปสัญญาณ (ก) สัญญาณ dq เป็นสัญญาณ 3 เฟส (abc) (ข) ลำดับการแปลงรูปสัญญาณ dq เป็นสัญญาณ abc และสัญญาณ $\alpha\beta$



รูปที่ 2.10 ผลลัพธ์การแปลงสัญญาณ $\alpha\beta$ เป็น สัญญาณ 3 เฟส abc

2.3 เทคนิควิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive Current Control)

เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบคาดการณ์หรือทำนายค่ากระแสไฟฟ้าวงหน้า (Model Predictive Control : MPC) ประยุกต์ใช้ในงานการควบคุมอินเวอร์เตอร์ สำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนระบบไฟฟ้า [5]-[12] เป็นแนวทางทฤษฎีในการประยุกต์ใช้งานสำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จึงนำเสนอทฤษฎีโดยการอ้างอิงจากการควบคุมการขับเคลื่อนระบบไฟฟ้าเพื่อทำการศึกษาและง่ายต่อความเข้าใจในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไคอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมแบบทำนายค่า

เทคนิคและวิธีการ MPC สำหรับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบควบคุม โดยพื้นฐานการจำกัดจำนวนด้วยตัวเลขความเป็นไปได้ของสถานะของการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าคงที่จาก สถานะของการทำงานของอุปกรณ์แปลงผันพลังงาน (Power converter) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวในข้างต้นนี้ทำให้เราสามารถที่จะทำนายค่าสถานะการทำงานที่เวลาถัดไปได้จากสถานะของการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการกำหนดค่าสถานะการทำงานในลำดับถัดไปจากการทำนายค่าเหตุการณ์ล่วงหน้า สำหรับเลือกสถานะการทำงานที่เหมาะสมในการสวิตซ์ซึ่ง มีหลักเกณฑ์การทำงานที่ประกอบไปด้วย cost function จะทำการประเมินผลสำหรับการทำนายค่าของตัวแปรที่จะทำการควบคุม โดยค่าที่ทำนายได้นั้นจะคำนวณสถานะของการทำงานของสวิตซ์ซึ่งที่ถูกต้องเป็นไปได้อันจะถูกดำเนินการเลือกค่าที่เหมาะสมโดย cost function เทคนิคการควบคุมแบบนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. กำหนดสมการ Cost function (สมการที่ 2.8)
2. สร้างรูปแบบของอินเวอร์เตอร์และออกแบบการสวิตซ์ซึ่งของอุปกรณ์สวิตซ์
3. สร้างแบบจำลองสำหรับการคาดการณ์หรือทำนายค่า

การสร้างแบบจำลองรูปแบบของเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time model) ของโหลดก็คือค่าที่ต้องการทำนายในเวลาการทำงานที่เวลาถัดไปของการประเมินผลตัวแปรโดย cost function คือ กระแสไฟฟ้าของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นฐานเวลาที่ใช้ในการคำนวณการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของระบบที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปประมวลผลในเวลาถัดไปของระบบต่อไป

2.3.1 Cost function

วัตถุประสงค์ของการควบคุมกระแสไฟฟ้ารูปแบบ MPC คือ จำกัดค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่ากระแสที่ใช้อ้างอิง สามารถเขียนเป็นสมการ cost function ในรูปแบบแกนที่ตั้งฉากกัน และวัดค่าความผิดพลาดระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงและค่าที่วัดได้แสดงดังสมการที่ 2.8

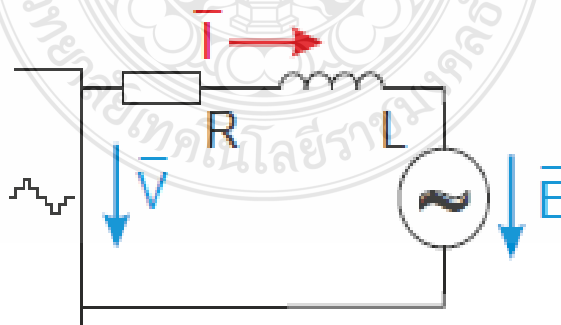
$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad (2.8)$$

เมื่อ $i_\alpha^p(k+1)$ และ $i_\beta^p(k+1)$ คือค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพตามลำดับ ในส่วนของการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของเวกเตอร์โพล $i^p(k+1)$ สำหรับใช้ในการกำหนดเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำนายได้นี้จะนำไปใช้สำหรับรูปแบบจำลองของโพล ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ส่วนค่า $i_\alpha^*(k+1)$ และ $i_\beta^*(k+1)$ คือค่ากระแสไฟฟ้าในส่วนที่ใช้อ้างอิง คือค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพ ในรูปแบบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i^*(k+1)$ เพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจ สมมุติให้ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อกรเก็บตัวอย่างในการสุ่มการทำงาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ $i^p(k+1) = i^*(k+1)$ โดยใช้วิธีการสำหรับการหน่วงเวลาในการติดตามค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่จะช่วยให้ไม่เกิดปัญหาความผิดพลาด แต่ในกรณีที่มีการสุ่มสัญญาณความถี่ที่สูงในการใช้งานก็จะไม่เกิดปัญหานี้

2.3.2 หลักการทำนายค่ากระแสในวงจรอินเวอร์เตอร์

เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบของการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์ ในระดับเบื้องต้น จะนำเอาการนำเสนอรูปแบบสำหรับการเชื่อมต่อสำหรับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวในการอธิบายทำความเข้าใจที่มาของสมการทางคณิตศาสตร์และรูปแบบการเชิงโครโนซ์ของระบบสำหรับนำไปใช้งานกับระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งจะนำเสนอในลำดับถัดไป

การทำนายค่ากระแสไฟฟ้า รูปแบบการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ โดยการพิจารณาจากสมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโพลและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ แสดงดังรูปที่ 2.12 แสดงวงจรสมมูลการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้า โดยการใช้ค่าความเหนี่ยวนำเป็นจุดต่อร่วมระหว่างเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ [19]

จากรูปที่ 2.12 การทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของโหลด ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องของแบบจำลอง สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v = Ri + L \frac{d_i}{d_t} + e \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 4.8 สามารถแทนด้วยฟังก์ชันการประมาณค่าในรูปแบบเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ T_s คือ ค่าเวลาในการสุ่มสัญญาณ แสดงในสมการที่ 2.10

$$\frac{d_i}{d_t} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.11

$$v_k = Ri(k) + L \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} + e(k) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 4.10 ย้ายค่าสมการเพื่อหาสมการที่ใช้ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาถัดไปดังสมการที่ 2.12

$$i(k+1) = \frac{T_s}{L} (v(k) - e(k) + i(k)) \left(1 - \frac{RT_s}{L} \right) \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.12 แสดงสมการสำหรับใช้ในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดที่จะเกิดขึ้นในลำดับเวลาถัดไปโดยการเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ $i^*(k)$ นั้นเอง

สรุปวิธีการควบคุมการนำค่ากระแสไฟฟ้า

- กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง $i_d^*(k)$ จากการสร้างของระบบควบคุมและค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $i^p(k)$
- ออกแบบและสร้างรูปแบบของระบบที่ใช้ในการนำค่าของกระแสไฟฟ้าจากโพลดในช่วงระยะเวลาถัดไป $i(k+1)$ สำหรับทั้งกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า
- ประเมินผลค่าความผิดพลาดของสัญญาณด้วย cost function ระหว่างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่นำรายได้ในแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า
- ค่าผิดพลาดของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่น้อยที่สุดคือค่าที่ถูกเลือกและตรงกันกับสถานะของการสวิตซ์ซึ่งในการสร้างสัญญาณควบคุมต่อไป

2.4 ระบบควบคุมของหน่วยประมวลผลกลาง

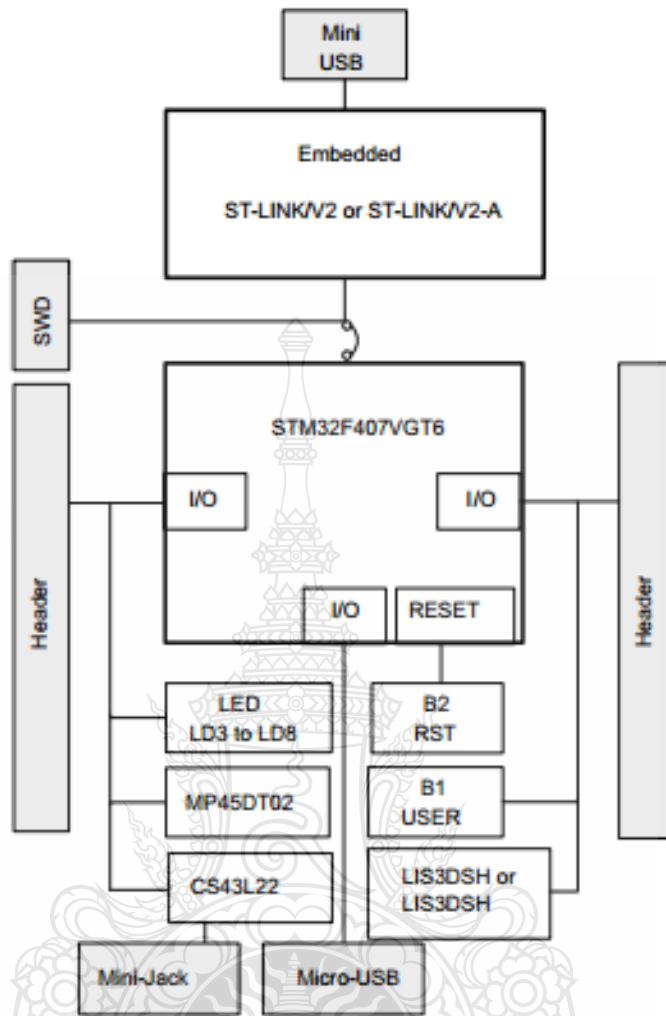
ชุดควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยบอร์ดประมวลผลในงานวิจัยนี้ เลือกใช้บอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ที่สามารถนำผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย และที่สำคัญคือเป็นซอฟต์แวร์ฟรี สามารถประยุกต์ใช้กับโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมี Block sets สำเร็จรูป ทำให้ง่ายต่อการศึกษาค้นคว้าทดลอง และพัฒนาโดยคนไทย สามารถใช้ออกแบบและควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์และอื่นๆ ประกอบไปด้วยความสามารถพื้นฐาน เช่น Digital I/O และฟังก์ชันพิเศษที่จำเป็นต้องใช้งานเช่น A/D, D/A, PWM Encoder, Interrupt, Timer เป็นต้น สามารถสรุปสาระสำคัญและสมรรถนะได้ดังนี้

- ใช้ตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4VGT6 ARM Cortex[®]-M4 ขนาด 32 บิต มีหน่วยความจำแบบแฟลช 1 เมกกะไบต์ และแบบชั่วคราว 192 กิโลไบต์ ประมวลผลการทำงานที่ความถี่สูงสุด 168 MHz
- ติดตั้งส่วนเชื่อมต่อข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ด้วย ST-LINK/V2
- มีความละเอียดในการทำงานในระดับจุดทศนิยมรองรับโครงสร้างการประมวลผลและข้อมูลด้วยตัวประมวลผล ARM
- โครงสร้างการดำเนินการเต็มรูปแบบในลักษณะของตัวประมวลผลดิจิทัลและมีระบบการปกป้องหน่วยความจำด้วยระบบรักษาความปลอดภัย

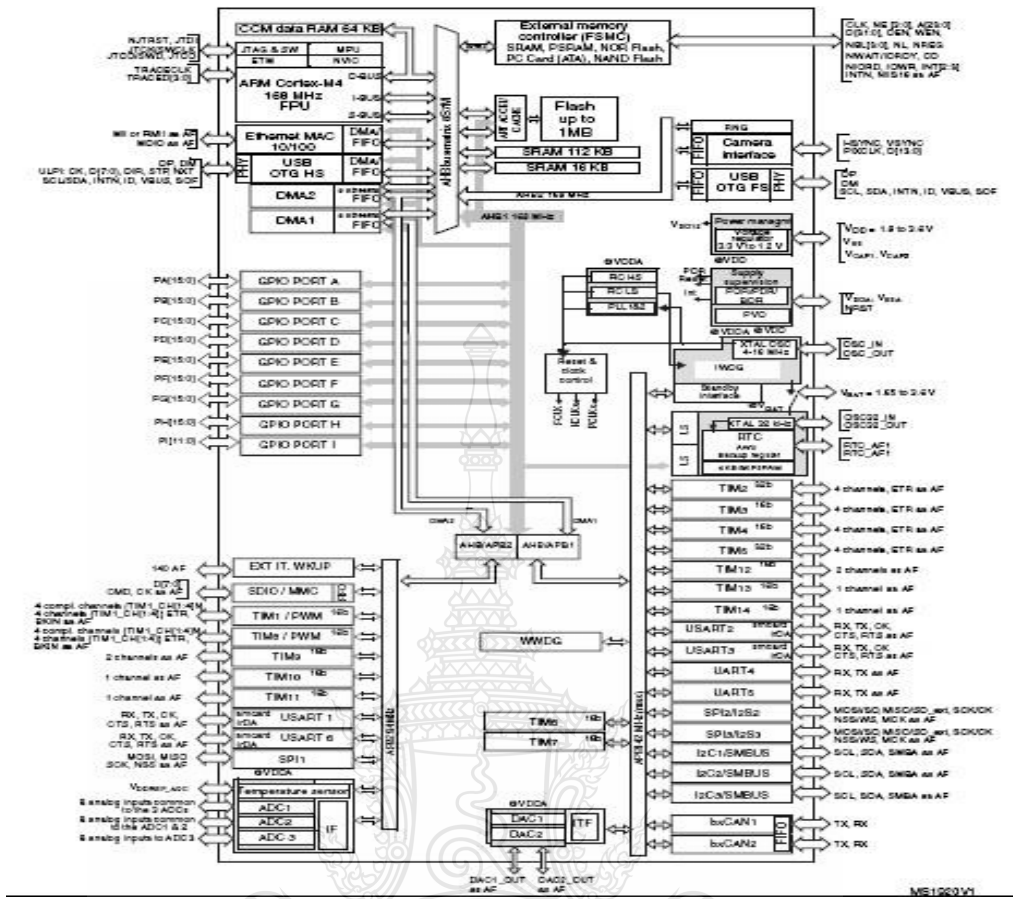
- ตัวแปลง A/D ขนาด 3x2 บิต 2.4 MSPS สามารถขยายได้ 24 ช่อง และ 7.2 MSPS triple interleaved mode
- ตัวแปลง D/A ขนาด 2x12 บิต
- ไทเมอร์ 17 ตัว เพิ่มขนาดสูงสุด 16 บิต 12 ตัว และ 32 บิต 2 ตัวแบบนับขึ้น 168 MHz แต่ละตัวมี 4 IC/OC/PWM หรือ ตัวนับจำนวนพัลส์และตัวถอดรหัสอินพุต แบบนับเพิ่ม (incremental encoder)
- มีแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายใน
- รองรับการเชื่อมต่อและใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์สำหรับ MATLAB/Simulink



รูปที่ 2.13 บอร์ดประมวลผล STM32F4 Discovery



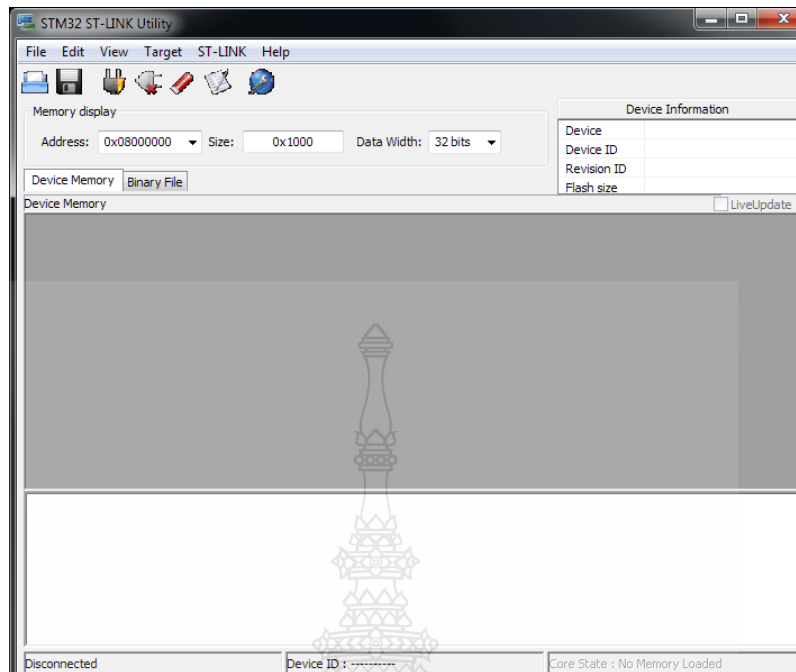
รูปที่ 2.14 โค้ดแกรมทางด้านฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผล STM32F4Discovery



รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมหน่วยประมวลผลการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG

การติดตั้งและทดสอบฮาร์ดแวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery บอร์ด เพื่อทดสอบการทำงานร่วมกับ Waijung Blockset และ MATLAB/Simulink

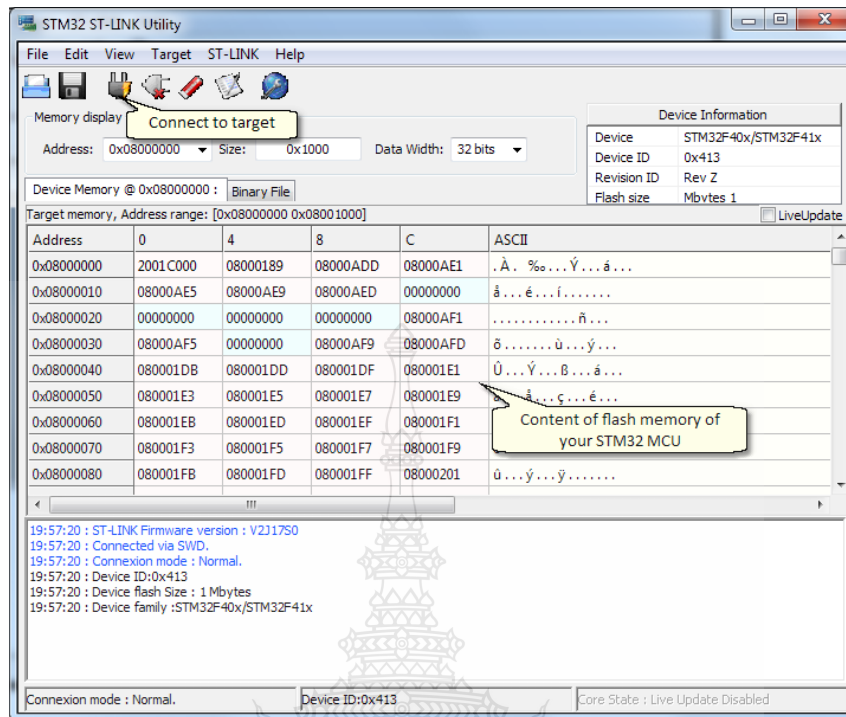
2.4.1 คำนวณโหลดและติดตั้งโปรแกรม STM32 ST-Link Utility และ ST-Link USB driver ทำการติดตั้งและเปิดโปรแกรมหลังทำการติดตั้งเสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 2.16



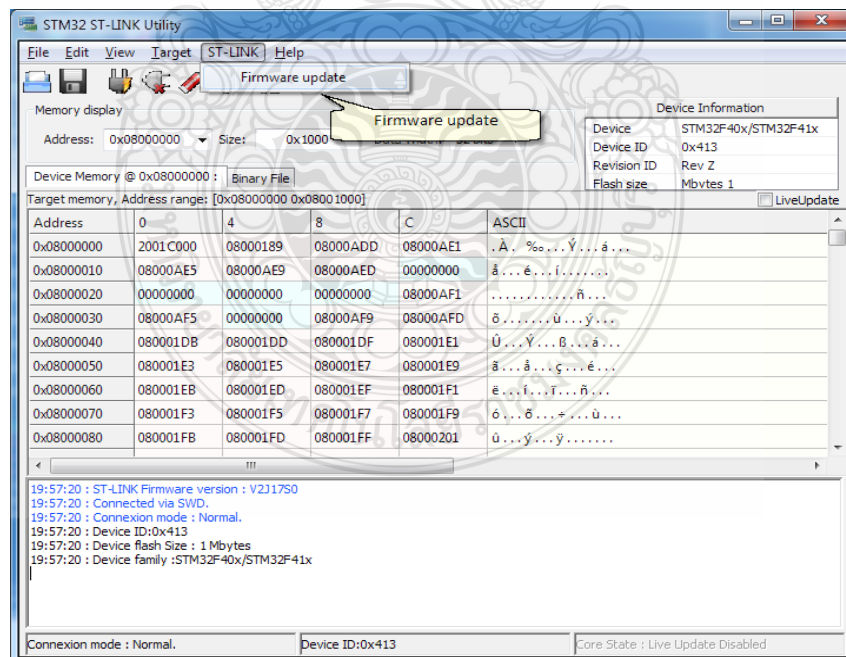
รูปที่ 2.16 หน้าต่างโปรแกรม STM32 ST-LINK Utility กับ ST-LINK ฮาร์ดแวร์

2.4.2 ดาวน์โหลดและติดตั้งโปรแกรม FTDI USB driver สำหรับการเชื่อมต่อพอร์ต aMG USB เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ หรือ ST-LINK Hardware

2.4.3 ทดสอบการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ โดยการเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับโปรแกรม STM32 ST-LINK Utility และกดปุ่ม Connect บนหน้าต่างโปรแกรม ถ้าโปรแกรมสามารถติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จะแสดงผลดังรูปที่ 2.17 และหากต้องการอัปเดตเฟิร์มแวร์ให้กับ ST-LINK Hardware โดยการกดปุ่ม Firmware update ดังรูปที่ 2.18 และหากไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ระหว่าง ST-LINK Utility และ Utility Hardware ให้ลองปิดและเปิดโปรแกรมใหม่เพื่อดำเนินการตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง

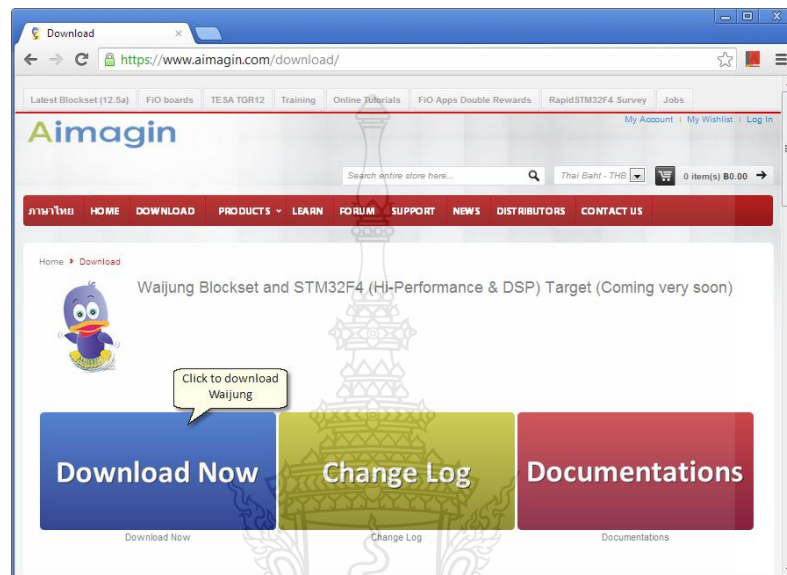


รูปที่ 2.17 STM32 ST-LINK Utility ติดต่อสื่อสารกับ STM32F4Discovery บอร์ด



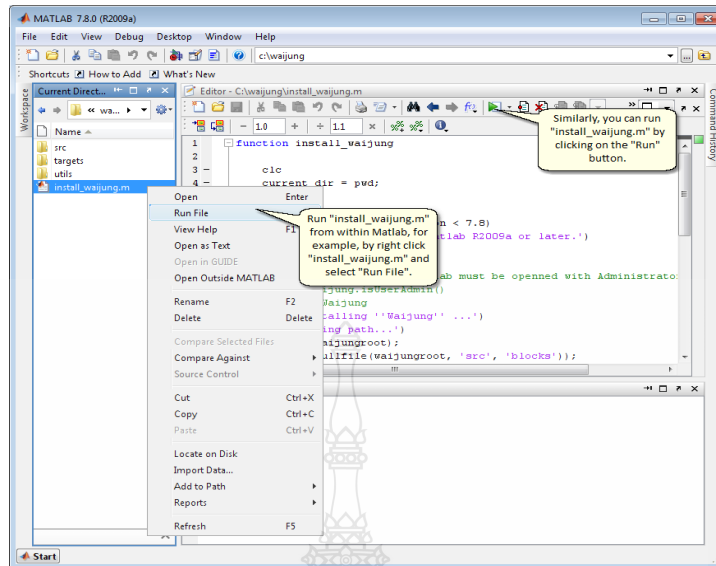
รูปที่ 2.18 การอัปเดตเฟิร์มแวร์ให้กับ ST-LINK Hardware

2.4.5 การติดตั้งโปรแกรม Waijung Blockset ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการดาวน์โหลดและติดตั้งโปรแกรม Waijung Blockset และ STM32F4 Target แสดงดังรูปที่ 2.19



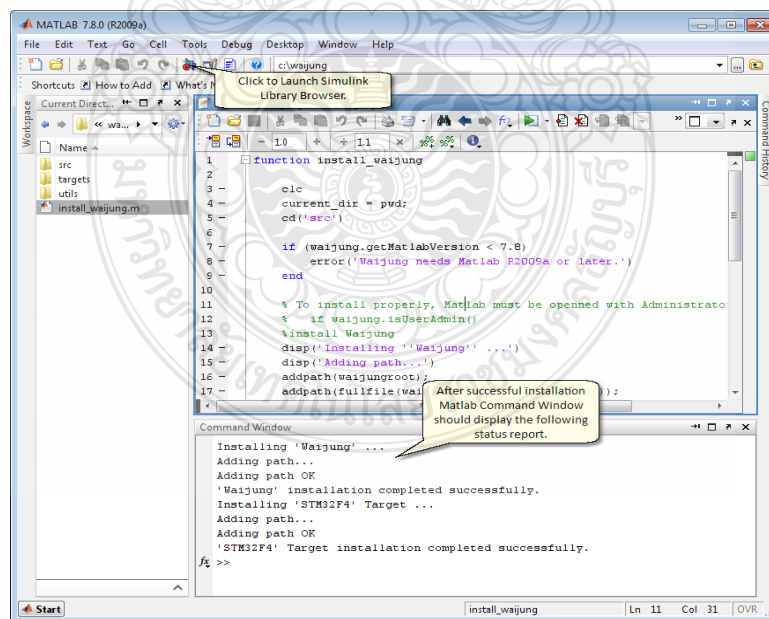
รูปที่ 2.19 ลิงค์ดาวน์โหลดโปรแกรม Waijung Blockset

หลังจากที่ทำการดาวน์โหลดโปรแกรมในรูปแบบของการบีบอัดไฟล์ 7-Zip ให้ทำการแตกไฟล์และเก็บไว้ในไดเรกทอรี C (แนะนำ) โดยตั้งชื่อไฟล์ของโฟลเดอร์ตามความเหมาะสม เช่น Waijung และเปิดโฟลเดอร์เพื่อค้นหาไฟล์ install_waijung.m และทำการเปิดไฟล์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วย Command windows แสดงดังรูปที่ 2.20

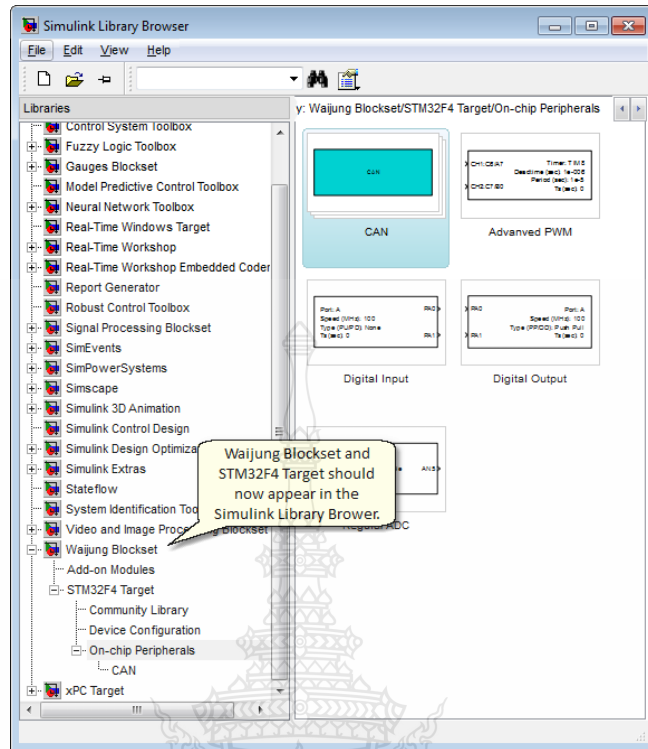


รูปที่ 2.20 การติดตั้ง Waijung Blockset ใน MATLAB/Simulink

ในรูปที่ 2.20 แสดงหน้าต่างสถานะของการติดตั้งที่ดำเนินการแล้วเสร็จ และทำการตรวจสอบการติดตั้ง Waijung Blockset ในไลบรารีของ Simulink ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 หน้าต่างแสดงสถานะการติดตั้ง Waijung Blockset ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2.22 Waijung Blockset ได้ดำเนินการติดตั้งลงในไลบรารีของ Simulink

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานววิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในการใช้งานเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้นำเสนอถึงเทคนิคและวิธีการของระบบการควบคุมในการใช้งานต่างๆ ดังนี้

M. Mosa, H. Abu-Rub, M.E. Ahmed, A. Kouzou and J. Rodriguez. (2013) [1] นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายระดับหนึ่งเฟสเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยการใช้รูปแบบการควบคุมจากการคาดการณ์ล่วงหน้า โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวในการประยุกต์ใช้งานกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนสามแหล่งจ่ายสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเหลือเพียงจำนวน 9 ตัว จากทั้งหมดที่ต้องใช้ 12 ตัวเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตจำนวน 7 ระดับแรงดัน นำเสนอโดยการออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ด้วยเวลาการทำงานจริงโดยการใช้ dSPACE 1103 สำหรับการนำเสนอ ผลการทดลองจากการควบคุม โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง และทำการจ่าย

กระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าได้เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 คุณสมบัติด้านการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงในระดับสูงด้วยวิธีการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า โดยปราศจากการใช้การควบคุมแบบเป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการ PWM หรือการเปรียบเทียบสัญญาณแบบวิธีการอื่นๆ

S. Vazquez, J.I. Leon, L.G. Franquelo, J.M. Carrasco, O. Martinez, J. Rodriguez, P. Cortes and S. Kouro. (2013) [2] นำเสนอขั้นตอนวิธีการการนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของลำดับการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยตรงสำหรับจ่ายในระบบไฟฟ้าในการควบคุมการนำค่ากำลังไฟฟ้าและใช้การอ้างอิงโดยการคำนวณค่าที่ดีที่สุดในการควบคุมการสวิตช์ซึ่งและพัฒนาการควบคุมกับบอร์ดประมวลผลดิจิทัลประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ STATCOM สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน ผลการวิจัยให้ผลตอบสนองจากการทดลองที่ดีแต่ต้องระมัดระวังเรื่องการลดจำนวนขั้นตอนในการคำนวณในการพัฒนากับอุปกรณ์จริงที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยการใช้ขั้นตอนวิธีการในการคำนวณที่ให้ผลลัพธ์ที่ชาญฉลาดในด้านคุณสมบัติการควบคุมแบบระบบปิดทั้งเรื่องของผลตอบสนองชั่วคราวและสถานะคงตัว

Marek Pástor and Jaroslav Dudrik. (2013) [3] นำเสนออินเวอร์เตอร์ 15 ระดับแรงดันชนิดคาสแคด เซกซ์บริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสด้วยเทคนิคการควบคุมการนำค่ากระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการด้วย RT-Lab เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า โดยเทคนิคการเชิงโครโนซ์กับระบบไฟฟ้าด้วย ซิงโครนัสเฟสล็อกกลูที่นำเสนอ แต่เป็นการปฏิบัติการในห้องทดลองที่ต้องอาศัยการทำงานด้วยการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้จากการทดลองโดยการใช้ cost function ที่มีความสะดวกและรวดเร็ว

Yohan Baek, Kui-Jun Lee and Dong-seok Hyun. (2009). [4] นำเสนอเทคนิควิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟสของอินเวอร์เตอร์ ในการนำเสนอกลยุทธ์การออกแบบเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแบบสมมาตร ชนิด 4×4 ในการเลือกค่าจากเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า และการตรวจสอบเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าจากลำดับการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของกระแสไฟฟ้าและฟังก์ชันการลดค่า โดยใช้ความถี่ในการสวิตช์ซึ่งแบบคงที่ทำให้คุณภาพของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีคุณรูปที่ดี ผลการศึกษาพบว่าให้ผลตอบสนองชั่วคราวและกลยุทธ์ในการนำเสนอมีคุณรูปที่ดี

H. M. Kojabadi, B. Yu, I. A. Gadoura, L. Chang and M. Ghribi.(2006) [5] นี้ ำ เสน อ
วิธีการใหม่ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิค PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเชื่อมต่อกับ
ระบบไฟฟ้า ด้วยการนำเสนอการปรับปรุงการควบคุมกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จากการทำนาย
ค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าด้วยแบบจำลองใน Matlab/Simulink ในการทดสอบปรากฏว่าให้ค่าผลรวม
ฮามอนิกส์ที่ดีกว่าสำหรับมาตรฐาน IEEE โดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลลัพธ์ที่ได้จากทดสอบ
ค่าความแตกต่างของค่าตัวกรองจากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในส่วนของเสถียรภาพของระบบและ
ผลตอบสนองชั่วคราว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้า สำหรับ
อินเวอร์เตอร์ ในหลากหลายรูปแบบ เช่น การควบคุมการขับเคลื่อนระบบไฟฟ้า การควบคุมโหลด
RL ในระบบไฟฟ้าสามเฟส การควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดเฟสเดียวหลายระดับ การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับแปลงผันพลังงาน
ไฟฟ้า ทั้งจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานทดแทนอื่นๆ โดยเทคนิควิธีการที่แตกต่าง
กันออกไปโดยการนำเสนอโครงสร้างของการควบคุมแบบ Model Predictive Control : MPC หรือ
รูปแบบการควบคุมแบบทำนายหรือคาดการณ์ล่วงหน้า ในการนำเสนอ

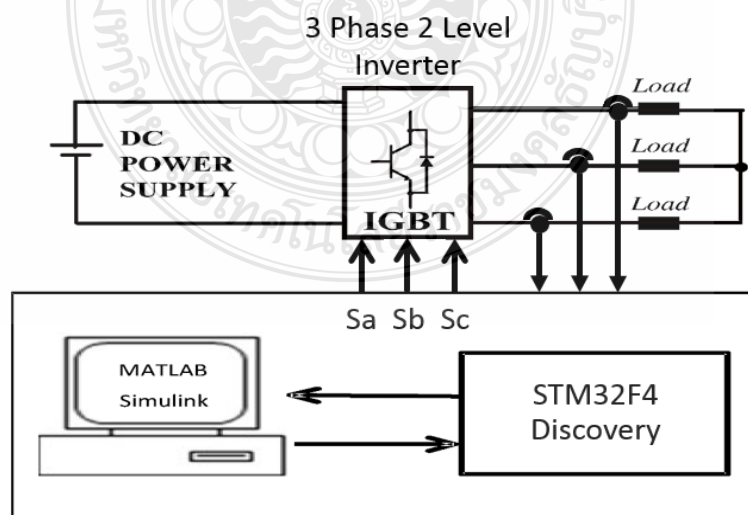
จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงกำหนดเป้าหมายการวิจัย ในส่วนของทดสอบวิธีการ
ควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ด้วยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อทำการศึกษา
และทดสอบการทำงาน ที่จะนำไปสู่การพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทน
โดยเทคนิคการควบคุมที่แตกต่างจากการควบคุมแบบดั้งเดิม (Classic control) และมีความง่ายต่อ
การนำไปประยุกต์ใช้งาน ตามความเหมาะสมหรือการใช้เทคนิคการควบคุมแบบผสมผสานที่
สามารถสร้างความยืดหยุ่นให้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับเปลี่ยนได้ตามพฤติกรรมของ
ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และทำงานให้มีความหลากหลายขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

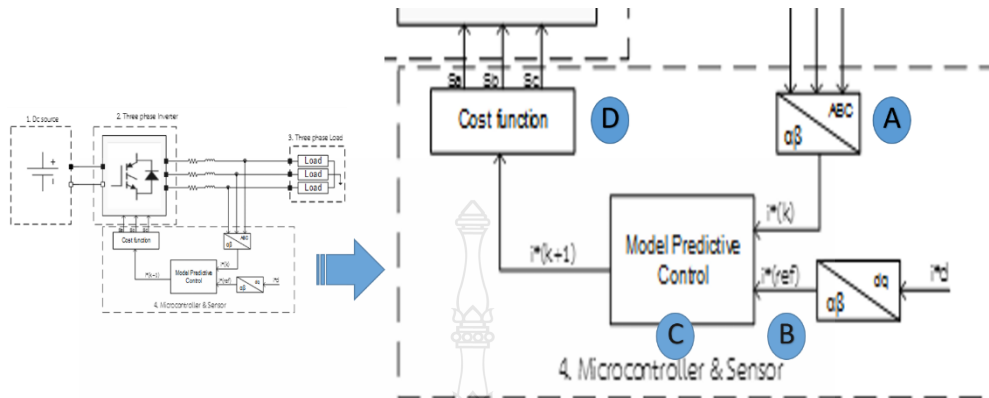
งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาวิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ร่วมกับการประยุกต์ใช้งานการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery และทำการทดสอบใช้งานขับ โหลด RL เพื่อทำการศึกษาผลการทดลองด้วยการควบคุมแบบดังกล่าวข้างต้น โดยมีขั้นตอนการศึกษาวิจัย ดังนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน โดยการควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2. ทดสอบการทำงานการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า พร้อมการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางด้านเอาต์พุตกระแสและแรงดันไฟฟ้า
3. นำรูปแบบการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ป้อนโปรแกรมการทำงานลงในบอร์ดควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณขับเคลื่อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery เพื่อทำการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างจากโปรแกรม MATLAB/Simulink
4. นำฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นไปทดสอบขับ โหลดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าและคำนวณหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแสดงส่วนประกอบงานวิจัย

3.1 หลักการทำงานของโครงการวิจัยโดยสังเขป

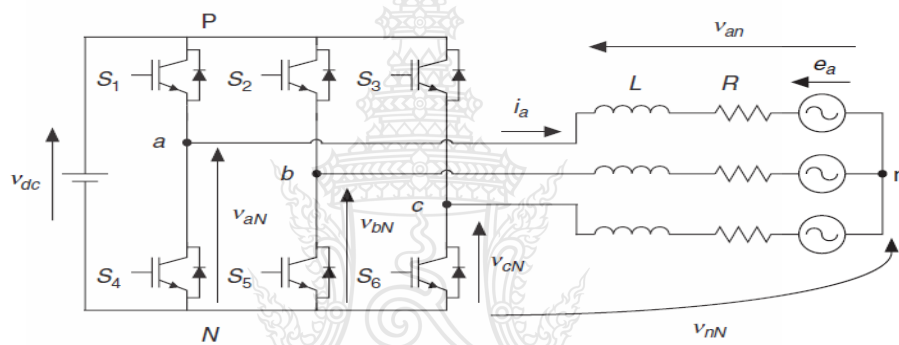


รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมควบคุมการทำงานแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมควบคุมการทำงานแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เป็นส่วนองค์ประกอบหลักของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อสร้างสัญญาณขั้วเกิดให้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ตามรูปที่ 3.1 มีหลักการทำงานโดยสังเขปดังต่อไปนี้คือ ตำแหน่ง A เช่น เซอร์คิตตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟส สัญญาณที่วัดค่าได้นี้จะถูกแปลงแกนจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นระบบ 2 แกน เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ให้มีขนาดเล็กและง่ายต่อการคำนวณ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $i^*(k)$ ในส่วนตำแหน่ง B เป็นส่วนสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงจากการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงในรูปแบบ 2 แกน คือ $i^*(d)$ และ $i^*(q)$ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าอินเฟสกันจึงกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้า $i^*(q)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ลำดับต่อมาที่ตำแหน่ง C นำสัญญาณที่ได้ทั้ง 2 ส่วนเข้าสู่กระบวนการทำงานของอัลกอริทึมในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า โดยภายในทฤษฎีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจะใช้หลักการจากคำนวณจากสมการทฤษฎีของแรงดันตกคร่อมที่โหลด และสมการแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back emf) จากสมการทางคณิตศาสตร์ และทำการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.3

ส่วนสำคัญลำดับต่อไปคือสมการเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน จำนวน 8 เวกเตอร์แรงดันจะทำให้เราทราบลักษณะการทำงานและเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ โดยจะมีเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพียง 1 เวกเตอร์ที่คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าจากแรงดันตกคร่อมโหลดและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของโหลดได้เหมาะสม และถูกต้องมีความแม่นยำมากที่สุดจากสมการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดได้ในลำดับการทำงานที่เวลา $t+1$ โดยมีคาบสัญญาณเวลาในรูปแบบ

เวลาช่วงขณะของแต่ละรอบการทำงานและประมวลผล กล่าวคือ เราสามารถที่จะหาค่าความต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าในแต่ละเวกเตอร์จากการคำนวณ และเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในการนำมาใช้เปรียบเทียบ และคำนวณเพื่อให้ทราบถึงการสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนของอินเวอร์เตอร์ให้สอดคล้องกับการทำงาน และกระแสไฟฟ้าในแต่ละวงรอบของการทำงานต่อไปในแต่ละครั้งของการทำงาน เมื่อทราบเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าใดที่ทำกรควบคุมการสวิตซ์ของสัญญาณขับเคลื่อนที่ให้แรงดันเอาต์พุตของแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าส่วนต่างน้อยที่สุด นั่นคือ เวกเตอร์แรงดันนั้นเป็นเวกเตอร์ที่สามารถสร้างหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้เหมาะสมและถูกต้องที่สุด



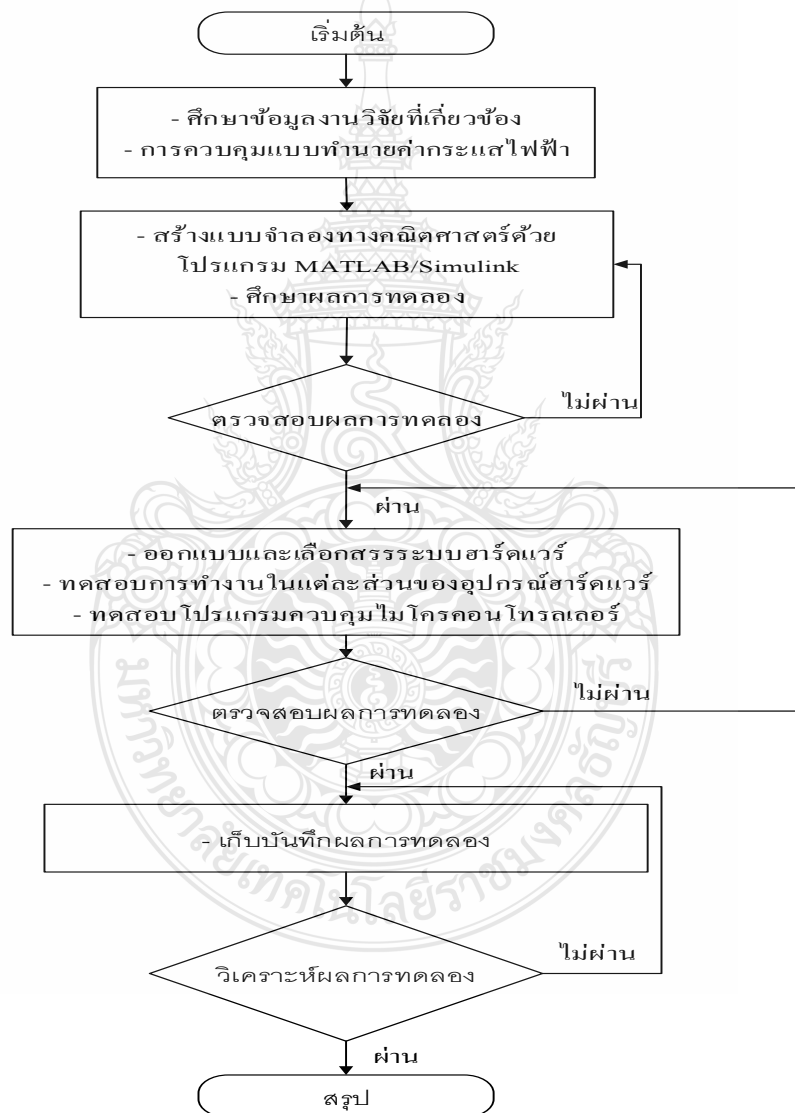
รูปที่ 3.3 แนวคิดสมการที่ใช้ในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า [13]

จากหลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่อธิบายในเบื้องต้น เมื่อเราทราบเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 คับแรงดัน ทำให้สามารถสร้างสัญญาณขับเคลื่อนได้อย่างถูกต้องในแต่ละรอบของการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ทั้งนี้ประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับความสามารถในการคำนวณและประมวลผลการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปแบบของการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อทำการศึกษาผลตอบสนองการควบคุมและประสิทธิภาพการทำงาน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจกับรูปแบบสมการที่จะนำไปออกแบบ และสร้างแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกันทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์ และการศึกษาออกแบบวิธีการศึกษาและดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยการศึกษาและหลักการทํางาน รวมถึงการใช้งานโมดูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส , การแปลงแกนระบบไฟฟ้า 3 เฟส การศึกษาขั้นตอนและวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในการควบคุมอินเวอร์เตอร์

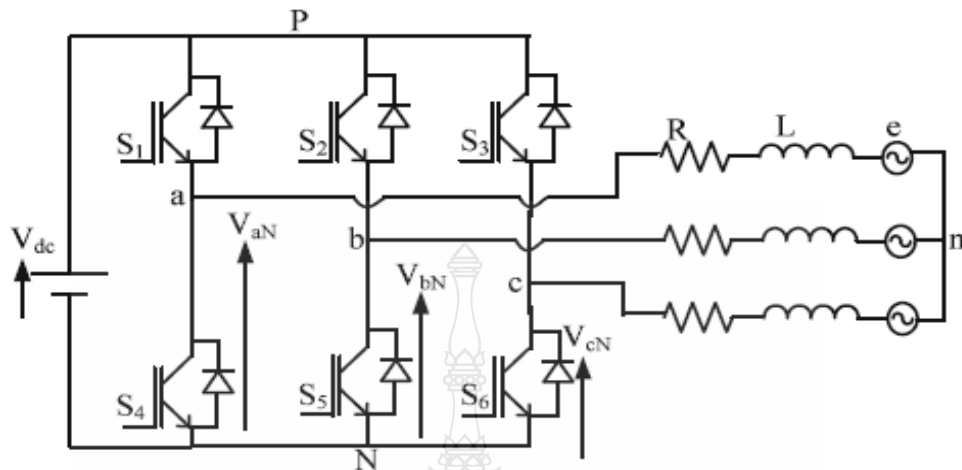
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การศึกษาเทคนิควิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยโมดูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ส่วนควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละรอบการสุ่มสัญญาณการทำงาน เพื่อส่งสัญญาณทางไฟฟ้าของสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยเทคนิควิธีการควบคุมการทำงานจ่ายกระแสไฟฟ้า มีลำดับขั้นตอนการศึกษาดำเนินการวิจัย ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย

3.3 สมการเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน



รูปที่ 3.5 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

การวิเคราะห์ที่แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นวิธีการที่ซับซ้อนสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบสมมาตรในการจ่ายพลังงานที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ในแต่ละขาขั้วเกิดของอุปกรณ์ไมโครอินเวอร์เตอร์ถูกแทนด้วยสถานะทำงานของสวิตช์แบบ 2 สถานะ คือ On และ Off (S_{i1}, S_{i2} $i = a, b, c$) เมื่อ a, b, c คือเฟสของแรงดันไฟฟ้าของระบบ 3 เฟส สามารถกำหนดสัญญาณขั้วเกิดโดยสมการที่ 3.1

$$S = \frac{2}{3} (S_a + aS_b + a^2S_c) \quad (3.1)$$

เมื่อ $a = e^{j2\pi/3}$. S_i แทนค่า S_{i1} ด้วย 0 เมื่อสถานะสัญญาณขั้วเกิดเป็น Off และ S_{i2} มีสถานะ On หรือแทนค่าสมการ S_i ด้วย 1 ถ้า S_{i1} มีสถานะเป็น 1 และ S_{i2} มีสถานะเป็น 0 จะได้สมการเอาต์พุตในรูปของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ 3.2

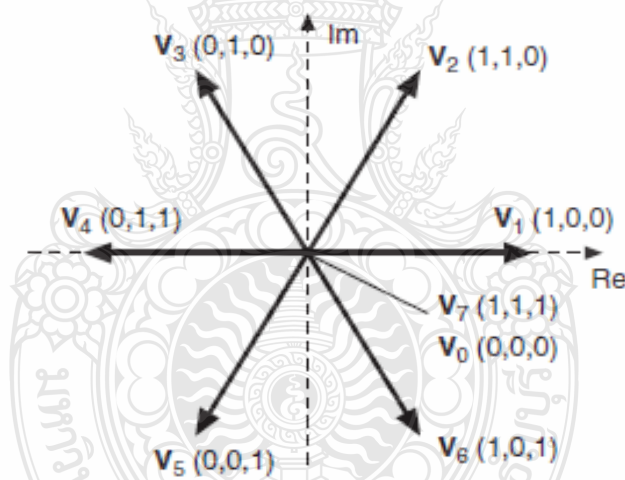
$$V = \frac{2}{3} (V_{an} + aV_{bn} + a^2V_{cn}) \quad (3.2)$$

เมื่อ V_{an}, V_{bn} และ V_{cn} แรงดันไฟฟ้าเฟสของแต่ละเฟส

จากสมการที่ 3.2 สามารถกำหนดเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์แรงดัน 8 สถานะทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.6 ที่มีความสอดคล้องกับการเชื่อมต่อแรงดันกับระบบไฟฟ้า และจากสถานะทำงานการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงดังสมการที่ 3.3

$$V(S_a, S_b, S_c) = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} (S_a + S_b e^{j2\pi/3} + S_c e^{j4\pi/3}) \quad (3.3)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการแปลงผันพลังงานเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ต่อรวมอยู่กับแรงดันอินพุทขาเข้าของโมดูลอินเวอร์เตอร์



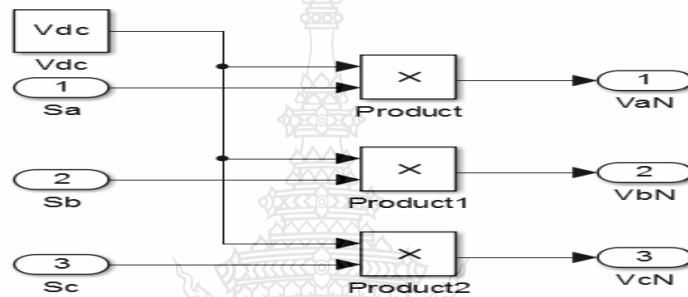
รูปที่ 3.6 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน

แสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ V_0 และ V_7 มีเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเป็น 0 เนื่องจากสถานะของการสวิตซ์ คือ $V_0 = (0,0,0)$ และ $V_7 = (1,1,1)$ ส่วนเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในตำแหน่งอื่นๆ ที่แสดงดังรูปที่ 3.6

อย่างไรก็ตามสามารถแทนค่าสมการแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์และความสัมพันธ์ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ 3.4 สามารถเขียนในรูปแบบบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.7

$$V = V_{dc} \cdot S \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.1 – 3.4 จะได้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดันเพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบรูปแบบการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะสามารถควบคุมได้โดยการ สร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ สำหรับนำไปสร้างอัลกอริทึมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแรงดันเอาต์พุต 3 เฟส ของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานในการสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส จากสัญญาณการควบคุม S_a , S_b และ S_c จะเห็นได้ว่าการแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ แรงดันไฟฟ้าดีซี ให้สามารถเปลี่ยนเป็นเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย สามารถสรุปเป็นสมการเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและสถานะของการสร้างสัญญาณขั้วเกิดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์การสร้างสัญญาณขั้วเกิดและเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้า

เวกเตอร์ (V)	สมการเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้า	สัญญาณขั้วเกิด					
		S_a	S_b	S_c	\bar{S}_a	\bar{S}_b	\bar{S}_c
0	0	0	0	0	1	1	1
1	$(2/3) \cdot V_{dc}$	1	0	0	0	1	1
2	$((1/3) \cdot V_{dc}) + (j \cdot (\sqrt{3}/3) \cdot V_{dc})$	1	1	0	0	0	1
3	$((-1/3) \cdot V_{dc}) + (j \cdot (\sqrt{3}/3) \cdot V_{dc})$	0	1	0	1	0	1

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ความสัมพันธ์การสร้างสัญญาณขั้วเกดและเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้า

เวกเตอร์ (V)	สมการเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้า	สัญญาณขั้วเกด					
		S_a	S_b	S_c	\bar{S}_a	\bar{S}_b	\bar{S}_c
5	$((1/3)*V_{dc})-(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	0	0	1	1	1	0
6	$((-1/3)*V_{dc})-(j*(\sqrt{3}/3)*V_{dc})$	1	0	1	0	1	0
7	0	1	1	1	0	0	0

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทราบค่าสมการเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับสัญญาณการขั้วเกด จึงนำรูปแบบของสมการในแต่ละเวกเตอร์ ไปเขียนอัลกอริทึมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณขั้วเกดต่อไป

3.4 การแปลงแกนและการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

การแปลงแกน abc - $\alpha\beta$

ในการลดขนาดของเวกเตอร์แรงดัน และกระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้อยู่ในรูปแบบ 2 เฟส ประกอบไปด้วยแกนจำนวนจริงและแกนจำนวนจินตภาพ ซึ่งทำมุมห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์สมการทางไฟฟ้าในวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส ของอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.1 แทนด้วย $\alpha\beta\gamma$ แสดงดังสมการที่ 3.5

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อ x_a, x_b และ x_c คือ เอาต์พุตแรงดัน กระแสไฟฟ้า หรือกำลังของระบบไฟฟ้า 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 3.5 และ

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{คือ} \quad \text{รูปแบบของ } T_{\alpha\beta\gamma}$$

จากสมการในรูปแบบเวกเตอร์ 3 มิติ ดำเนินการแทนค่าในลงในเวกเตอร์ด้วยเวกเตอร์พื้นฐานดังสมการที่ 3.6 ในรูปแบบของการแปลงแกน $T_{\alpha\beta\gamma}$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

แทนค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดฉากด้วยเวกเตอร์ดังสมการที่ 3.7

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

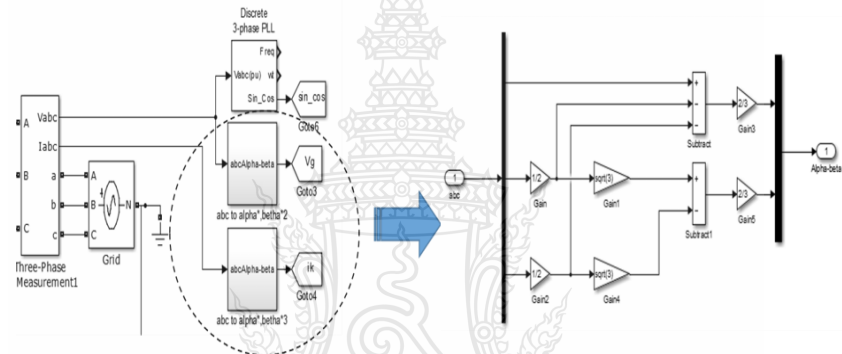
จากสมการที่ 3.7 แทนที่ลงสมการที่ 3.8 สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร เมื่อ $x_a + x_b + x_c = 0$ และ $x_\gamma = 0$ หมายความว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถแปลงแกนให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ 2 เฟสในระบบแกน x_α, x_β โดยที่ $x_\gamma = 0$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

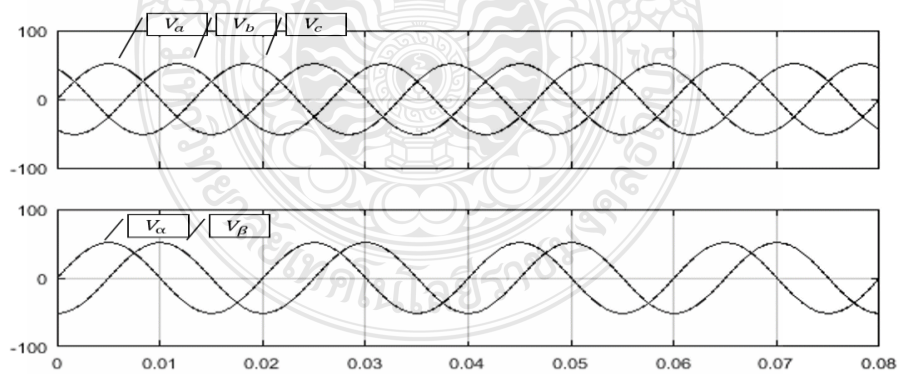
การแปลงกลับเวกเตอร์ของการแปลงแกน $\alpha\beta$ ดังสมการที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.8 และ สมการที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าการแปลงแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีความสอดคล้องกับกรอบอ้างอิงแกนนิ่งในระบบ 2 เฟส ที่สามารถแปลงกลับไปมาได้ในระบบไฟฟ้าที่มีความสมมาตรกัน แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองการแปลงแกน abc เป็นสัญญาณ $\alpha\beta$

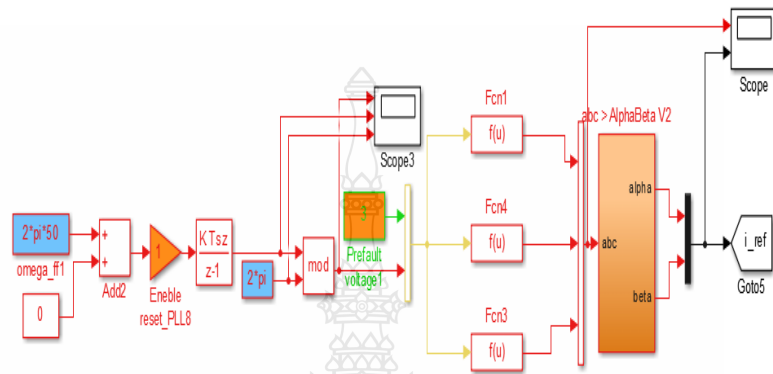


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการจาก abc เป็นสัญญาณ $\alpha\beta$

รูปที่ 3.9 แสดงผลการจำลองการแปลงสัญญาณจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้อยู่ในระบบ 2 แกนแบบ $\alpha - \beta$ axis

การสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

แบบจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ รูปที่ 3.14 โดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบจากสมการแปลงแกน ให้อยู่ในรูปแบบกรอบอ้างอิงแกน $\alpha\beta$ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

การสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงสัญญาณไซน์ 3 เฟส มีค่าแอมป์ลิจูด 3 แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิร์ต จากสมการที่ 3.10

$$i_a = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 0)$$

3.10

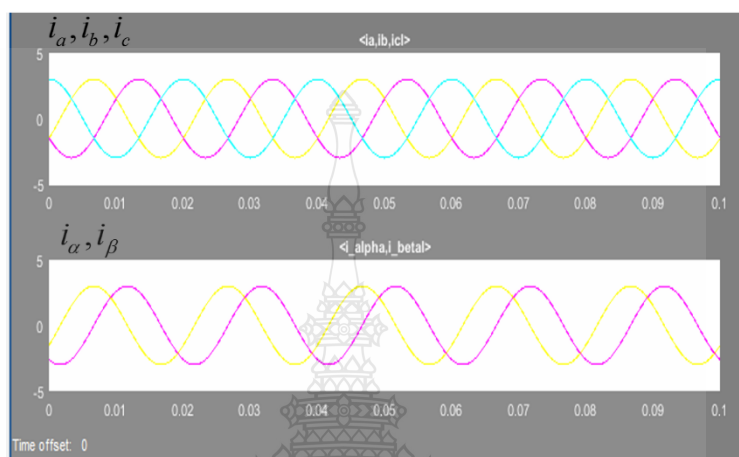
จะได้ว่า

$$i_a = 3 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_b = 3 \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$i_c = 3 \cos(\omega t + 0)$$

หลังจากได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในระบบไฟฟ้า 3 เฟส และดำเนินการแปลงแกนให้อยู่ในรูปแบบ 2 แกนดังสมการที่ 2.8 ในบทที่ 2 จะได้ผลการสร้างรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เอาท์พุทแบบจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและการแปลงแกน

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองและกำหนดค่าพารามิเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองเพื่อแสดงผลสัญญาณเอาท์พุทในส่วนต่างๆ เพื่อทบทวนและตรวจสอบความถูกต้อง แสดงผลลัพธ์ดังรูปที่แสดง

3.5 สมการแบบจำลองโหลด และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

จากรูปที่ 3.5 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบไปด้วยโหลดหรือภาระทางไฟฟ้าสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของโหลดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมการการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของโหลดได้ดังสมการที่ 3.11

$$\begin{aligned}
 v_{aN} &= L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + v_{nN} \\
 v_{bN} &= L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + v_{nN} \\
 v_{cN} &= L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + v_{nN}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานของโหลด และ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโหลด นำสมการที่ 3.11 แทนค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะลงในสมการจะได้

$$v = L \frac{d\left(\frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c)\right)}{dt} + R\left(\frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c)\right) + \frac{2}{3}(e_a + ae_b + a^2e_c) + \frac{2}{3}(v_{nN} + av_{nN} + a^2v_{nN})$$

กำหนดให้โหลดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็น โหลดแบบสมดุล จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะดังสมการที่ 3.12

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (3.12)$$

เมื่อ v คือ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และ i คือเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด และ e คือ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

จากสมการที่ 3.12 สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้กับโหลดแบบสมดุลแสดงดังสมการที่ 3.13

$$e(k-1) = v(k-1) - \frac{L}{T_s}(i_k - (R - \frac{L}{T_s})i(k-1)) \quad (3.13)$$

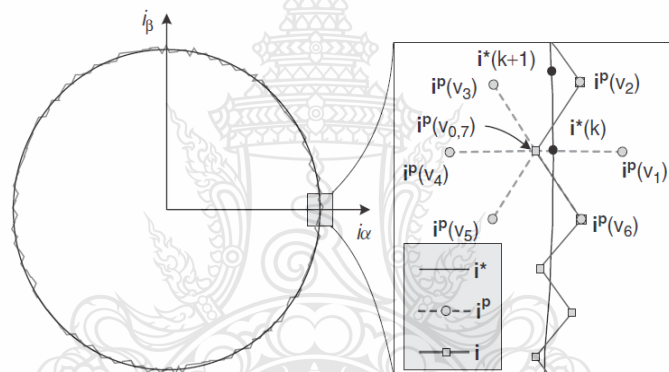
เนื่องจากความเร็วในการประมวลผลที่ใช้งานมีค่าสูงมากจึงกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ $e(k-1) = e$ เพื่อนำไปใช้งานในกระบวนการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าโดยการสมการที่ 3.12 และ 3.13 ในหัวข้อถัดไป

3.6 Model Predictive Current Control : MPC

การทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส นั้น มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

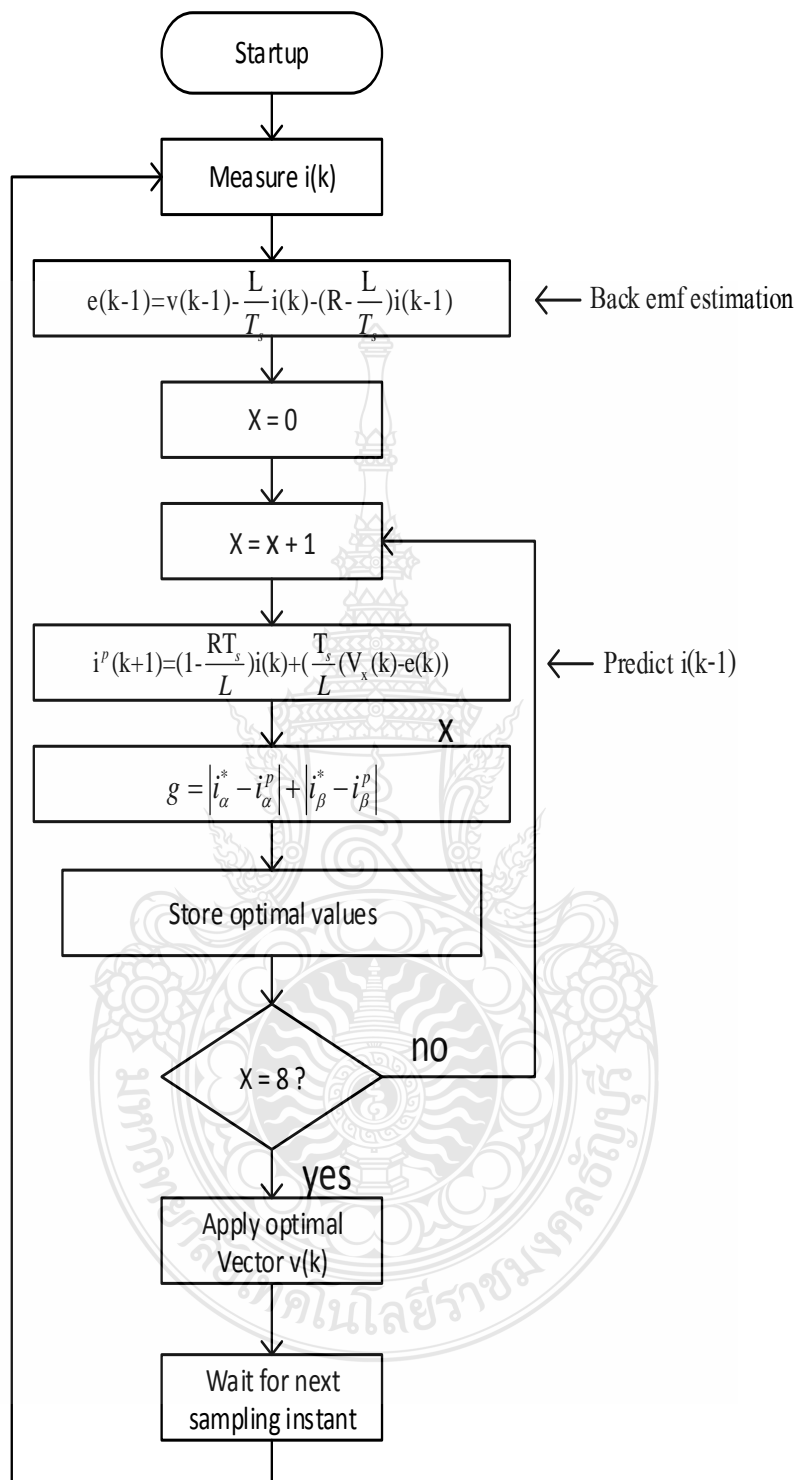
- วัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าของระบบ และทำการแปลงแกนจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้ อยู่ในรูป 2 เฟส $\alpha\beta$
- สร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า i^*d และ i^*q
- ประมวลผลโดยลอกริทึมในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและสร้างสัญญาณขับเคลื่อน การทำนายค่ากระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.12 หลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจาก

เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 2.16 จากบทที่ 2



รูปที่ 3.11 หลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.12 ภาพขยายแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าในรูปแบบการแปลงแกนที่ตำแหน่ง i_α ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (i^*) หรือ i_{ref} , กระแสไฟฟ้าจริง (i) หรือ i_k และกระแสไฟฟ้าที่ทำนายค่าได้ (i^P) หรือ $i(k+1)$ จากการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในตำแหน่งที่สถานะของการทำงานของสัญญาณขับเคลื่อนไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ให้ทำงานในตำแหน่งที่ถูกต้องสอดคล้องกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า $v(k)$ แสดงดังตารางที่ 2.1 และ ภาพที่ 2.3 ในบทที่ 2



รูปที่ 3.12 ไคอะแกรมการทำงานของแบบจำลองการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า [13]

การทำงานเพื่อสร้างสัญญาณขับเคลื่อนที่ตำแหน่งขาเกตของอินเวอร์เตอร์นั้น โดยใช้เทคนิควิธีการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบจากการสุ่มสัญญาณในแต่ละรอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลและทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและประมวลผลหาค่าที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละรอบของการทำงานเพื่อให้มีความสอดคล้องและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.14

จากรูปที่ 3.14 แสดงไดอะแกรมการทำงานภายในส่วนควบคุมการทำงานของวงจรควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในการประมวลผล และส่งค่าสัญญาณเอาต์พุตในการขับเคลื่อนให้กับอินเวอร์เตอร์ ในรูปแบบของ m file ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ในแต่ละรอบการประมวลผลการทำงานสามารถนำมาสร้างคำสั่งการเขียนโปรแกรมดังนี้

```
function [Sa,Sb,Sc] = control(I_ref,I_meas,Vdc,Ts)
```

ความหมาย : ประกาศฟังก์ชันส่งค่าสัญญาณขับเคลื่อน รับค่าสัญญาณอินพุตกระแสไฟฟ้าอ้างอิง, กระแสไฟฟ้าของระบบ, แรงดันไฟฟ้าอินพุต และค่าเวลาการประมวลผลสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์

```
R = 5.50;
```

ความหมาย : กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโหลดความต้านทาน (โอห์ม)

```
L = 10e-3;
```

ความหมาย : กำหนดค่าความเหนี่ยวนำ (มิลลิเฮนรี่)

```
v0 = 0;
```

```
v1 = 2/3*Vdc;
```

```
v3 = -1/3*Vdc + 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
```

```
v4 = -2/3*Vdc;
```

```
v5 = -1/3*Vdc - 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
```

```
v6 = 1/3*Vdc - 1j*sqrt(3)/3*Vdc;
```

```
v7 = 0;
```

```
v = [v0 v1 v2 v3 v4 v5 v6 v7];
```

```
states = [ 0 0 0; 1 0 0; 1 1 0; 0 1 0; 0 1 1; 0 0 1; 1 0 1; 1 1 1];
```

ความหมาย : กำหนดสถานะการทำงานจากสมการเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ

```
ik_ref = I_ref(1) + (1*j)*I_ref(2);
```

```
ik = I_meas(1) + (1*j)*I_meas(2);
```

ความหมาย : แยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงกับที่วัดได้

```
persistent x_old i_old x_opt
```

ความหมาย : กำหนดตัวแปรแบบถาวร

```
if isempty(x_old), x_old = 1; end
```

```
if isempty(i_old), i_old = 0+(j*0); end
```

```
if isempty(x_opt), x_opt = 0; end
```

```
g_opt = inf;
```

ความหมาย : กำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น

```
e = v(x_old) - L/Ts*ik - (R - L/Ts)*i_old;
```

ความหมาย : คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

```
i_old = ik;
```

ความหมาย : เก็บค่ากระแสไฟฟ้าปัจจุบัน

```
for i = 1:8
```

```
    v_o1 = v(i);
```

```
    ik1 = (1 - R*T_s/L)*ik + T_s/L*(v_o1 - e);
```

```
    g = abs(real(ik_ref - ik1)) + abs(imag(ik_ref - ik1));
```

```
    if (g < g_opt)
```

```
        g_opt = g;
```

```
        x_opt = i;
```

```
    end
```

```
end
```

ความหมาย : ทำการวนลูปรการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ ตามจำนวนของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าให้ครบทุกตัว (8 เวกเตอร์) เพื่อทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดน้อยที่สุด และทำการเก็บค่าตัวแปร g จาก cost function ที่มีค่าความเหมาะสม แสดงถึงการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ik1 จากสมการ $ik1 = (1 - R \cdot T_s / L) \cdot ik + T_s / L \cdot (v_{o1} - e)$

```

x_old = x_opt;
Sa = states(x_opt,1);
Sb = states(x_opt,2);
Sc = states(x_opt,3);

```

ความหมาย : กำหนดเอาต์พุตสัญญาณขับเคลื่อนที่ได้จากการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากการคำนวณ

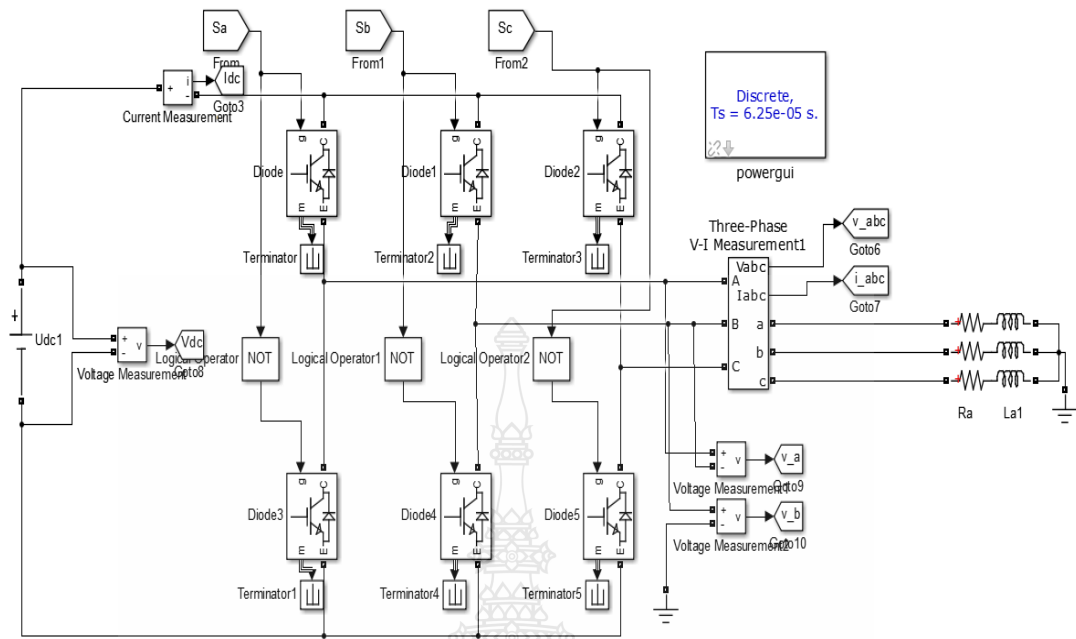
จากคำสั่งการเขียน โปรแกรม m file เมื่อสามารถเลือกและกำหนดสัญญาณเอาต์พุตสำหรับการขับเคลื่อน Sa, Sb และ Sc เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนที่สอดคล้องกับเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าในลำดับของการทำงานรอบถัดไปจากการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและทำการคำนวณไปรอบเวลาการทำงานใหม่เกิดขึ้น

3.7 ผลการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์

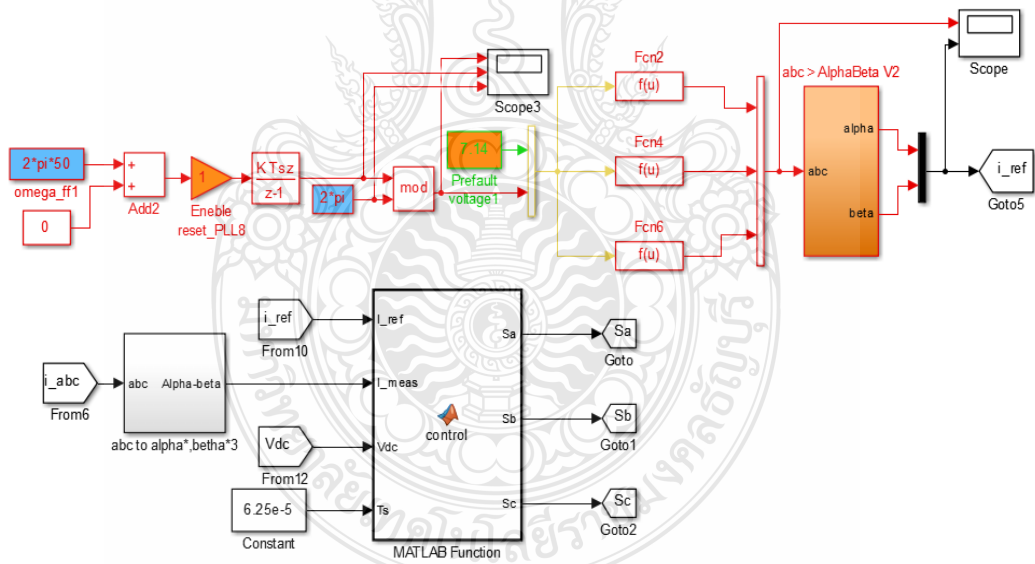
จากการศึกษาทางด้านทฤษฎี การทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน, การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า การแปลงแกนกรอบอ้างอิงจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็น 2 เฟส สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2 และแบบจำลองโมเดลดังรูปที่ 3.15 และ 3.16

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. อินพุต	120 V
ค่าความต้านทานภายในของฟิลเตอร์	500 mΩ
ค่าความเหนี่ยวนำของฟิลเตอร์	10 mH
ความถี่การคำนวณและการสวิตช์	1600 Hz

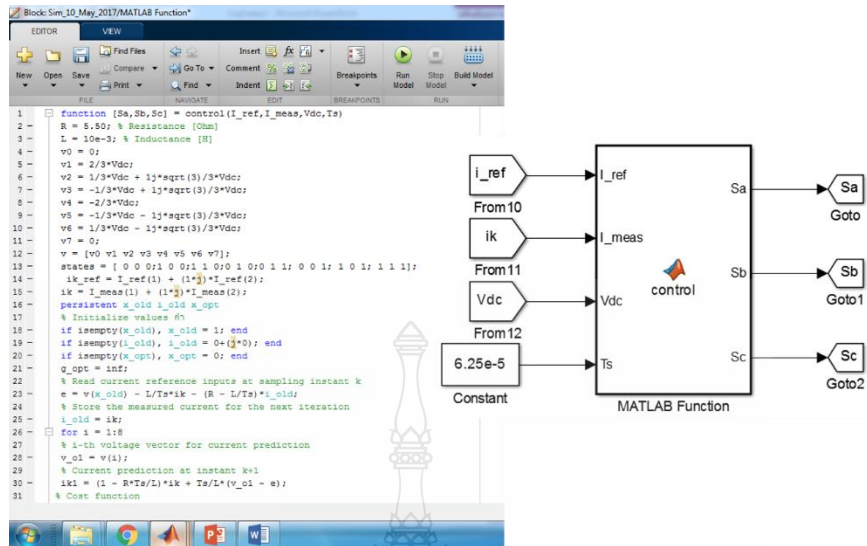


(ก)



(ข)

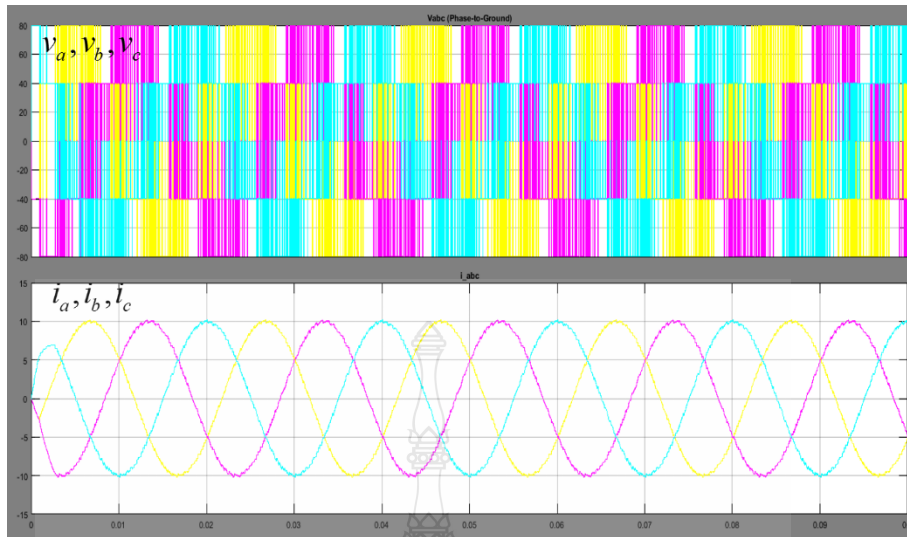
รูปที่ 3.13 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 2 ระดับ (ก) วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ (ข) ส่วนควบคุมการทำงานแบบการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



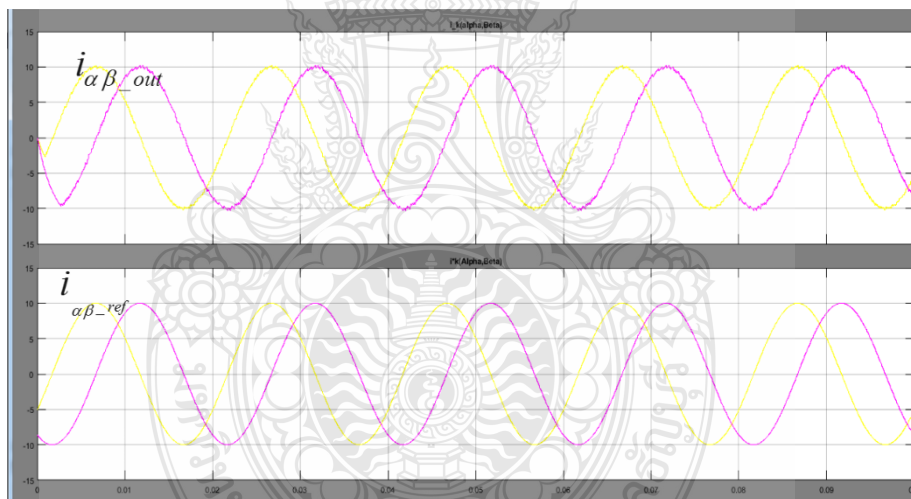
รูปที่ 3.14 อัลกอริทึมการควบคุมการทำงานค่ากระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.14 - 3.15 แสดงแบบจำลองที่สร้างด้วย Simulink Model ที่ทำการศึกษาและมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 แสดงแบบจำลองภาควงจรกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุต, อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, โหลด RL หรือภาระทางไฟฟ้า, การตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า, การแปลงแกนในระบบ 3 เฟสให้อยู่ในรูปแบบ 2 เฟส ทั้งนี้ส่วนประกอบย่อยที่สำคัญและเป็นสิ่งจำเป็นได้แก่ การแปลงแกนกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง หรือ การแปลงแกน $\alpha\beta$

อัลกอริทึมการทำงานค่ากระแสไฟฟ้า ประกอบไปด้วยสัญญาณอินพุตจาก 2 แหล่งคือ อินพุตกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและ อินพุตกระแสไฟฟ้าของระบบ เพื่อใช้ในการคำนวณและทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณขั้วเกิด Sa, Sb และ Sc ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดันในแต่ละไซเคิลหรือรอบการประมวลผลการทำงาน โดยตัวแปรทั้ง 2 ตัวแปรนี้จะต้องทำการแปลงแกนจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่ในรูปของแกนอ้างอิงแบบสองเฟส ($\alpha\beta$) ไดอะแกรมการทำงานของแบบจำลองการควบคุมการทำงานค่ากระแสไฟฟ้าวางหน้า ในรูปแบบของ m File ดังรูปที่ 3.17



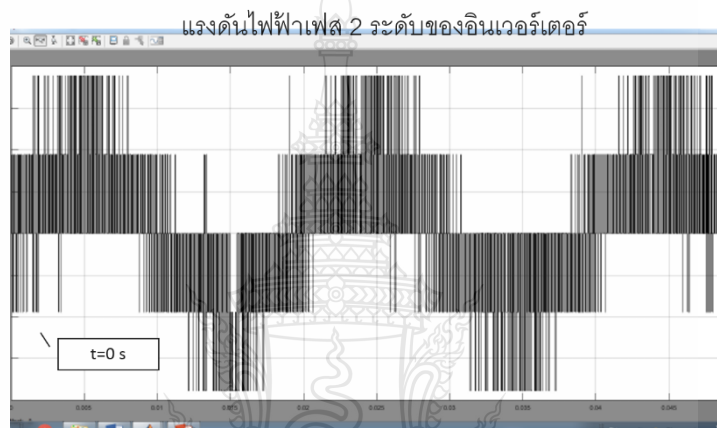
(ก)



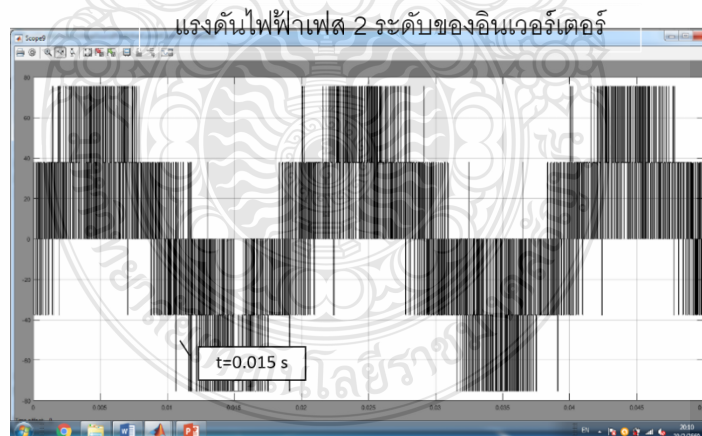
(ข)

รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟสขาออก (ที่จุด ABC ของรูปที่ 3.14 ก.) (ข) รูปคลื่นกระแส $\alpha\beta$ ขาออก เทียบกับกระแส $\alpha\beta$ อ้างอิง

รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทดสอบแบบจำลองที่ได้ดำเนินการศึกษาและออกแบบ แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเลือกสัญญาณที่กำหนด จากผลการศึกษา พบว่าความเร็วในการเลือกใช้ประมวลผลในแต่ละรอบการทำงานที่เวลา $62.5 \mu\text{s}$ ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด ให้เอาต์พุตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการควบคุมด้วยอัลกอริทึมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่ง่าย มีทิศทางที่สอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ



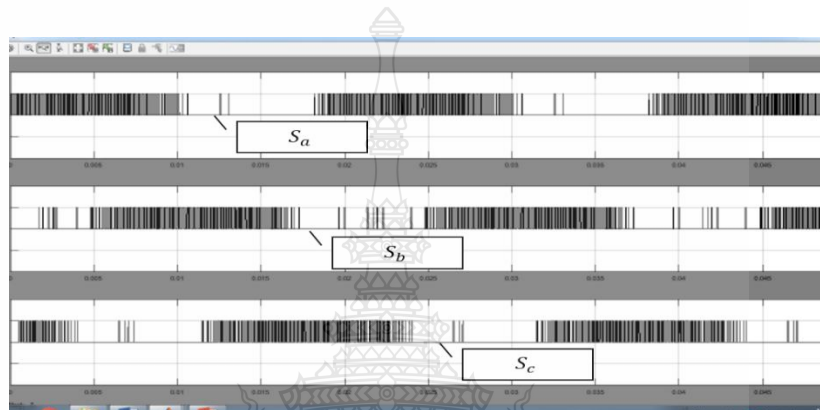
(ก)



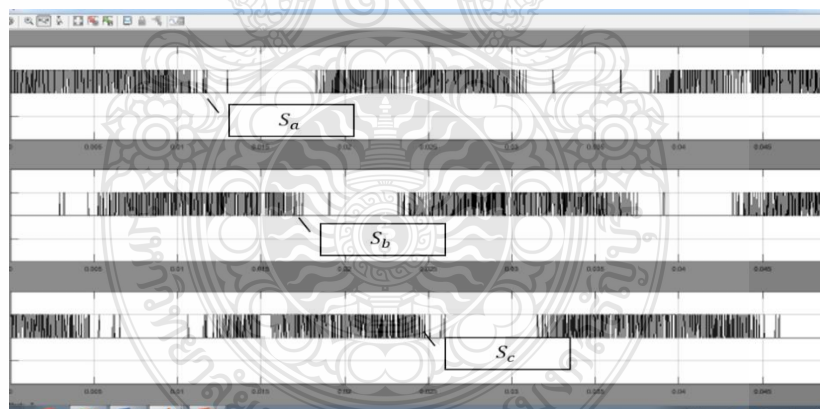
(ข)

รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าเฟสของอินเวอร์เตอร์ (ก) เอาต์พุตสัญญาณที่เวลา $t = 0 \text{ s}$
 (ข) เอาต์พุตสัญญาณกระแสที่เวลา $t = 0.015 \text{ s}$

รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง ที่ทำการสร้างขึ้นตามหลักการและทฤษฎีที่ทำการศึกษา โดยทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของระบบ สำหรับการพิสูจน์การทำงานของแบบจำลองให้สอดคล้องกันระหว่างการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ไปในทิศทางเดียวกัน และสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดันด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมเกต (ก) เอาท์พุตสัญญาณที่เวลา $t = 0$ s (ข) เอาท์พุตสัญญาณกระแสที่เวลา $t = 0.015$ s

3.8 สมการและค่า THD ของวงจรอินเวอร์เตอร์

สมการค่าความเพี้ยนของสัญญาณขาออกและสมการประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แสดงดังสมการข้างล่างดังนี้

สมการการคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V^{2h(rms)}}}{V_{1(rms)}} \times 100\% = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_{1(rms)}} \times 100\% \quad (3.14)$$

สมการการคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า

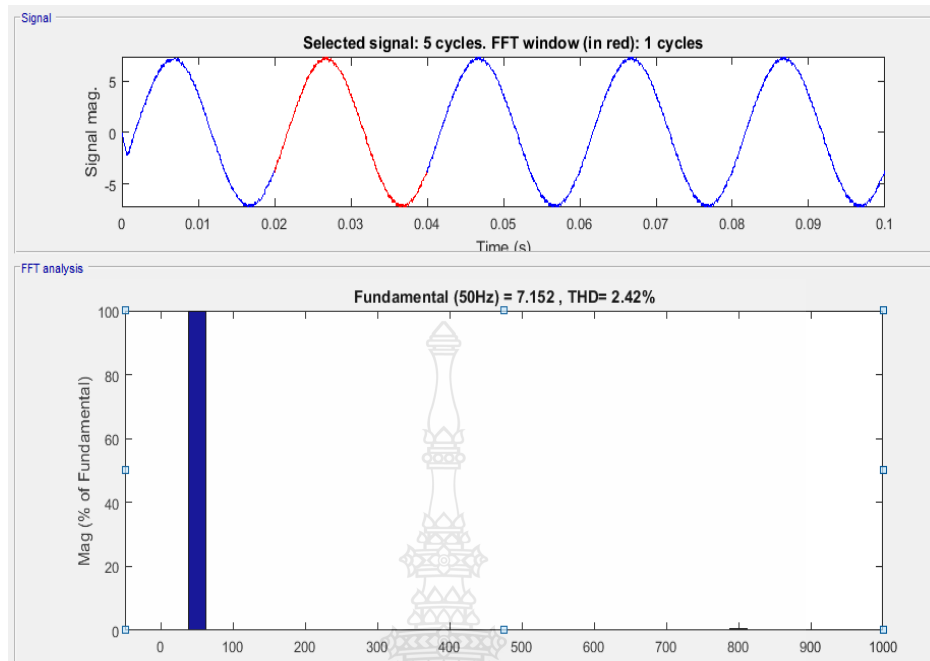
$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^{2h(rms)}}}{I_{1(rms)}} \times 100\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_{1(rms)}} \times 100\% \quad (3.15)$$

สมการการวัดค่ากำลังไฟฟ้า

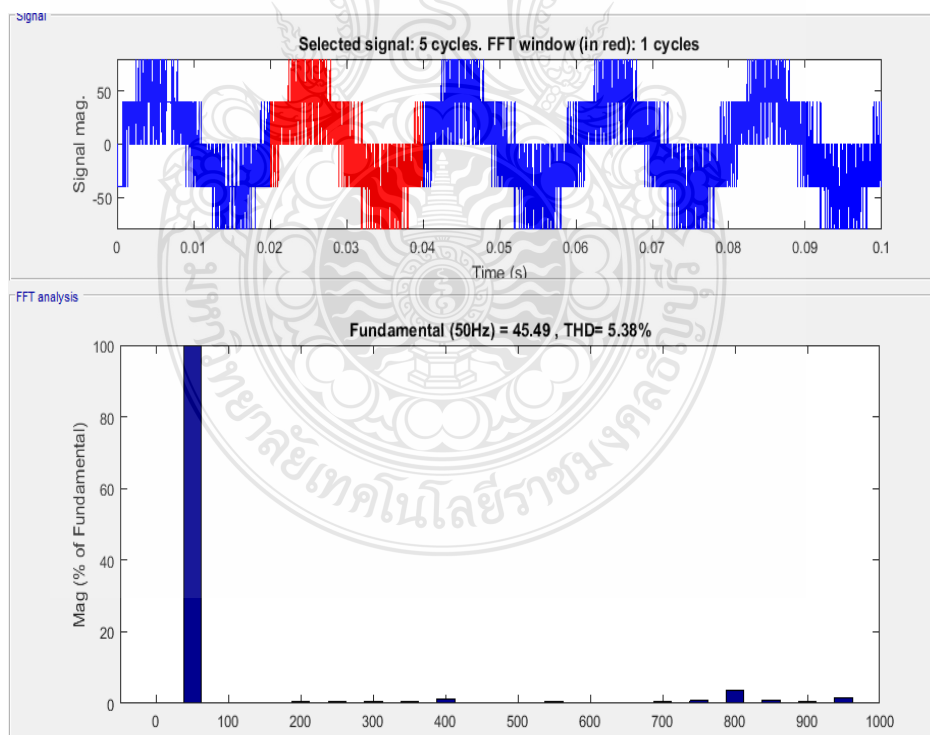
$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (3.16)$$

สมการหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

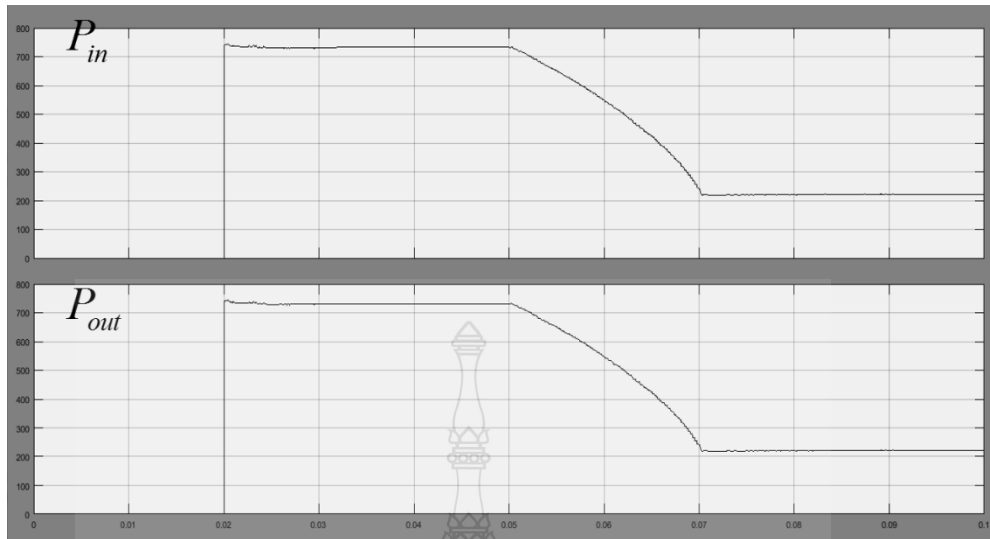
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.18 ผลการวัดเอาต์พุตสัญญาณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสักระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 ผลการวัดเอาต์พุตสัญญาณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าและขาออก

รูปที่ 3.19 - 3.121 แสดงการวัดค่าเอาต์พุตฮาร์มอนิกสักระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ตามลำดับที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สร้างจากสมการการคำนวณรูปแบบของบล็อกโคอะแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับนำไปใช้ในการเปรียบเทียบและศึกษาผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบจริงในลำดับถัดไป

3.9 การออกแบบระบบกำลังและระบบควบคุมในงานวิจัย

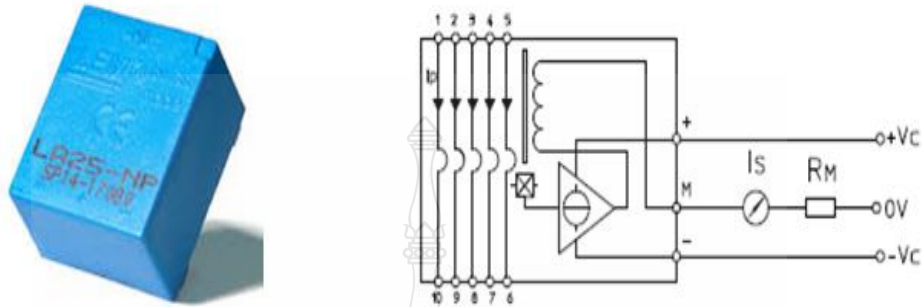
การศึกษาและออกแบบควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินการประกอบไปด้วย การตรวจวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า, การประมวลผลควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, รูปแบบและการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสด้วย Intelligent Power Module และ การเชื่อมต่อวงจรและทดสอบกับระบบไฟฟ้า

3.9.1 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแส

ในการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า ในการประมวลผลการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อความปลอดภัยของการออกแบบ ในการสร้างสัญญาณควบคุมจำเป็นที่จะต้องทำการแยกสัญญาณระหว่างส่วนภาคกำลังไฟฟ้าและภาคการควบคุม

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์ชนิดฮอลล์เอฟเฟกต์ LA25-NP สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีขนาดเล็ก มีความแม่นยำ มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีอุณหภูมิการทำงานต่ำ

ทำงานได้ในย่านความถี่ที่กว้าง ค่าการสูญเสียสอดคล้องเป็นศูนย์ ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ดี และสามารถติดตั้งได้บนแผ่นวงจรที่ออกแบบไว้ในวงจรเดียวกันได้



รูปที่ 3.21 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า LA25-NP

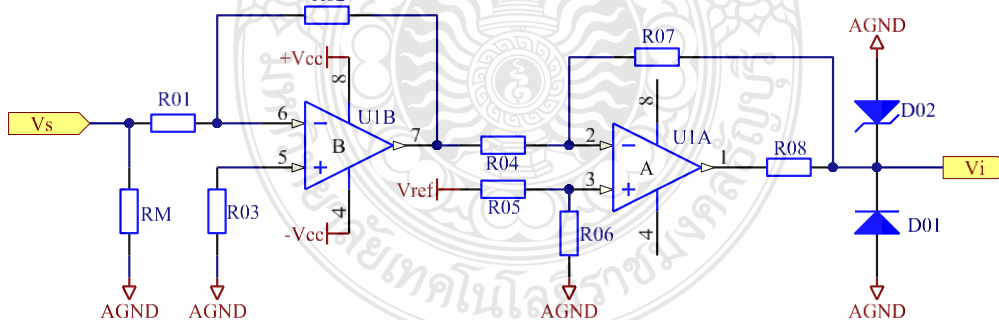
จากรูปที่ 3.34 R_m คือ ค่าความต้านทานที่ต่อในวงจรทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดค้ำทุติยภูมิของเซนเซอร์เกิดแรงดันตกคร่อมที่ค่าความต้านทาน R_m จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมที่ได้ในการส่งสัญญาณให้กับส่วนปรับระดับและยกระดับสัญญาณ ในส่วนของพิกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้งานได้แสดงดังรูปที่ 3.36 โดยสามารถพิจารณาได้จากวิธีการต่อวงจรของเซนเซอร์ที่แนะนำ

Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_p [m Ω]	Primary insertion inductance L_p [μ H]	Recommended connections
	nominal I_{pN} [A]	maximum I_p [A]					
1	25	36	25	1 / 1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2 / 1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3 / 1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4 / 1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	

รูปที่ 3.22 โดอะแกรมการต่อวงจรของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.35 กำหนดให้ LAH25-P สามารถวัดค่ากระแสสูงสุดทางด้านปฐมภูมิได้ 25 A การต่อวงจรตามข้อที่ 1 จะได้อัตราส่วน 1 ต่อ 1000 ของเซนเซอร์ หมายความว่าเราสามารถที่จะวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 25 A และให้กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ 25 mA ทำการเลือกค่าความต้านทาน R_m ให้เหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อหาค่าแรงดันตกคร่อม จะได้ว่า

สำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.36 มีหลักการเช่นเดียวกันกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยการเลือกขนาดของค่าความต้านทาน R_m ที่มีความเหมาะสมกับพิกัดหรือย่านการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน อยู่ในช่วงพิกัดกระแสทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ประมาณ 10 mA (ค่ากระแสใช้งานจริง) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ โดยมีค่าความต้านทาน R_1 เป็นตัวกำหนดค่าที่ต้องการวัดแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียงประมาณ 10 mV ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.37 แสดงข้อมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทาน R_1 ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ต้องการในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.23 วงจรการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3.38 เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านและแปลงสัญญาณอนาล็อกอยู่ในย่าน 0-3.3 โวลต์ แต่เนื่องจาก สัญญาณกระแสไฟฟ้ามีทั้งซีกบวกและซีกลบ

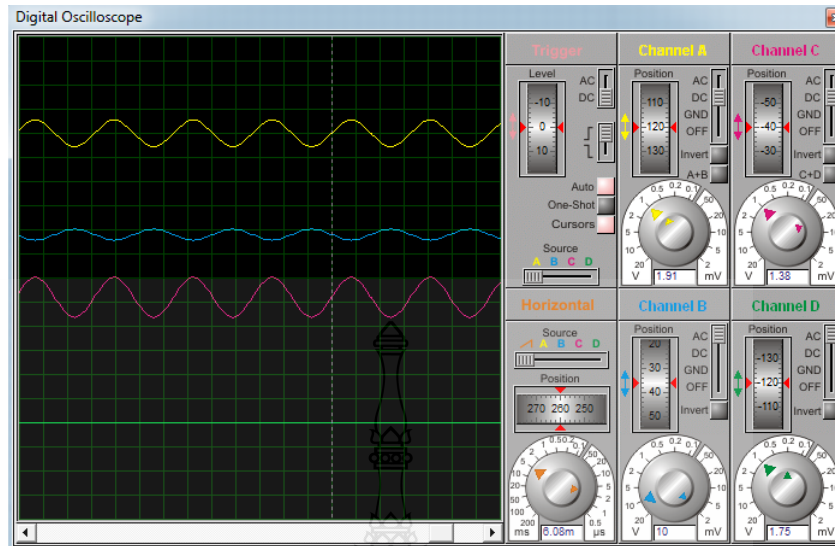
จึงจำเป็นที่จะต้องมีการยกระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์ฮอลล์เอฟเฟกต์ ในและทำการขยายสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0-3.3 โวลต์ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปใช้ประมวลผลได้ต่อไป ด้วยไอซีขยายสัญญาณ TL072 ดังสมการ

$$V_i = \frac{R_7}{R_4} \times \frac{R_2}{R_1} \times V_s + \frac{R_4 + R_7}{R_4} + \frac{R_6}{R_6 + R_5} \times V_{\text{ref}} \quad (3.16)$$

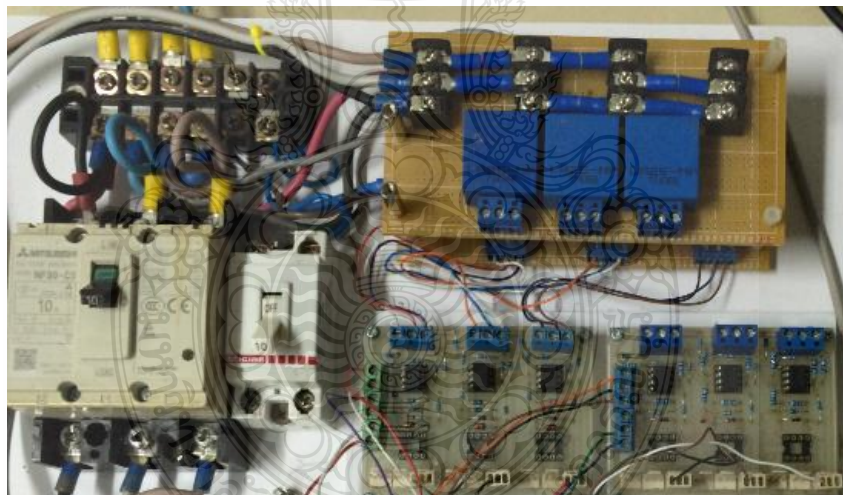
กำหนดให้ $R_4 = R_5$ และ $R_6 = R_7$ จะได้

$$V_i = \frac{R_7}{R_4} \times \left(V_{\text{ref}} + \frac{R_2}{R_1} \times V_s \right) \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{ref} และค่าความต้านทานไฟฟ้า R_4 และ R_7 ทำให้สามารถควบคุมขนาดสัญญาณอินพุต V_s ให้อยู่ในช่วง 0-2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงย่านแรงดันอินพุต เช่น ย่านแรงดันอินพุตทอนาล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ที่ 0-3 โวลต์ จะได้ว่า V_{ref} มีค่าเท่ากับ 0- 3 โวลต์ สามารถกำหนดค่าความต้านทาน R_4 และ R_7 เพื่อควบคุมให้สามารถอ่านค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสกลับที่อยู่ในช่วง R_4 จะมีค่าเท่ากับจำนวน 2 เท่าของ R_7



รูปที่ 3.24 ผลลัพธ์การปรับขนาดและขั้วระดับสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

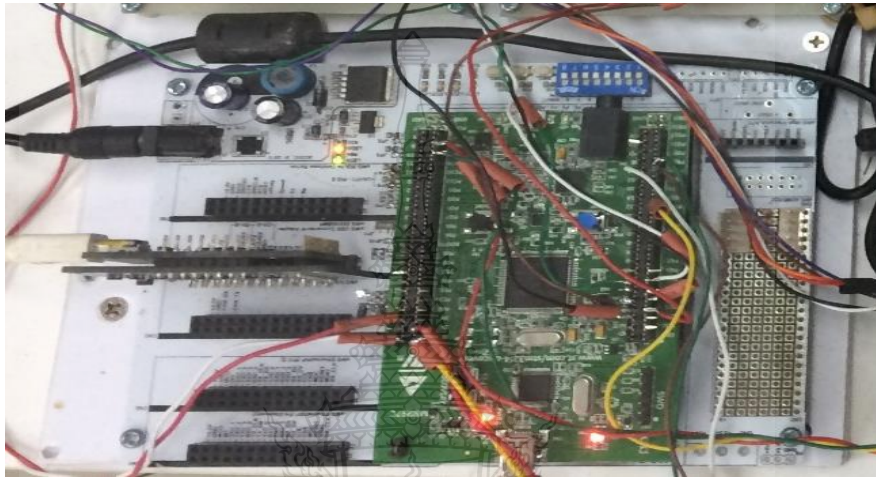


รูปที่ 3.25 วงจรภาคตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส

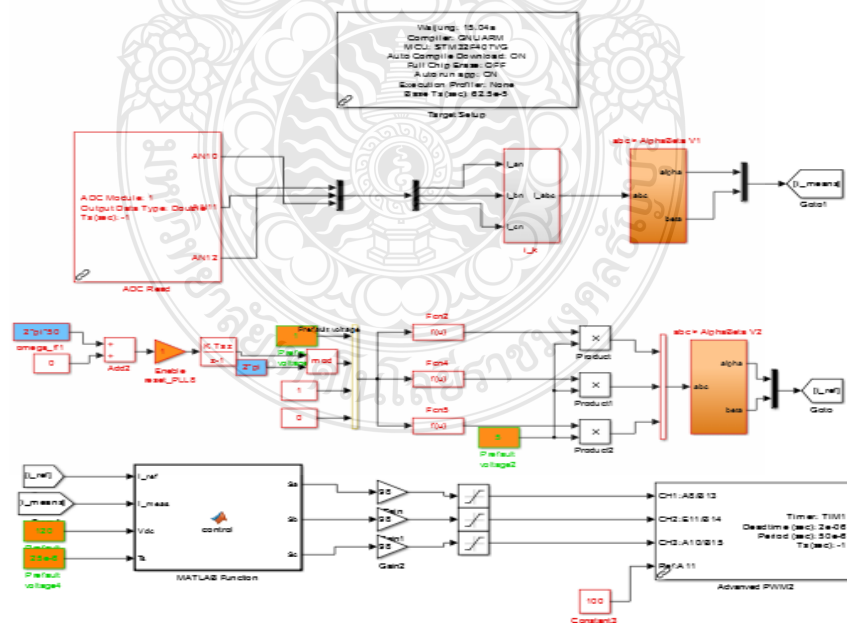
จากรูปที่ 38-40 แสดงวงจรการทำงาน ผลการจำลองการทำงาน และวงจรภาคตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ดำเนินการออกแบบและนำไปใช้งาน หลักจากทำการศึกษาคำนวณ ออกแบบ และทดสอบการทำงาน ประกอบไปด้วย การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์ และทำการนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและขั้วระดับสัญญาณแรงดัน ดังสมการที่ 3.17

3.8.2 ส่วนประมวลผลและควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

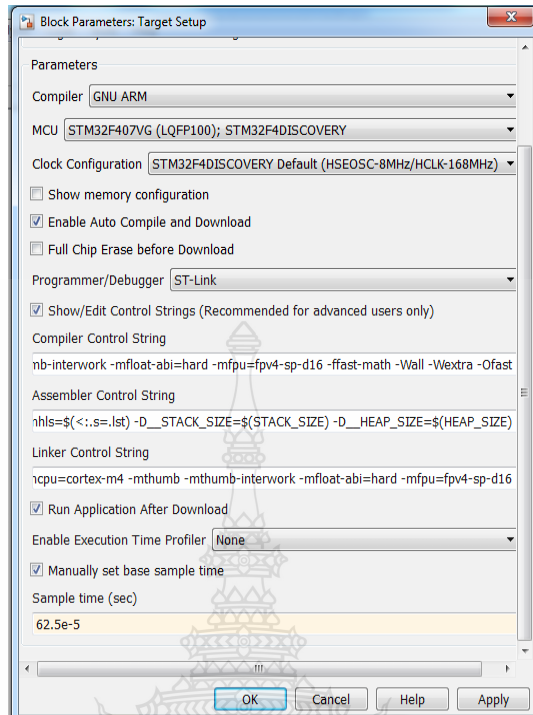
ตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการประมวลผล และประยุกต์ใช้งาน ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักสำคัญดังนี้คือ ภาคการตรวจวัดสัญญาณอินพุต, ภาคการคำนวณหรือ อัลกอริทึมการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า และ ภาคขับสัญญาณเกิด แสดงดังรูปที่ 3.27 - 3.29



รูปที่ 3.26 การอินเตอร์เฟสบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery



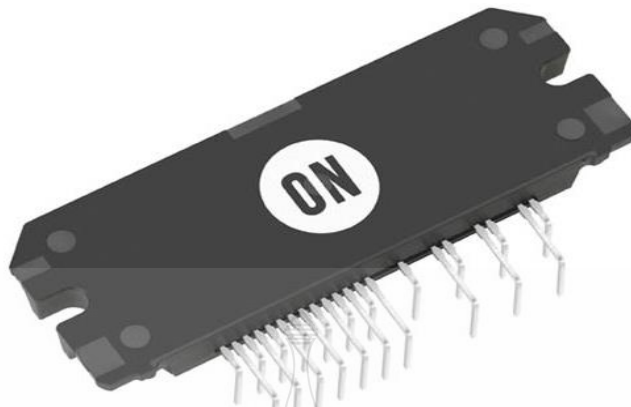
รูปที่ 3.27 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 3.28 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

3.8.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสด้วย Intelligent Power Module

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อความรวดเร็วและเพื่อมุ่งเน้นผลลัพธ์เทคนิคการควบคุม อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ แบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และลดความซับซ้อนในด้านการศึกษา ทดลอง จึงเลือกใช้อุปกรณ์ด้านภาคกำลังและภาคควบคุม ภาควงจรรวมสำเร็จรูปชนิด IPM (Intelligent Power Module) อนุกรม STK554U3XX ดังรูปที่ 3.32

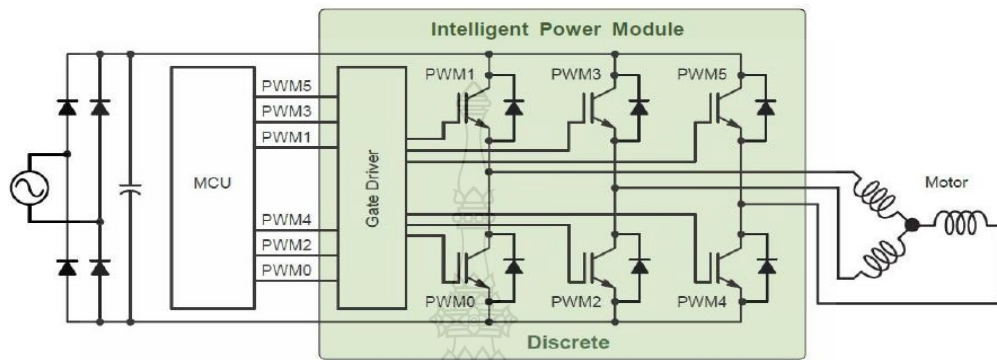


รูปที่ 3.29 วงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX

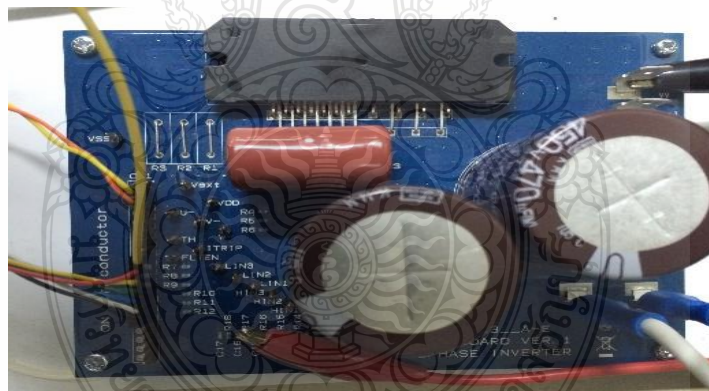
STK554U3XX พัฒนาโดยบริษัท ONs Insulated Metal Substrate Technology (IMST) ซึ่งออกแบบมาใช้งานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส จึงมีโครงสร้างมาตรฐานและสถาปัตยกรรมภายในที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ในงานเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ และสิ่งที่สำคัญคือภายในตัวอุปกรณ์ไอซีหลักประกอบด้วยวงจรรวมภาคกำลังไฟฟ้า และวงจรรวมภาคการควบคุมไว้ในตัวเดียวกัน สามารถสรุปคุณลักษณะเด่นได้ดังนี้

- สามารถใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงและควบคุมการทำงานการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ภายในอุปกรณ์วงจรรวมตัวเดียวและมีขนาดเล็ก (Single SIP Module)
- ภาคขับสัญญาณเอาต์พุตด้วย IGBT/FRD มีการป้องกันแรงดันไฟฟ้าตก, การป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน โดยแสดงเอาต์พุตสัญญาณเมื่อเกินความผิดปกติเพิ่มเติมไดโอดภายในสำหรับภาคขับสัญญาณเกตแรงดันสูง
- ฟังก์ชันเพิ่มเติมการป้องกันตรวจจับกระแสไฟฟ้าเกินด้วย Shunt resistor ในแต่ละเฟส โดยการทำงานร่วมกันหรือเป็นอิสระต่อกันได้
- มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายนอกด้วยเทอร์มิสเตอร์ภายในอุปกรณ์
- ใช้สัญญาณควบคุมอินพุตและให้สถานะเอาต์พุตที่แรงดันต่ำ และเหมาะสมกับการนำไปใช้ควบคุมด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง
- ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในส่วนควบคุมเพียงแหล่งจ่ายเดียวด้วย Boost strap ภายในสำหรับวงจรขับเคลื่อนด้านแรงดันสูง

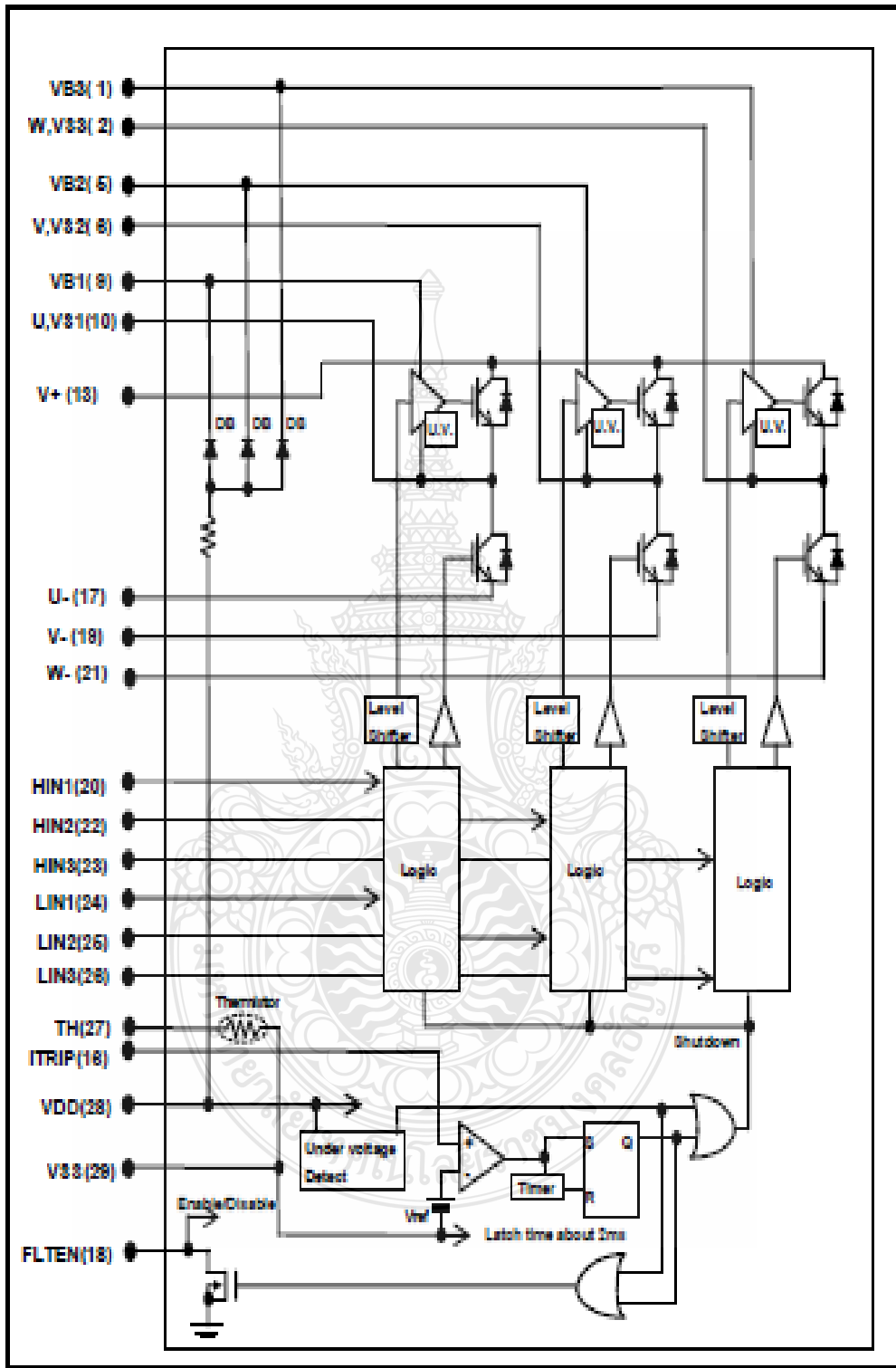
รูปที่ 3.45 – 3.49 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX ที่นำมาประยุกต์ในงานวิจัยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และวงจรสมมูลภายใน



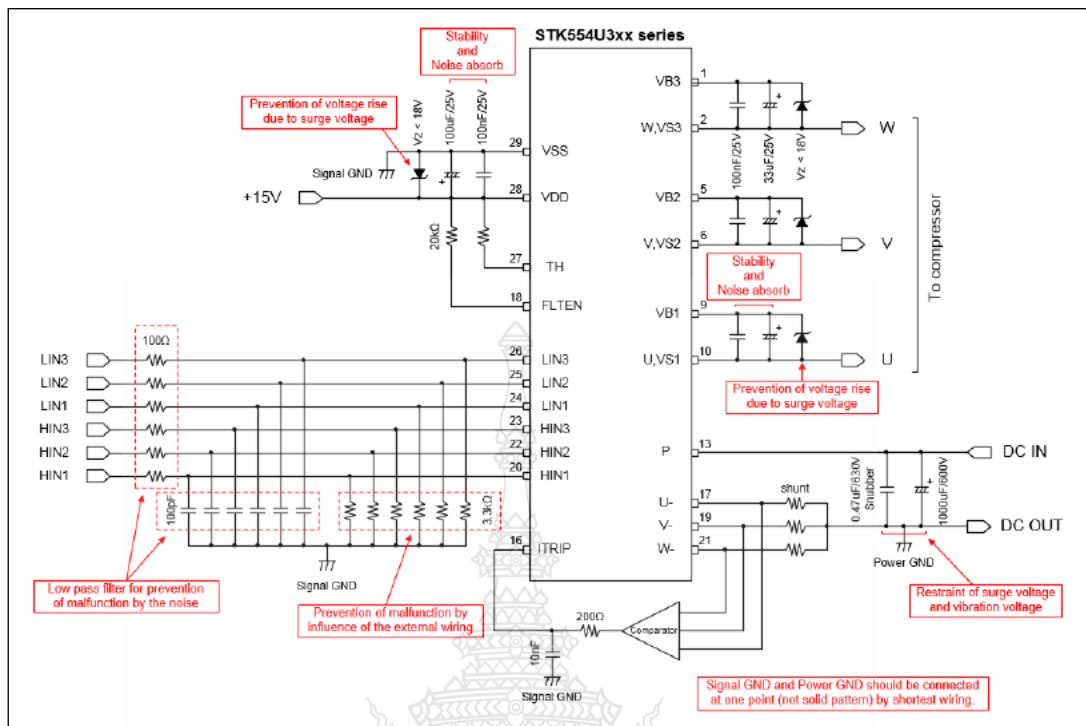
รูปที่ 3.30 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX



รูปที่ 3.31 บอร์ดอินเวอร์เตอร์ STK554U3XX ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3.32 วงจรสมมูลภายในของวงจรรวม IPM อนุกรม STK554U3XX



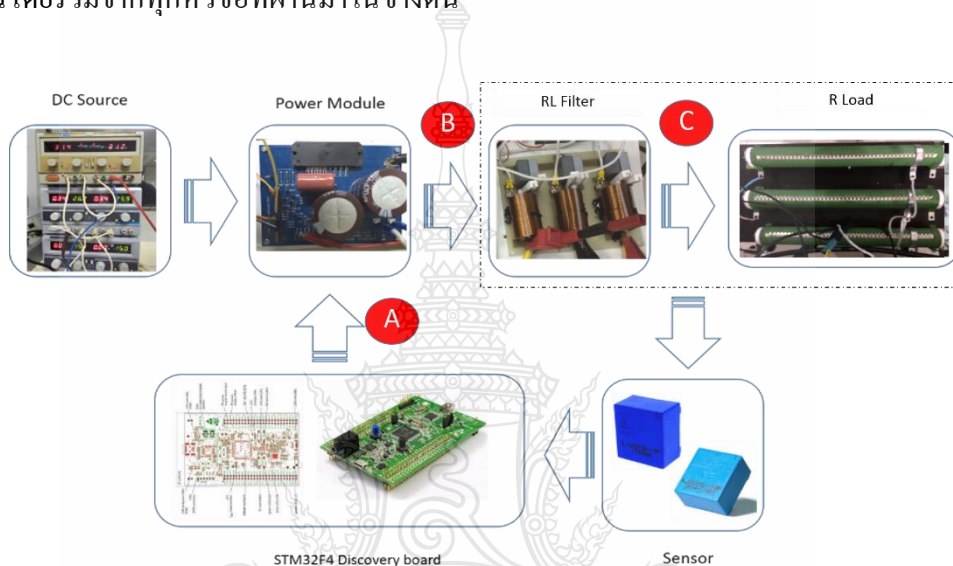
รูปที่ 3.33 วงจรการต่อใช้งาน วงจรรวม STK554U3xx

Pin	Name	Description
1	VB3	High Side Floating Supply Voltage 3
2	W,VS3	Output 3 - High Side Floating Supply Offset Voltage
3	NA	none
4	NA	none
5	VB2	High Side Floating Supply voltage 2
6	V,VS2	Output 2 - High Side Floating Supply Offset Voltage
7	NA	none
8	NA	none
9	VB1	High Side Floating Supply voltage 1
10	U,VS1	Output 1 - High Side Floating Supply Offset Voltage
11	NA	none
12	NA	none
13	+	Positive Bus Input Voltage
14	NA	none
15	NA	none
16	ITRIP	Shut-down Pin
17	U-	Low Side Emitter Connection - Phase 1
18	FLTEN	Fault Signal Output & Enable
19	V-	Low Side Emitter Connection - Phase 2
20	HIN1	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 1
21	W-	Low Side Emitter Connection - Phase 3
22	HIN2	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 2
23	HIN3	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 3
24	LIN1	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 1
25	LIN2	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 2
26	LIN3	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 3
27	TH	Temperature Monitor
28	VDD	+15V Control Power Supply
29	VSS	Negative Control Power Supply

รูปที่ 3.34 ตำแหน่งขาวงจรรวม STK554U3xx

3.8.4 การประกอบวงจรและการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาและทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส สองระดับแรงดัน โดยใช้เทคนิควิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ที่ผ่านการทดสอบโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ในหัวข้อที่ผ่านมา แสดงลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆทางด้านฮาร์ดแวร์โดยสรุปดังรูปที่ 3.36 เพื่อให้เห็นภาพไต่อะแกรมการทำงานโดยรวมจากทุกหัวข้อที่ผ่านมาในข้างต้น



รูปที่ 3.35 ไต่อะแกรมการทำงานรวมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

รูปที่ 3.36 แสดงการทำงานภาคส่วนการทำงาน โดยสรุปคือ 1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 2. โมดูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3. อุปกรณ์กรองสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 4. อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า 5. โหลดหรือภาระของระบบ และ 6. บอร์ดประมวลผลสัญญาณและควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถอธิบายโดยสรุปดังหัวข้อต่อไปนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการสำหรับการทดลอง โดยการนำแหล่งจ่ายจำนวน 2 ชุด มาต่ออนุกรมกันทั้ง 2 ชุด ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้ 120 โวลต์ ตามค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 3.37

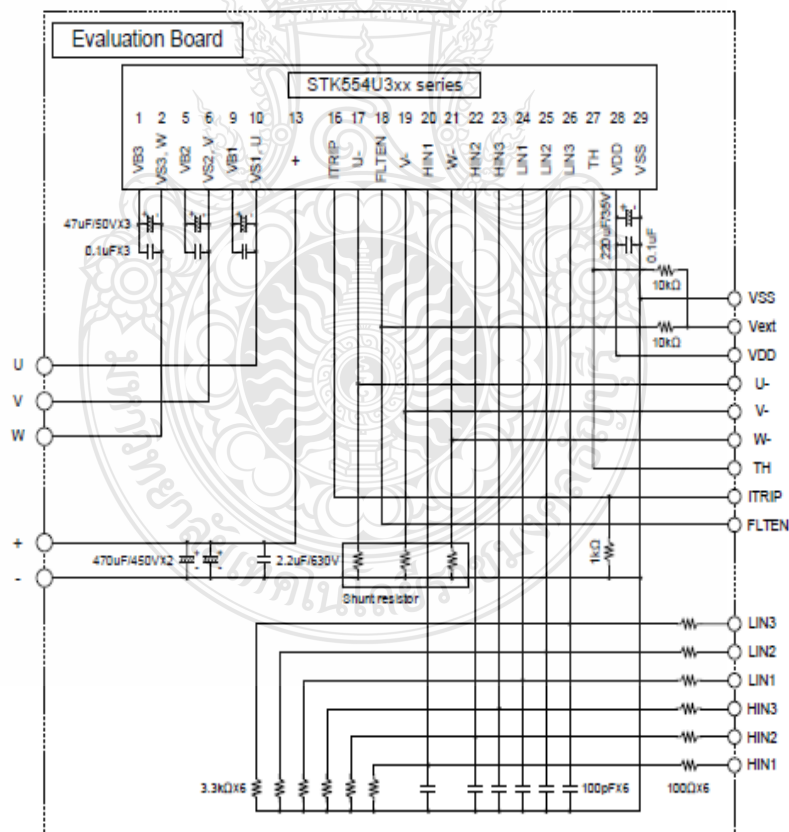


รูปที่ 3.36 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2) โมดูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด IPM STK554U362A-E อุปกรณ์นี้เป็นวงจรรวมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส พิกัดกำลังไฟฟ้า 10 A มีข้อดีคือสามารถออกแบบเขียนโปรแกรมควบคุม และเพื่อให้มีความสะดวกในการทำงานโดยรวมในภาคส่วนวงจรควบคุม วงจรตรวจจับความบกพร่องของกระแสไฟฟ้าเกิน วงจรการป้องกันการทำงานของสัญญาณการควบคุมที่ผิดพลาด วงจรตรวจจับอุณหภูมิสูงเกิน วงจรป้องกันการจุดชนวนเกตที่ผิดพลาด แต่ยังคงต้องการวงจรป้องกันการทำงานของ Dead time ที่จะต้องป้องกันจากภายนอกไม่น้อยกว่า 2 ไมโครวินาที และใช้แหล่งจ่ายสัญญาณควบคุมเกตในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ได้รวบรวมอยู่ในชุดเดียวกันอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดเพิ่มเติมในแต่ละรุ่นแสดงดังรูปที่ 3.38 และรูปที่ 3.39 แสดงวงจรสมมูลการต่อใช้งานบอร์ดวงจรรวม STK554U3xx

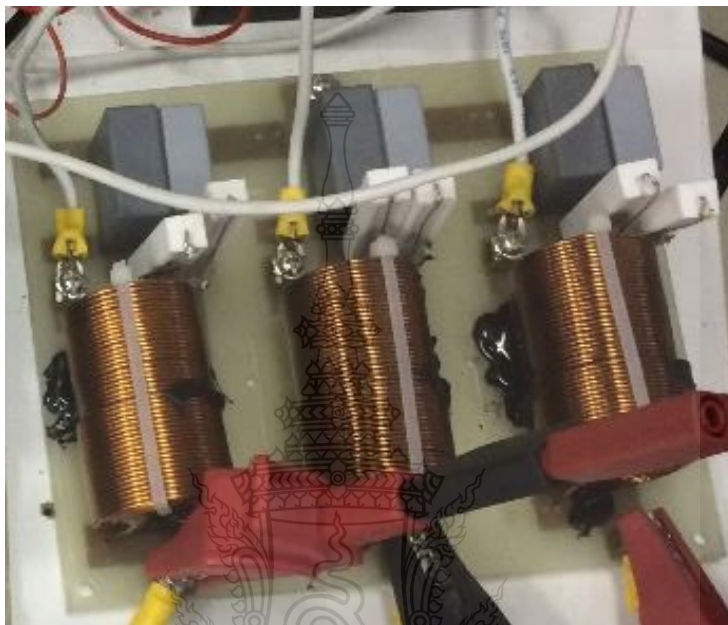
Device	STK554U362A-E	STK554U392A-E	STK554U3A2A-E
Feature	triple shunts		
Package	SIP1A – horizontal pins		
Voltage (VCEmax.)	600V		
Current (Ic)	10A	15A	20A
Peak current (Ic)	20A	30A	40A
Isolation voltage	2000V		
Shunt resistance	external		

รูปที่ 3.37 รายละเอียดคุณสมบัติวงจรรวม STK554U3xx



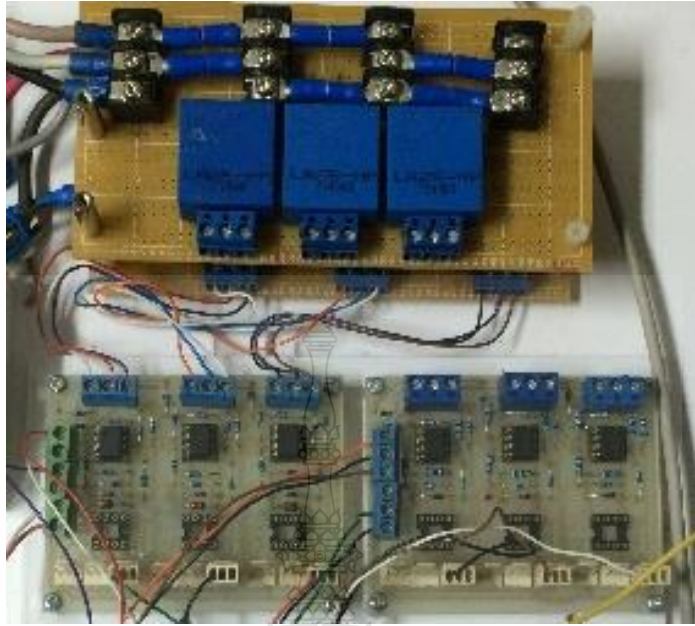
รูปที่ 3.38 วงจรสมมูลการต่อใช้งานบอร์ดวงจรรวม STK554U3xx

3) อุปกรณ์กรองสัญญาณเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ เป็นตัวช่วยในการกรองสัญญาณเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.40 มีขนาด 10 mH ค่าความต้านทานภายใน 0.5 โอห์ม ในการทดลอง



รูปที่ 3.39 อุปกรณ์กรองสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออก

4) ภาควัดค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากในเรื่องทฤษฎีของการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า มีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่ากระแสอินพุตของระบบที่แม่นยำ เพื่อนำไปประมวลผลให้กับอัลกอริทึม ในการสร้างสัญญาณควบคุมให้มีความสอดคล้องกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ระบบจะสร้างได้จากการควบคุมภาควงจรถ้าจำเป็น เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ผ่านตัวกรองสัญญาณกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.41



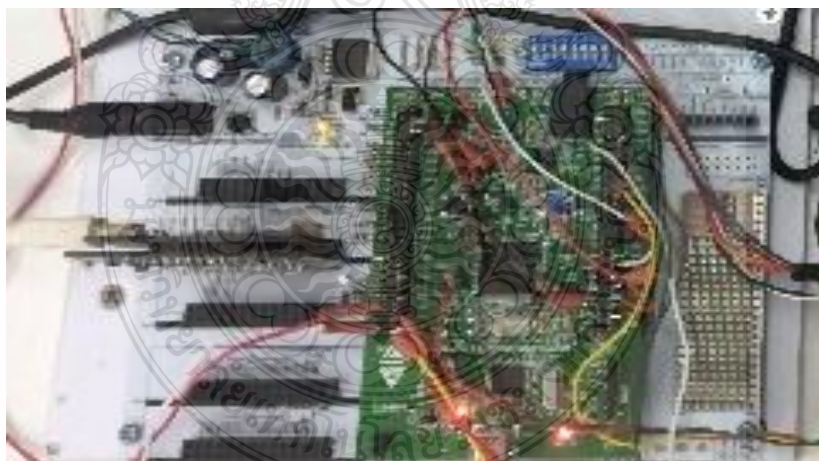
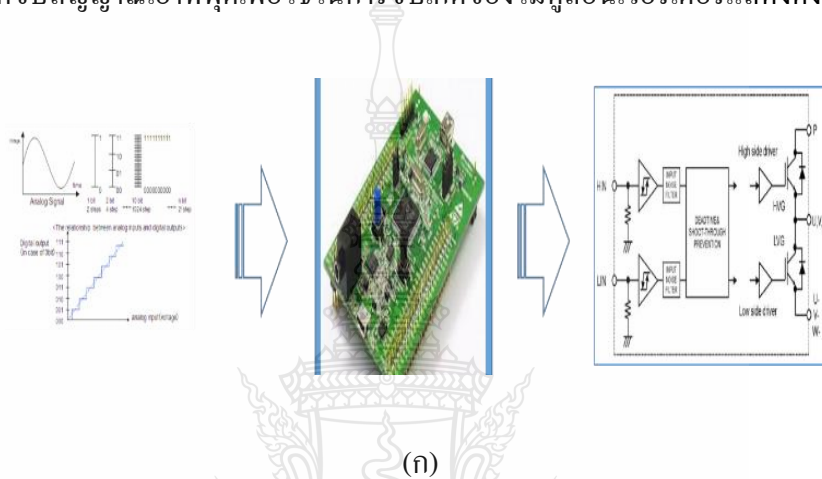
รูปที่ 3.40 ภาพการตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบ

5) โหลดหรือภาระของระบบที่ใช้ในการทดสอบ กับค่าความต้านทานในการวัดและศึกษาประสิทธิภาพจากการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 3.42 เป็นค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 0-5 โอห์ม โดยทำการศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าและทำการวัดหาค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบศึกษาการทดลอง



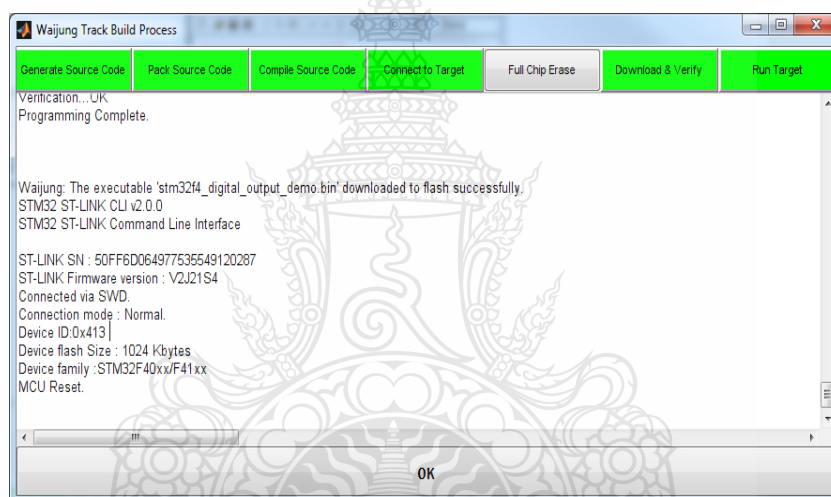
รูปที่ 3.41 โหลดความต้านทานไฟฟ้า

6) บอร์ดประมวลผลสัญญาณและควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ หลักการทำงานในเบื้องต้นของบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery มีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ด้านซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมควบคุมการทำงาน และด้านฮาร์ดแวร์ โดยในส่วนของซอฟต์แวร์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ในด้านส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์การควบคุม ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ภาคการตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบผ่านทางช่องอ่านสัญญาณ A/D และในส่วนของภาคขับสัญญาณเอาต์พุตเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.42 ส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์การควบคุม (ก) รูปแบบการอินเทอร์เฟสสัญญาณ
(ข) การต่อบอร์ดควบคุม

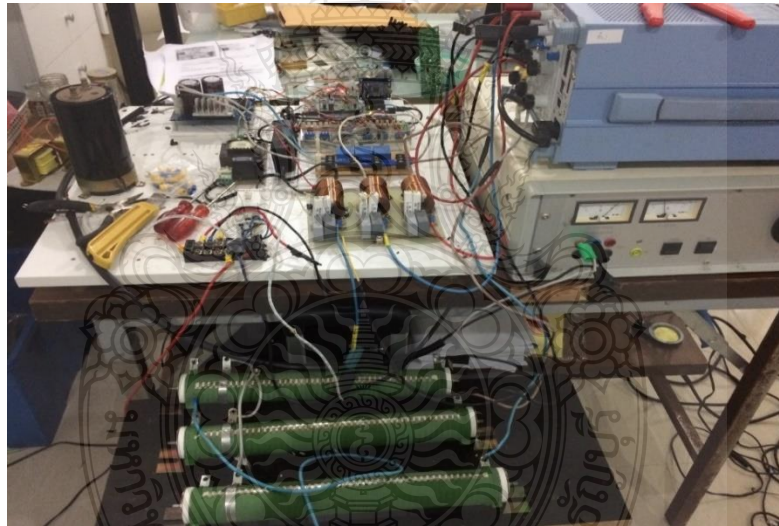
หลังจากการนำส่วนประกอบฮาร์ดแวร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อทำการศึกษา โดยการ ออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ร่วมกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink และฮาร์ดแวร์ในแต่ละภาคส่วนที่สำคัญ และทำการโหลดโปรแกรมลงบอร์ดประมวลผลดังรูปที่ 3.44 หากไม่มีข้อผิดพลาดหรือแก้ไข การปรับตั้งอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ให้ทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ตามที่ออกแบบไว้ จะได้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่พร้อมที่จะทำการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.44 - 3.46



รูปที่ 3.43 หน้าต่างแสดงการติดตั้งซอฟต์แวร์ด้วย Waijung Track Build Process



รูปที่ 3.44 การทดสอบการควบคุมอินเวอร์เตอร์



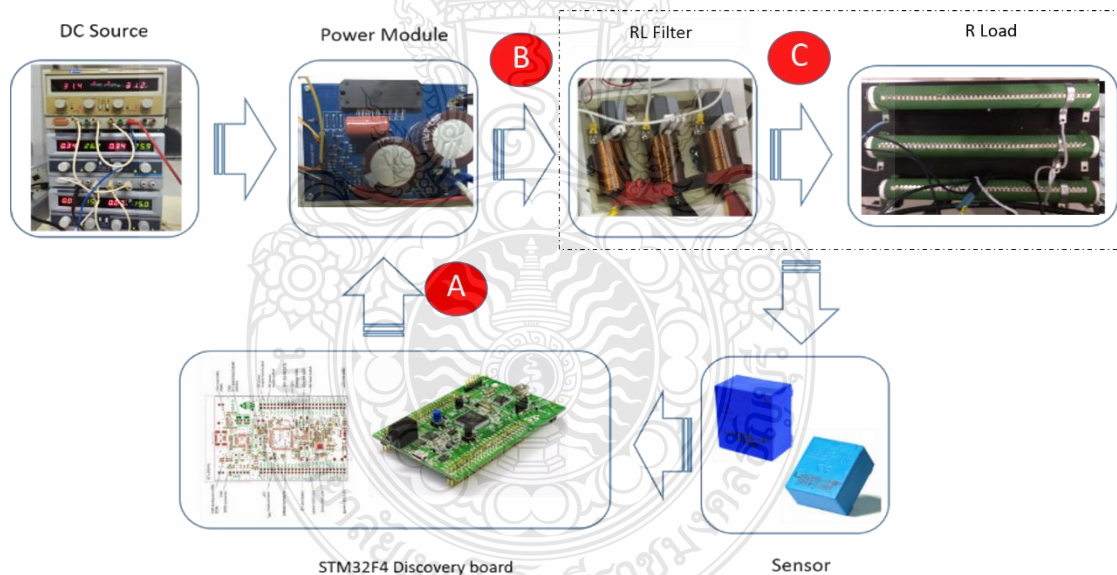
รูปที่ 3.45 การทดสอบขณะมีภาระโหลดที่ผิดปกติ

จากรูปที่ 3.44 - 3.46 แสดงภาพรวมของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่พร้อมสำหรับการทดลองและเขียนโปรแกรมเพื่อป้อนโปรแกรมที่บรรจุอัลกอริทึมลงในบอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery สำหรับการทดลองในลำดับถัดไปร่วมกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink และ Waijung Blockset

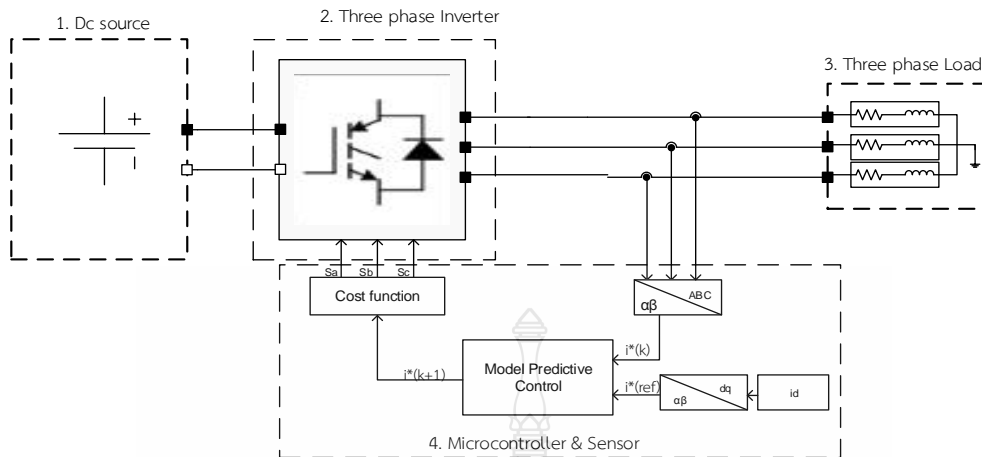
บทที่ 4

ผลการวิจัย

หลังจากทำการศึกษาออกแบบและทดลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ที่ใช้เทคนิคการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำไปประมวลผลสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำการวัดค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย จุด A การวัดสัญญาณขับเคลื่อน , จุด B การวัดสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และ จุด C การวัดสัญญาณเอาต์พุตในการทดสอบกับโหลดความต้านทานขนาด 5 โอห์ม พิกัดกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ แสดงไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงตำแหน่งการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากไดอะแกรมการทำงานรวมของระบบ

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตำแหน่งการวัดค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 4.1 ที่ใช้ในการศึกษาและทดลองจากระบบฮาร์ดแวร์ที่นำมาใช้งานจริง

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองกับเครื่องต้นแบบ

พารามิเตอร์	ความหมาย	ค่า
V_{DC}	แรงดันไฟฟ้าอินพุต	120 V _{DC}
L	ฟิลเตอร์กระแสไฟฟ้า	10 mH
R_L	ความต้านทานภายในฟิลเตอร์	0.5 Ω
T_s	ความถี่การประมวลผล	1,600 Hz
RL	ค่าพิกัดโหลด RL	1,000 W

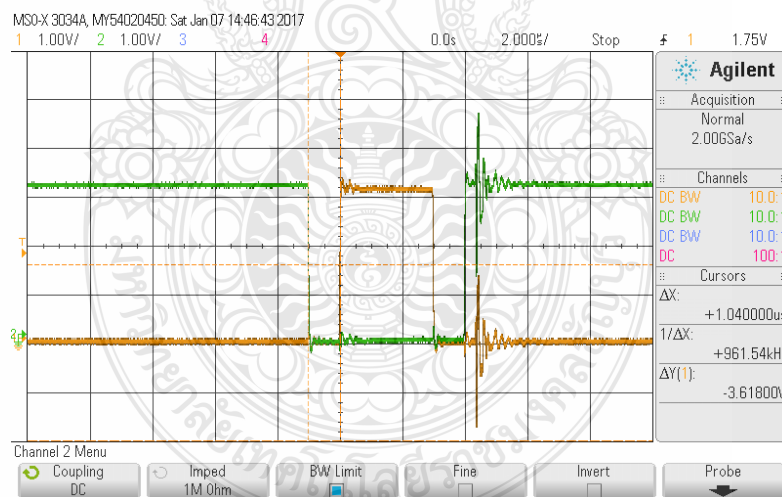
4.1 ผลการทดลองการทำงานทางด้านฮาร์ดแวร์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการออกแบบ และจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB/Simulink กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1 และประยุกต์ใช้งานลงอุปกรณ์บอร์ดประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ร่วมกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ได้ดำเนินการเลือกสรรและออกแบบการทำงาน มีผลการทดลองเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแสดงผลการทดลอง ได้แก่ การสร้างสัญญาณขั้วเกิดของอินเวอร์เตอร์, การวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์, การวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการสร้างสัญญาณควบคุมกระแสไฟฟ้า

แบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และการทดสอบกับโหลดความต้านทานเพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของการทำงาน



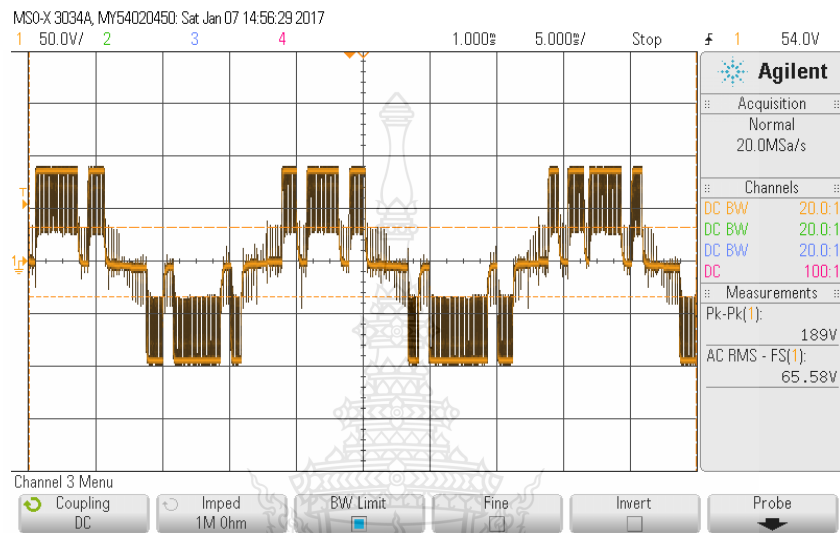
รูปที่ 4.3 สัญญาณขั้วเกต



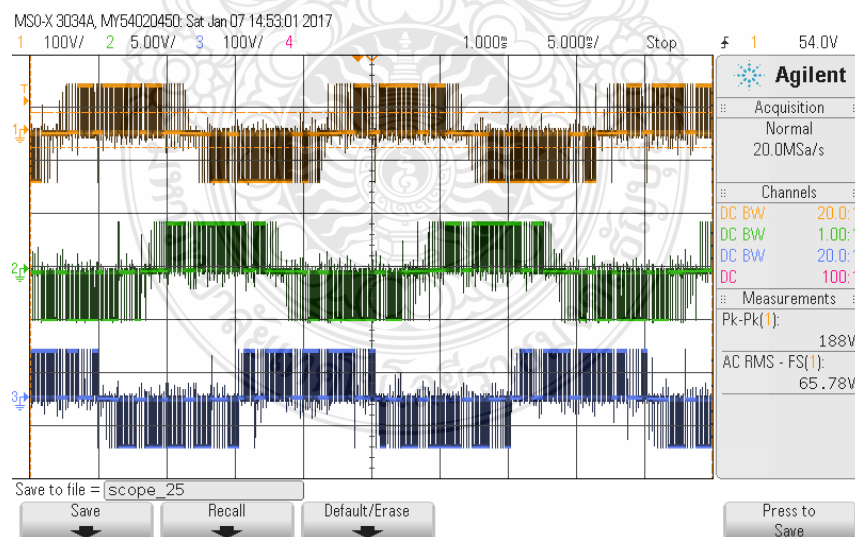
รูปที่ 4.4 Dead time ของสัญญาณขั้วเกต

จากรูปที่ 4.3 - 4.4 แสดงสัญญาณขั้วเกตของเอาต์พุตไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ด้วยวิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าผ่านพอร์ท PWM เอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณและประมวลผล โดยกำหนดค่า Dead time ของแต่ละสัญญาณเอาต์พุต

ตามคุณสมบัติความต้องการของฮาร์ดแวร์โมดูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ได้ทำการเลือกใช้ในภาค
วงจรกำลังที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 1-2 μ S และทำการทดลองสัญญาณเอาต์พุตขับเกตที่ความถี่ 10 กิโล
เฮิร์ต

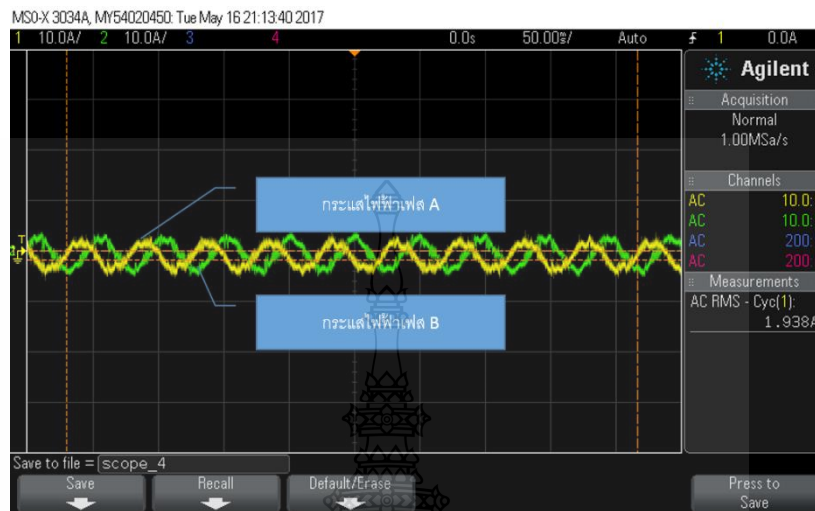


รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเฟสของอินเวอร์เตอร์

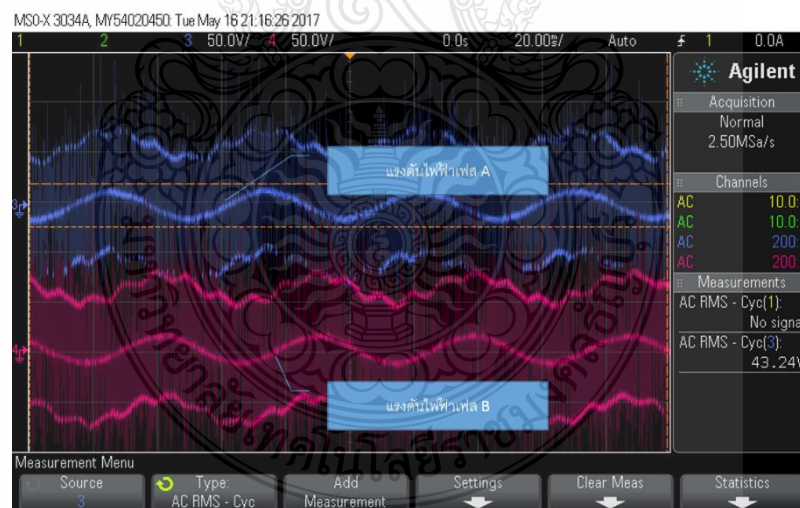


รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไลน์ของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.6 แสดงผลลัพธ์เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ทั้งในรูปแบบแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างเฟส ที่ได้จากการทดลอง

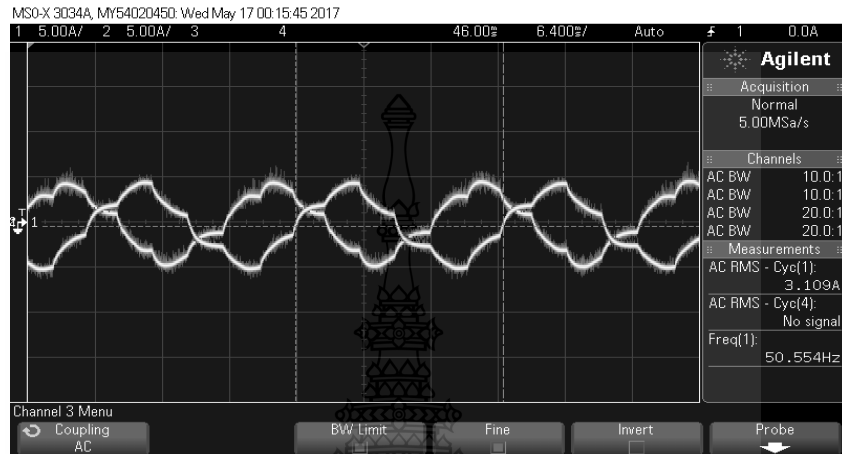


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A และ เฟส B ขณะ $i_{ref} = 2\text{ A}$



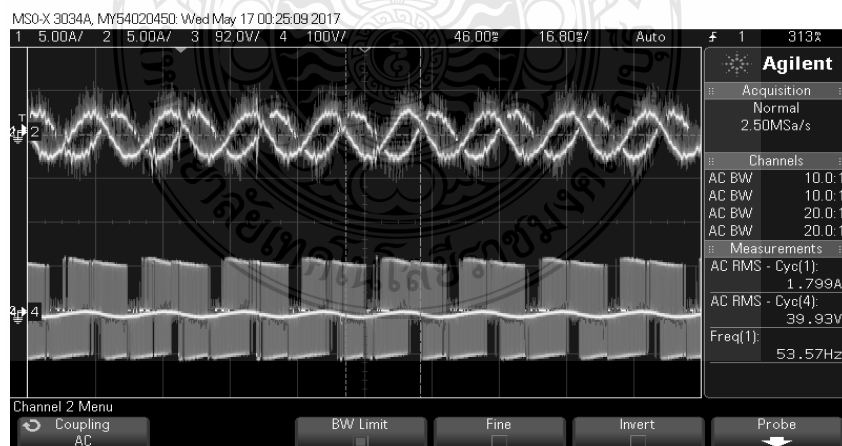
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส A และ เฟส B ขณะ $i_{ref} = 2\text{ A}$

รูปที่ 4.7 แสดงผลการวัดรูปคลื่นเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าของเฟส A และ เฟส B ที่ทำการทดลองปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเฟส A และ เฟส B ดังรูปที่ 4.8



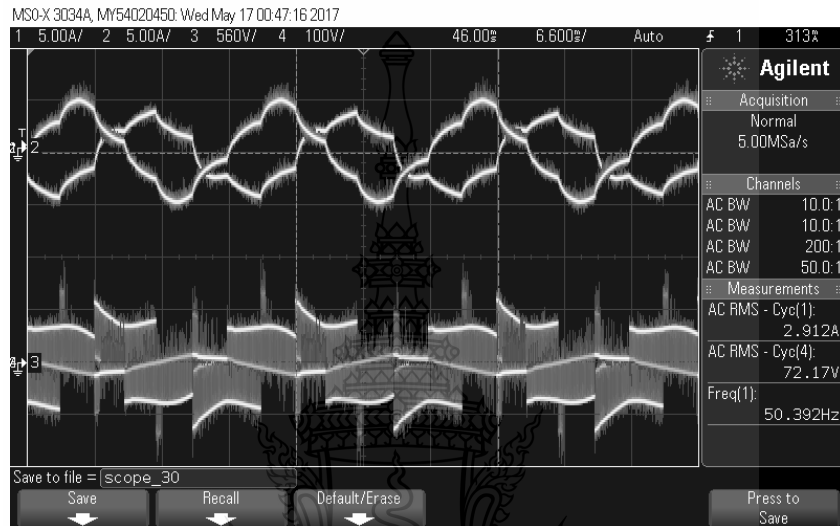
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A และ เฟส B ขณะพิกัดกระแสโหลด 3 A

รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดลองปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ด้วยค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องทดลอง



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B ขณะพิกัดกระแสโหลด 2 A

รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดลองปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ให้ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานจริง 1.79 แอมแปร์ โดยการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ 2 แอมแปร์ ให้เอาท์พุทกระแสไฟฟ้าจริง ต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง 0.21 แอมแปร์

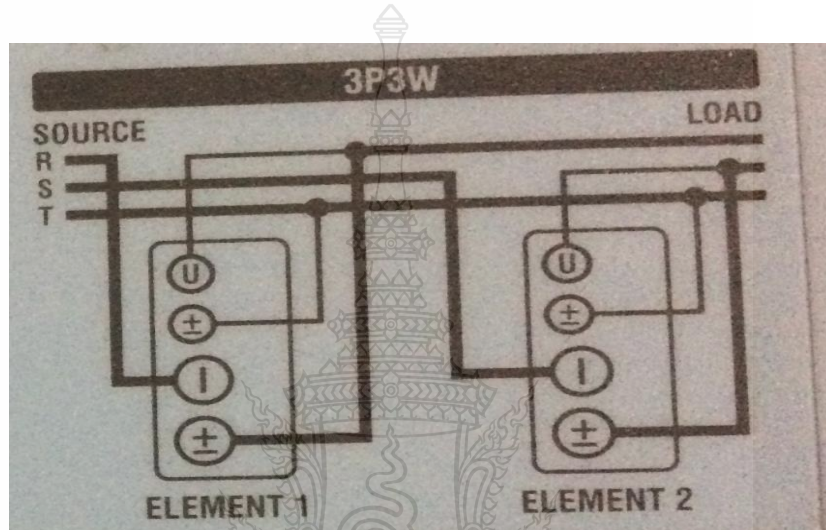


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเฟส A และเฟส B ขณะพิกัดกระแสโหลด 3 A

รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดลองปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ให้ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานจริง 2.91 แอมแปร์ โดยการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ 3 แอมแปร์

4.2 การทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้ากับโหลดความต้านทานคงที่

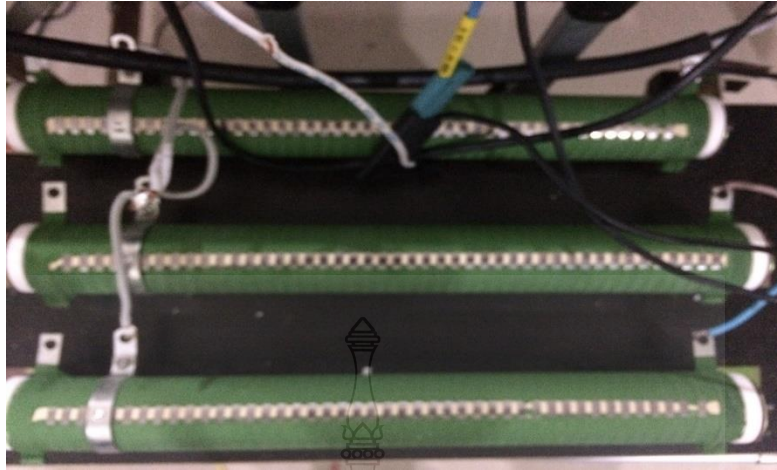
ค่าประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ในโครงการ ทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้า Power Meter รุ่น WT500 ของบริษัท YOKOGAWA การทดสอบกับโหลดที่พิกัดไม่เกิน 1 kW โดยรูป 4.12 แสดงไดอะแกรมการต่อวงจรของ WT500 ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงภาพการต่อใช้งานของ Power meter WT500 ขณะวงจรอินเวอร์เตอร์มีโหลดที่พิกัด



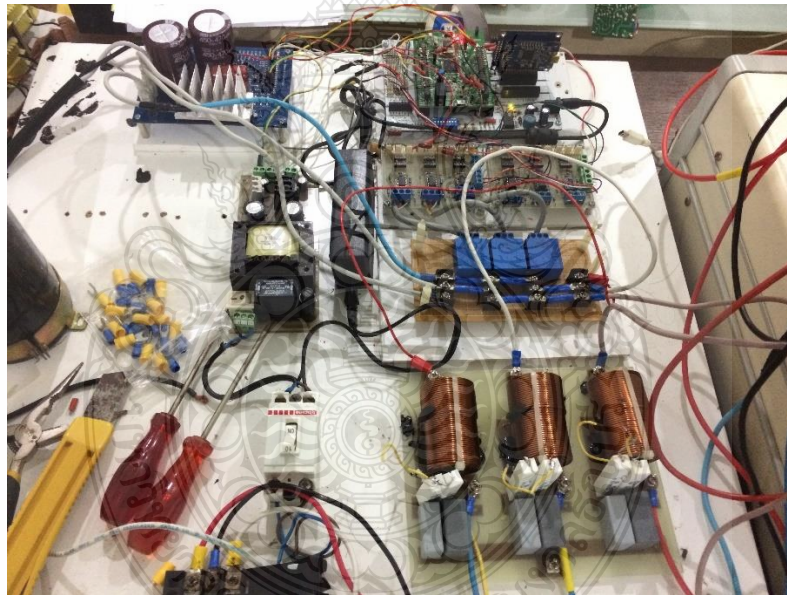
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมการต่อใช้งานของ Power Meter WT500



รูปที่ 4.13 ภาพ Power Meter WT500 ขณะต่อใช้งานในโครงการ

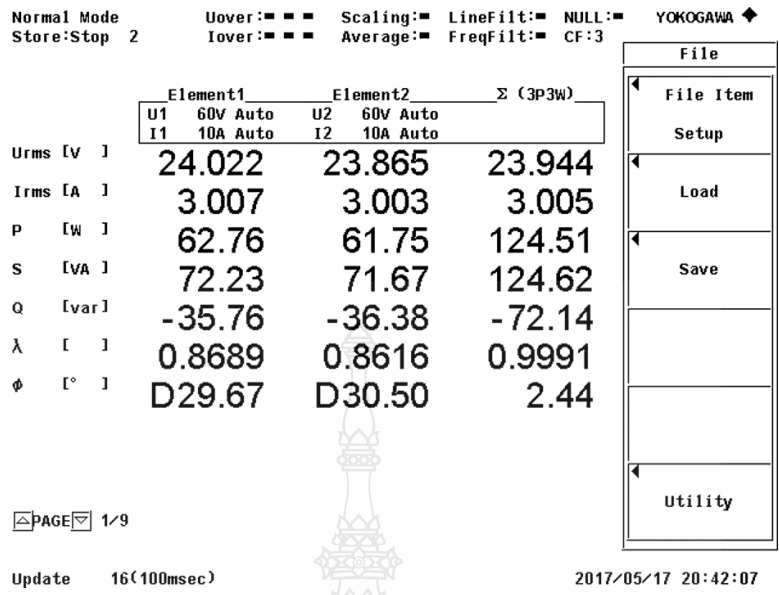


รูปที่ 4.14 โหลดความต้านทานที่ใช้ในการทดสอบ

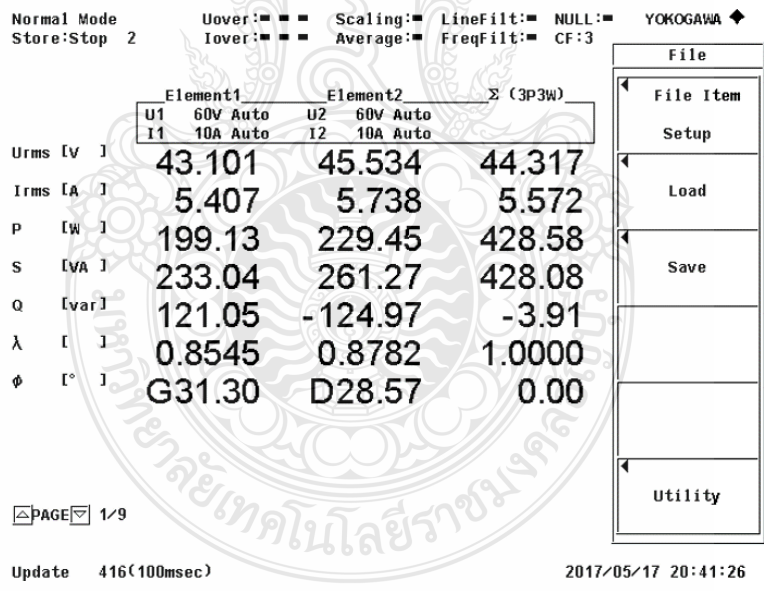


รูปที่ 4.15 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ

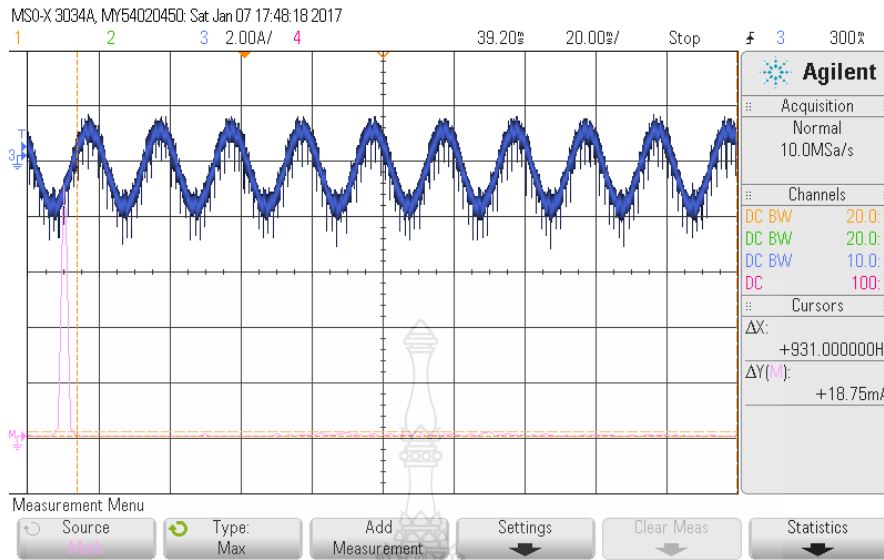
รูปที่ 4.13 – 4.15 แสดงอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการวัด และทำการทดลองแสดงผลลัพธ์ รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 4.16 – 4.17



รูปที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์



รูปที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์



รูปที่ 4.18 ค่าความเพี้ยน THD_i ของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.17- 4.17 ผลลัพธ์การวัดค่าพารามิเตอร์ที่พิกัดการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดย อัลกอริทึมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดสอบกับโหลดความต้านทานแบบคงที่ โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม ระหว่าง 3-5 แอมแปร์ สามารถสรุปผลลัพธ์และการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 4.2

รูปที่ 4.18 ผลการวัดค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าเฟส สามารถคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าเฟส ดังสมการ

$$\text{THD}_i (\%) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_{1(\text{rms})}} \times 100\%$$

$$\text{THD}_i (\%) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_{1(\text{rms})}} \times 100\%$$

$$= \sqrt{\frac{0.02^2 + 0.02^2 + 0.025^2 + 0.02^2 + 0.015^2}{1.076}} \times 100\%$$

$$= 4.364\%$$

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ

กำลังไฟฟ้าอินพุต $P_{in} = V \times I$	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต $P_{out} = \sum (3P3W)$	ประสิทธิภาพ $\eta = (P_{out} / P_{in})$
240	124.51	0.518
600	428.58	0.714
600	489.25	0.816

ตารางที่ 4.2 แสดงการบันทึกและคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตต่อกำลังไฟฟ้าอินพุต ด้วยวิธีการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าในการควบคุม และทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วย Power Meter WT500

4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องต้นแบบและแบบจำลองด้วย MATLAB/Simulink

จากการศึกษาแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบศึกษาเทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน ด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และทำการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อศึกษาการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า กับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน สามารถกำหนดพิกัดกระแสไฟฟ้าในการควบคุมมีความเหมาะสมที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไม่เกิน 3 แอมแปร์ (ข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์) และทดสอบกับโหลดความต้านทานค่าคงที่ 5 โอห์ม กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุต 3 เฟส 2 ระดับแรงดัน และควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดกับฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองไม่เกิน 3 แอมแปร์ มีค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.816 สามารถให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับแนวทางการศึกษาทดลอง แต่ให้ความสามารถในด้านพิกัดการควบคุมกระแสไฟฟ้าสูงสุด น้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยเหตุผลทางด้านฮาร์ดแวร์การศึกษาและทดลองจริง

บทที่ 5

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอ การควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า โดยการสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ มีหลักการในการทำงานโดยสร้างอัลกอริทึมในการควบคุมการทำงานจากการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า และสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ผ่านตัวกรองสัญญาณ Low-Pass filter พร้อมทำการประมวลผลและคำนวณแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในเวลาถัดไป ($t+1$) ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาปัจจุบันเพื่อทำการเปรียบเทียบและทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในลำดับถัดไป และสร้างสัญญาณการควบคุมด้วยตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery ในการควบคุมการทำงาน โดยทำการทดสอบการทำงานด้วยแบบจำลองร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการประยุกต์ใช้งานการควบคุมอุปกรณ์จริงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery

5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ที่ความถี่ขาออก 50 Hz โดยความถี่สวิตช์ที่ $1,600\text{ Hz}$ สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าขาออก 3 เฟส ผ่านชุดกรองความถี่แบบ Low-Pass filter ซึ่งมี L ขนาด 10 mH และ R ขนาด $0.5\ \Omega$ ทั้งนี้ระบบได้รับการทดสอบกับโหลด RL ที่พิกัดไม่เกิน 1 kW ผลการจำลองระบบกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าความเพี้ยน (THD) น้อยกว่า 5% ที่ขนาดกระแสขาออกโดยประมาณ 5 แอมแปร์ ขณะขับโหลดสูงสุดไม่เกิน 1 kW ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 98% อย่างไรก็ตามในเชิงปฏิบัติวงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงการมีประสิทธิภาพที่พอใช้ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีค่า 81.6% ค่าความเพี้ยน (THD) ขณะปฏิบัติ 4.364%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหากเลือกใช้และพัฒนาร่วมกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพ เช่น การเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมกับความถี่การใช้งานและค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด, ความรวดเร็วในการทำงานร่วมกับการพัฒนาอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพการในสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนได้รวดเร็วและมีความถี่ที่เหมาะสม

5.2.2 ควรออกแบบระบบเซนเซอร์การตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าให้มีความสอดคล้องกับย่านการวัดให้สามารถลดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสม

5.2.3 ลดสัญญาณรบกวนจากการสร้างเครื่องต้นแบบ โดยจัดให้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์รวมอยู่ในชุดเดียวกัน และเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งาน และคงทนต่อสภาวะการทดลองและการใช้งาน



บรรณานุกรม

- [1] M. Mosa, H. Abu-Rub, M.E. Ahmed, A. Kouzou and J. Rodriguez, **Control of single phase grid connected multilevel inverter using model predictive control**, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International, 2013.
- [2] S. Vazquez, J.I. Leon, L.G. Franquelo, J.M. Carrasco, O. Martinez, J. Rodriguez, P. Cortes and S. Kouro, **Model Predictive Control with constant switching frequency using a Discrete Space Vector Modulation with virtual state vectors**, Industrial Technology, ICIT, IEEE International Conference on, vol., no., pp.1-6, 2009.
- [3] Marek Pástor, Jaroslav Dudrik. (2013). **Predictive Current Control of Grid-tied Cascade H bridge Inverter**, DOI : 10.7305/automatika.54-3.186
- [4] Yohan Baek, Kui-Jun Lee and Dong-seok Hyun. **Improved Predictive Current Control for Grid Connected Inverter Applications with Parameter Estimation**, Industry Applications Society Annual Meeting, IAS., IEEE, vol., no., pp.1-6. (2009).
- [5] H. M. Kojabadi, B. Yu, I. A. Gadoura, L. Chang and M. Ghribi, **A novel DSP-based current controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 4, pp. 985-993, July 2006.
- [6] Yougui Guo; Yongdong L and Jianlin Zhu, **Modeling and simulation of seven level inverter based on multi-carrier control**, Electrical Machines and Systems, International Conference on, vol., no., pp.4136-4138, 17-20 Oct. 2008.
- [7] Villanueva, E., Correa, P., Rodriguez, J. and Pacas, M., **Control of a Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems**, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.56, no.11, pp.4399-4406, Nov. 2009.
- [8] Pharne, I.D. and Bhosale, Y.N., **A review on multilevel inverter topology**, Power, Energy and Control (ICPEC), International Conference on , vol., no., pp.700-703, 6-8 Feb. 2013.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Rao, S.N., Kumar, D.V.A. and Babu C.S., **New multilevel inverter topology with reduced number of switches using advanced modulation strategies**, Power, Energy and Control (ICPEC), International Conference on , vol., no., pp.693-699, 6-8 Feb. 2013.
- [10] Pandi, P.M.; Devarajan, N., **Optimization of power quality in cascaded multilevel inverter genetic algorithm approach**, Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2010 International Conference on , vol., no., pp.1-7, 29-31 July 2010.
- [11] Alabbasi, R.H.; Salih, S.M., **Control of cascade multilevel inverter using fuzzy logic technique**, Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2nd IEEE International Symposium on, vol., no., pp.96-101, 16-18 June 2010.
- [12] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, and J. Rodriguez, **Predictive control in power electronics and drive**, IEEE Transection on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4312-4324, December 2008.
- [13] J. Rodriguez, J. Pontt, C.A. Silva, P. Correa, P. Cortes and U. Ammann, **Predictive current control of a voltage source inverter**, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, pp. 495–503, Feb. 2007.
- [14] M. Masten and I. Panahi, **Digital signal processors for modern control systems**, Control Eng. Practice, vol. 5, no. 4, pp. 449–458, 1997.
- [15] E. F. Camacho and C. Bordons, **Model Predictive Control**, New York: Springer-Verlag, 1999.
- [16] Cortés, P., A. Wilson, S. Kouro, J. Rodriguez and H. Abu-Rub, **Model predictive control of multilevel cascaded H-bridge inverters**. IEEE T. Ind. Electr., 57(8): 2691-2699, 2010.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. PortilloGuisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, **Power–electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey**, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, pp. 1002–1016, Jun. 2006.
- [18] Silva C, Pereira R, da Silva L, Lambert-Torres G, Bose B and Ahn S., **A digital PLL scheme for three phase system using modified synchronous reference frame**, IEEE Transactions on Industrial Electronics 57(11), pp.3814–3821. 2010.



ภาคผนวก





ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับแหล่งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมโยงระบบไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริธึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



17 Equinox 2558		18 Equinox 2558				19 Equinox 2558	
Workshop 1	Workshop 2	Workshop 1	Workshop 2	Workshop 3	Workshop 1	Workshop 2	
09:00 - 09:30		09:30 - 10:00		10:00 - 10:30		10:30 - 11:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ			
09:30 - 10:00		10:00 - 10:30		10:30 - 11:00		11:00 - 12:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
10:00 - 10:30		10:30 - 11:00		11:00 - 12:00		12:00 - 13:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
10:30 - 11:00		11:00 - 12:00		12:00 - 13:00		13:00 - 14:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
11:00 - 12:00		12:00 - 13:00		13:00 - 14:00		14:00 - 15:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
12:00 - 13:00		13:00 - 14:00		14:00 - 15:00		15:00 - 16:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
13:00 - 14:00		14:00 - 15:00		15:00 - 16:00		16:00 - 17:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
14:00 - 15:00		15:00 - 16:00		16:00 - 17:00		17:00 - 18:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
15:00 - 16:00		16:00 - 17:00		17:00 - 18:00		18:00 - 19:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	
16:00 - 17:00		17:00 - 18:00		18:00 - 19:00		19:00 - 20:00	
Workshop 1: สมรรถนะ		Workshop 2: สมรรถนะ		Workshop 3: สมรรถนะ		Workshop 1: สมรรถนะ	



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
RE-1-44	การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เข้าระบบแหล่งผลิตงานเขื่อนเสด็จ ทิศชัยเชื้อเมโงระบบไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ณัฐ จินาคุน, วันชัย ทวีชัยสิทธิ์, ทรงยศ ศรีปรางค์ และชาญวิทย์ บุญช่วย	288
RE-1-45	ไฟโวลโตอีซีสมแบบเร็วของฟาร์มโซลาร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันโคเซียมแบบเบดไทยเวียน สุนทร สุทธิรักษ์	295
RE-1-46	การประเมินศักยภาพของระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากเขื่อนเสด็จภาคใต้ของภาค สุภาณี กลาภรัตน์, อธิษฐ์ ชีวเนนพธิ์ และอุบล แซ่สมง พิธิชญ์อิงการ	306
RE-1-47	การศึกษาการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากภัยธรรมชาติที่มีขีปนาวุธ ฉัตรชัย พรหมดี และชโย โสทัยอง	322
RE-1-48	ระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินสำหรับกับหม้อผลิตไฟฟ้าขนาดเล็มาก ด้วยวิธีถ่ายโอนคอร์ตโมเมต ไวเวทย์ นาสก, ชวโรจน์ ไชสิน, ชูวัฒน์ อารามรัตน์, เสริมสุข บัวเจริญ และอรรถวิทย์ อรรถเวชกุล	331
RE-1-49	การประเมินศักยภาพของระบบเขื่อนเสด็จแบบรวมเสด็จใช้พลังงานเสด็จและแผ่นสะท้อนเสด็จ นิวัฒน์ พิณเสด็จ, พิณเสด็จ รักความดี, สุรวิทย์ ช่างเจ็ด, ชูโรจน์ สิงค์ประภอบ และกฤษณพงศ์ กิตติกร	336
RE-1-50	การวิเคราะห์ศักยภาพของบริเวณลำน้ำตอนล่าง จังหวัดนครราชสีมา ภราดร หนูทอง, บุญวี การกระตึก และศิริวิทย์ เข็มพิพัฒน์	342
RE-1-51	การพัฒนาและทดสอบกับหม้อผลิตไฟฟ้าขนาดจุ่มแบบสองเฟสสำหรับพื้นที่ทางไกล ฉัตรชัย จามสิน, พิณเสด็จ รักความดี, กฤษณพงศ์ กิตติกร, ชูโรจน์ สิงค์ประภอบ และสุภาณี บุญบำรุง	351
RE-1-52	ผลกระทบของภาคอื่นในการนำหม้อผลิตไฟฟ้าเข้าไทยในระยะเวลาอันสั้นกับแบบขึ้น ฐานโยธิน เมธิธานนท์, ประสาน สัตยชัยเรืองศักดิ์, วิชชุดา ชิงพร และธรรวดี อธิวงกาญจน์	357
RE-1-53	ระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพด้วยวิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ บรณฤทธิ์ เสนุกิจธร และชาติชาย ไชบุญ	367
RE-1-55	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาด 750 W ณัฐพรณ์ ประพุดดี และกฤษพร เสวตสุคนธ์	377
RE-1-57	เทคนิคการรักษาระบบไฟฟ้าสำหรับกรณีฉุกเฉินด้วยวิธีการรักษาความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง ปิณฑิพนธ์ พานเมือง และชโย โสทัยอง	384
RE-1-59	การไฟโวลโตอีซีสมระหว่างบ้านเครื่องใช้แล้วกับหม้อผลิตโดยใช้ไฟโวลโตอีซีผ่าน การกระตุ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ณัฐชา เพ็ชรรัตน์, วิเศษ สัจแสงสว่าง, วันเนนชัย พรพิเชษฐ และชิตดา ไม้กุด	391
RE-1-60	การศึกษาการปรับสภาพขีปนาวุธต่าง ๆ โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับใช้เคมีไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียไฮ ดรอกไซด์ สำหรับการผลิตแก๊ส สุวัฒน์ นวอเพ็ง, พิณพิชฌ์ แซ่พิน, นริยา แก้วมณี และ Jeffrey Nash	399
RE-1-61	รูปทรงความเข้มรังสีแกมมาและสเปกตรัมกับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเขื่อนเสด็จ กานต์ นัครวราวุฒ, ชูโรจน์ สิงค์ประภอบ, ธนวิทย์ แซ่สว่าง และชยา ชีวเขต	410
RE-1-62	การศึกษาเชิงทดลองระบบการผลิตแก๊สอินทรีย์พลังงานเสด็จ	417



RE-1-44

การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสำหรับแหล่งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมโยงระบบไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริธึม
การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า
Reactive Power Control for Grid-connected Photovoltaic Power Generation using
Predictive Current Control Algorithm

เฉลิม จินดา^{1*}, วันชัย ทรัพย์สิงห์¹, ทรงกลด ศรีปรางค์², และชาญวิทย์ บุญช่วย²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

*ผู้ติดต่: Chalerm.jindat@gmail.com, 086-6654373

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยใช้อัลกอริธึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) เทคนิคที่นำเสนอเป็นการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของระบบล่วงหน้าจากสัญญาณไฟฟ้า เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ในการแปลงผันพลังงานให้ติดตามสัญญาณในระบบไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้จำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink และทดสอบอัลกอริธึมกับแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 2 ระดับ ข้อดีที่สำคัญของการควบคุมแบบทำนายกระแสไฟฟ้าคือสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้เร็วกว่าวิธีการควบคุมแบบทั่วไป และสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีที่นำเสนอนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับระบบสมาร์ตไมโครกริดที่ใช้แหล่งจ่ายพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในการรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

คำหลัก: การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ, อินเวอร์เตอร์สามเฟส

Abstract

This paper proposes reactive power control of a grid-connected three phase inverter for photovoltaic (PV) power generation using a predictive current control algorithm. The proposed approach a prediction of current signal of the grid system using signal from the grid for controlling grid-connected inverter. In this paper, two-level three-phase inverter is adopted in order to validate the proposed technique using MATLAB/Simulink software package. The main advantage of the predictive current control technique is faster responses to the variations of PV source comparing with the previous technique and it can control the reactive power that flow



คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

into the grid efficiently. The proposed approach could be applied to the smart micro-grid using the renewable source to maintain the voltage of the power system.

Keywords: Predictive current control, Reactive power, three-phase inverter.

1. บทนำ

การเชื่อมโยงแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปนิยมควบคุมเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) อย่างไรก็ตามการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีความสำคัญมากในการรักษาระดับแรงดันปลายทางบัสของระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1]

อุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (Grid connection) สำหรับการใช้งานในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน อย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์พลังงาน หรือแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าทางเลือกที่มีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ [2]

เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage source current control inverter : VSCCI) สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การควบคุมแบบ ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis), การควบคุมแบบเปรียบเทียบความชัน (Ramp comparison) และ การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) ซึ่งเทคนิควิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพในการประมวลผลการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากระบบได้อย่างรวดเร็ว ให้ผลตอบสนองที่ดีแต่ยังคงต้องใช้ระบบการประมวลผลที่รวดเร็ว [3]

เทคนิคการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) โดยการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าให้สามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงหนึ่งได้ [4] การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

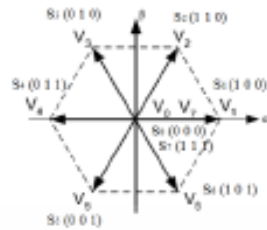
เหมาะสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ใช้งานจริง และใช้ความถี่ในการทำงานของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ที่สูง [5] วิธีการคำนวณทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่มีการปรับปรุงเทคนิคการควบคุมการทำงาน และประยุกต์ใช้ในงานควบคุมการผันพลังงานเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการที่ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ให้ผลตอบสนองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ [6] นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า [7] และการควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า [8]-[10] เป็นต้น

บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่เชื่อมโยงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอช่วยเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้ประยุกต์ในระบบสมาร์ตไมโครกริดสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

2. สถานะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ แสดงในลักษณะของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าตามลำดับการทำงาน ของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 1





รูปที่ 1 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ

เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสามเฟสของอินเวอร์เตอร์ แสดงด้วยการแปลงแกน α และ β แบ่งการทำงาน ได้ 8 สถานะ เพื่อให้อ้างอิงในการสร้างสัญญาณการควบคุมอุปกรณ์เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ เขียนอยู่ในรูปของสมการที่ (1) และ (2) [6]

$$v_i = \frac{2}{3} V_{dc} (S_{i1} + \alpha S_{i2} + \alpha^2 S_{i3}) \quad (1)$$

$$\alpha = e^{j2\pi/3} \quad (2)$$

สถานะการทำงาน ของสัญญาณควบคุมการสวิตซ์ซึ่ง จำนวน 3 เฟส 3 จุด ในการควบคุมการสวิตซ์ซึ่ง เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ แทนสถานะการทำงานด้วย 1 มีสถานะ ON และ 0 มีสถานะ OFF ดังนั้น สามารถ แบ่งออกได้เป็น $V_0 - V_7$ โดยที่ S_{i1} , S_{i2} , และ S_{i3} แสดงการทำงานของสัญญาณควบคุมในแต่ละเฟส

3. การควบคุมการนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า

การควบคุมการนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า โดย การวัดค่าสัญญาณอินพุตหลายๆ ค่าสัญญาณจากการ อุ่มสัญญาณที่เท่ากันทุกครั้งในการคำนวณ เพื่อใช้ในการ คำนวณการนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า สามารถสรุป ขึ้นคอนวีชันการหลัก ดังนี้ 1. วัดค่ากระแสไฟฟ้า ,แรงดันไฟฟ้า 2. การสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับการ นำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า 3. การนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า

และ ทำการหาต้นทุนที่น้อยที่สุดสำหรับการควบคุม การสวิตซ์ซึ่ง (Cost function) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โดอะแกรมการทำงานของกรควบคุมแบบ นำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์

3.1 การวัดและนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า

การวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าอยู่ใน รูปแบบของการแปลงแกนกรอบอ้างอิงในระบบสอง แกน คือ α และ β เพื่อให้สอดคล้องกับเวกเตอร์ แรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยจะทำกรลุ่มสัญญาณ อินพุตจากเวลาที่กำหนดแบบคงที่ในการคำนวณ ประกอบไปด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดความ ต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ และค่าแรงดันไฟฟ้าของ ระบบในช่วงระยะเวลาที่คงที่ตลอดทุกคาบสัญญาณ การทำงาน เริ่มจากสมการแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะดังนี้

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 รูปแบบของการทำงาน กำหนดให้ T_s คือ เวลาอ้างอิงสำหรับการอุ่มสัญญาณและ คำนวณ เพื่อการนำจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าที่ $i(k+1)$ สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ $\frac{di}{dt}$ ตาม

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k) - i(k-1)}{T_s} \quad (4)$$

เมื่อ $i(k)$ คือค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาที่ T_s และ $i(k-1)$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ของเวลาก่อนหน้า T_s นำสมการที่ 4 แทนค่าในสมการที่ 3 ทำกรย้ายข้าง สมการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลา T_s [4]



$$i(k) = \frac{1}{RT_s + L} (Li(k-1) + T_s v(k) - T_s v_s(k)) \quad (5)$$

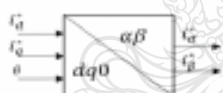
จากสมการที่ 5 สามารถทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลา T_s ถัดไปโดยการแทนค่าสมการด้วย $k - k + 1$

$$i(k+1) = \frac{1}{RT_s + L} (Li(k) + T_s v(k+1) - T_s v_s(k+1)) \quad (6)$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการที่ 6 สมการของการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาถัดไป พร้อมกับค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อใช้ในการหาค่าต้นทุนที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมการสวิตช์ซึ่งอยู่กรณีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

3.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

งานวิจัยนี้จำลองการทำงานด้วยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ ในรูปแบบกรวยอ้างอิงแบบหนึ่ง คือ ค่า i_d^* และ i_q^* ที่มีค่าคงที่ กับค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบโดยวิธีการเฟสล็อกคัล ทำให้ค่ามุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าสำหรับการสร้างสัญญาณอ้างอิงของระบบ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

สมการสำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์จากสมการที่ 7 [10]

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_b \\ v_b & -v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.3 ฟังก์ชันต้นทุนที่น้อยที่สุดสำหรับการสวิตช์ซึ่ง

การควบคุมกระแสไฟฟ้ารูปแบบการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า คือ การหาค่าความผิดพลาดระหว่าง

กระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่ากระแสที่ใช้อ้างอิง สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันต้นทุนที่น้อยที่สุด (Cost function minimization) ในรูปแบบการแปลงแกน และวัดค่าความผิดพลาดระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงและค่าที่ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าได้ และทำการปรับที่กหรือเก็บค่าที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังแสดงดังสมการที่ 8 [6]

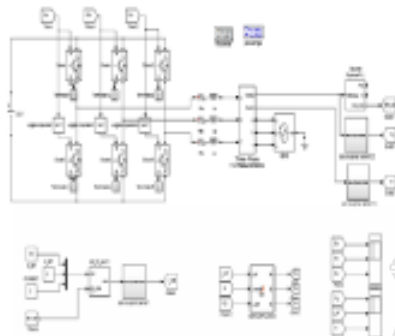
$$g = |i_d^*(k+1) - i_d^*(k+1)| + |i_q^*(k+1) - i_q^*(k+1)| \quad (8)$$

เมื่อ $i_d^*(k+1)$ และ $i_q^*(k+1)$ คือค่าจำนวนจริง และค่าจินตภาพที่คำนวณได้ในช่วงเวลาถัดไปของการทำงาน ส่วนค่า $i_d^*(k+1)$ และ $i_q^*(k+1)$ คือค่ากระแสไฟฟ้าในส่วนที่ใช้อ้างอิง

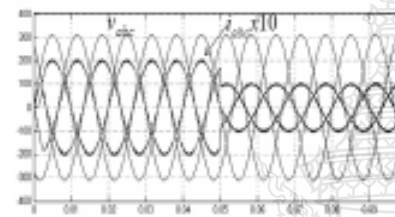
4. การสร้างแบบจำลองและผลการทดสอบ

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับที่ใช้การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4 ในการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง การควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้า เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาการใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทน อุปกรณ์ชุดเซมิคอนดักเตอร์ และการปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้า โดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแบบคงที่ และเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงาน กับวิธีการควบคุมแบบ Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) [11] กำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ดังต่อไปนี้ $R = 500\text{m}\Omega$, $L = 10\text{mH}$, $T_s = 25\mu\text{s}$, $V_m = 600\text{V}$, $V_{dcm} = 380\text{V}$, $f = 50\text{Hz}$ และ $i_{dref} = 20\text{A}$ เพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4

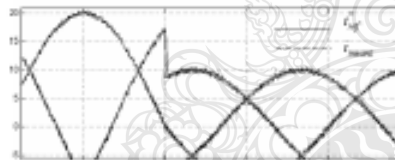




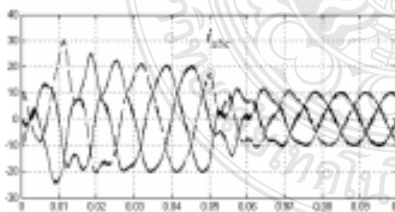
รูปที่ 4 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสสององศาสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า



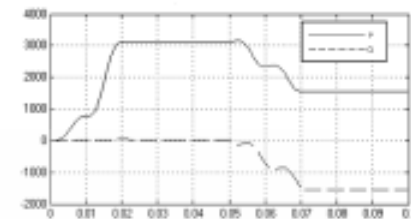
รูปที่ 5 ผลการจำลองการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6 รูปขยายแสดงกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ที่เวลา 0.05 วินาที



รูปที่ 7 เอาต์พุตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมแบบ SVPWM



รูปที่ 8 ผลการจำลองการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า P-Q ด้วยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 9 ผลการจำลองการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า P-Q ด้วยเทคนิคการควบคุม SVPWM

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับจ่ายเข้ากับระบบไฟฟ้า ตามขนาดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่สร้างขึ้นแบบจำลอง โดยทำการลดค่ากระแสไฟฟ้า i_{ref} ลง 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่เวลา $t=0.05$ วินาที ส่วนในรูปที่ 6 แสดงรูปขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลา $t=0.05$ วินาที เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่รวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 แสดงเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าในการแสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมแบบ SVPWM



ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า P-Q ของระบบควบคุมทั้งสองชนิด โดยทำการลดค่าพิกัดกระแสไฟฟ้า i_d^* ลง 50 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่ม i_q^* ขึ้นอีก 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถแสดงผลการตอบสนองของดังรูปที่ 8 แสดงผลการจำลองการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า P-Q ด้วยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และรูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า P-Q ด้วยเทคนิคการควบคุม SVPWM

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมต่อกับงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอข้อได้เปรียบความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้า,แหล่งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าในกรณีที่โหลดเร็วกว่าวิธี SVPWM นอกจากนี้ วิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสมาร์ตไมโครกริดสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Kahrobaei, A., Mohamed, Y.A.-R.L. (2012). Interactive Distributed Generation Interface for Flexible Micro-Grid Operation in Smart Distribution Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Volume: 3, No. 2, pp.295-305.

[2] Mosa, M. Abu-Rub, H. Ahmed, M.E. Kouzou, A. and Rodriguez, J. (2013). Control of single phase grid connected multilevel inverter using model predictive

control. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International*.

[3] Kojabadi, H.M., Bin Yu, Gadoura, I.A., Liuchen Chang and Ghribi, M. (2006). A novel DSP-based current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters. *Power Electronics*, vol. 21, no.4, pp.985-993.

[4] Rodriguez, J., Pontt, J., Correa, P., Lezana, P. and Cortes, P. (2005). Predictive power control of an AC/DC/AC converter. *Industry Applications Conference*, vol.2, pp.934-939.

[5] Vazquez, S., Leon, J.L., Franquelo, L.G. Carrasco, J.M. Martinez, O., Rodriguez, J., Cortes, P. and Kouro, S. (2009). Model Predictive Control with constant switching frequency using a Discrete Space Vector Modulation with virtual state vectors. *Industrial Technology, ICIT, IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1-6.

[6] Rodriguez, J., Cortes, P., Kennel, R. and Kazmierkowski, M.P. (2009). Model predictive control – a simple and powerful method to control power converters. *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. IEEE 6th International*, vol., no., pp.41-49

[7] Rodriguez, J. and Cortes, P. (2012). *Predictive Control of Power Converter and Electrical Drives*, John Wiley & Sons, New York.

[8] Yohan Baek, Ki-Jun Lee and Dong-seok Hyun. (2009). Improved Predictive Current Control for Grid Connected Inverter



Applications with Parameter Estimation.
Industry Applications Society Annual Meeting, IAS, IEEE, vol., no., pp.1-6.

[9] Cortes, P., Wilson, A., Kouro, S., Rodriguez, J. and Abu-Rub, H. (2010). Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.57, no.8, pp.2691-2699.

[10] Vazquez, S., Marquez, A., Aguilera, R., Quevedo, D., Leon, J.I. and Franquelo, L.G. (2015). Predictive Optimal Switching Sequence Direct Power Control for Grid-Connected Power Converters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.62, no.4, pp.2010-2020.

[11] Silva malla. (2012), SVPWM controller is developed to control the inverter, URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39586-svpwm-based-grid-connected-inverter>, access on 5/08/2014.



2. การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า โดยใช้อัลกอริธึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



หลักสูตรที่ 20 พฤศจิกายน 2558

เวลา	№๑1	№๑2	№๑3	№๑4	№๑5	№๑6	№๑7	№๑8
09:00 - 09:20	PW 21	PW 48	PE 21	GN 14	CT 10	DS 07	CM 20	GN 37
09:20 - 09:40	PW 22	PW 49	PE 22	GN 15	CP1 01	DS 08	PHI 01	GN 38
09:40 - 10:00	PW 23	PW 50	PE 23	GN 16	CP 01	DS 09	PH 01	GN 39
10:00 - 10:20	PW 24	PW 51	PE 24	GN 17	CP 02	DS 10	PH 02	GN 40
10:20 - 10:40	PW 25	PW 52	PE 25	GN 18	CP 03	DS 11	PH 03	GN 41
10:40 - 10:50	ศูนย์รวมศูนย์รวม							
10:50 - 11:10	PW 26	PW 53	PE 26	GN 19	CP 04	CP 07	PH 04	GN 42
11:10 - 11:30	PW 27	PW 54	PE 27	GN 20	CP 05	CP 08	PH 05	GN 43
11:30 - 11:50				GN 21	CP 06			GN 44
12:00 - 13:00	ศูนย์รวมศูนย์รวมศูนย์รวม							

- PW51 Harmonic Distortion Analysis of the Existing Industries and Reference signal for Harmonics Simulator
- PW52 การตรวจวัดคิซาร์จบางส่วนเพื่อหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคทางเสียงและโปรแกรมแลปวิว
- PW53 กรณีศึกษาของการปรับปรุงระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้พีแอลซี
- PW54 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อยของ กฟน.

Session PE

81

- PE21 การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับวงจรสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิดเหลื่อมกระแสหลายเฟสเข้ากับระบบไฟฟ้าหลัก โดยมีโซล่าเซลล์เป็นแหล่งจ่าย
- PE22 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคัปปลิ่งระหว่างขดลวดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย
- PE23 แหล่งจ่ายกำลังแบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่
- PE24 การมอดูเลตแบบซัฟฟ์สำหรับแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
- PE25 วิธีการลดการกระเพื่อมของแรงบิดอย่างง่ายสำหรับการควบคุมแบบคาดคะเนแรงบิดล่วงหน้าของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร
- PE26 การควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า
- PE27 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ตัว ด้วยเทคนิคเวกเตอร์ทางอ้อมไร้เซนเซอร์ กระแสกับตำแหน่งเซ็นต์เดียว

Session GN

84

- GN14 การออกแบบและสร้างวงจรแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
- GN15 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนเหล็กโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ
- GN16 การศึกษาเปรียบเทียบชนิดสัญญาณอ้างอิง SPWM และ HIPWM วงจรอินเวอร์เตอร์ไดโอดแคปป์ 5 ระดับ
- GN17 การออกแบบ Nd: YAG เลเซอร์กำลังสูงที่มีลำแสงขนาดเล็ก
- GN18 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิผลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาชนิด 3 เฟส และ 1 เฟส
- GN19 การพัฒนาสื่อการจำลองวงจรสายส่งแบบไมโครสตรีปด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น
- GN20 การศึกษาแบบจำลองพลวัตและการออกแบบระบบควบคุมของฟลายแบคอินเวอร์เตอร์แบบขนานสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก

PE26 การควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า โดยใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

วันชัย ทรัพย์สิงห์ เจริม จินาคุน
ทรงกต ศรีปรางค์ และ ชาญวิทย์ บุญช่วย

บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมที่รวดเร็ว โดยการวัดค่าพารามิเตอร์ ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง และควบคุมการสวิตช์ซึ่งอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ ให้มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพื่อควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนที่มีการเชื่อมโยงเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยอัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) ด้วยวิธีการจำลองและทดสอบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink กับแบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับ วิธีที่นำเสนอจะสามารถประยุกต์ใช้กับระบบสมาร์ตไมโครกริด ในการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และยังสามารถรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม โดยเทคนิคการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้านำเข้าที่ฟ

PE27 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 คู่ ด้วยเทคนิคเวกเตอร์ทางอ้อมไร้เซนเซอร์กระแสกับเตาเผาปูนซีเมนต์เดี่ยว

อิทธิพันธ์ สกุลวันรณศักดิ์ และ ศิริเดช บุญแสง

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่กันด้วยเวกเตอร์ทางอ้อมแบบไร้เซนเซอร์กระแส ไปขับเคลื่อนเตาเผาปูนซีเมนต์เดี่ยวขนาดใหญ่ โดยจะจำลองจากระบบจริงโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 215 แรงม้า 2 คู่ ต่อเข้ากับระบบส่งทางกลจำลองผ่านทางโปรแกรม Matlab/Simulink วิธีการควบคุมนี้ใช้เพียงตัวควบคุมความเร็วป้อนกลับซึ่งออกแบบง่าย โดยผลที่ศึกษาเน้นการทำงานสภาวะไดนามิกส์เพื่อตอบสนองทางความเร็วเป็นหลัก และผลทางด้านแรงบิดและฟลักซ์โรเตอร์ที่ถูกควบคุม อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นชนิดควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) ซึ่งให้ประสิทธิภาพทางแรงดันขาออกที่สูงขึ้นกับค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์รวม (THD) ที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ จากผลการจำลองพบว่า การควบคุมนี้ให้ผลตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองเป็นอย่างดีภายใต้การทำงานสภาวะไดนามิกส์

การควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า

โดยใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

Power Control for Grid-connected Three Phase inverter using Predictive Current Control Algorithm

วันชัย ทรัพย์สิงห์¹, เฉลิม อินทนนท์¹, ทรงกลด ศรีปรังค์ และ ชาญวิทย์ บุญช่วย²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี wanchai.s@en.mut.ac.th

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมที่รวดเร็ว โดยการวัดค่าพารามิเตอร์ ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง และควบคุมการสวิตช์ซึ่งอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ ให้มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนที่มีการเชื่อมโยงเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยอัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) ด้วยวิธีการจำลองและทดสอบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink กับแบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับ วิธีที่นำเสนอจะสามารถประยุกต์ใช้กับระบบสมาร์ตไมโครกริด ในการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และยังสามารถรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม โดยเทคนิคการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

คำสำคัญ: การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า, อินเวอร์เตอร์สามเฟส, สมาร์ตไมโครกริด

Abstract

This paper proposes power control for a grid-connected three phase inverter using a current predictive control algorithm. The proposed approach predicts the current signal of the PV system using the referent signal from the grid to control the grid-connected inverter. In this paper, the two-level three-phase inverter is adopted to validate the proposed technique using the MATLAB/Simulink software package. The main advantage of the current predictive control technique is faster responses to variations of the PV source compared to the general technique and it can efficiently control power to the grid. The proposed approach could be applied to the smart micro-grid using the renewable resource to maintain the voltage in the power system.

Keywords: Predictive current control, Three-phase inverter, Smart microgrid.

1. บทนำ

การเชื่อมโยงแหล่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปนิยมควบคุมเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) อย่างไรก็ตามการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีความสำคัญมากในการรักษาระดับแรงดันปลายทางของระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1] อุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (Grid connection) เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าทางเลือกที่มีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ [2] จากเทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage source current control inverter : VSCCI) สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis), การควบคุมแบบเปรียบเทียบความชัน (Ramp comparison) และ การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current control) ซึ่งเทคนิควิธีการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการประมวลผลการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากระบบได้อย่างรวดเร็ว ให้ผลตอบสนองที่ดีเพียงครั้งเดียวต้องใช้ระบบการประมวลผลที่รวดเร็ว [3]

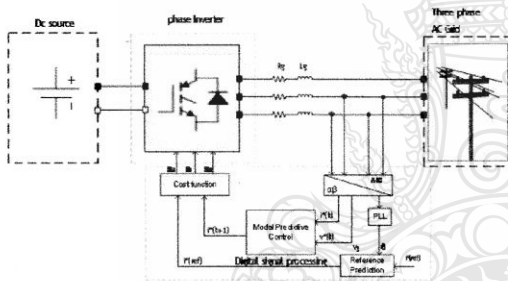
เทคนิคการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า (Predictive current-control) โดยการเชื่อมโยงเข้ากับระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าให้สามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และมีค่าเท่ากับหนึ่งได้ [4] มีประสิทธิภาพในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง เหมาะสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ใช้งานจริงและใช้ความถี่ในการควบคุมการคำนวณ ประมวลผลที่สูง [5] ซึ่งวิธีการคำนวณทำนายค่ากระแสไฟฟ้า มีการปรับปรุงเทคนิคการควบคุมการทำงาน และสามารถประยุกต์ใช้ในงานควบคุมการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการที่ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้งาน และได้รับความนิยมใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า และการควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เป็นต้น [6]-[10]

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า ช่วยเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของการควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในระบบสมาร์ตไมโครกริดสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

2. การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับ

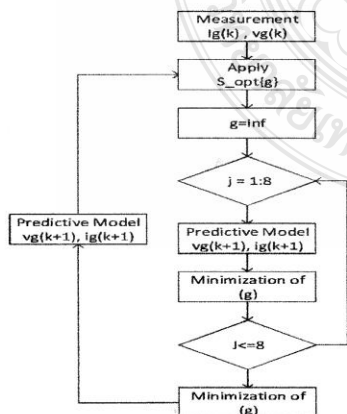
อินเวอร์เตอร์สามเฟส

จากรูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมการควบคุม ด้วยเทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ต่อรวมอยู่ในระบบ ด้วยการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ โดยการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าจากการทำนายล่วงหน้าพร้อมกับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ในการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง ในรูปแบบการแปลงแกนกรอบอ้างอิงให้กับระบบที่ต้องการ เพื่อแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน หรือเซลล์แสงอาทิตย์โดยการกำหนดให้มีค่าคงที่ในการออกแบบและจำลองการทำงาน



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

3. อัลกอริทึมการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2 อัลกอริทึมการควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า

อัลกอริทึมการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าสำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า ในทุกๆ ความเวลาการทำงานแสดงไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 2

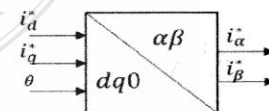
การวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าอยู่ในรูปแบบของการแปลงแกนกรอบอ้างอิงในระบบสองแกน คือ α และ β เพื่อให้สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยจะทำการสุ่มสัญญาณอินพุตจากเวลาที่กำหนดแบบคงที่ในการคำนวณประกอบไปด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจากความต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ และค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบ ในช่วงระยะเวลาที่คงที่ตลอดทุกคาบสัญญาณการทำงาน เริ่มจากค่ากระแสไฟฟ้าช่วงขณะ $i(k)$ คือค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาที่ T_s และ $i(k+1)$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของเวลาดับต่อไป เมื่อพิจารณาสมการกระแสไฟฟ้าที่เวลา T_s [4] จะได้ดังสมการที่ 1

$$i(k) = \frac{1}{RT_s + L} (Li(k-1) + T_s v(k) - T_s v_g(k)) \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 จะสามารถทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลา T_s ในเวลาดับต่อไปโดยการแทนค่าสมการด้วย $k = k+1$ ดังสมการที่ 2

$$i(k+1) = \frac{1}{RT_s + L} (Li(k) + T_s v(k+1) - T_s v_g(k+1)) \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 แสดงสมการของการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาดับไป พร้อมกับค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อใช้ในการหาค่าค้นหาที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมการสวิทช์ซึ่งถูกปรับอเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยนี้ จำลองการทำงานด้วยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ ในรูปแบบกรอบอ้างอิง ในการสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงให้กับระบบ คือ ค่า i_d^* และ i_q^* จากการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานจริงและค่ามุมเฟส ของระบบที่ต้องการ เพื่อการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงและมุมเฟส ในรูปแบบการแปลงแกนกรอบอ้างอิง ดังแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสร้างสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

สมการสำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์จากสมการที่ 3 [10] เพื่อใช้ในการออกแบบในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายให้กับระบบได้อย่างเหมาะสม โดยการควบคุมร่วมกับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้า หรือการชดเชยให้กับระบบได้

ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามความเหมาะสม ในการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สำหรับการสวิทช์ซึ่งอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

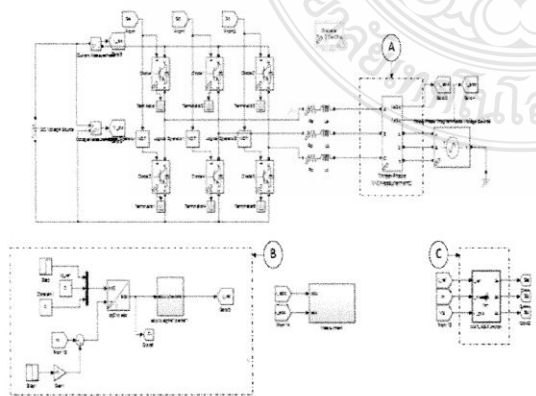
การควบคุมกระแสไฟฟ้า ในรูปแบบการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า คือ การหาค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ และค่ากระแสที่ใช้อ้างอิง สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันต้นทุนที่น้อยที่สุด (Cost- function minimization) ในรูปแบบการแปลงแกน และคำนวณหาค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง และค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำนายได้ ดังแสดงดังสมการที่ 4 [6]

$$g = |i_\alpha^*(k+1) - i_\alpha^p(k+1)| + |i_\beta^*(k+1) - i_\beta^p(k+1)| \quad (4)$$

เมื่อ $i_\alpha^p(k+1)$ และ $i_\beta^p(k+1)$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้ในช่วงเวลาที่ไปของการทำงาน ส่วนค่า $i_\alpha^*(k+1)$ และ $i_\beta^*(k+1)$ คือค่ากระแสไฟฟ้าในส่วนที่ใช้อ้างอิง ที่ได้มาจากการวัดและการประมาณค่าการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ให้กับระบบไฟฟ้าที่ต้องการ

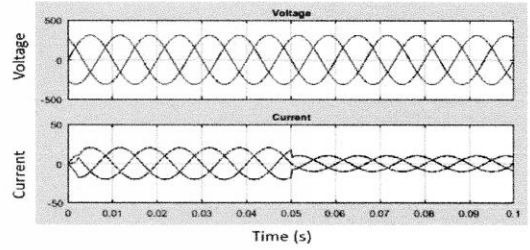
4. ผลการจำลองสถานการณ์

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับ ที่ใช้การควบคุมแบบทำนายค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาการใช้งาน กำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ดังนี้ $R = 0.5 \Omega$, $L = 0.1H$, $T_s = 25\mu s$, $V_{dc} = 600V$, $V_g = 380V$, $f = 50Hz$ และ $i_{ref}^* = 0 - 20A$ เพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4 ที่ตำแหน่ง C และแสดงผลการทดลองการตอบสนองต่อการควบคุม แสดงดังรูปที่ 5-รูปที่ 9

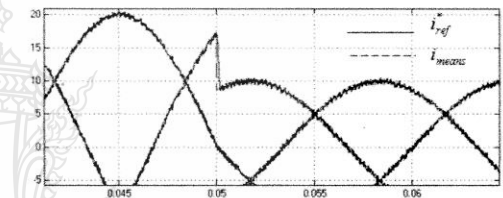


รูปที่ 4 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

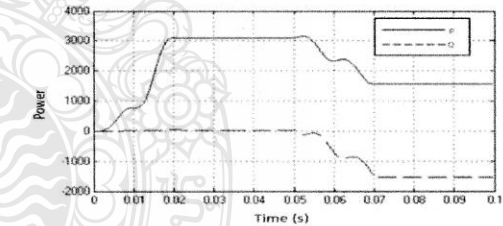
จากรูปที่ 5 - รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า โดยทำการสวิตช์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เวลา 0.05 วินาที มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับหนึ่ง แสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่ากระแสเอาท์พุทให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีการทั่วไป โดยการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากตำแหน่ง A ในรูปที่ 4



รูปที่ 5 ผลการจำลองการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่อินเฟสกับแรงดัน

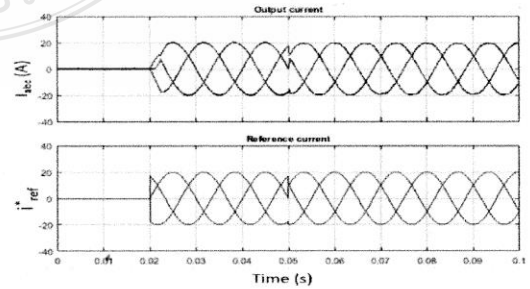


รูปที่ 6 รูปขยายกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง



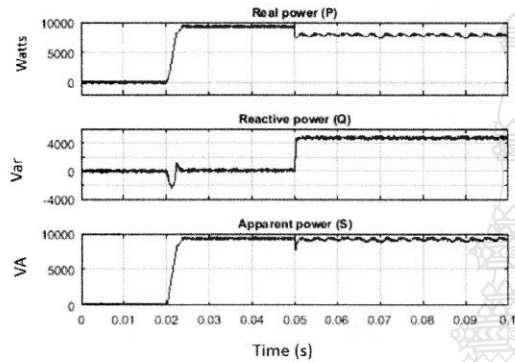
รูปที่ 7 ผลตอบสนองการจำลองการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า P-Q

รูปที่ 7 สัญญาณเอาท์พุทกำลังไฟฟ้า โดยการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง และค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เวลา 0.05 วินาที โดยสัญญาณอ้างอิงที่ตำแหน่ง B ในรูปที่ 4



รูปที่ 8 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเอาท์พุท

รูปแสดงการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 8 เมื่อจ่ายพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้าที่เวลา 0.02 วินาที และทำการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เวลา 0.05 วินาที มุมหน้า 30 องศา ศึกษาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเอาท์พุท ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีการปกติทั่วไป



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้า P-Q

รูปที่ 9 แสดงผลการทดลองจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.02 วินาที และเมื่อทำการชดเชยมุมเฟสหน้าหน้าทีเวลา 0.05 วินาที สังเกตผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งสามชนิด เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่รวดเร็ว แต่ยังคงมีสัญญาณรบกวนอื่นเนื่องมาจากการแกว่งหรือการสวิตช์ของสัญญาณไฟฟ้าเอาท์พุท เนื่องจากการเลือกค่าพารามิเตอร์และความถี่ในการประมวลผลสัญญาณ

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้ การควบคุมการหาค่ากระแสไฟฟ้า ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดเชื่อมโยงพลังงานไฟฟ้าจากแบบจำลองแหล่งพลังงานทดแทนแบบคงที่ ในการเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้สามารถพิจารณาไปประยุกต์ใช้ในระบบสมรรถนะไมโครกริด เพื่อการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า ด้วยแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ ได้ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Kahrobaei, Y.A.-R.I. Mohamed, "Interactive Distributed Generation Interface for Flexible Micro Grid Operation in Smart

Distribution Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.3, No.2, pp.295-305, 2012.

[2] M. Mosa, H. Abu-Rub, M.E. Ahmed, A. Kouzou and J. Rodriguez, "Control of single phase grid connected multilevel inverter using model predictive control", *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International*, 2013.

[3] H.M. Kojabadi, Bin Yu, I.A. Gadoura, Liuchen Chang and M. Ghribi, "A novel DSP-based current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters", *Power Electronics*, vol. 21, no.4, pp.985-993, 2006.

[4] J. Rodriguez, J. Pontt, P. Correa, P. Lezana and P. Cortes, "Predictive power control of an AC/DC/AC converter", *Industry Applications Conference*, vol.2, pp.934-939, 2005.

[5] S. Vazquez, J.I. Leon, L.G. Franquelo, J.M. Carrasco, O. Martinez, J. Rodriguez, P. Cortes and S. Kouro, "Model Predictive Control with constant switching frequency using a Discrete Space Vector Modulation with virtual state vectors", *Industrial Technology, ICIT, IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1-6, 2009.

[6] J. Rodriguez, P. Cortes, R. Kennel and M.P. Kazmierkowski, "Model predictive control -- a simple and powerful method to control power converters", *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. IEEE 6th International*, vol., no., pp.41-49, 2009.

[7] J. Rodriguez and P. Cortes, "Predictive Control of Power Converter and Electrical Drives", *John Wiley & Sons*, New York, 2012.

[8] Yohan Baek, Kui-Jun Lee and Dong-seok Hyum, "Improved Predictive Current Control for Grid Connected Inverter Applications with Parameter Estimation", *Industry Applications Society Annual Meeting, IAS, IEEE*, vol., no., pp.1-6, 2009.

[9] P. Cortes, A. Wilson, S. Kouro, J. Rodriguez and H. Abu-Rub, "Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.57, no.8, pp.2691-2699, 2010.

[10] S. Vazquez, A. Marquez, R. Aguilera, D. Quevedo, J.I. Leon and L.G. Franquelo, "Predictive Optimal Switching Sequence Direct Power Control for Grid-Connected Power Converters", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.62, no.4, pp.2010-2020, 2015.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเฉลิม จินาคุน
วัน เดือน ปี เกิด	12 สิงหาคม 2523
ที่อยู่	14/52 หมู่บ้านหัวดอน ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ปีศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรบัณฑิตวิชาชีพครู มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ปีการศึกษา 2552
เบอร์โทรศัพท์	086-6654373
อีเมล	Chalerm.jinatun1@gmail.com

