

การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง

DC DRIVE BASED REAL TIME WIND TURBINE SIMULATOR



บัญชา ศรีวิโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง

บัญชา ศรีวิโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบ
เวลาจริง

ชื่อ - นามสกุล

DC Drive Based Real Time Wind Turbine Simulator

สาขาวิชา

นายบัญชา ศรีวิโรจน์
วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

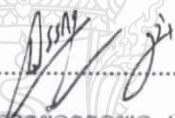
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.


ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

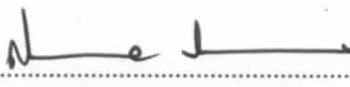

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคดิพิชญ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล, D.Eng)


..... กรรมการ
(อาจารย์สุรินทร์ แห่งงาม, Ph.D.)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย พิรสอาด, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง
ชื่อ – นามสกุล	นายบัญชา ศรีวิโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการจำลองการทำงานของกังหันลมที่ใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบทันเวลา เพื่อเป็นการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ให้เป็นไปตามเงื่อนไขโดยควบคุมสัญญาณความเร็วอ้างอิง โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกังหันโดยใช้โปรแกรม MATLAB/simulink ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ DSP บอร์ด เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา ในส่วนของการควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนาม

การออกแบบใช้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในฟังก์ชันบล็อกกังหันลมของโปรแกรม MATLAB/simulink เชื่อมต่อผ่าน DSP บอร์ด รุ่น DSPACE 1104 ตัวจอร์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 โดยควบคุมเพื่อสั่งงานมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขนาดพิกัด 220 โวลต์ 1,000 วัตต์ ในลักษณะ PI control ซึ่งใช้วงจรชอปเปอร์เป็นวงจรกำลังในการควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนาม โดยสวิตซ์ที่ความถี่ 30 kHz ปรับความเร็วรอบด้วยวิธีการปรับสัญญาณดิ้ว์ไซเคิล ในส่วนการหาพารามิเตอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ใช้วิธีการ system identification จากนั้นต่อฟางมอเตอร์เข้ากับโหลดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นภายนอกเพื่อทำการทดสอบกับโหลดความต้านทาน

ผลการทดสอบการจำลองกังหันลมควบคุมตามความเร็วลม 3 ระดับดังนี้ 1) ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที และ 3 เมตรต่อวินาที ใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรงแบบควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ 2) ที่ความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที ขับเคลื่อนแบบควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์เช่นกัน และ 3) ที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที ขับเคลื่อนแบบควบคุมขดลวดสนาม ทั้งนี้ระบบมีค่าความแปรปรวนเฉลี่ยรวมเท่ากับ 0.60484 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบจากมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วรอบอ้างอิงของกังหันลม โดยมีค่าความแปรปรวนอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

คำสำคัญ กังหันลม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก การควบคุมแรงดันขดลวดอาร์มาเจอร์ การควบคุมแรงดันขดลวดสนาม ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

Thesis Title	DC Drive Based Real Time Wind Turbine Simulator
Name - Surname	Mr. Bancha Sreewirote
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis presents the simulation of the operation of DC drive based real time wind turbine for separate excite DC motor controlling rely to the condition by speed reference signal controlling. The parameters of the wind turbine were defined in MATLAB/simulink via DSP board interface card to convert the signal to the real time format for the both of armature and shunt field voltage controlling.

The design uses the parameter definition in the block function of wind turbine of MATLAB/simulink connect via the DSPACE 1104 DSP board model to the controller circuit with PIC18F4431 micro controller in PI control mode to operate the separate excite DC motor 220 volts/1,000 watts. The chopper circuit was implemented as the power circuit to control the both of armature and shunt field voltage with switching frequency at 30 kHz in order to adjust the motor speed by duty cycle control. The transfer function of motor was defined by the system identification. After that, the motor are connected to a DC generator in order to test the system when such system is in loaded condition.

The results of the wind turbine simulator relies on 3 level of wind speed, which are 1) at 2.5 m/s and 3 m/s of wind speed, DC drive utilized by armature voltage control, then 2) at 5.5 m/s of wind speed, it also utilized by armature voltage control, and 3) at 9 m/s of wind speed, it utilized by field voltage control. Therefore, the average variance of such system is about 0.60484. It shows that the motor speed is adequate equal to speed reference of the wind turbine

Keywords: wind turbine, separate excite DC motor, armature voltage control, shunt filed control, PIC microcontroller

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา และเอาใจใส่ เป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์ ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล ผู้ทรงคุณวุฒิ รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยเหลือแนะนำในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณา ตรวจสอบ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณแม่คณิงนิจ ศรีวิโรจน์ ผู้ให้กำเนิด คุณเชิดเกียรติ ศรีวิโรจน์ พี่ชาย ที่แสนดีที่คอยช่วยเหลือกันตลอดมา ขอขอบคุณ คุณธิดานันท์ พุ่มพฤษย์และคุณจีระศักดิ์ วงศา ผู้ที่อยู่ เคียงข้างและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธัญบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและครู บานอาจารย์ ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน จนข้าพเจ้าเกิดทักษะเกี่ยวกับองค์ความรู้และศาสตร์ต่างๆ คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทั้งที่กล่าวถึงและไม่ได้ กล่าวถึงทุกท่าน

บัญชา ศรีวิโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการของการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กังหันลม.....	6
2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor).....	12
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
2.4 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE.....	38
2.5 โปรแกรม Matlab/Simulink.....	39
2.6 สรุป.....	42
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
3.1 การใช้งานฟังก์ชันบล็อกของกังหันลมบนโปรแกรม MATLAB.....	48
3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	54
3.3 การการหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการ System Identification.....	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบวงจรซีพียู.....	68
3.5 การออกแบบวงจรเสริม	69
3.6 การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสและ Encoder.....	74
3.7 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	76
3.8 การออกแบบในส่วนของ Software.....	83
3.9 สรุป.....	86
4 ผลการทดลอง	87
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ	87
4.2 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	88
4.3 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ.....	88
4.4 สรุป.....	116
5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	117
5.1 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	117
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	118
รายการอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะอุปกรณ์.....	121
ภาคผนวก ข โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการเขียน	186
ภาคผนวก ค ประมวลภาพกระบวนการดำเนินงานวิจัย.....	195
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	199
ประวัติผู้เขียน	229

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วย Ziegler-Nichole วิธีที่ 1.....	30
2.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วย Ziegler-Nichole วิธีที่ 2.....	30
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ	54
3.2 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาซีเฉพาะส่วนอ่านค่ากระแสและผลรวมทางเวลา.....	56
3.3 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาซีเฉพาะส่วนอ่านค่าความเร็วรอบและผลรวม ทางเวลา	57
4.1 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	97
4.2 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำการ เปลี่ยนแปลงโพลต์ตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	98
4.3 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	103
4.4 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำการ เปลี่ยนแปลงโพลต์ตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	104
4.5 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	109
4.6 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำการ เปลี่ยนแปลงโพลต์ตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	110
4.7 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9m/s	115
4.8 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำการ เปลี่ยนแปลงโพลต์ตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	116

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปริมาตรกรไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม.....	7
2.2 กังหันลมแนวแกนตั้งแบบต่างๆ.....	8
2.3 กังหันลมแนวแกนนอนแบบต่างๆ.....	9
2.4 อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือที่ประเทศไทย.....	10
2.5 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย.....	11
2.6 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์เมื่อคิดแรงบิดที่เพลลา	12
2.7 บล็อกของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่จากสมการที่ (2.25).....	14
2.8 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $U_i^*(s)$, $I_e^*(s)$ และ $\omega^*(s)$	15
2.9 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $U_e^*(s)$ กับ $I_e^*(s)$	15
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_e กับ i_e	16
2.11 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $\phi_e^*(s)$ และ $U_e^*(s)$	17
2.12 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับความเร็ว (Speed).....	17
2.13 บล็อกไดนามิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	18
2.14 บล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	19
2.15 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมีการควบคุม ที่อาร์เมเจอร์และ $\phi_e = \phi_{eN}$ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์ และแรงบิด	21
2.16 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสอาร์เมเจอร์และแรงบิดสถานะคงตัวเมื่อมีการควบคุมที่ขดสนามและ $U_a = U_{aN}$	23
2.17 ย่านการควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะคงตัว	24
2.18 ย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในส่วนขอความเร็ว และแรงบิด	26
2.19 ค่าของความผิดพลาด (error) ระหว่าง output ของระบบจริง กับ output ของโมเดล ทางคณิตศาสตร์ที่ ประมาณ (estimate) ได้	27
2.20 ลำดับขั้นตอนการทำงานของ System Identification	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.21 บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด	29
2.22 สัญญาณ S-Curve และตัวแปรที่ใช้ในการหาค่า	29
2.23 การตอบบล็อกไดอะแกรมวิธีที่ 2 ของ Zeigler-Nichole	30
2.24 บล็อกสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของ ZN Tuning วิธีการที่ 2	31
2.25 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการปรับค่าเกน k จนเกิดการแกว่งของระบบ	32
2.26 วงจรซีอปเปอร์คลาสเอ	33
2.27 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์	34
2.28 เซรามิกรีโซเนเตอร์และการต่อใช้งาน	37
2.29 คริสตอลรีโซเนเตอร์	37
2.30 โครงสร้างขาของ Crystal Square-wave	37
2.31 อุปกรณ์ควบคุม dSPACE	38
2.32 การทดสอบระบบของเครื่องกั้นจำลองกั้นลมในโปรแกรม MATLAB /SIMULINK	40
2.33 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม	41
2.34 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกั้นลม	41
3.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ	46
3.2 แผนภูมิกระบวนการวิจัย	48
3.3 (ก) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร	49
(ข) บล็อกไดอะแกรมแบบโครงสร้างภายในแบบจำลองความเร็วลม	50
3.4 แบบจำลองกั้นลม	50
3.5 (ก) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกั้นลมและการกำหนดตัวแปร	51
(ข) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกั้นลมและการกำหนดตัวแปร	52
(ค) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกั้นลม	52
3.6 หน้าต่างโปรแกรม Control Desk ที่ออกแบบไว้	53
3.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก	54
3.8 ค่าคงตัวทางเวลาเชิงกล	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 การตั้งชื่อไฟล์	58
3.10 การเลือกใช้คอมพิวเตอร์	59
3.11 การเลือก bit/sec ให้ตรงกับไมโครคอนโทรลเลอร์	59
3.12 Import Data เลือกข้อมูลมาใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน	60
3.13 ข้อมูลที่ใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน	60
3.14 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล	61
3.15 การพลอตกราฟข้อมูล a	61
3.16 การเลือกกล่องเครื่องมือ System Identification Tool (iden)	62
3.17 กล่องเครื่องมือ System Identification Tool	62
3.18 เลือก time domain ใน Import data	63
3.19 การเลือกอินพุตและเอาต์พุตใน Import data	63
3.20 การเลือก Estimate เป็น Process Model	64
3.21 หน้าต่างแสดงผลฟังก์ชันถ่ายโอน	64
3.22 การเลือกโมเดลเอาต์พุต	65
3.23 โมเดลเอาต์พุต	65
3.24 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์	66
3.25 ข้อมูลของกลุ่ม Speed Armature	67
3.26 ข้อมูลของกลุ่ม Current Armature	67
3.27 ข้อมูลของกลุ่ม Speed Field	68
3.28 วงจรช้อปเปอร์คลาสเอ	68
3.29 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์	70
3.30 หม้อแปลง สเต็ปดาวน์ที่ใช้งานจริง	70
3.31 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับ	71
3.32 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับที่สร้างขึ้น	71
3.33 วงจร Offset Voltage	72
3.34 วงจรขยายสัญญาณขั้วเกต	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.35 การต่อใช้งาน MAX232	73
3.36 วงจรรับค่ากระแสและฮอลเอฟเฟ็คขนาด 25 แอมแปร์	74
3.37 กราฟการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตเมื่อกระแสมีการเปลี่ยนแปลง	74
3.38 การต่อใช้งาน Encoder	75
3.39 (ก) ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรควบคุม	76
(ข) ส่วนประกอบต่างๆ วงจรควบคุมที่สร้างขึ้นจริง	76
3.40 ผังการทำงานของโปรแกรม	81
3.41 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาซีด้วยโปรแกรม CCS 'C' Compiler	84
3.42 ประมวลผลการออกแบบวงจรทั้งหมดเพื่อทำการทดสอบ	86
4.1 การทดสอบการจำลองกึ่งहनลด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง...	87
4.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบ การจำลองการทำงานของกึ่งहनล ด้วยโปรแกรม Matlab/simulink ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE DS1104	89
4.3 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 2.5 m/s จากแบบจำลองกึ่งहनล	90
4.4 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 3 m/s จากแบบจำลองกึ่งहनล	90
4.5 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 5.5 m/s จากแบบจำลองกึ่งहनล	91
4.6 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 7 m/s จากแบบจำลองกึ่งहनล	91
4.7 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5 m/s	93
4.8 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	93
4.9 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5m/s	94
4.10 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	94
4.11 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	95
4.13 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	96
4.14 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal โหลด 250 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	96
4.15 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s	97
4.16 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	99
4.17 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรมHyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	99
4.18 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจากPIC18F4431 ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	100
4.19 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3m/s	100
4.20 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431	101
4.21 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	101
4.22 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	102
4.23 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s.....	102
4.24 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.25 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5m/s	105
4.26 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5m/s	105
4.27 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	106
4.28 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	106
4.29 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	107
4.30 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	107
4.31 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	108
4.32 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	108
4.33 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s	109
4.34 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	111
4.35 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	111
4.36 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	112
4.37 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.38 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	113
4.39 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	113
4.40 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	114
4.41 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	114
4.42 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s	115



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันราคาน้ำมันมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ พลังงานทดแทน (renewable energy) จึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจาก แสงอาทิตย์ น้ำ ลม เป็นต้น แต่ในส่วนที่จะกล่าวถึงคือพลังงานลม ซึ่งอาศัยหลักการแปลงพลังงานจลน์จากลมที่ผ่านใบพัดของกังหันให้กลายเป็นแรงบิดที่กระทำต่อเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าจ่ายสู่ระบบต่อไป ปัจจุบันกังหันลมในประเทศไทยมีจำนวนน้อยมาก ปัญหาหลักที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้พลังงานลมในประเทศไทยคือความขาดแคลนบุคลากรที่มีประสบการณ์ ความรู้ และความเข้าใจที่ดีในการทำงานและการควบคุมกังหันลม นอกจากนี้ การขาดแคลนสถานที่ทดสอบจริงสำหรับกังหันลมจริงทำให้ผู้วิจัยไม่สามารถทำการวิจัยและพัฒนาระบบแปรผันพลังงานลม ซึ่งตามธรรมชาติไม่สามารถกำหนดให้ความเร็วลม เป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ตามคุณสมบัติของกังหันลม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพได้ จึงมีการสร้างชุดจำลองกังหันลมเพื่อจำลองความเร็วลม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ของระบบกังหันลม ผลตอบสนองของ กำลัง แรงบิด ความเร็วรอบ และอัตราส่วนความเร็วขอบของระบบ ภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการทำงานของกังหันลมได้เป็นอย่างดี

ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการติดตั้งกังหันลมและยังสามารถคาดคะเนประสิทธิภาพที่ได้ จึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า กระแสตรง แบบเวลาจริงนี้ขึ้นมา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของกังหันลม โดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองกังหันลมบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
- 1.2.3 เพื่อศึกษาระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.2.4 เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทดสอบการทำงานได้ในแบบเวลาจริง

1.3.2 ระบบควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเชื่อมต่อกับการ์ดอินเตอร์เฟซเพื่อควบคุมแรงดันในขดลวดอาร์เมเจอร์และแรงดันของขดลวดสนามในลักษณะการควบคุมแบบย้อนกลับ

1.3.3 ค่าความแปรปรวนของการจำลองระบบกังหันลมด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองการทำงานของกังหันลมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงาน

1.4.2 เชื่อมต่อการทำงานควบคุมสัญญาณแบบทันทีด้วย DSP card (DSPACE 1104)

1.4.3 จัดทำชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นภายนอก พิกัด 220 โวลต์ 1,000 วัตต์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 18F4431

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาเรียนรู้งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ความรู้พื้นฐานตลอดจนความก้าวหน้าในด้านวิวัฒนาการและงานวิจัยทางด้านกังหันที่มีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน

1.5.2 ศึกษาข้อมูล โครงสร้างตลอดจนหลักการดำเนินงาน ของกังหันลมในรูปแบบต่างๆ

1.5.3 ศึกษาหลักการดำเนินงานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และฟังก์ชันบล็อกของการจำลองกังหันลมบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.5.4 ศึกษาการใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟซ DSPACE 1104 เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

1.5.5 ศึกษาหลักการดำเนินงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ภาษาซี และกระบวนการควบคุมแบบ PL Control

1.5.6 ศึกษาหลักการดำเนินงาน โครงสร้างและองค์ประกอบส่วนต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separate Excited DC motor)

1.5.7 ศึกษาการออกแบบ วงจรขอปเปอร์และวงจรกำลังต่างๆในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.5.8 ศึกษาการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ด้วยกระบวนการ System Identification

1.5.9 ออกแบบฟังก์ชันบล็อกจำลองการทำงานของกัณฑ์ลมบน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.5.10 ออกแบบและทดสอบการเชื่อมต่อระหว่าง MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซ DSPICE 1104 เก็บผลและวัดค่าที่ได้จากการอ้างอิงความเร็วรอบ (Speed Reference) เพื่อทดสอบกระบวนการควบคุมบนฐานเวลาจริง

1.5.11 ออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการรับค่าความเร็วรอบ (Speed Reference), ค่ากระแสและค่าเวลาชั่วขณะเพื่อใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ k_p , k_i และ dt เพื่อใช้ในการควบคุมแบบลูบปิด

1.5.12 ออกแบบวงจรชอปเปอร์ เพื่อใช้ขับในส่วนของกระบวนการควบคุมแรงดันของขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์

1.5.13 เก็บผลการทดสอบแบบลูบปิดเมื่อพิจารณาตั้งแต่อินพุตนั้นคือค่าพารามิเตอร์ของกัณฑ์ลมที่แปรเปลี่ยนตามความเร็วลมเพื่อวิเคราะห์การทำงานของเอาต์พุตให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดในเชิงสถิติที่สามารถควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.5.14 ทดสอบการใช้งานของระบบการจำลองกัณฑ์ลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริงโดยต่อพ่วงกับโหลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นภายนอกเพื่อเก็บผลกำลังการจ่ายแก่โหลดชนิดความต้านทาน

1.5.15 สร้างชุดสาธิตการทำงานอย่างสมบูรณ์แบบ เพื่อใช้ในการสาธิตการทำงานแก่ผู้ที่ต้องการศึกษาเรียนรู้เพื่อเป็นประโยชน์ทางการศึกษาต่อไป

1.6 ประโยชน์ของการวิจัย

1.6.1 เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในกระบวนการจำลองการทำงานของกัณฑ์ลมในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.6.2 เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการเชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟซในการนำไปใช้การควบคุมอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

1.6.3 เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ในกระบวนการควบคุมแบบลูบปิด และในส่วนของการทำงานเฟอ์ฟังก์ชันของมอเตอร์

1.6.4 เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในวงจรกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดชอปเปอร์

1.6.5 เพื่อเป็นการพัฒนาให้เกิดความเข้าใจในระบบการควบคุมการจำลองกึ่งหุ่นยนต์แบบระบบไฟฟ้ากระแสตรงบนฐานเวลาจริง



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิทยานิพนธ์เรื่อง “การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง” จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 กังหันลม (Wind turbine)

2.1.1 หลักการของพลังงานลม

2.1.2 ประเภทของกังหันลม

2.1.3 ข้อมูลความเร็วลมในประเทศไทย

2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor)

2.2.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในย่านแรงบิดคงที่ (Armature Voltage Control)

2) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในย่านกำลังคงที่ (Field Weakening Control)

3) การควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้ง 2 รูป

2.2.3 การหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

2.2.4 การหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichole

2.2.5 วงจรช็อบเปอร์สำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

2.4 การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE

2.5 โปรแกรม Matlab/Simulink

2.5.1 Matlab

2.5.2 Simulink

2.5.3 Control Desk

2.5.4 ฟังก์ชันบล็อกรองกังหันลม

2.6 สรุป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กังหันลม (Wind Turbine) [1]

กังหันลม คือ เครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ จากนั้นนำพลังงานกลมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น การบดสีเมล็ดพืช การสูบน้ำ หรือในปัจจุบันใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อใช้ประโยชน์มีมาตั้งแต่ชนชาวอียิปต์โบราณและมีความต่อเนื่องถึงปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลมและหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด

2.1.1 หลักการของพลังงานลม

พลังงานลม (E_{wind}) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์

$$E_{wind} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ (A) สามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาดังนี้

$$M = \rho Av \quad (2.2)$$

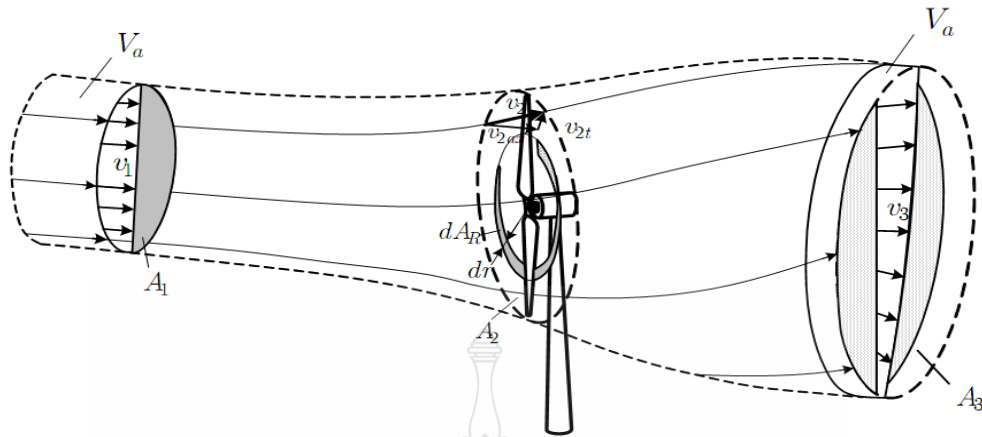
แทนสมการ 2.2 ในสมการ 2.1 จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลม นั่นเอง

$$M = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (2.3)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศ ($\approx 1.25 \text{ kg/m}^3$ ที่อุณหภูมิ 20 C)

จากภาพที่ 2.1 พลังงานลมที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด αA_1 และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน สามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.1 ปริมาณการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา

$$P_w = V_a \frac{dW_w}{dt} = d \frac{V_a \rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.5)$$

ปริมาณการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turb} v_2 \quad (2.6)$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_w = A_{turb} \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (2.7)$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb} ความเร็วลม และลักษณะของใบของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบทซ์ (Betz) กำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสกัดได้คือ

$$P_w^{\max} = \frac{16}{27} A_{turb} \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (2.8)$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$v_2 = \frac{3}{2} v_1 \quad \text{และ} \quad v_3 = \frac{1}{3} v_1 \quad (2.9)$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยที่กราฟลักษณะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด

$$C_p = \frac{P_w}{P_{Wind}} \quad (2.10)$$

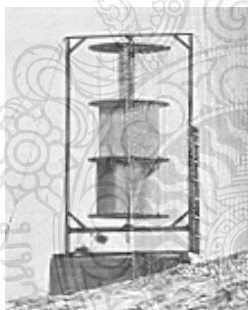
จากสมการที่ 2.3 ซึ่งจะได้กำลังงานของลมที่ผ่านกังหัน แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ด้วย เพราะฉะนั้นสมมุติให้กังหันมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a) จะเป็นดังนี้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p \quad (2.11)$$

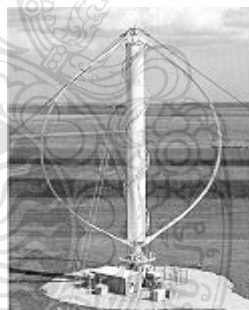
2.1.2 ประเภทของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอาจแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือกังหันแกนตั้ง (Vertical Axis และกังหันแนวนอน (Horizontal Axis)

1) กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Turbine (VAWT)) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง มีเพียง 2 แบบ คือ กังหันลมแดร์เรียวส (Darrieus) ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส และกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในประเทศฟินแลนด์ กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลม การพัฒนาจึงอยู่ในวงจำกัดและมีความไม่ต่อเนื่อง ปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบแกนตั้งน้อยมาก



กังหันลม Savonius



กังหันลม Darrieus



กังหันลม Cycrotor



กังหันลม Giromill

ภาพที่ 2.2 กังหันลมแนวแกนตั้งแบบต่างๆ



กังหันลม Windmill



กังหันลมจุดน้ำใบเสื่อลำแพน



กังหันลมสูบน้ำ



กังหันลมผลิตไฟฟ้า

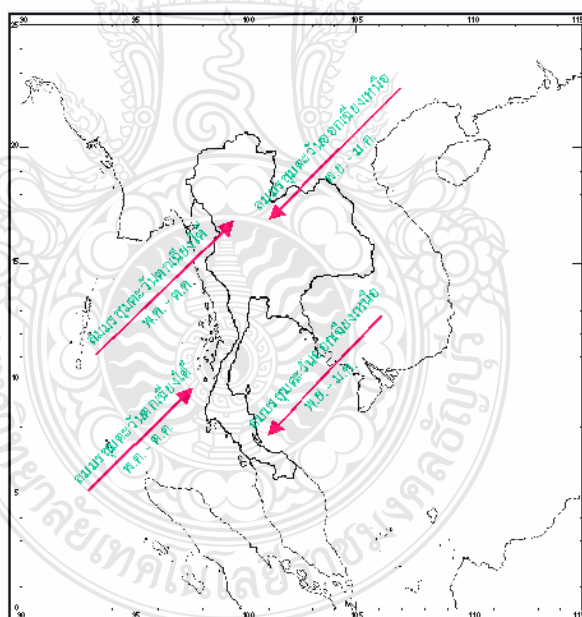
ภาพที่ 2.3 กังหันลมแนวแกนนอนแบบต่างๆ

2) กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Turbine (HAWT)) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลมลักษณะของใบพัดคือแบบมุมใบพัดคงที่และแบบปรับมุมใบพัดได้ ตัวอย่างกังหันลมแนวแกนนอนได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน กังหันลมชนิดหลายใบพัดสำหรับสูบน้ำ กังหันลมชนิด 1, 2, 3, 4 หรือ 6 ใบพัดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิด 3 ใบพัดได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง

2.1.3 ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยพบว่าศักยภาพพลังงานลมทั่วประเทศไทยมีค่า 44 เทอราวัตต์ชั่วโมงต่อปี จากการศึกษาเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ต่างๆ โดยกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า แหล่งแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3 (class 3) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 หรือมีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ที่ระดับความสูง 50 เมตร ในแถบภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเริ่มตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสงขลา จังหวัดปัตตานี และอุทยานแห่งชาติคอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม และยังพบแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกแหล่งหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาด้านทิศตะวันตก ตั้งแต่ทิวเขาตอนบน

จรดทิศเหนือตอนล่างในจังหวัดเพชรบุรี จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดตาก อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ระหว่างเดือนพฤษภาคมจนเข้าสู่เดือนตุลาคมนอกจากนี้ยังมีแหล่งพลังงานลมที่ดีที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อยู่ในบริเวณเทือกเขาอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี อุทยานแห่งชาติเขาหลวงและอุทยานแห่งชาติได้ร่มเย็น จังหวัดนครศรีธรรมราช อุทยานแห่งชาติศรีพังงาจังหวัดพังงา อุทยานแห่งชาติเขาพนมเบญจา จังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมา โดยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง 2 (class 1.3 – class 2) หรือมีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปที่มีความสูง 50 เมตร พบว่าที่ภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทยชายฝั่งตะวันตกตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดชุมพรถึงจังหวัดสุราษฎร์ธานีและบริเวณเทือกเขาในภาคเหนือคือจังหวัดเชียงใหม่ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือจังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย โดยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และพบที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตกตั้งแต่ จังหวัดพังงา จังหวัดภูเก็ต จังหวัดกระบี่ จังหวัดตรังถึงจังหวัดสตูลและชายฝั่งตะวันออกบริเวณอ่าวไทยคือ จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี โดยได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้



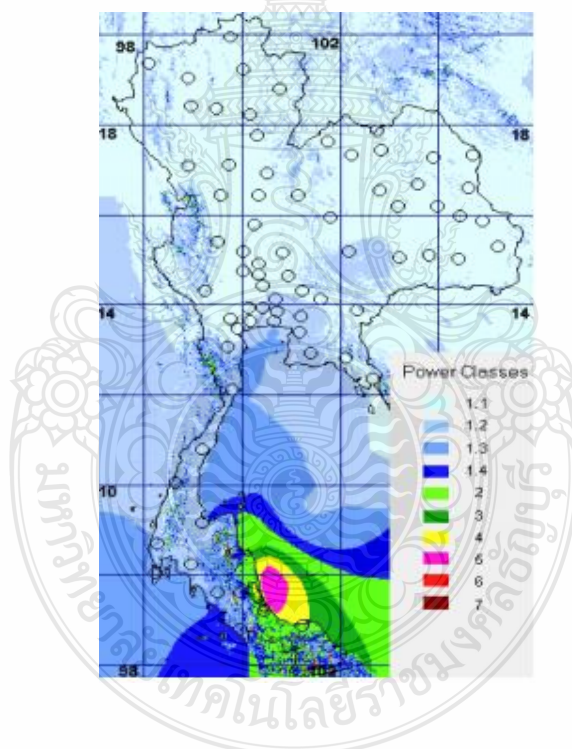
ภาพที่ 2.4 อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือที่ประเทศไทย

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

จากข้อมูลศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น หากเทียบกับประเทศในยุโรปแล้วถือว่ามีความต่ำมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแล้วความเร็วลมในระดับประมาณ 6

เมตรต่อวินาทีถือว่ายังไม่เหมาะกับการ ติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์ เพราะกังหันลมขนาดดังกล่าวต้องการความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12 – 13 เมตรต่อวินาที ดังนั้นทางเลือกที่เหมาะสมของประเทศไทยหากจะมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้า ควรจะเป็นระบบขนาดเล็กในช่วงพิกัดกำลังกิโลวัตต์จะมีความเหมาะสมกว่า (นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. 2547: 65)

ถึงแม้ผลจากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับที่อื่น แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าพลังงานลมที่มีอยู่ไม่สามารถใช้ได้จากการเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุนระหว่างพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมพบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีต้นทุนถูกกว่าประมาณ 8 – 10 เท่า และยิ่งถ้าสามารถผลิตใบพัดของกังหันลมได้เองจะถูกกว่าถึง 10 เท่า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์)



ภาพที่ 2.5 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

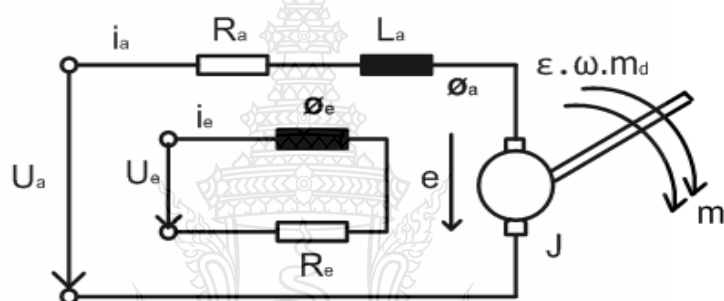
ในปัจจุบันในประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและจ่ายเข้าระบบสายส่งในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับพลังงานอื่นๆ โดยมีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 150 กิโลวัตต์ ซึ่งผลิตโดยบริษัทนอร์ดแทงก์ ประเทศเดนมาร์กในพื้นที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของการ

ไฟฟ้าฝ่ายผลิต ณ แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เพื่อสาธิตการผลิตไฟฟ้าจาก กังหันลมร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 กิโลวัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยจ่ายไฟเข้าระบบ สายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จนถึงปัจจุบันระบบยังสามารถทำงานได้อยู่

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) [2]

2.2.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สมการดิฟเฟอเรนเชียลและภาพบล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าโดยคิดแรงบิดที่เพลของมอเตอร์ เพื่อจะนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เมื่อคิดแรงบิดที่เพล

ก่อนการวิเคราะห์ มาพิจารณาคำหมายและสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้

m_a คือ Armature Torque , Electrical Torque

$$m_a = K i_e i_a \quad (2.12)$$

m_L คือ Load Torque

m_d คือ Accelerating Torque

$$m_d = m_a - m_L = J \frac{dw}{dt} \quad (2.13)$$

J คือ Moment of Inertia ของมอเตอร์และโหลด

$$J = \int r^2 dm \quad (2.14)$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตาม ภาพที่ 2.6 เราสามารถเขียนเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้ดังนี้

1.1 พิจารณาส่วนของวงจรรออาร์เมเจอร์ (Armature Circuit)

$$u_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_i \quad (2.15)$$

เมื่อส่วนของ Back emf หรือ Rotation Voltage

$$u_i = K i_e \omega \quad (2.16)$$

1.2 ในขณะเดียวกันส่วนของวงจรมอเตอร์ (Field Circuit)

$$u_e = i_e R_e + L_e \frac{di_e}{dt} \quad (2.17)$$

1.3 พิจารณา Moment of Inertia

จากแรงบิด (Torque) ในสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} m_d &= m_a - m_L \\ J \frac{d\omega}{dt} &= m_a - m_L \\ m_a &= K i_e i_a \end{aligned} \quad (2.18)$$

สมการในรูปของ Per – Unit (Normalization)

ค่าอ้างอิง (Refernce) ต่างๆที่ใช้มีดังนี้;

 U_{aN} คือ Norminal Amature Voltage หรือ Rated Armature Voltage

$$U_{aN} \text{ คือ } = U_{io} = K i_{eN} \omega_o \quad (2.19)$$

 U_{io} คือ แรงดันเหนี่ยวนำ (Induce Voltage) เมื่อไม่มีโหลด i_{sc} คือ Extrapolated Stalled Rotor Current ที่ Norminal Voltage หรือ Stand Still Current ($\omega=0$) หรือกระแสลัดวงจรที่ $\omega=0$ มีค่า 8 - 10 เท่าของกระแสพิกัด

$$i_{sc} = \frac{uaN}{R_a} \text{ หรือ } U_{aN} = i_{sc} R_a \quad (2.20)$$

 U_{eN} คือ Norminal Field Voltag ϕ_{eN} คือ Norminal Flix i_{eN} คือ Norminal Field Current

$$i_{eN} = \frac{uaN}{R_a} \quad (2.21)$$

 ω_o คือ Norminal no – load Speed m_{sc} คือ Extrapolated Stalled Rotor Torque หรือ Stand Still Torque

$$m_{sc} = K i_{eN} i_{sc} \quad (2.22)$$

ทำสมการต่างๆให้อยู่ในรูป Per - Unit โดยสมการที่ 2.15 หาดด้วย

$$\begin{aligned}
 U_{aN} &= i_{sc} R_a && \text{สมการที่ 2.20 จะได้} \\
 \frac{ua}{u_{aN}} &= \frac{i_a R_a}{u_{aN}} + \frac{L_a di_a}{u_{aN} dt} + \frac{u_i}{u_{aN}} \\
 \frac{ua}{u_{aN}} &= \frac{i_a}{i_{sc}} + \frac{L_a \frac{d(i_a)}{dt}}{R_a} + \frac{u_i}{u_{aN}}
 \end{aligned}$$

จะได้สมการ Per - Unit คือ

$$U_a^* = i_a^* + T_a^* \frac{di_a^*}{dt} + U_i^* \quad (2.23)$$

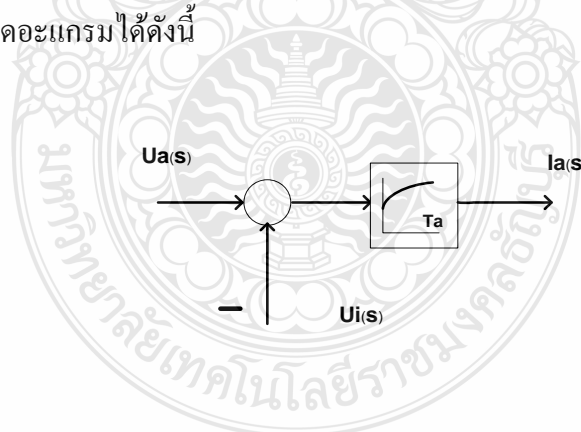
โดยที่ค่า T_a คือ Electrical Time Comstant ของขดลวดอาร์เมเจอร์

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.24)$$

สมการที่ (2.23) เขียนอยู่ในรูปของลาปลาซได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 U_a^*(s) &= I_a^*(s) + T_a^* s I_a^*(s) + U_i^*(s) \\
 \text{นั่นคือ } I_a^*(s) &= \frac{1}{T_a s + 1} [U_a^*(s)] - [U_i^*(s)] \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.25 จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแส $I_a^*(s)$ เป็น PT1 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

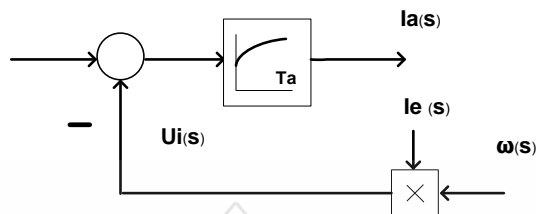


ภาพที่ 2.7 บล็อกของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่จากสมการที่ 2.25

จากสมการที่ 2.16 หาดด้วย $U_{aN} = K i_{eN} \omega_o$ จะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{u_i}{u_{aN}} &= \frac{K i_e \omega}{K i_{eN} \omega_o} = i_e^* \omega^* \\
 \text{นั่นคือ } \frac{U_i^*(s)}{U_a^*(s)} &= I_a^*(s) \omega^*(s) \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.26 สามารถเขียนได้เป็นภาพบล็อกได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 2.8 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $U_i^*(s)$, $I_a^*(s)$ และ $\omega^*(s)$

จากสมการที่ 2.17 หากด้วย $U_{aN} = I_{eN} R_e$ จะได้

$$\frac{u_e}{u_{eN}} = \frac{i_e R_e}{u_{eN}} + \frac{L_e di_e}{u_{eN} dt}$$

$$\frac{u_e}{u_{eN}} = \frac{i_e}{i_{eN}} + \frac{T_e d\left(\frac{i_e}{i_{eN}}\right)}{dt} \quad \left[\text{โดยที่ } T_e = \frac{L_e}{R_e} \right] \quad (2.27)$$

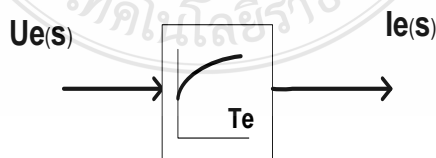
จะได้สมการในรูปของ Per-Unit ดังนี้

$$U_e^* = i_e^* + T_e \frac{di_e^*}{dt} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.16 เขียนให้อยู่ในรูปของลาปลาซได้ดังนี้

$$\begin{aligned} U_e^*(s) &= i_e^*(s) + T_e s I_e^*(s) \\ \text{จะได้ } I_e^*(s) &= \frac{U_e^*(s)}{T_e s + 1} \end{aligned} \quad (2.29)$$

สมการที่ 2.29 เป็น PT1 - Transfer Element ซึ่งแสดงเป็นภาพบล็อกได้ดังภาพที่ 2.9

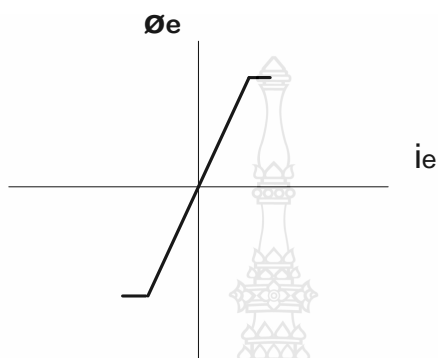


ภาพที่ 2.9 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $U_e^*(s)$ กับ $I_e^*(s)$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันส่วนกลับ (Inverse Function) ของ Magnetizing Curve หรือ B – H Curve นั่นคือ

$$\frac{i_e}{i_{eN}} = \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \quad (2.30)$$

จะเห็นว่า i_e จะเปลี่ยนไปตามลักษณะของ B – H Curve เขียนเป็นรูปได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_e กับ i_e

จากสมการที่ 2.27 นำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

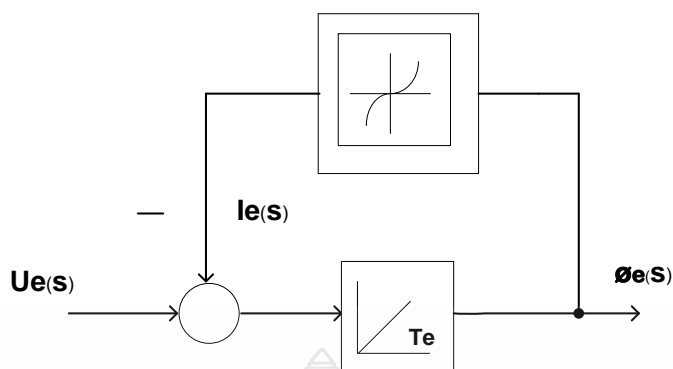
$$T_e \frac{d \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}}}{dt} = \frac{u_e}{u_{eN}} - \frac{i_e}{i_{eN}} \quad (2.31)$$

$$T_e \frac{d \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}}}{dt} = \frac{u_e}{u_{eN}} - \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}}$$

นั่นคือ $T_e \frac{d\phi_e}{dt} = u_e^*(s) - i_e^*(s) \quad (2.32)$

$$\phi_e^*(s) = \frac{1}{T_e s} [U_e^*(s) - I_e^*(s)] \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.21 เขียนเป็นภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 2.11 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่าง $\phi_e^*(S)$ และ $U_e^*(S)$

สมการที่ 2.18 หากด้วย m_{sc} จะได้

$$J \frac{\omega_o d \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)}{m_{sc} dt} = \frac{m_a}{m_{sc}} - m_L$$

$$T_m \frac{d\omega^*}{dt} = m_a^* - m_L^* \quad (2.34)$$

เมื่อ T_m คือ Mechanical Time Constant

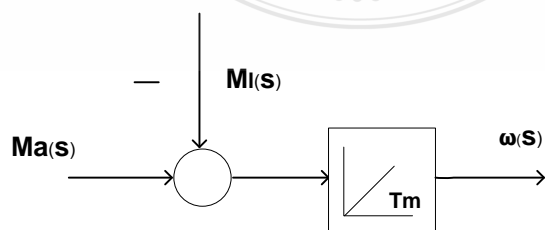
$$T_m = J \frac{\omega_o}{m_{sc}} U_a \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.22 เขียนในรูปของลาปลาซ

$$T_m S \omega^*(S) = M_a^*(S) - M_L^*(S)$$

$$\omega^*(S) = \frac{1}{T_m S} [M_a^*(S) - M_L^*(S)] \quad (2.36)$$

สมการที่ 2.36 แสดงด้วยภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 2.12 บล็อกความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับความเร็ว (Speed)

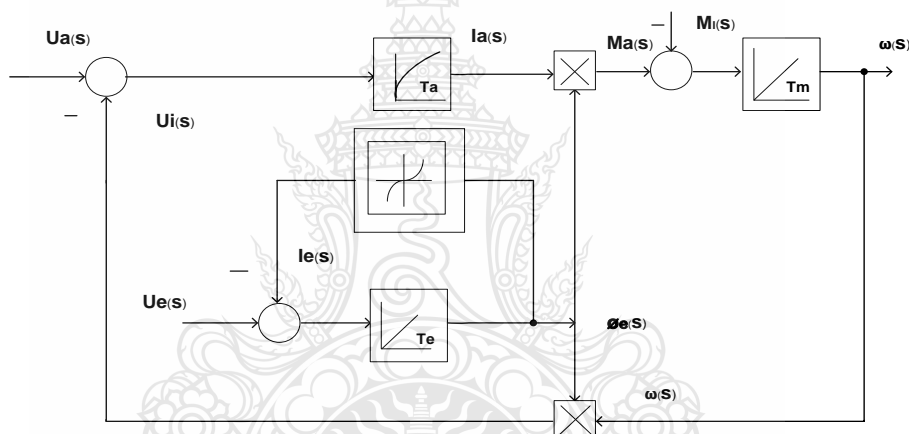
จากสมการที่ 2.12 ทหารด้วย $m_{sc} = K i_{eN} i_{sc} = m_o$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{m_a}{m_{sc}} &= \frac{K i_e i_a}{K i_{eN} i_{sc}} \\ \frac{m_a}{m_{sc}} &= \frac{i_e i_a}{i_{eN} i_{sc}} \\ M_a^* &= I_e^* I_a^* \end{aligned} \quad (2.37)$$

จากสมการที่ 2.37 เขียนในรูปของลาปลาซ จะได้

$$M_a^*(s) = I_e^*(s) I_a^*(s) \quad (2.38)$$

เมื่อพิจารณานำความสัมพันธ์ของสมการต่างๆ เข้าด้วยกันทำให้สามารถที่จะแสดงภาพบล็อกแบบไดนามิกส์ (Dynamic Block Diagram) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังภาพที่ 2.13



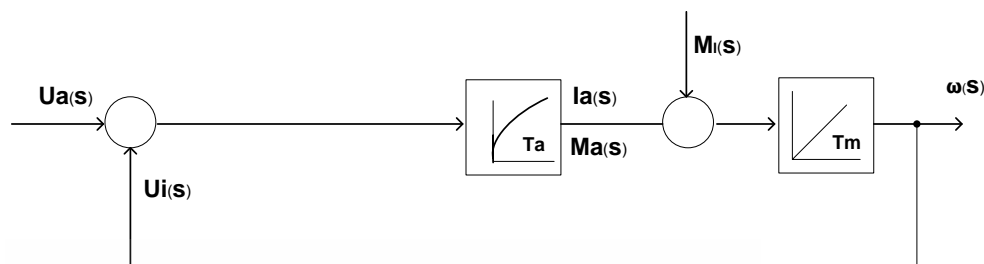
ภาพที่ 2.13 บล็อกไดนามิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสนามแม่เหล็กชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Machine) จะกำหนดให้ $i_e = i_{eN}$ นั่นเองดังนั้นจึงพบว่าจากสมการที่ 2.31 ก็จะได้ $\frac{i_e}{i_{eN}} = 1$ และ $\phi_e^* = 1$ นั่นคือ $I_e^*(s) = 1$

ดังนั้นจากสมการที่(2.38) จะได้

$$M_a^*(s) = I_a^*(s) \quad (2.39)$$

จึงสามารถเขียนบล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสนามแม่เหล็กชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Machine) ได้ใหม่ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 บล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากภาพที่ 2.14 สามารถหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function Equation) ของระบบได้คือ

$$\text{จาก } F(S) = \frac{W^*(s)}{U_a^*(s)}$$

เมื่อพิจารณาในสถานะที่ไม่มีภาระ (No-Load) ($M_L^* = 0$)

$$\text{เพราะฉะนั้น } F(S) = \frac{\frac{1}{T_s S + 1} \cdot \frac{1}{T_m S}}{1 + \frac{1}{T_s S + 1} \cdot \frac{1}{T_m S}}$$

$$\text{นั่นคือ } F(S) = \frac{1}{T_a T_m S^2 + T_m S + 1} \quad (2.40)$$

สำหรับสมการที่ 2.40 นี้ เป็นการเปรียบเทียบ $W^*(S)$ กับ $U_a^*(S)$ ซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ดังจะได้กล่าวต่อไป

2.2.2 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

คุณสมบัติของสถานะคงตัวโดยการที่อาร์เมเจอร์ และการควบคุมที่ขดสนามจากสมการที่ 2.23, 2.28 และ 2.34

$$T_a \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_{aN} \end{pmatrix} = \frac{u_a}{u_{aN}} - \frac{i_a}{i_{aN}} - \frac{\omega \phi_e}{\omega_o \phi_{eN}} \quad (2.41)$$

$$T_a \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_e \\ \phi_{eN} \end{pmatrix} = \frac{u_e}{u_{eN}} - \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \quad (2.42)$$

$$T_a \frac{d}{dt} \left(\frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \right) = \frac{i_a \cdot \phi_e}{i_{eN} \cdot \phi_{eN}} - \frac{m_L}{m_{sc}} \quad (2.43)$$

ในสภาวะคงตัวค่า u_a , u_e , m_L จะได้โดยนำสมการที่ 2.41-2.43 เท่ากับศูนย์

$$T_a \frac{d}{dt} \left(\frac{i_a}{i_{aN}} \right) = \frac{u_a}{u_{aN}} - \frac{i_a}{i_{aN}} - \frac{\omega \phi_e}{\omega_o \phi_{eN}} = 0 \quad (2.44)$$

$$T_a \frac{d}{dt} \left(\frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \right) = \frac{u_e}{u_{eN}} - \int \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} = 0 \quad (2.45)$$

$$T_m \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) = \frac{i_a \cdot \phi_e}{i_{eN} \cdot \phi_{eN}} - \frac{m_L}{m_{sc}} = 0 \quad (2.46)$$

ที่ normal flux $b = \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} < 1$ แล้วนำสมการที่ 2.46 แทนในสมการที่ 2.44

$$\frac{\omega}{\omega_o} = \frac{1u_a}{bu_{aN}} - \frac{1m_L}{b2m_{sc}} \quad (2.47)$$

$$\frac{i_a}{i_{aN}} = \frac{m_L}{m_{sc}} \quad (2.48)$$

ดังนั้นพฤติกรรมในสภาวะคงตัวของการควบคุมมอเตอร์เป็นดังนี้

$$\frac{\omega}{\omega_o} = \int 1 \frac{u_a}{u_{aN}} - \frac{m_L}{m_{sc}} \quad (2.49)$$

$$\frac{i_a}{i_{aN}} = \int \left(\frac{m_L}{m_{sc}} \right) \quad (2.50)$$

ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอาร์เมเจอร์และโหลด กระแสอาร์เมเจอร์จะเปลี่ยนแปลงตามโหลด ซึ่งลักษณะการควบคุมมอเตอร์จะกล่าวดังต่อไปนี้

1) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในย่านแรงบิดคงที่ (Armature

Voltage Control) การควบคุมที่อาร์เมเจอร์จะให้แรงดันที่ขลอลอดสนามคงที่นั่นคือให้ $b = \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} = 1$

ส่งผลให้ผลคูณของตัวคูณ $\frac{\phi_e}{\phi_{eN}}$ จากบล็อกในภาพที่ 9 หายไป ผลที่ได้คือ

$$\frac{\omega}{\omega_o} = \frac{u_a}{u_{aN}} - \frac{m_L}{m_{sc}} \quad (2.51)$$

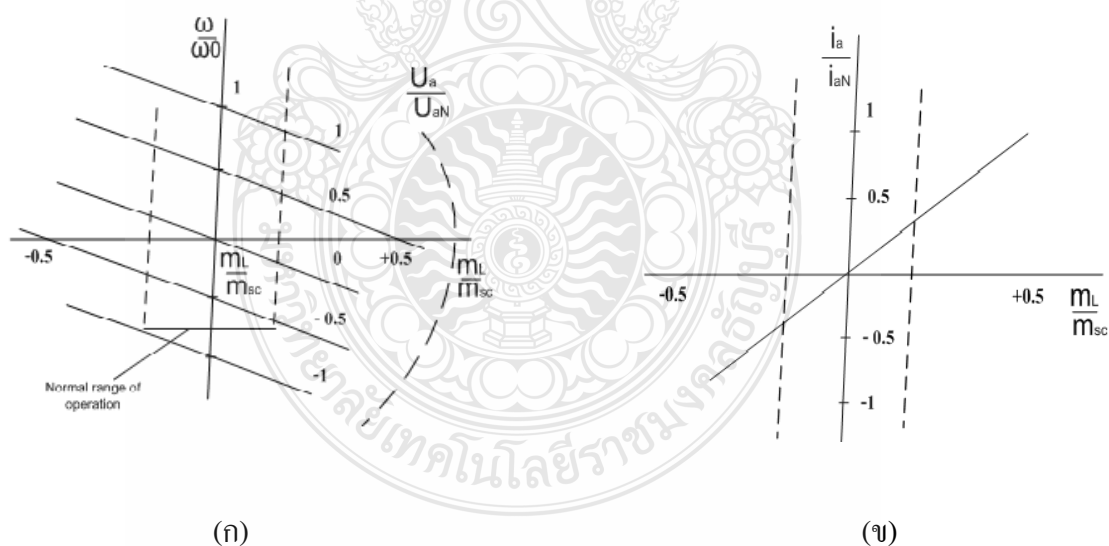
$$\frac{i_a}{i_{aN}} = \frac{m_L}{m_{sc}} \quad (2.52)$$

จากสมการทั้งสองเขียนออกมาเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งเป็นลักษณะเส้นตรงที่จะเห็นว่ากราฟของความเร็ว และแรงบิดนั้นสามารถควบคุมให้เป็นไปได้ถึง 4 ควอดแรนต์นั้นคือสามารถกลับทางของแรงบิดและความเร็วได้

เหตุที่สามารถควบคุมได้เนื่องจากว่าแรงดันอาร์เมเจอร์ U_a นั้นสามารถปรับได้ทั้งบวกและลบ และยังสามารปรับได้เต็มถึงค่าแรงดันพิกัด U_{aN} เท่านั้น นั่นคือการปรับค่า U_a จะปรับได้ในย่าน $-1 \leq U_{aN} \leq 1$ ดังภาพที่ 2.15 (ก) การป้อนแรงดัน อาร์เมเจอร์มากเกินไป จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสปาร์กขึ้นที่แปลงถ่าน ซึ่งอาจทำให้แปลงถ่านเกิดการอาร์กติดกันทำให้ลัดวงจรขดลวดได้ ส่วนกระแสอาร์เมเจอร์นี้จะป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิด โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันและความเร็ว เนื่องจากว่ากระแสอาร์เมเจอร์ I_{sc} และแรงบิด M_{sc} ที่มีค่า 8 – 10 เท่าของค่าพิกัดของกระแสและแรงบิด ดังนั้นย่านการทำงานปกติของกระแสและแรงบิดจะอยู่จำกัดอยู่ในย่าน

$$-0.2 \leq \frac{m_L}{m_{sc}} = \frac{i_a}{i_{aN}} \leq 0.2 \quad (2.53)$$

ดังภาพที่ 2.15 (ข) นั่นคือจะเกิดการ Over Load ได้ 2 เท่าของแรงบิดพิกัดส่วนที่นอกเหนือจากย่านดังกล่าว กราฟจะถูกจำกัดด้วย Armature Reaction และจะเกิดปัญหาทางด้าน Commutation ได้ ถ้าไม่มีขดลวดชดเชยพันอยู่



ภาพที่ 2.15 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมีการควบคุม

ที่อาร์เมเจอร์และ $\phi_e = \phi_{eN}$

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงบิด

2) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในย่านกำลังคงที่ (Field Weakening Control)

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอีกลักษณะหนึ่งคือ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์หลัก (Main flux , ϕ_e) แต่เนื่องจากว่าค่าของ ϕ_e ไม่สามารถที่จะเพิ่มให้เกิน ϕ_{eN} ได้เพราะจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการอิ่มตัว (Saturation) ของแกนเหล็กได้ ดังนั้นการควบคุม ϕ_e จะควบคุมไว้ระหว่าง

$$-1 \ll b = \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \ll 1 \quad (2.54)$$

ในกรณีที่มีการควบคุมที่อาร์เมเจอร์ ในลักษณะมอเตอร์หมุนได้ 2 ทิศทาง โดยการให้ u_a และ i_a เป็นไปได้ทั้งบวกและลบแล้วการควบคุมในขดสนามจะจำกัดอยู่ระหว่าง $b_{\min} \ll b \ll 1$ ก็เพียงพอ จุดประสงค์ในการควบคุมขดสนามก็เพื่อที่จะเพิ่มความเร็วมอเตอร์ให้มากขึ้นในขณะที่โหลดของมอเตอร์ลดลง เมื่อมีการเพิ่มแรงดันที่อาร์เมเจอร์ u_a อย่างเต็มที่ แล้วจากการควบคุมที่ขดสนามนี้ จะทำให้เขียนกราฟของความเร็วและแรงบิดชุดใหม่ที่ขึ้นอยู่กับตัวประกอบได้ตาม ภาพที่ 2.16 ซึ่งกราฟที่จะได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นกัน

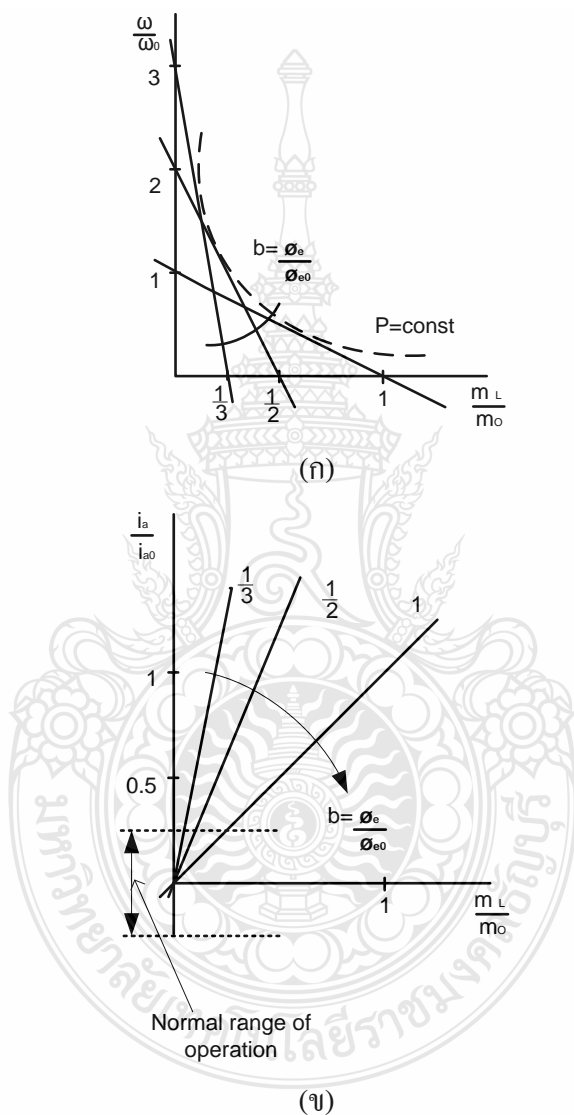
จากกราฟของความเร็วและแรงบิดภาพที่ 2.16 (ก) พิจารณาได้ดังนี้

$$\begin{array}{l} \text{ที่ no-load} \\ \text{StandStil} \end{array} \quad \begin{array}{l} : m_L = 0 \\ : \omega = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} : \frac{\omega_{nL}}{\omega_o} = \frac{1}{b} \\ : \frac{m_{st}}{m_{sc}} = b \end{array}$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การลดค่า b ลงจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันจะทำให้แรงบิดลดลง และลักษณะของกราฟจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะ $\frac{1}{b_2}$ ซึ่งนอกจากนี้จะเห็นได้ว่าถ้าให้ค่า b เป็นศูนย์ความเร็วของมอเตอร์จะสูงถึงค่าอนันต์ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในทางปฏิบัติค่า b ที่ต่ำสุดคือค่า b ที่ทำให้ความเร็วมอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความเร็วพิกัดเท่านั้น

ในภาพที่ 2.16 (ก) บ่งชี้ได้ว่าการลดค่า b ลง ณ ที่แรงบิดค่าคงที่ต่างๆ นั้นก็ไม่ได้ทำให้เกิดความเร็วสูงสุด (Higher speed) ที่เท่ากัน เนื่องจากการลดค่า b มีผลทำให้แรงบิดลดลงการที่จะทำให้แรงบิดคงที่ จะต้องเพิ่มค่ากระแสอาร์เมเจอร์แต่ถ้าให้แรงดันอาร์เมเจอร์มีค่าคงที่ดังนั้นก็ทำให้ความเร็วสูงสุดไม่เท่ากัน

ส่วนในภาพที่ 2.16 (ข) จะเห็นว่าถ้าให้หม้อเตอร์ทำงานที่แรงบิดคงที่แล้วมีการลดค่า b ลง ในขณะที่โหลดเท่ากันจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงการสูญเสียที่อาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการควบคุมที่ขดลวดสนามจะเกิดประโยชน์ในกรณีที่ต้องการลดแรงบิดลงเมื่อกำหนดให้แรงดันที่อาร์เมเจอร์คงที่ แต่ในกรณีที่มีการทำงานในย่านที่แรงดันอาร์เมเจอร์ยังไม่ถึงค่าพิกัดก็ไม่ควรที่จะทำการควบคุมที่ขดลวดสนาม เนื่องจากการสูญเสียจะมีมากนั่นเอง

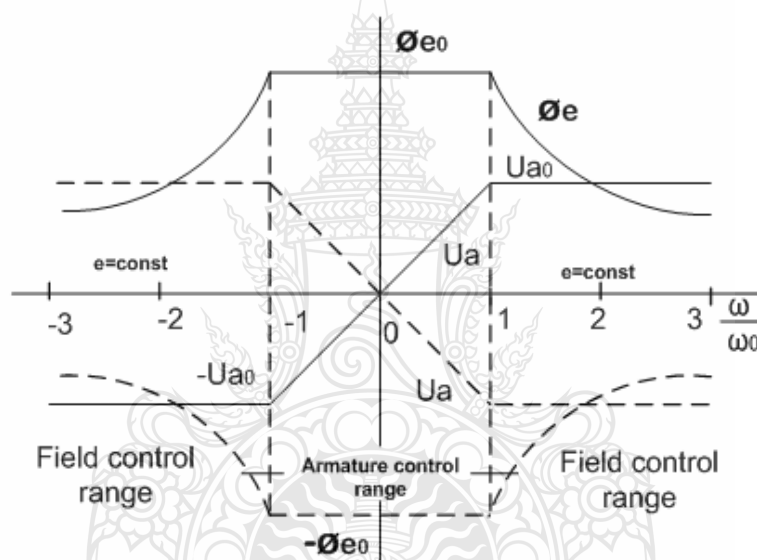


ภาพที่ 2.16 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงบิดสถานะคงตัวเมื่อมีการควบคุมที่ขดสนามและ $u_a = u_{aN}$

3) การควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้ง 2 รูป

เป็นการควบคุมเหนือไปจากย่านการใช้งานปกติ โดยที่ในการควบคุมความเร็วให้อยู่ในย่านความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ค่าของฟลักซ์หลักจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่อยู่ที่ค่า ϕ_{eN} ในขณะที่ความเร็วจะถูกเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันอาร์เมเจอร์ u_a การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า Base Speed หรือ Armature Control เมื่อมีการปรับแรงดันที่อาร์เมเจอร์จนถึงค่าพิกัด u_{aN} การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์จะเกิดขึ้นได้โดยการลดค่าของฟลักซ์หลัก ϕ_e ลง จะทำให้เพิ่มความเร็วขึ้นอีกได้เป็นสองเท่าของความเร็วพิกัด ดังนั้นการทำแบบนี้จึงต้องมีการแยกการควบคุมที่อาร์เมเจอร์และขดสนามออกจากกันผลที่ได้จากการควบคุมร่วมกันแสดงออกมาเป็นกราฟดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ย่านการควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะคงตัว

จากภาพที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าในการกลับทางหมุนและแรงบิดของมอเตอร์นั้นทำได้โดยการกลับขั้วของแรงดันที่อาร์เมเจอร์ และก็เป็นไปได้เช่นกันที่จะกลับทางหมุนของมอเตอร์โดยกลับที่ขั้วแรงดันอาร์เมเจอร์มาไว้คงเดิม แต่การกลับขั้วแรงดันที่ขดสนามแทน (ตามเส้นประในเวลาเดียวกัน โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขั้วของอาร์เมเจอร์)

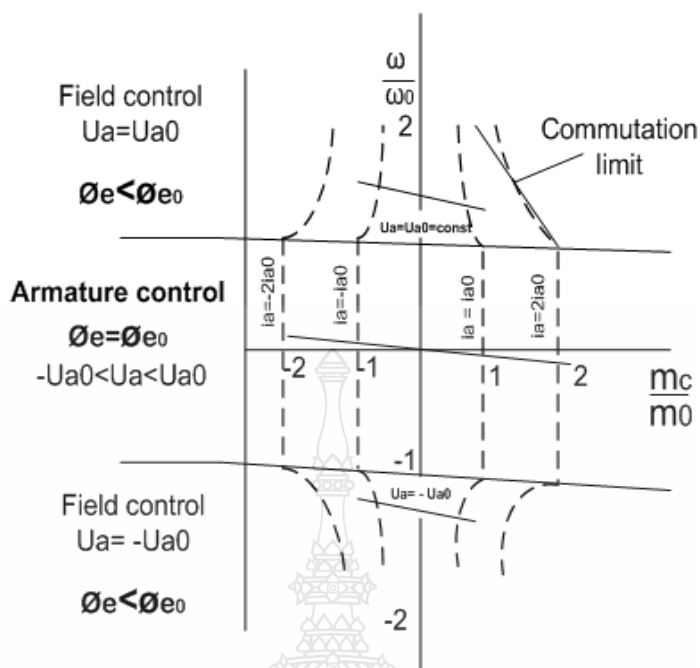
อย่างไรก็ตามวิธีการกลับขดสนาม (Field reverse) จะไม่นิยมใช้เพราะว่าในการกลับทางหมุนที่ขดสนามนั้นต้องที่การกลับทางของการกระตุ้นของขดสนาม ซึ่งกรณีที่มีมอเตอร์ตัวใหญ่มากมีพลังงานสะสมในขดสนามมากจึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการกระตุ้นกลับทางมากถ้าต้องการให้มี

การกลับทางเร็วโดยใช้วิธีการจ่ายแรงดันให้ขดสนามสูงๆ ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์มเจอร์สูงตามไปด้วยซึ่งจะเป็นอันตรายทำให้เกิดการ Commutation ได้ นอกจากนี้กระแสอาร์มเจอร์จะถูกกั้นไม่ให้ไหลในขณะที่มีการกลับทางหมุน นั่นคือแรงบิดจะเกิดการขัดจังหวะขึ้นในมอเตอร์ขนาดใหญ่ช่วงเวลาในการกลับทางและเวลาที่ทำให้เกิดแรงบิดมีค่าเป็นศูนย์นั้นอาจกินเวลาถึง 1 วินาที ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในการกลับทางหมุนที่ต้องการความเร็ว ดังนั้นการควบคุมในมอเตอร์ทำงานแบบ 4 ควอดแดรนต์ จึงนิยมทำให้แหล่งจ่ายที่ให้กับมอเตอร์เป็นไปได้ทั้งสองทางของแรงดันและกระแส ซึ่งจะทำให้เป็นข้อได้เปรียบกว่าการเปลี่ยนขั้วแรงดันขดสนาม

ในมอเตอร์ตัวเล็กๆ ใช้กำลังต่ำ การควบคุมที่อาร์มเจอร์ร่วมกับที่ขดสนามดังแสดงในภาพที่ 2.17 สามารถทำงานได้โดยการใช้ตัวต้านทานเป็นตัวปรับค่าแรงดันในมอเตอร์ขนาดใหญ่ๆ กินกระแสมาก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแหล่งจ่ายให้อาร์มเจอร์และขดสนามแยกออกจากกันโดยที่การควบคุมที่ขดสนามจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติด้วยอุปกรณ์ควบคุมของขดสนาม เพื่อปรับแรงดันที่จ่ายให้กับขดสนามซึ่งจะทำให้เป็นตัวจำกัดแรงดันที่อาร์มเจอร์ตามสมการ

$$\frac{u_i}{u_{aN}} = \frac{\omega}{\omega_o} = \frac{\phi_e}{\phi_{eN}} \ll 1 \quad (2.55)$$

ตามความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิดเมื่อมีการควบคุมที่อาร์มเจอร์ร่วมกับขดสนามแสดงดังภาพที่ 2.18 การควบคุมในย่านของอาร์มเจอร์จะทำให้กระแสอาร์มเจอร์มีค่าคงที่ i_a นั่นคือแรงบิดจะคงที่ด้วย ส่วนในย่านการควบคุมที่ขดสนามนั้นแรงบิดที่เกิดจาก i_a จะลดลง ทั้งนี้เพราะว่า $m \ll \phi_e$ i_a สำหรับเหตุผลที่คล้ายกันที่ U_a มีค่าคงที่ แรงบิดจะลดลงเมื่อฟลักซ์ลดลง ในส่วนบนด้านขวามือของกราฟในภาพที่ 2.18 การเกิด Commutation จะเป็นตัวจำกัดกระแสอาร์มเจอร์สูงสุดที่เกิดขึ้นได้ เมื่อการควบคุมที่ขดสนาม

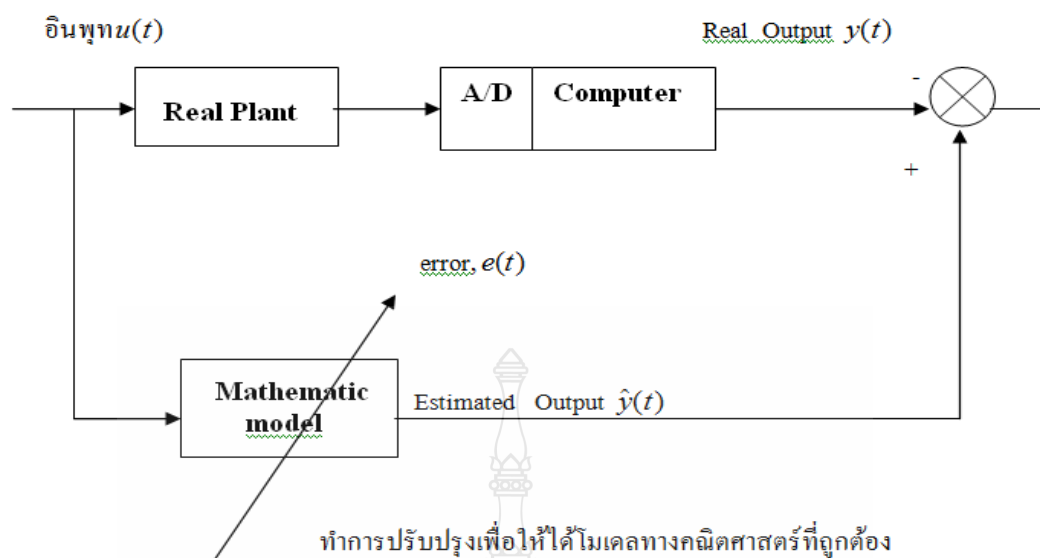


ภาพที่ 2.18 ย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในส่วนของความเร็วและแรงบิด

2.2.4 วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) [3,10]

วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เป็นเครื่องมือช่วยในการทดสอบหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบได้โดยการวัดค่า input & output ของระบบแล้วนำค่าข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญเพื่อใช้ในการหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบต่อไป โดยระบบที่สนใจที่จะใช้ศึกษาคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด Separately Excited แบบควบคุมอาร์เมเจอร์ (Armature Voltage Controlled) และแบบควบคุมแรงดันขดลวดสนาม (Shunt field Voltage Controlled) ในขณะมีโหลดและขณะที่ไม่มีโหลด

วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เป็นอีกหลักการหนึ่งที่สามารถใช้หาค่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยการอาศัยประมาณหาค่า parameter ที่เหมาะสมที่สุดจากการวัดและเก็บค่าข้อมูลจาก input และ output แล้วนำไปวิเคราะห์หาโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Computer



ภาพที่ 2.19 ค่าของความผิดพลาด (error) ระหว่าง output ของระบบจริง กับ output ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ ประมาณ (Estimate) ได้

โดยหลักการแล้วถ้าโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความถูกต้องหรือสมบูรณ์แบบค่าของความผิดพลาด (error) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่าง output ของระบบจริง กับ output ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ประมาณ (estimate) ได้ควรมีค่าน้อยที่สุด
ขั้นตอนของ System Identification มีดังต่อไปนี้

1) Construct the experiment and collect data

เริ่มต้นเราจะออกแบบการทดสอบที่เหมาะสมให้กับระบบเพื่อทำการเก็บค่าของ input และ output จากการทดลองมาเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประมาณหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์ควรเหมาะสมและถูกต้องก่อน โดยบางครั้งอาจต้องทำการกรองข้อมูล (Pre-filtering), เลือก Sampling interval ตลอดจนทำการเลือกช่วงของข้อมูล (Select range of data)

2) Choice of Model Structure

ในการเลือกโครงสร้างของ Model เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการทำวิธีการการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) นั้นอาจเป็นการยากที่จะตัดสินใจโดยเราจะเริ่มจากการตัดสินใจเลือกระหว่างโครงสร้างแบบ Ready-made model หรือ แบบ Tailor-made model โดยถ้าเราจะเลือกโครงสร้างแบบ Ready-made model ก็จะต้องตัดสินใจอีกว่าจะใช้รูปแบบ Model

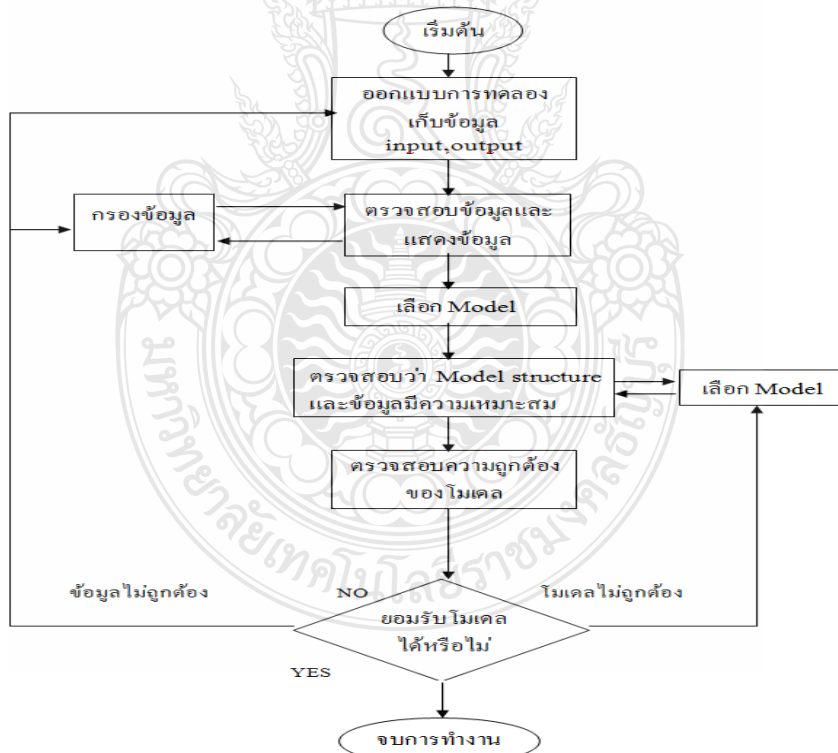
แบบ ARX, ARMAX, OE หรือ BJ หรือ แบบอื่นๆอีก จากนั้นก็จะต้องทำการเลือก order ให้กับ Model เหล่านั้น

3) System Identification Method

ทำการเลือก Identification Method (Criterion of fit) เพื่อประมาณค่า parameter เพื่อเอาไปแทนใน Model ที่เราเลือกไว้แล้ว โดยจะมีวิธีการหา เช่น LS,MI,PEM,IVM เป็นต้น

4) Model Validation

จาก Model ที่ประมาณค่า (estimate) มาได้จะต้องนำมาตรวจสอบความถูกต้องว่าสามารถยอมรับได้หรือไม่โดยใช้ข้อมูลชุดใหม่ (new data set or validation data) ซึ่งไม่เป็นข้อมูลเดียวกับข้อมูลที่ใช้ในการประมาณหา Model ในตอนแรก ถ้าหากพบว่า Model ยังไม่สามารถยอมรับได้ก็ให้กลับไปตรวจสอบว่าการเลือกโครงสร้างของ Model และการเก็บข้อมูลจากการทดลองมีข้อผิดพลาดหรือไม่ ถ้าพบว่ามีก็กลับไปเริ่มต้นออกแบบทำการทดลองใหม่ ซึ่งสรุปขั้นตอนของ System Identification เป็น Chart ได้ดังภาพที่ 2.20



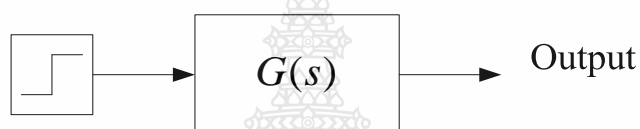
ภาพที่ 2.20 ลำดับขั้นตอนการทำงานของ System Identification

2.2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichole

วิธีการนี้ถูกคิดค้นโดย Zeigler และ Nichole พนักงานบริษัท Taylor Instruments ในปี 1942 ได้นำเสนอ 2 วิธี ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดี ประกอบด้วยวิธีที่ 1 เรียกว่า Reaction Curve Method และวิธีที่ 2 เรียกว่า Ultimate Sensitivity Method ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองวิธีนั้นไม่จำเป็นต้องทราบค่าแบบจำลองของระบบ การใช้งานเป็นดังนี้

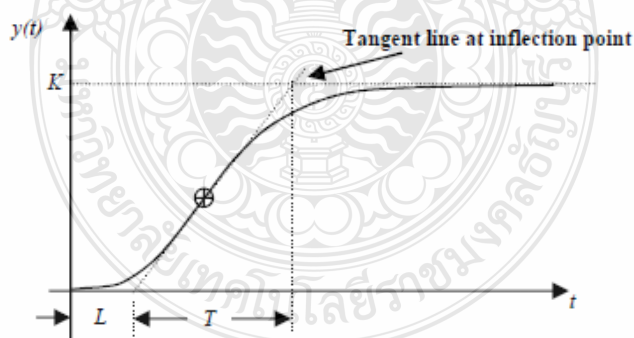
1) วิธีการที่ 1 Reaction Curve Method

ทำการจ่ายสัญญาณหนึ่งหน่วย (Unit-Step) ให้กับระบบที่สนใจแล้วดูผลตอบสนองของสัญญาณด้านออก แสดงดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 บล็อกไคอะแกรมฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด

สัญญาณเอาต์พุตจะต้องเป็นลักษณะ S-Curve จึงจะใช้วิธีการที่ 1 หาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมสัญญาณ S-Curve แสดงดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 สัญญาณ S-Curve และตัวแปรที่ใช้ในการหาค่า

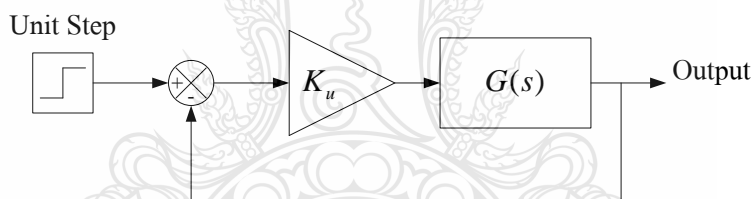
และใช้ค่าในตารางที่ 2.1 ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

ตารางที่ 2.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วย Ziegler-Nichole วิธีที่ 1

PID Type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2) วิธีการที่ 2 Ultimate Sensitivity Method

เมื่อทำการหาด้วยวิธีการที่ 1 ไม่ได้จะใช้วิธีการที่ 2 ในการหาค่าพารามิเตอร์ หลักการของวิธีการที่ 2 คือ ระบบจะต้องมีการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุต ดังแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 การต่อบล็อกไดอะแกรมวิธีที่ 2 ของ Ziegler-Nichole

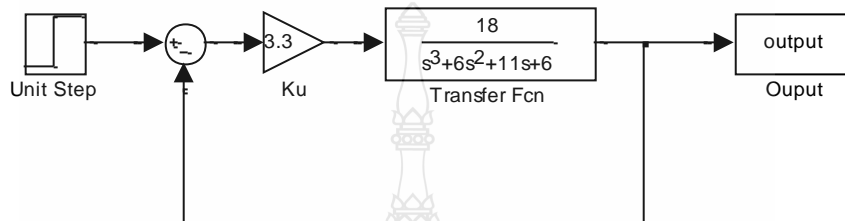
การวิเคราะห์วิธีการที่ 2 นั้นสามารถกระทำได้หลายวิธีเป้าหมายคือหาค่า K_u (Oscillate Factor) และ P_u (Oscillate Period) จากนั้นก็ใช้ตารางที่ 2.2 ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

ตารางที่ 2.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดี Ziegler-Nichole ด้วยวิธีที่ 2

PID Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	0
PID	$0.6K_u$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

โดยการนำเสนอในที่นี้จะใช้ 2 วิธีการคือ วิธีการแบบ Ultimate Sensitivity Method และ Routh Hurwitz Criterion

ตัวอย่างที่ 1 เมื่อระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{18}{(s+1)(s+2)(s+3)}$ ใช้วิธีการแบบ Ultimate Sensitivity Method ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอ เริ่มจากการสร้างบล็อกดังภาพที่ 2.24



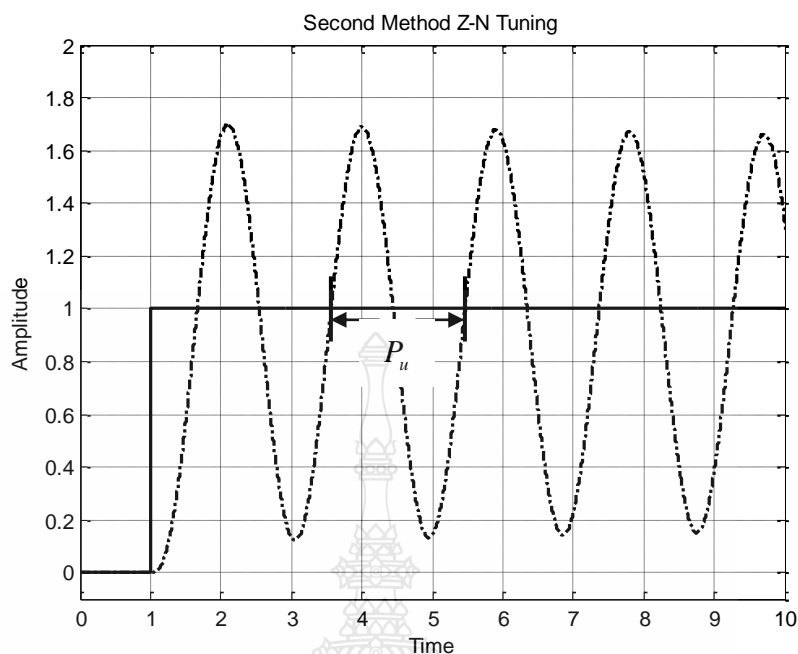
ภาพที่ 2.24 บล็อกสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของ ZN Tuning วิธีการที่ 2

ทำการเพิ่มค่าของเกน K_u จนระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) ดังภาพที่ 2.25 โดยค่าเกนที่ทำการปรับจนระบบเกิดการแกว่งอย่างสม่ำเสมออยู่ที่ $K_u = 3.3$ และค่าคาบเวลาของการแกว่ง $P_u = 1.90$ ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมพีไอที่ดีที่สุดที่ได้เป็นดังนี้

$$\text{ค่า } K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 3.3 = 1.98$$

$$\text{ค่า } K_i = \frac{K_p}{T_i} \text{ เมื่อ } T_i = \frac{P_u}{2} = \frac{1.9}{2} = 0.95 \text{ ดังนั้น } K_i = \frac{1.98}{0.95} = 2.1$$

$$\text{ค่า } K_d = \frac{K_p}{T_d} \text{ เมื่อ } T_d = \frac{P_u}{8} = \frac{1.9}{8} = 0.2375 \text{ ดังนั้น } K_d = 1.98 \times 0.2375 = 0.47$$



ภาพที่ 2.25 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการปรับค่าเกน k จนเกิดการแกว่งของระบบ

ตัวอย่างที่ 2 เมื่อระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{18}{(s+1)(s+2)(s+3)}$ ใช้วิธีการแบบ Routh

Hurwitz Criterion Method ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค การวิเคราะห์แบบเรย์ท์เซอร์วิช จะใช้ตารางเรย์ท์ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบ เพื่อทราบสมการคุณลักษณะ (Polynomial) ของระบบแบบวงปิด และค่าเกน K ดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบเมื่อเพิ่มเกน K เท่ากับ $G(s) = K \times \frac{18}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$

สมการคุณลักษณะของระบบได้จาก $1 + KG(s) = 0$

ดังนั้น สมการคุณลักษณะของระบบ $P(s) = s^3 + 6s^2 + 11s + 6 + K$ นำไปแทนตารางเรย์ท์ จะได้

	s^3	1	11	0
ตารางเรย์ท์	s^2	6	$6 + K$	0
	s^1	$60 - K$	0	0
	s^0	$6 + K$	0	0

จากตารางเรย์ท์จะได้ค่าเกน K_u เท่ากับ 60 และได้สมการช่วยดังนี้

สมการช่วย $6s^2 + 6 + 60 = 0$ ได้รากของสมการอยู่ที่ $\pm j3.32$ และ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ สูงสุดเท่ากับ 3.32 Rad/sec ดังนั้น จะได้คาบเวลาการแกว่งเท่ากับ $P_u = 1.89$ เมื่อทราบค่าเกน K_u และ P_u นำมาหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี โดยตารางที่ 2.3

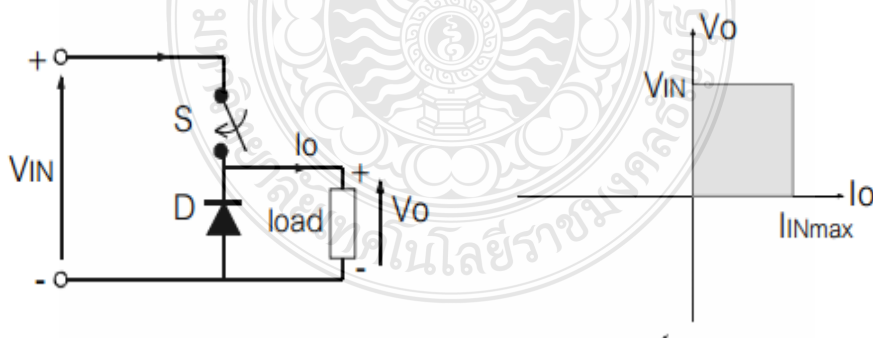
ค่าเกนพี $K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 60 = 36$

ค่าเกนไอ $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ เมื่อ $T_i = \frac{P_u}{2} = \frac{1.89}{2} = 0.945$ ดังนั้น $K_i = \frac{36}{0.945} = 38$

ค่าเกนดี $K_d = \frac{K_p}{T_d}$ เมื่อ $T_d = \frac{P_u}{8} = \frac{1.89}{8} = 0.24$ ดังนั้น $K_d = 36 \times 0.24 = 8.5$

2.2.6 วงจรช้อปเปอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [4,9]

วงจรนี้เป็นวงจรในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยรับสัญญาณ CCP (Capture compare pulse with modulation) หรือสัญญาณเปรียบเทียบ PWM ด้วยวิธีการใช้ PWM ขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยความถี่สูงให้มีการเปิดปิดตลอดเวลา โดยวงจรช้อปเปอร์จะแบ่งเป็น 5 ชนิด ได้แก่ วงจรช้อปเปอร์คลาสเอ วงจรช้อปเปอร์คลาสบี วงจรช้อปเปอร์คลาสซี วงจรช้อปเปอร์คลาสดี และวงจรช้อปเปอร์คลาสอี ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกใช้วงจรช้อปเปอร์คลาสเอ ซึ่งควบคุมง่าย และวงจรไม่ยุ่งยากซับซ้อนอีกทั้งใช้อุปกรณ์น้อยที่สุดในบันไดคลาสต่างๆ โดยมีลักษณะวงจรแสดงดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 วงจรช้อปเปอร์คลาสเอ

ลักษณะการเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรสับขั้นพื้นฐานในรูปสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ

1) Ton เปลี่ยนแปลง และ Toff เปลี่ยนแปลง แต่ T คงที่ เรียกการทำงานลักษณะนี้ว่าวิธีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation) แรงดันที่โหลดจะลดลงเมื่อ Ton น้อยลง

2) Ton คงที่ และ Toff เปลี่ยนแปลง แต่ T เปลี่ยนแปลง เรียกการทำงานลักษณะเช่นนี้ว่าวิธีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency modulation)

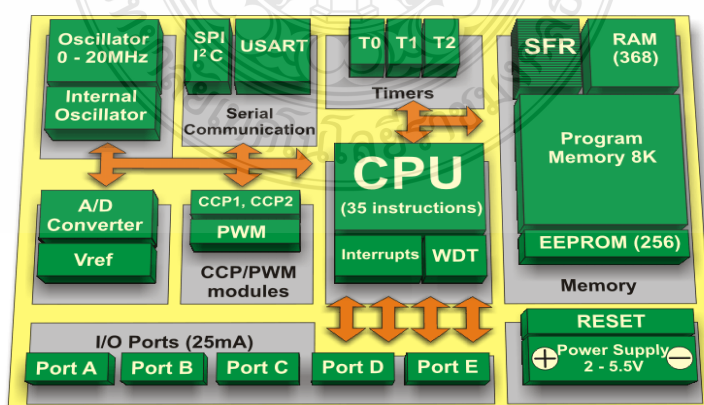
3) เป็นลักษณะการทำงานของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ และการเปลี่ยนแปลงความถี่

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [3,7]

คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์โดย ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน

2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนสามารถนำมาใช้งานในการควบคุมได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ครบครัน อีกทั้งยังง่ายต่อผู้ที่เริ่มเรียน คือสามารถที่จะเรียนรู้ได้ง่ายและสามารถนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูง ราคาถูก เป็นที่นิยม และมีให้เลือกมากมายหลายเบอร์ มีโครงสร้างเช่นเดียวกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ยี่ห้ออื่นโดยทั่วไป ซึ่งส่วนประกอบของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

1) หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานหรือประมวลผล ตามชุดของคำสั่งเครื่อง จากซอฟต์แวร์ คำนี้เริ่มใช้ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ต้นศตวรรษ 1960 หน่วยประมวลผล เปรียบเสมือนเป็นสมองของคอมพิวเตอร์ ในการทำหน้าที่ตัดสินใจหรือคำนวณจากคำสั่งที่ได้รับมา เช่น การเปรียบเทียบ การกระทำการทางคณิตศาสตร์ ฯลฯ โดยมีกระบวนการพื้นฐานคือ

- อ่านชุดคำสั่ง (fetch)
- ตีความชุดคำสั่ง (decode)
- ประมวลผลชุดคำสั่ง (execute)
- อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ (memory)
- เขียนข้อมูล/ส่งผลการประมวลกลับ (write back)

2) หน่วยความจำ (Memory)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บ โปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานทศในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3) ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port)

มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิตช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุต เพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4) ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)

คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียูหน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณ จำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus) บัสข้อมูลเป็นสายสัญญาณที่บรรจุข้อมูล เพื่อการประมวลผลทั้งหมด ขนาดของบัสจะขึ้นอยู่กับความสามารถการประมวลผล

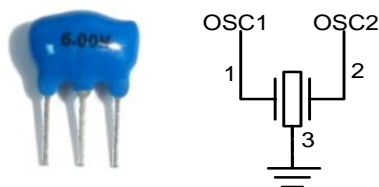
ของซีพียู สำหรับในงานทั่วๆ ไป ขนาดของบัสข้อมูลจะเป็น 8 บิต และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาจนถึง 16,32 และ 64 บิต บัสแอดเดรสเป็นสายสัญญาณที่บรรจุค่าตำแหน่งของหน่วยความจำ โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนั้น ซีพียู ต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน ดังนั้นจำนวนสายสัญญาณของแอดเดรสจึงต้องมีจำนวนมาก ยิ่งมากเท่าไร ก็จะเป็นการแสดง ขนาดของหน่วยความจำที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อกับได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก จำนวนแอดเดรสของหน่วยความจำ = 2 ยกกำลัง n (n คือจำนวนของเส้นทาง) ยกตัวอย่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งมีสายแอดเดรส 10 เส้น ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้ สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ 2 ยกกำลัง 10 = 1,024 ตำแหน่ง หากต้องการทราบความจุของหน่วยความจำจริงๆ จะต้องทราบถึงขนาดของบัสข้อมูลก่อนว่าเป็นเท่าใด หากเป็น 8 บิต ความจุของหน่วยความจำที่มีสายแอดเดรส 10 เส้น จะเท่ากับ $8 \times 1,024 = 8,192$ บิต และ 1 กิโลไบต์ เท่ากับ 1,024 ไบต์ ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว จึงมีความจุของหน่วยความจำเท่ากับ 8,192 บิต หรือ 1,024 ไบต์ หรือ 1 กิโลไบต์บัสควบคุมเป็นกลุ่มของสายสัญญาณควบคุมการติดต่อทั้งหมดของซีพียูกับหน่วยความจำและพอร์ต สำหรับสายสัญญาณเลือกควบคุมหลักได้แก่ สายสัญญาณเลือก-อ่าน-เขียนหน่วยความจำ สายสัญญาณเลือก-อ่าน-เขียนข้อมูลกับพอร์ต

5) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock)

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

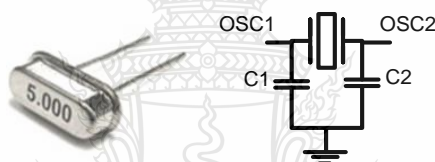
PIC สามารถเลือกใช้ออสซิลเลเตอร์ภายในหรือภายนอกได้ สำหรับออสซิลเลเตอร์ภายในจะเป็นประเภท RC ออสซิลเลเตอร์ซึ่งมีความถี่คงที่ 4 MHz ที่แรงดัน 5 โวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยวงจรออสซิลเลเตอร์ประเภท RC ออสซิลเลเตอร์ ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่ถ้าเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ภายนอก ความถี่จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อ วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาหรือวงจรออสซิลเลเตอร์ภายนอกมี 3 แบบดังนี้

แบบที่ 1 สร้างเซรามิกเรโซเนเตอร์ (Ceramic Resonators) เหมาะสำหรับงานที่ใช้ความถี่ไม่สูงมากนัก เพราะราคาถูกเมื่อเทียบกับออสซิลเลเตอร์ประเภทอื่น โดยการต่อใช้งาน ขากลางจะเป็นขากราวด์ (Ground: GND) ส่วนอีกสองขาต่อเข้ากับ CLKIN และ CLKOUT ของ PIC



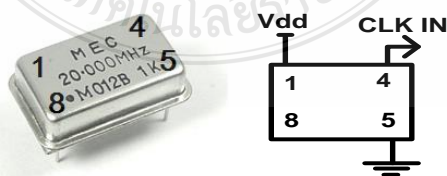
ภาพที่ 2.8 เซรามิกรีโซเนเตอร์และการต่อใช้งาน

แบบที่ 2 สร้างจากผลึกแร่คริสตอล (Quartz Crystal Oscillator) ใช้ตัวคริสตอลกำเนิดสัญญาณความถี่กำลังต่ำออกมา โดยจะต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) ลงกราวด์ (GND) ทั้ง 2 ขา และทั้งสองขาต่อเข้ากับขา OSC1/CLKIN และ OSC/CLKOUT ของ PIC ซึ่งคริสตอลจะมีราคาแพงกว่าเซรามิกเรโซเนเตอร์ แต่จะให้ความถี่ที่มีความเที่ยงตรงมากกว่า



ภาพที่ 2.29 คริสตอลรีโซเนเตอร์

แบบที่ 3 สร้างวงจรกำเนิดความถี่สี่เหลี่ยม (Crystal Square-wave Oscillator) ซึ่งจะมีคริสตอลและวงจรอยู่ในตัว ทำให้ความถี่ที่ออกมามีความเที่ยงตรงมาก แต่ราคาแพง โดยการต่อเข้ากับ PIC ดังนี้ ขา 1 ต่อเข้ากับไฟ 5 โวลต์ ขา 5 ต่อ กราวด์ (GND) ขา 4 ต่อเข้ากับ CLKIN ของ PIC ขา 8 ไม่ต่อ และขา CLKOUT ของ PIC ก็ไม่ต่อเช่นกัน



ภาพที่ 2.30 โครงสร้างขาของ Crystal Square-wave

ในภาพที่ 2.30 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จะเป็นการใช้ตัวคริสตอลต่อกับตัวเก็บประจุลงกราวด์ทั้งสองขา และทั้ง 2 ขาของคริสตอลต่อเข้ากับขา OSC1/CLKOUT ของ PIC สำหรับการเลือกใช้ความถี่ของคริสตอลจะมีผลต่อโหมดของสัญญาณนาฬิกาในการเขียนโปรแกรม แสดงดัง ตารางที่ 2.1 โดยมีโหมดต่างๆ ดังนี้

โหมด LP (Low Power Crystal) ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 32 kHz ถึง 100 kHz

โหมด XT (Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ถึง 4 MHz

โหมด HS0 (High Speed Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ 8 MHz ถึง 16 MHz

โหมด HS (High Speed Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ 4 MHz ถึง 20 MHz

โหมด RC (External Resistor/Capacitor) มี 2 โหมด สามารถกำหนดความถี่ได้จากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

2.4 การ์ดอินเทอร์เฟซ DSPACE, DS1104 [1,5]

ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในงานควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น ระบบควบคุมในรถยนต์ ระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ และระบบควบคุมหุ่นยนต์ เป็นต้น แต่การเขียนโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ระบบ รวมทั้งการทำให้คอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมต่อและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ได้นั้น ผู้ที่ทำการเขียนโปรแกรมต้องมีความรู้ทั้งทางด้านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ของคอมพิวเตอร์เป็นอย่างดี อีกทั้งการเขียนซอฟต์แวร์ยังเป็นลักษณะการเขียนฮาร์ดโค้ด ทำให้การนำคอมพิวเตอร์มาควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลาในการออกแบบนาน ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เรียกว่า MATLAB/SIMULINK ขึ้นมา โดยใช้ลักษณะการเขียนโปรแกรมร่วมกันระหว่างฮาร์ดโค้ดและบล็อกไดอะแกรม เพื่อช่วยลดปัญหาการเขียนโปรแกรมแบบเดิมลงได้มาก อีกทั้งยังสามารถนำบล็อกไดอะแกรมที่สร้างขึ้นมานำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงทำให้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและเพื่อการศึกษา



ก) ตัวควบคุม dSPACE DS1104



ข) R&D Controller Board

ภาพที่ 2.31 อุปกรณ์ควบคุม dSPACE

รูปแบบการใช้งาน Real – Time Interface (RTI) เป็นซอฟต์แวร์ที่จากบริษัท dSPACE เป็นผู้ผลิตและพัฒนาเพื่อให้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถสั่งงานการควบคุมที่ผลิตโดย dSPACE ได้แบบเวลาจริง (Real Time) ในการใช้งานนั้นผู้ใช้งานจะต้องมีการควบคุมที่ผลิตโดย dSPACE ติดตั้งอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ RTI ที่มีให้มาในคอมพิวเตอร์ หลังจากติดตั้งแล้วจะพบว่า Simulink Library Brower ของการ์ดที่ติดตั้งปรากฏอยู่ ตัวอย่างของการ์ดรุ่น DS1104 R&D Controller Broad ดังแสดงในภาพที่ 2.7

RTI สามารถกำหนดการควบคุมแบบเวลาจริง (Real Time) โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการสร้างโปรแกรมและสั่งการควบคุมดังกล่าว ซึ่งการควบคุมของ dSPACE จะมีซอฟต์แวร์เสริมชื่อ “Control Desk” ที่มีความโดดเด่นในการสร้าง GUI เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงค่าของ ตัวแปรต่าง ๆ ได้ทันทีที่โปรแกรมทำงาน

2.5 โปรแกรม MATLAB/SIMULINK [6]

2.5.1 MATLAB คือโปรแกรมที่รวบรวมไว้สำหรับการคำนวณที่เป็นตัวเลขซึ่งใช้ในการทำงานร่วมกับเมทริกซ์โดยจะรวมเป็นอินเตอร์เฟซสำหรับผู้ที่มีประสิทธิภาพกับกราฟิก ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ รวมทั้งไลบรารีที่ครอบคลุมเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรม MATLAB ไม่ได้จำกัดแต่การเขียนโปรแกรมเท่านั้นแต่ยังช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์และมองเห็นภาพข้อมูล พร้อมทั้งพัฒนาอัลกอริธึมที่มีประสิทธิภาพในการทำงานอีกด้วย

2.5.2 SIMULINK คือ โปรแกรมแบบตอบกลับที่รวมเข้าไว้ใน Matlab เพื่อใช้ในการสร้างโมเดลการวิเคราะห์และการจำลอง ซึ่งมีการติดต่อกับผู้ใช้งานแบบกราฟิกรูปบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองนั้น ๆ ด้วยวิธีการลากและปล่อยบล็อกไดอะแกรมลงในพื้นที่ที่มีการจำลองสร้างขึ้น คุณลักษณะขั้นสูงของ SIMULINK จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการดำเนินงานระบบย่อย ถ้ามีการเลือกกรณีของระบบย่อยและในขณะที่ระบบย่อยทำงานซ้ำจะได้ข้อมูลและสัญญาณที่เหมาะสมกับการออกแบบของตัวควบคุมที่ซับซ้อน

บล็อกไลบรารีขนาดใหญ่ของ SIMULINK ได้รับการปรับปรุงโดย dSPACE โดยเฉพาะการสนับสนุนอุปกรณ์ I/O (Input/Output) โดยสามารถใช้บล็อกไดอะแกรมเหล่านี้เพื่อสร้างการตั้งค่าการทดลองแบบเรียลไทม์ได้ทั้งหมด รวมทั้ง I/O และการเตรียมใช้งาน โดยที่ไม่ต้องมีการเขียนโค้ดโปรแกรมดังกล่าว

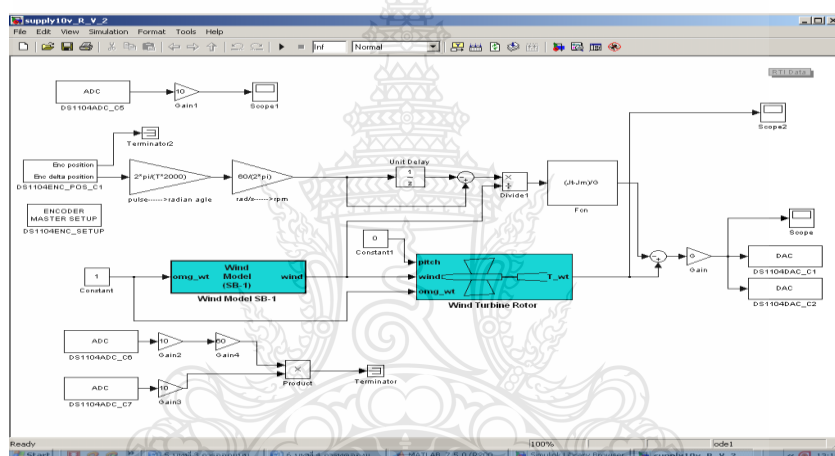
2.5.3 Control Desk คือโปรแกรมที่ใช้ในการสร้าง วิเคราะห์ แล้วทำการจำลองการทำงานของแบบจำลองบล็อกไดอะแกรม ซึ่งเป็นงานที่ซับซ้อน โดยสามารถแก้ไขได้ด้วยโปรแกรม

MATLAB/SIMULINK ด้วยการสนับสนุนของบล็อกไลบรารีที่มีมากมาย โดยเฉพาะการเลือกใช้บล็อกไลบรารีของ dSPACE สำหรับสนับสนุนอุปกรณ์ I/O

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ มีการใช้งานโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับ dSPACE โดยเชื่อมต่อการทำงานและควบคุมโดย โปรแกรม Control Desk ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดผ่านฟังก์ชันบล็อกของกังหันลมต่อไป

2.5.4 ฟังก์ชันบล็อกของกังหันลม

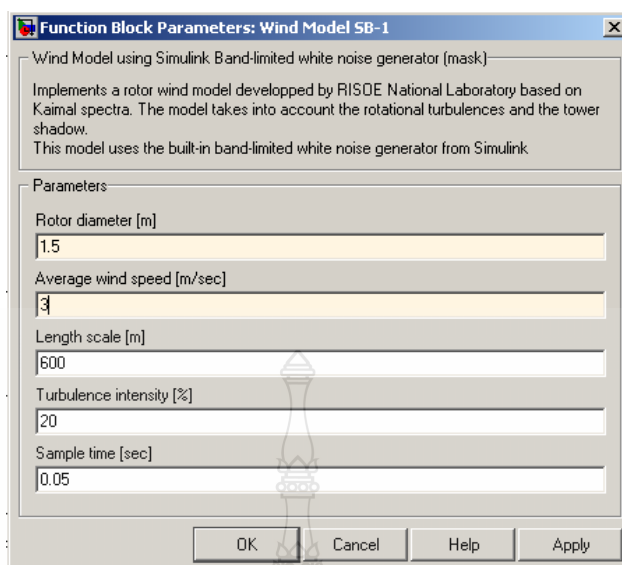
โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถทำการทดลองได้ เพียงแต่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม ที่ได้ออกแบบมาแล้วโดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลอง ในตัวแบบจำลองของแต่ละส่วน



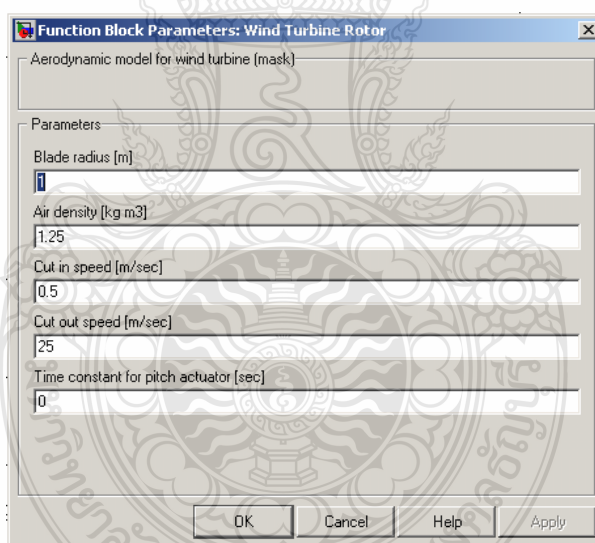
ภาพที่ 2.32 การทดสอบระบบของเครื่องกังหันจำลองกังหันลมในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจากทฤษฎี สามารถจะใช้ตัวแปรในการกำหนดค่าต่างๆ ได้เช่น ค่าความเร็วลม (Wind Speed), ขนาดของใบพัด (Blade Radius), พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด (Rotor Diameter) ในช่องใส่พารามิเตอร์ได้เลย ซึ่งมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ค่าความเร็วลมเฉลี่ย 3 m/s - ขนาดความยาวของ 1 ใบพัด 1.5 m
- พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด 3 m² - ความหนาแน่นของอากาศ 1.25 kg/m³



ภาพที่ 2.33 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม



ภาพที่ 2.34 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกังหันลม

เมื่อเรียบร้อยแล้วในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลอง (Simulation) เพื่อดูสัญญาณที่ได้แรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ แล้วจึงทำการทดสอบจากสัญญาณที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีจริงหรือไม่

2.6 สรุป

จากการศึกษาภาคทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ต้นตลอดจนหลักการที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย ทำให้เกิดแนวคิดในการดำเนินการ ตลอดจนการออกแบบในส่วนต่างๆ ของการจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง ทั้งในส่วนของการจำลองการทำงานและในส่วนการเชื่อมต่อกับระบบประมวลผล เข้าสู่การแสดงผลการทำงานจริง เพื่อทำการทดสอบให้เป็นไปตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองการทำงานสู่การเก็บผลการทดสอบให้ได้ผลตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ สามารถควบคุมพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด และมีค่าความแม่นยำในการควบคุม ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชาญฤทธิ์ ชาราสันติสุข,บุญช่วย เจริญผลและนพรัตน์ ม่วงคุ้ม (2553) ได้ทำการวิจัยเรื่อง “เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104” ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ดDS1104 โดยอินเตอร์เฟสการ์ดDS1104ใช้ควบคู่กับโปรแกรม Matlab/Simulink ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ผ่านหน้าต่างของตัว Graphic User Interface (GUI) ในการทดลองการทำงานจะทำการทดลองปรับความเร็วลมเฉลี่ย, ค่าความกว้างของรัศมีของใบพัด โครงการนี้ได้นำเทคโนโลยีของการ์ดควบคุมแบบเวลาจริงมาใช้ในการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ดDS1104

ประไพ จักขุจินดา (2552) ได้ทำงานวิจัยเรื่อง “แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้า” งานวิจัยนี้มีเป็นการสร้างแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้า และศึกษาข้อมูลทางเทคนิคและหลักการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์โบลเออร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm หมุน 2880 rpm เป็นต้นกำเนิดของลมเป่าไปยังกังหันลมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีแม่เหล็กทรงกระบอก กลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ความเข้มสนามแม่เหล็ก 70 mT และมีใบพัดลมจำนวน 7 ใบ เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมดเป็น 74 mm สวมติดกับแกนกลางของกังหันลมหมุนติดกับขดลวดทองแดงเบอร์40 จำนวน 550 รอบ พบว่า เมื่อวางกังหันลมผลิตไฟฟ้าห่างจากต้นกำเนิดของลมประมาณ 8 cm มีอัตราเร็วลม 7.14 m/s ทำให้กังหันลมหมุน 855 rpm และแม่เหล็กหมุนตัดขดลวดจะเกิดไฟฟ้า

กระแสสลับมีความต่างศักย์ 4.9 V และ กระแสสลับ 17.52 mA ส่งไปยังวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีความต่างศักย์ 3.60 V และกระแสตรง 14.90 mA ทำให้ยังหลอด LED จำนวน 7 หลอดสว่าง แบบจำลองกึ่งहनผลผลิตไฟฟ้านี้มีประสิทธิภาพประมาณ 9% และสามารถนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับนาฬิกาเครื่องคิดเลข วิทยุ ไฟฉายที่ใช้หลอด LED และอื่นๆ ที่สามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้

จิรายุทธ แก้วอาสา, ประมวลูย คงสาคร, สุชาติ โพธิ์ศรี, และชัยณรงค์ เย็นศิริ (2549) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง “ชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิดบนจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic” โดยได้กล่าวถึงการสร้างและหาคุณภาพของชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิดบนจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic เพื่อใช้เป็นชุดสาธิตประกอบการสอนในวิชาไมโครคอนโทรลเลอร์ ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) โดยอาศัยหลักทฤษฎีการคำนวณลูปปิดแบบ PI Control ด้วยโปรแกรม Visual Basic และการรับส่งข้อมูลควบคุมโดยใช้ PIC Microcontroller เทคนิคการควบคุมลูปปิดแบบ Close Loop P-I Control คือ ประมวลผลการทำงานด้วยโปรแกรม Visual Basic ที่คอมพิวเตอร์ ส่งค่าสัญญาณควบคุมให้กับ Microcontroller ที่เขียนด้วยภาษาซี (PIC C Compiler) สื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม และแปลงให้เป็นสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ส่งค่าไปควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ H-Bridge MOSFET Control Board และสัญญาณป้อนกลับ ใช้ Incremental Encoder ตรวจวัดความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ออกมาเป็นความถี่และแปลงเป็นแรงดัน 0-5 Vdc ด้วยวงจร F to V (Frequency Convert to Voltages) และส่งข้อมูลเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมในคอมพิวเตอร์ผลการทดสอบ พบว่า ขณะที่มอเตอร์ขับโหลดเต็มที่ ความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับ ความเร็วควบคุมที่คอมพิวเตอร์ ความแตกต่างเฉลี่ยที่ 1.008 เปอร์เซ็นต์ และผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ด้านคือสื่อการสอนโปรแกรม และเนื้อหาจำนวน 10 ท่าน พบว่าผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นต่อชุด สาธิต สอดคล้องกัน อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ($x = 4.28, SD = 0.14$) แสดงว่าชุดสาธิตนี้สามารถนำไปประกอบการเรียนการสอนหัวข้อการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้เป็นอย่างดี

นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์ (2547) ได้เขียนบทความวิจัยเรื่องเทคโนโลยีพลังงานลม ลงในวารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร สรุปความว่า บทความนี้ได้นำเสนอวิวัฒนาการกว่า 100 ปี ของเทคโนโลยีพลังงานลมนับจากอดีตถึงปัจจุบันศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทย

ทฤษฎีพลังงานลม ส่วนประกอบหลัก จุดเด่นจุดด้อย และผลกระทบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบต่างๆ การที่จะให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าเข้ามาทดแทนการผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันทั้งหมดคงเป็นไปได้ เพราะในอนาคตรูปแบบการใช้พลังงานจะหลากหลายมากขึ้น การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะลดลงเนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สัดส่วนการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานมวลชีวภาพ และพลังงานลมจะสูงขึ้น ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีอัตราเร็วของลมไม่สูงนัก แต่ก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในระดับกิโลวัตต์ได้ ถ้าเริ่มวิจัยและพัฒนาตั้งแต่วันนี้ ในอนาคตประเทศไทยจะมีเทคโนโลยีพลังงานลมเป็นของตัวเอง ไม่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมดเหมือนเช่นเทคโนโลยีอื่นๆ อย่างในปัจจุบัน

ปรีชญ์ พรหมรักษ์ และคณะ (2549) ได้ทำวิจัยเรื่อง การปรับปรุงและพัฒนาระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผลการวิจัยกล่าวว่า เมื่อ 8 ปีที่แล้ว การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมไม่คุ้มกับการลงทุน แต่ในปัจจุบันบริษัทยักษ์ใหญ่ทางด้านพลังงานของโลกเริ่มหันมาลงทุนในธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากลมกันอย่างมากมาย ประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมทั้งประเทศประมาณ 18,000 MW ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแก๊สธรรมชาติถึง 2 ใน 3 หรือกว่า 12,000 MW เป็นไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ 2,800 MW นอกจากนั้น เป็นพลังงานในรูปแบบอื่นๆ เช่น พลังงานมวลชีวภาพ และพลังงานแสงอาทิตย์โดยประเทศไทยนำเข้าพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งในรูปแบบของน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติและ ถ่านหิน รวมสูงถึง 50 ล้านตันต่อปี ประเทศไทยมีการทดลองใช้พลังงานลมที่สถานีทดลองไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานลม จ. ภูเก็ต ด้วยกำลังการผลิตเพียง 200 kW ประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังในเรื่องของการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ในขณะที่ประเทศในทวีปยุโรป อเมริกา และแม้กระทั่งจีนกับอินเดียได้ทำการวิจัยและพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และเราน่าจะสามารถทำได้เองโดยไม่ต้องง้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศ เหมือนอย่างเช่นอินเดียและจีน ซึ่งผลิตกังหันลมผลิตไฟฟ้าใช้ได้เอง ในขณะที่ระบบของพลังงานแสงอาทิตย์มีราคาสูง พลังงานลมจึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจากธรรมชาติซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มีวันหมด ที่น่าจะทำให้เป็นจริงในเชิงธุรกิจได้มากที่สุด และจะช่วยให้เราสามารถพึ่งตนเอง

เดช ดำรงค์ศักดิ์ และ ขงยศ วุฑฒิโกวิท (2547) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการวิจัยกล่าวว่า อัตราเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่สำนักงานเขตนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่าสะเมิง อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่มีค่า 4.1 m/s ซึ่งสูงกว่า 3 m/s

เป็นอัตราเร็วลมเริ่มต้นที่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้ และมีอัตราเร็วลมกรรโชกสูงสุด 25 m/s โดยระบบกังหันลมจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 507,264 หน่วยต่อปี เมื่อหันกังหันไปรับลมที่มาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

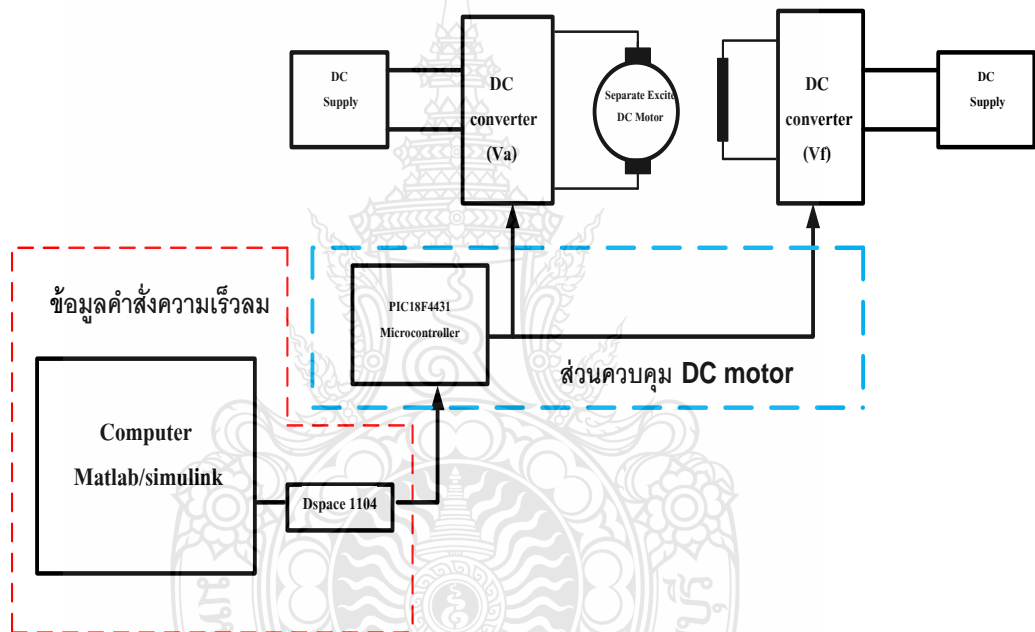
วิกันดา ศรีเดช (2551) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การกำหนดลักษณะใบกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุด ในสภาวะลมเฉพาะพื้นที่ ผลการวิจัยกล่าวว่า กังหันลมมักจะถูกออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานลมที่อัตราเร็วค่าหนึ่งไปเป็นพลังงานกลให้ได้มากที่สุด โดยคำนึงถึงตัวแปรออกแบบ (Design variable) หลายตัว เช่น ขนาดใบ อัตราเร็วรอบ ความสอบ (Taper) มุมบิดใบ (Twist angle) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) และมุมเฟิน (Pitch angle) มุมเฟินที่กำหนดเป็นสิ่งสำคัญยิ่งเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมปะทะ (Angle of attack) ที่ใบกังหันกระทำต่อลม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นมุมเฟินที่ดีที่สุดในแต่ละพื้นที่หรือภูมิประเทศย่อมแตกต่างกันแม้ว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยจะเท่ากันก็ตาม เพราะสภาวะลมในแต่ละพื้นที่จะมีความเบ้ต่างกัน ทำให้อัตราเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นพลังงานสูงสุดมีค่าต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งหามุมเฟินที่ดีที่สุดของใบกังหัน โดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสภาวะลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือ ทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหามุมเฟินที่ดีที่สุด ในสภาวะลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเฟินไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุดจากนั้นได้คำนวณหามุมเฟินที่ดีที่สุด ในกรณีที่สภาวะลมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยยังมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความเบ้ของสภาวะลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมเฟินที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้ น่าเป็นสาเหตุจากการที่ค่าอัตราเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความเบ้ของสภาวะลม พบว่าการปรับมุมเฟินเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควรในสภาวะลมที่มีความเบ้แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบของกังหันลมได้มากพอสมควร

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการ

วิทยานิพนธ์เรื่องการจำลองกึ่งหนึ่งด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง ผู้จัดทำได้นำทฤษฎีและความรู้ในหลาย ๆ เรื่องมาใช้ออกแบบร่วมกัน ซึ่งแต่ละส่วนจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป โดยเป็นการออกแบบในแต่ละส่วน ซึ่งการออกแบบทุกส่วนสามารถเขียนเป็นแผนผังโครงสร้างงานวิจัยได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ

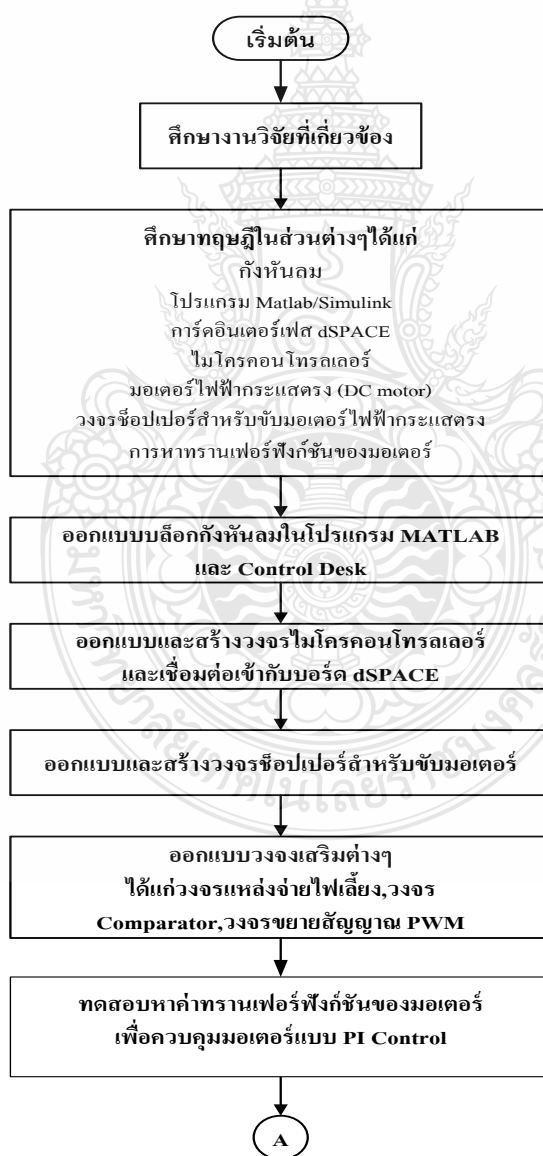
โครงสร้างโดยรวมของเครื่องจำลองกึ่งหนึ่งด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเชื่อมต่อด้วยการ์ดอินเทอร์เฟซด้วย DSP card (DSPACE 1104) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองส่วนหลักดังภาพที่ 3.1

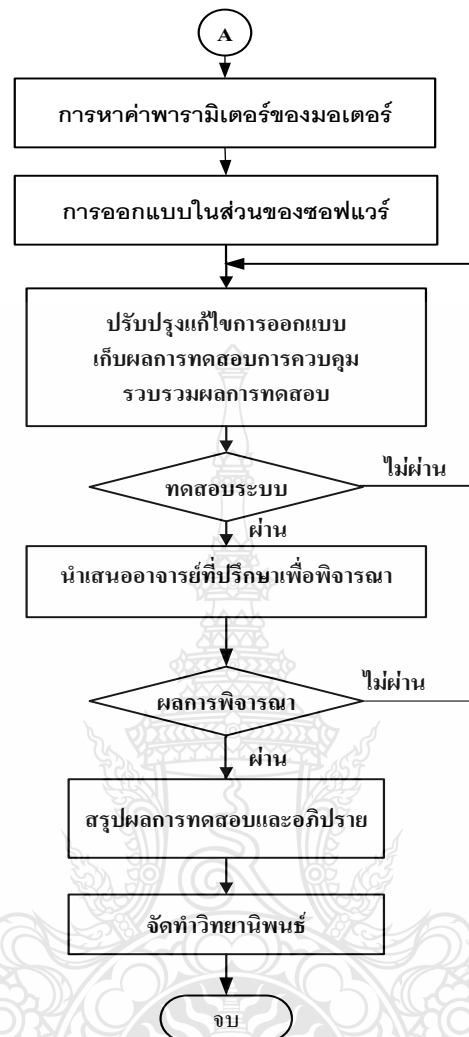
ในส่วนแรกประกอบไปด้วยแบบจำลองความเร็วลมใช้สร้างความเร็วลมที่ต้องการ รูปแบบของพลัง-ความเร็วของลมสามารถสร้างได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการสุ่มของ Kaimal Spectrum โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากข้อมูลค่าพิกัดความเร็วลมจริงและต่อมาจะเป็นแบบจำลองกึ่งหนึ่งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการและทฤษฎีกึ่งหนึ่ง

ที่กำหนดสัญญาณอ้างอิงในรูปของความเร็ว (Speed Reference) แล้วส่งไปยัง DSP card (DSPACE 1104) เพื่อสร้างสัญญาณแบบทันเวลาเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่ในส่วนที่สอง

ในส่วนที่สองคือการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ PIC 18F4431 เป็นตัวประมวลผลหลัก ซึ่ง จะทำการเขียนด้วยโปรแกรมด้วย CCSC Compiler โดยโปรแกรมไอซีผ่านบอร์ด Pickit2 เพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไปตามเงื่อนไขของพิกัดค่าความเร็วลมอ้างอิง และการทดสอบด้วยการควบคุมแรงดันขดลวดสนามและการควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์

ขั้นตอนงานวิจัยเรื่อง การจำลองกึ่งหนึ่งด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง สามารถแสดงเป็นแผนภูมิกระบวนการวิจัยได้ดังภาพที่ 3.1





ภาพที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการวิจัย

3.1 การใช้งานฟังก์ชันบล็อกของกึ่งหัดบนโปรแกรม MATLAB

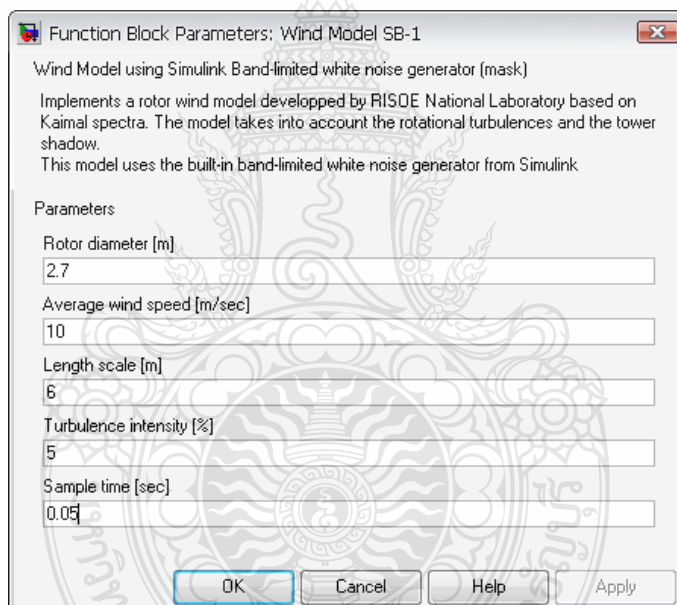
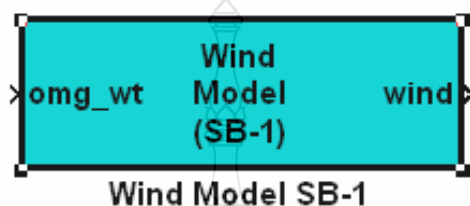
ในส่วนนี้ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญหลักๆ 3 ส่วน คือ สร้างแบบจำลองความเร็วลม สร้างแบบจำลองกึ่งหัด และในส่วนของการสร้างปุ่มควบคุมและแสดงผล control desk

3.1.1 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

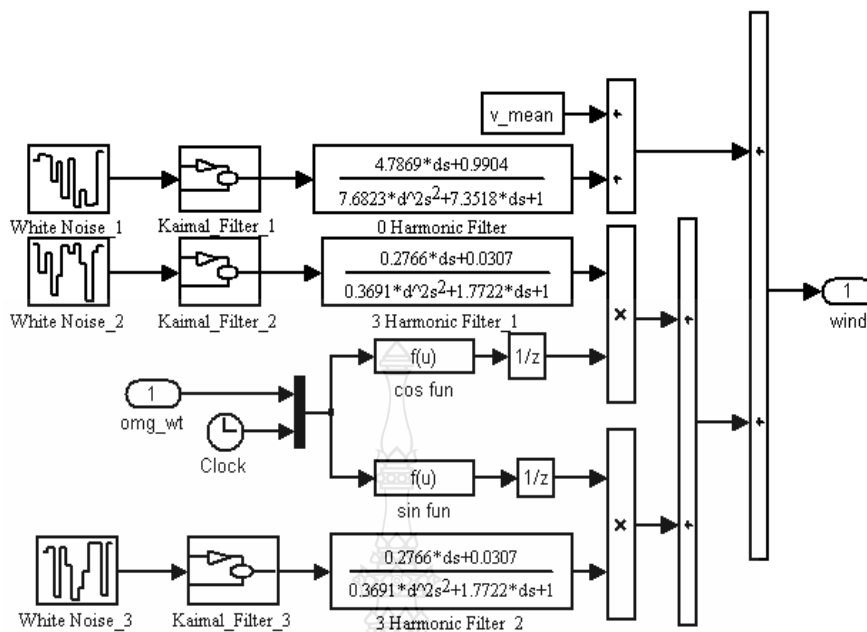
แบบจำลองความเร็วลมมีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและพฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงานลมนี้ไปสังเคราะห์ใช้ประโยชน์ต่อไปในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีปัจจัย 2 ส่วนคือ

- ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดและลดลงต่ำสุด

- ส่วนที่สองคือส่วนของค่าความแปรปรวน (Turbulence) เป็นคุณลักษณะของการสุ่มค่าไปแบบไม่เป็นปกติกับส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) กับเวลาและระยะทางและนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังนี้

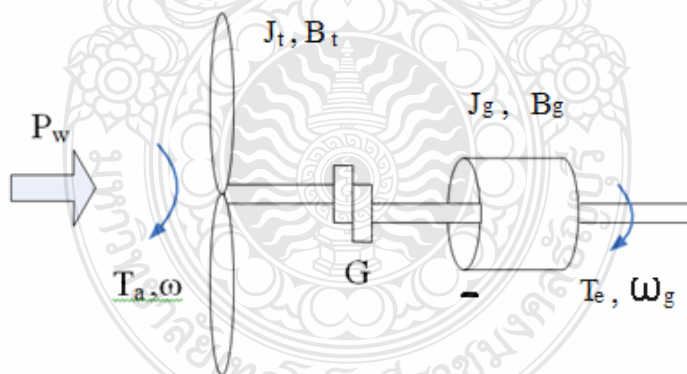


ภาพที่ 3.3 (ก) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร



ภาพที่ 3.3 (ข) บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในแบบจำลองความเร็วลม

3.1.2 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Rotor Model)



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองกังหันลม

สมมุติให้อัตราทดเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้น $w_g = w$ สามารถเขียนเป็นสมการไดนามิกของกังหันได้เป็น

$$T_e = 1 / (J D + B) \tag{3.1}$$

โดยที่ $J = J_r + J_g$ และ $B = B_r + B_g$

แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต

$$T_a - T_e = (JD + B)\omega \tag{3.2}$$

โดยตัวดำเนินการ $D = \frac{d}{dt}$

ทอร์กอากาศพลศาสตร์ T_a เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก w ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{P}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \tag{3.3}$$

แทนค่าใน $T_a = \frac{P_a}{w}$ จะได้ว่า

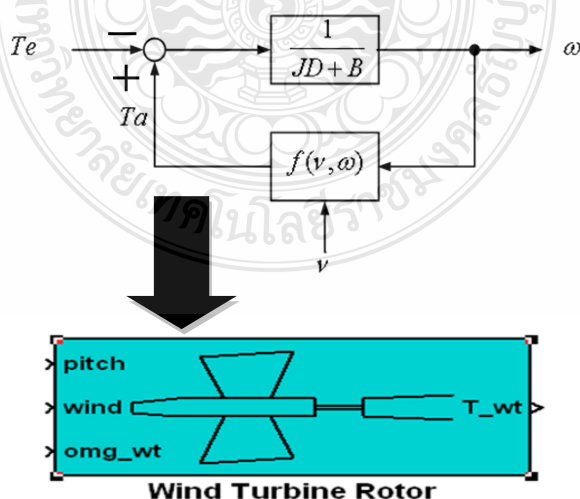
$$T_a = \frac{P}{2} \pi R^2 \frac{v^3}{w} C_p(\lambda) \tag{3.4}$$

แทนค่าใน $w = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้ ; jk

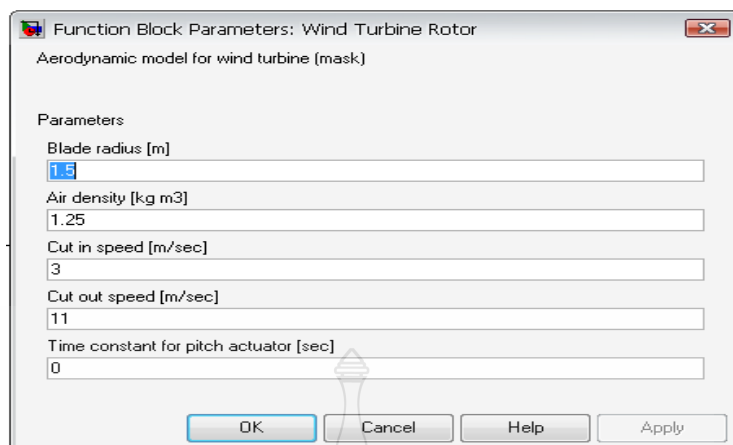
$$T_a = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 C_t(\lambda) = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 C_t(v, w) \tag{3.5}$$

โดยที่ค่าของ $C_t(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ทอร์ก

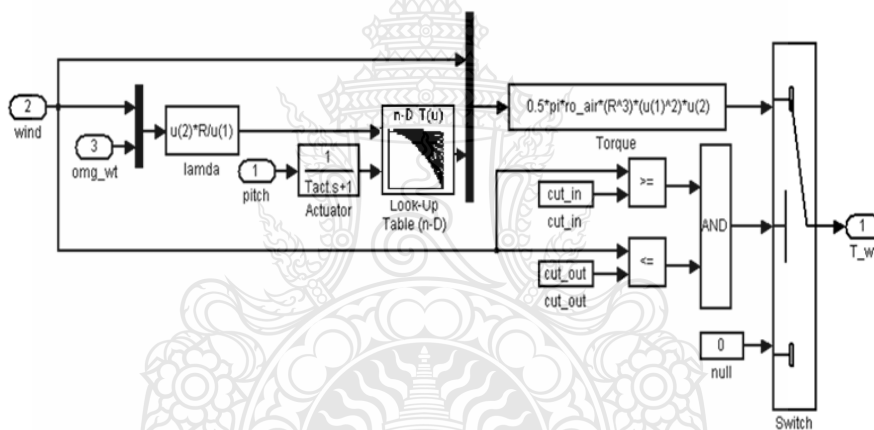
จากภาพที่ 3.4 กังหันเป็นระบบที่มีอินพุต คือ ทอร์กของเครื่องกำเนิด มีเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบ และถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน (Disturbance) ดังนั้นจากสมการ (1) และ (5) จึงเขียนบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) แบบจำลองของกังหันได้ดังนี้



ภาพที่ 3.5 (ก) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลมและการกำหนดตัวแปร



ภาพที่ 3.5 (ข) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลมและการกำหนดตัวแปร



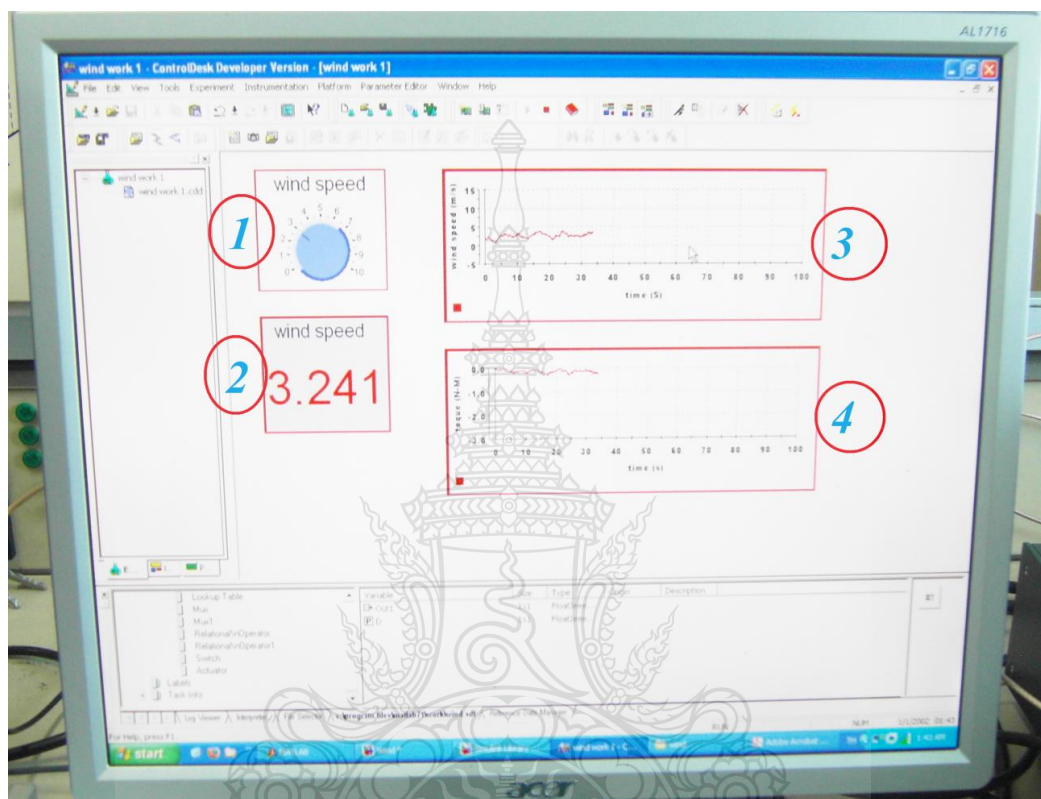
ภาพที่ 3.5 (ค) บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

3.1.3 ส่วนของการสร้างปุ่มควบคุมและแสดงผลด้วยโปรแกรมControl Desk

เป็นโปรแกรมเสริมที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับการ์ด DSP card (DSPACE 1104) เพื่อใช้ในการสั่งงานผ่านตัวโปรแกรม ซึ่งมีความโดดเด่นในการสร้าง GUI เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆได้ทันทีที่โปรแกรมทำงาน

ใช้ในการสร้าง วิเคราะห์ แล้วทำการจำลองการทำงานของแบบจำลองบล็อกไดอะแกรม ซึ่งเป็นงานที่ซับซ้อนโดยสามารถแก้ไขได้ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ด้วยการสนับสนุนของบล็อกไลบรารีที่มีมากมาย โดยเฉพาะการเลือกใช้บล็อกไลบรารีของDSP card (DSPACE 1104) สำหรับสนับสนุนอุปกรณ์ I/O

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ มีการใช้งาน MATLAB/SIMULINK ร่วมกับ DSP card (DSPACE 1104) โดยเชื่อมต่อการทำงานและควบคุมโดยโปรแกรม Control Desk ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดผ่านฟังก์ชันบล็อกของกังหันลม โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 หน้าต่างโปรแกรม Control Desk ที่ออกแบบไว้

การออกแบบเพื่อส่งค่าเข้าสู่บอร์ด DSP card (DSPACE 1104) ผ่านทางพอร์ต DACH1 เพื่อเข้าสู่ภาคไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ได้ออกแบบไว้ทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่

ดังภาพที่ 3.6 ส่วนที่ 1 เป็นปุ่มที่ใช้ในการปรับค่าความเร็วลมในหน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) ให้เป็นไปตามการทดลองที่ต้องการทำการทดสอบในระดับต่างๆ

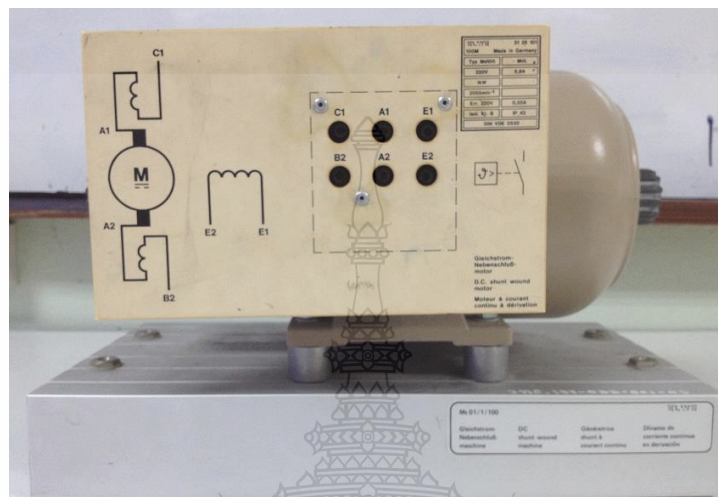
ส่วนที่ 2 เป็นการแสดงผลของความเร็วที่ได้จากการปรับของส่วนที่ 1

ส่วนที่ 3 หน้าจอแสดงผลค่าความเร็วลม

ส่วนที่ 4 หน้าจอแสดงผลค่าแรงบิดของกังหันลม

3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately excited DC Motor) พิกัด แรงดัน 220 โวลต์ พิกัดกำลัง 1 กิโลวัตต์



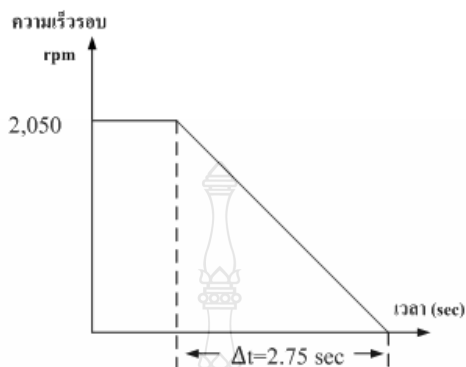
ภาพที่ 3.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้น ได้มาจากข้อมูลจำเพาะอุปกรณ์และการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

ค่าพารามิเตอร์	
แรงดันไฟฟ้า	$V_a = 220 \text{ V}$
กระแสอาร์เมเจอร์	$I_a = 5.6 \text{ A}$
ความต้านทานอาร์เมเจอร์	$R_a = 2.2 \ \Omega$
ความต้านทานขดลวดฟิลด์	$R_f = 400 \ \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์	$L_a = 0.015 \text{ H}$
ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดฟิลด์	$L_f = 7 \text{ H}$
ค่าคงตัวทางเวลาเชิงกล	$T_m = 2.75 \text{ sec}$
Moment of inertia	$J = 2.92 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
Viscous friction coefficient	$B = 37.77 \times 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$

- ค่าคงตัวทางเวลาเชิงกล (Mechanical time constant) (T_m) คือค่าเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการหยุดหมุนซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาตรและน้ำหนักตัวมอเตอร์ พิจารณาดังภาพ จะมีค่าเท่ากับ 2.75 วินาที



ภาพที่ 3.8 ค่าคงตัวทางเวลาเชิงกล

3.3 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการ System Identification

การหาโมเดลมอเตอร์หรือฟังก์ชันถ่ายโอนจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ นั่นคือ 1) ส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการส่งค่า 2) ส่วนของการรับและส่งค่าจากฮาร์ดแวร์เข้าสู่การเก็บผลในคอมพิวเตอร์ในภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ และ 3) ส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลขด้วยฟังก์ชัน system identification ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน นั่นคือโปรแกรม MATLAB

ส่วนที่ 1 ส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการส่งค่า

ส่วนนี้สิ่งสำคัญคือค่าที่ส่งไปในตัวคอมพิวเตอร์ได้แก่ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ค่ากระแสของมอเตอร์และผลรวมทางเวลา ในส่วนของกระแสฟิลด์และกระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้นในส่วนของฮาร์ดแวร์จึงประกอบไปด้วยส่วนสำคัญสองส่วน นั่นคือ ส่วนที่ทำการส่งค่าความเร็วรอบนั่นคือ การใช้เอ็นโค้ดเดอร์ในหาความเร็วรอบของมอเตอร์ และในส่วนของการส่งค่ากระแสโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสดังที่กล่าวไปแล้ว

ส่วนที่ 2 ส่วนของการรับและส่งค่าจากฮาร์ดแวร์เข้าสู่การเก็บผลในคอมพิวเตอร์ในภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนนี้อาศัยการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ หรือพอร์ต RS232 ในการส่งค่าเข้าสู่คอมพิวเตอร์นั้น ประกอบไปด้วยการเขียนโปรแกรมตั้งค่าพอร์ตอนุกรม รับค่าจากตัวตรวจจับกระแสและเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อเก็บความเร็วรอบแล้วส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ โดยที่คอมพิวเตอร์จะรับค่าโดยใช้โปรแกรม HyperTerminal ในการเก็บผลค่ากระแสและความเร็วรอบมาบันทึกไว้เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนในโปรแกรม MATLAB ในฟังก์ชัน

System Identification ต่อไป ในส่วนของการเขียนโปรแกรมนั้นได้ใช้โปรแกรม CCS 'C' Compiler ในการเขียนภาษาซีซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. การตั้งค่าพอร์ตอนุกรม จะต้องประกาศใช้พอร์ตอนุกรม ในส่วนของ header program ดังนี้ #use rs232 (baud=9600,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7) นั่นคือการตั้งบอดเรตให้เท่ากับ 9600 และตั้งค่าขา xmit คือขา C6 และขา rcv นั่นคือขา C7 ของไมโครคอนโทรลเลอร์

2. การเขียนโปรแกรมในส่วนของกราฟิโมเดลในรูปของกระแส จะต้องมีการประกาศใช้พอร์ตแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลในฟังก์ชันหลัก (void main) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเขียน โปรแกรมภาษาซีเฉพาะส่วนอ่านค่ากระแสและผลรวมทางเวลา

คำสั่งภาษาซี	คำอธิบาย
SETUP_ADC(ADC_CLOCK_INTERNAL);	กำหนดการอ่านสัญญาณภายในในการอ่าน ADC จากสัญญาณภายใน
SETUP_ADC_PORTS(sAN0);	กำหนดช่องในการอ่านADCที่ช่องAN0
SETUP_ADC_PORTS(sAN1);	กำหนดช่องในการอ่านADCที่ช่องAN0
SETUP_TIMER_1(T1_INTERNAL T1_DIV_BY_8);	กำหนดให้Timer1 ใช้สัญญาณนาฬิกาภายใน มีค่า Prescale 1:8
while(true){	วนลูป
set_timer1(0);	เริ่มต้นนับที่ 0
set_adc_channel(0);	เปิดการอ่าน ADC ที่ช่องAN0
V = read_adc();	เก็บค่า ADC ในตัวแปร V
V = (V*5)/1023;	แปลงบิตเป็นโวลต์
i1 = (2.482 - V)/0.186;	แปลงโวลต์เป็นกระแส
printf("%.3f\t%f\r\n",i1,dt);	ส่งค่ากระแสและsampling ไทม์ ผ่าน RS232
dt = get_timer1();	เก็บค่า timer ในตัวแปร dt
dt = dt * 8 * 0.0000005; }	แปลงค่า dt เป็นระบบเวลาจริง

จากโปรแกรมจะส่งค่ากระแสจริงและค่าผลรวมทางเวลา ผ่านพอร์ตอนุกรมเข้าสู่คอมพิวเตอร์ต่อไป โดยมีการกำหนดการใช้งานสัญญาณอนาล็อกแล้วแปลงให้สัญญาณอนาล็อกจากเซ็นเซอร์กระแส ให้เป็นค่าแรงดัน แล้วจึงแปลงค่าแรงดันเป็นค่ากระแสจริง และส่งค่าเวลาขณะนั้นเพื่อหาค่าเทียบเวลา ที่จะนำไปใช้ในการหาโมเดลลูปกระแสต่อไป

1. การเขียนโปรแกรมในส่วนของการทำงานโมเดลในรูปของความถี่ (ωa) ในส่วนนี้จะต้องประกาศการใช้งานฟังก์ชัน CCP เพื่อทำการรับค่าความถี่รอบ แสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งการเขียนโปรแกรมดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาซีเฉพาะส่วนอ่านค่าความถี่รอบและผลรวมทางเวลา

<pre>int16 pos = 0; float pos1,pos2; #include <int_ccp2> void count10{ pos = pos + 1; } void main() { float speed; float dt; enable_interrupts(GLOBAL); enable_interrupts(INT_CCP2); SETUP_CCP2(CCP_CAPTURE_RE); SETUP_TIMER_1(T1_INTERNAL T1_DIV_BY_8); set_timer1(0); while(true){ set_timer1(0); pos1 = (float)pos; printf("%.3f\t%f\r\n",speed,dt); pos2 = (float)pos; speed = (pos2-pos1)/dt; speed = (speed*2*3.14)/600; dt = get_timer1(); dt = dt*8*0.0000005; } </pre>	<p>ให้ตัวแปร pos เป็น integer 16bit</p> <p>ให้ตัวแปร pos1,pos2เป็นทศนิยม</p> <p>ฟังก์ชันอินเตอร์รัพ CCP2</p> <p>เปิดใช้งานฟังก์ชันอินเตอร์รัพ count1</p> <p>ให้ pos เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง</p> <p>ฟังก์ชันหลัก</p> <p>ประกาศตัวแปร speed และ dt</p> <p>เปิดใช้งานอินเตอร์รัพรวม</p> <p>เปิดอินเตอร์รัพ CCP2</p> <p>ให้ ccp2 ทำงาน capture ในโหมดขาขึ้น</p> <p>ตั้งtimer1 ใช้สัญญาณนาฬิกาภายในมีค่าprescale เท่ากับ 1:8</p> <p>เริ่มต้นนับที่0</p> <p>วนลูป</p> <p>เริ่มต้นนับที่0</p> <p>ให้pos=pos1</p> <p>ส่งค่ากระแสและsampling ไทม์</p> <p>ตัวแปรpos=pos2</p> <p>ความเร็ว=pos2-pos1 หารด้วย dt</p> <p>แปลง step/secเป็นradian/sec</p> <p>ให้timer1เท่ากับdt</p> <p>แปลงdtเป็นฐานเวลาจริง</p>
---	--

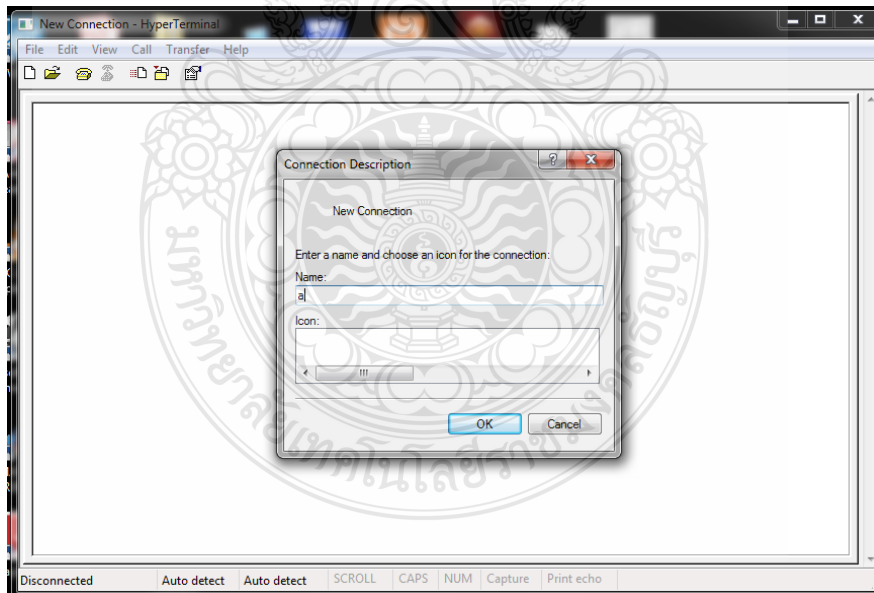
จากโปรแกรมจะต้องใช้งานฟังก์ชันอินเตอร์พรีเคาน์เตอร์เพื่อบันทึกค่าตัวแปร pos เพิ่มขึ้นทีละ 1 เพื่อเก็บค่า pos1 และ pos2 แล้วนำมาหาค่าความเร็วจาก $(pos2-pos1)/dt$ แล้วจึงแปลงความเร็วจาก step/sec เป็น radian/sec

ในส่วนของคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะทำการรับค่า กระแส ความเร็วและ sampling time นั้น ใช้โปรแกรม Hyperterminal ในการรับค่า ซึ่งโปรแกรม hyperterminal บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ xp นั้นมีโปรแกรมติดตั้งมาให้โดยเรียบร้อยแล้ว แต่สำหรับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 นั้นจะไม่มีโปรแกรม Hyperterminal มาให้ ดังนั้นจึงต้องคัดลอกไฟล์โปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์วินโดวส์ xp มาไว้ในเครื่องวินโดวส์ 7 โดยมีวิธีการดังนี้

1. copy ไฟล์ที่ชื่อ hypertrm.exe อยู่ที่ C:\Windows\System32 ในเครื่อง Windows XP วางใน C:\Program Files\Windows NT ในเครื่อง Windows Vista หรือ Windows 7

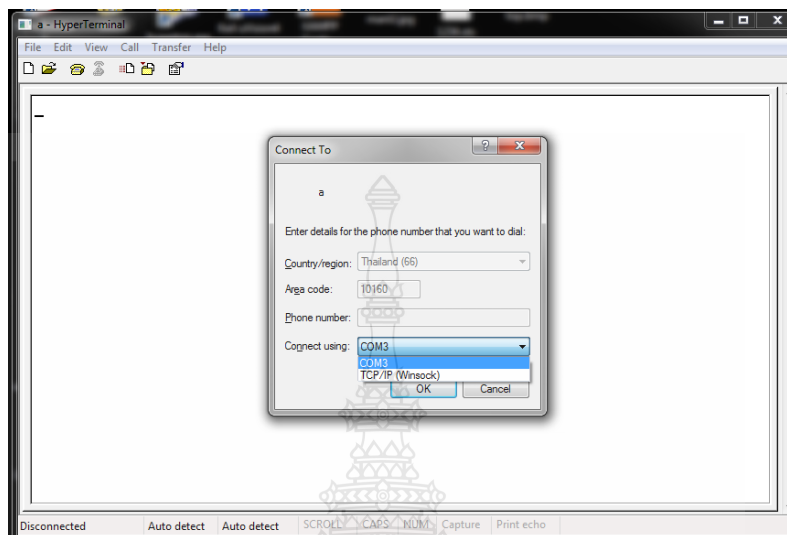
2. copy ไฟล์ที่ชื่อ hypertrm.dll อยู่ที่ C:\Windows\System32 ในเครื่อง Windows XP ไปวางใน C:\Windows\System32 ในเครื่อง Windows Vista หรือ Windows 7

หลังจากนั้นก็สามารรถเข้าใช้งานโปรแกรมได้ทันที โดยการเปิดโปรแกรมครั้งแรก โปรแกรมจะให้ใส่รหัสพื้นที่ โดยผู้ใช้จะใส่รหัสอะไรก็ได้ หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ตัวโปรแกรมเพื่อใช้งาน



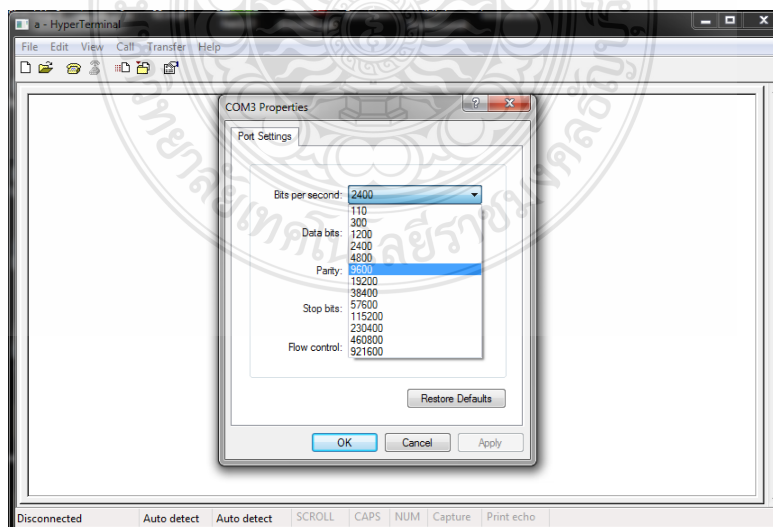
ภาพที่ 3.9 การตั้งชื่อไฟล์

เมื่อปรากฏหน้าต่างดังภาพที่ 3.9 ให้ตั้งชื่อไฟล์ ยกตัวอย่างเช่น a หลังจากนั้นให้เลือกคอมพอร์ตที่ใช้ต่อกับคอมพิวเตอร์ให้ถูกต้องดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การเลือกใช้คอมพอร์ต

หลังจากเลือกคอมพอร์ตที่ถูกต้องแล้ว จะเข้าสู่การตั้งค่าการเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม โดยให้เปลี่ยน bit/sec ให้เท่ากับ 9600 แสดงดังภาพที่ 3.11 ซึ่งตรงกับโปรแกรมภาษาซีที่เรากำหนดไว้ หากตั้งค่าไว้ไม่ตรงกันแล้ว จะทำให้ไม่สามารถรับค่ากระแส ความเร็วรอบและ sampling time จากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้



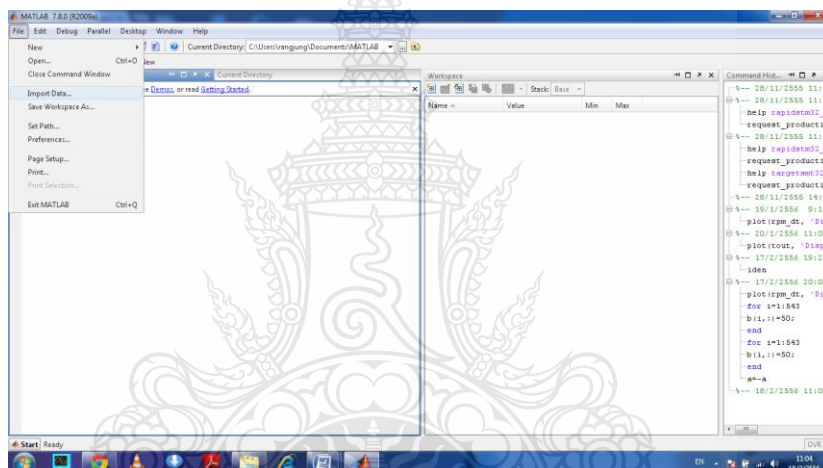
ภาพที่ 3.11 การเลือก bit/sec ให้ตรงกับไมโครคอนโทรลเลอร์

หลังจากนั้นให้เลือก apply และ ok จะเข้าสู่หน้าต่าง โปรแกรมแสดงผล การรับค่าจากพอร์ตอนุกรม ให้ทำการ capture การเลือกใช้คอมพอร์ตเพื่อเก็บค่าที่รับได้นำไปใช้ในฟังก์ชัน System Identification ของโปรแกรม Matlab ต่อไป

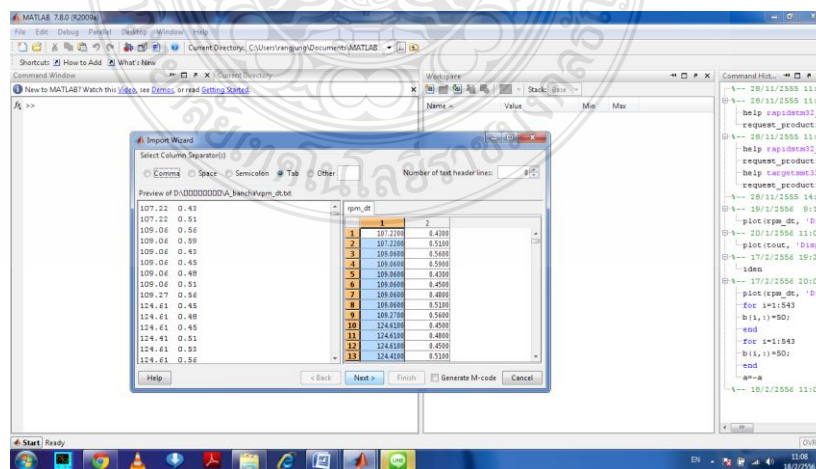
ส่วนที่ 3 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์บน โปรแกรม MATLAB

หลังจากที่ได้ทำการเก็บผลบนโปรแกรม Hyper terminal มาแล้วจะได้ค่ากระแส, ความเร็ว, และผลรวมทางเวลา หลังจากนั้นจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้นี้ไปใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เข้าสู่โปรแกรม MATLAB แล้วเลือก Import Data โดยเลือกตรงเมนูไฟล์แล้วเลือก Import data แล้วเลือกข้อมูลที่ได้จากการเก็บค่าความเร็วรอบมาใช้ในการพล็อตกราฟดังภาพที่ 3.12



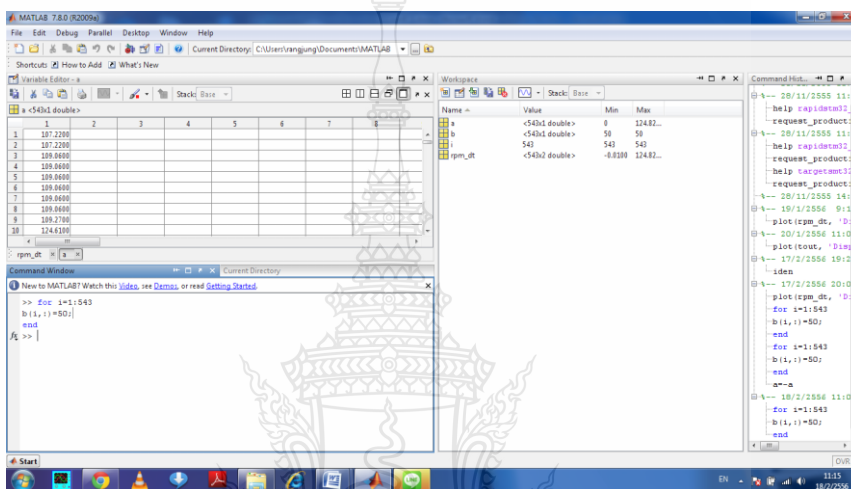
ภาพที่ 3.12 Import Data เลือกข้อมูลมาใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน



ภาพที่ 3.13 ข้อมูลที่ใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน

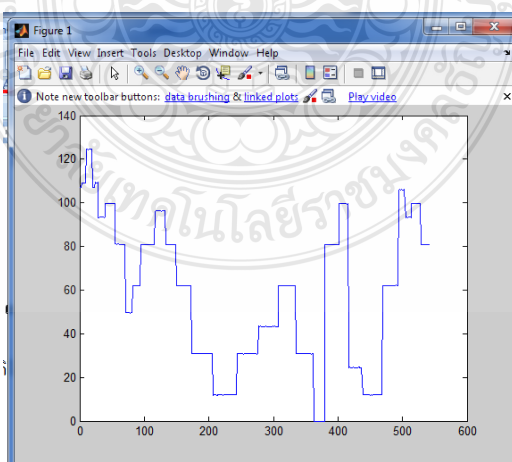
2) จากนั้นสร้างตารางขึ้นมาใหม่ 1 ตาราง แล้วทำการตั้งชื่อ ยกตัวอย่างเช่น a แล้วทำการคัดลอกข้อมูลความเร็วรอบมาไว้ที่ a ดังภาพที่ 3.13 และพิมพ์คำสั่งให้สร้างตาราง b ขึ้นมาอีก 1 ตาราง โดยมีชุดคำสั่งดังนี้

```
for i=1:543    หมายถึง ให้ i เท่ากับจำนวนข้อมูลทั้งหมด ในที่นี้ยกตัวอย่างเพียง 543 ค่า
b(i,:)=50;    สร้างตาราง b ให้ทุกค่าเท่ากับ 50 แต่ให้จำนวนเท่ากับ I นั่นคือ 543
end           จบการทำงาน
```



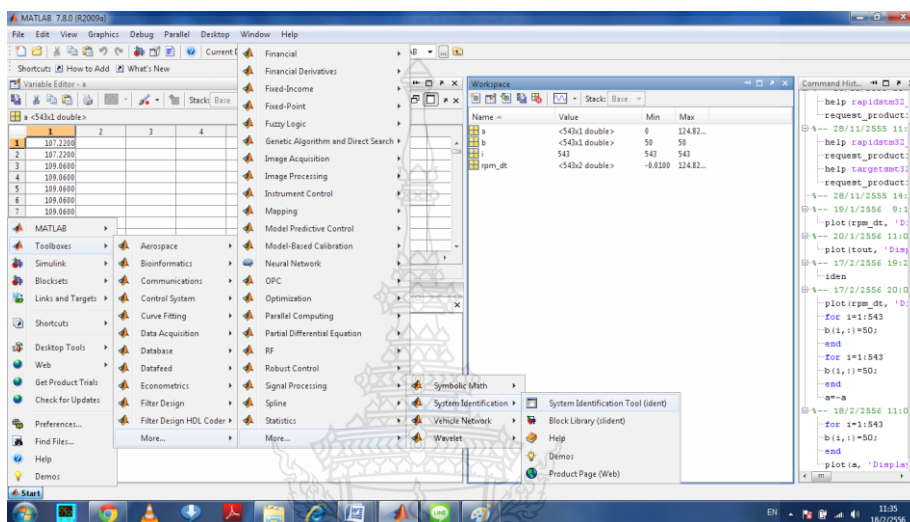
ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล

หากทำการพล็อตกราฟข้อมูล a จะได้ดังภาพที่ 3.15

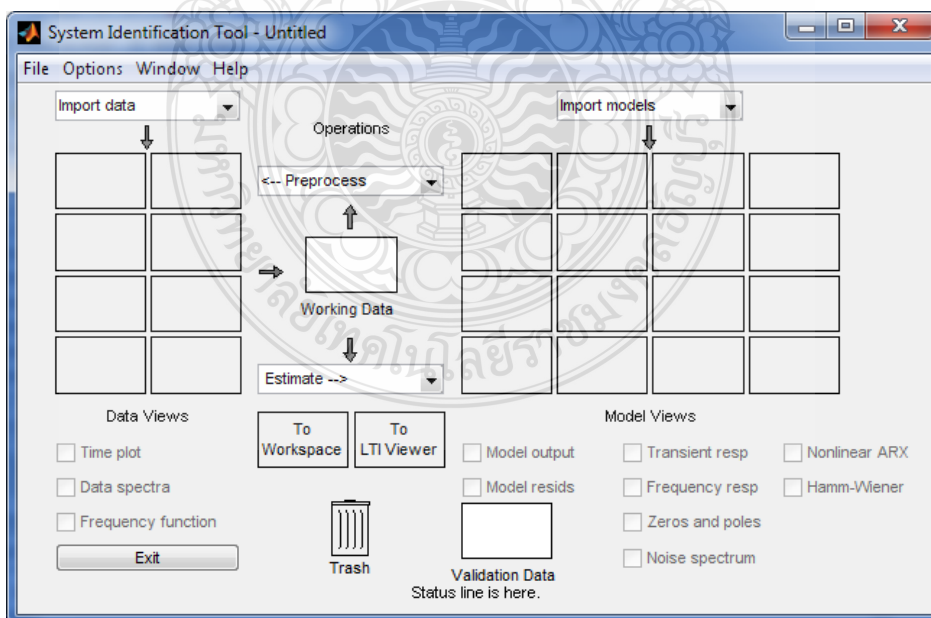


ภาพที่ 3.15 การพล็อตกราฟข้อมูล a

3) จากขั้นตอนที่ 1 และ 2 เป็นการเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในกล่องเครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ที่ชื่อ System Identification โดยมีขั้นตอนคือ 1 คลิกปุ่ม Start เลือก Toolboxes เลือก more และ more หรือหากเป็น version เก่าๆ ก็อาจเจอใน Toolboxes เลย แล้วเลือก System Identification และสุดท้ายเลือก System Identification Tool (iden) ดังภาพที่ 3.16

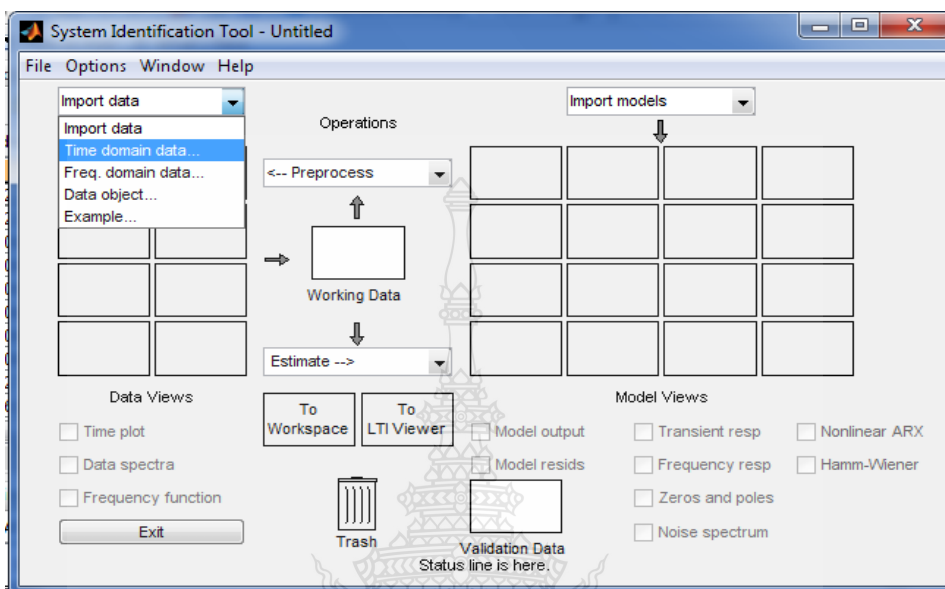


ภาพที่ 3.16 การเลือกกล่องเครื่องมือ System Identification Tool (iden)

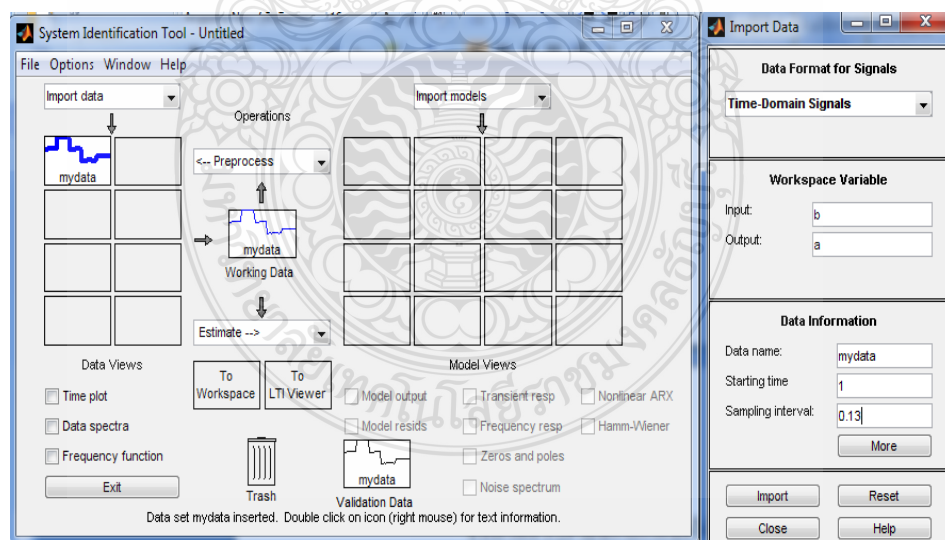


ภาพที่ 3.17 กล่องเครื่องมือ System Identification Tool

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างกล่องเครื่องมือ system identification ให้ทำการเลือกข้อมูลที่ Import data เป็น Time domain ดังภาพที่ 3.18

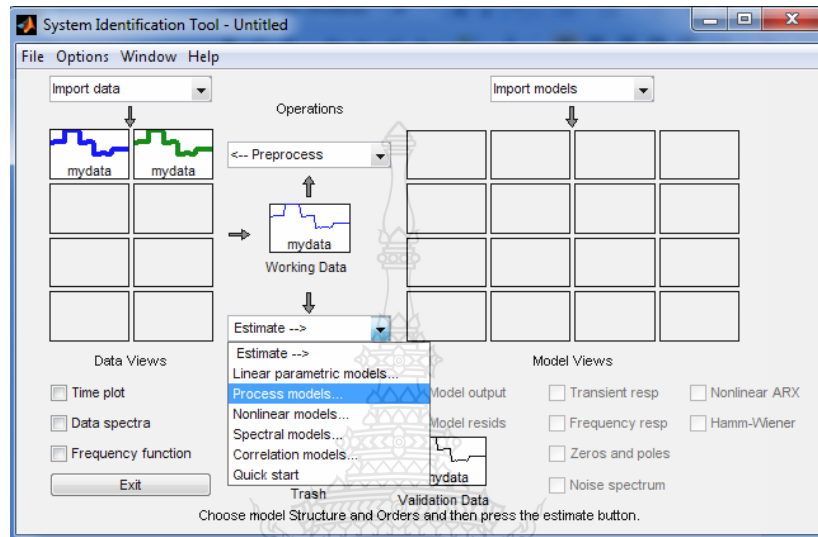


ภาพที่ 3.18 เลือก time domain ใน Import data



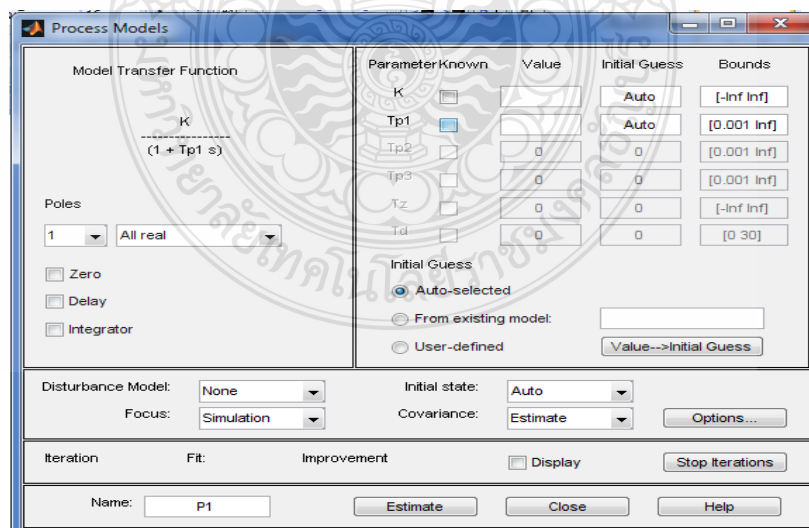
ภาพที่ 3.19 การเลือกอินพุทและเอาท์พุทใน Import data

จากภาพที่ 3.19 เป็นการกำหนดให้อินพุตเท่ากับตาราง b และเอาที่พุดคือข้อมูลความเร็วรอบ นั่นคือ a และกำหนด sampling time เท่ากับ 0.013 จากนั้นคลิกปุ่ม import data เมื่อ import แล้วจะได้ ข้อมูลนำเข้าหลังจากนั้นในส่วนของ Estimate ให้เลือก Process model ดังภาพที่ 3.20



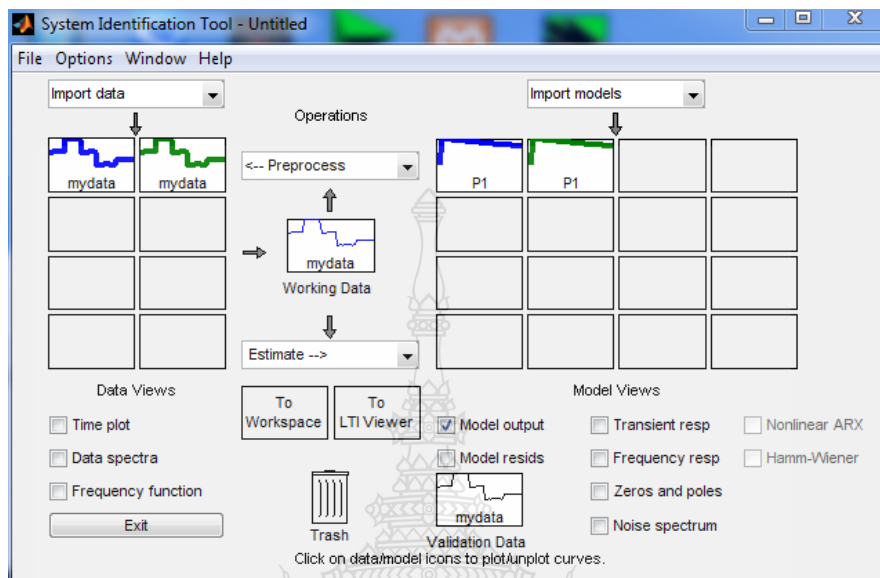
ภาพที่ 3.20 การเลือก Estimate เป็น Process Model

จากนั้นจะปรากฏ Process Models ดังภาพที่ 3.21 แล้วแสดงค่าของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ ให้ทำการติ๊กเลือก delay ออก เพื่อแสดงผลค่าจริง

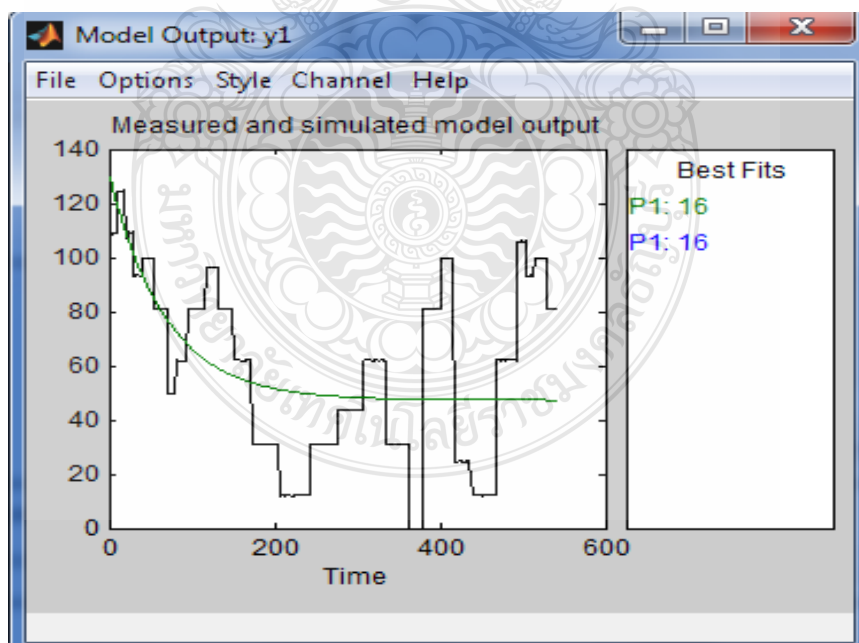


ภาพที่ 3.21 หน้าต่างแสดงผลฟังก์ชันถ่ายโอน

จากนั้นให้เลือก Estimate จะกลับไปทีกล่องเครื่องมือ system identification ให้ทำการเลือก Model output ดังภาพที่ 3.21 จะปรากฏ model output ดังภาพที่ 3.22

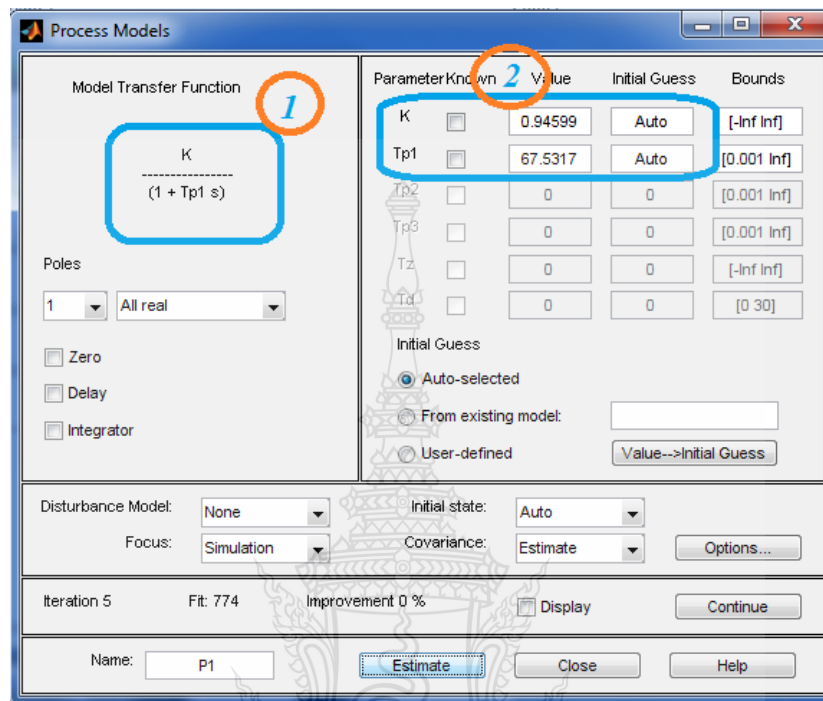


ภาพที่ 3.22 การเลือก โมเดลเอาท์พุท



ภาพที่ 3.23 โมเดลเอาท์พุท

สุดท้ายให้กลับไป process model ก็จะแสดงผล ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ ดังภาพที่ 3.24 โดยแสดงค่า K และ Tp รวมถึงสมการจุดที่ 1 และ 2 ของภาพ



ภาพที่ 3.24 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

จากวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมา ให้เปลี่ยนเพียงข้อมูลที่ Import เข้ามาเท่านั้น นั่นคือค่าของกระแส เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปกระแส สามารถสรุปหาค่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$T_f = \frac{K}{1 + T_{p1}s} \quad (3.8)$$

ลูป Speed Armature

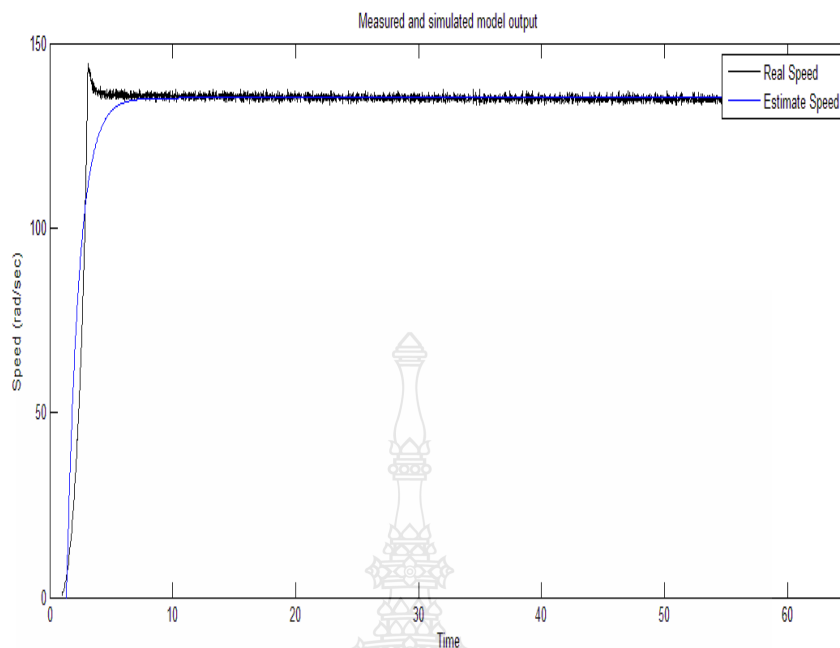
$$K = \frac{0.020006}{1 + 0.51274s}$$

ลูป Current Amature

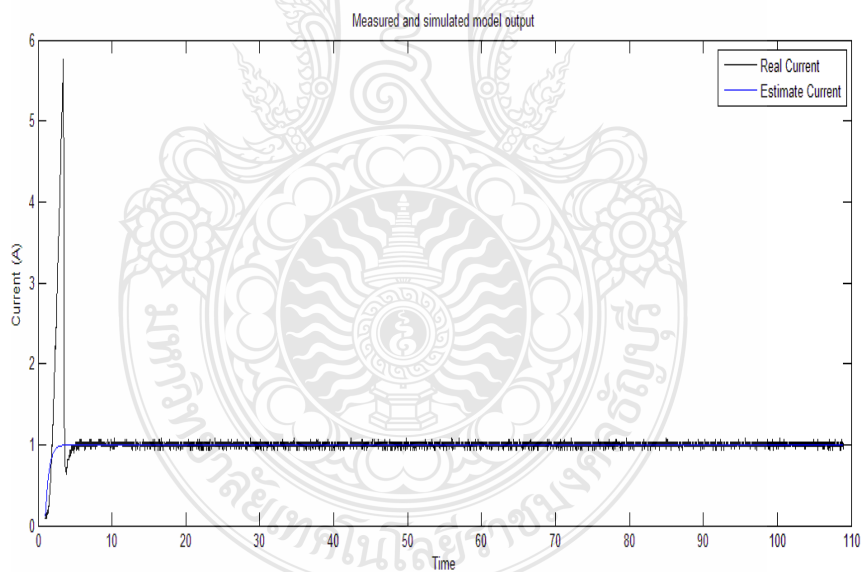
$$K = \frac{2.7036}{1 + 1.0079s}$$

ลูป Speed Field

$$K = \frac{0.003523}{1 + 0.83253s}$$



ภาพที่ 3.25 ข้อมูลของรูป Speed Armature



ภาพที่ 3.26 ข้อมูลของรูป Current Armature

จากภาพที่ 3.28 ภาพทางซ้ายมือเป็นแบบของวงจรช้อปเปอร์คลาสเอและภาพทางขวามือเป็นวงจรที่สร้างขึ้นจริงโดยได้เลือกใช้ MOSFET เบอร์ IR460LC ทั้งนี้การเลือกใช้นั้นต้องคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ไปยังมอเตอร์ แรงดันตกคร่อมสวิทช์ และควรมีแผ่นระบายความร้อนเนื่องจากความสูญเสียในการสวิทช์ซึ่งของอุปกรณ์สวิทช์นั้นคือ MOSFET จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวสวิทช์และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ อีกทั้งโหลดที่ใช้เป็นโหลดประเภทโหลดความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงต้องมีไดโอดชนิด fast diode เพื่อให้เกิดกระแสไหลวนในตัวมอเตอร์และป้องกันความเสียหายเนื่องจากกระแสไหลย้อน ซึ่งจะส่งผลความเสียหายแก่มอเตอร์

วงจรช้อปเปอร์คลาสเอนี้ จะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณกระตุ้นขาเกตในลักษณะเปิด-ปิดด้วยความถี่สูง ที่ความถี่ 30 kHz การควบคุมความเร็วรอบนั้นใช้การปรับค่าของ duty cycle และการที่จะขับสัญญาณขาเกตนั้นจะต้องใช้แรงดันที่สูงขึ้น เนื่องจากแรงดัน PWM ที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีระดับแรงดันอยู่ที่ 5 โวลต์ จะต้องทำการขยายแรงดันที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีระดับสูงเท่าที่จะสามารถขับมอเตอร์ได้ โดยระดับแรงดันที่ใช้ขับนั้นให้อ้างอิงจากข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ (data sheet) แต่ละตัวนั้นๆ ซึ่งวงจรขยายแรงดัน PWM นั้นจะขอกล่าวถึงในส่วนของวงจรเสริมต่อไป

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการเลือกอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งนั้นต้องพิจารณาแรงดันและกระแสตกคร่อมสวิทช์ ซึ่งมีโหลดมอเตอร์ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 220 V ดังนั้นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอีกหนึ่งวงจร ดังจะกล่าวไว้ในเรื่องของวงจรเสริม คือวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ต่อไป

3.5 การออกแบบวงจรเสริม

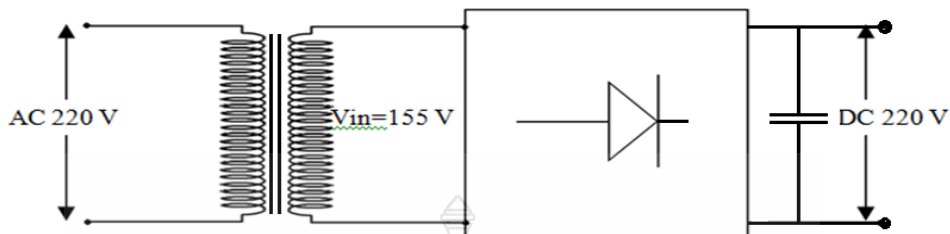
ในส่วนของวงจรเสริมนี้ เป็นส่วนที่มีความสำคัญเช่นกัน ได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในส่วนต่างๆ วงจร Offset Voltage ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างบอร์ด dSPACE เข้าสูไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขยายสัญญาณ PWM ที่จำเป็นต้องใช้ในการขับมอเตอร์ต่อไป

3.5.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในส่วนต่างๆ จะประกอบไปด้วยการจ่ายไฟ 4 ส่วนหลักๆ ได้แก่

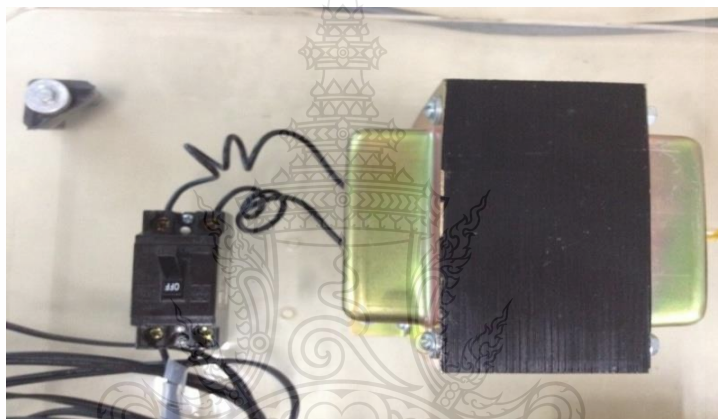
- 1) วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์
- 2) วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์
- 3) วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรขยายสัญญาณ PWM และ
- 4) วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจร Offset Voltage

3.5.1.1 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์

เนื่องจากมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 220 โวลต์กินกระแสประมาณ 5 แอมแปร์ จึงได้ออกแบบวงจรดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์



ภาพที่ 3.30 หม้อแปลง สตีปคาวนที่ใช้งานจริง

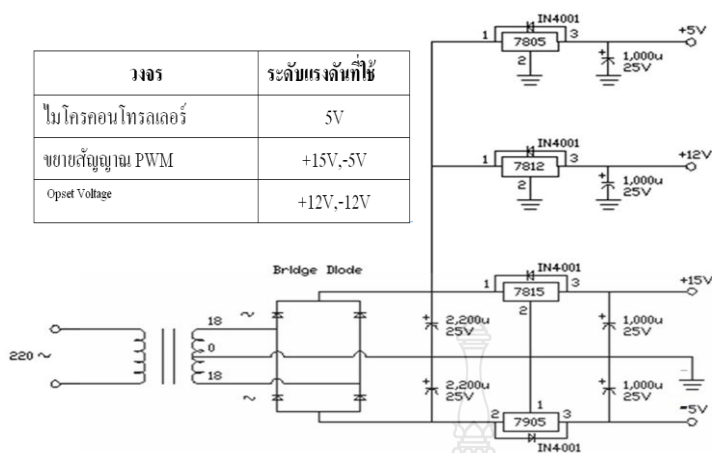
โดยคำนวณหา V_{in} ดังนี้

$$V_{dc} = V_{in} \times \sqrt{2} \quad (3.7)$$

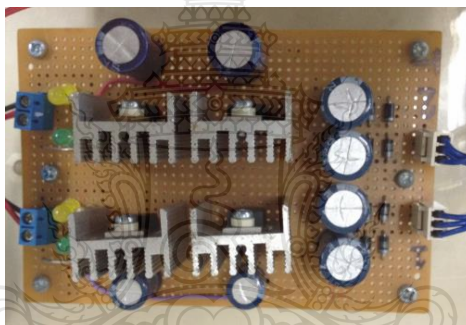
$$V_{in} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{220V}{\sqrt{2}} = 155 V$$

3.5.1.2 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆ

วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆ ได้แก่ วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจรขยายสัญญาณ PWM และวงจรจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร Offset Voltage แต่ละวงจรจะใช้ระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ดังตารางและวงจรในภาพที่ 3.31 และ 3.32



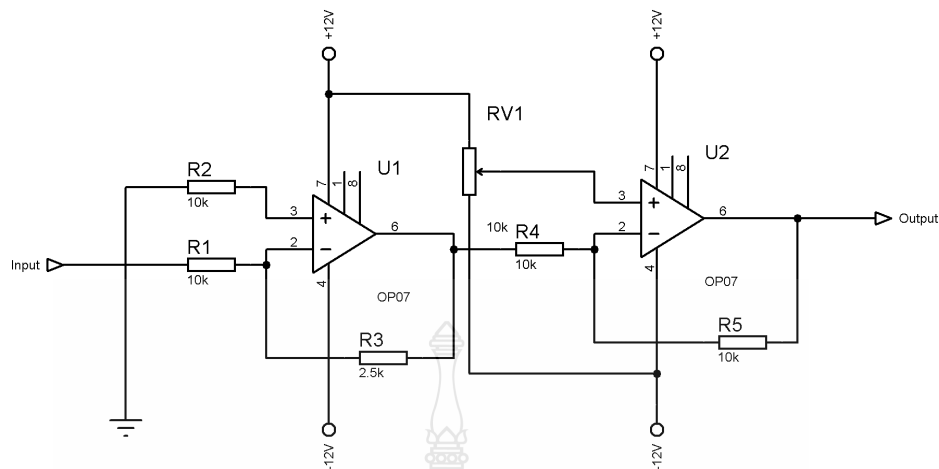
ภาพที่ 3.31 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับ



ภาพที่ 3.32 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับที่สร้างขึ้น

3.5.1.3 วงจร Offset Voltage

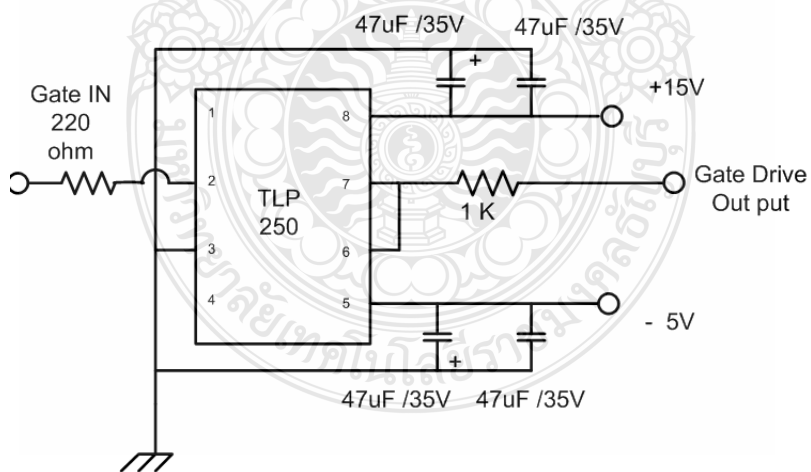
วงจรนี้เป็นวงจรลดอัตรส่วนของแรงดันเพื่อเชื่อมต่อระหว่าง dSPACE เข้าสู่ภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแรงดันนี้เปลี่ยนแปลงตามความเร็วอ้างอิง (Speed Reference) โดยระดับแรงดันเอาต์พุตที่ช่อง DACH1 ของ dSPACE จะจ่ายออกมาที่ -10 ถึง +10 โวลต์ ซึ่งต้องลดอัตราส่วนให้เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ นั่นคือ 0 ถึง 5 โวลต์ โดยการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.33



ภาพที่ 3.33 วงจร Offset Voltage

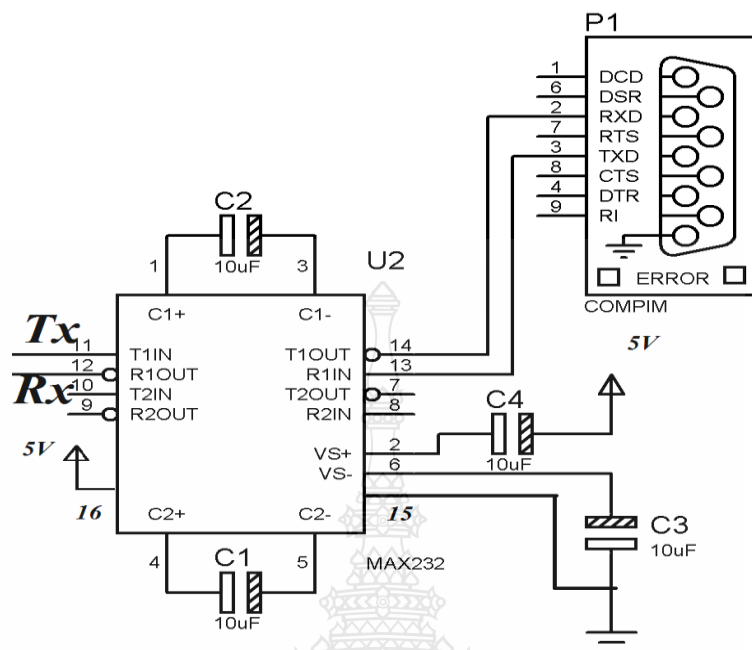
3.5.1.4 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณขับเคลื่อน

จากภาพที่ 3.33 เนื่องจาก มอสเฟตที่ใช้ ต้องใช้สัญญาณ PWM ขับที่ระดับแรงดัน +15V และ -5V จึงได้เลือกใช้ไอซี Opto Coupler TLP250 เพื่อขยายแรงดันให้สามารถขับสวิตช์มอสเฟตได้แสดงดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 วงจรขยายสัญญาณขับเคลื่อน

3.5.2 ส่วนการเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม



ภาพที่ 3.35 การต่อใช้งาน MAX232

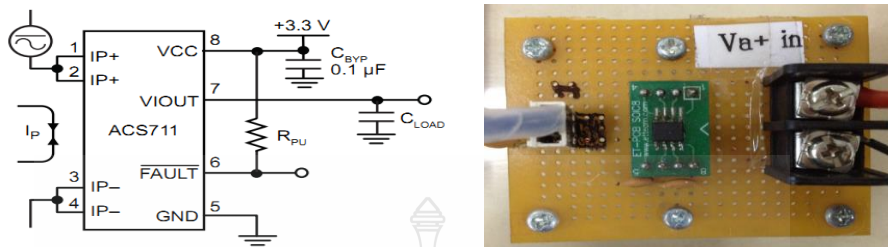
ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อใช้ในการส่งผ่านข้อมูล โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลความเร็วรอบ กระแส และค่าผลรวมทางเวลา หรือค่าต่างๆที่เราต้องการทราบค่า ทำให้สามารถทราบข้อมูลต่างๆ รวมถึงการทดสอบและการเก็บผลการทดลองผ่านพอร์ตอนุกรมนี้

พอร์ตอนุกรมนั้นเชื่อมต่อโดยผ่านไอซี max232 โดยมีวงจรดังภาพที่ 3.35 ซึ่งที่ไม่ได้ระบุไว้ในวงจรคือขาที่ 11 หรือขา Tx นั้น ให้ต่อเข้ากับขาที่ 25 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 และขาที่ 12 ของ max232 ให้ต่อเข้ากับขา Rx หรือขาที่ 26 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ และใช้ตัวเก็บประจุแบบมีขั้ว C1 ถึง C5 ที่มีความจุ 10 uF/50V

ในส่วนของการรับค่านั้น ได้ใช้โปรแกรม hyper terminal ในการอ่านค่าข้อมูลที่ได้รับเข้ามา แต่ทั้งนี้จะต้องตั้ง baud rate นั่นคือ 9600 ให้ตรงกันทั้งตัวโปรแกรม hyper terminal และในโปรแกรม CCS C Compiler มิฉะนั้นแล้ว hyper terminal จะไม่สามารถอ่านค่าข้อมูลที่ส่งเข้ามาได้ ในส่วนของการเขียนโปรแกรมนั้น จะได้กล่าวถึงในเรื่อง การออกแบบซอฟต์แวร์ต่อไป

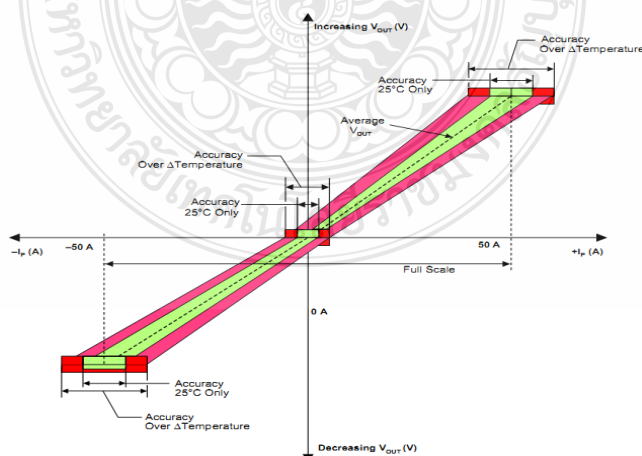
3.6 การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจกระแสและ Encoder

3.6.1 การรับค่ากระแสจากอุปกรณ์ตรวจกระแส



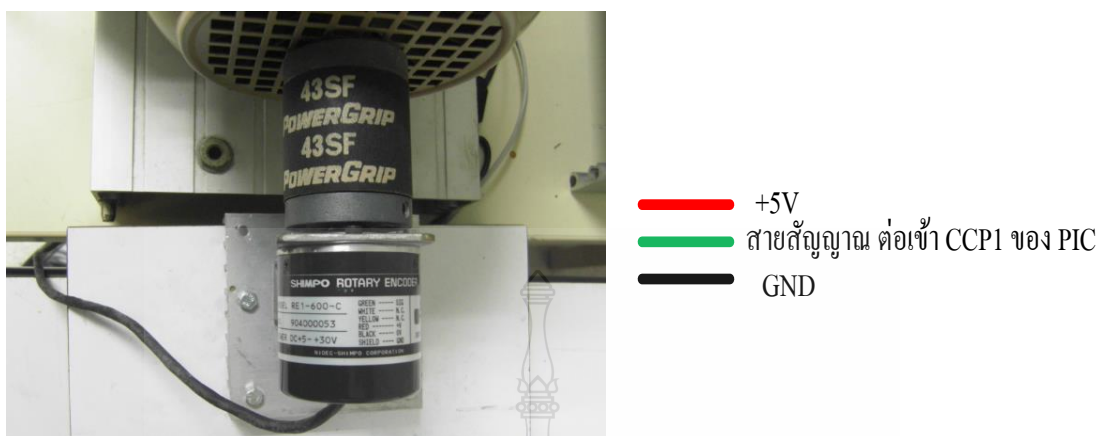
ภาพที่ 3.36 วงจรรับค่ากระแสและฮอลล์เอฟเฟ็คขนาด 25 แอมแปร์

อุปกรณ์ตรวจกระแสที่ใช้ได้ใช้แบบฮอลล์เอฟเฟ็ค ดังภาพที่ 3.36 ทนกระแสสูงสุดได้ถึง 25 แอมแปร์ จากข้อมูลอ้างอิงของอุปกรณ์ที่กระแส 0 แอมแปร์ จ่ายสัญญาณแรงดันที่ 2.5 โวลต์ และเพิ่มขึ้นตามค่าของกระแสอย่างเป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 3.10 แรงดันเอาต์พุต (VI out) เพิ่มขึ้นตามค่าของกระแสที่ไหลผ่าน I_{p+} ไปยัง I_{p-} เมื่อกระแส (I_p) เพิ่มขึ้นค่าของแรงดันเอาต์พุตก็จะเพิ่มตามขึ้นด้วย โดยช่วงของกระแสสามารถรับได้ตั้งแต่ -25แอมแปร์ถึง +25 แอมแปร์ หากกระแสต่ำกว่า 0 แอมแปร์ ค่าแรงดันที่จ่ายออกมาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าต่ำกว่า 2.5 โวลต์ และหากกระแสมากกว่า 0 แอมแปร์ ค่าแรงดันที่จ่ายออกมาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าสูงกว่า 2.5 โวลต์ แต่ไม่เกิน 5 โวลต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่าย VCC ที่เป็นแรงดันที่ใช้ในการอ้างอิง เพื่อกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุต (VI out) จากนั้นจึงใช้แรงดันเอาต์พุตที่ได้ไปต่อเข้ากับขาที่ 2 หรือ AN0 เพื่ออ่านค่าในโปรแกรมต่อไป



ภาพที่ 3.37 กราฟการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตเมื่อกระแสมีการเปลี่ยนแปลง

3.6.2 การรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์



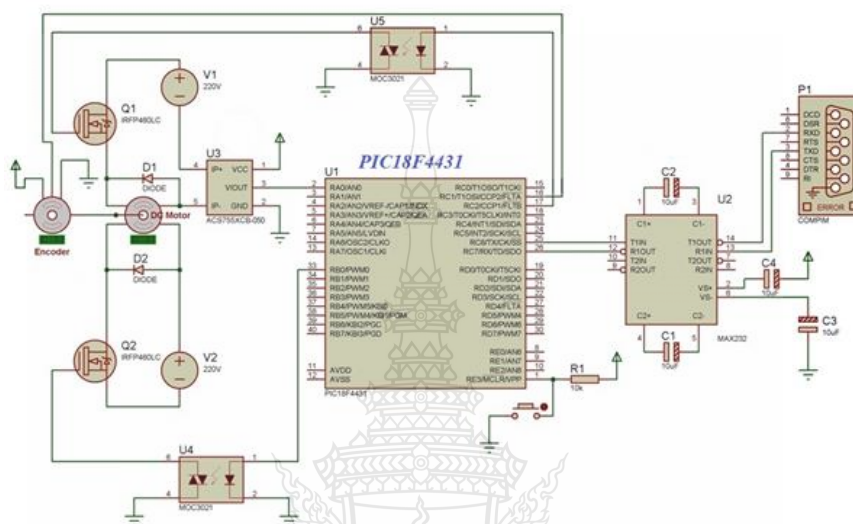
ภาพที่ 3.38 การต่อใช้งาน Encoder

Encoder เป็นอุปกรณ์ในการอ่านค่าความเร็วรอบจากมอเตอร์โดยต่อพ่วงเข้ากับแกนของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุน เ็นโค้ดเดอร์ก็จะหมุนตาม และจะจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยมออกมา โดยได้เลือกใช้เอ็นโค้ดเดอร์รุ่น RE1-600-C ซึ่งเอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้ เมื่อมอเตอร์หมุนไป 1 รอบจะจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยมออกมา 600 ลูกคลื่น จึงนำจำนวนลูกคลื่นนี้ออกมาใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่าของความเร็วรอบต่อไป ในส่วนของวงจรในการต่อใช้งานดังแสดงในภาพที่ 3.38 นั่นคือสายสีแดงต่อไฟเลี้ยง สายสีดำต่อกราวด์และสายสีเขียวเป็นสายสัญญาณ ใช้ต่อเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 ซึ่งได้ต่อเข้ากับขาที่ 16 หรือขา CCP2 เพื่อใช้ในการอ่านค่าความเร็วรอบต่อไป อีกทั้ง PIC18F4431 มีฟังก์ชันในการรองรับการอ่านค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์แล้วยังมีฟังก์ชันการขัดจังหวะการทำงานของโปรแกรม (Interrupt) ทำให้เกิดความเร็วในการตั้งงานและครอบคลุมการใช้งานที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

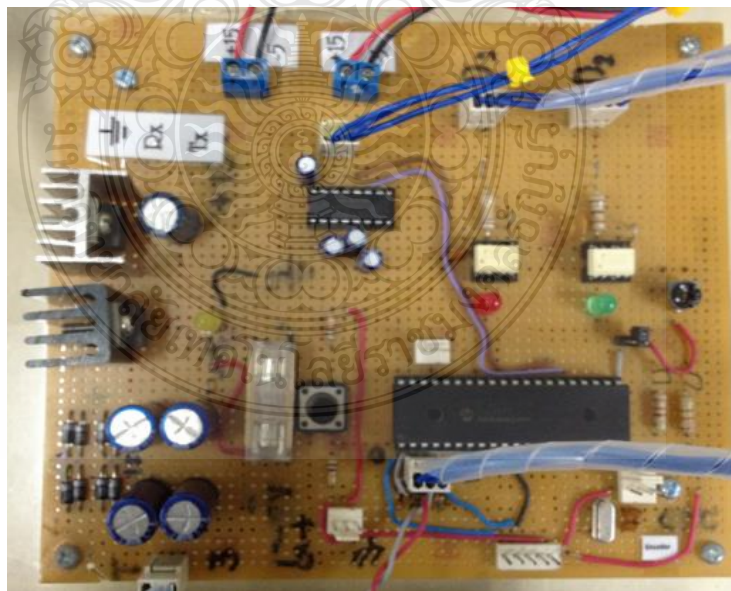
ในการอ่านค่าความเร็วรอบนี้ นอกเหนือจากนำไปใช้งานในส่วนของการรับค่าความเร็วรอบเพื่อนำไปปรับ duty cycle ของสัญญาณ PWM ให้เป็นไปตามความเร็วรอบที่ Set point ยังนำไปใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ด้วยวิธีการ System Identification ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไปเรื่อง “การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ด้วยวิธีการ System Identification” ซึ่งเป็นที่นิยมกันในขณะนี้ เนื่องจากง่ายและอีกทั้งโปรแกรม Matlab มีการรองรับฟังก์ชันและเป็นที่ยอมรับมาโดยตลอด

3.7 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 18F4431 มีส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.39



ภาพที่ 3.39 (ก) ส่วนประกอบต่างๆของวงจรควบคุม



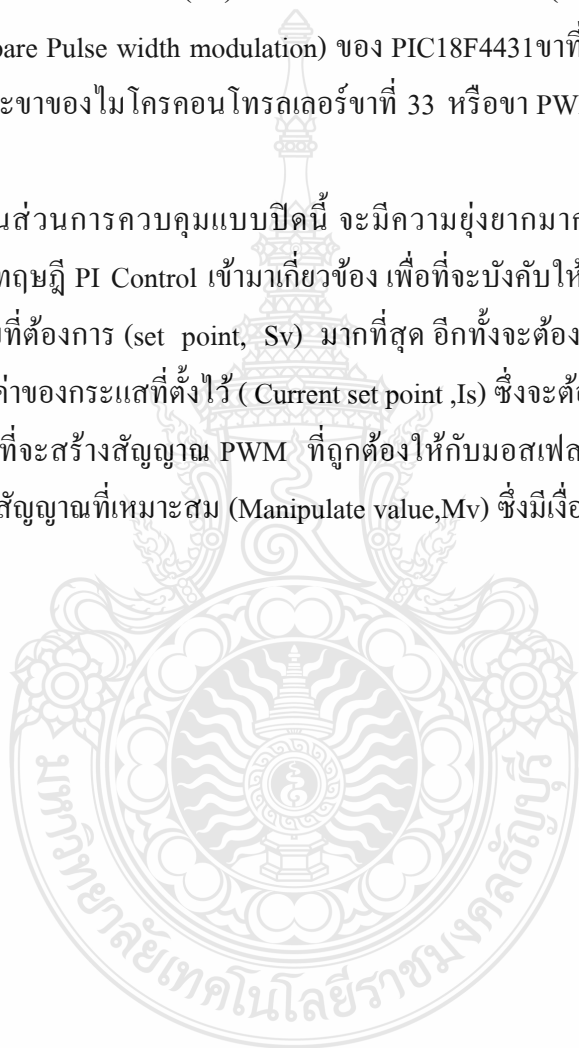
ภาพที่ 3.39 (ข) ส่วนประกอบต่างๆของวงจรควบคุมที่สร้างขึ้นจริง

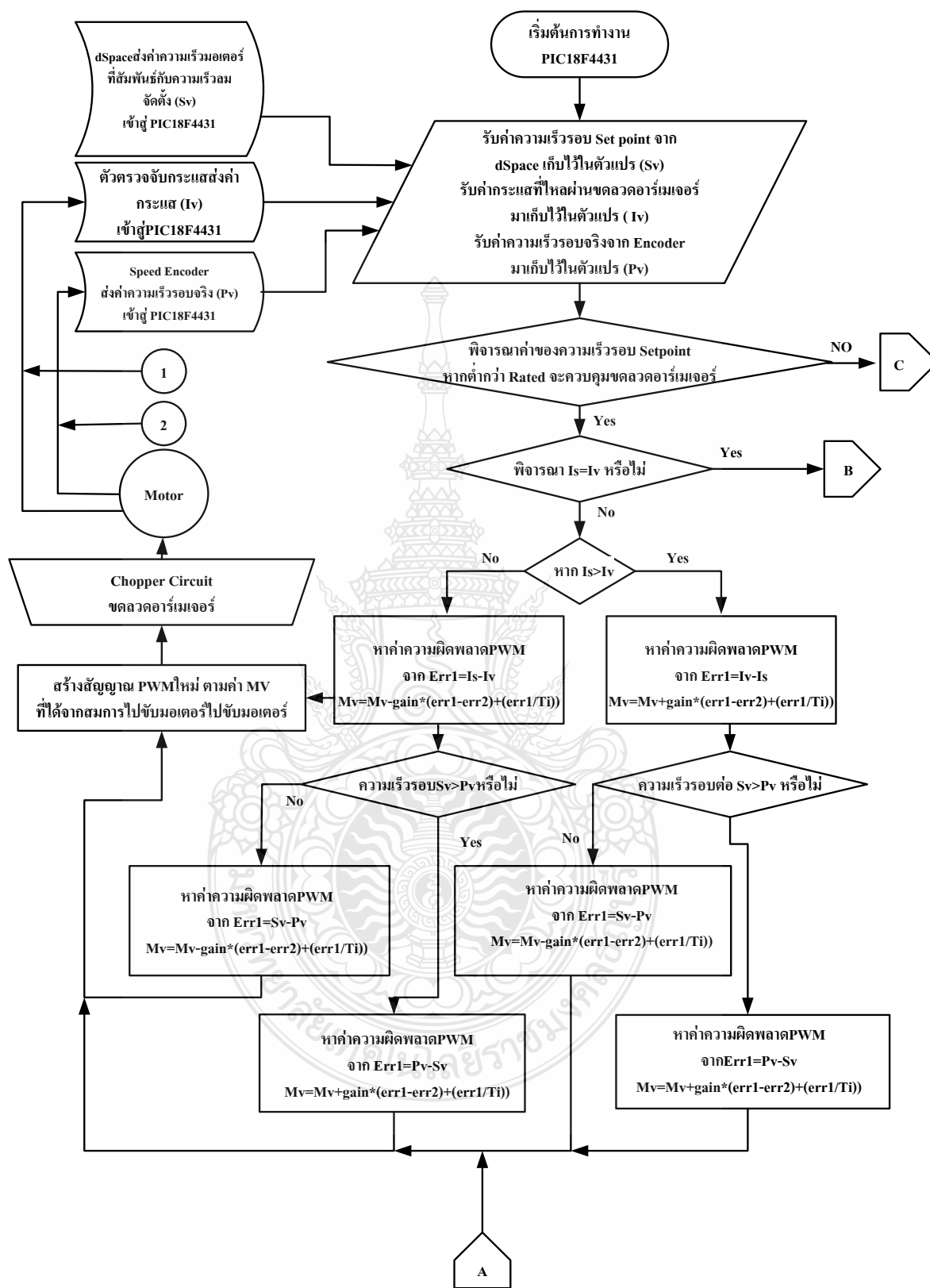
จากภาพที่ 3.39 (ก) และ ภาพที่ 3.39(ข) จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักๆได้แก่ ส่วนของสร้างสัญญาณ PWM ดังจุดที่ 1 เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ ส่วนรับค่ากระแส จุดที่2 ส่วนรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ จุดที่ 3 และส่วนการเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมดังจุดที่ 4 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.7.1 การสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulation)

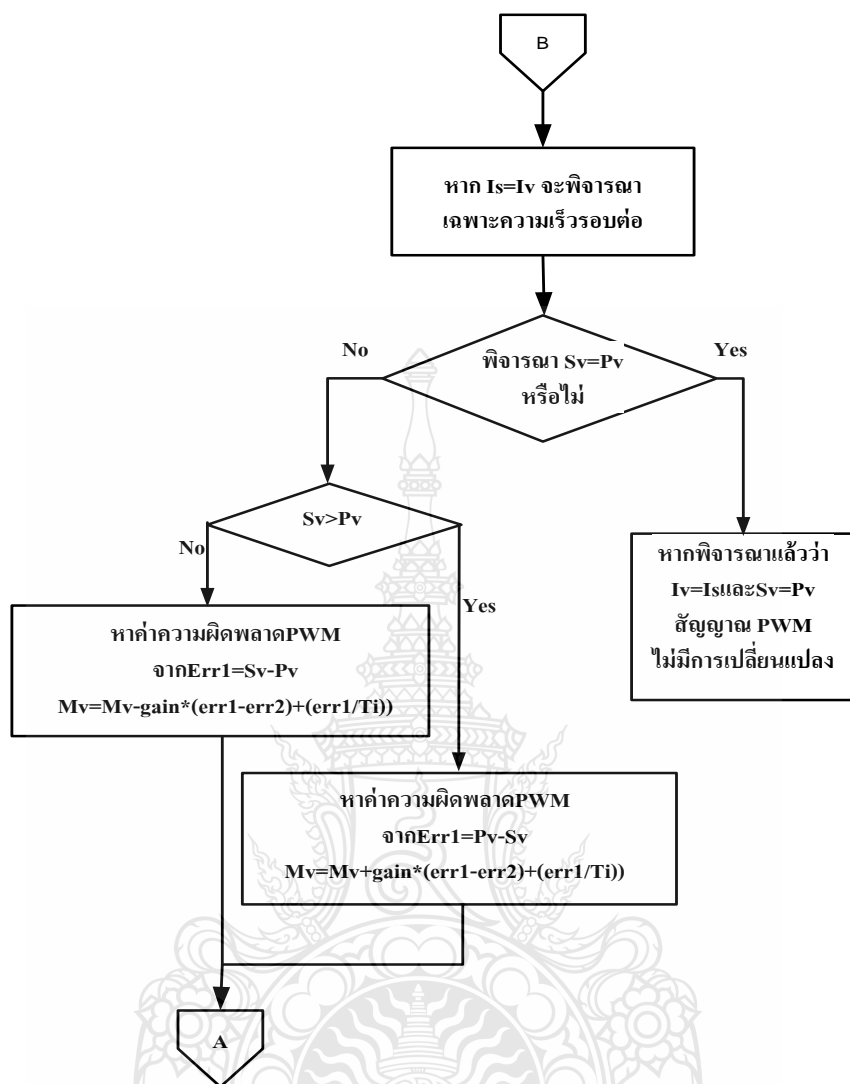
สัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นนี้ จะต้องใช้ในการสับวิตช์มอสเฟสเพื่อใช้ในการปรับแรงดัน 2 ส่วนคือ แรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์ (V_a) และแรงดันขดลวดสนาม (V_f) โดยเลือกใช้ขาสัญญาณ CCP1 (Capture Compare Pulse width modulation) ของ PIC18F4431ขาที่ 17 สำหรับควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์ และขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 33 หรือขา PWM1 สำหรับควบคุมแรงดันขดลวดสนาม

ซอฟต์แวร์ในส่วนการควบคุมแบบปิดนี้ จะมีความยุ่งยากมากกว่าการควบคุมแบบเปิดเนื่องจากจะมีเงื่อนไขทฤษฎี PI Control เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อที่จะบังคับให้ค่าความเร็วรอบที่วัดได้ให้ค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (set point, S_v) มากที่สุด อีกทั้งจะต้องควบคุมในส่วนของค่าของกระแสให้เป็นไปตามค่าของกระแสที่ตั้งไว้ (Current set point , I_s) ซึ่งจะต้องกำหนดเงื่อนไขที่ถูกต้องให้กับซอฟต์แวร์ เพื่อที่จะสร้างสัญญาณ PWM ที่ถูกต้องให้กับมอสเฟสที่เป็นตัวขับเคลื่อนต่อไป โดยเงื่อนไขนี้จะสร้างสัญญาณที่เหมาะสม (Manipulate value, M_v) ซึ่งมีเงื่อนไขตามภาพที่ 3.40 (ก-ง)

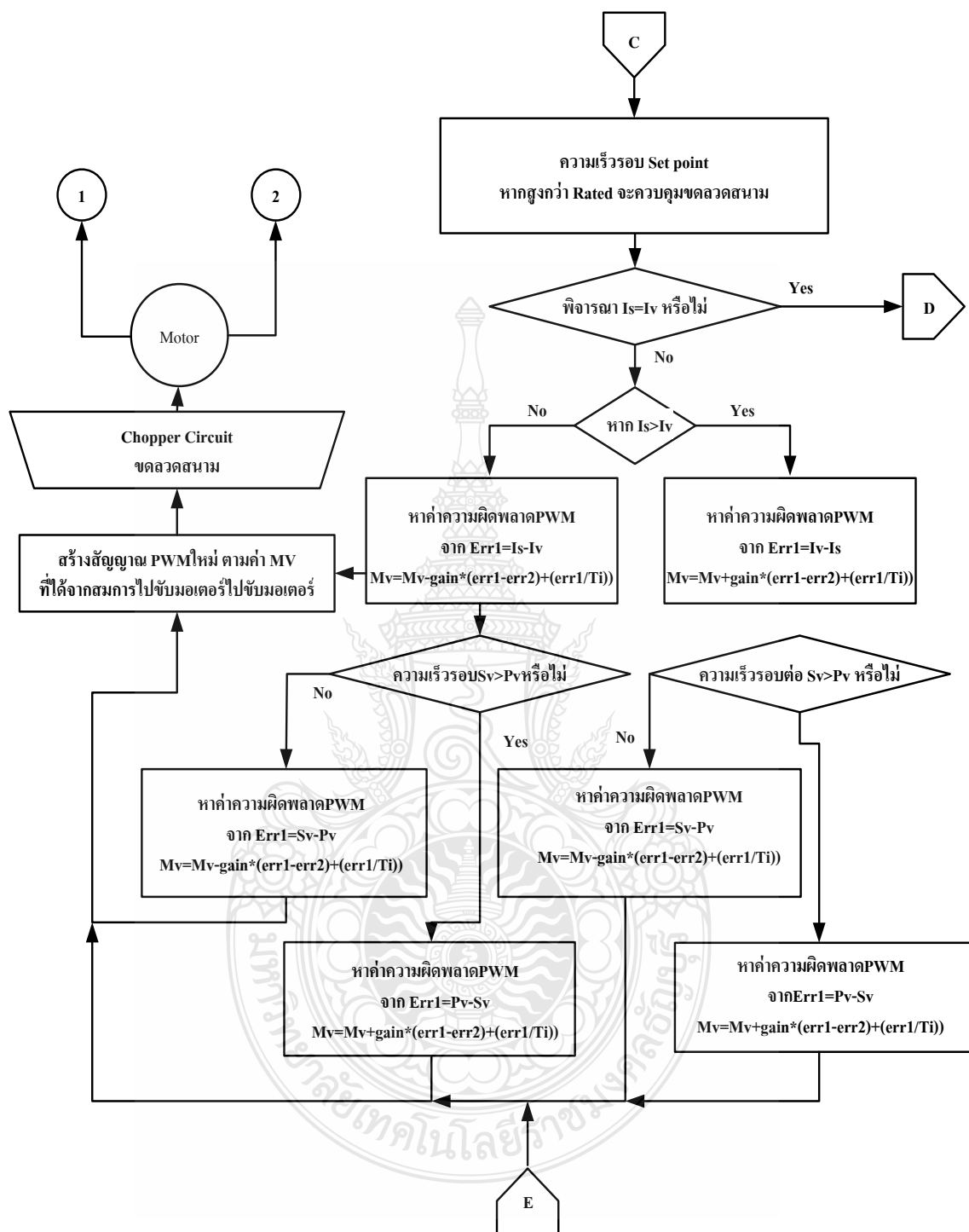




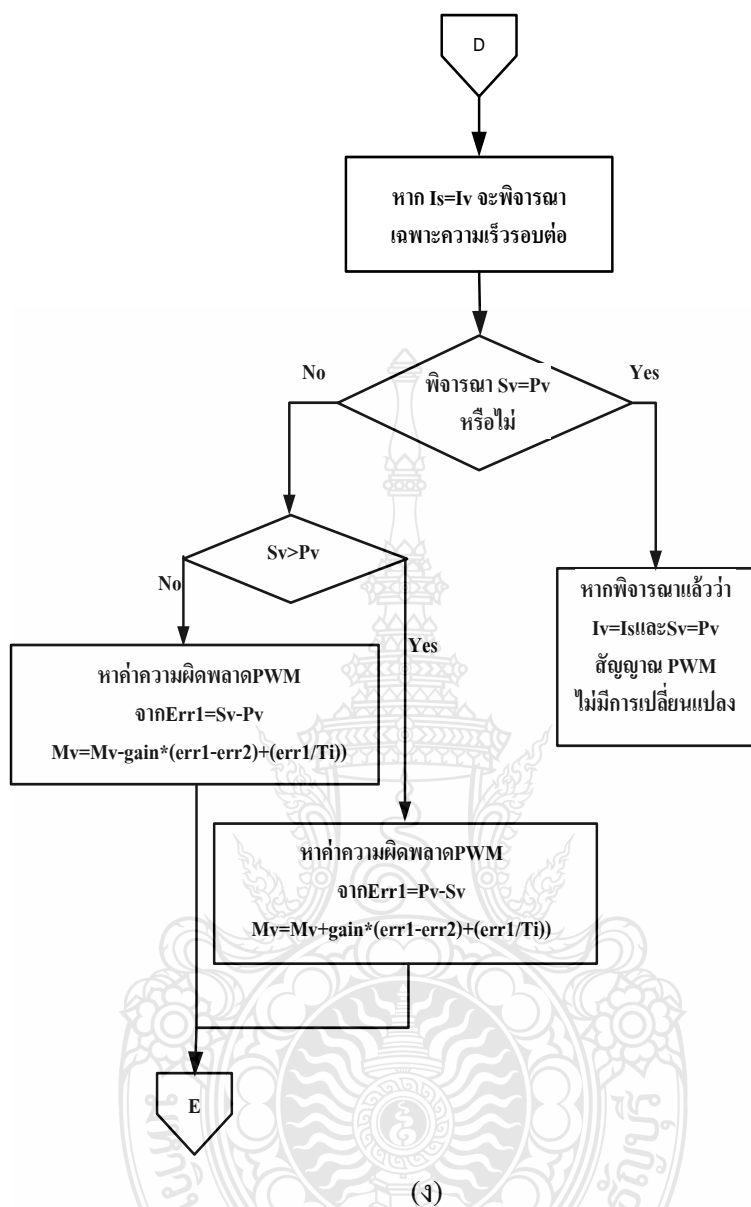
(ก)



(ข)



(ก)



ภาพที่ 3.40 ฟังก์การทำงานของโปรแกรม

จากสมการ PI-Control

$$M_v(t) = M_{v,ss} \pm K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (3.6)$$

กำหนดให้

S_v คือ ค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก DSP card (DSPACE 1104)

P_v คือ ค่าความเร็วรอบที่วัดได้

I_s คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

I_v คือ ค่ากระแสที่วัดได้

M_v คือ สัญญาณควบคุมขนาด 8บิตมีค่าเท่ากับ 0-255

เงื่อนไขที่ 1 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะเพิ่มค่ากระแสให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = I_s - I_v \quad (3.7)$$

$$M_v(t) = M_{v_1} + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (3.8)$$

เมื่อค่า $M_v \geq 254$ ให้ M_v เท่ากับ 254

ถ้าเงื่อนไขที่ 1 เป็นจริงแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมา (S_v) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4

เงื่อนไขที่ 2 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงมากกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะลดค่ากระแสลงโดยการลดค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = I_v - I_s \quad (3.9)$$

$$M_v(t) = M_{v_1} - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \text{ เมื่อค่า } M_v \leq 1 \text{ ให้ } M_v \text{ มีเท่ากับ } 1 \quad (3.10)$$

ถ้าเงื่อนไขที่ 2 เป็นจริงแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมา (S_v) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4 หากเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ไม่เป็นจริงก็โปรแกรมก็จะข้ามมาตรวจสอบเงื่อนไขที่ 3 และ 4 เลย

เงื่อนไขที่ 3 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมา โปรแกรมจะเพิ่มค่าความเร็วรอบให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = S_v - P_v \quad (3.11)$$

$$M_v(t) = M_{v_1} + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (3.12)$$

เมื่อค่า $M_v \geq 254$ ให้ M_v เท่ากับ 254

เงื่อนไขที่ 4 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงมากกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC18F4431 โปรแกรมจะลดค่าความเร็วรอบให้ต่ำลงโดยการลดค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = P_v - S_v \quad (3.14)$$

$$M_v(t) = M_{v_1} - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (3.15)$$

เมื่อค่า $M_v \leq 1$ ให้ M_v มีเท่ากับ 1

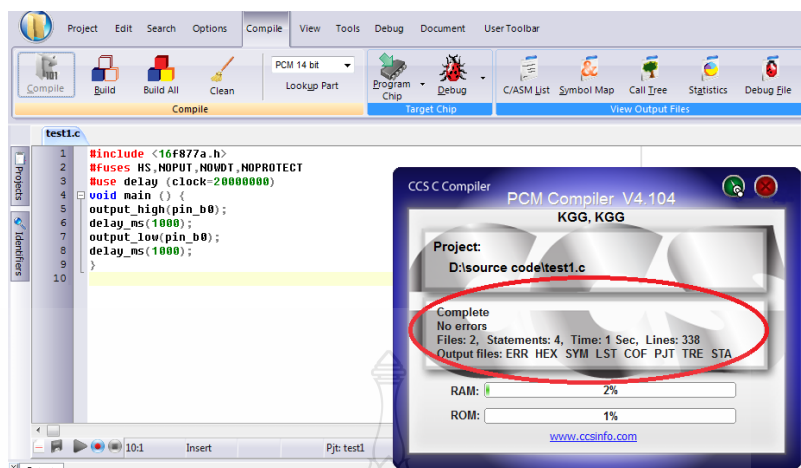
เงื่อนไขที่ 5 หาก $I_s = I_v$ แล้วตรวจสอบ $P_v = S_v$ แล้ว แสดงว่าสัญญาณ M_v ที่ได้มีความถูกต้องแล้ว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ

วงจรมอเตอร์คอนโทรลเลอร์นี้เป็นส่วนสำคัญของระบบควบคุม ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่รับมาจากวงจรดังกล่าวข้างต้น มาตรฐานระบบป้องกันต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสัญญาณ PWM, รับค่าและแสดงผลด้วย ซึ่งการทำงานในส่วนนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมทั้งหมด เนื่องจากจะทำให้วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด ความยืดหยุ่นในการทำงาน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมได้ง่าย และมีเสถียรภาพในการทำงานสูง ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้เลือกใช้เบอร์ PIC16F887 ของบริษัท Microchip ขนาด 8 บิต โดยคุณสมบัติการทำงานที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

- (ก) ความเร็วในการทำงาน 10 MIPS (Mega Instruction Per Second)
- (ข) มีไมโครเมมโมรี่/แคร์เตอร์ ขนาด 8/16 บิต
- (ค) มีส่วนสร้างสัญญาณ PWM ที่สามารถควบคุมวงจรมอเตอร์อินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟสแบบ ฮาล์ฟบริดจ์หรือฟูลบริดจ์ได้
- (ง) มีส่วนสร้างสัญญาณประวิงเวลาสำหรับ PWM
- (จ) สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่ทำงานแบบ I^2C ได้
- (ฉ) มีหน่วยความจำข้อมูลขนาด 1536 Bytes
- (ช) มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิดแฟลชขนาด 32 kbytes
- (ซ) มีวงจรแปลงจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล 8 ช่อง
- (ณ) มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต ทั้งหมด 5 พอร์ต คือ A,B,C,D,และE
- (ญ) มีวงจรรีเซ็ตตัวเองเมื่อป้อนไฟเลี้ยง
- (ฎ) ทำงานที่ระดับไฟเลี้ยง 5-9 V

3.8 การออกแบบในส่วนของ Software

การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ด้วยโปรแกรม CCS 'C' Compiler



ภาพที่ 3.41 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาซีด้วยโปรแกรม CCS 'C' Compiler

ในการเขียนภาษาซีเพื่อที่จะควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC นั้นสามารถเลือกใช้ได้มากมายหลายโปรแกรม ตัวอย่างเช่น โปรแกรม for PIC, โปรแกรม PIC Basic PRO, โปรแกรม C Compiler และโปรแกรม CCS 'C' Compiler ซึ่งจะเป็นภาษาซีที่แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากโปรแกรมนี้อาศัยภาษาซีที่ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากกว่าโปรแกรมอื่นๆ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม PIC C Compiler ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งมีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM ไว้ให้ 8 ชุด และในงานวิจัยนี้ใช้เพียง 2 ชุดเท่านั้นใช้รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต เพื่อควบคุมแรงดันอาร์มเจอร์และแรงดันฟิลต์ การคอมไพล์ใช้โปรแกรม Pickit 2 คู่กับบอร์ด Pickit 2 โดยการดึงไฟล์นามสกุล .hex ซึ่งโปรแกรม CCS PIC 'C' Compiler สามารถรองรับโปรแกรม Pickit 2 จึงทำให้ง่ายต่อการคอมไพล์ ซึ่งมีฟังก์ชันการคอมไพล์เฮกไฟล์แบบอัตโนมัติให้ใช้ จึงสามารถที่จะใช้งานได้อย่างรวดเร็วมากขึ้นวงจรควบคุมนี้จะรับสัญญาณ pulse ที่มาจาก encoder ซึ่งยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์ รับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์และรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดมาจาก DS1104 เข้ามาเป็นสัญญาณ ADC และจะเข้าสู่เงื่อนไข การเขียนโปรแกรมจะสอดคล้องกับการทดลอง นั่นคือมีการกำหนดให้

1. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์
2. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์
3. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบสูงเกินกว่าพิกัดของมอเตอร์

โดยข้อมูลการสั่งงานให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่ความเร็วย่านต่าง ๆ นั้น จะรับข้อมูลมาจาก DS1104 ส่งค่าเป็นอนาล็อกแล้วจึงนำสัญญาณอนาล็อกนี้ต่อเข้ากับขาสัญญาณ ADC ของ

PIC18F4431 นอกจากนี้แล้วการควบคุมความเร็วรอบนั้น จะอาศัยทฤษฎี PI control และยังมี การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์อีกด้วยในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และ คอมพิวเตอร์นั้น อาศัยการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 โดยต่อผ่าน MAX232 ที่เป็นอุปกรณ์ใน การเชื่อมต่อ ซึ่งวงจรควบคุมนี้จะรับสัญญาณ pulse ที่มาจาก encoder ซึ่งยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์ รับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์และรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดมาจาก DS1104 เข้า มาเป็นสัญญาณ ADC และจะเข้าสู่เงื่อนไข

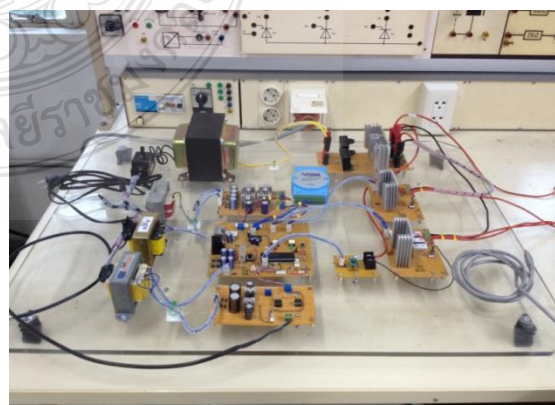
ในส่วนของการรับค่าต่างๆ ได้แก่

1. สัญญาณความเร็ว ได้เลือกใช้ encoder ที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม 600 สัญญาณต่อ รอบ ของบริษัท Shimpco รุ่น RE1-600-C มาใช้โดยต่อสายสัญญาณเข้ากับขา CCP2 ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 โดยการเขียนภาษาซีรับค่าความเร็วรอบ
2. ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ใช้เซนเซอร์กระแสเบอร์ ACS711ELCTR-25AB ที่ สามารถยอมให้กระแสไหลผ่านได้สูงสุดถึง 25 แอมแปร์ โดยสัญญาณนี้จะต่อเข้ากับ AN0 ของ PIC18F4431
3. สัญญาณข้อมูลความเร็วรอบที่รับมาจาก DS1104 เป็นตัวกำหนดความเร็วรอบให้ PIC18F4431 นั้นจะเป็นสัญญาณอนาล็อก เมื่อได้สัญญาณแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับขา AN1 ของ PIC18F4431 ทั้ง 3 สัญญาณที่ต่อเข้า PIC18F4431 จะเป็นข้อมูลเพื่อที่จะนำไปคำนวณค่าในทฤษฎี PI Control ต่อไป

ซึ่งการทำงานของโปรแกรมนั้นได้กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อที่ 3.3 เรื่องวงจรควบคุมการ ทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC และผังการทำงานของโปรแกรมห่วงที่ 3.8 ในส่วน ของภาษาซีที่ใช้ในการเขียนสั่งงานนั้น ใช้ในหลายการทดสอบเพื่อหาค่าต่างๆมากมาย ซึ่งมีความยาว ของโปรแกรมเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้จึงขอยกอธิบายไว้ในส่วนของภาคผนวกต่อไป



(ก) ชุด dSPACE



(ข) ชุดวงจรควบคุมทั้งหมด



(ค) การทดสอบกับโหลดความต้านทาน

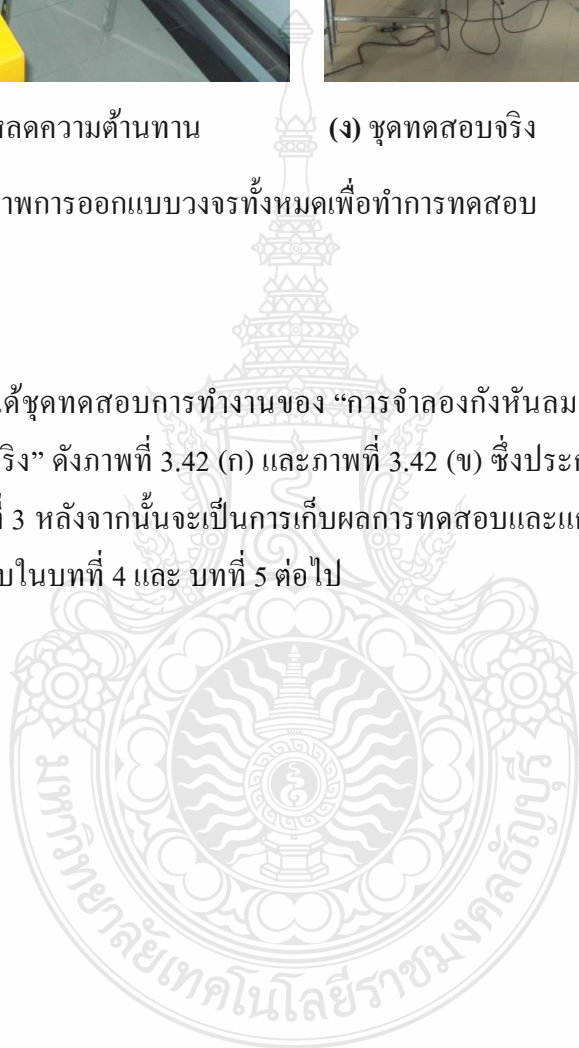


(ง) ชุดทดสอบจริง

ภาพที่ 3.42 ประมวลภาพการออกแบบวงจรทั้งหมดเพื่อทำการทดสอบ

3.9 สรุป

สุดท้ายจะได้ชุดทดสอบการทำงานของ “การจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า กระแสตรงแบบเวลาจริง” ดังภาพที่ 3.42 (ก) และภาพที่ 3.42 (ข) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่ได้กล่าวมาตลอดทั้งบทที่ 3 หลังจากนั้นจะเป็นการเก็บผลการทดสอบและแก้ไขในส่วนต่างๆ ตลอดจนการสรุปผลการทดสอบในบทที่ 4 และ บทที่ 5 ต่อไป

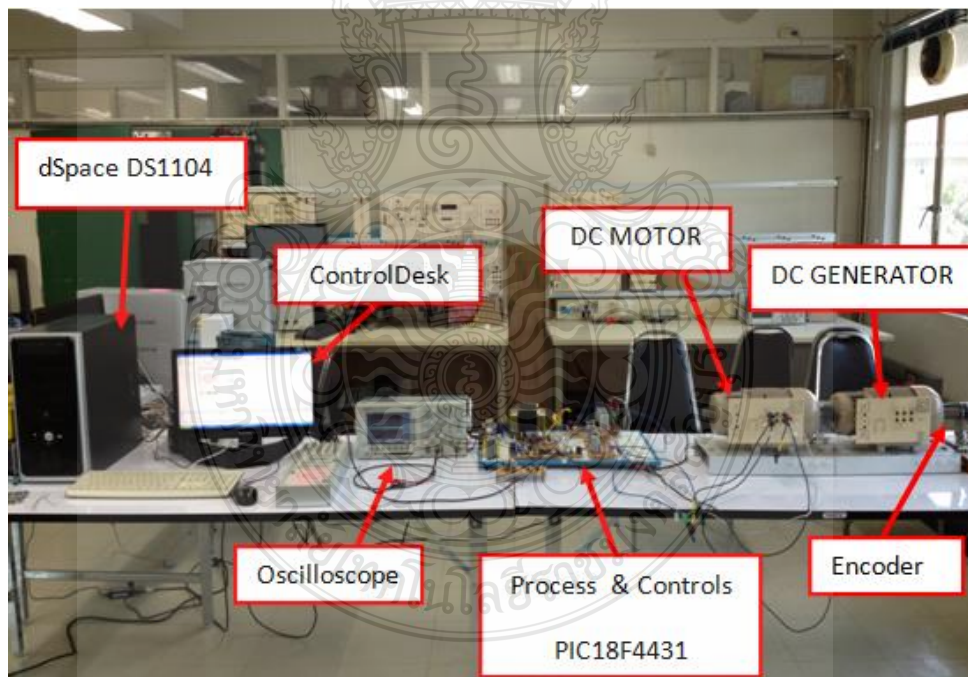


บทที่ 4

การทดสอบ

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อทดสอบการจำลองการทำงานของกังหันลมที่ใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แบบเวลาจริง โดยการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ให้เป็นไปตามเงื่อนไขซึ่งควบคุมสัญญาณความเร็วอ้างอิง (Speed Reference) โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกังหันลมบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ DSP board เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา ทั้งในส่วนของควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์และในส่วนของควบคุมแรงดันขดลวดสนามและทำการเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อวัดค่าแรงดันและกระแสที่ได้



ภาพที่ 4.1 การทดสอบการจำลองกังหันลมด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงแบบเวลาจริง

4.2 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดต้นแบบการจำลองกังหันลมด้วยคอมพิวเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบไปด้วย
 - ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 18F4431
 - มอสเฟต IRFP460LC
 - IC OPTO TLP250
 - เซนเซอร์กระแส ACS711ELCTR-25AB
 - Encoder Shimpo RE 1-600-C
 - MAX232
 - PIC kit2
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์ 220 โวลต์
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์ 220 โวลต์
4. เครื่องประมวลผล dSPACE DS1104
5. ความต้านทานปรับค่าได้ชนิดกำลังสูงขนาด 0-300 Ω
6. ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS2014B
7. โวลต์มิเตอร์
8. แอมมิเตอร์
9. คอมพิวเตอร์ สำหรับ รับค่าจากโปรแกรม HyperTerminal

4.3 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

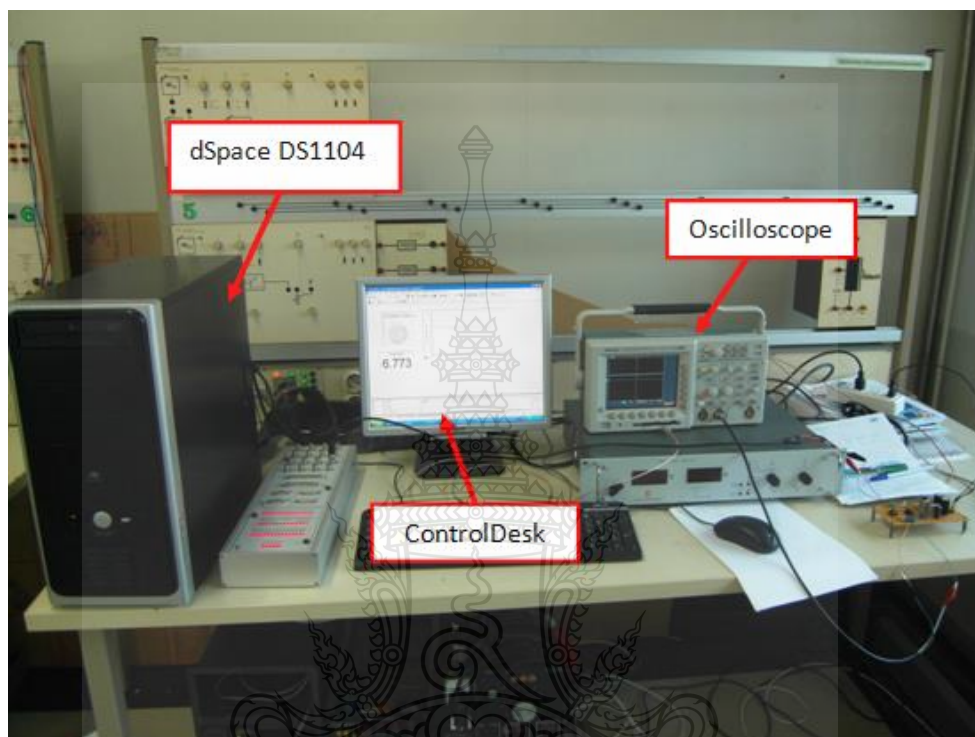
ขั้นตอนในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

4.3.1 การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซ dSPACE DS1104

การทดสอบในส่วนนี้เป็นการทดสอบโดยการจำลองการทำงานของกังหันลม สามารถทำการทดลองได้โดยไม่ต้องต่อวงจรภายนอก เพียงแต่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่ได้ออกแบบมาแล้วโดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลอง ในส่วนแบบจำลองของแต่ละส่วนซึ่งกำหนดค่าต่างๆ โดยอ้างอิงข้อมูลของกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ [11] และกำหนดค่า Blade Diameter เท่ากับ 2.7 m, ความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3 และทดสอบที่ความเร็วลม 4 ระดับ คือ

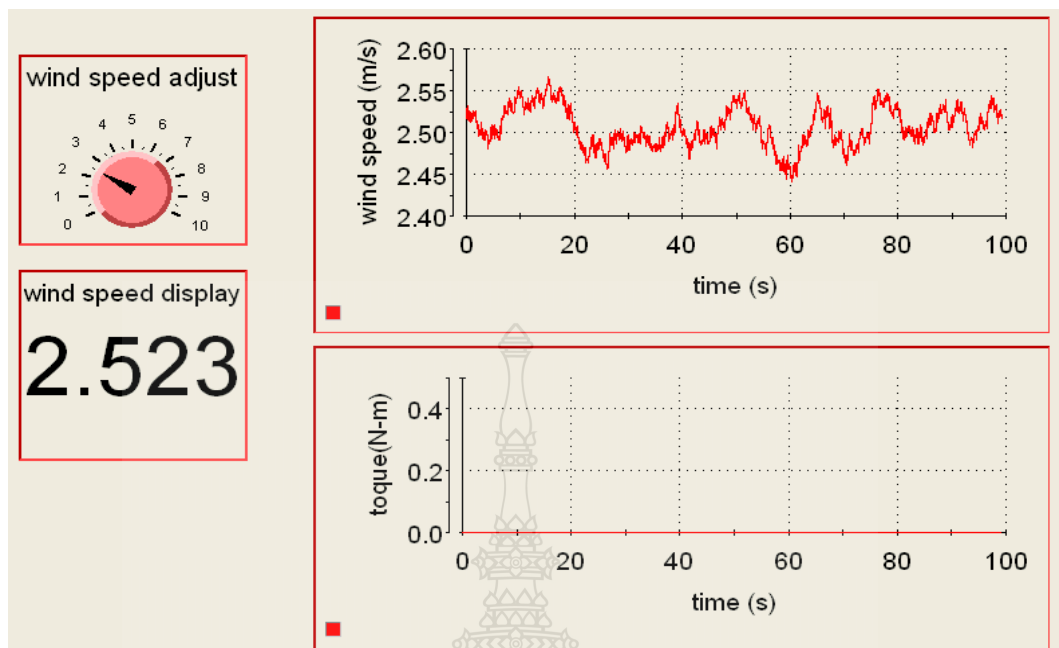
1. ระดับความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมเริ่มหมุน 2.5 m/s

2. ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า 3 m/s
3. ระดับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย 5.5 m/s
4. ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าเต็มอัตราการผลิตพิกัด 9 m/s

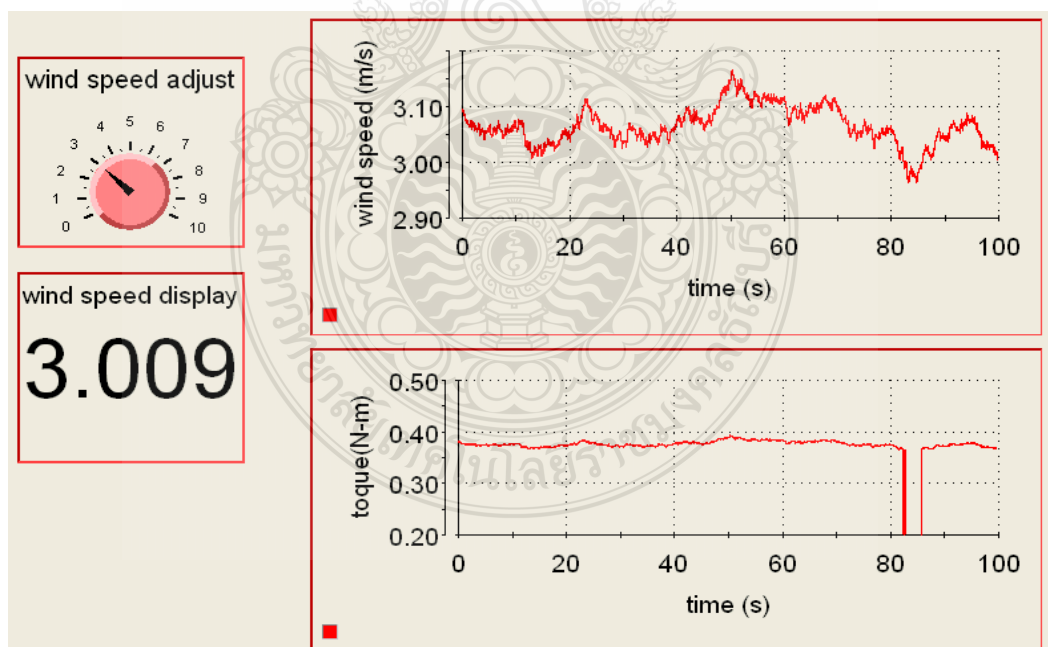


ภาพที่ 4.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบ การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE DS1104

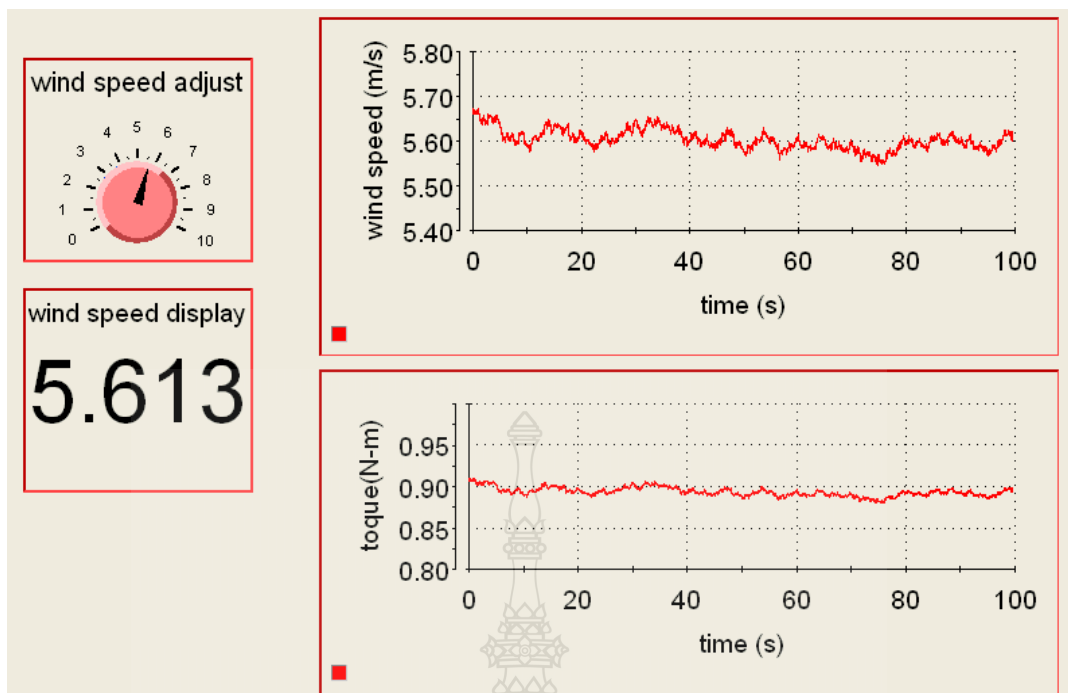
เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลองเพื่อดูสัญญาณความเร็วอ้างอิง (Speed reference) และแรงบิด (Torque) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ เมื่อเราทำการเปรียบเทียบสัญญาณแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model) และสัญญาณแบบจำลองกังหัน (Wind Turbine Model) จากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในลักษณะสัญญาณทันเวลา จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันทั้งสองสัญญาณ



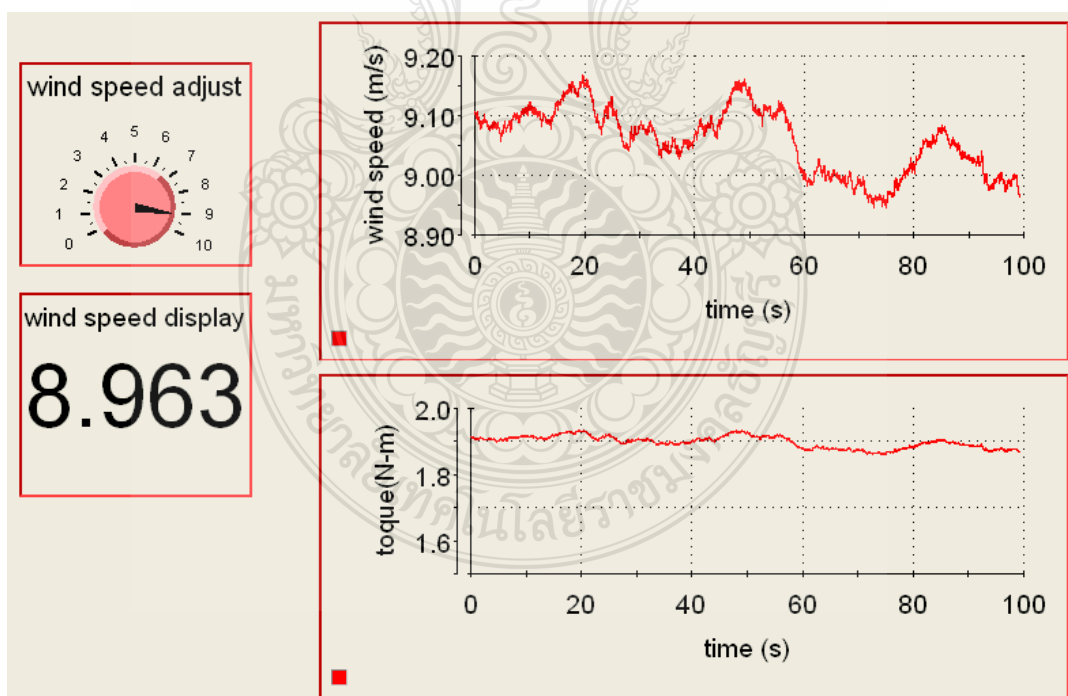
ภาพที่ 4.3 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 2.5 m/s จากแบบจำลองกึ่งหุ่นยนต์



ภาพที่ 4.4 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 3 m/s จากแบบจำลองกึ่งหุ่นยนต์



ภาพที่ 4.5 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 5.5 m/s จากแบบจำลองกึ่งหั่นลม



ภาพที่ 4.6 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 9 m/s จากแบบจำลองกึ่งหั่นลม

จากภาพที่ 4.3 เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104 แล้วทำการปรับค่าความเร็วลม (Wind Speed adjust) ที่สร้างด้วยโปรแกรม Control Desk ในรูปแบบทันเวลา ที่ค่าความเร็วลมประมาณ 2.5 m/s ผลที่ได้คือ ค่าความเร็วลม จะแกว่งอยู่ที่ช่วง 2.4-2.6 m/s และค่าแรงบิดมีค่าน้อยน้อยมากที่ประมาณ 0.1 N-m

จากภาพที่ 4.4 เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104 แล้วทำการปรับค่าความเร็วลม (Wind Speed adjust) ที่สร้างด้วยโปรแกรม Control Desk ในรูปแบบทันเวลา ที่ค่าความเร็วลมประมาณ 3.0 m/s ผลที่ได้คือ ค่าความเร็วลม จะแกว่งอยู่ที่ช่วง 2.9-3.1 m/s และค่าแรงบิดมีค่าที่ประมาณ 0.38 N-m

จากภาพที่ 4.5 เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104 แล้วทำการปรับค่าความเร็วลม (Wind Speed adjust) ที่สร้างด้วยโปรแกรม Control Desk ในรูปแบบทันเวลา ที่ค่าความเร็วลมประมาณ 5.5 m/s ผลที่ได้คือ ค่าความเร็วลม จะแกว่งอยู่ที่ช่วง 5.5-5.7 m/s และค่าแรงบิดมีค่าที่ประมาณ 0.9 N-m

จากภาพที่ 4.6 เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104 แล้วทำการปรับค่าความเร็วลม (Wind Speed adjust) ที่สร้างด้วยโปรแกรม Control Desk ในรูปแบบทันเวลา ที่ค่าความเร็วลมประมาณ 9.0 m/s ผลที่ได้คือ ค่าความเร็วลม จะแกว่งอยู่ที่ช่วง 8.9-9.2 m/s และค่าแรงบิดมีค่าที่ประมาณ 1.8 N-m

4.3.2. การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE DS1104

การทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการนำค่าที่ได้จากการจำลองความเร็วอ้างอิง (speed reference) จากการควบคุมด้วยโปรแกรม Control Desk มาป้อนให้กับชุดต้นแบบการจำลองกังหันลมด้วยควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

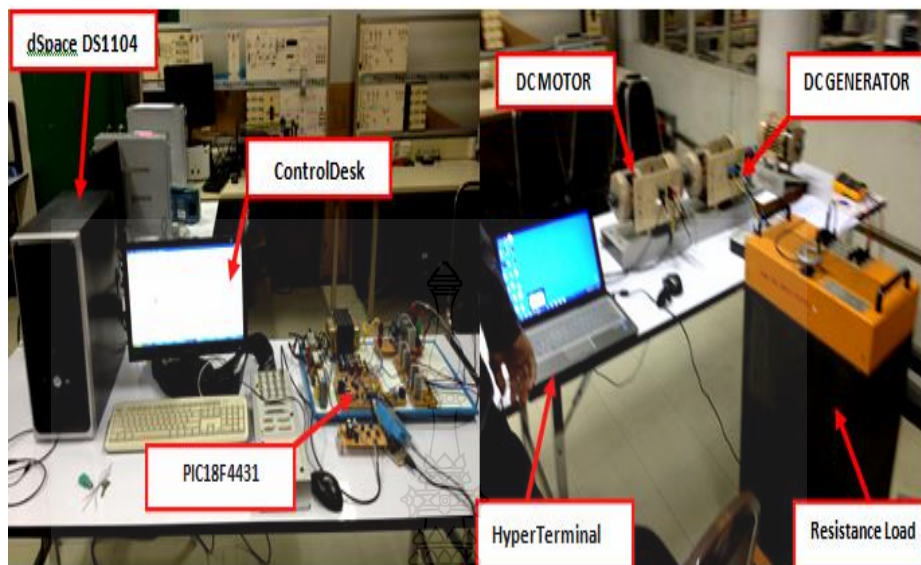
ซึ่งจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่าพิคคของมอเตอร์คือที่แรงดัน 0-175 โวลต์ที่ 80% ของพิคค

- เก็บผลที่ประมาณ 750 ค่าที่เวลา 75 วินาที

- คับปลั๊ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่ได้

- ทดสอบโหลดความต้านทานปรับค่า 4 สเต็ป 100 โอห์ม, 150 โอห์ม, 200 โอห์มและ 250 โอห์ม ตามลำดับ

- เก็บผลการทดสอบผ่าน โปรแกรม HyperTerminal

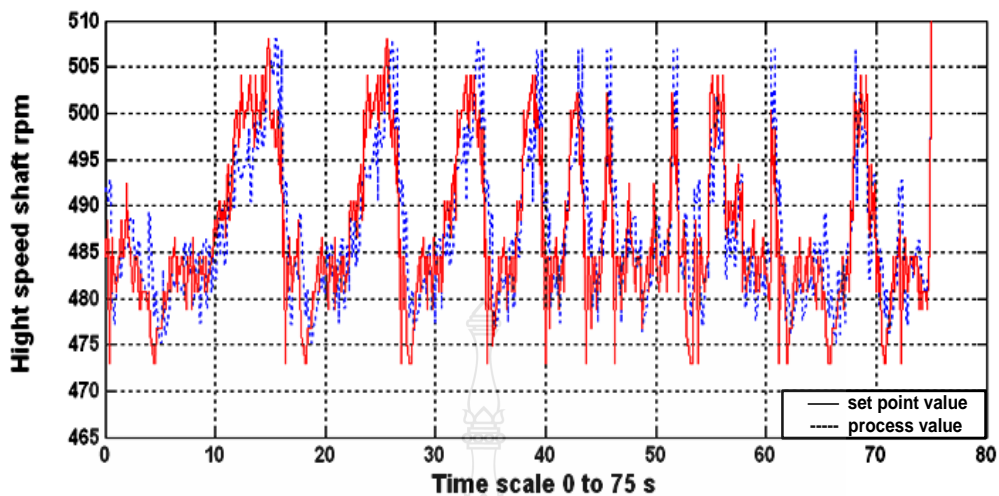


ภาพที่ 4.7 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5 m/s

File	Edit	Format	View	Help
404.88	1023	1.21	50.74	51.51 1.16
404.78	1023	1.22	51.17	51.33 1.13
404.56	1023	1.21	50.74	51.35 1.05
402.51	1023	1.18	49.52	51.6 0.95
400.47	1023	1.21	50.74	51.6 0.89
400.47	1023	1.2	50.33	50.38 1.00
400.47	1023	1.21	50.95	50.38 1.10
401.08	1023	1.2	50.84	49.92 0.98
401.69	1023	1.2	50.54	49.97 1.05
401.55	1023	1.2	50.33	50.52 1.08
401.41	1023	1.2	50.54	50.52 1.16
401.46	1023	1.21	50.74	50.74 1.13
401.5	1023	1.21	50.74	50.74 1.13
401.81	1023	1.21	50.74	50.48 1.05
402.12	1023	1.22	51.15	50.18 1.00
402.09	1023	1.21	50.74	50.81 0.97
402.07	1023	1.21	50.74	50.81 0.89
402.42	1023	1.22	51.15	50.84 0.95
402.77	1023	1.22	51.15	50.84 0.87
403.56	1023	1.23	51.56	50.82 0.95
404.34	1023	1.21	50.95	50.82 1.00
404.18	1023	1.21	50.94	51.15 1.10
404.02	1023	1.21	50.74	51.15 1.10
403.42	1023	1.2	50.54	51.18 1.10
402.82	1023	1.2	50.33	51.18 1.05
402.78	1023	1.2	50.54	50.61 0.95
402.75	1023	1.21	50.74	50.61 0.89
402.77	1023	1.21	50.74	50.76 0.89
402.79	1023	1.21	50.74	50.76 0.92
402.45	1023	1.2	50.54	50.92 1.05
402.12	1023	1.19	50.13	50.92 1.05
402.16	1023	1.2	50.54	50.54 1.16
402.2	1023	1.19	50.13	50.54 1.10
402.11	1023	1.2	50.33	50.47 1.10
402.02	1023	1.2	50.33	50.47 1.00
402.05	1023	1.2	50.33	50.35 0.95

- Duty cycle ของ PWM ที่ อาร์มเจอร์ โวลต์เตจ (Va)
- Duty cycle ของ PWM ที่ เฟลด์ (Vf)
- กระแสไหลผ่านมอเตอร์ ที่ได้จากการคำนวณ
- ความเร็วรอบ Input จาก DS1104
- ความเร็วรอบ Output ควบคุมด้วย PIC
- กระแสที่ได้จากการวัด

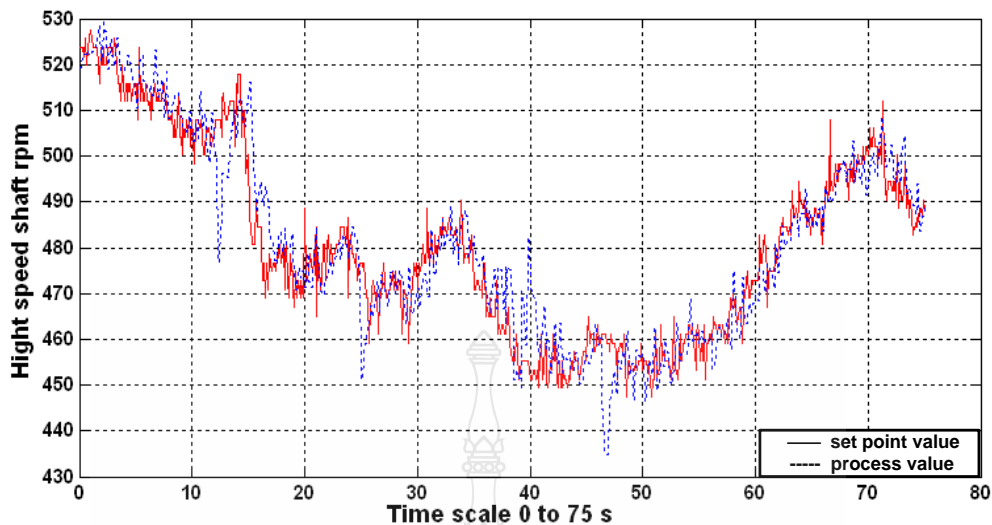
ภาพที่ 4.8 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

File	Edit	Format	View	Help			
376.83	1023	1.3	54.84	54.37	0.84		
377.34	1023	1.3	54.84	54.37	0.81		
377.53	1023	1.3	54.84	54.69	0.79		
377.72	1023	1.3	54.63	54.69	0.74		
378.11	1023	1.31	55.04	54.7	0.79		
378.5	1023	1.3	54.43	54.7	0.74		
378.59	1023	1.3	54.84	54.79	0.84		
378.68	1023	1.3	54.84	54.79	0.84		
379.11	1023	1.31	55.04	54.66	0.76		
379.53	1023	1.31	55.24	54.66	0.87		
379.88	1023	1.31	55.04	54.74	1.05		
380.23	1023	1.3	54.84	54.74	0.95		
380.32	1023	1.3	54.84	54.79	0.89		
380.41	1023	1.3	54.84	54.79	0.89		
380.39	1023	1.3	54.84	54.9	0.84		
380.38	1023	1.3	54.84	54.9	0.74		
379.51	1023	1.3	54.43	55.34	0.84		
378.65	1023	1.29	54.02	55.34	0.84		
378.99	1023	1.3	54.84	54.54	0.92		
379.33	1023	1.3	54.43	54.54	0.95		
378.73	1023	1.3	54.84	55.48	0.89		
378.13	1023	1.3	54.43	55.48	0.95		
377.4	1023	1.3	54.43	55.2	0.95		
376.68	1023	1.3	54.43	55.2	0.89		
377.22	1023	1.3	54.84	54.34	0.84		
377.77	1023	1.3	54.84	54.34	0.84		
377.63	1023	1.3	54.84	55.02	0.79		
377.5	1023	1.3	54.84	55.02	0.74		
377.72	1023	1.3	54.84	54.66	0.74		
377.95	1023	1.3	54.63	54.66	0.79		
378.63	1023	1.31	55.04	54.41	0.76		
379.3	1023	1.3	54.84	54.41	0.79		
378.72	1023	1.3	54.43	55.06	0.92		
378.14	1023	1.29	54.02	55.06	0.84		
377.55	1023	1.29	54.02	54.65	0.84		
376.96	1023	1.29	54.02	54.65	0.95		

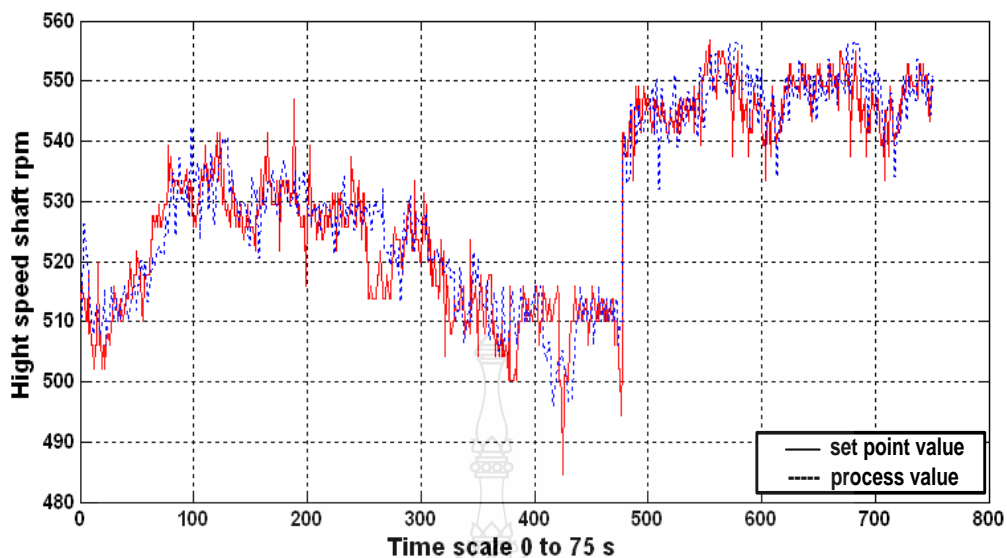
ภาพที่ 4.10 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

File	Edit	Format	View	Help
1023	1.28	53.81	53.48	0.59
1023	1.29	54.02	53.48	0.07
1023	1.28	53.81	55.1	2.44
1023	1.28	53.81	55.1	0.86
1023	1.27	53.4	54.55	0.59
1023	1.27	53.4	54.55	0.70
1023	1.29	54.22	54.13	0.49
1023	1.27	53.2	54.13	0.80
1023	1.27	53.4	53.57	0.52
1023	1.26	52.99	53.57	0.28
1023	1.26	52.99	53.18	0.65
1023	1.25	52.58	53.18	0.70
1023	1.26	52.99	53.64	0.70
1023	1.26	52.99	53.64	0.31
1023	1.26	52.99	53.69	0.75
1023	1.3	54.43	53.69	0.08
1023	1.26	52.99	53.2	0.54
1023	1.27	53.2	53.2	1.08
1023	1.25	52.58	53.45	3.99
1023	1.26	52.99	53.45	0.83
1023	1.26	52.99	53.98	0.94
1023	1.25	52.58	53.98	0.52
1023	1.26	52.99	52.99	0.70
1023	1.27	53.2	53.4	0.62
1023	1.27	53.2	53.4	0.60
1023	1.26	52.99	53.4	0.70
1023	1.27	53.4	54.02	0.20
1023	1.27	53.4	53.81	0.07
1023	1.27	53.4	53.81	0.88
1023	1.29	54.02	53.4	0.38
1023	1.28	53.81	53.61	0.00
1023	1.28	53.81	53.81	2.34
1023	1.27	53.4	53.4	0.13
1023	1.28	53.61	53.61	0.80
1023	1.28	53.81	53.4	0.17
1023	1.27	53.4	53.61	0.70

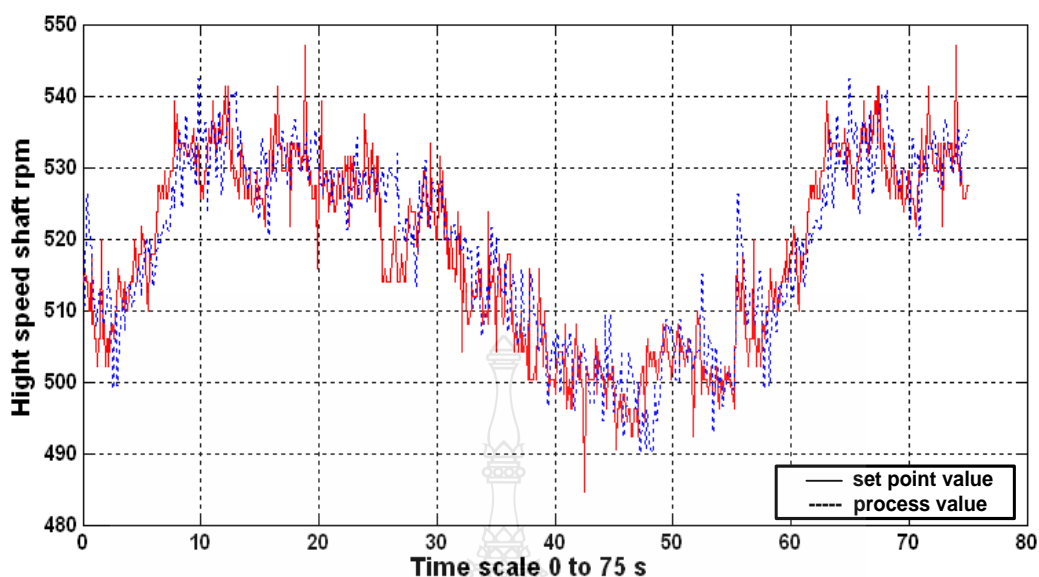
ภาพที่ 4.12 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

File	Edit	Format	View	Help			
318.51	1023	1.28	53.81	53.48	0.59		
318.88	1023	1.29	54.02	53.48	0.07		
317.64	1023	1.28	53.81	55.1	2.44		
316.39	1023	1.28	53.81	55.1	0.86		
315.29	1023	1.27	53.4	54.55	0.59		
314.19	1023	1.27	53.4	54.55	0.70		
314.33	1023	1.29	54.22	54.13	0.49		
314.46	1023	1.27	53.2	54.13	0.80		
314.35	1023	1.27	53.4	53.57	0.52		
314.23	1023	1.26	52.99	53.57	0.28		
314.09	1023	1.26	52.99	53.18	0.65		
313.95	1023	1.25	52.58	53.18	0.70		
313.35	1023	1.26	52.99	53.64	0.70		
312.75	1023	1.26	52.99	53.64	0.31		
312.11	1023	1.26	52.99	53.69	0.75		
311.46	1023	1.3	54.43	53.69	0.08		
311.3	1023	1.26	52.99	53.2	0.54		
311.15	1023	1.27	53.2	53.2	1.08		
310.33	1023	1.25	52.58	53.45	3.99		
309.51	1023	1.26	52.99	53.45	0.83		
308.57	1023	1.26	52.99	53.98	0.94		
307.62	1023	1.25	52.58	53.98	0.52		
307.07	1023	1.26	52.99	53.59	0.70		
306.52	1023	1.27	53.2	53.59	0.62		
307.5	1023	1.27	53.2	52.27	0.60		
308.47	1023	1.26	52.99	52.27	0.70		
308.46	1023	1.27	53.4	53.46	0.20		
308.45	1023	1.27	53.4	53.46	0.07		
309.59	1023	1.27	53.4	52.31	0.88		
310.73	1023	1.29	54.02	52.31	0.38		
311.5	1023	1.28	53.81	53.09	0.00		
312.26	1023	1.28	53.81	53.09	2.34		
312.17	1023	1.27	53.4	53.54	0.13		
312.08	1023	1.28	53.61	53.54	0.80		
312.84	1023	1.28	53.81	53.1	0.17		
313.61	1023	1.27	53.4	53.1	0.70		

ภาพที่ 4.14 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่ โหลด 250 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

จากภาพที่ 4.8, 4.10, 4.12 และภาพที่ 4.14 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการป้อนค่าความเร็วลมที่พิกัด 2.5 m/s และทดสอบกับโหลดความต้านทานตามลำดับ ซึ่งทำการเก็บผ่านโปรแกรม HyperTerminal ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะนำมาพล็อตดังภาพที่ 4.7, 4.9, 4.13 และภาพที่ 4.15 เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความเร็วรอบ

ตารางที่ 4.1 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

โหลดตัวต้านทาน(โอห์ม)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความแปรปรวน
100	486.8891	8.249649	0.570581
	487.2374	7.679068	
150	480.7108	20.68347	0.55719
	481.1448	21.24066	
200	529.6412	15.61625	0.212468
	530.3167	15.40379	
250	518.2267	12.72532	0.095336
	518.895	12.62998	

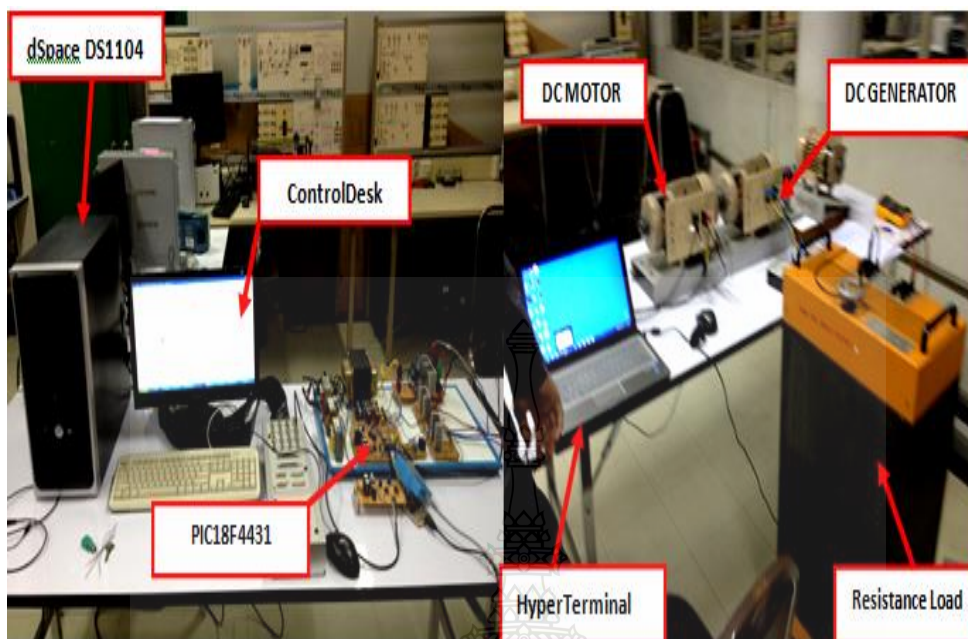
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s และมีการเปลี่ยนแปลง โหลดตามลำดับนั้น ค่าความแปรปรวนของข้อมูลความเร็วรอบ ที่ทำการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.35889 ซึ่งอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.2 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s

โหลดตัวต้านทาน (โอห์ม)	กระแสที่วัดได้ (แอมแปร์)	แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)
100	0.90	80
150	0.68	95
200	0.60	100
250	0.50	120

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 2.5m/s และมีการเปลี่ยนแปลง โหลดตามลำดับนั้น ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันจากเครื่องกำเนิดที่ได้เมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลงแต่แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

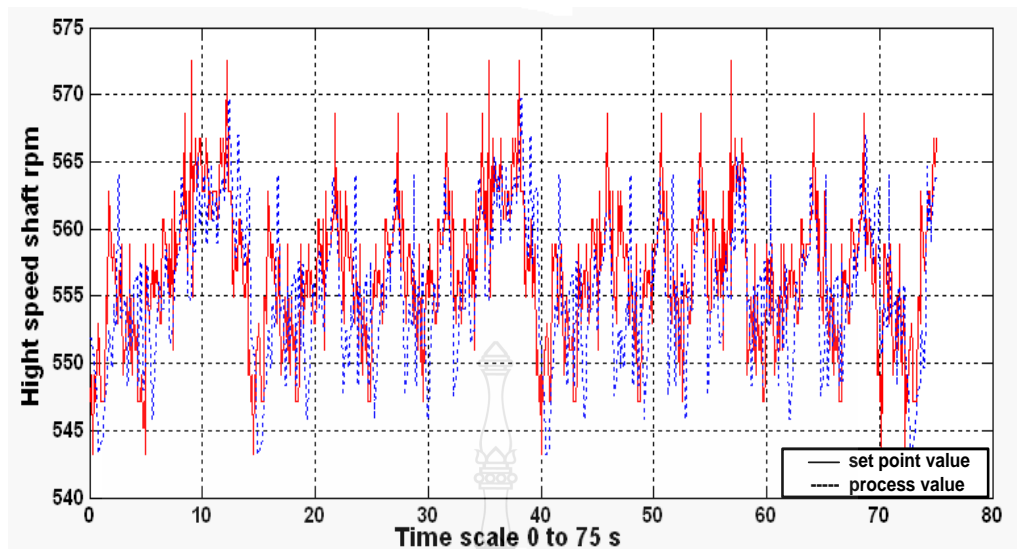
- 2) การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s
ซึ่งจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่าพิกัด ของมอเตอร์คือที่แรงดัน 0-175 โวลต์ที่ 80% ของพิกัด
- เก็บผลที่ประมาณ 750 ค่าที่เวลา 75 วินาที
 - คับปลั๊ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่ได้
 - ทดสอบโหลดความต้านทานปรับค่า 4สเต็ป 100 โอห์ม, 150 โอห์ม, 200 โอห์ม และ 250 โอห์ม ตามลำดับ
 - เก็บผลการทดสอบผ่าน โปรแกรม HyperTerminal



ภาพที่ 4.16 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

File	Edit	Format	View	Help			
318.51	1023	1.28	53.81	53.48	0.59		
318.88	1023	1.29	54.02	53.48	0.07		
317.64	1023	1.28	53.81	55.1	2.44		
316.39	1023	1.28	53.81	55.1	0.86		
315.29	1023	1.27	53.4	54.55	0.59		
314.19	1023	1.27	53.4	54.55	0.70		
314.33	1023	1.29	54.22	54.13	0.49		
314.46	1023	1.27	53.2	54.13	0.80		
314.35	1023	1.27	53.4	53.57	0.52		
314.23	1023	1.26	52.99	53.57	0.28		
314.09	1023	1.26	52.99	53.18	0.65		
313.95	1023	1.25	52.58	53.18	0.70		
313.35	1023	1.26	52.99	53.64	0.70		
312.75	1023	1.26	52.99	53.64	0.31		
312.11	1023	1.26	52.99	53.69	0.75		
311.46	1023	1.3	54.43	53.69	0.08		
311.3	1023	1.26	52.99	53.2	0.54		
311.15	1023	1.27	53.2	53.2	1.08		
310.33	1023	1.23	52.58	53.45	3.99		
309.51	1023	1.26	52.99	53.45	0.83		
308.57	1023	1.26	52.99	53.98	0.94		
307.62	1023	1.25	52.58	53.98	0.52		
307.07	1023	1.26	52.99	53.59	0.70		
306.52	1023	1.27	53.2	53.59	0.62		
307.5	1023	1.27	53.2	52.27	0.60		
308.47	1023	1.26	52.99	52.27	0.70		
308.46	1023	1.27	53.4	53.46	0.20		
308.45	1023	1.27	53.4	53.46	0.07		
309.59	1023	1.27	53.4	52.31	0.88		
310.73	1023	1.29	54.02	52.31	0.38		
311.5	1023	1.28	53.81	53.09	0.00		
312.26	1023	1.28	53.81	53.09	2.34		
312.17	1023	1.27	53.4	53.54	0.13		
312.08	1023	1.28	53.61	53.54	0.80		
312.84	1023	1.28	53.81	53.1	0.17		
313.61	1023	1.27	53.4	53.1	0.70		

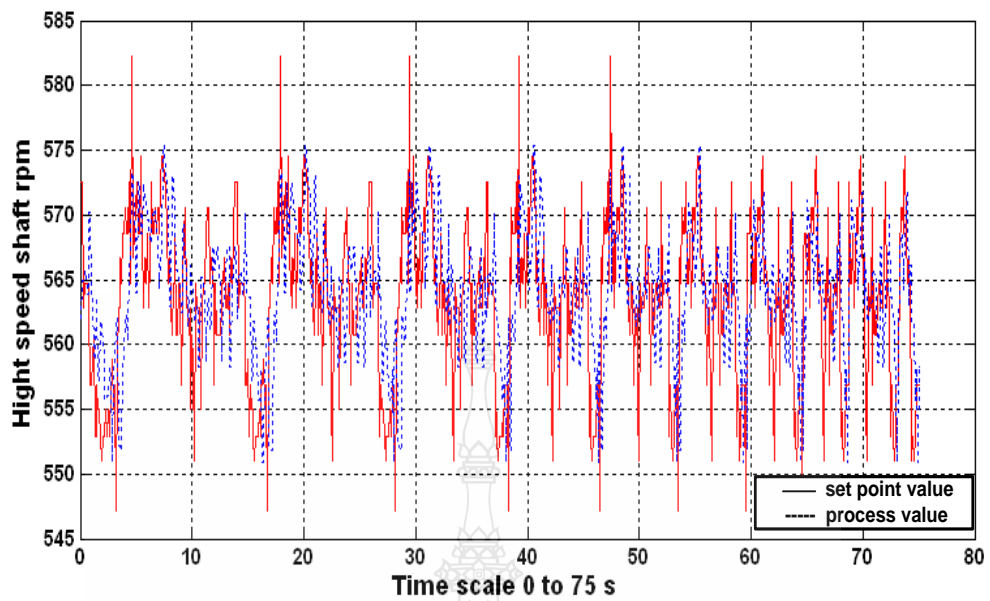
ภาพที่ 4.17 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์มและ ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3m/s



ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

File	Edit	Format	View	Help		
1023	1.43	59.95	58.85	0.92		
1023	1.43	59.95	59.16	0.87		
1023	1.4	58.93	59.16	0.87		
1023	1.41	59.13	59.23	0.95		
1023	1.41	59.13	59.23	1.02		
1023	1.41	59.13	59.05	1.08		
1023	1.41	59.13	59.05	1.00		
1023	1.4	58.93	59.71	0.92		
1023	1.39	58.31	59.71	0.92		
1023	1.39	58.31	59.05	1.02		
1023	1.39	58.52	59.05	1.13		
1023	1.4	58.72	58.52	1.02		
1023	1.38	57.9	58.52	1.00		
1023	1.38	57.9	59.02	0.92		
1023	1.39	58.31	59.02	0.81		
1023	1.38	58.11	58.35	0.92		
1023	1.38	58.11	58.35	0.89		
1023	1.38	57.9	58.83	1.02		
1023	1.37	57.7	58.83	0.97		
1023	1.38	57.9	58.61	1.05		
1023	1.38	57.9	58.61	0.97		
1023	1.38	57.9	58.19	1.02		
1023	1.38	58.11	58.19	1.08		
1023	1.38	57.9	58.23	1.08		
1023	1.38	58.11	58.23	1.02		
1023	1.38	57.9	58.45	1.00		
1023	1.39	58.31	58.45	1.00		
1023	1.39	58.31	57.69	0.97		
1023	1.39	58.52	57.69	0.89		
1023	1.38	58.11	58.46	0.92		
1023	1.39	58.31	58.46	0.95		
1023	1.36	57.29	58.85	0.92		
1023	1.39	58.52	58.85	0.89		
1023	1.4	58.93	57.82	0.89		
1023	1.4	58.93	57.82	0.97		
1023	1.41	59.34	57.78	1.02		

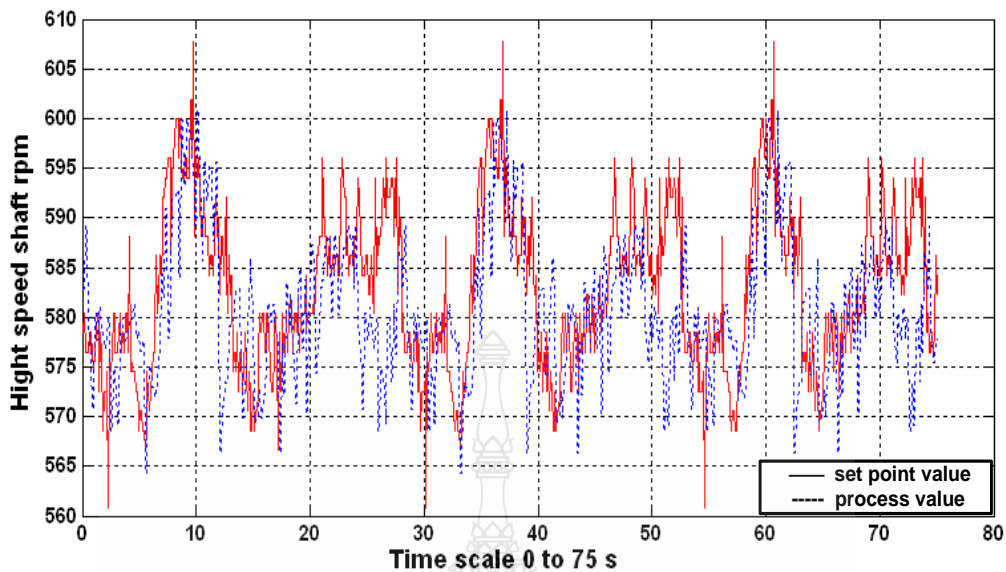
ภาพที่ 4.19 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3m/s



ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

File	Edit	Format	View	Help
1023	1.44	60.57	61.04	0.65
1023	1.45	60.77	61.04	0.02
1023	1.44	60.36	61.7	0.70
1023	1.44	60.36	61.7	0.38
1023	1.44	60.36	60.57	0.41
1023	1.44	60.57	60.57	0.70
1023	1.44	60.36	60.25	0.00
1023	1.44	60.57	60.25	0.38
1023	1.44	60.36	59.76	0.10
1023	1.43	60.16	59.76	0.49
1023	1.44	60.36	60.77	0.62
1023	1.44	60.57	60.77	2.23
1023	1.45	60.77	60.5	0.62
1023	1.44	60.57	60.5	3.28
1023	1.43	59.95	60.83	0.49
1023	1.44	60.57	60.83	0.83
1023	1.44	60.36	60.59	0.20
1023	1.42	59.54	60.59	0.54
1023	1.43	59.95	60.4	0.13
1023	1.43	59.95	60.4	0.59
1023	1.43	59.95	60.5	0.02
1023	1.43	60.16	60.5	0.07
1023	1.4	58.72	60.72	0.65
1023	1.44	60.36	60.72	0.75
1023	1.43	60.16	59.53	0.12
1023	1.44	60.36	59.53	0.52
1023	1.45	60.77	60.2	0.44
1023	1.45	60.77	60.2	2.86
1023	1.44	60.36	60.02	0.57
1023	1.44	60.36	60.02	0.17
1023	1.44	60.36	59.59	0.49
1023	1.44	60.57	59.59	0.42
1023	1.45	60.77	60.66	0.75
1023	1.44	60.36	60.66	2.57
1023	1.44	60.57	60.73	0.70
1023	1.44	60.57	60.73	0.59

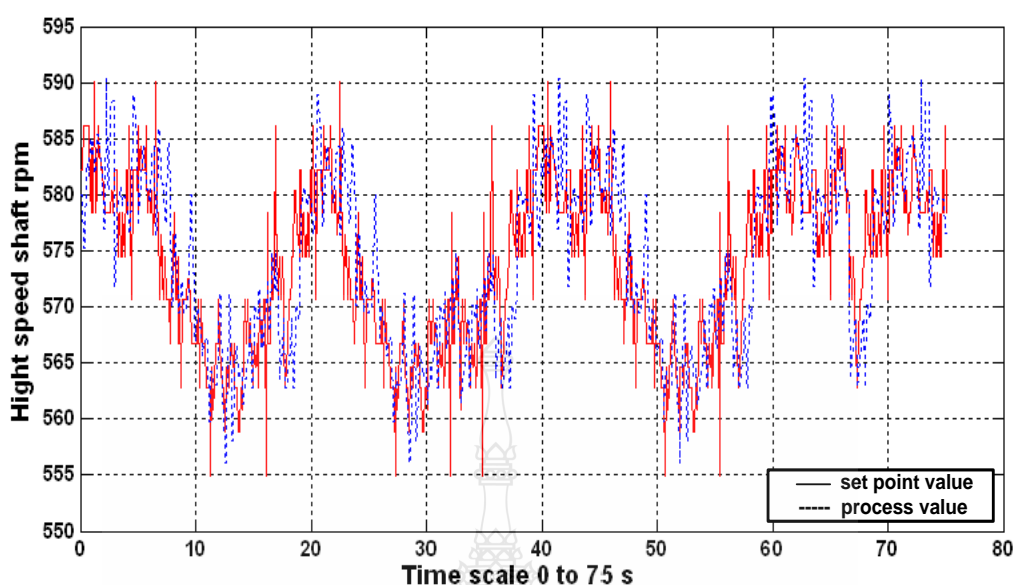
ภาพที่ 4.21 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่านโปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3m/s



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
363.54	1023	1.45	60.97	60.73	0.67
363.84	1023	1.45	60.97	60.73	0.83
365.04	1023	1.46	61.38	60.24	0.57
366.24	1023	1.46	61.38	60.24	0.65
366.66	1023	1.46	61.38	61.02	0.73
367.08	1023	1.46	61.38	61.02	1.79
367.61	1023	1.46	61.38	60.91	3.23
368.15	1023	1.46	61.38	60.91	0.73
367.73	1023	1.45	60.77	61.25	2.00
367.31	1023	1.44	60.57	61.25	0.73
368.22	1023	1.47	61.79	60.94	0.10
369.13	1023	1.44	60.57	60.94	0.67
368.66	1023	1.45	60.77	61.3	3.52
368.19	1023	1.46	61.38	61.3	0.68
368.21	1023	1.46	61.18	61.21	0.78
368.24	1023	1.46	61.18	61.21	0.25
368.28	1023	1.45	60.97	60.99	0.46
368.32	1023	1.45	60.97	60.99	0.73
368.73	1023	1.45	60.77	60.42	0.49
369.13	1023	1.44	60.57	60.42	0.67
367.94	1023	1.44	60.57	61.81	0.75
366.75	1023	1.44	60.57	61.81	0.08
366.59	1023	1.44	60.57	60.79	0.67
366.42	1023	1.44	60.57	60.79	0.36
365.45	1023	1.44	60.57	61.59	0.74
364.48	1023	1.45	60.77	61.59	0.83
363.5	1023	1.44	60.57	61.61	0.15
362.52	1023	1.45	60.97	61.61	3.99
363.67	1023	1.45	60.97	59.88	0.24
364.82	1023	1.45	60.97	59.88	0.59
365.21	1023	1.45	60.97	60.64	0.21
365.6	1023	1.43	60.16	60.64	0.67
365.42	1023	1.44	60.57	60.8	0.65
365.25	1023	1.43	60.16	60.8	0.67
364.83	1023	1.43	60.16	60.63	0.28
364.41	1023	1.44	60.57	60.63	0.07

ภาพที่ 4.23 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

จากภาพที่ 4.17, 4.19, 4.21 และภาพที่ 4.23 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการป้อนค่าความเร็วลม ที่พิกัด 3 m/s และทดสอบกับโหลดความต้านทานตามลำดับ ซึ่งทำการเก็บผ่านโปรแกรม HyperTerminal ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะนำมา พล็อตดังภาพที่ 4.18, 4.20, 4.22 และภาพที่ 4.24 เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ลงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

โหลดตัวต้านทาน(โอห์ม)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความแปรปรวน
100	556.6642	5.260581	0.25442
	555.3465	5.515004	
150	563.5726	6.266749	1.202218
	564.165	5.064531	
200	582.904	8.143293	0.549799
	580.7011	7.593494	
250	573.7991	7.489963	0.59356
	574.2898	8.083525	

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าจากการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตามลำดับนั้น ค่าความแปรปรวนของข้อมูลความเร็วรอบที่ทำการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.64999 ซึ่งอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.4 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s

โหลดตัวต้านทาน (โอห์ม)	กระแสที่วัดได้ (แอมแปร์)	แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)
100	0.90	116
150	0.75	120
200	0.64	125
250	0.60	125

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าจากการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 3 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตามลำดับนั้น ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันจากเครื่องกำเนิดที่ได้ เมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลงแต่แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

3) การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

ซึ่งจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงค่าพิกัด ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือที่ 176 โวลต์ที่ 80% ของพิกัด

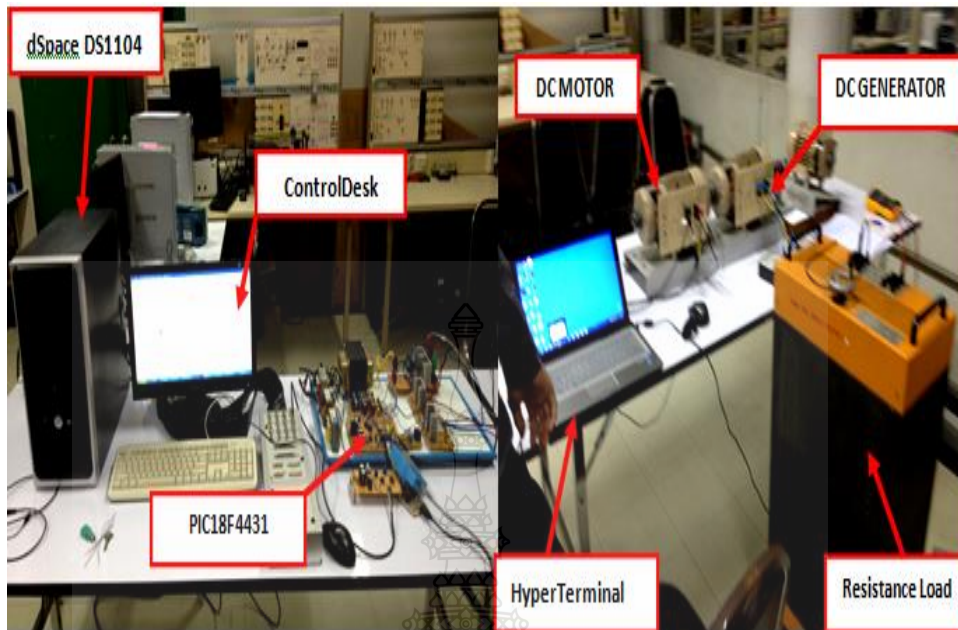
- เก็บผลที่ประมาณ 750 ค่าที่เวลา 75 วินาที

- คับปลั๊ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่ได้

- ทดสอบโหลดความต้านทานปรับค่า 4 สแต็ป 100 โอห์ม, 150 โอห์ม, 200 โอห์ม และ 250

โอห์ม ตามลำดับ

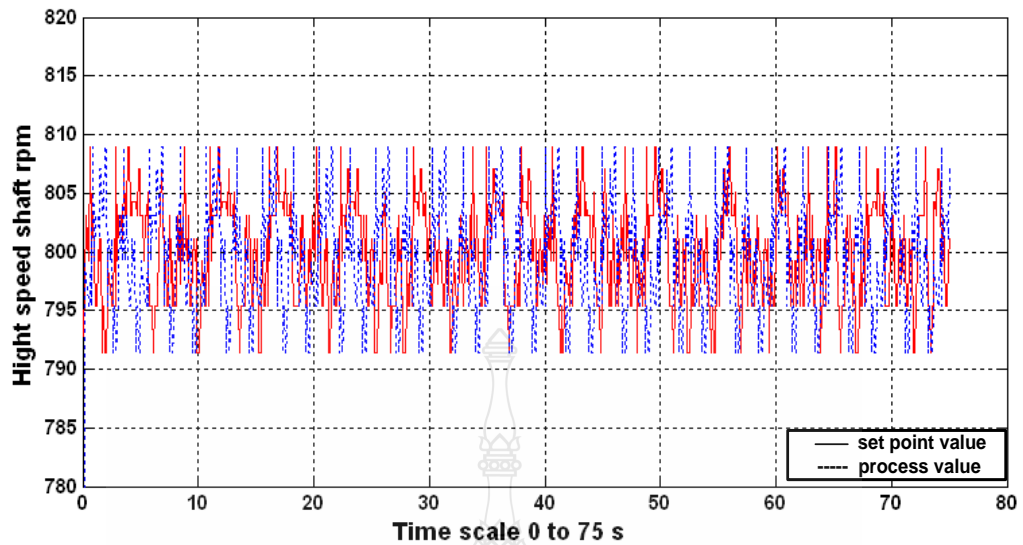
- เก็บผลการทดสอบผ่าน โปรแกรม HyperTerminal



ภาพที่ 4.25 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5m/s

File	Edit	Format	View	Help			
759.33	1023	1.99	83.02	83.28	1.66		
759.33	1023	1.99	83.48	83.69	1.66		
763.66	1023	2	84.1	83.48	2.23		
767.08	1023	2	83.89	83.48	2.39		
770.5	1023	1.99	83.69	83.28	2.36		
773.39	1023	2.02	84.71	83.28	2.08		
776.27	1023	2	83.89	83.89	2.05		
780.22	1023	1.99	83.69	83.28	1.84		
784.18	1023	2	84.1	84.71	2.05		
786.3	1023	1.99	83.69	83.69	1.94		
788.43	1023	1.98	83.28	84.1	1.87		
789.27	1023	1.98	83.28	84.1	2.50		
790.12	1023	1.99	83.69	84.1	1.73		
791.37	1023	2	83.89	83.89	2.36		
792.63	1023	1.99	83.69	84.51	2.21		
795.18	1023	2	83.89	84.51	1.73		
797.72	1023	1.97	82.87	84.1	1.87		
797.55	1023	1.98	83.28	84.1	1.87		
797.38	1023	1.97	82.87	84.71	1.79		
798.04	1023	1.97	82.87	84.71	1.92		
798.7	1023	1.98	83.28	83.28	2.29		
799.96	1023	1.99	83.69	83.69	2.39		
801.23	1023	1.99	83.48	83.89	2.50		
801.51	1023	1.99	83.48	83.69	2.21		
788.08	1023	1.98	83.28	83.89	1.87		
777.83	1023	1.98	83.28	82.87	1.94		
781.07	1023	2	83.89	83.28	2.39		
785.34	1023	1.98	83.28	82.87	2.47		
789.62	1023	2.02	84.71	82.87	2.13		
790.91	1023	1.99	83.69	83.02	2.02		
792.2	1023	2	84.1	83.48	2.18		
793.33	1023	2	84.1	84.1	2.44		
794.45	1023	2	84.1	83.89	2.18		
796.66	1023	2	83.89	83.69	2.08		
798.88	1023	2.01	84.51	84.71	2.15		
801.72	1023	2.01	84.51	83.89	2.18		

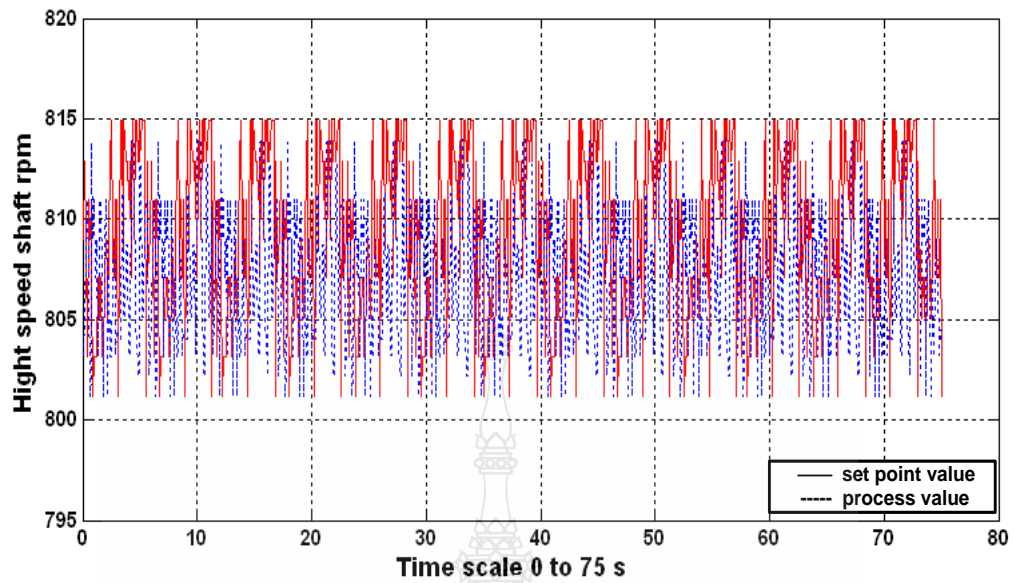
ภาพที่ 4.26 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และ ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s



ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
797.24	1023	2.02	84.71	84.11	1.94
798.37	1023	2.03	85.12	84.31	1.55
798.37	1023	2.02	84.71	84.71	1.79
796.83	1023	2	84.1	84.92	2.02
796.83	1023	2.02	84.92	84.51	1.84
798.04	1023	2.02	84.71	83.89	1.66
798.05	1023	2.02	84.92	84	1.45
797.01	1023	2.01	84.51	85.22	1.81
783.29	1023	2	83.89	84.71	1.94
789.03	1023	2	84.1	84.92	1.66
802.26	1023	2	84.1	84.51	2.05
793.62	1023	2	84.1	84.71	1.81
793.62	1023	2.01	84.51	84.1	2.00
799.94	1023	2.01	84.3	84.92	1.97
799.94	1023	2.01	84.51	84.71	1.94
795.77	1023	2.01	84.51	84.92	1.76
795.77	1023	2	84.1	84.51	1.45
798.81	1023	2	84.1	83.89	1.47
798.81	1023	2.01	84.51	84.71	1.50
796.83	1023	2.02	84.71	84.92	2.00
796.83	1023	2.01	84.51	84.51	1.97
798.53	1023	2.01	84.3	83.89	1.76
798.53	1023	2.02	84.71	84.51	1.50
797.92	1023	2.03	85.12	84.1	1.73
797.92	1023	2.03	85.33	84.1	1.94
798.17	1023	2.02	84.71	84.51	1.55
798.17	1023	2.01	84.51	84.71	1.71
798.28	1023	2.02	84.92	84.51	2.02
798.28	1023	2.01	84.51	84.11	1.52
797.46	1023	2.02	84.92	84.24	1.71
797.46	1023	2	83.89	84.24	2.08
798.06	1023	2.02	84.71	84.19	1.81
798.06	1023	2.03	85.33	84.19	1.45
798.11	1023	2.03	85.33	84.95	1.76
798.11	1023	2.04	84.66	84.95	1.94
798.36	1023	2.03	85.33	84.31	1.52

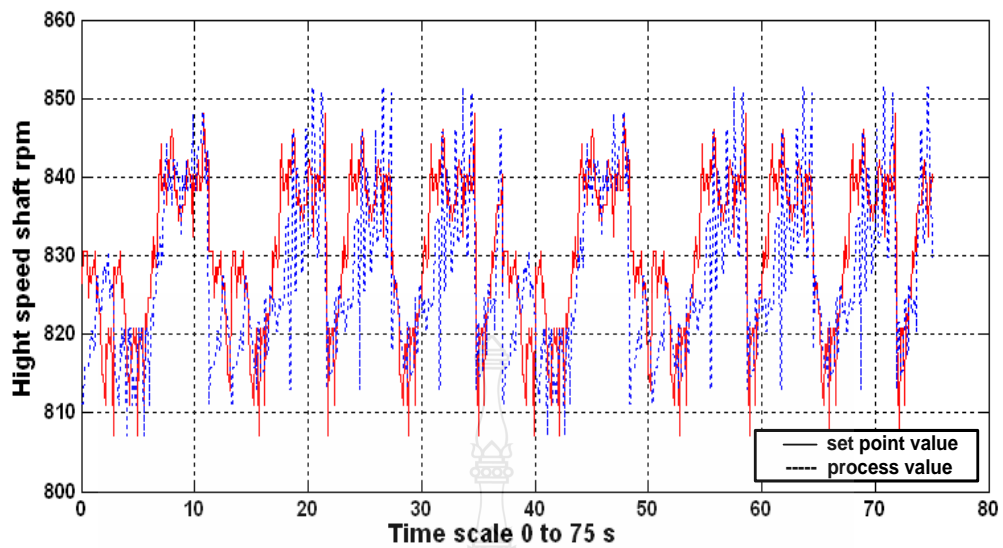
ภาพที่ 4.28 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โหลด และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s



ภาพที่ 4.29 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

File	Edit	Format	View	Help			
719.18	1023	2.06	86.55	84.94	1.23		
720.94	1023	2.07	86.96	84.94	0.78		
722.64	1023	2.07	86.96	85.42	0.18		
724.33	1023	2.07	86.96	85.42	2.26		
726.02	1023	2.07	86.96	85.43	0.49		
727.71	1023	2.06	86.35	85.43	0.34		
728.95	1023	2.07	86.76	85.68	0.28		
730.18	1023	2.07	86.76	85.68	0.03		
730.98	1023	2.06	86.55	85.91	0.67		
731.77	1023	2.07	86.76	85.91	0.25		
733.03	1023	2.07	86.76	85.66	2.15		
734.28	1023	2.07	86.96	85.66	0.70		
734.14	1023	2.06	86.35	86.65	0.08		
734	1023	2.06	86.55	86.65	0.54		
734.38	1023	2.06	86.55	86.33	0.65		
734.76	1023	2.05	86.14	86.33	0.32		
734.91	1023	2.05	86.14	86.15	0.52		
735.06	1023	2.03	85.33	86.15	3.63		
734.76	1023	2.03	85.33	86.76	1.89		
734.46	1023	2.03	85.12	86.76	0.20		
734.11	1023	2.02	84.92	86.55	0.92		
733.77	1023	2.04	85.73	86.76	0.12		
733.88	1023	2.04	85.53	86.76	0.67		
734	1023	2.05	85.94	86.96	0.13		
734.75	1023	2.04	85.73	86.35	5.60		
735.5	1023	2.05	85.94	86.55	0.31		
734.94	1023	2.03	85.33	86.55	2.84		
734.39	1023	2.01	84.51	86.14	0.16		
735.17	1023	2.05	86.76	86.14	0.54		
735.95	1023	2.04	86.76	85.33	4.68		
736.66	1023	2.05	86.55	85.33	0.25		
737.38	1023	2.05	86.76	85.12	1.47		
736.08	1023	2.02	86.76	84.92	0.41		
734.79	1023	2.05	86.96	85.73	0.54		
735.49	1023	2.05	86.35	85.53	2.10		
736.2	1023	2.05	86.55	85.94	0.38		

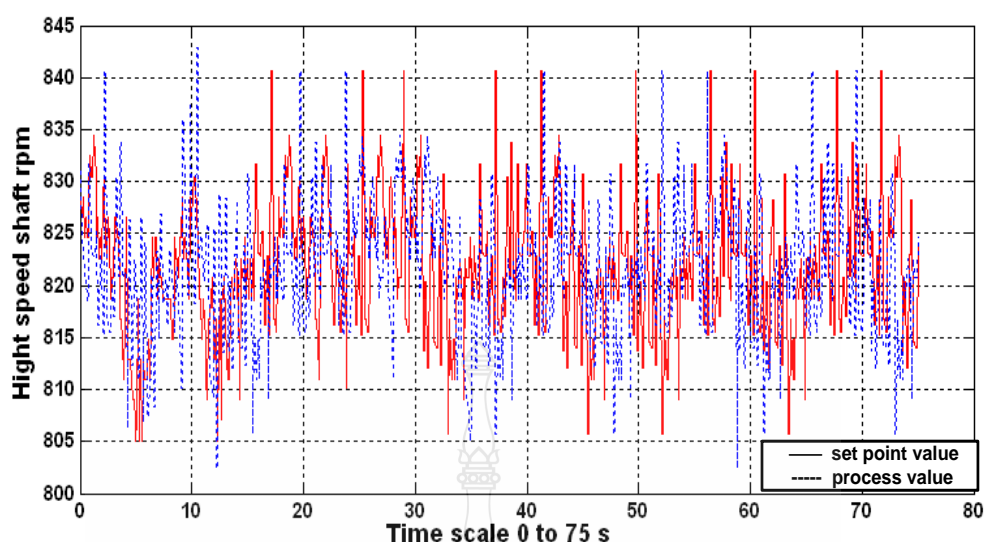
ภาพที่ 4.30 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โหลด และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s



ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โหลด และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
668.12	1023	2.07	86.76	87.02	0.80
668.56	1023	2.06	86.55	86.26	0.70
669.01	1023	2.07	86.76	86.26	1.52
669.58	1023	2.06	86.35	85.93	1.13
670.15	1023	2.06	86.55	85.93	0.70
670.95	1023	2.06	86.35	85.71	2.57
671.75	1023	2.06	86.35	85.71	0.67
671.58	1023	2.07	86.76	87.08	0.10
671.42	1023	2.08	87.17	87.08	0.67
672.35	1023	2.07	86.96	86.19	0.54
673.27	1023	2.07	86.96	86.19	0.10
674.64	1023	2.08	87.37	86.16	0.03
676.01	1023	2.08	87.17	86.16	5.26
676.73	1023	2.07	86.96	86.41	0.36
677.44	1023	2.06	86.35	86.41	0.57
678.68	1023	2.06	86.55	85.47	0.75
679.93	1023	2.05	86.14	85.47	0.31
680.27	1023	2.06	86.35	86.16	1.23
680.62	1023	2.05	86.14	86.16	0.28
682.16	1023	2.07	86.76	85.37	0.07
683.7	1023	2.07	86.96	85.37	0.67
682.59	1023	2.07	86.76	88.03	2.21
681.47	1023	2.06	86.35	88.03	2.42
682.25	1023	2.05	86.14	85.53	0.54
683.02	1023	2.06	86.55	85.53	0.08
684.13	1023	2.06	86.35	85.39	0.36
685.25	1023	2.04	85.73	85.39	0.62
685.4	1023	2.05	85.94	85.94	0.78
685.56	1023	2.05	85.94	85.94	0.88
686.11	1023	2.05	85.94	85.55	0.54
686.65	1023	2.06	86.55	85.55	3.94
686.42	1023	2.06	86.55	86.95	0.46
686.19	1023	2.06	86.35	86.95	2.55
686.74	1023	2.06	86.35	85.96	0.60
687.29	1023	2.05	85.94	85.96	0.80
685.68	1023	2.04	85.53	87.3	0.59

ภาพที่ 4.32 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โหลดและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s



ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โห้้ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

จากภาพที่ 4.26, 4.28, 4.30 และภาพที่ 4.32 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการป้อนค่าความเร็วลมที่พิกัด 5.5 m/s และทดสอบกับโหลดความต้านทานตามลำดับ ซึ่งทำการเก็บผ่านโปรแกรม HyperTerminal ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะนำมาพล็อตดังภาพที่ 4.27, 4.29, 4.31 และภาพที่ 4.33 เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ลงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/

โหลดตัวต้านทาน(โห้้ม)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความแปรปรวน
100	799.8645	4.434094	0.73456
	799.2599	5.168653	
150	809.5675	4.218817	0.385556
	807.2574	3.833261	
200	830.5925	9.636467	1.00835
	827.5444	10.64482	
250	821.6581	6.764388	0.2746
	821.5834	7.038993	

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าจากการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตามลำดับนั้น ค่าความแปรปรวนของข้อมูลความเร็วรอบ ที่ทำการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.60076 ซึ่งอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.6 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s

โหลดตัวต้านทาน (โอห์ม)	กระแสที่วัดได้ (แอมแปร์)	แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)
100	1.54	170
150	1.25	170
200	0.90	165
250	0.72	160

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าจากการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 5.5 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตามลำดับนั้น ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันจากเครื่องกำเนิดที่ได้เมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลงแต่แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

4) การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

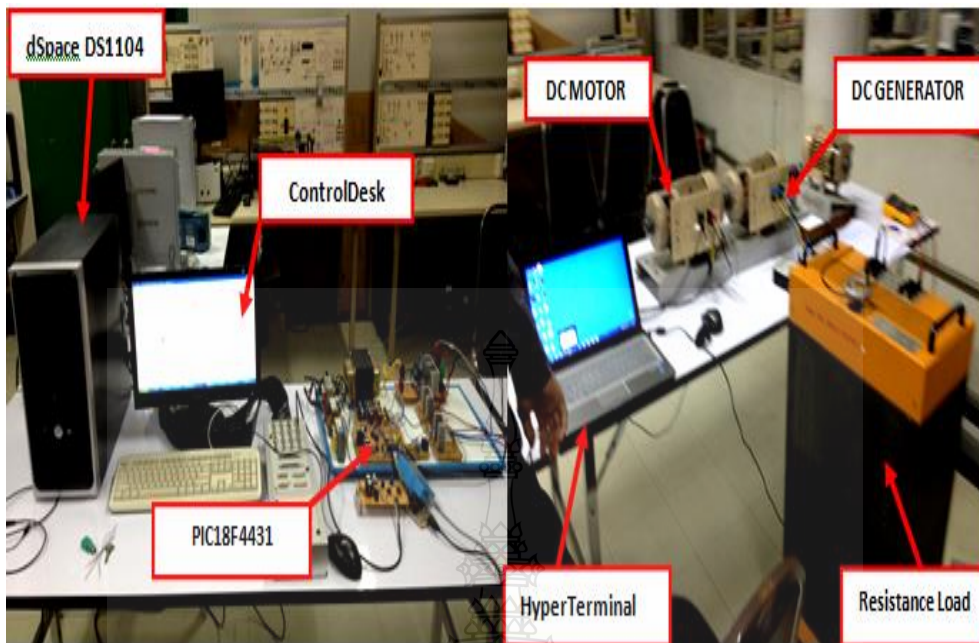
ซึ่งจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงเกินค่าพิกัดความเร็ว ของมอเตอร์คือควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ให้คงที่ที่แรงดัน 176 โวลต์ที่ 80% ของ พิกัด และปรับลดแรงดันขดลวดสนาม

- เก็บผลที่ประมาณ 750 ค่าที่เวลา 75 วินาที

- คับปลั๊ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่ได้

- ทดสอบโหลดความต้านทานปรับค่า 4 สเติร์ป 100 โอห์ม, 150 โอห์ม, 200 โอห์มและ 250 โอห์ม ตามลำดับ

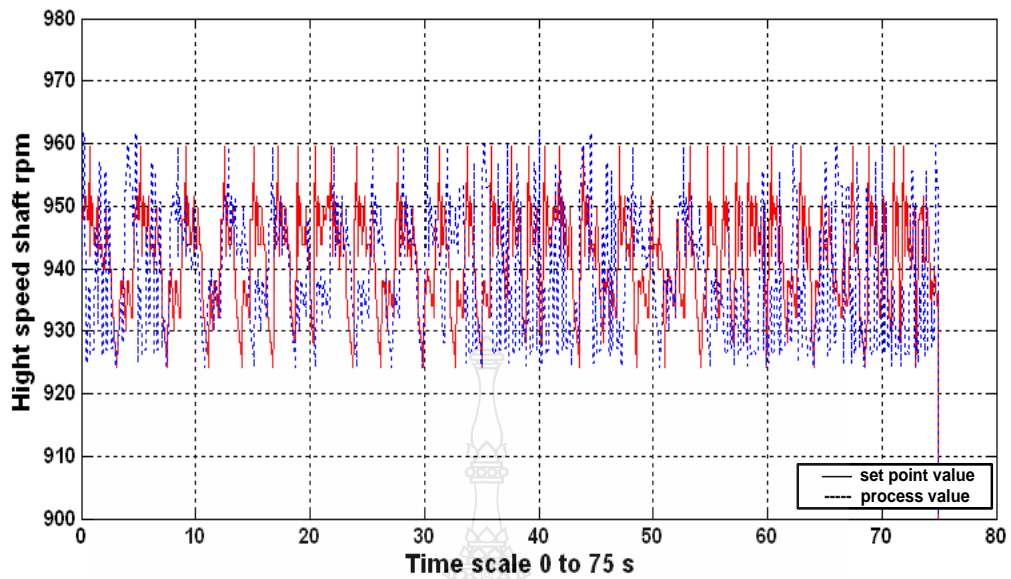
- เก็บผลการทดสอบผ่าน โปรแกรม HyperTerminal



ภาพที่ 4.34 การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ ก่อนการทดสอบการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
1023	943.97	2.37	99.24	98.44	2.81
1023	949.19	2.37	99.24	100.7	3.02
1023	954.41	2.38	99.65	100.7	3.05
1023	957.46	2.38	99.65	96.85	2.92
1023	960.51	2.37	99.24	96.85	2.92
1023	961.89	2.37	99.24	98.12	2.71
1023	963.27	2.39	100.47	98.12	2.92
1023	965.16	2.35	98.63	97.1	2.13
1023	967.05	2.38	99.65	97	3.31
1023	969.69	2.37	99.44	97.07	2.76
1023	972.33	2.36	98.83	97.07	3.44
1023	972.33	2.36	98.83	99.1	2.71
1023	972.34	2.37	99.24	99.1	3.44
1023	974.75	2.38	99.65	97.51	2.5
1023	977.16	2.35	98.63	97.51	3.07
1023	976.07	2.36	98.83	100.2	2.44
1023	974.97	2.36	98.83	100.2	2.39
1023	977.1	2.36	98.83	96.98	3.49
1023	979.23	2.35	98.42	96.98	3.26
1023	977.87	2.35	98.42	100.07	2.71
1023	976.5	2.36	98.83	100.07	2.71
1023	979.15	2.37	99.44	97.08	2.44
1023	981.8	2.36	98.83	97.08	3.31
1023	981.37	2.36	98.83	99.54	2.92
1023	980.94	2.35	98.63	99.54	2.44
1023	982.35	2.34	98.22	97.1	3.34
1023	983.75	2.33	97.6	97.1	2.63
1023	984.09	2.33	97.6	97.55	3.39
1023	984.43	2.32	97.19	97.55	3.39
1023	985.11	2.32	97.19	96.81	2.86
1023	985.78	2.31	96.78	96.81	3.18
1023	985.96	2.32	97.19	97.31	2.65
1023	986.14	2.33	97.6	97.31	3.05
1023	986.8	2.34	98.22	97.85	3.18
1023	987.46	2.34	98.22	97.85	3.55
1023	988.57	2.34	98.01	97.2	3.28

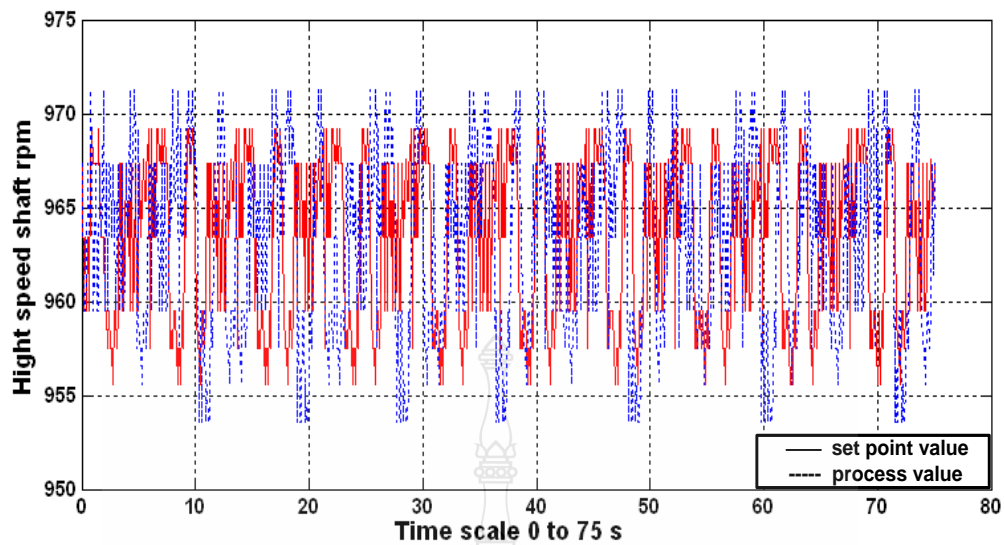
ภาพที่ 4.35 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 100 โอห์ม และ ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s



ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 100 โอห์มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
1023	812.52	2.39	101.29	101.29	1.52
1023	811	2.36	100.47	100.47	2.00
1023	811	2.37	100.88	100.47	1.45
1023	810.85	2.37	100.47	100.67	1.87
1023	810.85	2.38	100.88	101.29	1.47
1023	811.98	2.39	100.47	100.88	2.08
1023	811.98	2.39	101.29	101.08	1.60
1023	811.73	2.39	101.29	101.7	2.08
1023	811.73	2.39	101.49	101.29	1.73
1023	812.41	2.4	101.29	100.47	1.60
1023	812.42	2.43	101.29	100.67	1.81
1023	812.84	2.41	101.29	101.29	1.45
1023	812.84	2.39	101.29	100.47	1.97
1023	812.34	2.4	101.29	100.47	1.52
1023	812.34	2.39	101.49	100.67	2.02
1023	812.34	2.4	101.08	101.29	1.58
1023	812.34	2.39	100.88	100.88	0.50
1023	870.29	2.41	100.88	101.08	0.58
1023	870.34	2.41	100.88	101.7	2.63
1023	683.88	2.42	100.47	100.47	1.84
1023	683.77	2.41	100.47	101.29	1.31
1023	848.23	2.41	100.47	101.29	1.66
1023	848.27	2.41	100.26	100.47	1.71
1023	770.61	2.41	100.47	101.29	2.10
1023	770.56	2.41	100.26	101.29	1.73
1023	831.11	2.42	100.26	100.88	1.39
1023	831.14	2.41	100.06	101.29	1.58
1023	794.74	2.4	100.47	100.88	1.63
1023	794.71	2.4	100.47	101.08	1.39
1023	822.73	2.4	100.47	100.47	1.45
1023	822.74	2.39	100.26	100.88	1.73
1023	803.16	2.39	100.47	101.29	1.55
1023	803.15	2.39	101.29	100.47	1.71
1023	816.64	2.39	101.29	100.67	2.08
1023	816.64	2.38	100.47	101.29	2.02
1023	810.6	2.39	101.29	100.47	1.76

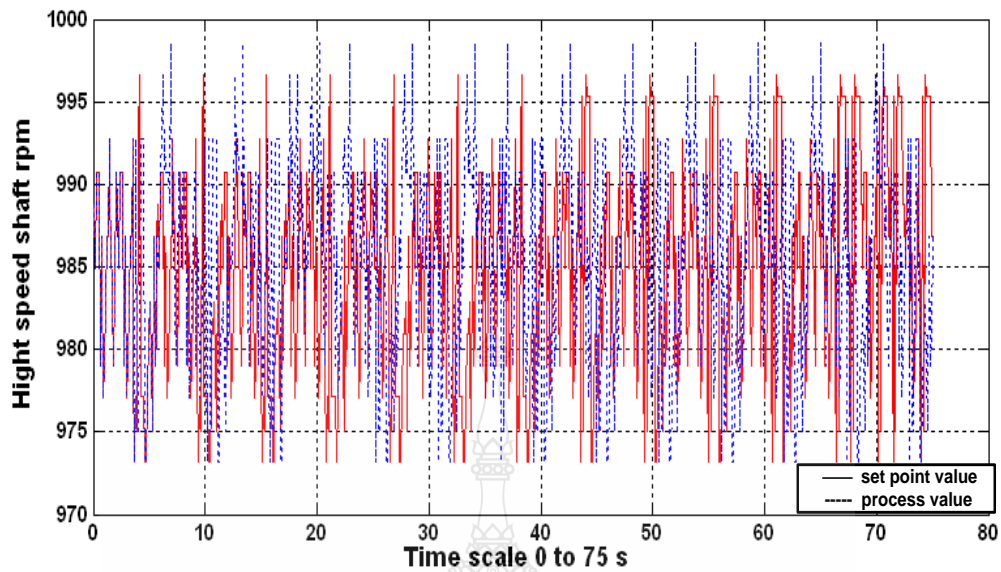
ภาพที่ 4.37 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 150 โอห์ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s



ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 150 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9m/s

File	Edit	Format	View	Help	
1023	922.35	2.44	103.54	103.54	2.46
1023	922.65	2.43	103.13	103.13	2.47
1023	922.96	2.42	103.74	103.74	2.48
1023	926.09	2.43	103.74	103.74	2.49
1023	929.23	2.4	103.74	103.74	2.47
1023	928.77	2.41	102.51	102.51	2.48
1023	928.31	2.42	103.33	103.33	2.47
1023	929.69	2.42	103.13	103.13	2.47
1023	931.07	2.42	102.31	102.31	2.47
1023	933.05	2.42	102.51	102.51	2.47
1023	935.03	2.43	102.92	102.92	2.49
1023	933.44	2.43	103.33	103.33	2.46
1023	931.85	2.44	103.33	103.33	2.47
1023	936.93	2.45	103.95	103.95	2.46
1023	942.02	2.45	103.54	103.54	2.45
1023	936.66	2.45	103.33	103.33	2.44
1023	931.3	2.44	102.92	102.92	2.48
1023	940.98	2.43	102.51	102.51	2.47
1023	950.67	2.46	103	103	2.47
1023	942.87	2.44	103.74	103.74	2.47
1023	935.04	2.45	103.54	103.54	2.46
1023	942.7	2.46	103.54	103.54	2.47
1023	950.36	2.46	103.13	103.13	2.47
1023	945.91	2.46	103.74	103.74	2.47
1023	941.45	2.47	103.74	103.74	2.44
1023	943.98	2.48	103.74	103.74	2.46
1023	946.52	2.49	102.51	102.51	2.46
1023	946.05	2.47	103.33	103.33	2.44
1023	945.57	2.48	103.13	103.13	2.44
1023	945.78	2.47	102.31	102.31	2.45
1023	946	2.47	102.51	102.51	2.46
1023	946.17	2.47	102.92	102.92	2.46
1023	946.33	2.47	103.33	103.33	2.48
1023	947.49	2.49	103.33	103.33	2.44
1023	948.65	2.46	103.95	103.95	2.43
1023	949.38	2.47	102.51	102.51	2.42

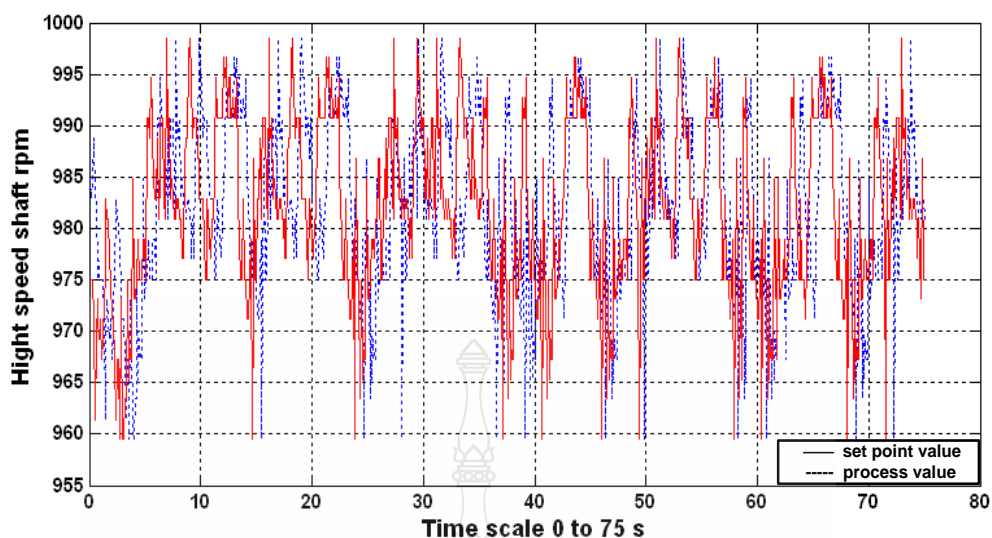
ภาพที่ 4.39 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 200 โห้้ม และป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s



ภาพที่ 4.40 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 200 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

File	Edit	Format	View	Help	
1023	984.89	2.46	103.13	102.1	2.43
1023	982.89	2.45	102.92	102.1	2.43
1023	984.89	2.46	103.13	102.1	2.47
1023	988.81	2.47	103.54	101.7	2.47
1023	982.89	2.45	102.92	100.67	2.47
1023	982.89	2.45	102.92	101.49	2.48
1023	975.06	2.43	102.1	101.9	2.47
1023	978.97	2.44	102.51	101.7	2.47
1023	975.06	2.43	102.1	101.49	2.46
1023	975.06	2.43	102.1	101.7	2.45
1023	975.06	2.43	102.1	101.29	2.45
1023	975.06	2.43	102.1	101.49	2.47
1023	971.24	2.42	101.7	101.9	2.45
1023	961.40	2.4	100.67	102.1	2.46
1023	969.23	2.42	101.49	102.92	2.47
1023	973.15	2.43	101.9	102.72	2.47
1023	971.24	2.42	101.7	102.72	2.47
1023	969.23	2.42	101.49	102.31	2.45
1023	971.24	2.42	101.7	102.1	2.45
1023	967.32	2.41	101.29	101.7	2.49
1023	969.23	2.42	101.49	101.7	2.47
1023	973.15	2.43	101.9	101.7	2.47
1023	975.06	2.43	102.1	101.29	2.47
1023	982.89	2.45	102.92	100.67	2.45
1023	980.98	2.45	102.72	101.29	2.46
1023	980.98	2.45	102.72	101.29	2.45
1023	977.06	2.44	102.31	100.47	2.45
1023	975.06	2.43	102.1	101.9	2.45
1023	971.24	2.42	101.7	101.7	2.45
1023	971.24	2.42	101.7	100.47	2.44
1023	971.24	2.42	101.7	100.47	2.39
1023	967.32	2.41	101.29	100.88	2.43
1023	961.40	2.4	100.67	100.88	2.46
1023	967.32	2.41	101.29	102.1	2.43
1023	967.32	2.41	101.29	101.08	2.43
1023	959.49	2.39	100.47	101.49	2.45

ภาพที่ 4.41 ผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งเก็บค่าผ่าน โปรแกรม HyperTerminal ที่โหลด 250 โห้้มและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s



ภาพที่ 4.42 เปรียบเทียบความเร็วรอบจาก DS 1104 กับการประมวลผลจาก PIC18F4431 ที่โหลด 250 โห้หมและป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

จากภาพที่ 4.35, 4.37, 4.39 และภาพที่ 4.41 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการป้อนค่าความเร็วลมที่พิกัด 9 m/s และทดสอบกับโหลดความต้านทานตามลำดับ ซึ่งทำการเก็บผ่านโปรแกรม HyperTerminal ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะนำมาพล็อตดังภาพที่ 4.36, 4.38, 4.40 และภาพที่ 4.42 เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ลงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

โหลดตัวต้านทาน(โห้หม)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความแปรปรวน
100	941.284	8.141007	2.43083
	938.5544	10.5714	
150	963.4277	4.334797	0.67265
	963.1822	5.007452	
200	984.6721	6.385941	0.111027
	985.5822	6.274913	
250	981.6444	8.605815	0.024398
	981.7527	8.581416	

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตามลำดับนั้น ค่าความแปรปรวนของข้อมูลความเร็วรอบ ที่ทำการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.80972 ซึ่งอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.8 ผลการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจากการป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s

โหลดตัวต้านทาน (โอห์ม)	กระแสที่วัดได้ (แอมแปร์)	แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)
100	1.5	187
150	1.32	187
200	1.12	185
250	0.82	180

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าการที่ป้อนความเร็วอ้างอิง (speed reference) ที่ 9 m/s และมีการเปลี่ยนแปลง โหลดตามลำดับนั้น ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันจากเครื่องกำเนิดที่ได้เมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลงแต่แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.4 สรุป

จากการเก็บผลการทดสอบที่ได้นั้น พบว่าค่าความแปรปรวนของความเร็วรอบที่ทำการป้อนจาก DS 1104 ในระดับความเร็วลมค่าต่างๆตั้งแต่ ระดับความเร็วลมต่ำสุดที่กั้นลมเริ่มหมุน 2.5 m/s ระดับความเร็วลมที่กั้นลมเริ่มผลิตไฟฟ้า 3 m/s , ระดับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย 5 m/s และระดับความเร็วลมที่กั้นลมเริ่มผลิตไฟฟ้าเต็มอัตราการผลิตพิกัด 9 m/s ที่กำหนดนั้น ค่าความแปรปรวนของความเร็วรอบที่จากการเฉลี่ยคือ 0.60484 ซึ่งอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบจำลองการทำงานของกังหันลมที่ใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แบบเวลาจริง เพื่อเป็นการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกจำลองพฤติกรรมการทำงานของกังหันลม ให้เป็นไปตามเงื่อนไขโดยควบคุมสัญญาณความเร็วอ้างอิง (Speed Reference) มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกังหันลมบนโปรแกรม Matlab/simulink ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส DSP board เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา ทั้งในส่วนของ การควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์และในส่วนของ การควบคุมแรงดันขดลวดสนาม การออกแบบใช้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในฟังก์ชันบล็อกกังหันลมของโปรแกรม Matlab/simulink เชื่อมต่อผ่าน DSP board รุ่น DSPACE 1104 เข้าสู่ภาควงจรควบคุม ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 ควบคุมในลักษณะ PI Control เพื่อสั่งงานมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขนาด พิกัด 220 โวลต์ 1,000 วัตต์ ใช้วงจรชอปเปอร์เป็นวงจรกำลังในการควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์ และแรงดันขดลวดสนาม โดยสับสวิตซ์ที่ความถี่ 30 kHz ปรับความเร็วรอบด้วยวิธีการปรับสัญญาณ CCP ในส่วนการหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ใช้วิธีการ system identification จากนั้นต่อฟวมอเตอร์เข้ากับโหลดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นภายนอกเพื่อทำการทดสอบกับ โหลดความต้านทาน

ผลการทดสอบการจำลองกังหันลมควบคุมตามลักษณะการทำงานของมอเตอร์คือ 1.ต่ำกว่า พิกัดของมอเตอร์ ทดสอบที่ความเร็วลม 2.5 m/s และ 3m/s ใช้การควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์ 2. พิกัดของมอเตอร์ทดสอบที่ความเร็วลม 5.5m/s ใช้การควบคุมแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์และ 3.สูงกว่า พิกัดของมอเตอร์ ทดสอบที่ความเร็วลม 9m/s ใช้การควบคุมแรงดันขดลวดสนาม มีค่าความ แปรปรวนเฉลี่ยเท่ากับ 0.60484 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบจากมอเตอร์มีค่าใกล้เคียง กับค่าความเร็วรอบอ้างอิงของกังหันลม โดยมีค่าความแปรปรวนอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

5.1 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

จากการทดสอบสามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นของงานวิจัย ระบบจำลองการทำงานของ กังหันลมที่ใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แบบเวลาจริง ดังนี้

5.1.1 การทดสอบรับสัญญาณกระแสหากศึกษาจากข้อมูลอ้างอิงอุปกรณ์แล้ว กระแสที่ 0 แอมป์ แรงดันอ้างอิงที่จ่ายออกมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 2.5 โวลต์ แต่เมื่อทดสอบจริงจะได้

แรงดันที่ 2.482 โวลต์ ดังนั้นควรกำหนดการเขียนโปรแกรมรับค่ากระแสที่ 0 แอมป์ เป็น 2.482 โวลต์ ไม่ควรกำหนดตามข้อมูลอ้างอิงอุปกรณ์

5.1.2 การเก็บผลการทดลองเกิดปัญหาในส่วนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากความถี่สูงในการสับสวิทช์ของมอสเฟส โดยเฉพาะเมื่อขับมอเตอร์ที่ความเร็วรอบสูง ทำให้ค่ารอบและกระแสที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง แนวทางการแก้ไขคือต้องสร้างวงจรกรองความถี่ ให้สัญญาณที่เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เรียบขึ้น

5.1.3 การเขียนโปรแกรมควบคุมในส่วนการรับสัญญาณกระแส จะมีกระแสในส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากเป็นกระแสย้อนกลับ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าเป็นค่าติดลบ วิธีการแก้ไขคือในส่วนของตัวโปรแกรมจะมีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ให้ใช้งานให้กลับค่าของกระแสจากลบให้เป็นบวกและกำหนดได้ว่าถ้ากระแสที่มีค่าเกินกว่าค่าความเป็นจริงให้โปรแกรมไม่นำมาคิด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในส่วนของฮาร์ดแวร์ชุดต้นแบบ ควรออกแบบหลายวงจรให้มีความเสถียรภาพให้ดีขึ้นเนื่องจากการรบกวนของสัญญาณความถี่สูง

5.2.2 ในการพัฒนางานวิจัยให้ดีขึ้น ควรมีการพัฒนาการสร้างซอฟต์แวร์สำเร็จรูป ให้ใช้งานง่ายขึ้น ไม่ยุ่งยากและสามารถนำไปใช้ประกอบประกอบการเรียนการสอนได้

5.2.3 การวัดค่าได้ใช้โปรแกรม hyper terminal ในการเก็บผลและแสดงผลการทำงานแล้วจึงนำมาพลอตกราฟ หากจะพัฒนาควรพัฒนาการแสดงผลเป็นกราฟิกของทุกๆ ส่วนนับจากอินพุตจนถึงเอาต์พุต ให้เป็นเวลาจริงโดยการพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติม ให้สามารถแสดงผลได้ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] นพรัตน์ ม่วงคุ้มและวิษณุ เหมือนแแกร “เครื่องจำลองกักกันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเทอร์เฟซการ์ด DS1104” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, 2552
- [2] สมพร ศุภรัตน์สมบัติและ ธเนศร์ อุดมศรี “ชุดสาธิตระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้ตัวควบคุมพีไอแบบลูปปิด” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538
- [3] จิระศักดิ์ วงศา.เอกสารประกอบการสอน วิชาไมโครคอนโทรลเลอร์. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี, 2554
- [4] รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน. วุฒิพล ธารศิริเศรษฐ์. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” หจก. วี.เจ. พรินติ้ง, 2547.
- [5] dSPACE. [ออนไลน์] 21 มกราคม 2549. [สืบค้นวันที่ 9 สิงหาคม 2554]. จาก www.dspace.com
- [6] สมหวัง อริสริวงษ์. การควบคุมอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์แบบเวลาจริงโดยใช้ MATLAB/SIMULINK ร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ. [ออนไลน์] 23 มีนาคม 2550. [สืบค้นวันที่ 9 สิงหาคม 2554]. จาก www.thailandindustry.com
- [7] ดอนสัน ปงผาบ และ ทิพวัลย์ คำน้ำนอง, 2550, ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และการประยุกต์ใช้งาน, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ
- [8] จิรายุทธ แก้วอาสา, ชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบลูปปิดบนจอกอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม visual basic. วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ. กรุงเทพฯ, 2549
- [9] วงจร Chopper. [ออนไลน์] 15 มีนาคม 2549 [สืบค้นวันที่ 22 สิงหาคม 2554]. จาก www.oocities.org/powerelectronics1995/choppers.doc
- [10] การหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์. [ออนไลน์] 8 พฤษภาคม 2551 [สืบค้นวันที่ 10 สิงหาคม 2554]. จาก eestud.en.kku.ac.th/~u4021015/.../project%20report1.doc
- [11] ข้อมูลจำเพาะ: Model 1000L กักกันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์, บริษัท เดอะคลินิคคอมเน็ทเวิร์ค จำกัด







PIC18F2331/2431/4331/4431

Data Sheet

28/40/44-Pin Enhanced
Flash Microcontrollers
with nanoWatt Technology,
High Performance PWM and A/D



MICROCHIP PIC18F2331/2431/4331/4431

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology, High Performance PWM and A/D

14-bit Power Control PWM Module:

- Up to 4 channels with complementary outputs
- Edge- or center-aligned operation
- Flexible dead-band generator
- Hardware fault protection inputs
- Simultaneous update of duty cycle and period:
 - Flexible special event trigger output

Motion Feedback Module:

- Three independent input capture channels:
 - Flexible operating modes for period and pulse width measurement
 - Special Hall Sensor interface module
 - Special event trigger output to other modules
- Quadrature Encoder Interface:
 - 2 phase inputs and one index input from encoder
 - High and low position tracking with direction status and change of direction interrupt
 - Velocity measurement

High-Speed, 200 Ksps 10-bit A/D Converter:

- Up to 9 channels
- Simultaneous two-channel sampling
- Sequential sampling: 1, 2 or 4 selected channels
- Auto-conversion capability
- 4-word FIFO with selectable interrupt frequency
- Selectable external conversion triggers
- Programmable acquisition time

Flexible Oscillator Structure:

- Four crystal modes up to 40 MHz
- Two external clock modes up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies: 31 kHz to 8 MHz
 - OSCUNE can compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown of device if clock fails

Power-Managed Modes:

- Run CPU on, peripherals on
- Idle CPU off, peripherals on
- Sleep CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep current down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator, 1.8 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer (WDT), 2.1 μ A typical
- Two-Speed oscillator start-up

Peripheral Highlights:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (TCY/16)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (TCY)
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10 bits
- Enhanced USART module:
 - Supports RS-485, RS-232 and LIN 1.2
 - Auto-Wake-up on Start bit
 - Auto-Baud detect
- RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)

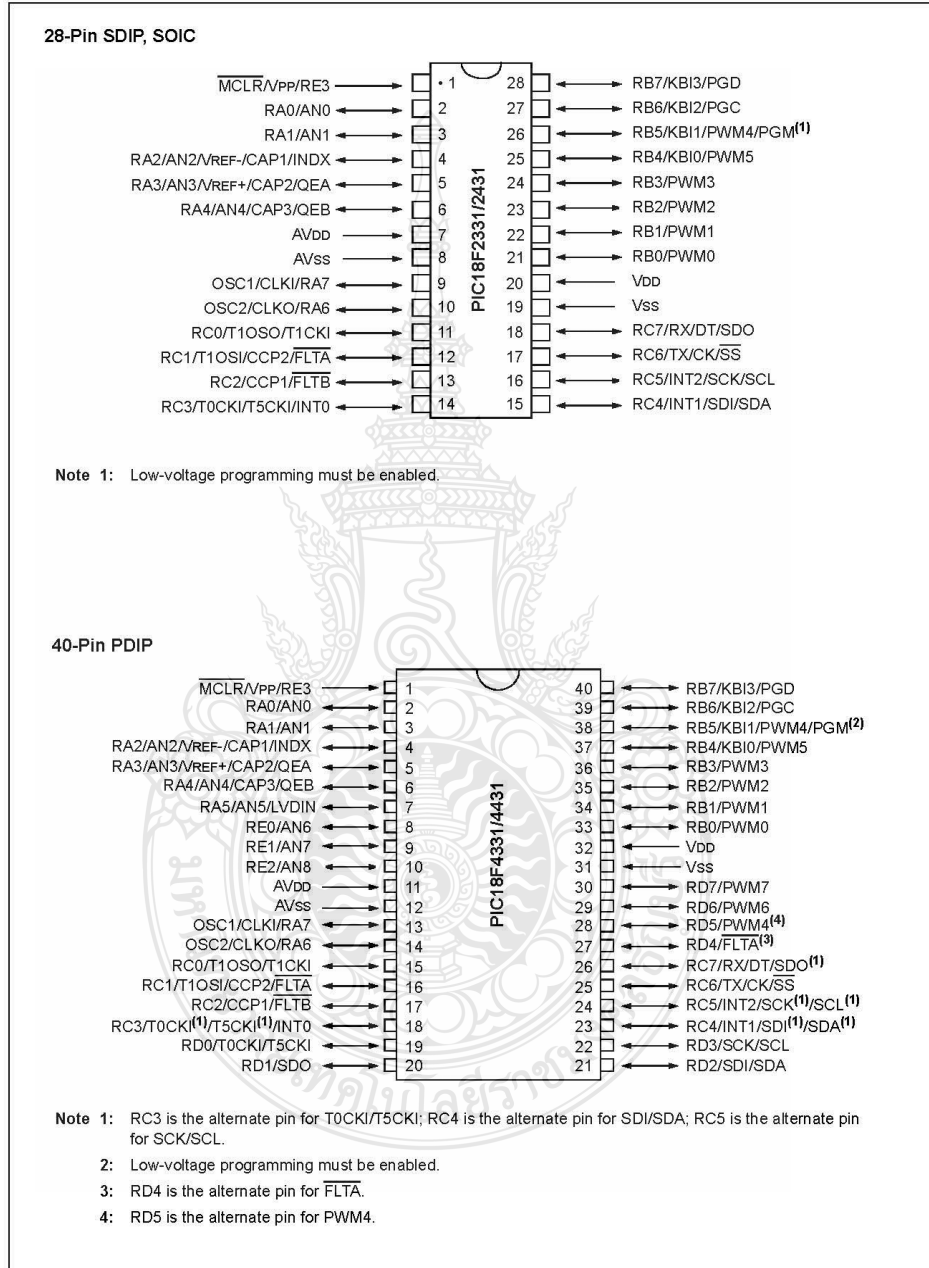
Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: 100 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 X 8 Single-cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-supply In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
 - Drives PWM outputs safely when debugging

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP	SSP		EUSART	Quadrature Encoder	14-bit PWM (ch)	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Slave I ² C™				
PIC18F2331	8192	4096	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F2431	16384	8192	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F4331	8192	4096	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3
PIC18F4431	16384	8192	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3

PIC18F2331/2431/4331/4431

Pin Diagrams



PIC18F2331/2431/4331/4431

1.3 Details on Individual Family Members

Devices in the PIC18F2331/2431/4331/4431 family are available in 28-pin (PIC18F2X31) and 40/44-pin (PIC18F4X31) packages. The block diagram for the two groups is shown in Figure 1-1.

The devices are differentiated from each other in three ways:

1. Flash program memory (8 Kbytes for PIC18F2X31 devices, 16 Kbytes for PIC18F4X31).
2. A/D channels (5 for PIC18F2X31 devices, 9 for PIC18F4X31 devices).
3. I/O ports (3 bidirectional ports on PIC18F2X31 devices, 5 bidirectional ports on PIC18F4X31 devices).

All other features for devices in this family are identical. These are summarized in Table 1-1.

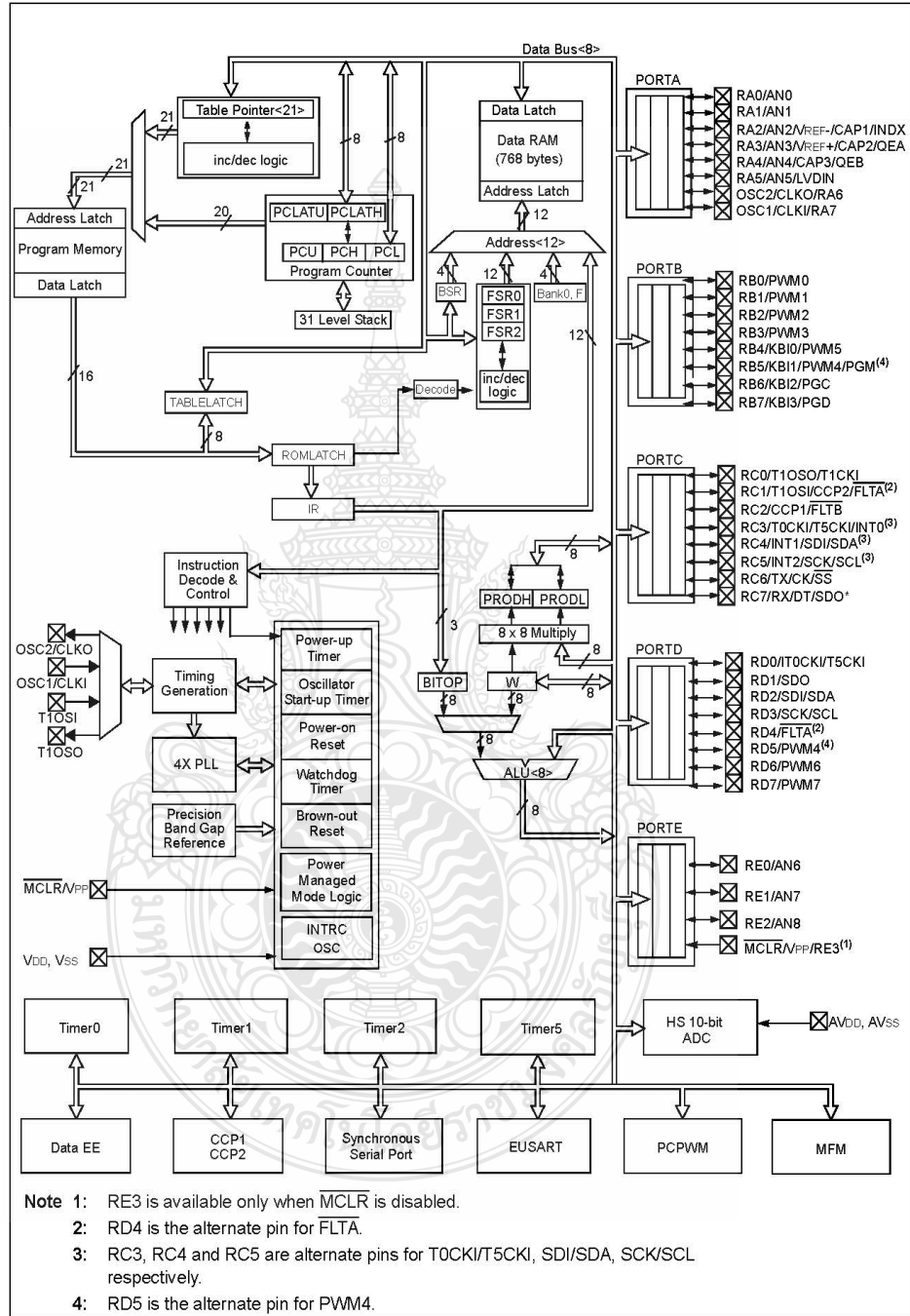
The pinouts for all devices are listed in Table 1-2 and Table 1-3.

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2331	PIC18F2431	PIC18F4331	PIC18F4431
Operating Frequency	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Program Memory (Bytes)	8192	16384	8192	16384
Program Memory (Instructions)	4096	8192	4096	8192
Data Memory (Bytes)	768	768	768	768
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	22	22	34	34
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
14-bit Power Control PWM	(6 Channels)	(6 Channels)	(8 Channels)	(8 Channels)
Motion Feedback module (Input Capture/Quadrature Encoder Interface)	1 QEI or 3x IC	1 QEI or 3x IC	1 QEI or 3x IC	1 QEI or 3x IC
Serial Communications	SSP, Enhanced USART	SSP, Enhanced USART	SSP, Enhanced USART	SSP, Enhanced USART
10-bit High-Speed Analog-to-Digital Converter module	5 Input Channels	5 Input Channels	9 Input Channels	9 Input Channels
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions
Packages	28-pin SDIP 28-pin SOIC	28-pin SDIP 28-pin SOIC	40-pin DIP 44-pin TQFP 44-pin QFN	40-pin DIP 44-pin TQFP 44-pin QFN

PIC18F2331/2431/4331/4431

FIGURE 1-2: PIC18F4331/4431 BLOCK DIAGRAM



PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-2: PIC18F2331/2431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number		Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	SOIC			
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	11	11	I/O O I	ST — ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2/FLTA RC1 T1OSI CCP2 FLTA	12	12	I/O I I/O I	ST CMOS ST ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output. Fault interrupt input pin.
RC2/CCP1/FLTB RC2 CCP1 FLTB	13	13	I/O I/O I	ST ST ST	Digital I/O. Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output. Fault interrupt input pin.
RC3/T0CKI/T5CKI/INT0 RC3 T0CKI T5CKI INT0	14	14	I/O I I I	ST ST ST ST	Digital I/O. Timer0 alternate clock input. Timer5 alternate clock input. External interrupt 0.
RC4/INT1/SDI/SDA RC4 INT1 SDI SDA	15	15	I/O I I I/O	ST ST ST ST	Digital I/O. External interrupt 1. SPI™ data in. I ² C™ data I/O.
RC5/INT2/SCK/SCL RC5 INT2 SCK SCL	16	16	I/O I I/O I/O	ST ST ST ST	Digital I/O. External interrupt 2. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC6/TX/CK/SS RC6 TX CK SS	17	17	I/O O I/O I	ST — ST TTL	Digital I/O. USART Asynchronous Transmit. USART Synchronous Clock (see related RX/DT). SPI Slave Select input.
RC7/RX/DT/SDO RC7 RX DT SDO	18	18	I/O I I/O O	ST ST ST —	Digital I/O. USART Asynchronous Receive. USART Synchronous Data (see related TX/CK). SPI data out.
Vss	8, 19	8, 19	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	7, 20	7, 20	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
MCLR/VPP/RE3 MCLR VPP RE3	1	18	18	I P I	ST ST	Master Clear (input) or programming voltage (input). Master Clear (Reset) input. This pin is an active-low. Reset to the device. Programming voltage input. Digital input. Available only when MCLR is disabled.
OSC1/CLKI/RA7 OSC1 CLKI RA7	13	30	32	I I I/O	ST CMOS TTL	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode, CMOS otherwise. External clock source input. Always associated with pin function OSC1. (See related OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins.) General purpose I/O pin.
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	14	31	33	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.
RA0/AN0 RA0 AN0 RA1/AN1 RA1 AN1 RA2/AN2/VREF-/CAP1/ INDX RA2 AN2 VREF- CAP1 INDX RA3/AN3/VREF+/ CAP2/QEA RA3 AN3 VREF+ CAP2 QEA RA4/AN4/CAP3/QEB RA4 AN4 CAP3 QEB RA5/AN5/LVDIN RA5 AN5 LVDIN	2 3 4 5 6 7	19 20 21 22 23 24	19 20 21 22 23 24	I/O I I/O I I/O I I I I/O I I I I/O I I I	TTL Analog TTL Analog TTL Analog ST ST TTL Analog ST ST TTL Analog ST ST TTL Analog Analog	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0. Digital I/O. Analog input 1. Digital I/O. Analog input 2. A/D Reference Voltage (Low) input. Input capture pin 1. Quadrature Encoder Interface index input pin. Digital I/O. Analog input 3. A/D Reference Voltage (High) input. Input capture pin 2. Quadrature Encoder Interface channel A input pin. Digital I/O. Analog input 4. Input capture pin 3. Quadrature Encoder Interface channel B input pin. Digital I/O. Analog input 5. Low-voltage Detect input.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.						
RB0/PWM0	33	8	9	I/O	TTL	Digital I/O.
RB0				O	TTL	PWM output 0.
RB1/PWM1	34	9	10	I/O	TTL	Digital I/O.
RB1				O	TTL	PWM output 1.
RB2/PWM2	35	10	11	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2				O	TTL	PWM output 2.
RB3/PWM3	36	11	12	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3				O	TTL	PWM output 3.
RB4/KBI0/PWM5	37	14	14	I/O	TTL	Digital I/O.
RB4				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI0				O	TTL	PWM output 5.
RB5/KBI1/PWM4/PGM	38	15	15	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI1				O	TTL	PWM output 4.
PGM				I/O	ST	Low-voltage ICSP programming entry pin.
RB6/KBI2/PGC	39	16	16	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI2				I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming clock pin.
PGC						
RB7/KBI3/PGD	40	17	17	I/O	TTL	Digital I/O.
RB7				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI3				I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming data pin.
PGD						

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
RC0/T1OSO/T1CKI	15	32	34	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RC0				O	—	Digital I/O.
T1OSO				I	—	Timer1 oscillator output.
T1CKI				I	ST	Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2/FLTA	16	35	35	I/O	ST	Digital I/O.
RC1				I	CMOS	Timer1 oscillator input.
T1OSI				I/O	ST	Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output.
CCP2				I	ST	Fault interrupt input pin.
FLTA				I	ST	Fault interrupt input pin.
RC2/CCP1/FLT \overline{B}	17	36	36	I/O	ST	Digital I/O.
RC2				I/O	ST	Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.
CCP1				I	ST	Fault interrupt input pin.
FLT \overline{B}				I	ST	Fault interrupt input pin.
RC3/T0CKI/T5CKI/INT0	18	37	37	I/O	ST	Digital I/O.
RC3				I	ST	Timer0 alternate clock input.
T0CKI				I	ST	Timer5 alternate clock input.
T5CKI				I	ST	External interrupt 0.
INT0				I	ST	External interrupt 0.
RC4/INT1/SDI/SDA	23	42	42	I/O	ST	Digital I/O.
RC4				I	ST	External interrupt 1.
INT1				I	ST	SPI Data in.
SDI				I/O	ST	I ² C Data I/O.
SDA				I/O	ST	I ² C Data I/O.
RC5/INT2/SCK/SCL	24	43	43	I/O	ST	Digital I/O.
RC5				I	ST	External interrupt 2.
INT2				I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI mode.
SCK				I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
SCL				I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC6/TX/CK/ \overline{SS}	25	44	44	I/O	ST	Digital I/O.
RC6				O	—	USART Asynchronous Transmit.
TX				I/O	ST	USART Synchronous Clock (see related RX/DT).
CK				I	ST	SPI Slave Select input.
\overline{SS}				I	ST	SPI Slave Select input.
RC7/RX/DT/SDO	26	1	1	I/O	ST	Digital I/O.
RC7				I	ST	USART Asynchronous Receive.
RX				I/O	ST	USART Synchronous Data (see related TX/CK).
DT				O	—	SPI Data out.
SDO				O	—	SPI Data out.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description	
	DIP	TQFP	QFN				
RD0/T0CKI/T5CKI	19	38	38	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port, or a Parallel Slave Port (PSP) for interfacing to a microprocessor port. These pins have TTL input buffers when PSP module is enabled. Digital I/O.	
RD0				I	ST		Timer0 external clock input.
T0CKI				I	ST		Timer5 input clock.
RD1/SDO	20	39	39	I/O	ST	Digital I/O.	
RD1				O	—		SPI Data out.
RD2/SDI/SDA	21	40	40	I/O	ST	Digital I/O.	
RD2				I	ST		SPI Data in.
SDI				I/O	ST		I ² C Data I/O.
RD3/SCK/SCL	22	41	41	I/O	ST	Digital I/O.	
RD3				I/O	ST		Synchronous serial clock input/output for SPI mode.
SCK				I/O	ST		Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RD4/FLTA	27	2	2	I/O	ST	Digital I/O.	
RD4				I	ST		Fault interrupt input pin.
RD5/PWM4	28	3	3	I/O	ST	Digital I/O.	
RD5				O	TTL		PWM output 4.
RD6/PWM6	29	4	4	I/O	ST	Digital I/O.	
RD6				O	TTL		PWM output 6.
RD7/PWM7	30	5	5	I/O	ST	Digital I/O.	
RD7				O	TTL		PWM output 7.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
RE0/AN6 RE0 AN6	8	25	25	I/O I	ST Analog	PORTE is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 6.
RE1/AN7 RE1 AN7	9	26	26	I/O I	ST Analog	Digital I/O. Analog input 7.
RE2/AN8 RE2 AN8	10	27	27	I/O I	ST Analog	Digital I/O. Analog input 8.
Vss	12, 31	6, 29	6, 30, 31	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	11, 32	7, 28	7, 8, 28, 29	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
NC	—	12, 13, 33, 34	13	NC	NC	No connect

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to VDD)



PIC18F2331/2431/4331/4431

2.0 OSCILLATOR CONFIGURATIONS

2.1 Oscillator Types

The PIC18F2331/2431/4331/4431 devices can be operated in 10 different oscillator modes. The user can program the configuration bits Fosc3:Fosc0 in Configuration register 1H to select one of these 10 modes:

1. LP Low-power Crystal
2. XT Crystal/Resonator
3. HS High-speed Crystal/Resonator
4. HSPLL High-speed Crystal/Resonator with PLL enabled
5. RC External Resistor/Capacitor with Fosc/4 output on RA6
6. RCIO External Resistor/Capacitor with I/O on RA6
7. INTIO1 Internal Oscillator with Fosc/4 output on RA6 and I/O on RA7
8. INTIO2 Internal Oscillator with I/O on RA6 and RA7
9. EC External Clock with Fosc/4 output
10. ECIO External Clock with I/O on RA6

2.2 Crystal Oscillator/Ceramic Resonators

In XT, LP, HS or HSPLL oscillator modes, a crystal or ceramic resonator is connected to the OSC1 and OSC2 pins to establish oscillation. Figure 2-1 shows the pin connections.

The oscillator design requires the use of a parallel cut crystal.

Note: Use of a series cut crystal may give a frequency out of the crystal manufacturers' specifications.

FIGURE 2-1: CRYSTAL/CERAMIC RESONATOR OPERATION (XT, LP, HS OR HSPLL CONFIGURATION)

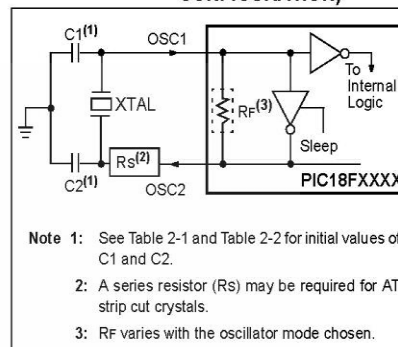


TABLE 2-1: CAPACITOR SELECTION FOR CERAMIC RESONATORS

Typical Capacitor Values Used:			
Mode	Freq	OSC1	OSC2
XT	455 kHz	56 pF	56 pF
	2.0 MHz	47 pF	47 pF
	4.0 MHz	33 pF	33 pF
HS	8.0 MHz	27 pF	27 pF
	16.0 MHz	22 pF	22 pF

Capacitor values are for design guidance only.
These capacitors were tested with the resonators listed below for basic start-up and operation. **These values are not optimized.**
Different capacitor values may be required to produce acceptable oscillator operation. The user should test the performance of the oscillator over the expected VDD and temperature range for the application.
See the notes on page 22 for additional information.

Resonators Used:	
455 kHz	4.0 MHz
2.0 MHz	8.0 MHz
16.0 MHz	

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 2-2: CAPACITOR SELECTION FOR CRYSTAL OSCILLATOR

Osc Type	Crystal Freq	Typical Capacitor Values Tested:	
		C1	C2
LP	32 kHz	33 pF	33 pF
	200 kHz	15 pF	15 pF
XT	1 MHz	33 pF	33 pF
	4 MHz	27 pF	27 pF
HS	4 MHz	27 pF	27 pF
	8 MHz	22 pF	22 pF
	20 MHz	15 pF	15 pF

Capacitor values are for design guidance only.

These capacitors were tested with the crystals listed below for basic start-up and operation. **These values are not optimized.**

Different capacitor values may be required to produce acceptable oscillator operation. The user should test the performance of the oscillator over the expected VDD and temperature range for the application.

See the notes following this table for additional information.

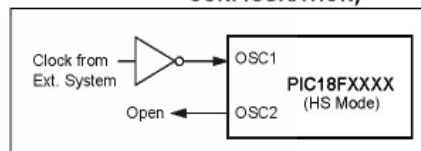
Crystals Used:

32 kHz	4 MHz
200 kHz	8 MHz
1 MHz	20 MHz

- Note 1:** Higher capacitance increases the stability of oscillator, but also increases the start-up time.
- 2:** When operating below 3V VDD, or when using certain ceramic resonators at any voltage, it may be necessary to use the HS mode or switch to a crystal oscillator.
- 3:** Since each resonator/crystal has its own characteristics, the user should consult the resonator/crystal manufacturer for appropriate values of external components.
- 4:** Rs may be required to avoid overdriving crystals with low drive level specification.
- 5:** Always verify oscillator performance over the VDD and temperature range that is expected for the application.

An external clock source may also be connected to the OSC1 pin in the HS mode, as shown in Figure 2-2.

FIGURE 2-2: EXTERNAL CLOCK INPUT OPERATION (HS OSC CONFIGURATION)



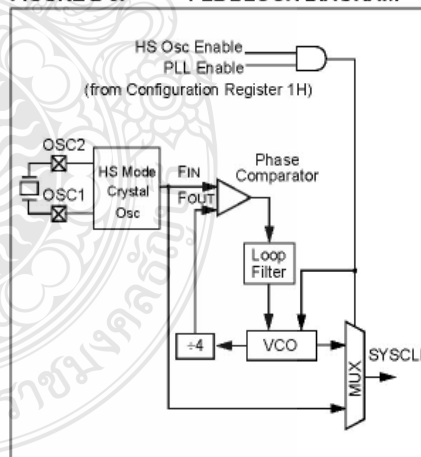
2.3 HSPLL

A Phase Locked Loop (PLL) circuit is provided as an option for users who wish to use a lower frequency crystal oscillator circuit, or to clock the device up to its highest rated frequency from a crystal oscillator. This may be useful for customers who are concerned with EMI due to high-frequency crystals.

The HSPLL mode makes use of the HS mode oscillator for frequencies up to 10 MHz. A PLL then multiplies the oscillator output frequency by 4 to produce an internal clock frequency up to 40 MHz.

The PLL is enabled only when the oscillator configuration bits are programmed for HSPLL mode. If programmed for any other mode, the PLL is not enabled.

FIGURE 2-3: PLL BLOCK DIAGRAM



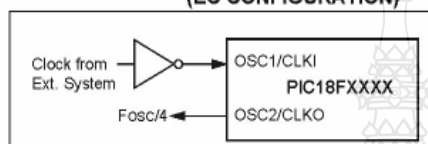
PIC18F2331/2431/4331/4431

2.4 External Clock Input

The EC and ECIO oscillator modes require an external clock source to be connected to the OSC1 pin. There is no oscillator start-up time required after a Power-on Reset or after an exit from Sleep mode.

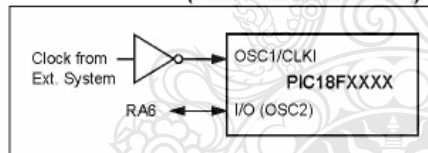
In the EC Oscillator mode, the oscillator frequency divided by 4 is available on the OSC2 pin. This signal may be used for test purposes or to synchronize other logic. Figure 2-4 shows the pin connections for the EC Oscillator mode.

FIGURE 2-4: EXTERNAL CLOCK INPUT OPERATION (EC CONFIGURATION)



The ECIO Oscillator mode functions like the EC mode, except that the OSC2 pin becomes an additional general purpose I/O pin. The I/O pin becomes bit 6 of PORTA (RA6). Figure 2-5 shows the pin connections for the ECIO Oscillator mode.

FIGURE 2-5: EXTERNAL CLOCK INPUT OPERATION (ECIO CONFIGURATION)

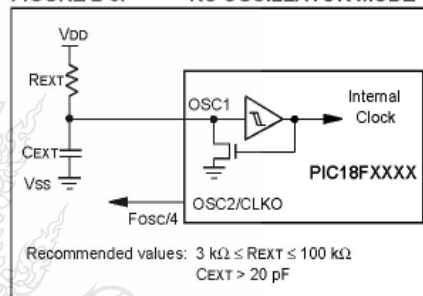


2.5 RC Oscillator

For timing insensitive applications, the "RC" and "RCIO" device options offer additional cost savings. The RC oscillator frequency is a function of the supply voltage, the resistor (REXT) and capacitor (CEXT) values and the operating temperature. In addition to this, the oscillator frequency will vary from unit to unit due to normal manufacturing variation. Furthermore, the difference in lead frame capacitance between package types will also affect the oscillation frequency, especially for low CEXT values. The user also needs to take into account variation due to tolerance of external R and C components used. Figure 2-6 shows how the R/C combination is connected.

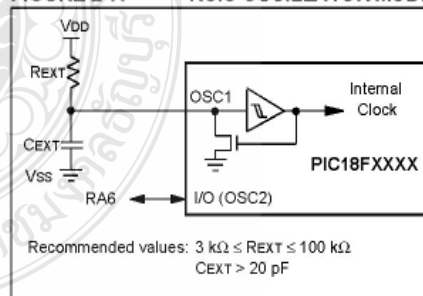
In the RC Oscillator mode, the oscillator frequency divided by 4 is available on the OSC2 pin. This signal may be used for test purposes or to synchronize other logic.

FIGURE 2-6: RC OSCILLATOR MODE



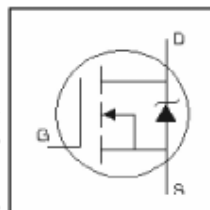
The RCIO Oscillator mode (Figure 2-7) functions like the RC mode, except that the OSC2 pin becomes an additional general purpose I/O pin. The I/O pin becomes bit 6 of PORTA (RA6).

FIGURE 2-7: RCIO OSCILLATOR MODE



HEXFET® Power MOSFET

- Ultra Low Gate Charge
- Reduced Gate Drive Requirement
- Enhanced 30V V_{GS} Rating
- Reduced C_{ISS} , C_{OSS} , C_{RSS}
- Isolated Central Mounting Hole
- Dynamic dv/dt Rated
- Repetitive Avalanche Rated



$$V_{DSS} = 500V$$

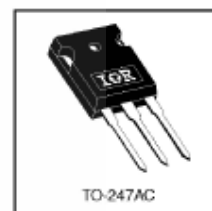
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

This new series of Low Charge HEXFET Power MOSFETs achieve significantly lower gate charge over conventional MOSFETs. Utilizing advanced Hexfet technology the device improvements allow for reduced gate drive requirements, faster switching speeds and increased total system savings. These device improvements combined with the proven ruggedness and reliability of HEXFETs offer the designer a new standard in power transistors for switching applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



TO-247AC

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	12	
I_{DM}	Pulsed Drain Current Φ	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 30	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy Φ	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current Φ	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy Φ	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt Φ	3.5	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf-in (1.1N-m)	


Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	—	


Revision 0

IRFP460LC

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.59	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(ON)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 12A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	12	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 12A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 500V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250	μA	$V_{DS} = 400V, V_{GS} = 0V, T_J = 125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	120	nC	$I_D = 20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	32	nC	$V_{DS} = 400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	49	nC	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD} = 250V$
t_r	Rise Time	—	77	—	ns	$I_D = 20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	40	—	ns	$R_G = 4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	43	—	ns	$R_D = 12\Omega$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	3600	—	pF	$V_{DS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	440	—	pF	$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	39	—	pF	$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 20A, V_{GS} = 0V$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	6.6	9.9	μC	$di/dt = 100A/\mu\text{s}$ ③
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 4.3\text{mH}$, $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 20A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 20A$, $di/dt \leq 160A/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.



IRFP460LC

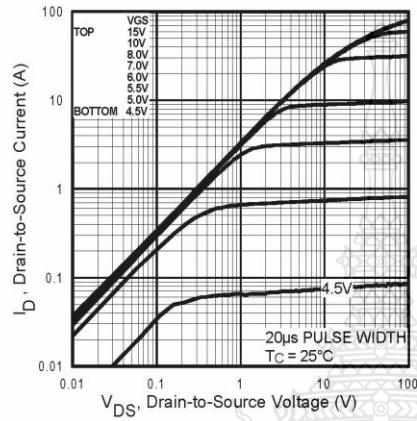


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C = 25^\circ\text{C}$

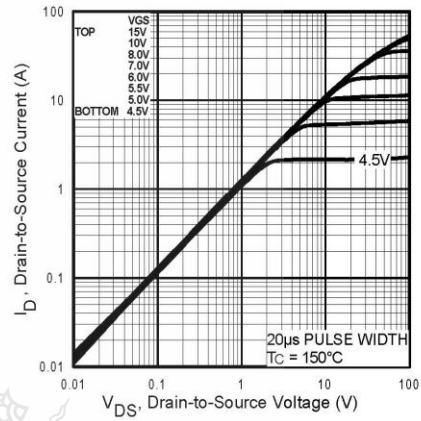


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C = 150^\circ\text{C}$

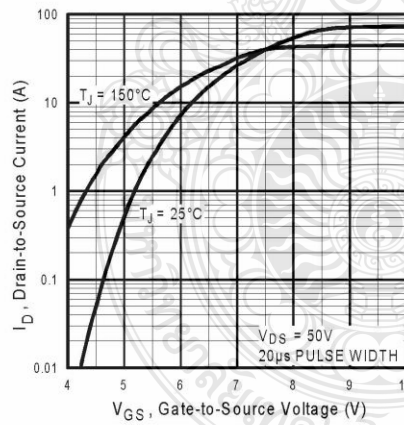


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

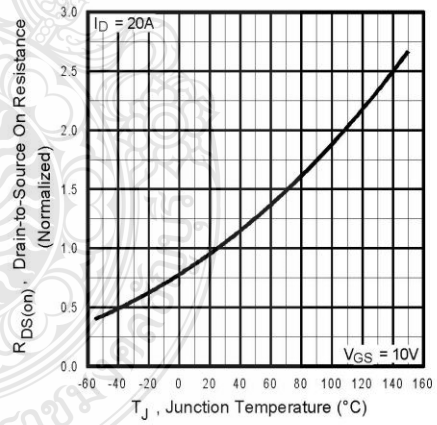


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFP460LC

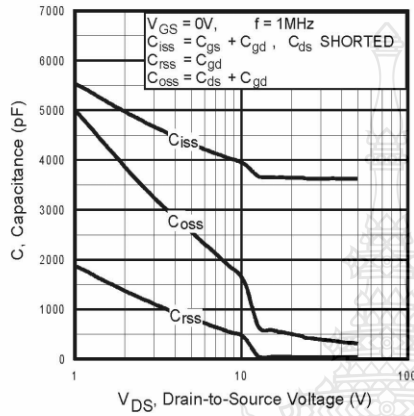


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

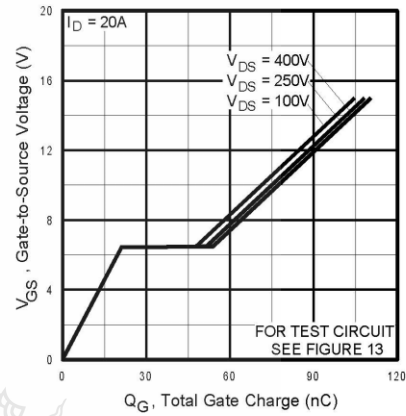


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

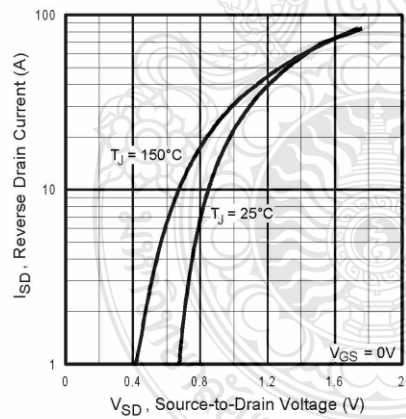


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

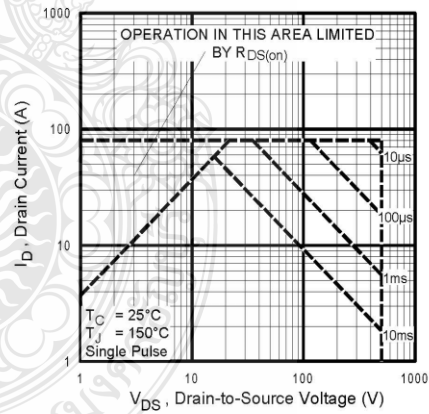


Fig 8. Maximum Safe Operating Area



IRFP460LC

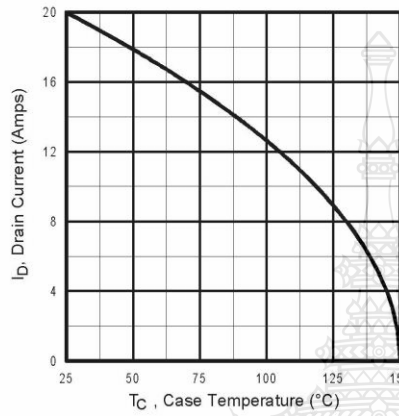


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

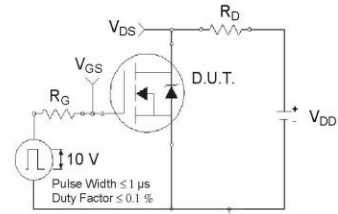


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

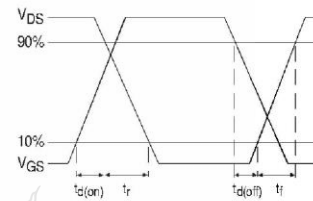


Fig 10b. Switching Time Waveforms

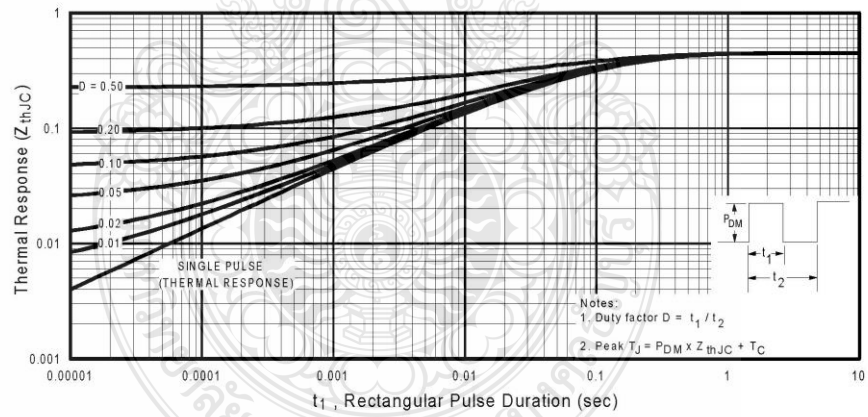


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFP460LC

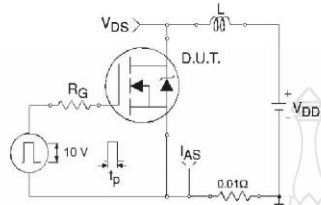


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

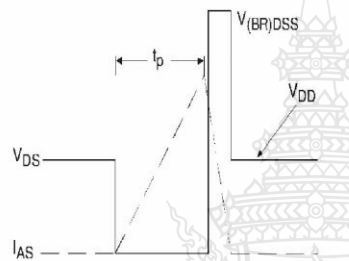


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

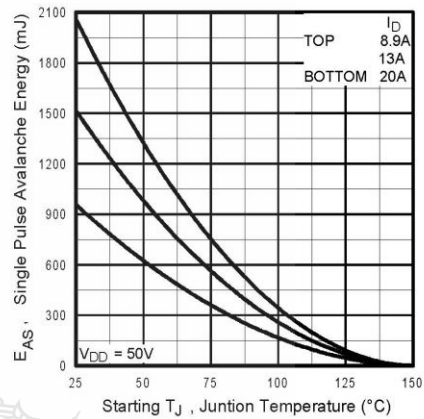


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

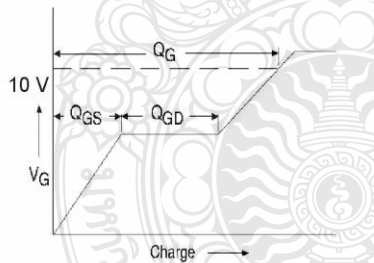


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

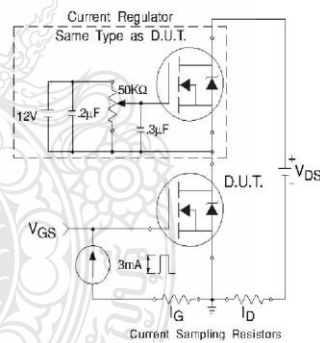
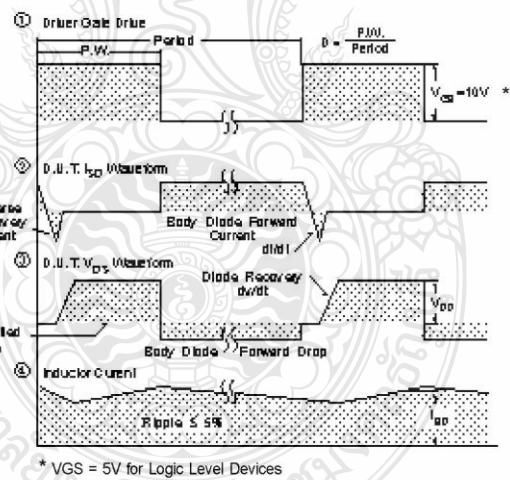
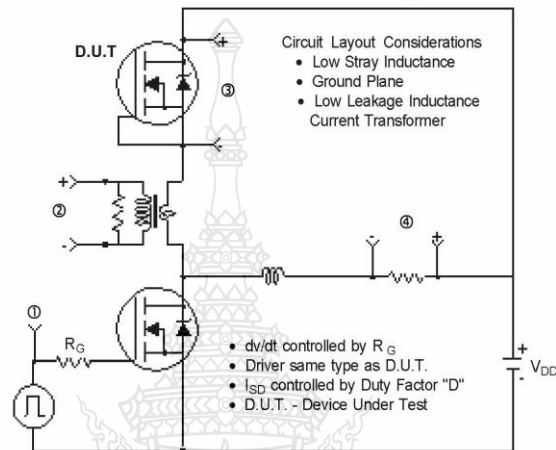


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



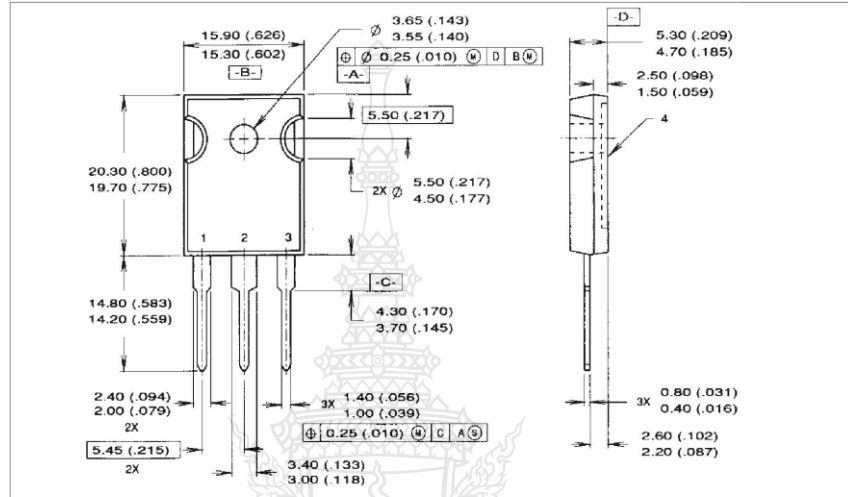
* VGS = 5V for Logic Level Devices

Fig 14. For N-Channel HEXFETS

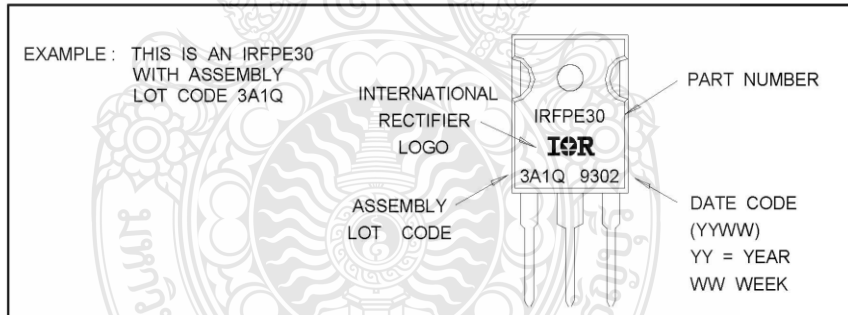
IRF460LC



Package Outline TO-247AC



Part Marking Information TO-247AC



WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, Tel: (310) 322 3331
EUROPEAN HEADQUARTERS: Hurst Green, Oxted, Surrey RH8 9BB, UK Tel: (44) 0883 713215
IR CANADA: 7321 Victoria Park Ave., Suite 201, Markham, Ontario L3R 3L1, Tel: (905) 475 1897 **IR GERMANY:**
 Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg Tel: 6172 37066 **IR ITALY:** Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino Tel: (39) 1145
 10111 **IR FAR EAST:** K&H Bldg., 2F, 3-30-4 Nishi-Ikeburo 3-Chome, Toshima-Ki, Tokyo 171 Tel: (03)3983 0641 **IR**
SOUTHEAST ASIA: 315 Outram Road, #10-02 Tan Boon Liat Building, 0316 Tel: 65 221 8371

Data and specifications subject to change without notice.

TLP250

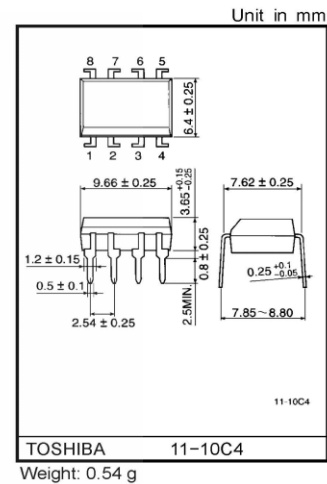
Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditionor
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

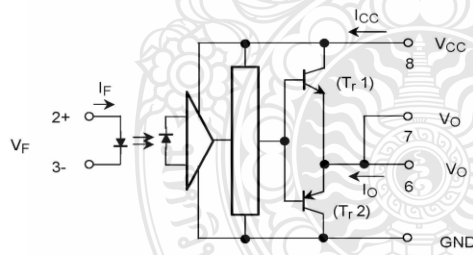
- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500V_{RMS}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823
 Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
 Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: 6.4mm(min.)
- Clearance: 6.4mm(min.)

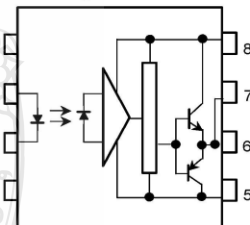


Schmatic



A 0.1 μF bypass capcitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

Truth Table

	Tr1	Tr2
Input LED On	On	Off
Input LED Off	Off	On

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_J	125	°C	
Detector	"H" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPH}	-1.5	A	
	"L" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPL}	+1.5	A	
	Output voltage	V_O	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	V_{CC}	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Junction temperature	T_J	125	°C	
	Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz	
Operating temperature range	T_{opr}	-20~85	°C		
Storage temperature range	T_{stg}	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	T_{sol}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	BV_S	2500	Vrms		

(Note 1) Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps

(Note 2) Exponential waveform

(Note 3) Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$, $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

(Note 4) Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	V_{CC}	15	—	30 20	V
Peak output current	I_{OPH}/I_{OPL}	—	—	±0.5	A
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	70 85	°C

TOSHIBA

TLP250

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F / ΔTa	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OPH}	3	V _{CC} = 30V (*1) I _F = 10 mA V ₈₋₆ = 4V I _F = 0 V ₆₋₅ = 2.5V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OPL}	2		0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V _{OL}	5	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	I _{CCCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I _{CCCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs

TOSHIBA

TLP250

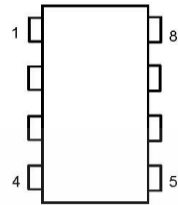
Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t _{pLH}	6 I _F = 8mA V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t _{pHL}		—	0.15	0.5	
Output rise time	t _r	7		—	—	—	
Output fall time	t _f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	C _{MH}	7	V _{CM} = 600V, I _F = 8mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output	C _{ML}	7	V _{CM} = 600V, I _F = 0mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

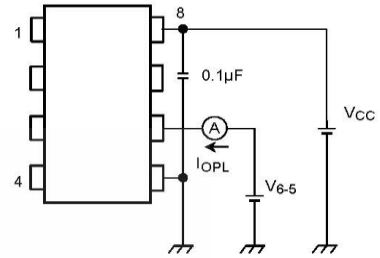
* All typical values are at Ta = 25°C



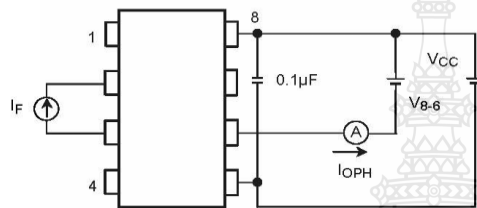
Test Circuit 1 :



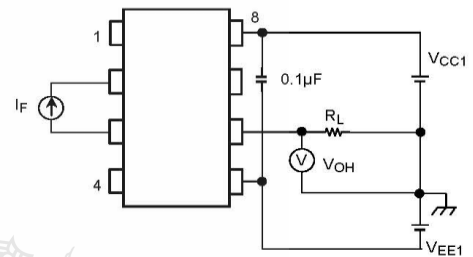
Test Circuit 2 : IOPL



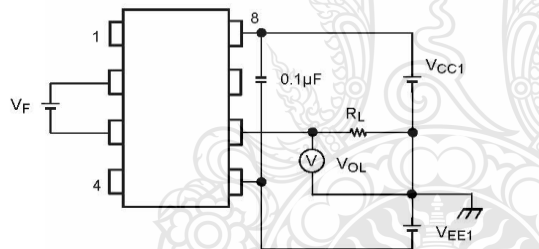
Test Circuit 3 : IOPH



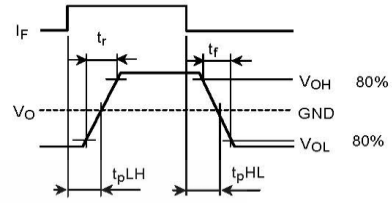
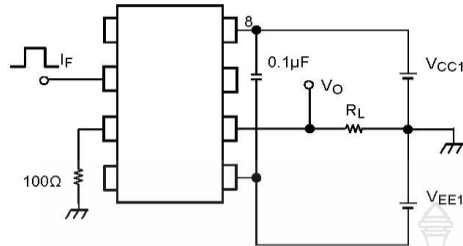
Test Circuit 4 : VOH



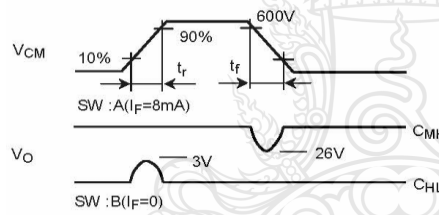
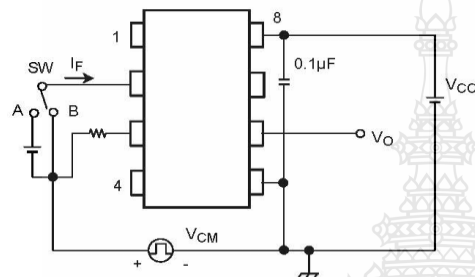
Test Circuit 5 : VOL



Test Circuit 6: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



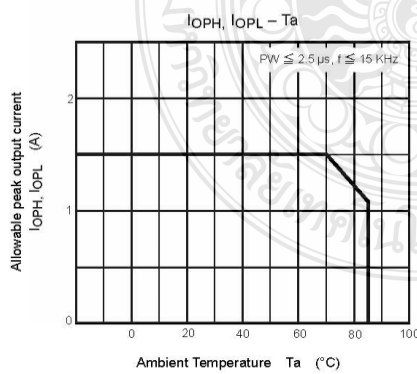
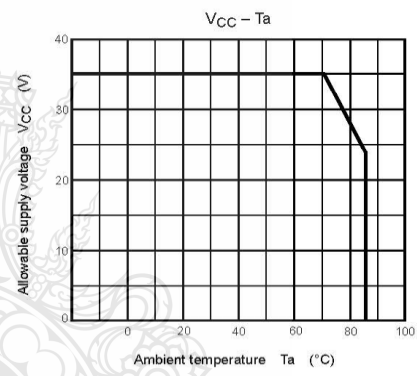
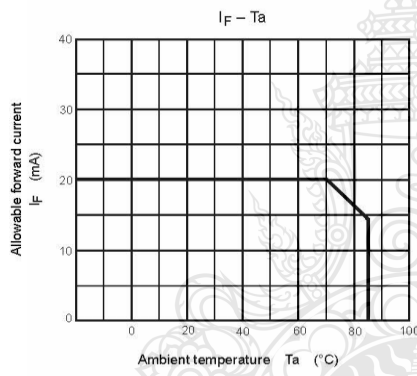
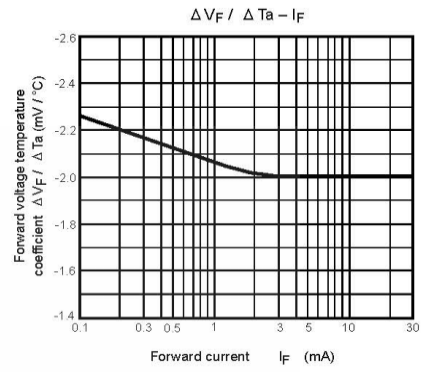
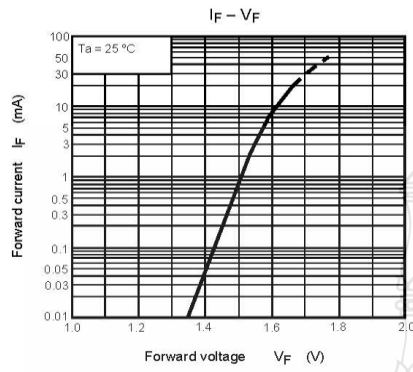
Test Circuit 7: C_{MH} , C_{ML}



$$C_{ML} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_f \text{ (\mu s)}}$$

$$C_{MH} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_r \text{ (\mu s)}}$$

$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.





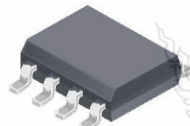
ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for <100 V Isolation Applications

Features and Benefits

- No external sense resistor required; single package solution
- 1.2 mΩ internal conductor resistance; reduced power loss
- Economical low- and high-side current sensing
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- ±12.5 A and ±25 A full scale sensing ranges
- Overcurrent FAULT trips and latches at 100% of full-scale current
- Low-noise analog signal path
- 100 kHz bandwidth
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 3.0 to 5.5 V, single supply operation
- Integrated electrostatic shield for output stability
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1



Description

The Allegro® ACS711 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in <100 V audio, communications systems, and white goods applications. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include circuit protection, current monitoring, and motor and inverter control.

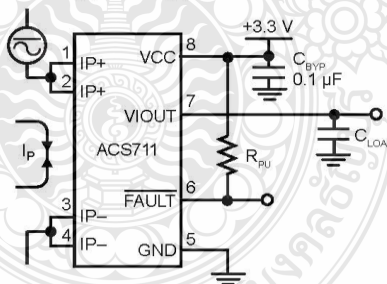
The device consists of a linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer.

The output of the device has a positive slope proportional to the current flow from IP+ to IP- (pins 1 and 2, to pins 3 and 4). The internal resistance of this conductive path is 1.2 mΩ typical, providing a non-intrusive measurement interface that saves power in applications that require energy efficiency.

The ACS711 is optimized for low-side current sensing applications, although the terminals of the conductive path are electrically isolated from the sensor leads (pins 5 through 8), providing sufficient internal creepage and clearance dimensions for a low AC or DC working voltage applications. The thickness

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1: The ACS711 outputs an analog signal, V_{IOUT} , that varies linearly with the bi-directional AC or DC primary current, I_P , within the range specified. The FAULT pin trips when I_P reaches ±100% of its full-scale current.

ACS711**Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications****Description (continued)**

of the copper conductor allows survival of the device at up to 5× overcurrent conditions.

The ACS711 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes.

Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Packing ¹	T _A (°C)	Optimized Accuracy Range, I _P (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS711ELCTR-12AB-T ²	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±12.5	110
ACS711ELCTR-25AB-T ²	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±25	55
ACS711KLCTR-12AB-T ²	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 125	±12.5	110
ACS711KLCTR-25AB-T ²	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 125	±25	55

¹Contact Allegro for additional packing options.

²Sensitivity measured with V_{CC} = 3.3 V.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V _{CC}		7	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Output Voltage	V _{IOUT}		7	V
Reverse Output Voltage	V _{RIOUT}		-0.1	V
Working Voltage for Basic Isolation	V _{WORKING}	Voltage applied between pins 1-4 and 5-8	100	VAC peak or VDC
FAULT Pin Voltage	V _{FAULT}		7	V
Overcurrent Transient Tolerance	I _{POC}	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T _A	Range E	-40 to 85	°C
		Range K	-40 to 125	°C
Maximum Junction Temperature	T _{J(max)}		165	°C
Storage Temperature	T _{stg}		-65 to 170	°C

Thermal Characteristics

Characteristic	Symbol	Test Conditions ¹	Value	Units
Package Thermal Resistance, Junction to Lead	R _{θJL}	Mounted on Allegro ASEK 711 evaluation board	5	°C/W
Package Thermal Resistance, Junction to Ambient ²	R _{θJA}	Mounted on Allegro 85-0404 evaluation board, includes the power consumed by the board	23	°C/W

¹Additional thermal information available on the Allegro website

²The Allegro evaluation board has 1500 mm² of 2 oz. copper on each side, connected to pins 1 and 2, and to pins 3 and 4, with thermal vias connecting the layers. Performance values include the power consumed by the PCB. Further details on the board are available from the Frequently Asked Questions document on our website.

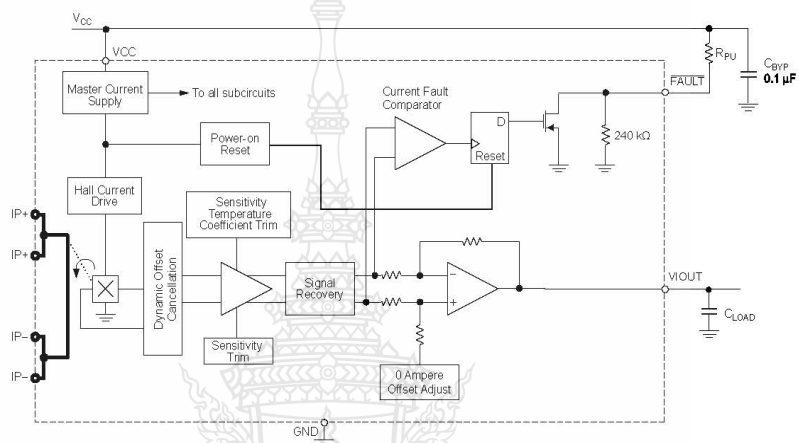


Allegro Microsystems, Inc.
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

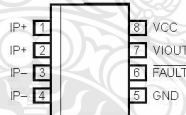
ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

Functional Block Diagram



Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sensed; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sensed; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FAULT	Overcurrent fault; active low
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

ACS711**Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent
Fault Output for < 100 V Isolation Applications****COMMON OPERATING CHARACTERISTICS** over full range of T_A and $V_{CC} = 3.3$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage ¹	V_{CC}		3	3.3	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 3.3$ V, output open	–	4	5.5	mA
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	VIOUT to GND	–	–	1	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	VIOUT to GND	15	–	–	k Ω
Primary Conductor Resistance	R_{IP}	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	1.2	–	m Ω
VIOUT Rise Time	t_r	$I_P = I_{P_{MAX}}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, COUT = open	–	3.5	–	μs
Propagation Delay Time	t_{PROP}	$I_P = I_P(\text{max})$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, COUT = open	–	1.2	–	μs
Response Time	$t_{RESPONSE}$	$I_P = I_P(\text{max})$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, COUT = open	–	4.6	–	μs
Internal Bandwidth ²	BW_I	–3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	100	–	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	–	± 1	–	%
Symmetry	E_{SYM}	Apply full scale I_P	–	100	–	%
VIOUT Saturation Voltages	V_{IOH}		$V_{CC} - 0.3$	–	–	V
	V_{IOL}		–	–	0.3	V
Quiescent Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	$I_P = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	$V_{CC} / 2$	–	V
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on primary conductor	–	35	–	μs
FAULT Pin Characteristics						
FAULT Operating Point	I_{FAULT}		–	$\pm 1 \times I_P$	–	A
FAULT Output Pullup Resistor	R_{PU}		1	–	–	k Ω
FAULT Output Voltage	V_{OH}		–	$V_{CC} - 0.3$	–	V
	V_{OL}	$R_{PU} = 1$ k Ω	–	0.3	–	V
FAULT Response Time	t_{FAULT}	Measured from $ I_P > I_{FAULT} $ to $V_{FAULT} \leq V_{OL}$	–	1.3	–	μs
V_{CC} Off Voltage Level for Fault Reset ³	V_{CCFR}		–	–	200	mV
V_{CC} Off Duration for Fault Reset ³	t_{CCFR}		100	–	–	μs

¹Devices are programmed for maximum accuracy at 3.3 V V_{CC} levels. The device contains ratiometry circuits that accurately alter the 0 A Output Voltage and Sensitivity level of the device in proportion to the applied V_{CC} level. However, as a result of minor nonlinearities in the ratiometry circuit additional output error will result when V_{CC} varies from the 3.3 V V_{CC} level. Customers that plan to operate the device from a 5 V regulated supply should contact their local Allegro sales representative regarding expected device accuracy levels under these bias conditions.

²Calculated using the formula $BW_I = 0.35 / t_r$.

³After the FAULT pin is latched low, the only way to reset it is through a power-off and power-on cycle on the VCC pin. To get a guaranteed fault reset, V_{CC} must stay below V_{CCFR} for a period greater than t_{CCFR} before settling to the normal operation voltage (3 to 5.5 V).



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

ACS711**Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent
Fault Output for < 100 V Isolation Applications****x12.5A PERFORMANCE CHARACTERISTICS for E TEMPERATURE RANGE** $T_A = 25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 3.3\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-12.5	-	12.5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P	-	110	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	110	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 85°C	-	110	-	mV/A
Noise ²	V_{NOISE}	$T_A = 25^\circ\text{C}$, no external low pass filter on VIOUT	-	11	-	mV
Electrical Offset Voltage	$V_{OE(TA)}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 5	-	mV
	$V_{OE(TOP)HT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 85°C	-	± 40	-	mV
	$V_{OE(TOP)LT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	± 50	-	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 12.5\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C	-	± 5	-	%

¹See Characteristic Performance Data for parameter distributions over temperature.

² ± 3 sigma noise voltage.

³Percentage of I_P , with $I_P = \pm 12.5\text{ A}$.

x12.5A PERFORMANCE CHARACTERISTICS for K TEMPERATURE RANGE¹ $T_A = 25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 3.3\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-12.5	-	12.5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P	-	110	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	110	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 125°C	-	110	-	mV/A
Noise ²	V_{NOISE}	$T_A = 25^\circ\text{C}$, no external low pass filter on VIOUT	-	11	-	mV
Electrical Offset Voltage	$V_{OE(TA)}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 5	-	mV
	$V_{OE(TOP)HT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 125°C	-	± 40	-	mV
	$V_{OE(TOP)LT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	± 50	-	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 12.5\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 125°C	-	± 5	-	%

¹See Characteristic Performance Data for parameter distributions over temperature.

² ± 3 sigma noise voltage.

³Percentage of I_P , with $I_P = \pm 12.5\text{ A}$.



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

ACS711**Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent
Fault Output for < 100 V Isolation Applications****x25A PERFORMANCE CHARACTERISTICS for E TEMPERATURE RANGE** $T_A = 25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 3.3\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-25	-	25	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P	-	55	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	55	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 85°C	-	55	-	mV/A
Noise ²	V_{NOISE}	$T_A = 25^\circ\text{C}$, no external low pass filter on VIOUT	-	8	-	mV
Electrical Offset Voltage	$V_{OE(TA)}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 5	-	mV
	$V_{OE(TOP)HT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 85°C	-	± 30	-	mV
	$V_{OE(TOP)LT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	± 35	-	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 25\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C	-	± 4	-	%

¹See Characteristic Performance Data for parameter distributions over temperature.

² ± 3 sigma noise voltage.

³Percentage of I_P , with $I_P = \pm 25\text{ A}$.

x25A PERFORMANCE CHARACTERISTICS for K TEMPERATURE RANGE¹ $T_A = 25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 3.3\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-25	-	25	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P	-	55	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	55	-	mV/A
		Full scale of I_P applied for 5 ms, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 125°C	-	55	-	mV/A
Noise ²	V_{NOISE}	$T_A = 25^\circ\text{C}$, no external low pass filter on VIOUT	-	8	-	mV
Electrical Offset Voltage	$V_{OE(TA)}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 5	-	mV
	$V_{OE(TOP)HT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ to 125°C	-	± 30	-	mV
	$V_{OE(TOP)LT}$	$I_P = 0\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	± 35	-	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 25\text{ A}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 125°C	-	± 4	-	%

¹See Characteristic Performance Data for parameter distributions over temperature.

² ± 3 sigma noise voltage.

³Percentage of I_P , with $I_P = \pm 25\text{ A}$.



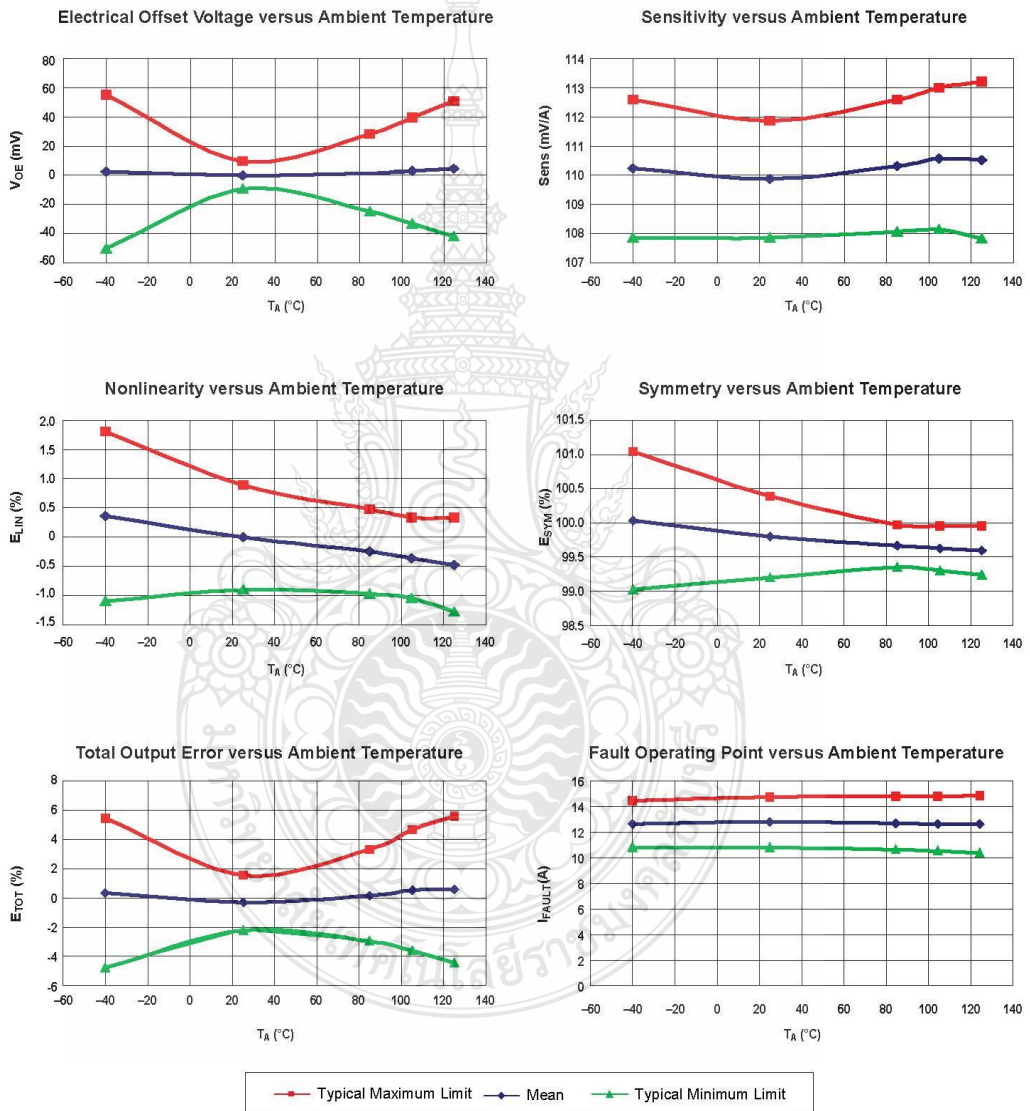
Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000, www.allegromicro.com

ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

Characteristic Performance Data
 Data taken using the ACS711KLC-12A, $V_{CC} = 3.3\text{ V}$

Accuracy Data



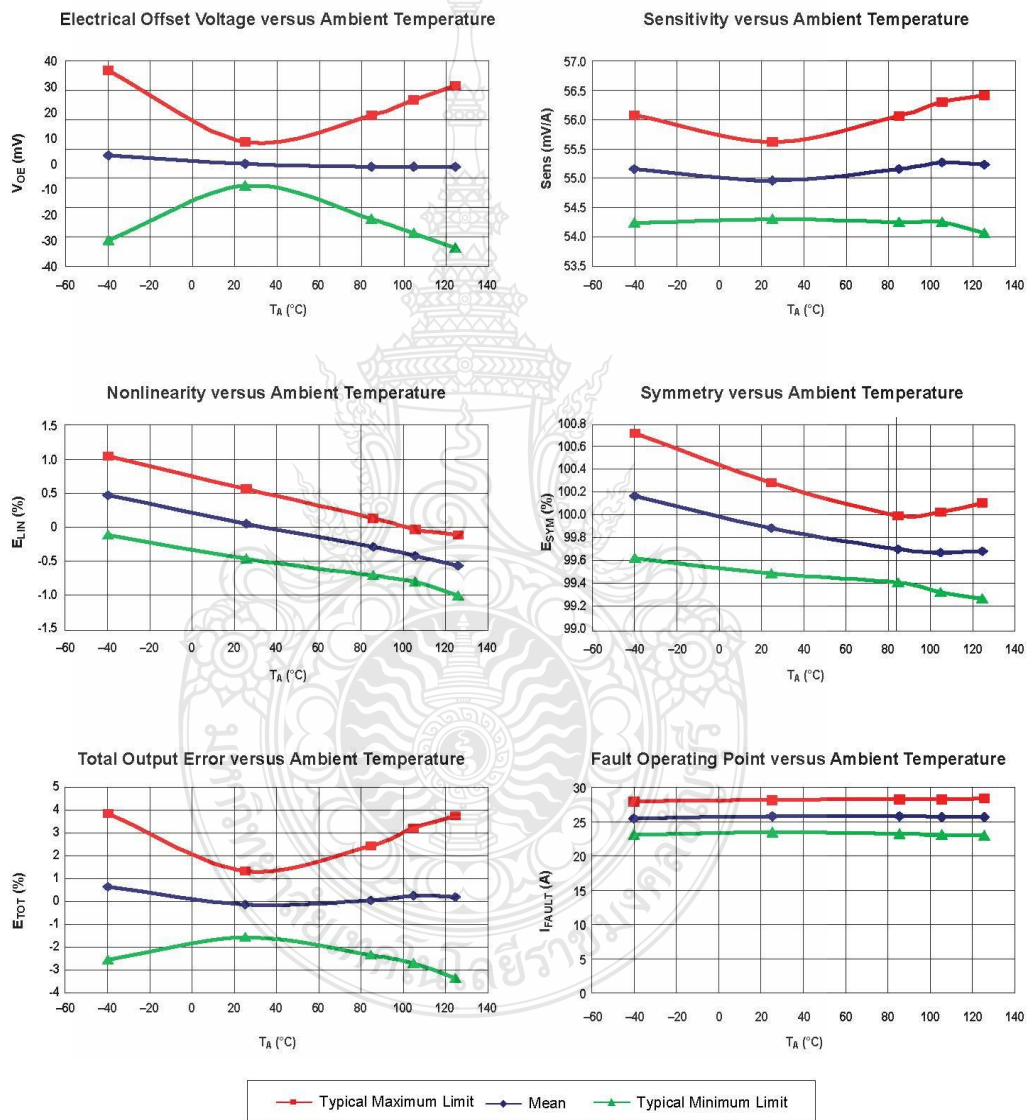
Allegro MicroSystems, Inc.
 115 Northeast Cutoff
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
 1.508.853.5000, www.allegromicro.com

ACS711

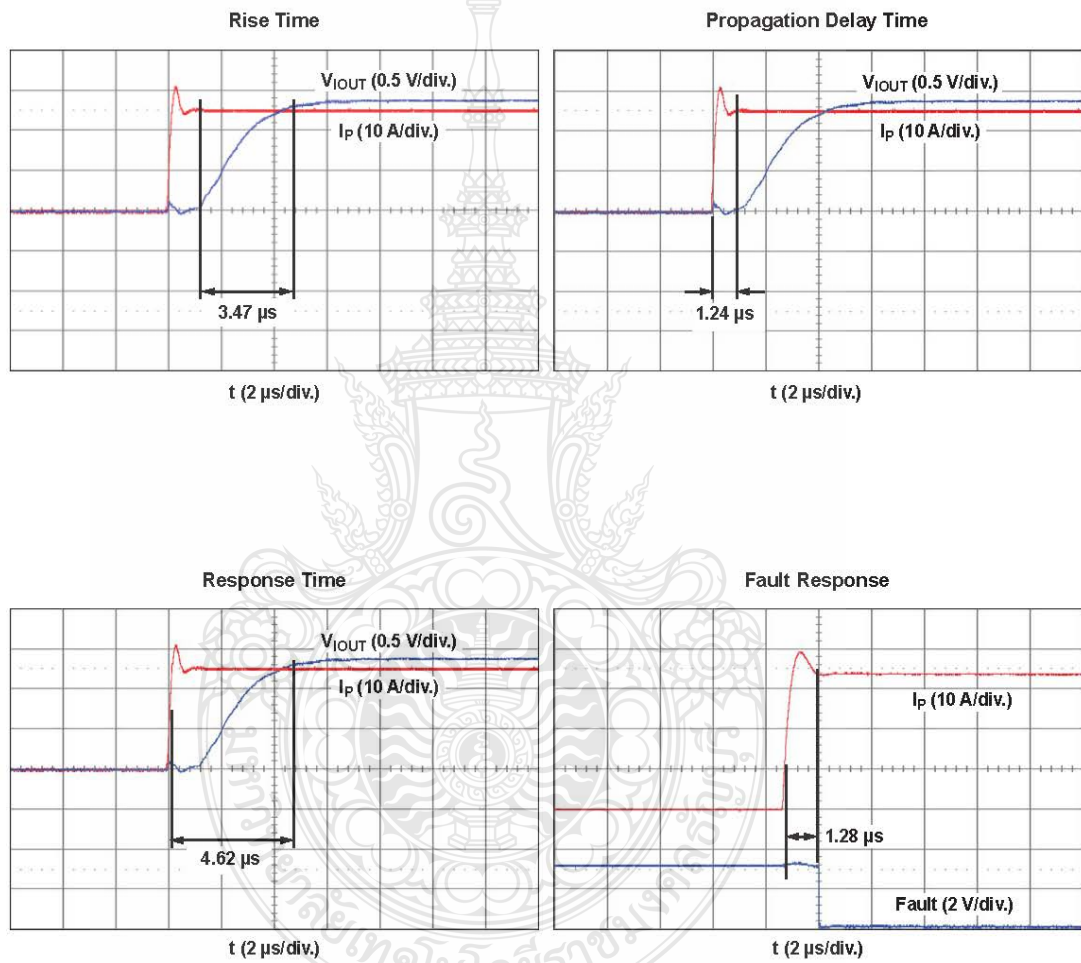
Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

Characteristic Performance Data
 Data taken using the ACS711KLC-25A, $V_{CC} = 3.3\text{ V}$

Accuracy Data



Allegro MicroSystems, Inc.
 115 Northeast Cutoff
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
 1.508.853.5000; www.allegromicro.com

ACS711**Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent
Fault Output for < 100 V Isolation Applications****Characteristic Performance Data**
Data taken using the ACS711KLC-25A**Timing Data**

ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

Definitions of Accuracy Characteristics

Sensitivity (Sens). The change in sensor output in response to a 1 A change through the primary conductor. The sensitivity is the product of the magnetic circuit sensitivity (G/A) and the linear IC amplifier gain (mV/G). The linear IC amplifier gain is programmed at the factory to optimize the sensitivity (mV/A) for the full-scale current of the device.

Noise (V_{NOISE}). The product of the linear IC amplifier gain (mV) and the noise floor for the Allegro Hall effect linear IC. The noise floor is derived from the thermal and shot noise observed in Hall elements. Dividing the noise (mV) by the sensitivity (mV/A) provides the smallest current that the device is able to resolve.

Linearity (E_{LIN}). The degree to which the voltage output from the sensor varies in direct proportion to the primary current through its full-scale amplitude. Nonlinearity in the output can be attributed to the saturation of the flux concentrator approaching the full-scale current. The following equation is used to derive the linearity:

where $V_{IOUT_full\text{-scale amperes}}$ = the output voltage (V) when the

$$100 \left\{ 1 - \left[\frac{\Delta \text{gain} \times \% \text{ sat} (V_{IOUT_full\text{-scale amperes}} - V_{IOUT(Q)})}{2 (V_{IOUT_half\text{-scale amperes}} - V_{IOUT(Q)})} \right] \right\}$$

sensed current approximates full-scale $\pm I_p$.

Symmetry (E_{SYM}). The degree to which the absolute voltage output from the sensor varies in proportion to either a positive or negative full-scale primary current. The following formula is used to derive symmetry:

$$100 \left(\frac{V_{IOUT_+ \text{ full-scale amperes}} - V_{IOUT(Q)}}{V_{IOUT(Q)} - V_{IOUT_ - \text{ full-scale amperes}}} \right)$$

Quiescent output voltage (V_{IOUT(Q)}). The output of the sensor when the primary current is zero. For a unipolar supply voltage, it nominally remains at $V_{CC}/2$. Thus, $V_{CC} = 3.3 \text{ V}$ translates into $V_{IOUT(Q)} = 1.65 \text{ V}$. Variation in $V_{IOUT(Q)}$ can be attributed to the resolution of the Allegro linear IC quiescent voltage trim and thermal drift.

Electrical offset voltage (V_{OE}). The deviation of the device output from its ideal quiescent value of $V_{CC}/2$ due to nonmagnetic causes. To convert this voltage to amperes, divide by the device sensitivity, Sens.

Accuracy (E_{TOT}). The accuracy represents the maximum deviation of the actual output from its ideal value. This is also known as the total output error. The accuracy is illustrated graphically in the output voltage versus current chart below.

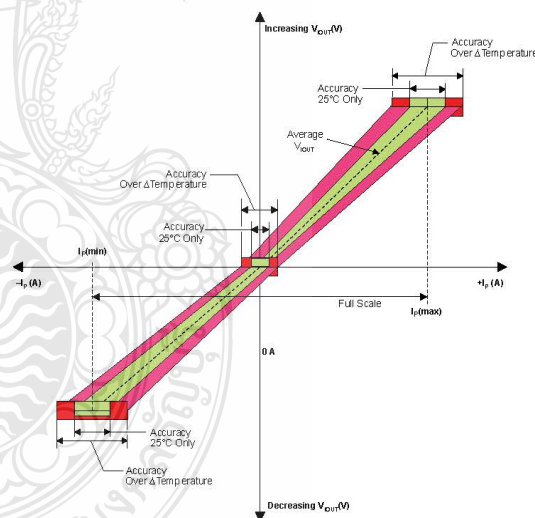
Ratiometry. The ratiometric feature means that its 0 A output, $V_{IOUT(Q)}$, (nominally equal to $V_{CC}/2$) and sensitivity, Sens, are proportional to its supply voltage, V_{CC} . The following formula is used to derive the ratiometric change in 0 A output voltage, $\Delta V_{IOUT(Q)RAT}$ (%).

$$100 \left(\frac{V_{IOUT(Q)VCC} / V_{IOUT(Q)3.3V}}{V_{CC} / 3.3 \text{ V}} \right)$$

The ratiometric change in sensitivity, ΔSens_{RAT} (%), is defined as:

$$100 \left(\frac{\text{Sens}_{VCC} / \text{Sens}_{3.3V}}{V_{CC} / 3.3 \text{ V}} \right)$$

Output Voltage versus Sensed Current
Accuracy at 0 A and at Full-Scale Current



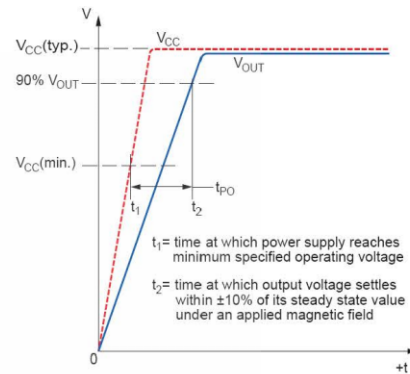
ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

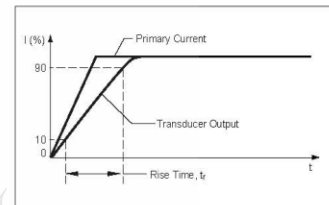
Definitions of Dynamic Response Characteristics

Power-On Time (t_{PO}). When the supply is ramped to its operating voltage, the device requires a finite time to power its internal components before responding to an input magnetic field.

Power-On Time, t_{PO} , is defined as the time it takes for the output voltage to settle within $\pm 10\%$ of its steady state value under an applied magnetic field, after the power supply has reached its minimum specified operating voltage, $V_{CC}(\min)$, as shown in the chart at right.



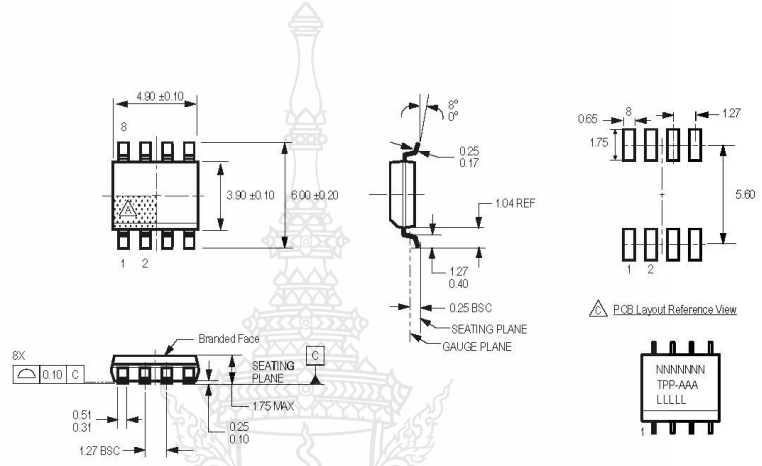
Rise time (t_r). The time interval between a) when the sensor reaches 10% of its full scale value, and b) when it reaches 90% of its full scale value. The rise time to a step response is used to derive the bandwidth of the current sensor, in which $f(-3 \text{ dB}) = 0.35/t_r$. Both t_r and $t_{RESPONSE}$ are detrimentally affected by eddy current losses observed in the conductive IC ground plane.



ACS711

Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent Fault Output for < 100 V Isolation Applications

Package LC, 8-pin SOIC



For Reference Only, not for tooling use (reference MS-012AA)
 Dimensions in millimeters
 Dimensions exclusive of mold flash, gate burrs, and dambar protrusions
 Exact case and lead configuration at supplier discretion within limits shown

- ⚠ Terminal #1 mark area
- ⚠ Branding scale and appearance at supplier discretion
- ⚠ Reference land pattern layout (reference IPC-351)
- ⚠ SOIC 127P00X175-3M₁ all pads a minimum of 0.20 mm from all adjacent pads, adjust as necessary to meet application process requirements and PCB layout tolerances

Standard Branding Reference View

N = Device part number
 T = Device temperature range
 P = Package Designator
 A = Amperage
 L = Lot number
 Belly Brand = Country of Origin



ACS711***Hall Effect Linear Current Sensor with Overcurrent
Fault Output for < 100 V Isolation Applications*****Revision History**

Revision	Revision Date	Description of Revision
Rev. 3	January 5, 2012	Update description

Copyright ©2008-2012, Allegro MicroSystems, Inc.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in life support devices or systems, if a failure of an Allegro product can reasonably be expected to cause the failure of that life support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use, nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

For the latest version of this document, visit our website:

www.allegromicro.com



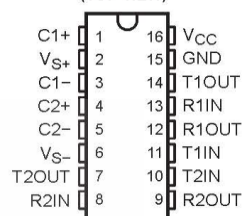
Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L – FEBRUARY 1989 – REVISED MARCH 2004

- Meets or Exceeds TIA/EIA-232-F and ITU Recommendation V.28
- Operates From a Single 5-V Power Supply With 1.0- μ F Charge-Pump Capacitors
- Operates Up To 120 kbit/s
- Two Drivers and Two Receivers
- \pm 30-V Input Levels
- Low Supply Current . . . 8 mA Typical
- ESD Protection Exceeds JESD 22
 - 2000-V Human-Body Model (A114-A)
- Upgrade With Improved ESD (15-kV HBM) and 0.1- μ F Charge-Pump Capacitors is Available With the MAX202
- Applications
 - TIA/EIA-232-F, Battery-Powered Systems, Terminals, Modems, and Computers

MAX232 . . . D, DW, N, OR NS PACKAGE
MAX232I . . . D, DW, OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



description/ordering information

The MAX232 is a dual driver/receiver that includes a capacitive voltage generator to supply TIA/EIA-232-F voltage levels from a single 5-V supply. Each receiver converts TIA/EIA-232-F inputs to 5-V TTL/CMOS levels. These receivers have a typical threshold of 1.3 V, a typical hysteresis of 0.5 V, and can accept \pm 30-V inputs. Each driver converts TTL/CMOS input levels into TIA/EIA-232-F levels. The driver, receiver, and voltage-generator functions are available as cells in the Texas Instruments LinASIC™ library.

ORDERING INFORMATION

TA	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	PDIP (N)	Tube of 25	MAX232N	MAX232N
	SOIC (D)	Tube of 40	MAX232D	MAX232
		Reel of 2500	MAX232DR	
	SOIC (DW)	Tube of 40	MAX232DW	MAX232
		Reel of 2000	MAX232DWR	
SOP (NS)	Reel of 2000	MAX232NSR	MAX232	
-40°C to 85°C	PDIP (N)	Tube of 25	MAX232IN	MAX232IN
	SOIC (D)	Tube of 40	MAX232ID	MAX232I
		Reel of 2500	MAX232IDR	
	SOIC (DW)	Tube of 40	MAX232IDW	MAX232I
Reel of 2000		MAX232IDWR		

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

LinASIC is a trademark of Texas Instruments.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

1

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L - FEBRUARY 1989 - REVISED MARCH 2004

Function Tables

EACH DRIVER

INPUT TIN	OUTPUT TOUT
L	H
H	L

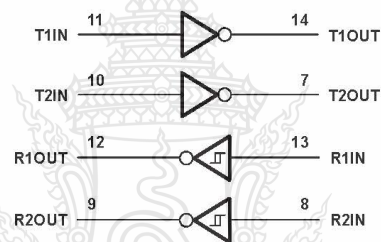
H = high level, L = low level

EACH RECEIVER

INPUT RIN	OUTPUT ROUT
L	H
H	L

H = high level, L = low level

logic diagram (positive logic)



 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L – FEBRUARY 1989 – REVISED MARCH 2004

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Input supply voltage range, V_{CC} (see Note 1)	–0.3 V to 6 V
Positive output supply voltage range, V_{S+}	$V_{CC} - 0.3$ V to 15 V
Negative output supply voltage range, V_{S-}	–0.3 V to –15 V
Input voltage range, V_I : Driver	–0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V
Receiver	±30 V
Output voltage range, V_O : T1OUT, T2OUT	$V_{S-} - 0.3$ V to $V_{S+} + 0.3$ V
R1OUT, R2OUT	–0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V
Short-circuit duration: T1OUT, T2OUT	Unlimited
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 2 and 3): D package	73°C/W
DW package	57°C/W
N package	67°C/W
NS package	64°C/W
Operating virtual junction temperature, T_J	150°C
Storage temperature range, T_{stg}	–65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. All voltages are with respect to network GND.

2. Maximum power dissipation is a function of $T_J(\text{max})$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A)/\theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.

3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

recommended operating conditions

		MIN	NOM	MAX	UNIT
V_{CC}	Supply voltage	4.5	5	5.5	V
V_{IH}	High-level input voltage (T1IN, T2IN)	2			V
V_{IL}	Low-level input voltage (T1IN, T2IN)			0.8	V
R1IN, R2IN	Receiver input voltage			±30	V
T_A	Operating free-air temperature		0	70	°C
		MAX232I	–40	85	

electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature (unless otherwise noted) (see Note 4 and Figure 4)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
I_{CC} Supply current	$V_{CC} = 5.5$ V, All outputs open, $T_A = 25^\circ\text{C}$		8	10	mA

‡ All typical values are at $V_{CC} = 5$ V and $T_A = 25^\circ\text{C}$.

NOTE 4: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at $V_{CC} = 5 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$.

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L – FEBRUARY 1989 – REVISED MARCH 2004

DRIVER SECTION

electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature range (see Note 4)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP†	MAX	UNIT
V _{OH}	High-level output voltage	T1OUT, T2OUT	R _L = 3 kΩ to GND	5	7		V
V _{OL}	Low-level output voltage‡	T1OUT, T2OUT	R _L = 3 kΩ to GND		-7	-5	V
r _o	Output resistance	T1OUT, T2OUT	V _{S+} = V _{S-} = 0, V _O = ±2 V	300			Ω
I _{OS} §	Short-circuit output current	T1OUT, T2OUT	V _{CC} = 5.5 V, V _O = 0		±10		mA
I _{IS}	Short-circuit input current	T1IN, T2IN	V _I = 0			200	μA

† All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

‡ The algebraic convention, in which the least-positive (most negative) value is designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels only.

§ Not more than one output should be shorted at a time.

NOTE 4: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V_{CC} = 5 V ± 0.5 V.

switching characteristics, V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C (see Note 4)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
SR	Driver slew rate	R _L = 3 kΩ to 7 kΩ, See Figure 2			30	V/μs
SR(t)	Driver transition region slew rate	See Figure 3		3		V/μs
	Data rate	One TOUT switching		120		kbit/s

NOTE 4: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V_{CC} = 5 V ± 0.5 V.

RECEIVER SECTION

electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature range (see Note 4)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP†	MAX	UNIT
V _{OH}	High-level output voltage	R1OUT, R2OUT	I _{OH} = -1 mA	3.5			V
V _{OL}	Low-level output voltage‡	R1OUT, R2OUT	I _{OL} = 3.2 mA			0.4	V
V _{IT+}	Receiver positive-going input threshold voltage	R1IN, R2IN	V _{CC} = 5 V, T _A = 25°C		1.7	2.4	V
V _{IT-}	Receiver negative-going input threshold voltage	R1IN, R2IN	V _{CC} = 5 V, T _A = 25°C	0.8	1.2		V
V _{hys}	Input hysteresis voltage	R1IN, R2IN	V _{CC} = 5 V	0.2	0.5	1	V
r _i	Receiver input resistance	R1IN, R2IN	V _{CC} = 5, T _A = 25°C	3	5	7	kΩ

† All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

‡ The algebraic convention, in which the least-positive (most negative) value is designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels only.

NOTE 4: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V_{CC} = 5 V ± 0.5 V.

switching characteristics, V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C (see Note 4 and Figure 1)

PARAMETER		TYP	UNIT
t _{PLH(R)}	Receiver propagation delay time, low- to high-level output	500	ns
t _{PHL(R)}	Receiver propagation delay time, high- to low-level output	500	ns

NOTE 4: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V_{CC} = 5 V ± 0.5 V.

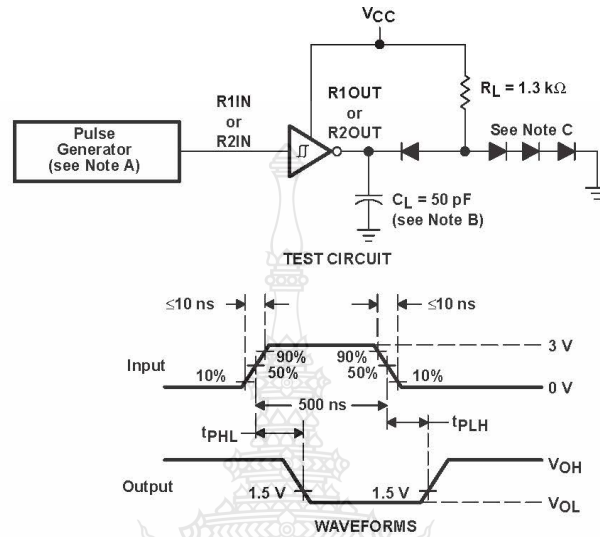


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L - FEBRUARY 1989 - REVISED MARCH 2004

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



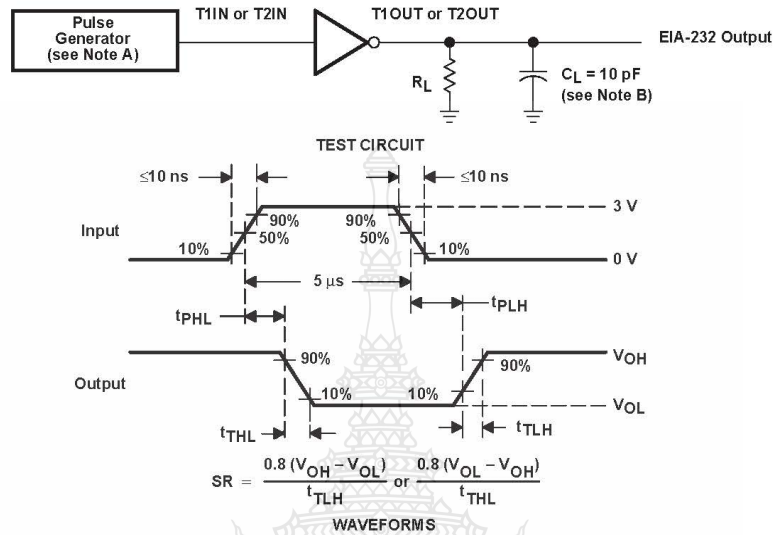
- NOTES: A. The pulse generator has the following characteristics: $Z_O = 50 \Omega$, duty cycle $\leq 50\%$.
 B. C_L includes probe and jig capacitance.
 C. All diodes are 1N3064 or equivalent.

Figure 1. Receiver Test Circuit and Waveforms for t_{PHL} and t_{PLH} Measurements

MAX232, MAX232I
DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

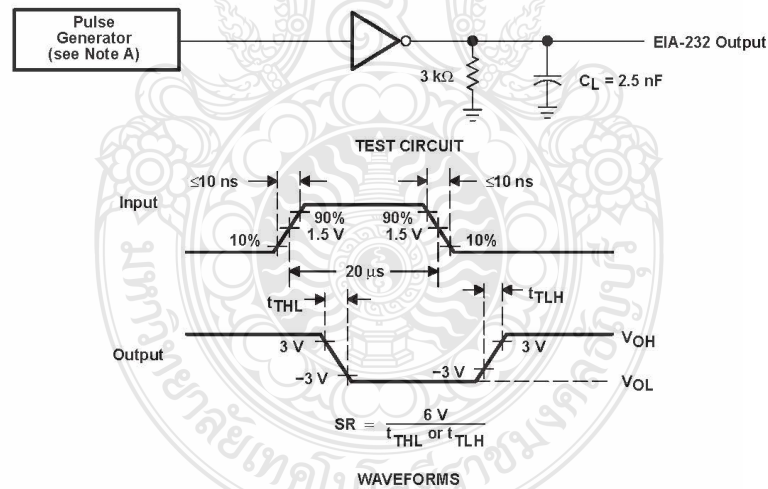
SLLS047L - FEBRUARY 1989 - REVISED MARCH 2004

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



NOTES: A. The pulse generator has the following characteristics: $Z_O = 50 \Omega$, duty cycle $\leq 50\%$.
 B. C_L includes probe and jig capacitance.

Figure 2. Driver Test Circuit and Waveforms for t_{PHL} and t_{PLH} Measurements (5- μ s Input)



NOTE A: The pulse generator has the following characteristics: $Z_O = 50 \Omega$, duty cycle $\leq 50\%$.

Figure 3. Test Circuit and Waveforms for t_{THL} and t_{TLH} Measurements (20- μ s Input)

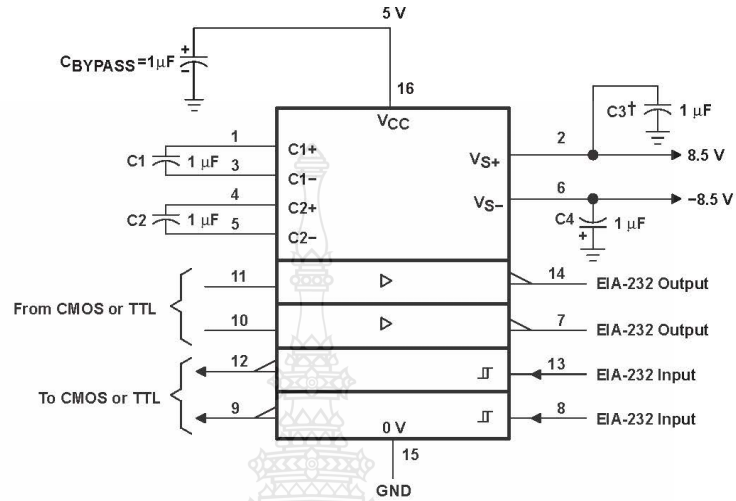


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047L - FEBRUARY 1989 - REVISED MARCH 2004

APPLICATION INFORMATION



† C3 can be connected to VCC or GND.

NOTES: A. Resistor values shown are nominal.

B. Nonpolarized ceramic capacitors are acceptable. If polarized tantalum or electrolytic capacitors are used, they should be connected as shown. In addition to the 1-µF capacitors shown, the MAX202 can operate with 0.1-µF capacitors.

Figure 4. Typical Operating Circuit

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
MAX232D	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DE4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DG4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DR	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DRE4	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DRG4	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DW	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DWE4	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DWG4	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DWR	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DWRE4	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232DWRG4	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232ID	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDE4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDG4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDR	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDRE4	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDRG4	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDW	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDWE4	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDWG4	ACTIVE	SOIC	DW	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDWR	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDWRE4	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IDWRG4	ACTIVE	SOIC	DW	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232IN	ACTIVE	PDIP	N	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
MAX232INE4	ACTIVE	PDIP	N	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
MAX232N	ACTIVE	PDIP	N	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
MAX232NE4	ACTIVE	PDIP	N	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
MAX232NSR	ACTIVE	SO	NS	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232NSRE4	ACTIVE	SO	NS	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM
MAX232NSRG4	ACTIVE	SO	NS	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM

⁽¹⁾ The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBsolete: TI has discontinued the production of the device.

⁽²⁾ Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS), Pb-Free (RoHS Exempt), or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

TBD: The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

Pb-Free (RoHS): TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

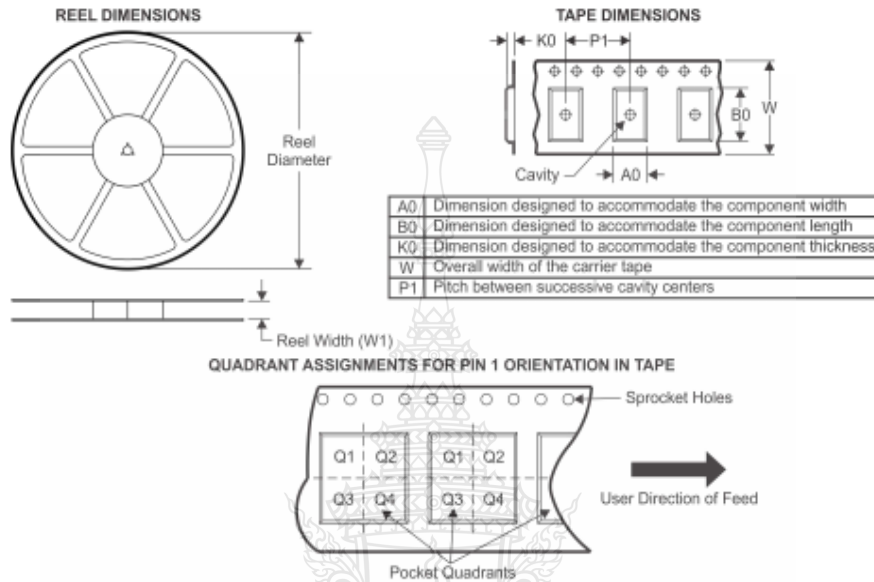
Pb-Free (RoHS Exempt): This component has a RoHS exemption for either 1) lead-based flip-chip solder bumps used between the die and package, or 2) lead-based die adhesive used between the die and leadframe. The component is otherwise considered Pb-Free (RoHS compatible) as defined above.

Green (RoHS & no Sb/Br): TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material).

⁽³⁾ MSL, Peak Temp. -- The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

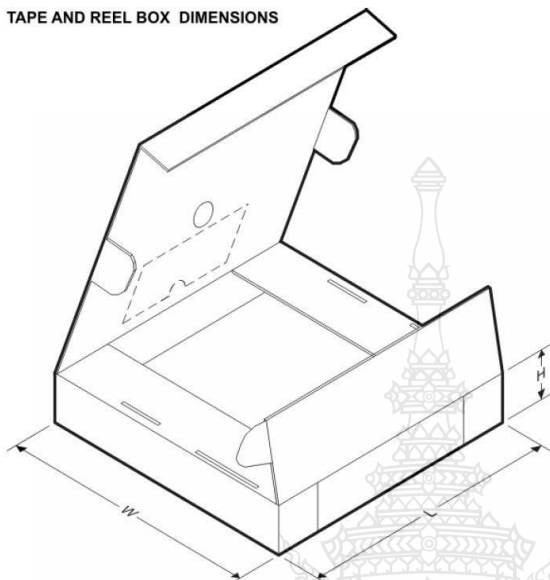
Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION


*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
MAX232DR	SOIC	D	16	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
MAX232DR	SOIC	D	16	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
MAX232DWR	SOIC	DW	16	2000	330.0	16.4	10.75	10.7	2.7	12.0	16.0	Q1
MAX232DWRG4	SOIC	DW	16	2000	330.0	16.4	10.75	10.7	2.7	12.0	16.0	Q1
MAX232IDR	SOIC	D	16	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
MAX232IDWR	SOIC	DW	16	2000	330.0	16.4	10.75	10.7	2.7	12.0	16.0	Q1
MAX232IDWRG4	SOIC	DW	16	2000	330.0	16.4	10.75	10.7	2.7	12.0	16.0	Q1
MAX232NSR	SO	NS	16	2000	330.0	16.4	8.2	10.5	2.5	12.0	16.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS

*All dimensions are nominal

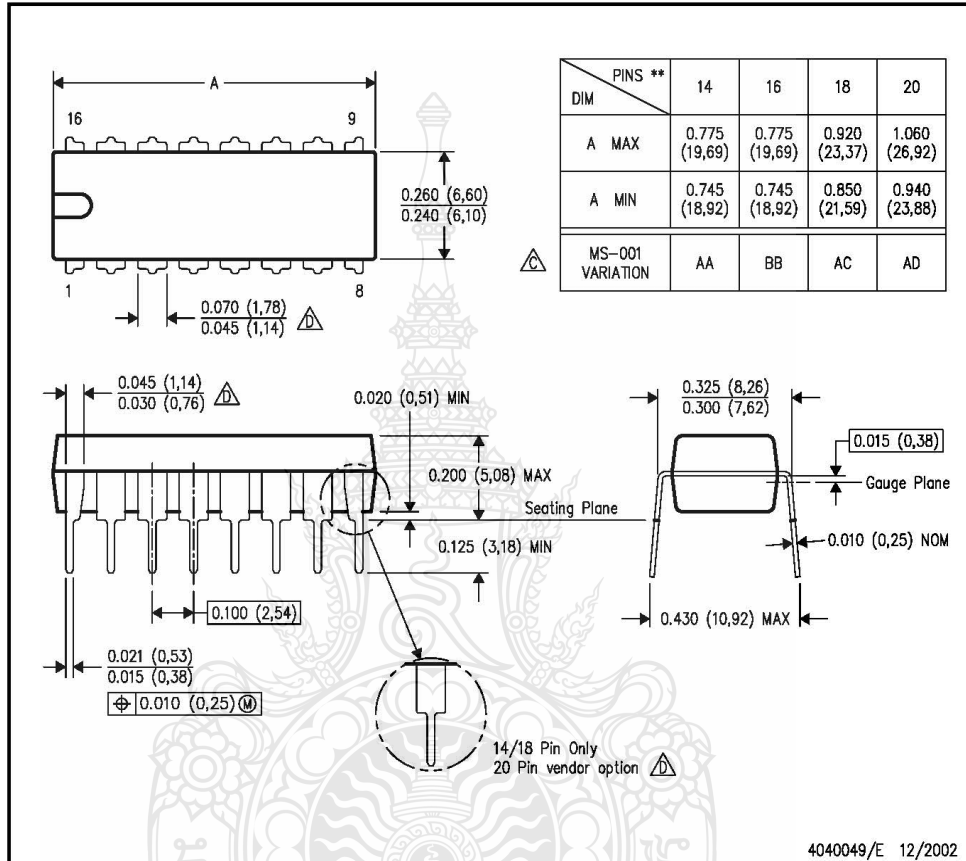
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
MAX232DR	SOIC	D	16	2500	367.0	367.0	38.0
MAX232DR	SOIC	D	16	2500	333.2	345.9	28.6
MAX232DWR	SOIC	DW	16	2000	366.0	364.0	50.0
MAX232DWRG4	SOIC	DW	16	2000	367.0	367.0	38.0
MAX232IDR	SOIC	D	16	2500	333.2	345.9	28.6
MAX232IDWR	SOIC	DW	16	2000	366.0	364.0	50.0
MAX232IDWRG4	SOIC	DW	16	2000	367.0	367.0	38.0
MAX232NSR	SO	NS	16	2000	367.0	367.0	38.0

MECHANICAL DATA

N (R-PDIP-T**)

PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE

16 PINS SHOWN



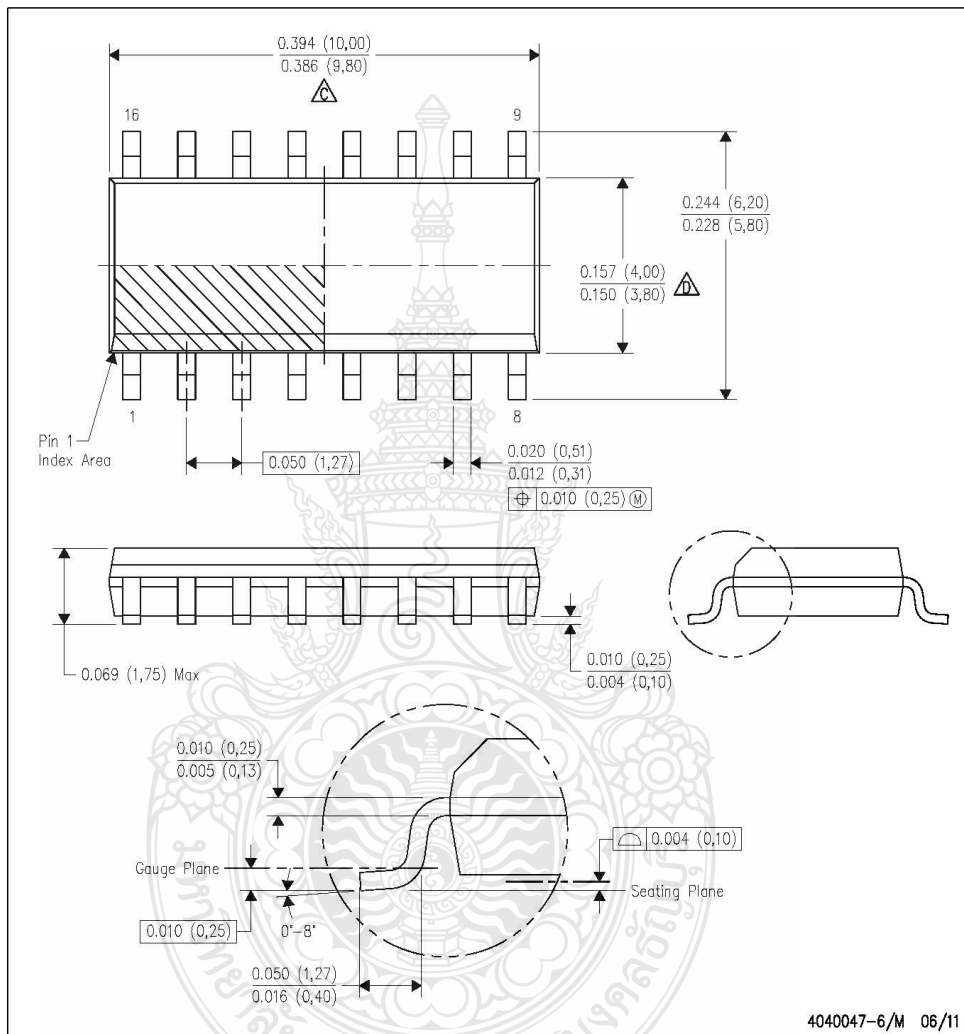
4040049/E 12/2002

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - Falls within JEDEC MS-001, except 18 and 20 pin minimum body length (Dim A).
 - The 20 pin end lead shoulder width is a vendor option, either half or full width.

MECHANICAL DATA

D (R-PDSO-G16)

PLASTIC SMALL OUTLINE

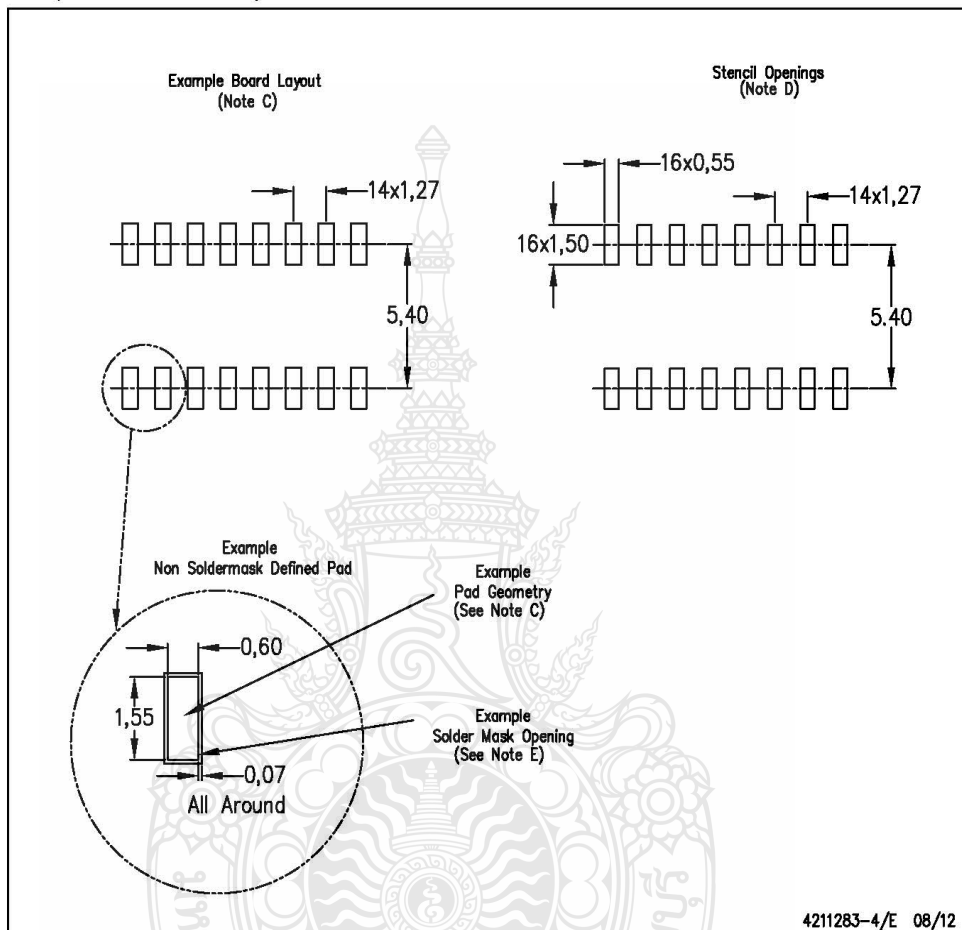


- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Body length does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed 0.006 (0,15) each side.
 - D. Body width does not include interlead flash. Interlead flash shall not exceed 0.017 (0,43) each side.
 - E. Reference JEDEC MS-012 variation AC.

LAND PATTERN DATA

D (R-PDSO-G16)

PLASTIC SMALL OUTLINE

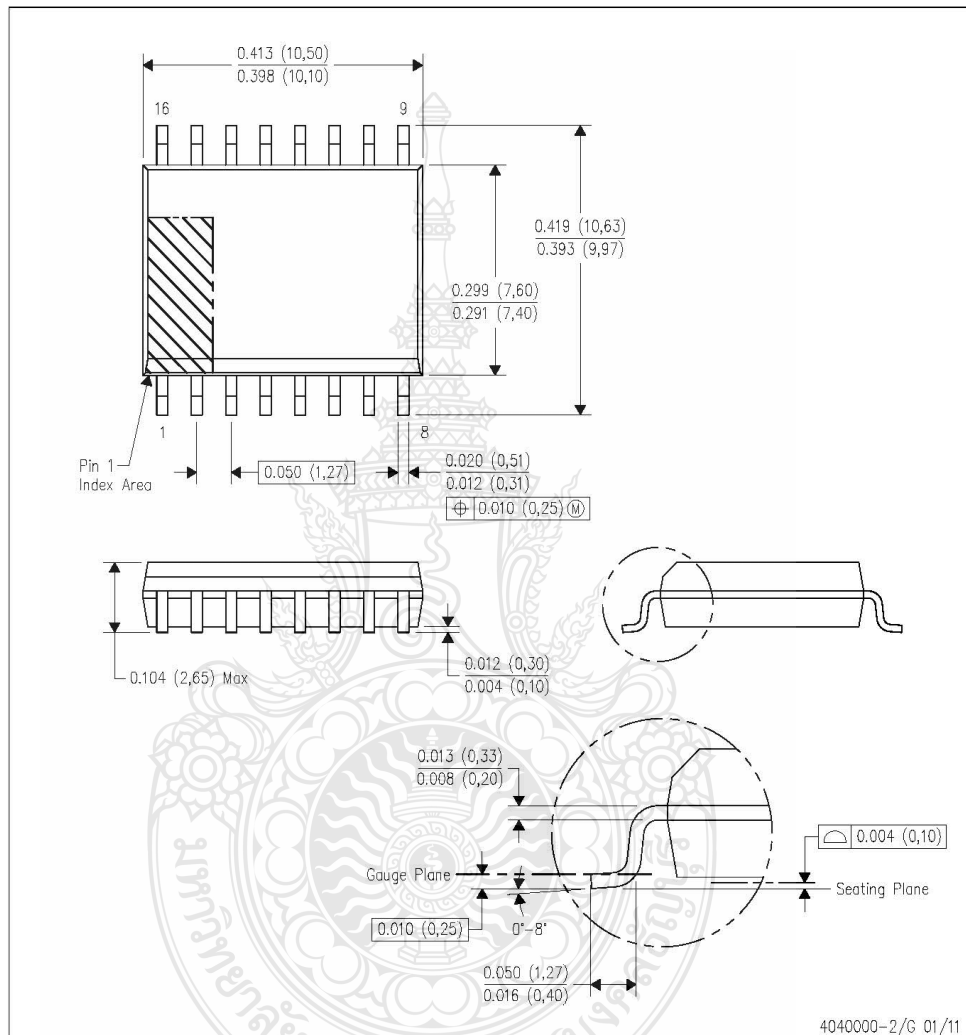


- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525 for other stencil recommendations.
 - Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

MECHANICAL DATA

DW (R-PDSO-G16)

PLASTIC SMALL OUTLINE

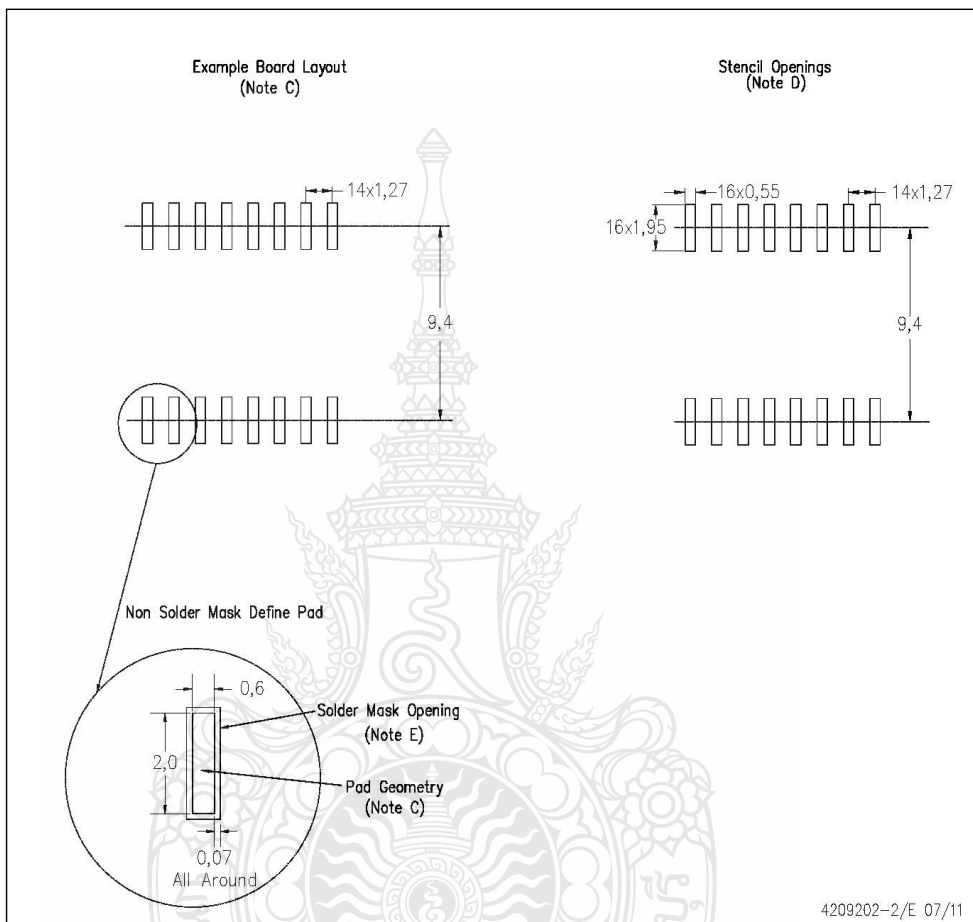


- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters). Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M-1994.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0.006 (0,15).
 - Falls within JEDEC MS-013 variation AA.

LAND PATTERN DATA

DW (R-PDSO-G16)

PLASTIC SMALL OUTLINE



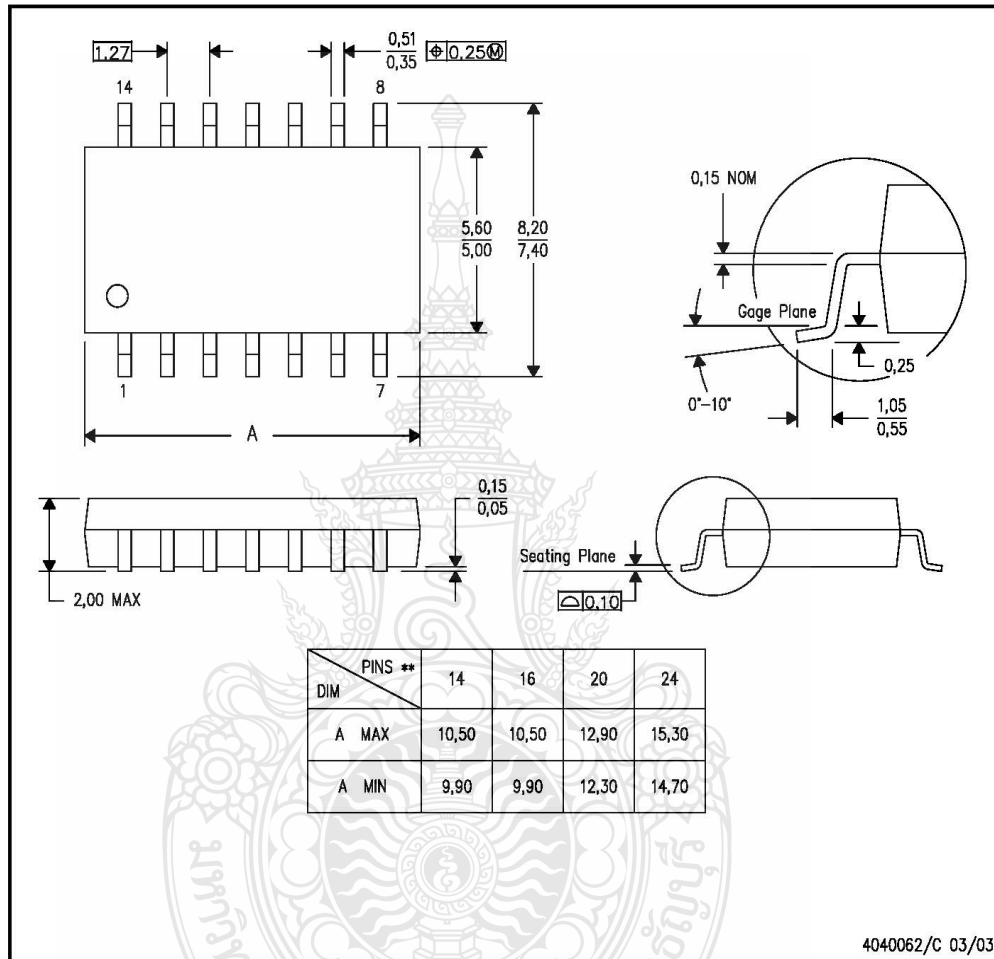
4209202-2/E 07/11

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Refer to IPC7351 for alternate board design.
 - D. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525
 - E. Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

MECHANICAL DATA

NS (R-PDSO-G)**
14-PINS SHOWN

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion, not to exceed 0,15.

DS1104 R&D Controller Board



- Single-board PCI hardware for use in PCs
- Set of intelligent I/O on-board



ภาพที่ ก.6 ชุดอุปกรณ์ควบคุม dSPACE DS1104



DS1104 R&D Controller Board

Cost-effective system for controller development



Key Features

- Single-board PCI hardware for use in PCs
- Incremental encoder interface
- Serial interface (UART)
- Set of intelligent I/O on-board

Description

Application Areas

The real-time hardware based on PowerPC technology and its set of I/O interfaces make the controller board an ideal solution for developing controllers in various fields, such as drives, robotics, aerospace and automotives.

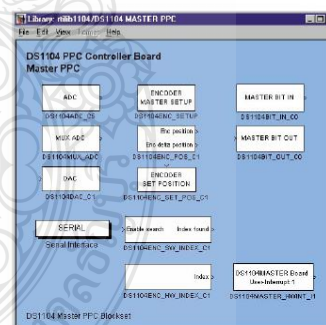
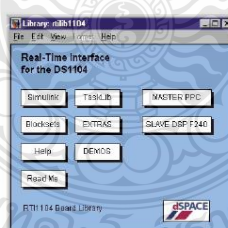
Key Benefits

The DS1104 upgrades your PC to a powerful development system for rapid control prototyping („R&D“ stands for research & development). Real-Time Interface provides Simulink® blocks for graphical configuration of A/D, D/A, digital I/O lines, incremental encoder interface and PWM generation, for example. The board can be installed in virtually any PC with a free 5-V PCI slot.

Real-Time Interface

Using Real-Time Interface

With Real-Time Interface (RTI), you can easily run your function models on the DS1104 R&D Controller Board. You can configure all I/O graphically by dragging RTI blocks and reduce the implementation time to a minimum.



Single-Board Hardware

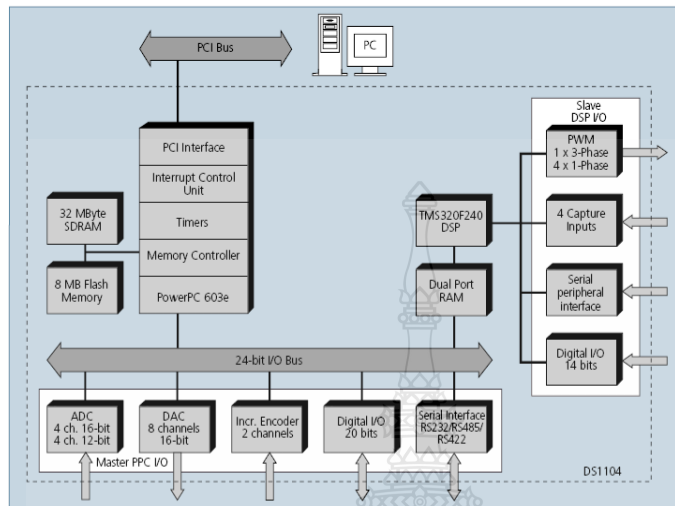
Parameter		Specification
Digital incremental encoder interface	Channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2 independent channels ■ Selectable single-ended (TTL) or differential (RS422) input (software programmable for each channel)
	Position counters	<ul style="list-style-type: none"> ■ 24-bit resolution ■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 6.6 MHz ■ Counter reset or reload via software
	Sensor supply voltage	<ul style="list-style-type: none"> ■ 5 V/0.5 A
Serial interface	Configuration	<ul style="list-style-type: none"> ■ Single UART (universal asynchronous receiver and transmitter) with FIFO ■ PLL-driven UART for accurate baud rate selection ■ RS232/RS422/RS485 compatibility
	Baud rate	<ul style="list-style-type: none"> ■ Up to 115.2 kBd (RS232) ■ Up to 1 MBd (RS422/RS485)
Slave DSP	Type	<ul style="list-style-type: none"> ■ Texas Instruments TMS320F240 DSP ■ 16-bit fixed-point processor
	Clock rate	<ul style="list-style-type: none"> ■ 20 MHz
	Memory	<ul style="list-style-type: none"> ■ 64Kx16 external code memory ■ 28Kx16 external data memory ■ 4Kx16 dual-port memory for communication ■ 32 KB flash memory
	I/O channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 10 PWM outputs ■ 4 capture inputs ■ 1 serial peripheral interface
	Input voltage range	<ul style="list-style-type: none"> ■ TTL input/output level ■ A/D converter inputs: 0 ... 5 V
	Output current	<ul style="list-style-type: none"> ■ Max. ±13 mA
Host interface		<ul style="list-style-type: none"> ■ Requires one 33 MHz / 32-bit 5-V PCI slot
Physical characteristics	Physical size	<ul style="list-style-type: none"> ■ 185 x 107 mm (7.28 x 4.2 in)
	Ambient temperature	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0 ... 55 °C (32 ... 131 °F)
	Cooling	<ul style="list-style-type: none"> ■ Active cooling by fan
	Power consumption	<ul style="list-style-type: none"> ■ 18.5 W
	Power supply	<ul style="list-style-type: none"> ■ +5 V ±5%, 2.5 A ■ +12 V ±5%, 0.3 A ■ -12 V ±5%, 0.2 A

Order Information

Product	Order Number
DS1104 R&D Controller Board	■ DS1104

Relevant Software and Hardware

Software	Order Number	
Included	<ul style="list-style-type: none"> ■ DS1104 Real-Time Library ■ Experiment and Platform Manager for hardware management 	–
		–
Required	<ul style="list-style-type: none"> ■ Real-Time Interface ■ Microtec C Compiler 	<ul style="list-style-type: none"> ■ RTI ■ CCPPPC
	Optional	<ul style="list-style-type: none"> ■ ControlDesk Standard – Operator Version ■ ControlDesk Standard – Developer Version
<ul style="list-style-type: none"> ■ MLIB/MTRACE 		<ul style="list-style-type: none"> ■ MLIB/MTRACE
<ul style="list-style-type: none"> ■ CLIB 		<ul style="list-style-type: none"> ■ CLIB
Hardware		Order Number
Optional	<ul style="list-style-type: none"> ■ Connector Panel 	<ul style="list-style-type: none"> ■ CP1104
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Combined Connector/LED Panel 	<ul style="list-style-type: none"> ■ CLP1104



Block Diagram

Induction Motor Control

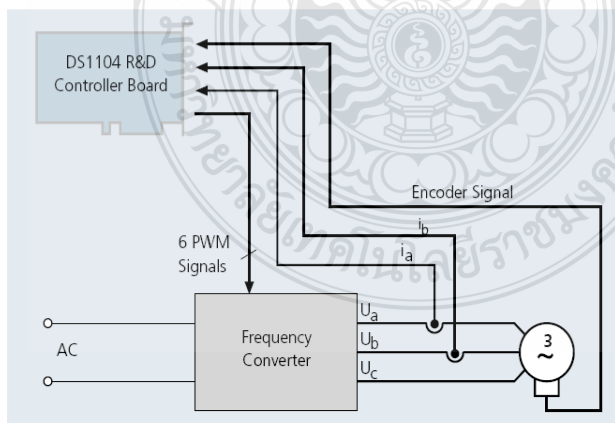
Drive Control

In this use case, an induction motor controller is developed with the DS1104. The slave DSP system was designed for applications in drive control, and the PowerPC's calculation power supports convenient simulation and a smooth development process. In combination with Simulink®, the board makes it easy to verify and optimize control algorithms and parameters.

Determining Values

One of the board's incremental encoder interfaces picks up the encoder signal of the motor, while two A/D converters are required to analyze the motor currents. The controller board calculates the control algorithm on the basis of the measured values and determines the corresponding pulse width modulation (PWM). The three-phase PWM signals are generated on the board's DSP subsystem and determine the converter's output voltage and frequency.

Use Case

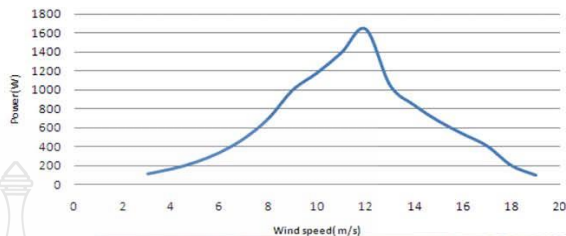


(1000L) กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1000 วัตต์

ข้อมูลเฉพาะ : Model 1000L

- Type: 3 Blade Upwind
- (แบบแนวอน) : 3 ใบพัด
- Rotor Diameter: 2.7m
- (เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด)
- Start-up Wind Speed: 2.5m/s (5.6 mph)
- (ความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมเริ่มหมุน)
- Cut-in Wind Speed: 3 m/s (6.7 mph)
- (ความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า)
- Rated Wind Speed: 9m/s (20.1 mph)
- (ความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าเต็มอัตราการผลิตพิกัด)
- Rated Power: 1000 Watts
- (อัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมสูงสุด)
- Maximum Power: ~ 1300Watts
- (อัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมสูงสุด)
- Furling Wind Speed: 12 m/s (27 mph)
- (ช่วงความเร็วลมที่ระบบพับหางหรือ หมุนใบกังหันลมขนานกับทิศทางลมเริ่มทำงาน)
- Over speed Protection: Auto Furl
- (ระบบป้องกันเมื่อความเร็วสูงเกินพิกัด) : ระบบพับหรือหมุนใบกังหันลมเมื่อความเร็วเกินพิกัด
- Temperature Range: -40 to +60 Deg. C
- (-40 to +140 Deg. F)
- (ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน)
- Generator: Permanent Magnet Alternator
- (ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทแม่เหล็กถาวร
- Output Form:48 VDC Nominal
- (แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
- ความสูงของเสาขั้นต่ำ 6 (m) หรือมากกว่า
- เส้นผ่านศูนย์กลางเสาที่แนะนำ 4" หรือมากกว่า
- แบตเตอรี่ที่เหมาะสม 12V200AH 4 ลูก หรือมากกว่า, น้ำหนักไม่รวมเสา 71 Kg.
- **แถมชุดควบคุมการบรรจุแบตเตอรี่ไม่รวมแบตเตอรี่, เสา, และค่าติดตั้งค่าภาษีและค่าจัดส่ง**

Power curve



สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่

บริษัท เดอะซีเอ็นคอม เน็ตเวิร์ค จำกัด.

สายตรงพลังงานทดแทน : 081-9470935

โชว์รูม: ชั้น 1 ศูนย์คอมพิวเตอร์ เดอะสตาร์พลาซ่า โทร. 038-616705

www.ccn.co.th, E-mail:sale@ccn.co.th

จำหน่ายผลิตภัณฑ์พลังงานทดแทน

-พลังงานแสงอาทิตย์

-ไบโอดีเซล

-พลังงานลม

ภาพที่ ก.7 ขนาดกังหันลมที่ใช้อ้างอิง



ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการเขียน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ทำ model loop กระแส (Va)

```

#include <18f4431.h>
#define device adc=10
#define fuses HS,NOWDT,NOPROTECT
#define use delay(clock=8000000)
#define use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7)

void main()
{
int16 A,A1;           ประกาศตัวแปร A, A1 เป็น integer 16 bits
float V,V1;          ประกาศตัวแปร V, V1 เป็น floating point number
float i1,i2;         ประกาศตัวแปร i1, i2 เป็น floating point number
float dt;            ประกาศตัวแปร dt เป็น floating point number
SETUP_ADC(ADC_CLOCK_INTERNAL);   กำหนดสัญญาณ clock ในการอ่าน a to d
                                   เป็นสัญญาณภายใน
SETUP_ADC_PORTS(sAN0);           กำหนดช่องในการอ่าน a to d เป็น AN0
SETUP_ADC_PORTS(sAN1);           กำหนดช่องในการอ่าน a to d เป็น AN1
SETUP_TIMER_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8);   กำหนด timer1 ใช้สัญญาณ
                                           Clock ภายใน มีค่า Prescale 1:8

set_timer1(0);                   เริ่มต้นการนับที่ 0
while(true){
set_timer1(0);                   เริ่มต้นการนับที่ 0
set_adc_channel(0);              เปิดการอ่าน a to d ที่ช่อง AN0
V = read_adc();                  อ่านค่า a to d มาเก็บไว้ที่ตัวแปร V
V = (V*5)/1023;                  แปลงจากจำนวนบิตเป็นโวลต์
i1 = (2.482 - V)/0.186;          แปลงจากโวลต์เป็นกระแส
printf("%.3ft%fr\n",i1,dt);     ส่งค่ากระแสและ sampling time ผ่าน RS-232 เข้า
                                   คอมพิวเตอร์

dt = get_timer1();               อ่านค่า timer1 มาเก็บไว้ที่ตัวแปร dt
dt = dt * 8 *0.0000005;         แปลงค่า dt เป็นระบบเวลาจริง
}

```



```

pos2 = (float)pos;
speed = (pos2-pos1)/dt;
speed = (speed*2*3.14)/600;
dt = get_timer1();
dt = dt*8*0.0000005;
}
}

```

หมายเหตุ

ค่าตัวแปร pos เท่ากับ pos2

ความเร็วเท่ากับ pos2 – pos1 หาร dt

แปลงค่าความเร็วจาก step/sec เป็น radian/sec

อ่านค่า timer1 มาเก็บไว้ที่ตัวแปร dt

แปลงค่า dt เป็นระบบเวลาจริง

การทำ model loop ความเร็ว (wf)



โปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 3 loop

```

#include <18f4431.h>
#define device adc=10
#define fuses HS,NOWDT,NOPROTECT
#define use delay(clock=8000000)
#define use rs232(baud=9600, xmit=PIN_c6, rcv=PIN_c7)
#include <math.h>
int16 pos = 0;
float pos1,pos2;
#define int_ccp2
void count1(){
pos = pos + 1;
}
void main()
{
float speed,speed_sp = 0;
float Iset,i1,i2;
float speed1;
float V,V1,i1;
float dt,dt1;
float error,error2;
float e1,e2;
float Kp = 5, Ki = 0.5;

```

ประกาศตัวแปร pos เป็น integer 16 bits

ประกาศตัวแปร pos1,pos2 เป็น floating point number

ฟังก์ชัน interrupt ccp2

เปิดการใช้งานฟังก์ชัน interrupt ชื่อ count1

ค่าตัวแปร pos เพิ่มขึ้นทีละ 1

ประกาศตัวแปร speed,speed_sp เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร Iset,i1,i2 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร speed1 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร V,V1,i1 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร dt,dt1 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร error,error2 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร e1,e2 เป็น floating point number

ประกาศตัวแปร Kp,Ki เป็น floating point number เท่ากับ 5 และ 0.02 ตามลำดับ

float Kp0 = 1, Ki0 = 0.02;	ประกาศตัวแปร Kp0,Ki0 เป็น floating point number เท่ากับ 1 และ 0.02 ตามลำดับ
float Kp1 = 1, Ki1 = 0.005;	ประกาศตัวแปร Kp1,Ki1 เป็น floating point number เท่ากับ 1 และ 0.005 ตามลำดับ
int16 PPWM0 = 0;	ประกาศตัวแปร PPWM0 เป็น integer 16 bits เท่ากับ 0
int16 PPWM = 0;	ประกาศตัวแปร PPWM เป็น integer 16 bits เท่ากับ 0
int16 PPWM2 = 0;	ประกาศตัวแปร PPWM2 เป็น integer 16 bits เท่ากับ 0
float PWM = 0;	ประกาศตัวแปร PWM เป็น floating point number เท่ากับ 0
Float IPWM = 0;	ประกาศตัวแปร IPWM เป็น floating point number เท่ากับ 0
float FPWM = 0;	ประกาศตัวแปร FPWM เป็น floating point number เท่ากับ 0
float PWM2 = 0;	ประกาศตัวแปร PWM2 เป็น floating point number เท่ากับ 0
int16 period = 4095;	ประกาศตัวแปร period เป็น integer 16 bits เท่ากับ 4095
int i = 0;	ประกาศตัวแปร i เป็น integer 8 bits เท่ากับ 0
enable_interrupts(GLOBAL);	เปิดการใช้งาน interrupt รวม
enable_interrupts(INT_CCP2);	เปิดการใช้งาน interrupt ccp2
SETUP_CCP2(CCP_CAPTURE_RE);	กำหนดค่า ccp2 ทำงานในโหมด capture ขอบขาขึ้น
enable_interrupts(INT_CCP1);	เปิดการใช้งาน interrupt ccp1
setup_ccp1(CCP_PWM);	กำหนดค่า ccp1 ทำงานในโหมด PWM
setup_power_pwm_pins(PWM_BOTH_ON ,PWM_OFF,PWM_OFF,PWM_OFF);	กำหนดค่า Power PWM ทำงานช่องที่ B0, B1
setup_power_pwm(PWM_CLOCK_DIV_4 PWM_FREE_RUN,1,0,period,0,1,0);	กำหนดค่า clock อัตราส่วน 1:4
SETUP_TIMER_1(T1_INTERNAL T1_DIV_BY_8);	กำหนด timer1 ใช้สัญญาณ Clock ภายใน มีค่า Prescale1:8

setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 255, 1);	กำหนดค่า timer2
SETUP_ADC(ADC_CLOCK_INTERNAL);	กำหนดสัญญาณ clock ในการอ่าน a to d เป็นสัญญาณภายใน
SETUP_ADC_PORTS(sAN0);	กำหนดช่องในการอ่าน a to d เป็น AN0
SETUP_ADC_PORTS(sAN1);	กำหนดช่องในการอ่าน a to d เป็น AN1
set_timer2(0);	เริ่มต้นการของ timer2 นับที่ 0
set_timer1(0);	เริ่มต้นการของ timer1 นับที่ 0
while(true){	
set_timer1(0);	เริ่มต้นการของ timer1 นับที่ 0
set_adc_channel(0);	เปิดการอ่าน a to d ที่ช่อง AN0
V = read_adc();	อ่านค่า a to d มาเก็บไว้ที่ตัวแปร V
V = (V*5)/1023;	แปลงจากจำนวนบิตเป็นโวลต์
i1 = (2.482 - V)/0.186;	แปลงจากโวลต์เป็นกระแส
e1 = Iset - i1;	หา error กระแสจังหวะที่ 1
set_adc_channel(1);	เปิดการอ่าน a to d ที่ช่อง AN1
V1 = read_adc();	อ่านค่า a to d มาเก็บไว้ที่ตัวแปร V1
V1 = (V1*5)/1023;	แปลงจากจำนวนบิตเป็นโวลต์
speed_sp = V1*41.867;	ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์กับ ความเร็ว set point
Iset = (speed_sp + 0.97196 + 0.065)/248.7285;	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว set point กับกระแส set point
i = i+1;	ค่า I เพิ่มขึ้นทีละ 1
pos1 = (float)pos;	ค่าตัวแปร pos เท่ากับ pos1
delay_ms(5);	delay time 5 millisecond
pos2 = (float)pos;	ค่าตัวแปร pos เท่ากับ pos2
V = read_adc();	อ่านค่า a to d มาเก็บไว้ที่ตัวแปร V
V = (V*5)/1023;	แปลงจากจำนวนบิตเป็นโวลต์
I2 = (2.482 - V)/0.186;	แปลงจากโวลต์เป็นกระแส
E2 = Iset - i2;	หา error กระแสจังหวะที่ 2
IPWM = IPWM + (Kp * e1) + (Ki * (e1+e2) * dt);	สมการ PI control กระแส

```

IPWM = abs(IPWM);           PWM absolute PWM
PPWM0 = (int16)IPWM;       แปลงค่า PWM เป็น integer 16 bits เก็บไว้ที่
PPWM
if(i == 1){                ถ้า I เท่ากับ 1
    speed = (pos2-pos1)/dt;  ความเร็วเท่ากับ pos2 – pos1 หาร dt
    speed = (speed*2*3.14)/600;  แปลงค่าความเร็วจาก step/sec เป็น radian/sec
    error = speed_sp - speed;  error เท่ากับ speed_sp - speed
    dt = get_timer1();       อ่านค่า timer1 มาเก็บไว้ที่ตัวแปร dt
    dt = dt*8*0.0000005;    แปลงค่า dt เป็นระบบเวลาจริง
}
if(i == 2){
    speed1 = (pos1 - pos2)/dt;  ความเร็วเท่ากับ pos1 – pos2 หาร dt
    speed1 = (speed1*2*3.14)/600;  แปลงค่าความเร็วจาก step/sec เป็น radian/sec
    error2 = speed_sp - speed1;  error เท่ากับ speed_sp - speed
    i = 0;                    ให้ค่า I = 0
}
if(V1 < 2.5){             ถ้า V1 < 2.5 Vf คงที่ control Va
    PWM = PWM + (Kp0 * error) + (Ki0 * (error+error2) * dt);
    สมการ PI control Va
    PWM = abs(PWM);         PWM absolute PWM
    PPWM = (int16)PWM;      แปลงค่า PWM เป็น integer 16 bits เก็บไว้ที่
    PPWM
    set_pwm1_duty(PPWM);   จ่ายค่า PPWM ออกที่ ccp1
    set_power_pwm0_duty(1023 * ((period>>8)+1));
    จ่าย duty cycle 100% ออกที่ power pwm0 (B0)
}
else if(V1 >= 2.5){      ถ้า V1 >= 2.5 control Va, control Vf

    PWM = PWM + (Kp0 * error) + (Ki0 * (error+error2) * dt);  สมการ PI control Va

```

```

PWM = abs(PWM);           PWM absolute PWM
PPWM = (int16)PWM;       แปลงค่า PWM เป็น integer 16 bits เก็บไว้ที่
                          PPWM

FPWM = FPWM + (Kp1 * error) + (Ki1 * (error+error2) * dt);  สมการ PI control Vf
FPWM = abs(FPWM);       FPWM absolute FPWM
PPWM2 = (int16)FPWM;    แปลงค่า PPWM2 เป็น integer 16 bits เก็บไว้ที่
                          FPWM

set_pwm1_duty((int16)PWM);  จ่ายค่า PPWM ออกที่ ccp1
set_power_pwm0_duty((int16)FPWM * ((period>>8)+1));
                          จ่ายค่า FPWM ออกที่ Power PWM (B0)
}

printf("%f\t%f\t%f\r\n",speed_sp,speed,i1);ส่งค่า speed_sp, speed และ กระแส ผ่าน RS-232
                          เข้าสู่คอมพิวเตอร์

if(PWM >= 1023 || FPWM >=1023){  ถ้า PWM >= 1023 หรือ FPWM >= 1023
PWM = 800;                       PWM = 800
FPWM = 800;                       FPWM = 800
}

delay_ms(5);                      delay time 5 millisecond

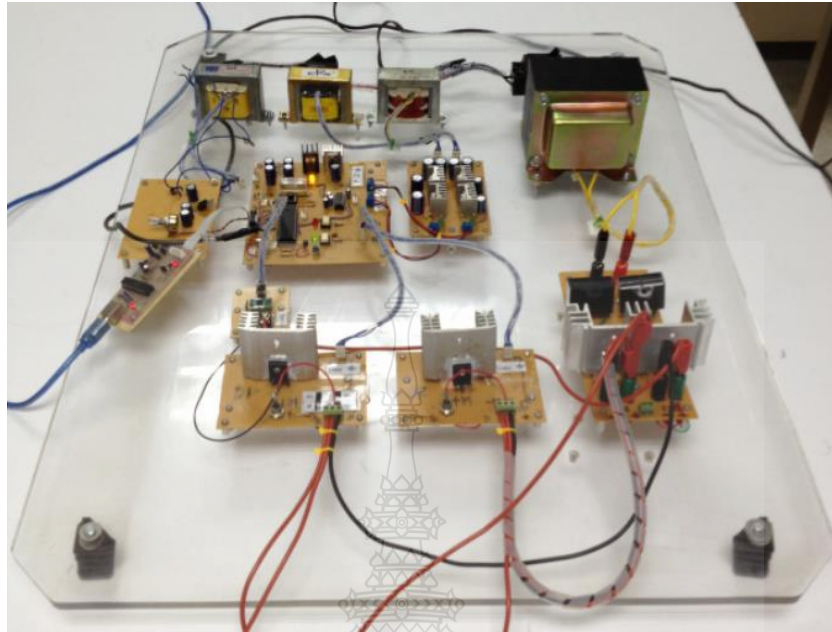
No table of figures entries found.
}

```




ภาคผนวก ค

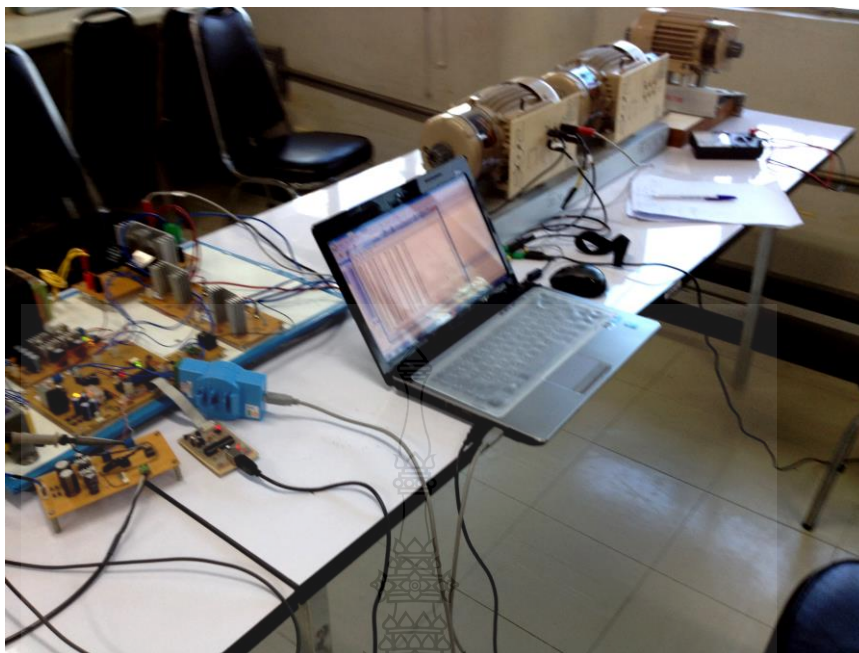
ประมวลภาพกระบวนการดำเนินงานวิจัย



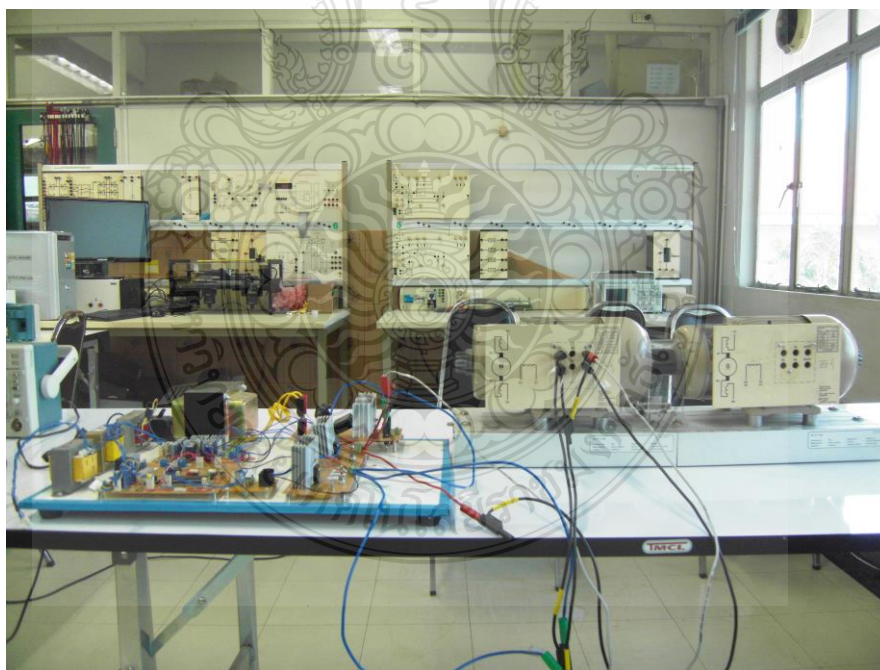
ภาพที่ ค.1 ชุดต้นแบบการจำลองกั้นล้มด้วยควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ ค.2 Control Desk ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ค.3 โปรแกรม HyperTerminal ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ค.4 คับปลั๊กมอเตอร์กับเครื่องกำเนิด

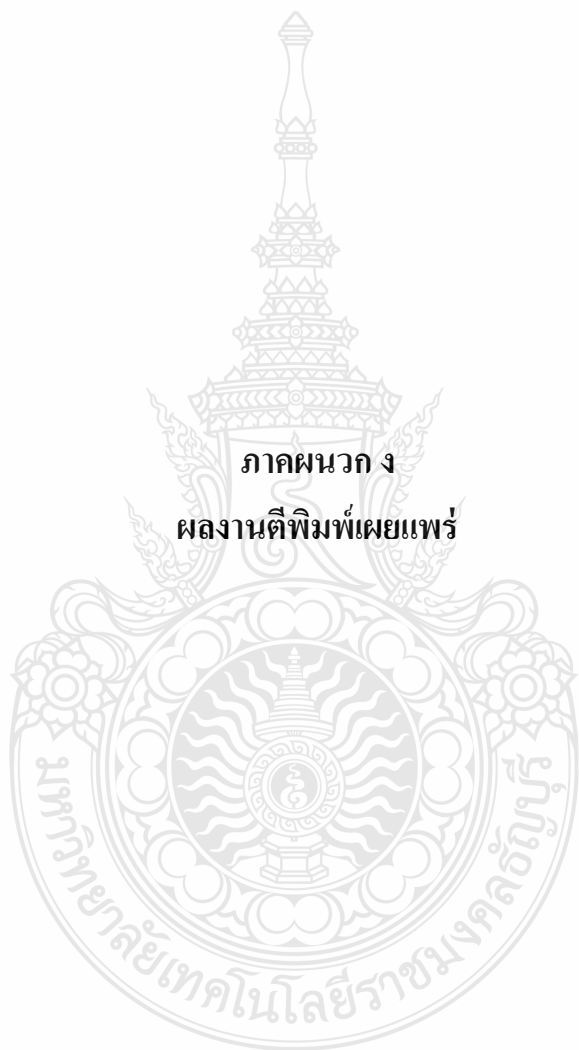


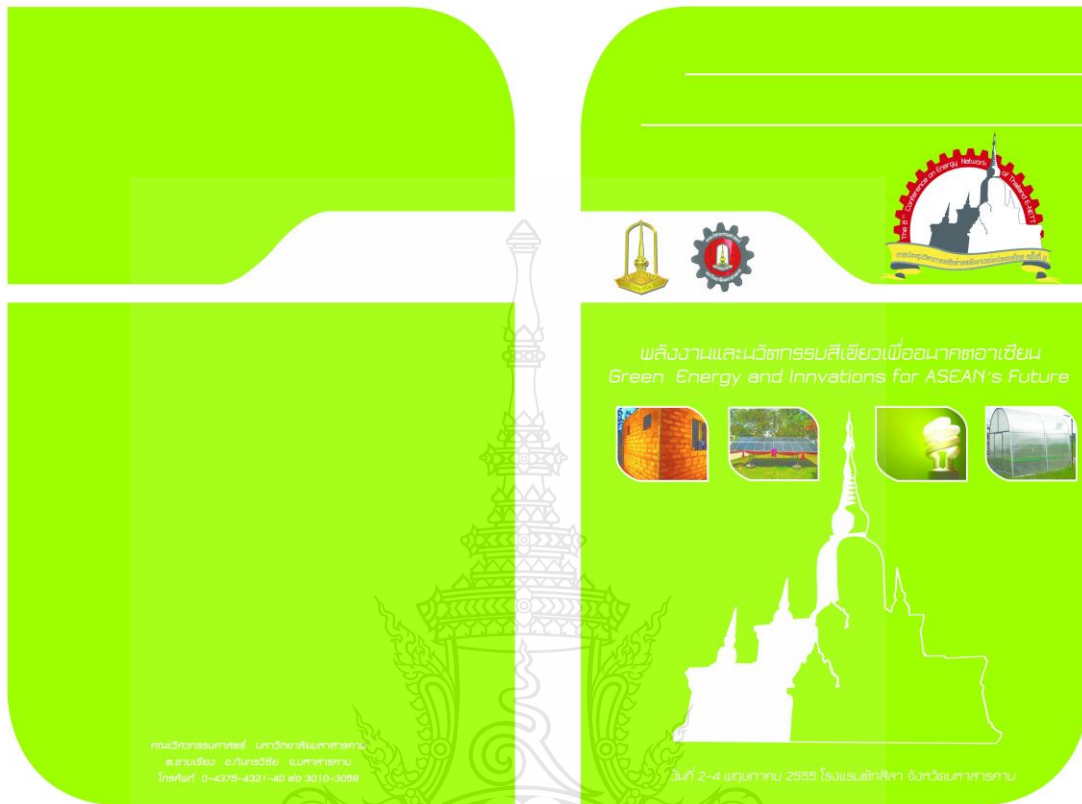
ภาพที่ ค.5 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ ค.6 การจัดและติดตั้งอุปกรณ์ในวันทดลอง

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน
Green Energy and Innovations for ASEAN's Future

วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2559 โรงแรมอัสสัมชัญ จังหวัดนนทบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาคารเรียน ๑/ก/อาคาร ๕๒๖ ถนนพหลโยธิน
โทรศัพท์ 0-4379-4321-40 ต่อ 3010-3058

The poster features a green background with a white silhouette of a traditional Thai stupa in the center. At the top right, there is a red circular logo with a white silhouette of a stupa and the text 'Green Energy, New Era' and 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี'. Below the logo are three small icons: a golden oil lamp, a gear with a red center, and a red banner. The main text is in Thai and English, followed by four small images: a brick wall, a solar panel array, a glowing lightbulb, and a greenhouse. At the bottom left, there is contact information for the Faculty of Engineering, Rajabhat Thanyaburi. At the bottom right, there is the date and location of the event.



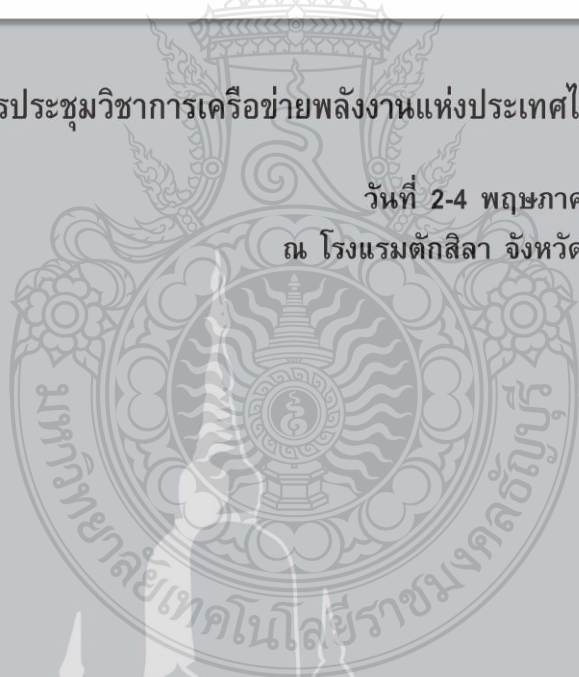


รวมบทความย่อ

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

ณ โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม



จัดโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



หน่วยงานในเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

1. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
5. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
7. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
8. มหาวิทยาลัยศิลปากร
9. มหาวิทยาลัยรังสิต
10. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
11. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12. มหาวิทยาลัยนเรศวร
13. มหาวิทยาลัยนเรศวร (วิทยาลัยพลังงานทดแทน)
14. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
15. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
16. มหาวิทยาลัยทักษิณ
17. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
18. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
19. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
20. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
21. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
22. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
23. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
24. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
25. มหาวิทยาลัยสยาม
26. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา
27. มหาวิทยาลัยพะเยา



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรธรณี	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมิวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อติศักดิ์ บัดติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อูโรโสภณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กันย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิตา เนียมมัญญ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร. ณรงค์ อึ้งกิมบัววน	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลหาพนิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร อังควิเศษพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิตา สุขแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลกฤษณ์ จิตต์โต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาว์ณย์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปรีชา ศรีประกาศาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วาญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

Wind Turbine Simulator with a Separate Excite DC Motor

บัญชา ศรีวิโรจน์* และวันชัย ทรัพย์สิงห์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3567
E-mail : sr_bancha@hotmail.com, w_subsingha@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขนาด 1,000 วัตต์ 220 โวลต์ โดยควบคุมสัญญาณความเร็วอ้างอิง (Speed Reference) ผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ รุ่น DS 1104 เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลาและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 เป็นตัวควบคุมการทำงานของภาควงจรควบคุมมอเตอร์ ทั้งนี้การควบคุมเป็นแบบลูปิด โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งในส่วนการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์และในส่วนการควบคุมแรงดันขดลวดฟิลด์ การทดสอบได้มีการป้อนค่าความเร็วอ้างอิงแบบทันเวลา ที่ความเร็วลม 4 ระดับ คือ ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มหมุน 2.5 m/s ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า 3 m/s ระดับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย 5.5 m/s และระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าเต็มพิกัดกำลัง 9 m/s ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบจากมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วอ้างอิงโดยมีค่าแปรปรวนอยู่ในขนาดที่ยอมรับได้

คำหลัก: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก, รูปแบบทันเวลา, ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

Abstract

This article presents the Wind Turbine Simulator with is driven by 1kw Separate Excite DC Machine The input of the drive is controlled by wind turbine block set in Matlab/simulink of the via the interface card real time DSP board (DS 1104) The DC drive control function is using the PIC micro controller model PIC18F4431 which is implemented with PI control loop in order to fulfill in Armature Voltage and Field control functions. The experiment is set into 4 level of a real time wind speed which is fed into the dc drive .The 4 level of wind speed are 2.5 m/s which is the rotating/startup speed of wind turbine, 3 m/s which is electrical power startup of wind turbine ,5.5 m/s which is the average wind speed in Thailand and 9 m/s which is the maximum power speed of wind turbine that generate The experimental resulted show that output motor speed is approximately equal to the reference speed in an acceptable variation value.

Keywords: separate excite dc motor, Real-time, PIC microcontroller

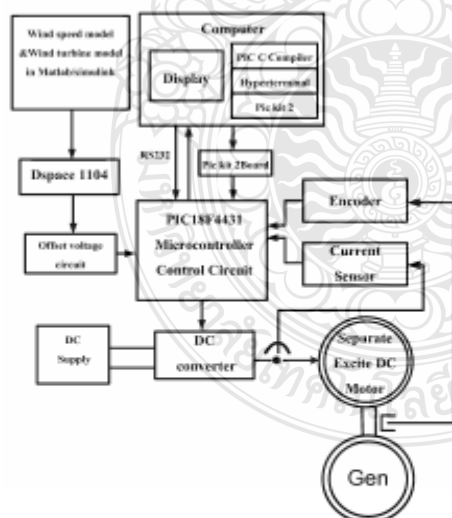
ENETT8-XXX

1/8



1. บทนำ

ปัจจุบันการตื่นตัวในการหาพลังงานทดแทน [1] [2] ด้านพลังงานจากลมมีการพัฒนามากขึ้น แต่การทดสอบ กับกังหันลมจริงทำได้ยากและไม่เหมาะกับการนำมาออกแบบระบบควบคุมเพราะการทดสอบระบบควบคุมต้องการทดสอบที่ความเร็วคงที่ที่ความเร็วค่าๆหนึ่ง หรือที่ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนด แต่กังหันลมจริงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความเร็วลมจริงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่แน่นอน ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลอง ระบบพลังงานลมและกังหันลมโดยการกำหนดพารามิเตอร์ลงใน Wind Turbine Model เพื่อสร้างสัญญาณความเร็วที่จะนำไปใช้เป็นความเร็วอ้างอิงในการควบคุมความเร็วของ DC motor ส่วนที่สองเป็นการนำสัญญาณ ที่ได้มาควบคุมมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบสัมพันธ์กับความเร็วลม ทั้งนี้ควบคุมแบบ Real time โดยผ่าน DS1104 board และควบคุมความเร็วภายใน DC motor ทั้งหมด จะประยุกต์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4431



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องจำลองกังหันลม

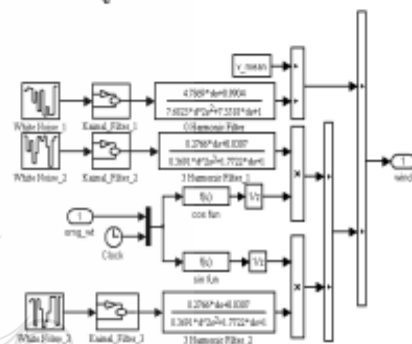
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

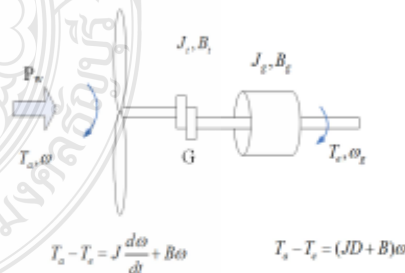
แบบจำลองความเร็วลม [3] มีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและพฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงานลมนี้ไปสังเคราะห์ใช้ประโยชน์ต่อไป ในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีปัจจัย 2 ส่วนคือ

(ก) ส่วนแรกคือความเร็วเป็นค่าคงที่เฉลี่ย ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงต่ำสุด

(ข) ส่วนที่สองเป็นค่า Turbulence ของความเร็วลมซึ่งสามารถ เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลม
2.2 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model)



รูปที่ 3 แบบจำลองกังหันลม

สมมุติให้อัตราทดเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้น $\omega_s = \omega$ สามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันได้ โดยที่ $J = J_1 + J_2$ และ $B = B_1 + B_2$ แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต



$$T_o - T_c = (JD + B)\omega \quad (1)$$

โดยกำหนดตัวดำเนินการ $D = \frac{d}{dt}$

แรงบิดอากาศพลศาสตร์ T_c เป็นค่าที่ได้รับผล ส่วนหนึ่งจาก ω ดังต่อไปนี้ โดยกังหันที่มีขนาดและ ลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะ ต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังไฟฟ้าที่กังหัน สกัดได้จากผลคูณสมการที่ 2

$$P_c = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(v, \omega, \beta) \quad (2)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีกรปรับ มุมพิช β ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับ ค่าของ v และ ω เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ (3)

$$\omega = \frac{\lambda v}{R} \quad (3)$$

จะได้ $P_c = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad (4)$

แทนค่าใน $T_c = \frac{P_c}{\omega}$ จะได้ว่า

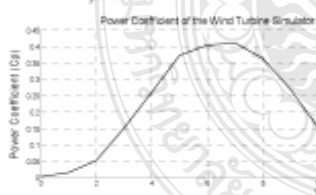
$$T_c = \frac{\rho}{2} \pi R^2 \frac{v^3}{\omega} C_p(\lambda) \quad (5)$$

แทนค่าใน $\omega = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_c = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^2 C_p(\lambda) \quad (6)$$

โดยที่ค่าของ $C_p(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์

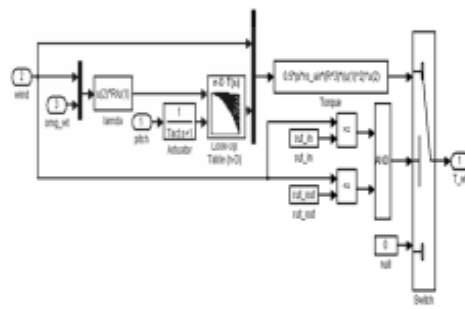
แรงบิดและ $C_p(\lambda)$ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลัง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับแลมด้า (λ)

จากรูปที่ 3 กังหันเป็นระบบที่มีอินพุตคือ แรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือความเร็วรอบ และ ถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน

(Disturbance) ดังนั้นจากสมการ 6 จึงเขียน บล็อกไดอะแกรม แบบจำลองของกังหันได้ดังรูปที่ 5

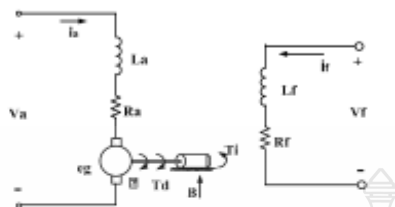


รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่า จากสมการพื้นฐานของ กังหันลม สามารถที่นำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรม Matlab/Simulink ได้โดยในส่วนของการคำนวณค่า C_p จะใช้บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ช่วยในการคำนวณค่า C_p โดยใช้ หลักการ Interpolation

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separate excite dc motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วยขดลวดที่ สำคัญอยู่ 2 ขด คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดฟิลด์ การควบคุมความเร็วจะควบคุมในส่วนของแรงดันอาร์ เมเจอร์ โดยการเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์หรือลดแรงดัน อาร์เมเจอร์ หากเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ความเร็วรอบก็ จะสูงขึ้นและหากลดแรงดันความเร็วรอบก็จะต่ำลง ใน ส่วนของแรงดันฟิลด์นั้นในงานส่วนใหญ่จะกำหนดให้ คงที่ แต่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างออกไปคือมีการ ควบคุมแรงดันฟิลด์ [1]



รูปที่ 6 วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาการหาค่าพารามิเตอร์ ตาม
กฎของเคอร์ซอพฟ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้
[4]

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (7)$$

$$\text{ซึ่ง } e_g = K_f i_f \omega \quad (8)$$

$$\text{จะได้ } V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_f i_f \omega \quad (9)$$

เมื่อกำหนดให้ K_f เป็นแรงดันคงที่ (V.s/rad) ทำการ
แปลงลาปลาซในสมการที่ 2 จะได้

$$I_a(s) = I_a(s) R_a + L_a s I_a(s) + K_f I_f \omega(s) \quad (10)$$

จากสมการที่ 3 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_f I_f \omega(s)}{s L_a + R_a} \quad (11)$$

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาทางกลจะได้

$$T_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_c \quad (12)$$

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ 5 และกำหนดให้
 $T_c(s) = K_f I_f I_a(s)$ และ $T_c(s) = 0$ จะได้

$$\omega(s) = \frac{K_f I_f I_a(s)}{sJ + B} \quad (13)$$

เมื่อ K_f เป็นค่าคงที่ของแรงบิด (N.m/A).

แทนค่า $I_a(s)$ ในสมการที่ 10 และ 12 ตามลำดับ
ทราบเฟอฟังก์ชันระหว่าง armature voltage (V_a) และ
ความเร็วมอเตอร์ (ω) จะได้เป็น

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_f I_f / R_a R_f B}{\left[\frac{L_a J}{R_a B} s^2 + \left(\frac{L_a}{R_a} + \frac{J}{B} \right) s + 1 + \frac{(K_f I_f)^2}{R_a R_f^2 B} \right]} \quad (14)$$

กำหนดให้ $K_v = K_f$ จะได้

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_f I_f / R_a R_f B}{\left[\frac{L_a J}{R_a B} s^2 + \left(\frac{L_a}{R_a} + \frac{J}{B} \right) s + 1 + \frac{(K_f I_f)^2}{R_a R_f^2 B} \right]} \quad (15)$$

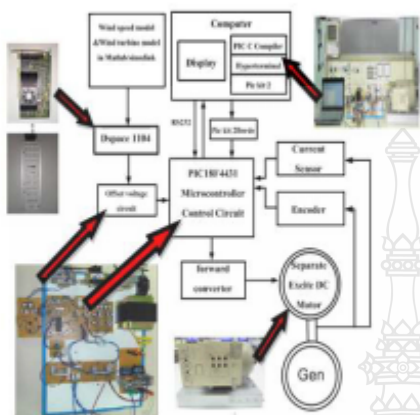
จากสมการเมื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	
แรงดันไฟฟ้า	$V_a = 220 \text{ V}$
กระแสอาร์เมเจอร์	$I_a = 5.6 \text{ A}$
ความต้านทานอาร์เมเจอร์	$R_a = 2.2 \text{ } \Omega$
ความต้านทานขดลวดฟิลด์	$R_f = 400 \text{ } \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์	$L_a = 0.015 \text{ H}$
ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดฟิลด์	$L_f = 7 \text{ H}$
Mechanical time constant	$T_m = 2.75 \text{ sec}$
Moment of inertia	$J = 2.92 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
Viscous friction coefficient	$B = 37.77 \cdot 10^{-5} \text{ N.m.s/rad}$

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ควบคุมของมอเตอร์

ส่วนที่ควบคุม	Kp	Ki
ลูปกระแสอาร์เมเจอร์	5	0.5
ลูปความเร็วอาร์เมเจอร์	1	0.02
ลูปความเร็วฟิลด์	1	0.005

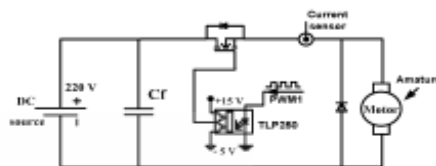
การควบคุมความเร็วรอบ มอเตอร์แบบลูปปิดจะถูก
ควบคุมด้วย PIC18F4431 เพียงตัวเดียวโดยรับคำสั่ง
เป็นข้อมูลจาก DS 1104 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์
PIC18F4431 รับสัญญาณอินพุตเข้ามาก็จะทำการรับ
ค่าและส่งค่าเข้ามาแสดงบนคอมพิวเตอร์ในหน้าต่าง
ของโปรแกรม HyperTerminal ในส่วนของการควบคุม
แบบลูปปิดนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัว
ประมวลผลเปรียบเทียบกับข้อมูลเอง โดยรับคำสั่งภาษาซี
ที่ถูกส่งไว้ และทำการประมวลผล วนลูปอย่างต่อเนื่อง
จนกว่าค่าที่ควบคุม (set point, SV) จะเท่ากับค่าที่วัด
ได้ (Process value, PV)



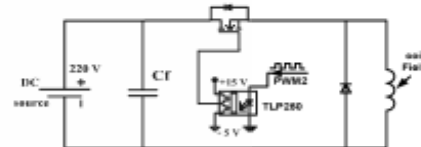
รูปที่ 7 การออกแบบเครื่องจำลองทั้งหมด

2.4 วงจรกำลังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยมอสเฟสแบบ forward converter

วงจรนี้เป็นวงจรที่ทำหน้าที่สับสวิตซ์มอสเฟสที่มีความถี่ที่เหมาะสมที่ 30 kHz โดยรับสัญญาณ PWM 1 และ PWM 2 มาจาก OPTO เบอร์ TLP250 ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ PWM ที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 ให้มีขนาดแรงดันที่เหมาะสมสำหรับมอสเฟส ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้มอสเฟสเบอร์ IRFP460LC สามารถทนแรงดันได้ที่ 500 โวลต์และรับกระแสได้ถึง 20 แอมป์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวมอสเฟส แรงดันระหว่างขา drain และ source และแรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนขาคู่ของมอสเฟส ซึ่งต้องใช้แรงดันในการขับเคลื่อนที่เหมาะสมคือ 15 โวลต์และ -5 โวลต์ อีกทั้ง OPTO TLP250 ยังเป็นวงจรที่ช่วยแยกกราวนด์ระหว่างวงจรกำลังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์กับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อเกิดการลัดวงจรในส่วนภาคขับเคลื่อนมอสเฟสความเสียหายที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกส่งไปถึงภาคไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 8 วงจรกำลังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์อาร์เมเจอร์ (Va)



รูปที่ 9 วงจรกำลังภาคขับเคลื่อนฟิลด์ (Vf)

2.6 การออกแบบในส่วนของ Software

จะมีซอฟต์แวร์ที่เป็นการขับเคลื่อนแบบ close loop control ซอฟต์แวร์นี้ จะมีเงื่อนไขทฤษฎี PI Control เพื่อให้ค่าความเร็วรอบที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (set point, Sv) ในส่วนของค่ากระแสให้เป็นไปตามค่าของกระแสที่ตั้งไว้ (Current set point ,Is) ซึ่งต้องกำหนดเงื่อนไขที่ถูกต้อง เพื่อที่จะสร้างสัญญาณ PWM ที่เหมาะสม (Manipulate value ,Mv) ซึ่งมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ จากสมการ PI-Control [5]

$$M_v(t) = M_{v_s} + K_v \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (13)$$

กำหนดให้

- Sv คือ ค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก Ds 1104
- Pv คือ ค่าความเร็วรอบที่วัดได้
- Is คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ
- Iv คือ ค่ากระแสที่วัดได้
- Mv คือ สัญญาณควบคุมขนาด 8 บิตมีค่าเท่ากับ 0-255



เงื่อนไขที่ 1 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะเพิ่มค่ากระแสให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_c จำนวนตามสมการ

$$err_1 = I_r - I_c \quad (16)$$

$$M_c(t) = M_c + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (17)$$

เมื่อค่า $M_c \geq 254$ ให้ M_c เท่ากับ 254

ถ้าเงื่อนไขที่ 1 เป็นจริงแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมาจาก Ds 1104 (Sv) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4

เงื่อนไขที่ 2 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงมากกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะลดค่ากระแส ลงโดยการลดค่า M_c จำนวนตามสมการ

$$err_1 = I_r - I_c \quad (18)$$

$$M_c(t) = M_c - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (19)$$

เมื่อค่า $M_c \leq 1$ ให้ M_c มีเท่ากับ 1

ถ้าเงื่อนไขที่ 2 เป็นจริงแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมาจาก Ds 1104 (Sv) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4 หากเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ไม่เป็นจริงก็โปรแกรมก็จะข้ามมาตรวจสอบเงื่อนไขที่ 3 และ 4 เลย

เงื่อนไขที่ 3 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก Ds 1104 โปรแกรมจะเพิ่มค่าความเร็วรอบให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_c จำนวนตามสมการ

$$err_1 = S_r - S_c \quad (20)$$

$$M_c(t) = M_c + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (21)$$

เมื่อค่า $M_c \geq 254$ ให้ M_c เท่ากับ 254

เงื่อนไขที่ 4 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงมากกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก Ds 1104 โปรแกรมจะลดค่าความเร็วรอบให้ต่ำลงโดยการลดค่า M_c จำนวนตามสมการ

$$err_1 = P_r - S_c \quad (22)$$

$$M_c(t) = M_c - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (23)$$

เมื่อค่า $M_c \leq 1$ ให้ M_c มีเท่ากับ 1

เงื่อนไขที่ 5 หาก $I_r = I_c$ แล้วตรวจสอบ $P_r = S_c$ แล้วจะได้

$$M_r = I_r = I_c = P_r = S_c \quad (24)$$

2.7 การเขียนโปรแกรมภาษาซี

ในส่วนของโปรแกรม PIC C Compiler นั้น จะต้องมีการเขียนรับค่าสัญญาณความเร็วรอบจาก encoder ค่าคำสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์จาก DS1104 ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์ และการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดจะมีความยาวมาก โปรแกรมที่สำคัญในส่วนสร้างสัญญาณ PWM ของ Va และ Vb คือ

$$PWM = PWM + (Kp0 * error) + (Ki0 * (error + error2) * dt); \quad (24)$$

$$FPWM = FPWM + (Kp1 * error) + (Ki1 * (error + error2) * dt); \quad (25)$$



รูปที่ 10 ต้นแบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

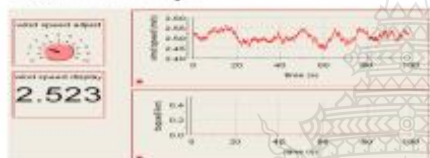
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบเครื่องจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ควบคุมด้วยการ์ด อินเทอร์เน็ต

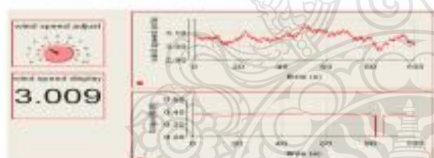
การทดลองระบบจำลองในโปรแกรม Matlab/Simulink สามารถทำการทดลองได้โดยไม่ต้องวางจริงภายนอก เพียงแค่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ได้ออกแบบมาแล้วโดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลอง ในส่วนแบบจำลองของแต่ละส่วนโดยกำหนด Blade Diameter เท่ากับ 2.7 m, ความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m³ และทดสอบที่ความเร็วลม 4 ระดับ คือ 1.ระดับความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมเริ่มหมุน 2.5 m/s 2. ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า 3 m/s 3. ระดับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย 5-6 m/s 4.



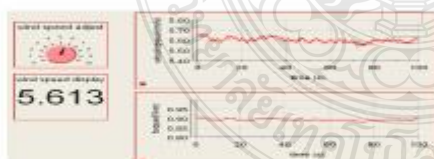
ระดับความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าเต็มอัตราการผลิตที่ 9 m/s เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลองเพื่อดูสัญญาณความเร็วอ้างอิง (Speed reference) และแรงบิด (Torque) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ เมื่อเราทำการเปรียบเทียบสัญญาณแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model) และสัญญาณแบบจำลองกังหัน (Wind Turbine Model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink ในลักษณะสัญญาณทันเวลา จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันทั้งสองสัญญาณดังแสดงในรูป



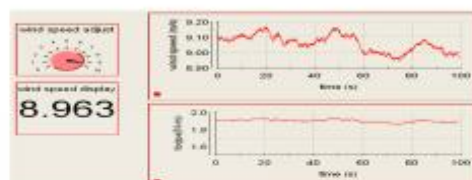
รูปที่ 12 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 2.5 m/s จากแบบจำลองกังหันลม



รูปที่ 13 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 3 m/s จากแบบจำลองกังหันลม

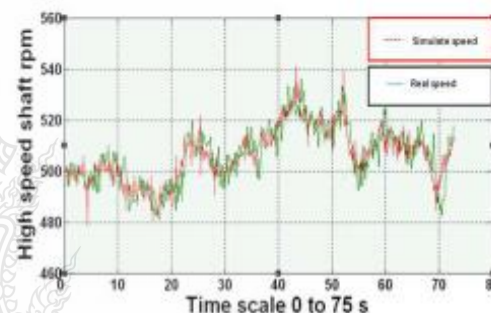


รูปที่ 14 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 5.5 m/s จากแบบจำลองกังหันลม

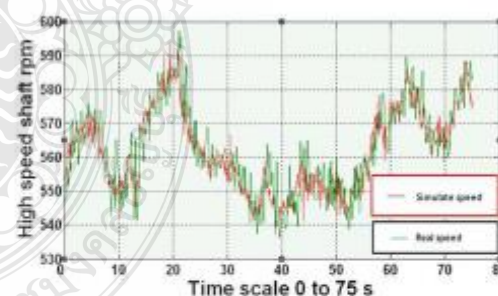


รูปที่ 15 ความเร็วและแรงบิดที่ระดับความเร็วลม 9 m/s จากแบบจำลองกังหันลม

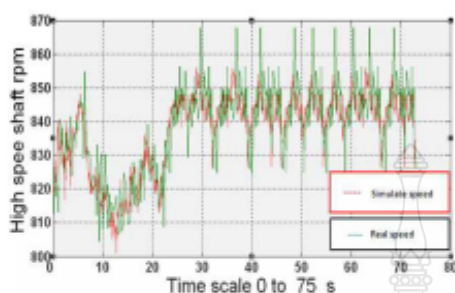
3.2 ผลการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมด้วยการดีอินเตอร์เฟส DS1104



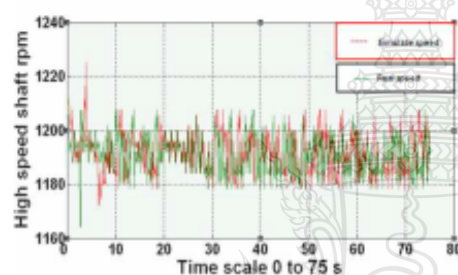
รูปที่ 16 ความเร็วรอบที่ระดับความเร็วลม 2.5 m/s



รูปที่ 17 ความเร็วรอบที่ระดับความเร็วลม 3 m/s



รูปที่ 18 ความเร็วรอบที่ระดับความเร็วลม 5.5 m/s



รูปที่ 19 ความเร็วรอบที่ระดับความเร็วลม 9 m/s
ตารางที่ 3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรูปที่ 16-19

ระดับความเร็วลม (m/s)	สัญญาณ	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแปรปรวน
2.5	จำลอง	506.15	10.36	0.84
	ค่าจริง	506.45	11.20	
3	จำลอง	561.52	11.65	4.54
	ค่าจริง	560.39	16.19	
5.5	จำลอง	837.49	11.41	1.57
	ค่าจริง	838.39	12.98	
9	จำลอง	1194.52	39.64	4.77
	ค่าจริง	1193.46	34.87	

4.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองกับการทดลอง พบว่าที่ระดับความเร็วลม

2.5 m/s 3m/s และ 5m/s เป็นช่วงของการควบคุมแบบอาร์มาเจอร์โวลต์เตจค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.84 4.54 และ 1.57 ตามลำดับที่ระดับความเร็วลม 9 m/s เป็นช่วงของการควบคุมแบบฟิลด์ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ คือ 4.77 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความแปรปรวนทั้งสองช่วงของการควบคุมมีค่าน้อย จึงสรุปได้ว่าสามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1]R.Ii.Ovando,J.Aguayo, M. Cotorogea"Emulation of a Low power Wind Turbine with a DC motor in Matlab/Simulink"Centro Nacional de Investigaci3n yDesarrollo Tecnol3gico (CENIDET)Departamento de Ingenieria Electr3nica Interior Internado Palmire s/n Apdo. 5-164. C.p.62050,Cuernavaca, Morelos, M3xico Tel.: +52 (777) 3 62 77 70
- [2] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อธิตพล ศศิธรานูวัฒน์. (2547, กรกฎาคม-ธันวาคม). "เทคโนโลยีพลังงานลม," วารสารมหาวิทยาลัยแนวทวาร. 12(2) . 57-73.
- [3] ชาญฤทธิ์ ชาราลันดิสุข บุญช่วย เจริญผล นพรัตน์ ม่วงคุ้ม "เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส DS 1104" การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2(5-6 กุมภาพันธ์ 2553) เชียงใหม่
- [4] Sasiya Udomsuk, Tidarut Areerak, Kongpol Areerak and Kongpan Areerak, "Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search", European Journal of Scientific Research, Vol.60, No.4 (2011), pp.488-497.
- [5] จิรายุทธ แก้วอาสา, ชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบลูบปีตบนจอตอมพิวเตอร์โปรแกรม visual basic.วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ. กรุงเทพฯ, 2549



มหาวิทยาลัยธนบุรี
Thonburi University

วารสารวิชาการ
มหาวิทยาลัยธนบุรี
Journal of Thonburi University

ปีที่ 7 ฉบับที่ 13 มกราคม - มิถุนายน 2556
Vol. 7 No. 13 January - June 2013



ISSN 1905 - 9469



วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 7 ฉบับที่ 13 เดือน มกราคม – มิถุนายน 2556 ISSN 1905 - 9469

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานการวิจัยและผลงานวิชาการทางด้านมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ให้ทันสมัยและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการ ให้เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ
3. เพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพทางวิชาการของบุคลากรทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ดำเนินการ

บัญชา เกิดมณี อธิการบดี มหาวิทยาลัยธนบุรี

บรรณาธิการ

ดร.อุไรรัตน์ แยมชุตี รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารุณี มีสินทปัญญา คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. สมบัติ	ทีฆทรัพย์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงศรี	สรณสถาพร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร. อรสา	อร่ามรัตน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ชัย	เทียนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมชัย	อภิรัตน์พิมลชัย	มหาวิทยาลัยธนบุรี

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (มกราคม – มิถุนายน และ กรกฎาคม – ธันวาคม) ของทุกปี

พิมพ์ที่

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธนบุรี

- บทความวิชาการและวิจัยทุกเรื่องได้รับการพิจารณาจากสำนักบรรณาธิการโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewer) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย
- ผลงานที่ปรากฏในวารสารฉบับนี้เป็นลิขสิทธิ์เฉพาะส่วนบุคคลของผู้เขียนซึ่งต้องรับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายที่อาจเกิดขึ้นได้ และไม่มีผลต่อกองบรรณาธิการ

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

ศาสตราจารย์เสนาะ	ติเยาว์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนาคม	สุนทรชัยนาคแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯ พระนครศรีอยุธยา
รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์	อยู่ถนอม	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิวิมล	มีอำพล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พยอม	วงศ์สารศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะบุตร	วานิชพงษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	กริชชาญชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลย์ลักษณ์	อัครวีระศักดิ์	สถาบันเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบุญรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อังสนา	จันแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ไกร	โพธิ์งาม	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รองศาสตราจารย์ ดร. พงศ์	หรรดาส	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.คำรณ	ศรีน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ไพรัช	ถิ่นธานี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ชาญ	ถนัดงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯพระนครศรีอยุธยา
รองศาสตราจารย์ วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีฯเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ผุสดี	รุมาคม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ประยูร	บุญประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ไกรวิชิต	ดินดีเมธ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ จลีพร	โกกลางกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัญญา	วสุศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรรย์	แสนราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัณวีรัช	พลูปราชญ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นวลนดา	สงวนวงศ์ทอง	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการกองบรรณาธิการ

กุลยา	สุขพงษ์ไทย	สำนักหอสมุด	มหาวิทยาลัยธนบุรี
จิรศักดิ์	ส่งบุญแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ทัทยา	แย้มขุติ	สำนักวิชาการ	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ศิริวัลย์	จันทร์แก้ว	คณะบัญชี	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ศรัณย์ธร	บรรจงคณิต	คณะบริหารธุรกิจ	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ลินดา	แช่ตัน	คณะบริหารธุรกิจ	มหาวิทยาลัยธนบุรี
วัฒนา	เอกปมิตศิลป์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ธัญญา	พุ่มมะเตือ	สำนักงบประมาณและการเงิน	มหาวิทยาลัยธนบุรี
อรรษาวี	เจ๊ะสะแม	ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ	มหาวิทยาลัยธนบุรี

สารบัญ

CONTENTS

ปีที่ 7 ฉบับที่ 13 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2556

บทความวิจัย

- 7 การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC
SEPARATE EXCITE DC MOTOR CONTROLLING BY PIC MICROCONTROLLING
บัญชา ศรีวิโรจน์, วันชัย ทรัพย์สิงห์, จีระศักดิ์ วงศา
- 19 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการบริหารบริการเทคโนโลยีสารสนเทศของสถาบันอุดมศึกษาโดยวิธีการพัฒนาแบบจำลองสมการ
โครงสร้าง
AN ANALYSIS OF FACTOR TOWARDS HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN THE INFORMATION TECHNOLOGY SERVICE
MANAGEMENT BY DEVELOPMENT BY DEVELOPMENT OF STRUCTURAL EQUATION MODEL
ศรัณย์ นาคถนอม, ผศ.ดร.ฉมน จีรังสุวรรณ
- 26 การศึกษาความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
A STUDY OF STRESS IN A HORIZONTAL PRESSURE VESSEL AND THE SADDLE SUPPORTS USING FINITE ELEMENT METHOD
อรรถพล ชัยมันัสกุล
- 35 การศึกษาคำบวงสรวงในประเพณีและพิธีกรรมทางล้านนาที่ส่งผลต่อวิถีชีวิตของประชาชนในจังหวัดเชียงราย
A STUDY OF WORSHIPPING WORDS IN LANNA CULTURAL AND CEREMONIAL ACTIVITIES WHICH EFFECT WAYS OF LIFE OF
THE RESIDENTS IN CHIANGRAI PROVINCE
สุทัศน์ คล้ายสุวรรณ
- 55 ความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงกลยุทธ์กับความสามารถทางการแข่งขันด้านการศึกษาของมหาวิทยาลัยเอกชนกลุ่มเครือข่ายเบญจมิตร
วิชาการ
RELATIONSHIP OF STRATEGIC FACTORS AND THE EDUCATION COMPETITIVENESS OF PRIVATE UNIVERSITIES IN
BENJAMITRA ACADEMIC NETWORK.
ฉันทิพย์ อาริยะโรจน์กุล, รองศาสตราจารย์เสาวภา มีถาวรกุล
- 65 แนวทางการพัฒนาองค์กรแห่งการเรียนรู้ของวิชาชีพบัญชี ในประเทศไทย
AN APPROACH TO DEVELOPMENT OF LEARNING ORGANIZATION FOR ACCOUNTING PROFESSION IN THAILAND
สมชาย เลิศภิรมย์สุข
- 79 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาโอ่งมังกร ราชบุรี
PERSONAL FACTOR, MARKETING MIX, AND THE PURCHASING BEHAVIOR OF DRAGON JARS POTTERY IN RATCHABURI.
นงลักษณ์ สุตินทวีบูลย์, พาสัน ทิมทรัพย์, ชลัช กลิ่นอุบล
- 88 ปัจจัยที่มีผลกับพฤติกรรมการเลือกซื้อผ้าฝ้ายย้อมสีของผู้ประกอบการค้าผ้าฝ้ายในกรุงเทพมหานคร
FACTORS AFFECTING DYE COTTON BUYING BEHAVIOR OF TEXTILE MERCHANTS IN BANGKOK
เจริญ อนุธรรมสมบัติ, พาสัน ทิมทรัพย์, ชลัช กลิ่นอุบล
- 98 ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดบริการที่มีผลต่อพฤติกรรมผู้บริโภคคนพม่า LOUIS MORAIS บริษัท ดรีมทีม (ประเทศไทย) จำกัด
(มหาชน)
SERVICE MAKETING MIX FACTORS AFFECTION BEHAVIOR OF CONSUMERS OF LOUIS MORAIS, DREAMTEAM
THAILAND PUBLIC COMPANY LIMITED
เอี่ยมกุล สุขสุชีพ, มยุขพันธ์ ไซมันคง
- 106 พฤติกรรมการใช้สารสนเทศของนักศึกษา มหาวิทยาลัยธนบุรี
INFORMATION BEHAVIORS OF THONBURI UNIVERSITY STUDENTS
กุลยา สุขพงษ์ไทย

Journal of Thonburi University

บทความวิจัย

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC SEPARATE EXCITE DC MOTOR CONTROLLING BY PIC MICROCONTROLLING บัญชา ศรีโรจน์, วันชัย ทวีทรัพย์สิงห์, จิระศักดิ์ วงศา.....	7
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการบริหารบริการเทคโนโลยีสารสนเทศของสถาบันอุดมศึกษาโดยวิธีการพัฒนาระบบจำลองสมการโครงสร้าง AN ANALYSIS OF FACTOR TOWARDS HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN THE INFORMATION TECHNOLOGY SERVICE MANAGEMENT BY DEVELOPMENT BY DEVELOPMENT OF STRUCTURAL EQUATION MODEL ศรัณย์ นาคทนอม, ผศ.ดร.ณมน จีรังสุวรรณ	19
การศึกษาความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ A STUDY OF STRESS IN A HORIZONTAL PRESSURE VESSEL AND THE SADDLE SUPPORTS USING FINITE ELEMENT METHOD อรรถพล ชัยมณีสกุล	26
การศึกษาคำบวงสรวงในประเพณีและพิธีกรรมทางล้านนาที่ส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตของประชาชนในจังหวัดเชียงใหม่ A study of worshipping words in Lanna cultural and ceremonial activities which effect ways of life of the residents in Chiangrai Province สุทัศน์ กล้ายสุวรรณ	35
ความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงกลยุทธ์กับความสามารถทางการแข่งขันด้านการศึกษาของมหาวิทยาลัยเอกชนกลุ่มเครือข่ายเบญจมิตรวิชาการ RELATIONSHIP OF STRATEGIC FACTORS AND THE EDUCATION COMPETITIVENESS OF PRIVATE UNIVERSITIES IN BENJAMITRA ACADEMIC NETWORK. ฉันทพิชญ์ อาริยะโรจน์กุล, รศ.เสาวภา มีถาวรกุล, รศ.นวลเสนาห์ วงศ์จิตธรรม	55
แนวทางการพัฒนากิจกรรมแห่งการเรียนรู้ของวิชาชีพบัญชี ในประเทศไทย An Approach to Development of Learning Organization for Accounting Profession in Thailand สมชาย เกียรติรัมย์สุข	65
ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาโอ่งมังกร ราชบุรี PERSONAL FACTOR, MARKETING MIX, AND THE PURCHASING BEHAVIOR OF DRAGON JARS POTTERY IN RATCHABURI. นงลักษณ์ สุคันทรินบูลย์, พาสน์ ทวีทรัพย์, ชลธิ์ กลิ่นดูบล	79
ปัจจัยที่มีผลกับพฤติกรรมการเลือกซื้อผ้าฝ้ายย้อมสีของผู้ประกอบการค้าผ้าในกรุงเทพมหานคร Factors Affecting Dye Cotton Buying Behavior of Textile Merchants in Bangkok เจริญ อนุธรรมสมบัติ, พาสน์ ทวีทรัพย์, ชลธิ์ กลิ่นดูบล	88
ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดบริการที่มีผลต่อพฤติกรรมผู้บริโภคของ Louis Morais บริษัท ศรีมทีม (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) SERVICE MAKETING MIX FACTORS AFFECTION BEHAVIOR OF CONSUMERS OF LOUIS MORAIS, DREAMTEAM THAILAND PUBLIC COMPANY LIMITED เอี่ยมกุล สุระสุทธิ, มยุรพันธ์ ไซม่อนคง	98
พฤติกรรมการใช้สารสนเทศของนักศึกษา มหาวิทยาลัยธนบุรี INFORMATION BEHAVIORS OF THONBURI UNIVERSITY STUDENTS กุลยา สุระพงษ์ไทย	106
บทความวิชาการ การบัญชีทรัพยากรมนุษย์ : เครื่องมือที่ใช้วัดประเมินศักยภาพการลงทุนมนุษย์เพื่อประโยชน์ขององค์การ HUMAN RESOURCE ACCOUNTING: A POTENTIAL OF HUMAN CAPITAL EVALUATION MEASUREMENT TOOL FOR ORGANIZATION BENEFIT สุภัทราพร ทวีจันทร์	122

มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ถนนสุขุมวิท 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทร 0-2809-0823-27 โทรสาร 0-2809-0832 www.thonburi-u.ac.th

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC

SEPARATE EXCITE DC MOTOR CONTROLLING BY PIC MICROCONTROLLING

บัญชา ศรีวิโรจน์¹, วันชัย ทรัพย์สิงห์², จีระศักดิ์ วงศา³
Bancha Sreewirote¹, Wanchai Subsingha², Jeerasak Wongsas³
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม^{1,2}
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี³

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ที่มอเตอร์ขนาด 1,000 วัตต์ 220 โวลต์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมด การควบคุมมอเตอร์จะประกอบไปด้วยทฤษฎีควบคุมแบบลูบปิด PI control ประมวลผลด้วยการเขียนโปรแกรมสร้างสมการให้สามารถควบคุมการสั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ไปควบคุมมอเตอร์ และอาศัยการเชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรมที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บผลการทดสอบทั้งในส่วนของแอมเพอร์โวลต์เตจคอนโทรล (V_d) และในส่วนของฟิลต์คอนโทรล (V_f) ด้วยโปรแกรม Hyper Terminal การทดสอบได้ใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC16F877A เป็นตัวกำหนดความเร็วรอบ (set point) ให้กับ PIC18F4431 เป็นตัวประมวลผลการทำงาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบอยู่ตลอดเวลาเป็นช่วง ๆ ไปผลการทดสอบพบว่า ขณะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วที่กำหนดไว้หรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ความเร็วจริงของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงความเร็วควบคุมที่กำหนดไว้ และเวลาเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์จริงที่เข้าใกล้ความเร็วที่กำหนดไว้ลดลงเฉลี่ยเหลือเพียง 0.85 วินาทีเท่านั้น

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก, ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC, แอมเพอร์โวลต์เตจคอนโทรล, ฟิลต์คอนโทรล

Abstract

This article describes the better performance of separately excited dc motor controlling for 1000 watts 220 volt by using 8-bit PIC18F4431 microcontroller controls all the functions. The motor controlling is consisting of the closed loop PI control theory evaluated the result by equation programming able to generate the PWM (Pulse Width Modulation) signal to control motor. The result collection both armature voltage control (V_a) and field control (V_f) has performed by Hyper Terminal programming connected to the computer via the serial port. The evaluation has been using the microcontroller PIC16F877A to be the set point rotating speed for PIC18F4431. There is the speed variation periodically. The evaluation result found the actual rotating speed of motor is approximated to the set point value during the speed changing of motor load and spending average time reduce to 0.85 second only.

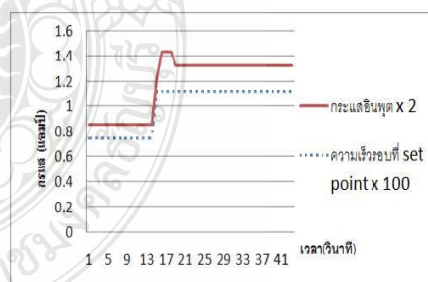
Keywords: separate excite dc motor, PIC microcontroller, amateur voltage control, field control

บทนำ

การควบคุมความมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกส่วนใหญ่มีบทบาทสำคัญที่ใช้ในการควบคุมความเร็วในเครื่องจักรและกระบวนการผลิตอัตโนมัติในระบบอุตสาหกรรมนั้น จะควบคุมในส่วนของแรงดันอาร์เมเจอร์ โดยการเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์หรือลดแรงดันอาร์เมเจอร์ หากเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ความเร็วรอบก็จะสูงขึ้นและหากลดแรงดันความเร็วรอบก็จะต่ำลง ในส่วนของแรงดันฟีลด์นั้นในงานส่วนใหญ่จะกำหนดให้คงที่ แต่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างออกไปคือมีการควบคุมแรงดันฟีลด์คือหากลดแรงดันฟีลด์ความเร็วรอบจะเพิ่มสูงขึ้นและหากเพิ่มแรงดันฟีลด์ความเร็วรอบก็จะลดต่ำลง ซึ่งขณะช่วงมอเตอร์กำลังเริ่มหมุนหรือเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบนั้น จะเกิดการกระชากทำให้กระแสไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้น จึงเกิดการสูญเสียทางกำลังไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 1 อีกทั้งความเร็วรอบในขณะเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลานาน กว่าที่จะเข้าใกล้ความเร็วรอบที่กำหนดไว้จริง หรือตอบสนองช้านั่นเอง

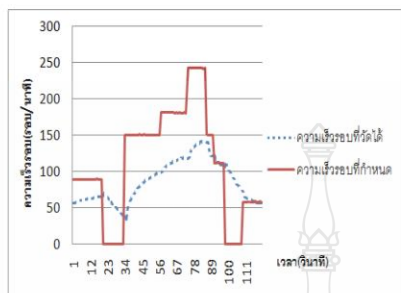
งานวิจัยนี้จึงได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เข้ามาควบคุมในส่วนของวงจรควบคุมทั้งหมด เนื่องจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็กกะทัดรัด และยังมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ สามารถรับค่าความเร็วรอบของ

มอเตอร์ได้ สามารถรับค่าของกระแสโดยการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC) โดยที่ไม่จำเป็นต้องซื้อโมดูลแปลงสัญญาณมาใช้ จึงทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย โดยสามารถสร้างสัญญาณ pulse with modulate (PWM) ที่จะสร้างสัญญาณขับมอเตอร์ให้กับมอเตอร์เพื่อที่จะสับสวิตซ์ในการขับมอเตอร์ อีกทั้งยังสามารถสร้างสมการในการควบคุม PI ให้กับมอเตอร์ได้จึงสามารถควบคุมแบบย้อนกลับได้ (Feedback Control) ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC จึงมีความเหมาะสมสำหรับการควบคุมในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบการควบคุมให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดได้อีกด้วย



ภาพที่ 1 กระแสช่วงที่ เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดไว้ (set point, SV)



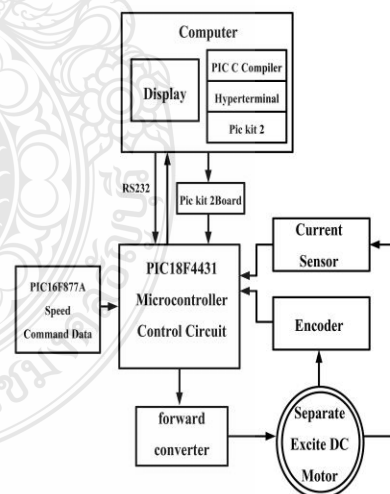


ภาพที่ 2 ความเร็วรอบในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ของมอเตอร์ที่กำหนดไว้ (set point, SV)

การออกแบบ

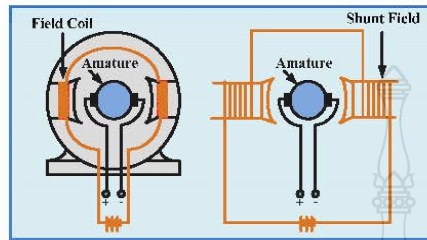
ในส่วนของงานวิจัยนี้ ได้ใช้การควบคุมแบบลูปปิด คือการรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตามค่าความเร็วรอบที่กำหนดไว้ ซึ่งต้องอาศัยตัววัดความเร็วรอบ (Encoder) และเซนเซอร์กระแส (current sensor) เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าในทฤษฎี PI Control และสร้างสัญญาณ PWM เพื่อนำไปขับขาคงของมอเตอร์ที่เป็นตัวสับสวิตซ์ให้กับมอเตอร์การควบคุมนี้จะอาศัยการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ โดยสื่อสารผ่านทางพอร์ตอนุกรม ซึ่งโปรแกรมที่ใช้เชื่อมต่อเพื่อรับค่าคือโปรแกรม Hyper Terminal และคอมไพล์ด้วยโปรแกรม PIC kit 2 ซึ่งใช้คู่กันกับบอร์ด PIC kit 2 ในส่วนของการเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อควบคุมและสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะใช้โปรแกรม PIC C Compiler โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้เบอร์นี้ เนื่องจากสามารถรับค่ากระแสได้โดยตรงที่รับมาจากเซนเซอร์กระแส เนื่องจากมีโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลภายในตัว ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และยังมีฟังก์ชันในส่วนของสร้างสัญญาณ PWM มากเพียงพอต่อการใช้งาน อีกทั้งการรับค่าความเร็วรอบจาก encoder สามารถที่จะต่อเข้าใช้งานได้โดยตรงซึ่งไม่ต้องต่อวงจรใดๆเพิ่มเติม เนื่องจากในตัวของ PIC18F4431 มีโมดูลที่รองรับการอ่านค่าของ encoder อยู่แล้ว จึงทำให้ประหยัดในส่วน

ของการสร้างวงจรแปลงความถี่ที่ได้รับจาก encoder ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Frequency convert to voltage) 0-5 โวลต์ ที่ป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงเป็นการลดขนาดของวงจรให้มีขนาดเล็กกลงได้อีกด้วย โดยมีบล็อกไดอะแกรมระบบการควบคุมดังแสดงในภาพที่ 3 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบลูปปิดจะถูกควบคุมด้วย PIC18F4431 เพียงตัวเดียวเท่านั้นโดยรับคำสั่งเป็นข้อมูลจาก PIC18F877A เป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 รับสัญญาณอินพุตเข้ามา ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการรับค่าและส่งค่าเข้ามาแสดงบนคอมพิวเตอร์ในหน้าต่างของโปรแกรม Hyper Terminal ในส่วนของการควบคุมแบบลูปปิดนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวประมวลผลเปรียบเทียบข้อมูลเอง โดยรับคำสั่งภาษาซีที่ถูกสั่งไว้ และทำการประมวลผลจนลูปอย่างต่อเนื่องจนกว่าค่าที่ควบคุม (set point,SV) จะเท่ากับค่าที่วัดได้ (Process value,PV)



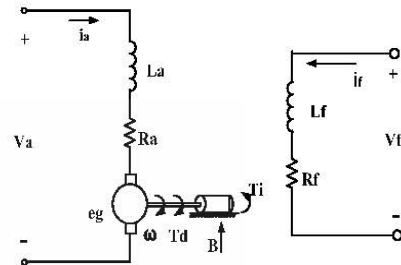
ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมความเร็วแบบลูปปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก



ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (separate excite dc motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วยขดลวดที่สำคัญอยู่ 2 ขด คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดฟิลด์โดยพื้นฐานของดีซีมอเตอร์แบบ Separately Excited จะคล้ายกันกับ Self - excited ลักษณะโครงสร้างหลักจะประกอบด้วยส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุนเคลื่อนที่ (Rotor) หรือหากพิจารณาในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าก็แยกออกเป็น 2 วงจร คือวงจรฟิลด์ (Field Circuit) ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กหลัก และ วงจรอาร์เมเจอร์ (Armature circuit) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กรอบๆ อาร์เมเจอร์ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับวงจรฟิลด์ และวงจรอาร์เมเจอร์ จะแยกเป็นอิสระซึ่งกันและกัน การควบคุมความเร็วจะควบคุมในส่วนของแรงดันอาร์เมเจอร์ โดยการเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์หรือลดแรงดันอาร์เมเจอร์ หากเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ความเร็วรอบก็จะสูงขึ้นและหากลดแรงดันความเร็วรอบก็จะต่ำลง ในส่วนของแรงดันฟิลด์นั้นในงานส่วนใหญ่จะกำหนดให้คงที่ แต่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างออกไปคือมีการควบคุมแรงดันฟิลด์คือหากลดแรงดันฟิลด์ความเร็วรอบจะเพิ่มสูงขึ้นและหากเพิ่มแรงดันฟิลด์ความเร็วรอบก็จะลดต่ำลง



ภาพที่ 5 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

1.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

จากภาพที่ 5 เมื่อพิจารณาการหาค่าพารามิเตอร์ ตามกฎของเคอร์ซอพฟสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [1]

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (1)$$

$$\text{ซึ่ง } e_g = K_v i_f \omega \quad (2)$$

$$\text{จะได้ } V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_v i_f \omega \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ K_v เป็นแรงดันคงที่ (V.s/rad).

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ 2 จะได้

$$I_a(s) = I_a(s)R_a + L_a s I_a(s) + K_v I_f \omega(s) \quad (4)$$

จากสมการที่ 3 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_v I_f \omega(s)}{sL_a + R_a} \quad (5)$$

จากภาพที่ 4 เมื่อพิจารณาทางกลจะได้

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (6)$$

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ 5 และกำหนดให้

$$T_d(s) = K_t I_f I_a(s) \text{ และ } T_L(s) = 0 \text{ จะได้}$$

$$\omega(s) = \frac{K_t I_f I_a(s)}{sJ + B} \quad (7)$$

เมื่อ K_t เป็นค่าคงที่ของแรงบิด (N.m/A)

แทนค่า $I_a(s)$ ในสมการที่ 4 และ 6 ตามลำดับ ทราบเฟอ์ฟังก์ชันระหว่าง armature voltage (V_a) และ ความเร็วมอเตอร์ (V_f) จะได้เป็น



$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K I_f / R_a R_f B}{\left[\frac{L_a J}{R_a B} \right] s^2 + \left[\frac{L_a}{R_a} + \frac{J}{B} \right] s + \left[1 + \frac{(K I_f)^2}{R_a R_f B} \right]} \quad (8)$$

กำหนดให้ $K_v = K_f$ จะได้

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K I_f / R_a R_f B}{\left[\frac{L_a J}{R_a B} \right] s^2 + \left[\frac{L_a}{R_a} + \frac{J}{B} \right] s + \left[1 + \frac{(K I_f)^2}{R_a R_f B} \right]} \quad (9)$$

การหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันด้วยวิธีการ system identify เป็นวิธีการเก็บผลการทดสอบ โดยวิธีการเริ่มการหมุนมอเตอร์เพื่อที่จะเก็บค่าของกระแส แรงต้นและความเร็วรอบ หลายหมื่นค่า แล้วนำค่าที่ได้นั้น มาทำการหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันในโปรแกรม Matlab ซึ่งได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์กระแสตรงได้ดังนี้

$$T_f = \frac{K}{1 + T_m s} \quad (10)$$

รูป Amature

$$K = \frac{2.7036}{1 + 1.0079 s} \quad (11)$$

รูป speed

$$K = \frac{0.020006}{1 + 0.51274 s} \quad (12)$$

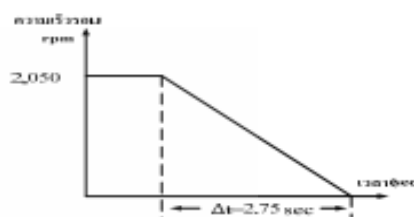
จากสมการข้างต้นเมื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์จะได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	
แรงดันไฟฟ้า	$V_a = 220 \text{ V}$
กระแสอาร์เมเจอร์	$I_a = 5.6 \text{ A}$
ความต้านทานอาร์เมเจอร์	$R_a = 2.2 \ \Omega$
ความต้านทานฟิลด์	$R_f = 400 \ \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์	$L_a = 0.015 \text{ H}$
ค่าความเหนี่ยวนำฟิลด์	$L_f = 7 \text{ H}$
Mechanical time constant	$T_m = 2.75 \text{ sec}$
Moment of inertia	$J = 2.92 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Viscous friction coefficient	$B = 0.777 \cdot 10^{-1} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$

โดยที่ Mechanical time constant (T_m) คือค่าเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการหยุดหมุนซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมีและ

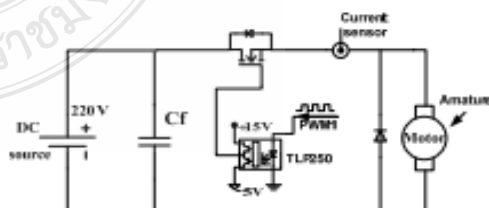
น้ำหนักตัวมอเตอร์ พิจารณาดังภาพที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.75 วินาที



ภาพที่ 6 mechanical time constant

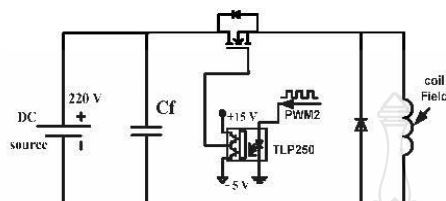
2. วงจรกำลังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยมอสเฟต

วงจรนี้เป็นวงจรที่ทำหน้าที่สวิตช์ซิมมอสเฟตที่มีความถี่ที่เหมาะสมที่ 30 kHz โดยรับสัญญาณ PWM 1 และ PWM 2 มาจาก OPTO เบอร์ TLP250 ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ PWM ที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 ให้มีขนาดแรงต้นที่เหมาะสมสำหรับมอสเฟต ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IRFP460LC สามารถทนแรงต้นได้ที่ 500 โวลต์และรับกระแสได้ถึง 20 แอมป์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวมอสเฟต แรงต้นระหว่างขา drain และ source และแรงต้นที่ใช้ขั้วขาเกตุของมอสเฟต ซึ่งต้องใช้แรงต้นในการขับขาเกตุที่เหมาะสมคือ 15 โวลต์และ -5 โวลต์ อีกทั้ง OPTO TLP250 ยังเป็นวงจรที่ช่วยแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์กับวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อเกิดการลัดวงจรในส่วนภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อภาไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 7 วงจรกำลังภาคขับเคลื่อนแรงต้นอาร์เมเจอร์ (V_a)





ภาพที่ 8 วงจรกำลังภาคขับแรงดันขดลวดฟิลด์ (VF)

3. วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

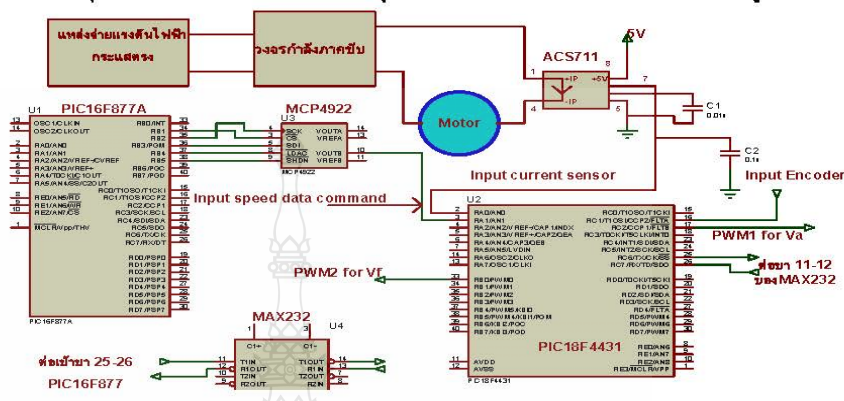
ในส่วนของการเขียนโปรแกรมภาษาซี ใช้โปรแกรม PIC C Compiler ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งมีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM ไว้ให้ 8 ชุด และในงานวิจัยนี้ใช้เพียง 2 ชุดเท่านั้นใช้รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต เพื่อควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์และแรงดันฟิลด์ การคอมไพล์ใช้โปรแกรม Pickit 2 คู่กับบอร์ด Pickit 2 โดยการตั้งไฟล์นามสกุล .hex ซึ่งโปรแกรม CCS PIC 'C' Compiler สามารถรองรับโปรแกรม Pickit 2 จึงทำให้ง่ายต่อการคอมไพล์ ซึ่งมีฟังก์ชันการคอมไพล์เอ็กไฟล์แบบอัตโนมัติให้ใช้ จึงสามารถที่จะใช้งานได้อย่างรวดเร็วมากขึ้นวงจรควบคุมนี้จะรับสัญญาณ pulse ที่มาจาก encoder ซึ่งยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์รับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์และรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดมาจาก PIC16F877A เข้ามาเป็นสัญญาณ ADC และจะเข้าสู่เงื่อนไข คือความเร็วที่พิกัดของมอเตอร์ กำหนดให้เท่ากับ 80 % ของความเร็วที่พิกัดจริงของมอเตอร์นั่นคือ 2,050 rpm

เนื่องจากในการทดสอบจะมีการทดสอบที่สูงกว่าพิกัดของมอเตอร์ จึงต้องกำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่พิกัดเท่ากับ 80% เพื่อเป็นการถนอมอุปกรณ์ซึ่งมีราคาสูง การเขียนโปรแกรมจะสอดคล้องกับการทดลอง นั่นคือมีการกำหนดให้

1. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์
2. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์
3. มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบสูงเกินกว่าพิกัดของมอเตอร์

โดยข้อมูลการสั่งงานให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่ความเร็วต่างกันนั้น จะรับข้อมูลมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์อีกตัวหนึ่งนั่นคือ PIC16F877A ส่งค่าเป็นสัญญาณดิจิตอลและเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกแล้วจึงนำสัญญาณอนาล็อกนี้ต่อเข้ากับขาสัญญาณ ADC ของ PIC18F4431 นอกจากนี้แล้วการควบคุมความเร็วรอบนั้น จะอาศัยทฤษฎี PI control และยังมี การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์อีกด้วยในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์นั้น อาศัยการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 โดยต่อผ่าน MAX232 ที่เป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อ ซึ่งวงจรควบคุมนี้จะรับสัญญาณ pulse ที่มาจาก encoder ซึ่งยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์รับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์และรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดมาจาก PIC16F877A เข้ามาเป็นสัญญาณ ADC และจะเข้าสู่เงื่อนไข

วงจรรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบกระตุ้นแยกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC



ภาพที่ 9 วงจรรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบกระตุ้นแยกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ในส่วนของการรับค่าต่างๆ ได้แก่

1. สัญญาณความเร็ว ได้เลือกใช้ encoder ที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม 600 สัญญาณต่อรอบ ของบริษัท Shimpo รุ่น RE1-600-C มาใช้ โดยต่อสายสัญญาณเข้ากับขา CCP2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4431 โดยการเขียนภาษาซีรับค่าความเร็วรอบ
2. ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ใช้เซนเซอร์กระแสเบอร์ ACS711ELCTR-25AB ที่สามารถยอมให้กระแสไหลผ่านได้สูงถึง 25 แอมป์ โดยสัญญาณนี้จะต่อเข้ากับ AN0 ของ PIC18F4431
3. สัญญาณข้อมูลความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC16F877A เป็นตัวกำหนดความเร็วรอบให้ PIC 18F4431 นั้นจะเป็นสัญญาณดิจิตอลจึงทำการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกโดยใช้ไอซีแปลงสัญญาณเบอร์ MCP4922 เมื่อได้สัญญาณแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับขา AN1 ของ PIC18F4431 ทั้ง 3 สัญญาณที่ต่อเข้า PIC18F4431 จะเป็นข้อมูลที่จะนำไปคำนวณค่าในทฤษฎี PI Control ต่อไป

4. การออกแบบในส่วนของ Software

จะมีซอฟต์แวร์ที่เป็นการขับมอเตอร์แบบ open loop control และซอฟต์แวร์แบบ close loop control เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

1. open loop control ในการออกแบบซอฟต์แวร์นี้ เมื่อรับค่าความเร็วรอบที่ PIC16F877A กำหนดมา หลังจากนั้น PIC18F4431 ก็สร้างสัญญาณ PWM ให้สอดคล้องกับค่าความเร็วรอบ โดยการปรับ duty cycle นอกจากจะสร้างสัญญาณ PWM แล้ว PIC18F4431 จะต้องส่งข้อมูลความเร็วรอบที่วัดได้ (Process value, Pv) และค่ากระแสที่วัดได้ (Current Value, Iv) ไปยังคอมพิวเตอร์อีกด้วย
2. close loop control ซอฟต์แวร์นี้ จะเงื่อนไขทฤษฎี PI Control เพื่อให้ให้ค่าความเร็วรอบที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (set point, Sv) ในส่วนของการคำนวณให้เป็นไปตามค่าของกระแสที่ตั้งไว้ (Current set point ,Is) ซึ่งต้องกำหนดเงื่อนไขที่ถูกต้อง เพื่อที่จะสร้างสัญญาณ PWM ที่เหมาะสม (Manipulate value, Mv) ซึ่งมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้



จากสมการ PI-Control [2]

$$M_v(t) = M_{v_0} \pm K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (13)$$

กำหนดให้

เงื่อนไขที่ 1 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะเพิ่มค่ากระแสให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = I_r - I_v \quad (14)$$

$$M_v(t) = M_{v_0} + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (15)$$

เมื่อค่า $M_v \geq 254$ ให้ M_v เท่ากับ 254

ถ้าเงื่อนไขที่ 1 เป็นจริงแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC16F877A (Sv) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4

เงื่อนไขที่ 2 ถ้าค่ากระแสที่วัดได้จริงมากกว่าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะลดค่ากระแสลงโดยการลดค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = I_r - I_v \quad (16)$$

$$M_v(t) = M_{v_0} - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (17)$$

เมื่อค่า $M_v \leq 1$ ให้ M_v มีเท่ากับ 1

ถ้าเงื่อนไขที่ 2 เป็นจริงแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC16F877A (Sv) อีกครั้งในเงื่อนไขที่ 3 และ 4 หากเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ไม่เป็นจริงก็โปรแกรมก็จะเข้ามาตรวจสอบเงื่อนไขที่ 3 และ 4 เลย

เงื่อนไขที่ 3 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC16F877A โปรแกรมจะเพิ่มค่าความเร็วรอบให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = S_r - S_v \quad (18)$$

$$M_v(t) = M_{v_0} + gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (19)$$

เมื่อค่า $M_v \geq 254$ ให้ M_v เท่ากับ 254

เงื่อนไขที่ 4 หากค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริงมากกว่าค่าความเร็วรอบที่รับมาจาก PIC16F877A โปรแกรมจะลดค่าความเร็วรอบให้ต่ำลงโดยการลดค่า M_v คำนวณตามสมการ

$$err_1 = P_r - P_v \quad (20)$$

$$M_v(t) = M_{v_0} - gain[(err_1 - err_2) + err_1 / T_i] \quad (21)$$

เมื่อค่า $M_v \leq 1$ ให้ M_v มีเท่ากับ 1

เงื่อนไขที่ 5 หาก $I_r = I_v$ แล้วตรวจสอบ $P_r = S_r$ แล้วจะได้

$$M_v = I_r = I_v = P_r = S_r \quad (22)$$

5. การเขียนโปรแกรมภาษาซี

ในส่วนของการเขียนโปรแกรม PIC C Compiler นั้น จะต้องมีการเขียนรับค่าสัญญาณต่างๆ ได้แก่ การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรม RS232, การเขียนโปรแกรมรับค่าความเร็วรอบจาก encoder, การเขียนโปรแกรมรับค่าคำสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์จาก PIC16F877A ,การเขียนโปรแกรมสร้างความเร็วรอบหลายๆค่าในตัว PIC16F877A ,การเขียนโปรแกรมรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์ และการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดจะมีความยาวมาก จึงได้ยกตัวอย่างโปรแกรมมาบางส่วนมีดังนี้

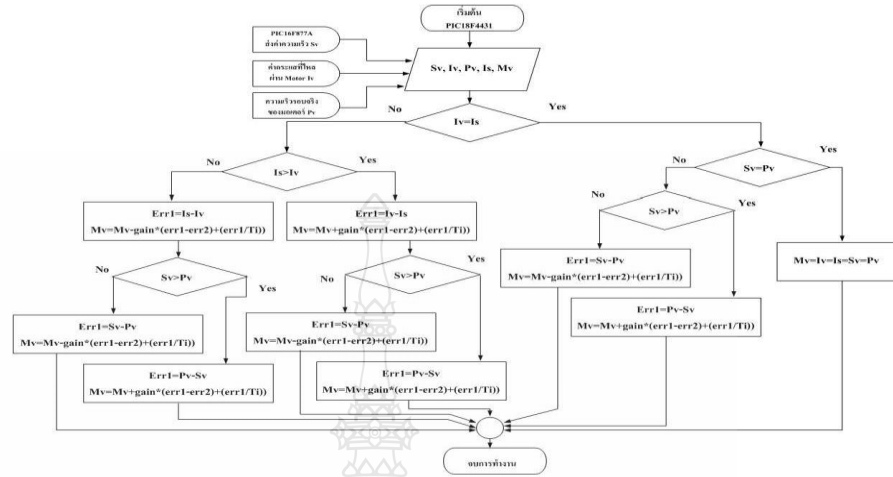
1. ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรม RS232

```
#include <18f4431.h>
#device adc=8
#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT
#use delay(clock=8000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6,
rcv=PIN_C7)
```

2. ตัวอย่างโปรแกรมรับค่าความเร็วรอบจาก encoder

```
pos1 = (float)pos;
delay_ms(5);
pos2 = (float)pos;
speed = (pos2-pos1);
speed = (speed*2*3.14)/600;
speed2=speed;
dt = get_timer1();
dt = dt*8*0.0000005;
printf("%0.3f\t%f\t%f\t%f\n",speed,dt,v,vf);
```





ภาพที่ 10 ผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

3. ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมรับค่าคำสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์จาก PIC16F877A ที่เป็นสัญญาณอนาล็อก

```
set_adc_channel(1);
delay_us(10);
value = read_adc();
```

4. ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมสร้างความเร็วรอบหลายๆค่าใน PIC16F877A ที่จ่ายสัญญาณนี้ให้กับ PIC18F4431

```
#define MCP4922_CS PIN_B1
#define MCP4922_CLK PIN_B2
#define MCP4922_DIN PIN_B3
#define MCP4922_LDAC PIN_B4
#define MCP4922_SHDN PIN_B5
```

5. ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมอเตอร์

```
set_adc_channel(0);
```

```
delay_us(10);
value = read_adc();
value2=read_adc();
trvalue2=(value2*(5.0/255));
if= abs((trvalue2)/0.186);
```

6. ตัวอย่างการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งโปรแกรมมีดังนี้

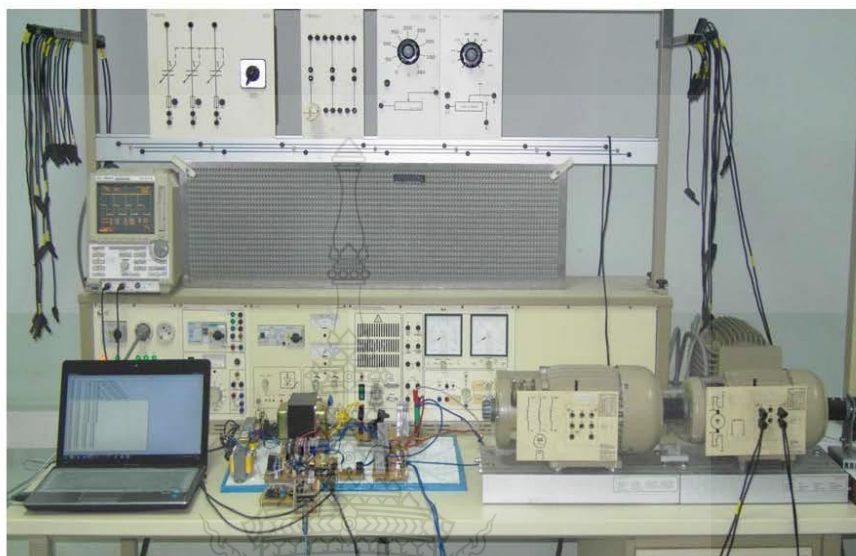
```
SETUP_CCP2(CCP_CAPTURE_RE);
enable_interrupts(INT_CCP1);
setup_ccp1(CCP_PWM);
```

ในส่วนของสัญญาณสร้าง PWM ของ Va และ Vf คือ

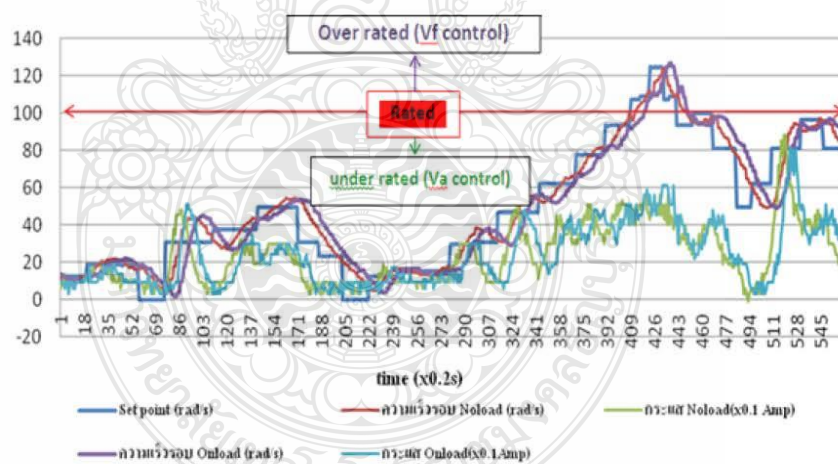
$$PWM = PWM + (Kp0 * error) + (Ki0 * (error+error2) * dt);$$

$$FPWM = FPWM + (Kp1 * error) + (Ki1 * (error+error2) * dt);$$





ภาพที่ 11 ชุดสาธิตการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC



ภาพที่ 12 ผลการทดลองกระแสและความเร็วรอบขณะ No load และ On load เทียบกับความเร็วรอบที่ตั้งไว้ (set point)

ผลการวิจัย

จากการทดสอบเพื่อการควบคุมที่มีประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยกแบบลูบปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น มีผลการดำเนินงานดังนี้

1. ผลการทดสอบชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 สามารถควบคุมความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตามทฤษฎี PI control ที่ขนาดของมอเตอร์ 1000 วัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ และขนาดกระแส 5.6 แอมป์ ที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 0-2055 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ โดยค่าของความเร็วกระแส จะแสดงบนหน้าตาของโปรแกรม Hyperterminal ซึ่งสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมขณะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วที่กำหนดไว้หรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ความเร็วจริงของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงความเร็วควบคุมที่กำหนดไว้ และเวลาเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์จริงที่เข้าใกล้ความเร็วที่กำหนดไว้ลดลงเฉลี่ยเหลือเพียง 0.85 วินาทีเท่านั้นเมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟจะได้ดังภาพที่ 12

2. ผลการทดสอบการทำงานของวงจรถูกกำลังสามารถขับมอเตอร์ได้ถึงพิกัดที่กำหนด ในช่วงที่ความเร็วรอบเกินพิกัด สามารถลดค่าแรงดันฟิลต์ (VF) ลงได้ แต่จะเกิดความผิดเพี้ยนของกระแสเนื่องจากสัญญาณรบกวนทำให้ส่งผลต่อการรับค่าของชุดควบคุม ค่าที่ส่งจึงมีความผิดเพี้ยนบ้างแต่ไม่ถึง 10 ใน 10,000 ค่า หรือคิดเป็น 0.1%

สรุป

จากการทดลองของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกขนาด 1000 วัตต์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F4431 สามารถที่จะปรับความเร็วรอบที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับคำสั่งความเร็วรอบของ PIC16F877A ได้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 2 % เมื่อไม่คิดค่า Mechanical time constants (T_m) เนื่องจากช่วงนี้ไม่สามารถควบคุมได้ สาเหตุเพราะถึงแม้ว่าจะจ่าย

สัญญาณ Mv ให้ต่ำลงมากที่สุดคือ 0 มอเตอร์ก็จะไม่หยุดทันที

การทดสอบเมื่อเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ วงจรควบคุมสามารถที่จะรักษาความเร็วรอบให้เข้าใกล้ความเร็วที่กำหนดไม่ว่าความเร็วที่ PIC16F877A จะกำหนดมาเท่าไรก็ตาม หรือไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ค่าความเร็วรอบก็ยังคงรักษาระดับความเร็วรอบให้เข้าใกล้ค่าความเร็วรอบที่กำหนดอยู่เสมอ

ข้อเสนอแนะ

1. การเก็บผลการทดลองจะเกิดปัญหาในส่วนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากความถี่สูงในการสวิตช์ของมอสเฟสโดยเฉพาะเมื่อขับมอเตอร์ด้วยความเร็วรอบสูงๆ ทำให้คาร์บอนและกระแสที่วัดได้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง แนวทางการแก้ไขคือต้องสร้างวงจรถองความถี่ให้สัญญาณที่เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เรียบขึ้น

2. การเขียนโปรแกรมควบคุมในส่วนการรับสัญญาณกระแส จะมีกระแสในส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากเป็นกระแสย้อนกลับ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าเป็นค่าติดลบ วิธีการแก้ไขคือในส่วนของตัวโปรแกรมจะมีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ให้ใช้งานให้กลับค่าของกระแสจากลบให้เป็นบวกและกำหนดได้ว่าถ้ากระแสที่มีค่าเกินกว่าค่าความเป็นจริงให้โปรแกรมไม่นำมาคิด

3. การทดสอบรับสัญญาณกระแสหากศึกษาจาก data sheet แล้วกระแสที่ 0 แอมป์ สัญญาณจะออกมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 2.5 โวลต์ แต่เมื่อทดสอบจริงจะได้กระแสเพียง 2.482 โวลต์ ดังนั้นควรกำหนดการเขียนโปรแกรมรับค่ากระแสที่ 0 โวลต์เป็น 2.482 โวลต์ไม่ควรกำหนดตาม data sheet



เอกสารอ้างอิง

- [1] Sasiya Udomsuk; et al. (2011). Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search. **European Journal of Scientific Research**. 60(4): 488- 497.
- [2] จิรายุทธ แก้วอาสา. (2549). ชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบลูปปิดบนจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม visual basic. วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายบัญชา ศรีวิโรจน์
วัน เดือน ปีเกิด	7 กรกฎาคม 2521
ที่อยู่	1/167 ตำบลนาป่า อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ. 2545
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน

