สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบป้องกันอินดัคชั่นมอเตอร์แบบหลายฟังก์ชั่นควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

MULTIFUNCTION PROTECTION SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR USING A COMPUTER

TT060519

วรโชติ ลาภพูนผล
WORACHOAT LAPPHOONPHOL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....60519
วัน,เดือน,ปี.....- 3 ก.ค. 2549

b 11546426
ป.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1658-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MULTIFUNCTION PROTECTION SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR USING A COMPUTER

WORACHOAT LAPPHOONPHOOL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2005

ISBN 974-15-1658-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบป้องกันอินดัคชั่นมอเตอร์แบบหลายฟังก์ชั่น ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นาย วรโชติ ลาภพูนผล
รหัสประจำตัว	43061123
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ประภาษ ไพรสุวรรณา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟส ไม่ให้เกิดความเสียหายอันเนื่องจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากการใช้งานเกินพิกัดกำลังปกติของมอเตอร์ โดยการควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และซอฟท์แวร์ควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ ส่วนของซอฟท์แวร์ควบคุมนั้นประกอบด้วยโปรแกรมหลัก ที่ทำหน้าที่ ติดต่อกับผู้ใช้งาน และเป็นการเรียกใช้งานโปรแกรมย่อย ซึ่งทำหน้าที่ เป็นฟังก์ชั่นควบคุมการป้องกันมอเตอร์ โดยออกแบบให้มีการป้องกันแต่ละส่วนแยกเป็นโมดูลอิสระ ผู้ใช้งานสามารถที่กำหนดและปรับค่าการทำงานของฟังก์ชั่นการป้องกันได้ตามต้องการ ระบบป้องกันมอเตอร์นี้มีการทำงานโดยรวม คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับข้อมูลที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจวัด และทำการแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลขนาด 8 บิต แล้วทำการประมวลผลตามฟังก์ชั่นที่ได้กำหนดไว้ โดยข้อมูลที่ได้จะส่งให้คอมพิวเตอร์แสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์ สุดท้าย ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Multifunction Protection System for Induction Motor Using a Computer
Student	WORACHOTE LAPPHOONPHOOL
Student ID	43061123
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prapas Prisuwanna Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis is proposes a method of a digital - controlled motor protection system to prevent damages of a three - phase induction motor caused by both several utility power supply quality abnormal condition the motor rated - power overloading, conditions. This digital protection system control software consists of a main program part and subroutine program parts. The former is used to control system hardwares and user interfaces, while the latter is used for protection function whose it algorithms are programmed in the form of subroutine modules or several functions individually. Furthers more, the user can define the protection function as required easily by a support of the main program. The overall system operation resumes are that, firstly, the microcontroller has received analog input signals from measurement nits. Secondly the analog signals are converted to an eight bits digital data. Then these data is processed accordingly to the defined protection function tasks in the main program. Finally, the microcontroller transfers the protection results or the tripping signals to the motor protective gear to disconnect the motor from the utility power supply simultaneously with an alarm signal for status of the protection function monitoring.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก รศ. ประภาษ ไพรสุวรรณา อาจารย์ปรึกษาวิทยานิพนธ์, รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) และผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเสิศ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด ซึ่งผู้เขียนเองมีความรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่าน ตลอดเวลาท่านเป็นผู้ให้โอกาสและชี้นำทางในการศึกษา จนทำให้ผู้เขียนมีวันนี้ได้

ขอขอบคุณ ผศใดร. อานันทวัฒน์ คุณากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมใช้เครื่องมือวัด DC Motor ที่ใช้ในการทดลอง

ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างซาบซึ้งและความนับถือแด่ รศ.ประภาษ ไพรสุวรรณา, รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ และผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเสิศ

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนภายในห้องวิจัย 406 และ 405 ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ อาจารย์ ภูมิ และอาจารย์ เสริม ที่อยู่ในห้องวิจัย 406 ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ ดีเสมอมา และเป็นอาจารย์ต่างประเทศที่ใจดีมาก

ขอขอบคุณ จารุภัณฑ์ กุลเสถียร ที่ให้ความส่วนช่วยเหลือและหวังดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ ป้า น้า อา และน้องๆ ที่ค่อยให้การทำงานโดยดีเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงจะมีมาไดจาวิทยานิพน์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ คุณพ่อ คณุแม่ พี่ ป้า น้า อา น้องๆ คุณครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรโชติ ลาภพูนผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาระบบป้องกัน..... 1

1.2 ความสำคัญระบบป้องกันมอเตอร์..... 1

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.4 สมมุติฐานของการวิจัยและการพัฒนา..... 2

1.5 ทฤษฎี หรือ แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... 3

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3

1.7 วิธีการวิจัย..... 3

1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์..... 4

1.9 ประโยชน์ได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... 5

2.1 บทนำ..... 5

2.1.1 โครงสร้าง และส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 5

2.1.2 หลักการทำงาน..... 5

2.1.3 กำลังงานส่งผ่านมอเตอร์..... 13

2.1.4 การหาวงจรสมมูลของมอเตอร์..... 14

2.1.4.1 การทดสอบแบบไร้โหลด (No load test) 15

2.1.4.2 การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (Block rotor test)..... 17

2.1.4.3 การทดสอบแบบ DC test (VI- method)..... 19

2.1.5 พิกัดกำลัง..... 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีทั่วไปและหลักการของระบบป้องกันมอเตอร์..... 21

3.1 บทนำ..... 21

3.2 หลักการของระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 21

3.2.1 สาเหตุของความผิดปกติที่เกิดกับมอเตอร์..... 21

3.2.1.1 ความผิดปกติเกี่ยวกับโหลด..... 21

3.2.1.2 ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า..... 22

3.2.1.3 ความผิดปกติภายในมอเตอร์..... 22

3.2.2 ผลกระทบที่เกิดกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติ..... 22

3.2.2.1 สภาวะแรงดันเกิน..... 22

3.2.2.2 สภาวะแรงดันต่ำ..... 25

3.2.2.3 การป้องกันเฟสไม่สมดุล..... 26

3.2.2.4 สภาวะการไม่หมุนหรือหมุนกลับทิศทาง..... 29

3.2.2.5 การป้องกันความถี่สูง-ต่ำกว่าปกติ..... 30

3.2.2.6 สภาวะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์..... 31

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์ตัวตรวจวัด..... 40

3.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า..... 40

3.3.1.1 การทดสอบหม้อแปลง..... 42

3.3.2 ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแส..... 46

3.3.2.1 หลักการทำงานของฮอลล์..... 46

3.3.2.2 ชนิดของฮอลล์..... 47

3.3.3 ตัวตรวจวัดการสะท้อนแสง..... 51

3.3.4 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ..... 57

บทที่ 4 ทฤษฎีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการใช้ Visual Basic6..... 59

4.1 บทนำ..... 59

4.1.1 สถาปัตยกรรมและชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51..... 59

4.1.1.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์..... 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.1.2 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51 แบบแฟลช..... 59

4.1.1.3 คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51..... 59

4.1.1.4 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51..... 61

4.1.1.5 รีจิสเตอร์แคปเจอร์..... 62

4.1.1.6 ความสามารถที่เพิ่มเติมในพอร์ตอนุกรมของ P89C51RD+ และ P89C51RD2..... 63

4.1.1.7 โหมดการทำงานของพอร์ตอนุกรมในMCS-51..... 63

4.1.1.8 อัตราบอดของพอร์ตอนุกรมในไมโครคอน โทรลเลอร์ MCS-51..... 64

4.1.1.9 การเขียนโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัพต์..... 65

4.1.1.10 สแต็กในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช..... 66

4.1.1.11 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232..... 67

4.1.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C 69

4.1.3 การใช้งานไอซี ADC/DAC บนระบบบัส I^2C เบอร์ PCF8591..... 72

4.1.4 การใช้ Visual Basic 6..... 74

4.1.5 การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อฮาร์ดแวร์โดยใช้ Visual Basic 6..... 75

4.1.6 องค์ประกอบในการใช้ MsComm..... 77

บทที่ 5 หลักการออกแบบ..... 78

5.1 บทนำ..... 78

5.2 ลักษณะโครงของระบบป้องกันมอเตอร์..... 79

5.3 ส่วนของฮาร์ดแวร์..... 80

5.3.1 ส่วนการควบคุมการตัดต่อวงจรของมอเตอร์..... 80

5.3.2 ส่วนของการวัดสัญญาณและผลการทดสอบวงจรต่างๆ จากตัวมอเตอร์. 81

5.3.2.1 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์และเซ็นเซอร์..... 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3.2.2 รายละเอียดการทำงานของวงจรแต่ละส่วน..... 82

5.3.2.3 วงจรตรวจวัดสัญญาณ..... 82

5.3.3 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์และเซ็นเซอร์ต่าง ๆ..... 82

5.3.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า..... 82

5.3.3.2 การทดสอบตัวตรวจวัดกระแส..... 86

5.3.3.3 การทดสอบตัวสะท้อนแสง..... 88

5.3.3.4 การทดสอบตัววัดอุณหภูมิ..... 90

5.3.4 รายละเอียดการทำงานของวงจรแต่ละส่วน..... 92

5.3.4.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ..... 92

5.3.4.2 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง..... 93

5.3.4.3 วงจรจำกัดแรงดันเกิน..... 96

5.3.4.4 วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์..... 97

5.3.4.5 วงจรแก้ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น..... 98

5.3.4.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์..... 101

5.3.4.7 วงจรกรองสัญญาณ..... 102

5.3.5 วงจรตรวจวัดสัญญาณต่างๆ..... 103

5.3.5.1 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน..... 103

5.3.5.2 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส..... 109

5.3.5.3 วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ..... 117

5.3.5.4 วงจรตรวจวัดความถี่..... 120

5.3.5.5 วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ..... 123

5.3.5.6 วงจรตรวจวัดความต่างเฟส..... 128

5.3.5.7 วงจรโซลิดสเตตรีเลย์..... 131

5.3.6 โครงสร้างของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์..... 135

5.3.6.1 ส่วนควบคุมและประมวลผล..... 135

5.3.6.2 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์..... 135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 ส่วนของโปรแกรม..... 136

5.4.1 โครงสร้างหลัก..... 136

5.4.2 โครงสร้างของฟังก์ชั่นระบบป้องกันมอเตอร์..... 144

5.4.2.1 โครงสร้างของฟังก์ชั่นการป้องกันแรงดันสูง-ต่ำ..... 144

5.4.2.2 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง..... 146

5.4.2.3 โครงสร้างของฟังก์ชั่นการป้องกันการติดขัดของโหลดทางกล..... 147

5.4.2.4 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการหายไปของโหลดทางกล..... 149

5.4.2.5 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันความถี่ต่ำ-สูงเกิน..... 150

5.4.2.6 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องการสลับเฟส..... 150

5.4.2.7 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกิน..... 151

5.4.2.8 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการล็อคโรเตอร์ 154

5.4.2.9 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันความเร็วรอบเกิน/ต่ำเกิน..... 155

5.4.2.10 โครงสร้างการวัดพลังงานไฟฟ้า..... 155

บทที่ 6 ผลการทดลอง..... 158

บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์..... 236

บรรณานุกรม..... 237

ภาคผนวก..... 240

ประวัติผู้เขียน..... 234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดัคชั่น (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม	6
2.2	บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	13
2.3	วงจรทดสอบแบบไร้โหลด	15
2.4	วงจรทดสอบแบบยึดโรเตอร์	17
2.5	วงจรการทดสอบแบบ VI-Method	19
2.6	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	20
3.1	วงจรสายป้อนที่มีความเหนี่ยวนำแฝงอยู่	23
3.2	แรงดันไฟฟ้าเกินจากสวิตซ์ชิ่ง	24
3.3	แรงดันไฟฟ้าเกินจากฟ้าผ่า	25
3.4	เวกเตอร์ที่มีองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, ลบ และศูนย์	27
3.5	การเกิดขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง	28
3.6	องค์ประกอบสมมาตรที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ประเภท	28
3.7	Motor Unbalance derating Curve, NEMA	29
3.8	สภาวะการเรียงลำดับเฟส	30
3.9	การกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้า	31
3.10	ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด	33
3.11	การลดพิกัดมอเตอร์ลงตามระดับความสูง	35
3.12	ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ตัววัดอุณหภูมิของมอเตอร์	36
3.13	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	39
3.14	อุณหภูมิมอเตอร์เมื่อใช้งานแบบช่วงจังหวะ	40
3.15	ลักษณะหม้อแปลงแบบสองขดลวด	40
3.16	วงจรการทดสอบแบบเปิดวงจร	42
3.17	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณค่าจากการทดสอบแบบเปิดวงจร	42
3.18	วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร	43
3.19	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณค่าจากการทดสอบแบบลัดวงจร	44
3.20	วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบ	44
3.21	บล็อกไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางด้านปฐมภูมิ	46
3.22	สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนประจุพาหะของตัวนำ	47
3.23	บล็อกไดอะแกรมและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอล์ซนิดสวิตซ์	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.24	ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแสและวงจรสมมูลของ LEM.....	48
3.25	บล็อกไดอะแกรมของ Hall Effect.....	50
3.26	การพันสายไฟคล้องตัวตรวจวัดสัญญาณกระแส 1 รอบและ 4 รอบ.....	50
3.27	กลไกของออฟโตอินคริเม้นท์.....	52
3.28	ตัวเซ็นเซอร์แบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและมีหลายช่อง.....	52
3.29	ผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย.....	53
3.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นลิเนียร์กับความไม่ได้ศูนย์กลาง.....	53
3.31	การต่อวงจรตัววัดความเร็วรอบแบบสะท้อนแสง.....	56
3.32	เทอร์มิสเตอร์แบบต่าง ๆ.....	57
3.33	สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์.....	57
4.1	โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชอนุกรม 89C51RD2.....	60
4.2	การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51.....	61
4.3	กระบวนการเก็บและเรียกข้อมูลภายในสแต็กของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51.....	66
4.4	การจัดขาคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25.....	67
4.5	การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ.....	68
4.6	ผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ บนบัส I^2C	69
4.7	การต่อตัวต้านทานพูลอัปบนสายสัญญาณในระบบบัส I^2C	70
4.8	การต่อตัวต้านทาน R_S เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I^2C	70
4.9	สถานะต่างๆ ในบัส I^2C	72
4.10	การจัดขาของไอซี ADC/DAC ขนาด 8 บิต ผ่านบัส I^2C เบอร์ PCF8591.....	74
4.11	การเลือก Components.....	75
4.12	การเลือก Microsoft Comm Control 6.0.....	76
4.13	การเลือก MSComm ใน Toolbox มาไว้ใน From.....	76
5.1	แผนภูมิระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	78
5.2	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการป้องกันมอเตอร์.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.3	สัญญาณที่เกิดการสั่นหน้าสัมผัสของแมคเนติกคอนแทคเตอร์เปลี่ยนจาก On เป็น OFF	80
5.4	สัญญาณที่เกิดการสั่นหน้าสัมผัสของแมคเนติกคอนแทคเตอร์เปลี่ยนจาก OFF เป็น On	80
5.5	สัญญาณที่จากการ On เป็น OFF ของโซลิดสเตต	81
5.6	สัญญาณที่จากการ OFF เป็น On ของโซลิดสเตต	81
5.7	วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร	83
5.8	วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร	83
5.9	วงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยประมาณ	84
5.10	วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	84
5.11	สัญญาณหม้อแปลงขนาด 250/6V 0.5A ความถี่ 50Hz	85
5.12	กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับเอาต์พุตของหม้อแปลง	86
5.13	วงจรทดสอบตรวจจับกระแส LEM Model LA-55P	86
5.14	สัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแสที่ความถี่ 50Hz	87
5.15	การเปรียบเทียบกระแสอินพุตกับกระแสเอาต์พุต	88
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสอินพุต	88
5.17	วงจรวัดความเร็วรอบ	88
5.18	สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร็วรอบ	89
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tachometer กับวงจรวัดความเร็วรอบ	89
5.20	การทดลองหาค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์	90
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์กับอุณหภูมิ	91
5.22	การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน	92
5.23	วงจรกรองความถี่ต่ำ	92
5.24	วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงและบล็อกไดอะแกรม	93
5.25	วงจรการคำนวณแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง	94
5.26	วงจรขยายชนิดผลรวม	95
5.27	บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง	96
5.28	กราฟคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด	96
5.29	วงจรจำกัดแรงดันเกิน	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.30	วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์	97
5.31	วงจรขยายผลต่าง	98
5.32	วิธีการคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรขยายผลต่าง	99
5.33	วงจรไม่กลับขั้ว	100
5.34	วงจรวีทสโตนบริดจ์	101
5.35	วงจรกรองสัญญาณ	102
5.36	บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน	103
5.37	วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน	104
5.38	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดแรงดัน	105
5.39	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและวัดจริงของวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน	105
5.40	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OA}	106
5.41	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OB}	107
5.42	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OC}	107
5.43	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OD}	108
5.44	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_O	109
5.45	บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส	109
5.46	วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส	110
5.47	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดกระแส	111
5.48	สัญญาณที่วัดได้จากการจำลองและวัดจริงของวงจรตรวจวัดกระแส	112
5.49	สัญญาณที่วัดได้จากขา 1 ของ U1A ของวงจรตรวจวัดกระแส	113
5.50	สัญญาณที่วัดได้จากขา 3 ของ U2A ของวงจรตรวจวัดกระแส	114
5.51	สัญญาณอินพุตที่วัดจากขา 2,3 ของ U2A และเอาต์พุตที่วัดจาก ขา 1 ของU4A	115
5.52	สัญญาณที่วัดจากวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงของวงจรตรวจวัดกระแส	116
5.53	สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U7A ที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแส	116
5.54	สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U8A ที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแส	117
5.55	บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดความเร็วรอบ	117
5.56	วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ	118
5.57	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรวัดความเร็วรอบ	118
5.58	สัญญาณเอาต์พุต V_{OSA} ของวงจรวัดความเร็วรอบทั้งแบบจำลองและวัดจริง	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.59	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรวัดความเร็วรอบ	120
5.60	บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจความถี่	120
5.61	วงจรวัดความถี่ไฟฟ้า	121
5.62	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่างๆ ของวงจรวัดความถี่	121
5.63	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและทดลองจริง	122
5.64	สัญญาณที่ได้จากการจำลองและทดลองจริงของวงจรวัดความถี่	123
5.65	บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	123
5.66	วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	124
5.67	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	124
5.68	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันทางด้านเอาต์พุต	125
5.69	สัญญาณจำลองที่วัดได้จากจุด NTC	126
5.70	สัญญาณจำลองที่วัดได้จากจุดสมดุลของบริดจ์	126
5.71	สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	127
5.72	สัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	127
5.73	บล็อกไดอะแกรมวงจรตรวจวัดความต่างเฟส	128
5.74	วงจรตรวจวัดความต่างเฟส	128
5.75	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดความต่างเฟส	129
5.76	สัญญาณอินพุตที่ขาคอลเล็กเตอร์ของ Q1 และ Q2	130
5.77	สัญญาณที่วัดได้จากวงจรตรวจวัดความต่างเฟส	131
5.78	บล็อกไดอะแกรมของวงจรโซลิคสเตตรีเลย์	131
5.79	วงจรโซลิดสเตตรีเลย์	132
5.80	สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรโซลิดสเตตรีเลย์	133
5.81	สัญญาณที่ส่งออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์	133
5.82	สัญญาณที่วัดได้จากวงจรโซลิดสเตต	135
5.83	ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด	136
5.84	ลำดับการทำงานของโปรแกรม Visual Basic6	138
5.85	ลำดับการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์	139
5.86	ตัวอย่างการส่งค่า "R" ไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์	140
5.87	ตัวอย่างการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.88	ตัวอย่างการรับค่า "R" จากพอร์ตอนุกรม	141
5.89	ตัวอย่างการส่งข้อมูลออกจากพอร์ตอนุกรม	141
5.90	ตัวอย่างการส่งคำสั่งเมื่อระบบเกิดการ Trip	141
5.91	หน้าต่างเลือกการติดต่อพอร์ตสื่อสาร	142
5.92	หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม	142
5.93	หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม	143
5.94	หน้าต่างแสดงผลของการบันทึกข้อมูลของในเท็กซ์ไฟล์	143
5.95	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันหลายฟังก์ชั่น	144
5.96	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันแรงดันสูงและต่ำเกิน	145
5.97	โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันแรงดันเฟส A, เฟส B และเฟส C	146
5.98	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง	147
5.99	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันโหลดติดขัด	148
5.100	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการหายไปของโหลด	149
5.101	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันความถี่ต่ำและสูงเกิน	150
5.102	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันสลับเฟส	151
5.103	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันอุณหภูมิเกิน	153
5.104	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันการล็อคโรเตอร์	154
5.105	โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันความเร็วรอบเกิน/ต่ำเกิน	155
5.106	โครงสร้างการวัดพลังงานไฟฟ้า	157
6.1	วงจรสมมูลของมอเตอร์ 1HP	160
6.2	บอร์ด MCS-51 ที่ใช้ในการทดลอง	161
6.3	การเชื่อมต่อระหว่าง MCS-51 กับ PCF8591	162
6.4	การติดตั้ง Thermocouple กับ Thermistor เข้ากับมอเตอร์	163
6.5	การติดตั้งตัวตรวจวัดความเร็วแบบ Optical Sensors เข้ากับมอเตอร์	163
6.6	การทดลองระบบป้องกันที่สร้างขึ้น	164
6.7	จอภาพแสดงผลด้วยโปรแกรม Visual Basic6	164
6.8	การต่อวงจรที่ใช้ทดลองระบบป้องกันมอเตอร์	165
6.9	กราฟแสดงสภาวะการเปิด-ปิดของมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลองขณะ No Load	165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.10	กราฟแสดงสภาวะแรงดันทางด้านอินพุตของมอเตอร์ ในภาวะปกติ ก่อนทำการทดลอง.....	166
6.11	กราฟสภาวะกระแสของมอเตอร์ในช่วงทดลองขณะ No-Load.....	166
6.12	กราฟความเร็วของมอเตอร์ ในช่วงทำการทดลองขณะ No Load.....	167
6.13	กราฟแสดงสภาวะของอุณหภูมิที่ผิวมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลองขณะ No Load.....	167
6.14	กราฟแสดงสภาวะทางอุณหภูมิภายในของมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลอง No Load.....	168
6.15	สภาวความผิดปกติ เมื่อแรงดันเฟส A สูงกว่าปกติ 5%.....	168
6.16	การเปรียบเทียบแรงดันที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	178
6.17	การเปรียบเทียบกระแสที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	178
6.18	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	178
6.19	การเปรียบเทียบ Reactive Power ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	179
6.20	การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	179
6.21	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่โครงมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	179
6.22	การเปรียบเทียบความเร็วมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	180
6.23	การเปรียบเทียบความถี่ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น.....	180
6.24	no load Power.....	195
6.25	no load current.....	196
6.26	การเปลี่ยนค่า Rc และ Xm ของมอเตอร์ 1HP.....	196
6.27	ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังการทดลองในสภาวะปกติ.....	197
6.28	ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะผิดปกติ2เฟส	197
6.29	ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะสูง-ต่ำกว่า...	198
6.30	ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะผิดปกติ1เฟส	198
6.31	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันปกติ.....	199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.32	กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 3 เฟส....	200
6.33	กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 1 เฟส....	202
6.34	กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 2 เฟส....	203
6.35	กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 2 เฟส....	204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่า Reactance ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	19
3.1	ค่าอุณหภูมิของชั้นฉนวนชนิดต่างๆ.....	33
3.2	การย้ายค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงต่างๆ.....	45
3.3	ข้อมูลพิกัดอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส Hall Effect Model LA-55P.....	51
3.4	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ รุ่น TTC3A473-A9A.....	58
4.1	การเลือกอัตราบอดของวงจรพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	65
4.2	รายละเอียดชื่อขาสัญญาณของ PCF8591.....	73
5.1	ผลการทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร.....	83
5.2	ผลการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร.....	84
5.3	ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	85
5.4	ข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส.....	87
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Tachometerกับวงจรวัดความเร็วรอบ.....	90
5.6	ข้อมูลที่วัดได้จากตัวเทอร์มิสเตอร์.....	91
5.7	ตารางความเป็นจริงของ JK Flip Flop เบอร์ SN74LS109A.....	129
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์กับอุณหภูมิแตกต่างสูงสุด.....	152
6.1	การเทียบขนาดโหลดระหว่าง DC Motor กับ AC Motor.....	169
6.2	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=220V, Vb=220V, Vc=220V ขณะที่มีการต่อ Coupling.....	170
6.3	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=220V, Vb=220V, Vc=220V.....	181
6.4	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=204V, Vc=204V.....	182
6.5	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=237V, Vc=237V.....	183
6.6	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=188V, Vc=188V.....	184
6.7	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=255V, Vb=255V, Vc=255V.....	185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
6.8	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=220V, Vc=220V.....	186
6.9	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=204V, Vc=220V.....	187
6.10	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=220V, Vc=220V.....	188
6.11	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=188V, Vc=220V.....	189
6.12	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=220V, Vc=220V.....	190
6.13	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=237V, Vc=220V.....	191
6.14	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=237V, Vc=220V.....	192
6.15	ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=255V, Vc=220V.....	193
6.16	ผลของความผิดปกติในลักษณะต่างๆ ที่ทำการทดลอง.....	194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาระบบป้องกัน [1]

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของสังคมสมัยใหม่ การพัฒนาประเทศทางด้านอุตสาหกรรม ที่มีความต้องการปริมาณพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดต่าง ๆ บางครั้งอาจเกิดความผิดปกติ (Fault) ซึ่งสาเหตุหลายประการ มาจากการที่ฉนวนไฟฟ้าบางส่วนเสียหาย อันเนื่องมาจากความร้อนสูง หรือ เกิดจากอุบัติเหตุทางกล ซึ่งทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ความผิดปกติครั้งนี้ ทำความเสียหายต่อระบบการผลิต และอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น ความร้อนสูง (Overheating),แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage and Under Voltage), ความถี่ต่ำ (Under Frequency) เป็นต้น ดังนั้น ระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกัน (Protection System)ที่ดี เพื่อลดความเสียหายต่ออุปกรณ์กับระบบดังกล่าว

1.2 ความสำคัญระบบป้องกันมอเตอร์ [1]

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวาง และมีความสำคัญในวงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ความเสียหายอันเนื่องมาจากมอเตอร์ชำรุด จะทำให้เสียเวลาในการซ่อมบำรุง แล้วยังทำให้เกิดความสูญเสียในขบวนการผลิต ดังนั้น การที่จะลดความเสียหายของมอเตอร์ได้ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ เพื่อป้องกันความผิดปกติจากภายนอก หรือ ภายใน เช่น แรงดันไฟฟ้าตก,แรงดันไฟฟ้าเกิน, การลัดวงจรของขดลวด และอุณหภูมิของขดลวดสูงเกินขีดจำกัดของชั้นฉนวน

ในปัจจุบันระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนใหญ่เป็นแบบแม่เหล็กไฟฟ้า, แบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือ แบบที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (แสดงสถานการณ์ทำงาน และตัดออกจากระบบโดยไม่บอกสาเหตุที่เกิดความผิดปกติ) ที่ไม่สามารถป้องกันการเกิดปัญหาต่างๆ ได้อย่างครอบคลุม การนำระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งาน จึงต้องมีความหน้าเชื่อถือได้สูง หรือ มีการป้องกันแบบหลากหลายฟังก์ชั่น ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์มากขึ้น และทำให้เกิดความซับซ้อนในการติดตั้ง ขณะเดียวกัน ก็ทำให้เกิดความยุ่งยากในการตั้งค่าการทำงาน สำหรับรีเลย์แต่ละชนิดที่นำมาติดตั้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการซ่อมบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเสนองานวิจัย เพื่อแก้ไขปัญหา โดยการพัฒนาออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชั่น ที่ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่ให้เกิดความเสียหายจากสาเหตุต่าง ๆ ได้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ ได้ออกแบบให้ทำงานโดยการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และซอฟท์แวร์ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กลงเปลี่ยนแปลงวิธีการเพิ่มการทำงานได้ง่ายขึ้น

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

เสนอแนวทางการศึกษา การค้นคว้า และการพัฒนาเครื่องต้นแบบ เพื่อนำไปใช้ทดแทนระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เป็นแบบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ในการแก้ปัญหา จึงได้มีการพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง โดยมีโครงสร้างการทำงานที่ง่ายต่อการพัฒนา โดยระบบส่วนหลักเป็นการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานได้อย่างอิสระ ซึ่งปรับตั้งค่าการป้องกันได้อย่างคล่องตัว เช่น ปรับเปอร์เซ็นต์ของการเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแส เป็นต้น เก็บและเรียกดูข้อมูลภายหลังของการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันนั้น ๆ ได้ เพื่อให้การพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความสามารถใกล้เคียงกับระบบป้องกันจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

1.4 สมมุติฐานของการวิจัยและการพัฒนา

ระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชั่น อาศัยหลักการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์แบบเดิม คือ รีเลย์ที่อาศัยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromechanical Relay) ที่มีการทำงานอย่างชัดเจน คือ การปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ, การคำนวณเปรียบเทียบขนาดสัญญาณเพื่อใช้ในการดำเนินงานตามขั้นตอน ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ทดแทนการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากไม่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้ตามการพัฒนาวิธีป้องกันแบบใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้น ดังนั้น สมมุติฐานที่ตั้งไว้ คือ ระบบรีเลย์ป้องกันมอเตอร์แบบเดิม สามารถที่ทดแทนด้วยฟังก์ชั่นการทำงานโดยโปรแกรมควบคุมใหม่ได้ ซึ่งมีข้อดี คือ ปรับเปลี่ยนการทำงานและปรับตั้งค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ มีความแม่นยำในการทำงาน บอกถึงสาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้น และเก็บข้อมูลการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ทำให้ระบบป้องกันมีขนาดที่เล็กลงมาก และมีฟังก์ชั่นการทำงานที่หลากหลายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ทฤษฎี หรือ แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ โดยนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของขั้นตอนการทำงานที่ชัดเจนตามชนิดของรีเลย์ที่ใช้ป้องกัน ในชุดของคำสั่ง (Program) การออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์สามารถกำหนดฟังก์ชั่นป้องกันหลายๆ ฟังก์ชั่น โดยการทำงานเก็บไว้ในชิพเพียงตัวเดียว ทำให้ระบบมีขนาดที่เล็กลง นอกจากนี้ ยังติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้งานได้ ทำให้ทราบถึงสภาวะการทำงานต่างๆ ที่เกิดกับมอเตอร์ผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ สามารถปรับตั้งค่าต่างๆ ของฟังก์ชั่น และทำให้การป้องกันแต่ละชนิดเป็นไปได้ด้วยดี

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ
2. ศึกษาระบบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานและออกแบบโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ให้สัมพันธ์กับไมโครคอนโทรลเลอร์
3. กำหนดฟังก์ชั่นการทำงานของระบบป้องกัน และแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์
4. สร้างเครื่องต้นแบบของระบบป้องกัน เพื่อทดสอบหลักการทำงานความผิดปกติดังนี้
   - แรงดันไฟฟ้าสูง-ต่ำกว่าปกติค่าที่กำหนด
   - กระแสไม่สมดุล (เกิน, ขาดหายไปของกระแส ฯ)
   - อุณหภูมิที่สูงเกินกว่าชั้นของฉนวน
   - ความถี่สูง-ต่ำกว่าปกติ
   - การสลับเฟสของระบบไฟฟ้า
   - การไม่หมุน หรือ หมุนกลับทิศทาง

1.7 วิธีการวิจัย

1. ศึกษา และค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ วารสาร เอกสาร และตำราที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบป้องกัน
2. ออกแบบวงจรการทำงาน โดยใช้การจำลองวงจรต่าง ๆ จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น OrCad เป็นต้น
3. ศึกษา ทดลอง และควบคุมการทำงานตัวประมวลผลสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์
4. สร้าง ติดตั้ง และแก้ไขส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย
5. ทดลอง และแก้ไขวงจรที่ทำการวิจัยในแต่ละส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำแต่ละส่วนมาประกอบเข้ารวมกัน และทดลองรวมกันทั้งหมด

7. แก้ไข ปรับปรุงวงจรและทำการสอบวงจรทั้งหมด

8. เขียนโปรแกรมระบบป้องกันในแต่ละส่วน โดยโปรแกรมจะต้องสัมพันธ์กับฮาร์ดแวร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ก่อนแล้ว

9. เขียนโปรแกรมการติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์โดยเขียนด้วยโปรแกรม Visual Basic6 (VB6)

10. ทดสอบโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์กับฮาร์ดแวร์ที่ทำขึ้นว่าสัมพันธ์กัน หรือ ไม่

11. ทดสอบและแก้ไขวงจรรวมทั้งโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

12. ทดสอบการติดต่อกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์

13. เก็บผลที่ได้จากการทดลอง แล้วสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ศึกษา วิเคราะห์ เพื่อออกแบบ และทดลองระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดแบ่งเป็นบท ๆ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

บทที่ 3 ทฤษฎีทั่วไปและหลักการของระบบป้องกันมอเตอร์

บทที่ 4 ทฤษฎีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการใช้โปรแกรม VisualBasic6 (VB6)

บทที่ 5 หลักการออกแบบ

บทที่ 6 ผลการทดลอง

บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.9 ประโยชน์ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. มีการประยุกต์ใช้หลักการป้องกันมอเตอร์แบบหลากหลายฟังก์ชั่น
2. รู้จักและใช้เทคโนโลยีที่มีมากับชิพต่าง ๆ ประกอบกันเข้ากับโครงงานวิจัยที่ทำ
3. รู้จักการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการควบคุม โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอล
4. เป็นพื้นฐานความรู้การศึกษาวิธีการป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยเทคโนโลยีใหม่ ๆ
5. นำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการควบคุมระบบป้องกันอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนด้วยการเหนี่ยวนำ ที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม มอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้ อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือ หลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส นิยมเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีข้อดี คือ มีโครงสร้างที่ง่าย และทนทาน มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสภาวะที่มอเตอร์หมุนปกติ ไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้น การสูญเสียเนื่องจากความฝืดลดลง หรือ มีค่าที่น้อย และมีตัวประกอบกำลังที่ดี มีการบำรุงรักษาต่ำ ข้อเสีย คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับโหลดที่ใช้ขับ และมีแรงบิดในขณะเริ่มต้นหมุนค่อนข้างต่ำ จึงทำให้สิ้นเปลืองค่ากำลังไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น

2.1.1 โครงสร้าง และส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1],[2]

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนเคลื่อนที่ (Rotor) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) โครงสร้างภายในของโรเตอร์ทำด้วยแผ่นลามิเนทเซาะผิวทางด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นเจาะรูสำหรับสอดเพลา เมื่อนำแผ่นเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ โดยภายในร่องมีแกนอะลูมิเนียมอยู่ในร่องของผิวด้านนอกของกรงกระรอก และที่ปลายของแกนอะลูมิเนียมทั้งสองข้าง มีการต่อเชื่อมถึงกันโดยวงแหวน เรียกว่า "End Ring" ส่วนที่ปลายเพลาอาจมีครีบยื่นออกไป เพื่อใช้ในการติดตั้งใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) จะใช้ขดลวดทองแดงในการพันแทนที่จะใช้แกนอะลูมิเนียมอย่างมอเตอร์ชนิดกรงกระรอก และที่ปลายของขดลวดจะมีการต่อวงแหวนลื่นเพื่อใช้ในการต่อร่วมกับวงจรภายนอกในการสตาร์ทการทำงานของมอเตอร์ โดยโรเตอร์จะมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนที่ของสเตเตอร์

2.1.2 หลักการทำงาน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สมดุลที่เป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในสเตเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจร ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงบิดขึ้นที่ตัวโรเตอร์ ซึ่งโรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน หรือ ความเร็วซิงโครนัส (ω_S) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\omega_S = \frac{(2\pi)/(P/2)}{1/f} = \frac{2\omega}{P} \tag{2.1}$$

หากเขียนอยู่ในรูปของหน่วยรอบต่อนาที (rpm) จะได้ค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ (ω_S) ดังนี้

$$n_s = \frac{60\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \tag{2.2}$$

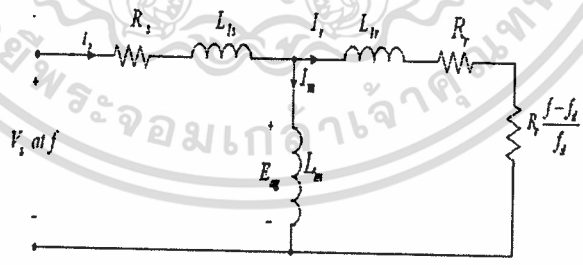
เมื่อ n_s คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)

ω_s คือ ค่าความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (rad/s)

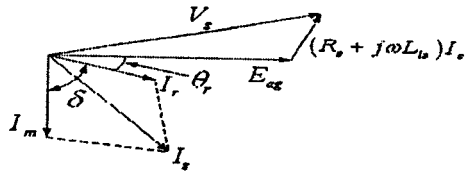
f คือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (Pole)

สนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B_{ag}) จะหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์รอบ ๆ ขดลวด ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องอากาศ (E_{ag}) มีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่าย แสดงได้ดังรูป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_s คือ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V)

R_s คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ω)

R_r คือ ความต้านทานขดลวดโรเตอร์ (Ω)

L_m คือ ความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก (mH)

L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ (mH)

L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ (mH)

และเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เป็นไปในลักษณะของฟังก์ชั่นไซน์นูโซดอย์ จากกฎของฟาราเดย์ ทำให้หาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จากสมการดังนี้

$$e_{ag} = \frac{N_s d\phi_{ag}}{dt} \tag{2.3}$$

เมื่อ e_{ag} คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในช่องว่าง

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวด

ϕ_{ag} คือ สนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

เมื่อสนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่คล้องขดลวดสเตเตอร์มีค่า $\phi_{ag}(t)$ เท่ากับ $\phi_{ag}\sin\omega t$ จะได้

$$e_{ag} = N_s\phi_{ag}\omega Cos\omega t \tag{2.4}$$

โดย ω คือ มีค่าเท่ากับ $2\pi f$

เมื่อแทนค่า $cos(\omega t)$ เท่ากับหนึ่ง และทำสมการ (2.4) เป็นค่าอาร์เอ็มเอส (rms) จะได้

$$E_{ag} = 4.44N_s\phi_{ag}f \tag{2.5}$$

แรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศกับกระแสที่โรเตอร์ ถ้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ทำให้ไม่มีกระแสไหลในโรเตอร์ เมื่อไม่มีกระแสเกิดขึ้นก็จะไม่เกิดแรงบิด แต่ถ้าโรเตอร์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ (ω_s) กับความเร็วโรเตอร์ (ω_r) ซึ่งเรียกว่า ความเร็วสลิป (ω_{sl}) จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \tag{2.6}$$

โดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วสลิปกับความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส เรียกว่า สลิป (s) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$slip, s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{slip}}{\omega_s} \tag{2.7}$$

เมื่อ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator Angular frequency)

ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor Angular frequency)

ω_{sl} คือ ความถี่เชิงมุมสลิป (Slip Angular frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ สนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่หมุนผ่านขั้วแม่เหล็กที่ตัวสเตเตอร์ และโรเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในตัวนำ และกระแสไหลในโรเตอร์ที่ความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ โดยค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสจะมีค่าสูงสุด โดยขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้ มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง ในขณะที่มอเตอร์อยู่กับที่ (ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสาย กรณีดังกล่าวจะมีค่าสลิปหรือ ค่าการลื่นไถลเท่ากับ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อโรเตอร์มีการหมุนที่ความเร็วใด ๆ ค่าสลิปจะมีค่าแปรผันตามกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = sE_{ag} \tag{2.8}$$

เมื่อ E_r คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงาน (V)

E_{ag} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ช่องว่างอากาศ (V)

S คือ ค่าการลื่นไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปตามสมการต่อไปนี้

$$f_{sl} = sf \tag{2.9}$$

เมื่อ f_{sl} คือ ความถี่ไฟฟ้าที่โรเตอร์ (Hz)

f คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังทางกลจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กำลังทางด้านอินพุตไม่ได้เกิดจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการส่งผ่านกำลังทางช่องว่างอากาศ (Air gap) โดยการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสหาได้จากสมการที่ (2.8) ถ้านำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าหารด้วยค่าอิมพิแดนซ์ที่โรเตอร์ต่อเฟส (Z_r) จะได้ค่ากระแสโรเตอร์(I_r) ที่ไหลอยู่ในตัวโรเตอร์ เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ค่าสลิปใด ๆ จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{I}_r = \frac{sE_r}{Z_r} = \frac{sE_r}{R_r + j2\pi fsL_{lr}} \tag{2.10}$$

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้หลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Equivalent Circuit) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างกันตรงที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีส่วนของการเคลื่อนที่เท่านั้น ดังนั้นวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหมือนกับวงจรสมมูลทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานของแกนเหล็กในบางครั้งสามารถละเลยได้ ดังรูปที่ 2.1 กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ที่ไหลในขดลวดความต้านทานของสเตเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) และในขดลวด (Copper Loss) โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำได้โดยย้าย X_m มาไว้ในด้านหน้าของวงจร ค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลทางด้านสเตเตอร์กับโรเตอร์ หากต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงทางด้านโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์ หาค่าได้จากสมการนี้

$$E_r' = aE_r = E_m \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_r' คือ แรงดันไฟฟ้าขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่โดยย้ายค่ามาทางด้านสเตเตอร์ (V)

E_m คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ (V)

E_r คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ (V)

a คือ อัตราส่วนระหว่างขดลวดทางด้านสเตเตอร์กับขดลวดทางด้านโรเตอร์

ความสัมพันธ์ของกระแสโรเตอร์ หาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ได้จากสมการนี้

$$\overline{E}_r = R_r \overline{I}_r + j2\pi fsL_{lr}\overline{I}_r \tag{2.12}$$

และจากสมการหากคูณด้วยค่า $1/s$ จะได้

$$\overline{E}_{ag} = \frac{R_r}{s}\overline{I}_r + j2\pi fL_{lr}\overline{I}_r \tag{2.13}$$

ผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องอากาศกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยกระแสโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque) และหาค่าความสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$P_r = 3R_r I_r^2 \tag{2.14}$$

จากรูปที่ 2.1 ก) เทอมของค่า R_r/s ถูกแทนด้วยผลบวกของค่า R_r กับค่า $R_r(1-s)/s$ จากสมการที่ 2.13 ปริมาณต่าง ๆ ทั้งหมดของโรเตอร์ อ้างอิงได้จากจำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์ หากนำสมการ 2.13 คูณด้วยค่าคอนจูเกตของกระแสในโรเตอร์ แล้วนำค่าจำนวนจริง (Real) มาใช้ จะได้ค่ากำลังงานที่ข้ามช่องอากาศ ที่เรียกว่า Air gap Power (P_{ag}) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{ag} = 3\frac{R_r}{s}I_r^2 \tag{2.15}$$

จากสมการ 2.12 และ 2.15 ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล (P_{em}) และค่าแรงบิดทางกล (T_{em}) หาได้ดังนี้

$$P_{em} = P_{ag} - P_r$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{em} = 3I_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \tag{2.16}$$

และ

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} \tag{2.17}$$

จากสมการ 2.14, 2.15 และ 2.17 จะได้

$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \tag{2.18}$$

จากรูปที่ 2.1ก) ค่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์(I_s) เป็นผลรวมของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก(I_m)กับกระแสที่ไหลผ่านวงจรสมมูลโรเตอร์(I_r)โดยจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{I}_s = \bar{I}_m + \bar{I}_r \tag{2.19}$$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.1ข) กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก จะล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่ 90 องศา โดยค่ากระแสที่โรเตอร์เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่เป็นมุมเท่ากับตัวประกอบกำลังของวงจรโรเตอร์ (Power Factor Angle of Rotor Circuit)

$$\theta_r = tan^{-1} \left(\frac{2\pi f L_{lr}}{R_r/s} \right) \tag{2.20}$$

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$T_{em} = K_1 \phi_{ag} I_r Sin\delta \tag{2.21}$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่

δ คือ มีค่าเท่ากับ $90^\circ + \theta_r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ δ คือ มุมแรงบิด (Torque Angle) หรือ มุมระหว่างกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศกับค่ากระแสโรเตอร์ ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ $\bar{V}_s$ หาได้จากสมการ

$$\bar{V}_s = \bar{E}_{ag} + \left(R_s + j2\pi fL_{ls}\right)\bar{I}_s \tag{2.22}$$

ในสภาวะความเป็นจริงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไป ค่าความถี่สลิปมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งมีผลทำให้ค่า $2\pi fL_{lr}R_r$ ค่าของมุมตัวประกอบกำลัง θ_r มีค่าประมาณ 0 องศา และมุมแรงบิด δ มีค่าเท่ากับ 90 องศา จากสมการที่ 2.21 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$T_{em} = K_1\phi_{ag}I_r \tag{2.23}$$

จากสมการ 2.8 และสมการ 2.12 จะได้ค่าประมาณของกระแสที่โรเตอร์ ตามสมการ

$$I_r \approx K_2\phi_{ag}sf \tag{2.24}$$

เมื่อ K_2 คือ ค่าคงที่

ดังนั้นค่าของแรงบิดจากสมการ 2.23 จะมีค่าดังนี้

$$T_{em} \approx K_3\phi_{ag}^2 sf \tag{2.25}$$

เมื่อ K_3 คือ ค่าคงที่

จากการประมาณค่าทั้งหมด สรุปได้ว่า

$$I_s \approx \sqrt{I_m^2 + I_r^2} \tag{2.26}$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ปกติทั่ว ๆ ไป จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ 2.22 มีค่าดังนี้

$$V_s \approx 4.44N_s\phi_{ag}f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

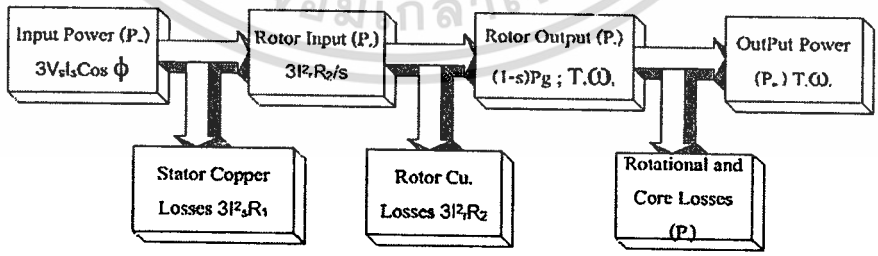
$$V_s \approx E_{ag} \tag{2.27}$$

จากสมการ 2.27 ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยประมาณได้ ยกเว้นการทำงานที่ความถี่ต่ำและค่าอัตราส่วนของกำลังสูญเสียต่อกำลังกลที่โรเตอร์ มีค่าดังสมการ

$$\% P_r = \frac{P_r}{P_{em}} = \frac{s}{1-s} \tag{2.28}$$

2.1.3 กำลังงานส่งผ่านมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าเป็นกำลังไฟฟ้า 3 เฟสของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้านออกซึ่งได้จากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็นกำลังไฟฟ้าด้วย แต่สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิของมอเตอร์ถูกทำให้ลัดวงจร จึงไม่มีกำลังไฟฟ้าด้านออกมาจากมอเตอร์ แต่จะมีกำลังทางกลออกมาแทน ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และกำลังทางกลด้านออกของมอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของมอเตอร์ (P_{in}) ที่ได้จากระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (P_{scl}) และเกิดการสูญเสียขึ้นที่ Hystersis Loss และ Eddy Current Loss เรียกว่า Core Loss (P_{core}) จะถูกส่งข้ามช่องว่างอากาศ เรียกกำลังไฟฟ้าส่วนนี้ว่า Air gap Power (P_{ag}) เป็นกำลังด้านเข้าโรเตอร์ เมื่อส่งเข้ามาที่โรเตอร์พบกับกำลังสูญเสียที่ขดลวดของโรเตอร์ (P_r) และเปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกล (P_{em}) ที่จุดนี้ กำลังด้านออกจะมีกำลังสูญเสียทางกลให้กับแรงต้านลมของโรเตอร์ และความฝืดแบริ่งของมอเตอร์ เรียกว่า Friction and Windage Losses $(P_{f\&w})$ และ Stray Losses (P_{misc})



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เข้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ช่องว่างอากาศ เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ โดยหากำลังไฟฟ้าด้านเข้าได้จากสมการ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{in} = 3V_s I_s Cos\theta_s \tag{2.29}$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดกำลังสูญเสียที่ขดลวดบนสเตเตอร์ตามสมการ

$$P_{scl} = 3I_s^2 R_s \tag{2.30}$$

จากบล็อกไดอะแกรม การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์ กำลังสูญเสียต่าง ๆ ที่มีค่าคงที่ รวมเรียกว่า Rotational Losses (P_r) ถ้าตัด R_c ออกจากวงจรจะได้

$$P_r = P_{core} + P_{f\&w} + P_{misc} \tag{2.31}$$

กำลังส่งผ่านช่องอากาศ หาได้จากสมการที่ 2.15 หรือ สมการต่อไปนี้

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} \tag{2.32}$$

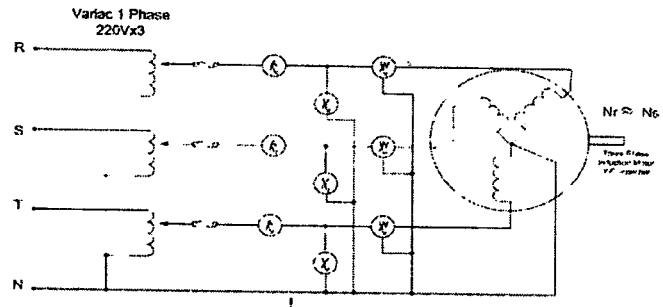
กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องอากาศของมอเตอร์ หรือ กำลังไฟฟ้าด้านออกของสเตเตอร์ เมื่อข้ามช่องว่างอากาศจะส่งไปที่โรเตอร์ หรือ เรียกว่า กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของโรเตอร์ ซึ่งมีชื่อเรียกได้แตกต่างกันไป กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่โรเตอร์ ได้แก่ กำลังสูญเสียที่ขดลวดบนโรเตอร์ ส่วนกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์ จะถูกรวมอยู่กับ Rotational Losses (P_r) กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากโรเตอร์ จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังกลดังสมการที่ 2.16, 2.17 และ 2.18

2.1.4 การหาวงจรสมมูลของมอเตอร์

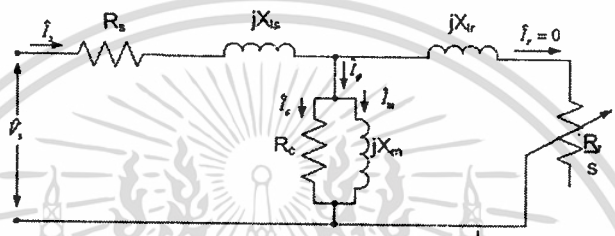
วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ถูกใช้มากในการหาผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนภาระทางกล ถ้าวงจรสมมูลนี้นำมาใช้กับมอเตอร์จริง ๆ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลจึงมีความสำคัญมาก ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์จะหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 [3] ซึ่งต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อม เพราะความต้านทานทางด้านสเตเตอร์มีการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ และความต้านทานทางด้านโรเตอร์ แปรเปลี่ยนตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าบนโรเตอร์ ซึ่งมีวิธีหาได้ 2 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

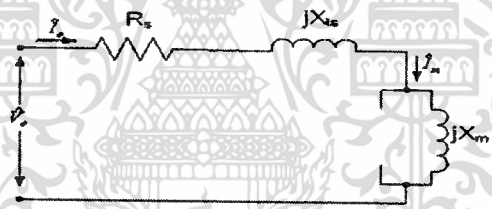
2.1.4.1 การทดสอบแบบไร้โหลด (No load test)



ก) วงจรที่ใช้ในการทดสอบ



ข) วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ค) วงจรสมมูลของมอเตอร์โดยประมาณ

รูปที่ 2.3 วงจรทดสอบแบบไร้โหลด

การทดสอบแบบไร้โหลด เทียบได้กับ เปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการทดสอบเพื่อหา Exciting Current และ Rotational Losses โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุล และความถี่ที่พิกัดให้กับขดลวดสเตเตอร์ดังรูปที่ 2.3 ก) ขณะที่ไม่มีโหลดทางกล และมีความเร็วรอบ N_r ที่มีค่าใกล้เคียงกับ N_s ค่าของสลิปจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งกระแสทางด้านโรเตอร์มีค่าน้อยมากแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ข) จะไม่พิจารณากำลังสูญเสียทางด้านโรเตอร์ แต่จะพิจารณากำลังสูญเสียทางด้านสเตเตอร์เพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 2.3 ค) กำลังไฟฟ้าด้านเข้ามอเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบไร้โหลดทางกล คือ No Load Losses และการหาค่าของ X_{ls} และ X_m จากการทดสอบนี้หา Rotational Losses ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = P_o - 3I_o^2 R_s \tag{2.33}$$

เมื่อ P_o คือ กำลังไฟฟ้าด้านเข้า 3 เฟส ขณะที่ไร้โหลดทางกล (W)

I_o คือ กระแสไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์ ขณะไร้โหลดทางกล (A)

R_s คือ ความต้านทานของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส $(\Omega/Phase)$

การหาค่าของ R_s หาได้จากการทดสอบแบบ VI - Method ซึ่งวัดหาค่าต่าง ๆ โดยการวัดที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และมุมระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจากกำลังไฟฟ้าขณะไร้โหลดทางกล ดังสมการ

$$\theta_o = Cos^{-1}\left(\frac{P_o}{V_o I_o}\right) \tag{2.34}$$

เมื่อ P_o คือ กำลังไฟฟ้าต่อเฟสทางด้านเข้ามอเตอร์ขณะไร้โหลดทางกล (W)

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์ขณะไร้โหลด (V)

I_o คือ กระแสไฟฟ้าขณะไร้โหลด (A)

θ_o คือ มุมเฟสระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้า

ดังนั้นค่าของ Magnetizing Current (I_m) และ Core Losses Current (I_c) หาได้จากสมการ

$$I_m = I_o Sin(\theta_o) \tag{2.35}$$

$$I_c = I_o Cos(\theta_o) \tag{2.36}$$

ในขณะที่ไร้โหลดทางกล กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์มีค่าน้อยมาก สามารถละทิ้งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม R_s ได้ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม X_m และ X_s เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังสมการ

$$X_m + X_s = \frac{V_o}{I_m} \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

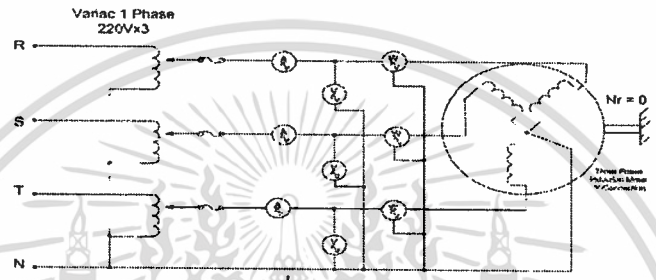
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ถ้าทราบค่าของ X_s ก็หาค่าของ X_m ได้ หรือ หาค่าของ X_m และ R_c ได้ดังสมการต่อไปนี้

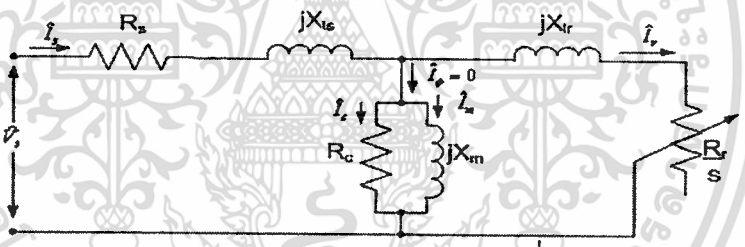
$$X_m = \frac{V_o}{I_o Sin\theta_o} \tag{2.38}$$

$$R_c = \frac{V_o}{I_o Cos\theta_o} \tag{2.39}$$

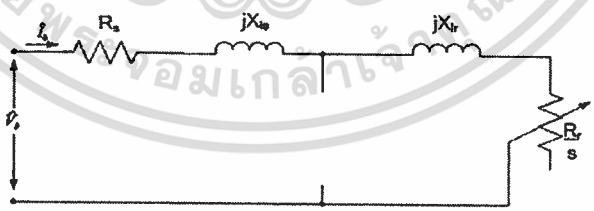
2.1.4.2 **การทดสอบแบบยึดโรเตอร์** (Block rotor test)



ก) วงจรที่ใช้ในการทดสอบ



ข) วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ค) วงจรสมมูลของมอเตอร์โดยประมาณ

รูปที่ 2.4 วงจรทดสอบแบบยึดโรเตอร์

การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ เทียบได้กับการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Leakage Impedances โดยทำการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หยุดอยู่กับที่ ในขณะที่ค่าสลิปมีค่าเท่ากับหนึ่ง จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุลให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60519

กระแสมีค่าเท่ากับพิกัดดังรูปที่ 2.4 ก) เนื่องจาก Exciting Current มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับกระแสที่พิกัด สามารถละเว้นค่า X_m และ R_c ได้ดังรูปที่ 2.4 ข) ดังนั้นค่า Block Rotor Reactance จะเท่ากับ Reactance ด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์ ดังรูปที่ 2.3 ค) การหาค่ามุมระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ยึดโรเตอร์หาได้ดังนี้

$$\theta_b = Cos^{-1}\left(\frac{P_b}{V_b I_b}\right) \tag{2.40}$$

เมื่อ θ_b คือ มุมระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ยึดโรเตอร์

P_b คือ กำลังไฟฟ้าต่อเฟสทางด้านเข้ามอเตอร์ขณะยึดโรเตอร์(W)

V_b คือ แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะยึดโรเตอร์(V)

I_b คือ กระแสไฟฟ้าที่พิกัดขณะยึดโรเตอร์(A)

โดยปกติกระแสไฟฟ้าขณะยึดโรเตอร์ที่ไหลผ่าน X_m มีค่าน้อยมากจึงละทิ้งได้ และนำค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ขณะยึดโรเตอร์มาหาค่าอิมพีแดนซ์ขณะยึดโรเตอร์ดังสมการ

$$Z_b = \frac{V_b \angle 0}{I_b \angle \theta_b} = R_b + jX_b \tag{2.41}$$

เมื่อ

$$R_b = R_s + R_r \tag{2.42}$$

หาค่า R_r ได้

$$R_r = R_b - R_s \tag{2.43}$$

และ

$$X_b = X_{ls} + X_{lr} \tag{2.44}$$

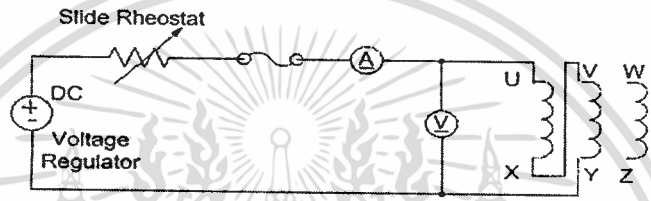
โดยค่า X_{ls} และ X_{lr} สามารถแยกค่าทั้งสองได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 112 ดังตารางที่ 2.1 เมื่อได้ค่า X_{ls} สามารถหาค่า X_m ได้จากสมการที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่า Reactance ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Motor Class	Description	X_{ls}	X_{lr}
A	Normal starting torque, Normal starting current	0.5	0.5
B	Normal starting torque, Normal low starting current	0.4	0.6
C	High starting torque, low starting current	0.3	0.7
D	High starting torque, high slip	0.5	0.5
Wound rotor		0.5	0.5

2.1.4.3 **การทดสอบแบบ** DC-test (V-I method)



รูปที่ 2.5 วงจรการทดสอบแบบ DC-Test

จากรูป เป็นการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในการทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในวงจรของโรเตอร์ ซึ่งค่ารีแอกเตนซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเข้าใกล้ศูนย์ ในการทดสอบต้องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับพิกัดแล้วบันทึกค่า V_{dc} และ I_{dc} เพื่อคำนวณหาค่า R_s

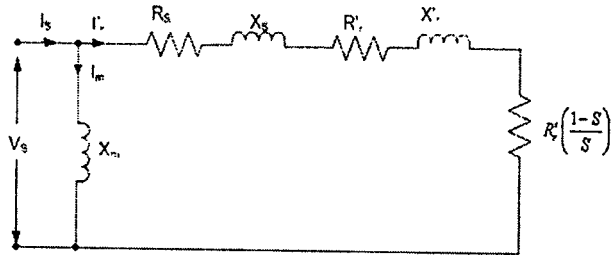
$$R_s = \frac{1}{2}\frac{V_{dc}}{I_{dc}} \tag{2.45}$$

และจะได้ R_r จาก

$$R_r = R_b - R_s \tag{2.46}$$

จากหลักการในหัวข้อ 2.1.4.1 ถึง 2.1.4.3 นำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยประมาณ ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยประมาณ

2.1.5 พิกัดกำลัง

พิกัดกำลังของเครื่องจักรกลขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดบนเครื่องจักรกล มีสาเหตุมาจากกำลังสูญเสีย ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น แหล่งกำเนิดความร้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่ ความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก, ความต้านทานของขดลวด และความสูญเสียจากความฝืด ลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิ เริ่มจากอุณหภูมิแวดล้อม และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิอิ่มตัว เมื่อถึงจุดนี้ แสดงว่าความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในเครื่องจักรกลสมดุลกับความร้อนที่ระบายออก ในการระบายความร้อนมี 3 วิธี คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี กำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามโหลดทางกล และมีค่ามากสุด เมื่อเครื่องจักรกลจ่ายภาระทางกลสูงสุด หรือ อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น เครื่องจักรกลมีอุณหภูมิสูงสุดได้เท่าใดขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนที่ใช้ทำเครื่องจักรกล ในการกำหนดพิกัดกำลังของเครื่องจักรกลขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวน วิธีการระบายความร้อน และอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีทั่วไปและหลักการของระบบป้องกันมอเตอร์

3.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งมีการใช้งานอย่างกว้างขวางและมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก ความเสียหายอันเนื่องจากมอเตอร์ชำรุด ทำให้เสียเวลาในการซ่อมบำรุง แล้วยังทำให้เกิดความสูญเสียในขบวนการผลิตอีกด้วย ดังนั้น เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ จึงมีความจำเป็นต้องมีระบบป้องกัน เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับมอเตอร์

ดังนั้น ความสำคัญของระบบป้องกันมอเตอร์ที่ต้องพิจารณา คือ เมื่อมีสภาวะผิดปกติเกิดขึ้นไม่ว่าจะเกิดความผิดปกติจากระบบไฟฟ้ากำลัง หรือ ผู้ใช้งานก็ตาม ระบบป้องกันต้องตรวจพบ และควบคุมสภาพการทำงานของมอเตอร์ โดยการปลดมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังและพร้อมแจ้งเตือนสถานะความผิดปกติที่เกิดขึ้นให้ผู้ใช้งานทราบ ในบางครั้งความผิดปกติที่เกิดอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องปลดมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าทันทีที่ตรวจพบความผิดปกติ เพื่อป้องกันมิให้มีการหยุดเดินมอเตอร์โดยไม่จำเป็น เช่น การเกิดโหลดเกินเพียงเล็กน้อย หรือ การเกิดแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังตกลงเพียงเล็กน้อย (Voltage dip) เป็นต้น ในระบบป้องกันต้องอาศัยการตรวจวัด และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์เป็นหลัก เพื่อทำการวิเคราะห์ และตัดสินว่าควรปลดมอเตอร์ออกจากระบบ หรือ เพียงแสดงสถานะความผิดปกติที่เกิดขึ้นให้ผู้ใช้ทราบ

3.2 หลักการของระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หลักการของระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จำแนกได้เป็น

3.2.1 สาเหตุของความผิดปกติที่เกิดกับมอเตอร์ [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

ชนิดความเสียหายเนื่องจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

3.2.1.1 ความผิดปกติเกี่ยวกับโหลด (Faults Related to Driven Load)

ความผิดปกติที่เกี่ยวกับโหลดมีดังนี้

1. การทำงานเกินพิกัด ถ้ามอเตอร์ทำงานเกินกำลัง จะต้องดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นเหตุทำให้กำลังสูญเสีย และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **การเริ่มเดินเครื่องยาวนาน หรือ บ่อยครั้งเกินไป** จะก่อให้เกิดความเสียหาย แต่ถ้าระยะเวลาสั้น และ Start บ่อย หรือ นานไป จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมากเกินเป็นเหตุให้มอเตอร์เสียหายได้

3. **โรเตอร์ถูกตรึงไว้** (Jamming) ให้หยุดอยู่กับที่ ทำให้มอเตอร์ดึงกระแสไฟฟ้าเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าเริ่มเดินเครื่อง ประกอบกับไม่มีการระบายความร้อน จะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

3.2.1.2 **ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า** (Power Supply Faults)

ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า แบ่งได้ดังนี้

1. **การเกิดแรงดันไฟฟ้าตก** (Drop In Voltage) จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ และความเร็วลดลง การลดลงลักษณะนี้ จะทำให้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสีย และความร้อนจะเพิ่มขึ้นตาม

2. **การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล** (Unbalance) ทำให้มี Negative Sequence Current ไหล เป็นสาเหตุ ให้มีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้โรเตอร์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

3.2.1.3 **ความผิดปกติภายในมอเตอร์** (Internal Motor Faults)

ความผิดปกติภายในมอเตอร์ แบ่งได้ดังนี้

1. **การลัดวงจรระหว่างเฟส** (Phase to Phase Short Circuit) จะทำความเสียหายอย่างมากแก่มอเตอร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าสูงมาก

2. **การลัดวงจรลงโครงโลหะ** (Frame Faults) ผลของการลัดวงจรขดลวดมอเตอร์ลงโครงโลหะ ขึ้นอยู่กับระบบการต่อลงดิน และตำแหน่ง การลัดวงจร ถ้าการลัดวงจรรุนแรงมากอาจต้องพันขดลวดใหม่

3.2.2 **ผลกระทบที่เกิดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติ**

ระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์มีพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณา **คือ แรงดันไฟฟ้า, ลำดับเฟส, ความถี่** เป็นต้น โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับการใช้งานมอเตอร์ที่สำคัญ คือ แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ได้รับ โดยแบ่งสภาวะความผิดปกติที่เกิดได้ดังนี้

3.2.2.1 **สภาวะแรงดันเกิน** (Excess or Over Voltage)

จากระบบไฟฟ้ากำลังที่จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีสาเหตุการเกิด เช่น การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่ายที่ไม่เหมาะสมในบางช่วงเวลา (Transmission and Distribution System) หรือ อาจเกิดจากค่าพารามิเตอร์ของระบบสายส่ง และสายป้อนไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสม เช่น ค่าความจุที่ปลายทางของสายส่งมีค่าที่สูงเกินไป เป็นต้น ในบางครั้งผู้ใช้งานที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Control Regulator:AVR) มีการทำงานที่ผิดพลาดในบางช่วงเวลา โดยทั่วไป โหลดหลายชนิดถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง การใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินที่สามารถตรวจสอบสภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดได้ตลอดเวลา เมื่อพบความผิดปกติที่แรงดันไฟฟ้าเกินกว่าค่าที่กำหนด ต้องแจ้งให้ผู้ใช้งานทราบ หรือ อาจต้องปลดวงจรออกจากระบบเมื่อพบความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากกว่าปกติ ตามมาตรฐานของ IEEE C37.96-200 [3] ที่กำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถรับแรงดันไฟฟ้าเกินได้สูงสุด15% ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด สภาวะการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Over Voltage) สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

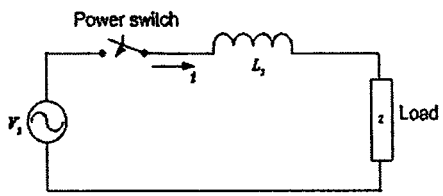
1. **แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง** (Switching Surge) การเกิดแรงดันไฟฟ้าชั่วครู่เกิดขึ้นอยู่เสมอ ในขณะที่มีการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อกำลัง เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์, สวิตซ์ชิ่ง, แมคเนติกคอนแทคเตอร์, ฟิวส์ เป็นต้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าอย่างกะทันหัน ไม่ว่าเป็นการตัดกระแสไฟฟ้าที่กำลังไหลอยู่ หรือ การต่อวงจรที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรอย่างทันที เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.1 การเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่ปรากฏอยู่บนสายส่ง ที่เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่ที่เกิดจากการตัดต่ออุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง มีผลทำให้ขนาดและรูปร่างของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยหาแรงดันไฟฟ้าสายป้อนที่เดินไปยังมอเตอร์ได้ดังนี้

$$V_s = L_s \frac{di}{dt} \tag{3.1}$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลัง(V)

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงในระบบ(mH)

$\frac{di}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา



รูปที่ 3.1 วงจรสายป้อนที่มีความเหนี่ยวนำแฝงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า** (Lightning Surge Over Voltage) เกิดจากสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติที่มีลักษณะรูปคลื่น เช่นเดียวกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่ที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ลักษณะของการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบไฟฟ้ากำลังมี 2 อย่างคือ

- การเกิดฟ้าผ่าโดยตรงยังระบบไฟฟ้ากำลัง
- การเหนี่ยวนำเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง

จากทั้ง 2 กรณี ทำให้เกิดขนาดของแรงดันไฟฟ้า และรูปคลื่นที่ต่างกันกับแรงดันไฟฟ้าชั่วครู่ที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง โดยเฉพาะในอัตราส่วนเวลาช่วงขาขึ้นและช่วงขาลงของคลื่น ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ซึ่งการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินในลักษณะนี้ ทำเช่นเดียวกับการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่ที่เกิดจากสวิตช์ชิ่ง ซึ่งการป้องกันแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. Type of Protection

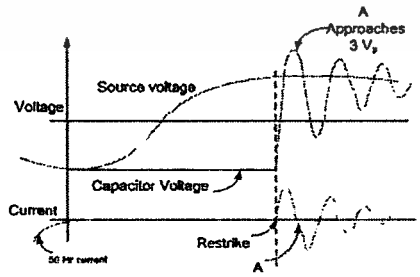
- โดยทั่วไปจะใช้ Surge Arresters ตัวต่อเฟส โดยต่อระหว่างเฟสและ Ground เพื่อจำกัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดมอเตอร์ให้มีค่าต่ำ เมื่อมี Lighting Surge และ Switching Surge
- ใช้ Surge Capacitors เพื่อลดความชันของลูกคลื่น Lighting Surge และ Switching Surge

2. Locations of Surge Protection

- Surge Arresters และ Surge Capacitors ต่อห่างกันไม่เกิน 1 เมตรจากขั้วมอเตอร์
- วงจร Supply Circuit เข้ากับ Surge Equipment แล้วต่อไปยังมอเตอร์

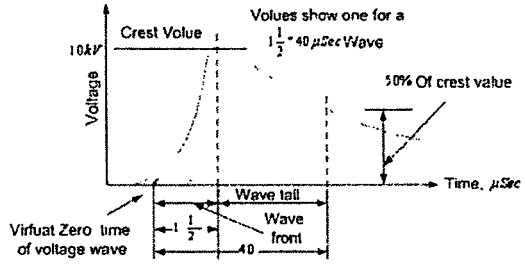
3. When to Apply Surge Protection ข้อแนะนำทั่ว ๆ ไป ในการใช้ Surge Protection เพื่อป้องกันมอเตอร์ดังนี้

- ใช้กับมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าปานกลางขนาดมากกว่า 400kW
- ใช้กับมอเตอร์ขนาด 150kW ซึ่งต่อกับสาย Overhead Line ที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกับมอเตอร์



รูปที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าเกินจากสวิตช์ชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แรงดันไฟฟ้าเกินจากฟ้าผ่า

3.2.2.2 **สภาวะแรงดันต่ำ** (Under Voltage)

การป้องกันแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ต่ำกว่าปกติมีจุดประสงค์ดังนี้ คือ

1. **เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น** กับมอเตอร์ที่เริ่มเดินเครื่องใหม่อีกครั้ง **หรือ** แรงดันไฟฟ้าหายไปแล้วกลับมาอีก

2. **เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์พุ่งสูงขึ้น** ขณะขับโหลดมอเตอร์ในระบบไฟฟ้า และป้องกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ หรือแรงดันไฟฟ้าหายไปแล้วกลับมาอีกครั้งหนึ่ง

ในการป้องกันแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติควรเป็นทันทีทันใด หรือ แบบหน่วงเวลาอย่างใดอย่างหนึ่ง (การป้องกันแบบหน่วงเวลา ควรเลือกใช้กับมอเตอร์ที่สำคัญมากในการปฏิบัติงาน ที่ต้องการความต่อเนื่องของขบวนการผลิต ซึ่งป้องกันการปลดออกจากวงจรโดยไม่จำเป็น) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกเกิดจากการลัดวงจรภายนอก ดังนั้น การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัดมีผลเสีย คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพยายามดึงกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายมากขึ้นผิดปกติ เพื่อชดเชยกำลังที่สูญเสีย และแรงบิดที่ขาดหายไปจากแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ที่จะขับโหลดทางกล จึงทำให้เกิดความร้อนสูญเสียภายในมอเตอร์มากขึ้น เมื่อเทียบได้กับการขับโหลดเกินของมอเตอร์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำลง โดยความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ปรากฏที่โหลดทางกล กับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับแสดงได้สมการ [6]

$$T_a = \left[\left(\frac{V_s}{V_r} \right)^2 * T_m \right] - T_L \qquad (3.2)$$

เมื่อ T_a คือ **แรงบิดที่ใช้เร่งการหมุนของโหลดโดยเฉลี่ย**

V_s คือ **แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์**

V_r คือ **แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์**

T_m คือ **แรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์**

T_L คือ **แรงบิดที่โหลด**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานมอเตอร์ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่า 0.3 Sec ถือได้ว่าไม่ควรใช้งานมอเตอร์นั้น จนกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติดังกล่าวผ่านพ้นไป ดังนั้น เมื่อพบว่าเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ต้องหยุดการทำงานมอเตอร์ ในขณะเดียวกันต้องแยกสภาพการเกิดแรงดันไฟฟ้าต่ำชั่วขณะเป็นเวลาสั้น ๆ.หรือ น้อยกว่า 0.3 Sec ต้องไม่ทำให้เกิดการหยุดทำงานของมอเตอร์โดยไม่จำเป็น

3.2.2.3 **การป้องกันเฟสไม่สมดุล** (Phase Unbalance Protection)

การป้องกันมอเตอร์ที่ได้รับความเสียหายจากความร้อนเกินเกิดขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยมีสาเหตุ 2 ประการ คือ

1. **การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเฟสที่ไหลในมอเตอร์** เพื่อให้จ่ายกำลังอย่างต่อเนื่อง ให้ได้เท่ากับแรงดันไฟฟ้ายังสมดุลอยู่

2. **แรงดันลำดับลบ** (Negative Sequence) ที่ปรากฏขึ้นและก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติไหลในโรเตอร์ เนื่องจากค่า Negative Sequence Impedance ของมอเตอร์มีค่าประมาณ Locked Rotor Impedance ดังนั้น เพียงค่าแรงดันลำดับลบที่ต่ำจะสร้างกระแส ไฟฟ้าลำดับลบขนาดสูงได้

การเกิดแรงดันไฟฟ้าเฟสไม่เท่ากัน (Phase Unbalance) อาจเกิดจาก แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ไม่เท่ากัน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกของแต่ละเฟสก่อนเข้ามอเตอร์ไม่เท่ากัน หรือ เกิดการลัดวงจรแบบไม่สมดุลที่ระบบไฟฟ้า และสายไฟฟ้าเส้นหนึ่งที่จ่ายให้มอเตอร์ไม่มีไฟเลี้ยง ทำให้มีไฟเพียง 2 เส้น ที่จ่ายไฟให้มอเตอร์สภาพเช่นนี้ เรียกว่าการเกิด Single Phasing

ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสนั้น เมื่อจ่ายกำลังให้กับโหลดในแต่ละเฟสไม่สมดุล โดยรวมแรงดันไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งที่หายไปด้วย ซึ่งเป็นกรณีที่มีความรุนแรงมากที่สุด และไม่เหมาะสมให้มอเตอร์ทำงานเป็นอย่างยิ่ง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างไม่สมดุลในมอเตอร์ และมีปริมาณที่มากผิดปกติทำให้เกิดความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นมาก ถ้าโหลดทางกลที่มอเตอร์ขับอยู่นั้นมีปริมาณ 80%ถึง 100%ที่พิกัดของแรงบิดมอเตอร์นั้น ทำให้เกิดสภาพล็อคโรเตอร์ (Lockrotor) หรือ มอเตอร์หยุดหมุนทันทีที่ปริมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น มีค่ามากเทียบเท่าได้กับการเกิดสภาพล็อคโรเตอร์ขณะทำการเดินเครื่อง ในการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล หาได้จากองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component Analysis) [8] ซึ่งแยกองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, ลบ และศูนย์ ออกจากองค์ประกอบสมมาตรเดิมของระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_a,\ V_b,\ V_c$ คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส *A*, เฟส *B*,เฟส *C*

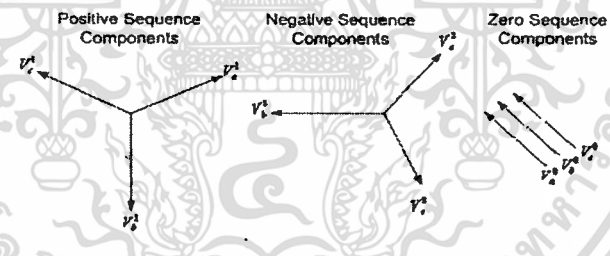
$V_a^0,\ V_a^1,\ V_a^2$ คือ แรงดันไฟฟ้าลำดับ ศูนย์, บวก, ลบ

a คือ Operator $1\angle 120^\circ \left(1e^{j120}\right)$

จากสมการที่ 3.3 หาค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ลำดับต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

จากแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส แยกเป็นเวกเตอร์ที่มีองค์ประกอบสมมาตรต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 เวกเตอร์ที่มีองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, ลบ และศูนย์

จากรูปเขียนองค์ประกอบสมมาตรแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้ คือ

- องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก

$$\left.\begin{aligned} V_a^1 &= V_a \\ V_b^1 &= a^2 V_a \\ V_c^1 &= a V_a \end{aligned}\right\} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

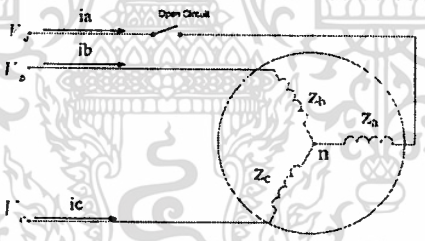
- องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบ

$$\left.\begin{aligned} V_a^2 &= V_a \\ V_b^2 &= a V_a \\ V_c^2 &= a^2 V_a \end{aligned}\right\} \tag{3.6}$$

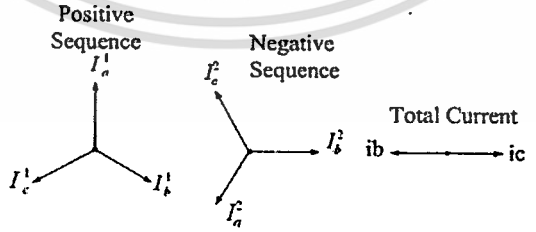
- องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์

$$\left.\begin{aligned} V_a^0 &= V_a \\ V_b^0 &= V_b \\ V_c^0 &= V_c \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.5 ทำได้โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบสมมาตรได้จากสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 แสดงได้ดังองค์ประกอบสมมาตรลำดับต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.6 [3], [8]



รูปที่ 3.5 การเกิดขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง



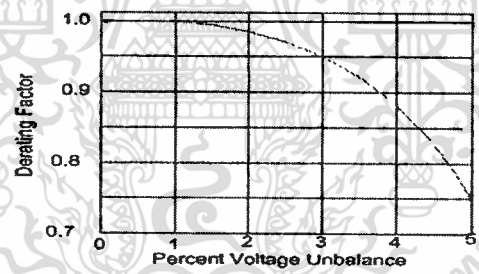
$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \ (Open\ Circuit\ in\ a-Phase)$$
$$I_b = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 = -j\sqrt{3} I_a^1$$
$$I_c = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 = +j\sqrt{3} I_a^1$$

รูปที่ 3.6 องค์ประกอบสมมาตรที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ [illegible] ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะเกิดองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าสมมาตรลำดับลบไหลในวงจรมอเตอร์ ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก และทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางสวนกับสนามแม่เหล็กหมุนเดิม ทำให้ตัวนำบนโรเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น จึงได้สนามแม่เหล็กรวมด้วยอัตราการหมุนตัดตัวนำที่ความถี่เชิงมุมเป็น 2 เท่าของความถี่เชิงมุมปกติ $(2\omega_s)$ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) บนตัวนำโรเตอร์มากขึ้น [9], [11] จึงเกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้นผิดปกติ เช่น แรงดันไฟฟ้า หรือ กระแสไฟฟ้าไม่สมดุล 5% ของค่าพิกัดปกติ จะเกิดองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบเพิ่มขึ้นประมาณ 30%ของค่าปกติ และทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากปกติประมาณ 40% ถึง 50%

ดังนั้น ในการป้องกันสภาวะไม่สมดุลที่เกิดขึ้นต้องปลดวงจรมอเตอร์ออกจากระบบทันทีที่เกิดสภาวะไม่สมดุล ในกรณีที่เกิดสภาวะความไม่สมดุลเพียงเล็กน้อยประมาณ 5% ของพิกัดปกติทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ระบบป้องกันต้องให้มอเตอร์ทำงานต่อไปเพียงบอกความผิดปกตินั้นให้ผู้ใช้ทราบเพียงอย่างเดียว ในบางครั้งมีความจำเป็นต้องให้มอเตอร์ทำงานในสภาวะไม่สมดุลได้ โดยทำการลดปริมาณของโหลดที่มอเตอร์ขับลงให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดความร้อนสูญเสียในมอเตอร์อยู่ในข้อกำหนดของ NEMA ดังรูปที่ 3.7 [12]



รูปที่ 3.7 Motor Unbalance derating Curve,NEMA

3.2.2.4 **สภาวะการไม่หมุน หรือ หมุนกลับทิศทาง** [1], [5]

การป้องกัน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Protection Against Failure to Rotation
   - **เมื่อเกิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า** 3 **เฟส ขาดหายไปแล้วกลายเป็น** Single Phasing
   - **ถ้ามอเตอร์ หรือ** Driven Load **ถูกตรึงอยู่กับที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่ได้**
2. Protection Against Reverse Rotation
   - **การที่มอเตอร์หมุนกลับทางนั้น เกิดจากการสลับเฟสของไฟฟ้า** 3 **เฟส**
   - **การหมุนกลับทางอาจเกิดความเสียหายทางกลอย่างมาก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ลำดับแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสเรียงลำดับผิดจากสภาวะปกติที่มีการใช้งานอยู่ ซึ่งสาเหตุเกิดจากระบบส่งจ่าย หรือ เกิดการไขว้สาย (Transpesed Line) เพื่อรักษาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายส่งให้มีค่าอยู่ในข้อกำหนดในการส่งพลังงานไฟฟ้า โดยเวกเตอร์ของการเรียงลำดับเฟสปกติแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ก) และเวกเตอร์ลำดับเฟสผิดปกติแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ข)



ก) ลำดับเฟสเรียงจาก ABC ข) ลำดับเฟสเรียงจาก ACB

รูปที่ 3.8 สภาวะการเรียงลำดับเฟส

ผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีเกิดการกลับเฟสแก่มอเตอร์ คือ ทำให้เพลามอเตอร์หมุนกลับทิศทางเดิม ถ้าโหลดทางกลที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์นั้น มีการทำงานที่ไม่สามารถให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ จะทำให้เกิดความเสียหายกับโหลด หรือ กระบวนการผลิตนั้น ๆ

3.2.2.5 การป้องกันความถี่สูง-ต่ำกว่าปกติ (Over/Under Frequency) [9], [26]

ในการป้องกันความถี่สูง – ต่ำกว่าปกติ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำกว่าปกติ และความร้อนในขดลวดสเตเตอร์เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์จะพิจารณาที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำงานเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า มีการเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีแกนเหล็กเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงและถ่ายทอดพลังงาน หาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = 4.44 k_w N_{ph} \phi f \tag{3.8}$$

เมื่อ E คือ แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับ (V)

k_w คือ ค่าคงที่ของการพันขดลวด

N_{ph} คือ จำนวนรอบขดลวดที่สเตเตอร์ $(Turn)$

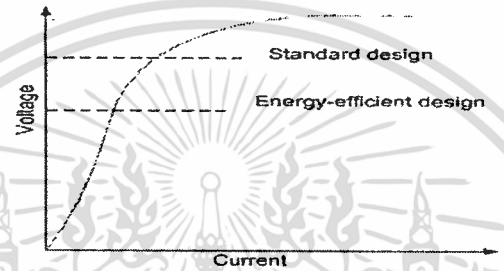
f คือ ค่าความถี่ที่มอเตอร์ได้รับ (Hz)

ϕ คือ ค่าของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ ถ้ามีการเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า (E) และความถี่ (f) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์ถูกออกแบบให้ทำงานได้ดีสุดที่ค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่คงที่ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ [5]

1. **แรงดัน E เพิ่ม หรือ ค่าความถี่ f เพิ่มขึ้น** เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากความถี่เหนี่ยวนำลดลง เรียกว่า การกระตุ้นเกิน (Over Excitation) ทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว ความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้น เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนฮีสเตอร์รีซีสในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลงกว่าปกติที่โหลดค่าเดียวกัน



รูปที่ 3.9 การกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2. **แรงดัน E ลด หรือ ค่าความถี่ f ลดลง** เมื่อเกิดสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าลดลง อาจเกิดจากความถี่เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ที่เรียกว่า การกระตุ้นต่ำ (Under Excitation) ทำให้มอเตอร์มีแรงบิดที่เพลาลดลงกว่าค่าปกติ ไม่สามารถขับโหลดได้ มอเตอร์ทำการดึงกระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่สร้างแรงบิดชดเชยกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง หรือ ความถี่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความสูญเสียในขดลวดเพิ่มมากกว่าปกติ ในขณะที่ขับโหลดเดียวกัน และมอเตอร์มีประสิทธิภาพลดลงกว่าปกติ

3.2.2.6 สภาวะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์ [1], [5], [13], [14]

การป้องกันโหลดเกิน เป็นการตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์เป็นระยะเวลานาน ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้รีเลย์ทำการตัดก่อนที่ตัวมอเตอร์ได้รับความเสียหาย สำหรับมอเตอร์ที่มีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในขดลวดจะหยุดการทำงาน เมื่อขดลวดมีอุณหภูมิสูงเกินกว่าชั้นของฉนวน บางครั้งอาจจะไม่สั่งให้มอเตอร์หยุดการทำงาน แต่มีสัญญาณเตือนให้ผู้ใช้งานทราบ ซึ่งสภาวะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์ จำแนกรายละเอียดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การตรวจวัดอุณหภูมิสภาวะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์ ทำได้ดังนี้

1) Resistance Temperature Detectors สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่จะมี Detector จำนวน 6 ตัว ฝังอยู่ใน Winding Slots รอบ ๆ แกนมอเตอร์ เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิทุกเฟส ที่มีค่าใช้งาน 10Ω หรือ 120Ω โดยค่าความต้านทานจะแปรผันตามอุณหภูมิ

2) Thermocouples เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือ ความร้อนเป็นแรงดันไฟฟ้า แบ่งได้ 7 ชนิด คือ

- Thermocouples Type S วัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 1,550°C และอุณหภูมิช่วงสั้น มีค่าประมาณ -50°C ถึง 1,700°C

- Thermocouples Type R ให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตสูงกว่าแบบ S วัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 1,600°C และอุณหภูมิช่วงสั้น มีค่าประมาณ -50°C ถึง 1,700°C

- Thermocouples Type B วัดอุณหภูมิตั้งแต่ 100°C ถึง 1,600°C และอุณหภูมิช่วงสั้น มีค่าประมาณ 50°C ถึง 1,750°C

- Thermocouples Type J วัดอุณหภูมิตั้งแต่ -210°C ถึง 1,200°C

- Thermocouples Type K วัดอุณหภูมิตั้งแต่ -180°C ถึง 1,350°C

- Thermocouples Type T วัดอุณหภูมิตั้งแต่ -185°C ถึง 300°C และอุณหภูมิช่วงสั้น มีค่าประมาณ -250°C ถึง 400°C

- Thermocouples Type E วัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 800°C

3) Thermistors แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- Positive Temperature Coefficient Type (PTC) เป็นแบบที่ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

- Negative Temperature Cofficient Type (NTC) เป็นแบบที่ความต้านทานมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ

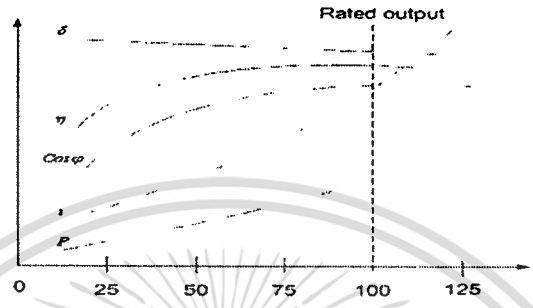
การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่กำหนดกำลังให้ขับโหลดใช้งานได้ บางครั้งต้องให้มอเตอร์ขับโหลดเกินกำลังที่กำหนดไว้ และต้องพิจารณาถึงชนิดชั้นของฉนวนที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์นั้น ๆ การกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ เป็นลักษณะใดนั้นกำหนดได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 : ช่วงกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่มากกว่า 2 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงานปกติ เกิดจากการล็อคโรเตอร์ หรือ การลัดวงจรภายในมอเตอร์ขึ้น สาเหตุเกิดจากความผิดปกติทางกล ทำให้เกิดการล็อคของเพลา จนตลับลูกปืนเสียหายไม่สามารถหมุนได้

ช่วงที่ 2: ช่วงกระแสไฟฟ้าโหลดเกินรวมทั้งช่วงทำงานของมอเตอร์ คือ ช่วงทำงานที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 3 - 8 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด และช่วงโหลดเกินตั้งแต่ 100% - 200% ของ FLC เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงานกระทั่งมีความเร็วที่พิกัด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลขับอยู่ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่โหลดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100% - 200% ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด สาเหตุมาจากการปรับตั้งแนวเพลามอเตอร์กับโหลดไม่เหมาะสม นอกจากนี้อาจเกิดหล่อลื่นของเพลากับตลับลูกปืนที่ไม่ดีพอ และการบิดเบี้ยวของแนวแกนเพลาโรเตอร์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบางตัวทำให้เกิดสภาพโหลดเกินในมอเตอร์ขึ้นได้ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

ช่วงที่ 3 : ช่วงกระแสไฟฟ้าใช้งานมอเตอร์ตามปกติ ตั้งแต่ 10-120% ของ FLC เป็นการขับโหลดน้อยกว่าพิกัด

ผลของโหลดเกินทำให้เกิดความร้อนสูญเสียมากผิดปกติ และสะสมในตัวมอเตอร์จนอุณหภูมิขึ้นไปถึงขีดจำกัดของชั้นฉนวน ถ้าปริมาณโหลดเกินพิกัดมาก หรือ เป็นระยะเวลานาน ดังนั้น พิกัดหนึ่ง ๆ สามารถรับโหลดเกินได้อย่างจำกัด ทั้งในส่วนของปริมาณ และระยะเวลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อม ขีดจำกัดชั้นฉนวนและการระบายความร้อนที่โครงมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อม และขีดจำกัดของชั้นฉนวน ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าอุณหภูมิของชั้นฉนวนชนิดต่าง ๆ

อุณหภูมิแวดล้อม $^{\circ}C$	Maximum Temp. Rise of Insulation Class ($^{\circ}C$)				
	A(105°)	E(120°)	B(130°)	F(155°)	H(180°)
30	75	90	100	125	150
40	65	80	90	115	140

2. การถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุทำได้ 3 วิธี [13], [15], [16]

การนำความร้อน (Conduction) คือ การเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือ เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อน ระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน เป็นการเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic Motor) หรือ การชนกันโดยตรงของโมเลกุลเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง กรณีของโลหะที่เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีหลักการคำนวณที่ถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเยร์ นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ซึ่งโฟริเยร์ ได้เสนอสมการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ความร้อนดังสมการ

$$q_x = -kA\left(\frac{dt}{dx}\right) \tag{3.9}$$

เมื่อ q_x คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำความร้อน (W)

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของสสารที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่านมีหน่วยเป็น $W/m^{\circ}C$ ในระบบ SI

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน $(m)^2$

$\frac{dt}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

การพาความร้อน (Convection) คือ การเคลื่อนที่ระหว่างผิวของแข็งกับของไหล โดยของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือ พาความร้อนจากผิวของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อน เกิดจากผลรวมการนำความร้อนและการเคลื่อนของไหล แบ่งเป็นการพาโดยการบังคับ (Forced Convection) กับ การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free Convection) มีหลักการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ ดังสมการต่อไปนี้

$$q = hA\left(T_h - T_c\right) \tag{3.10}$$

เมื่อ q คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาความร้อน(W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m^{\circ}C$

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน $(m)^2$

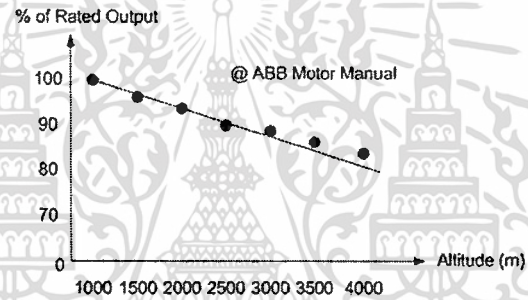
T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า $(^{\circ}C)$

T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า $(^{\circ}C)$

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ การเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลาง การแผ่รังสีได้ดีที่สุดในสุญญากาศ แต่ในวัสดุที่เป็นโลหะนั้นมีค่าน้อยมากจึงไม่มานำคิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

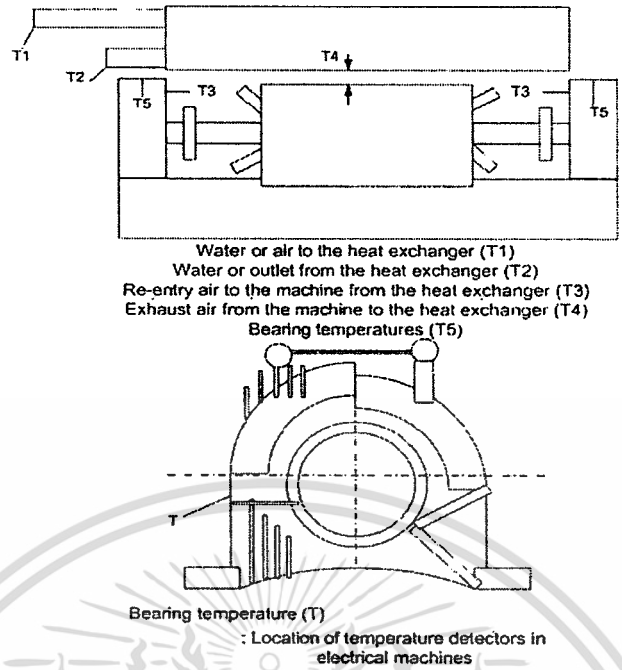
3. **สภาวะอุณหภูมิเกินในมอเตอร์** มีสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจนเกินพิกัดชั้นฉนวน และโครงสร้างของมอเตอร์ได้ เช่น อุณหภูมิแวดล้อมสูงเกินกว่า $40^{\circ}C$ ตามมาตรฐาน IEC, มอเตอร์มีการระบายความร้อนออกจากตัวไม่เพียงพอ เนื่องจากมีฝุ่นละอองปกคลุมพื้นผิวของมอเตอร์มาก หรือ เกิดจากบริเวณที่ติดตั้งใช้งานมอเตอร์นั้นมีความกดอากาศต่ำ เนื่องจากพื้นที่ติดตั้งอยู่สูงจากระดับใช้งานปกติ (MSL) มาก ซึ่งมีความหนาแน่นของอากาศต่ำ ทำให้อากาศที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน (Coolant medium) นั้นมีน้อย เกิดผลกระทบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างการระบายความร้อนโดยตรงกับอากาศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์ในลักษณะนี้ ต้องมีการลดภาระโหลดทางกลที่ขับลงเป็นสัดส่วนตามความสูงของพื้นที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.11 [6] เพื่อเป็นการรักษาสภาพการเพิ่มของอุณหภูมิในมอเตอร์ให้อยู่ในพิกัดของชั้นฉนวนของมอเตอร์



รูปที่ 3.11 การลดพิกัดมอเตอร์ลงตามระดับความสูง

การตรวจวัดอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ ต้องเลือกจุดที่วัดได้ถูกต้องและติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว โดยอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ที่ใช้มีหลายประเภท เช่น อาร์ทีดี (Resistance Temperature Detector: RTD) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ, เทอร์โมคัปเปิลที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวมันเองแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสภาพแวดล้อมตัวมัน เป็นต้น ดังนั้นตำแหน่งในการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิของมอเตอร์แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ตัววัดอุณหภูมิของมอเตอร์

4. **ข้อดีข้อเสียของตัววัดอุณหภูมิ** จำแนกได้ดังนี้

- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ให้สัญญาณทางด้านเอาต์พุตต่ำ, เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิต่ำ และต้องมีการชดเชยค่าที่ถูกต้อง ส่วนมากใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

- อาร์ทีดี (RTD) ให้เอาต์พุตเป็นความต้านทานมีค่าน้อยและมีราคาแพงส่วนมากใช้ในห้องทดลอง

- เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) มีความเป็นเชิงเส้นน้อยให้เอาต์พุตเป็นความต้านทานมีค่าต่ำ ส่วนมากใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิ

5. **ผลกระทบเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน** จะมีผลกระทบต่อมอเตอร์จากสภาวะโหลดเกินโดยอาศัยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานทุกตัวในวงจรสมมูลจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความร้อนสูญเสีย และค่าความต้านทานสมมูลของโรเตอร์ $\left(R_r'\right)$ ได้ทำการถ่ายโอน (Refer) ไปยังด้านปฐมภูมิของวงจรสมมูลแล้วนั้น สามารถแปรค่าได้ โดยขึ้นอยู่กับค่าสลิปที่แปรค่าตั้งแต่ $0 \le S \le 1$ ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบของเพลามอเตอร์ที่ขับโหลดอยู่ เนื่องจากมอเตอร์ถูกออกแบบมาให้ทำงานในลักษณะของกำลังทางเอาต์พุตคงที่ (Constant Power output) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดทางกลที่เพลามอเตอร์ส่งผลให้ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยในลักษณะผกผันกัน (จากสมการ $P = T\omega$) ทำให้ค่าสลิปเปลี่ยนแปลงด้วย (จากสมการที่ 2.7) ดังนั้น ค่าความต้านทานสมมูลของโรเตอร์จึงเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามไปด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงรวมค่า R_r' และ $R_r\left(\frac{1-S}{S}\right)$ ให้เป็นเทอมเดียวกัน คือ (R_r'/S) การคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียภายในมอเตอร์ดังนี้

$$Rotor\ Loss = 3I_r'^2(R_r'/S) \tag{3.11}$$

$$Stator\ Loss = 3I_s^2 R_s \tag{3.12}$$

ดังนั้น $$Total\ Power\ Loss = 3I_r'^2\left(R_r'/S\right) + 3I_s^2\left(R_s\right) \tag{3.13}$$

จากรูปที่ 2.6 เมื่อไม่พิจารณาส่วนของกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetization Current) I_m แล้ว เนื่องจาก $I_s \gg I_m$ และ $T_r \gg I_m$ ดังนั้น $I_s \cong T_r$

ดังนั้น $$Total\ Power\ Loss = 3I_s^2(R_r'/S + R_s) \tag{3.14}$$

เมื่อ R_r' คือ ค่าความต้านทานสมมูลโรเตอร์ที่ถูกถ่ายโอนไปด้านสเตเตอร์

$R_r' = \alpha^2 R_r$ เมื่อ $\alpha = E_s/E_{rr}$ เป็นอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์ ซึ่ง α เทียบได้กับอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า จากสมการที่ 3.14 คือ กำลังความร้อนสูญเสียที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่ทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากปกติ เมื่อใช้มอเตอร์ขับโหลดทางกล ซึ่งมีปัจจัยหลัก คือ ค่ากระแสไฟฟ้ามอเตอร์ (I_s) ที่แปรตามปริมาณโหลดทางกล นอกจากนั้น โครงสร้างของมอเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวด้วย

6. **ทฤษฎีการเพิ่มและลดอุณหภูมิของมอเตอร์** [5] โดยการพิจารณาให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีโครงสร้างโดยรวมเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Uniform and Homogenius) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ใช้หลักการสมดุลของพลังงานในสสาร คือ

ก) พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในมอเตอร์ ณ ช่วงเวลาใด ๆ คือ Pdt

ข) พลังงานสูญเสียออกจากมอเตอร์ในรูปแบบของการระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกแปรค่าตามสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นโครงสร้างมอเตอร์ (λ) พื้นผิวภายนอกของมอเตอร์ (A), ความแตกต่างอุณหภูมิขณะระบายความร้อน ณ เวลาใดๆ dt

ค) พลังงานสะสมในตัวมอเตอร์ จะแปรตามค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุโครงสร้างมอเตอร์ (C), มวลของมอเตอร์ (M) และส่วนความแตกต่างอุณหภูมิ dT_m ที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ก) ถึง ค) นำมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลพลังงานความร้อน

$$Pdt = A\lambda T_m dt + CMdT_m \tag{3.15}$$

เมื่อ P หมายถึง กำลังสูญเสียภายในมอเตอร์ โดยทั่วไป พิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งหมายถึง การเกิดความร้อนสูญเสียจากกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทานภายในมอเตอร์จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่มีอัตราการระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกสมดุลกับความร้อน ดังนั้น $dT_m = 0$ และ $T_m = P/A\lambda$ ซึ่งกำหนดให้เป็น T_{fin} ณ จุด Steady-State จากสมการที่ 3.15 จะได้

$$Pdt - A\lambda T_m dt = CMdT_m \tag{3.16}$$

$$(P/A\lambda)dt - T_m dt = (CM/A\lambda)dT_m \tag{3.17}$$

เมื่อแทนค่า $T_{fin} = P/A\lambda$ และกำหนด $\tau_m = CM/A\lambda$ แทนลงในสมการที่ 3.17 ดังนั้นจะได้

$$T_{fin}dt - T_m dt = \tau_m dT_m \tag{3.18}$$

$$(T_{fin} - T_m)dt = \tau_m dT_m \tag{3.19}$$

$$\frac{1}{\tau_m}dt = \frac{1}{(T_{fin} - T_m)}dT_m \tag{3.20}$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับ 1 มีค่าดังนี้

$$T_m(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m}) + T_{sm}e^{-t/\tau_m} \tag{3.21}$$

โดยที่ $T_{fin} = T_{sm}$ และ τ_m คือ ค่าคงตัวเวลาของการเพิ่มและลดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{fin} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้นคงที่ ณ จุด Steady-State โดยทั่ว ๆ ไปจะอยู่ที่เวลา $t \geq 4\tau_m$ จากสมการที่ 3.21 แยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิ และส่วนของการลดอุณหภูมิ คือ

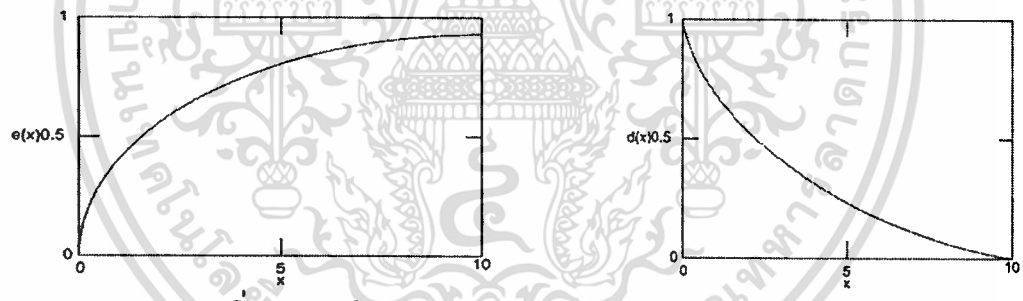
$$T_h(t) = T_{fin}\left(1 - e^{-t/\tau_m}\right) \tag{3.22}$$

เป็นสมการที่แสดงการเพิ่มอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เป็นฟังก์ชั่นของเวลา คือ $T_h(t)$

$$T_c(t) = T_{sm}e^{-t/\tau_m} \tag{3.23}$$

เป็นสมการที่แสดงการลดอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เป็นฟังก์ชั่นของเวลา คือ $T_c(t)$

โดยที่ T_{sm} มีค่าเท่ากับ T_{fin} ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดจากอุณหภูมิปกติจนถึงตำแหน่งที่มีการหยุดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อ $t \geq \tau_m$ กราฟของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามสมการที่ 3.22 และ3.23 ดังรูปต่อไปนี้



ก) การเพิ่มอุณหภูมิ ข) การลดอุณหภูมิ

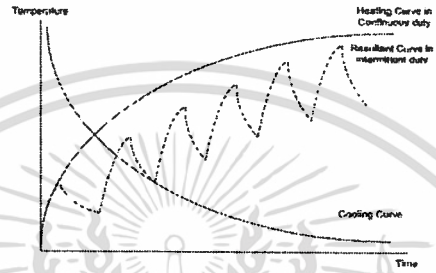
รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สำหรับโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจริง ๆ นั้น ประกอบด้วยสารต่าง ๆ หลายชนิดทั้งส่วนที่เป็นโลหะ และอโลหะ ที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางความร้อนแตกต่างกันไปทำให้สภาพการเปลี่ยนแปลงเพิ่ม และลดอุณหภูมิภายในมอเตอร์นั้นมีความซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์โดยทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากองค์ประกอบของพารามิเตอร์ในสมการที่ 3.15 นั้นมีจำนวนของนิพจน์มากขึ้นตามชนิดของสาร แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง [5] แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่ม และลดอุณหภูมิที่มีลักษณะของกราฟเอ็กซ์โพเนลเซียล ถ้าในกรณีที่สสารนั้นเป็นโลหะมีค่าความร้อนที่ดีแนวโน้มการเพิ่ม และลดอุณหภูมิมีลักษณะเข้าใกล้กราฟเอ็กซ์โพเนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชียลมากขึ้น การใช้ทฤษฎีเพิ่ม ลดอุณหภูมิในสสารนั้นมาใช้อธิบาย และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในมอเตอร์ โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาว่ามอเตอร์นั้นประกอบด้วยสารเนื้อเดียวกันส่วนใหญ่เป็นโลหะ

ในกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในมอเตอร์เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง คือ ในลักษณะของการเดินเครื่องแบบเป็นช่วงจังหวะ (Intermittent duty) และถ้ามอเตอร์นั้นมีสภาพการนำความร้อนที่ดีมากจะได้ลักษณะการเพิ่มและการลดอุณหภูมิในมอเตอร์เป็นดังรูปที่ 3.14

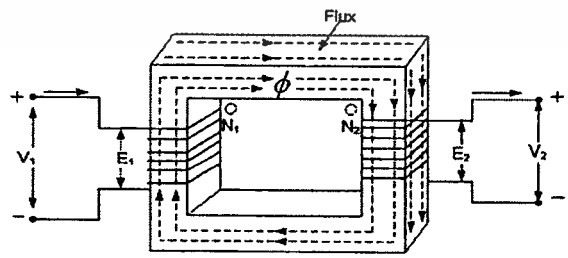


รูปที่ 3.14 อุณหภูมิมอเตอร์เมื่อใช้งานแบบช่วงจังหวะ

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์ตัวตรวจวัด

3.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Potential Transformer) [9], [10], [24]

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งในการเพิ่ม หรือ ลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กแบบปิด จะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแกนเหล็ก ถ้ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มีการเปลี่ยนแปลงไปมา สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปมาด้วย ถ้านำขดลวดอีกขดมาพันรอบแกนนี้ จะเกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น เรียกหลักการนี้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ลักษณะหม้อแปลงแบบสองขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบอุดมคติ คือ ไม่มีการสูญเสียที่แกนเหล็ก โดยไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และไม่มีค่าสูญเสียในขดลวดทองแดง เมื่อไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล หมายความว่า เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดสามารถเชื่อมโยงอยู่ระหว่างขดลวดทั้งสอง การเหนี่ยวนำของขดลวดทั้งสองเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) ของ e_1 และ e_2 จะเกิดขึ้นที่ขดลวด N_1 และ N_2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ต่อเวลา แสดงได้ดังนี้

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \tag{3.24}$$

และ

$$e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \tag{3.25}$$

โดยทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_1 จะตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ โดยหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนคงที่ คือ $e_1 = V_1$ เมื่อนำสมการที่ 3.24 หารด้วย 3.25 จะได้ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบขดลวดและแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \tag{3.26}$$

เมื่อ e_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V)

e_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)

N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ $(Turn)$

N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ $(Turn)$

a คือ อัตราส่วนของหม้อแปลง

ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ดังสมการต่อไปนี้

$$\varphi = \phi_{max} Sin(\omega t) \tag{3.27}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.27 แทนในสมการที่ 3.24 และ 3.25 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นซึ่งมีขดลวด N รอบ แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= \omega N_1 \phi_m Cos(\omega t) \\ e_2 &= \omega N_2 \phi_m Cos(\omega t) \end{aligned}\right\} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ 3.28 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ e_1 จะมีเฟสนำหน้า φ เป็นมุม 90° เพราะฉะนั้นจะได้ค่าของ rms (Root Mean Square) ดังสมการต่อไปนี้

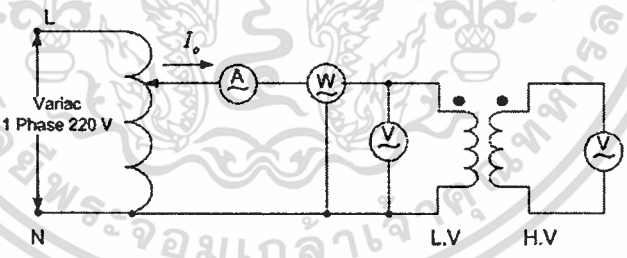
$$\left.\begin{aligned} E_1 &= 4.44 f N_1 \phi_{\max} \\ E_2 &= 4.44 f N_2 \phi_{\max} \end{aligned}\right\} \quad (3.29)$$

3.3.1.1 **การทดสอบหม้อแปลง**

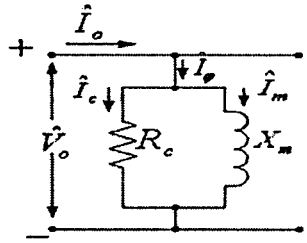
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าทำตามมาตรฐาน IEC 76-1976 [18] เพื่อดูคุณสมบัติของหม้อแปลง ทำได้ 2 วิธี

1. **การทดสอบแบบเปิดวงจร** (Open Circuit Test)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจรดังรูปที่ 3.16 โดยที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (H.V) ไม่มีโหลด และป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านทุติยภูมิ (L.V) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เท่ากับพิกัดของแรงดันไฟฟ้า แล้วทำการวัดค่าต่าง ๆ เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น แล้วนำมาหาค่าพารามิเตอร์ และนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบเปิดวงจร ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 วงจรการทดสอบแบบเปิดวงจร



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณค่าจากการทดสอบแบบเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_o = V_o I_o Cos(\theta_0) \text{ (Core Loss)} \tag{3.30}$$

$$I_c = I_o Cos(\theta_o) \tag{3.31}$$

$$I_m = I_o Sin\theta_o = \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \tag{3.32}$$

เมื่อ P_o คือ กำลังไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (W)

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)

I_o คือ กระแสไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (A)

I_c คือ กระแสไฟฟ้าสูญเสียในลวดทองแดง (A)

I_m คือ กระแสไฟฟ้าสูญเสียในสนามแม่เหล็ก (A)

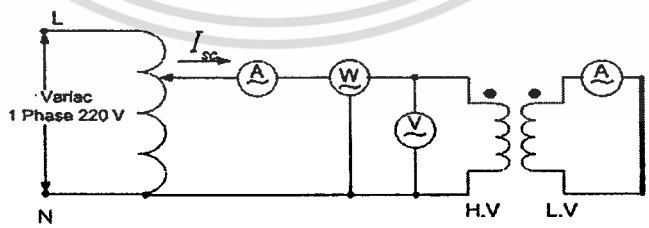
θ_0 คือ มุมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

R_c คือ ค่าความต้านทานที่แกนเหล็กขณะเปิดวงจร (Ω)

X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็กขณะเปิดวงจร (Ω)

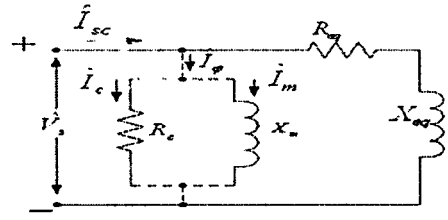
2. **การทดสอบแบบลัดวงจร** (Short Circuit Test)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจรดังรูปที่ 3.18 โดยที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิถูกลัดวงจร และป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านปฐมภูมิจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับกระแสที่พิกัดของทางด้านปฐมภูมิ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น แล้วนำมาหาค่าพารามิเตอร์ และนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบลัดวงจร ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณค่าจากการทดสอบแบบลัดวงจร

$$P_s = V_s I_s Cos(\theta_s) \text{ (Copper Loss)} \tag{3.33}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \tag{3.34}$$

$$R_{eq} = \frac{P_s}{I_s^2} \tag{3.35}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \tag{3.36}$$

เมื่อ P_s คือ กำลังไฟฟ้าขณะลัดวงจร (W)

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (V)

I_s คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)

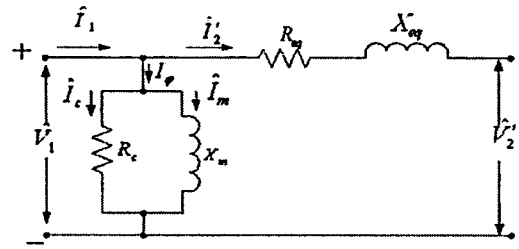
Z_{eq} คือ อิมพีแดนซ์โดยรวมขณะลัดวงจร (Ω)

R_{eq} คือ ค่าความต้านทานขณะลัดวงจร (Ω)

X_{eq} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ขณะลัดวงจร (Ω)

θ_s คือ มุมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 วิธี นำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยประมาณได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปค่าความต้านทานที่ย้ายจากด้านปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิ หรือ ทุติยภูมิมาปฐมภูมิ โดยใช้อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง (Transformation ratio) เพื่อทำให้ความต้านทาน แรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ย้ายมาไม่เกิดการคลาดเคลื่อนมากนัก หาได้ดังนี้

$$a = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{3.37}$$

ค่าของการย้ายต่าง ๆ จากปฐมภูมิมาทุติยภูมิ หรือ ทุติยภูมิมาปฐมภูมิ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การย้ายค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงต่างๆ

ขดลวดปฐมภูมิมาทางด้านขดลวดทุติยภูมิ	ขดลวดทุติยภูมิมาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ
$v_1' = \frac{v_1}{a}$	$v_2' = av_2$
$i_1' = a\,i_1$	$i_2' = \frac{i_2}{a}$
$R_1' = \frac{R_1}{a^2}, Z_1' = \frac{Z_1}{a^2}, x_1' = \frac{x_1}{a^2}$	$R_2' = a^2R_2, Z_2' = a^2Z_2, x_2' = a^2x_2$

เมื่อ v_1', v_2' คือ แรงดันไฟฟ้าที่ย้ายจากปฐมภูมิมาทางทุติยภูมิ (V) / แรงดันไฟฟ้าที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางปฐมภูมิ (V)

i_1', i_2' คือ กระแสไฟฟ้าที่ย้ายจากปฐมภูมิมาทางทุติยภูมิ (A) / กระแสไฟฟ้าที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางปฐมภูมิ (A)

R_1', R_2' คือ ความต้านทานที่ย้ายจากปฐมภูมิมาทางทุติยภูมิ (Ω) / ความต้านทานที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางปฐมภูมิ (Ω)

x_1', x_2' คือ รีแอกแตนซ์ที่ย้ายจากปฐมภูมิมาทางทุติยภูมิ (Ω) / รีแอกแตนซ์ที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางปฐมภูมิ (Ω)

Z_1', Z_2' คือ อิมพีแดนซ์ที่ย้ายจากปฐมภูมิมาทางทุติยภูมิ (Ω) / อิมพีแดนซ์ที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางปฐมภูมิ (Ω)

ค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงไป ตอนที่ยังไม่ได้จ่ายไฟไปยังตอนที่จ่ายไฟเต็มที่ หาได้ดังนี้

$$\%\,Reg = \frac{E_2 - v_2}{E_2} * 100 \tag{3.38}$$

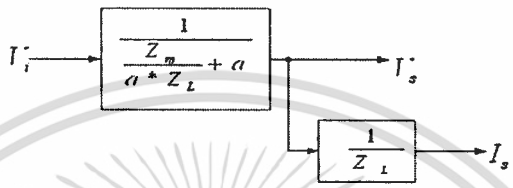
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\%\mathrm{Re}g$ คือ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง

E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิขณะที่ไม่จ่ายไฟ (V)

v_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิขณะที่จ่ายไฟเต็มที่ (V)

จากตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.20 เมื่อมีการย้ายค่าพารามิเตอร์จากทุติยภูมิมาปฐมภูมิ นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 บล็อกไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ย้ายจากทุติยภูมิมาทางด้านปฐมภูมิ

เมื่อ V_i คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (ปฐมภูมิ) (V)

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (ทุติยภูมิ) (V)

Z_m คือ Iron Impedance (Ω)

Z_L คือ Load Impedance (Ω)

a คือ Transformation ratio

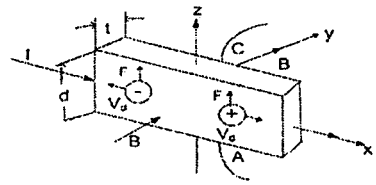
3.3.2 **ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแส** (Current Transducer) [6],[7],[14],[19],[20]

ในการตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าในที่วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้อุปกรณ์ที่ เรียกว่า ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Current Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับกระแสไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานดังนี้

3.3.2.1 **หลักการทำงานของฮอลล์เอฟเฟกต์**

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ หรือ แผ่นตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า "Hall Effect" ที่เป็นผลมาจากการเบี่ยงเบนของประจุพาหะจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของแผ่นตัวนำ ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนประจุพาหะของตัวนำ

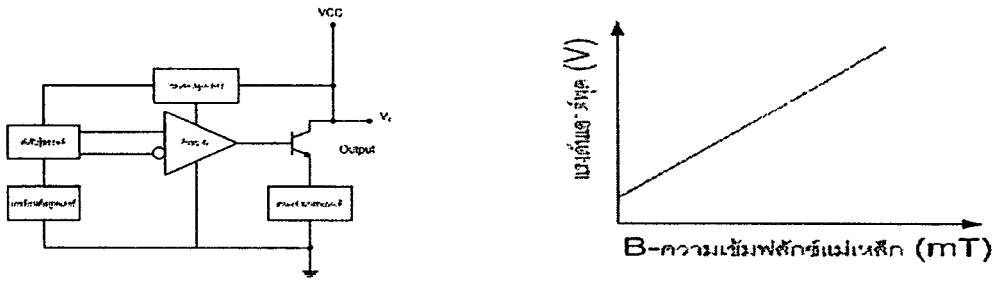
จากรูปประกอบด้วยลวดตัวนำที่ทำเป็นแผ่นบาง ๆ มีกระแส I ไหลผ่านในทิศทาง $+X$ และวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศทาง +Y (พุ่งเข้าในกระดาษ) ถ้าประจุพาหะเป็นอีเล็กตรอน หรือประจุลบที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศทาง –X ด้วยความเร็ว V_d จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก F ขึ้นในทิศทาง $+Z$ ทำให้อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนขึ้นไปสะสมกันอยู่ที่ขอบแผ่นบนของแผ่นตัวนำ ส่วนประจุบวกที่เหลือจะไปรวมกันอยู่ที่ขอบของแผ่นล่าง การเกิดปรากฏการณ์อย่างนี้ เรียกว่า ฮอลล์โวลต์เตท (Hall Voltage: V_H) เกิดขึ้นตามแนวยาวของวัสดุแท่งนั้นในลักษณะเช่นนี้จะถูกเรียกว่า แหล่งกำเนิดฮอลล์ (Hall generator) ระดับค่าของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันตรงต่อกำลังของสนามไฟฟ้า ถ้าทิศทางของสนามกลับกันจะทำให้ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วยเป็นมุมเฟส 180° กลับเฟส ภายในข้อจำกัดที่แน่นอน

3.3.2.2 **ชนิดของฮอลล์**

แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ชนิดเป็นสวิตช์, ชนิดเป็นตัวแลตช์ และชนิดเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น ชนิดที่เป็นสวิตช์และชนิดแลตช์เป็นอุปกรณ์ทางดิจิตอล คือ มีเอาต์พุตเพียง 2 สถานะไม่เปิดก็ปิด ในขณะที่ฮอลล์แบบเชิงเส้นจะให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์แบบเชิงเส้น จึงขอกล่าวเฉพาะฮอลล์ชนิดเชิงเส้นอย่างเดียว

ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น มีหลักการทำงาน คือ ถ้าเพิ่มสนามแม่เหล็กให้แก่ฮอลล์ แล้วทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิด เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เรียกฮอลล์นี้ว่า ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น (Linear Hall Device) ซึ่งจะไม่เกิดการเปิด/ปิด แบบฮอลล์ชนิดสวิตช์ คือ ไม่เกิดฮีสเตอร์รีซิส ความไวของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นประมาณ 16mV/mT สามารถนำฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมาหาขั้วของสนามแม่เหล็กได้ ถ้ารู้ค่าแรงดันไฟฟ้าในขณะที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ เรียกว่า จุดอินเตอร์เซปต์ (Intercept) หากแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์มีค่ามากกว่าจุดอินเตอร์เซปต์ แสดงว่าขณะนั้นขั้วของสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์น้อยกว่าจุดอินเตอร์เซปต์ แสดงว่าสนามแม่เหล็กขณะนั้นเป็นขั้วใต้ จากคุณสมบัติดังกล่าวหาตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมและการตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้น

ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส (Current Transducer) ทำหน้าที่ แปลงขนาดสัญญาณกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ก)



ก) ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส ข) Equivalent Circuit of Hall CT

รูปที่ 3.24 ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแสและวงจรสมมูลของ LEM

จากรูป เมื่อมีสัญญาณกระแสไหลผ่านเข้ามาในสายตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ผ่านส่วนที่เป็น Hall Device จะสร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านตัวมัน และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้จะเป็นค่าสัญญาณที่จะนำไปใช้ต่อไป ดังรูปที่ 3.24 ก) แสดง Hall Device และรูปที่ 3.24 ข) แสดงบล็อกไดอะแกรมของฮอลล์เอฟเฟกต์

เมื่อ N_1, N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ $(Turn)$ / จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ $(Turn)$

i_1, i_2 คือ กระแสทางด้านปฐมภูมิ (A) / กระแสทางด้านทุติยภูมิ (A)

e_2 คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่าน Hall Effect (V)

E_e คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยแรงเคลื่อนของแหล่งจ่าย (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์อาศัยทฤษฎีของฟาราเดย์และเคอร์ซอฟฟ์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} e_2 &= E_e + i_2 r_2 = KB + i_2 R \\ e_2 &= -r_2 i_2 - N_2 A \frac{dB}{dt} \\ N_1 i_1 + N_2 i_2 &= N_1 i_o = Hl \\ B &= f(H) \approx \mu H \end{aligned}\right\} \quad (3.39)$$

เมื่อ e_2 คือ แรงเคลื่อน *e.m.f* ทางด้านทุติยภูมิ (V)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (T)

N_1, N_2 คือ จำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ $(Turn)$

i_1, i_2 คือ กระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (A)

R คือ ความต้านทานของเบอเดน $(burden)$ (Ω)

l คือ ความยาวเฉลี่ยของสนามแม่เหล็ก (m)

μ คือ Magnetic permeability

จากสมการที่ 3.39 กำหนดให้ค่า e_2 มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้สมการดังนี้

$$\left.\begin{aligned} N_2 A \frac{dB}{dt} + KB + (r_2 + R) i_2 &= 0 \\ N_1 i_1 + N_2 i_2 &= \frac{l}{\mu} B \end{aligned}\right\} \quad (3.40)$$

จากสมการที่ 3.40 ทำการอินทีเกรต และหาค่าของกระแส i_2 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left.\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= -\frac{K \mu N_2 (r_2 + R) l}{\mu N_2^2 A} B + \frac{N_1 (r_2 + R)}{A N_2^2} i_1 \\ i_2 &= \frac{l}{\mu N_2} B - \frac{N_1}{N_2} i_1 \end{aligned}\right\} \quad (3.41)$$

เมื่อ i_1 คือ Input Variable (A)

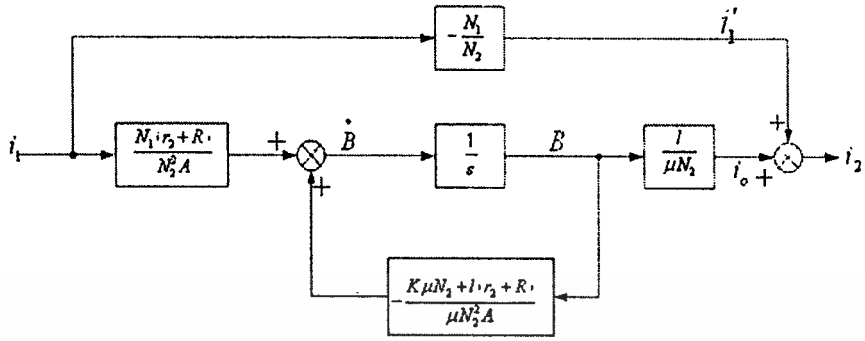
i_2 คือ Output Variable (A)

B คือ State Variable

K คือ Gain (K=0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.41 นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.25 บล็อกไดอะแกรมของ Hall Effect

การคำนวณหาค่ากระแสของตัวตรวจวัดกระแสจะอยู่ในรูปแอมป์เทิร์น (AT) โดยสมมุติให้พิกัดของกระแสที่ 100 แอมป์เทิร์น มีแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 4 โวลต์ หมายความว่า ต้องจ่ายกระแส 100 แอมป์ ในการคล้องสายเพียง 1 รอบ ถ้าเพิ่มจำนวนสายไฟที่ใช้คล้องเพิ่มขึ้นก็ต้องจ่ายกระแสน้อยลง แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.26 การพันสายไฟคล้องตัวตรวจวัดสัญญาณกระแส 1รอบและ 4รอบ

ในการคำนวณหาค่ากระแสอินพุต เอาต์พุต แรงดันเอาต์พุตที่ผ่านความต้านทาน และค่าผิดพลาดของกระแส หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{peak} = \frac{I_{AT}}{Turn} \qquad (A) \tag{3.42}$$

$$I_{output} = \frac{I_{rms}}{\text{อัตราส่วน} * Turn} \quad (A) \tag{3.43}$$

$$V_{output} = R * I_{output} \quad (V) \tag{3.44}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%error = \left(\frac{I_{measu} - I_{cal}}{I_{cal}} \right) * 100 \qquad (3.45)$$

เมื่อ I_{Peak} คือ กระแสพิกัดที่ฮอลล์เอฟเฟกต์ทนได้ (A)

I_{AT} คือ กระแสที่เกิดการเหนี่ยวนำกับจำนวน (AT)

$Turn$ คือ จำนวนรอบที่พันอยู่บนฮอลล์เอฟเฟกต์

I_{output} คือ กระแสเอาต์พุตที่ได้จากฮอลล์เอฟเฟกต์ (A)

I_{rms} คือ กระแสที่อินพุตที่ไหลผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์ (A)

V_{output} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากขา M

R คือ ความต้านทานที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า

$\%error$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด

I_{measu} คือ ค่ากระแสที่วัดได้(A)

I_{cal} คือ ค่ากระแสที่คำนวณได้(A)

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส Hall Effect Model LA-55P มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลพิกัดอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส Hall Effect Model LA-55P

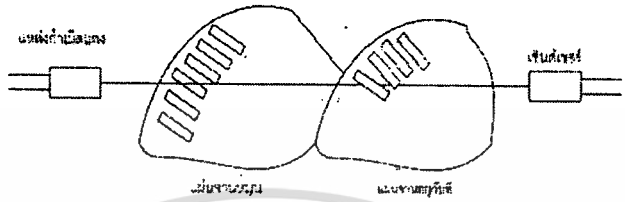
Primary Nominal r.m.s. Current	50A
Primary Current Measuring Rang	0....±70A
Measuring Resistance	$T_A = 70^{\circ}C, \pm 12V, \pm 50A, R = 10...100\Omega$ $\pm 70A, R = 10...50\Omega$ $T_A = 70^{\circ}C, \pm 15V, \pm 50A, R = 50...160\Omega$ $\pm 70A, R = 50...90\Omega$
Secondary Nominal r.m.s Current	50mA
Conversion Ratio	1:1000
Frequency Bandwidth(-1dB)	DC...200kHz
Linearity	<0.15%

3.3.3 ตัวตรวจวัดการสะท้อนแสง (Optical Sensors) [6], [7], [14], [21], [22]

ทรานสดิวเซอร์วัดความเร็วรอบที่ใช้เป็นแบบการสะท้อนแสง(Optical Sensors) **ใช้หลักการเดียวกับ อินริเม้น หรือ เอนโต้เบอร์ ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และให้กำเนิดเอาต์พุต**

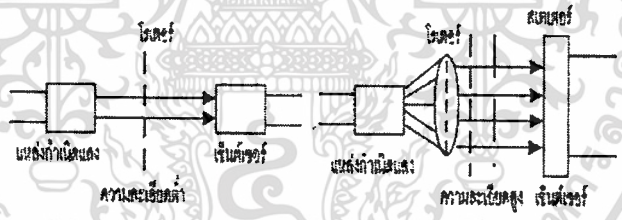
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ที่เป็นสัดส่วนกับแมกนีจูดของความเร็วเชิงมุม หรือ สัญญาณพัลส์แปรผันตรงกับการหมุนของเพลา นำไปใช้การรับรู้ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ได้ โดยเอนโคดเดอร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดแสงจานหมุน (Rotary disk) จานอยู่กับที่และตัวเซ็นเซอร์บนแผ่นจานหมุนทำเป็นช่องโดยรอบ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.27 กลไกของออฟโตอินคริเม้นท์

โดยบนแผ่นอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสงผ่านตรงข้างไปยังตัวเซ็นเซอร์ ถ้าเป็นเอนโคดเดอร์ที่ใช้วัดความเร็วรอบต่ำไม่ต้องมีแผ่นอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟ หรือ *LED* แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.28 ตัวเซ็นเซอร์แบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและมีหลายช่อง

ความละเอียดของอินคริเม้นท์เอนโคดเดอร์ คือ จำนวนคาบเวลาของสัญญาณทางเอาต์พุตต่อการหมุนของเพลาใน 1 รอบ บอกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบ หรือ จำนวนไซเคิลต่อ 360° มุมทางเชิงกล หรือ ไซเคิลต่อองศาเอนโคดเดอร์ที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป มีความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10000 พัลส์ต่อรอบในทางปฏิบัติเนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดียวกัน ถ้าต้องการที่ผ่านช่องไปยังเซ็นเซอร์เป็นเส้นตรงพร้อม ๆ กัน ทำได้โดยใช้เลนซ์ หรือ พาราโบลิครีแฟลดเดอร์ ดังรูปที่ 3.29 จำนวนพัลส์ต่อ 1 รอบ สัญญาณที่เอนโคดเดอร์สร้างออกมาเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของแถบทึบระหว่างช่องว่างเท่ากัน การหาความกว้างช่องว่าง (W) ได้สมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

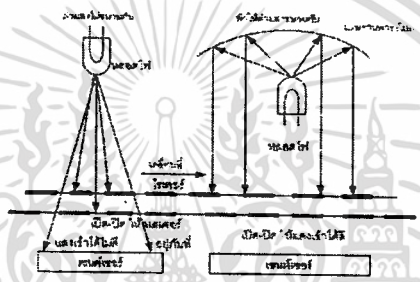
$$W = \frac{\pi D}{2N} \tag{3.46}$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของผ่านจาน

N คือ จำนวนของความละเอียดเป็นพัลส์ต่อรอบ

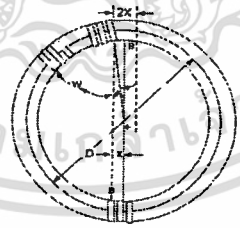
W คือ ความกว้างของช่องว่าง

ค่าตัวแปรของสมการที่ 3.46 หาได้จากรูป 3.30 โดยให้ D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นหมุนของเอนโคดเดอร์ ค่าประมาณที่ใกล้เคียงมากของค่าความกว้างช่องว่าง ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.29 ผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย

$$W = \frac{0.75\pi D}{2N} \tag{3.47}$$



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นลิเนียร์กับความไม่ได้ศูนย์กลาง

เออร์เรอร์จะเป็นลิเนียร์ = $2X / W$

เมื่อ W คือ $\pi D /$ ความละเอียด = ความกว้างของพัลส์

X คือ ความแตกต่างไปจากศูนย์กลาง

$2X$ คือ ผลรวมคาบเวลาของเออร์เรอร์ในช่วงการหมุน 180°

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่นจาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดความเร็วในการหมุน ส่วนใหญ่ต้องให้แกนของทรานสดิวเซอร์ต่อ หรือสัมผัสกับแกนที่ทำการวัด ปัญหาสำคัญคือ ต้องติดตั้งทรานสดิวเซอร์ให้พอดีกับแกนหมุน ดังนั้นปัญหานี้ แก้ได้โดยการใช้แบบการสะท้อนแสง เมื่อให้ลำแสงอินฟราเรดจากตัวส่งตกลงบนแกนแถบเล็ก ๆ ของเทปสะท้อนซึ่งหมุนผ่าน แสงก็จะถูกสะท้อนกลับไปยังตัวเซ็นเซอร์จึงทำให้ได้เอาต์พุตเป็นพัลส์ (ปกติจะอิ่มตัวเป็น Open Collector ของทรานสดิวเซอร์) อีกปัญหาคือ ความยากที่ติดตั้งตัวกำเนิดแสง และตัวเซ็นเซอร์ให้ใกล้กับแกน ดังนั้นความถี่ที่ตัวทรานสดิวเซอร์วัดได้ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟส $(d\theta)$ ต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลา (dt) ดังนี้

$$f = \frac{d\theta}{dt} \tag{3.48}$$

ดังนั้นทำการอินทีเกรตสมการที่ 3.48 จะได้มุมเฟสเอาต์พุตของวงจรดังสมการที่ 3.49 โดยที่ $\Delta f_v(t) = K_v \Delta V_f(t)$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า V_f ที่ทำการควบคุมความถี่ของวงจร

$$\theta_v(t) = \theta_v(0) + \int_0^t K_v V_f(t)dt \tag{3.49}$$

จากสมการ เมื่อทำการแปลง *Laplace* ได้ฟังก์ชั่นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\theta_v(s)}{V_f(s)} = \frac{K_v}{s} \tag{3.50}$$

เมื่อนำทรานสดิวเซอร์ที่มีความไวต่อแสง ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราเร็วของมอเตอร์ให้เป็นขบวนพัลส์ของแรงดันไฟฟ้าที่มีมุมเฟส $\theta_t(t)$ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d\theta_t(t)}{dt} = K_t \omega_m(t) \tag{3.51}$$

เมื่อ K_t เป็นค่าคงที่สัดส่วนของเครื่องอัตราเร็ว

ดังนั้น สามารถที่พิจารณาหาฟังก์ชั่นแปลงย้ายของมุมเฟสเอาต์พุต $\theta_t(s)$ ของเครื่องวัดอัตราเร็วต่ออัตราของมอเตอร์ $\Omega_m(s)$ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\theta_t(t)}{\Omega_m(s)} = \frac{K_t}{s} \tag{3.52}$$

ซึ่งคล้ายคลึงกับฟังก์ชั่นแปลงย้ายของวงจรในสมการที่ 3.50 โดยจานของเครื่องวัดอัตราเร็วมีรูเจาะไปตามขอบด้วยระยะห่างเท่าๆ กัน ซึ่งจำนวนรูของจานหมุนจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ตามจำนวนรูต่อหนึ่งรอบ หรือ เท่ากับ $\frac{\text{จำนวนรู}}{2\pi}$ พัลส์ต่อเรเดียนโดยประมาณ เนื่องจากมอเตอร์มีอัตราเร็ว ω_o เรเดียนต่อวินาที โดยแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า $\frac{\text{จำนวนรู}}{2\pi} * \omega_o$ พัลส์ต่อวินาทีที่เอาต์พุตของเครื่องวัดอัตราเร็ว แล้วสัญญาณนี้จะถูกหารด้วยวงจรนับ N ทำให้ได้สัญญาณป้อนกลับที่มีความถี่ $f_v = \frac{\text{จำนวนรู}}{2\pi N} * \omega_o$ พัลส์ต่อวินาที โดยทั่ว ๆ ไป ถ้าเจาะรู k รูบนจานของเครื่องวัดอัตราเร็วจะทำให้ได้รับสัญญาณ k พัลส์ต่อหนึ่งรอบซึ่งเท่ากับ $\frac{k}{2\pi}$ พัลส์ต่อเรเดียน และเนื่องจากมอเตอร์มีอัตราเร็ว ω_m รอบต่อนาที หรือ เท่ากับ $\frac{2\pi\omega_m}{60}$ เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องวัดอัตราเร็ว ดังสมการที่ 3.53

$$\left(\frac{k}{2\pi}\right)\left(\frac{2\pi\omega_m}{60}\right) = \left(\frac{k\omega_m}{60}\right) \text{ พัลส์ต่อวินาที} \tag{3.53}$$

เมื่อสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรนับแล้ว สัญญาณจะถูกหารด้วยค่า N ทำให้ได้สัญญาณป้อนกลับมีความถี่ ดังสมการที่ 3.54

$$f = \frac{k\,\omega_m}{60\,N} \text{ พัลส์ต่อวินาที} \tag{3.54}$$

เมื่อ f คือ ความถี่จำนวนพัลส์ที่แสงตกกระทบตัวรับแสง $(Pulse)$

N คือ ค่าคงที่ของจำนวนนับของเพลาตัดผ่านตัวเซ็นเซอร์

ω_m คือ อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)

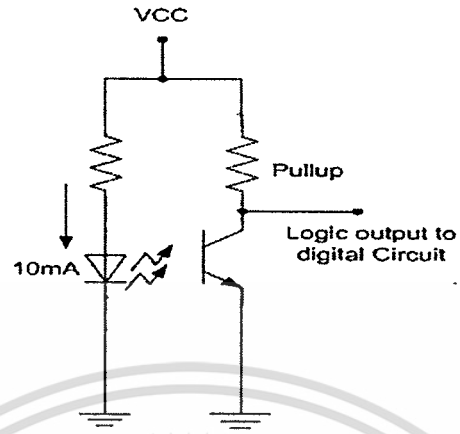
k คือ ค่าคงที่จำนวนพัลส์ของเทปสะท้อน

จากสมการหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบต่อความถี่ของการตัดผ่านแกนหมุน ได้ดังนี้

$$\omega_m = f * 60 \tag{3.55}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการใช้ตัววัดความเร็วรอบแบบสะท้อนแสง แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.31 การต่อวงจรตัววัดความเร็วรอบแบบสะท้อนแสง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เซ็นเซอร์แบบ *Photo interrupters* ชนิด *Reflect Type* โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังนี้

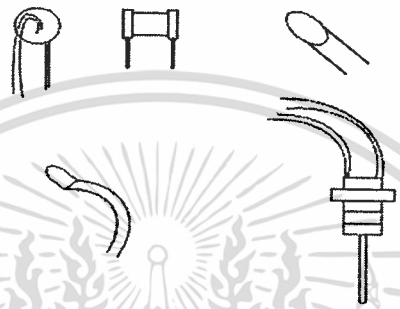
Item	Item	Symbol	Conditions	Min	Type	Max	Unit
Input	Forward Voltage	V_F	$I_F = 10mA$			1.3	V
	Reverse Current	I_R	$V_R = 5V$			10	μA
	Peak Wavelength	λ_P			940		nm
Output	Collector dark current	I_{CEO}	$V_{CE} = 10V$			0.2	μA
Light Current		I_L	$V_{CE} = 5V$ $I_F = 10mA$	90			μA
Leakage current		I_{CEOD}	$V_{CE} = 5V$ $I_F = 10mA$			0.2	μA
Switching Speeds	Rise time	t_r	$V_{CC} = 2V$ $I_C = 100\mu A$ $R_L = 1K\Omega$		30		μSec
	Fall time	t_f			25		μSec

3.3.4 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermistors) [14]

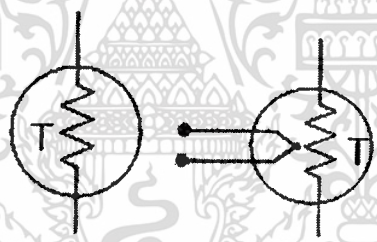
เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) นั้นเกิดจากรากศัพท์สองคำ คือ Thermal+resistor เป็นเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิอีกประเภทหนึ่ง ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุกับอุณหภูมิ เทอร์มิสเตอร์ทำมาจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับโลหะออกไซด์ เช่น แมงกานีส นิกเกิล โคบอลต์ หรือ โครเมียม เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้น ด้วยคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวที่มีความไวสูงในการแปรค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น ณ ค่าอุณหภูมิเดียวกันแล้ว เทอร์มิสเตอร์มีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าเมื่อเทียบกับ RTD (มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าค่อนข้างน้อย คือ มีค่าประมาณ 5mW ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป $1^{\circ}C$) เทอร์มิสเตอร์ที่นำมาใช้งานในปัจจุบันนั้นมีมากมายหลายแบบโดยรูปแบบต่าง ๆ และสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ ได้ดังรูปที่ 3.32 และ 3.33



รูปที่ 3.32 เทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ



รูปที่ 3.33 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์

ปกติเทอร์มิสเตอร์จะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น Negative Temperature Coefficient (NTC) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิอยู่ในรูปของเอ็กโพเนลเชียล ในการวัดของเทอร์มิสเตอร์มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $173^{\circ}K$ ถึง $573^{\circ}K$ ($-100^{\circ}C$ ถึง $+300^{\circ}C$) โดยคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์จะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทำให้เทอร์มิสเตอร์ถูกนำมาใช้ในงานการตรวจวัดอุณหภูมิที่มีพื้นที่แคบๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ หาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_t = R_0 exp\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \tag{3.56}$$

เมื่อ R_t คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิเท่ากับ $T^\circ K$

R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ $T^\circ K$

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยองศา $\left(^\circ K\right)$

β คือ ค่าคงที่ของเทอร์มิสเตอร์ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน โดยทั่วไป มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $3000^\circ K$ จนถึง $5000^\circ K$ ขณะที่ R_0 มีค่าทั่วไปประมาณ 2000Ω

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์ รุ่น TTC3A473-A9A

Thermal Dissipation Constant	$\geq$5mW/$^\circ C$
Thermal Time Constant	$\leq$11Sec
Maximum Dissipation	250mW
Operating Temperature Range at Zero Power at Maximum Power	 -40 to 125°C 0 to 55°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ทฤษฎีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการใช้ Visual Basic 6

4.1 บทนำ

4.1.1 สถาปัตยกรรมและชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51[29],[30]

4.1.1.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroController) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถมากมาย ไม่ว่า เป็นหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ ฯลฯ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้ โดยช่วยลดจำนวนอุปกรณ์ ขนาดของระบบลง ทำให้มีความสามารถสูงเพิ่มขึ้น ในการควบคุม ทำได้โดยการเขียนโปรแกรม กำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ

4.1.1.2 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช

เหตุผลที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีหน่วยความจำภายในเป็นแบบแฟลช (Flash Memory) ของ Philips Corporation มีด้วยกันหลายประการ คือ

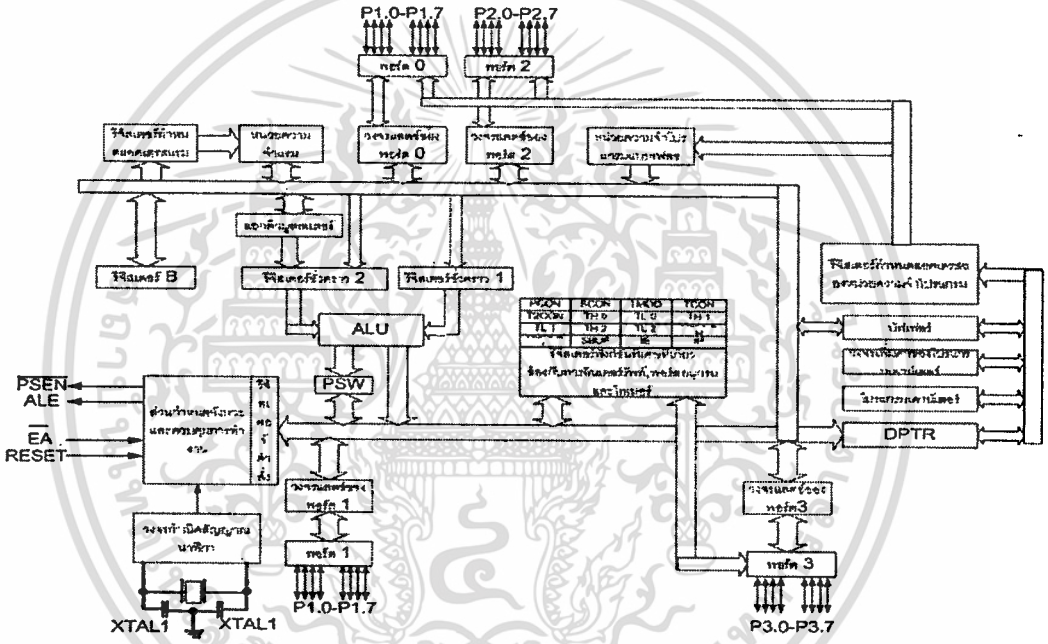
1. หน่วยความจำโปรแกรมในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ลบและเขียนใหม่ได้ ภายในชิพเดี่ยวไม่ต้องใช้หน่วยความจำภายนอกช่วย ส่งผลให้ใช้งานพอร์ตอินพุตได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
2. ต้นทุนและเวลาในการพัฒนาระบบลดลง ไม่ต้องใช้เครื่องมือพัฒนาจำพวกอีมูเลเตอร์ และเครื่องโปรแกรมอีพรอมช่วย
3. การใช้หน่วยความจำภายในป้องกันการคัดลอกข้อมูลของหน่วยความจำโปรแกรมได้
4. การโปรแกรมข้อมูลในหน่วยความจำ ไม่จำเป็นต้องถอดตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ออกทำการโปรแกรมใหม่ เพราะอาศัยการติดต่อแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) ทำให้การพัฒนา การซ่อมบำรุง ตลอดจนการปรับปรุงอัปเกรดข้อมูล ในหน่วยความจำทำได้อย่างสะดวก
5. ชุดคำสั่งและสถาปัตยกรรมพื้นฐานเหมือนไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ของผู้ผลิตอื่น ๆ

4.1.1.3 คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
- ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลชสามารถลบและเขียนใหม่ได้
- หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นแบบแรม บางเบอร์มีหน่วยความจำแบบอีพีรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง ใช้งานได้ทั้งอินพุต และเอาต์พุต
- วงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟลูดูเพล็กซ์
- ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต อย่างน้อย 2 ตัว
- มีแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัพต์ 6 ประเภท
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ในชิพ
- วงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI
- วอต์ด็อกไทเมอร์ในตัว

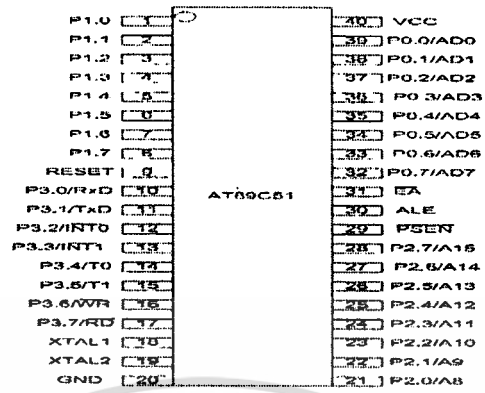


รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชอนุกรม 89C51RD2

จากรูป เป็นโครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51xx ที่มีส่วนประกอบเพิ่มเติมแตกต่างจากเดิมอยู่หลายส่วน เช่น วงจรเชื่อมต่ออนุกรมแบบSPI ใช้การเขียนข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมโดยไม่ต้องถอดตัวชิพออกจากระบบ หรือ การโปรแกรมในวงจร ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต ที่เพิ่มเติมเข้ามาอีกหนึ่งตัวเป็นไทเมอร์ 2 และวงจรวอตช์ด็อกที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานผิดพลาดของซีพียู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.4 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51



รูปที่ 4.2 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

จากรูป อธิบายขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนี้

- ขา VCC ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5 V
- ขา GND ใช้สำหรับต่อกราวด์ของระบบ
- ขาพอร์ต 0 (P0.0 – P0.7) มี 8 ขา แต่ละขากำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุต และเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป หากต้องการกำหนดให้ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุต ทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อ และยังใช้งานเป็นขาแอดเดรสไบต์ต่ำของหน่วยความจำภายนอก (A0 - A7) และขาข้อมูล (D0 – D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วย เพื่อสลับการทำงานให้เป็นได้ทั้งขาแอดเดรส และขาข้อมูล
- ขาพอร์ต1 (P1.0 - P1.7) มี 8 ขา แต่ละขากำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป หากต้องการกำหนดให้ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุต ทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อ นอกจากนี้ ขา P1.0 เป็นขาอินพุตสำหรับนับค่าไทเมอร์ 2 และ P1.1 เป็นขาอินพุตทริกเกอร์ของไทเมอร์ 2 ในขณะที่ขา P1.4 ถึง P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรมข้อมูลในระบบ
- ขาพอร์ต2 (P2.0 - P2.7) มี 8 ขา แต่ละขากำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป หากต้องการกำหนดให้ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุต ทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อ และยังใช้งานเป็นขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก
- ขาพอร์ต3 (P3.0-P3.7) มี 8 ขา แต่ละขากำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป หากต้องการกำหนดให้ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุต ทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อ นอกจากนี้ ขาพอร์ต 3 ที่มีหน้าที่พิเศษ ดังนี้

P3.0 เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P3.1 เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา TxD

P3.2 เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัพต์จากภายนอกช่องที่ 0 หรือ $\overline{INT0}$

P3.3 เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัพต์จากภายนอกช่องที่ 1 หรือ $\overline{INT1}$

P3.4 เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากภายนอกช่องที่ 0 หรือขา T0

P3.5 เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากภายนอกช่องที่ 1 หรือขา T1

P3.6 เป็นขาสัญญาณ $\overline{WR}$ ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 เป็นขาสัญญาณ $\overline{RD}$ ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

- ขารีเซต ใช้รีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยป้อนสัญญาณรีเซตอย่างน้อย 2 แมชีนไซเกิล โดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่อง

- ขา ALE/$\overline{PROG}$ (Address Latch Enable/Program Pulse input) ใช้ในการควบคุมการแลตช์ของพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก นอกจากนี้ ยังใช้เป็นขาสำหรับรับพัลส์ของการโปรแกรมข้อมูลลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในรุ่นที่มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบอีพีรอม

- ขา $\overline{PSEN}$ (Program Store Enable) ใช้ในการส่งสัญญาณ เพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณออกมา 2 ครั้ง ในแต่ละแมชีนไซเกิล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก ขานี้จะไม่มีการส่งสัญญาณใด ๆ ออกมา

- ขา $\overline{EA}$/Vpp (External Access enable/Programming voltage input) ใช้สำหรับการเลือกติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก หรือ ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ หากขานี้เป็น "0" แสดงการเลือกใช้หน่วยความจำภายนอก และหากเป็น"1" เป็นการติดต่อกับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

- ขา XTAL1และ XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตอล เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1.1.5 **รีจิสเตอร์แคปเจอร์** (Capture register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต มีเฉพาะในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช เบอร์ P89C51RD+ และP89C51RD2 ใช้ร่วมกับไทเมอร์/เคาน์เตอร์2 โดยมีชื่อเรียกว่า รีจิสเตอร์ RCAP2 แบ่งเป็นไบต์ต่ำ คือ RCAP2L มีแอดเดรสอยู่ที่ CAH และไบต์สูง คือ RCAP2H มีแอดเดรสอยู่ที่ CBH เมื่อไทเมอร์ 2 ทำงานในโหมดแคปเจอร์ เป็นโหมดที่กำหนดให้ตรวจจับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงสถานะทางลอจิกที่ขา T2EX เพื่อใช้ในการวัดคาบเวลา ความถี่ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพัลส์ที่ขา T2EX

4.1.1.6 ความสามารถที่เพิ่มเติมในพอร์ตอนุกรมของ P89C51RD2

พอร์ตอนุกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์ 1 ชุด ใช้ขาสัญญาณของพอร์ต 3 คือ ขา *P*3.0 เป็นขารับข้อมูลเข้า (RxD) และขา P3.1เป็นขาส่งข้อมูลออก (TxD) โดยวงจรสื่อสารข้อมูลแบบ อะซิง โครนัส ปกติใช้ในการติดต่อสื่อสารกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือ การรับ-ส่งข้อมูลโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา แต่ใช้การกำหนดค่าอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลให้มีค่าเท่ากัน เรียกว่า อัตราบอด หรือ บอดเรต มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (Bit per Second: bps) รูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการรับ-ส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

1. เริ่มต้น (Start Bit) มีขนาด 1 บิต
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรม มีขนาด 8 บิต
3. บิตตรวจสอบพาริตี้ (Parity Bit) มีขนาด 1 บิตหรือไม่มี
4. บิตปิดท้ายหรือบิตหยุด (Stop Bit) มีขนาด 1 บิต

4.1.1.7 โหมดการทำงานของพอร์ตอนุกรมใน MCS-51

การเลือกโหมดทำงานของพอร์ตอนุกรม ทำได้โดยกำหนดข้อมูลให้แก่บิต SM0 และ SM1 ในรีจิสเตอร์ SCON ซึ่งได้ 4 โหมด คือ

1. **การทำงานในโหมด 0 ของวงจรพอร์ตอนุกรม**

การทำงานใช้ขา RxD ในการรับ-ส่งข้อมูลโดยต่อกับ Shift Register ภายนอก ส่วนขา TxDเป็น Output Shift Clock เพื่อกระตุ้นรีจิสเตอร์ภายนอกให้เลื่อนบิต และถ้ามีการส่งข้อมูล หรือ รับข้อมูล 8 บิต จะเริ่มที่บิตต่ำสุดก่อน โดยมีค่า บอดเรต เท่ากับ $\frac{1}{12}$ ของความถี่ที่ใช้บนชิพ

2. **การทำงานในโหมด 1 ของวงจรพอร์ตอนุกรม**

การรับส่งข้อมูลเป็นแบบ 10 บิต ประกอบด้วยบิตเริ่มต้น 1 บิต บิตข้อมูล 8 บิต และบิตจบ 1 บิต นอกจากนี้ยังกำหนดค่า Baud Rate ได้ ซึ่งค่า Baud Rate จะแปรตามตัวจับเวลาตัวที่ 1 แล้วส่งข้อมูลออกทางขา TxD พร้อมรับข้อมูลทางขา RxD ถ้าเป็นการรับข้อมูลตัว Stop Bit จะเข้ามายังบิต RB8 ใน SCON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **การทำงานในโหมด 2 ของวงจรพอร์ตอนุกรม**

การกำหนดค่าบอดเรตได้ 2 ค่า คือ $\frac{1}{64}$ และ $\frac{1}{32}$ ของสัญญาณนาฬิกาบนชิพ ซึ่งการรับ-ส่งข้อมูลจะเป็นชุดข้อมูล 9 บิต มีบิตเริ่มต้น บิตหยุด รวมเป็น 11 บิต โดยบิตข้อมูล 9 บิต เป็นจำนวนข้อมูล 8 บิต และบิตที่โปรแกรมได้อีก 1 บิต โดยบิตนี้จะเป็นบิตที่ 9 ซึ่งใช้เป็น Parity Bit ในการส่งข้อมูลต้องเขียนไปที่ บิต TB8 ใน SCON สำหรับรับข้อมูล บิตที่ 9 ถูกเก็บในบิต RB8

4. **การทำงานในโหมด 3 ของวงจรพอร์ตอนุกรม**

การทำงานในโหมดนี้คล้ายกับโหมด 2 แต่การกำหนดค่าบอดเรต โดยการโปรแกรมไปที่ Timer1 หลังจากโปรแกรมแล้ว ยังเลือกได้อีก 2 ค่า คือ ความถี่การเกิด Overflow ของ Time1 หารด้วย 16 และหารด้วย 32

4.1.1.8 **อัตราบอดของพอร์ตอนุกรมในไมโครคอนโทรล เลอร์** MCS-51

โหมด 0

อัตราบอดของโหมดนี้มีค่าคงที่ โดยคำนวณได้จากสูตร

อัตราบอดในโหมด 0 = ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา 1/12 หน่วยเป็น บิตต่อวินาที

โหมด 1 และ 3

เนื่องจากทั้งสองโหมดนี้ สามารถเลือกแหล่งกำเนิดอัตราบอดได้ 2 แหล่ง คือ อัตราโอเวอร์โฟลว์ของไทเมอร์ 1 และ ไทเมอร์ 2 สำหรับอัตราบอดเมื่อใช้การเกิดโอเวอร์โฟลว์ของไทเมอร์ 1 ต้องใช้บิต SMOD ในรีจิสเตอร์ PCON มาพิจารณาประกอบ โดยคำนวณหาค่าอัตราบอดได้จาก

อัตราบอด = $(2^{\text{ค่าของบิต SMOD}}/32) \times$ อัตราโอเวอร์โฟลว์ของไทเมอร์ 1

ถ้าหากในไทเมอร์ 1 ไม่ได้เอ็นเอเบิลอินเตอร์รัพต์ไว้ สามารถหาค่าอัตราบอดได้จาก

อัตราบอด = $(2^{\text{ค่าของบิต SMOD}}/32) \times$ (ความถี่สัญญาณนาฬิกา/ {12 x [256-(TH1)]}

ในกรณีที่ใช้ไทเมอร์ 2 กำหนดอัตราบอด สามารถคำนวณหาค่าอัตราบอดได้จาก

อัตราบอด = อัตราโอเวอร์โฟลว์ของไทเมอร์ 2/16 หน่วยเป็นบิตต่อวินาที

ถ้าหากกำหนดให้ไทเมอร์ 2 ทำงานในโหมดไทเมอร์หรือเคาน์เตอร์ตามปกติ สามารถคำนวณหาค่าอัตราบอดได้จาก

อัตราบอด = ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา / (32x (65536-($RCAP2H, RCAP2L$)))

โดยที่ RCAP2L, RCAP2H เป็นค่าของรีจิสเตอร์ มีขนาด 16 บิตไม่คิดเครื่องหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเลือกอัตราบอดของวงจรพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

อัตราบอด (บิตต่อวินาที: bps)	ความถี่สัญญาณนาฬิกา	SMOD	ไทเมอร์		
			C/T	โหมด	ค่ารีโหลด
โหมด 0: สูงสุด 1MHz	12MHz	x	x	x	x
โหมด 2:สูงสุด 375 k	12MHz	1	x	x	x
โหมด 1, 3: 62.5k	12MHz	1	0	2	FFH
19.2k (19200)	11.0592MHz	1	0	2	FDH
9.6k (9600)	11.0592MHz	0	0	2	FDH
4.8k (4800)	11.0592MHz	0	0	2	FAH
2.4k (2400)	11.0592MHz	0	0	2	F4H
1.2k (1200)	11.0592MHz	0	0	2	E8H
137.5	11.0592MHz	0	0	2	1DH
110	6MHz	0	0	2	72H
110	12MHz	0	0	1	FEEBH

โหมด 2

เป็นการกำหนดอัตราบอดของบิต SMOD ในรีจิสเตอร์ PCON ถ้า SMOD เป็น "0" อัตราบอดเท่ากับ 1/64 ของความถี่สัญญาณนาฬิกา และถ้าเป็น "1" อัตราบอดเท่ากับ 1/32 ของความถี่สัญญาณนาฬิกา หาค่าได้ดังนี้

อัตราบอด = $(2^{\text{ค่าของบิต SMOD}}/64)$ x (ความถี่สัญญาณนาฬิกา)

4.1.1.9 **การเขียนโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัพต์**

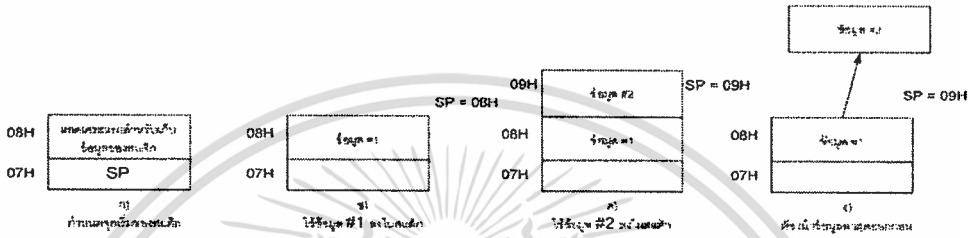
มีหลักการดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยแอดเดรสอินเตอร์รัพต์เสมอ เพื่อให้การตรวจสอบทำได้ง่าย และแยกส่วนของโปรแกรมย่อยออกจากโปรแกรมหลัก ด้วยคำสั่ง ORG xxxxH
2. เมื่อเข้าสู่โปรแกรมย่อยควรเก็บค่าของรีจิสเตอร์ หรือ แฟลก ไว้ในสแต็กก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่อการทำงานของทั้งโปรแกรมด้วย คำสั่ง PUSH
3. เมื่อเขียนโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการคืนค่าของรีจิสเตอร์ที่เก็บไว้ในสแต็กด้วยคำสั่ง POP และปิดท้ายโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัพต์ด้วยคำสั่ง RETI เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.10 **สแต็กในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช**

เป็นพื้นที่บางส่วนของหน่วยความจำข้อมูลที่สำรองไว้สำหรับเก็บค่ารีจิสเตอร์ เนื่องจากการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บ่อยครั้งที่รีจิสเตอร์ตัวหนึ่งต้องทำงานกับข้อมูล หรือ เงื่อนไขหลายอย่างภายในโปรแกรมควบคุมเดียวกัน ในขณะที่ทำงานอยู่อาจมีความจำเป็นต้องกระโดดหรือ เปลี่ยนแปลงแอดเดรส เนื่องจาก ไปทำงานที่โปรแกรมย่อยอื่น ๆ ก่อนแล้วกลับมาทำงานที่เดิม ทำให้ข้อมูลสุดท้ายต้องถูกเรียกออกมาใช้ก่อน หรือ FIO (First in Last Out) แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.3 กระบวนการเก็บและเรียกข้อมูลภายในสแต็กของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

เพื่อให้การทำงานยังคงต่อเนื่อง ร วดเร็ว และไม่สิ้นเปลืองหน่วยความจำข้อมูล จึงจัดสรรพื้นที่ของสแต็กในหน่วยความจำข้อมูลสำรองไว้ประมาณ 10 ไบต์ ซึ่งสแต็กเป็นรีจิสเตอร์ฟังก์ชั่นพิเศษตัวหนึ่งที่มีแอดเดรสอยู่ที่ 81H มีขนาด 8 บิต เมื่อเกิดการรีเซตขึ้นในระบบ ค่าของรีจิสเตอร์สแต็กจะเป็น 07H เสมอ และการใช้งานสแต็กมีขั้นตอนดังนี้

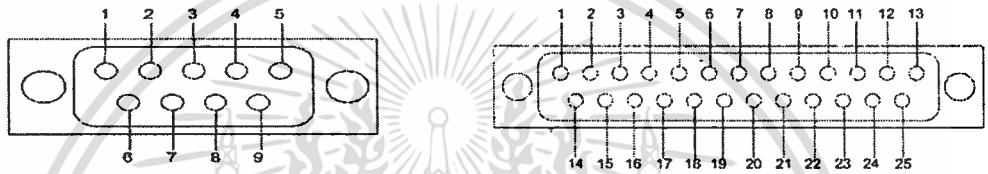
1. กำหนดจุดเริ่มต้นลงในรีจิสเตอร์ SP แอดเดรสที่อยู่ถัดจากค่าของ SP คือ แอดเดรสแรกที่เก็บข้อมูลได้ ปกติจะใช้ค่า SP เท่ากับ 07H ดังนั้น แอดเดรสสำหรับเก็บข้อมูล คือ 08H
2. เก็บข้อมูลลงด้วยคำสั่ง PUSH
3. ทุกครั้งที่เก็บข้อมูลค่าของ SP จะเพิ่มขึ้น
4. การเข้าออกของข้อมูลเป็นแบบ FILO
5. เรียกข้อมูลออกด้วยคำสั่ง POP
6. ไม่ควรสำรองพื้นที่ไว้มากเกินความจำเป็น เพราะทำให้หน่วยความจำข้อมูลเหลือน้อยลง อาจไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ในหน่วยความจำข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์
7. จัดลำดับการเรียกข้อมูลออกให้ถูกต้อง โดยข้อมูลที่เก็บเข้าไปลำดับสุดท้ายต้องเรียกออกมาก่อนเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.11 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232 [30]

มาตรฐานการเชื่อมแบบอนุกรม RS-232 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ออกแบบมา เพื่อใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลอนุกรมอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดยคณะกรรมการที่เรียกว่า สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industries Association: EIA) ได้วางมาตรฐานที่เรียกว่า EIA RS-232 ซึ่งกำหนดความยาวสูงสุดของสายสัญญาณไว้ที่ 50 ฟุต มีระดับสัญญาณตั้งแต่ -3V ถึง -12V แสดงว่ามีข้อมูล (Mark) และ +3V ถึง +12V แสดงว่าเป็นช่องว่าง (Space)

คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS-232 และการเชื่อมต่อ ใช้มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ DB-25 ตัวผู้หรือ DB-9 ตัวผู้แสดงได้รูป

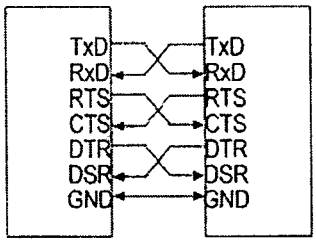


ก) คอนเน็กเตอร์ 9 ขา หรือแบบ DB-9 ข) คอนเน็กเตอร์ 25 ขา หรือแบบ DB-25

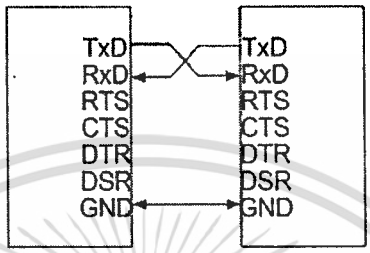
คอนเน็กเตอร์ DB-9	คอนเน็กเตอร์ DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	ชนิดของสายสัญญาณ
1	8	Data Carrier Detector: DCD	อินพุต
2	3	Received Data: RxD	อินพุต
3	2	Transmitted Data: TxD	เอาต์พุต
4	20	Data Terminal Ready: DTR	เอาต์พุต
5	7	Signal Ground: GND	-
6	6	Data Set Ready: DSR	อินพุต
7	4	Request To Send: RTS	เอาต์พุต
8	5	Clear To Send: CTS	อินพุต
9	22	Ring Indicator: RI	อินพุต

รูปที่ 4.4 การจัดขาคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ Null Modem



ข) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ RS -232 โดยใช้สัญญาณเพียง 3 เส้น

รูปที่ 4.5 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ

จากรูป เป็นการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก โดยลูกศรแสดงถึงทิศทางของข้อมูล ในรูปที่ 4.5 ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null Modem หรือ การเชื่อมต่อโดยตรงไม่ต้องผ่านโมเด็ม ที่มีการตรวจสอบแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบ ส่วนรูปที่4.5 ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null Modem ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น โดยใช้ส่งข้อมูล รับข้อมูล และกราวด์ หน้าที่การทำงานขาของพอร์ตอนุกรม RS-232 มีดังนี้

- Data Carrier Detect: DCD หรือ Carrier Detect: CD จะแอกตีฟ เมื่อมีการส่งสัญญาณพาห์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งาน
- Receive Data: RD หรือ RxD ใช้รับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่อ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์
- Transmitted Data: TD หรือ TxD ใช้ส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์ ใช้สำหรับส่งข้อมูลออก
- Data Terminal Ready: DTR เป็นสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์ เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ การติดต่อขา DTR จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null Modem ใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 เส้น โดยต้องต่อขา DTR, DCD และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน ในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์
- Signal Ground: GND ขากราวด์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Data Set Ready: DSR ใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR เป็นขาสำหรับข้อมูลจากภายนอกที่ถูกส่งมาจากขา DTR

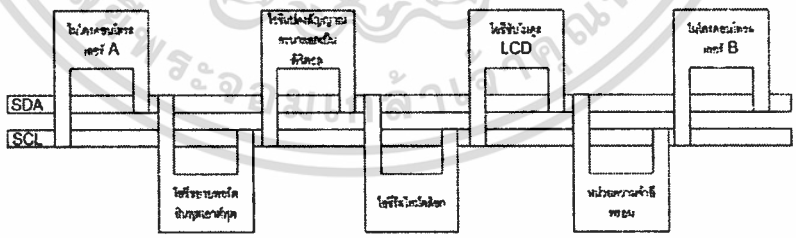
- Request To Send: RTS ใช้สำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้อุปกรณ์ปลายทาง ส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS และขา CTS เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null Modem เพียง 3 สาย โดยเชื่อมต่อขา RTS และ CTS เข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

- Clear To Send: CTS คอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับสัญญาณข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้น ขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือไม่

- Ring Indicator: RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ในการสื่อสารสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน แต่จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็ม

4.1.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C

Inter – IC Communication: I^2C คือ การติดต่อสื่อสารระหว่างไอซี ได้รับการพัฒนาโดยบริษัทฟิลิปส์ มีจุดมุ่งหมายหลักต้องการให้ไอซี หรือ โมดูลติดต่อสั่งงาน และควบคุมโดยสายสัญญาณเพียง 2 เส้น คือ สายข้อมูล (Serial Data Line: SDA) กับสายสัญญาณนาฬิกา (Serial Clock Line: SCL) ใช้กำหนดจังหวะการทำงาน การติดต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I^2C เพียงต่อสายข้อมูล และสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนาน หรือ พ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรส หรือ ตำแหน่งการติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัว ใช้รหัสข้อมูลและกำหนดสภาวะลอจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว



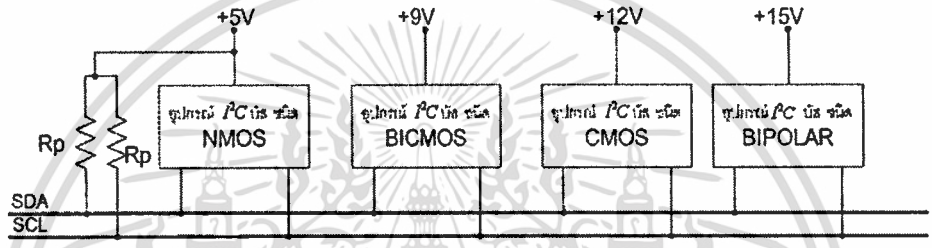
รูปที่ 4.6 ผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบัส I^2C

จากรูป เป็นการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ บนบัส I^2C โดยอุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อมีหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นไอซีขยายอินพุต-เอาต์พุต (I/O Expander) ไอซีแปลงสัญญาณอะนา ล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาล็อก (DAC) ไอซีรีลไทม์คล็อก (RTC) ไอซีขับโมดูล (LCD) หน่วยความจำอีพรอม และไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

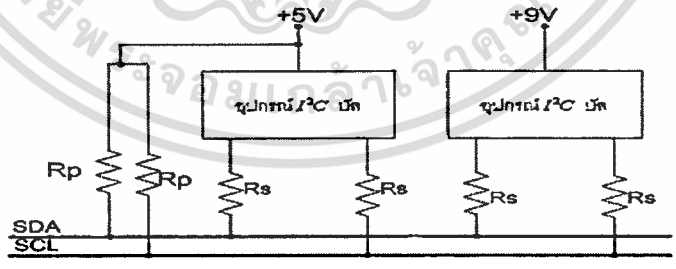
คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C

สาย SDAและ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (bi – directional line) มีการต่อตัวต้านทานพูลอัป กับ แรงดัน +5V ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสภาวะลอจิกสูงขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน ทั้งยังช่วยในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสอง ข้อเด่นของบัส I^2C คือ เชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยอุปกรณ์บนบัส I^2C ตัวหนึ่งอาจใช้ไฟเลี้ยง +5V อีกตัวหนึ่งใช้ไฟเลี้ยง+12V หรือ ในการต่อรวมกันในลักษณะที่อุปกรณ์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยงเท่ากัน โดยให้ต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน และต่อตัวต้านทานพูลอัป (R_P) เข้ากับแรงดัน +5V ไว้เสมอ ดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การต่อตัวต้านทานพูลอัปบนสายสัญญาณในระบบบัส I^2C

ในกรณีที่อาจมีแรงดันไฟกระชากขนาดใหญ่ปะปนเข้ามาในบัส I^2C ที่ขา SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวต้องต่อตัวต้านทานอนุกรมกับขา SDA และ SCL เรียกว่า R_S ก่อนต่อเข้าสู่บัส I^2C ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การต่อตัวต้านทาน R_S เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I^2C

หลักการของบัส I^2C

หลักการของบัส I^2C มีอุปกรณ์ต่อพ่วงมากมาย จึงต้องกำหนดรูปแบบการติดต่อ ที่เรียกว่าโปรโตคอล (Protocol) เพื่อให้ทราบว่าอุปกรณ์ตัวใดติดต่ออยู่ว่าเป็นตัวรับ หรือ ตัวส่ง และการทำงานมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่เป็นตัวส่งข้อมูล เรียกว่า ตัวส่ง (Transmitter)

อุปกรณ์ที่เป็นตัวรับข้อมูล เรียกว่า ตัวรับ (Receiver) ในอุปกรณ์บนบัส I^2C เป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง หรือเป็นตัวรับเพียงอย่างเดียว จะไม่มีอุปกรณ์ตัวใดบนบัส I^2C ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งเพียงอย่างเดียว

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการติดต่อบนบัส I^2C เรียกว่า มาสเตอร์ (Master)

อุปกรณ์ที่ถูกควบคุม หรือ อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I^2C เรียกว่า สเลฟ (Slave)

ข้อกำหนดในการติดต่อบนบัส I^2C คือ

1. การถ่ายทอดข้อมูลเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น
2. ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อสาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูง สาย SDA ต้องรักษาข้อมูลไว้ อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น มิฉะนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้น จะได้รับการแปลความหมายเป็นสัญญาณควบคุมแทนทันที

สภาวะที่เกิดขึ้นบนบัส I^2C

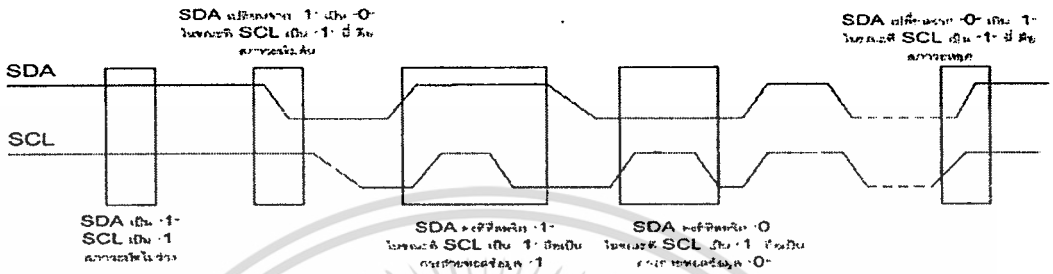
มีด้วยกัน 5 สภาวะดังนี้

1. บัสว่าง (Bus Not Busy) เกิดขึ้น เมื่อสาย SDA และ SCL เป็นลอจิกสูงทั้งคู่ หมายถึงการถ่ายทอดข้อมูลเริ่มต้นขึ้น
2. การถ่ายทอดข้อมูล (Start Data Transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง ซึ่งเรียกว่า สภาวะเริ่มต้น
3. หยุดการถ่ายทอดข้อมูล (Stop Data Transfer) ที่เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากต่ำไปสูง ขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกต่ำ ซึ่งเรียกว่า สภาวะหยุด
4. ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส (Data Valid) เกิดถัดจากสภาวะเริ่มต้น โดยสถานะลอจิกที่เกิดขึ้นบนสาย SDA เป็นข้อมูลที่ทำการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ข้อมูลในจังหวะนั้นเป็น "0" หรือ "1" ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อต้องการให้การถ่ายทอดข้อมูลสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่ขา SDA ต้องคงที่ ตลอดช่วงเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะนั้น อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ทำการควบคุมการถ่ายทอดข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสภาวะหยุด หรือสภาวะเริ่มต้น ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดเกิดความผิดพลาดขึ้น
5. รับรู้ข้อมูล (Acknowledge) เกิดหลังจากการถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิต เรียกว่า บิตรับรู้ (Acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์มาสเตอร์จะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เพื่อตอบสนองบิตรับรู้ที่ส่งมาจากตัวส่งทางด้านตัวรับจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำลงบนบัส อุปกรณ์สเลฟที่ถูกอ้างอิงถึงในการติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะเกิดบิตรับรู้ เพื่อตอบสนองการรับข้อมูลในแต่ละไบต์เรียบร้อยแล้ว

ในรูปที่ 4.9 เป็นไดอะแกรมเวลาที่แสดงถึงการเกิดสภาวะต่าง ๆ บนบัส I^2C ไม่ว่าจะเป็นสภาวะบัสว่าง, เริ่มต้น, ถ่ายข้อมูล, รับรู้ และหยุดการถ่ายทอดข้อมูล



รูปที่ 4.9 สถานะต่าง ๆ ในบัส I^2C

4.1.3 การใช้งานไอซี ADC/DAC บนระบบบัส I^2C เบอร์ PCF8591

การเชื่อมต่อสัญญาณอะนาล็อกกับพอร์ตอนุกรมผ่านระบบบัส I^2C

เป็นข้อมูลการติดต่อกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ โดยใช้สัญญาณดิจิตอล นำมาเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ที่เป็นตัวประมวลผลสัญญาณอะนาล็อก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ ไอซีแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) เพื่อเชื่อมต่อโดยผ่านบัส I^2C การใช้ไอซี ADC เบอร์ PCF8591 ในการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล

ข้อมูลเบื้องต้นของ PCF8591

เป็นไอซีแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 8 บิต 4 ช่อง และแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาล็อก ด้วยการควบคุมผ่านบัส I^2C ทำให้ต่อพ่วงไอซี PCF8591 ได้สูงสุดถึง 8 ตัว รองรับการอ่านค่าสัญญาณอะนาล็อกอินพุตได้สูงสุดถึง 32 ช่อง และส่งสัญญาณอะนาล็อกเอาต์พุตสูงสุดได้ถึง 8 ช่อง ด้วยการกำหนดแอดเดรสจากขา A0, A1 และ A2 ดังตารางที่ 4.2 และการจัดขาของไอซี ADC/DAC ขนาด 8 บิต ดังรูปที่ 4.10 ส่วนคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญมีดังนี้

1. ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟชุดเดียว
2. ไฟเลี้ยงวงจรที่ 2.5V – 6V
3. กินกระแสขณะอยู่ในสภาวะสแตนบายต์ต่ำ
4. ติดต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบัส I^2C
5. เลือกตำแหน่งแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์จากขา A0, A1, A2 ทำให้ต่อพ่วงกันได้สูงสุดถึง 8 ตัว
6. อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling) ขึ้นอยู่กับความเร็วของสัญญาณนาฬิกาบนบัส I^2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. วงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลรับสัญญาณอะนาล็อกได้ 4 ช่อง ทั้งยังเลือกได้ว่าให้ทำงานแบบแยกช่อง หรือ ทำงานแบบวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

8. การอ่านค่าสามารถกำหนดให้เลื่อนช่องอินพุตโดยอัตโนมัติได้

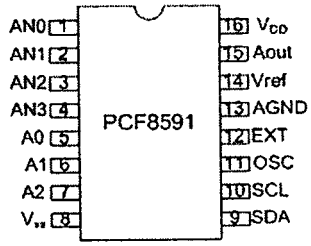
9. สัญญาณอะนาล็อกมีระดับแรงดันตั้งแต่ Vss ไปจนถึง V_{DD}

10. มีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาล็อกขนาด 8 บิต 1 ช่อง

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดชื่อขาสัญญาณของ PCF8591

ชื่อ	ตำแหน่งขา	หน้าที่
AN0	1	อะนาล็อกอินพุตช่องที่ 1
AN1	2	อะนาล็อกอินพุตช่องที่ 2
AN2	3	อะนาล็อกอินพุตช่องที่ 3
AN3	4	อะนาล็อกอินพุตช่องที่ 4
A0	5	ขากำหนดแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์ บิต 0
A1	6	ขากำหนดแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์ บิต 1
A2	7	ขากำหนดแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์ บิต 2
Vss	8	กราวด์
SDA	9	ขาข้อมูลสำหรับ I^2C บัส
SCL	10	ขาสัญญาณนาฬิกาสำหรับ I^2C บัส
OSC	11	ขาอินพุตเอาต์พุตออสซิลเตอร์
EXT	12	ขาเลือกออสซิลเตอร์ภายในหรือภายนอก
AGND	13	กราวด์อะนาล็อก
Vref	14	ขาอินพุตสำหรับแรงดันอ้างอิง
Aout	15	ขาอะนาล็อกเอาต์พุต(วงจร D/A)
V_{DD}	16	ไฟเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การจัดขาของไอซี ADC/DAC ขนาด 8 บิต ผ่านบัส I^2C เบอร์ PCF8591

การอ่านค่าข้อมูลอินพุตอะนาล็อกของ PCF8591
มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดแอดเดรสของ PCF8591 ที่ขา A2, A1, A0
2. เรียกโปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ
3. ส่งข้อมูลควบคุมไปยัง PCF8591
4. ส่งสัญญาณ Stop
5. เรียกโปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ
6. ส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสอีกครั้ง โดยครั้งนี้กำหนดให้เป็นโหมดอ่านข้อมูล (ส่งข้อมูลลอจิก "1" ให้แก่บิต $R/\overline{W}$) เพื่อเริ่มต้นอ่านค่าข้อมูลจากช่องสัญญาณอะนาล็อกอินพุต
7. อ่านค่าขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิกตอลช่องที่ 1
8. หากต้องการอ่านค่าในช่องต่อไปให้เริ่มต้นการติดต่อใหม่ ดังนั้น การเขียนโปรแกรมเพื่ออ่านค่าต่อเนื่องทั้ง 4 ช่อง หรือ มากกว่า ต้องเขียนโปรแกรมวนลูป เพื่อกำหนดรอบการทำงานจำนวน 4 รอบ หรือ มากกว่า ก็จะอ่านค่าได้ครบทุกช่อง

การเขียนข้อมูลวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาล็อกของ PCF8591
มีข้อแตกต่างจากการอ่านข้อมูลดังนี้

1. เรียกโปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ
2. ส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสโดยให้ทำงานในโหมดเขียนข้อมูล(บิต $R/\overline{W}$ เป็นลอจิก "0")
3. ส่งข้อมูลควบคุม 40H ไปยัง PCF8591เพื่อ Enable อะนาล็อก
4. ส่งข้อมูลไปยังเอาต์พุตอะนาล็อก โดยค่าที่ส่งออกไปต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0-255
5. ส่งภาวะหยุด

4.1.4 การใช้ Visual Basic 6 [31], [32], [33], [34]

ในปัจจุบันระบบปฏิบัติการ (Operating System) ของ Windows ได้เข้ามาแทนที่ระบบปฏิบัติการ Ms-DOS เนื่องจากระบบปฏิบัติการ Windows มีการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับ

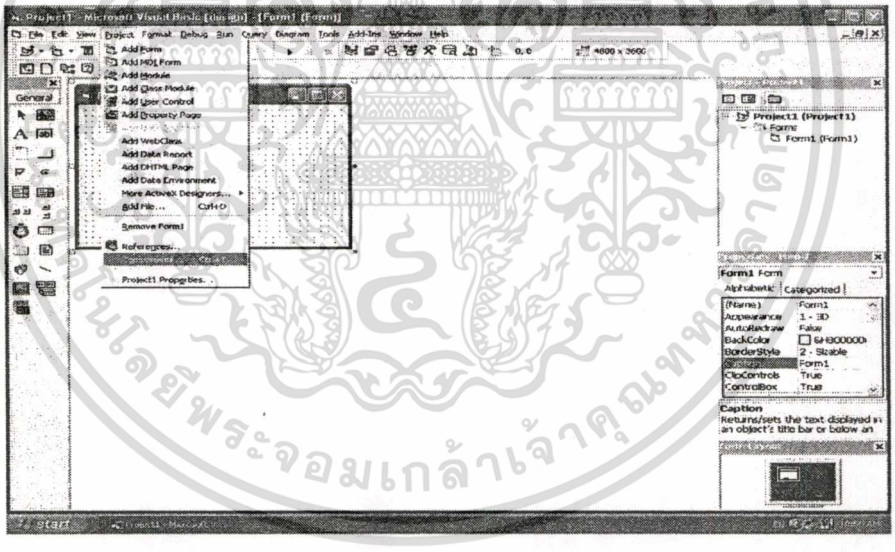
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ใช้อยู่ในรูปของ GUI (Graphic User Interface) ที่ใช้รูปภาพแทนคำสั่งต่าง ๆ แต่ MS-DOS คำสั่งจะอยู่ในรูปของตัวอักษร ที่ป้อนทีละบรรทัด ที่เรียกว่า "Command Line" ด้วยเหตุนี้ จึงเปลี่ยนรูปแบบและแนวความคิดหันมาพัฒนาโปรแกรมบน Windows แทน

ซึ่ง Visual Basic จัดเป็นภาษาที่ได้รับความนิยม และถูกนำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรม เพื่อใช้งานบน Windows เนื่องจากเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้เทคโนโลยีในลักษณะVisualize ซึ่งเลือก Control ที่เหมาะสมแล้ววาดลงบน Fromก็สร้างจอภาพที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้ รวมทั้งการใช้โปรแกรมแบบ Event-driven ซึ่งเป็นการเขียนโปรแกรม เพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงานให้กับ Control ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นตามเหตุการณ์ (Event) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

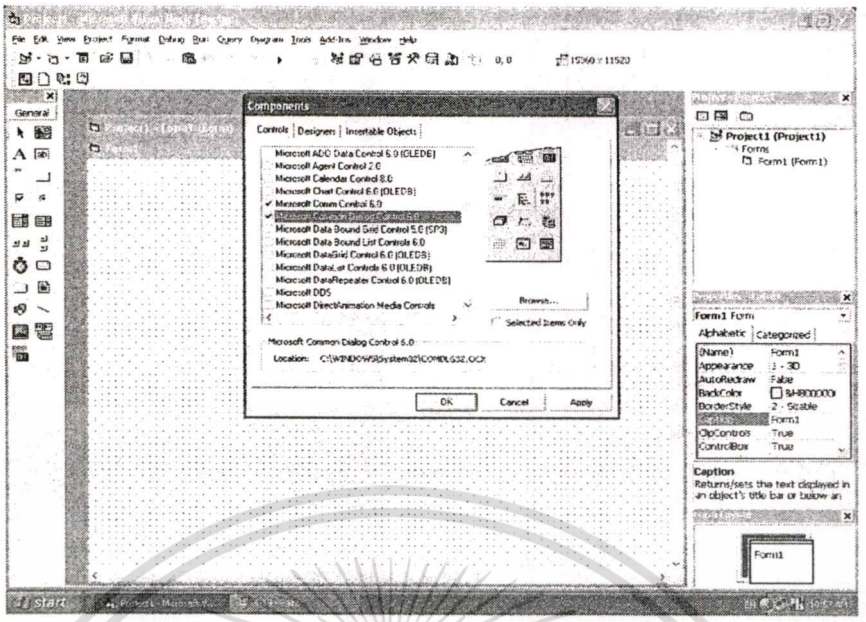
4.1.5 การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อฮาร์ดแวร์โดยใช้ Visual Basic

ทำได้โดยใช้ VB Control ที่ชื่อ MsComm โดยกำหนดใน Custom Control แล้วเข้าไปที่ เมนู Project→Components เลือกที่ช่อง MsComm ก็จะปรากฏเป็นไอคอนโทรศัพท์สีเหลือง ให้คลิกที่ไอคอนลากนำมาไว้บน Fromใน Project ของโปรแกรม ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13

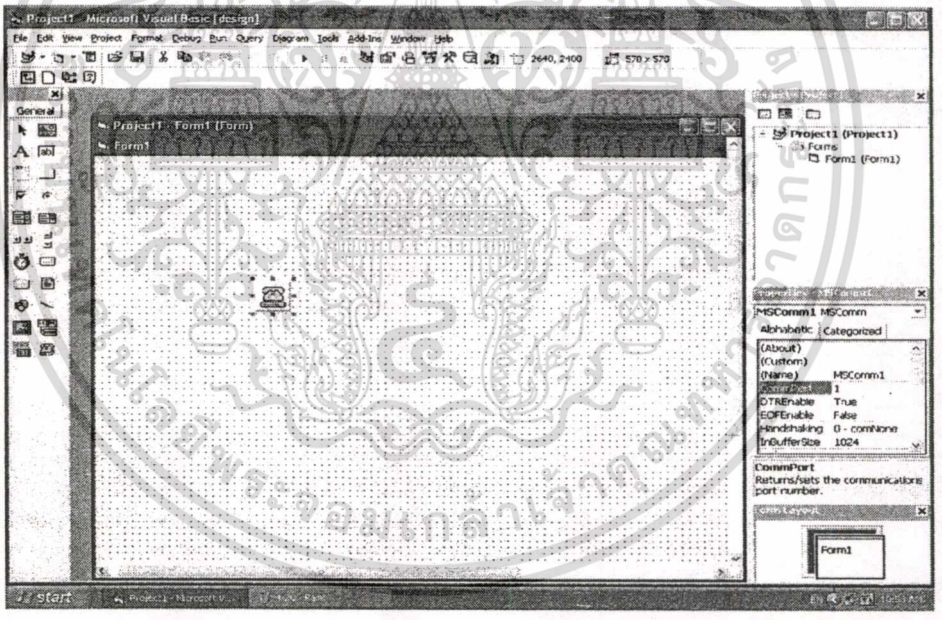


รูปที่ 4.11 การเลือก Components

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การเลือก Microsoft Comm Control 6.0



รูปที่ 4.13 การเลือก MsComm ใน Toolbox มาไว้ใน From

การเขียนโปรแกรมติดต่อกับ Serial Port ทำได้ 2 วิธี คือ

- การติดต่อแบบอินเตอร์รัพต์ คือ ขบวนการอินเตอร์รัพต์จะมีอุปกรณ์รอบข้างเกือบทุกชิ้นที่ต้องปฏิบัติงานอยู่ เพื่อส่งสัญญาณไปให้แก่ ซีพียู โดยการรับ-ส่งสัญญาณ จะใช้รหัสแอสกี้ การเขียนโปรแกรมอินเตอร์รัพต์ ทำให้เกิด CommEvent กับ OnCommEvent เมื่อมีข้อมูลเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การติดต่อแบบโพลลิ่ง คือ ในพีซี การโพลลิ่งบางทีใช้การส่งผ่านข้อมูลระหว่าง Terminal กับซีพียู ซึ่งตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา เมื่อซีพียูส่งสัญญาณออกไปการตรวจสอบ ถ้าพบว่ามีข้อมูลที่ต้องส่งเข้ามา (เรียกว่า"Wet Poll") ซึ่งเสียช่วงเวลา 90 เปอร์เซ็นต์ คาบเวลาที่เสียไปนั้น ต้องไปใช้เทคนิค การโพลแบบ "Round Robin" แทน แต่ใน VB จะใช้การตรวจสอบข้อมูลที่มาจาก Serial Port ตลอด โดยใช้ Control Timer เข้ามาช่วยในการเขียนโปรแกรม และตรวจสอบได้ถึงระดับ 1mS หรือจะใช้ Do...Loop ก็ได้

ในตัวคอนโทรล MsComm มี Event ที่ใช้เพียง Event เดียวเท่านั้น ก็คือ OnCommEvent ซึ่งใช้ในการติดต่อแบบอินเตอร์รัพต์ การเขียนโปรแกรมติดต่อ Serial Port แบบธรรมดาจะใช้ CommEvent เพียง ComEvReceive, ComEvSend ถ้าเป็นการติดต่อสื่อสารแบบ โมเด็มจะใช้หลายตัวในการตรวจสอบสัญญาณ

4.1.6 องค์ประกอบในการใช้ MsComm

1. **การตั้งค่าติดต่อพอร์ต**
   - Comport คือ ต้องกำหนดหมายเลข Port ที่ใช้ต่อ Rs-232(Com1, Com2)
   - Setting คือ ต้องกำหนดอัตรา Baud Rate, Parity, Data (จำนวนบิต), Stop
   - Handshaking คือ กำหนดได้ 4 แบบ ComNone, ComXonXoff, ComRTS และ ComTrsXonXoff
2. **การใช้ Buffer ในการรับส่งข้อมูล**
   - InBuffersize คือ การกำหนด Buffer ในการรับเข้ามา
   - OutBuffersize คือ การกำหนด Buffer ในการส่งข้อมูลออกไป
   - Rthreshold คือ การกำหนดการเกิด Event-driven ในการรับข้อมูลเข้ามา
   - Sthreshold คือ การกำหนดการเกิด Event-driven ในการส่งข้อมูลออกไป
   - Input Len คือ จำนวนของข้อมูลที่ไปอ่านใน Buffer รับข้อมูล
   - EOFEnable คือ การที่บอกว่าสิ้นสุดของไฟล์ (EOF) End of File
3. **ด้านฮาร์ดแวร์**
   - Parity Replace คือ ค่าของคาเล็กเตอร์ที่แทนในเมื่อเกิด Parity Error
   - Null Discard คือ การกำหนดให้รับหรือไม่รับ Null Character
   - RTSEnable คือ ทำให้สัญญาณ RTS (Request To Send)
   - DTREnable คือ ทำให้สัญญาณ DTS (Data Terminal Ready)

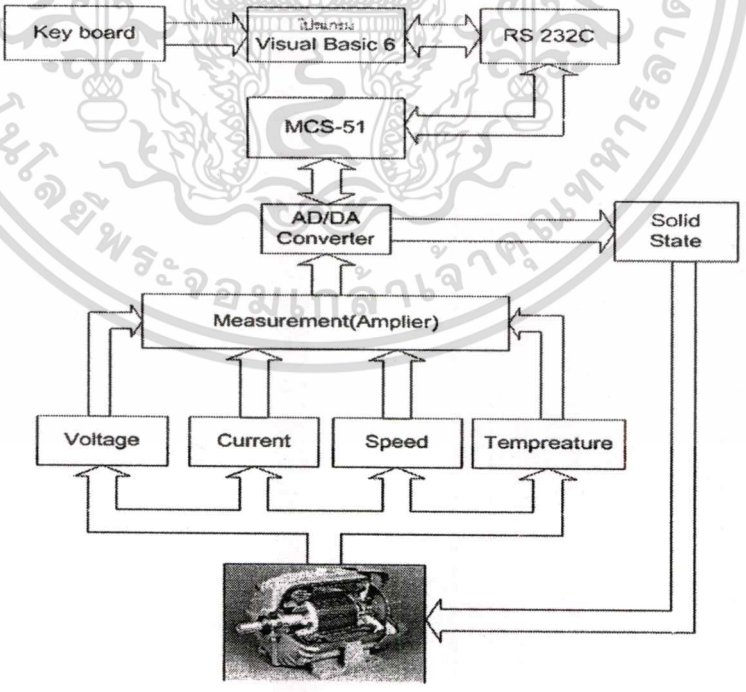
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
หลักการออกแบบ

5.1 บทนำ

ระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นแนวทางหนึ่งในการป้องกันระบบให้มีความน่าเชื่อถือ และมีความแม่นยำมากกว่าแบบเดิม เพื่อใช้เป็นลักษณะการป้องกันความผิดปกติอย่างใดอย่างหนึ่ง จะเห็นได้ว่าเมื่อต้องการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับสภาวะใด ๆ ต้องใช้รีเลย์เฉพาะสภาวะนั้น แต่ถ้าต้องการป้องกันความผิดปกติให้ครอบคลุมทุกสภาวะต้องใช้รีเลย์เป็นจำนวนมาก ทำให้มีความซับซ้อนในการติดตั้ง และปรับตั้งค่าขอบเขตการป้องกันตามสภาวะต่าง ๆ ให้มีความสอดคล้องกัน เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าวจึงนำระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้งาน ทำให้ระบบป้องกันมีขนาดเล็กลง ลดความซับซ้อนลง ปรับตั้งค่าสภาวะความผิดปกติและเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานได้ง่าย

นอกจากนี้ ระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ยังถูกออกแบบโปรแกรมให้มีหน้าที่ในการทำงานต่าง ๆ ได้อย่างครอบคลุม โดยใช้คอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อควบคุมปริมาณทางไฟฟ้าในการใช้งานมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้ [2], [7]



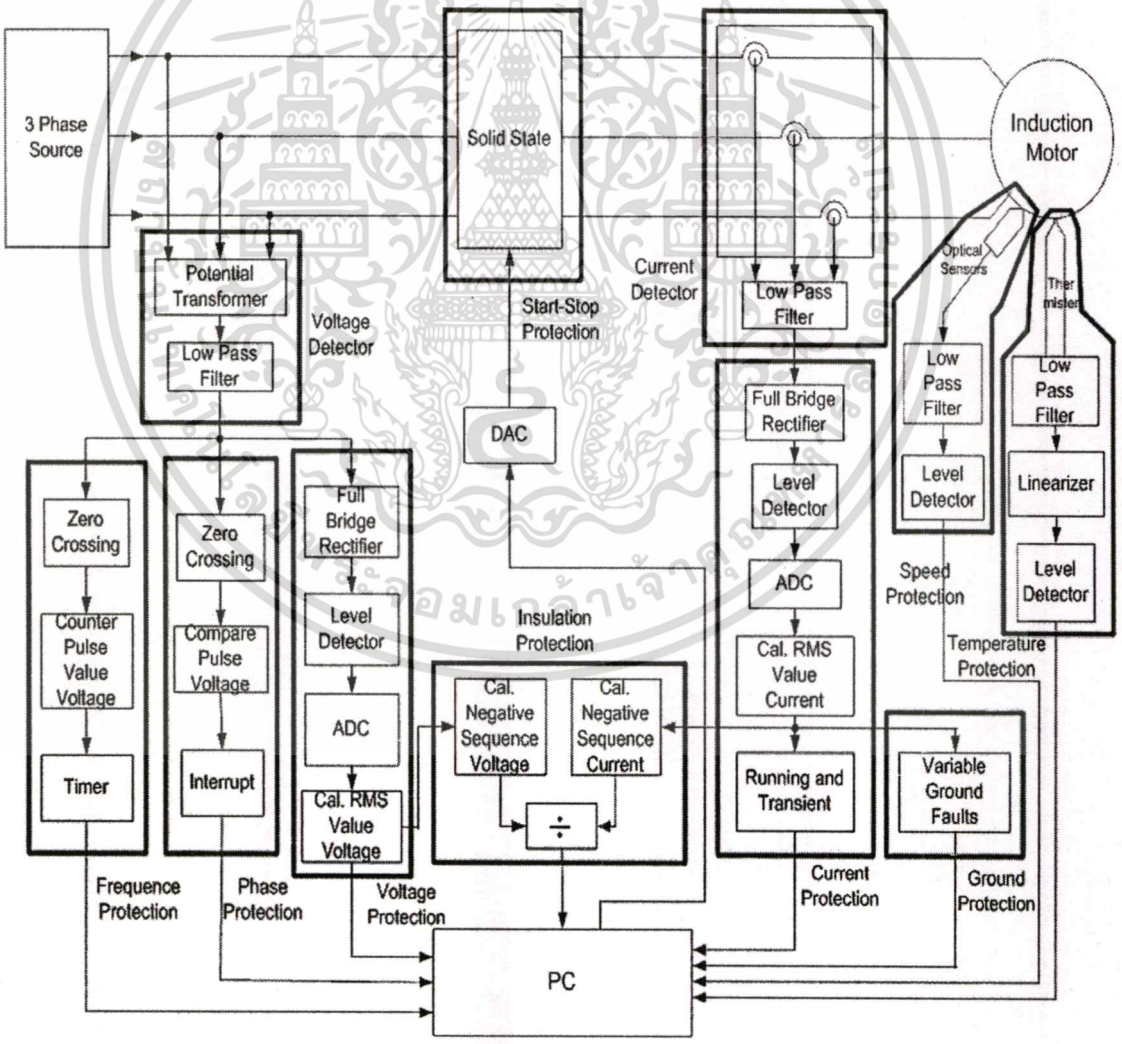
รูปที่ 5.1 แผนภูมิระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ลักษณะโครงของระบบป้องกันมอเตอร์

ระบบป้องกันมอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนของโปรแกรม (Software) โดยทั้งสองส่วนเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบป้องกันที่ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 5.2 และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวพักข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ตัวมอเตอร์ โดยจะทำการวิเคราะห์สภาวะความผิดปกตินั้นๆ ว่าให้มอเตอร์ทำงาน หรือ หยุดการทำงาน ส่วนของคอมพิวเตอร์จะแสดงสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์และสื่อสารกับผู้ใช้งานโดยผ่าน Key broad

ดังนั้น ในการออกแบบโปรแกรมควบคุม จึงต้องให้สอดคล้อง และมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ที่ทำขึ้น เพื่อให้ระบบป้องกันเป็นไปตามต้องการ ในขณะเดียวกัน ก็ทำให้ระบบโดยรวมมีขนาดที่เล็กลง [1], [2], [3], [6], [7]



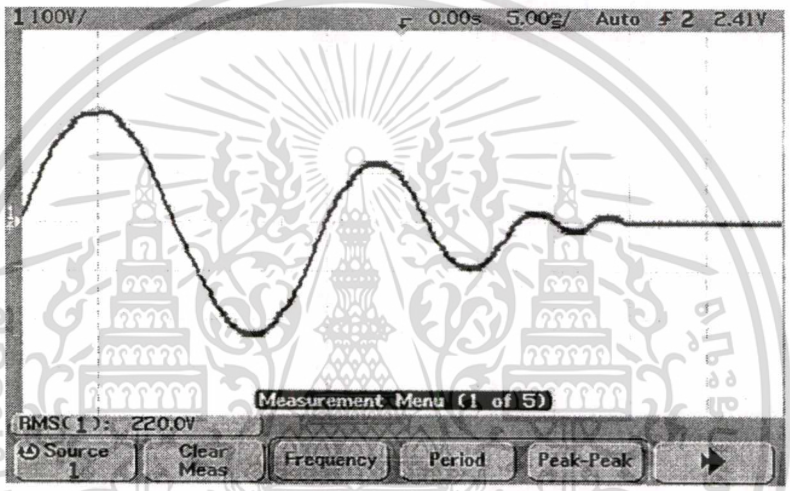
รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการป้องกันมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

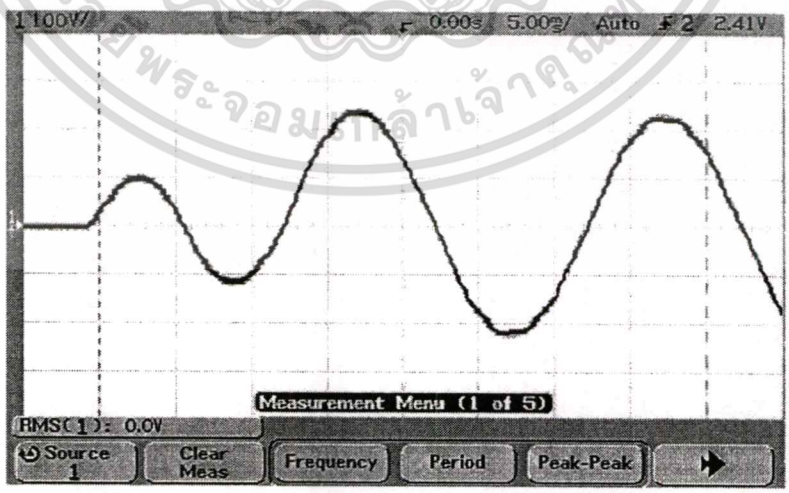
5.3 ส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware)

5.3.1 ส่วนการควบคุมการตัดต่อวงจรของมอเตอร์

การตัดต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ใช้วิธีแบบต่อตรง (Direct On Line Starting: DOL) ที่ใช้โซลิดสเตตแทน แมคเนติกคอนแทคเตอร์ ที่มีส่วนเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสที่ทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Bounce อยู่ชั่วระยะหนึ่ง มีระยะเวลาประมาณ 5ms ถึง 50ms ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้น แก้ไขได้โดยใช้โซลิดสเตตแทน สัญญาณที่ได้จากการตัดต่อของโซลิดสเตตดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6

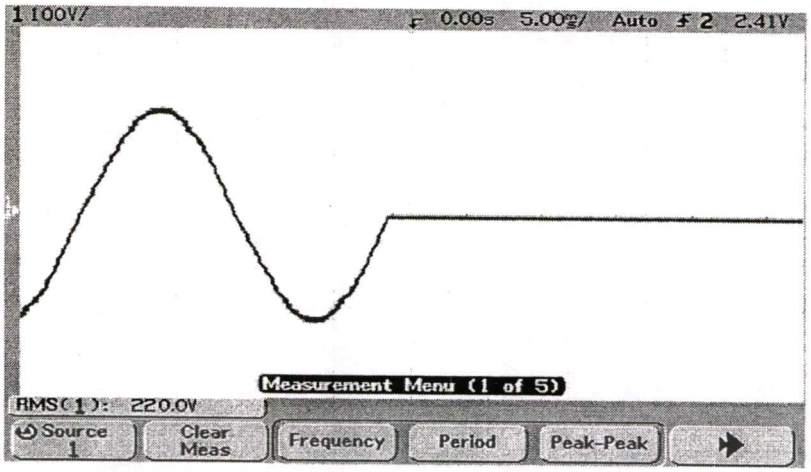


รูปที่ 5.3 สัญญาณที่เกิดการสั่นหน้าสัมผัสของแมคเนติกคอนแทคเตอร์เปลี่ยนจาก On เป็น OFF

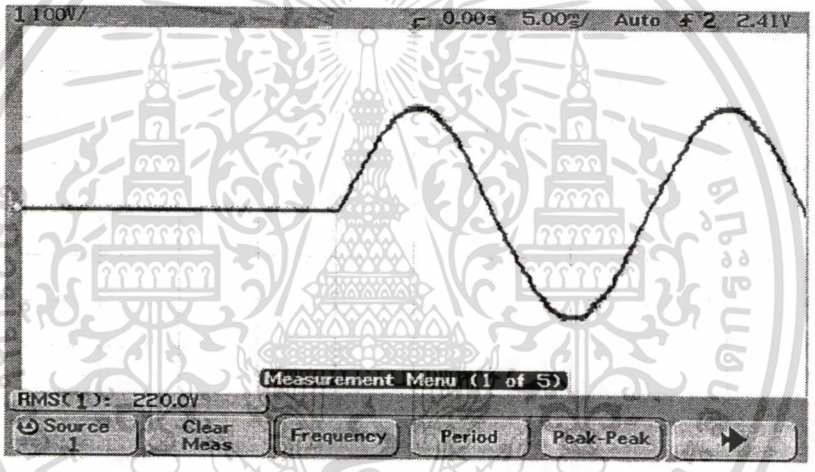


รูปที่ 5.4 สัญญาณที่เกิดการสั่นหน้าสัมผัสของแมคเนติกคอนแทคเตอร์เปลี่ยนจาก OFFเป็น On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สัญญาณที่จากการ On เป็น OFF ของ โซลิดสเตต



รูปที่ 5.6 สัญญาณที่จากการ OFF เป็น On ของ โซลิดสเตต

5.3.2 ส่วนของการวัดสัญญาณและผลการทดสอบวงจรต่าง ๆ จากตัวมอเตอร์

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.2 แบ่งวงจรการใช้งาน และอุปกรณ์วัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.3.2.1 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์และเซ็นเซอร์

โดยมีการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้า (Potential Transformer)
2. ตัวตรวจวัดกระแส (Current Transducer)
3. ตัวสะท้อนแสง (Optical Sensors)
4. ตัววัดอุณหภูมิ (Thermister)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2 รายละเอียดการทำงานของวงจรแต่ละส่วน

จำแนกรายละเอียดของวงจรต่าง ๆ ได้เป็น

1. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)
2. วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง (Absolute-value Circuit)
3. วงจรจำกัดแรงดันเกิน (Level Detector)
4. วงจรตรวจวัดสัญญาณผ่านศูนย์ (Zero Crossing)
5. วงจรแก้ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)
6. วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)
7. วงจรกรองสัญญาณ(Smoothed)

5.3.2.3 วงจรตรวจวัดสัญญาณ

การตรวจวัดสัญญาณต่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน (Voltage Detector)
2. วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส (Current Detector)
3. วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ (Speed Detector)
4. วงจรตรวจวัดสัญญาณความถี่ (Frequency Detector)
5. วงจรตรวจวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ (Temperature Detector)
6. วงจรตรวจวัดความต่างเฟสของระบบไฟฟ้า (Phase Sequence Detector)
7. วงจรโซลิดสเตตที่ใช้ตัดต่อการทำงานของมอเตอร์ (Solid State)

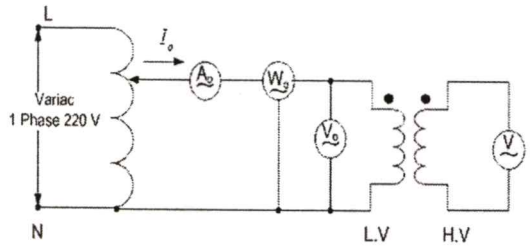
5.3.3 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์และเซ็นเซอร์ต่าง ๆ

5.3.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า (Potential Transformer)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาด 3VA, $250/6V_{ac}$, 50Hz, 1ϕ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 76-1967 ตามหัวข้อที่ 3.3.1.1 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **การทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร** (Open Circuit Test)



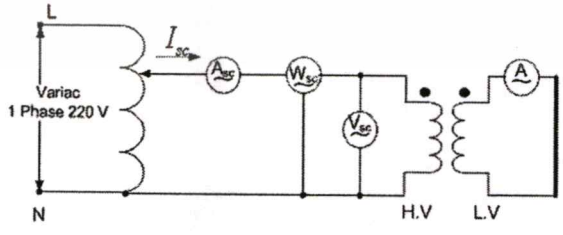
รูปที่ 5.7 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

จากรูป เป็นวงจรทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร และผลที่ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

Description	Transformer rated 0.5A(6V)
Vo(Voltage No Load)	$6V_{ac}$
Po(No Load Power Loss)	0.039W
Io(No Load Current)	0.015A
a (Transformer ratio)	41.67
$Cos\theta_o$ (No Load Power Factor)	0.433
I_C (Iron Loss Current)	0.0065A
I_m (Core Loss Current)	0.0135A
X_m (Magnetizing reactance)	444.4 Ω
R_C (Iron Loss resistance)	923.08 Ω

2. **การทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร** (Short Circuit Test)



รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร

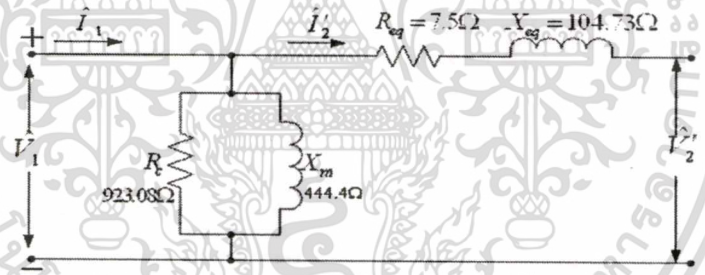
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นวงจรทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร และผลที่ได้ดังตารางต่อไปนี้

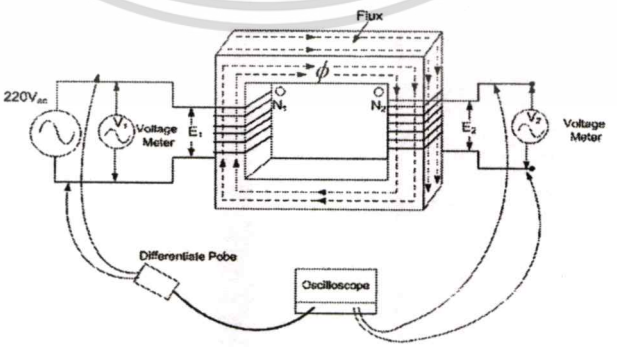
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร(Short Circuit Test)

Description	Transformer rated 0.5A(6V)
V_{sc} (Voltage Short Circuit)	$21\,V_{ac}$
P_{sc} (Short Circuit input Power Loss)	1.5W
I_{sc} (Short Circuit input Current)	0.2A
a (Transformer ratio)	41.67
$Cos\theta_s$ (Short Circuit Power Factor)	0.357
Z_{eq} (Equivalent Impedance)	$105\,\Omega$
R_{eq} (Winding Resistance)	$7.5\,\Omega$
X_{eq} (Leakage Reactance)	$104.73\,\Omega$

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร และแบบลัดวงจร นำมาเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูป



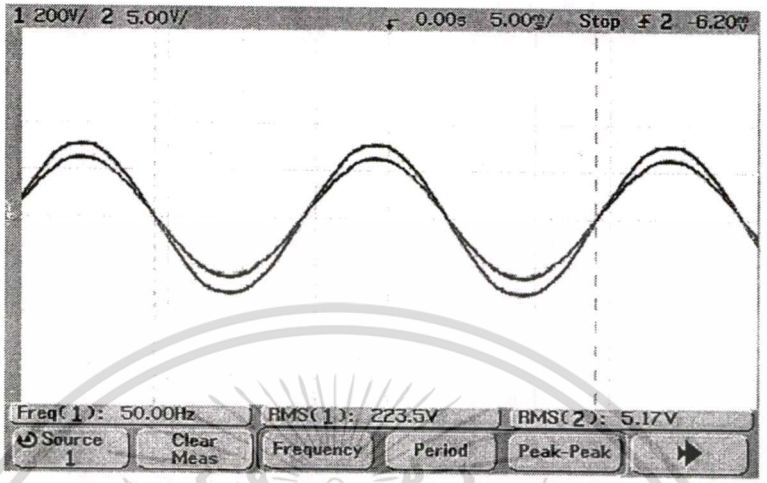
รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยประมาณ (Approximate Equivalent Circuit)



รูปที่ 5.10 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นวงจรที่ใช้ทดสอบวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับทางด้านเอาต์พุต โดยผลการทดสอบดังตารางที่ 5.3 และรูปสัญญาณที่วัดได้ดังรูปต่อไปนี้



RMS(1) แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต RMS(2) แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต

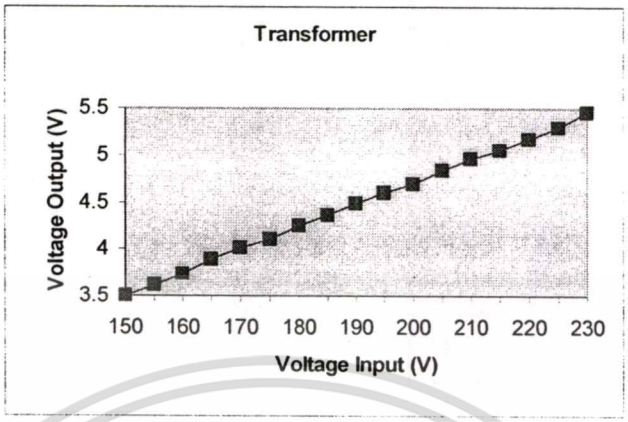
รูปที่ 5.11 สัญญาณหม้อแปลงขนาด 250/6V 0.5A ความถี่ 50Hz

ตารางที่ 5.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

แรงดันไฟฟ้าอินพุต(V)	แรงดันเอาต์พุต (V)
150	3.5
155	3.61
160	3.74
165	3.89
170	4.01
175	4.11
180	4.25
185	4.36
190	4.48
195	4.6
200	4.69
205	4.83
210	4.96
215	5.05
220	5.17
225	5.3
230	5.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

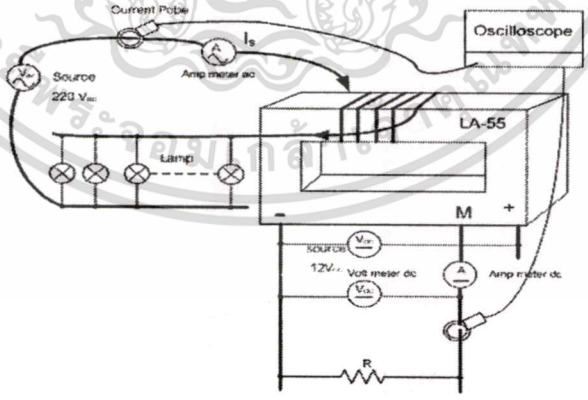
จากตารางนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับเอาต์พุตของหม้อแปลง

5.3.3.2 **การทดสอบตัวตรวจวัดกระแส** (Current Transducer)

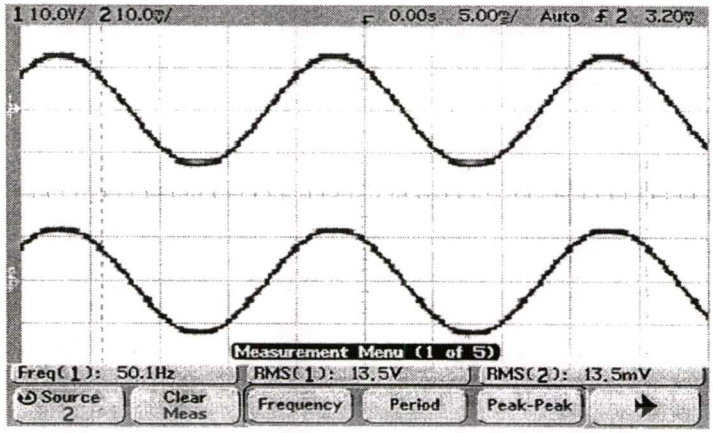
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ ฮอลล์เอฟเฟกต์ มีข้อดี คือ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ และมีแบนด์วิชกว้าง ตามหัวข้อ 3.3.2 กระแสที่ออกจาก LEM ถูกแปลงสัญญาณให้เป็นแรงดัน โดยทฤษฎีของนอร์ตัน ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ±5 โวลต์ ในการทดสอบอุปกรณ์ เพื่อหาค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนในการแปลงสัญญาณ ทำได้โดยการจ่ายกระแสผ่านอุปกรณ์ และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส



รูปที่ 5.13 **วงจรทดสอบตรวจจับกระแส** LEM Model LA-55P

จากรูป เป็นการทดลองตัวตรวจวัดกระแส ทางด้านอินพุต เอาต์พุต และการแปลงสัญญาณกระแสเป็นแรงดัน โดยใช้ตัวต้านทานต่อ และสัญญาณกระแสที่วัดได้ จากการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



RMS(1) กระแสอินพุต เท่ากับ 13A RMS(2) แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต เท่ากับ 13mV

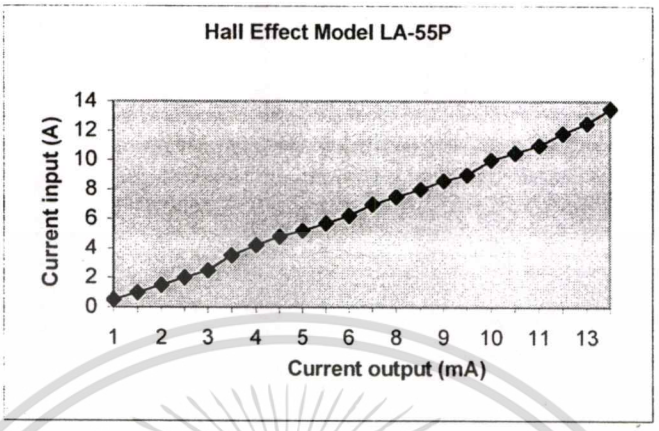
รูปที่ 5.14 สัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแสที่ความถี่ 50Hz

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส Hall Effect Model LA-55P

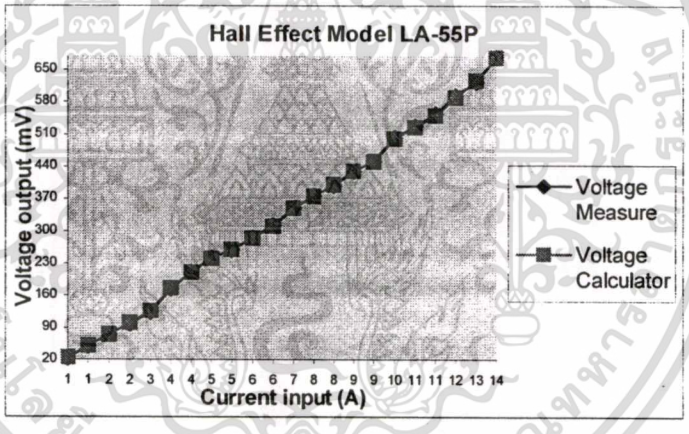
Current		Voltage Output (V)		%Error
Input (A)	Output (mA) พัน 2 รอบ	Voltage O/P (Measure)	Voltage O/P (Calculator)	
0.5	0.25	0.024	0.025	-0.00400
1.0	0.50	0.049	0.050	-0.00200
1.5	0.75	0.076	0.075	0.00133
2.0	1.00	0.098	0.100	-0.00200
2.5	1.25	0.123	0.125	-0.00160
3.5	1.75	0.174	0.175	-0.00057
4.2	2.10	0.211	0.210	0.00048
4.8	2.40	0.242	0.240	0.00083
5.2	2.60	0.259	0.260	-0.00038
5.7	2.85	0.286	0.285	0.00035
6.2	3.10	0.312	0.310	0.00065
7.0	3.50	0.349	0.350	-0.00029
7.5	3.75	0.376	0.375	0.00027
8.0	4.00	0.398	0.400	-0.00050
8.6	4.30	0.429	0.430	-0.00023
9.0	4.50	0.452	0.450	0.00044
10.0	5.00	0.502	0.500	0.00040
10.5	5.25	0.527	0.525	0.00038
11.0	5.50	0.553	0.550	0.00055
11.8	5.90	0.593	0.590	0.00051
12.5	6.25	0.623	0.625	-0.00032
13.5	6.75	0.676	0.675	0.00015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง แสดงผลทดสอบตัวตรวจวัดกระแส แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต กระแสเอาต์พุต และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้ดังรูปต่อไปนี้

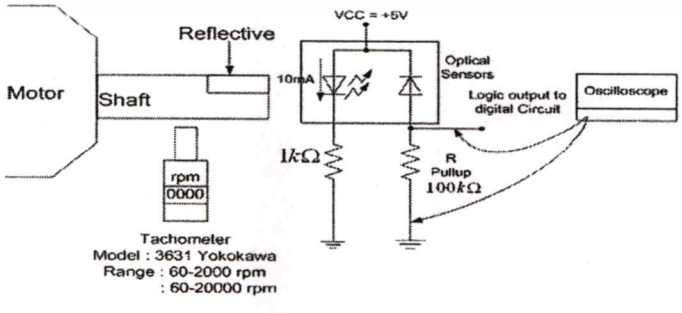


รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบกระแสอินพุตกับกระแสเอาต์พุต



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสอินพุต

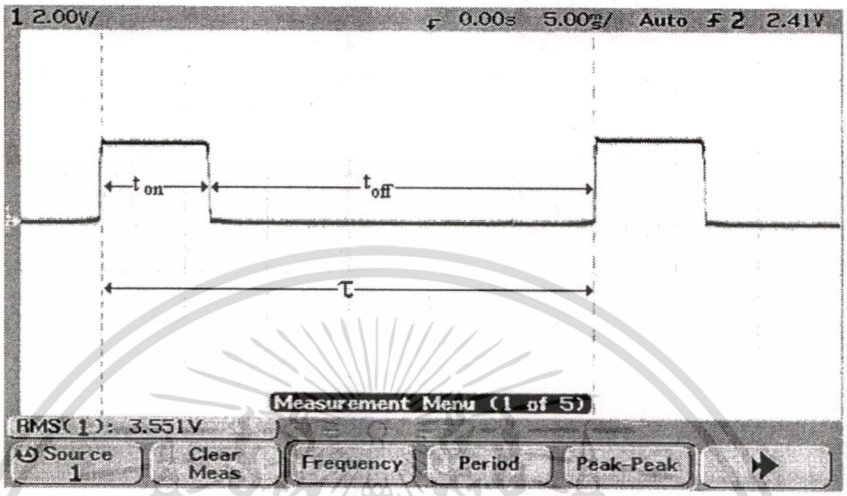
5.3.3.3 การทดสอบตัวสะท้อนแสง (Optical Sensors)



รูปที่ 5.17 วงจรวัดความเร็วรอบ

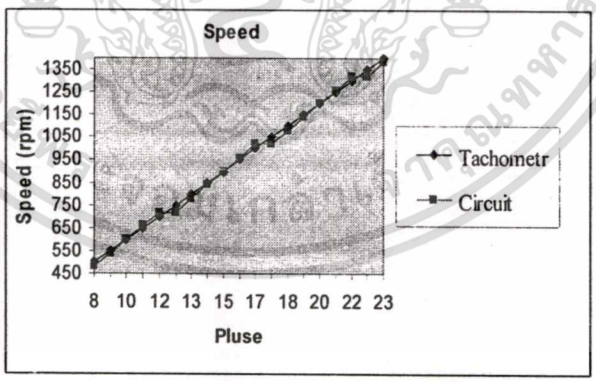
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นวงจรวัดสัญญาณความเร็วรอบด้วยแสง (Optical Sensors) แบบสะท้อนแสง (Reflective) มีหลักการทำงาน คือ แสงที่แหล่งจ่าย (Source) ไปตกกระทบที่เพลาของมอเตอร์ แล้วสะท้อนแสงเข้าตัวรับแสง (Receiver) เป็นแบบ Open Collector สัญญาณที่ได้เป็นพัลส์ดังรูป



รูปที่ 5.18 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร็วรอบ

โดยสัญญาณพัลส์มีความถี่แปรผันตรงกับความเร็วของมอเตอร์ ใช้หลักการคำนวณตาม หัวข้อ 3.3.3 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังนี้



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tachometer กับวงจรวัดความเร็วรอบ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tachometer กับวงจรวัดความเร็วรอบแสดงผลการทดลองได้ดังตารางต่อไปนี้

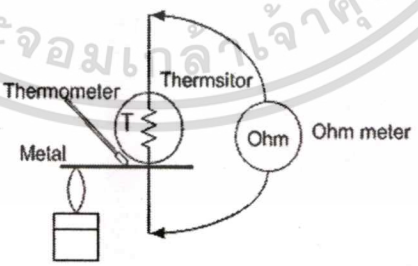
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tachometer กับวงจรวัดความเร็วรอบ

จำนวนพัลส์ที่วัดได้ (Pulse)	ความเร็วรอบที่วัดจาก Tachometer Model: 3631 Yokokawa(rpm)	ความเร็วรอบที่วัดได้จากวงจรวัดความเร็ว(rpm)
8	500	480
9	550	540
10	600	600
11	650	660
12	700	720
13	750	720
14	800	780
15	850	840
16	900	900
17	950	960
18	1000	1020
19	1050	1020
20	1100	1080
21	1150	1140
22	1200	1200
22	1250	1260
23	1300	1320

5.3.3.4 การทดสอบตัววัดอุณหภูมิ (Thermister)

ในการวัดค่าอุณหภูมิ ใช้เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC รุ่น TTC3A473-A9A มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามหัวข้อ 3.3.4 ซึ่งวิธีการทดลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.20 การทดลองหาค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์

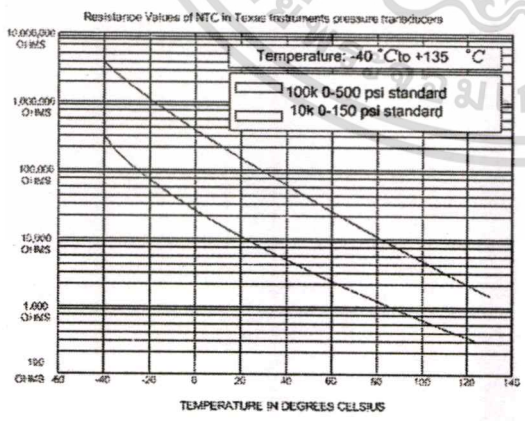
จากการทดลองได้ผลดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

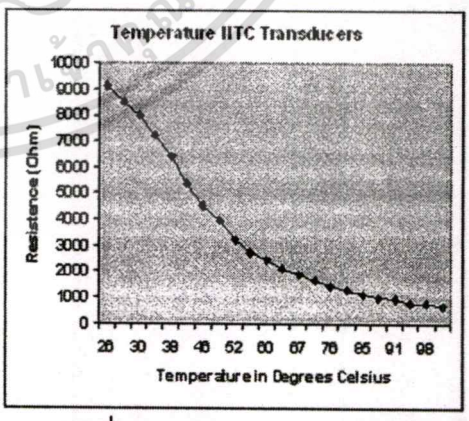
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลที่วัดได้จากตัวเทอร์มิสเตอร์

อุณหภูมิที่ผิวโลหะที่เทอร์มิสเตอร์ติดอยู่ $(^{\circ}C)$	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (Ω)
26	9120
28	8512
30	7980
33	7222
38	6425
41	5372
46	4525
48	3945
52	3254
58	2741
60	2435
64	2128
67	1923
72	1692
76	1425
81	1290
85	1100
88	998
91	942
95	809
98	792
102	698

จากตารางแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้



ก) กราฟมาตรฐานของเทอร์มิสเตอร์



ข) กราฟที่ได้จากการทดสอบเทอร์มิสเตอร์

รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 รายละเอียดการทำงานของวงจรแต่ละส่วน

5.3.4.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) [34], [35]

เนื่องจากสัญญาณรบกวนความถี่สูง ทำให้เกิดความผิดพลาด ในการนำค่าสัญญาณไปประมวลผล ต้องใช้วงจรลดทอนสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออก โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำที่ยอม ให้ความถี่ต่ำผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดันดีซีจนถึงความถี่คัตออฟ(f_c) (ความถี่คัตออฟ คือ ความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ) แสดงได้ดังรูป



ก) การตอบสนองความถี่ของวงจร ข) บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองความถี่ต่ำ

รูปที่ 5.22 การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูป เส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติ และเส้นปะแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ ซึ่งเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop Band)

ในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ ที่กรองสัญญาณความถี่ต่ำที่ใช้งานโดยทั่วไป เป็นวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ R, C แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



ก) วงจรกรองความถี่ต่ำ ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.23 วงจรกรองความถี่ต่ำ

จากรูปวงจรกรองความถี่ต่ำ คำนวณหาแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อม C ได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} \times V_i$$

$$V_o = \frac{1}{1 + j\omega CR} \times V_i = \frac{1}{1 + sCR} * V_i \qquad (5.1)$$

จากสมการนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.23 ข) เมื่อค่า R ในวงจรมีค่าน้อยมากหรือเข้าใกล้ "0" ซึ่งมีค่า C เพียงตัวเดียว (เรียกว่า วงจร Surge Protection ทำหน้าที่ ปรับปรุงขนาดสัญญาณซายน์ (Sine Wave) ที่มีรูปสัญญาณผิดเพี้ยนให้ดีขึ้น โดยอาศัยการ Change และ Discharge ของตัวเก็บประจุ) ถ้าอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ "1" หาค่าความถี่คัตออฟ ได้ดังนี้

$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 2\pi f_C \qquad (5.2)$$

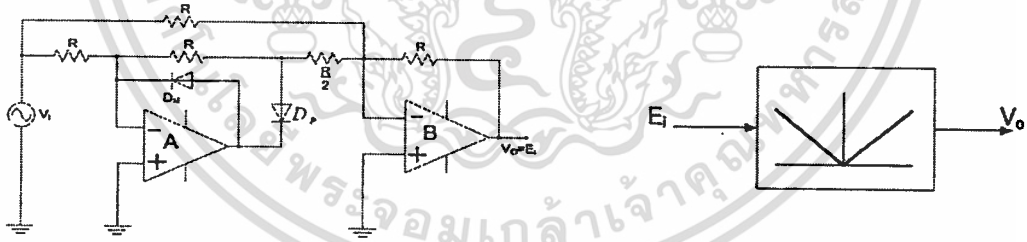
เมื่อ ω_C คือ ความถี่คัตออฟ (rad/S)

f_C คือ ความถี่คัตออฟ (H_Z)

R คือ ความต้านทาน (Ω)

C คือ ค่าตัวเก็บประจุ (F)

5.3.4.2 **วงจรเรียงแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง** (Absolute-value Circuit) [34]



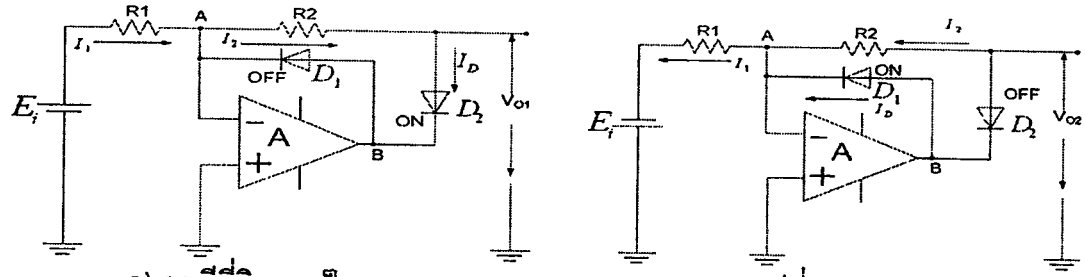
ก) วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง ข) สัญลักษณ์วงจรฟูลเวฟเรกติไฟเออร์

รูปที่ 5.24 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงและบล็อกไดอะแกรม

จากรูป เป็นวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง โดยใช้ออปแอมป์กับไดโอดมาสร้างเป็นวงจรในการวิเคราะห์วงจรแบ่งออกเป็น 2 วงจร ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง



ก) กรณีที่อินพุตเป็นบวก ข) กรณีที่อินพุตเป็นลบ

รูปที่ 5.25 วงจรการคำนวณแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง

จากรูป ใช้ทฤษฎีของโนดโวลต์เตท (Node Voltage) ในการหาค่าต่างของวงจร คือ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นบวก ทำให้ D_1ไม่ทำงาน และ D_2ทำงาน หาค่าของแรงดันได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{E_i - V_A}{R_1}, I_2 = \frac{V_A - V_{01}}{R_2} \tag{5.3}$$

$$V_{01} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) * V_i \tag{5.4}$$

เมื่อ E_i คือ แรงดันอินพุตที่สัญญาณเป็นไซน์

V_A คือ แรงดันตกคร่อมขั้วอินพุตของออปแอมป์ในอุดมคติ

V_{01} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรที่มีอินพุตเป็นสัญญาณช่วงบวก

เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นลบ ทำให้ D_1ทำงาน และ D_2 ไม่ทำงาน หาค่าของแรงดันได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{V_A - E_i}{R_1}, I_2 = 0 = \frac{V_{o2} - V_A}{R_2}, V_B = -E_i + 0.6$$
$$V_{02} = 0 * R_2 \approx 0 \tag{5.5}$$

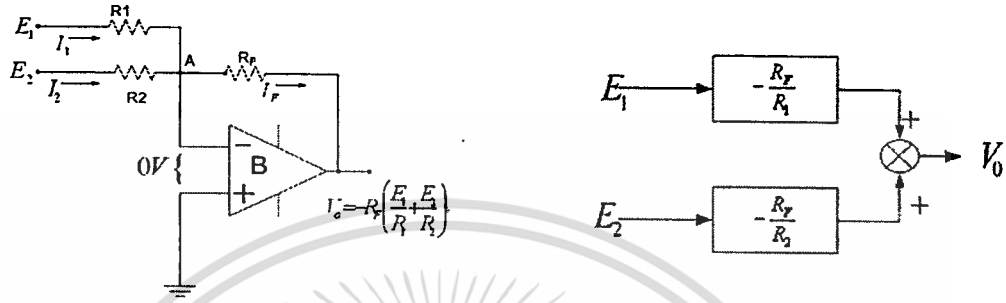
จากสมการ เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต (V_{o2}) =0V เมื่อ V_A=0V ดังนั้นสมการที่ 5.4 และ 5.5 นำมาค่าแรงดันเอาต์พุตมารวมกันโดยใช้ทฤษฎีการวางซ้อน (Superposition) ได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = V_{o1} + V_{o2}$$

$$V_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) * V_i + 0 \qquad (5.6)$$

2. **วงจรขยายชนิดผลรวม** (Summing amplifier)



ก) วงจรขยายชนิดผลรวม ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.26 วงจรขยายชนิดผลรวม

จากรูป ใช้ทฤษฎีของโนดโวลต์เทททำการวิเคราะห์วงจร โดยสมมุติให้ออปแอมป์เป็นอุดมคติ ซึ่งมีอัตราขยายลูฟปิดเท่ากับอนันต์ (A= α) หาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}, I_2 = \frac{E_2}{R_2} \qquad (5.7)$$

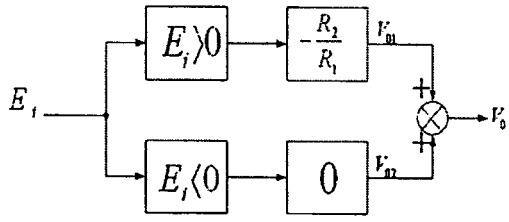
$$I_F = I_1 + I_2 = \frac{E_A - V_o}{R_F} \qquad (5.8)$$

แทนค่าสมการที่ 5.7 ในสมการที่ 5.8 จะได้

$$V_o = -R_F\left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}\right) \qquad (5.9)$$

จากสมการ นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 5.26 ข) จากสมการที่ 5.6 นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

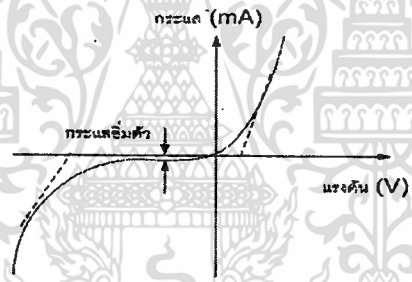


รูปที่ 5.27 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงไฟสลับไฟตรง

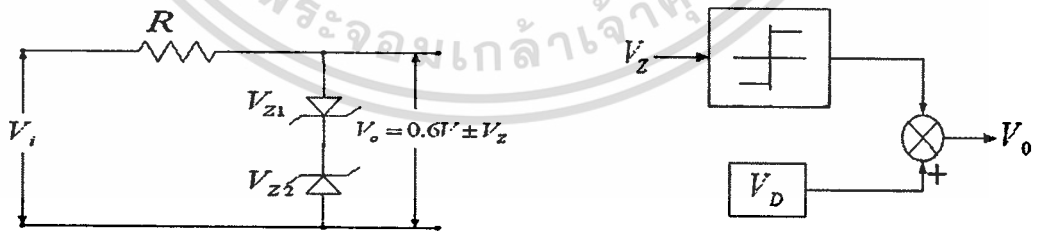
จากรูป เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นบวก แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ E_i เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นลบ แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ $|-E_i|$

5.3.4.3 **วงจรจำกัดแรงดันเกิน** (Level Detector) [34], [35], [36]

ในการจำกัดแรงดันไม่ให้เกินค่าที่กำหนด ใช้คุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) เป็นตัวจำกัดแรงดัน ซึ่งแสดงคุณสมบัติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.28 กราฟคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด



ก) วงจรจำกัดแรงดันเกิน ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.29 วงจรจำกัดแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เมื่อแรงดันอินพุตเป็นบวก ทำให้ V_{Z1} ประพฤติตัวเป็นไดโอด และ V_{Z2} ประพฤติตัวเป็น ซีเนอร์ ถ้าแรงดันอินพุตเป็นลบ ทำให้ V_{Z1} ประพฤติตัวเป็นซีเนอร์ และ V_{Z2} ประพฤติตัวเป็นไดโอด จากวงจรหาค่าแรงดันเอาต์พุต หาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_o = V_D \pm V_z \tag{5.10}$$

$$I_o = \frac{V_i - V_o}{R_o} \tag{5.11}$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุต (V)

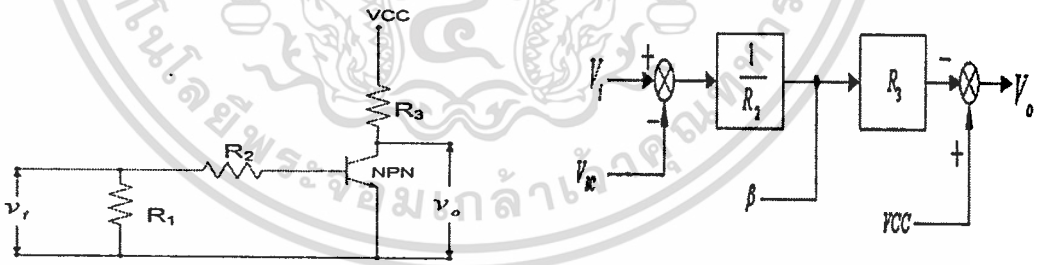
V_Z คือ แรงดันที่ตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดขณะรีเวิร์ดไบแอส

V_D คือ แรงดันที่ตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดขณะเฟอร์เวิร์ดไบแอส

$\pm$ คือ $\begin{cases} + & \text{เมื่อแรงดันอินพุตมีค่ามากกว่าศูนย์} \\ - & \text{เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าน้อยกว่าศูนย์} \end{cases}$

จากสมการที่ 5.10 เขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.29 ข)

5.3.4.4 **วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์** (Zero Crossing detector) [36], [37], [38]



ก) การต่อทรานซิสเตอร์แบบ Open Collector ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.30 วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์

จากรูป ใช้คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์(Transistor) ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturated) เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่ามากกว่า 0.7 โวลต์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน แต่ถ้าสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่า 0.7 โวลต์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน ข้อดีของการใช้ทรานซิสเตอร์ คือ สามารถปิด-เปิดได้อย่างรวดเร็วหลาย ๆ ครั้งต่อวินาที ซึ่งในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ หาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_B = \frac{V_i - V_{BE}}{R_2} \tag{5.12}$$

$$I_C = \beta I_B \tag{5.13}$$

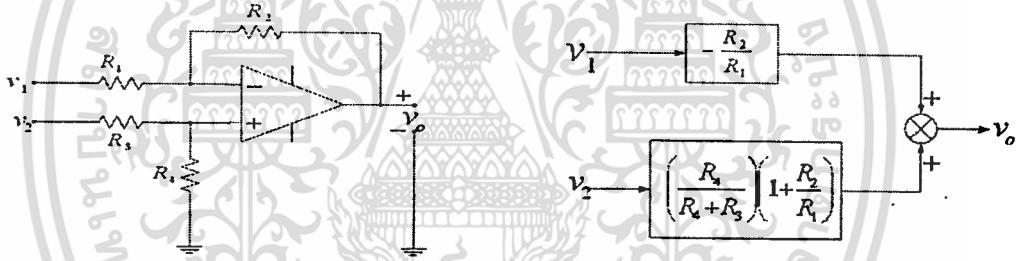
$$V_o = V_{CC} - I_C R_3 \tag{5.14}$$

จากสมการนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.30 ข)

5.3.4.5 **วงจรแก้ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น** (Linearization)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ แก้คุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น แล้วแสดงค่าสเกลต่าง ๆ ในระบบของเครื่องวัด ประกอบไปด้วย 2 วงจร คือ

1. **วงจรขยายผลต่าง** (Differential Amplifier) [34], [35]

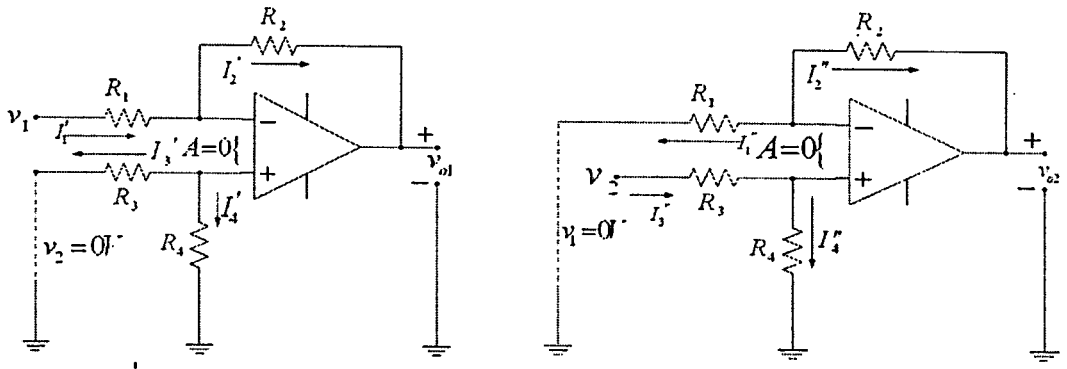


ก) วงจรขยายผลต่าง ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.31 วงจรขยายผลต่าง

จากรูป เป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณ ที่มีขนาดแรงดันน้อยกว่า 10mV ซึ่งในการวิเคราะห์วงจร แบ่งออกได้ 2 กรณี คือ แรงดัน v_1 เป็นศูนย์ กับแรงดัน v_2 เป็นศูนย์ ในการรวมสัญญาณเอาต์พุตเข้าด้วยกัน จะใช้ทฤษฎีการวางซ้อน แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) เมื่อแรงดัน v_2 เป็นศูนย์ ข) เมื่อแรงดัน v_1 เป็นศูนย์

รูปที่ 5.32 วิธีการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของวงจรขยายผลต่าง

จากรูป ใช้ทฤษฎีของโนดโวลต์เตท วิเคราะห์วงจรได้ดังนี้

- เมื่อแรงดัน v_2 เป็นศูนย์ หาค่าต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_1' = I_2' + I_3' + I_4' \tag{5.15}$$

$$I_1' = \frac{v_1}{R_1}, I_2' = -\frac{v_{01}}{R_2}, I_3' = \frac{v_A}{R_3}, I_4' = \frac{v_A}{R_4} \tag{5.16}$$

นำสมการที่ 5.16 แทนในสมการที่ 5.15 จะได้

$$\frac{v_1}{R_1} = -\frac{v_{01}}{R_2} + \frac{v_A}{R_3} + \frac{v_A}{R_4} \tag{5.17}$$

จากสมการที่ 5.17 เมื่อ v_A =0V จะได้

$$v_{01} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \tag{5.18}$$

- เมื่อแรงดัน v_1 เป็นศูนย์ หาค่าต่าง ๆ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_1'' + I_2'' = 0 \tag{5.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1'' = \frac{v_1}{R_1}, I_2'' = \frac{v_A - v_{02}}{R_2}, I_3'' = \frac{v_2 - v_A}{R_3}, I_4'' = \frac{v_A}{R_4} \tag{5.20}$$

นำสมการที่ 5.20 แทนในสมการที่ 5.19 โดยให้ $v_A = \left(\frac{v_2}{R_3 + R_4}\right) R_4$ จะได้

$$v_{02} = v_A \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$v_{02} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \tag{5.21}$$

จากสมการที่ 5.18 และสมการที่ 5.21 นำมารวมกัน จะได้

$$v_o = v_{01} + v_{02}$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1) \tag{5.22}$$

จากสมการนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.31 ข)

2. **วงจรไม่กลับขั้ว** (Non-Inverting Amplifier) [34], [35]



ก) วงจรไม่กลับขั้ว ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.33 วงจรไม่กลับขั้ว

จากรูป เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต v_i ให้กับวงจร แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีขั้วเหมือนกับแรงดันอินพุต v_i การคำนวณหาแรงดันเอาต์พุต หาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{v_i}{R_1}, I_2 = \frac{v_o - v_i}{R_2}$$

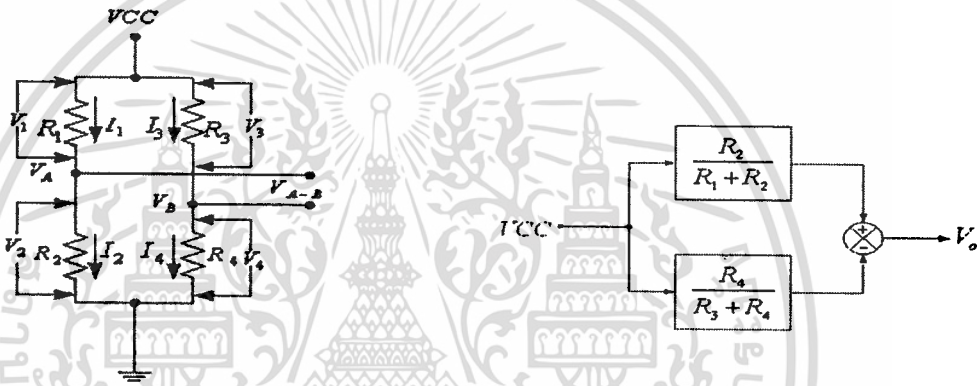
$$v_o - \frac{v_i}{R_1} R_2 - v_i = 0$$

$$v_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5.23)$$

จากสมการ นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.33 ข)

5.3.4.6 **วงจรวีทสโตนบริดจ์** (Wheatstone bridge) [39]

วงจรประกอบด้วยค่าความต้านทาน $R_1 - R_4$ ที่นำมาต่อแบบอนุกรม และขนานกัน ดังรูป



ก) วงจรวีทสโตนบริดจ์ ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.34 วงจรวีทสโตนบริดจ์

จากรูป ใช้ทฤษฎีการแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divide) เพื่อหาแรงดันตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) VCC, V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) VCC \quad (5.24)$$

และ

$$V_3 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right) VCC, V_4 = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) VCC \quad (5.25)$$

ในการค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง V_A กับ V_B หาได้จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) ซึ่งเป็นผลต่างของแรงดัน V_1 กับ V_3 หรือ V_2 กับ V_4 ได้ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{A-B} = V_2 - V_1$$

$$V_{A-B} = VCC\left(\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_1}{R_1+R_2}\right) \quad (5.26)$$

จากสมการ นำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม เพื่อหาค่าแรงดัน V_{A-B} ได้ดังรูปที่ 5.34 ข) เมื่อแรงดัน V_{A-B} มีค่าเท่ากับศูนย์ วงจรอยู่ในสภาวะสมดุล แต่ถ้าไม่เท่ากับศูนย์ วงจรไม่อยู่ในสภาวะสมดุล จากหลักการดังกล่าว หาค่าความต้านทานในสภาวะแรงดันสมดุลได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = 1 \quad (5.27)$$

ข้อดีของการเปรียบเทียบค่าความต้านทาน ด้วยวิธีการทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ คือ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรบริดจ์ไม่จำเป็นต้องคงที่
2. ในการเปรียบเทียบแรงดันที่บริดจ์ ต้องถูกปรับให้ได้ค่าเท่ากับศูนย์
3. ความเที่ยงตรงในการเปรียบเทียบขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานในวงจร

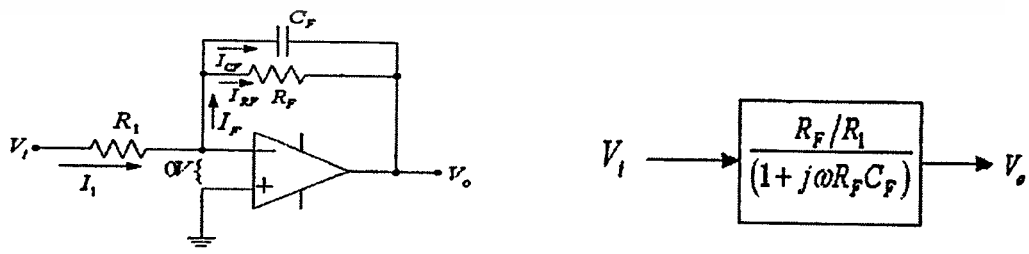
ดังนั้นความไวของบริดจ์หาได้ดังนี้

$$\text{ความไวของบริดจ์} = \frac{\text{แรงดันที่เปลี่ยนแปลง}}{\text{ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง}}$$

$$E_o = \frac{\Delta V_{A-B}}{\Delta R} \quad (5.28)$$

ความไวในการเปรียบเทียบ มีหน่วยเป็นโวลต์เทตต่อโอห์ม (V/Ω) ถ้า E_0 มีค่ามาก แสดงว่าวงจรมีความไวมาก

5.3.4.7 วงจรกรองสัญญาณ (Smoothed)



ก) วงจรกรองสัญญาณ ข) บล็อกไดอะแกรมทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 5.35 วงจรกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amp) ซึ่งตัว C_F ต่อขนานกับตัว R_F เพื่อให้เสถียรภาพด้านความถี่ของวงจรดีขึ้น และให้อัตราสลูว์สูงขึ้นเป็น 10 โวลต์ต่อไมโครวินาที โดยค่า C_F มีค่าประมาณ $3pF$ หรือน้อยมาก ในการคำนวณแรงดันเอาต์พุตของวงจร ได้ดังสมการต่อไปนี้

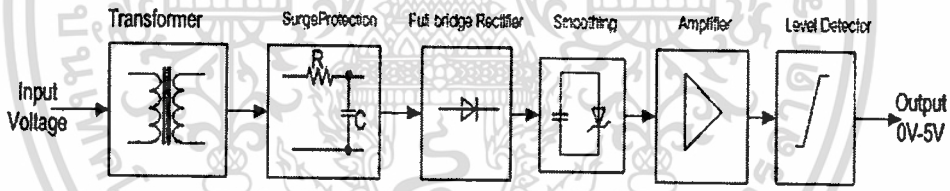
$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, I_F = \frac{-V_o}{Z_F}, Z_F = R_F \parallel C_F = \frac{R_F}{1 + j\omega C_F R_F} \tag{5.29}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_F \\ V_o &= -\frac{Z_F}{R_1} V_1 \\ V_o &= -\frac{R_F / R_1}{1 + j\omega C_F R_F} \end{aligned} \tag{5.30}$$

จากสมการนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.35 ข)

5.3.5 วงจรตรวจวัดสัญญาณต่าง ๆ

5.3.5.1 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน (Voltage Detector)



รูปที่ 5.36 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

จากรูป อธิบายการทำงานของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้า ทำน้าที่ เพิ่มหรือลด ขนาดของแรงดัน โดยทฤษฎีและผลการทดสอบแสดงตามหัวข้อ 3.3.1 กับ 5.3.3.1

2. วงจรป้องกันแรงดันเกิน ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่ต่ำออกจากวงจร ตามหัวข้อ 5.3.4.1 ซึ่งกำนดให้ความถี่คัตออฟที่ใช้ 1 kH_z และค่า R=1 Ω เพราะฉะนั้น หาค่า C ได้ดังนี้

$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 2\pi f_C$$

$$\therefore C = \frac{1}{2\pi f_C R} = \frac{1}{2\pi * 1000 * 1} = 0.0001591F \approx 159.1\mu F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

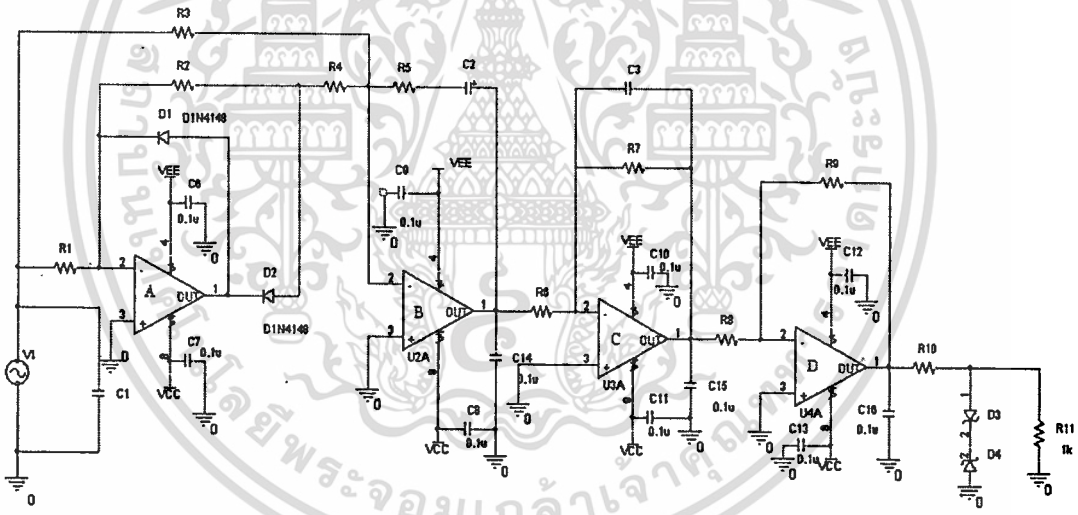
3. วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง หลักการคำนวณหาค่าต่างตามหัวข้อ 5.3.4.2 โดยกำหนดค่าความต้านทานทุกตัวเท่ากับ $10k\Omega$ ถ้าต้องการให้แรงดันเอาต์พุตเรียบขึ้น และปรับขนาดแรงดันได้ ต้องใช้ความต้านทานปรับค่าได้ประมณ $10k\Omega$ ต่ออนุกรมกับค่า $C=10\mu F$

4. วงจรปรับขนาดแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่ ปรับขนาดแรงดันที่ยังไม่เรียบให้เรียบขึ้น ใช้หลักการคำนวณตามหัวข้อ 5.3.4.7 โดยการกำหนดให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1 และกำหนดให้ค่าความต้านทานทุกตัวเท่ากับ $10k\Omega$

5. วงจรขยาย ทำหน้าที่ ขยายหรือลดขนาดแรงดันไฟฟ้า โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1 และกำหนดให้ค่าความต้านทานทุกตัวเท่ากับ $10k\Omega$

6. วงจรจำกัดแรงดัน ทำหน้าที่ จำกัดขนาดแรงดันไม่ให้เกินกว่าที่กำหนด ใช้หลักการตามข้อที่ 5.3.4.3 โดยค่าแรงดันเอาต์พุตไม่เกิน 5 โวลต์ ส่วนค่าความต้านทานประมาณ $10k\Omega$

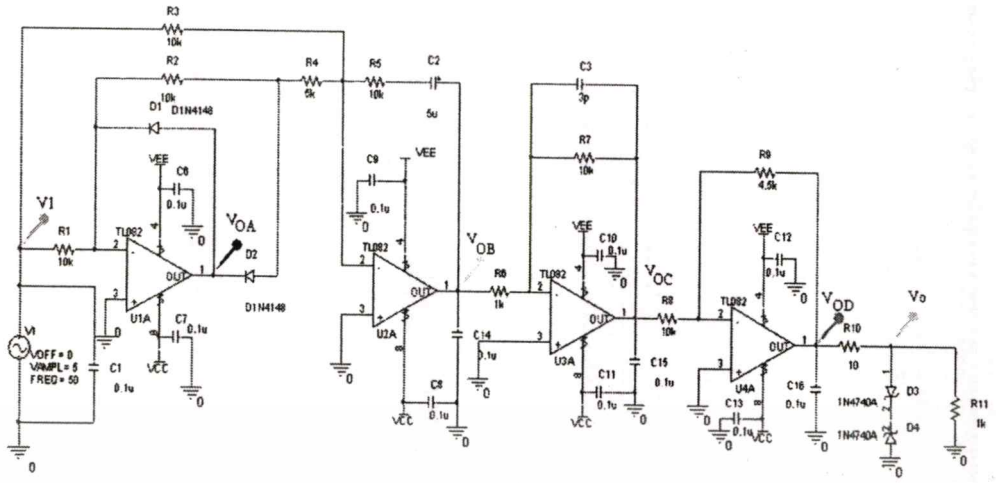
จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 5.37 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

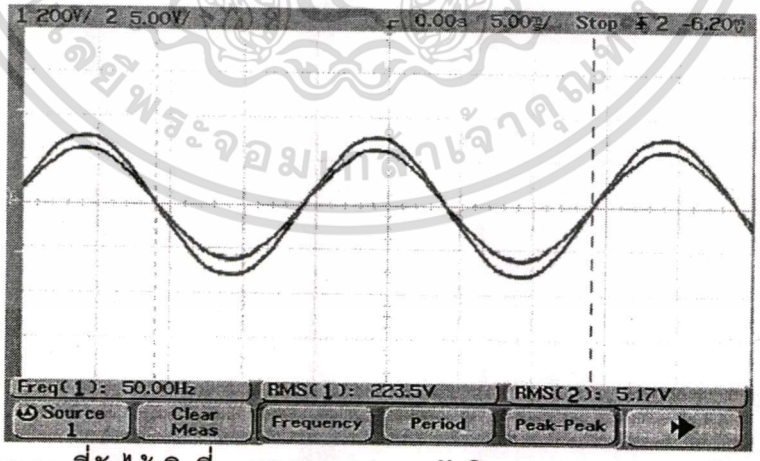
จากรูป กำหนดจุดวัดสัญญาณตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.36 ได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดแรงดัน

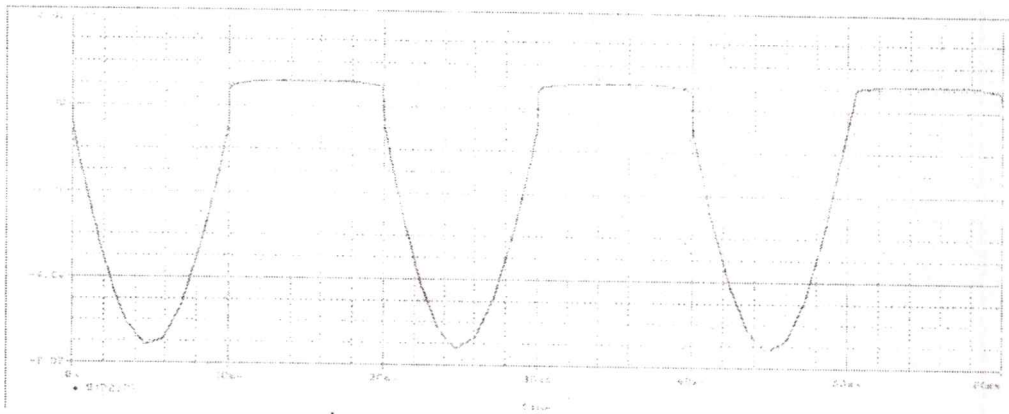
ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วย OrCAD ณ ที่จุด V_1



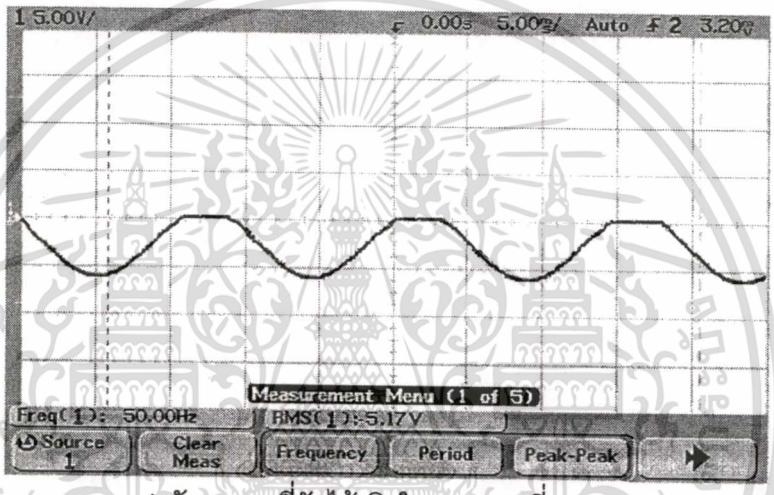
ข) สัญญาณที่วัดได้จริงที่จุด V_1 RMS(1) แรงดันอินพุต, RMS(2) แรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 5.39 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและวัดจริงของวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

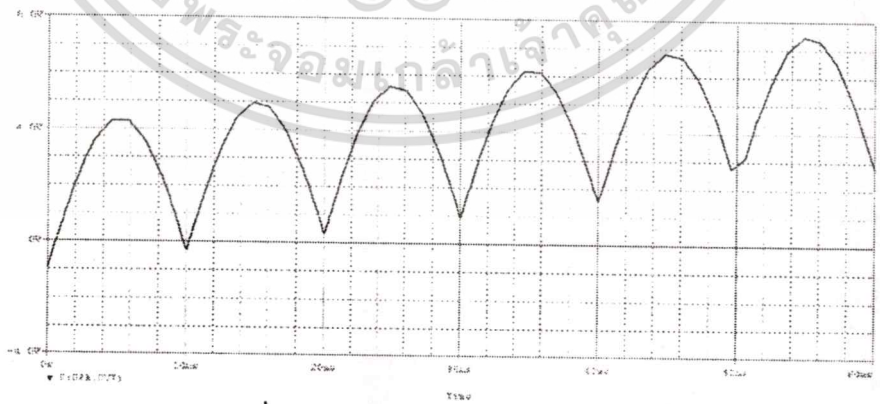


ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วย OrCAD ณ ที่จุด V_{OA}



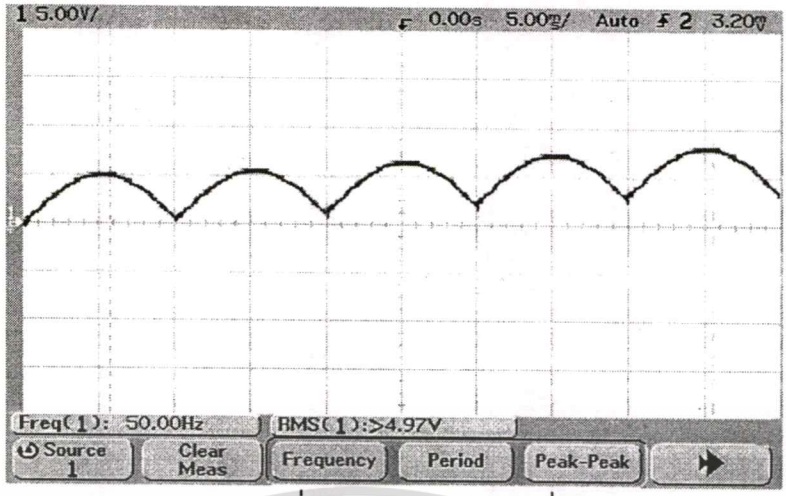
ข) สัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_{OA}

รูปที่ 5.40 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OA}



ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยOrCAD ณ ที่จุด V_{OB}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

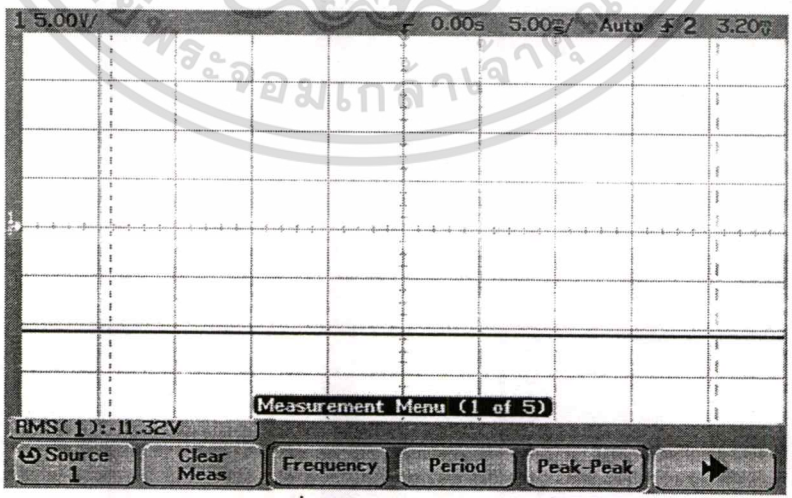


ข) สัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_{OB}

รูปที่ 5.41 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OB}



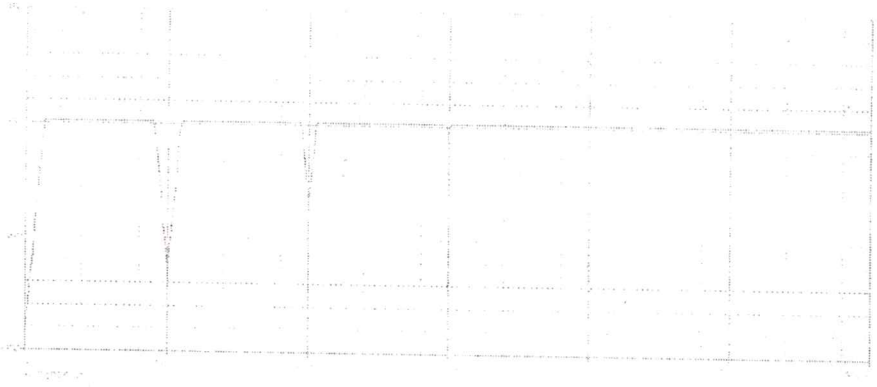
ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยOrCAD ณ ที่จุด V_{OC}



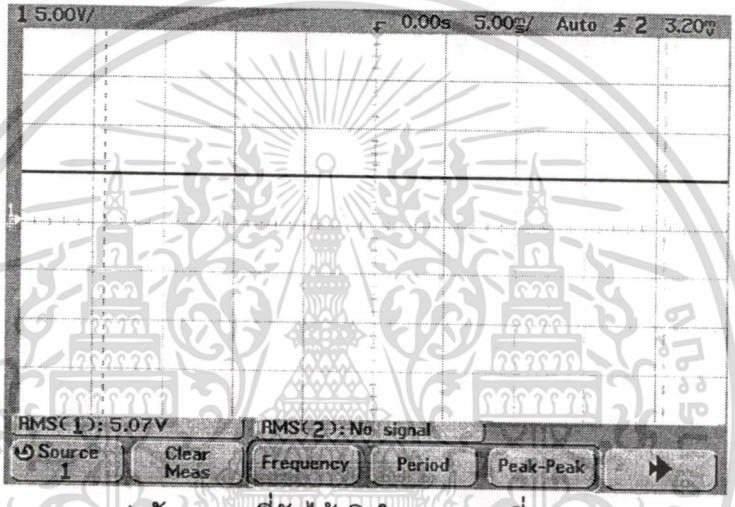
ข) สัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_{OC}

รูปที่ 5.42 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OC}

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

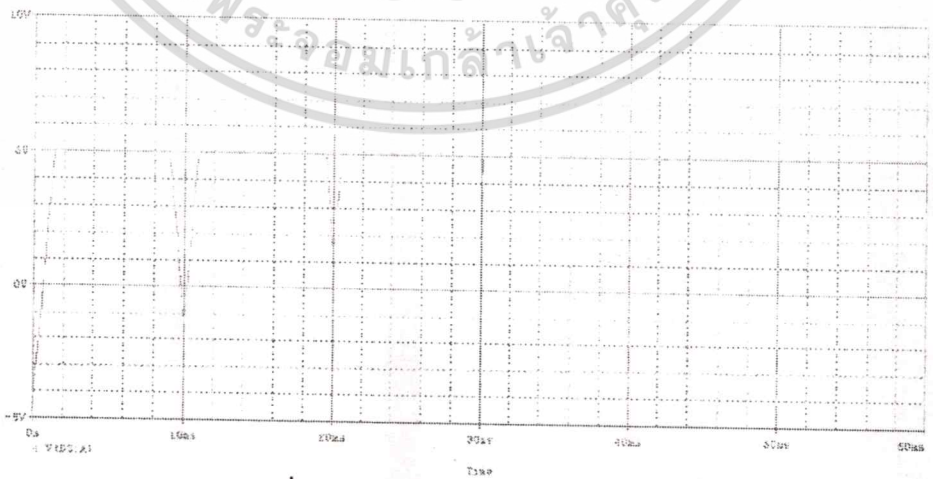


ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วย OrCAD ณ ที่จุด V_{OD}



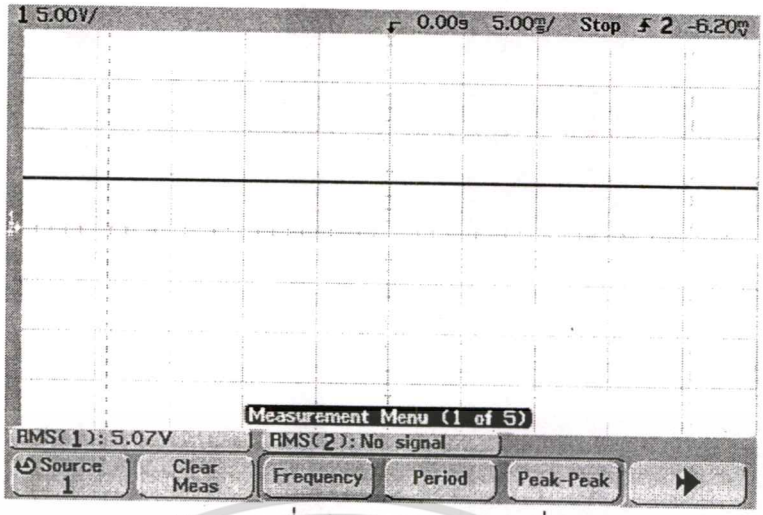
ข) สัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_{OD}

รูปที่ 5.43 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดจริงที่จุด V_{OD}



ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วย OrCAD ณ ที่จุด V_o

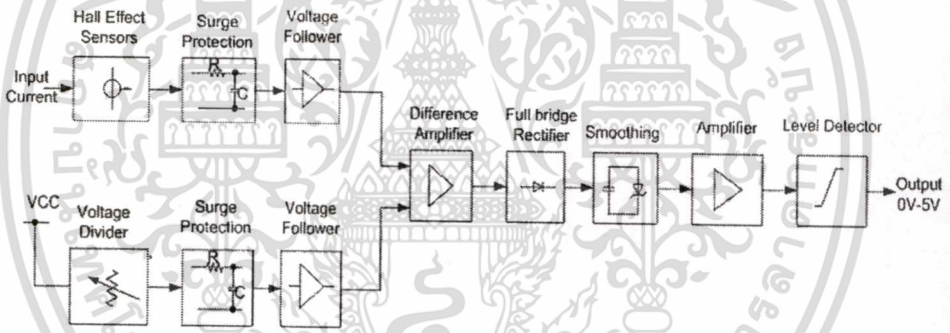
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_o

รูปที่ 5.44 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและสัญญาณที่วัดได้จริงในวงจร ณ ที่จุด V_o

5.3.5.2 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส (Current Detector)



รูปที่ 5.45 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส

จากรูป อธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกและหลักการคำนวณได้ดังนี้

1. ตัววัดสัญญาณกระแส ทำหน้าที่ วัดสัญญาณกระแสทางด้านอินพุต โดยใช้ทฤษฎีตามข้อที่ 3.3.2 และผลการทดลองของตัวตรวจวัดกระแส แสดงได้ ตามข้อที่ 5.3.3.2

2. วงจรป้องกันแรงดันเกิน ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่ต่ำออกจากวงจร ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 2

3. วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) หรือ วงจรบัฟเฟอร์ ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ 1 มีคุณสมบัติ คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์(Z_i)ที่สูงมาก ในขณะที่ให้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์(Z_o)ต่ำ

4. วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง ทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ตามข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วงจรปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังไม่เรียบให้เรียบมากขึ้น ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่สูง และขยายแรงดัน ตามข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 4

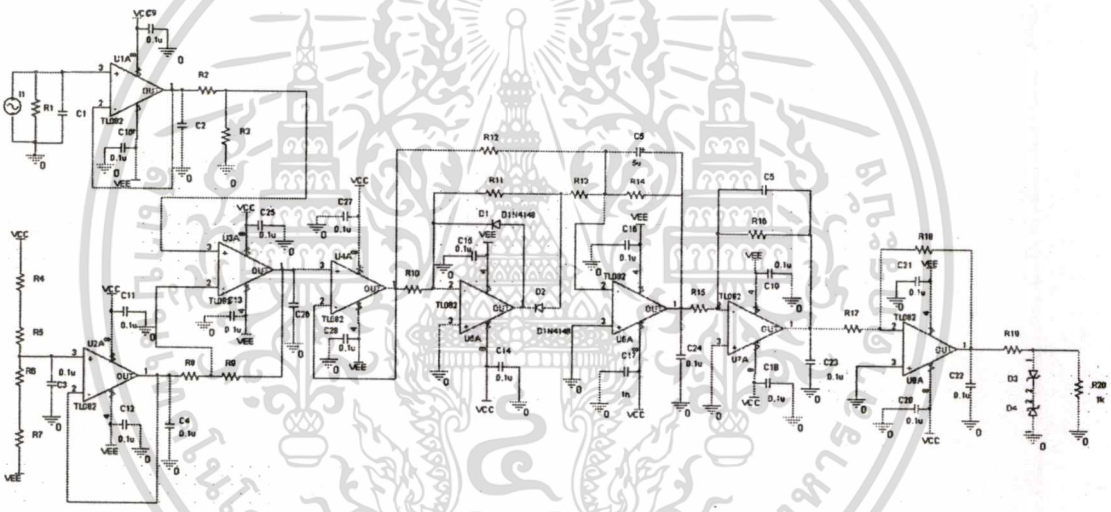
6. วงจรขยาย ทำหน้าที่ ขยาย หรือ ลดขนาดแรงดัน ตามข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 5

7. วงจรจำกัดแรงดัน ทำหน้าที่ จำกัดแรงดันไม่ให้เกินที่กำหนด ตามข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 6

8. วงจรแบ่งแรงดัน ทำหน้าที่ แบ่งขนาดแรงดันอ้างอิง เพื่อใช้ในการตัดค่าออฟเซตไฟฟ้ากระแสตรงออกจากวงจร โดยปรับให้เป็นค่าบวกเมื่อออฟเซตเป็นค่าลบ หรือปรับเป็นค่าลบเมื่อออฟเซตเป็นค่าบวก

9. วงจรขยายผลต่าง ทำหน้าที่ วัดสัญญาณ 2 สัญญาณ ที่มีความแตกต่างกัน ตามข้อหัวข้อที่ 5.3.4.5 ของข้อ 1

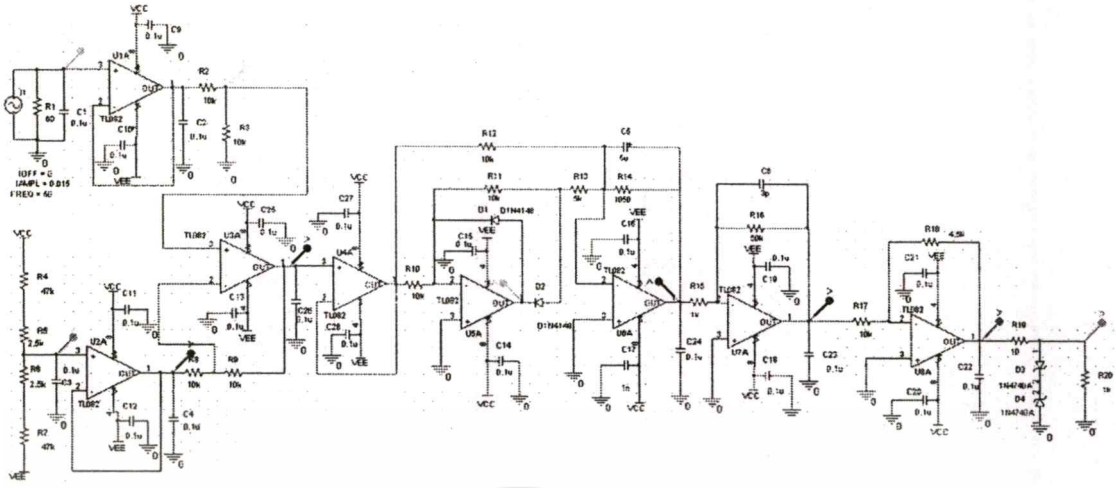
จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสได้ดังนี้



รูปที่ 5.46 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.45 แบ่งออกเป็น 4 วงจร ได้แก่ วงจรตรวจวัดกระแส วงจรปรับค่าออฟเซต วงจรขยายผลต่าง และวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง โดยกำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.47 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดกระแส

จากรูป ในการใช้ตัวตรวจวัดกระแส โดยกำหนดกระแสทางด้านอินพุต เท่ากับ 15A **ดังนั้น** กระแสทางด้านเอาต์พุตของตัวตรวจวัดกระแส หาได้ดังนี้

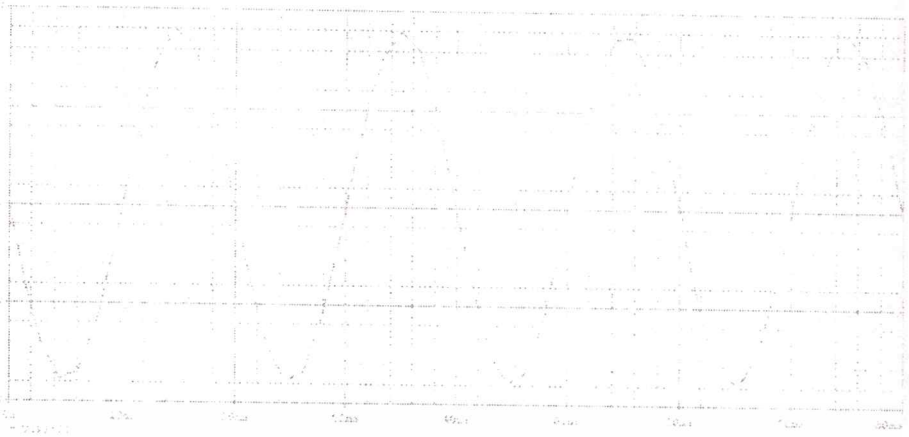
$$I_{SN} = I_P / K_N$$
$$I_{SN} = 15/1000 = 0.015A$$

โดยที่ อัตราส่วน(K_N)ของตัวตรวจวัดกระแส กระแสทางด้านอินพุต(I_P)และกระแสทางด้านเอาต์พุต(I_{SN})ส่วนค่าความต้านทาน R_1 ที่ใช้เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น แรงดัน เลือกใช้ได้ตั้งแต่ $10\Omega - 100\Omega$ ควรเลือกค่าความต้านทานไม่มากเกิน จะทำให้ Current Transducer เสียหายได้ หรือ น้อยเกิน ทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวเร็วขึ้น ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ขา M ของตัวตรวจวัดกระแส หาได้ดังนี้

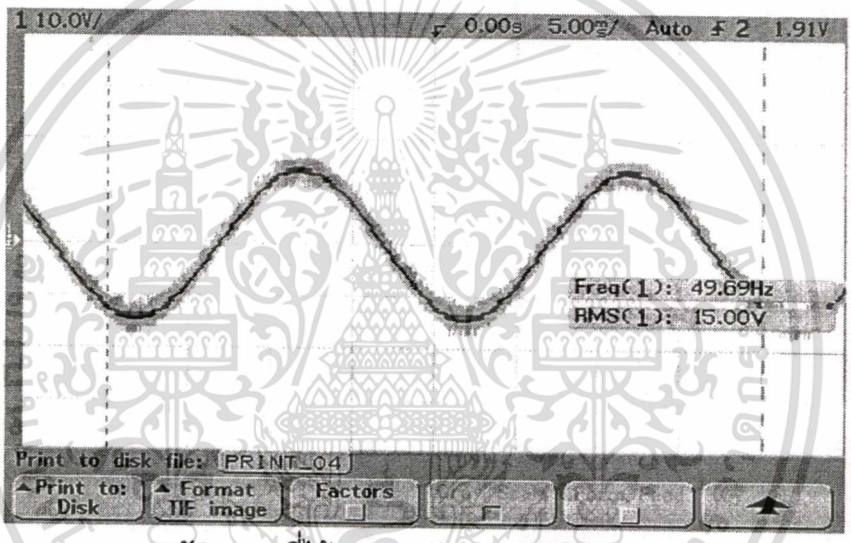
$$V_1 = I_{SN} * R_1$$
$$V_1 = 0.015 * 60 = 0.9V$$

ในการวัดสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรตวจวัดกระแส แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



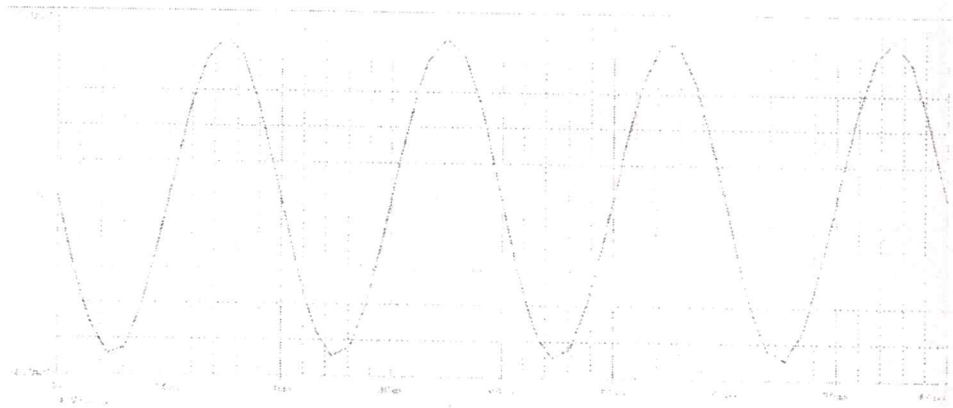
ก) สัญญาณที่ได้จากการจำลองโดย OrCAD ที่ขา 2 ของ U1A



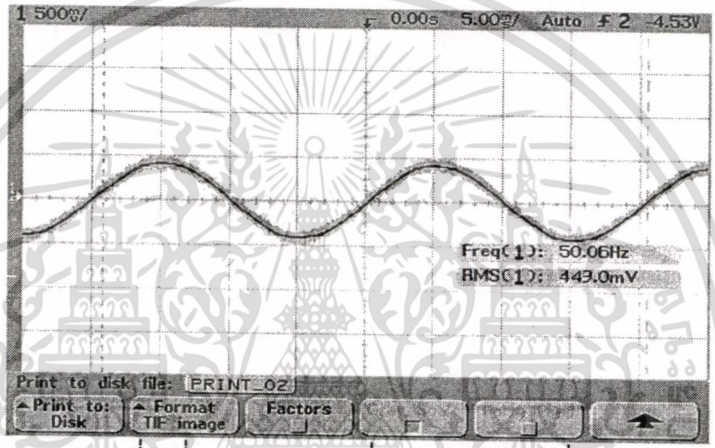
ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดกระแสอินพุตของวงจร

รูปที่ 5.48 สัญญาณที่วัดได้จากการจำลองและวัดจริงของวงจรตรวจวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณกระแสที่เปลี่ยนเป็นแรงดัน ที่ขา 1 ของ U1A โดยการจำลอง OrCAD

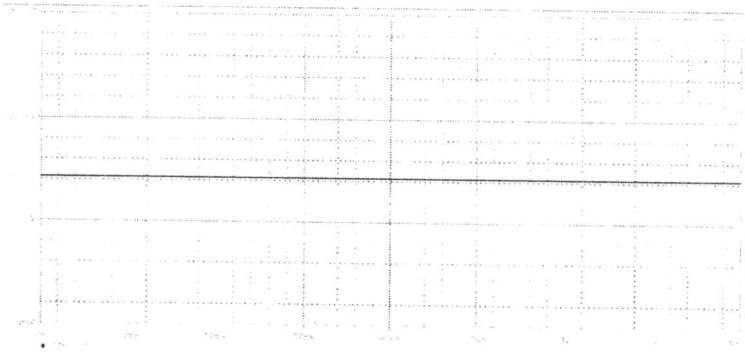


ข) สัญญาณกระแสที่เปลี่ยนเป็นแรงดัน ที่ขา 1 ของ U1A ที่ได้จากการวัดในวงจร

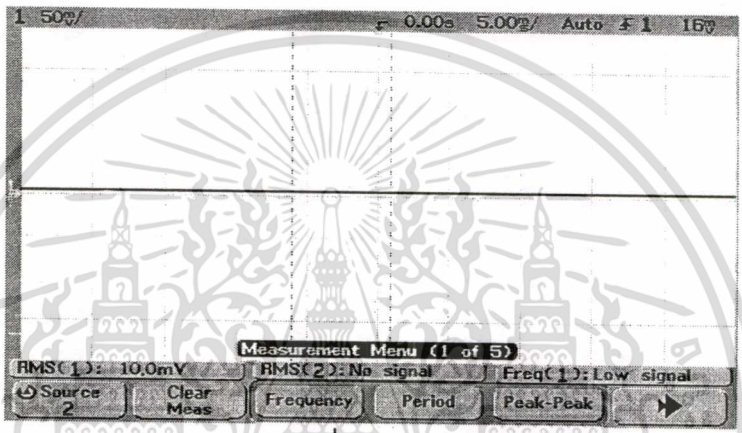
รูปที่ 5.49 สัญญาณที่วัดได้จากขา 1 ของ U1A ของวงจรตรวจวัดกระแส

ในการกำหนดแรงดันออฟเซตของวงจร ทำได้โดยการวัดที่ขา 1 ของ U3A ให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าบวก และลบค่าเท่ากัน โดยการปรับค่าความต้านทานในวงจรที่ใช้ R_5 และ R_6 เป็นความต้านทานแบบปรับค่าเพียงตัวเดียว แสดงดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

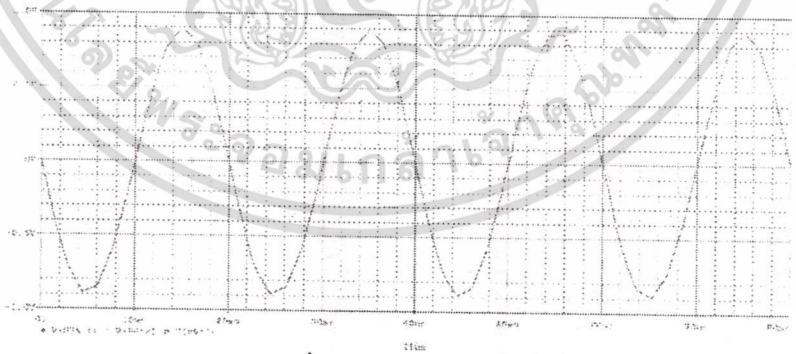


ก) สัญญาณอินพุตที่ขา 3 ของ U2A โดยการจำลองด้วย OrCAD



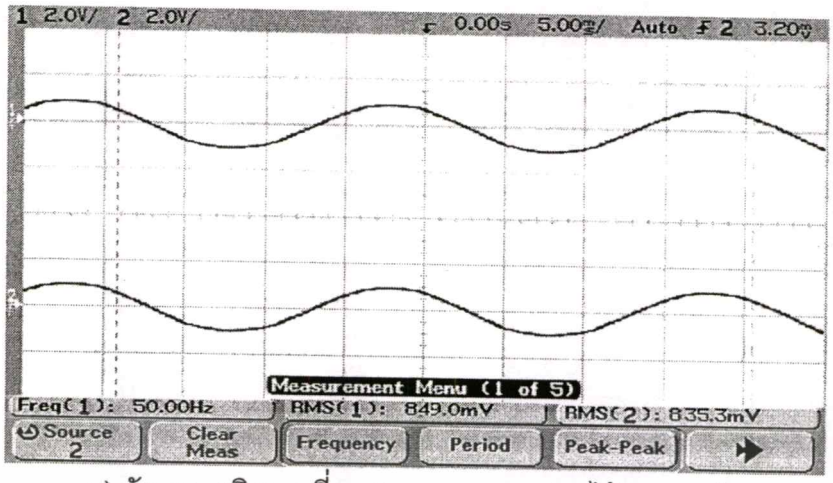
ข) สัญญาณอินพุตที่ขา 3 ของ U2A โดยการวัด

รูปที่ 5.50 สัญญาณที่วัดได้จากขา 3 ของ U2A ของวงจรตรวจวัดกระแส

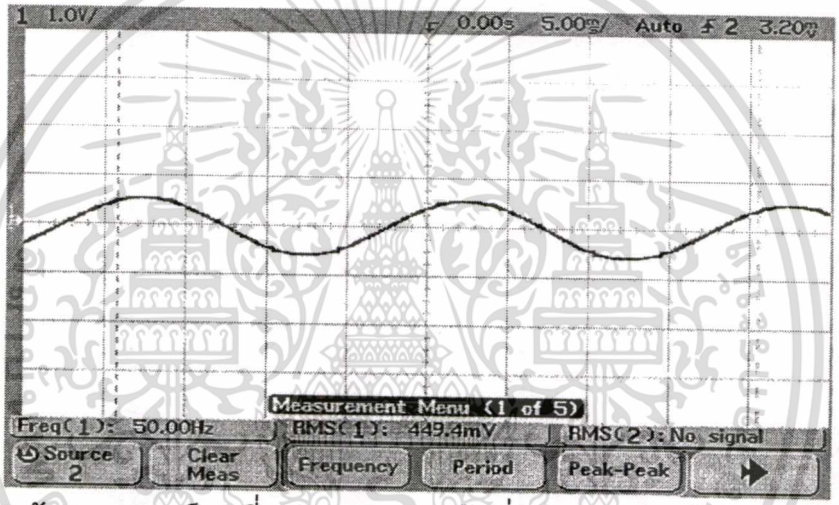


ก) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1ของ U3A โดยการจำลอง OrCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

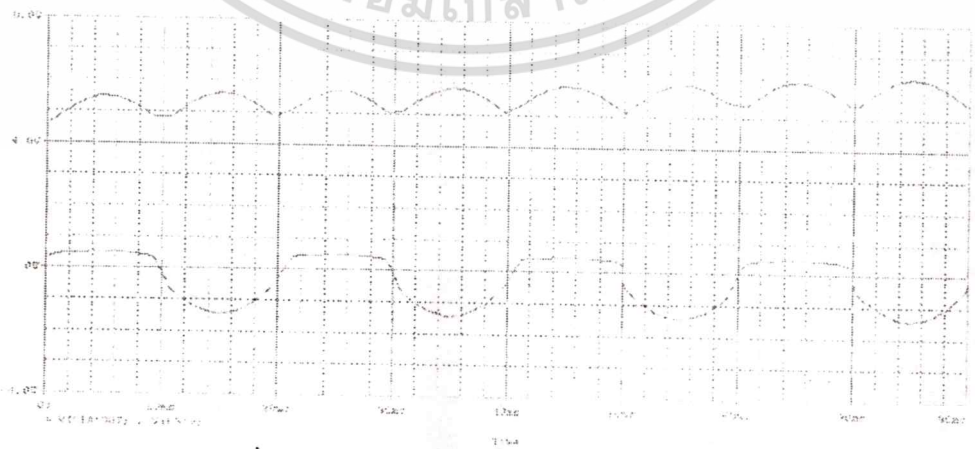


ข) สัญญาณอินพุต ที่ขา 2 และ 3 ของ U3A ได้จากการวัด



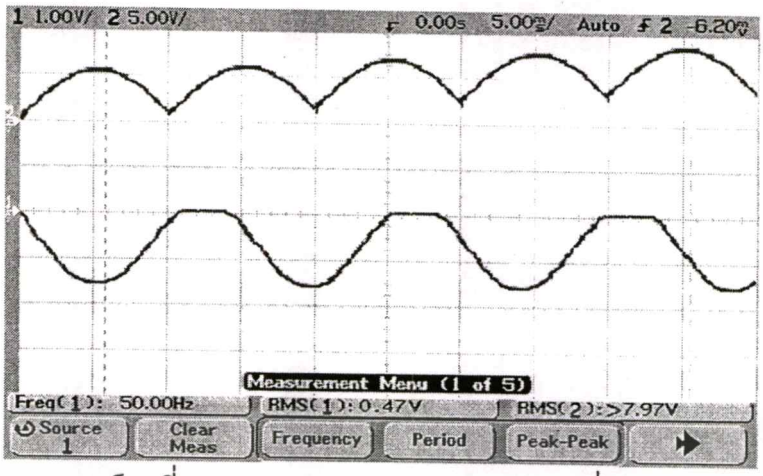
ค) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U3A หรือ ที่ขา 1 ของ U4A ได้จากการวัด

รูปที่ 5.51 สัญญาณอินพุตที่วัดจากขา 2, 3 ของ U2A และเอาต์พุตที่วัดจาก ขา 1 ของU4A



ก) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 1 ของ U5A และขา 1 ของ U6A ที่ได้จากการจำลอง OrCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

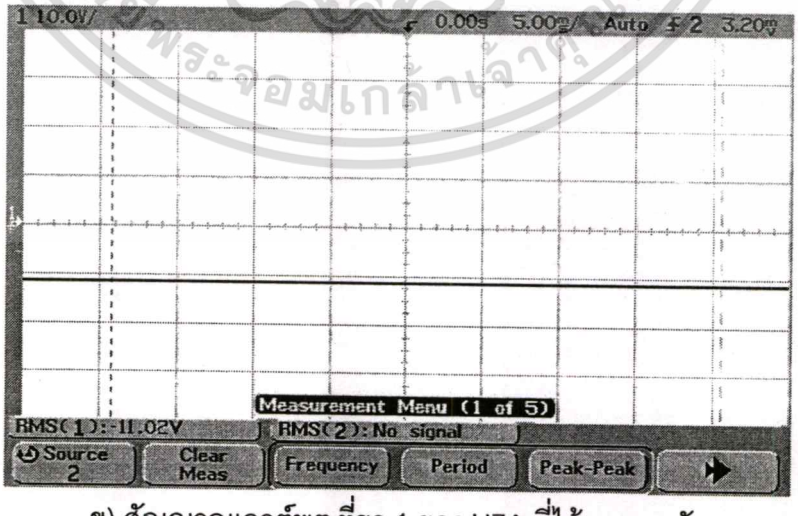


ข) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 1 ของ U5A และขา 1 ของ U6A ที่ได้จากการวัดในวงจร

รูปที่ 5.52 สัญญาณที่วัดจากวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงของวงจรตรวจวัดกระแส



ก) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U7A โดยการจำลอง OrCAD

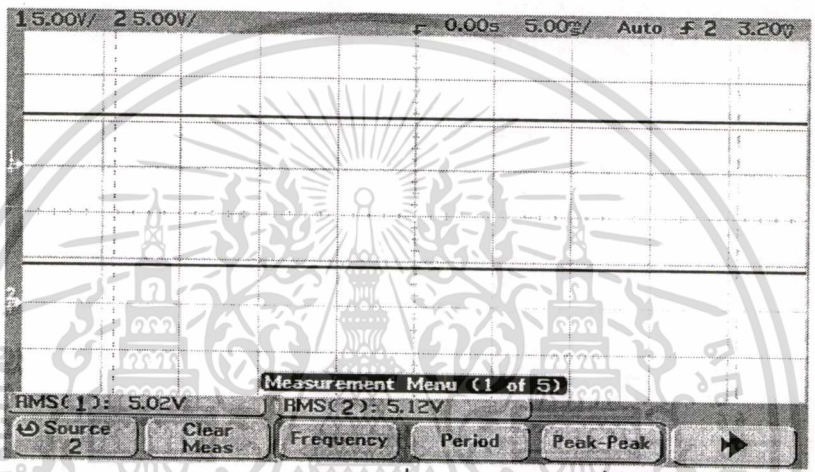


ข) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U7A ที่ได้จากการวัด

รูปที่ 5.53 สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U7A ที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

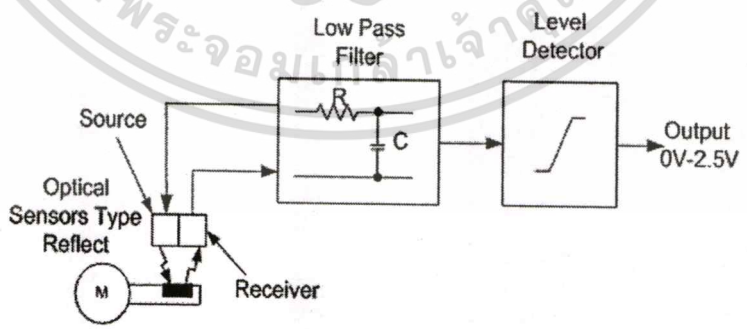
ก) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U8A โดยการจำลองด้วย OrCAD



ข) สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U8A ที่วัดได้

รูปที่ 5.54 สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา 1 ของ U8A ที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแส

5.3.5.3 **วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ** (Speed Detector)



รูปที่ 5.55 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

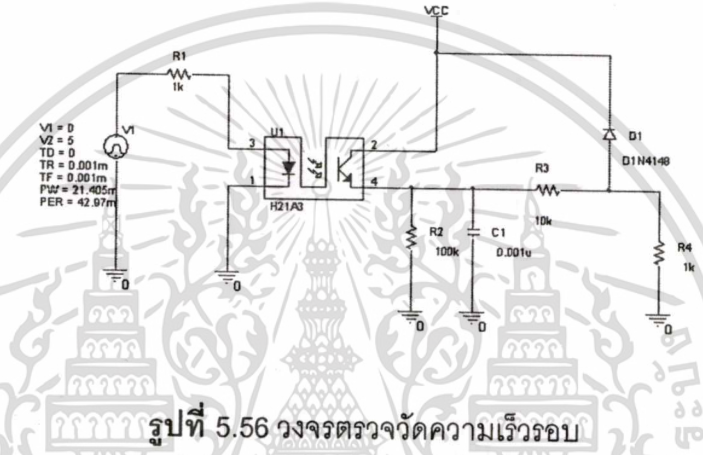
จากรูป อธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกและหลักการคำนวณได้ดังนี้

1. เซ็นเซอร์แบบสะท้อนแสง ทำหน้าที่ เปล่งแสงให้ไปตกกระทบแผ่นวัสดุแล้วสะท้อนกลับเข้าตัวรับ โดยใช้ทฤษฎีการคำนวณตามข้อที่ 3.3.3 และผลการทดสอบตามข้อที่ 5.3.3.3

2. วงจรกรองความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่ต่ำออกจากวงจรไม่ให้เข้าไปรบกวนไมโครคอนโทรลเลอร์ ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 2

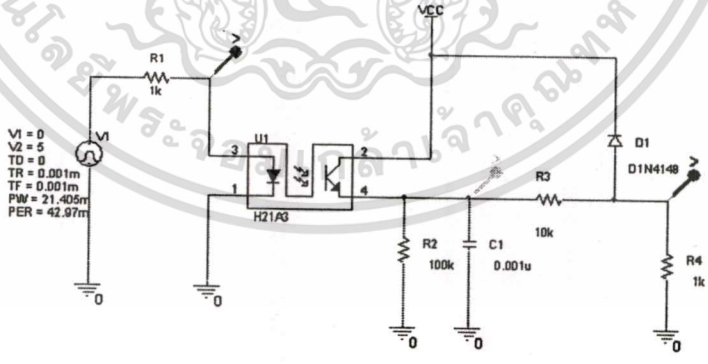
3. วงจรจำกัดแรงดัน ทำหน้าที่ จำกัดแรงดันไม่ให้เกินที่กำหนด

จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.56 วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ

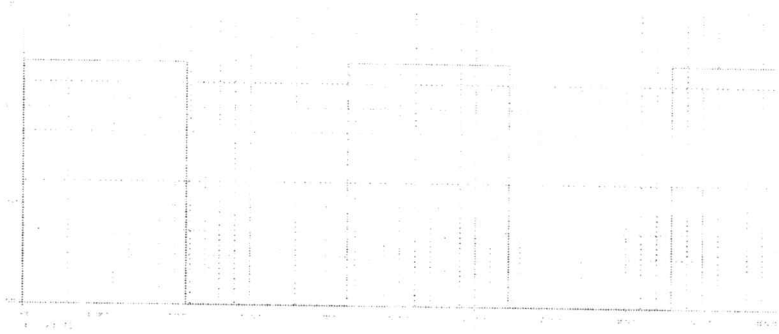
และกำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



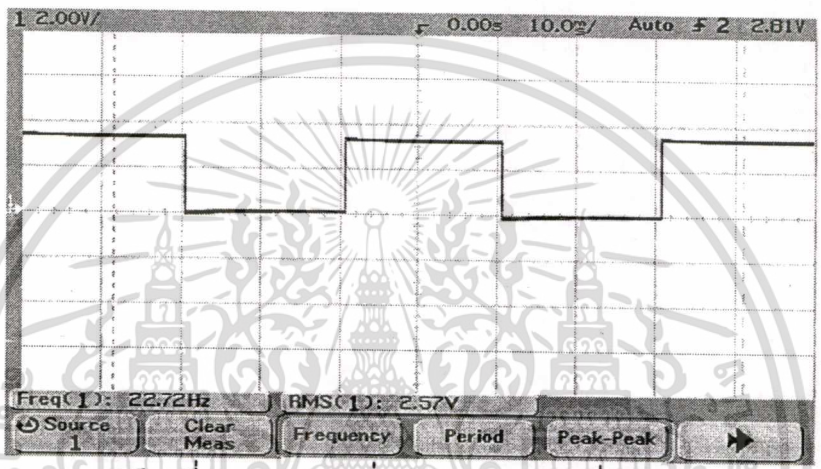
รูปที่ 5.57 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรวัดความเร็วรอบ

จากรูป ในการจำลองความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ด้วยโปรแกรม ทำได้โดยการกำหนดความกว้างของพัลส์ หาได้จากสมการที่ 3.55 สัญญาณที่ได้จากทดสอบและการจำลอง ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

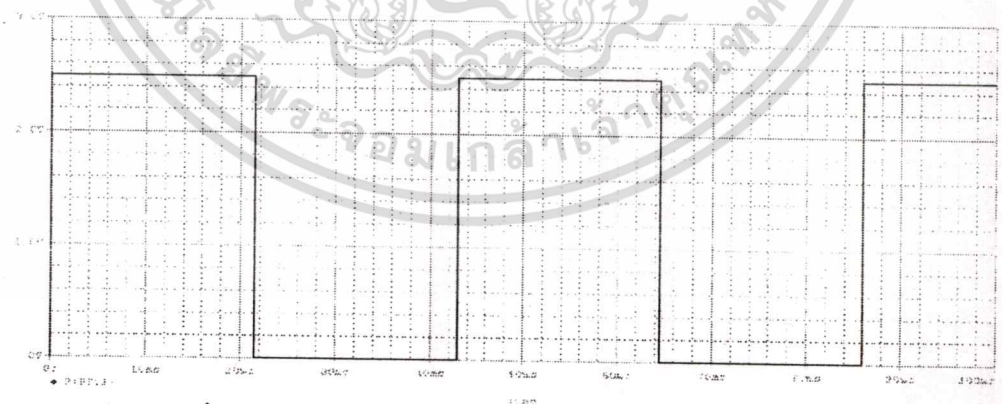


ก) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 4 ของ U1 ได้จากการ 1396 rpm



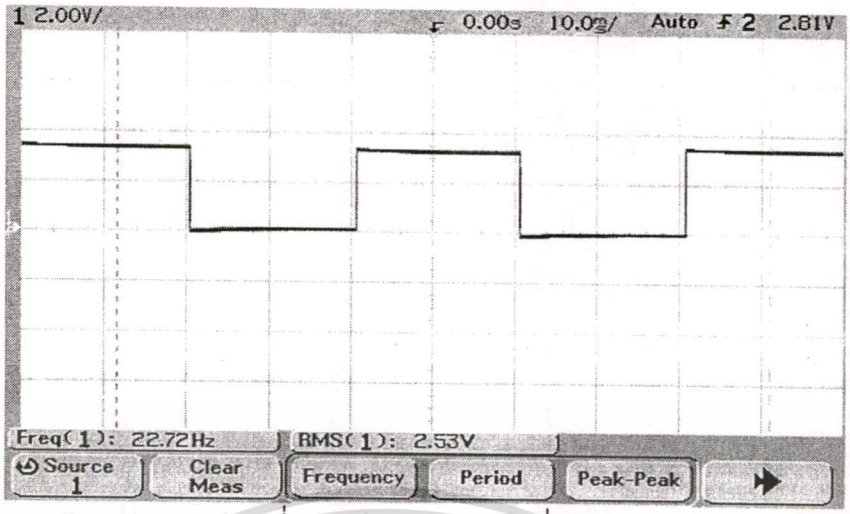
ข) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 4 ของ U1 ที่วัดได้จากวงจรวัด ที่ความเร็วรอบ 1396 rpm

รูปที่ 5.58 สัญญาณเอาต์พุต V_{OSA} ของวงจรวัดความเร็วรอบทั้งแบบจำลองและวัดจริง



ก) สัญญาณเอาต์พุตที่ V_o วงจรวัดความเร็วรอบมอเตอร์ด้วย OrCAD ที่ความเร็วรอบ 1396 rpm

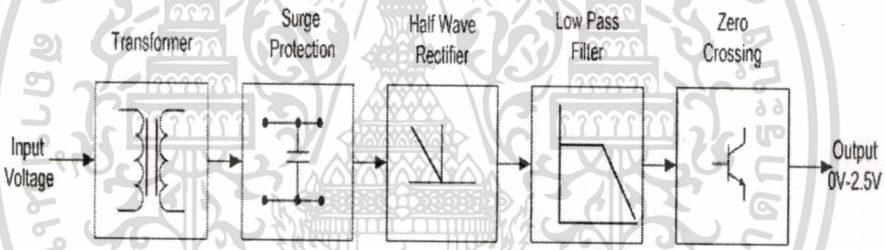
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สัญญาณเอาต์พุต ที่ R_3 วัดได้จากวงจรวัดที่ความเร็วรอบ 1396 rpm

รูปที่ 5.59 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรวัดความเร็วรอบ

5.3.5.4 **วงจรตรวจวัดความถี่** (Frequency Detector)



รูปที่ 5.60 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจความถี่

จากรูป อธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกและหลักการคำนวณได้ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่ เพิ่ม และลดขนาดแรงดันไฟฟ้า ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 1

2. วงจรป้องกันแรงดันเกิน ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่ต่ำ และป้องกันแรงดันเกิน ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 2

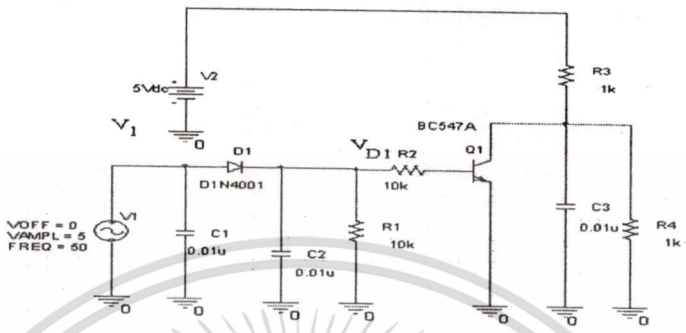
3. วงจรเรียงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แบบฮาล์เวฟ (Half Wave Rectifier) ทำหน้าที่ แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยสัญญาณที่ได้เป็นแบบครึ่งคลื่น ซึ่งเป็นข้อเสียของวงจรเรียงกระแสแบบฮาล์เวฟ แต่ในวิทยานิพนธ์ใช้คุณสมบัติการจ่ายแบบครึ่งคลื่น

4. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ กรองสัญญาณรบกวนทางด้านอินพุต ที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่ กำหนด ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วงจรตัดผ่านศูนย์ ทำหน้าที่ ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นพัลส์ จะทำงานเมื่อสัญญาณตัดผ่าน 0° หรือ 360° แสดงได้ดังหัวข้อ 5.3.4.4

จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรวัดความถี่ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.61 วงจรวัดความถี่ไฟฟ้า

จากรูป แรงดันที่ผ่านวงจรฮาล์เวฟหาได้ดังนี้

$$E_{rms} = 0.707E_{\max}$$

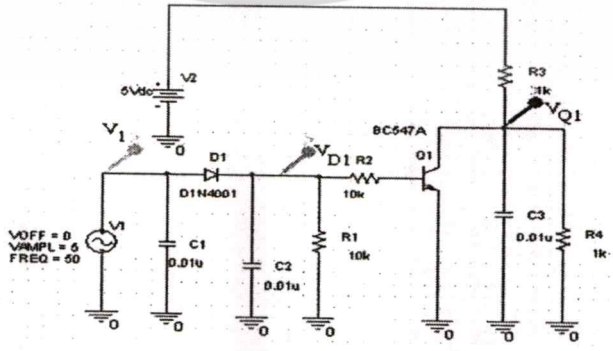
$$E_{\max} = \frac{E_{rms}}{0.707}$$

$$E_{\max} = \frac{5}{0.707} = 7.072136V$$

$$V_{dc} = E_{av} = 0.636E_{\max}$$

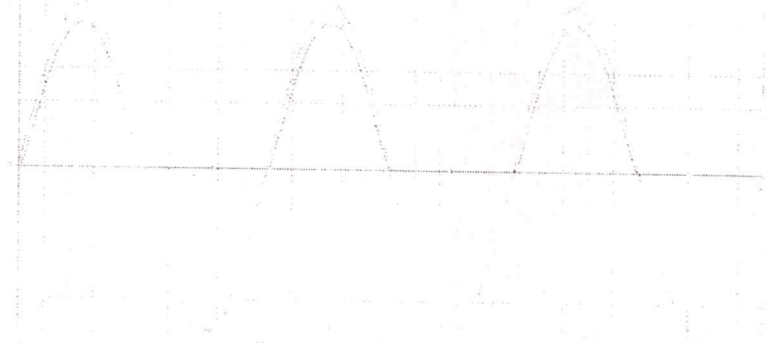
$$V_{dc} = 0.636 * 7.072136 = 4.4979V \approx 4.5V$$

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.61 กำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

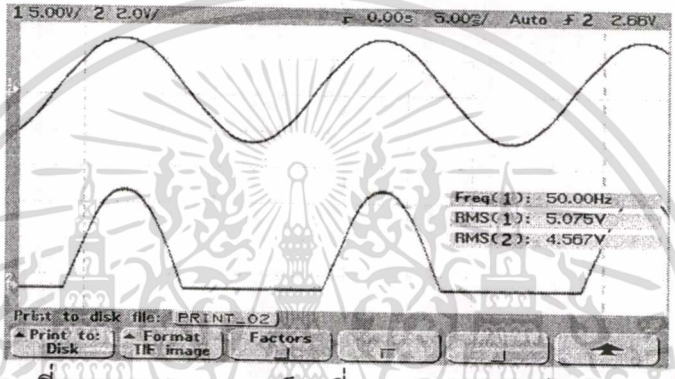


รูปที่ 5.62 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่างๆ ของวงจรวัดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

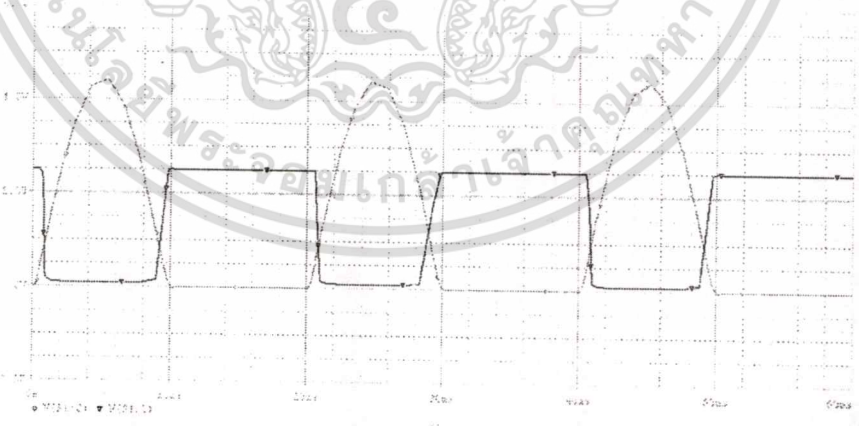


ก) สัญญาณอินพุทที่ขา Anode และเอาต์พุตที่ขา Cathode ของไดโอด D_1 ที่ได้จากการจำลอง



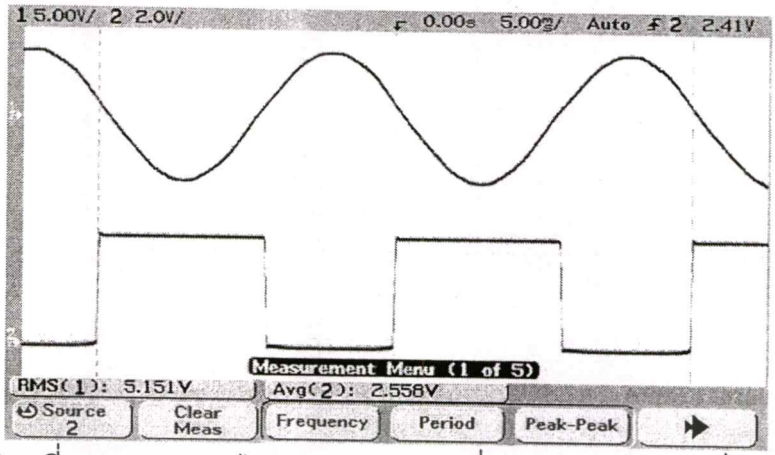
ข) สัญญาณอินพุทที่ขา Anode และเอาต์พุตที่ขา Cathode ของไดโอด D_1 ที่ได้จากการวัด

รูปที่ 5.63 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและทดลองจริง



ก) สัญญาณอินพุทที่ขา Cathode ของไดโอด และเอาต์พุตที่ขา C ทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

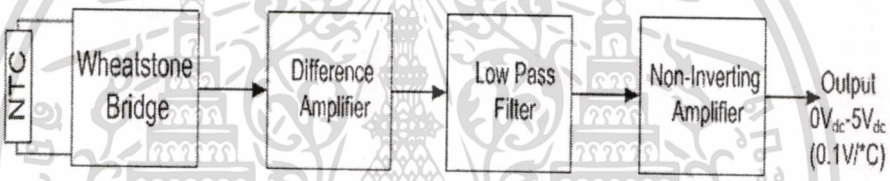
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สัญญาณอินพุทที่ขา Anode ของไดโอด และเอาต์พุตที่ขา C ทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 5.64 สัญญาณที่ได้จากการจำลองและทดลองจริงของวงจรวัดความถี่

5.3.5.5 **วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ** (Temperature Detector)



รูปที่ 5.65 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

จากรูป อธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกและหลักการคำนวณได้ดังนี้

1. NTC ทำหน้าที่ วัดอุณหภูมิโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทาน โดยทฤษฎีแสดงได้ดังข้อที่ 3.3.4 และผลการทดสอบได้ดังข้อที่ 5.3.3.4

2. Wheatstone Bridge ทำหน้าที่ วัดความสมดุลของวงจร ในกรณีที่สมดุลกระแสในวงจรจะเท่ากับศูนย์ ถ้าไม่สมดุลกระแสจะมีไหลวงจร แสดงได้ดังข้อที่ 5.3.4.6

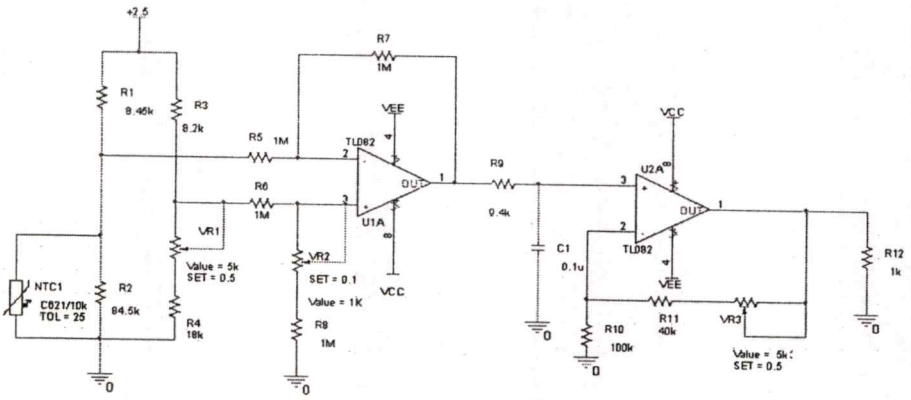
3. วงจรขยายผลต่าง ทำหน้าที่ วัดสัญญาณ 2 สัญญาณ ที่มีความแตกต่างกัน ตามข้อที่ 5.3.4.5 ของข้อ 1

4. วงจรกรองความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ กรองสัญญาณความถี่ต่ำออกจากวงจรไม่ให้เข้าไปรบกวนไมโครคอนโทรลเลอร์ ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 5.3.5.1 ของข้อ 2

5. วงจรไม่กลับขั้ว ทำหน้าที่ ขยายสัญญาณ และยังคงเฟสของสัญญาณเอาต์พุตให้เหมือนกับสัญญาณทางด้านอินพุท แสดงได้ดังข้อที่ 5.3.4.5 ของข้อ 2

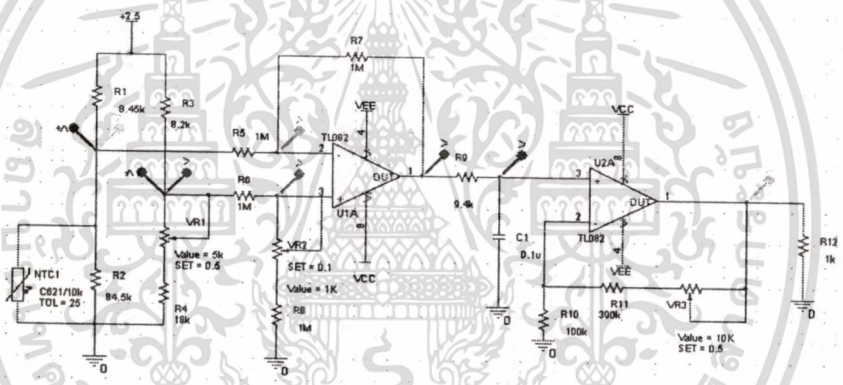
จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.66 วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.65 กำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.67 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

จากรูป การหาความต้านทานของวงจรหาได้ในสภาวะสมดุลของบริดจ์ประมาณ 0V โดยกำหนดแรงดันที่บริดจ์สมดุลที่ให้เท่ากับ 0.8V กระแสในวงจรเท่ากับ 0.2mA ดังนั้น หาค่าความต้านทานได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{Vcc - Vb}{I}$$

$$R_1 = \frac{2.5 - 0.8}{0.2 * 10^{-3}} = 8.5k\Omega \approx 8.45k\Omega$$

ส่วนค่าความต้านทาน R_2 ขนานกับ NTC หาได้โดยสมการที่ 5.28 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_1}{R_2 \parallel NTC} \approx 1$$
$$\therefore R_1 \approx R_2 \parallel NTC = 8.45k\Omega$$

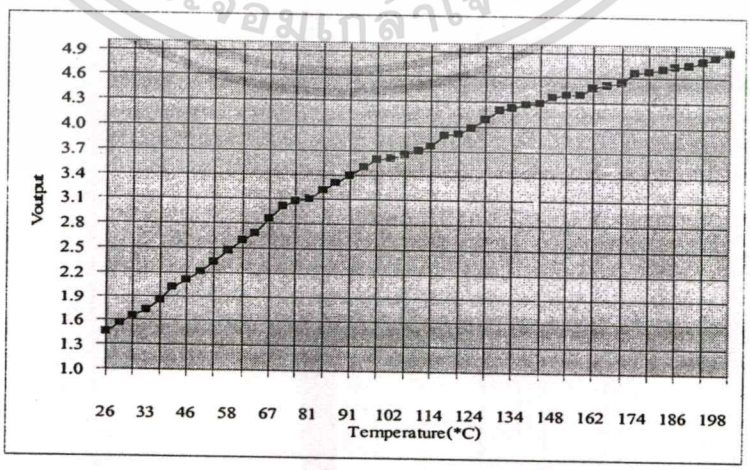
เนื่องจากค่าความต้านทานของ NTC ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ $10k\Omega$ ที่ $25^{\circ}C$ ดังนั้น ค่าความต้านทาน R_2 ได้ดังนี้

$$R_2 \parallel NTC = R_T = \frac{R_2 * NTC}{R_2 + NTC}$$
$$R_2 = \frac{NTC * R_T}{NTC - R_T} = \frac{10k * 8.45k}{10k - 8.45k} = 54516.129\Omega = 54.516k\Omega$$

เพราะฉะนั้น เลือกค่าความต้านทาน R_2 ประมาณ $84.5k\Omega$ เนื่องจากค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งเมื่อนำค่าที่คำนวณได้ไปรวมกับค่าความต้านทานเทอร์มิสเตอร์ทำให้อุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงง่าย แต่เมื่อเพิ่มค่าที่คำนวณได้ 1.55 เท่า [40] จะทำให้ได้ค่าความต้านทาน R_2 ประมาณ $84.5k\Omega$ ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่าความต้านทาน R_3, R_4, VR_1 ได้ดังนี้

$$R_3 = \frac{Vcc - Vb}{I}$$
$$R_3 = \frac{2.5 - 0.8}{0.21 * 10^{-3}} = 8.095k\Omega \approx 8.2k\Omega$$

ส่วนค่าความต้านทาน R_4, VR_1 กำหนดให้ R_4 เท่ากับ $18k\Omega$ และ VR_1 เป็นความต้านทานปรับค่าได้ ตั้งแต่ $0\Omega - 5k\Omega$ จากวงจร วัดสัญญาณโดยการจำลอง และวัดในวงจรได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.68 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันทางด้านเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

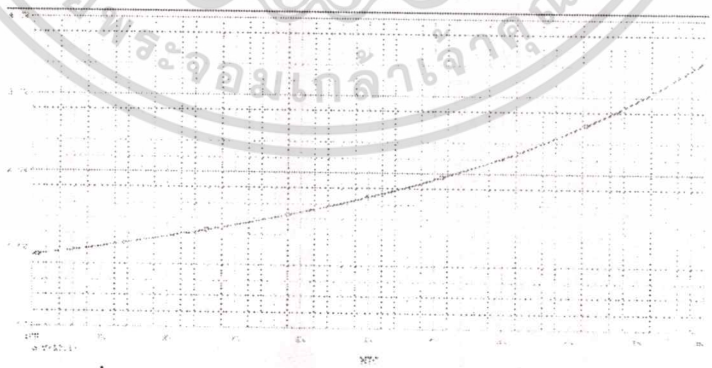
จากรูป แสดงเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิที่ได้รับการแก้ไขให้เส้นเชิง โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ 200°C มีแรงดันที่เอาต์พุตของวงจร 4.912โวทต์



รูปที่ 5.69 สัญญาณจำลองที่วัดได้จากจุด NTC

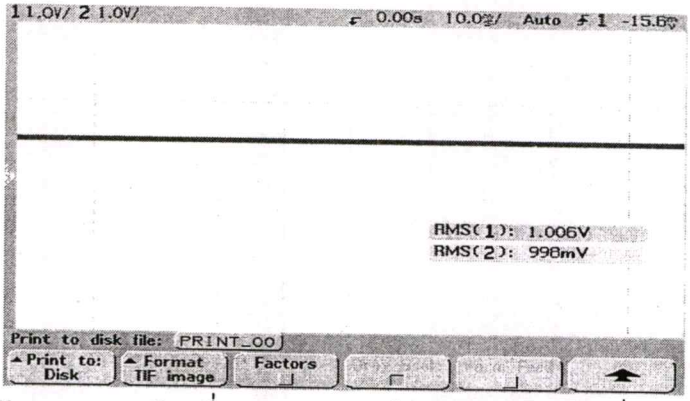


รูปที่ 5.70 สัญญาณจำลองที่วัดได้จากจุดสมดุลของบริดจ์



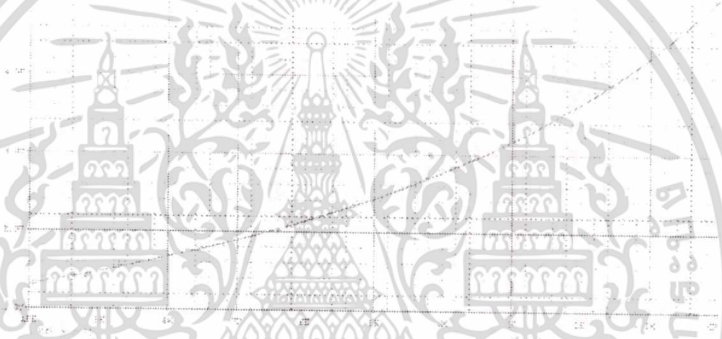
ก) สัญญาณที่วัดได้จากขา 3 ของ U2A เทียบกับ NTC ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

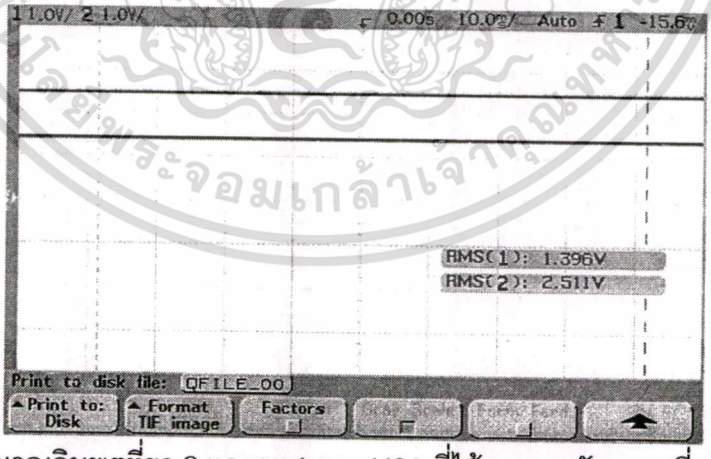


ข) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 1 ของ U1A ได้จากการวัดวงจรที่ $27.5^{\circ}C$

รูปที่ 5.71 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ



ก) สัญญาณอินพุตที่ขา 1 ของ U2A เทียบกับ NTC ได้จากการจำลอง

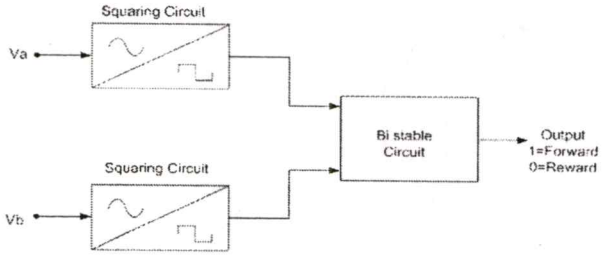


ข) สัญญาณอินพุตที่ขา 3 และขา 1 ของ U2A ที่ได้จากการวัดวงจร ที่ $27.5^{\circ}C$

รูปที่ 5.72 สัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

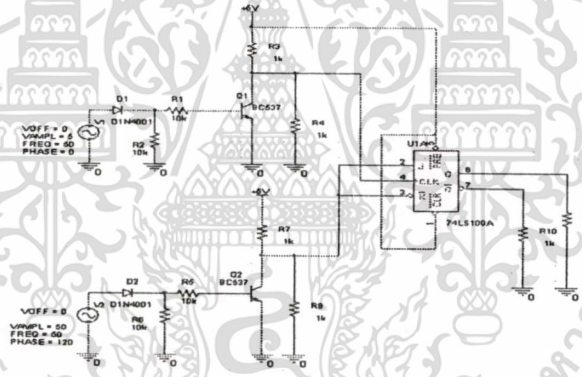
5.3.5.6 วงจรตรวจวัดความต่างเฟส (Phase Sequence)



รูปที่ 5.73 บล็อกไดอะแกรมวงจรตรวจวัดความต่างเฟส

จากรูป ออกแบบวงจรตรวจวัดความต่างเฟส และอธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกได้ดังนี้

1. Squaring Circuit ทำหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพัลส์ ตามข้อที่ 5.3.5.4
2. Bistable Circuit ทำหน้าที่ เปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณ โดยใช้คุณสมบัติของ JK Flip Flop



รูปที่ 5.74 วงจรตรวจวัดความต่างเฟส

จากรูป เมื่อนำ JK Flip Flop มาใช้เปรียบเทียบ ซึ่งคุณสมบัติแสดงได้ตามตารางความจริงดังต่อไปนี้

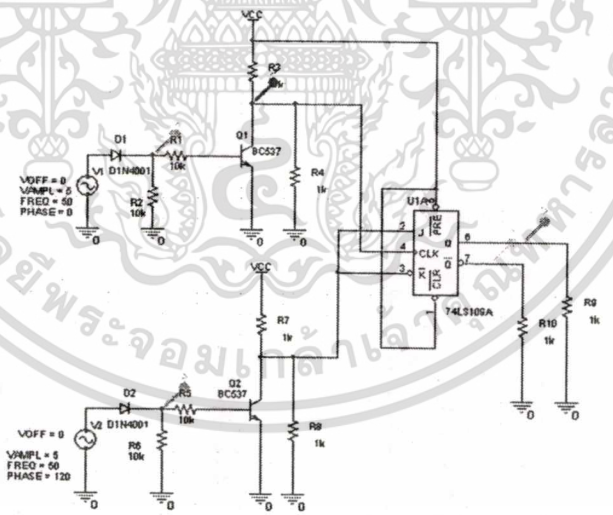
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ตารางความเป็นจริงของ JK Flip Flop เบอร์ SN74LS109A

Input					Outputs	
$\overline{PRE}$	$\overline{CLR}$	CLK	J	K	Q	$\overline{Q}$
L	H	X	X	X	H	L
H	L	X	X	X	L	H
L	L	X	X	X	$H^{\uparrow}$	$H^{\uparrow}$
H	H	↑	L	L	L	H
H	H	↑	H	L	*TOGGLE*	
H	H	↑	L	H	Q_0	$\overline{Q_0}$
H	H	↑	H	H	H	L
H	H	L	X	X	Q_0	$\overline{Q_0}$

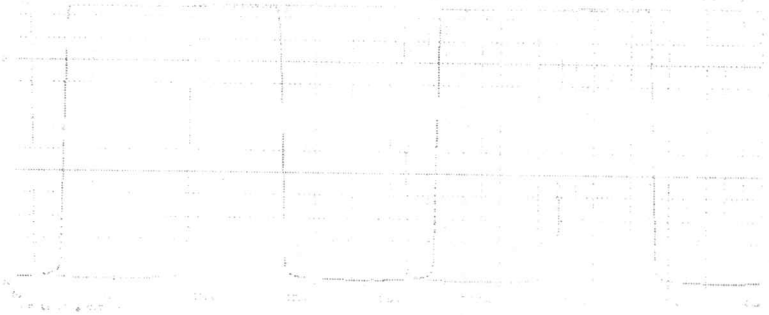
จากตารางความจริง เอาต์พุตของ JK Flip Flopที่ขาQ เป็น High และ Low สลับกัน ได้ต้องป้อนสัญญาณให้ J และ K มีอินพุตเหมือนกัน และขา CLK ต้องเป็น High ที่ขอบขาขึ้นโดยให้ขา$\overline{PRE}$ และ $\overline{CLR}$ เป็น High ทั้งคู่

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.73 กำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

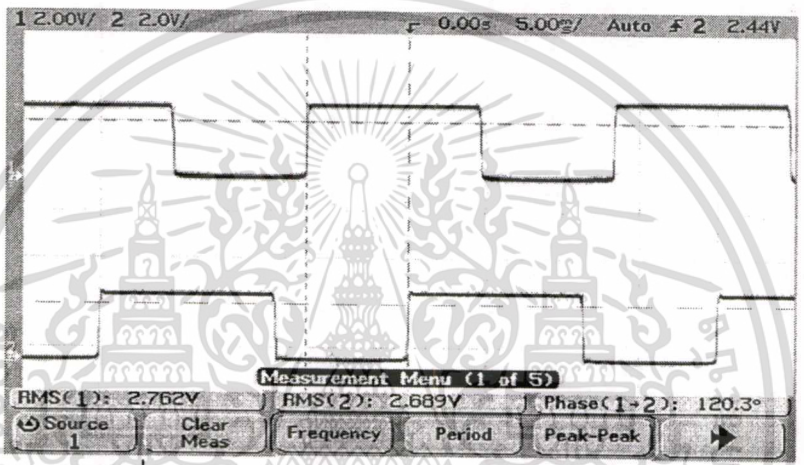


รูปที่ 5.75 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรตรวจวัดความต่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

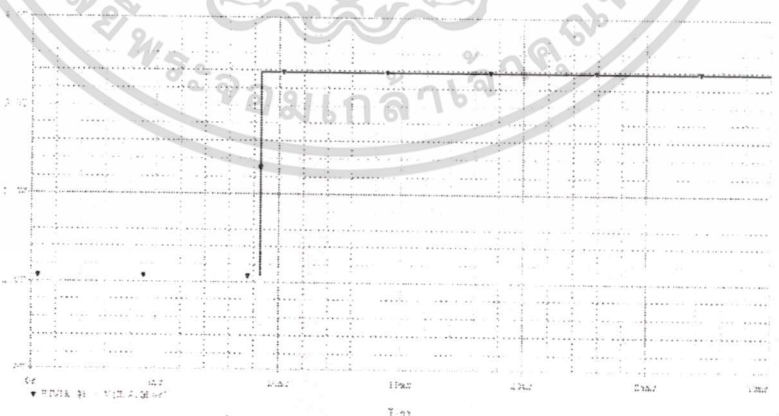


ก) สัญญาณอินพุตที่ขา 2 มุม 120° และขา 4 มุม 0° ของ JK Flip Flop ที่ได้จากการจำลอง



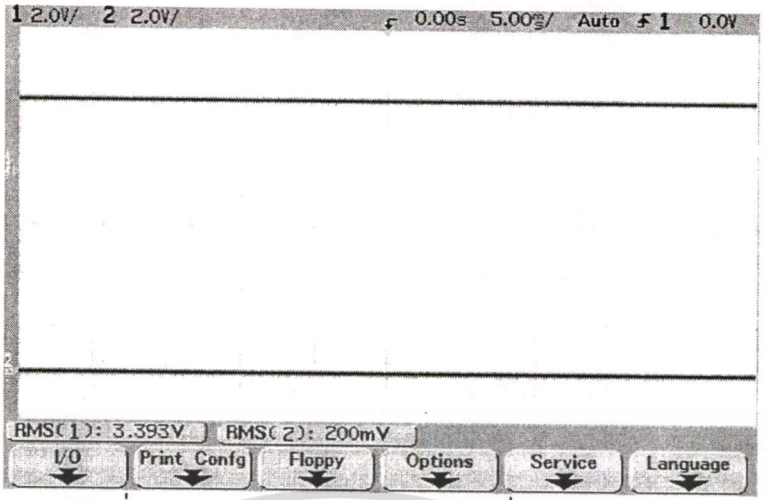
ข) สัญญาณอินพุตที่ขา 2 มุม 120° และขา 4 มุม 0° ของ JK Flip Flop ที่ได้จากการวัด

รูปที่ 5.76 สัญญาณอินพุตที่ขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_1 และ Q_2



ก) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา Q และ $\overline{Q}$ ของ JK Flip Flop ได้จากการจำลอง

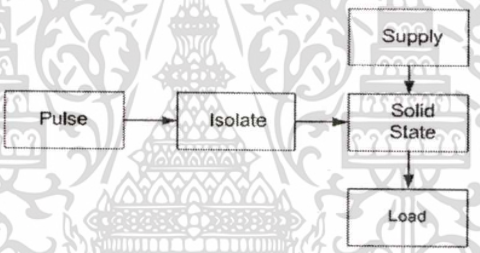
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สัญญาณเอาต์พุตที่ขา Q และ $\overline{Q}$ ของ JK Flip Flop ที่ได้จากการวัด

รูปที่ 5.77 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรตรวจวัดความต่างเฟส

5.3.5.7 **วงจรโซลิดสเตตรีเลย์**(Solid State Relay)



รูปที่ 5.78 บล็อกไดอะแกรมของวงจรโซลิคสเตตรีเลย์

จากรูป อธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกและหลักการคำนวณได้ดังนี้

1. Pulse ทำหน้าที่ ส่งสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปให้โซลิดสเตตตัดต่อการทำงานของระบบ

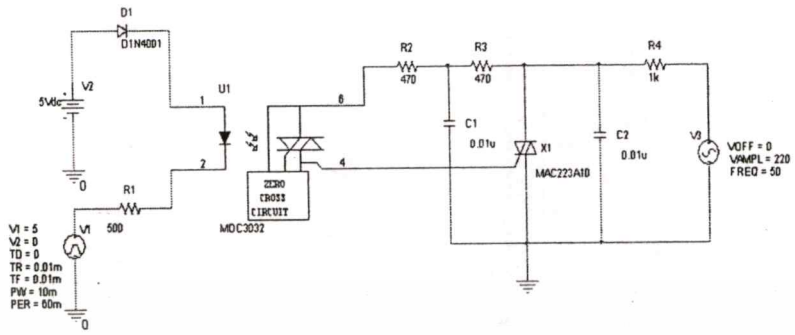
2. Isolate ทำหน้าที่ แยกสัญญาณควบคุมที่มีขนาดแรงดันต่ำออกจากสัญญาณที่มีขนาดแรงดันสูง

3. Solid State ทำหน้าที่ ตัดต่อการทำงานของระบบ โดยไม่มีหน้าสัมผัสต่อวงจร และไม่ทำให้เกิดการสั่นของหน้าสัมผัส หรือเรียกว่า Bounce ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบ

4. Supply ทำหน้าที่ จ่ายแรงดันให้แก่ Solid Stateเพื่อใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรม ออกแบบวงจรวงจรโซลิคสเตตรีเลย์ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.79 วงจรโซลิดสเตตรีเลย์

จากรูป ใช้ออปโต้คัปเลอร์เบอร์ MOC3032 ภายในมีวงจร Zero Crossing ซึ่งทำให้ลดปัญหาสัญญาณรบกวนเข้าไปในสายไฟได้ ในการหาความต้านทาน R_1 โดยเลือกกระแสไหล 5mA ตาม Data Sheet ของ MOC3032 ที่กำหนดกระแสใช้งานทางด้านควบคุมอยู่ที่ 5-15mA และแรงดันอยู่ที่ 1.6V หาได้ดังนี้

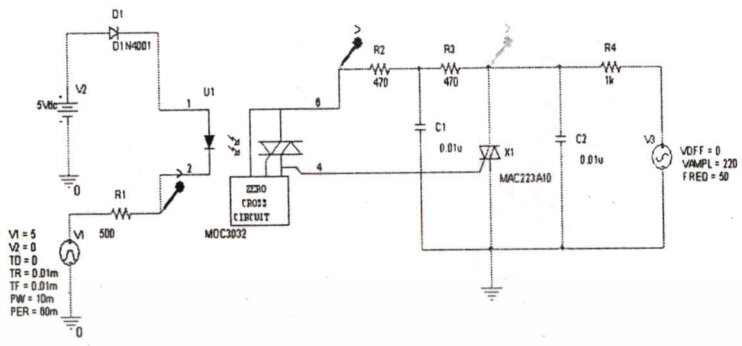
$$R_1 = \frac{VCC - VD_1 - VD_{cou}}{I}$$

$$R_1 = \frac{5 - 0.7 - 1.6}{5*10^{-3}} = 540\Omega$$

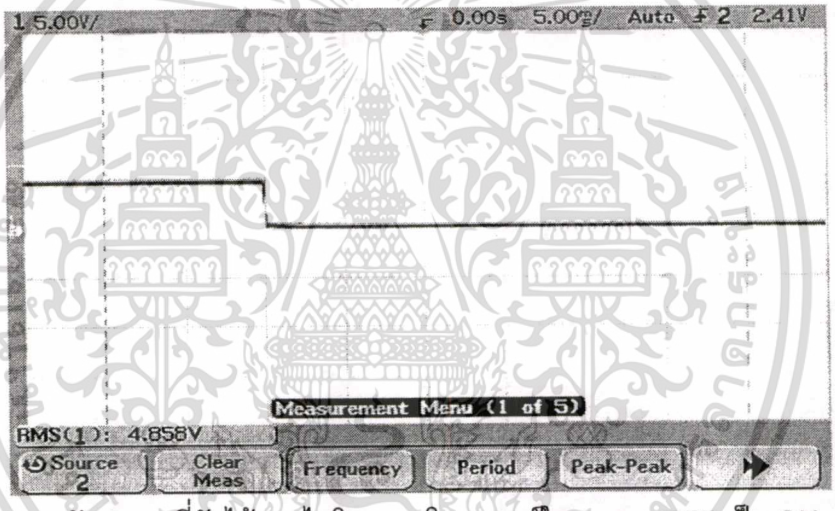
ดังนั้น ค่าที่คำนวณได้ของ R_1 เท่ากับ 540Ω จึงเลือกใช้ความต้านทาน R_1 ประมาณ 500Ω เมื่อป้อนแรงดันควบคุมเข้ามา LED ภายในออปโต้คัปเลอร์ ทำให้โฟโตไตรแอคภายในนำกระแส แต่โฟโตไตแอคจะนำกระแส เมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านสูงของออปโต้คัปเลอร์ มีค่าเริ่มต้นที่ 0° 180° หรือ 360° นำให้โฟโตไตรแอคนำกระแสทุกครั้งที่มีแรงดันศูนย์โวลต์ ค่า R_3 และ C_1 เป็นตัวป้องกันทรานเซี้ยนต์ จากการเพิ่มแรงดันของโหลดอย่างรวดเร็ว ทำให้ไตรแอคเสียได้ นอกจากนี้ C_1 ยังเป็นตัวลดสัญญาณรบกวนและแรงดันกระชากในสายไฟ ส่วน R_3 เป็นตัวจำกัดกระแส โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นตัวลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก R_2 เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่าน ไตรแอค X_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

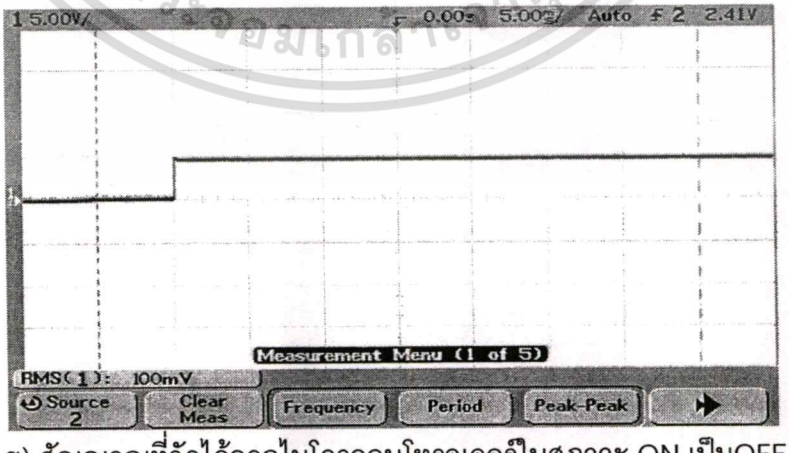
จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.78 กำหนดจุดการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.80 สัญญาณที่วัดได้ตามจุดต่าง ๆ ของวงจรโซลิดสเตตรีเลย์



ก) สัญญาณที่วัดได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ในสภาวะ OFF เป็น ON

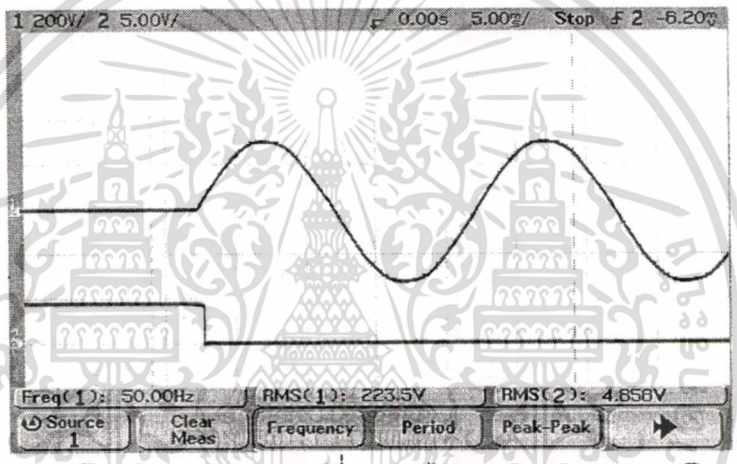


ข) สัญญาณที่วัดได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ในสภาวะ ON เป็นOFF

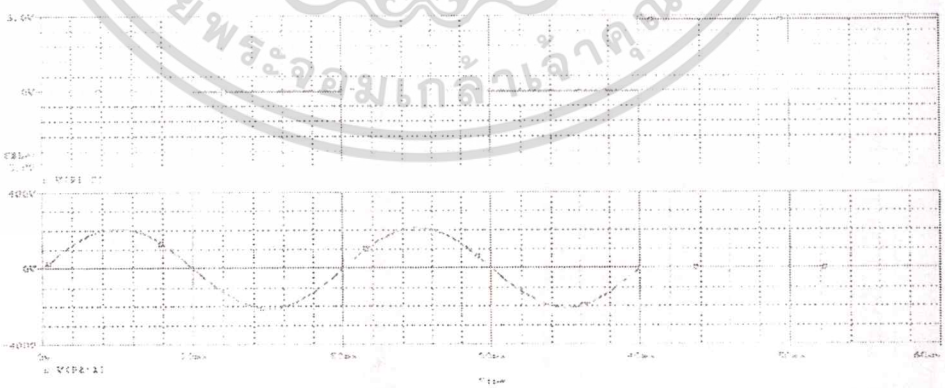
รูปที่ 5.81 สัญญาณที่ส่งออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) สัญญาณอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งออกไปควบคุมจากOFF เป็น ON กับสัญญาณแรงดันตกคร่อมไตรแอค ที่ได้จากการจำลอง

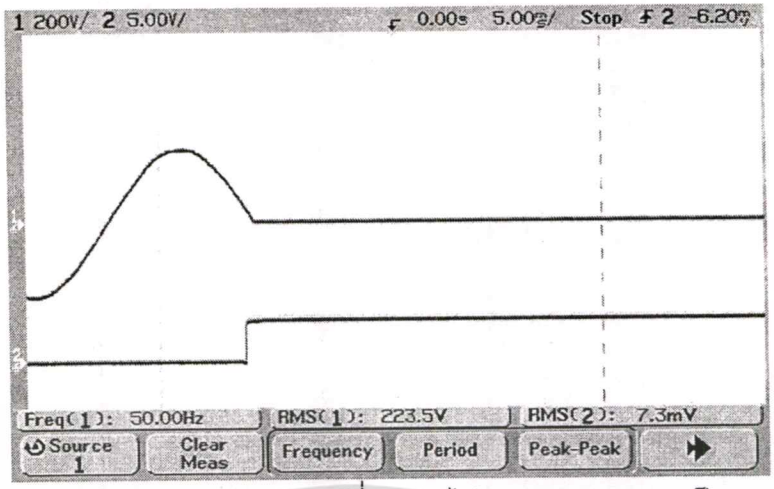


ข) สัญญาณอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งออกไปควบคุมจาก OFF เป็น ON กับสัญญาณแรงดันตกคร่อมไตรแอค ที่ได้จากการวัด



ค) สัญญาณอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งออกไปควบคุมจาก ON เป็น OFF กับสัญญาณแรงดันตกคร่อมไตรแอค ที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) สัญญาณอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งออกไปควบคุมจากON เป็น OFF กับสัญญาณแรงดันตกคร่อมไตรแอค ที่ได้จากการวัด

รูปที่ 5.82 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรโซลิดสเตต

5.3.6 โครงสร้างของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์

5.3.6.1 ส่วนควบคุมและประมวลผล

ส่วนควบคุมและประมวลผลเป็นส่วนของชิพไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ชิพสนับสนุนการทำงาน เพื่อให้เป็นศูนย์กลางควบคุมรีเลย์ทั้งหมด ได้แก่ หน่วยความจำชนิดถาวร หน่วยความจำที่อ่าน – เขียนค่าได้ พร้อมทั้งชิพสนับสนุนที่เป็นส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่จำเป็นในการใช้ติดต่อกับผู้ใช้งาน เช่น พอร์ตอนุกรมสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสารข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ที่จำเป็นในการติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 5.1

5.3.6.2 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์ (Start Motor)

การควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์มีหลายวิธี เช่น การสตาร์ท แบบสตาร์-เดลต้า (Star–Delta), การสตาร์ทแบบออโตทรานสฟอร์มเมอร์และการสตาร์ทแบบต่อตรง (Direct on Line Start: DOL) เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้วิธีการสตาร์ทแบบต่อตรง เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์น้อยที่สุด และประหยัดที่สุด นอกจากนี้ ยังคงมีใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีพิกัดขนาดเล็กตั้งแต่ไม่ถึง 1 กิโลวัตต์ ไปจนถึงมอเตอร์ที่มีพิกัดขนาดใหญ่หลายกิโลวัตต์ โครงสร้างดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.2

จากโครงสร้างของระบบควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์และระบบป้องกันมอเตอร์ ได้ถูกควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยโปรแกรมควบคุมที่มีการกำหนดและออกแบบ

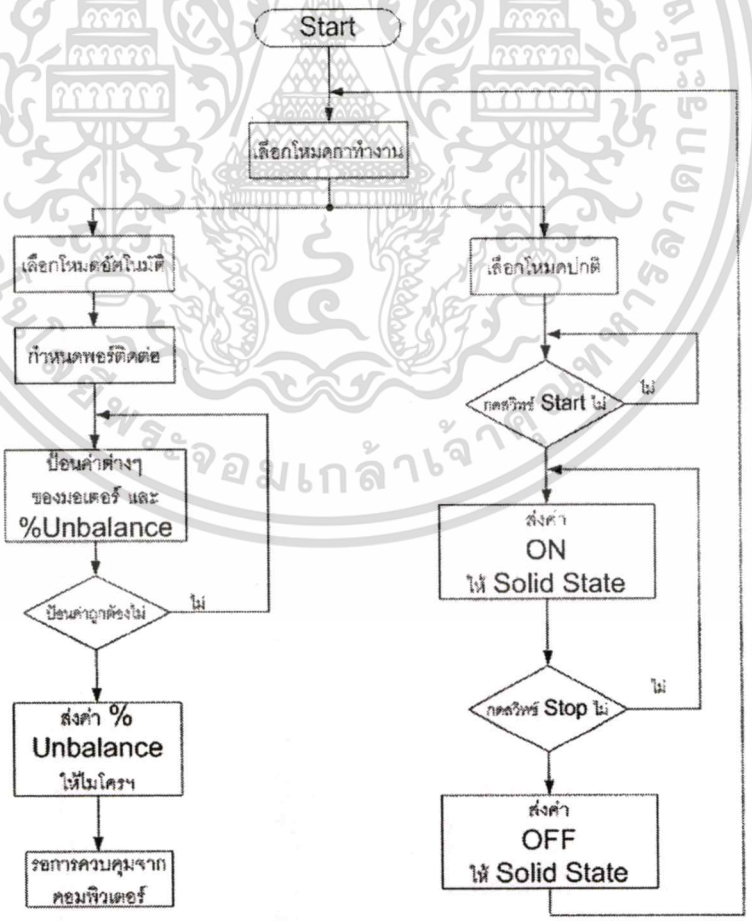
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมให้สอดคล้องกับโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ เพื่อทำให้ระบบรีเลย์ป้องกันมีฟังก์ชั่นการทำงานที่เพียงพอต่อการป้องกันมอเตอร์ และขนาดของระบบโดยรวมมีขนาดเล็กลง

5.4 ส่วนของโปรแกรม (Software)

5.4.1 โครงสร้างหลัก

โครงสร้างของรีเลย์ป้องกันควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของโปรแกรมแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์เชื่อมต่อทุกตัว และตรวจสอบการติดตามการทำงานแต่ละส่วนของโปรแกรมควบคุม ส่วนคอมพิวเตอร์จะแสดงสถานการณ์ในการทำงานของมอเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของรีเลย์ โดยผู้ใช้งานจะทราบผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ การตั้งค่าและเก็บข้อมูลสภาวะการทำงานของรีเลย์ จะแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดได้ดังรูปที่ 5.83



รูปที่ 5.83 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ เขียนขึ้นจากโปรแกรมภาษาวิชชวลเบสิก 6 ซึ่งเป็นภาษาระดับสูง(High Level Languages) มีการสร้างกราฟฟิก เพื่ออินเตอร์เฟดกับผู้ใช้โดยตรง เรียกว่า GUI (Graphic User Interface) ให้ผู้ใช้สามารถใช้งานโปรแกรมได้ง่าย และเห็นภาพการทำงานร่วมไปด้วย การทำงานแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 มีการส่งโค๊ดออกไปให้กับเครื่องป้องกันมอเตอร์ เมื่อเครื่องป้องกันมอเตอร์ได้รับโค๊ดที่ถูกส่งมาจากโปรแกรม และรู้ตำแหน่งของตัวเอง ก็จะส่งข้อมูลสภาวะการทำงานของมอเตอร์เป็นข้อมูลรหัสแอสกี (ASCII Code) ที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำของเครื่องป้องกันมอเตอร์ให้กับโปรแกรม ซึ่งหลังจากส่งโค๊ดออกมาก็จะรอรับข้อมูล โดยจะรับข้อมูลลงมาที่เท็กซ์บอซ์ก แต่เนื่องจากต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูล จึงต้องตั้งรหัสของข้อมูลที่ส่งมาเป็นดังนี้

สตาร์ทบิต	แรงดัน	กระแส	ความถี่	อุณหภูมิ	ความเร็ว	ทิศทาง	สภาวะ	คาเร็กเตอร์ 13 และ 10

ในการส่งรหัสแอสกีตัวที่ 13 และตัวที่ 10 เป็นรหัสแอสกีที่ใช้ในการขึ้นบรรทัดใหม่ ที่ต้องส่งมาเนื่องจากให้ข้อมูลที่รับส่งนั้นมีการแบ่งข้อมูลออกเป็นชุด ๆ ทุกช่วงเวลาของการรับส่งข้อมูล โดยในการเก็บข้อมูลลงเท็กซ์บอซ์กจะเรียงข้อมูลที่รับเข้ามาเป็นบรรทัดไปจนกระทั่งข้อมูลที่ถูกส่งมาหมด

ขั้นตอนที่ 2 โปรแกรมจะนำข้อมูลที่อยู่ในเท็กซ์บอซ์กไปทำการปรับแต่งโดยตัดบรรทัดที่ไม่ใช่ข้อมูลออกไป ให้เหลือเพียงที่เป็นข้อมูล

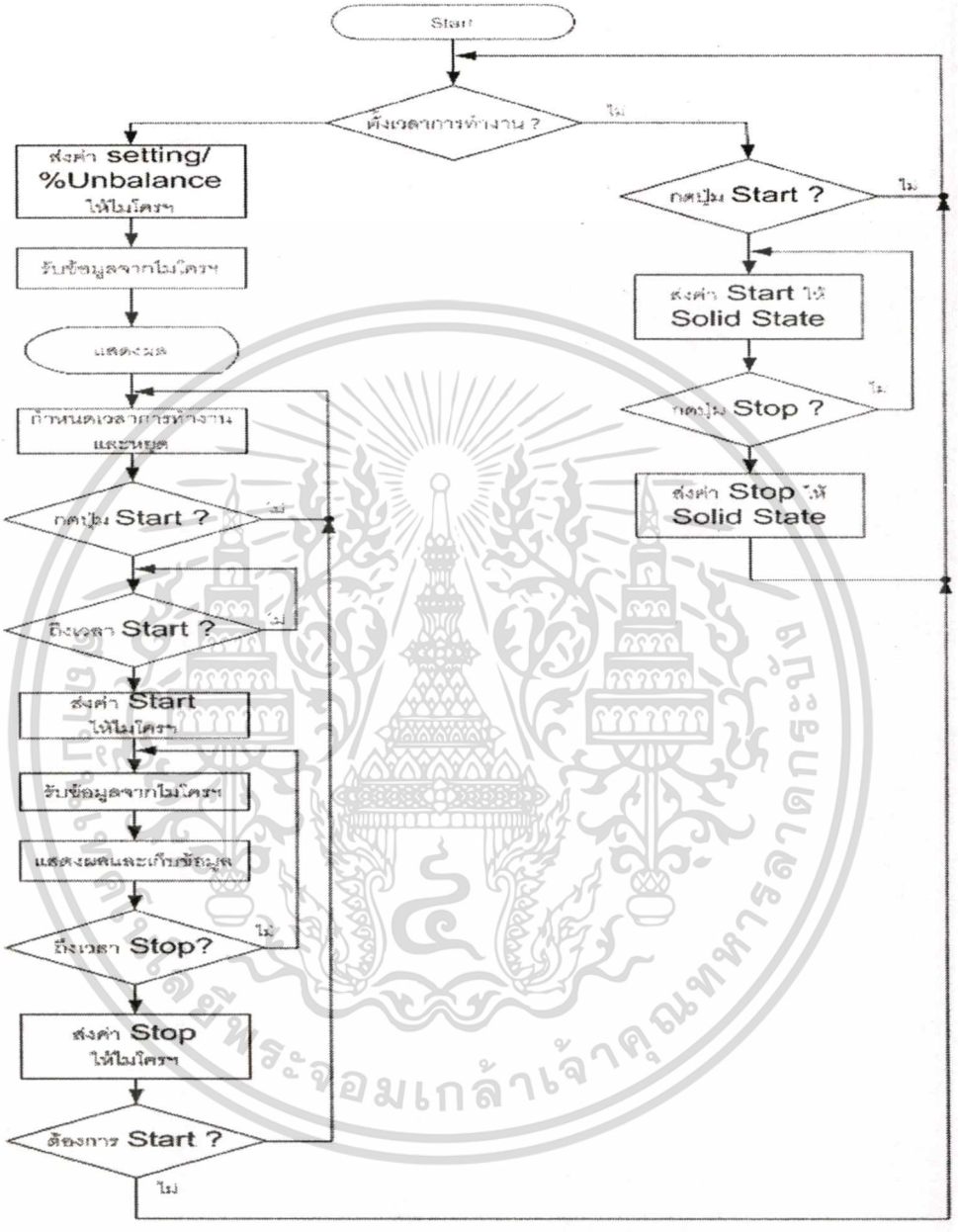
ขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมจะทำการแบ่งข้อมูลซึ่งผ่านการปรับแต่งเรียบร้อยแล้วจากขั้นตอนที่ 2 ออกเป็นชุด ๆ โดยในแต่ละชุดข้อมูลจะถูกตัดแบ่งออกเป็น แรงดัน, กระแส, ความถี่, ความเร็ว, ทิศทางการหมุน, สภาวะการเปิด - ปิด แล้วนำข้อมูลที่ถูกตัดแบ่งแต่ละชุดนี้ไปจัดใส่ในตารางซึ่งมีการแสดงผลตามลักษณะของข้อมูล โดยจะแบ่งข้อมูลแต่ละชุดลงในตารางแต่ละแถว เพื่อใช้ในการแสดงผลขั้นสูงกว่า คือ การวาดกราฟต่อไป ในการแบ่งข้อมูลนี้จะเริ่มแบ่งข้อมูลตั้งแต่ข้อมูลชุดแรกในการเท็กซ์บอซ์กไปจนกระทั่งถึงชุดสุดท้ายของข้อมูล

ขั้นตอนที่ 4 ในการดูสภาวะการทำงานของมอเตอร์ทั้งหมด ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มการบันทึกข้อมูล โดยเครื่องระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำจนกระทั่งถึงขณะที่ทำการดาวน์โหลด (Download) ข้อมูล จะแสดงอยู่ในตารางโดยเรียงลำดับข้อมูล หากข้อมูลที่แสดงอยู่มีค่ามากกว่าที่ตารางจะแสดงให้เห็นบนหน้าจอ ผู้ใช้สามารถที่เลื่อนดูข้อมูลทั้งหมดได้โดยใช้ สกอร์บาร์ด้านข้างของตาราง หรือ เปิดดูเท็กซ์อิดิสซ์ก็ได้

ขั้นตอนที่ 5 ในการแสดงผลแบบกราฟ สามารถดูข้อมูลแต่ละข้อมูลได้จากหน้าจอหลัก โดยเลือกชนิดของข้อมูลแต่ละชนิดได้

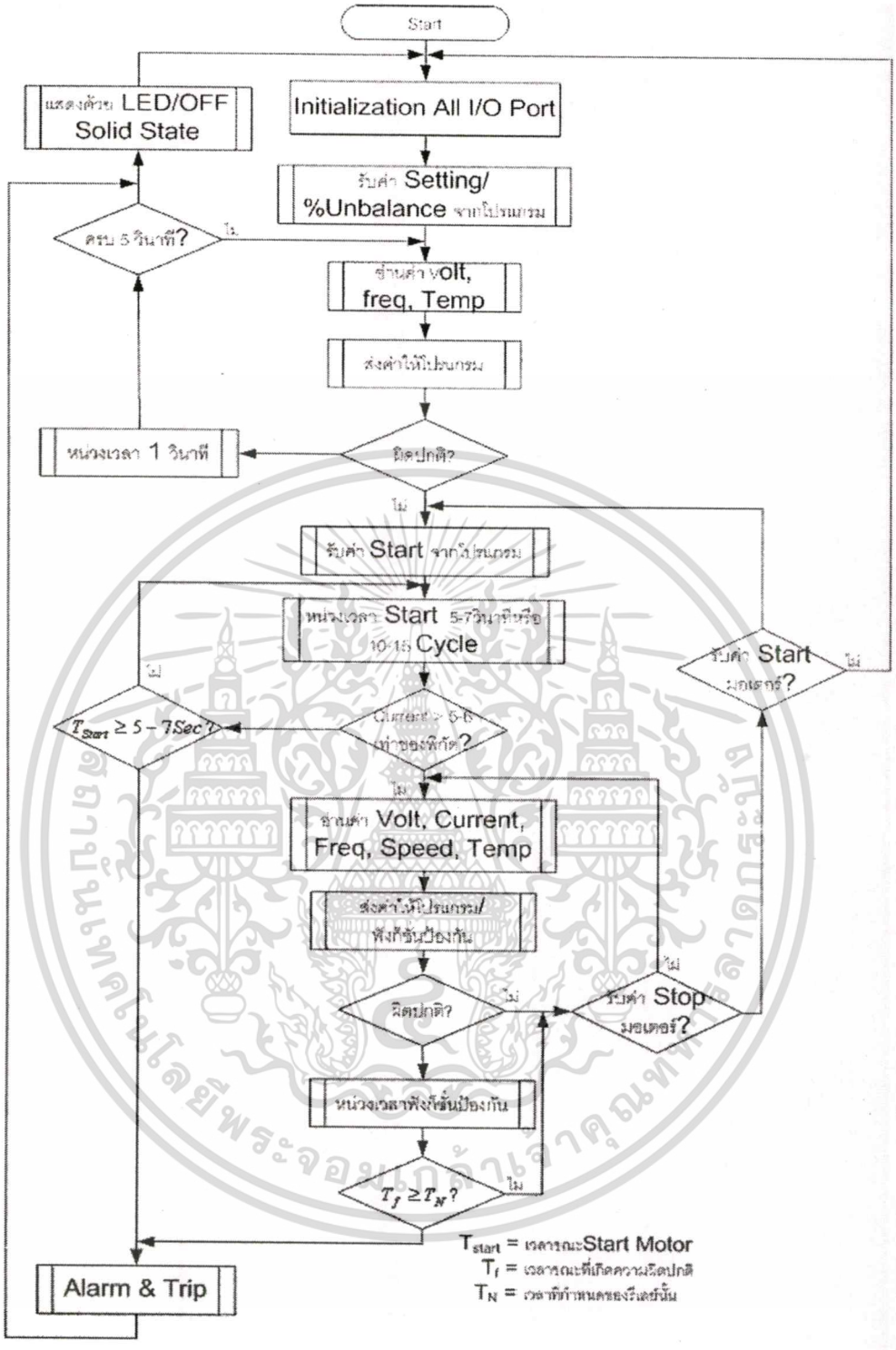
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดในรูปที่ 5.84 จะแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 5.84 และ 5.85 ตามลำดับ



รูปที่ 5.84 ลำดับการทำงานของโปรแกรม Visual Basic6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

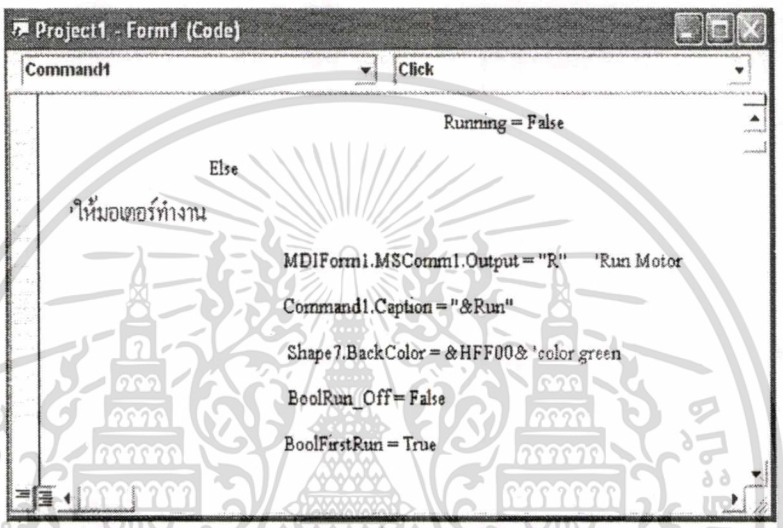


รูปที่ 5.85 ลำดับการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

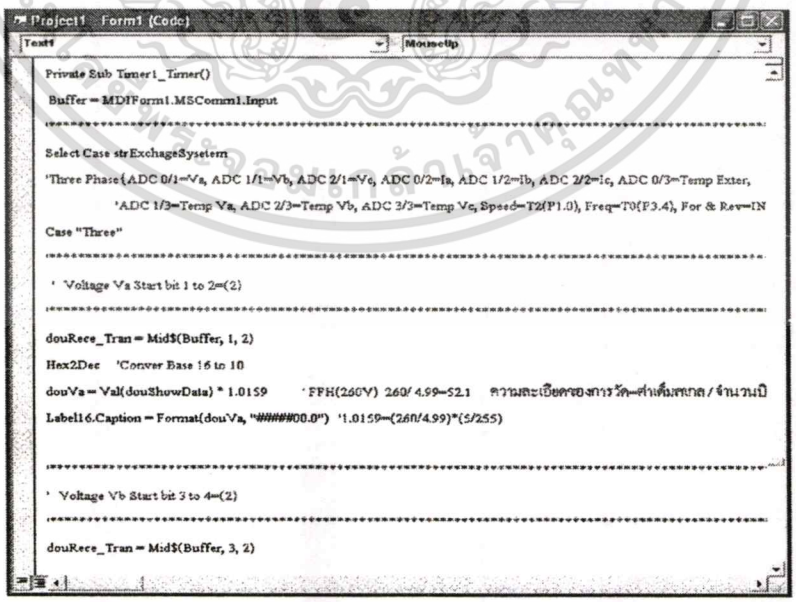
ไมโครคอนโทรลเลอร์ และคอมพิวเตอร์จะติดต่อสื่อสารทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องเข้าใจ ในการตีความหมายของรหัสข้อมูลที่รับเข้ามา รหัสข้อมูลที่ใช้แทนการตั้ง ค่า แรงดัน ด้วยรหัสแอสกี "V" จะถูกส่งออกจากคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรมไปสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานโปรแกรมจะต้องคลิกปุ่ม Start คอมพิวเตอร์จะทำการส่งรหัสแอสกี "R" ออกมา ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อได้รับรหัสนี้ก็จะส่งสัญญาณ "Low" ให้วงจรโซลิดสเตตรีเลย์ทำงาน มอเตอร์หมุน เมื่อระบบเกิดการ Trip ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ "High"ให้วงจรโซลิดสเตตรีเลย์หยุดการทำงาน แต่ถ้าต้องการหยุดทำงาน จะต้องคลิกปุ่ม Stop คอมพิวเตอร์จะทำการส่งรหัสแอสกี "S" ออกมา ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อได้รับรหัสก็ส่งสัญญาณ "High" ให้วงจรโซลิดสเตตรีเลย์จะหยุดการทำงาน ดังรูปต่อไปนี้

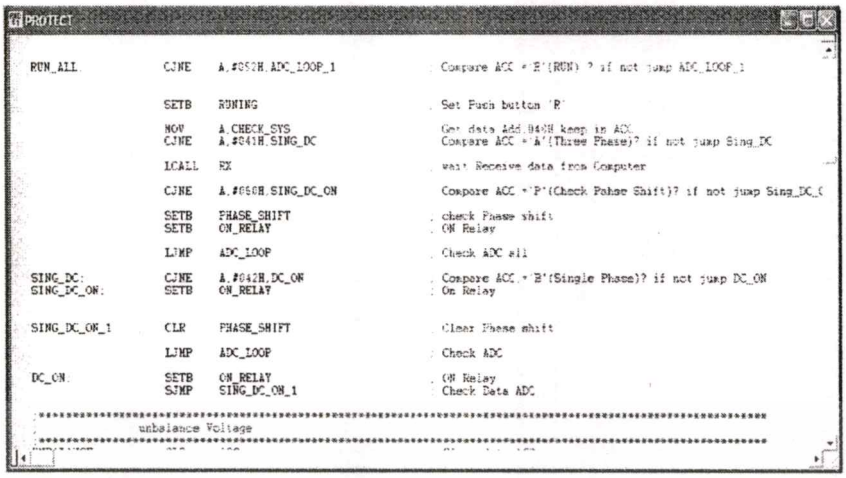


รูปที่ 5.86 ตัวอย่างการส่งค่า "R" ไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.87 ตัวอย่างการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
PROTECT

RUN_ALL:        CJNE    A,#052H,ADC_LOOP_1          ; Compare ACC = 'R'(RUN) ? if not jump ADC_LOOP_1

                SETB    RUNNING                     ; Set Push button 'R'

                MOV     A,CHECK_SYS                 ; Get data Add.040H keep in ACC
                CJNE    A,#041H,SING_DC             ; Compare ACC = 'A'(Three Phase)? if not jump Sing_DC

                LCALL   RX                          ; wait Receive data from Computer

                CJNE    A,#050H,SING_DC_ON          ; Compare ACC = 'P'(Check Pahse Shift)? if not jump Sing_DC_(

                SETB    PHASE_SHIFT                 ; check Phase shift
                SETB    ON_RELAY                    ; ON Relay

                LJMP    ADC_LOOP                    ; Check ADC all

SING_DC:        CJNE    A,#042H,DC_ON               ; Compare ACC = 'B'(Single Phase)? if not jump DC_ON
SING_DC_ON:     SETB    ON_RELAY                    ; On Relay

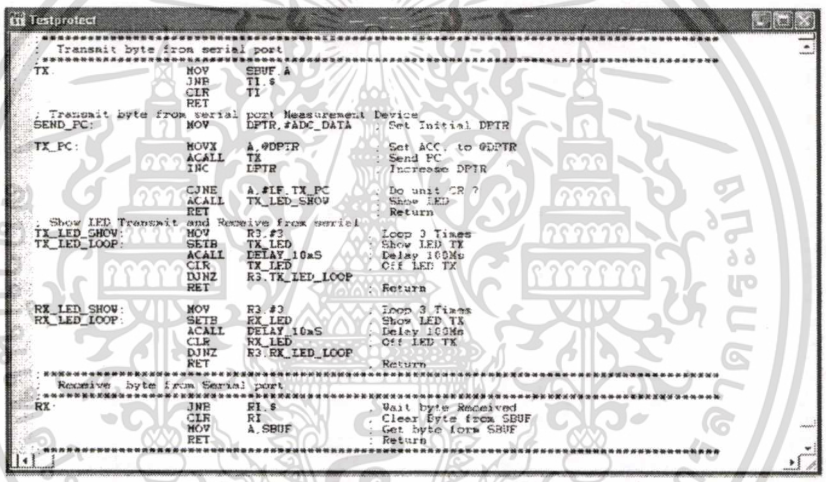
SING_DC_ON_1:   CLR     PHASE_SHIFT                 ; Clear Phase shift

                LJMP    ADC_LOOP                    ; Check ADC

DC_ON:          SETB    ON_RELAY                    ; ON Relay
                SJMP    SING_DC_ON_1                ; Check Data ADC

;*****************************************************************************************
;               unbalance Voltage
;*****************************************************************************************
```

รูปที่ 5.88 ตัวอย่างการรับค่า “R” จากพอร์ตอนุกรม



```
Testprotect

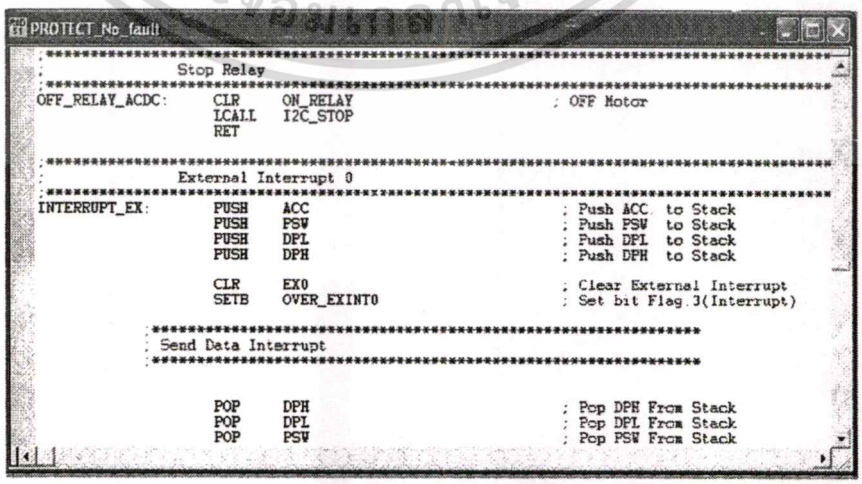
;*****************************************************************************************
;  Transmit byte from serial port
;*****************************************************************************************
TX:             MOV     SBUF,A
                JNB     TI,$
                CLR     TI
                RET
; Transmit byte from serial port Measurement Device
SEND_PC:        MOV     DPTR,#ADC_DATA      ; Set Initial DPTR

TX_PC:          MOVX    A,@DPTR             ; Set ACC. to @DPTR
                ACALL   TX                  ; Send PC
                INC     DPTR                ; Increase DPTR

                CJNE    A,#1F,TX_PC         ; Do unit CR ?
                ACALL   TX_LED_SHOW         ; Show LED
                RET                         ; Return
; Show LED Transmit and Receive from serial
TX_LED_SHOW:    MOV     R2,#2               ; Loop 2 Times
TX_LED_LOOP:    SETB    TX_LED              ; Show LED TX
                ACALL   DELAY_10mS          ; Delay 100Ms
                CLR     TX_LED              ; Off LED TX
                DJNZ    R3,TX_LED_LOOP
                RET                         ; Return

RX_LED_SHOW:    MOV     R3,#3               ; Loop 3 Times
RX_LED_LOOP:    SETB    RX_LED              ; Show LED TX
                ACALL   DELAY_10mS          ; Delay 100Ms
                CLR     RX_LED              ; Off LED TX
                DJNZ    R3,RX_LED_LOOP
                RET                         ; Return
;*****************************************************************************************
;  Receive  byte from Serial port
;*****************************************************************************************
RX:             JNB     RI,$                ; Wait byte Received
                CLR     RI                  ; Clear Byte from SBUF
                MOV     A,SBUF              ; Get byte form SBUF
                RET                         ; Return
;*****************************************************************************************
```

รูปที่ 5.89 ตัวอย่างการส่งข้อมูลออกจากพอร์ตอนุกรม



```
PROTECT_No_fault

;*****************************************************************************************
;               Stop Relay
;*****************************************************************************************
OFF_RELAY_ACDC:     CLR     ON_RELAY                ; OFF Motor
                    LCALL   I2C_STOP
                    RET

;*****************************************************************************************
;               External Interrupt 0
;*****************************************************************************************
INTERRUPT_EX:       PUSH    ACC                     ; Push ACC  to Stack
                    PUSH    PSW                     ; Push PSW  to Stack
                    PUSH    DPL                     ; Push DPL  to Stack
                    PUSH    DPH                     ; Push DPH  to Stack

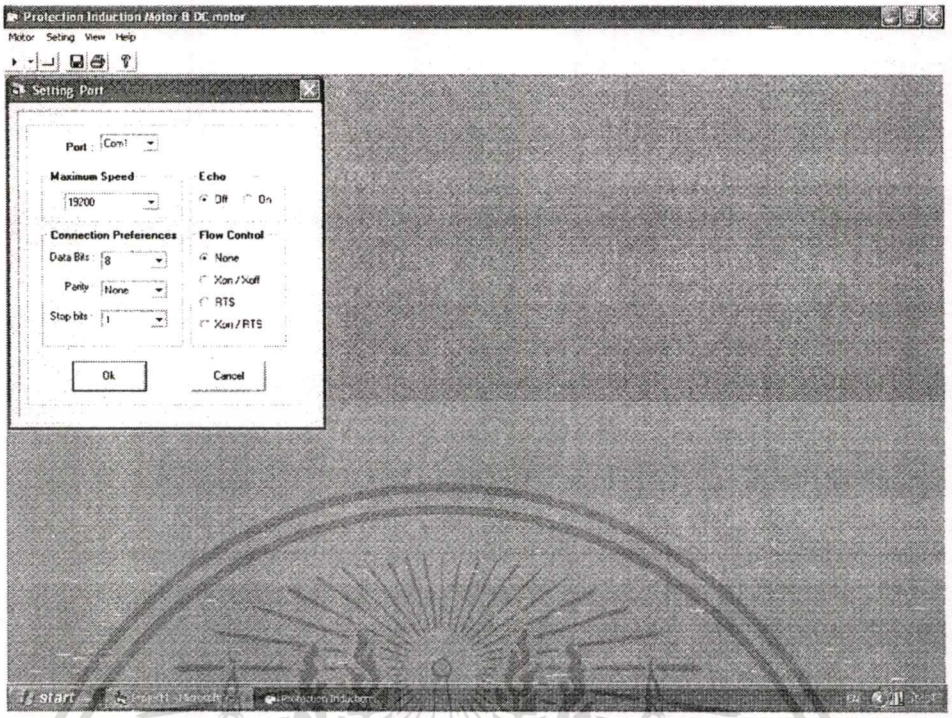
                    CLR     EX0                     ; Clear External Interrupt
                    SETB    OVER_EXINT0             ; Set bit Flag.3(Interrupt)

                ;***************************************************************
                ; Send Data Interrupt
                ;***************************************************************

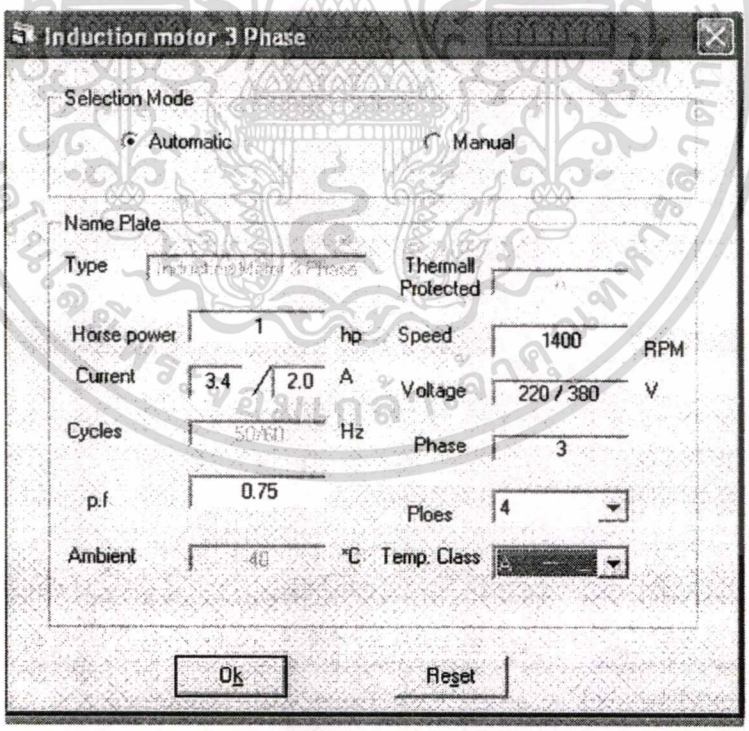

                    POP     DPH                     ; Pop DPH From Stack
                    POP     DPL                     ; Pop DPL From Stack
                    POP     PSW                     ; Pop PSW From Stack
```

รูปที่ 5.90 ตัวอย่างการส่งคำสั่งเมื่อระบบเกิดการ Trip

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

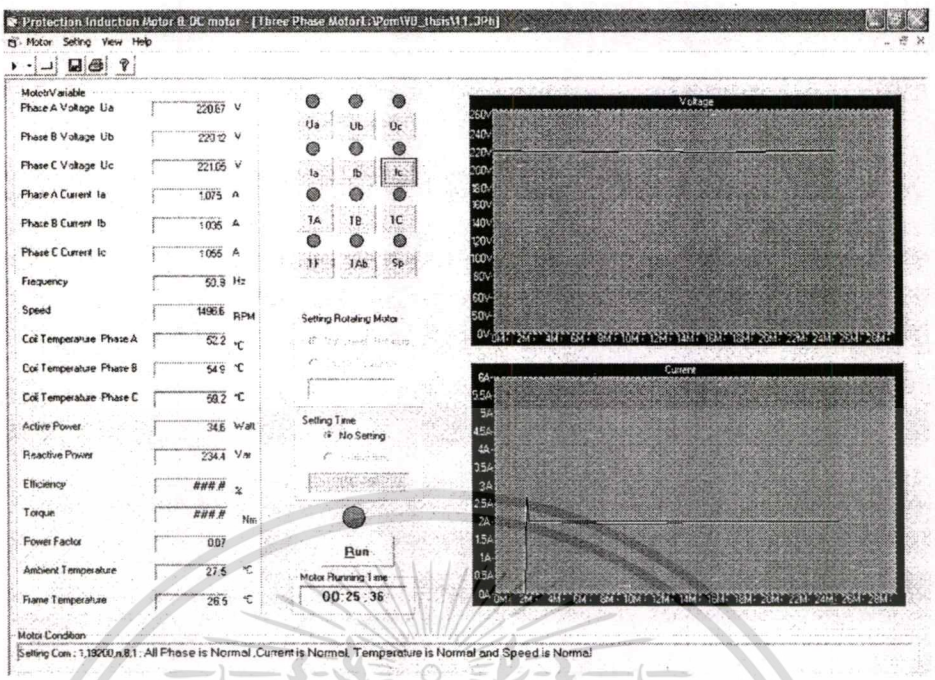


รูปที่ 5.91 หน้าต่างเลือกการติดต่อพอร์ตสื่อสาร

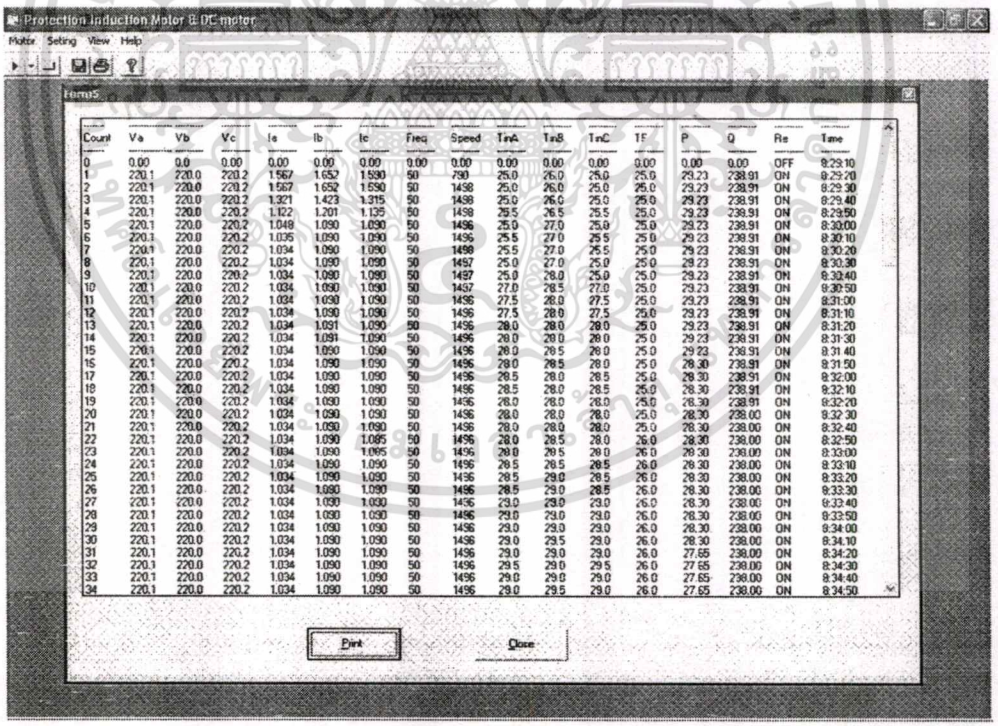


รูปที่ 5.92 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.93 หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม

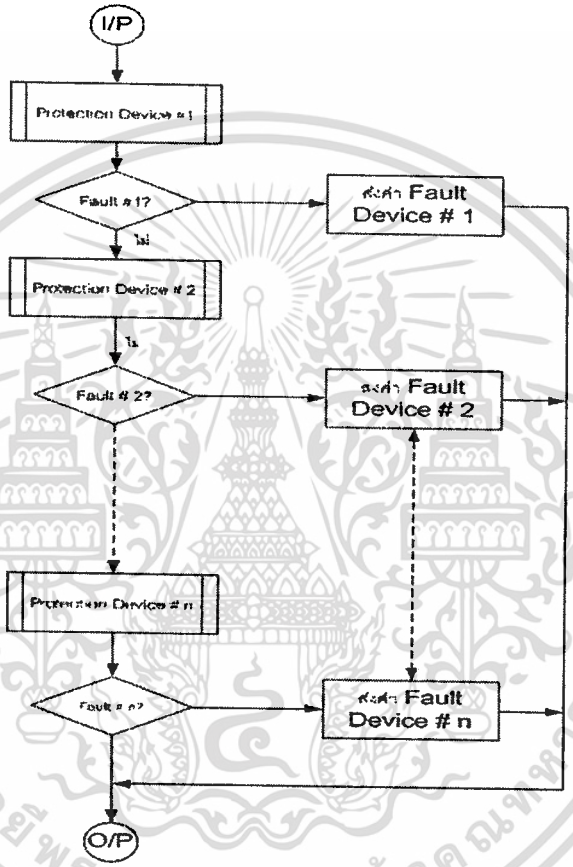


รูปที่ 5.94 หน้าต่างแสดงผลของการบันทึกข้อมูลของในเท็กซ์ไฟล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 โครงสร้างของฟังก์ชั่นระบบป้องกันมอเตอร์

โครงสร้างของฟังก์ชั่นการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่วนใหญ่เป็นการเรียกโปรแกรมย่อยหลายๆ โปรแกรมรวมกัน โดยให้ทำงานตามลำดับโปรแกรมย่อยฟังก์ชั่นการป้องกัน (Sequential of Protection Function Subroutine) ซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วยบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมย่อยแต่ละฟังก์ชั่น ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.95 โครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันหลายฟังก์ชั่น

5.4.2.1 โครงสร้างของฟังก์ชั่นป้องกันแรงดันสูง-ต่ำ (Over/Under Voltage)

หลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันสภาวะแรงดันสูง-ต่ำ กำหนดเป็นขั้นตอนการทำงานได้ โดยพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน เช่น ค่าRMS, ค่าเฉลี่ย หรือ ค่ายอด เป็นต้น ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง ค่าของระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น และลดต่ำลงจากค่าปกติ ทั้งสองกรณีแสดงได้ดังสมการที่ 5.31[41], [45], [46] โดยพิจารณาเครื่องหมายบวก หรือ ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

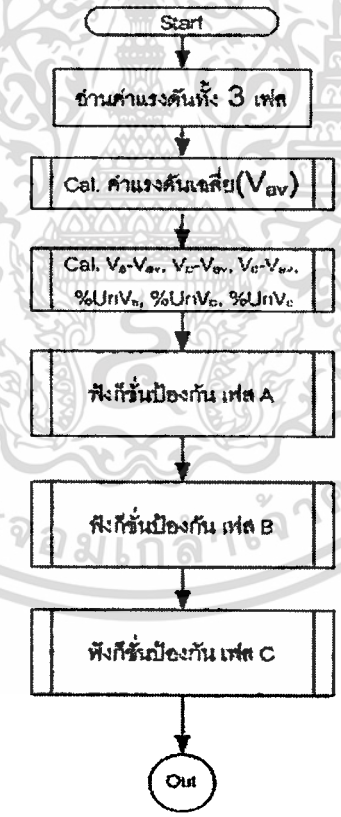
$$\%PVUR = \frac{Max\left\{\left|V_a - V_{avg}\right|, \left|V_b - V_{avg}\right|, \left|V_c - V_{avg}\right|\right\}}{V_{avg}} \times 100 \quad (5.31)$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (5.32)$$

เมื่อ %PVUR = Percentage phase voltage unbalance

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

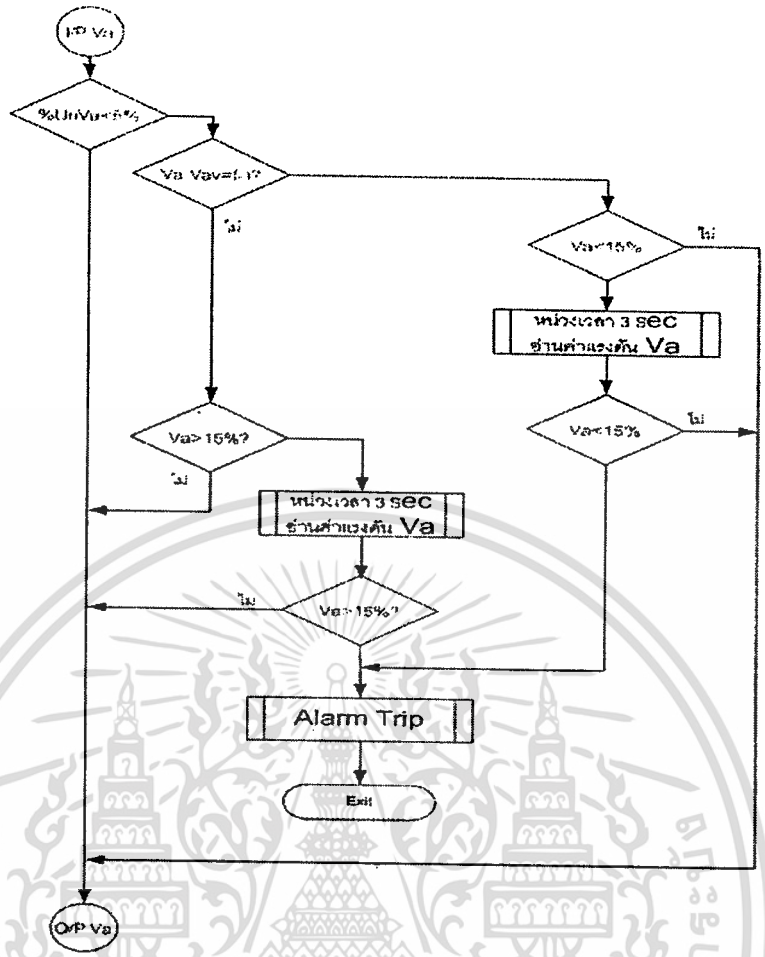
จากสมการที่ 5.31 เป็นการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่เป็นแรงดันระหว่าง Line กับ Neutral นำมาเขียนเป็นโฟล์วชาร์ทการทำงานของฟังก์ชั่นการป้องกันแรงดันสูงเกินและแรงดันต่ำเกิน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.96 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันแรงดันสูงและต่ำกว่าปกติ

จากโฟล์วชาร์ท นำมาเขียนโครงสร้างของระบบป้องกันแรงดันสูงและแรงดันต่ำ โดยแยกออกเป็นการป้องกันเฟสA, เฟส B และเฟส C มีหลักการทำงานเหมือนกัน ดังโฟลว์ชาร์ท ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.97 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันแรงดันเฟส A, เฟส B และเฟส C

5.4.2.2 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง

การขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไหลวนในโรเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนมากกว่าปกติ เพราะฉะนั้น ต้องมีการป้องกันการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกวิธีการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ ซึ่งเขียนโฟล์วชาร์ท ได้ดังรูปที่ 5.98 ส่วนกระแสไม่สมดุลใช้สมการเดียวกับสมการของแรงดันไม่สมดุล โดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 5.33 [3], [42], [43], [44],[45], [46]

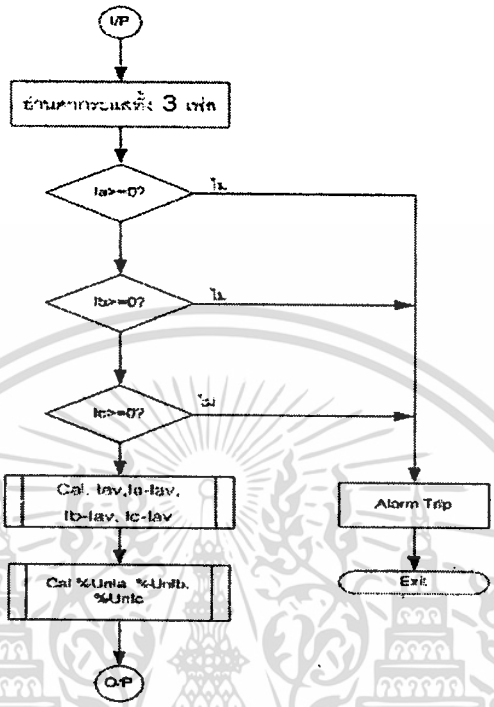
$$\%PIUR = \frac{Max\left\{\left|I_a - I_{avg}\right|, \left|I_b - I_{avg}\right|, \left|I_c - I_{avg}\right|\right\}}{I_{avg}} \times 100 \qquad (5.33)$$

$$I_{avg} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \qquad (5.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ %PVUR = Percentage phase Current unbalance

I_{avg} = กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 5.98 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง

5.4.2.3 โครงสร้างของฟังก์ชั่นการป้องกันการติดขัดของโหลดทางกล (Load Jam) [3], [5], [42], [43], [44]

ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำขับโหลดทางกล ในบางกรณี อาจมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกล ในขณะที่มอเตอร์นั้นเดินเครื่องอยู่ หรือ อาจมีการปลดโหลดทางกลออกอย่างกะทันหัน หรือ มีการเพิ่มโหลดเข้าไปอย่างทันที กรณีเหล่านี้เรียกว่า Load-Jam ซึ่งส่งผลกระทบให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด (Pulsation Torque) และทำให้เกิดสภาพโหลดเกิน (กระแสเกิน) ในช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ถ้าสภาพดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดอุณหภูมิเกินพิกัดได้ จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพดังกล่าวโดยหลักการดังนี้

ในสภาวะโหลดต่อเนื่องปกติ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์เป็น I_N มีความเร็วรอบ N และเมื่อเกิดสภาพ Load-Jam จะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์เป็น I_M มีความเร็วรอบ N_M ภายในระยะเวลา $\Delta t = td$ ดังนั้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส คือ $$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{(I_N - I_M)}{td} \qquad (5.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบ คือ $$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{(N - N_M)}{td} \quad (5.36)$$

เมื่อ $\Delta t = td$ เป็นช่วงระยะเวลาของการเกิดสภาวะดังกล่าว แยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

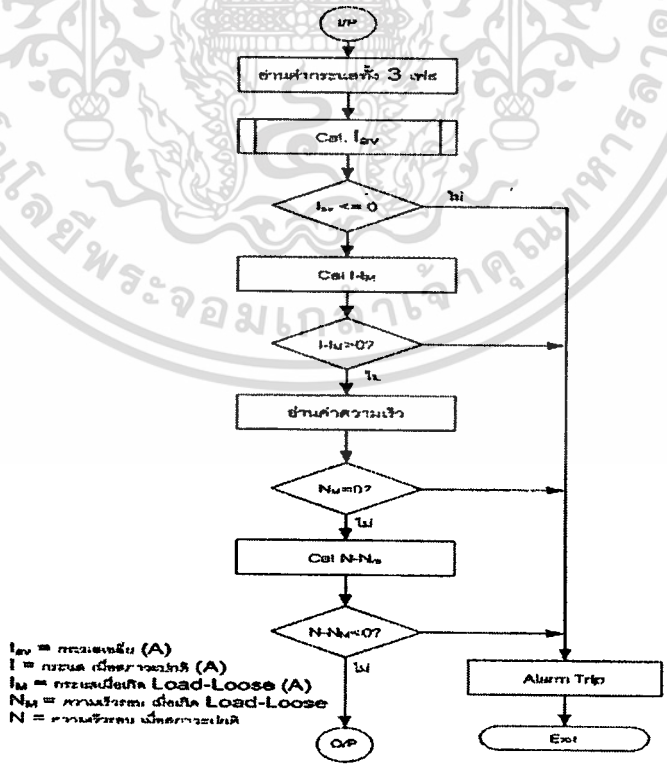
กรณีที่ 1 $\Delta t = td \gg 0$ สภาวะจะเข้าสู่สภาพการเกิดโหลดเกิน ซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจสอบสภาวะนี้ จะเป็นของฟังก์ชั่นการตรวจสอบสภาพโหลดเกิน

กรณีที่ 2 $\Delta t = td \to 0$ สภาวะนี้ เรียกว่า การเกิด Load-Jam จะทำให้เกิดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เป็นจำนวนมากทันที และเกิดความร้อน $(3I_M^2 R_s)$ เพิ่มขึ้นอย่างมากในเวลาไม่กี่วินาที ดังนั้น จากสมการที่ 5.35 และ 5.36 จะได้

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \gg 0 \qquad \text{มีค่าเป็นบวก}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \ll 0 \qquad \text{มีค่าเป็นลบ}$$

เมื่อเทียบค่ากระแสปกติ (I-nominal) และความเร็วรอบที่โหลดปกติ (N) นำเขียนโปรแกรมฟังก์ชั่นโหลดติดขัด ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.99 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันโหลดติดขัด

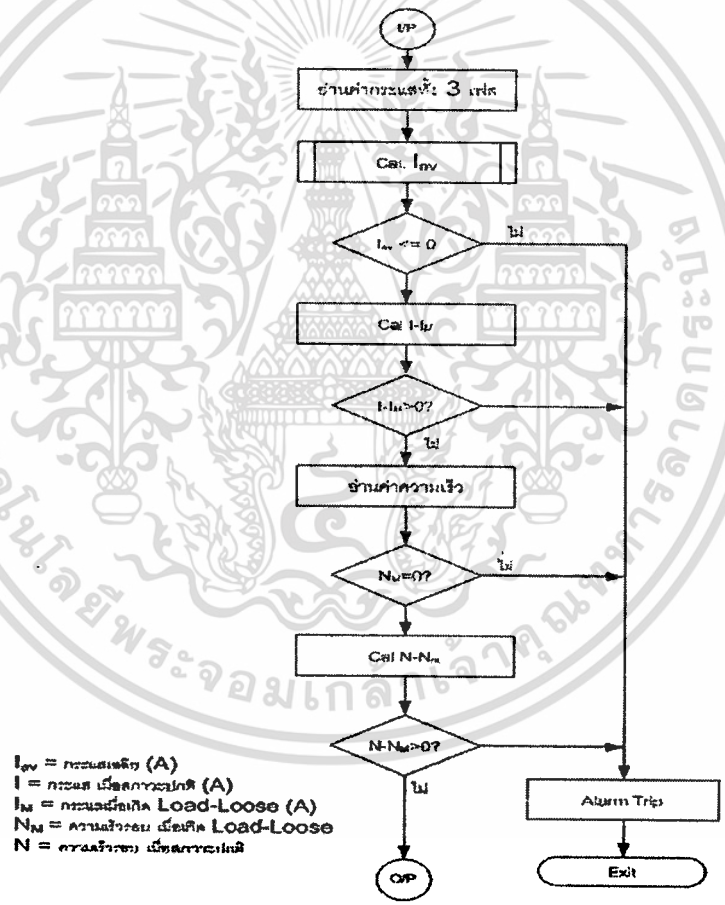
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.4 **โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการหายไปของโหลดทางกล**(Load– Looses) [3], [5], [42], [43],

เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นตรงกันข้ามกับสภาวะการติดขัดของโหลดทางกล โดยมีการทำงานเช่นเดียวกับโครงสร้างฟังก์ชั่นการป้องกันโหลดติดขัดซึ่งมีโครงสร้างดังรูปต่อไปนี้

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \ll 0 \qquad \text{มีค่าเป็นลบ}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \gg 0 \qquad \text{มีค่าเป็นบวก}$$

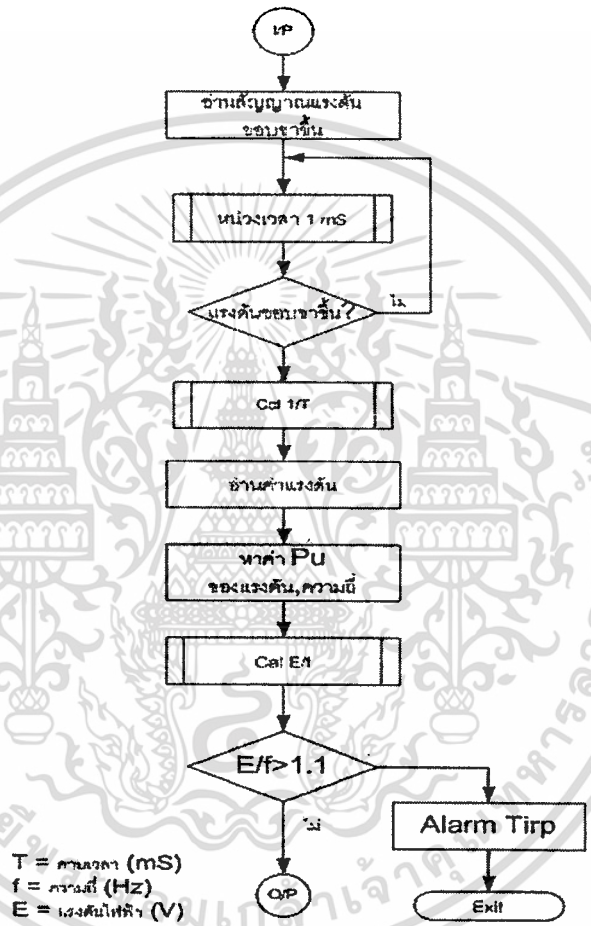


รูปที่ 5.100 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการหายไปของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.5 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันความถี่ต่ำ-สูงเกิน (Under/Over Frequency)

การที่ความถี่มีการเปลี่ยนแปลง มีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ และทำให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ต่ำลงกว่าปกติที่ใช้งานที่โหลดเดียวกัน จากสมการที่ 2.5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ ซึ่งปกติมักไม่ยอมให้ทำงานเมื่อมีอัตราส่วน E/f มีค่าเกิน1.1 ซึ่งมีโครงสร้าง ได้ดังรูปต่อไปนี้

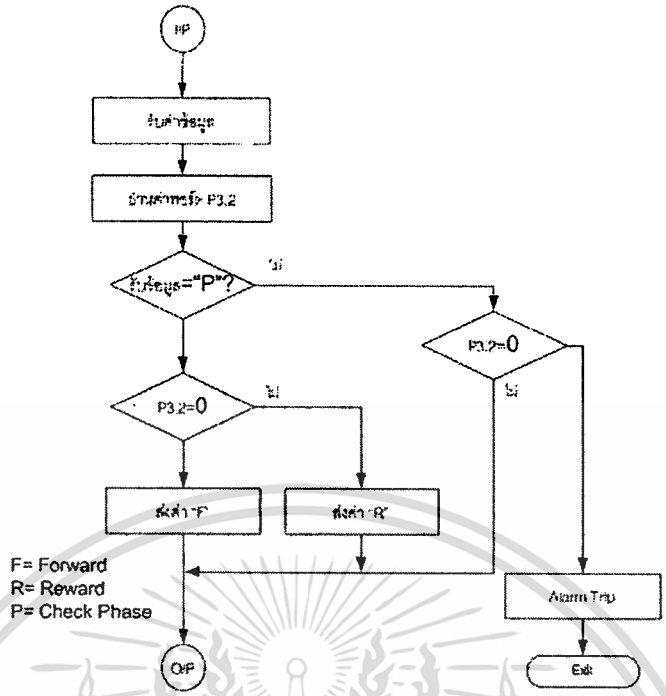


รูปที่ 5.101 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันความถี่ต่ำและสูงเกิน

5.4.2.6 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องการสลับเฟส (Phase-Sequence)

จากรูปที่ 5.103 เป็นหลักการป้องกันการสลับเฟส ซึ่งเป็นการตอบสนองแบบทันทีทันใด จะตรวจลำดับเฟส หรือ ไม่ตรวจสอบก็ได้ โดยถ้าข้อมูลที่รับเข้ามาเป็น "P" จะทำการตรวจสอบลำดับเฟส แต่ถ้าไม่เท่ากับ "P" จะทำการตรวจสอบลำดับเฟสแต่เป็นการตรวจสอบลำดับการหมุนของมอเตอร์แทนพอร์ต P3.2 มีค่าเป็น "High (Forward)" ลำดับเฟสเป็น ABC ถ้าพอร์ต P3.2 มีค่าเป็น "Low (Reward)" ลำดับเฟสเป็น ACB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.102 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันสลับเฟส

5.4.2.7 โครงสร้างของฟังก์ชันป้องกันโหลดเกิน (Overload)

โครงสร้างการป้องกันโหลดเกิน ได้นำวิธีการจำลองการสะสมของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ ตามหลักการวัดค่าของกระแสมอเตอร์ที่ไหลผ่านตัวฮอลล์เอฟเฟกต์ คำนวณเป็นหน่วยของค่าพลังงานความร้อนสูญเสียภายในขดลวดสเตเตอร์ [5]

จากทฤษฎีการเพิ่มและลดอุณหภูมิในสสารจากสมการที่ 3.30 พิจารณาเฉพาะเทอมแรกที่แสดงการเพิ่มอุณหภูมิของสสาร ซึ่งหมายถึง มอเตอร์เหนี่ยวนำที่กำลังพิจารณาดังนี้

$$T_h(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m}) \tag{5.37}$$

ในการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมนั้น ใช้วิธีการประมาณค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์ขับโหลดทางกลต่าง ๆ กัน ซึ่งหมายถึง การเพิ่มอุณหภูมิจะแปรตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ดังนั้นต้องเปลี่ยนความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5.37 ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ดังนี้

- กำหนดให้กระแสมอเตอร์ที่พิกัด 100% คือ I_n อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (Steady State Temperature) เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องคือ T_{ho}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้กระแสมอเตอร์ที่โหลดใด ๆ (โหลดเกิน 100%) คือ I_M อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง คือ T_{hn}
- แทนค่า $T_{fin} = P/A\lambda$ เมื่อ $P = 3I_M^2 R_s$ ดังนั้น

$$T_{ho}(t) = \frac{3I_n^2 R_s}{A\lambda}\left(1 - e^{-t/\tau_m}\right) \tag{5.38}$$

และ

$$T_{hn}(t) = \frac{3I_M^2 R_s}{A\lambda}\left(1 - e^{-t/\tau_m}\right) \tag{5.39}$$

นำสมการที่ 5.39/5.38 จะได้

$$T_{hn}(t) = \left(\frac{I_M}{I_n}\right)^2 T_{ho}(t) \tag{5.40}$$

หรือ

$$T_{hn} = \left(\frac{I_M}{I_n}\right)^2 T_{ho} \tag{5.41}$$

จากสมการที่ 5.41 อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว เมื่อมอเตอร์ขับโหลดทางกลใด ๆ ที่เกินพิกัดจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสมอเตอร์ที่เกินพิกัดนั้น ๆ และเมื่อแปรค่ากระแส I_M ตั้งแต่ค่าพิกัด 100%ไปจนถึง 250% ของพิกัดแล้วจะได้ความสัมพันธ์ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์กับอุณหภูมิแตกต่างสูงสุด

I_M (%)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	250
Max. Diff	1.00x	1.21x	1.44x	1.69x	1.96x	2.25x	2.56x	2.89x	3.24x	4.00x	4.84x	6.25x
Temp=T_{fin}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}	T_{ho}

จากตารางสามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่า กระแสที่เกินพิกัด I_M ใด ๆ จะทำให้เกิดอุณหภูมิสภาวะคงตัวขึ้นไปได้สูงสุดเท่านั้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5.41 ถ้ามอเตอร์ที่กำลังพิจารณานั้นขับโหลดที่ 110% ได้อย่างปลอดภัยเมื่อใช้ฉนวนชนิด A และมอเตอร์ตัวเดียวกันนี้ขับโหลดที่ 120%ของพิกัดได้อย่างปลอดภัย ถ้าใช้ฉนวนชนิด E ดังนั้น

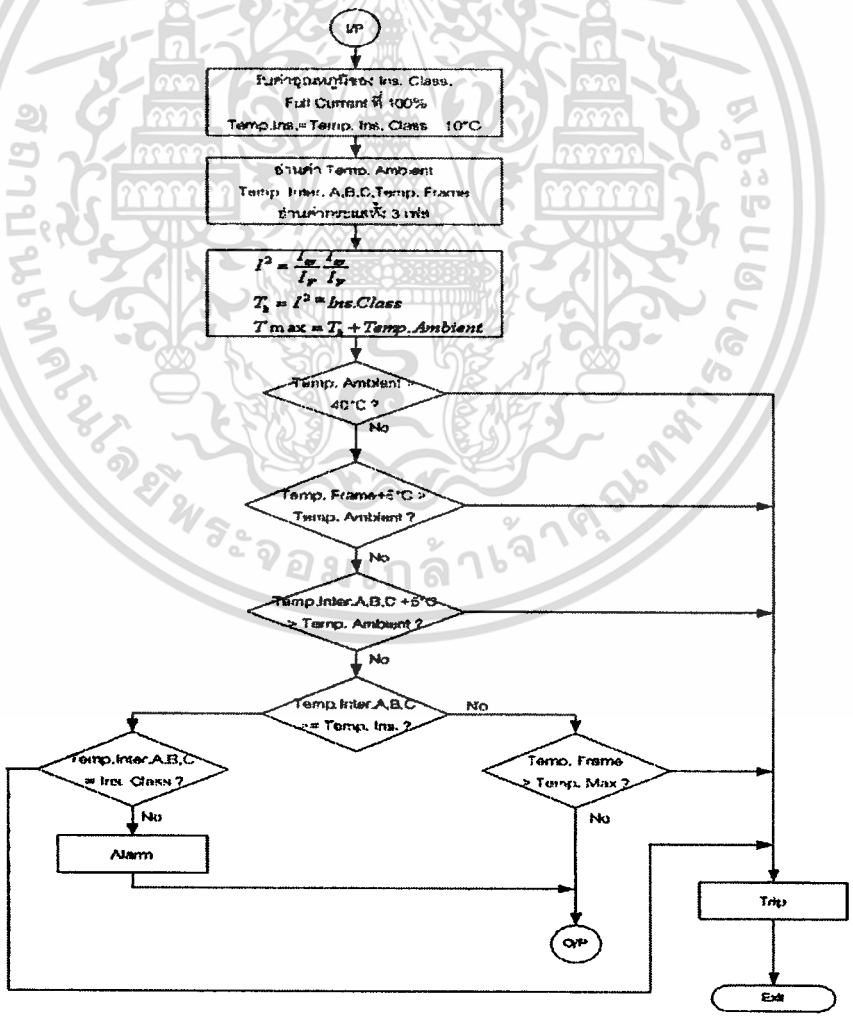
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{h1} = 1.21T_{ho} \tag{5.42}$$

และ $$T_{h2} = 1.44T_{ho} \tag{5.43}$$

ดังนั้น $$T_{ho} = 0.76(T_{h1} * T_{h2})^{1/2} \tag{5.44}$$

เมื่อแทน T_{h1} และ T_{h2} ด้วย ค่าตามมาตรฐาน IEC-Publication 85/1984 ได้ค่า $T_{ho} \cong 55^{\circ}C$ หมายถึง มอเตอร์มีอุณหภูมิที่สภาวะคงตัวสูงสุดเท่ากับ 55+40=95°C โดยประมาณ เมื่อขับโหลดที่พิกัด 100% ดังนั้น เมื่อทราบค่า T_{ho} หาอุณหภูมิที่สภาวะคงตัวสูงสุดที่แต่ละค่ากระแสมอเตอร์ I_M ได้ โดยนำค่า T_{ho} แทนลงในตารางที่ 5.8 จากหลักการดังกล่าวเขียนโครงสร้างของระบบป้องกันอุณหภูมิเกินได้ดังรูปต่อไปนี้

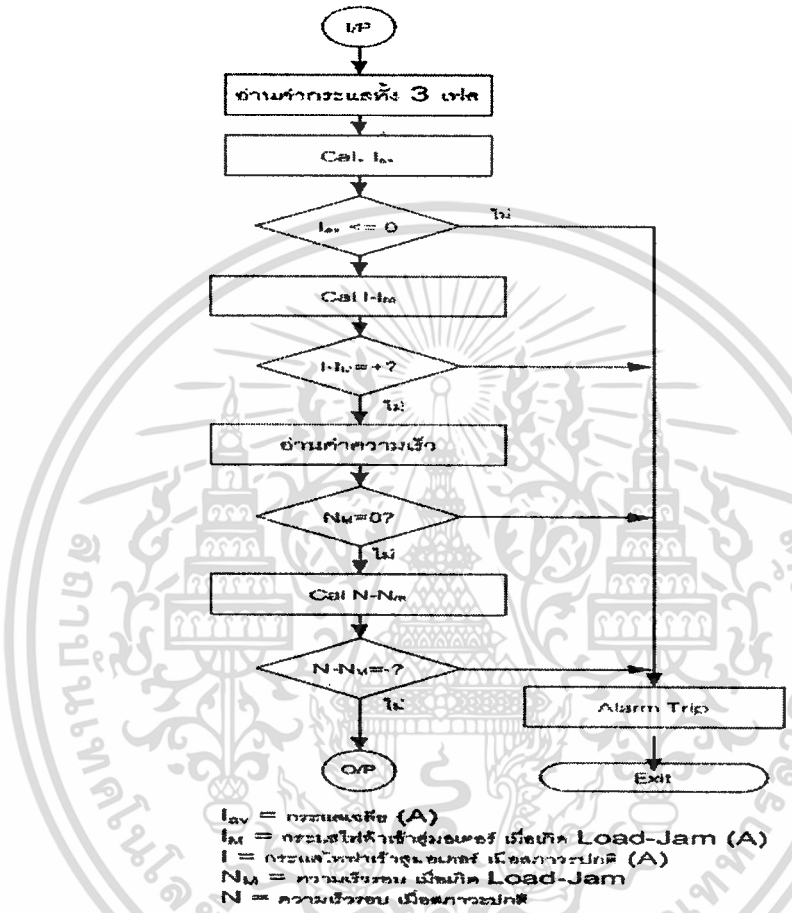


รูปที่ 5.103 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันอุณหภูมิเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.8 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการล็อคโรเตอร์ (Lock rotor)

มีหลักการคล้ายกับการป้องกันสภาวะการติดขัดของโหลดทางกล แต่จะมีความแตกต่างในส่วนของเวลา ในการเกิดเหตุการณ์ที่ยาวนานต่างกัน และใช้ตรวจสอบในช่วงการเริ่มเดินเครื่องรวมกับการตรวจสอบและความเร็วรอบ ดังรูปต่อไปนี้

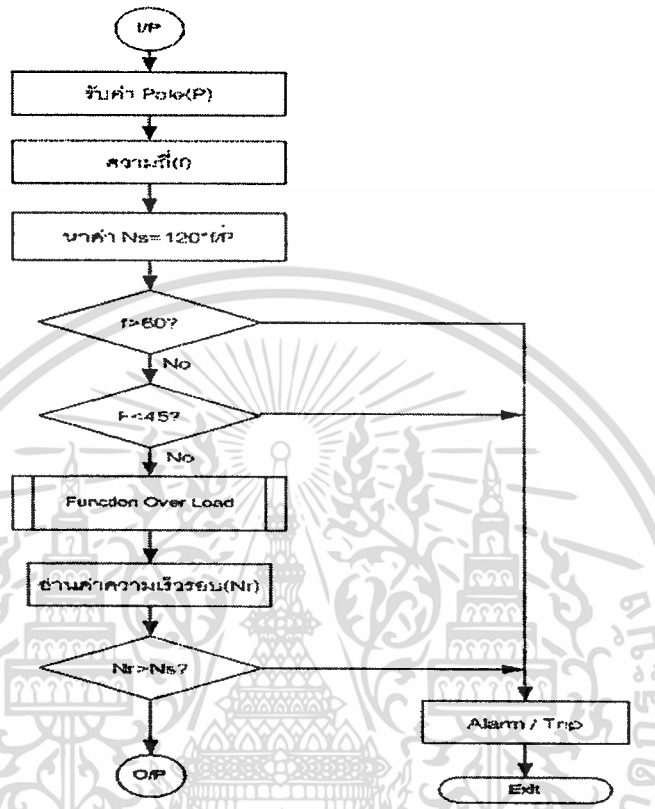


รูปที่ 5.104 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันการล็อคโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.9 **โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันความเร็วรอบสูง/ต่ำกว่าปกติ** (Over / Under - Speed)

การป้องกันความเร็วรอบสูงเกินและต่ำกว่าปกติ แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.105 โครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกันความเร็วรอบเกิน/ต่ำกว่าปกติ

5.4.2.10 **โครงสร้างการวัดพลังงานไฟฟ้า**

การวัดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ สามารถหาค่าของพลังงานได้โดยมีสมการที่เกี่ยวข้อง **คือ**

$$S = V.I = P/Cos\phi \quad [VA] \tag{5.45}$$

$$P = V.I.Cos\phi \quad [W] \tag{5.46}$$

$$Q = V.I.Sin\phi \quad [Var] \tag{5.47}$$

จากสมการที่ 5.45 – 5.47 **ได้เฉพาะแรงดันและกระแสเป็นรูปคลื่นซายน์ ในการหาค่าของกำลังงาน ณ ขณะใด ๆ หาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา** T **นั้น ดังต่อไปนี้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} p(t)\,dt \tag{5.48}$$

จากสมการ เมื่อกำหนดช่วงเวลาที่นานพอ ก็จะหาค่าเฉลี่ย P ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น ส่วนพลังงานจะหาได้จาก งาน X เวลา ดังนี้

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t)\,dt \tag{5.49}$$

จากสมการที่ 5.49 แปลงสมการมาอยู่ในรูปของผลรวมได้ ดังสมการที่ 5.50 เพื่อนำไปใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

$$W = \sum_{k=1}^{n} p(t_k)\Delta t = \sum_{k=1}^{n} u(t_k).i(t_k)\Delta t \tag{5.50}$$

เมื่อ n = อัตราการสุ่ม

Δt = ช่วงเวลาการสุ่ม

$u(t_k)$ = แรงดันไฟฟ้า rms ณ เวลาที่สุ่ม

$i(t_k)$ = กระแสไฟฟ้า rms ณ เวลาที่สุ่ม

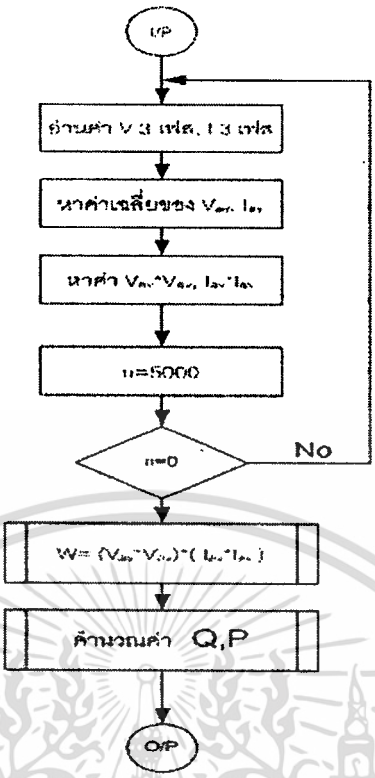
ในการคำนวณหาค่า Rms ของแรงดันและกระแส หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$U_{rms} = \left[\Delta t \sum_{k=1}^{n} u^2(t_k)\right]^{1/2} \tag{5.51}$$

$$I_{rms} = \left[\Delta t \sum_{k=1}^{n} i^2(t_k)\right]^{1/2} \tag{5.52}$$

จากสมการที่ 5.50 – 5.52 นำมาเขียนเป็นโฟลว์ทชาร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.106 โครงสร้างการวัดพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการทดลอง

6.1 บทนำ

จากโครงสร้างฟังก์ชั่นป้องกัน นำมาเขียนโปรแกรมควบคุมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาเครื่อง (MCS-51 Assembly Language) แล้วทำการแปลเป็นรหัสคำสั่ง (Machine Code) โดยใช้โปรแกรมแปลงคำสั่ง (Systronix RAD51) ทำให้ได้ชุดคำสั่งภาษา เครื่องเป็นเลขฐาน16 (Object Code) จากนั้น นำไปบันทึกลงในหน่วยความจำถาวรชนิด EPROM ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ได้นำชุดคำสั่งนี้ไปประมวลผลต่อไป ส่วนของบอร์ดที่ใช้ควบคุมเป็นบอร์ดสำเร็จรูปที่มีอุปกรณ์ชิพสนับสนุนการทำงานหลายชนิดในบอร์ด เช่น พอร์ตขนาน (8255-PPI) หน่วยความจำชั่วคราวที่อ่านเขียนได้ (RAM) แสดงได้ในรูปที่ 6.1ส่วนอุปกรณ์การแปลงสัญญาณจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC/DAC)นั้น โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ PCF8591 มีการประมวลผลสัญญาณบนระบบบัส I^2C ที่ใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ในส่วนของการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งานเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Bais6 การแสดงผลเป็นกราฟ และตัวเลขดังรูปที่ 6.7

สำหรับการทดลองที่ใช้ทดสอบระบบป้องกันมอเตอร์ได้ออกแบบสร้างขึ้นนั้น มีการต่อวงจรที่ใช้ทดลองดังรูปที่ 6.8 โดยการทดลองใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ 1 แรงม้า และDC Motor โดยมีคุณสมบัติดังนี้

MITSUBISHI Electric [Super Line Three Induction Motor]

1HP	4Poles	Type	SF-JR
HERTZ	50	FRAME	80m
Volts	220/380	RATING	CONT.
AMP	3.4/2.0	Insulation Class	B
RPM	1400	AMB.TEMP.	$40^{\circ}C$
JIS	C 4004	BEARING	6204-6203 zz
JP	44 JC4		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Motor NIKXI Power PACK

Output	1.5kW	Volts	130V
AMP.	15A	RPM	1800
Fid. Volts	180V	Duty	CONT.
WOUND	SHUNT	TYPE	KC-150

หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1HP โดยให้มอเตอร์ทำงานนานเกิน 3 ชม เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่แน่นอน มีค่าในการทดสอบดังต่อไปนี้

ความต้านทานของขดลวด

U-X=14.1 Ω V-Y=13.6 Ω W-Z=13.7 Ω

No-load test

Va=222.3V	Ia=1.064A	Pa=24.1W	Qa=239.9Var	Sa=253.0VA	P.F.a=0.18
Vb=224.3V	Ib=1.060A	Pb=23.1W	Qb=238.9Var	Sb=253.7VA	P.F.b=0.19
Vc=221.3V	Ic=1.057A	Pc=24.2W	Qc=239.8Var	Sc=253.9VA	P.F.c=0.17

Block - Rotor

Va=54.9V	Ia=2.01A	Pa=75.1W	Qa=75.7Var	Sa=106.6VA	P.Fa=0.72
Vb=53.6V	Ib=2.03A	Pb=74.2W	Qb=74.6Var	Sb=105.7VA	P.Fb=0.71
Vc=50.8V	Ic=2.01A	Pc=75.2W	Qc=75.1Var	Sc=105.9VA	P.Fc=0.71

VI-Method

Vdc	4.96	9.5	15.62	21.3
Idc	0.5	1.0	1.5	2.0

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของมอเตอร์ 1HP ดังต่อไปนี้

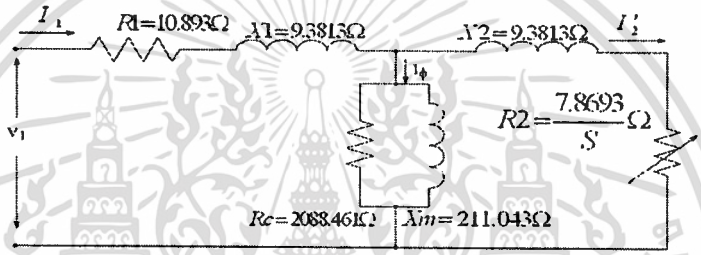
Rc=2088.461 Ω

Xm=211.043 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R1=10.893Ω ซึ่งไม่รวมค่าของ Skin Effect [9] ที่เกิด เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้ารวมค่าของ Skin Effect เข้าไปทำให้ค่าความต้านทาน R1มีค่าเพิ่มประมาณ1.34 เท่าของความต้านทานที่คำนวณได้ณความถี่ 20 kHz โดยค่าความต้านทาน R1=1.34*10.8933=14.597Ω, R2=7.8693Ω เมื่อรวมค่าของ Skin Effect เข้าไปจะได้ R2=10.544862Ω

การหาค่า X1 และ X2 สามารถแยกค่าทั้ง 2 ได้ตามมาตรฐาน IEEE Std 112 ได้จาก ตารางที่ 2.1 [9] โดยมอเตอร์ที่ใช้ทดลองเป็นมอเตอร์คลาส A ซึ่งค่า X1 และ X2 มีค่าประมาณ 0.5 เท่าของค่าReactance ของมอเตอร์ที่คำนวณได้ ดังนั้นX1=0.5*18.7626=9.381Ω และ X2=0.5*18.7626=9.3813Ω และนำค่าพารามิเตอร์ไปใส่ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6.1

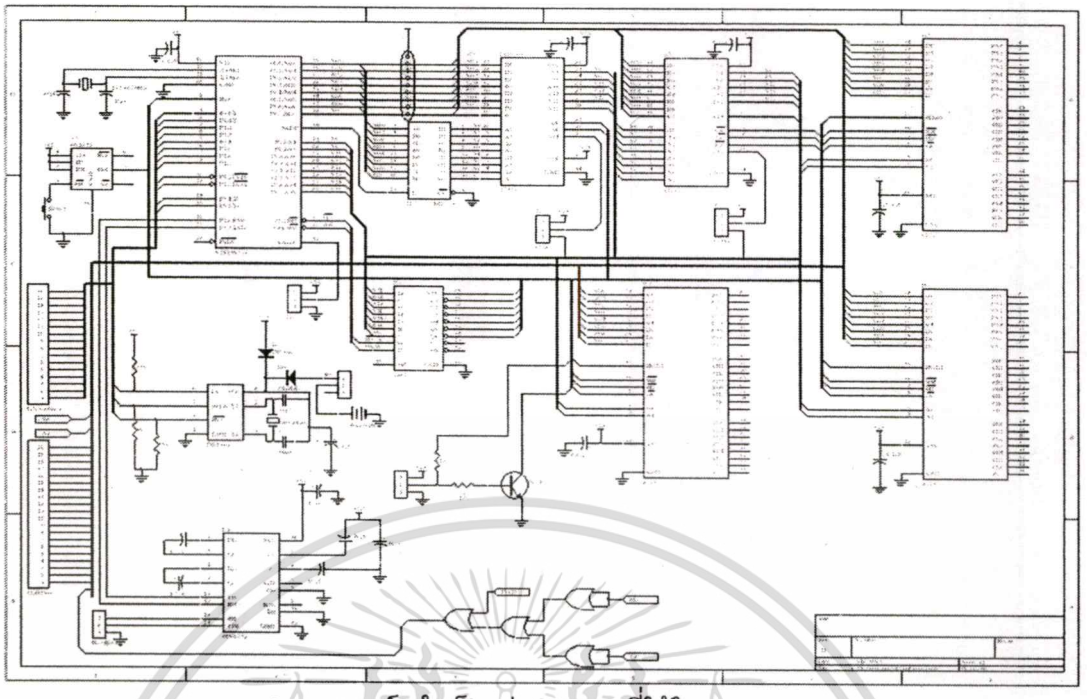


รูปที่ 6.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์1HP

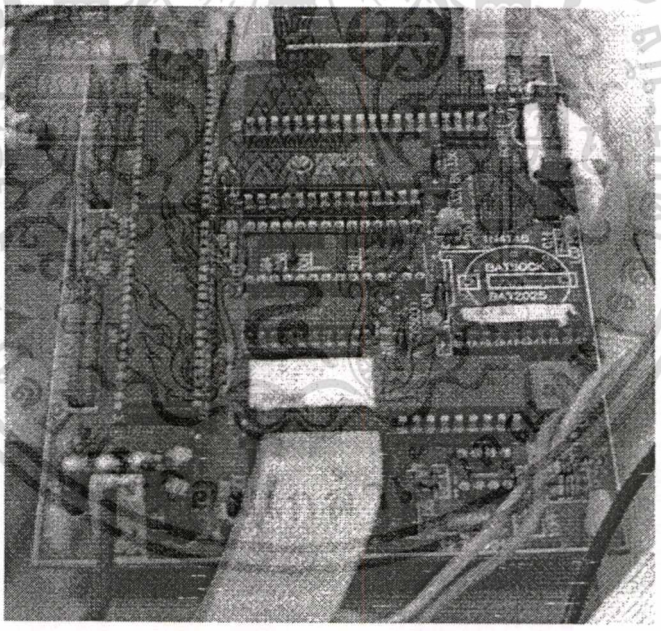
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1.	โวลต์มิเตอร์	3	เครื่อง
2.	ดีซีแอ่มป์มิเตอร์	2	เครื่อง
3.	แคลมป์มิเตอร์	1	เครื่อง
4.	เทอร์โมมิเตอร์	2	เครื่อง
5.	ทาโคมิเตอร์	1	เครื่อง
6.	เพาเวอร์มิเตอร์	3	เครื่อง
7.	ออสซิลโลสโคป	1	เครื่อง
8.	ชุดทดลองระบบป้องกัน	1	ชุด
9.	มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า,2 แรงม้า	2	เครื่อง
10.	ดีซีมอเตอร์ขนาด 1.5kW	1	เครื่อง
11.	หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าแรงดันได้ 3 เฟส	1	เครื่อง
12.	หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าแรงดันได้ 1 เฟส	2	เครื่อง
13.	แผงหลอดไฟฟ้า 100W*40 หลอด	1	ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



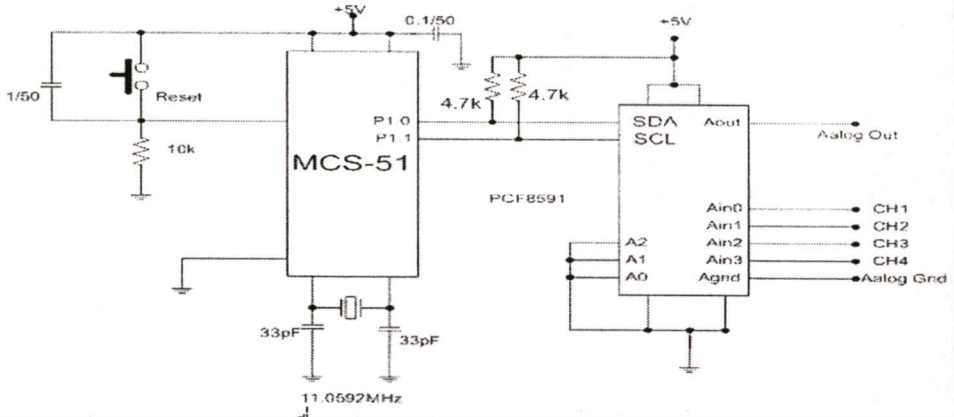
ก) วงจรบอร์ดสำเร็จรูป MCS-51ที่ใช้ในการทดลอง



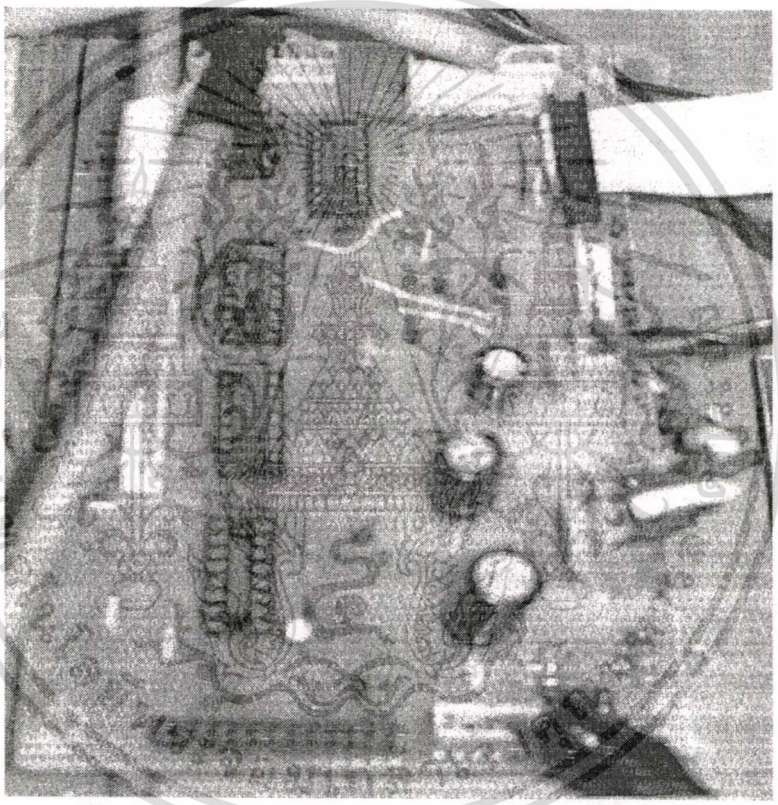
ข) วงจรสำเร็จรูปของ MCS-51

รูปที่ 6.2 บอร์ด MCS-51ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



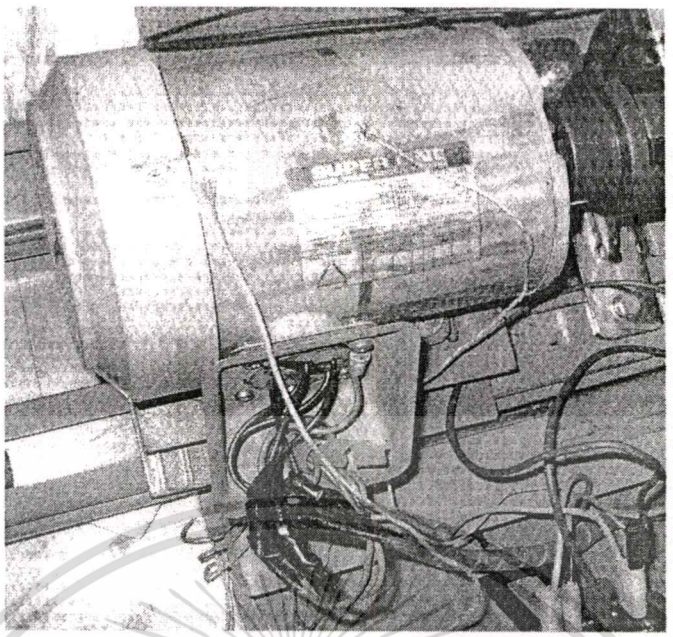
ก) การเชื่อมต่อระหว่าง PCF8591 กับ MCS-51



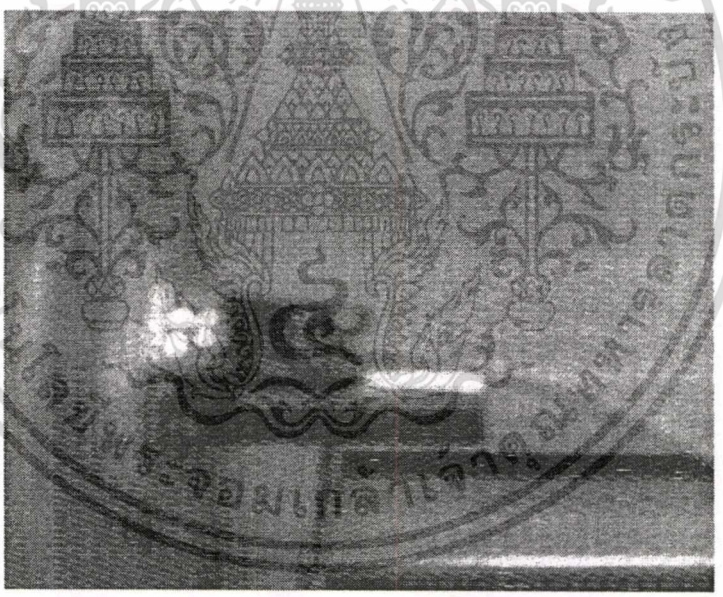
ข) การติดตั้งอุปกรณ์ไอซี PCF8591

รูปที่ 6.3 การเชื่อมต่อระหว่าง MCS-51กับ PCF8591

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

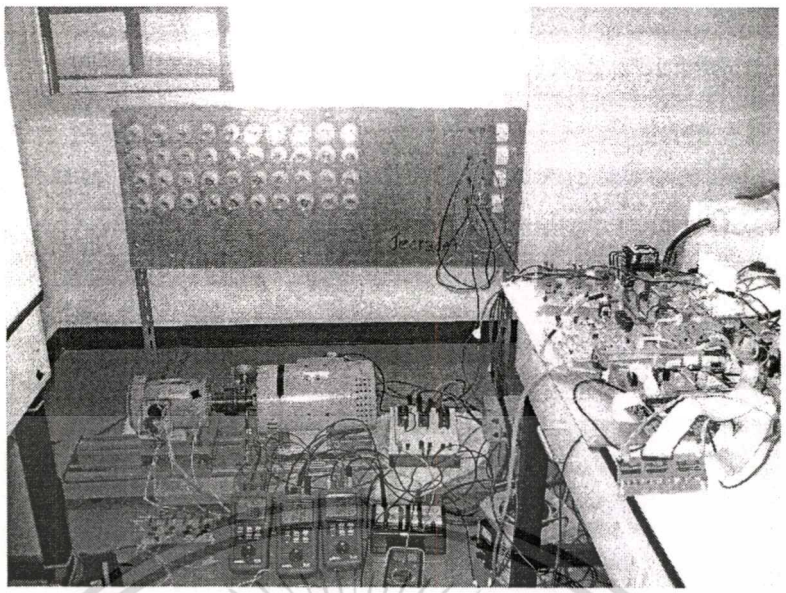


รูปที่ 6.4 การติดตั้ง Thermocouple กับ Thermistor เข้ากับมอเตอร์

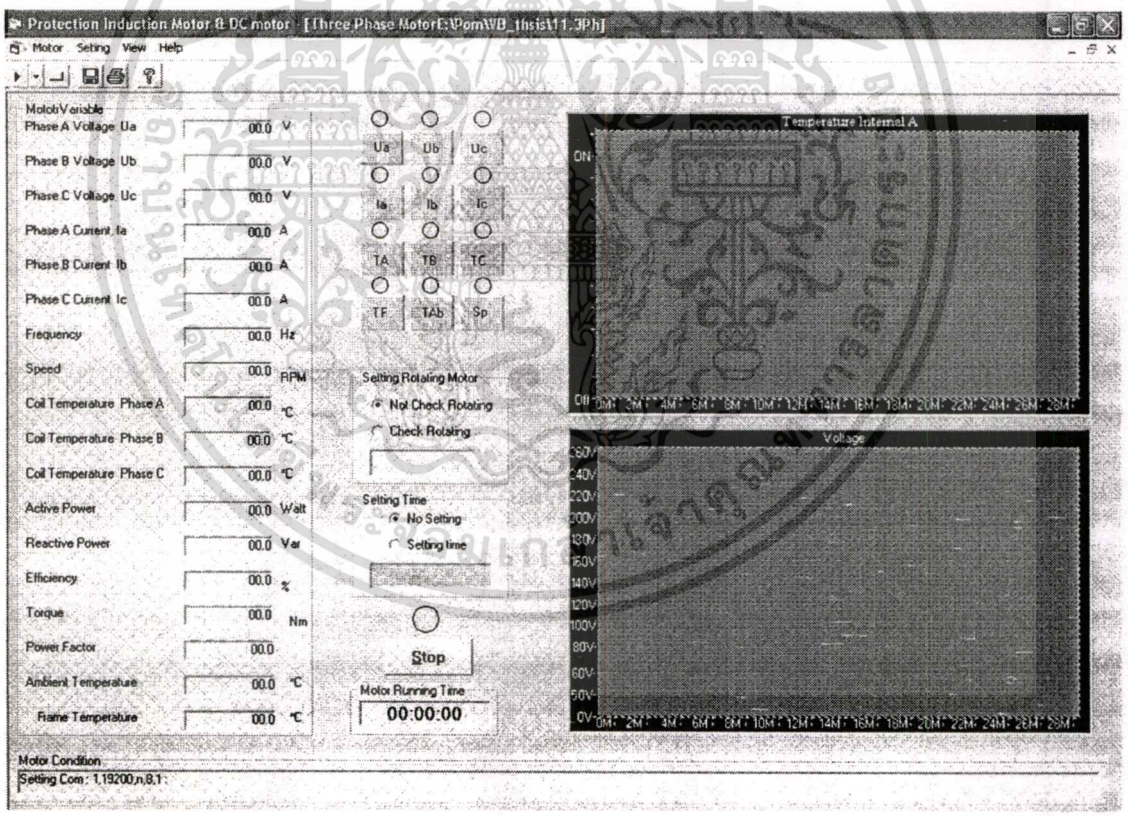


รูปที่ 6.5 การติดตั้งตัวตรวจวัดความเร็วแบบ Optical Sensors เข้ากับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

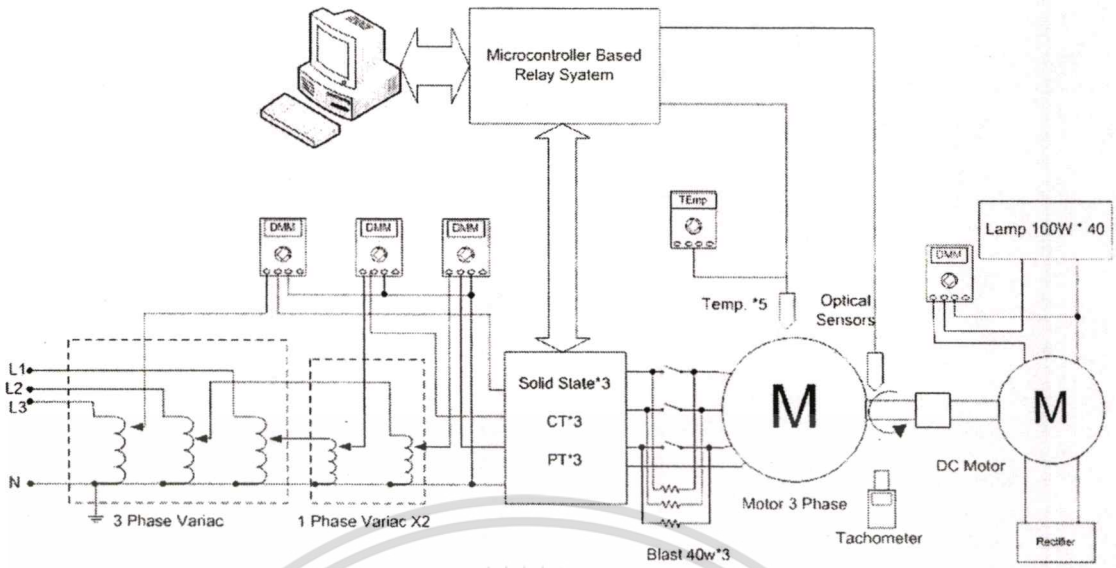


รูปที่ 6.6 การทดลองระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

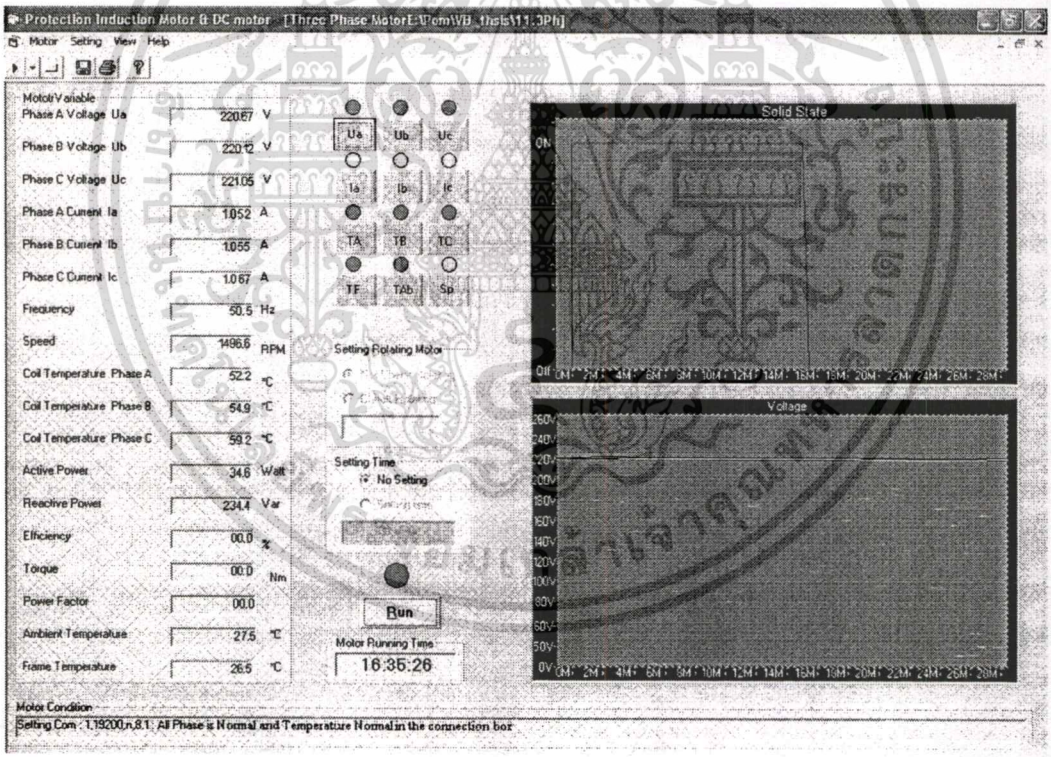


รูปที่ 6.7 จอภาพแสดงผลด้วยโปรแกรม Visual Bais6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

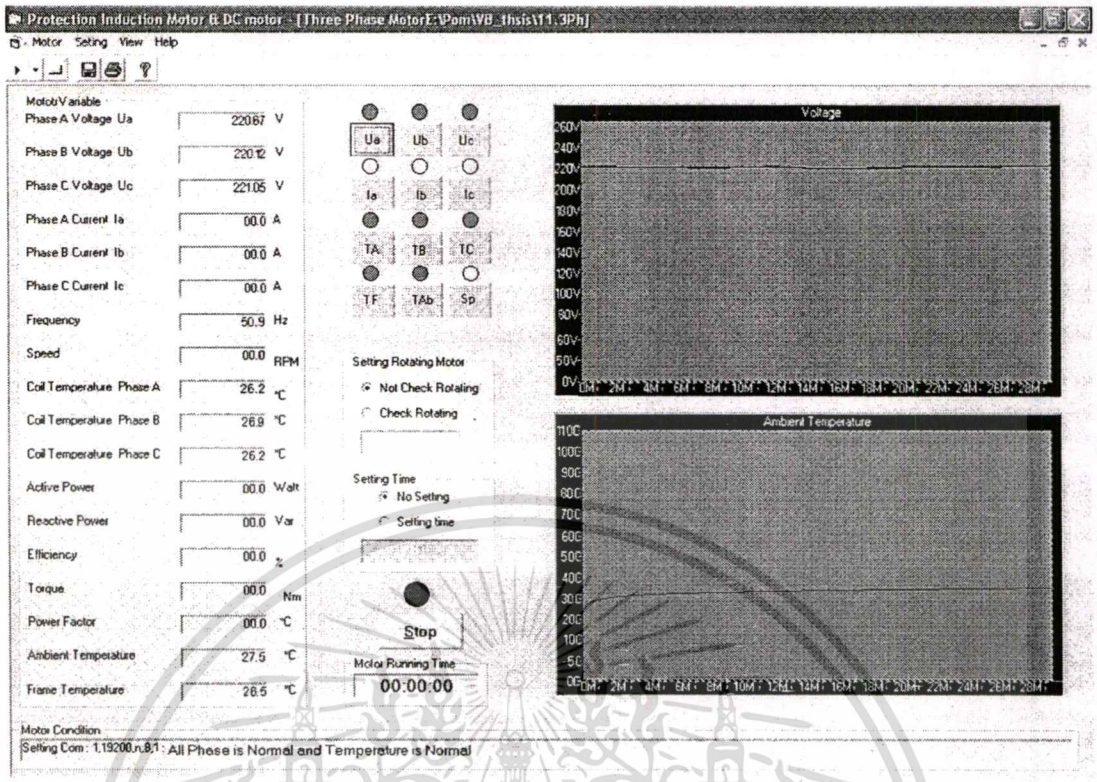


รูปที่ 6.8 การต่อวงจรที่ใช้ทดลองระบบป้องกันมอเตอร์

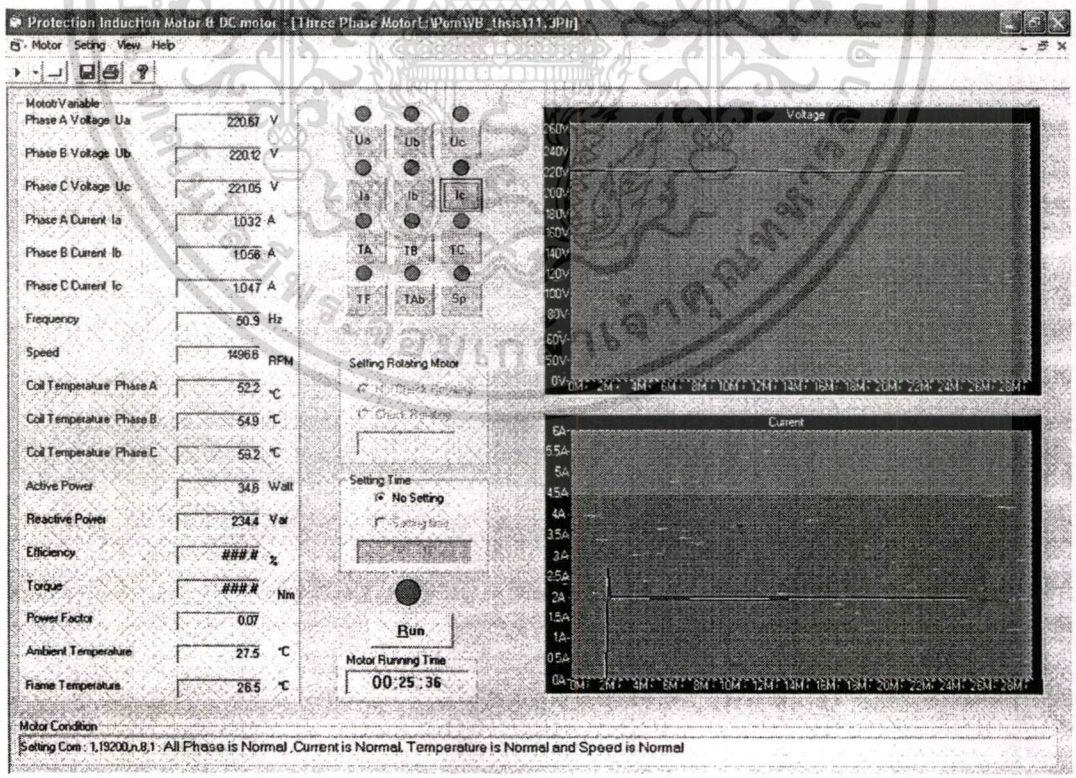


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงสภาวะการเปิด-ปิดของมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลองขณะ No Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

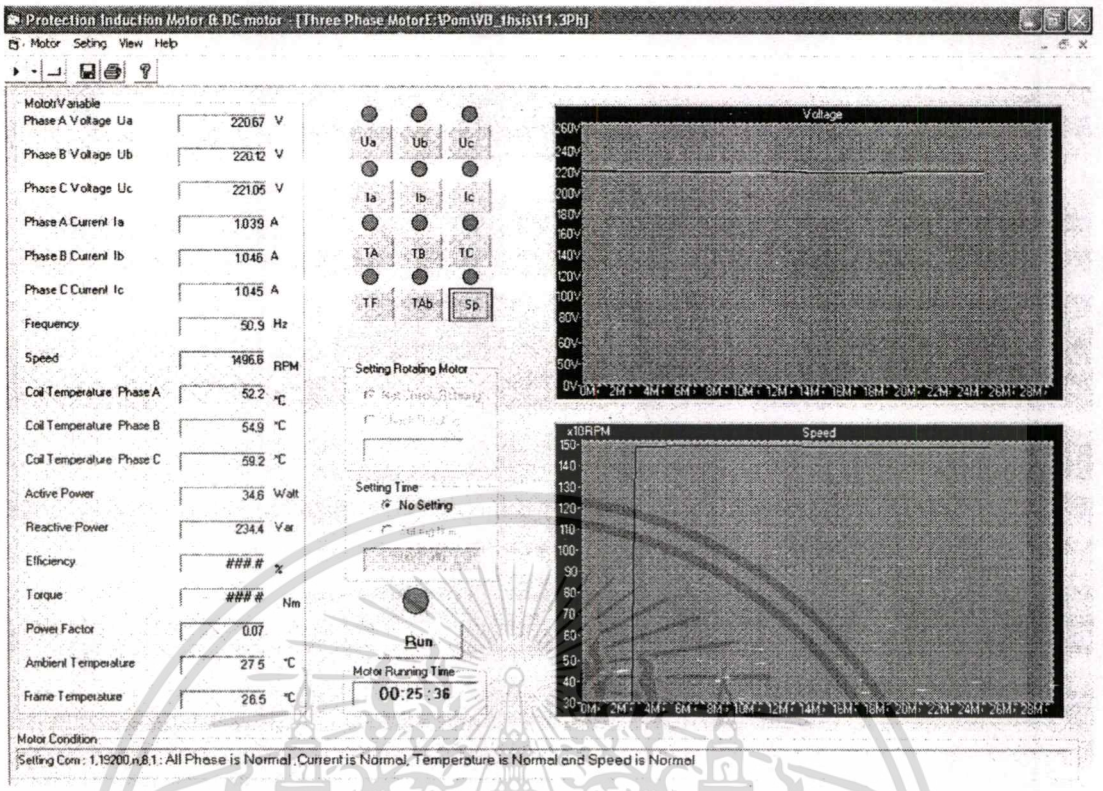


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงสภาวะแรงดันทางด้านอินพุตของมอเตอร์ ในภาวะปกติ ก่อนทำการทดลอง

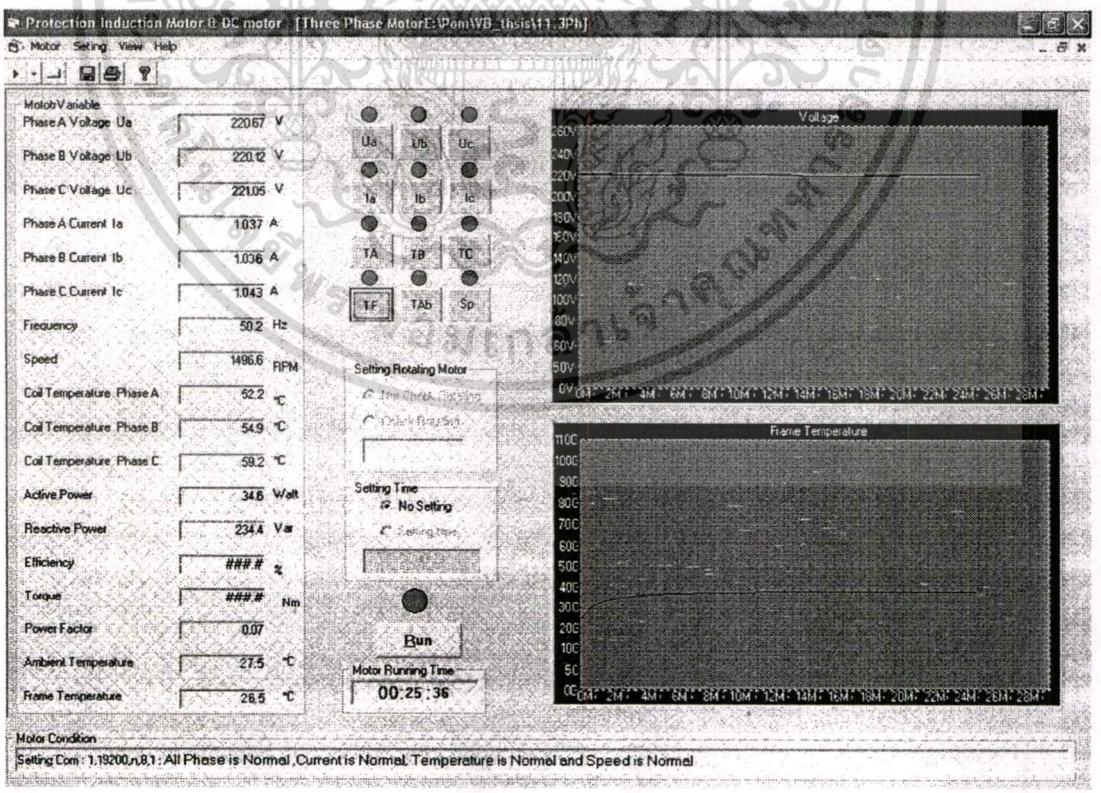


รูปที่ 6.11 กราฟสภาวะกระแสของมอเตอร์ในช่วงทดลองขณะ No Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

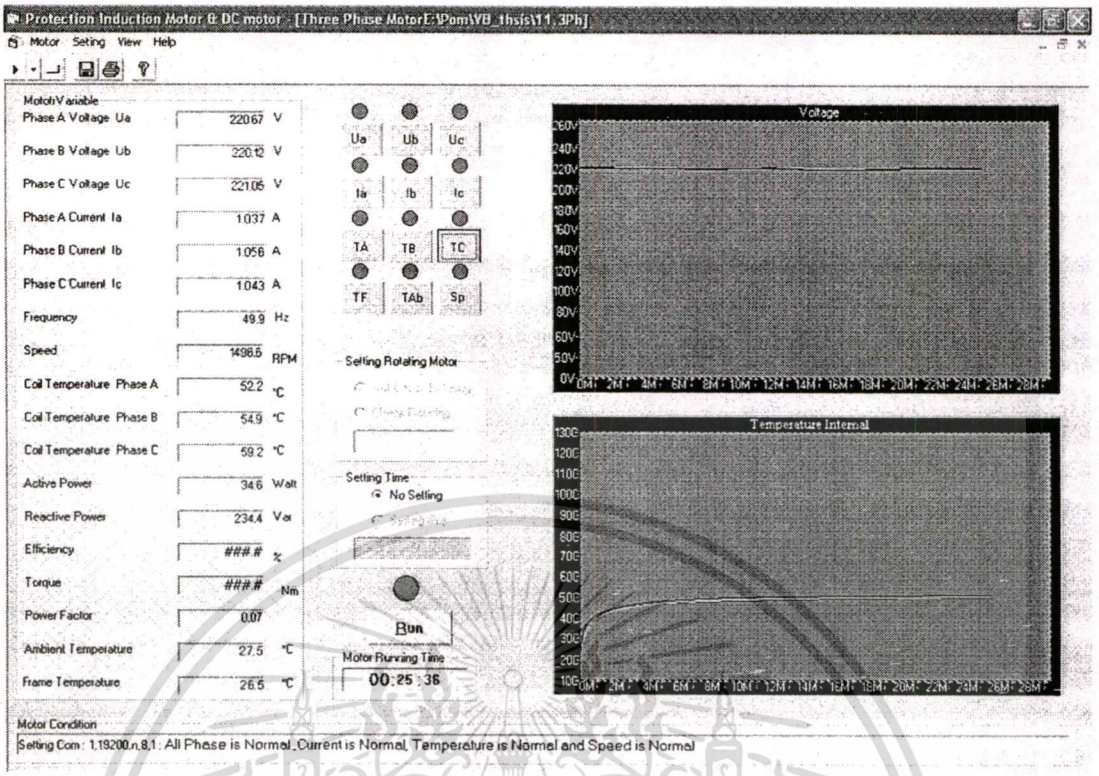


รูปที่ 6.12 กราฟความเร็วของมอเตอร์ ในช่วงทำการทดลองขณะ No Load

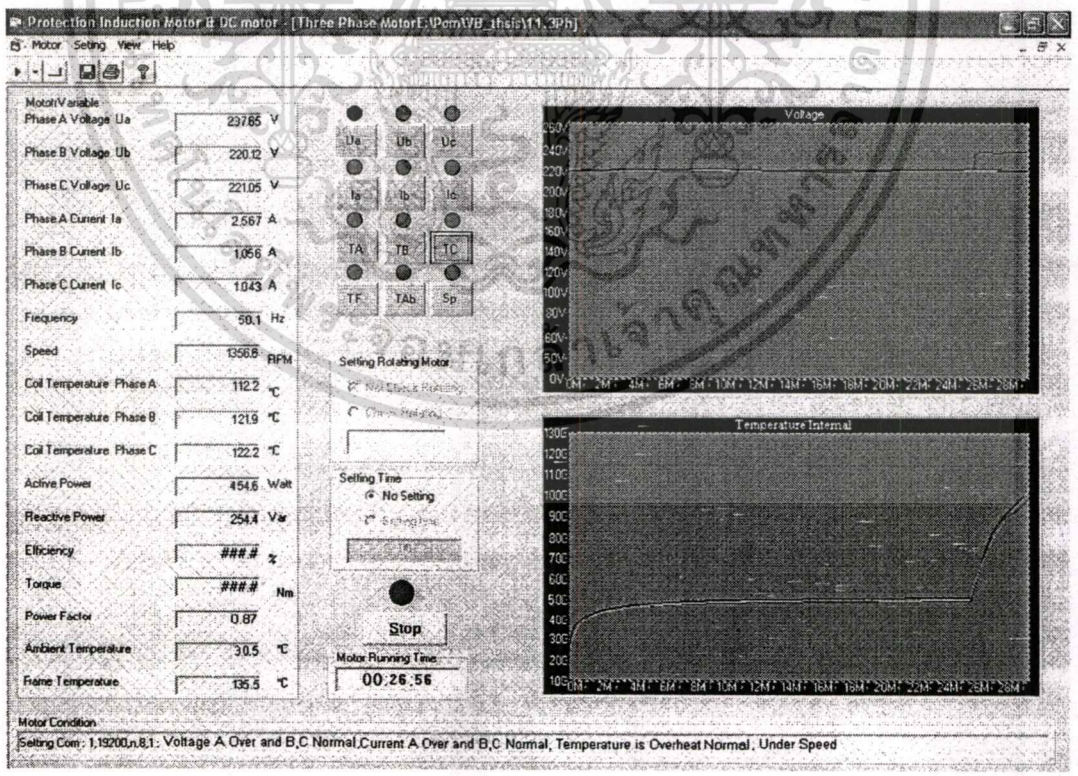


รูปที่ 6.13 กราฟแสดงสภาวะของอุณหภูมิที่ผิวมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลองขณะ No Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงสภาวะทางอุณหภูมิภายในของมอเตอร์ ในช่วงที่ทำการทดลอง No Load



รูปที่ 6.15 สภาวะความปกติเมื่อแรงดันเฟส A สูงกว่าปกติ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองระบบป้องกันมอเตอร์จะทำการทดสอบสภาวะต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. สภาวะแรงดันปกติทั้ง 3 เฟส
2. สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติทั้ง 3 เฟส
3. สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (Phase A)
4. สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (Phase A, Phase B)
5. สภาวะแรงดันสูงกว่าปกติทั้ง 3 เฟส
6. สภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ 1 เฟส (Phase A)
7. สภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ 2 เฟส (Phase A, Phase B)
8. สภาวะแรงดันสูงกว่า 1 เฟส, แรงดันต่ำกว่า 1 เฟส และแรงดันปกติ 1 เฟส

ตารางที่ 6.1 การเทียบขนาดโหลดระหว่าง DC Motor กับ AC Motor

DC Motor		AC Motor	
% Load	Current (A)	% Load	Current(A)
60	9.0	100.00	2.106
50	7.5	83.33	1.908
40	6.0	66.67	1.714
30	4.5	50.00	1.498
20	3.0	33.33	1.341
10	1.5	16.67	1.196
0	0.1	0	1.075

จากตาราง แสดงการเทียบขนาดของโหลดที่ใช้การทดลง โดยการเทียบขนาดกระแสของ DC Motor ที่พิกัด ที่กระแสของ Dc Motor 9 แอมป์ (60%) เทียบได้กับ 2.106 แอมป์ (100%) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัด จากการทดลองความผิดปกติสภาวะต่าง ๆ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ซึ่ง ผลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 6.2 แสดงถึงการทดสอบสภาวะต่างๆ ที่เกิดความผิดปกติกับมอเตอร์ ในสภาวะของโหลดต่างๆ ส่วนการวัดอุณหภูมิทำได้โดยการตัดวงจรของโซลิดสเตตออกจากวงจรเพื่อทดลองอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เมื่อรับได้แรงดันไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ กัน ส่วนตารางที่ 6.3 เป็นการสรุปผลการทดลองจากสภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP **เมื่อได้รับแรงดันสมดุล** Va=220V, Vb=220V, Vc=220V **ขณะที่มีการต่อ** Coupling

การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ก่อนใช้งาน

U-X = 10.7 V-Y= 10.5 W-Z = 10.5

No-Load test

Va =	220.6	Ia =1.0	31	Pa =	33.5	Var a=	225.1	VA a=	227.6	P.F.a=	0.15
Vb =	220.6	Ib =	1.086	Pb =	41.0	Var b=	236.1	VA b=	239.6	P.F.b=	0.17
Vc =	220.1	Ic =1.0	74	Pc=	31.2	Var c=	234.3	VA c=	236.3	P.F.c=	0.13

Block rotor Test

Va =	55.2	Ia =	2.04	Pa =	79.3	Var a=	80.0	VA a=	112.6	P.F.a=	0.70
Vb =	55.2	Ib =	2.08	Pb =	80.8	Var b=	81.3	VA b=	114.6	P.F.b=	0.71
Vc =	55.6	Ic =	2.06	Pc=	80.1	Var c=	81.7	VA c=	114.4	P.F.c=	0.70

VI-Method

Idc =	0.5	1.0	1.5	2.0
Vdc=	6.55	12.08	18.49	23.90

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C

Measurement

Load %	Idc	Vdc	Voltage (V)			Current (A)				Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature(°C) Internal			Fr	Speed (rpm)	Status	Time
			A	B	C	A	B	C	In		A	B	C	A	B	C	A	B	C				
			220.0	220.0	220.0					50							26.0	26.0	26.0	25.0		OFF	11:30:25
			220.0	220.0	220.0	1.035	1.102	1.075	0.9	50	48.5	55.9	40.5	221	240.5	229.5	26.0	26.0	26.0	25.0	1496	ON	11:32:45
			220.0	220.0	220.0	1.035	1.102	1.075	0.9	50	48.5	58.9	41.5	222	239.8	230.4	48.0	49.0	50.0	40.5	1497	ON	13:25:23
0	0.0	108.9	220.0	220.0	220.0	1.036	1.111	1.074	0.9	50	48.0	58.9	41.9	222.6	239.9	231.8	48.0	50.0	49.0	40.0	1497	ON	13:30:23
0	0.0	108.0	220.0	220.0	220.0	1.044	1.109	1.098	0.9	50	48.8	56.7	39.7	224.7	239.8	238.8	49.0	51.0	50.0	41.0	1497	ON	13:35:23
0	0.0	109.1	220.0	220.0	220.0	1.032	1.104	1.077	1.0	50	47.4	57.6	39.5	221.3	236.9	232.5	49.0	51.0	50.0	41.0	1496	ON	13:45:23
0	0.0	108.0	220.0	220.0	220.0	1.039	1.103	1.090	1.0	50	47.6	24.9	39.0	223.2	237.6	235.2	50.0	51.0	50.0	42.0	1497	ON	13:55:23
0	0.0	109.2	220.0	220.0	220.0	1.040	1.106	1.089	1.0	50	46.9	55.8	41.3	221.9	238.5	235.6	50.0	52.0	51.0	42.0	1497	ON	14:05:23
0	0.0	109.2	220.0	220.0	220.0	1.045	1.111	1.085	1.0	50	49.8	56.0	39.8	223.7	239.8	235.1	51.0	52.0	51.0	42.0	1496	ON	14:15:23
10	1.6	99.3	220.0	220.0	220.0	1.131	1.174	1.195	1.0	50	112.6	109.1	122.5	223.1	234.8	232.0	51.0	52.0	51.0	42.0	1473	ON	14:25:23
10	1.6	99.1	220.0	220.0	220.0	1.120	1.173	1.187	1.0	50	109.5	107.0	122.1	220.7	235.0	231.7	52.0	53.0	51.0	43.0	1475	ON	14:35:23
10	1.6	99.7	220.0	220.0	220.0	1.132	1.182	1.183	1.0	50	110.8	107.0	121.2	223.6	237.7	239.1	53.0	54.0	52.0	44.0	1475	ON	14:45:23
10	1.6	100.0	220.0	220.0	220.0	1.116	1.197	1.205	1.0	50	111.4	108.8	123.2	228.5	243.6	235.2	53.5	55.0	53.0	45.0	1475	ON	14:55:23
10	1.6	99.9	220.0	220.0	220.0	1.122	1.176	1.203	1.0	50	109.5	107.0	125.1	219.2	238.0	234.3	53.0	56.0	54.0	45.0	1475	ON	15:05:23
10	1.6	99.5	220.0	220.0	220.0	1.121	1.186	1.196	1.0	50	109.5	106.7	125.0	222.0	238.1	234.2	54.0	56.0	54.0	45.0	1475	ON	15:15:23
20	3.0	96.3	220.0	220.0	220.0	1.243	1.279	1.345	1.1	50	165.6	157.4	178.6	218.0	232.7	238.6	54.0	56.0	54.0	45.0	1460	ON	15:25:23
20	3.0	96.4	220.0	220.0	220.0	1.238	1.269	1.345	1.1	50	166.4	152.3	179.2	215.4	232.3	237.6	56.0	58.0	56.0	46.0	1456	ON	15:35:23

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C																							
Measurement																							
Load %	Idc	Vdc	Voltage (V)			Current (A)				Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature(°C)				Speed (rpm)	Status	Time
																	Internal			Fr			
			A	B	C	A	B	C	In		A	B	C	A	B	C	A	B	C				
20	3.0	96.3	220.0	220.0	220.0	1.232	1.265	1.349	1.1	50	164.7	153.4	179.1	214.1	230.6	241.5	56.0	58.0	56.0	47.0	1457	ON	15:45:23
20	3.0	96.0	220.0	220.0	220.0	1.245	1.271	1.345	1.1	50	166.6	153.0	179.3	217.4	234.5	238.9	57.0	60.0	57.0	48.0	1459	ON	15:55:23
20	3.0	95.8	220.0	220.0	220.0	1.235	1.267	1.350	1.1	50	166.5	151.5	177.6	215.7	233.6	241.2	58.0	61.0	58.0	49.0	1458	ON	16:05:23
20	3.0	95.9	220.0	220.0	220.0	1.225	1.258	1.341	1.1	50	166.6	150.2	177.6	214.1	230.8	236.3	59.0	61.0	59.0	49.0	1459	ON	16:15:23
30	4.5	94.1	220.0	220.0	220.0	1.415	1.451	1.510	1.2	50	219.3	210.1	234.6	220.5	238.5	240.5	59.0	62.0	61.0	49.0	1450	ON	16:25:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.411	1.445	1.506	1.2	50	220.0	211.2	232.5	222.2	237.5	239.6	60.0	63.0	62.0	49.0	1449	ON	16:35:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.407	1.435	1.499	1.2	50	219.0	208.1	231.8	221.8	233.2	239.6	61.0	63.0	63.0	49.0	1448	ON	16:45:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.409	1.420	1.499	1.2	50	218.8	208.8	232.6	222.6	234.8	240.3	62.0	64.0	64.0	49.0	1450	ON	16:55:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.398	1.425	1.499	1.2	50	219.7	207.6	230.2	219.0	231.4	238.5	63.0	66.0	65.0	49.0	1450	ON	17:05:23
30	4.5	94.2	220.0	220.0	220.0	1.407	1.412	1.498	1.2	50	216.4	204.7	230.9	219.0	234.2	237.7	64.0	67.0	65.0	49.0	1448	ON	17:15:23
40	6.0	89.1	220.0	220.0	220.0	1.668	1.691	1.746	1.5	50	290.3	285.3	304.7	225.9	239.5	238.1	69.0	69.0	69.0	51.0	1427	ON	17:25:23
40	6.0	88.9	220.0	220.0	220.0	1.661	1.679	1.735	1.5	50	288.5	282.1	301.3	226.6	238.9	239.5	72.0	73.0	73.0	53.0	1422	ON	17:35:23
40	6.0	89.0	220.0	220.0	220.0	1.660	1.683	1.739	1.5	50	288.5	283.5	304.0	225.8	239.5	237.7	75.0	76.0	76.0	55.0	1425	ON	17:45:23
40	6.0	88.7	220.0	220.0	220.0	1.652	1.674	1.735	1.5	50	287.1	280.9	302.8	225.7	238.9	239.8	77.0	80.0	77.0	57.0	1425	ON	17:55:23
40	6.0	88.5	220.0	220.0	220.0	1.657	1.675	1.717	1.5	50	287.7	282.6	297.7	225.8	236.5	236.7	79.0	81.0	79.0	59.0	1425	ON	18:05:23
40	6.0	88.5	220.0	220.0	220.0	1.649	1.672	1.714	1.5	50	285.5	282.0	297.2	225.5	236.5	236.5	80.0	84.0	80.0	60.0	1426	ON	18:15:23
50	7.5	86.5	220.0	220.0	220.0	1.872	1.890	1.922	1.7	50	342.5	339.4	352.6	231.1	242.0	238.5	83.0	88.0	83.0	61.0	1402	ON	18:25:23

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C																							
Measurement																							
Load %	Idc	Vdc	Voltage (V)			Current (A)				Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature(°C) Internal			Fr	Speed (rpm)	Status	Time
			A	B	C	A	B	C	In		A	B	C	A	B	C	A	B	C				
50	7.5	86.2	220.0	220.0	220.0	1.872	1.888	1.923	1.7	50	341.5	340.0	351.4	232.8	240.4	237.3	87.0	92.0	87.0	65.0	1409	ON	18:35:23
50	7.5	85.9	220.0	220.0	220.0	1.878	1.877	1.911	1.7	50	343.3	337.1	350.4	228.6	239.7	236.0	92.0	95.0	89.0	68.0	1397	ON	18:45:23
50	7.5	86.0	220.0	220.0	220.0	1.864	1.876	1.908	1.7	50	340.4	337.7	348.2	229.9	237.9	236.1	93.0	96.0	93.0	70.0	1398	ON	18:55:23
50	7.5	85.9	220.0	220.0	220.0	1.860	1.885	1.908	1.7	50	339.5	339.3	349.4	230.6	237.8	235.0	95.0	105.0	95.0	72.0	1397	ON	19:05:23
50	7.5	85.6	220.0	220.0	220.0	1.856	1.880	1.903	1.7	50	338.5	339.2	349.1	230.7	240.8	233.7	98.0	113.0	98.0	72.0	1399	ON	19:15:23
60	9.0	80.9	220.0	220.0	220.0	2.190	2.18	2.230	2.0	50	419.2	412.4	427.4	236.7	243.3	245.1	97.0	121.0	98.0	73.0	1362	ON	19:25:23
60	9.0	80.3	220.0	220.0	220.0	2.180	2.19	2.230	2.0	50	419.7	414.2	427.7	235.5	244.9	242.7	105.0	125.0	105.0	79.0	1367	ON	19:35:23
60	9.0	80.5	220.0	220.0	220.0	2.180	2.17	2.220	2.0	50	418.4	410.4	427.4	234.4	243.3	243.2	112.0	129.0	112.0	82.0	1348	ON	19:45:23
60	9.0	80.2	220.0	220.0	220.0	2.170	2.18	2.220	2.0	50	418.1	411.7	425.9	232.1	242.2	240.4	115.0	121.0	116.0	84.0	1342	ON	19:55:23
60	9.0	80.4	220.0	220.0	220.0	2.160	2.16	2.210	2.0	50	413.6	409.1	423.2	231.6	239.7	241.2	119.0	125.0	119.0	86.0	1340	ON	20:05:23
60	9.0	80.1	220.0	220.0	220.0	2.160	2.19	2.230	2.0	50	416.8	410.6	424.6	232.6	240.3	241.3	122.0	129.0	122.0	88.0	1335	ON	20:15:23
			220.0	220.0	220.0					50							122.0	129.0	122.0	88.0		OFF	20:25:23

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C

Computer

Load %	Idc	Vdc	Voltage			Current				Freq	True Power(W)	Reactive Power(var)	Temperature(°C)				Speed	Status	Time
													In			Fr			
			A	B	C	A	B	C	In				A	B	C				
			220.0	220.0	220.0					50			26	25.5	26	26		OFF	11:30:25
			220.0	220.0	220.0	1.035	1.102	1.075		50	48.3	231.5	26	25.5	26	26	1499	ON	11:32:45
			220.0	220.0	220.0	1.035	1.102	1.075		50	48.5	230.5	48.5	48.5	48.5	41.5	1496	ON	13:25:23
0	0.0	108.9	220.0	220.0	220.0	1.036	1.111	1.074		50	49.5	231.5	48.0	49.5	48.0	41.5	1495	ON	13:30:23
0	0.0	108.0	220.0	220.0	220.0	1.044	1.109	1.098		50	48.8	235.2	49.5	50.5	49.5	41.0	1496	ON	13:35:23
0	0.0	109.1	220.0	220.0	220.0	1.032	1.104	1.077		50	47.4	230.3	50.0	50.0	50.0	41.0	1495	ON	13:45:23
0	0.0	108.0	220.0	220.0	220.0	1.039	1.103	1.090		50	37.3	233.2	50.0	50.0	50.0	41.5	1496	ON	13:55:23
0	0.0	109.2	220.0	220.0	220.0	1.040	1.106	1.089		50	48.3	232.5	50.5	51.5	50.5	42.0	1497	ON	14:05:23
0	0.0	109.2	220.0	220.0	220.0	1.045	1.111	1.085		50	48.5	233.9	51.0	52.0	51.0	42.0	1497	ON	14:15:23
10	1.6	99.3	220.0	220.0	220.0	1.131	1.174	1.195		50	115.5	228.5	51.0	52.0	51.0	42.5	1473	ON	14:25:23
10	1.6	99.1	220.0	220.0	220.0	1.120	1.173	1.187		50	113.2	229.6	52.5	52.5	52.5	43.0	1474	ON	14:35:23
10	1.6	99.7	220.0	220.0	220.0	1.132	1.182	1.183		50	113.2	234.5	52.5	54.0	52.5	44.5	1474	ON	14:45:23
10	1.6	100.0	220.0	220.0	220.0	1.116	1.197	1.205		50	114.6	235.8	52.5	55.5	52.5	46.0	1475	ON	14:55:23
10	1.6	99.9	220.0	220.0	220.0	1.122	1.176	1.203		50	115.6	230.6	53.5	57.5	53.5	45.5	1475	ON	15:05:23
10	1.6	99.5	220.0	220.0	220.0	1.121	1.186	1.196		50	115.6	232.3	54.5	57.0	54.5	45.5	1475	ON	15:15:23
20	3.0	96.3	220.0	220.0	220.0	1.243	1.279	1.345		50	165.6	230.1	55.5	57.5	55.5	46.0	1459	ON	15:25:23
20	3.0	96.4	220.0	220.0	220.0	1.238	1.269	1.345		50	166.4	228.6	56.5	57.5	56.5	47.5	1459	ON	15:35:23

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C

Computer

Load %	Idc	Vdc	Voltage			Current				Freq	True Power(W)	Reactive Power(var)	Temperature(°C)				Speed	Status	Time
													In			Fr			
			A	B	C	A	B	C	In				A	B	C				
20	3.0	96.3	220.0	220.0	220.0	1.232	1.265	1.349		50	164.7	228.3	56.5	59.0	56.5	48.5	1457	ON	15:45:23
20	3.0	96.0	220.0	220.0	220.0	1.245	1.271	1.345		50	166.6	230.3	57.5	59.0	57.5	49.0	1459	ON	15:55:23
20	3.0	95.8	220.0	220.0	220.0	1.235	1.267	1.350		50	166.5	230.6	58.0	59.5	58.0	49.5	1459	ON	16:05:23
20	3.0	95.9	220.0	220.0	220.0	1.225	1.258	1.341		50	166.6	228.3	59.5	62.5	59.5	50.0	1459	ON	16:15:23
30	4.5	94.1	220.0	220.0	220.0	1.415	1.451	1.510		50	219.3	235.2	59.5	62.5	59.5	49.0	1449	ON	16:25:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.411	1.445	1.506		50	220.0	234.3	60.5	63.0	60.5	49.0	1450	ON	16:35:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.407	1.435	1.499		50	219.0	231.2	60.5	64.5	60.5	49.5	1448	ON	16:45:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.409	1.420	1.499		50	218.8	232.5	62.5	65.0	62.5	50.5	1450	ON	16:55:23
30	4.5	94.3	220.0	220.0	220.0	1.398	1.425	1.499		50	219.7	229.3	63.5	66.5	63.5	50.5	1450	ON	17:05:23
30	4.5	94.2	220.0	220.0	220.0	1.407	1.412	1.498		50	216.4	231.2	65.0	68.5	65.0	50.0	1449	ON	17:15:23
40	6.0	89.1	220.0	220.0	220.0	1.668	1.691	1.746		50	290.3	235.3	70.5	70.5	70.5	52.0	1429	ON	17:25:23
40	6.0	88.9	220.0	220.0	220.0	1.661	1.679	1.735		50	293.3	235.6	71.5	72.5	71.5	52.5	1428	ON	17:35:23
40	6.0	89.0	220.0	220.0	220.0	1.660	1.683	1.739		50	293.2	235.3	76.0	77.5	76.0	54.5	1426	ON	17:45:23
40	6.0	88.7	220.0	220.0	220.0	1.652	1.674	1.735		50	291.2	234.6	78.5	81.5	78.5	58.5	1426	ON	17:55:23
40	6.0	88.5	220.0	220.0	220.0	1.657	1.675	1.717		50	289.3	233.6	79.0	80.0	79.0	60.5	1425	ON	18:05:23
40	6.0	88.5	220.0	220.0	220.0	1.649	1.672	1.714		50	288.6	233.3	80.5	85.0	80.5	60.0	1425	ON	18:15:23
50	7.5	86.5	220.0	220.0	220.0	1.872	1.890	1.922		50	342.5	236.5	84.5	89.5	84.5	61.5	1400	ON	18:25:23

Mitsubisht 1hp 4Poles 220/380V 3.4/2.0A 1400 rpm 40°C

Computer

Load %	Idc	Vdc	Voltage			Current				Freq	True Power(W)	Reactive Power(var)	Temperature(°C)				Speed	Status	Time
													In			Fr			
			A	B	C	A	B	C	In				A	B	C				
50	7.5	86.2	220.0	220.0	220.0	1.872	1.888	1.923		50	345.6	234.8	88.0	93.5	88.0	66.5	1408	ON	18:35:23
50	7.5	85.9	220.0	220.0	220.0	1.878	1.877	1.911		50	343.3	234.3	91.5	95.5	91.5	69.5	1407	ON	18:45:23
50	7.5	86.0	220.0	220.0	220.0	1.864	1.876	1.908		50	342.3	234.1	93.5	97.5	93.5	71.0	1407	ON	18:55:23
50	7.5	85.9	220.0	220.0	220.0	1.860	1.885	1.908		50	343.2	235.3	95.5	106.5	95.5	72.5	1405	ON	19:05:23
50	7.5	85.6	220.0	220.0	220.0	1.856	1.880	1.903		50	342.5	235.6	99.5	114.5	99.5	72.5	1405	ON	19:15:23
60	9.0	80.9	220.0	220.0	220.0	2.190	2.18	2.230		50	419.2	240.3	99.5	120.5	99.5	75.5	1352	ON	19:25:23
60	9.0	80.3	220.0	220.0	220.0	2.180	2.19	2.230		50	419.7	241.2	104.0	126.5	104.0	80.5	1362	ON	19:35:23
60	9.0	80.5	220.0	220.0	220.0	2.180	2.17	2.220		50	418.4	239.6	111.5	130.0	111.5	85.5	1367	ON	19:45:23
60	9.0	80.2	220.0	220.0	220.0	2.170	2.18	2.220		50	418.1	239.1	113.5	120.0	113.5	86.5	1345	ON	19:55:23
60	9.0	80.4	220.0	220.0	220.0	2.160	2.16	2.210		50	413.6	236.5	120.5	125.5	120.5	86.5	1345	ON	20:05:23
60	9.0	80.1	220.0	220.0	220.0	2.160	2.19	2.230		50	416.8	238.5	120.5	130.0	120.5	86.5	1345	ON	20:15:23
			220.0	220.0	220.0					50			120.5	130	121	86.5		OFF	20:25:23

การทดลองหาค่าพารามิเตอร์หลังใช้งาน

U-X = 14.9 V-Y= 14.5 W-Z = 14.2

No-Load test

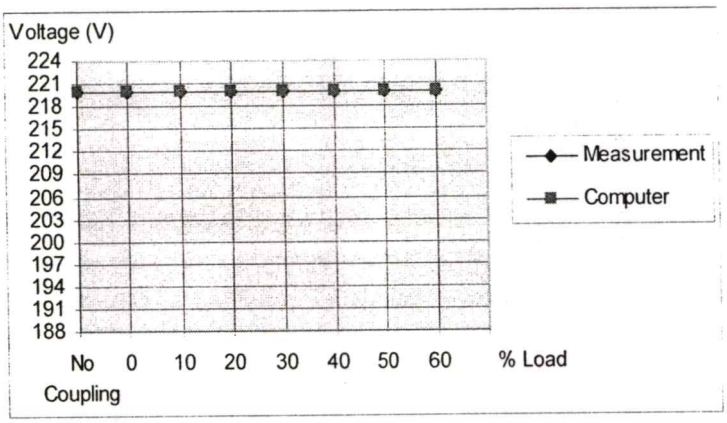
Va =	220.6	Ia =2.3	70	Pa =	451.0	Var a=	259.9	VA a=	520.5	P.F.a=	0.87
Vb =	219.9	Ib =	2.380	Pb =	447.5	Var b=	270.4	VA b=	522.8	P.F.b=	0.86
Vc =	220.5	Ic =2.4	30	Pc=	462.5	Var c=	268.5	VA c=	534.1	P.F.c=	0.86

Block rotor Test

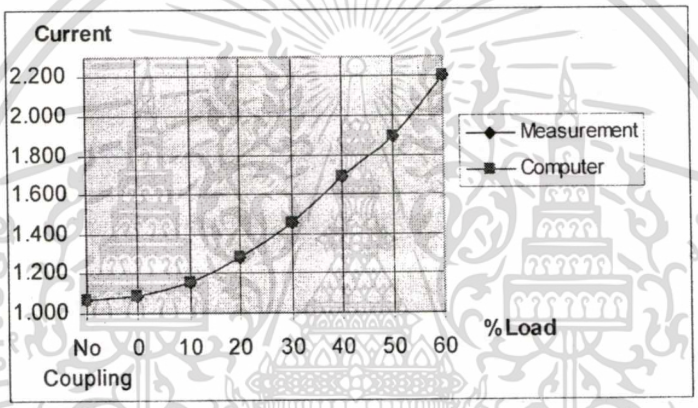
Va =	65.7	Ia =	2.02	Pa =	105.5	Var a=	80.6	VA a=	132.8	P.F.a=	0.79
Vb =	65.9	Ib =	2.02	Pb =	105.5	Var b=	80.7	VA b=	132.9	P.F.b=	0.79
Vc =	65.9	Ic =	2.03	Pc=	106.3	Var c=	81.7	VA c=	134.0	P.F.c=	0.79

VI-Method

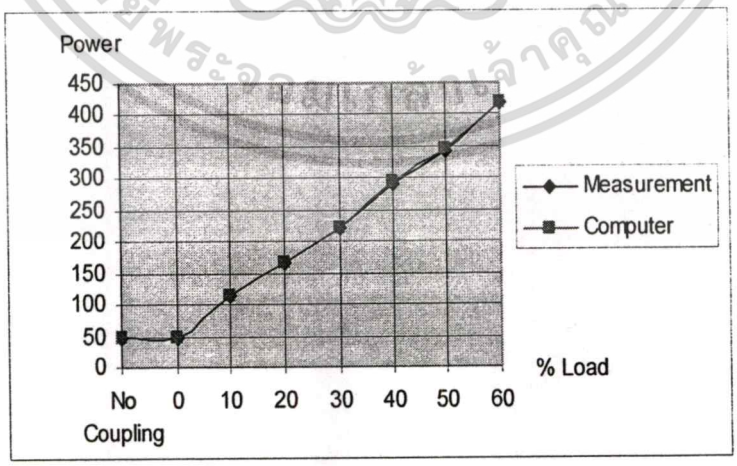
Idc =	0.5	1.0	1.5	2.0
Vdc=	5.49	12.73	19.84	27.10



รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบแรงดันที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

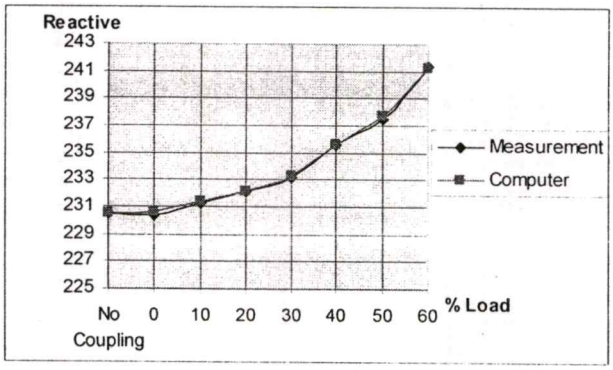


รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบกระแสที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

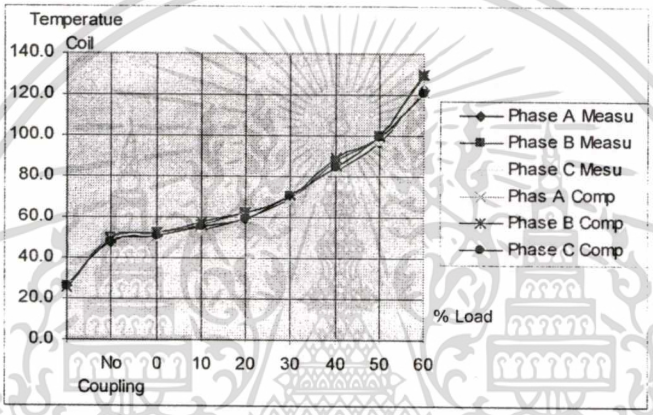


รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

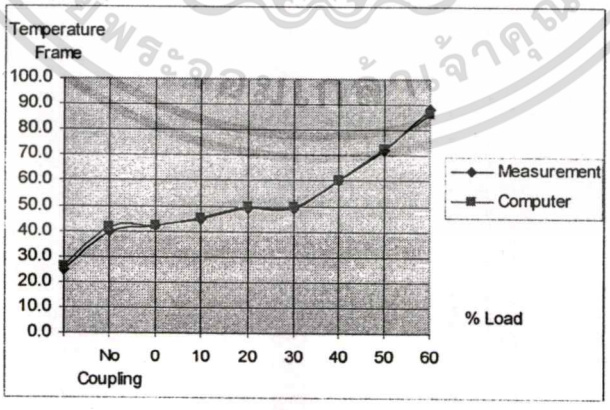
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบ Reactive Power ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

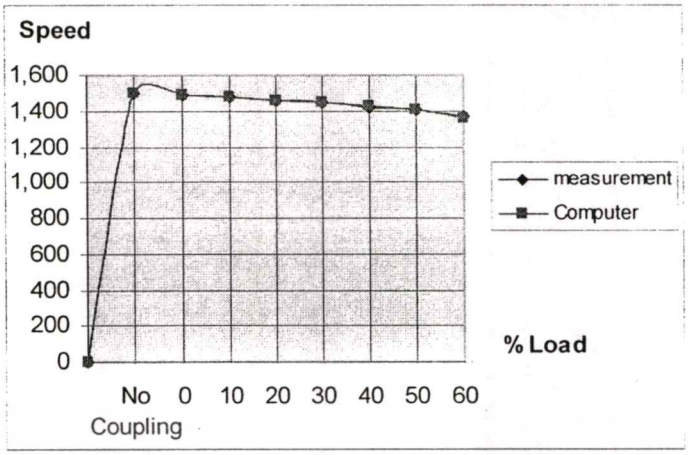


รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

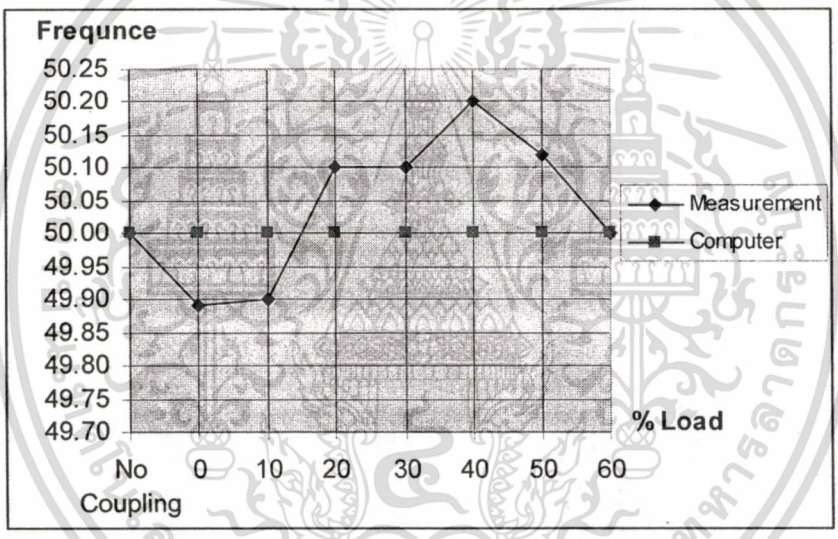


รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่โครงมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบความเร็วมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น



รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบความถี่ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับระบบป้องกันที่สร้างขึ้น

จากตารางที่ 6.16 ถึง 6.23 พบว่า ระบบป้องกันที่สร้างขึ้นสามารถวัดแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้า, อุณหภูมิ, ความเร็วรอบ ความถี่ และ Reactive Power ได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=220V, Vb=220V, Vc=220V

Computer

Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)				Speed (rpm)
	I	V							Internal			Frame	
			A	B	C				A	B	C		
No	-	-	1.036	1.085	1.079	50	33.5	229.5	48.5	52.5	48.5	41.0	1496
0	0	108.9	1.029	1.135	1.069	50	47.9	233.0	50.5	52.0	50.5	41.5	1496
10	1.6	99.8	1.120	1.191	1.199	50	113.9	231.4	55.0	55.0	55.5	45.5	1475
20	3.0	95.6	1.225	1.260	1.349	50	166.2	227.7	60.5	61.5	60.5	49.5	1459
30	4.5	94.2	1.407	1.415	1.494	50	217.6	223.3	63.5	65.0	63.5	50.5	1448
40	6.0	88.5	1.650	1.672	1.720	50	288.3	232.6	80.5	82.5	80.0	60.0	1426
50	7.5	85.6	1.860	1.880	1.901	50	342.3	235.4	98.5	100.0	97.5	71.5	1409
60	9.0	80.1	2.169	2.186	2.235	50	416.8	238.6	105.3	104.5	105.5	88.5	1332

Measurement

Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				Speed (rpm)
	I	V											Internal			Frame	
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	1.030	1.087	1.078	50	31.5	39.2	26.9	224.5	236.0	236.4	49.5	51.5	49.0	42.0	1498
0	0	108.9	1.022	1.128	1.072	50	47.0	59.4	37.8	227.4	234.8	236.7	51.0	51.5	51.5	42.5	1496
10	1.6	99.8	1.121	1.186	1.196	50	109.5	106.7	125.0	222.0	238.1	234.6	54.0	56	54.0	45.5	1474
20	3.0	95.6	1.225	1.258	1.341	49.9	166.6	150.2	177.6	214.1	230.8	236.3	60.5	61.0	60.0	49.0	1458
30	4.5	94.2	1.406	1.412	1.498	50.1	216.4	204.7	230.9	219.1	234.2	237.7	64.0	65.5	64.0	49.5	1448
40	6.0	88.5	1.649	1.672	1.714	50	285.3	282.0	297.2	225.6	236.5	236.5	81.0	82	81.5	59.5	1426
50	7.5	85.6	1.856	1.887	1.903	50	338.5	339.2	349.1	230.7	240.8	233.7	98.5	101.5	96.5	71.5	1408
60	9.0	80.1	2.160	2.184	2.230	50	417.5	410.6	424.6	236.6	240.3	241.3	105	105.5	106	88.5	1335

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=204V, Vc=204V

Computer														
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (^{o}C)					Speed (rpm)
	I	V							Internal			Frame		
			A	B	C				A	B	C			
No	-	-	0.983	0.983	0.916	50	26.6	190.3	43.5	45.0	44.0	33.5		1499
0	0	108.9	0.865	0.907	0.903	50	15.4	172.4	47.5	48.0	48.0	35.5		1498
10	1.6	99.8	1.010	1.024	1.023	50	108.9	173.3	53.5	54.5	53.0	38.5		1469
20	3.0	95.6	1.155	1.135	1.148	50	134.2	186.6	57.5	58.5	58.0	40.5		1452
30	4.5	94.2	1.426	1.317	1.402	50	197.1	190.9	65.5	66.0	65.5	43.5		1425
40	6.0	88.5	1.730	1.682	1.701	50	279.4	202.3	71.5	72.5	73.0	51.5		1412
50	7.5	85.6	1.919	1.878	1.909	50	325.4	205.8	79.5	81.0	81.5	59.5		1366
60	9.0	80.1	2.360	2.349	2.361	50	437.3	199.8	84.5	85.6	85.5	67.5		1327

Measurement																		
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (^{o}C)					Speed (rpm)
	I	V											Internal			Frame		
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C			
No	-	-	0.915	0.987	0.915	50.5	19.0	27.6	33.7	186.2	199.7	186.3	43.5	45.5	44.5	34.0		1497
0	0	108.9	0.866	0.905	0.904	50	34.1	71.5	15.4	172.4	171.5	171.5	47.0	48.5	48.0	35.0		1499
10	1.6	99.8	1.006	1.023	1.022	49.9	130.2	66.5	130.2	159.2	201.3	159.2	53.5	54.5	53.5	38.0		1470
20	3.0	95.6	1.155	1.134	1.147	50	179.1	111.8	111.8	154.5	202.6	202.4	57.5	58.5	57.5	39.5		1452
30	4.5	94.2	1.425	1.314	1.412	50	242.4	174.5	174.5	163.1	204.9	204.9	65.5	66.5	65.5	44.0		1425
40	6.0	88.5	1.728	1.683	1.699	49.8	313.9	262.1	262.3	163.1	221.9	221.4	72.5	73.5	73.5	52.5		1412
50	7.5	85.6	1.920	1.879	1.910	50	355.4	310.1	310.2	167.1	225.6	225.6	80.5	80.5	80.5	60.0		1365
60	9.0	80.1	2.360	2.350	2.359	50	448.2	415.2	449.2	180.1	239.1	181.3	85.0	86.5	85.5	66.5		1327

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=237V, Vc=237V

Computer															
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)						Speed (rpm)
	I	V							Internal			Frame			
			A	B	C				A	B	C				
No	-	-	1.068	1.064	1.057	50	61.5	270.2	55.5	56.5	55.5	31.0			1493
0	0	108.9	1.098	1.072	1.083	50	109.7	252.6	56.5	56.0	56.5	32.5			1491
10	1.6	99.8	1.288	1.245	1.228	50	132.8	300.4	57.5	58.0	57.5	37.5			1475
20	3.0	95.6	1.410	1.413	1.420	50	204.9	275.2	62.5	63.0	63.5	39.5			1459
30	4.5	94.2	1.618	1.707	1.698	50	243.5	261.5	69.5	69.5	70.5	46.5			1435
40	6.0	88.5	1.819	1.895	1.896	50	330.1	296.3	79.5	80.5	80.5	50.0			1413
50	7.5	85.6	2.060	2.130	2.070	50	408.1	270.8	89.5	89.5	89.5	57.0			1376
60	9.0	80.1	2.362	2.30	2.36	50	476.9	305.3	99.5	100.5	99.5	61.0			1335

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				Speed (rpm)
	I	V											Internal			Frame	
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	1.068	1.064	1.057	49.5	61.2	62.4	61.5	262.3	317.7	230.5	55.5	56.0	55.5	31.5	1493
0	0	108.9	1.088	1.082	1.083	50	109.3	109.4	109.9	262.3	262.5	269.4	56	56.6.5	56.5	32.5	1491
10	1.6	99.8	1.288	1.245	1.228	50	114.4	115.8	115.9	322.2	297.9	301.4	57.5	58.5	57.5	37.5	1475
20	3.0	95.6	1.411	1.413	1.420	50222.	7	219.9	228.8	251.9	323.8	251.9	62.5	63.5	63.0	39.5	1459
30	4.5	94.2	1.628	1.707	1.698	50.1	295.5	246.1	189.8	245.5	321.2	217.9	69.5	69.5	70.0	46.5	1435
40	6.0	88.5	1.819	1.895	1.896	50	330.1	312.5	312.5	296.3	323.5	323.5	79.5	80.0	80.0	50.0	1413
50	7.5	85.6	2.061	2.130	2.070	49.7	408.1	383.2	420.5	270.8	321.8	245.3	89.5	89.5	89.5	57.0	1376
60	9.0	80.1	2.370	2.324	2.36	49.6							99.5	100.5	99.5	61.0	1335

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=188V, Vc=188V

Computer															
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					Speed (rpm)
	I	V							Internal			Frame		
			A	B	C				A	B	C			
No	-	-	0.798	0.843	0.817	50.0	22.7	152.6	41.0	41.0	41.0	37.0	1498	
0	0	108.9	0.821	0.856	0.853	50.0	47.8	151.5	42.0	43.0	42.0	37.0	1489	
10	1.6	99.8	1.004	1.013	1.013	50.0	110.5	153.2	47.5	48.0	46.0	38.0	1462	
20	3.0	95.6	1.236	1.265	1.248	50.0	175.0	157.3	54.0	57.0	56.0	42.0	1435	
30	4.5	94.2	1.540	1.558	1.527	50.0	239.6	164.6	72.0	75.5	71.0	47.5	1398	
40	6.0	88.5	1.747	1.780	1.751	50.0	284.5	169.9	87.0	86.0	86.0	55.0	1366	
50	7.5	85.6	2.130	2.190	2.130	50.0	361.7	181.8	95.0	95.0	95.0	66.0	1321	
60	9.0	80.1	2.560	2.600	2.580	50.0	441.7	198.3	111.5	110.0	110.0	81.0	1281	

Measurement																
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)			Speed (rpm)
	I	V											Internal		Frame	
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C			
No	-	-	0.798	0.843	0.817	50.0	23.2	25.8	19.2	148.3	156.6	152.8	40.5	41.0	41.0	36.5	1498	
0	0	108.9	0.821	0.856	0.853	50.0	46.6	51.2	45.5	147.1	153.0	154.4	42.0	43.0	42.0	37.0	1489	
10	1.6	99.8	1.008	1.013	1.020	50.2	111.4	110.9	109.2	152.8	154.9	152.0	47.0	48.0	46.0	38.0	1463	
20	3.0	95.6	1.242	1.254	1.250	50.0	174.7	177.0	173.2	153.6	159.1	159.2	54.0	58.0	56.0	42.0	1436	
30	4.5	94.2	1.536	1.560	1.532	50.0	240.8	242.2	235.9	161.9	166.7	165.1	71.5	76.0	71.0	47.5	1402	
40	6.0	88.5	1.748	1.776	1.753	49.9	283.5	287.2	282.8	167.8	171.9	170.1	87.0	86.0	86.0	55.0	1365	
50	7.5	85.6	2.130	2.190	2.130	50.2	358.2	368.3	358.5	179.2	184.5	181.8	95.0	95.0	95.5	66.0	1321	
60	9.0	80.1	2.600	2.600	2.580	50.2	438.2	445.9	440.9	199.6	199.2	196.2	111.0	110.0	110.0	81.0	1281	

ตารางที่ 6.7 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=255V, Vb=255V, Vc=255V

Computer															
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					Speed (rpm)
	I	V							Internal			Frame		
			A	B	C				A	B	C			
No	-	-	1.479	1.479	1.479	50.0	57.4	385.5	67.0	66	67.0	54.0	1498	
0	0	108.9	1.479	1.479	1.479	50.0	81.2	382.2	67.5	65.0	65.0	55.0	1495	
10	1.6	99.8	1.579	1.580	1.580	50.0	141.7	369.4	70.0	71.5	69.0	56.0	1479	
20	3.0	95.6	1.692	1.660	1.663	50.0	202.1	364.7	75.0	76.0	75.0	63.0	1464	
30	4.5	94.2	1.742	1.746	1.754	50.0	259.5	356.5	79.0	81.0	80.0	68.0	1450	
40	6.0	88.5	1.882	1.882	1.887	50.0	318.4	350.2	87.0	86.0	87.0	74.0	1430	
50	7.5	85.6	1.958	1.966	1.980	50.0	380.4	344.9	96.0	96.5	96.5	82.0	1422	
60	9.0	80.1	2.140	2.140	2.140	50.0	434.4	340.4	108.0	106.0	108.0	97.0	1406	

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				Speed (rpm)
	I	V											Internal			Frame	
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	1.486	1.513	1.574	49.9	46.9	71.3	54.1	377.2	380.6	398.8	66.5	66.0	67.0	54.0	1498
0	0	108.9	1.480	1.531	1.571	50.2	70.3	91.6	78.8	371.6	380.4	394.5	67.5	66.5	65.0	55.0	1495
10	1.6	99.8	1.579	1.584	1.585	50.1	131.6	157.1	136.3	356.1	370.7	381.3	70.0	71.5	69.0	56.0	1479
20	3.0	95.6	1.692	1.660	1.663	50.0	193.8	217.0	196.2	349.1	364.3	371.6	75.0	76.0	75.0	63.0	1464
30	4.5	94.2	1.742	1.746	1.754	50.0	254.3	270.9	253.3	345.4	359.7	364.4	79.0	81.0	80.0	68.0	1450
40	6.0	88.5	1.882	1.882	1.887	49.9	310.1	338.9	306.2	331.6	358.4	360.5	87.0	86.0	87.0	74.0	1430
50	7.5	85.6	1.958	1.966	1.980	49.9	371.4	395.9	373.8	333.4	345.5	355.8	96.0	96.5	96.5	82.0	1422
60	9.0	80.1	2.140	2.140	2.140	50.0	431.6	435.7	435.8	340.3	337.9	342.9	108.0	106.0	108.0	97.0	1406

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=220V, Vc=220V

Computer															
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					Speed (rpm)	
	I	V							Internal			Frame			
			A	B	C				A	B	C				
No	-	-	0.865	1.070	1.069	50.0	30.3	217.2	47.0	47.5	46.0	38.0	1499		
0	0	108.9	0.869	1.071	1.071	50.0	55.2	216.0	49.5	50.0	49.5	40.0	1492		
10	1.6	99.8	0.920	1.218	1.221	50.0	109.8	213.8	52.0	53.0	51.5	42.5	1477		
20	3.0	95.6	1.006	1.390	1.393	50.0	164.5	212.6	56.0	57.0	56.0	44.0	1459		
30	4.5	94.2	1.165	1.575	1.570	50.0	217.5	216.7	61.5	62.5	61.5	48.0	1440		
40	6.0	88.5	1.453	1.793	1.788	50.0	286.3	217.4	69.0	70.0	69.0	55.0	1409		
50	7.5	85.6	1.680	2.090	2.095	50.0	367.6	229.0	78.0	79.0	79.0	67.5	1382		
60	9.0	80.1	2.015	2.369	2.369	50.0	423.5	231.4	94.5	95.5	94	84.0	1353		

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				Speed (rpm)
	I	V											Internal			Frame	
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	0.866	1.070	1.069	50.2	15.4	65.2	10.3	174.2	225.4	252.1	46.5	47.5	46.0	37.5	1498
0	0	108.9	0.868	1.071	1.070	50.3	34.5	95.0	36.0	174.3	220.0	253.8	49.5	50.0	49	40.0	1492
10	1.6	99.8	0.920	1.218	1.220	50.1	76.9	161.9	90.6	163.7	215.2	262.5	52.0	53.0	51.5	42.5	1477
20	3.0	95.6	1.007	1.391	1.391	49.9	127.3	217.0	149.2	161.6	217.6	258.7	56.0	57.0	56.0	44.0	1459
30	4.5	94.2	1.165	1.577	1.570	49.9	170.9	277.6	204.1	166.6	211.8	271.8	61.0	62.0	61.5	48.0	1440
40	6.0	88.5	1.453	1.793	1.788	50.2	238.5	340.8	279.5	174.4	209.5	268.3	69.0	70.0	69.0	55.0	1408
50	7.5	85.6	1.679	2.090	2.095	49.5	295.1	455.5	352.1	175.5	210.6	301.0	78.0	79.0	79.5	67.0	1382
60	9.0	80.1	2.015	2.370	2.369	50.0	359.3	489.2	421.9	189.6	219.3	285.3	94.5	95.5	94	84.0	1353

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=204V, Vc=220V

Computer														
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					Speed (rpm)
									Internal			Frame		
	I	V	A	B	C				A	B	C			
No	-	-	0.915	0.911	1.109	50.0	29.8	202.0	43.0	44.0	43.0	33.0	1498	
0	0	108.9	0.935	0.937	1.142	50.0	53.7	200.8	47.0	48.0	47.0	38.0	1492	
10	1.6	99.8	1.006	1.005	1.310	50.0	115.3	203.5	50.0	51.0	51.0	38.0	1472	
20	3.0	95.6	1.144	1.145	1.455	50.0	165.3	201.1	57.5	57.5	57.5	40.5	1452	
30	4.5	94.2	1.334	1.345	1.654	50.0	227.7	205.7	63.0	63.0	63.0	46.5	1426	
40	6.0	88.5	1.682	1.687	2.011	50.0	314.7	211.6	75.0	74.0	75.0	55.0	1410	
50	7.5	85.6	1.879	1.876	2.200	50.0	359.8	214.0	92.0	92.0	92.0	62.5	1368	
60	9.0	80.1	2.320	2.320	2.630	50.0	462.0	224.8	112.0	112.0	113.5	79.5	1327	

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				Speed (rpm)
													Internal			Frame	
	I	V	A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	0.915	0.911	1.109	50.2	-1.1	49.4	41.1	186.8	175.1	244.0	43.0	44.0	43.0	33.5	1498
0	0	108.9	0.936	0.937	1.142	50.0	19.2	71.5	70.5	189.2	171.5	241.8	47.0	48.0	47.0	38.0	1492
10	1.6	99.8	1.006	1.005	1.309	50.0	130.2	66.4	149.2	159.2	201.5	249.8	50.0	51.0	51.0	38.0	1472
20	3.0	95.6	1.144	1.143	1.455	50.3	179.1	111.8	204.9	154.5	202.6	246.2	57.5	57.5	57.5	41.5	1452
30	4.5	94.2	1.334	1.345	1.654	50.0	242.4	174.5	266.3	163.0	204.9	249.1	63.0	63.0	63.0	47.5	1426
40	6.0	88.5	1.682	1.687	2.011	50.0	313.9	262.1	368.0	163.0	221.9	249.8	75.0	74.0	75.0	55.0	1410
50	7.5	85.6	1.880	1.875	2.200	49.9	355.4	310.1	413.8	167.1	225.2	249.7	92.0	92.0	92.0	62.0	1368
60	9.0	80.1	2.320	2.320	2.630	50.0	448.2	415.2	522.6	180.1	239.1	255.2	112.0	112.0	113.5	79.0	1327

ตารางที่ 6.10 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=220V, Vc=220V

Computer														
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					
									Internal			Frame	Speed (rpm)	
	I	V	A	B	C				A	B	C			
No	-	-	0.664	1.091	1.094	50	31.1	208.3	46.5	47.5	46.5	40.5	1498	
0	0	108.9	0.676	1.141	1.150	50	59.0	205.5	47.0	48.0	47.5	42.5	1490	
10	1.6	99.8	0.684	1.337	1.337	50	118.0	205.3	51.0	52.0	52.0	48.5	1476	
20	3.0	95.6	0.888	1.545	1.545	50	193.9	205.2	57.0	56.0	56.0	51.0	1448	
30	4.5	94.2	1.064	1.759	1.759	50	246.0	206.8	67.0	68.5	68.0	54.0	1423	
40	6.0	88.5	1.269	1.964	1.964	50	210.5	209.8	76.0	75.5	77.0	64.0	1399	
50	7.5	85.6	1.578	2.280	2.280	50	363.3	215.8	96.0	97.0	97.0	71.0	1370	
60	9.0	80.1	1.910	2.550	2.550	50	368.0	212.0	112.5	113.0	113.5	81.0	1338	

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)				
													Internal			Frame	Speed (rpm)
	dc	c	A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	0.664	1.091	1.094	50	-2.6	103.8	-7.9	125.2	216.9	282.8	46.5	47.5	46.5	40.5	1498
0	0	108.9	0.676	1.141	1.150	50	18.4	135.1	23.5	128.1	212.1	276.4	47.5	48.5	47.0	42.5	1490
10	1.6	99.8	0.684	1.337	1.337	50	55.2	213.4	85.5	114.4	202.7	298.7	51.5	52.5	52.0	48.5	1476
20	3.0	95.6	0.888	1.545	1.545	50	112.1	293.9	175.6	124.7	186.7	304.2	57.5	56.5	56.0	51.5	1448
30	4.5	94.2	1.064	1.759	1.759	50	156.2	343.0	238.9	131.4	179.9	309.1	67.0	68.5	68.5	54.5	1423
40	6.0	88.5	1.270	1.964	1.964	50	198.8	401.6	31.2	132.2	183.9	313.2	76.5	75.5	77.0	64.5	1399
50	7.5	85.6	1.578	2.280	2.280	50	236.6	472.6		145.6	186.4		96.5	97.5	97.0	71.5	1370
60	9.0	80.1	1.910	2.550	2.550	50	324.5	324.5	455.1	161.6	161.6	312.8	112.5	113.5	113.0	81.5	1338

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=188V, Vc=220V

Computer

Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)				Speed (rpm)
									Internal			Frame	
	I	V	A	B	C				A	B	C		
No	-	-	0.869	0.725	1.199	50.0	29.0	182.2	44.0	44.0	44.0	39.0	1499
0	0	108.9	0.873	0.760	1.248	50.0	56.3	179.8	44.0	45.0	44.0	39.0	1490
10	1.6	99.8	0.953	0.905	1.455	50.0	152.9	180.7	49.0	48.0	49.5	420	1469
20	3.0	95.6	1.108	1.133	1.692	50.0	181.7	182.8	58.0	59.0	58.0	45.0	1442
30	4.5	94.2	1.325	1.404	1.918	50.0	244.6	184.9	72.5	73.072		54.0	1415
40	6.0	88.5	1.327	1.404	2.190	50.0	266.9	188.7	76.0	77.0	77.0	59.0	1409
50	7.5	85.6	1.850	2.010	2.470	50.0	370.6	198.6	91.0	90.0	91.0	75.0	1342
60	9.0	80.1	2.350	2.430	2.870	50.0	461.2	212.5	113.0	113.0	113.0	97	1323

Measurement

Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)			Frame	Speed (rpm)
													Internal				
	I	V	A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	0.869	0.725	1.199	50.0	-36.0	63.0	60.0	155.9	128.3	262.5	44.0	44.0	44.0	39.0	1499
0	0	108.9	0.873	0.760	1.248	50.0	-8.7	84.0	93.6	164.6	115.6	259.2	44.0	45.0	44.0	39.0	1490
10	1.6	99.8	0.953	0.905	1.455	49.9	139.3	139.3	180.1	176.5	99.7	265.9	49.0	48.0	49.5	40.5	1469
20	3.0	95.6	1.108	1.133	1.692	50.0	90.0	191.8	263.3	188.8	94.9	264.7	58.0	59.0	58.0	45.0	1442
30	4.5	94.2	1.325	1.404	1.918	50.0	154.7	245.7	333.4	196.7	98.7	259.3	72.5	73.0	72	54.0	1415
40	6.0	88.5	1.327	1.404	2.190	50.0	154.7	245.7	400.2	196.7	98.7	270.7	76.0	77.0	77.0	59.0	1409
50	7.5	85.6	1.850	2.010	2.470	50.0	276.8	360.4	474.5	212.6	115.9	267.2	91.0	90.0	91.0	75.0	1342
60	9.0	80.1	2.350	2.430	2.870	49.9	374.8	439.0	569.8	231.0	134.3	272.1	113.0	113.0	113.0	97.0	1323

ตารางที่ 6.12 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=220V, Vc=220V

Computer															
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)					Frame	Speed (rpm)
	I	V							Internal						
			A	B	C				A	B	C				
No	-	-	1.258	1.003	1.002	50.0	36.4	250.9	50.0	51.0	50.0			42.0	1498
0	0	108.9	1.236	1.070	1.094	50.0	58.6	245.0	52.0	53.0	52.0			42.0	1495
10	1.6	99.8	1.362	1.245	1.245	50.0	112.9	243.0	55.0	56	55.0			43.0	1477
20	3.0	95.6	1.510	1.360	1.360	50.0	166.1	244.2	61.0	61.5	61.5			45.0	1460
30	4.5	94.2	1.653	1.492	1.492	50.0	228.3	249.1	65.0	65.0	65.0			48.0	1439
40	6.0	88.5	1.990	1.712	1.719	50.0	318.3	248.0	85.0	87.0	87.0			55.0	1410
50	7.5	85.6	2.150	1.842	1.845	50.0	361.8	249.6	100.5	99.5	101.0			60.0	1396
60	9.0	80.1	2.510	2.232	2.230	50.0	455.4	255.5	112.5	109.0	111.2			80.0	1355

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)			Frame	Speed (rpm)
	I	V											Internal				
			A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	1.258	1.003	1.002	50.0	56.5	1.8	51.0	292.6	244.7	215.4	50.0	51.0	50.0	42.0	1498
0	0	108.9	1.236	1.070	1.094	50.0	68.0	50.6	57.2	274.2	234.3	226.4	52.0	53.0	52.0	42.0	1495
10	1.6	99.8	1.362	1.245	1.245	50.2	157.5	70.8	110.3	281.7	259.0	188.3	55.0	56	55.0	43.0	1477
20	3.0	95.6	1.510	1.360	1.360	50.1	224.2	119.0	155.0	279.1	270.0	183.6	61.0	61.0	61.0	45.0	1460
30	4.5	94.2	1.653	1.492	1.492	50.1	278.4	192.6	213.9	274.0	273.4	199.8	65.0	65.0	65.0	48.0	1439
40	6.0	88.5	1.990	1.712	1.719	50.0	377.8	268.4	308.7	285.8	264.6	193.6	85.0	87.0	87.0	55.0	1410
50	7.5	85.6	2.150	1.842	1.845	50.0	419.7	354.5	311.2	287.4	197.5	263.9	100.5	99.5	101.0	60.0	1396
60	9.0	80.1	2.510	2.232	2.230	50.1	518.3	442.8	405.0	292.3	206.3	267.9	112.5	109.0	120.0	80.0	1355

ตารางที่ 6.13 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=237V, Vb=237V, Vc=220V

Computer																
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)						Frame	Speed (rpm)
									Internal							
	I	V	A	B	C				A	B	C					
No	-	-	1.180	1.187	1.048	50.0	38.8	272.6	53.0	54.0	54.0				39.0	1498
0	0	108.9	1.198	1.199	1.046	50.0	53.8	271.1	55.0	56.0	55.0				41.0	1493
10	1.6	99.8	1.288	1.294	1.064	50.0	119.6	267.5	58.0	59.0	58.0				43.0	1477
20	3.0	95.6	1.410	1.414	1.149	50.0	172.4	275.9	62.0	64.0	62.0				45.0	1463
30	4.5	94.2	1.618	1.614	1.314	50.0	243.8	261.5	64.0	66.0	67.0				48.5	1440
40	6.0	88.5	1.819	1.817	1.511	50.0	308.5	263.1	77.0	79.0	80.0				51.0	1420
50	7.5	85.6	2.060	2.080	1.735	50.0	370.5	265.2	93.0	97.5	97.0				57.0	1394
60	9.0	80.1	2.36	2.38	2.040	50.0	449.2	273.4	115.0	115.0	115.0				61.0	1370

Measurement																		
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)					
													Internal			Frame	Speed (rpm)	
	I	V	A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C			
No	-	-	1.180	1.187	1.048	50.0	78.5	27.8	10.0	268.3	318.9	230.5	53.0	54.0	54.0	39.0	1498	
0	0	108.9	1.198	1.199	1.046	50.0	61.8	61.8	37.8	262.3	317.7	233.2	55.0	56.0	55.0	41.0	1493	
10	1.6	99.8	1.288	1.294	1.064	49.9	168.4	115.0	75.3	256.7	322.2	223.7	58.0	59.0	58.0	43.0	1477	
20	3.0	95.6	1.410	1.414	1.149	50.0	222.2	170.4	124.6	251.0	323.5	253.1	62.0	64.0	62.0	45.0	1463	
30	4.5	94.2	1.618	1.614	1.314	50.0	295.5	246.1	189.8	245.5	321.2	217.9	64.0	66.0	67.0	48.5	1440	
40	6.0	88.5	1.819	1.817	1.511	50.0	365.3	312.5	247.7	241.8	323.5	223.9	77.0	79.0	80.0	51.0	1420	
50	7.5	85.6	2.060	2.080	1.735	50.0	420.5	383.2	307.9	245.3	321.8	228.6	93.0	97.5	97.0	57.0	1394	
60	9.0	80.1	2.36	2.38	2.040	50.0	503.1	463.8	380.7	249.4	333.2	237.5	115.0	115.0	115.0	61.0	1370	

ตารางที่ 6.14 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=204V, Vb=237V, Vc=220V

Computer																
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C)						Frame	Speed (rpm)
									Internal							
	I	V	A	B	C				A		B		C			
No	-	-	0.765	1.315	1.238	50.0	36.4	239.4	50.5		51.5		51.0		34.5	1499
0	0	108.9	0.790	1.330	1.225	50.0	61.1	237.1	50.5		52.5		52.0		37.5	1493
10	1.6	99.8	0.828	1.500	1.314	50.0	124.9	233.8	55.0		56.5		55.5		39.0	1476
20	3.0	95.6	0.970	1.675	1.446	50.0	187.6	232.5	63.0		63.5		65.0		48.5	1454
30	4.5	94.2	1.125	1.846	1.578	50.0	237.8	233.2	70.0		70.5		71.0		52.5	1435
40	6.0	88.5	1.370	2.100	1.760	50.0	302.7	234.1	85.0		85.0		85.0		59.0	1411
50	7.5	85.6	1.620	2.310	1.985	50.0	364.4	297.1	95.0		98.0		95.0		60.0	1378
60	9.0	80.1	1.950	2.570	2.230	50.0	434.5	365.8	115.5		117.5		116		68.5	1335

Measurement																	
Load %	DC		Current			Freq	True Power (w)			Reactive Power (Var)			Temperature (°C)			Frame	Speed (rpm)
													Internal				
	I	V	A	B	C		A	B	C	A	B	C	A	B	C		
No	-	-	0.764	1.316	1.239	50.0	31.7	104.3	-26.8	151.9	294.6	271.6	50.5	51.5	51.0	34.5	1498
0	0	108.9	0.789	1.329	1.227	50.2	52.4	130.6	0.2	152.9	288.0	270.4	50.5	52.5	52.0	37.5	1493
10	1.6	99.8	0.830	1.503	1.314	50.0	101.9	216.4	56.4	135.5	281.4	284.5	55.0	56.5	55.0	39.0	1475
20	3.0	95.6	0.969	1.675	1.446	49.9	146.9	293.3	294.5	133.0	270.0	294.5	63.0	64.5	65.0	48.5	1454
30	4.5	94.2	1.124	1.845	1.576	50.1	185.9	353.0	267.0	132.0	267.0	267.0	70.0	70.0	70.0	52.5	1435
40	6.0	88.5	1.371	2.09	1.760	50.1	244.8	420.3	243.0	137.2	263.1	302.1	85.0	88.0	85.0	59.0	1411
50	7.5	85.6	1.621	2.310	1.988	50.0	297.1	483.2	312.9	145.6	258.0	305.6	95.0	98.0	95.0	60.5	1378
60	9.0	80.1	1.94	2.570	2.230	50.0	365.8	549.9	387.7	157.0	261.4	303.7	115.0	117.5	116.5	69.5	1335

ตารางที่ 6.15 ข้อมูลการทดลองมอเตอร์ 1HP เมื่อได้รับแรงดันสมดุล Va=188V, Vb=255V, Vc=220V

Computer

Load %	DC I	DC V	Current A	Current B	Current C	Freq	True Power (w)	Reactive Power (Var)	Temperature (°C) Internal A	Internal B	Internal C	Frame	Speed (rpm)
No	-	-	0.406	1.579	1.577	50	46.5	11.3	46.0	46.0	46.0	39.0	1498
0	0	108.9	0.696	1.143	1.263	50	59.8	19.7	47.0	48.0	47.0	42.0	1489
10	1.6	99.8	0.721	1.309	1.395	50	120.5	58.3	51.0	54.0	52.0	44.0	1470
20	3.0	95.6	0.873	1.535	1.575	50	185.3	106.2	59.0	62.0	60.0	50.0	1448
30	4.5	94.2	1.043	1.748	1.755	50	238.7	147.1	67.0	68.0	67.0	54.0	1428
40	6.0	88.5	1.341	2.060	1.990	50	312.0	213.8	81.0	84.0	85.0	64.0	1389
50	7.5	85.6	1.532	2.250	2.160	50	356.1	250.2	101.0	102.0	102.0	75.0	1346
60	9.0	80.1	1.949	2.590		50	441.4	331.1	124.0	127.0	124.0	102.0	1305

Measurement

Load %	DC I	DC V	Current A	Current B	Current C	Freq	True Power (w) A	True Power (w) B	True Power (w) C	Reactive Power (Var) A	Reactive Power (Var) B	Reactive Power (Var) C	Temperature (°C) Internal A	Internal B	Internal C	Frame	Speed (rpm)
No	-	-	0.408	1.574	1.577	50.2	11.3	208.5	-80.4	75.6	336.8	338.7	46.0	46.0	46.0	39.0	1498
0	0	108.9	0.691	1.143	1.256	50.2	19.7	133.9	25.8	129.8	213.3	275.5	47.0	48.0	47.0	42.0	1489
10	1.6	99.8	0.721	1.311	1.395	50.1	58.3	208.3	95.0	122.4	200.0	292.5	51.0	54.0	52.0	44.0	1469
20	3.0	95.6	0.873	1.535	1.575	49.8	106.2	281.2	168.6	125.8	187.0	303.5	59.0	62.0	60.0	50.0	1448
30	4.5	94.2	1.043	1.748	1.755	50.0	147.1	338.9	230.0	131.1	184.6	312.2	67.0	68.0	67.0	54.0	1428
40	6.0	88.5	1.341	2.060	2.000	50.0	213.8	413.9	308.3	134.9	186.4	313.2	81.0	84.0	85.0	64.0	1389
50	7.5	85.6	1.532	2.250	2.160	50.2	250.2	461.9	356.1	142.3	190.1	316.9	99.0	102.0	102.0	75.0	1346
60	9.0	80.1	1.949	2.590	2.201	50.0	331.1	537.4	455.8	160.0	192.9	314.0	124.0	127.0	124.0	102.0	1305

จากตารางที่ 6.2 ถึง 6.15 สรุปผลการทดลองได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.16 ผลของความผิดปกติในลักษณะต่างๆ ที่ทำการทดลอง

สภาวะผิดปกติต่างๆ	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc	n_r	T_{in}	T_F
มอเตอร์หยุดการทำงาน	<	<	<	<	<	<	<	*	*
แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสปกติ	N	N	N	N	N	N	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A Open Circuit	0	≥N	≥N	<	≤N	≤N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส B Open Circuit	≥N	0	≥N	N	<	N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส C Open Circuit	≥N	≥N	0	N	N	<	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส A เพิ่มขึ้น	≤N	≥N	≥N	≥N	N	N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส B เพิ่มขึ้น	≥N	≤N	≥N	N	≥N	N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส C เพิ่มขึ้น	≥N	≥N	≤N	N	N	≥N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส A, B เพิ่มขึ้น	≤N	≤N	≥N	≥N	≥N	N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส A, C เพิ่มขึ้น	≤N	≥N	≤N	≥N	N	≥N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส B,C เพิ่มขึ้น	≥N	≤N	≤N	N	≥N	≥N	≤N	*	*
ความต้านทานเฟส A, B, C เพิ่มขึ้น	≤N	≤N	≤N	≥N	≥N	≥N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	>	>	>	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ	≤N	≤N	≤N	<	<	<	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	>	N	N	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส B สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	N	>	N	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส C สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	N	N	>	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A ต่ำกว่าปกติ	≤N	≥N	≥N	<	N	N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส B ต่ำกว่าปกติ	≥N	≤N	≥N	N	<	N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส C ต่ำกว่าปกติ	≥N	≥N	≤N	N	N	<	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A, B สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	>	>	N	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A, C สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	>	N	>	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส B, C สูงกว่าปกติ	≥N	≥N	≥N	N	>	>	N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A, B ต่ำกว่าปกติ	≤N	≤N	≥N	<	<	N	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส A, C ต่ำกว่าปกติ	≤N	≥N	≤N	<	N	<	≤N	*	*
แรงดันไฟฟ้าเฟส B, C ต่ำกว่าปกติ	≥N	≤N	≤N	N	<	<	≤N	*	*

ความหมายของสัญญาลักษณ์ในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

< คือ ค่าน้อยกว่าที่กำหนด (220V ±5%)

> คือ ค่ามากกว่าที่กำหนด (220V ±5%)

N คือ เท่ากับปกติ (220V ±5%)

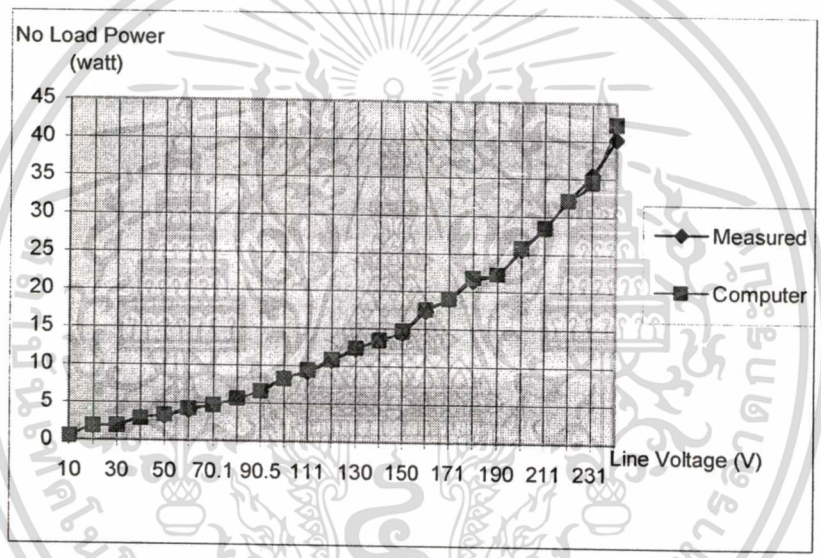
≤ คือ ค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนด (220V ±5%)

≥ คือ ค่ามากกว่าหรือเท่ากับที่กำหนด (220V ±5%)

* คือ ไม่สามารถวัดได้

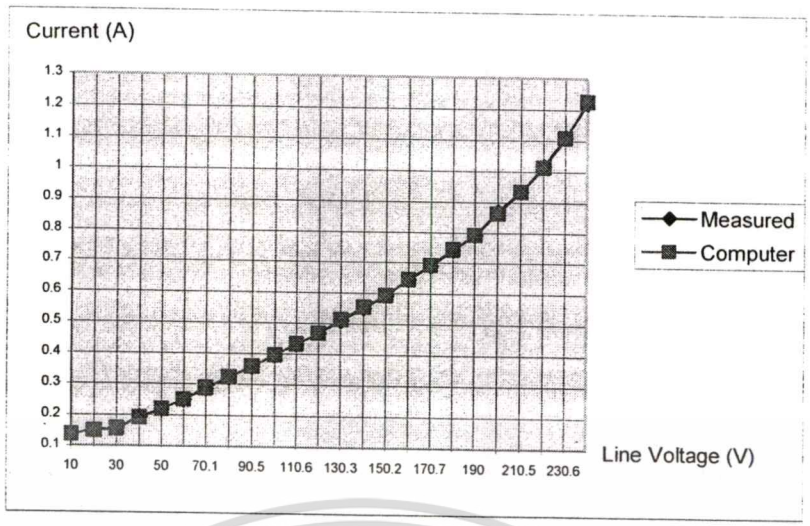
≤N คือ ค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าปกติ (220V ±5%)

≥N คือ ค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าปกติ (220V ±5%)

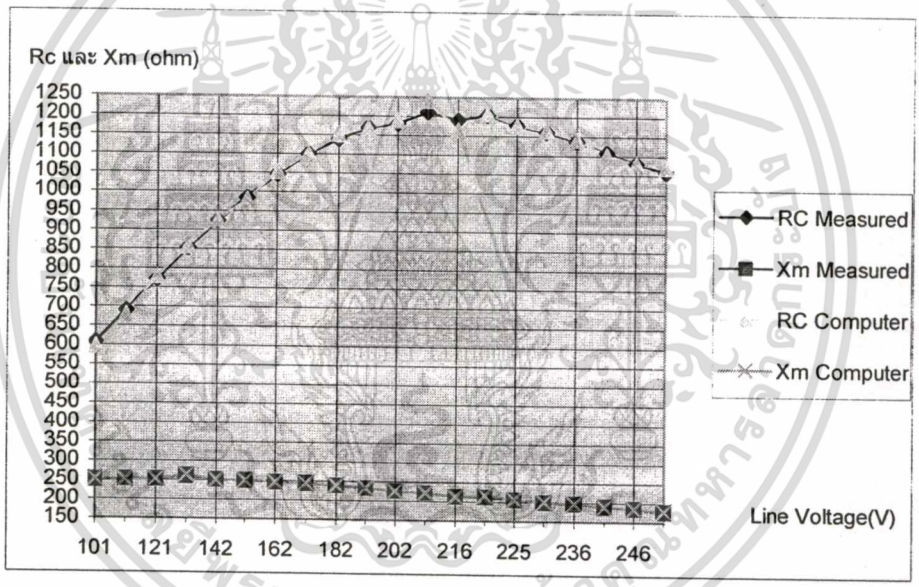


รูปที่ 6.24 no load Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



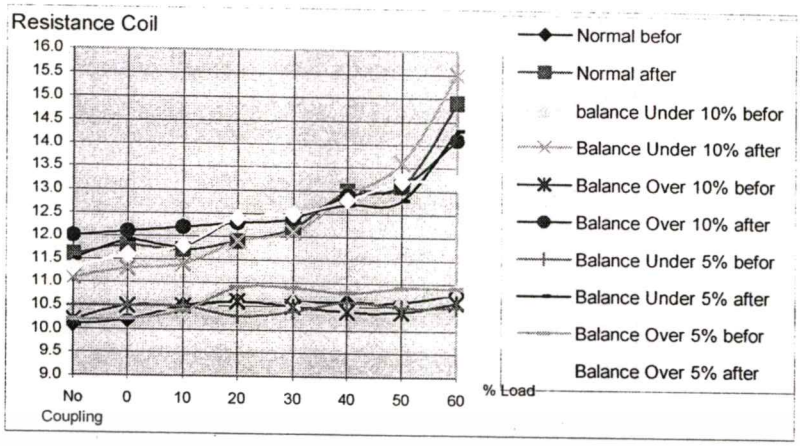
รูปที่ 6.25 no load current



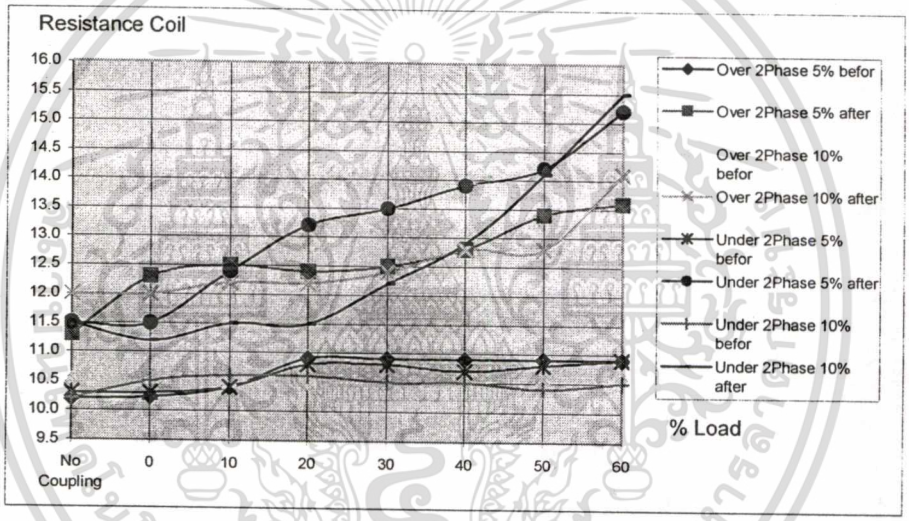
รูปที่ 6.26 การเปลี่ยนค่า Rc และ Xm ของมอเตอร์ 1HP

จากรูปที่ 6.24 ถึง 6.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เมื่อมอเตอร์ไม่ได้ต่อกับโหลด พบว่า เมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อย ๆ ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ Rc และ Xm เพิ่มขึ้นทำให้กระแสและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มจนถึงพิกัดค่า Rc มีค่าสูงสุด ซึ่งตรงนี้ ทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าเกือบเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ในขณะที่ Xm มีค่าลดลง ดังนั้นในการเพิ่มแรงดันสูงหรือต่ำกว่าพิกัด ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงต่ำกว่าปกติ และอุณหภูมิในมอเตอร์สูงขึ้นไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

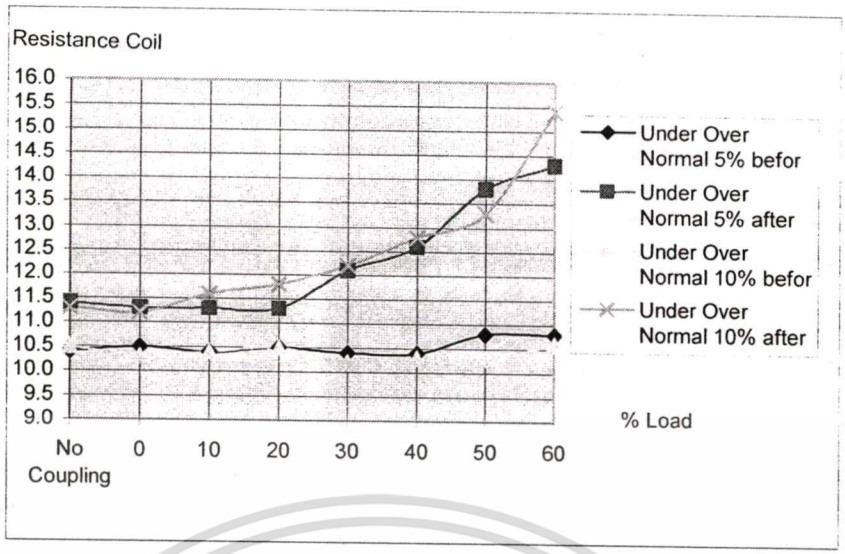


รูปที่ 6.27 ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังการทดลองในสภาวะปกติ

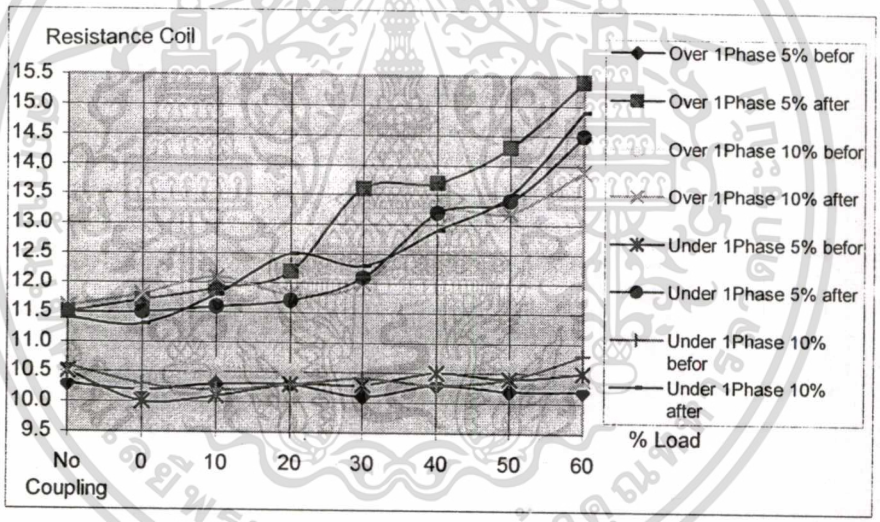


รูปที่ 6.28 ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะผิดปกติ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



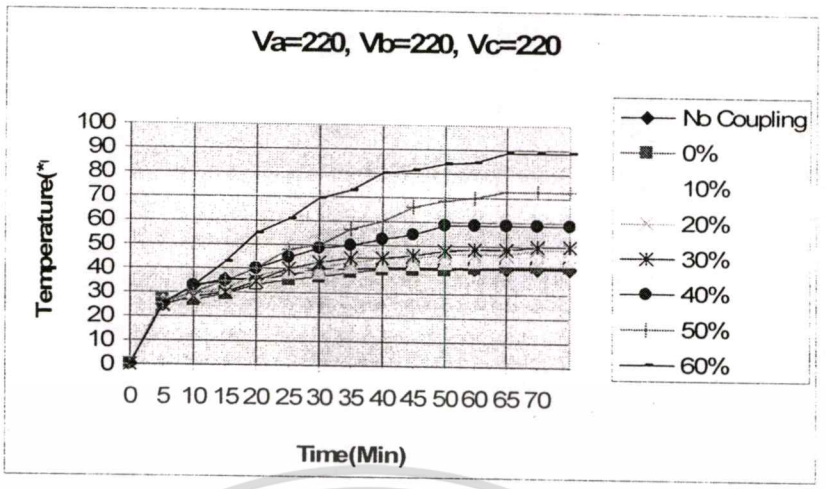
รูปที่ 6.29 ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะสูง-ต่ำกว่า



รูปที่ 6.30 ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์ เมื่อก่อนและหลังทดลองในสภาวะผิดปกติ 1 เฟส

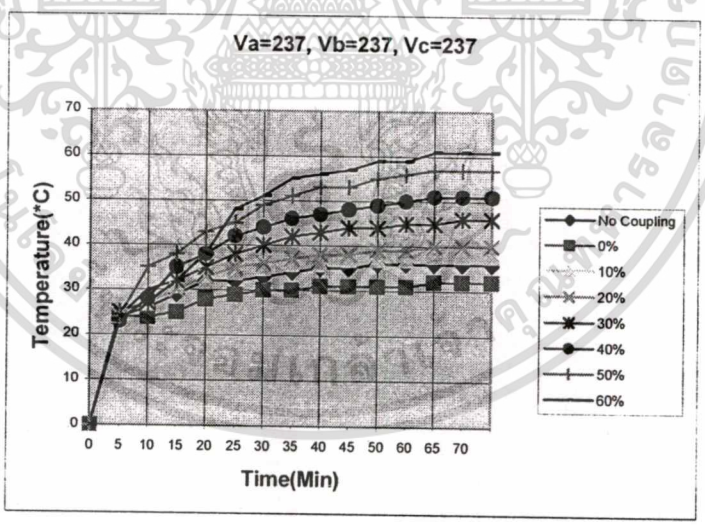
จากรูปที่ 6.27 ถึง 6.30 พบว่า ค่าความต้านทานขดลวดของมอเตอร์ ก่อนการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมอเตอร์ขณะก่อนการทดลองอุณภูมิภายในกับภายนอกมีอุณหภูมิเท่ากัน แต่เมื่อมีการใช้งาน พบว่า ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ไม่ว่ามอเตอร์ตัวนั้นทำงานมาแล้วกี่ชั่วโมง และพบว่าในสภาวะแรงดันต่ำปกติ จะมีค่าความต้านทานสูงกว่าในสภาวะแรงดันสูงกว่า เนื่องจากความร้อนสะสมที่ขดลวดในมอเตอร์ เนื่องจากที่สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ มอเตอร์ทำการดึงกระแสเพิ่มมากกว่าปกติ จึงทำให้อุณหภูมิเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



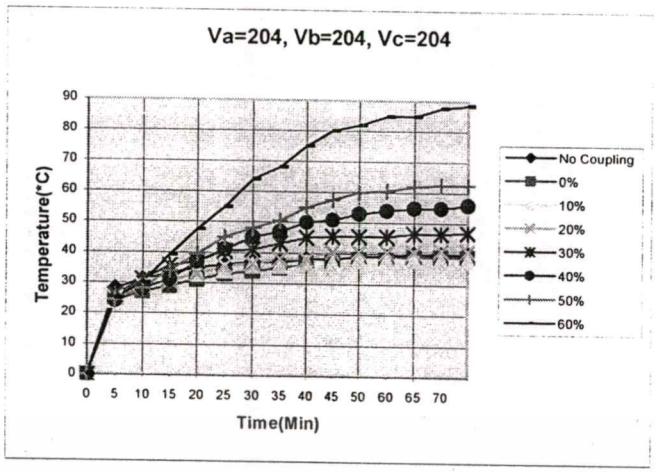
รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันปกติ

จากรูป ค่าอุณหภูมิในสภาวะการทำงานที่ปกติ เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล เป็นเวลาที่ยาวนานอุณหภูมิของมอเตอร์เริ่มมีค่าคงที่ แต่ในช่วงการขับโหลด 40%-60% ของ DC Generator Motor หรือเท่ากับ 60%-100% ของ AC Motor เพราะอุณหภูมิมีการปลี่ยนแปลงมาก

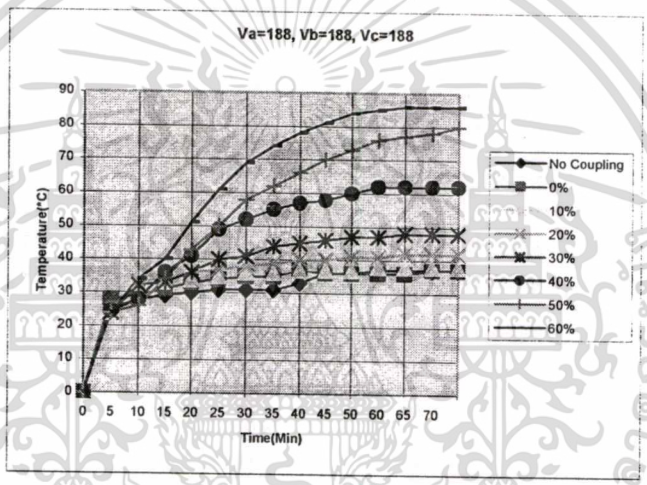


ก) สภาวะแรงดันสมดุลที่มากกว่าปกติ 5%

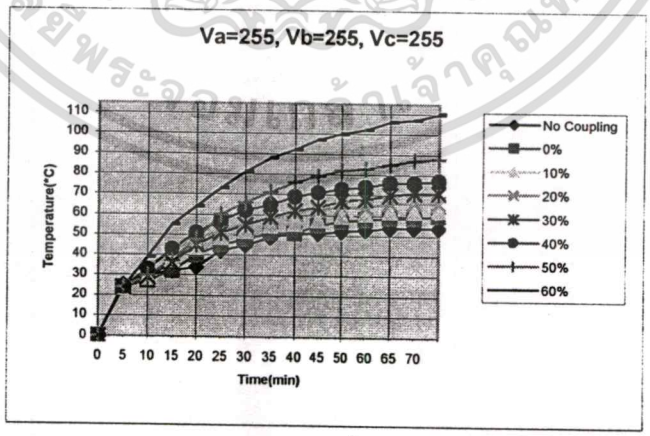
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สภาวะแรงดันสมดุลที่ต่ำกว่าปกติ 5%



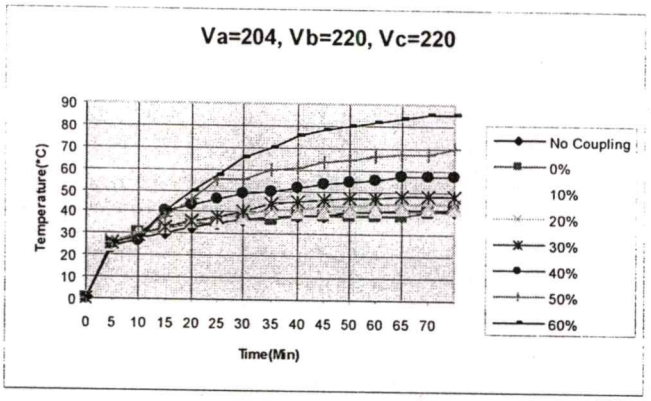
ค) สภาวะแรงดันสมดุลที่ต่ำกว่าปกติ 10%



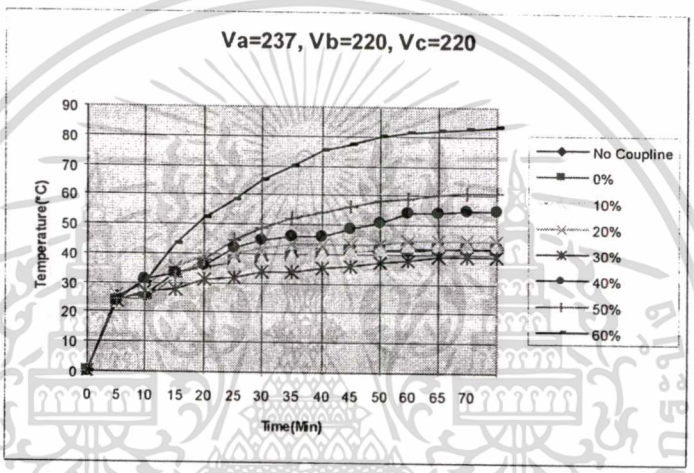
ง) สภาวะแรงดันสมดุลที่มากกว่าปกติ 10%

รูปที่ 6.32 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 3 เฟส

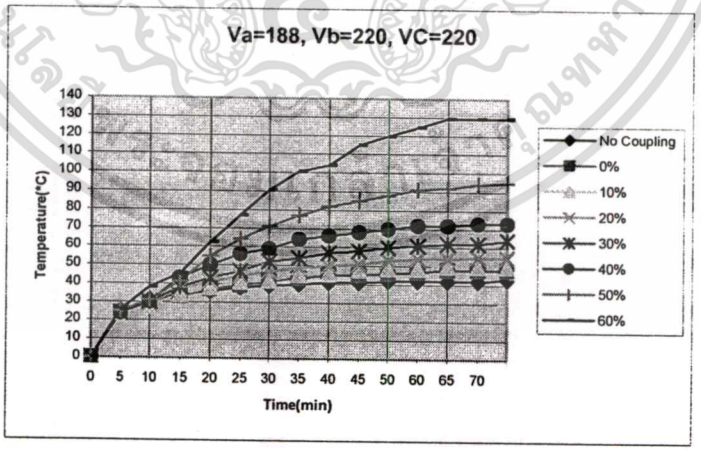
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 1 เฟส ที่ต่ำกว่าปกติ 5%

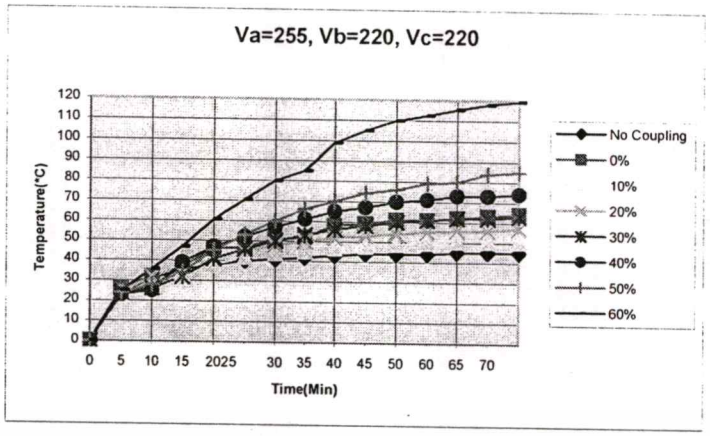


ข) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 1 เฟส ที่สูงกว่าปกติ 5%



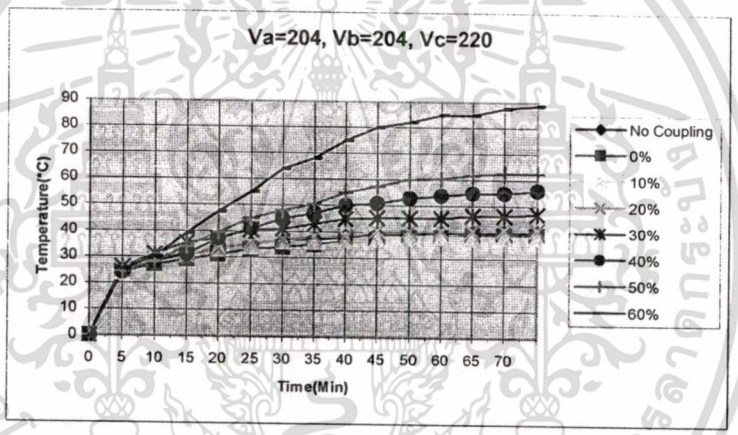
ค) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 1 เฟส ที่ต่ำกว่าปกติ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

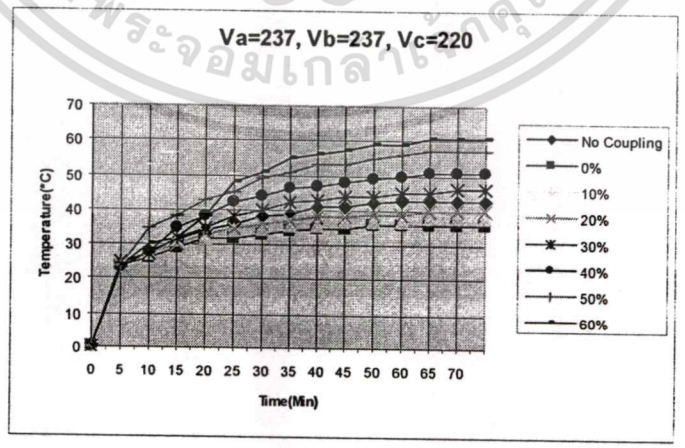


ง) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 1 เฟส ที่สูงกว่าปกติ 10%

รูปที่ 6.33 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 1 **เฟส**

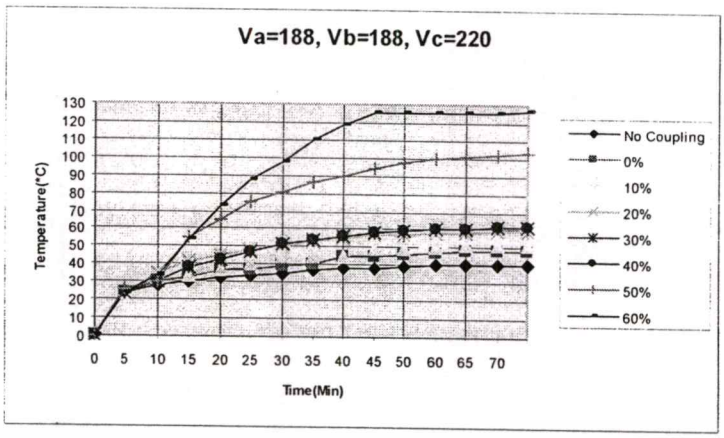


ก) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 2 เฟส ที่ต่ำกว่าปกติ 5%

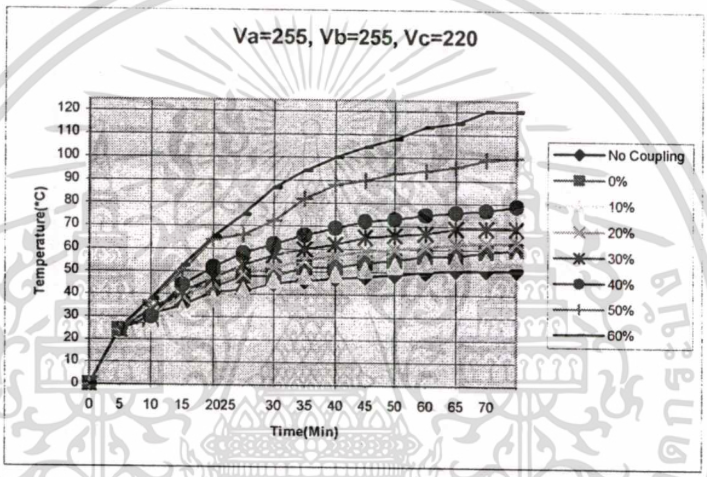


ข) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 2 เฟส ที่สูงกว่าปกติ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

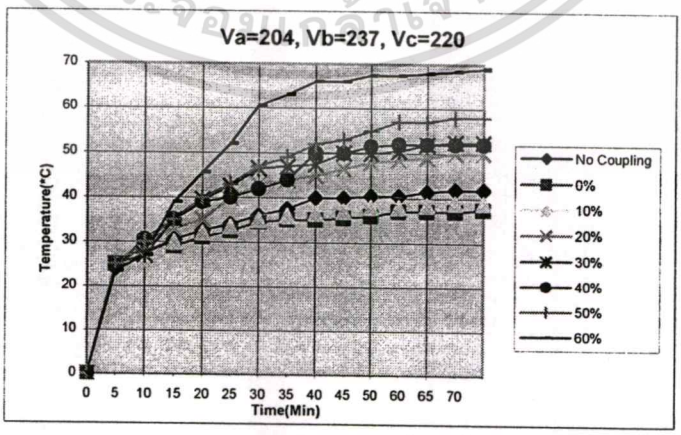


ค) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 2 เฟส ที่ต่ำกว่าปกติ 10%



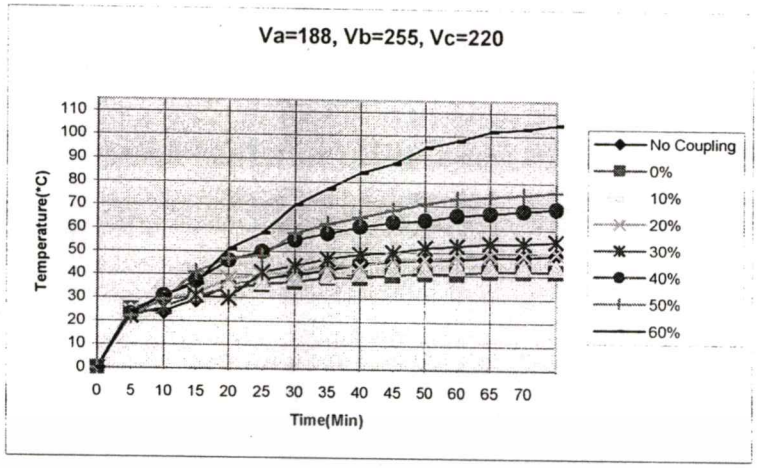
ง) สภาวะแรงดันไม่สมดุล 2 เฟส ที่สูงกว่าปกติ 10%

รูปที่ 6.34 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 2 เฟส



ก) สภาวะแรงดันไม่สมดุลที่สูง-ต่ำกว่า 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สภาวะแรงดันไม่สมดุลที่สูง-ต่ำกว่า 10%

รูปที่ 6.35 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อได้รับสภาวะแรงดันไม่ปกติ 2 เฟส

จากรูปที่ 6.32 ถึง 6.35 พบว่า แรงดันที่ต่ำกว่าปกตินั้น มีอุณหภูมิสูงกว่าแรงดันเกิน เนื่องมาจากกระแสได้ที่ไหลเข้ามอเตอร์ ซึ่งเมื่อแรงดันต่ำกว่าปกตินั้นจะทำการดึงกระแสเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่สร้างแรงบิดให้เท่ากับที่สูญเสียไป ในขณะเดียวกันเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันเกินกว่าปกติ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะน้อยลง ทำให้อุณหภูมิมอเตอร์ที่ได้รับแรงดันเกินพิกัดมีอุณหภูมิน้อยกว่ามอเตอร์ที่ได้รับแรงดันต่ำกว่าปกติ และความเร็วของมอเตอร์ก็น้อยกว่าปกติที่ได้รับแรงดันสูงกว่าหรือแรงดันที่สมดุล ในกรณีที่ มีแรงดันเฟสหนึ่งสูงกว่า อีกเฟสต่ำกว่า และอีกเฟสปกติ พบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะได้รับแรงดันปกติที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากการออกแบบระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการทำงานของโปรแกรมระบบป้องกันควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย Visual Basic6 จากนั้น ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ3 เฟส ขนาด1HP, 220/380V จากผลการทดลองพบว่าระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถที่ป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เกือบทุกฟังก์ชั่นตามหลักการที่ได้กำหนดขึ้น มีเพียงบางฟังก์ชั่นเท่านั้นที่ไม่สามารถทดลองได้ เช่น ฟังก์ชั่นป้องกันความถี่สูงเกิน-ต่ำกว่าปกติ ฟังก์ชั่นป้องกันการขาดหายไปของโหลด และฟังก์ชั่นป้องกันอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีเครื่องปรับความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ ไม่มีแท่นมอเตอร์ที่ต่อใช้งานและปลดโหลดออกทันทีเพื่อทำการทดลอง และระบบป้องกันอุณหภูมิ เมื่อทำการทดลองไปแล้ว ต้องรอให้อุณหภูมิภายในมอเตอร์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกจึงจะทำการทดสอบได้ ซึ่งทำให้เสียเวลาในการทดลองสภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองสรุปได้ว่า การออกแบบระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยระบบที่ออกแบบสร้างขึ้นได้เอาความสามารถของรีเลย์ป้องกันแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน ในลักษณะเรียงลำดับความสำคัญของความผิดปกติ และให้ทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มอเตอร์มีการใช้งานอยู่ ในขณะที่ไม่ทำให้เกิดการปลดวงจรมอเตอร์ออกโดยไม่จำเป็น โดยมีคุณสมบัติของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีความไวในการวัดสัญญาณต่าง ๆ ประมาณ ±1% ของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล หรือ ใช้เวลาในการแปลงสัญญาณประมาณ 100ms ข้อมูลที่ทำการแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลถูกส่งโอนถ่ายเข้าคอมพิวเตอร์ตลอดเวลาของการใช้งาน ในการตรวจจับความผิดปกติจะใช้เวลาปลดวงจรออกภายใน 5ms-7msนอกจากนี้ ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถเก็บข้อมูลการใช้งานตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงหยุดการทำงาน โดยเก็บในรูปของเท็กซ์ไฟล์

ข้อเสนอแนะ ในการพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ควรใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความเร็ว และความละเอียดในการประมวลผลมาก MCS-51ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน คือ DSP โดยมีชุดแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลภายใน มีพอร์ตในการใช้งานหลายพอร์ต และมีความละเอียดในการประมวลผลขนาด 16 บิต ซึ่งเหมาะสำหรับรองรับต่อการพัฒนาในอนาคต นอกจากนี้ ทำให้ในระบบป้องกันมีขนาดที่เล็กลงมากกว่าใช้ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบป้องกัน ควรมีการตรวจสอบค่าของกระแสไฟฟ้าที่สายนิวทรอลและค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงอายุการใช้งานของมอเตอร์ แล้วนำไปวางแผนในการซ่อมบำรุง แสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **การป้องกันระบบไฟฟ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สิงหาคม 2545: บ. เอ็ม แอนด์อี จำกัด, พ.ศ. 2545, หน้าที่ 12 - 274,

[2] Austin H. Bonnett, Fellow, IEEE, and George C. Soukup, "IEEE Transactions on Industry Applications", Vol 28, No. 4 July, August 1992.

[3] IEEE Std C37.96-2000, "IEEE Guide for AC Motor Protection"

[4] สันติ อัศวศรีพงศ์ธร. **รีเลย์ป้องกันกับการป้องกันระบบกำลัง**. พิมพ์ครั้งที่ 1: สมาคมศูนย์วิชาการไทย-ออสเตรเลีย, หน้าที่ 1 พ.ศ. 2526.

[5] นิรุธ จิรสุวรรณกุล, "**ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชั่นควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์**", พ.ศ.2541

[6] Walter A. Elmore, Protective Relaying Theory and Applications, ABB Power T&D Company Inc, 1994

[7] T S MADHAVA RAO, Power System Protection Static Relays With Microprocessor Applications, Second Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1989

[8] JOHN J.GRAINGER, WILIAM D.STEVENSON, JR., Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 1994, pp 416-464

[9] George McPherson,Robert D.Laramore,An Introduction to Electrical Machines and Transformers, Second Edition, John Wiley & Sons,1990,pp1-147, 239-314,447-545

[10] รศ. สัมพันธ์ หาญชเล, เครื่องกลไฟฟ้า 1(หม้อแปลงไฟฟ้า) Electrical Machines 1 (Transformer), พิมพ์ครั้งที่ 8, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2533

[11] อานันทวัฒน์ คุณากร, **การพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้กับเฟสเดียวการต่อแบบแยกเฟส**, พ.ศ. 2538

[12] NEMA Standards MG1-1993, Rev 4, "Motors and Generators"

[13] CEI/IEC 60034-1:1996 International Standard, "Rotation Electrical Machine Part1: Roting and Performance", International Standard; 1996, pp31-126

[14] พจนาฎ สุวรรณมณี, **เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น**, พิมพ์ครั้งที่1 มีนาคม 2545, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้าที่125-198, 267-336

[15] นักสิทธ์ คูวัฒนาชัย, **การถ่ายเทความร้อน** (Heat Transfer), พฤศจิกายน 2533, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, พ.ศ. 2533 หน้า 1-5, 301-327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] พงษ์เจต พรหมวงศ์, **การถ่ายเทความร้อน**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2534, หน้า 1-9, 61-87

[17] จินดา อาจริยะกุล, Differential Equations, พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2535, ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, หน้าที่ 82-86

[18] IEC 76-1976

[19] เซมิคัดคอนเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ "**การตรวจจับกระแสตรงและสลับ**" ฉบับที่ 164 ปี 2543 หน้า 80-83

[20] Ai Xin, Bao Hai, Song Jiahua, Yang Yihan,"The Hall Current Transformer Modeling and Simulation", 1998

[21] วิชัย ศังขจันทรานนท์, **ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 5 มิถุนายน 2539 หน้า 648-652, 709-816

[22] โยธิน เปรมปราณีรัชต์, **ระบบเซอร์และอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์**, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ.2533, Japan International Cooperation Agency (JICA), หน้าที่ 109-139, 435-467

[23] ไชยชาญ หินเกิด, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า3** (Electrical Machines 2), พิมพ์ครั้งที่ 3, พฤศจิกายน 2543, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้าที่ 1-88,135-192

[24] พิชิต ลำยอง, **เครื่องกลไฟฟ้า** 1 (Electrical Machine 1), พิมพ์ครั้งที่ 2, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2539

[25] IEEE Std 112-1996.: IEEE Standard test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generators. : The Institute of Electrical and Electronic Engineer Inc 1997.

[26] Kelly O', Denis. PERFORMANCE AND CONTROL OF ELECTRICAL MACHINES. London: McGraw-Hill.1992.

[27] วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, **เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51 Flash Microcontroller ฉบับ AT89C5x ของ** Atmel,บ. อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด, หน้า 3-140]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] ธีรวัฒน์ ประกอบ, **การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์**: พิมพ์ครั้งที่ 4 กันยายน 2543: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

[29] กฤษดา ใจเย็น, อรรถพล บุญยะโภคา, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **การเรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม**.: บ. อินโนเวตีฟเอ็กเพอริเมนต์ จำกัด, หน้าที่ 1-34, 145-151

[30] กิตติ ภักดีวัฒนะกุล, จำลอง ครูอุตสาหะ.Visual Basic 6 **ฉบับโปรแกรมเมอร์** พิมพ์ครั้งที่ 5 ตุลาคม 2542, บ. เคทีพี แอนด์ คอนซัลท์ จำกัด

[31] อภิชาติ ภู่พลับ. **เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วย** Visual Basic.พิมพ์ครั้งที่ 1 กันยายน 2546: บ. Info press Developer Book

[32] Noel Jerke, Visual Basic6: The Complete Reference, McGraw-Hill, pp105-146,87-356

[33] สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิ, **การเขียนโปรแกรมด้วย** Visual Basic 6.0 **ระดับสูง** (**การใช้งานฟังก์ชั่นวินโดวส์** API-32 **บิต**), พ.ศ.2542, บ. ไพรเมด จำกัด

[34] วิโรจน์ อัศวรังสี, ชัชวาลย์ เต็มฤทธิวงศ์, กรชุลี ใช้สถิตย์, **การใช้ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี**, บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), พ.ศ. 2521, หน้า 61-266, 327-358,483-508

[35] สักรียา ชิตวงศ์, **วิศวกรรมอิเล็กทรอนกส์** (Electronic Engineering), พิมพ์ครั้งที่ 1. พ.ศ. 2544, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้าที่ 330-392

[36] ยืน ภู่วรวรรณ, **ทฤษฎีการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม** 1, พิมพ์ครั้งที่ 15 พ.ศ. 2531, บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, พ.ศ .2531, หน้า 89-90, 170-227

[37] ยืน ภู่วรวรรณ, **อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม**, บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, หน้า 25-60, 124 -128, 161-183, 201-229, 255-270

[38] ชัยยงค์ แก้วมงคล, นภัทร วัจนเทพินทร์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง1**, พิมพ์ครั้งที่ 2 มิถุนายน 2542, บ. สกายบุ๊กส์, หน้า 109-110, 301-309

[39] วิบูล เขมรังสฤษฎ์, **วิศวกรรมไฟฟ้าทฤษฎีเครื่องวัดไฟฟ้าการวัดขนาดทางไฟฟ้า**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระเหนือ, พ.ศ 2528, หน้าที่ 90 -131

[40] ธนาวุฒิ ไกรฤทธิกุล, **รวมบทความ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์**, บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), พ.ศ. 2538, หน้าที่ 24 - 31

[41] IEEE Std 141-1993.: IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants. : IEEE 1993. pp 89-91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[42] Mehmet CUNKAS, Ramazan AKKAYA, Ali OZTURK. : **Protection of AC Motors by Means of Microcontrollers.** : IEEE 2000. pp 1093-1096

[43] Cunkas, M.,: **Protection of Asynchronous Motors Aided PC by means of Microcontroller.** :, Ms Thesis, Konya, Turkey, 1998.

[44] Roy Cosse,Jr.,P.E., Herbert Cheung, E.I.T., Jeff Mazereeuw C.E.T.,Mark Reid, P.E.: A OMPARISON OF ANSI GUIDELINES FOR LARGE AC MOTOR PROTECTION WITH MICROPROCESSOR BASED "BLACK BOX" RELAY.,IEEE paper No. PCIC-93-11, pp 101-109

[45] วรโชติ ลาภพูนผล, วิจิตร กิณเรศ, ประภาษ ไพรสุวรรณา, "**ระบบป้องกันมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์**", วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2547

[46] วรโชติ ลาภพูนผล, วิจิตร กิณเรศ, ประภาษ ไพรสุวรรณา, "**การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง - ต่ำกว่าปกติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์**", วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวสารลาดกระบัง
Ladkrabang Engineering Journal
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,Bangkok 10520

วันที่ 8 เมษายน 2548

เลขที่อ้างอิง 1022

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณวรโชติ ลาภพูนผล วิจิตร กิณเรศ ประภาษ ไพรสุวรรณา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่องระบบป้องกันมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ (Protection of Induction Motor by Microcontrollers) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวสารลาดกระบัง บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 21 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2547

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบป้องกันมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Protection of Induction Motor by Microcontrollers

วรโชติ ลาภพูนผล วิจิตร กิณเรศ ประภาษ ไพรสุวรรณา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

จากการศึกษา, การออกแบบระบบป้องกันมอเตอร์ที่สามารถควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แสดงผลและสั่งการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการศึกษาสามารถแบ่งระบบป้องกันออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของโปรแกรมและส่วนของฮาร์ดแวร์ ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งเข้าคอมพิวเตอร์โดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ข้อมูลที่วัดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Visual Basic 6

การทำงานของระบบป้องกันเริ่มต้นด้วยการกดปุ่มบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ระบบจะตรวจวัดสัญญาณในสภาวะคงที่และชั่วขณะ เมื่อมอเตอร์ทำงานระบบป้องกันมอเตอร์จะตรวจวัดสัญญาณกระแส, แรงดัน, อุณหภูมิขดลวด โดยแสดงผลที่จอคอมพิวเตอร์ ถ้าระบบตรวจพบความผิดปกติที่ไม่มีความรุนแรงระบบจะส่งสัญญาณเพียงแค่ Alarm และแสดงข้อมูลความผิดปกติ แต่ถ้าความผิดปกติที่มีความรุนแรงระบบจะสั่งในหยุดการทำงานของมอเตอร์และแสดงข้อมูลความผิดปกติ ในการทำงานครั้งต่อไปต้องแก้ไขความผิดปกติให้เรียบร้อยก่อนทำงานต่อไป

Abstract

In This Study, a Protection system for induction motors has been developed using a microcontroller MCS-51 and display control computer protection equipment. The study is divided into two parts as software and hardware. The data obtained from the motor was transferred to a computer through a microcontroller MCS-51. These data were then analyzed on the computer by using program written in VB6.

The induction motor starts to operate by clicking on the start button on the computer and then the detection start during steady state and transient times. Since the motor runs in operation phase current, phase voltage, winding temperatures of the motor can be monitored. When a problem is detected, the program stops the motor immediately and shows a message on by user. As soon as the problem is removed. The program can restart the motor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าไปมาก โรงงานอุตสาหกรรมได้นำเทคโนโลยีควบคุมระบบการทำงานมาใช้อย่างกว้างขวาง ที่มีความน่าเชื่อถือและความแม่นยำมากกว่า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบป้องกันความเสียหายแก่อุปกรณ์ เพื่อให้ขบวนการผลิตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นิยมใช้เป็นต้นกำลัง จากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้ระบบป้องกันถูกพัฒนาไปด้วย ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือและแม่นยำกว่าแบบเดิมที่เป็นรีเลย์แบบแม่เหล็ก หรือ รีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ โดยการนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง ง่ายต่อการควบคุมและแสดงผลการทำงานที่เข้าใจง่ายต่อผู้ใช้งาน การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ติดต่อโดยผ่านพอร์ตอนุกรมที่มีชิพ(Chip) เพียงตัวเดียว คือ RS-232 [1]

การศึกษาระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยวัดสัญญาณจากมอเตอร์มากมาย เช่น อุณหภูมิขดลวด, ความเร็ว, กระแส, แรงดัน เป็นต้น [2] การวัดแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์ใช้หม้อแปลงแรงดันที่มีขนาด 250V/5V, การวัดความไม่สมดุลกระแสหรือการขาดหายไปใช้ฮอลล์เอฟเฟคต์ (Hall Effect) วัดกระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์ ส่วนการวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ จะพิจารณาให้มอเตอร์มีโครงสร้างเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Uniform and Homogenous) เพื่อง่ายต่อการพิจารณา ซึ่งใช้เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์

โดยอุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไปมักเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันการตัดต่อไฟเข้ามอเตอร์ตามแต่ออกแบบ เช่น การป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูง-ต่ำกว่าปกติ, การป้องกันความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ระบบป้องกันมากขึ้น

2. ทฤษฎีและการคำนวณ

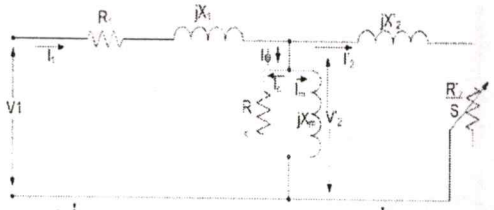
ในการศึกษาและคำนวณค่าต่างๆ ใช้มอเตอร์ขนาดดังนี้

$P_o = 0.746W, n_r = 1400rpm$

$f = 50Hz, V = 220/380V$

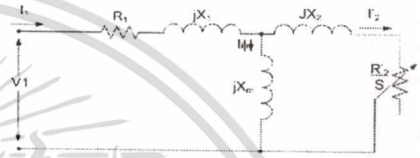
$I = 3.4/2.0A, Insulation\ Class = B$

$Poles = 4$



รูปที่ 1. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส

จากรูปที่1 เมื่อพิจารณากระแสโรเตอร์ที่มากกว่ากระแสกระตุ้น $(I'_2 >> I_\phi)$และค่าความต้านทานแกนเหล็กน้อยกว่ารีแอคแตนต์สนามแม่เหล็ก $(R_c << jX_m)$ [3] สามารถตัดค่า R_c ออกได้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. วงจรสมมูลแบบประมาณค่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า

จากรูปที่2 สามารถหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ดังสมการที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรูปที่1 ได้จากการทดสอบในสภาวะ No-Load test, Block Rotor test และ VI- Method

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \qquad (1)$$

เมื่อ V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด (V)

R_1 = ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ω)

R'_2 = ความต้านทานโรเตอร์ที่โอนย้ายมาสเตเตอร์ (Ω)

R_c = ความต้านทานแกนเหล็ก (Ω)

X_1 = รีแอคแตนต์สเตเตอร์ (Ω)

X'_2 = รีแอคแตนต์โรเตอร์ที่โอนย้ายมาที่สเตเตอร์ (Ω)

X_m = รีแอคแตนต์สนามแม่เหล็ก (Ω)

I_1 = กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ (A)

I'_2 = กระแสที่โรเตอร์ถูกโอนย้ายมาสเตเตอร์ (A)

s = สลิป(Slip)

n_s = Synchronous speed (rpm)

n_r = Rotor speed (rpm)

ϕ_1 = มุมระหว่างกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่2 สามารถหาค่า Input active Power (P_{in}) และ Reactive Power (Q_{in}) ของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ 2

$$\left.\begin{aligned} P_{in} &= \sqrt{3} V_1 I_1 \cos\phi_1 \\ Q_{in} &= \sqrt{3} V_1 I_1 \sin\phi_1 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

ค่ากำลังงานสูญเสียทองแดงที่สเตเตอร์และโรเตอร์หาได้จากสมการที่ 3

$$\left.\begin{aligned} P_{scu} &= 3 I_1^2 R_1 \\ P_{rcu} &= 3 (I_2')^2 R_2' \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

ค่า Friction losses, Windage losses และOutput Power สามารถรวมกันโดยเรียกว่า Mechanical losses (P_m) ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 เป็นการหาค่าสลิปของมอเตอร์

$$P_m = 3(I_2')^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (4)$$

$$s = \left(\frac{n_s - n_r}{n_s}\right) * 100 \quad (5)$$

และสามารถหาค่าความต้านทานโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าตามสลิปดังสมการที่ 6

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (6)$$

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนการส่งผ่านกำลังงานทางด้านสเตเตอร์มายังโรเตอร์ของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ 7

$$\left.\begin{aligned} P_{in} &= P_{scu} + P_{rcu} + P_{core} + P_{f\&w} + P_{out} \\ P_{in} &= (I_1)^2 R_1 + (I_2')^2 R_2' + P_{core} + (I_2')^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s}\right) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

ในการหาค่า Power Output ของมอเตอร์หาได้ในขณะที่มอเตอร์ทำงานซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

ถ้า $S > 0$ โดยที่ $P_{out} > 0$

จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถเขียนสมการที่ 8-10 ได้ดังนี้

$$P_{out} = P_{in} - \left(P_{scu} + P_{rcu} + P_{core} + P_{f\&w}\right) \quad (8)$$

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \quad (9)$$

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad \text{N-m} \quad (10)$$

โดยที่ T = Torque (N-m)

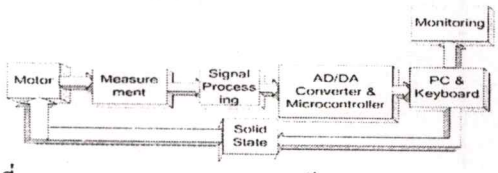
P_{out} = Power output (w)

ω_r = Angular speed of rotor (rad/s)

3. ฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์

3.1 ฮาร์ดแวร์

ในการศึกษาระบบป้องกันมอเตอร์สามารถแสดงเป็น Block diagram ดังรูปที่ 3

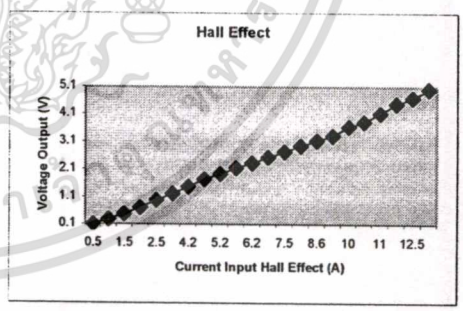


รูปที่ 3. Block diagram ของระบบป้องกัน

จากรูปที่ 3 สัญญาณที่วัดได้จากมอเตอร์ คือ กระแส, แรงดัน, อุณหภูมิขดลวด, ความเร็วรอบ เป็นต้น ดังนั้นตัวตรวจวัดสัญญาณกระแสใช้ฮอลล์เอฟเฟคต์ (Hall Effect) ซึ่งมีข้อดี คือ การตอบสนองที่ดีและความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ต่ำมีแบนด์วิชการใช้งานกว้างและเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นการตรวจวัดสัญญาณกระแสแสดงได้ดังรูปที่4 ส่วนค่า Rใช้เปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นแรงดัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตของวงจรวัดกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 5

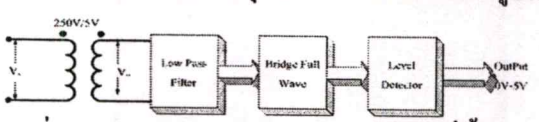


รูปที่ 4. Block diagram ของ Hall Effect ที่วัดกระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์



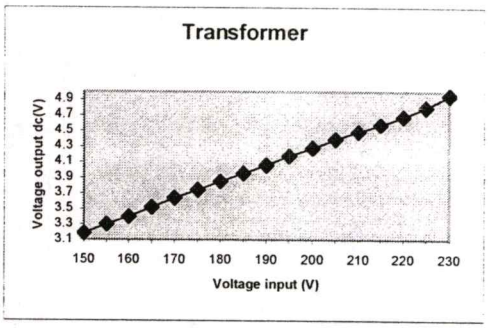
รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตของวงจรวัดกระแส

ในการตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใช้หม้อแปลงแบบ Step down แสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่6 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตที่ขั้วสเตเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตที่วงจรวัดแรงดันได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6. Block diagram วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



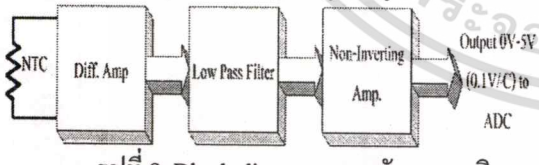
รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตที่สเตเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตของวงจรวัดแรงดัน

จากกราฟรูปที่5 และรูปที่7 สามารถหาค่า V_{rms} และ I_{rms} ได้ดังสมการที่ 11 และสมการที่12

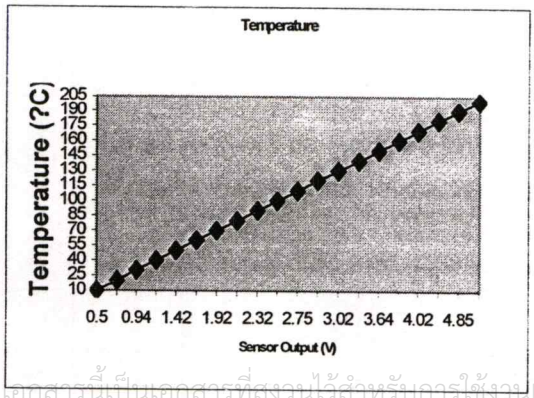
$$V_{rms} = \frac{\left(\Delta t \sum_{i}^{n} V_i^2(t_n)\right)^{1/2}}{n} = \frac{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots V_n^2}}{n} \quad (11)$$

$$I_{rms} = \frac{\left(\Delta t \sum_{i}^{n} I_i^2(t_n)\right)^{1/2}}{n} = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots I_n^2}}{n} \quad (12)$$

ในการวัดอุณหภูมิใช้ NTC (Negative Temperature Coefficient)[4] ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังนั้นต้องมีวงจรอีเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เป็น Linearizer เพื่อแก้ไขคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นวงจร Linearizer ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Differential Amp และ Inverting Amp ที่ทำหน้าที่ Linearization ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำ(Low Pass Filter)ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนออกจากระบบก่อนเข้า ADC ของ MCS-51 แสดงได้ดัง Block diagram รูปที่ 8 โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันเอาต์พุตวงจรวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 9

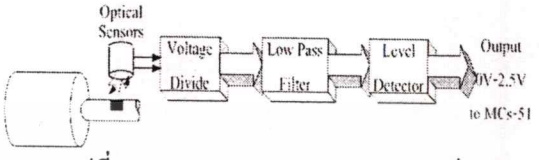


รูปที่ 8. Block diagram วงจรวัดอุณหภูมิ

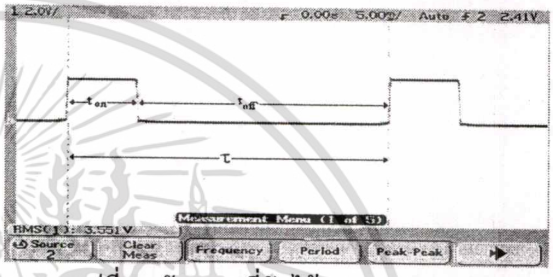


รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดัน

วงจรวัดความเร็วรอบมอเตอร์ใช้ Optical Sensor แบบสะท้อนแสง(reflective)[4], [5] ซึ่งมีตัวรับส่งในตัวเดียวกัน สัญญาณที่ได้จากตัว Optical sensor เป็นสัญญาณพัลส์ โดย 1 พัลส์ต่อหนึ่งรอบ แสดงได้ดัง Block diagram รูปที่ 10 สัญญาณที่ได้จาก Optical Sensor แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10. Block diagram วงจรวัดความเร็วรอบ



รูปที่ 11.สัญญาณที่วัดได้จาก Optical sensor

จากรูปที่ 11 สามารถหาความถี่ต่อรอบการหมุนของเพลามอเตอร์ดังสมการที่ 13 [5]

$$\tau = \tau_{on} + \tau_{off} \Rightarrow \tau = \frac{1}{f} \quad (13)$$

หลักการวัดความเร็วรอบด้วย Optical Sensor แบบสะท้อนแสง สมมุติให้การสะท้อนแสงจำนวน k ครั้ง ดังนั้นจะได้สัญญาณจำนวน k พัลส์ต่อรอบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{k}{2\pi}$ พัลส์ต่อเรเดียน และเนื่องจากมอเตอร์มีอัตราเร็ว ω_m รอบต่อนาที หรือ เท่ากับ $\frac{2\pi\omega_m}{60}$ เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องวัดอัตราเร็วรอบแบบ Optical Sensor ดังสมการที่ 14 และเมื่อสัญญาณผ่านการนับของไมโครคอนโทรลเลอร์สัญญาณถูกหารด้วยค่า N ทำให้ได้สัญญาณป้อนกลับมีความถี่ดังสมการที่ 15 เพราะฉะนั้นได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 16

$$\left(\frac{k}{2\pi}\right)\left(\frac{2\pi\omega_m}{60}\right) = \frac{k\omega_m}{60} \quad (14)$$

$$f = \frac{k * \omega_m}{60 * N} \quad (15)$$

$$\omega_m = \frac{f * N * 60}{k} \quad (16)$$

เมื่อ k,N = 1

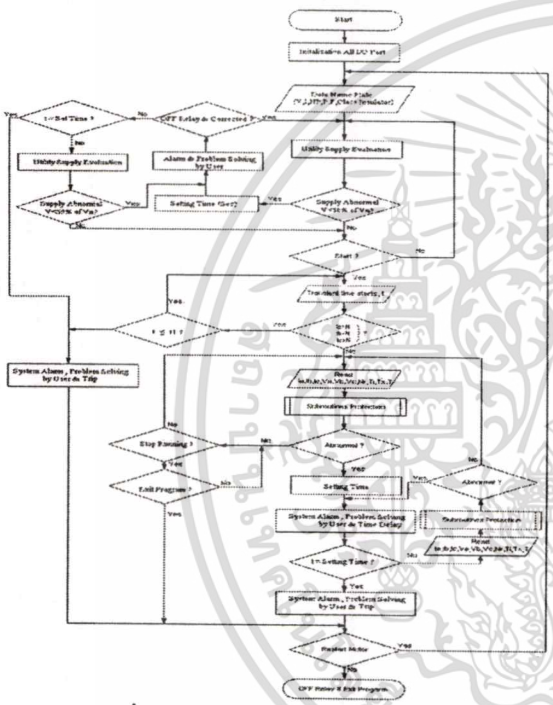
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นได้สมการที่ 17

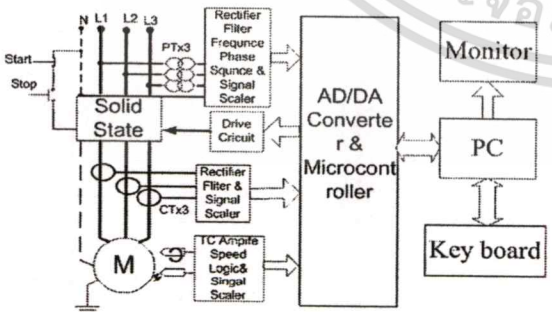
$$\omega_m = N_r = f * 60 \quad rpm \qquad (17)$$

3.2 ซอฟแวร์และการใช้งาน

ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมการทำงานเป็นขั้นตอนตามรูปที่ 12 ซึ่งโปรแกรมส่วนใหญ่เป็นการเรียกใช้งานผ่านโปรแกรมย่อยต่างๆ (Subroutine) ของระบบป้องกันและการป้องกันมอเตอร์ทำตามมาตรฐาน IEEE [6] การใช้งานของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จัดสร้างนี้ โดยการสั่งงานผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ การต่อใช้งานระบบป้องกันแสดงได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12. Flow Chart ของระบบป้องกัน



รูปที่ 13. การต่อวงจรใช้งานของระบบป้องกัน

4. ผลการทดลอง

เป็นการนำทฤษฎีดังกล่าวมาเขียนเป็นโฟลว์ชาร์ตโดยออกแบบฮาร์ดแวร์ให้มีความสัมพันธ์ซอฟแวร์โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 1 และรูปที่14 ถึง 16

5. สรุปผลการทดลอง

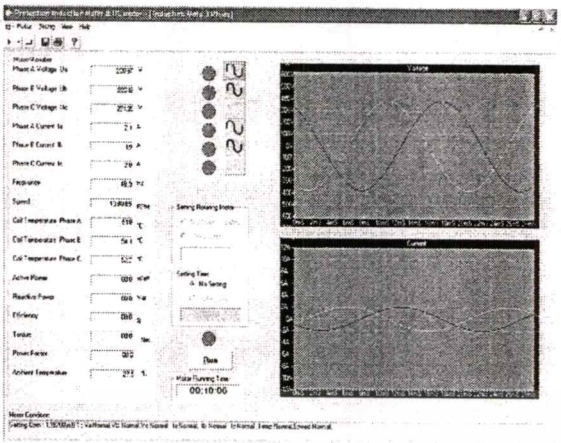
ในการศึกษาระบบป้องกันมอเตอร์ขนาด 1 HP ที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์มีความไวในการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ± 1%ของการแปลงสัญญาณ ADC โดยตรวจวัดสัญญาณทุกๆ 20 mS และเก็บข้อมูลสภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์โดยใช้เวลา 20 ms ในการแยกสาเหตุความผิดปกติ ถ้าเกิดความผิดปกติที่รุนแรงมากใช้เวลา100msในการปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง และถ้าความผิดปกติไม่รุนแรงระบบจะ Alarm โดยทำการตรวจสอบระยะเวลาความผิดปกตินานเกินไปหรือไม่ จากตารางที่ 1 เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบระบบป้องกัน เมื่อตรวจพบความผิดปกตินั้นระบบป้องกันทำการวิเคราะห์ความผิดปกตินั้น ว่าเกิดความผิดปกติชนิดไหนและทำการปลดวงจรออกระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการปลดออกจากระบบออกภายในระยะเวลา 5-10 วินาที โดยระบบป้องกันมีคุณสมบัติของ ADC ดังนี้

Input Voltage Supply	± 5V
Converting time for per channel	20 μ S
Resolution	8 bit

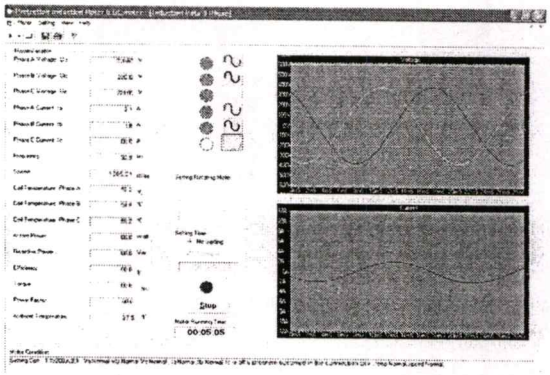
ส่วนระบบป้องกันมอเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

ระบบการทำงานของระบบป้องกัน		เวลาที่ใช้
ระบบไฟฟ้า 3เฟส	220V-240V ± 1% 380V-416V ± 1%	
กระแสต่อเฟส	1A-20A ± 3%	
ความถี่	50-60Hz	
แรงดันสูงสุด	10%	1-30วินาที
แรงดันต่ำ	10%	1-30วินาที
แรงดันไม่สมดุล	2%-10%ปรับได้	1-30วินาที
กระแสไม่สมดุล	2%-10%ปรับได้	1-30วินาที
Start	Solid State	

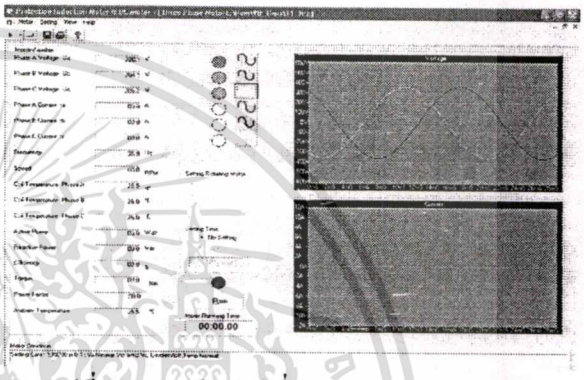
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14. ภาวะปกติของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 15. ความผิดปกติของกระแสเฟส C



รูปที่ 16. ความผิดปกติที่เกิดจากเฟส Aและเฟส B

ตารางที่1. ผลการทดลองเมื่อเกิดความผิดปกติที่สภาวะต่าง

ความผิดปกติทดสอบ	Voltage (V)			Current (A)			Nr(rpm)	Temp	State
	ϕA	ϕB	ϕC	ϕA	ϕB	ϕC			
ไม่ทำงาน	0	0	0	0	0	0	0	*	OFF
ไม่มีกระแสไฟฟ้า 3 เฟส	220	220	220	0	0	0	0	*	OFF
ไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ขดลวด เฟสA	220	220	220	0	2.15	2.19	1378	*	OFF(7mS)
เมื่อขดลวดเฟส A Short รอบ	<220	>220	220	>2.56	2.21	2.14	1379	*	OFF(6mS)
แรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟส ปกติ	220	220	220	2.01	1.95	2.03	1380	*	ON
แรงดัน A สูงกว่ากำหนด	237	220	220	2.16	1.98	1.86	1350	*	OFF(6mS)
แรงดัน A ต่ำกว่ากำหนด	204	220	220	1.53	1.89	1.94	1356	*	OFF(8mS)
แรงดัน A, B สูงกว่ากำหนด	237	237	220	2.16	2.17	1.92	1352	*	OFF(7mS)
แรงดัน A, B ต่ำกว่ากำหนด	204	204	220	1.49	1.32	1.91	1350	*	OFF(5mS)
แรงดัน A, B, C สูงกว่ากำหนด	237	237	237	2.14	2.18	2.16	1356	*	OFF(5mS)
แรงดัน A, B, C ต่ำกว่ากำหนด	204	204	204	1.32	1.23	1.45	1350	*	OFF(5mS)

โดยที่ * = ไม่พิจารณา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Guttler and Kantz "Induction motor failure detection using geometric signal Separation", Electrical Machines and Power System, 2000, vol.28, pp.515-536, Taylor and Francis.

[2] P.J.Tavner and J. Peman, Condition Monitoring of Electrical Motors. Reaserch Studies Press Ltd., Letchworth, Herfordshire, 1987, England.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[3] พิชิต ลำยอง, "เครื่องกลไฟฟ้า1, Electrical Machine1" พิมพ์ครั้งที่ 2, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ตุลาคม 2539, กรุงเทพฯ

[4] พจนฎ สุวรรณมณี, เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น,พิมพ์ครั้งที่1,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้าที่ 176-183,272-279

[5] วิชัย ศังขจันทรานนท์,"ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง2",พิมพ์ครั้งที่5 มิถุนายน 2539, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น),หน้า 648-651, 786-790

[6] IEEE Std C37.96-2000, "IEEE Guide for AC Motor Protection", 30 March 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวสารลาดกระบัง
Ladkrabang Engineering Journal
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,Bangkok 10520

วันที่ 8 เมษายน 2548

เลขที่อ้างอิง 1021

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณวรโชติ ลาภพูนผล วิจิตร กิณเรศ ประภาษ ไพรสุวรรณา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง-ต่ำกว่าปกติควบคุมคอมพิวเตอร์ (Protection Induction Motor Over and Under Voltage Using Computer) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวสารลาดกระบัง บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 21 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2547

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง-ต่ำกว่าปกติ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

Protection Induction Motor Over and Under Voltage Using a Computer

วรโชติ ลาภพูนผล วิจิตร กิณเรศ ประภาษ ไพรสุวรรณา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยเริ่มจากการศึกษาถึงปัญหาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า, การขาดหายของกำลังไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่ง หรือการไม่เท่ากันของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยบทความนี้เป็นการพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Software และ Hardware การวิเคราะห์ข้อมูลเขียนด้วยโปรแกรม Visual Basic 6

Abstract

This paper proposes the developed protection system for three-phase induction motor. The study is Electrical problems commonly are caused by unstable voltage, phase losses unbalance voltage which can damage the induction motor. This paper proposes, a protection system for induction motor have been developed using a computer and protection equipment. The study is divided into two parts as software and hardware. These data were then analyzed the computer by using the program written in VB6.

1. บทนำ

ในระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้โรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นตัวรับกำลังไฟฟ้ามาใช้ โดยทั่วไปมักประสบปัญหาความยุ่งยากหรือเสียหายอันเนื่องจากความผิดปกติจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบางช่วงเวลา ทำให้เกิดความชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์ ยังทำให้เกิดการหยุดชะงักของขบวนการผลิตในโรงงาน ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างมากต้องมีการป้องกันความผิดปกติที่เกิดขึ้น

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ [1]

- ความผิดปกติที่เกี่ยวกับโหลด
- ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า
- ความผิดปกติภายในตัวมอเตอร์

ในบทความนี้ได้พิจารณาถึงกรณีที่เกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าต่างๆ มีดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าอย่างกระทันหันที่เกิดขึ้นจากข้อขัดข้องของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า
- การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมายังโหลดอาจมีค่าสูงหรือต่ำเกินกว่าย่านปลอดภัยของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การขาดหายของกระแสไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งของระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันหรือการขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง ทำให้เกิดอันตรายขึ้นกับตัวมอเตอร์ได้

2. ทฤษฎี

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า [2], [3]

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ถ้าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในภาวะสมดุล สามารถเขียนเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 1 เมื่ออยู่ภาวะปกติ แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟส V_1, V_2, V_3 และกระแส I_1, I_2, I_3 แต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน ทำให้กระแสที่สายนิวทรอลเท่ากับศูนย์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_1 = V_2 = V_3 \quad (1)$$

$$I_1 = I_2 = I_3; I_N = 0 \quad (2)$$

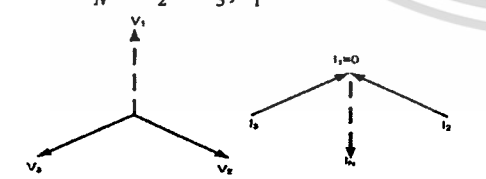


รูปที่ 1 เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในภาวะสมดุล

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเกิดขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ได้ดังรูปที่2 ซึ่งส่งผลให้มอเตอร์สร้างแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ(Back emf.) ขึ้นแทนแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขาดหายไปในเฟสนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_1 \approx V_2 = V_3 \quad (3)$$

$$I_N \approx I_2 = I_3; I_1 = 0 \quad (4)$$



รูปที่ 2. เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เมื่ออยู่ในภาวะไม่สมดุล

ในการขาดหายไปของแรงดันไฟฟ้าในเฟสใดเฟสหนึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ยังปกติอยู่จะรับกระแสเพิ่มขึ้นจากปกติ ทำให้ขดลวดสเตเตอร์เกิดความร้อนขึ้น เป็นสาเหตุของปัญหาการชำรุดเสียหายของมอเตอร์

$$\%V_{UN} = \frac{Max\left[\left|V_a - V_{avg}\right|, \left|V_b - V_{avg}\right|, \left|V_c - V_{avg}\right|\right]}{V_{avg}} * 100 \quad (5)$$

โดยที่ $V_{agv} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$

ในการคำนวณค่าแรงดันไม่สมดุลด้วยคอมพิวเตอร์ใช้สมการที่ 5 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า [3] แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่แรก คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อเฟสน้อยกว่าแรงดันเฉลี่ย

$$V_{max} \le V_{agv} \quad \%V_{UN} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{agv}} * 100 \quad (6)$$

- กรณีที่สอง คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อเฟสมากกว่าค่าแรงดันเฉลี่ย

$$V_{max} > V_{agv} \quad \%V_{UN} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}} * 100 \quad (7)$$

ในทำนองเดียวกันการหาค่ากระแสไม่สมดุลใช้สมการที่ 5 ซึ่งเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสได้ดังสมการที่ 6

$$\left.\begin{aligned} I_{max} \le I_{agv} \quad \%I_{UN} &= \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{agv}} * 100 \\ I_{max} > I_{agv} \quad \%I_{UN} &= \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} * 100 \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

โดยที่ $\%V_{UN}$ คือ Percentage Voltage Unbalance

V_a, V_b, V_c คือ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

V_{agv} คือ แรงดันเฉลี่ยทั้ง 3 เฟส

V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ละเฟส

V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ละเฟส

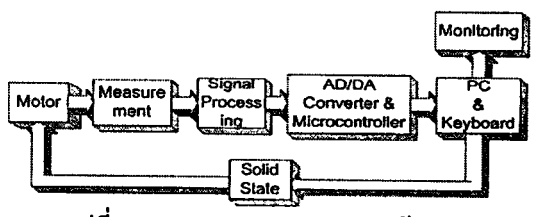
I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดแต่ละเฟส

I_{min} คือ กระแสไฟฟ้าต่ำสุดแต่ละเฟส

I_{agv} คือ กระแสเฉลี่ยทั้ง 3เฟส

3. ภาคควบคุม

3.1 ฮาร์ดแวร์



รูปที่ 3. Block diagram ของระบบป้องกัน

จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนของ Measurement

ทำหน้าที่ วัดสัญญาณจากตัวมอเตอร์ เช่น แรงดัน กระแส ความเร็ว เป็นต้น

- ส่วนของ Signal Processing

ทำหน้าที่ ขยายสัญญาณที่วัดได้และแยกแยะสัญญาณตามชนิดสัญญาณของมอเตอร์

- ส่วนของ AD/DA Converter

ทำหน้าที่ แปลงสัญญาณอะนาลอกให้เป็นดิจิตอล

- ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์

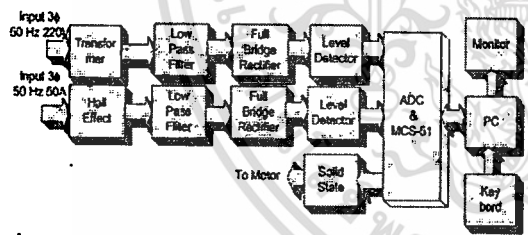
ทำหน้าที่ วิเคราะห์ข้อมูลความผิดปกติต่างๆ ส่งข้อมูลให้ PC และตัดต่อการทำงานของมอเตอร์

- ส่วนของ PC

ทำหน้าที่รับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์และแยกแยะข้อมูลตามชนิดของสัญญาณที่วัดได้จากมอเตอร์ และส่งข้อมูลให้ Monitor เพื่อแสดงผลการทำงานให้ผู้ใช้งานทราบถึงสภาวะการทำงานของมอเตอร์และรับคำสั่งจาก Key board

- ส่วนของ Solid State

ทำหน้าที่ตัดต่อการทำงานของมอเตอร์สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ 20 A ที่แรงดัน 600Vac



รูปที่ 4. Block diagram การตรวจวัดแรงดันและกระแส

Block diagram ในรูปที่ 3 สามารถแยกการวัดสัญญาณต่างๆ เช่น แรงดัน, กระแส และส่วนต่างๆของระบบป้องกันแรงดันสูง-ต่ำกว่าปกติได้ดังรูปที่ 4 สามารถแบ่งหน้าที่การทำงานของแต่ละบล็อกต่างๆได้ดังนี้

- ส่วนที่รับแรงดันไฟฟ้า (Transformer)

ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ารับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาทำการลดขนาดของแรงดันลงให้เหมาะสมกับการใช้งาน

- วงจรกรองสัญญาณ (Low Pass filter)

ทำหน้าที่กรองความถี่ต่ำ (Low pass Filter) กรองสัญญาณรบกวนที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า ก่อนที่จะเข้าวงจรเรียงกระแส

- วงจรเรียงกระแส (Full Bridge Rectifier)

ทำหน้าที่เรียงสัญญาณกระแสสลับเป็นกระแสตรง

- วงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าเกิน (Level Detector)

ทำหน้าที่รักษาแรงดันไม่ให้สูงเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งกำหนดไว้ที่ 5 V ก่อนที่เข้า ADC

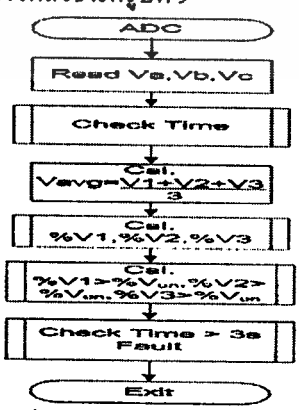
- วงจรตรวจจับกระแส (Current transducer)

ทำหน้าที่วัดกระแสที่สเตเตอร์ โดยใช้ LEM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ Hall Effect เนื่องจากมีข้อดี คือ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำและแบนด์วิชกว้าง

จากหลักการทำงานดังกล่าวสามารถออกแบบวงจรตรวจวัดแรงดันและกระแสได้ ดังรูปที่5 และรูปที่ 6

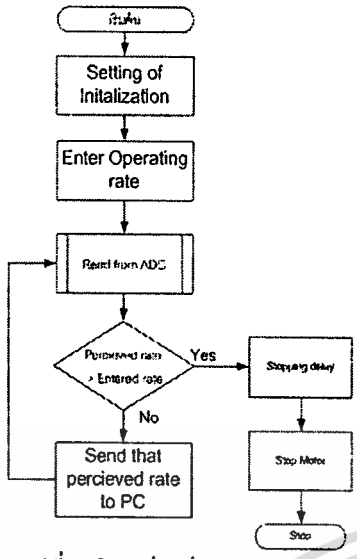
3.2 ซอฟต์แวร์

การทำงานระบบป้องกันแรงดันสูง-ต่ำกว่าปกติด้วยคอมพิวเตอร์ เริ่มจากหน่วงเวลาในช่วง Start เพื่อป้องกันการตัดวงจรออกในภาวะเริ่มต้น เมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะคงที่ระบบทำการวัดแรงดันและกระแส เพื่อนำค่าวัดได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ตั้งไว้ ถ้าค่าที่วัดได้มากกว่าค่ากำหนด ระบบป้องกันหน่วงเวลาตามระยะความผิดปกตินั้นๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าเกินไประบบป้องกันจะตัดออกจากระบบภายใน 5-10 วินาที เป็นต้น ในการทำงานของระบบป้องกันใช้สมการที่ 5 ถึง 8 มาเขียนโฟลว์ชาร์ตได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 การเขียนโปรแกรมใน MCS-51 ใช้โปรแกรม C51 [5] ข้อมูลที่วัดได้ถูกส่งเข้า PC โดยผ่านพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้เขียนด้วยโปรแกรม VB6 ซึ่งขั้นตอนการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันสูง-ต่ำกว่าปกติบน PC แสดงได้ดังโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 9

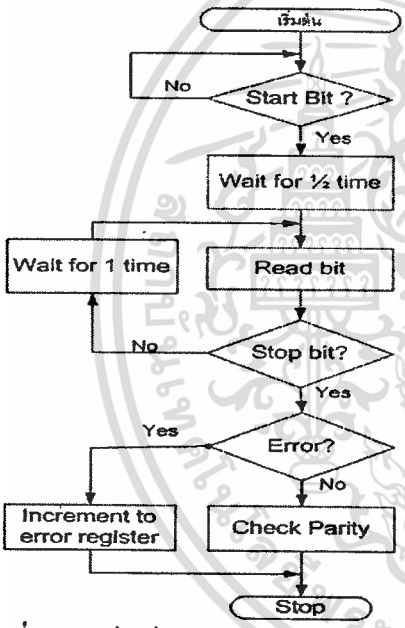


รูปที่ 7. โฟลว์ชาร์ตของการวิเคราะห์แรงดันไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8. โฟลว์ชาร์ตของ MCS-51



รูปที่ 9. โฟลว์ชาร์ตของระบบป้องกันบน PC

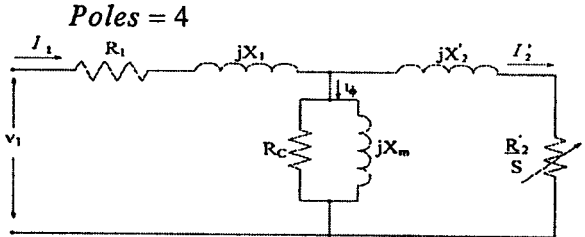
4. ผลการทดสอบ

$P_o = 0.746W, n_r = 1400rpm$

$f = 50Hz, V = 220/380V$

$I = 3.4/2.0A, Insulation\ Class = B$

$Poles = 4$



รูปที่ 10. วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลหาได้จากการทดสอบ No-Load test, Block rotor test และ VI - Method test ผลที่ได้การทดสอบดังนี้

No-load test

Vo	Io	Po
220	1.2	120

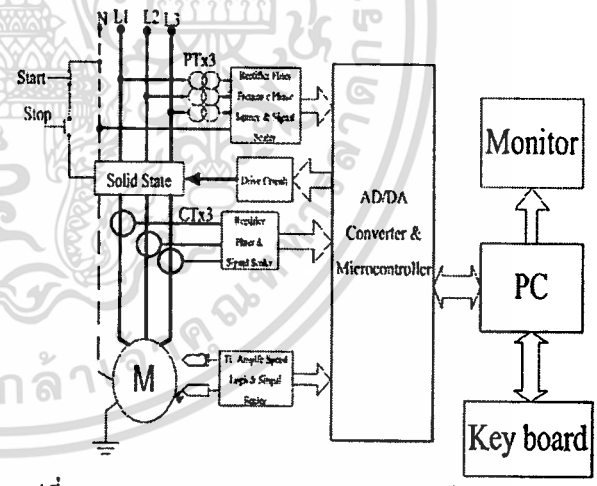
Block Rotor test

Vb	Ib	Pb
96	2	180

VI-Method test

Vdc	19.03	27.36	37.56
Idc	1.03	1.49	2.04

การใช้งานอุปกรณ์ป้องกันแรงดันสูง-ต่ำกว่าปกติมีขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่11โดยทำการทดสอบมอเตอร์ตามขนาดแรงดันต่างๆกันดังตารางที่1



รูปที่11. วงจรทดสอบการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5. สรุป

การป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นั้น โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทฟิลิปส์ P89C51RD2 ขนาด 8 บิตมีแฟลชในตัว โดยมีหน่วยความจำโปรแกรมสูงถึง 64 กิโลไบต์ และมีไทเมอร์/เคาร์เตอร์ ถึง 3 ตัว ความเร็วในการใช้งานเป็น 2 เท่าของสัญญาณนาฬิกา และใช้ PCF8591 ในการแปลง

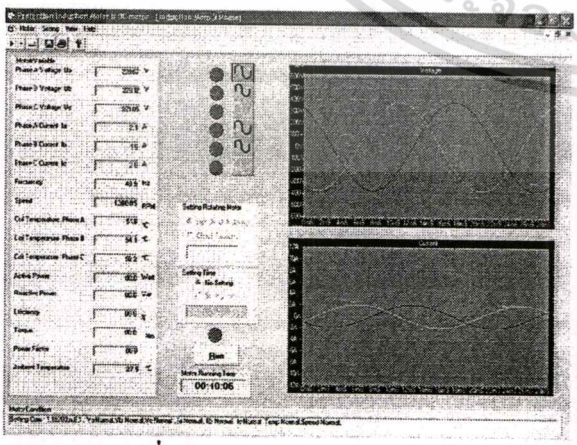
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล ซึ่งเป็นการติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย I^2C ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

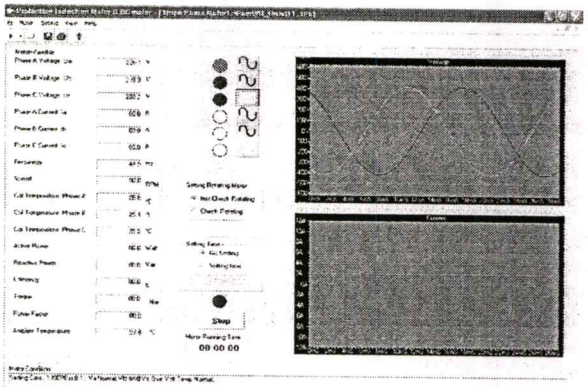
Input Voltage Supply	$\pm$ 5V
Converting time for per channel	20 μ S
Resolution	8 Bit

เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง-ต่ำกว่าปกติของระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้พัฒนาขึ้น ระบบป้องกันสามารถที่จะนำไปใช้ป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ และสามารถทราบถึงสาเหตุของความผิดปกติกับจำนวนครั้งของความผิดปกติเกิดขึ้นบ่อยเพียงใดโดยดูข้อมูลย้อนหลังได้ โดยมีคุณสมบัติของระบบป้องกันดังนี้

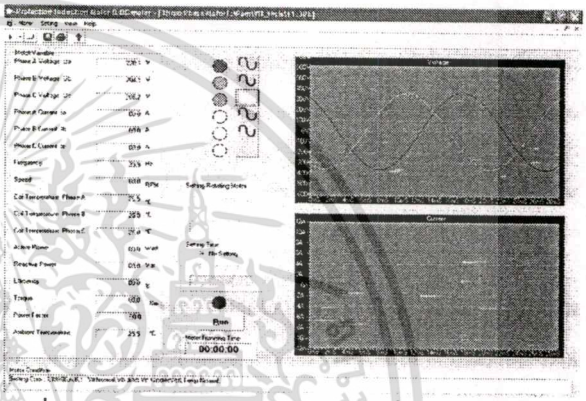
ระบบการทำงาน		เวลาที่ใช้
ระบบไฟฟ้า 3 เฟส	220V-240V $\pm$ 1% 380V-416V $\pm$ 1%	
กระแสต่อเฟส	1A-20A $\pm$ 3%	
ความถี่	50-60 Hz	
แรงดันสูงสุด	10%	1-30วินาที
แรงดันต่ำสุด	10%	1-30วินาที
แรงดันไม่สมดุล	2%-10% ปรับได้	1-30วินาที
กระแสไม่สมดุล	2%-10% ปรับได้	1-30วินาที
Start	Solid State	



รูปที่ 10. ภาวะปกติของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 11. ภาวะความผิดปกติของระบบเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส



รูปที่ 12. ภาวะความผิดปกติของระบบเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 2 เฟส

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, การป้องกันระบบไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 1 สิงหาคม 2545: บ. เอ็มแอนด์อี จำกัด พ.ศ. 2545 หน้า 274

[2] John J. Grainger, William D. Stevenson, JR., Power System Analysis, International Editions 1994; McGraw-Hill, pp14-25.

[3] IEEE Std. C37.96-2000; IEEE Guide for AC Motor Protection.

[4] Cunkas, M., "Protection of Asynchronous Motors Aided PC by means of Microcontroller", Ms Thesis, Konya, Turkey, 2000.

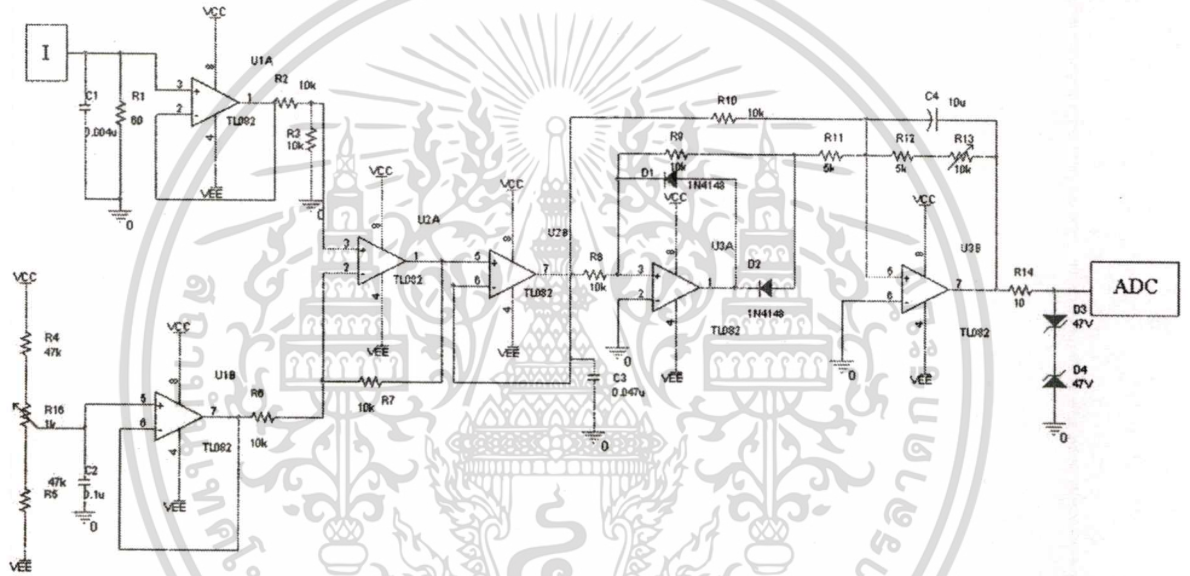
[5] Sila Research; "Architectural Overview of the MHS C51 family"

[6] IEEE Std. 141-1993, "IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants"

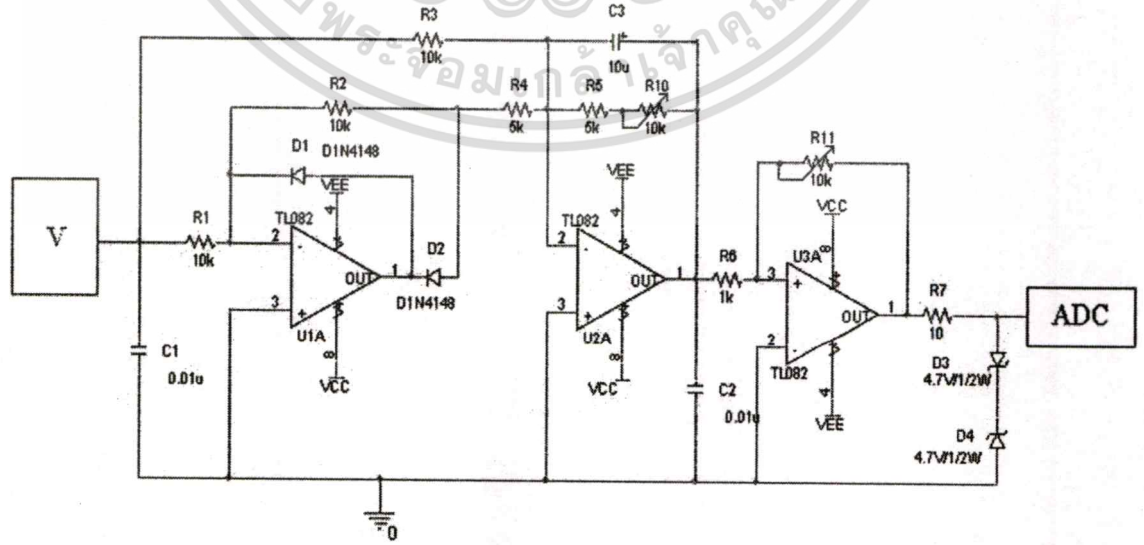
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1. แสดงสภาวะความผิดปกติที่ใช้ในการทดสอบที่ขนาดแรงดันต่างๆ

ความผิดปกติทดสอบค่าที่กำหนด 220V	Voltage (V)			Current (A)			Nr (rpm)	สภาวะ Solid State
	ϕ A	ϕ B	ϕ C	ϕ A	ϕ B	ϕ C		
ไม่มีแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส	0	0	0	0	0	0	0	OFF
แรงดันปกติทั้ง 3 เฟส	220	220	220	2.01	1.95	2.03	1380	ON
แรงดันเฟส A สูงกว่ากำหนด	237	220	220	2.16	1.98	2.01	1350 ลดลง	OFF (3 Sec)
แรงดันเฟส A ต่ำกว่ากำหนด	204	220	220	1.53	1.89	1.94	1356 ลดลง	OFF (4 Sec)
แรงดันเฟส B, C สูงกว่ากำหนด	220	237	237	1.92	2.17	2.16	1352 ลดลง	OFF (1 Sec)
แรงดันเฟส A, B ต่ำกว่ากำหนด	204	204	204	1.49	1.32	1.91	1350 ลดลง	OFF (1 Sec)



รูปที่ 5. วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส



รูปที่ 6. วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISSN 0125-1724

วิศวสาร

ลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2542

1. การวิเคราะห์และเลือกใช้หม้อแปลงจำหน่ายเพื่อลดค่าพลังงานสูญเสีย
ภัฐวุฒิ วงศ์ไทญ่ ศุลี บรรจงจิตร นิพัทธ์ กอบชนจันดา บุญเลิศ ชัยชาญ เจษฎ์ศิริ เลิศอุดมโชคชัย

2. การหาค่าคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซีนิวโรคอนโทรลเลอร์
ชัยรัตน์ วิสุทธิรัตน์ ศุลี บรรจงจิตร นิมิต บุญภริมย์

3. การออกแบบระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. กรณีศึกษาแม่เมาะ 3 - ราชบุรี โดยใช้คอมพิวเตอร์
ชำนิ ใจประดิษฐ์ธรรม ศุลี บรรจงจิตร มนตรี สีสาจันดาไกรฤกษ์

4. การวางแผนระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้รูปแบบของ Kohonen
จิรภัทร อุปนิมห์ มนตรี สีสาจันดาไกรฤกษ์

5. การพัฒนาการออกแบบเต้าเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ
สมัน หนองหลัย ชัยวุฒิ จัตรคชัย

6. โหลดโฟลว์ด้วยการแทรกสลับแบบฟิลเตอร์นิวตัน
ประภาส โพธิสุวรรณชาญ คนึวัฒน์ จงวนิชเสถียร กุลชาติ อินทรกำแหง

7. การปรับปรุงการตอบสนองของวงจรพลังงานสูงสุดของโซ่ขวางวงจรไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 2 ด้านพุช
คมกฤษ ธนสุวรรณ ประภาส โพธิสุวรรณชาญ คนึวัฒน์ จงวนิชเสถียร

8. วิเคราะห์ค่าสูญเสียทางแสงของสายใยแก้วนำแสงประเภทดัชนีขั้นบันไดที่ใช้งานในระบบสื่อสารสองทาง
นพรัตน์ ประเสริฐสมิตสิริ กฤษดากร อิสริยการ สมนึก ไกลวิศวิศร์

9. การวิเคราะห์ปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานร่วมกันของระบบ IEEE 1394 และระบบไร้สายความเร็วสูงชนิด HIPERLAN
กัญจน์ ชีพลีประเสริฐ พิทยุ งามนิครรชา ชวลิต ธนไพบูลย์ ไกรสิน สังวาลย์ ศิริชัย ตรุณศิริสงวน

10. วิธีการปรับปรุงผลตอบสนองความถี่ให้ได้ตามมาตรฐาน IEC61 โดยการใช้วงจรป้อนกลับแบบแรงดันและกระแสร่วมกัน
พรบุรุษ ยุตติวัฒนา เทอดศักดิ์ อนันโชประภา ไกรสิน สังวาลย์

11. การศึกษาคุณภาพของสัญญาณในระบบประชุมทางไกลที่ส่งผ่าน HDSL
วิชชา ตอกไม้ กอบชัย เตชะหาญ วรภาพย์ ศิครสมบูรณ์ ชาติชาย บุญเจียจันทร์ ธงชัย ชมภูศรี

12. การส่งผ่านจดหมายอิเล็กทรอนิกส์เป็นแฟกซ์
ณัฐพงษ์ พัฒนพงษ์ กอบชัย เตชะหาญ พรพจน์ บุญสุขช่วย ธงชัย อาจสุทธิ์

13. การวิเคราะห์สมรรถนะของ DS-CDMA โดยใช้รองสัญญาณการจางแบบนาคากามิแบบเสพสันพันธ์
นิมล สมบุญ กอบชัย เตชะหาญ สมยศ บุณยะปิยะ

14. การสร้างระบบประมวลผลสัญญาณดิจิตอลที่เวลาจริงแบบขนาน
สายชัยนันท์ หอมจันทร์ สุรพันธ์ ชื่นชัน พิเชษฐ์ ธรังธรรม กอบชัย เตชะหาญ มนูญ พวงทุม

15. การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลที่ทำงานในโหมดของกระแสโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบอิลีทีพ
บุญชัย เบญจลักษณ์ พนมยงค์ ศิริวุฒานนท์ กอบชัย เตชะหาญ วัชญ ดอนพิดันทร์

16. วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่ปรับค่าได้ในโหมดกระแส
อนุรี หล่อสวัสดิ์ศิริ จริยา สิลิตจันลวานนท์ วิภา แสงทิลิทธิ์ ประโมทย์ ราชเสียม

17. ระบบควบคุมแบบดิจิตอลอุปกรณ์กระจายหน่วยควบคุมแบบเครือข่ายเส้นทางเดียว
ภูวรินทร์ นิธวังษี ชาลิต เบญจางคประเสริฐ สุเทิกร เกียรติสุมตร

18. การออกแบบและพัฒนา SNMP Agent
จิรเมธ พราพัฒนาจิรวัฒน์ บรรจง ปิยสาวง

19. การย่างดุลของเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดหนึ่งสูบเพื่อให้เกิดแรงสั่นต่ำสุด
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ วลีพรรณ กันเนื่อง

20. สมรรถนะทางพลศาสตร์ของยางรองสั่นความเร็วสูงด้วยสารหล่อลื่นบัน-นิวตลนิกน
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อุทาน หนูจันทร์แก้ว

21. การทดสอบการโก่งงอของคานแบบคานระยะจาย
อภิชัย เสมศรี

22. การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงที่ได้จากการเปลี่ยนมุมทางแรงกล
อัครเดช สินธุภัค เมืองแก้ว อุดัน

23. สมรรถนะการฉีดพ่นของเครื่องฉีดพ่นสารเคมีแบบแรงดัน
อัครเดช สินธุภัค เมษา มณฑีราลัยพร

24. การคำนวณออกแบบทอร์ชันบาร์เพื่อนำมาทดสอบจากกระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดันภาใช้ใหม่
กุลยา ศรีงามผ่อง อัญชลีพร วาริทวัวัสดิ์ หล่อทองคำ

25. การผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายสิงค์คลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์เป็นสารตะตุ้น
ธีระโยติ ควีธีระวิโรจน์ อัญชลีพร วาริทวัวัสดิ์ หล่อทองคำ

26. วงจรคูณ/หารสัญญาณสองควอดแรนท์ที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์
วินัย ศิริมงคลาด วลัยลักษณ์ ประสงค์สุข วิจิตรา เพียรกิจ วิภาวัยย์ บวดธรีพย์

27. เครื่องควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบ 4 ควอแดรนท์โดยใช้มอดูเลชั่นความถี่
คมสัน กอชัยวาส อนุวัฒน์ จงวนิชเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิเล็กทรอนิกส์

AC Electronic Load

ประภาษ ไพรสุวรรณา อนุวัฒน์ จางวัฒนเลิศ ยุทธนา ลาภพูนผล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึง การสร้างโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อใช้ในการแทนโหลดคงที่ ซึ่งไม่มีความสะดวกในการปรับปรุงวงจร จากการทดลองที่ค่ากระแสต่างๆ กัน และได้ทำการออกแบบให้สามารถตั้งค่ากระแสที่ใช้งานได้หลาย ๆ ค่า โดยอาศัยการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อที่รักษากระแสให้มีค่าคงที่ สามารถที่ตั้งค่ากระแสให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งอาศัยสัญญาณจากไอซี TCA785 ที่มีสัญญาณพัลส์ที่สามารถควบคุมมุมเฟสได้ระหว่าง 0° – 180° ซึ่งสามารถควบคุมสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ และควบคุมการทำงานของไตรแอค เมื่อมีค่ากระแสสูงเกินกว่าค่าความต้องการไอซี TCA785 จะสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับไตรแอค ด้วยมุมที่สูงขึ้น เพื่อที่จะลดค่ากระแส และ ในทางกลับกันเมื่อมีค่ากระแสต่ำกว่าค่าความต้องการไอซี TCA785 จะสร้างสัญญาณจุดชนวนไตรแอคด้วยมุมที่ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังใช้งานคู่กับรีแอคเตอร์อิ่มตัวเพื่อที่จะควบคุมแรงดัน และช่วยควบคุมกระแสการทำงานด้วย

Abstract

This paper describes the design of "AC Electronic Load" in order to substitute fixed electric load. Generally, it is difficult to adjust the fixed load in each test. The design using feedback control for constant current can perform fine settings and vary the designed current values. The firing angle 0°-180° of TCA785 directly controls the triac. As the current value is higher than the setting value, the TCA785 will increase the firing angle and then the current value will decrease. In the other hand, as the current value is lower than the setting value, the TCA785 will decrease the firing angle and then the current value will increase. In addition, we use saturable controlled reactor together with TCA785 in order to control voltage and adjust current following by the setting current.

1. บทนำ

การทดสอบหาค่ากระแสของโหลดค่าคงที่ เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน ๆ คุณสมบัติของสารที่ใช้ทำเป็นโหลดเปลี่ยนแปลง คลาดเคลื่อนเกิดความผิดพลาดขึ้น

จากการทดสอบหาค่ากระแสของโหลดค่าอื่นๆ ต้องนำโหลดค่าคงที่หลายๆตัว มาต่อเข้าไปในวงจร ซึ่งไม่มีความสะดวก ดังนั้นจึงหาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แทนโหลดแบบเดิม (โหลดหนึ่งตัวสามารถเปลี่ยนแปลงกระแสได้ค่าๆหนึ่ง)โดยมีคุณสมบัติที่สามารถตั้งค่ากระแสที่ใช้ทำการทดสอบได้หลายๆ ค่า และรักษาค่ากระแสที่ตั้งไว้ให้มีค่าคงที่อยู่ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ ซึ่งเรียกอุปกรณ์นี้ว่า "โหลดไฟฟ้ากระแสสลับ" โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นตัวช่วยในการควบคุมวงจรไฟฟ้า

2. หลักการของรีแอคเตอร์อิ่มตัว

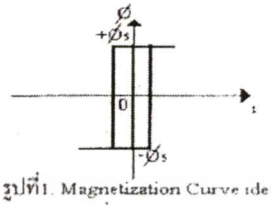
เมื่อกำหนดให้แกนเหล็กที่นำมาใช้ทำรีแอคเตอร์ อิ่มตัวแปรผันควบคุม[2] มีคุณสมบัติของ Magnetization Curve ในลักษณะเส้นหักมุมในเชิง Ideal [3,4] ดังรูปที่ 1

เมื่อนำแกนเหล็กที่มีคุณสมบัติดังกล่าวมาพันขดลวดจำนวน N_1 รอบ และพันขดลวดอีกชุดหนึ่งจำนวน N_2 รอบ ดัง

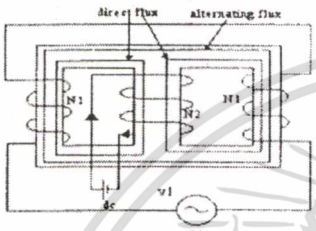
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol.16, No. 4, December 1999

รูปที่2. ซึ่งจะได้อุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าชิ้นหนึ่งซึ่งเรียกว่ารีแอคเตอร์ [1,4]



รูปที่1. Magnetization Curve ideal



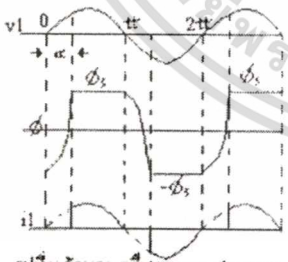
รูปที่ 2 ลักษณะของรีแอคเตอร์อีมตัว

จากรูปที่2.รีแอคเตอร์ที่ใช้เป็นแกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell type) ขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับพันอยู่บนแกนด้านข้างทั้งสองข้าง ส่วนขดลวดควบคุมพันอยู่บนแกนกลางของหม้อแปลง ดังรูปที่2. เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับจะหักล้างพอดีที่ขากลางของรีแอคเตอร์ [2]

เมื่อต่อรีแอคเตอร์เข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่2. V_s ซึ่งเป็นค่า RMSของ v_s มีค่ามากกว่า V_c ซึ่งเป็น RMS Voltageที่เริ่มทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวตามสมการเมื่อ

$$V_s > 4.44\, f N_1 \phi_c = V_c \qquad (1)$$

จะมีช่วงเวลาหนึ่งช่วงที่ปรากฏในแต่ละครึ่งไซเกิลของและลบของV_s ซึ่งเป็นช่วงที่แกนเหล็กไม่อิ่มตัวดังรูปที่3.



รูปที่3. ลักษณะคลื่นของ v_1 ,Ø และ i_1

ช่วงเวลาดังกล่าวกระแส $i_1 = 0$ คือ รีแอคเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นสวิทช์ชนิดหนึ่งได้โดยช่วงเวลาที่ขดนำกระแสมีค่าดังสมการข้างล่าง

จากสมการที่ 3 และ 4 พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดัน V_c สามารถควบคุมค่าพลังงานและช่วงการเกิดอิ่มตัวของแกนเหล็กได้[3,4]

จากสมการที่ 1 จะได้ $\phi = \phi_{(\omega t_1)} + \Delta\phi$ เมื่อ $\omega t_1 = \alpha$

$$\phi = \phi_{(\omega t_1)} + \frac{1}{N\omega}\int_{\alpha}^{\omega t} v\, d\omega$$

$$\phi = \phi_{(\omega t_1)} + \frac{\sqrt{2}V}{N\omega}(1 - \cos\theta)$$

เมื่อ $\phi_{(\omega t_1)} = -\phi_c$, $V = V_c$, $\theta = \pi$, $\phi = \phi$

$$\phi_c = \phi_c + \frac{2\sqrt{2}V_c}{N\omega}$$

$$\phi = \frac{\sqrt{2}V_c}{N\omega}$$

เมื่อป้อนแรงดันด้วย v_s จะได้ $\phi = \phi_c, \theta = \alpha$

$$\phi_c = -\phi_c + \frac{\sqrt{2}V}{N\omega}(1 - \cos\alpha)$$

$$\alpha = 2\cos^{-1}\frac{V_c}{\sqrt{2}V}$$

โดยที่ α คือช่วงมุมไม่อิ่มตัวของแกนเหล็ก

3. การกระตุ้นไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4 การกระตุ้นสนามไฟฟ้ากระแสตรง

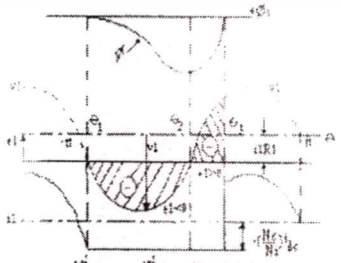
$$mmf_1 + mmf_2 = 0$$

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

$$V = \left[\frac{N_2}{N_1}\right] R_1 I_2 \qquad (7)$$

$$\Phi = \frac{1}{N\omega}\int_{\omega t_1}^{\omega t}(V_1 + R_1 I_2)\,d\omega t + \phi_{(\omega t_1)}, \theta = \omega t = \theta_1 \qquad (8)$$

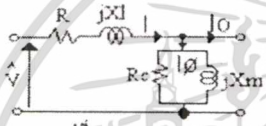
จากรูปที่4. ถ้าไม่มี v_1 ตกคร่อมขด N_1 กระแส I_2 ที่จะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวที่ ϕ ที่สมมติขดนี้มี ขด N_1 ขดนั้น จะมีช่วงที่แกนเหล็กไม่อิ่มตัวเกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าตามสมการที่6 และเนื่องจาก i_1 มีค่าเป็นลบ ช่วงที่แกนเหล็กไม่อิ่มตัวจึงเกิดเฉพาะในช่วงหว่างไซเกิลตรงของ v_1 ในช่วงดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่5.และมีค่าตามสมการที่7 และ8



รูปที่ 5.การเปลี่ยนแปลงของ ϕ_{1,i_1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่5. จะเห็นได้ว่าถ้าปรับ I_{dc} เพิ่มหรือลดก็สามารถปรับมุม θ_1 ซึ่งเป็นมุมระหว่างช่วงแกนเหล็กอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ซึ่ง I_{dc} มีค่าลดลงใกล้ 0 เท่าไร θ_1 ยิ่งมีค่าใกล้เคียง π มากขึ้นเท่านั้น การกระตุ้นไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทิศทางเดียวขึ้นอยู่ที่ขากลาง ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะไปเสริมและหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ จึงมีผลให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าความเหนี่ยวนำลดลง แรงเคลื่อนที่ตกคร่อมรีแอคเตอร์น้อยลง ในทางกลับกันถ้าไม่มีการกระตุ้นไฟฟ้ากระแสตรงค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้น แรงเคลื่อนตกคร่อมรีแอคเตอร์มากขึ้น[2,3,4]



รูปที่ 6 วงจรสมมูล

จากรูปที่4. สามารถที่เขียนEquivalent circuit ดังรูปที่6. ได้วงจรสมมูลของรีแอคเตอร์อิ่มตัวเมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ลดลง(จากสภาวะอิ่มตัว) เทียบกับค่าความต้านทานสมมูลที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Rc) ลดลง ขณะที่ความต้านทานจากขดลวด (R) มีค่าคงที่เสมอ เมื่อค่าความต้านทานทั้งสองรวมกันจะได้ว่าค่าความต้านทานเสมือนมีค่าที่ลดลง [2] ดังสมการที่ 9.

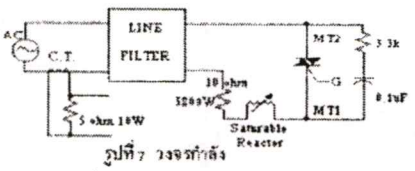
$$Za = (R + Rc) + jX_m \qquad -(9)$$

จากสมการที่9. จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์ (Za) มีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสในวงจรมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงลักษณะการควบคุมกระแส โดยใช้รีแอคเตอร์อิ่มตัวในการควบคุม

โดยที่ jX_m = รีแอคแตนซ์เสมือน

4. วงจรกำลัง

จากความต้องการให้กระแสไฟฟ้าคงที่คลอดช่วงการทำงาน จึงเลือกวงจรควบคุมเฟสแบบควบคุมได้ทั้งสองทิศทาง (Bi-directional Controller) [4] ดังรูปที่ 7.



รูปที่ 7 วงจรกำลัง

จากรูปที่7. ใช้หลักการดึงกระแสโดยอาศัยสัญญาณไอซี TCA785 ควบคุมการปรับมุมทริกของไตรแอค คือ กระแสที่ดึงเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ดึงเริ่มต้น มุมทริกของไตรแอคจะค่อยๆเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้ากระแสที่ดึงเข้ามีค่าลดน้อยลงจากค่าที่ตั้งไว้ทำให้มุมทริกของไตรแอคมีค่าลดลง

นอกจากนี้ในส่วนหนี่ยวนำที่ปรับค่าได้ (รีแอคเตอร์อิ่มตัว)เป็นส่วนช่วยในการดึงกระแสอีกทางหนึ่ง คือ ในส่วนหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้มีขดลวดควบคุม ถ้าค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นกระแสที่ใช้จะน้อยลงแต่ค่าความเหนี่ยวนำน้อยลงกระแสจะมีค่ามากขึ้น

Snubberเป็นตัวถ่ายพลังงานโดยการลดค่า dv/dt ในวงจรควบคุมเฟส คือ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านไตรแอคลดลงเหลือต่ำกว่าค่ากระแสเสียค (Holding Current)แล้ว ไตรแอคจะหยุดนำกระแสจะเปลี่ยนแปลงทางด้านแรงดันครึ่งวัฏไตรแอคโดยทันทีทันใด จะมีค่า dv/dt สูง และผลของ dv/dt นี้เอง เมื่อจากนำ ทำให้เกิดกระแสรั่วไหล (Leakage) ขึ้น ทำแรงดันที่ตกคร่อมไตรแอคจะเปลี่ยนโดยทันทีทันใดได้ด้วยค่า dv/dt ที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีอินดักตีฟในวงจรเสริมทำให้ค่า dv/dt ค่อนข้างสูง เพื่อไม่ให้ค่าแรงดันนี้ทำให้ไตรแอคพัง หรือเป็นสัญญาณรบกวนในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกได้ การแก้คือเพิ่มตัวเก็บประจุขนานกับด้านทานต่ออนุกรมแล้วตกคร่อมที่ขั้วไตรแอค ดังรูปที่7. โดยทำให้แรงดันที่ครึ่งวัฏถัดไปประจุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และพยายามต่อต้านการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว ตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมขดลวดสองขดในไตรแอคจึงไปได้ [illegible]

5. การออกแบบ

5.1 การออกแบบรีแอคเตอร์อิ่มตัว

จากที่กำหนดค่ากระแสสูงสุดของโหลดในวงจรเท่ากับ 14A พิกัดแรงดัน 220V การออกแบบในการออกแบบเกี่ยวกับหน้าตัดของแกนเหล็ก (A) จะเป็นตารางนิ้ว [6]

$$A = \frac{\sqrt{1.1}}{5.58} \qquad \text{(10)}$$

ซึ่งจะได้ขนาดแกนกลาง 3นิ้ว ใช้แกนเหล็ก S-14[7] สำหรับขดลวดด้านข้างในขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับหาได้จากสมการที่1 และรูปที่6 โดยที่ประมาณค่าความต้านทานมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์[4] จึงได้สมการ

$$I = \frac{V}{Z} \qquad \text{(11)}$$

$$I = \frac{V}{jX_L} \qquad \text{(12)}$$

ดังนั้น $jX_L = 4.44\,fNBA$ (13)

โดยกำหนดให้ E=110V(ขดลวดสองขดต่อคล่อมกัน) และแบ่งกันรับแรงดันอย่างละครึ่งf=50Hz,B=1.2T,A=3x1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดารางนิ้ว ซึ่งจะได้ N=150รอบ จึงควรใช้จำนวนรอบให้มากกว่าเพื่อให้ค่าอินดัคแตนซ์มากกว่าต้องการเล็กน้อย[4]จากค่ากระแสสูงสุด14A จึงได้ลวด SWG-14[7]

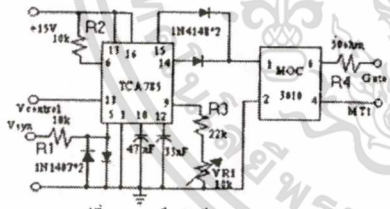
การออกแบบขดลวดควบคุมสามารถหาได้จากสมการข้างล่าง [3,4,7]

$$NI = Hl = \phi\Re = \frac{Bl_g}{\mu_0} \qquad (14)$$

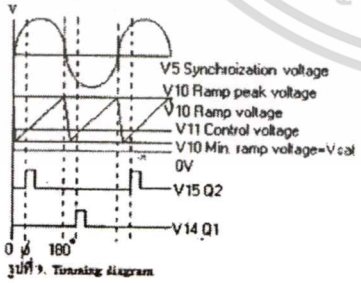
โดยกำหนดให้มีการยกระดับความเข้มสนามแม่เหล็ก B=1.8T(จากเดิม1.2Tที่ทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว),lg=2.33 มิลลิเมตร,I=3A ซึ่งได้ NI=3337A.t ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กต้องมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ประมาณ 2 เท่าเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้น B-H Curve [3,4] จึงได้จำนวนรอบขดลวดควบคุมมากขึ้น ดังนั้นขดลวดควบคุมจึงมีจำนวน 2,225 รอบ และขดลวดทนกระแสสูงสุด 3A ใช้ลวด SWG-20 [7]

5.2 การออกแบบวงจรควบคุม

ในการตรวจจับกระแสจากวงจรกำลัง โดยการใช้หม้อแปลงกระแส(CT) เพื่อควบคุมการจุดชนวนของไตรแอค โดยอาศัยการกำเนิดสัญญาณพัลส์และการเลื่อนพัลส์ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลง สามารถแสดงวงจรควบคุมการสร้างพัลส์ดังรูปที่ 8.และ9.



รูปที่ 8. วงจรสร้างพัลส์



รูปที่ 9. Timming diagram

จากรูปที่ 8. เมื่อมีแรงดัน Vsyh เข้ามาโดยผ่าน R1เพื่อที่ลดขนาดสัญญาณลง และไดโอดที่ต่อขนานเพื่อที่จำกัดขนาดแรงดันที่เข้าสู่ไอซี TCA785 เอาต์พุตที่ขา14 และ15 ตามTiming diagram รูปที่9.ซึ่งเป็นพัลส์บวกขนาด 50 Hz โดยผ่านไดโอดเมื่อรวมพัลส์ทั้งสองเข้าด้วยกันที่ความถี่ 100 Hz เอาท์พุทไอซี Opto Isolator MOC3010 ถูกเปลี่ยนเป็นพัลส์บวกและลบสลับกัน เมื่อเข้าสู่การควบคุมขาเกตของไตรแอค VR1 ทำหน้าที่กำหนดความลาดชันสัญญาณแรมป์(ramp)ภายในไอซี TCA785 ส่งผลให้สามารถปรับมุมทริกช้าหรือเร็วได้ การเลื่อนพัลส์จะควบคุมโดยแรงดันดีซีที่ขา11ของไอซี TCA785 ซึ่งได้มาจากแรงดันที่แปลงมาจากกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแส(CT) คือถ้าแรงดันที่แปลงได้สูงกว่า สัญญาณพัลส์จะเลื่อนเข้าสู่มุม 180° ถ้าแรงดันที่แปลงได้น้อยกว่า สัญญาณพัลส์จะเลื่อนเข้าสู่มุม 0 ° [10]

6. ผลการทดลอง

6.1 การทดลองค่าคงที่ของกระแส ทดสอบทั้งแบบไม่มีการควบคุมป้อนกลับและแบบมีการป้อนกลับ

วิธีการทดลอง

ตั้งค่ากระแสต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 A ถึง 14 A แล้วทำการบันทึกค่าทุก ๆ 10 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1. และตารางที่ 2.โดยกำหนดให้

I คือ กระแสเริ่มต้นที่ตั้งไว้ (A)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)

ตารางที่1. แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสเมื่อไม่มีการป้อนกลับ

t(นาที)	I(A)						
	2A	4A	6A	8A	10A	12A	14A
0	2	4	6	8	10	12	14
10	1.9	4	5.9	8	10	11.9	13.9
20	2	3.9	5.9	7.9	9.9	11.9	13.9
30	1.9	3.8	5.8	7.9	9.9	11.9	13.8
40	1.9	3.9	5.9	7.8	9.8	11.8	13.8
50	1.9	3.8	5.9	7.8	9.8	11.8	13.8
60	1.9	3.8	5.9	7.8	9.8	11.8	13.8

ตารางที่ 2. แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสเมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับ

t(นาที)	I(A)						
	2A	4A	6A	8A	10A	12A	14A
0	2	4	6	8	10	12	14
10	2	4	6	8	10	12	14
20	2	4	6	8	10	12	14
30	2	4	6	8	10	11.9	14
40	2	3.9	5.9	8	9.9	11.9	14
50	2	3.9	5.9	8	9.9	11.9	14
60	2	3.9	5.9	8	9.9	11.9	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

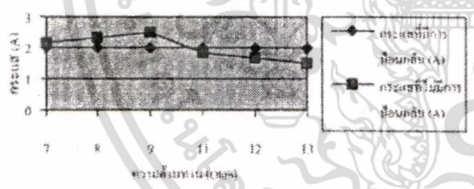
6.2 การทดลองเพื่อทดสอบค่าคงที่ของกระแสเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันที เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับ กับแบบไม่มีการป้อนกลับ

ตารางที่ 3. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดทันทีในระบบที่มีการป้อนกลับ

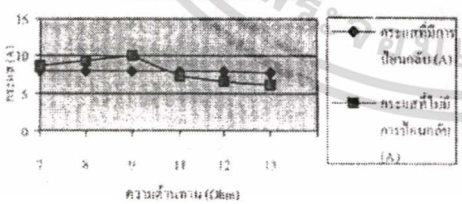
กระแสเริ่มต้น	ความต้านทานรวมที่คาดหวัง (Ohm)			ความต้านทานรวมที่เพิ่มขึ้น (Ohm)		
(A)	9.3	8.6	8.0	11	12	13
2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A
8A	8A	8A	8A	8A	8A	8.8A
14A	14.5A	14.5A	14.9A	15.1A	14.9A	15A

ตารางที่ 4. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดทันทีในระบบที่ไม่มีการป้อนกลับ

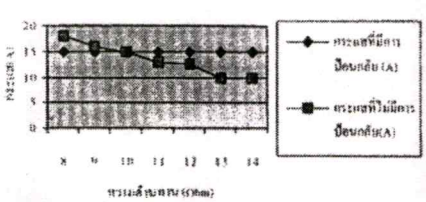
กระแสเริ่มต้น	ความต้านทานรวมที่คาดหวัง (Ohm)			ความต้านทานรวมที่เพิ่มขึ้น (Ohm)		
(A)	9.3	8.6	8.0	11	12	13
2A	2.2A	2A	2A	2A	2A	2A
8A	8.7A	8A	8A	8A	8.9A	8.8A
14A	15.2A	16.3A	17.5A	12.8A	11.7A	10A



รูปที่8. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีเมื่อกระแสเริ่มต้นที่ 2 A



รูปที่9. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีเมื่อกระแสเริ่มต้น 8 A



รูปที่10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีเมื่อกระแสเริ่มต้น 14 A

6.3 การทดลองเพื่อดูค่า ของเพาเวอร์แฟคเตอร์,สารโมนิกและค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนโดยการใช้โมดูเลเตอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นไปในวงจร

วิธีการทดสอบ

จากการเปลี่ยนค่ากระแสตั้งแต่ 2 A – 14 A โดยการปรับค่าของกระแสตรง ที่ป้อนเข้าเซอร์โวมอเตอร์ และทำการควบคุมค่าคงที่ของกระแสที่มุมจุดชนวนของไตรแอค เพื่อที่จะให้เซอร์โวมอเตอร์นำกระแส ให้ตามมุมจุดชนวนของโหลด

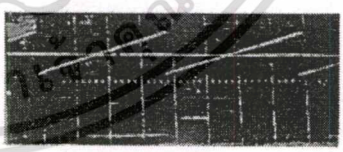
PF. = ค่าของเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ (Power Factor)

D.F. = ค่าความเพี้ยนของกระแส(Distortion Factor)

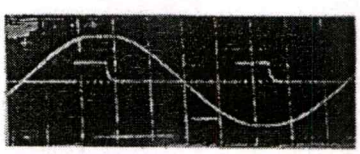
ตารางที่ 5 แสดงค่าของเพาเวอร์แฟคเตอร์,สารโมนิก,กำลังไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้า

V (Volts)	I (A)	Power (W)	PF	THD	Harmonic (%)		
					1	3	5
225	2	160	0.33	0.9	94.4	32	7.4
224	4	280	0.21	0.92	95.9	27	9
224	6	480	0.21	0.95	96.3	26.3	4
224	8	480	0.24	0.97	95.1	23.8	2.8
224	10	760	0.34	0.98	97.9	2	2
224	12	1170	0.44	0.99	98	16.2	1.8
224	14	1700	0.54	0.99	99.2	12.4	1.8

6.4 ผลของรูปคลื่นที่ได้จากการวัด

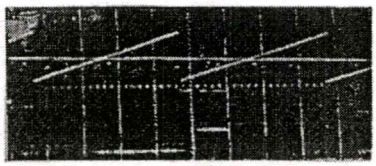


รูปที่ 11. กราฟแสดงสัญญาณควบคุมที่ขา 11 ของไอซี TCA785 เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณแรมป์ภายในรูปที่9 (4 V/div, 2.5 ms/div)



รูปที่ 12. กราฟแสดงสัญญาณพัลส์บวกขนาด100 Hz เมื่อเทียบกับแรงดันซิงค์รูปที่9.(5V/div, 2 ms/div)

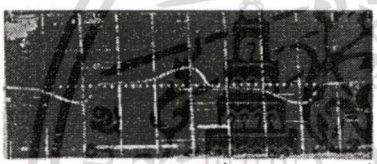
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



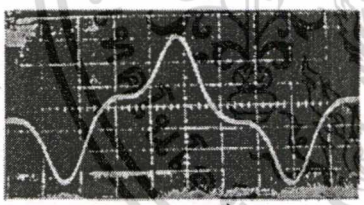
รูปที่13. กราฟแสดงสัญญาณชุดควบคุมแบบปิดเทียบกับสัญญาณแรงกริ (4V/div, 2.5 ms/div)



รูปที่14.กราฟแสดงสัญญาณกระแสจุดที่ไม่มีโหลดความเหนี่ยวนำโดยอาศัยการปรับมุมทริกเกอร์ที่การสึงกระแส (10 V/div, 5 ms/div)



รูปที่15.กราฟแสดงสัญญาณกระแส เมื่อมีโหลดความเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้า DC ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ 10 V (10 V/div, 4 ms/div)



รูปที่16.กราฟแสดงสัญญาณกระแส เมื่อมีโหลดความเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้า DC ของชุดควบคุมแรงดัน 30V(10V/div, 4ms/div)

7. สรุป

จากการทดลองค่าคงที่ของกระแสไฟฟ้า ปรากฏว่าโหลดไฟฟ้ากระแสสลับที่สร้างขึ้น มีค่ากระแสค่อนข้างคงที่ คือมีค่าที่ผิดพลาดประมาณ 0.1A – 0.2A และ ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์อยู่ในช่วง 0.2 – 0.54 ล้าหลัง (Lagging) ภายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ1ชั่วโมง เมื่อทำการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีทันใดที่กระแสต่ำๆระบบก็จะยังคงรักษาค่าคงที่ของกระแสไว้ได้ตลอดไปแต่เมื่อทำการทดสอบที่ขนาดของกระแสสูงๆระบบจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้น อันเนื่องมาจากสภาพภายในวงจรที่มีค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์อิ่มตัวจึงทำให้กระแสมีลักษณะต่อเนื่องมากยิ่งขึ้นโดยการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่16กับรูปที่16.แต่ผลของรีแอคเตอร์อิ่มตัวทำให้มุมทริกของไดแอคน้อยกว่ามุมของโหลดที่เกิดขึ้นจริงตามรูปที่ 6. เนื่องจากกระแสกระตุ้น Iϕ ที่ไหลเข้าในส่วนวงจรขนาน Re และ jXm มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพิกัดของกระแส ดังนั้นค่าของเฟสของมันได้ ในทางปฏิบัติของ existing branch สามารถประกอบด้วย R และ jXl ที่ต่ออนุกรมกันกระแสที่เกิดขึ้นล้าหลังแรงดันอยู่เป็นมุม[9]

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega l}{R}\right)$$

และนี่คือข้อจำกัดแต่ผลดีได้ยังมีค่าที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการป้อนกลับต่อเข้ามา

8. เอกสารอ้างอิง

[1] G. J. Angerbaver, Principles of DC and AC Circuit, Delmar Publisher Inc. Singapore, third edition, 1989

[2] E. E. Brumbach, Electronic Variable Speed Drives, Delmar Publishers, Singapore, 1996

[3] พิชัย ล้ายอง เอกสารประกอบการสอนวิชา Electrical Machine I คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง หน้า18-35,หน้า37-50

[4] วีระ พิเชฐจันธิญ เอกสารประกอบการสอนวิชา Power Electronic Circuit คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน้า69-75

[5] M.H. Rashid, Power Electronic Circuit, devices and Applications, Prentice Hall International, 1988

[6] เอกสารประกอบการสอนวิชา Transformer, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ [illegible], กรุงเทพมหานคร,2538.

[7] W. T. McLyman Transformer and Inductor Design Handbook, pp110, pp137-140, pp289-297

[8] นิพนธ์ ภวกุล และ ชนาธรณ์ มาโพศาลสินนม, " วิเคราะห์รีแอคเตอร์ที่มีตัวในแกนเหล็ก" ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สจล., 2538

[9] ยืน ภู่วรวรรณ, อิเลคทรอนิคส์กำลังและการควบคุม, ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครคอมพิวเตอร์,คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า127-129

[10] Reference Semiconductor Techincal Data Bipolar IC TCA785 ordering code Q67000 - A2321

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย วรโชติ ลาภพูนผล เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน 2514 ที่จังหวัด พิจิตร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2537

ปี 2537-2544 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ที่ บ.พร้อมเทคโนเซอร์วิส จำกัด

ปี 2534 2537 เข้าทำงานในตำแหน่งช่างซ่อมบำรุง โรงแรมแอมบาสเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้