

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

INSULATION FAILURE DETECTOR FOR 3Ø INDUCTION MOTORS



นายกิตติวัฒน์ สมนึก

นายธนินท์ พนาคำรง

นายนิรันดร์ แซ่ดี

นายปณัศย์ อุษยชัย

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

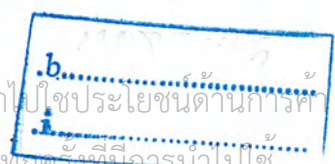
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....55596

วัน,เดือน,ปี 20 พ.ค. 2548



เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
INSULATION FAILURE DETECTOR FOR 3Ø INDUCTION MOTORS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

INSULATION FAILURE DETECTOR FOR 3Ø INDUCTION MOTORS

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติวัฒน์ สมนึก รหัสนักศึกษา 43010032
2. นายชนันท์ พนาดำรง รหัสนักศึกษา 43010165
3. นายนิรันดร์ แซ่ลี รหัสนักศึกษา 43010224
4. นายปณัสย์ อุษุข รหัสนักศึกษา 43010238



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.เมกิมชาติ یمانพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

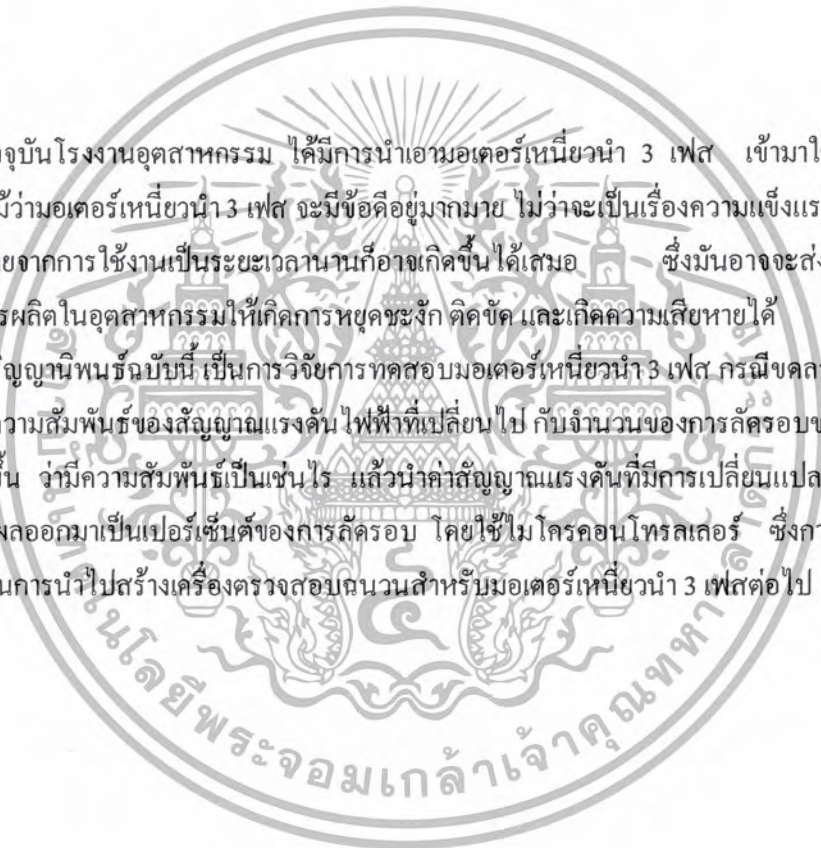
## เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1. นายกิติวัฒน์ สมนึก 43010032
  2. นายชนันท์ พนาคำรง 43010165
  3. นายนิรันดร์ แซ่ลี 43010224
  4. นายปณัสย์ อุษุข 43010238
- รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา  
อ.เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2546

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรม ได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลาย ถึงแม้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีข้อดีอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความแข็งแรง ทนทาน แต่ความเสียหายจากการใช้งานเป็นระยะเวลานานก็อาจเกิดขึ้นได้เสมอ ซึ่งมันอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมให้เกิดการหยุดชะงัก ดัดขัด และเกิดความเสียหายได้

ปริญญาพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิจัยการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส กรณีขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ เพื่อดูความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป กับจำนวนของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ว่ามีความสัมพันธ์เป็นเช่นไร เมื่อนำค่าสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ ไปเปรียบเทียบกับผลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลัดรอบ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปสร้างเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อไป



## INSULATION FAILURE DETECTOR FOR 3Ø INDUCTION MOTORS

Kitiwat Somnuk

Tanan Panadamrong

Nirun Saelee

Panus Auisui

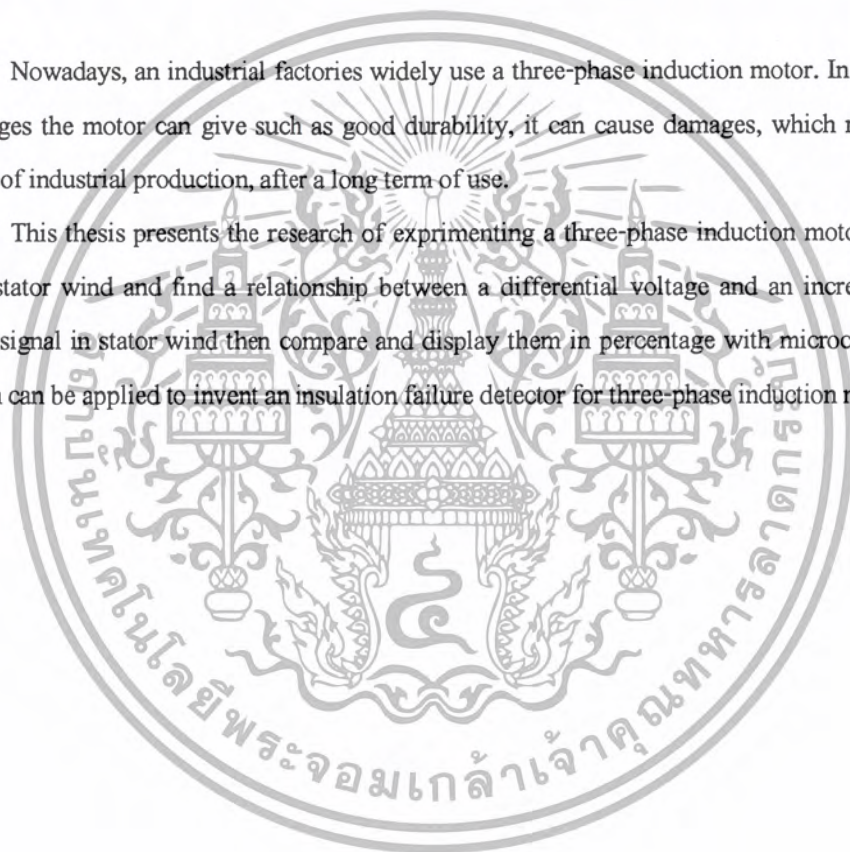
Asisst.Prof.Dr.Vijit Kinnaret Advisor

Chalermchat Manop Advisor

### ABSTRACT

Nowadays, an industrial factories widely use a three-phase induction motor. In spite of many advantages the motor can give such as good durability, it can cause damages, which may stopped a process of industrial production, after a long term of use.

This thesis presents the research of experimenting a three-phase induction motor with a short turned stator wind and find a relationship between a differential voltage and an increment of short turning signal in stator wind then compare and display them in percentage with microcontroller. This research can be applied to invent an insulation failure detector for three-phase induction motors.



### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นบุคคลสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ศส.ดร.วิจิตร กิณเรศ และ อ.เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก และต้องขอขอบคุณพี่ๆ ป.โท และพี่ๆ ในห้อง PMC ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายกิตติวัฒน์ สมนึก	43010032
นายธนนท์ พนาดำรง	43010165
นายนิรันดร์ แซ่ลี	43010224
นายปลั่งยศ อุษสุษ	43010238



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	4
2.1 รูปแบบของการพันขลวดที่สเตเตอร์	4
2.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขลวดสเตเตอร์	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่สเตเตอร์	10
บทที่ 3 เทคนิคผสมรวมแรงดันไลน์ – นิวตรอล และการแสดงผล	15
3.1 การวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วย MCSA	15
3.2 การตรวจจับการลัดวงจรโดยใช้สัญญาณแรงดัน	16
3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในเครื่องมือทดสอบ	21
3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	22
3.5 ทฤษฎีการใช้งานจอแสดงผล	26
บทที่ 4 วงจรการทดลอง	32
4.1 การออกแบบวงจรการทดลอง	32
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	35
4.3 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	38
4.4 วิธีการทดสอบและการปรับแต่งวงจร	39
บทที่ 5 ผลการทดลอง	41
5.1 ผลของสัญญาณแรงดันของระบบที่สภาวะต่างๆ	41
5.2 ผลของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากมอเตอร์ 3 แรงม้า	42
5.3 ผลของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากมอเตอร์ 5 แรงม้า	54
5.4 การแสดงผลจากหน้าจอ (LCD)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 วิจัยและสรุปผลการทดลอง

62

บรรณานุกรม

64

ภาคผนวก

65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 ประเภทความเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	1
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก	4
รูปที่ 2.2 แสดงการพันขดลวดแบบ Form Wound coil	5
รูปที่ 2.3 แสดงการพันขดลวดแบบ random Wound coil	5
รูปที่ 2.4 แสดงการพันขดลวดของ Two slot ,Double layer stator winding	6
รูปที่ 2.5 โหมคความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขดลวดต่อแบบสตาร์	7
รูปที่ 2.6 Symmetrical patterns	8
รูปที่ 2.7 Single phasing patterns	8
รูปที่ 2.8 Nonsymmetrical pattern without grinding	9
รูปที่ 2.9 Nonsymmetrical pattern with grinding	9
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการใช้งานของฉนวน	11
รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดรอยที่ผิวขดลวด	12
รูปที่ 3.1 ระบบการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ MCSA	15
รูปที่ 3.2 สเปคตรัมที่เกิดขึ้นในกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	16
รูปที่ 3.3 วงจรขยายกลับเฟส	21
รูปที่ 3.4 วงจร Unity-gain follower	21
รูปที่ 3.5 วงจร Summing Amplifier	22
รูปที่ 3.6 แสดงไคโอะแกรมขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458	23
รูปที่ 3.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 กับ LCD	31
รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบวงจรการทดลอง	32
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรของภาคตรวจสออบแหล่งจ่ายไฟ และภาคตรวจสอบมอเตอร์	33
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรรับสัญญาณจากภาคตรวจสอบมอเตอร์ และภาคตรวจสออบแหล่งจ่ายไฟ	34
รูปที่ 4.4 เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	34
รูปที่ 4.5 แสดงวงจรภายในเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส(1)	36
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรภายในเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส(2)	37
รูปที่ 4.7 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	38
รูปที่ 4.8 การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการทดลอง	40
รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณแรงดันของระบบที่สภาวะต่างๆ	41
รูปที่ 5.2 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ	42
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ กับเปอร์เซ็นต์การลัดรอบ ของขดลวดที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ	44
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ กับเปอร์เซ็นต์การลัดรอบของขดลวดที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ	45
รูปที่ 5.6 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป	46
รูปที่ 5.7 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป	47
รูปที่ 5.8 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป	48
รูปที่ 5.9 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป	49
รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะสมดุล	50
รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะไม่สมดุล 3%	51
รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะไม่สมดุล 5%	52
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่ค่าสลิปต่างกัน	53
รูปที่ 5.14 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ	54
รูปที่ 5.15 แสดงการเริ่มทำงานของเครื่อง	55
รูปที่ 5.16 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 1%	55
รูปที่ 5.17 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%	56
รูปที่ 5.18 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%	56
รูปที่ 5.19 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%	57
รูปที่ 5.20 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบมากกว่า 5%	57
รูปที่ 5.21 แสดงการไม่ลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์	58
รูปที่ 5.22 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 1%	58
รูปที่ 5.23 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 2%	59
รูปที่ 5.24 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 3%	59
รูปที่ 5.25 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 4%	60
รูปที่ 5.26 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 5%	60
รูปที่ 5.27 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ 6%	61
รูปที่ 5.28 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์มากกว่า 7%	61

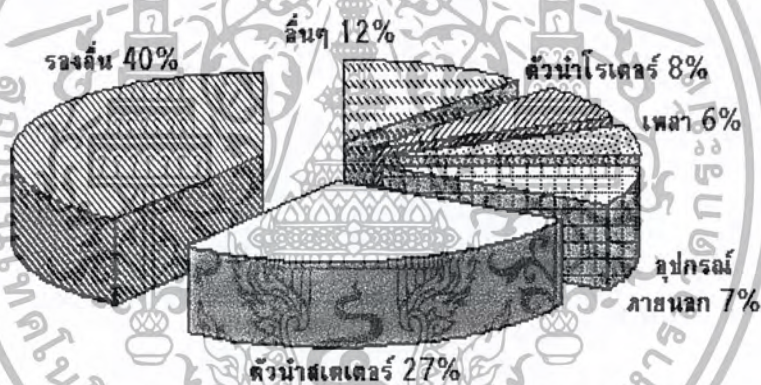
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ได้เปลี่ยนมาใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor) แทนดีซีมอเตอร์ (DC Motor) กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน การบำรุงรักษาค่า และที่สำคัญมีราคาถูก แต่ถึงอย่างไรก็ตาม มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ก็ยังมีจุดอ่อนที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ ทั้งนี้พบว่าสาเหตุหลักของความเสียหายในมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งหมดประมาณ 27% จะมีสาเหตุมาจากการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ [1] ซึ่งการชำรุดเสียหายดังกล่าว ถ้าไม่สามารถตรวจสอบได้อย่างทันที่ทันที ก็จะมีผลทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวมอเตอร์ได้ โดยถ้าปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำงาน ก็จะมีผลต่อการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต



รูปที่ 1.1 ประเภทความเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ในบางครั้งอาจเกิดมาจากการลุกลามของปัญหาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์สำหรับบางกรณีนั้น ก็สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยประสบการณ์ แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องอาศัยสัญญาณที่อยู่ภายในตัวมอเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์ เช่น แรงดัน กระแส เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นต้นจึงจะสามารถตรวจสอบได้ ดังเช่นกรณีของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรหรือที่เรียกชื่อสั้นๆ ว่าลัดรอบ (Short-tum) ที่มีสาเหตุมาจากการชำรุดของฉนวนลวดตัวนำ ซึ่งการชำรุดของฉนวนจะมีสาเหตุหลักมาจาก อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้น จากการทำงานที่ผิดพลาดของการระบายความร้อนและสาเหตุอื่น [2] ซึ่งกรณีนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นจากภายนอกได้ โดยกรณีที่เกิดการลัดรอบที่จำนวนของขดลวดน้อยๆ ซึ่งเป็นระยะการชำรุดเสียหายในระยะเริ่มแรก สัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้ ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญดังกล่าว จึงได้สร้างชุดเครื่องมือต้นแบบสำหรับ การตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขดลวด โดยใช้ผลรวม ของแรงดันเฟส ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทั้งนี้ในการทดสอบมอเตอร์จะต้องต่อแบบวาย (Y) และไม่ต่อสายนิวทรัลเข้ากับระบบ นอกจากนี้แล้วยังมีวงจรสำหรับตรวจสอบความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟ เพื่อความถูกต้องของการวิจัยด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.เพื่อศึกษาเชิงวิจัยลักษณะของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลัดรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
- 2.เพื่อศึกษาอิทธิพลต่างๆ และแนวทางการแก้ไขของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์
- 3.เพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจสอบจนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สามารถตรวจสอบได้ในลักษณะออนไลน์ (On-Line)

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้ในลักษณะออฟไลน์ (Off-Line) และออนไลน์ (On-Line) โดยสามารถแสดงผลเป็นแบบดิจิทัล ที่สามารถบอกถึงระดับของสัญญาณฟอลต์ นอกจากนี้แล้ว ยังมีวงจรเพื่อบอกถึงระดับความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟ ในขณะที่ทำการทดสอบด้วย

การศึกษาของโครงการคือ ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้แก่ 3 และ 5 แรงม้า โดยทำการพิจารณาถึงลักษณะของสัญญาณฟอลต์ในกรณีต่างๆ ได้แก่ ที่จำนวนการลัดรอบต่างๆ คือ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 รอบ ทำการทดสอบที่สถานะมีโหลด และ ไม่มีโหลด และที่สถานะแรงดันไม่สมดุลต่างๆ เป็นต้น ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจสอบจนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าจนวนเริ่มเสื่อมคุณภาพมากน้อยเพียงใด

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์
3. ออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบสัญญาณแรงดันจากการลัดรอบ ของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
4. จัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการสร้างชุดทดสอบ และสร้างชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ออกแบบลักษณะการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สำหรับทดสอบ
6. ทดสอบการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเก็บผลที่ได้
7. ศึกษาการเขียนโปรแกรม ของไมโครคอนโทรลเลอร์(PIC18F458 ) เพื่อนำมาต่อร่วมกับชุดทดสอบ ให้แสดงผลของสัญญาณการลัดรอบของขดลวดออกมา
8. จัดทำโครงสร้างเพื่อใส่ชุดทดลอง
9. ประเมินการทำงานของเครื่องมือทดสอบ รวมถึงการแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ได้
10. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงาน



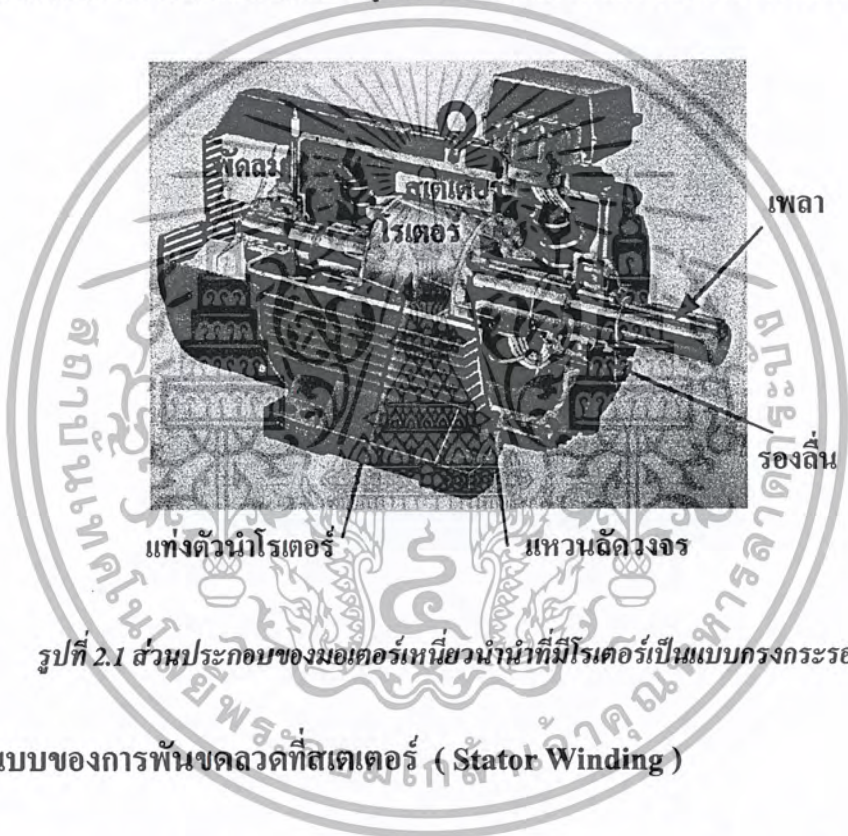
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐานและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ (Stator) ส่วนหมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) และในปัจจุบันได้แบริ่ง (Bearing) [6] ออกมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมีทั้งส่วนที่เคลื่อนที่และอยู่กับที่ ซึ่งในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะส่วนประกอบสเตเตอร์ที่มีความสำคัญที่จะนำไปใช้ในโครงงานวิจัยนี้

สเตเตอร์ เป็นส่วนที่อยู่กับที่ และมีโครงสร้างเหมือนกับสเตเตอร์ของมอเตอร์ชนิดอื่นๆ คือทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนกันและอัดเป็นแท่งรูปทรงกระบอกเพื่อทำหน้าที่เป็นร่องวางขดลวด 3 เฟส



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก

#### 2.1 รูปแบบของการพันขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator Winding)

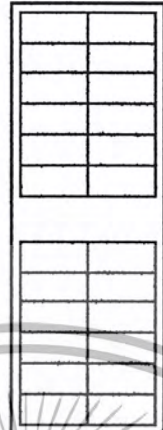
ลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสลอต (Slot) เดียวกัน และแบบที่มีแท่งตัวนำ 2 ขนาดอยู่ในสลอต เดียวกัน

##### 1. การพันแบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสลอตเดียวกัน (Individual coils)

การพันขดลวดสเตเตอร์ ในรูปแบบนี้มีลักษณะเด่น คือ ในแต่ละช่องสลอตจะมีแท่งตัวนำหลายๆ แท่งอยู่ในสลอตเดียวกันแต่ทุกแท่งตัวนำนั้นจะมีขนาดเท่าๆ กัน โดยเราสามารถแบ่งได้ออกเป็นอีก 2 แบบย่อย คือ

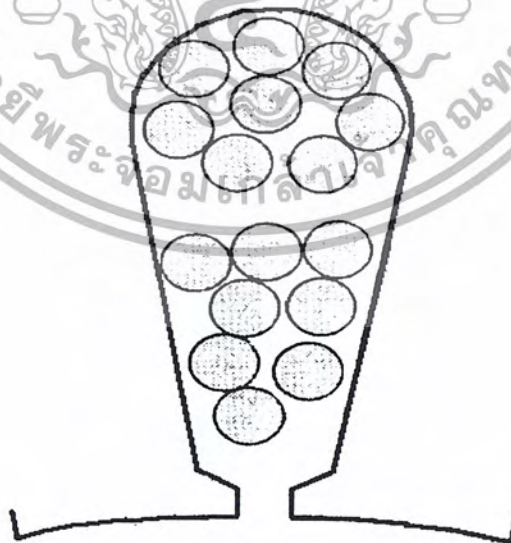
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Form Wound coil การพันในลักษณะนี้มักจะพบมากในมอเตอร์ ที่มีขนาดใหญ่ โดยแท่งตัวนำที่นำมาใช้พันลงในร่องสลอตนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวนแท่งของขดลวดในแต่ละช่องสลอตจะมีจำนวนมากแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการพันขดลวดแบบ *Form Wound coil*

- Random Wound coil การพันขดลวดในลักษณะนี้มักจะพบมากในมอเตอร์ ที่มีขนาดเล็กๆ โดยแท่งตัวนำที่นำมาพันลงในร่องสลอตนั้นจะมีไม่มากนัก และการพันขดลวดในลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแท่งขดลวดตัวนำเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3

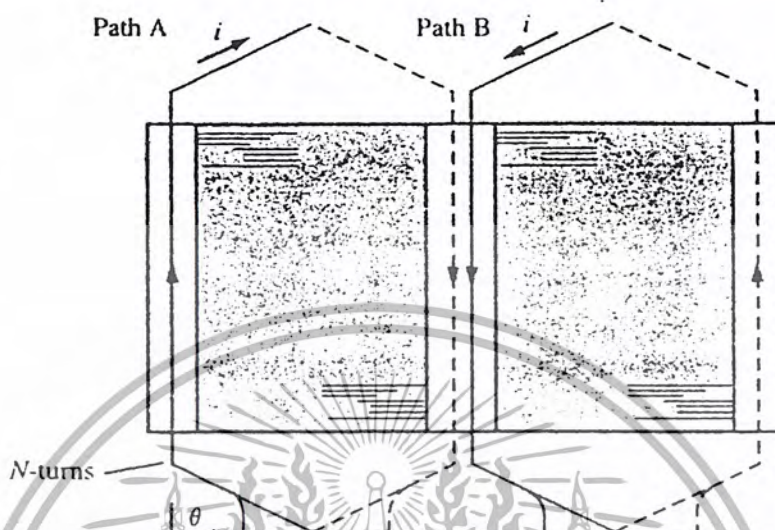


รูปที่ 2.3 แสดงการพันขดลวดแบบ *random Wound coil*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แบบที่มีแท่งตัวนำ 2 ขนาดอยู่ในสลอต เดียวกัน (Double layer winding)

ลักษณะการพันขดลวดในรูปแบบนี้คือการพันขดลวดที่มีขดลวด 2 ขนาดอยู่ในร่องสลอต เดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการพันขดลวดของ Two slot, Double layer stator winding

ในโครงงานนี้มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองมีลักษณะการพันแบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสลอตเดียวกัน

### 2.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

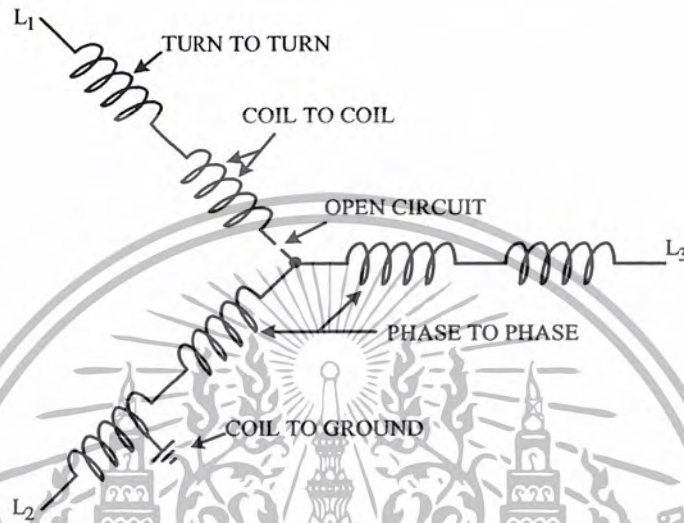
ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ จะเป็นการพิจารณาร่วมกันระหว่าง โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้น (Failure modes) ที่ขดลวดสเตเตอร์ กับลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น (Failure patterns) ที่ขดลวดสเตเตอร์ [3] โดยพิจารณาได้ดังนี้

#### โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

ในการวิเคราะห์โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ พิจารณาได้ว่ามีโหมดของความเสียหายที่เกิดขึ้น อยู่ด้วยกัน 5 ประเภท [3] แสดงดังรูปที่ 2.5 ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn to turn)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงขด (Coil to coil)
- การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงเฟส (Phase to phase)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงกราวด์ (Coil to ground)
- และกรณีเปิดวงจร (Open circuit)



รูปที่ 2.5 โหมดความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขดลวดต่อแบบสตาร์

จากการตรวจสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มอเตอร์ที่มีการพันเป็นแบบลุ่ม มักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มเดินบ่อยครั้ง สวดตัวนำในแต่ละขดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมาย จะเป็นสาเหตุทำให้มีบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (สั่น) ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบ ภายในขดขดลวด การลัดวงจรดังกล่าวจะนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ส่งผลให้จำนวนของขดลวดตัวนำเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ แล้วก็ทำให้เกิดการลัดรอลงกราวด์ที่สลอตในที่สุด ซึ่งผลของการลัดรอลงกราวด์นั้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งไว้ที่ตัวมอเตอร์ด้วย เพราะเวลาเริ่มเกิดการลัดรอลงกราวด์มอเตอร์ยังคงทำงานต่อไป ก็ยังส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มไปเรื่อยๆ จนทำให้เกิดเฟสถึงเฟสฟอลต์ หรือกราวด์ฟอลต์ (Ground fault) จนทำให้มอเตอร์หยุดทำงานในที่สุด

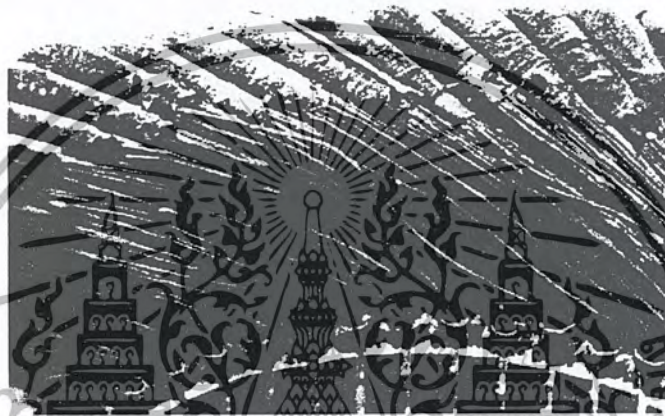
ในการวิเคราะห์โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ของทั้ง 5 ประเภท จะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกจะมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็กๆ เท่านั้น คือ รอบถึงรอบ แล้วก็จะลุกลาม ทำให้เกิดอีกสี่สถานะตามมา [3] ดังนั้นถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอลงกราวด์ได้ก็จะสามารถ แก้ไขปรับปรุง หรือวางแผนการซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากอีกสี่สถานะที่มีอันตรายสูงกว่า มีอัตราเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นลดลงไปด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

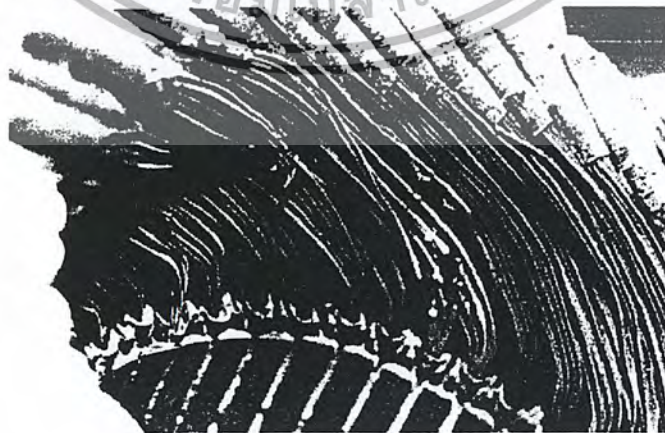
เป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับโหมดของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ มากที่สุด แต่จะถูกแยกนำมาพิจารณาต่างหาก

การนำความสัมพันธ์ของ โหมดของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Failure modes) และ ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Failure patterns) นำมาพิจารณาร่วมกัน จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ที่นำโหมดของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ มาพิจารณาร่วมกัน แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 Symmetrical patterns

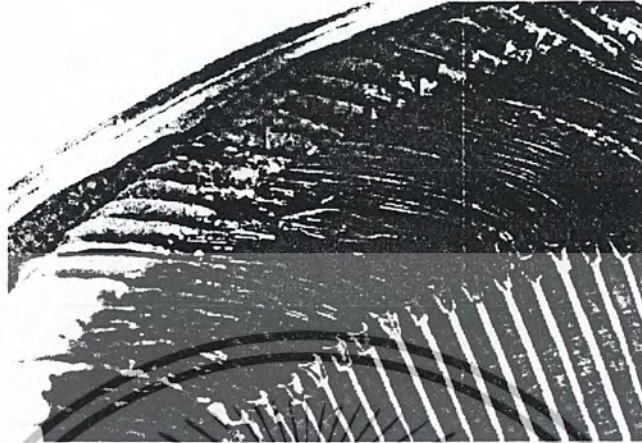
รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Symmetrical patterns : ในแต่ละขดของขดลวดของแต่ละเฟสถูกทำให้ร้อนมากโดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ multiple turn-to-turn shorting ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น โดยที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการเกิดโอเวอร์โวลด์



รูปที่ 2.7 Single phasing patterns

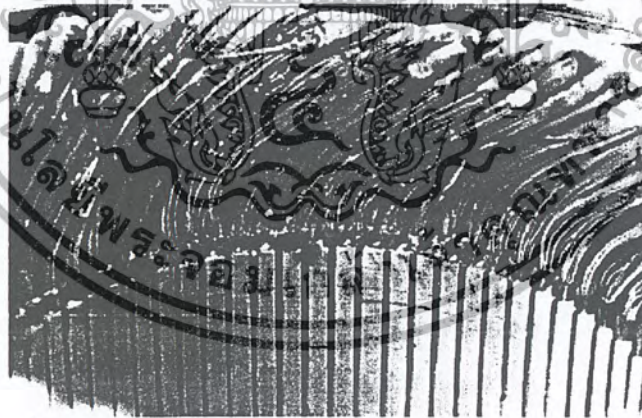
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Single phasing patterns : เกิดความร้อนและเกิดความเสียหายที่ขดลวดอย่างสมบูรณ์เพราะสาเหตุมาจาก turn-to-turn shorting โดยเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด 1 เฟส



รูปที่ 2.8 Nonsymmetrical pattern without grounding

รูปที่ 2.8 ลักษณะของ Nonsymmetrical pattern without grounding : กลุ่มของขดลวดถูกทำให้เกิดความร้อนโดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ multiple turn-to-turn shorting ส่งผลให้สายไฟเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.9 Nonsymmetrical pattern with grinding

รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Nonsymmetrical pattern with grounding : ขดลวด 1 ขดถูกต่อลงกราวนด์โดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ turn-to-turn shorting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเราต้อง ใช้โหมคความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ และลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์มาพิจารณาร่วมกันเสมอ เพื่อให้การวินิจฉัยลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์เป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ และสังเกตได้ว่าในแต่ละกรณีทีกล่าวมารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นแบบ turn-to-turn shorting ทั้งหมด แต่มีเหตุที่ทำให้เกิดลักษณะความเสียหายที่ขดลวดต่างกันออกไป เพราะเนื่องมาจากการมีลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ที่ต่างกันออกไป [3]

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่สเตเตอร์

ในส่วนนี้ได้ชี้แจงให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยหลายชนิดที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของสเตเตอร์และความเสื่อมสภาพก่อนกำหนด [3]

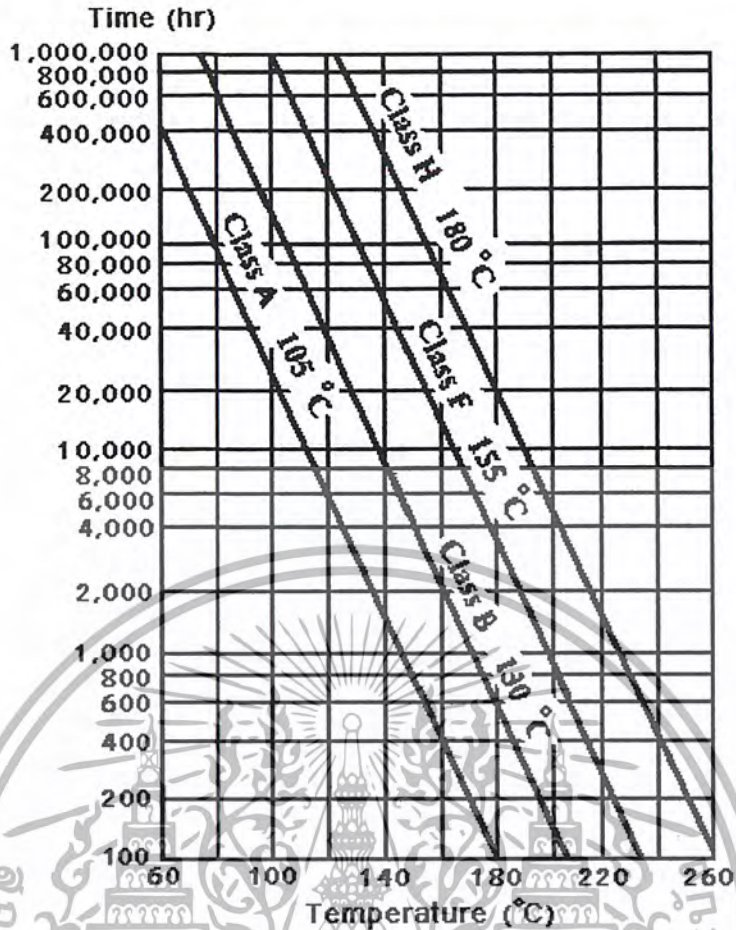
### 2.3.1 ผลของความร้อน

รูปแบบของความร้อนที่เกิดขึ้นมีดังนี้คือ

#### 1. ความร้อนที่เกิดจากการเสื่อมอายุ (Aging)

AIEE 510 และ IEEE 275 ได้ดำเนินการทดสอบโดยกำหนดผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อระบบฉนวนของขดลวด จากการทดสอบอายุการใช้งานน้อยที่สุดของฉนวนที่ 20,000 ชั่วโมง จะพบว่าอายุของฉนวนจะลดลงครึ่งหนึ่งของทุกๆ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนหลายๆประเภทเทียบกับอุณหภูมิและอายุการใช้งาน เว้นแต่เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ระบบของฉนวนเกิดความเปราะบางและเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนไป และเมื่อถึงจุดหนึ่งถ้ามีความเค้นสูงเพียงพอก็จะทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด ถ้าไม่แก้ไขก็จะทำให้มีความเสียหายมากขึ้น จากการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิ มี 2 วิธีการที่ช่วยให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น คือ ลดอุณหภูมิลงหรือ ไม่ก็เพิ่มคุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน

ยกตัวอย่าง ถ้าใช้มอเตอร์ มีฉนวนคลาสบี (Class B) จะใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 130 องศาเซลเซียส โดยมีอายุการใช้งาน 20,000 ชม. แต่ถ้าที่อุณหภูมิเท่าเดิมแล้วใช้ฉนวนมอเตอร์คลาสเอฟ (Class F) จะทำให้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นถึง 100,000 ชั่วโมง (จากรูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการใช้งานของฉนวน

## 2. ความร้อนที่เกิดจากการ โอเวอร์ โหลด (Thermal Overloading)

(a) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงหรือการกระเพื่อมของแรงดัน จะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของมอเตอร์และการทนอุณหภูมิของฉนวน มาตรฐานการออกแบบมอเตอร์ได้ยึดมาตรฐานของ NEMA(MG-12.43) โดยมีข้อกำหนดแรงดันที่  $\pm 10\%$  ถ้าสูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานลดลง

(b) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากแรงดันแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะเกิดแค่เพียงเล็กน้อย ก็จะมีผลทำให้มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ขดลวดที่พันอยู่มากเกินกว่าปกติ จาก Rule of Thumb อุณหภูมิแต่ละเฟสจะเพิ่มขึ้น  $25\%$  ทุกๆ  $3.5\%$  ของแรงดันที่ไม่เท่ากันในแต่ละเฟส และนี่คือเหตุผลของสาเหตุที่ว่าทำไมต้องพยายามทำให้เราต้องรักษาแหล่งจ่ายไฟให้จ่ายไฟได้เท่ากันทั้ง 3 เฟส

(c) ขณะสตาร์ทมอเตอร์ จะมีการดึงกระแสเพิ่มขึ้นประมาณ 5-8 เท่าของกระแสปกติ ดังนั้นถ้าทำการสตาร์ทมอเตอร์ซ้ำๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่ามอเตอร์ที่ออกแบบมานั้นออกแบบมาเพื่อใช้กับงานอะไร โหลดเป็นอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น มีมอเตอร์เหมือนกัน 2 ตัว ตัวหนึ่งติดมอเตอร์ใช้งานกับโหลดที่มีความเฉื่อยสูง อีกตัวใช้ปั๊มน้ำ ตัวที่ใช้ปั๊มน้ำสามารถสตาร์ทได้นานกว่าตัวที่ติดมอเตอร์ ทำให้มีคำถามว่าสตาร์ทอย่างไรจึงจะปลอดภัย ซึ่งคำตอบก็คือต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของโพลด์ที่นำมาใช้งานกับมอเตอร์ตัวนั้นว่ามีลักษณะอย่างไรเช่น ความถี่ น้ำหนัก กราฟแรงบิดของโพลด์ ระยะเวลาที่ทำการสตาร์ทเป็นต้น ผลจากการสตาร์ทบ่อยๆ หรือการใช้ช่วงเวลาในการสตาร์ทสั้นๆ จะทำให้ฉนวนมีการขยายตัวเกิดการเปราะและแตกหักได้ ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องออกแบบจากวัสดุที่สามารถยืดขยายตัวและทนต่อการงอได้

(d) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากการไหลเวียนของอากาศภายในตัวมอเตอร์ไม่ดีเพียงพอ จะมีผลทำให้ฉนวนเกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้นมอเตอร์ควรมีการทำความสะอาดทั้งภายในและภายนอกเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการไหลของอากาศจะไม่ถูกขัดขวางซึ่งเป็นการจำกัดอุณหภูมิทำให้ฉนวนมีประสิทธิภาพดีขึ้น

(e) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากความร้อนของอุณหภูมิที่อยู่ล้อมรอบตัวมอเตอร์ จากมาตรฐานของNEMA ได้ออกแบบให้อุณหภูมิรอบๆ ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส

### 2.3.2 ผลเนื่องมาจากไฟฟ้า

ส่งผลดังนี้คือ

#### 1. ฉนวน (Dielectric)

ต้องดูความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวนกับแรงดันที่ใช้ ความคงทนของฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน การเกิดเบรกดาวน์ผ่านฉนวนจะนำไปสู่การเกิด

- ลัดระหว่างเฟส
- ลัดระหว่างรอบ
- ลัดลงดิน

2. การเสียหายที่พื้นผิว (Tracking) ตามรูปที่ 2.11 [4] แสดงตัวอย่างของการที่ผิวของขดลวดเกิดรอย ซึ่งจะส่งผลทำให้ขดลวดเกิดความเสียหายในลักษณะเฟสถึงกราวด์ นั่นเอง มักพบกับมอเตอร์ที่ใช้กับแรงดันที่เกิน 600 โวลต์ ซึ่งจะเกิดพื้นผิวฉนวนของขดลวด โดยจะมีลักษณะดังนี้ คือ

- ฉนวนเป็นรู
- เกิดสะสมความชื้นและสิ่งสกปรก
- เกิดกระแสดิซชาร์จลงดินเป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้เป็นจุดเล็กๆ ที่ฉนวนทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลง



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดรอยที่ผิวขดลวด

3. โครนา (Corona) เป็นปัญหาที่สำคัญ พบที่ขดลวดที่ใช้งานเกิน 5 kV เป็นการคายประจุ (discharge) ในฉนวนตรงที่มีแรงดันมากกว่าค่าวิกฤต มี 3 ชนิด

- ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ภายใน โดยเกิดที่โพรงของฉนวน
- ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ที่หน้าสัมผัส
- ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุเป็นจุด โดยเกิดที่ที่มีสภาพเป็นจุดแหลม,คม

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโครนา คือ ความถี่, ความหนาของฉนวน, แรงดัน, ความชื้น, อุณหภูมิ

4. แรงดันทรานเซียนท์ (Transient voltage) เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การตัดต่อของหน้าสัมผัส, ไฟฟ้า เป็นต้น มีผลทำให้อายุของฉนวนสั้นลง เกิดการเสียหายเร็วขึ้นและจะนำไปสู่การเกิด

- line to line, line to ground, multiphase line to ground, three-phase fault
- เกิด high voltage oscillations
- เกิดกระแสเกินทำให้ฟิวส์ป้องกันกระแสเกิน (current limiting fuses) ตัดวงจรออก

### 2.3.3 ผลเนื่องมาจากแรงทางกล

แรงทางกลเกิดจากเหตุการณ์ต่อไปนี้คือ

#### 1. การเคลื่อนตัวของขดลวด

จากกระแสที่ไหลในขดลวด ที่สเตเตอร์จะสร้างแรงบนขดลวดโดยเป็นสัดส่วนกับกระแสกำลังสอง ( $F \propto I^2$ ) แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างการสตาร์ทจะเป็นเหตุให้ขดลวดเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การเคลื่อนที่นี้จะเป็นผลให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงที่ฉนวนของขดลวด และเป็นเหตุให้ตัวนำทองแดงเสียหาย

#### 2. โรเตอร์ไปตี กระทบ ถูก สเตเตอร์ (rotor strike) มีหลายเหตุผลคือ

- ลูกปืนเสีย
- เฟลาบิดเบี้ยวไป
- rotor to stator misalignment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่โรเตอร์ไปกระทบถูกสเตเตอร์แรงที่เกิดขึ้นทำให้ ฉนวนที่ขดลวดถูกเจาะเป็นรู ผลที่ตามมา ก็คือเกิดการรั่วลงดิน บางครั้งก็ขึ้นอยู่กับ ความถี่ของการสตาร์ท และจำนวนครั้งของการกระทบกัน ระหว่างโรเตอร์กับ สเตเตอร์ถ้ามีการกระทบกันระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่ ที่ ความเร็วเต็มที่ ผลก็คือทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่จุดสัมผัสกันนั้น และจะทำให้อายุการใช้งานของขดลวดที่ สเตเตอร์เสื่อมเร็วกว่ากำหนดด้วย

### 3. สาเหตุอื่นๆ

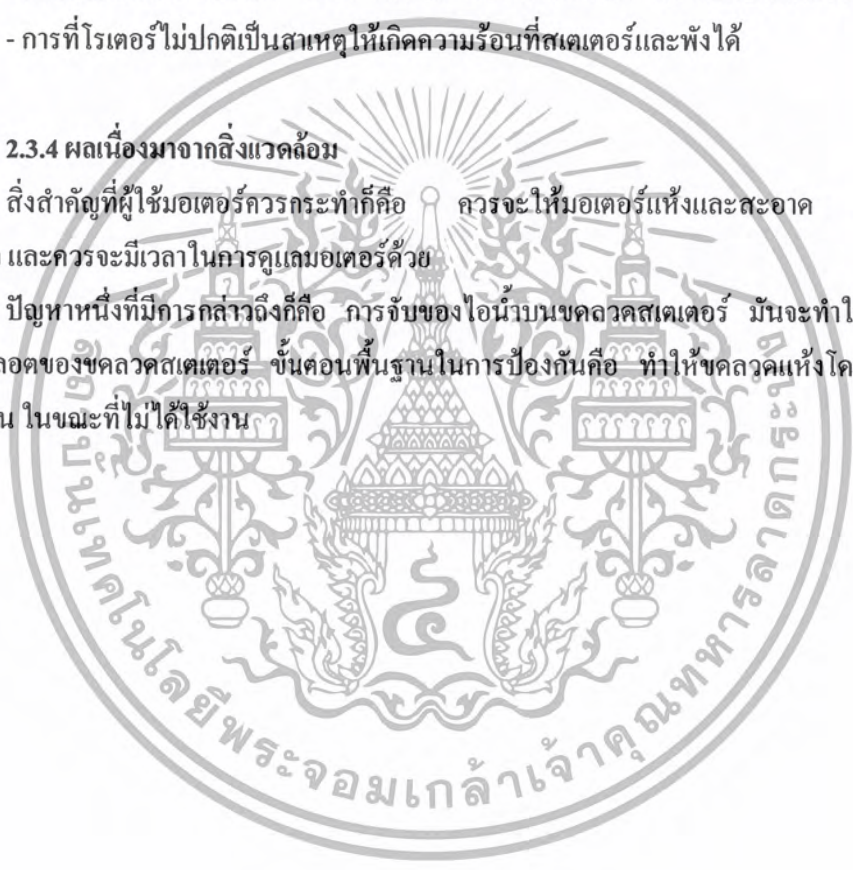
ทำให้ขดลวดเกิดความเสียหายมีดังนี้คือ

- ความสมดุลของน้ำหนัก โรเตอร์ และพัดลม เป็นผลให้หลวมและการไปตีถูกสเตเตอร์
- นอตและเกลียวหลวม ไปกระทบสเตเตอร์
- สิ่งแปลกปลอมเข้ามาต่อเตอร์ โดยผ่านระบบระบายอากาศ และไปกระทบสเตเตอร์
- การที่โรเตอร์ไม่ปกติเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนที่สเตเตอร์และพังได้

#### 2.3.4 ผลเนื่องมาจากสิ่งแวดลอม

สิ่งสำคัญที่ผู้ใช้มอเตอร์ควรกระทำก็คือ ควรจะให้มอเตอร์แห้งและสะอาด ทั้งภายในและ ภายนอก และควรจะมีเวลาในการดูแลมอเตอร์ด้วย

ปัญหาหนึ่งที่มีการกล่าวถึงก็คือ การจับของไอน้ำบนขดลวดสเตเตอร์ มันจะทำให้เกิดการลัดลง ดินในสลอตของขดลวดสเตเตอร์ ขั้นตอนพื้นฐานในการป้องกันคือ ทำให้ขดลวดแห้งโดยใช้ช่องระบาย ความร้อน ในขณะที่ไม่ได้ใช้งาน

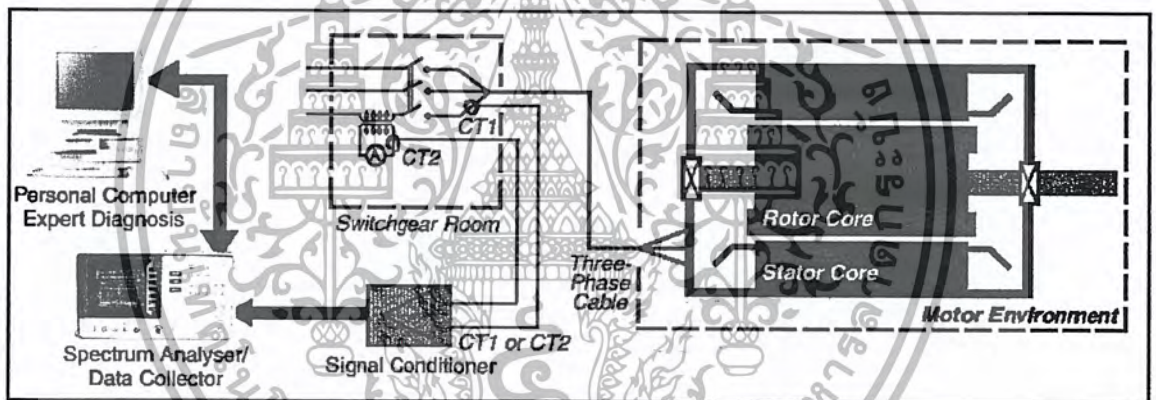


## บทที่ 3

### เทคนิคผลรวมแรงดันไลน์ – นิวตรอล และการแสดงผล

#### 3.1 การวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วย MCSA

วิธีการวินิจฉัยซึ่งเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบันนี้ คือ การวินิจฉัยจากสัญญาณกระแสเดเตอร์ (Motor Current Signature Analysis, MCSA) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [6] ที่มีข้อดี คือ เป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ สามารถตรวจจับได้ง่ายกว่าสัญญาณอื่นๆ เช่น สัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่จำเป็น ต้องใช้ขดลวดหา (search coil) ระบบวิธีการวินิจฉัยโดยใช้ MCSA แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเป็นการวิเคราะห์ จากการตรวจจับสเปกตรัมที่เกิดขึ้นรวมอยู่ในสัญญาณกระแสเดเตอร์ การวินิจฉัยด้วยวิธีดังกล่าวจะต้อง มีเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyser) สำหรับแปลงไปยังโดเมนความถี่ก่อนการวินิจฉัยโดยใช้ คอมพิวเตอร์

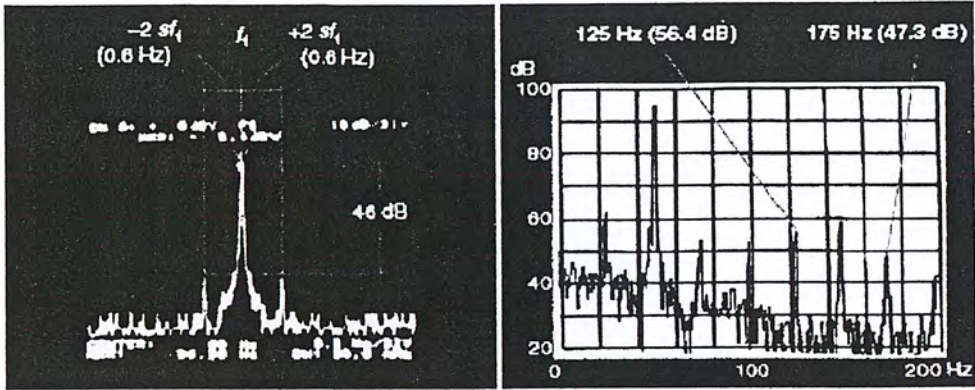


รูปที่ 3.1 ระบบการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ MCSA

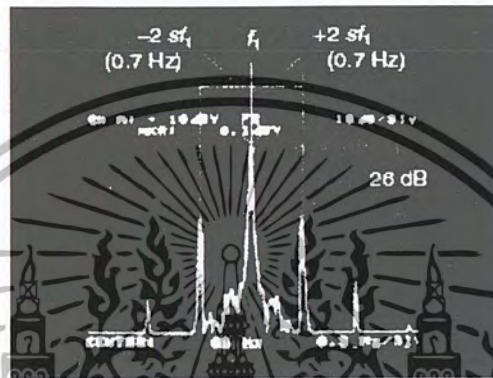
รูปที่ 3.2 (a) ได้แสดงสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเดเตอร์เมื่อมอเตอร์มีสภาพค่อนข้างที่จะ สมบูรณ์ ซึ่งปรากฏสเปกตรัมที่มีความถี่มูลฐานเพียงอย่างเดียว รูปที่ 3.2 (b) เมื่อขดลวดสเตเตอร์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำลัดวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดมีฮาร์มอนิกที่มีความถี่สูงปะปนรวมอยู่ในสัญญาณกระแส เดเตอร์ จากรูปสเปกตรัมที่มีความถี่ 125 Hz และ 175 Hz คือสเปกตรัมฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากสาเหตุ ขดลวดลัดรอกดังกล่าว รูปที่ 3.2 (c) เมื่อแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก จะทำให้เกิดมีฮาร์มอนิกที่มีความถี่ เท่ากับ  $\pm 2s f_1$  ปรากฏอยู่รอบความถี่มูลฐาน ทั้งนี้เมื่อ S คือสลิป และ  $f_1$  คือความถี่มูลฐาน

จะเห็นได้ว่า การวินิจฉัยโดยใช้ MCSA ถึงแม้จะมีข้อดีอยู่ก็ตาม แต่ก็มีความยุ่งยากในเรื่องของ การวิเคราะห์สเปกตรัม และอุปกรณ์ที่ใช้ก็มีราคาสูงมาก ดังนั้น เราจึงใช้เทคนิคการตรวจจับสัญญาณสเต เตอร์โดยใช้สัญญาณแรงดันไลน์-นิวตรอลแทน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) สเปกตรัมแสดงมอเตอร์ก่อนข้างสมบูรณ์ (b) สเปกตรัมแสดงสเตเตอร์ไม่สมบูรณ์



(c) สเปกตรัมแสดงโรเตอร์ไม่สมบูรณ์

รูปที่ 3.2 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นในกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 3.2 การตรวจจ็บบการลัดรอบโดยใช้สัญญาณแรงดัน

ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการดังกล่าวนี้ อาศัยการเปลี่ยนแปลง หรือการไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance,  $Z$ ) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟสจะมีความสมดุลกัน แต่ก็อาจจะเกิดกรณีที่ไม่สมดุลได้ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเพิ่มเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น เครื่องตรวจสถานะสัญญาณ เครื่องวัดต่างๆ เป็นต้น แต่สาเหตุที่สำคัญมากจะมาจากอิมพีแดนซ์ของเฟส ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐาน (Fundamental) แล้ว ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าฉบับพลันทั้งสามเฟส ( $\tilde{V}_{sum}$ ) ในรูปของเฟสเซอร์ (Phasor) จะมีความสัมพันธ์เป็น [5]

$$\tilde{V}_{sum} = \tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c \quad (1)$$

หรือ

$$\tilde{V}_{sum} = Z_a \tilde{I}_a + Z_b \tilde{I}_b + Z_c \tilde{I}_c \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องจักรกลที่สมดุล ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสจะเท่ากัน

$$Z_a = Z_b = Z_c \quad (3)$$

ผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ก็จะมีค่าเท่ากับ 0

$$\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (4)$$

และจากสมการที่ (1) ถ้าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์มีค่าเป็นเชิงเส้น ก็จะหมายความว่ารวมไปถึงแรงดันไฟฟ้า จับพลันด้วย

$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = v_{sum}(t) \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ถ้าไม่มีฟอลต์เนื่องจากความไม่สมดุล (Unbalance fault) จะได้

$$v_{sum}(t) = 0 \quad (6)$$

กรณีที่ 2 ระบบสมดุล และ

$$v_{sum}(t) \neq 0 \quad (7)$$

นั่นหมายความว่าเกิดกรณีฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร



ในส่วนของ การกำหนดปริมาณของไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุลสำหรับ การทดสอบมอเตอร์ เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสถานะที่มีแรงดันป้อนเข้าไม่สมดุล สามารถคำนวณหาแรงดันป้อนเข้าได้จากนิยามที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE Std 141 ซึ่งได้ให้คำนิยามของ เปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (phase voltage unbalance in percent) หรือ PVUR (%) ไว้ ดังนี้

$$\text{PVUR (\%)} = \frac{\text{maximum voltage deviation from average phase voltage magnitude}}{\text{average phase voltage magnitude}} \times 100\%$$

$$= \frac{\max(|V_a - V_{Pavg}|, |V_b - V_{Pavg}|, |V_c - V_{Pavg}|)}{V_{Pavg}} \times 100\%$$

เมื่อ  $V_{Pavg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$



ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 1 เฟส

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$V_b, V_c = 220 \text{ volt} \quad \%PVUR = 5$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{V_a + 440}{3}$$

ตั้งสมมติฐาน

กรณีที่ 1  $|V_{avg} - V_a| \Rightarrow MAX$

$$5 = \frac{\left(\frac{V_a + 440 - V_a}{3}\right) \times 100}{V_a + 440}$$

$$5 = \frac{100V_a + 44000 - 300V_a}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 44000 - 200V_a$$

$$205V_a = 41800$$

$$V_a = 203.9$$

คำตอบที่ถูกคือ  $V_a$  จะต้องน้อยกว่า  $V_{avg}$  ไม่นเกิน 5%

$$V_{avg} = (203.9 + 440) / 3$$

$$= 214.33$$

$$PVUR (\%) = (214.33 - 203.9) / 214.33$$

$$= 0.048 \Rightarrow 5\%$$

กรณีที่ 2  $|220 - V_{avg}| \Rightarrow MAX$

$$5 = \frac{\left(\frac{220 - V_a + 440}{3}\right) \times 100}{V_a + 440}$$

$$5 = \frac{66000 - 100V_a - 44000}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 22000 - 100V_a$$

$$105V_a = 19800$$

$$V_a = 188.57$$

$$V_{avg} = (188.57 + 440) / 3$$

$$= 209.52$$

$$PVUR (\%) = (209.52 - 188.57) / 209.52$$

$$= 0.099 \Rightarrow 10\%$$

เห็นได้ว่ากรณีที่ 2 นั้น ไม่เป็นจริงเนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$\therefore V_a = 203.9, \quad V_b = 220, \quad V_c = 220$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 2 เฟส

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$V_b, V_c = 220 \text{ volt} \quad \%PVUR = 5$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{2V_a + 220}{3}$$

ตั้งสมมติฐาน

กรณีที่ 1  $|V_{avg} - V_a| \Rightarrow MAX$

$$5 = \frac{\left(\frac{2V_a + 220}{3} - V_a\right) \times 100}{\frac{2V_a + 220}{3}}$$

$$5 = \frac{200V_a + 22000 - 300V_a}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 22000 - 100V_a$$

$$110V_a = 20900$$

$$V_a = 190$$

คำตอบที่ถูกต้อง  $V_a$  จะต้องน้อยกว่า  $V_{avg}$  ไม่เกิน 5%

$$V_{avg} = (2 \times 190 + 220) / 3$$

$$= 200$$

$$PVUR (\%) = (200 - 190) / 200$$

$$= 0.05 \Rightarrow 5\%$$

และ  $V_c$  (220v) ก็จะต้องมากกว่า  $V_{avg}$  ไม่เกิน 5% ด้วยเช่นกัน

$$PVUR (\%) = (220 - 200) / 200$$

$$= 0.10 \Rightarrow 10\%$$

เห็นได้ว่ากรณีที่ 1 นั้น ไม่เป็นจริงเนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$\therefore V_a = 204.3, \quad V_b = 204.3, \quad V_c = 220$$

หมายเหตุ สถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส จะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าใน 2 เฟส ที่เกิดความผิดปกติมีค่าเท่ากัน เพื่อให้ง่ายกับการพิจารณา

กรณีที่ 2  $|220 - V_{avg}| \Rightarrow MAX$

$$5 = \frac{\left(220 - \frac{2V_a + 220}{3}\right) \times 100}{\frac{2V_a + 220}{3}}$$

$$5 = \frac{66000 - 200V_a - 22000}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 44000 - 220V_a$$

$$210V_a = 42900$$

$$V_a = 204.3$$

$$V_{avg} = (2 \times 204.3 + 220) / 3$$

$$= 209.53$$

$$PVUR (\%) = (209.53 - 204.3) / 209.53$$

$$= 0.025 \Rightarrow 2.5\%$$

$$PVUR (\%) = (220 - 209.53) / 209.53$$

$$= 0.049 \Rightarrow 5\%$$

### 3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในเครื่องมือทดสอบ

#### 3.3.1 ออปแอมป์

วงจรพื้นฐานของออปแอมป์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ได้แก่

##### วงจรรยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

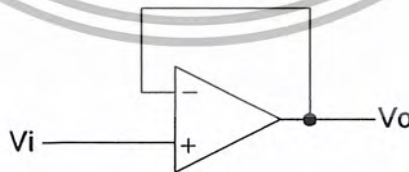
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุตที่เข้ามาเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดสูงชันกว่าเดิม โดยลักษณะการขยายสัญญาณจะเป็นแบบกลับเฟส กล่าวคือสัปดาห์ของสัญญาณเข้าและออกจะมีเครื่องหมายต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นกรณีของไฟฟ้ากระแสสลับ สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตจะมีมุมต่างเฟสกัน 180 องศาทางไฟฟ้า ลักษณะของวงจรรยายกลับเฟส แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรรยายกลับเฟส

##### วงจรมตามแรงดัน (Unity-gain follower)

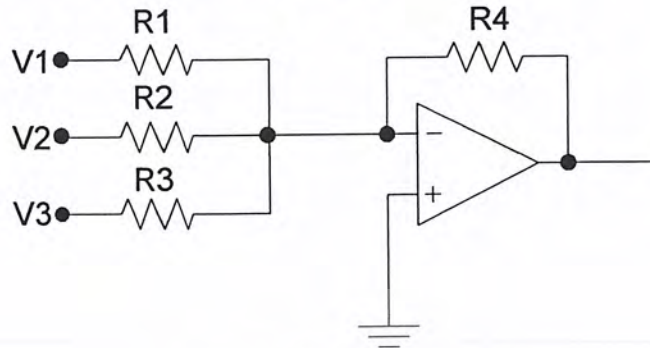
ในบางครั้ง เราอาจต้องการวงจรรอแอมป์ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง เพื่อนำไปใช้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ในกรณีนี้สามารถใช้วงจรรยายกลับเฟส แต่ให้  $R_2$  มีค่าเป็นศูนย์ ก็จะได้ลักษณะของวงจรมตามแรงดัน แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจร Unity-gain follower

### วงจรวกแรงดัน (Summing Amplifier)

วงจรวกแรงดัน คือวงจรรวมที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแรงดันอินพุตที่ถูกขยายแล้วออกสู่เอาต์พุต ลักษณะของวงจรวกแรงดัน แสดงดังรูปที่ 3.5



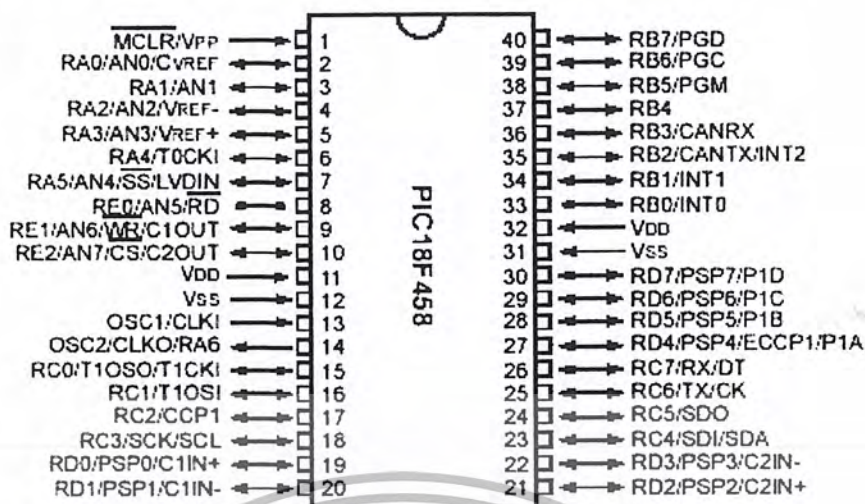
รูปที่ 3.5 วงจร Summing Amplifier

### 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยทั่วไปแล้วเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีการทำงานในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณอนาล็อก เช่น แรงดัน กระแส อุณหภูมิ ความดันและอื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มารับสัญญาณอนาล็อกจึงต้องมีการแปลงรูปสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัลเสียก่อน วงจรที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณนี้เรียกว่า วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter) หรือวงจรเอดูดี

ในการวิจัยโครงงานนี้จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 มาทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันมาจาก 2 ส่วนคือ สัญญาณแรงดันที่มาจากภาคตรวจสอบความสมดุลของระบบ และส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่รับสัญญาณแรงดันที่มาจากภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะนำสัญญาณแรงดันที่ได้มาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter) หรือเอดูดี แล้วทำการประมวลผลเพื่อส่งค่าออกไปแสดงผลบนจอ LCD

### 3.4.1 การทำงานของขาพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458



รูปที่ 3.6 แสดงโต๊ะแกรมขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

ในส่วนของการทำงานของขาแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	รายละเอียดการทำงาน
OSC1/CLK	13	ขาต่อคริสตอล/รับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก
OSC2/CLKO/RA6	10	ขาต่อคริสตอล/ในโหมด RC
MCLR/VPP	1	ขารับสัญญาณรีเซ็ตหลัก(Master Clear Input) ทำงานที่ลอจิก 0
<b>ขาพอร์ต A</b>		
RA0/AN0/CVREF	2	- ขาพอร์ต RA0 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 0
RA1/AN1	3	- ขาพอร์ต RA1 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 1
RA2/AN2/VREF-	4	- อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 2 - อินพุตแรงดันอ้างอิงลบของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล
RA3/AN3/VREF+	5	- ขาพอร์ต RA3 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 3 - อินพุตแรงดันอ้างอิงบวกของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	รายละเอียดการทำงาน
RA4/ T0CKI	6	- ขาพอร์ต RA4 - อินพุตสัญญาณพิกษาของไทมเมอร์ 0
RA5/ AN4/ SS/ LVDIN	7	- ขาพอร์ต RA5 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 4
<b>ขาพอร์ต B</b>		
RB0/ INT0	33	- ขาพอร์ต RB3 - อินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอก
RB1/ INT1	34	ขาพอร์ต RB1
RB2/CANTX/INT2	35	ขาพอร์ต RB2
RB3/CANRX	36	- ขาพอร์ต RB3 - อินพุตรับแรงดันโปรแกรมต่ำ (+5V) ถ้าอินาเบลไว้
RB4	37	ขาพอร์ต RB4
RB5/PGM	38	ขาพอร์ต RB5
RB6/PGC	39	ขาพอร์ต RB6
RB7/PGD	40	ขาพอร์ต RB7
<b>ขาพอร์ต C</b>		
RC0/TIOSO/TICKI	15	- ขาพอร์ต RC0 - เอาต์พุตวงจรออสซิลเลเตอร์ของไทมเมอร์ 1 - อินพุตสัญญาณพิกษาของไทมเมอร์ 1
RC1/TIOSI	16	- ขาพอร์ต RC1 - อินพุตวงจรออสซิลเลเตอร์ของไทมเมอร์ 1
RC2/CCP1	17	- ขาพอร์ต RC2 - อินพุตวงจรแคปเจอร์/เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบ
RC3/SCK/SCL	18	- ขาพอร์ต RC3 - ขาสัญญาณพิกษาของวงจร SPI และระบบบัส I <sup>2</sup> C
RC4/SDI/SDA	23	- ขาพอร์ต RC4 - ขาข้อมูลอินพุตของวงจร SPI - ขาข้อมูลอนุกรมของระบบบัส I <sup>2</sup> C
RC5/SDO	24	- ขาพอร์ต RC5 - ขาข้อมูลเอาต์พุตของวงจร SPI

**ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 (ต่อ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	รายละเอียดการทำงาน
RC6/TX/CK	25	- ขาพอร์ต RC6 - ขาเอาต์พุตวงจร USART สำหรับเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม
RC7/RX/DT	26	- ขาพอร์ต RC7 - ขาอินพุตวงจร USART สำหรับเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม
<b>ขาพอร์ต D</b>		
RD0/PSP0/C1IN+	19	- ขาพอร์ต RD0 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 0
RD1/PSP1/C1IN-	20	- ขาพอร์ต RD1 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 1
RD2/PSP2/C2IN+	21	- ขาพอร์ต RD2 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 2
RD3/PSP3/C2IN-	22	- ขาพอร์ต RD3 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 3
RD4/PSP4/ECCP1/PIA	27	- ขาพอร์ต RD4 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 4
RD5/PSP5/PIB	28	- ขาพอร์ต RD5 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 5
RD6/PSP6/PIC	29	- ขาพอร์ต RD6 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 6
RD7/PSP7/PID	30	- ขาพอร์ต RD7 - ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 7
<b>ขาพอร์ต E</b>		
RE0/AN5/RD	8	- ขาพอร์ต RE0 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 5 - ขาสัญญาณ RD สำหรับส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน
RE1/AN6/WR/C1OUT	9	- ขาพอร์ต RE1 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 6 - ขาสัญญาณ WR สำหรับส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน
RE2/AN7/CS/C2OUT	10	- ขาพอร์ต RE2 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 7 - ขาสัญญาณ CS สำหรับส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	รายละเอียดการทำงาน
<b>ขาต่อไฟเลี้ยง</b>		
VDD	11,32	- ขาต่อไฟเลี้ยง ใช้ได้ตั้งแต่ +2 ถึง +5.5 V
VSS	12,31	- ขาต่อกราวด์

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 (ต่อ)

### 3.5 ทฤษฎีการใช้งานจอแสดงผล

#### 3.5.1 การแสดงผลทางหน้าจอแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)

รายละเอียดเกี่ยวกับ LCD โดยในตัว LCD จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วน ดังนี้

ตัวแสดงผล (Display) ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องอาศัยมุมในการมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ LCD

ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของ LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุมโดยเฉพาะ ชิปที่นิยมใช้คือ เบอร์ HD44780 และ HD61830 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักษร ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟิก

ตัวขับ (Driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับนี้ ได้แก่ เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

#### 3.5.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุม LCD

ในการใช้งาน LCD จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมให้เสียก่อน โดยส่วนต่างๆ ภายในของชิปควบคุม LCD ที่ใช้ใน LCD แบบอักษร ประกอบด้วย

บัพเฟอร์อินพุตเอาต์พุต เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก เพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม

รีจิสเตอร์คำสั่ง ( Instruction register : IR ) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อนำไปควบคุมการแสดงผล

รีจิสเตอร์ข้อมูล ( Data register : DR ) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อถ่ายทอดไปยังหน่วยความจำที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษรเพิ่มเติมในแรมเก็บตัวอักษร

แรมเก็บข้อมูลแสดงผล ( Display data RAM : DDRAM ) เป็นหน่วยความจำแรมที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR โดยตัวควบคุมจะนำข้อมูลใน DDRAM นี้ไปเปิดตาราง ( Look-up table ) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรอมและแรมเก็บตัวอักษรเพื่อนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล

รอมเก็บตัวอักษร ( Character generator ROM : CGROM ) เป็นหน่วยความจำรอมที่ใช้เก็บข้อมูลตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7200 บิต โดยจะถูกอ่านด้วยค่าของข้อมูลใน DDRAM

แรมเก็บตัวอักษร ( Character generator RAM : CGRAM ) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นใหม่ ในกรณีที่ตัวอักษรใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้นทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุมจะมาอ่านค่าจาก CGRAM เอง

แฟล็ก BUSY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่า ตัวควบคุมพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้นก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมจะต้องตรวจสอบสถานะของแฟล็ก BUSY นี้เสียก่อน

### 3.5.3 การทำงานของขาต่างๆ ของ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2)

LCD 16x2 มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา โดยรายละเอียดการทำงานของแต่ละขามีดังนี้

$V_{SS}$  (ขา 1) : ต่อกราวด์

$V_{DD}$  (ขา 2) : ต่อไฟเลี้ยง + 5 โวลต์

$V_0$  (ขา 3) : เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

RS (ขา 4) : เป็นขาอินพุตใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น “ 0 “ ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขานี้เป็น “ 1 “ ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

R/W (ขา 5) : เป็นขาที่ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD ถ้าเป็น “ 0 “ เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น “ 1 “ จะเป็นการอ่านข้อมูล

E (ขา 6) : เป็นขาอินพุตให้ LCD ทำงาน

D0 – D7 (ขา 7 – 14) : เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก ขนาด 8 บิต

### 3.5.4 คำสั่งสำหรับควบคุม LCD

คำสั่งควบคุม LCD ของชิปควบคุม ที่สำคัญมี 10 คำสั่งดังนี้

คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล ( Clear display ) มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่างเข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด

คำสั่ง Return home ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูลเป็น “ 1 “ เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผลแต่ข้อมูลบนจอแสดงผลไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือข้อมูลคำสั่งนี้จะ เป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

คำสั่งเลือก โหมดการป้อนข้อมูล ( Entry mode set ) มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังรูป

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	0	1	I/D	S

แสดงรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากบิต S เป็น “ 1 “ เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล ตัวเคอร์เซอร์จะอยู่กับที่ แต่อักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่หากบิตนี้เป็น “ 0 “ เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ตัวเคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ

บิต I/D เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว ทำให้แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น “ 1 “ แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็น “ 0 “ แอดเดรสของ DDRAM จะลดลง

คำสั่งควบคุมการแสดงผล มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังรูป

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	1	D	C	B

แสดงรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งควบคุมการแสดงผล

บิต D ใช้ควบคุมการเปิดปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “ 1 “ จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น “ 0 “ จะเป็นการปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนจอแสดงผล ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น “ 1 “ ถ้ากำหนดให้เป็น “ 0 “ จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์ หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น “ 1 “ เคอร์เซอร์จะกระพริบ

คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังรูป

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

แสดงรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับกำหนดบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ถ้า S/C เป็น “ 0 “ และ R/L เป็น “ 0 “ จะเป็นการเลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย

ถ้า S/C เป็น “ 0 “ และ R/L เป็น “ 1 “ จะเป็นการเลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา

ถ้า S/C เป็น “ 1 “ และ R/L เป็น “ 0 “ จะเป็นการเลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย

ถ้า S/C เป็น “ 1 “ และ R/L เป็น “ 1 “ จะเป็นการเลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา

คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	1	DL	N	F	*	*

แสดงรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

บิต DL ใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น “ 0 “ จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต แต่ถ้าบิตนี้เป็น “ 1 “ จะเป็นแบบ 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น “ 0 “ จะแสดงผล 1 บรรทัด แต่ถ้าเป็น “ 1 “ จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลสามารถแสดงผลได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลมากกว่า 2 บรรทัด ก็ให้กำหนดบิต N นี้เป็น “ 1 “

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรในการแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “ 0 “ จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x7 จุด และถ้าเป็น “ 1 “ จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x10 จุด

คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้ บิต 7 เป็น “ 0 “ บิต 6 เป็น “ 1 “ ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะแทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM โดยจะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ที่ 00H-3FH

คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น “ 1 “ และข้อมูลอีก 7 บิตที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H – 0FFH

คำสั่งอ่านแฟลค BUSY และแอดเดรส มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังรูป

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
BF	A	A	A	A	A	A	A

← แอดเดรสไบต์สูง →      ← แอดเดรสไบต์ต่ำ →  
แสดงรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งอ่านแฟลค BUSY และแอดเดรส

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านแฟลค BUSY ( BF ) โดยแฟลคนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น “ 0 “ แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น “ 1 “ แสดงว่าขณะนี้ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานยังไม่พร้อมที่จะรับข้อมูล

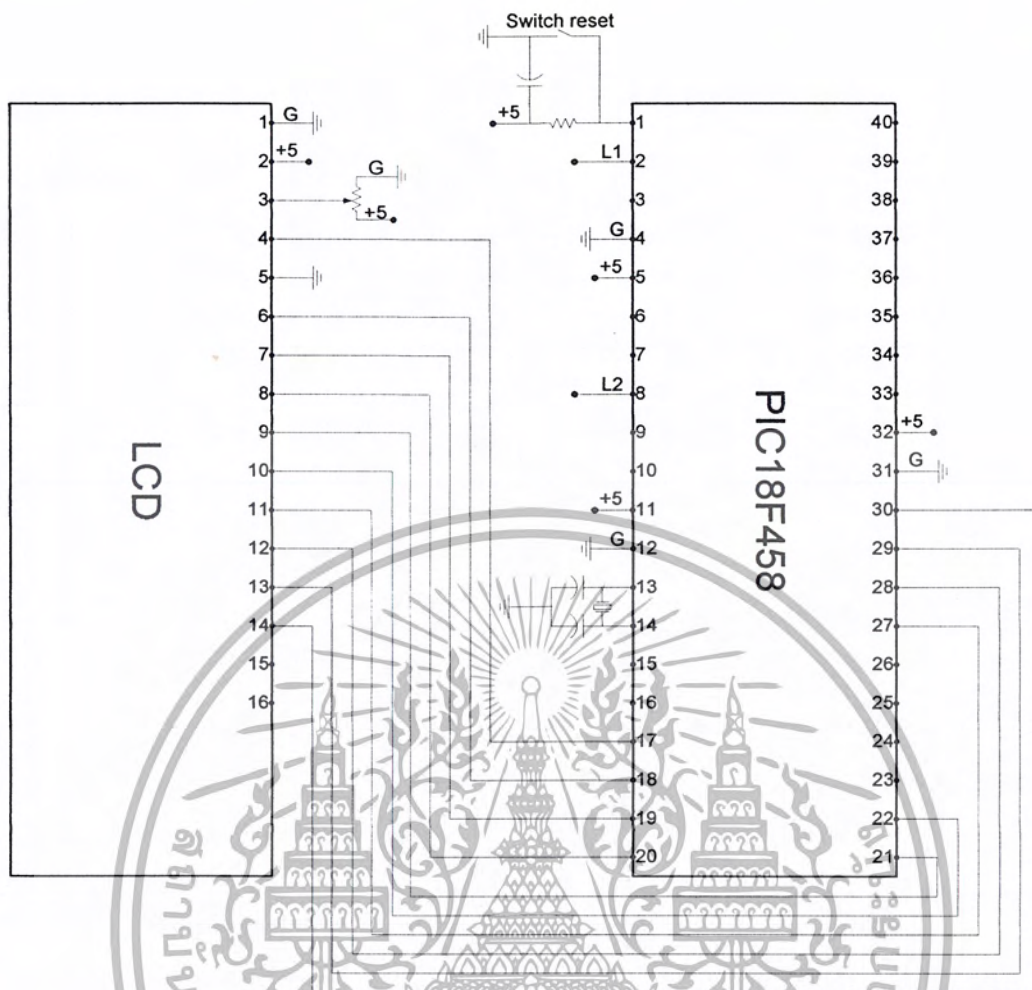
### 3.5.5 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่ LCD

ในการเขียนข้อมูลเพื่อควบคุม LCD ให้แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (Instruction) แล้วกำหนดโหมดการทำงานให้แก่ LCD ก่อน จากนั้นจึงค่อยส่งข้อมูล (Data) ที่ต้องการแสดงผล เนื่องจากบิตข้อมูลของ LCD มี 8 เชน คือ D0 – D7 และใช้เป็นทางผ่านของทั้งคำสั่งและข้อมูล ดังนั้นในการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องอาศัยการกำหนดคำสั่งสัญญาณลจิกที่ขา RS

เมื่อต้องการเขียนหรืออ่านข้อมูลใน CGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอดเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น “ 1 “ เพื่อแจ้งให้ตัวควบคุมทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติไม่ใช่ข้อมูลคำสั่ง ในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลจะต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “ 1 “ ข้อมูลขนาด 8 บิต ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลที่อ่านออกมาได้จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสของ CGRAM หรือ DDRAM ตามที่ต้องการ

### 3.5.6 จังหวะการทำงานของ LCD

ในการติดต่อกับ LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD แปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เรียบร้อยก่อน จากนั้นจึงจะรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 กับ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วงจรการทดลอง

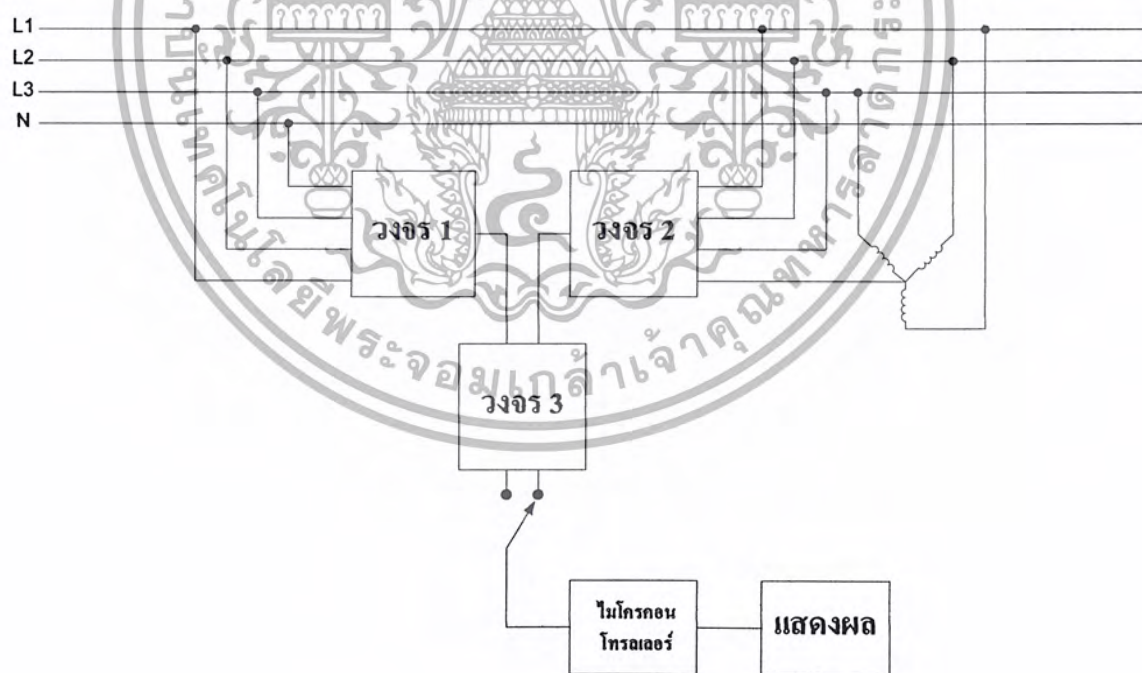
#### 4.1 การออกแบบวงจรการทดลอง

แนวทางการออกแบบวงจร เพื่อใช้ในการสร้างเครื่องตรวจสอบจนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 4.1 คือ

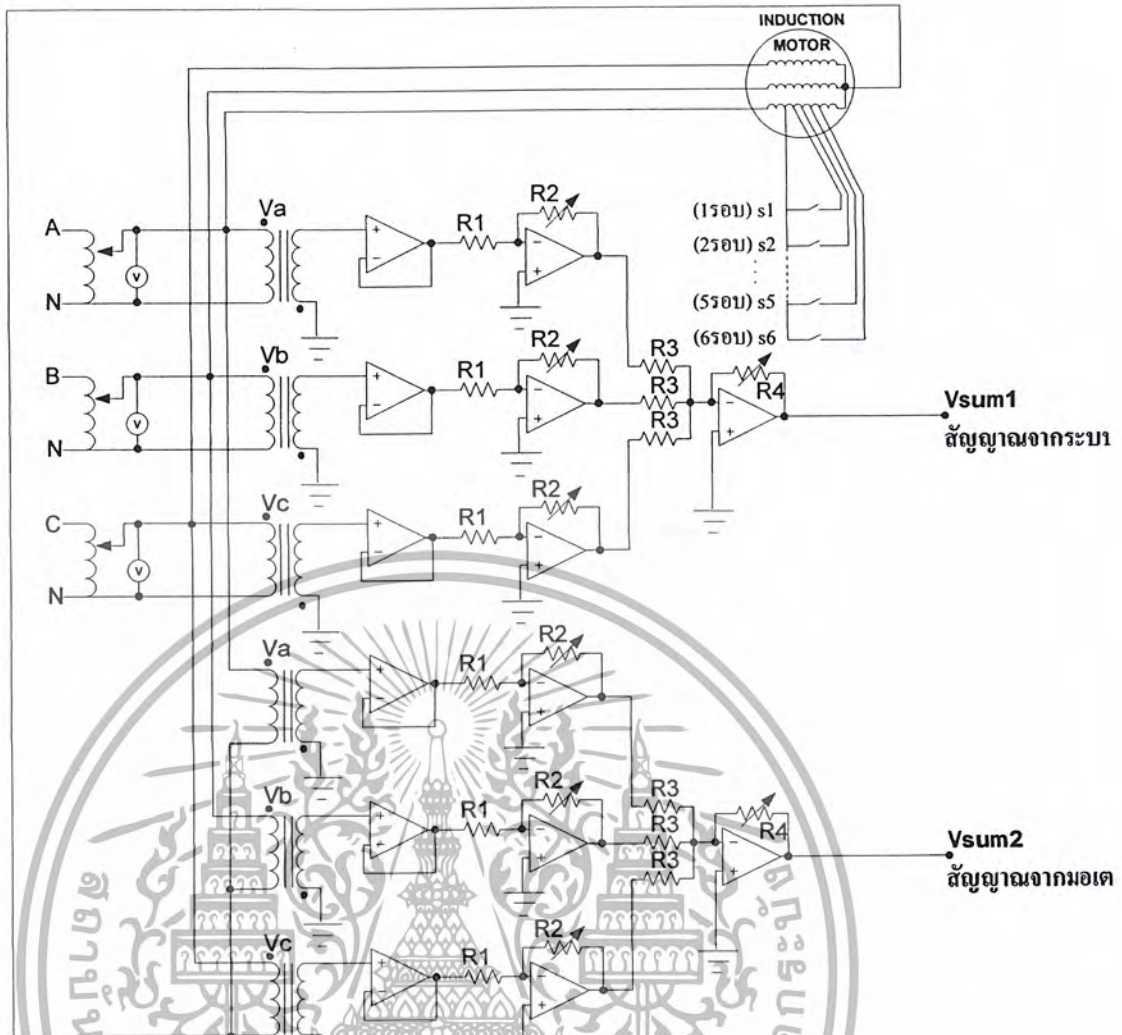
วงจร 1 และวงจร 2 เป็น ภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ และภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยทั้งสองภาคจะมีวงจรการทำงานที่เหมือนกัน แต่ที่ต่างกัน คือจุดกราวด์ของภาคแหล่งจ่ายไฟจะต่อกับสายนิวทรัล และจุดกราวด์ของภาคมอเตอร์จะต่อกับจุดสตาร์ของมอเตอร์ โดยที่จุดสตาร์ของมอเตอร์กับจุดนิวทรัลของระบบ จะไม่ต่อกัน

วงจร 3 เป็นส่วนที่นำสัญญาณจากระบบ และสัญญาณจากมอเตอร์ มาทำให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีจุดกราวด์ร่วมกัน

ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเป็นส่วนที่จะสังเกตตรวจสอบความสมดุลของระบบก่อน เพื่อบอกถึงระดับเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของระบบ แล้วจึงตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์



รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบวงจรการทดลอง

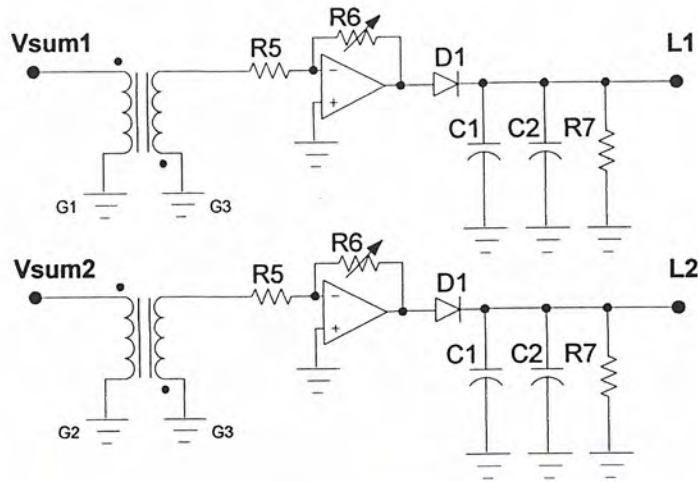


รูปที่ 4.2 แสดงวงจรของภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ และภาคตรวจสอบมอเตอร์

จากรูปที่ 4.2 อธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้ ส่วนแรกเริ่มจากการนำสัญญาณแรงดันจากระบบ (ภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ) มาลดระดับแรงดันลงในแต่ละเฟส โดยผ่านหม้อแปลง 220/6 V<sub>rms</sub> จากนั้นนำสัญญาณแรงดันที่ลดระดับลงแล้ว มาผ่านเข้าวงจรบัพเฟอร์ เพื่อไม่ให้จุดทดลองมีผลกระทบต่อแรงดันที่รับเข้ามา (เพราะจุดทดลองอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล) แล้วนำสัญญาณที่ได้ป้อนเข้าวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส เพื่อให้แรงดันทั้งสามเฟสที่เข้ามามีค่าเท่ากัน เมื่ออยู่ในภาวะปกติ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ทั้ง 3 เฟส มารวมกันในวงจรรวมสัญญาณ จะได้เป็นสัญญาณจากระบบ (Vsum1)

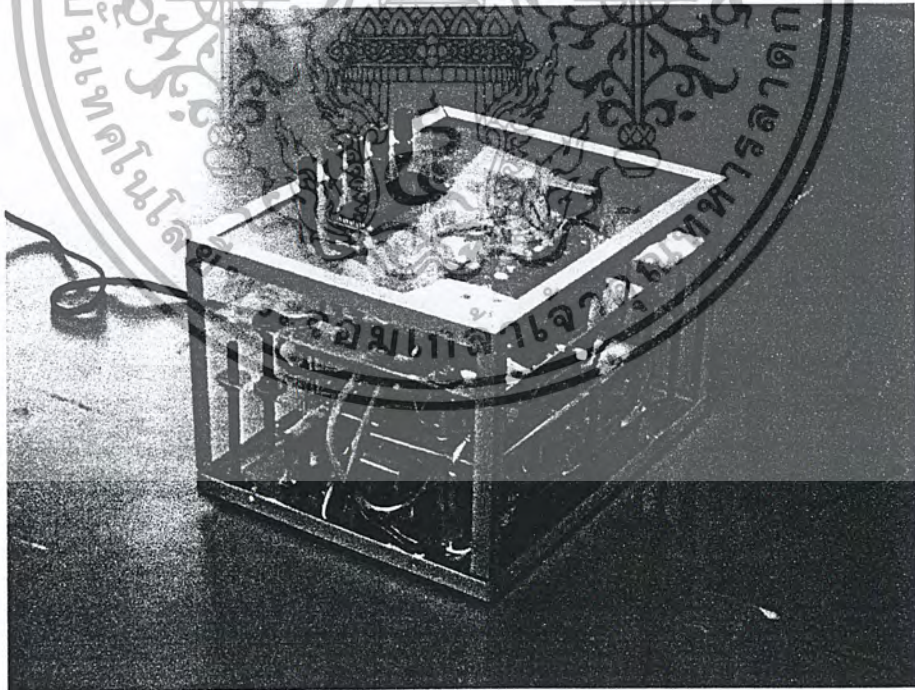
ส่วนที่สองจะเป็นการนำเอาสัญญาณแรงดันจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ภาคตรวจสอบมอเตอร์) โดยมีขั้นตอนเหมือนกับส่วนแรกทุกประการ โดยผลสุดท้ายจะได้เป็นสัญญาณจากมอเตอร์ (Vsum2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรรับสัญญาณจากภาคตรวจสอบมอเตอร์ และภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งก็คือวงจรที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจากภาคตรวจสอบมอเตอร์ และภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ โดยส่วนนี้เป็นส่วนที่จะนำสัญญาณที่ได้จากระบบ และสัญญาณจากมอเตอร์ ไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล แต่เนื่องจากว่าภาคตรวจสอบมอเตอร์และภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟมีจุดครานที่ต่างกัน ดังนั้น ในส่วนของวงจรตามรูปที่ 4.3 นี้ เป็นส่วนที่นำสัญญาณที่ได้จากทั้งสองภาคการตรวจสอบ ผ่านเข้าหม้อแปลง เพื่อทำให้สัญญาณที่ได้มีความเดียวกัน



รูปที่ 4.4 เครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

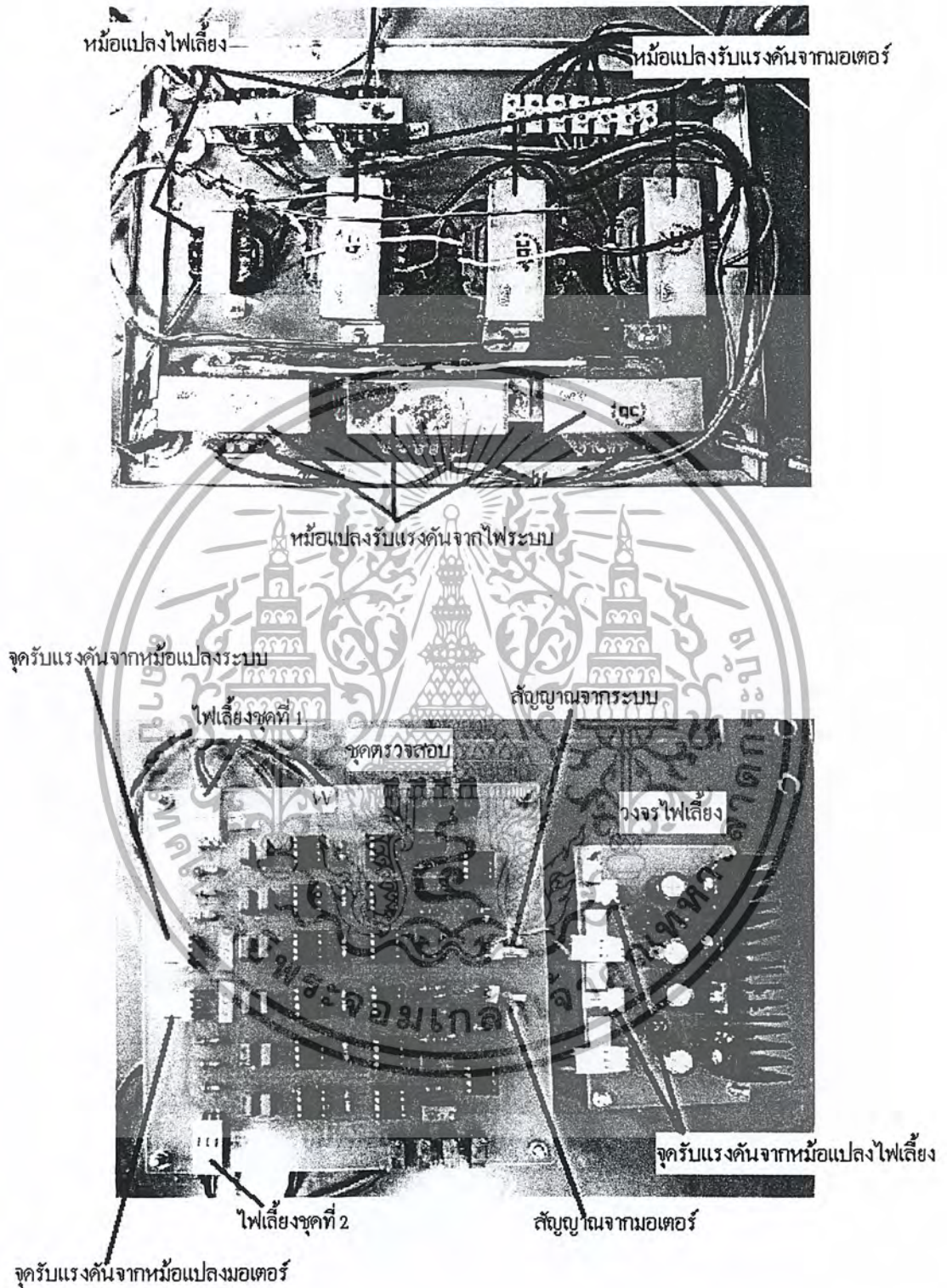
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ คือ

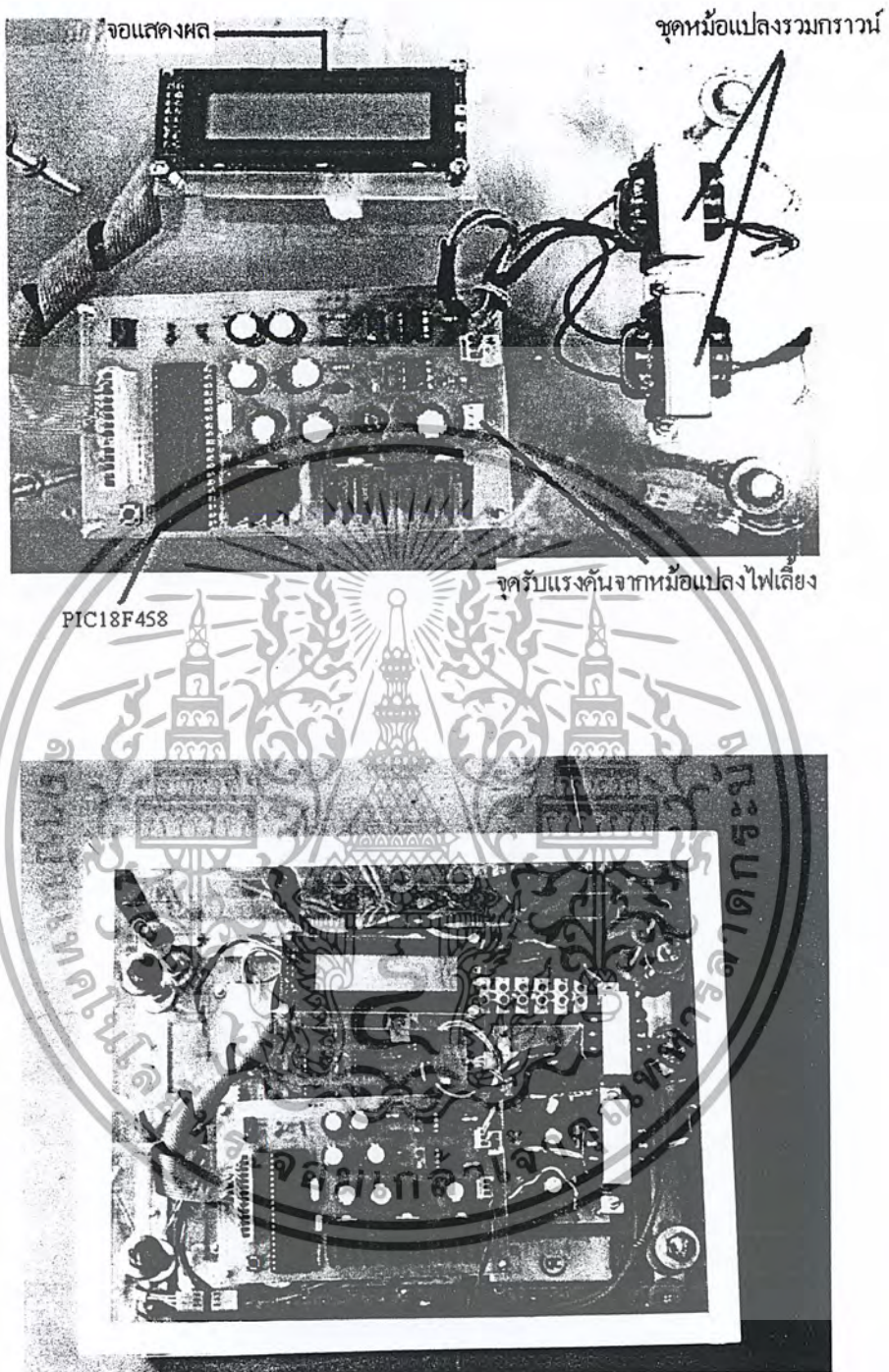
1. วาริแอก (variac) 1 เฟส	3 ตัว
2. โวลต์มิเตอร์ 1 เฟส	3 ตัว
3. หม้อแปลง 220/6	6 ตัว
หม้อแปลง 220/220	2 ตัว
หม้อแปลง 220/15	3 ตัว
4. connector 4 ขา	2 ตัว
5. ออปแอมป์ LF351	16 ตัว
6. ตัวต้านทาน(R) 1k โอห์ม	2 ตัว
3k โอห์ม	6 ตัว
220 โอห์ม	2 ตัว
500 โอห์ม	1 ตัว
11 โอห์ม	9 ตัว
7. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 100k โอห์ม	17 ตัว
8. คาปาซิเตอร์ 470 ไมโครฟารัด	11 ตัว
10 ไมโครฟารัด	13 ตัว
9. ไดโอด	2 ตัว
10. บริดจ์เรกติไฟต์	3 ตัว
11. REGULATOR 7805	1 ตัว
7815	3 ตัว
7915	3 ตัว
12. HEATSINK	7 ตัว
13. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458	1 ตัว
14. สวิตช์รีเซต	1 ตัว
15. คริสตอล 20 MHz	1 ตัว
16. จอแสดงผล (LCD)	1 อัน





รูปที่ 4.5 แสดงวงจรภายในเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรภายในเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส(2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

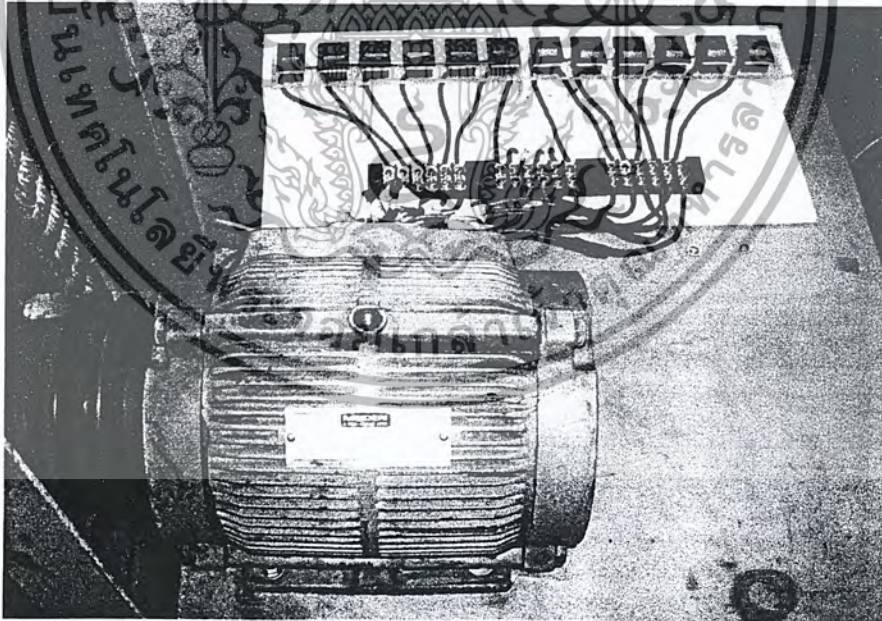
### 4.3 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิดกรงกระรอก มีพิกัด 3 และ 5 แรงม้า 3 เฟส 50Hz 4 ขั้วแม่เหล็ก การพันขดลวดเป็นแบบสุ่ม มีแรงดัน  $V_{ac}$  เท่ากับ  $380 V_{rms}$  ในการทดสอบแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์ มอเตอร์ต่อแบบวาย โดยที่จุดต่อร่วมของขดลวดสเตเตอร์ ไม่ต่อเข้ากับสายนิวตรอลของระบบ ซึ่งมอเตอร์ 3 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ ใน 1 เฟส จะมีจำนวนขดลวด 270 รอบ โดยใน 1 สล็อตมี 45 รอบ และมอเตอร์ 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ ใน 1 เฟส จะมีจำนวนขดลวด 180 รอบ โดยใน 1 สล็อตมี 30 รอบ

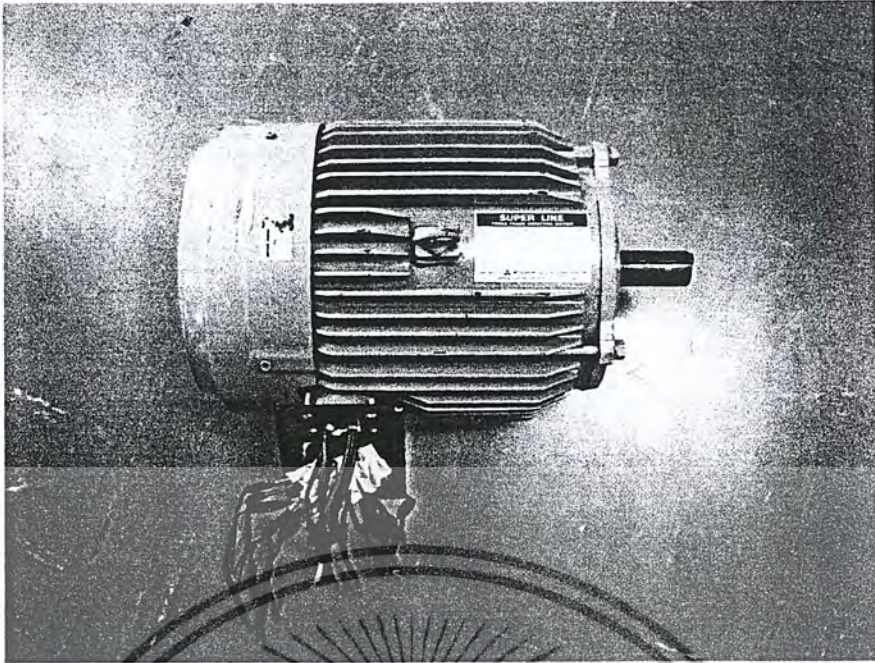
โดยมอเตอร์ที่ใช้นี้จะสั่งพันพิเศษโดยมีการต่อสายจากขดลวดที่จำนวนรอบต่างๆ ออกมาเพื่อใช้สำหรับการช็อตที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ โดยใช้สวิตช์เป็นตัว เปิด-ปิดในการช็อต

ซึ่งกำหนดให้

- 3 รอบ คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์
- 6 รอบ คิดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์
- 8 รอบ คิดเป็น 3 เปอร์เซ็นต์
- 11 รอบ คิดเป็น 4 เปอร์เซ็นต์
- 14 รอบ คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์
- 16 รอบ คิดเป็น 6 เปอร์เซ็นต์



a) มอเตอร์ 3 แรงม้า



6) มอเตอร์ 5 แรงม้า

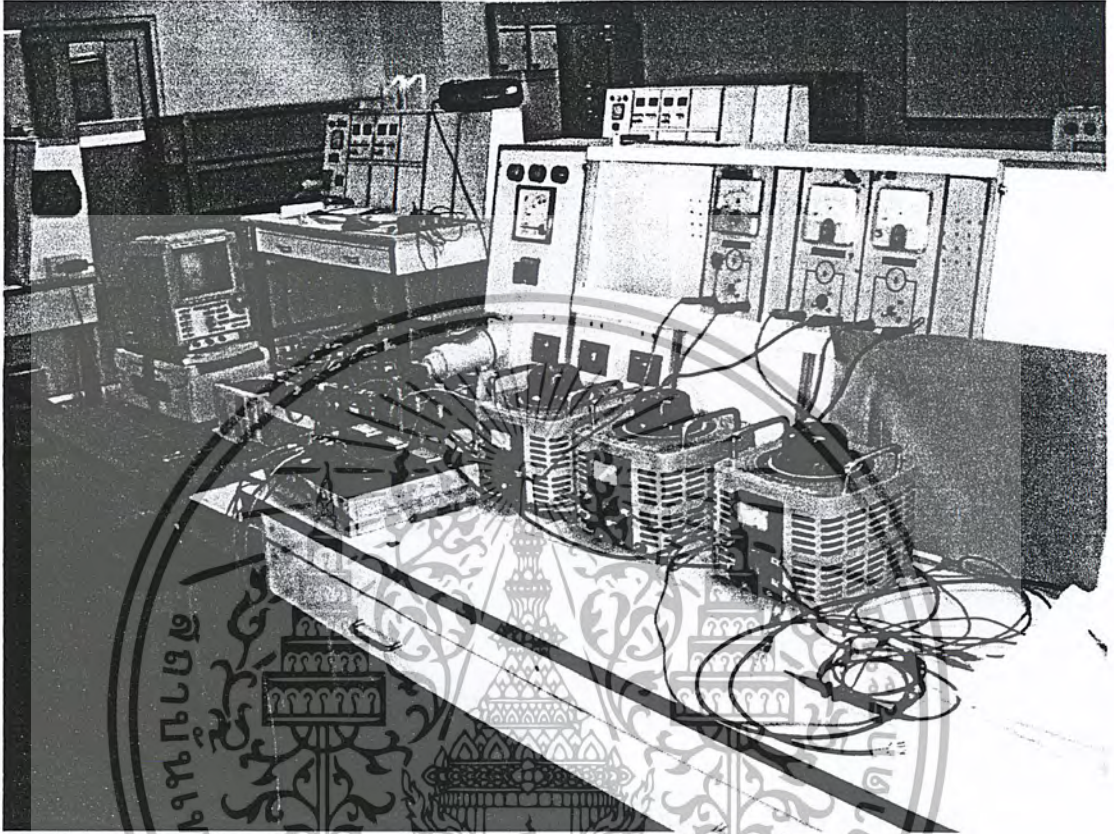
รูปที่ 4.7 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4.4 วิธีการทดสอบและการปรับแต่งวงจร

1. ต่อวาริแอก 1 เฟส 3 ตัว แบบสตาร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟของระบบและมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ โดยจุดสตาร์ของด้านปฐมภูมิของวาริแอกคือกับจุดนิวทรัลของระบบ แต่จุดสตาร์ของด้านทุติยภูมิของวาริแอกไม่ต้องต่อเข้ากับจุดสตาร์ของมอเตอร์
2. นำวงจรที่ออกแบบไว้มาทำการปรับอเฟสของออปแอมป์ โดยการต่อไฟเลี้ยงของออปแอมป์ของแต่ละชุด จากนั้นให้ต่อกราวด์เป็นอินพุตของวงจรแทนอินพุตที่มาจากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 220/6 ทั้ง 3 เฟส ของทั้งสองวงจรการทดสอบ จากนั้นปรับเอาต์พุตของออปแอมป์แต่ละตัวให้แรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณศูนย์ โดยปรับค่าที่ตัวความต้านทานออปเซต
3. ปรับค่าอัตราขยายแรงดันให้เข้าหม้อแปลงของแต่ละเฟสทุกชุด โดยให้ป้อนไฟ 220 V 1 เฟส ให้หม้อแปลง 220/6 ทั้ง 3 เฟส ทั้งสองวงจรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยทำการปรับที่ตัวความต้านทานปรับค่าได้
4. ต่อชุดทดสอบเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส โดยให้จุดสตาร์ของด้านปฐมภูมิของทั้งสองชุดทดสอบ ต่อกับจุดนิวทรัลของระบบ ปรับวาริแอกให้แหล่งจ่ายสมดุลกันทั้ง 3 เฟส ให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่จุ่มรวมจากวงจรบวกแรงดันมีค่าประมาณศูนย์ตามทฤษฎี ปรับให้เอาต์พุตของวงจรบวกแรงดันที่เป็นไฟดิซีแล้วให้มีค่าใกล้เคียงกันโดยปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณของระบบที่สมดุลทั้งสองวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ข้ายจุดสตาร์ทของด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 220/6 ของชุดตรวจมอเตอร์จากจุดนิวทรัลของระบบมาที่จุดสตาร์ทของมอเตอร์ จะได้สัญญาณของขดลวดที่สเตเตอร์ จากนั้นจะนำเอาที่หุคของระบบและมอเตอร์ไปต่อให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลต่อไป



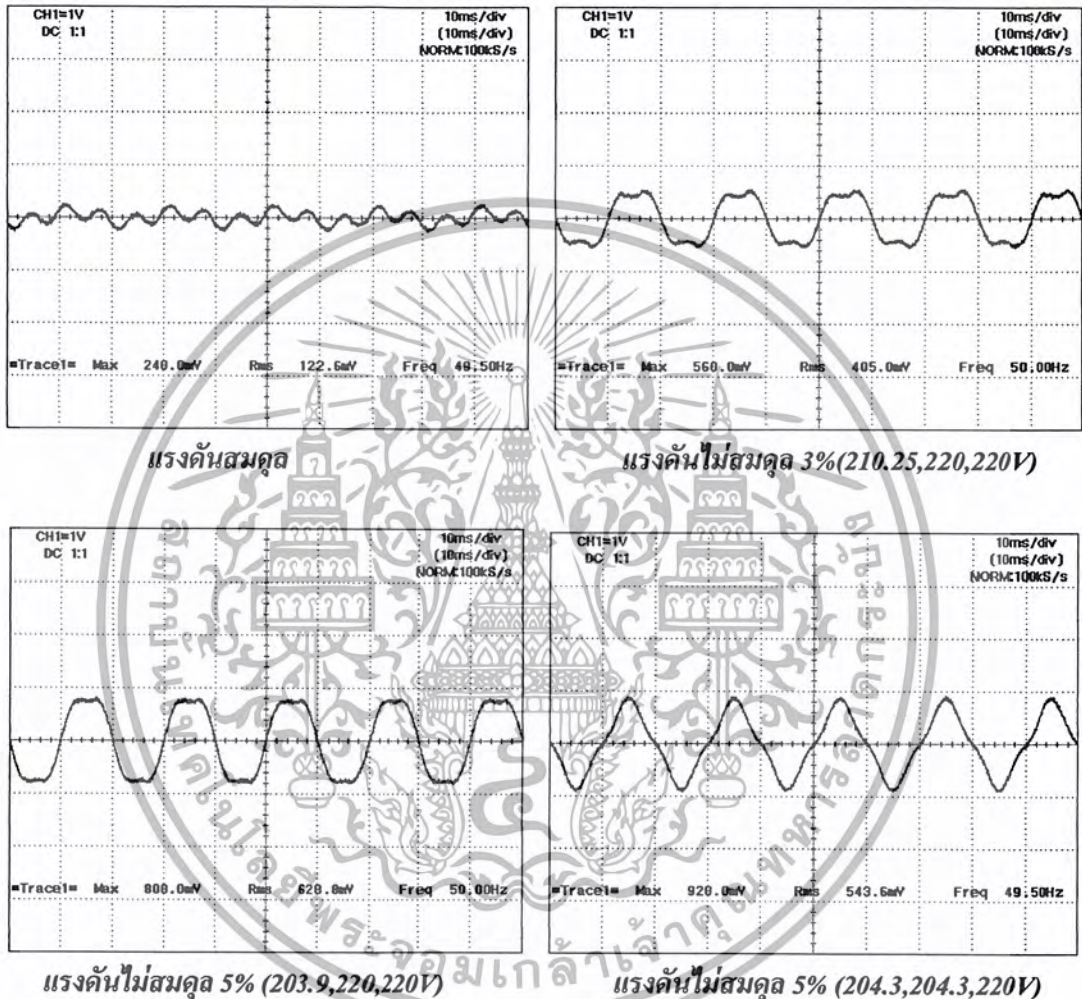
รูปที่ 4.8 การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลของสัญญาณแรงดันของระบบที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณแรงดันของระบบที่สภาวะต่างๆ

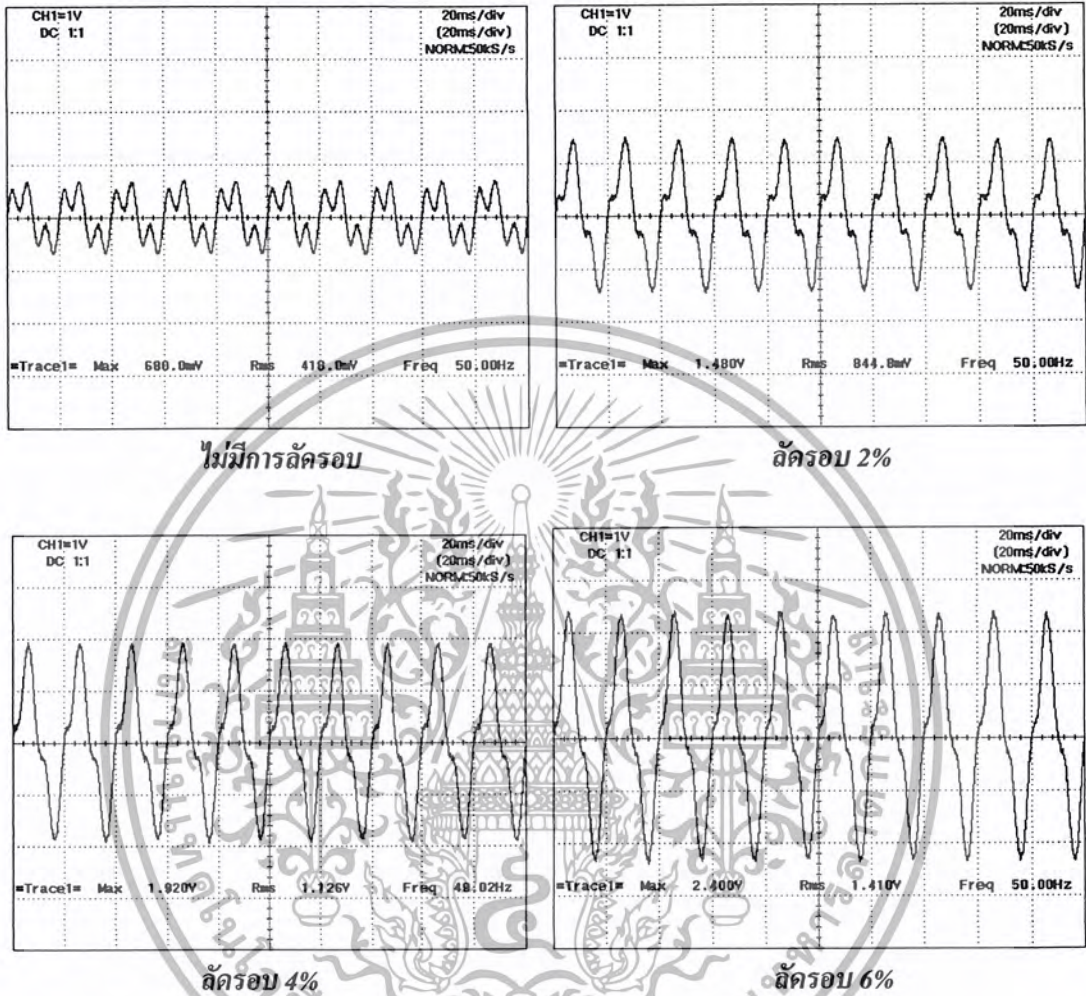
จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกความสมดุลของระบบ กล่าวคือ เมื่อภาวะความไม่สมดุลของระบบมีค่ามากขึ้นจะทำให้สัญญาณแรงดันมีค่ามากขึ้น

ในส่วนของสองรูปข้างล่างเป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟกรณีแรงดันไม่สมดุล 5% (203.9, 220, 220V) และแรงดันไม่สมดุล 5% (204.3, 204.3, 220V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

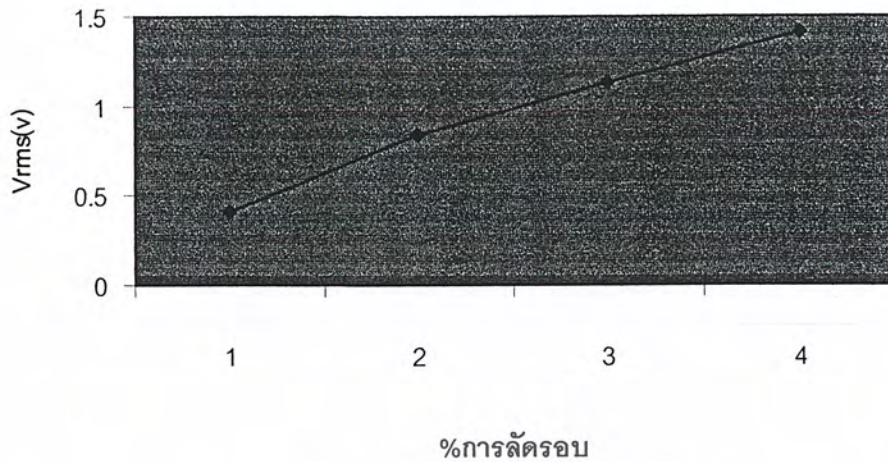
## 5.2 ผลของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากมอเตอร์ 3 แรงม้า

### 5.2.1 แรงดันสมมูล ขณะไม่มีภาระ



รูปที่ 5.2 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมมูล ขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมมูลขณะไม่มีภาระ ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

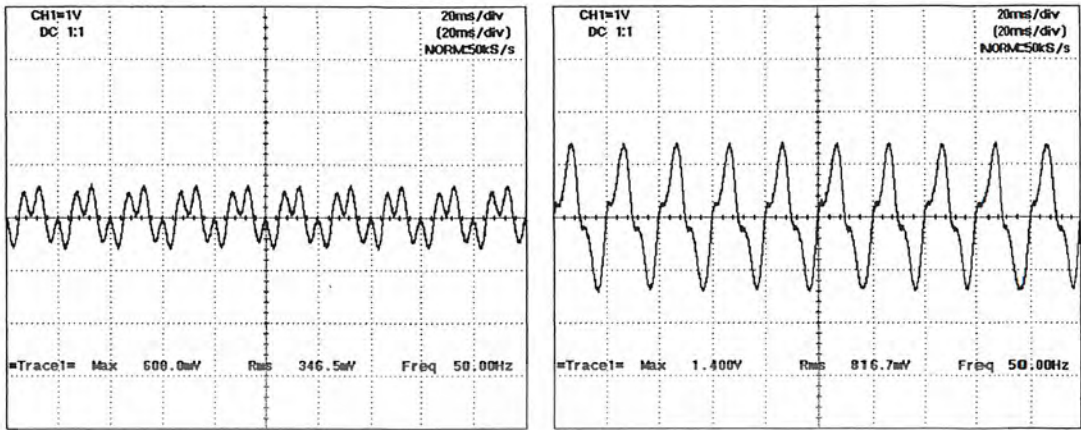


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ กับเปอร์เซ็นต์การล้ดรอบของขดลวดที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตรวจจับได้จากภาคตรวจสอบมอเตอร์เทียบกับเปอร์เซ็นต์การล้ดรอบของขดลวดที่เปลี่ยนไป เมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะแรงดันระบบสมดุล ขณะไม่มีภาระ โดยค่าแรงดันที่ตรวจจับได้จะทีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการล้ดรอบมากขึ้น

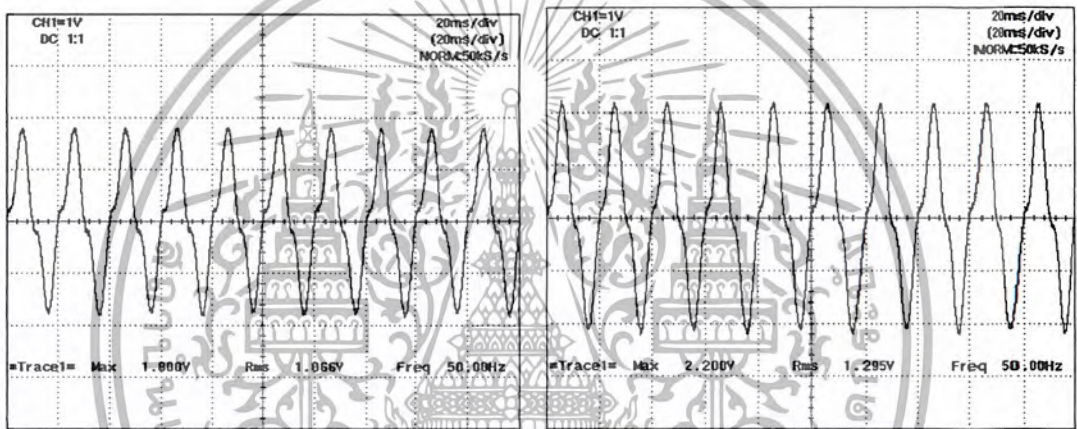


## 5.2.2 แรงดันไม่สมดุล ขณะไม่มีภาระ



ไม่มีภาระ

ภาระ 2%

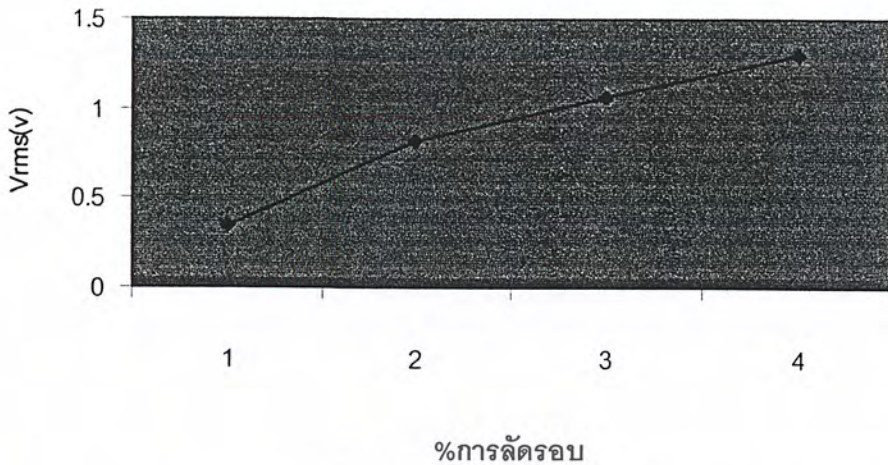


ภาระ 4%

ภาระ 6%

รูปที่ 5.4 แสดงการล้ารอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการล้ารอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการล้ารอบมากขึ้น



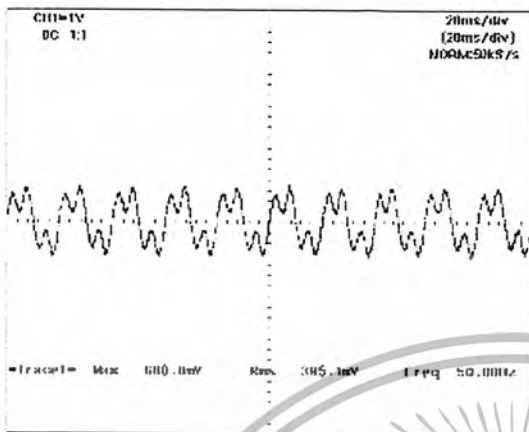
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ กับเปอร์เซ็นต์การลัดรอบของขดลวดที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตรวจจับได้จากภาคตรวจสอบมอเตอร์เทียบกับเปอร์เซ็นต์การลัดรอบของขดลวดที่เปลี่ยนไป เมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะแรงดันระบบไม่สมดุล 5% ขณะไม่มีภาระ โดยค่าแรงดันที่ตรวจจับได้จะทีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

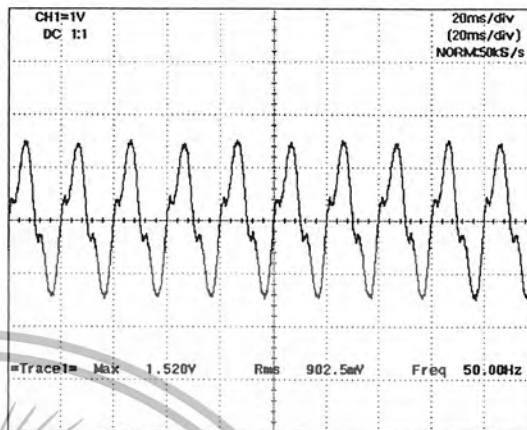


### 5.2.3 สมดุล ขณะมีภาระ

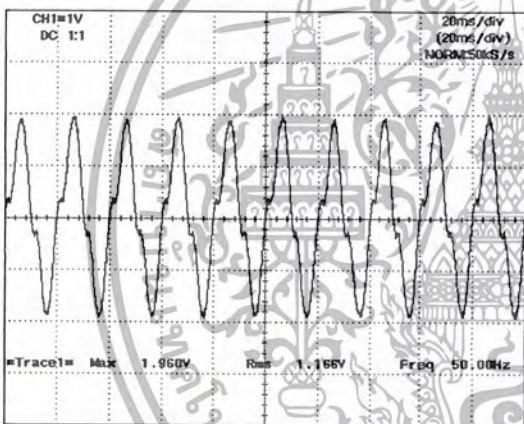
#### 5.2.3.1 25% ของพิกัดสลิป



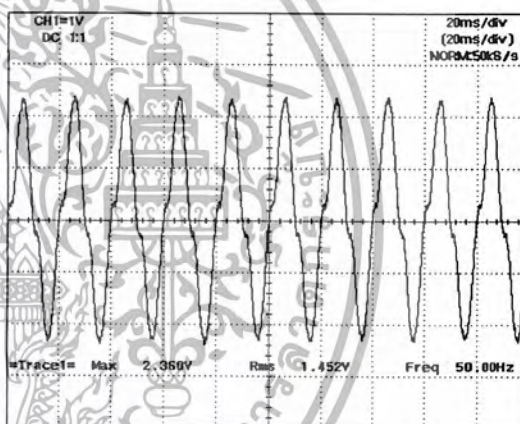
ไม่มีการลัดรอบ



ลัดรอบ 2%



ลัดรอบ 4%

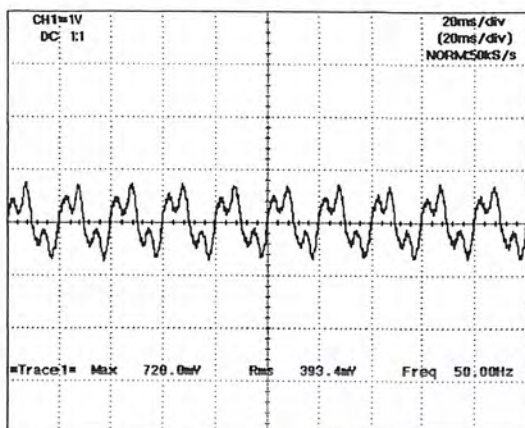


ลัดรอบ 6%

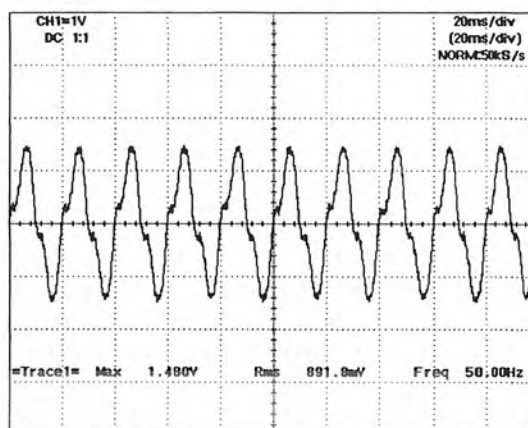
รูปที่ 5.6 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป

จากรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของ ขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับ ได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

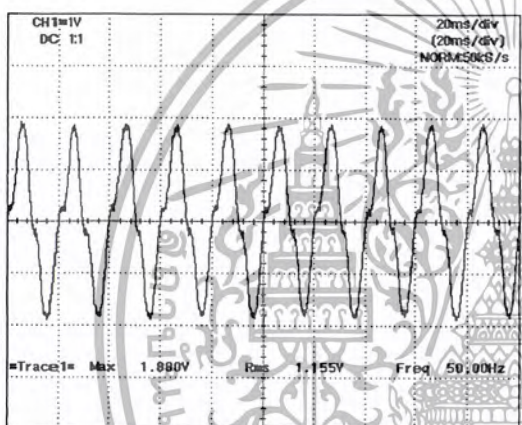
## 5.2.3.2 50% ของพิกัดสลิป



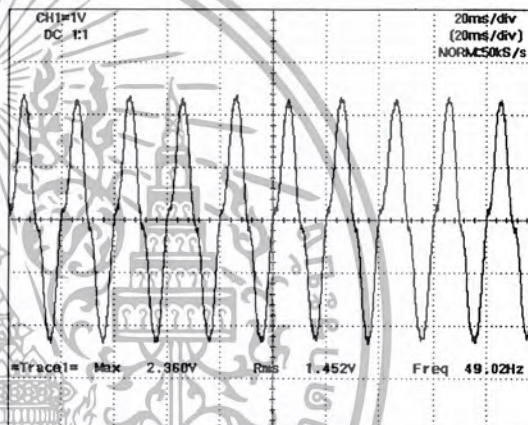
ไม่มีการลัดรอบ



ลัดรอบ 2%



ลัดรอบ 4%



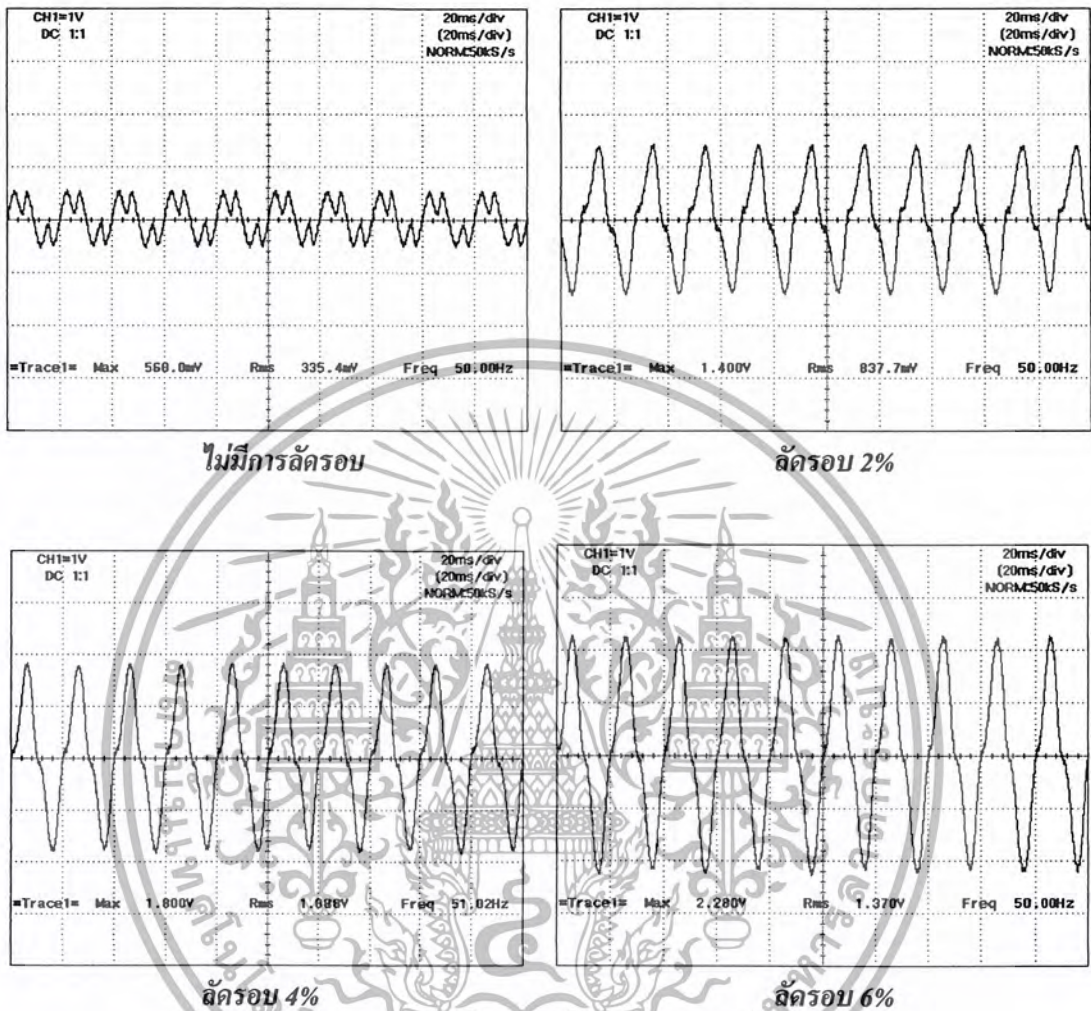
ลัดรอบ 6%

รูปที่ 5.7 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมมูล ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป

จากรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมมูล ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

## 5.2.4 ไม่สมดุล 5% (203.9,220,220 V) ขณะมีภาระ

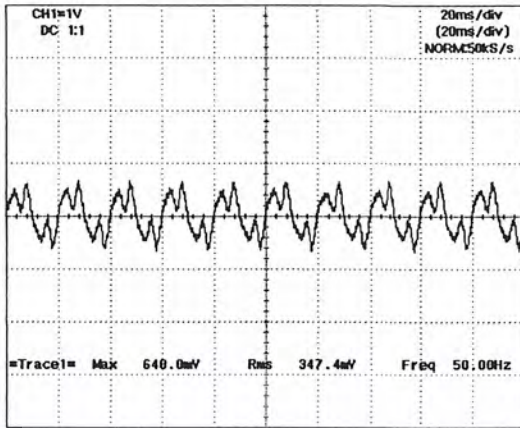
### 5.2.4.1 25% ของพิกัดสลิป



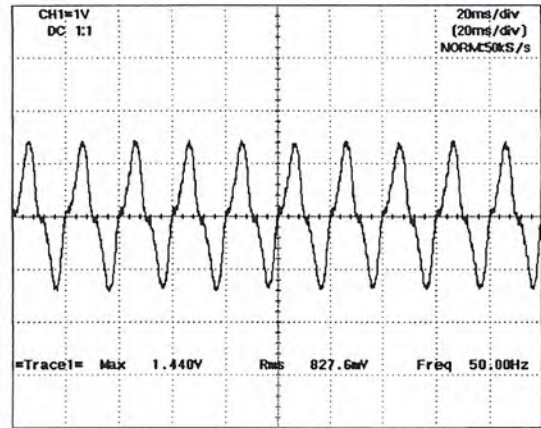
รูปที่ 5.8 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป

จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 25% ของพิกัดสลิป ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

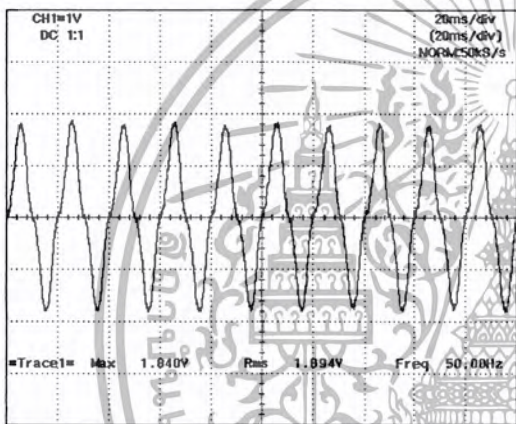
## 5.2.4.2 50% ของพิกัดสลิป



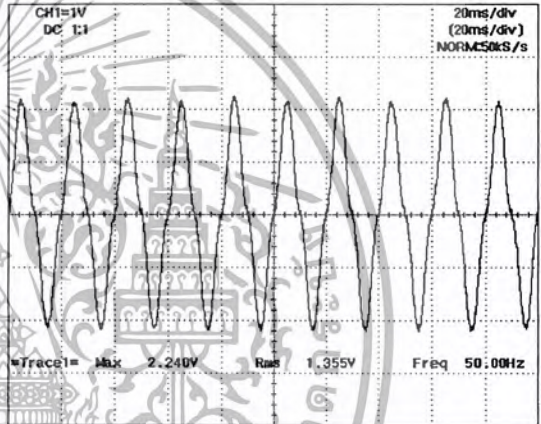
ไม่มีการลัดรอบ



ลัดรอบ 2%



ลัดรอบ 4%



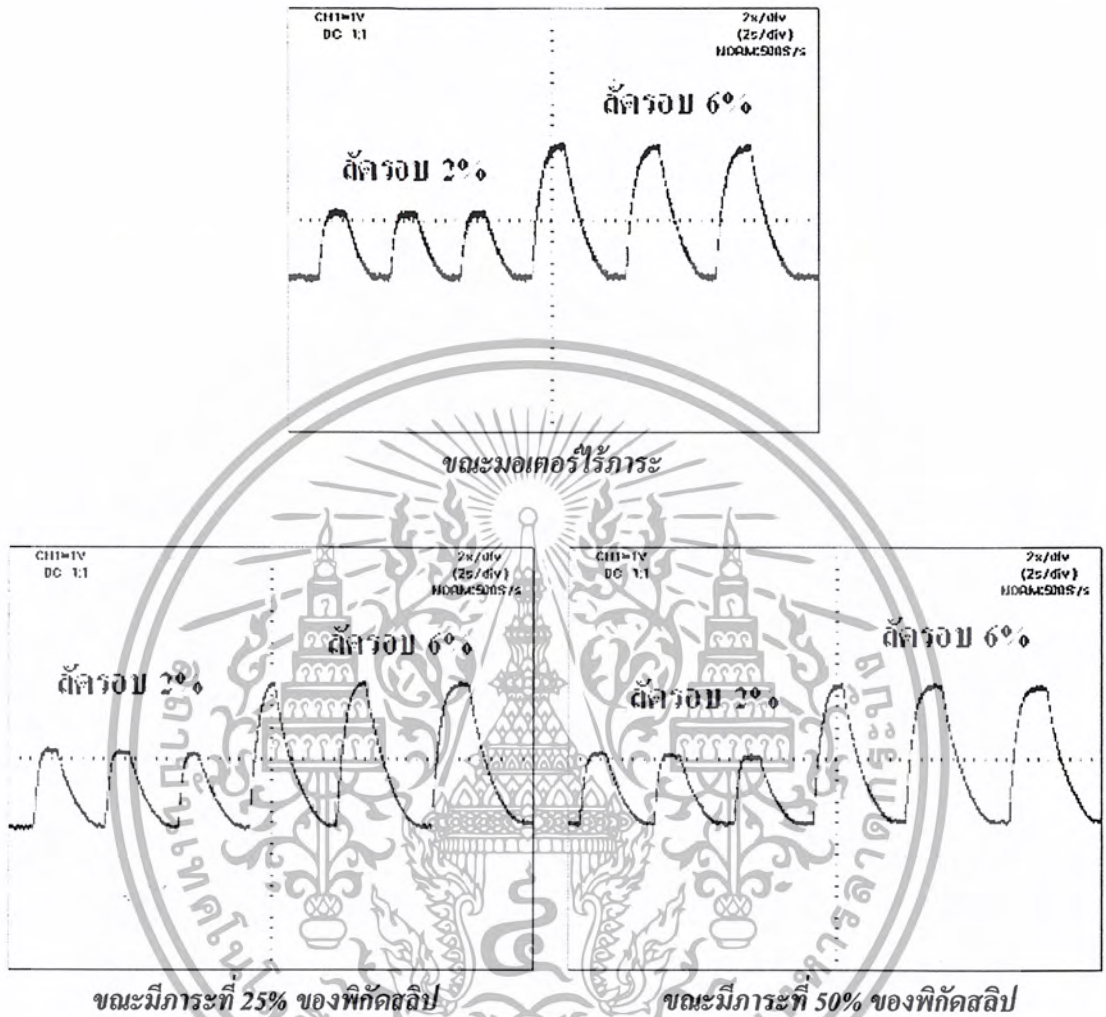
ลัดรอบ 6%

รูปที่ 5.9 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป

จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลอง ในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล 5% ขณะมีภาระที่ 50% ของพิกัดสลิป ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

## 5.2.5 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบ

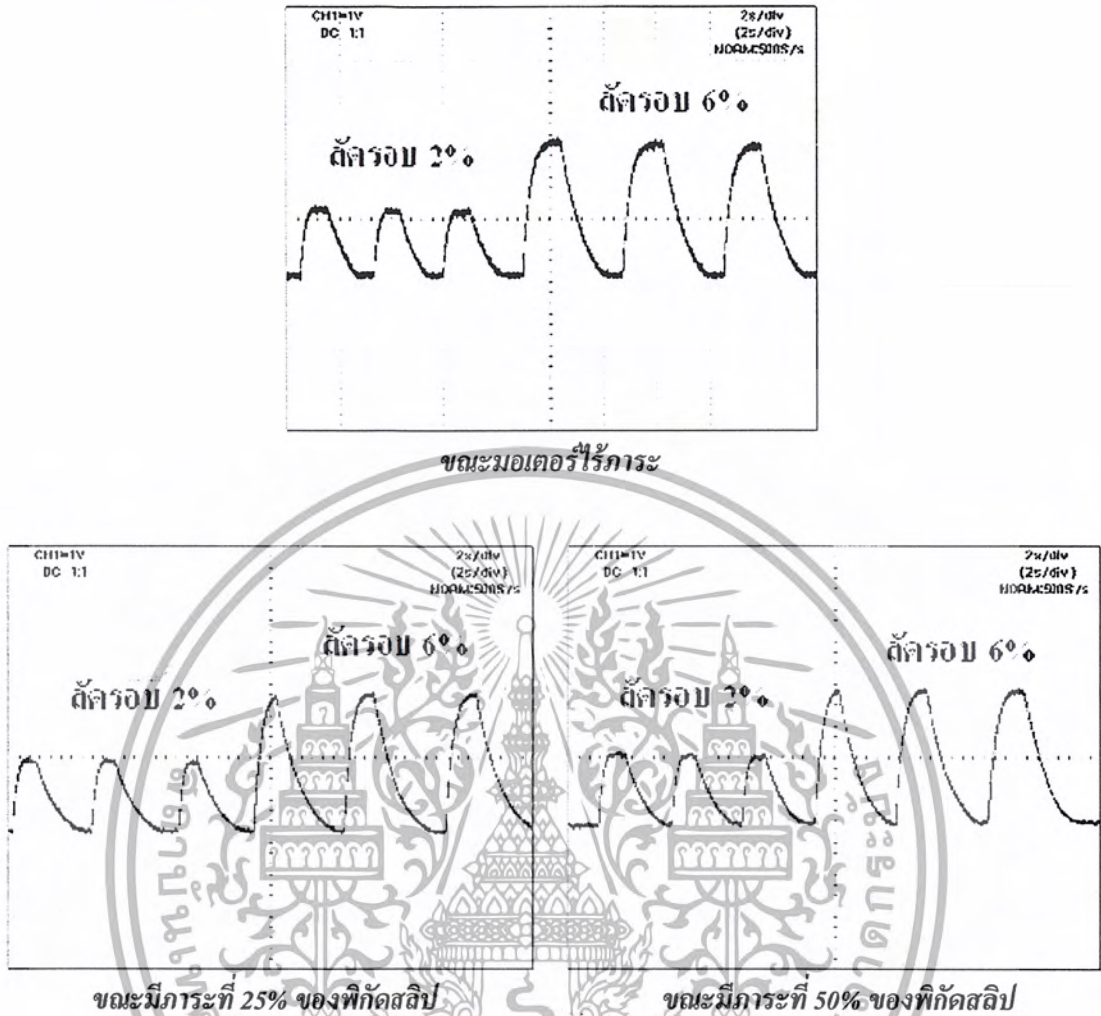
### 5.2.5.1 ที่ภาวะสมดุล



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะสมดุล

เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากภาคตรวจสอบมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์มีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่ 2% และ 6% ในภาวะที่ระบบมีความสมดุล แต่มอเตอร์มีการขับเคลื่อนต่างกัน

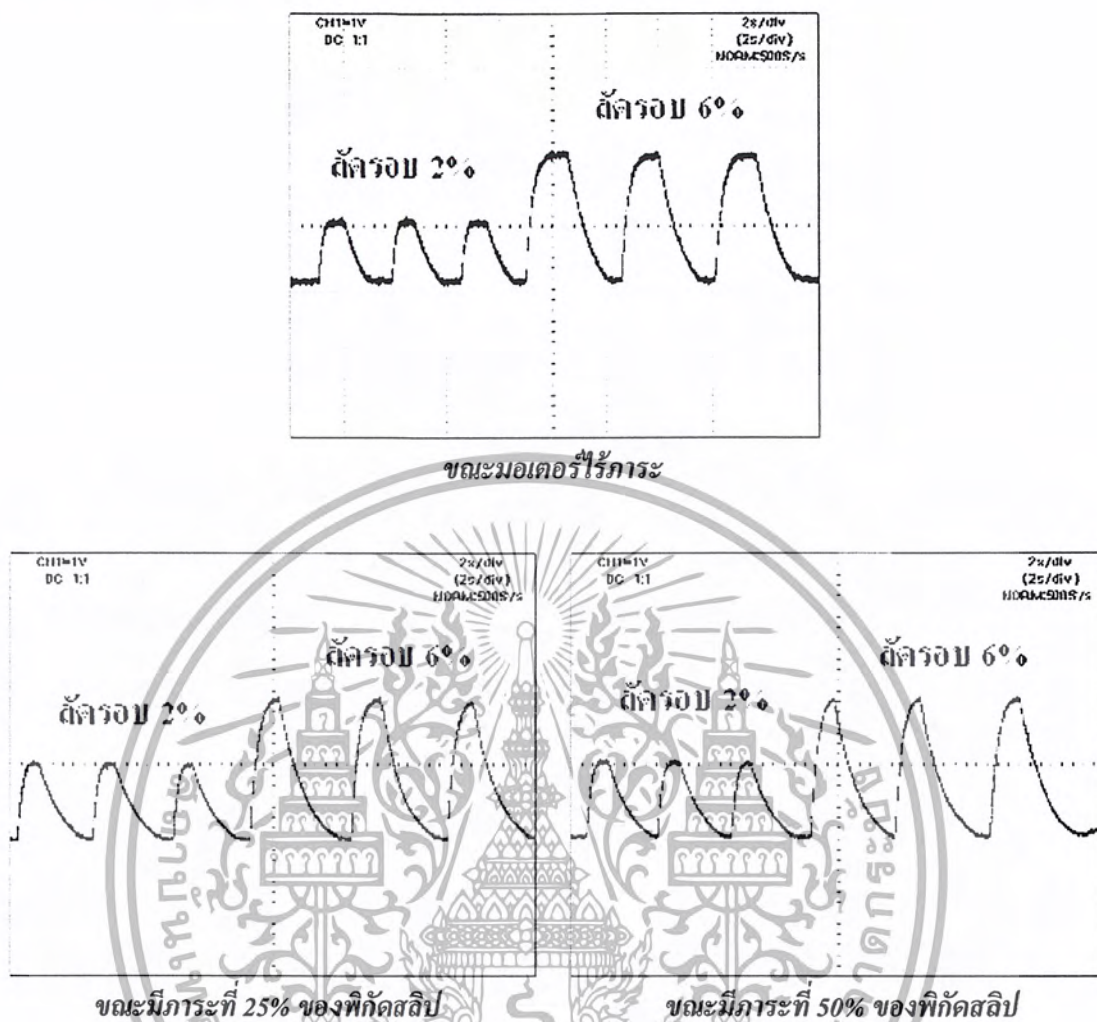
### 5.2.5.2 ที่ภาวะไม่สมดุล 3% (210.25,220,220V)



รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการล้นรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะไม่สมดุล 3%

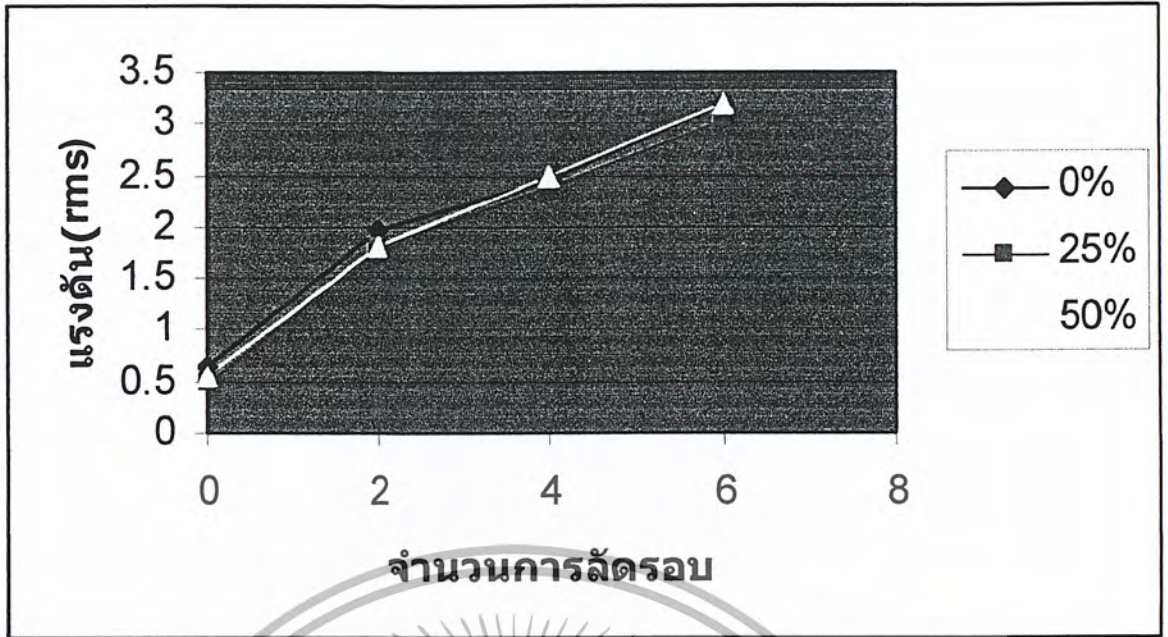
เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากภาคตรวจสอบมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์มีการล้นรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่ 2% และ 6% ในภาวะที่ระบบมีความไม่สมดุล 3% และมอเตอร์มีการขับเคลื่อนต่างกัน

### 5.2.5.3 ที่ภาวะไม่สมดุล 5% (203.9,220,220V)



รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะไม่สมดุล 5%

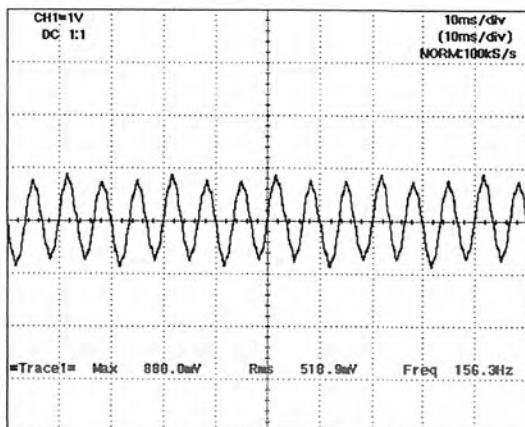
เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงสัญญาณแรงดัน ที่ตรวจจับได้จากภาคตรวจสอบมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์มีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่ 2% และ 6% ในภาวะที่ระบบมีความไม่สมดุล 5% และมอเตอร์มีการขับภาระต่างกัน



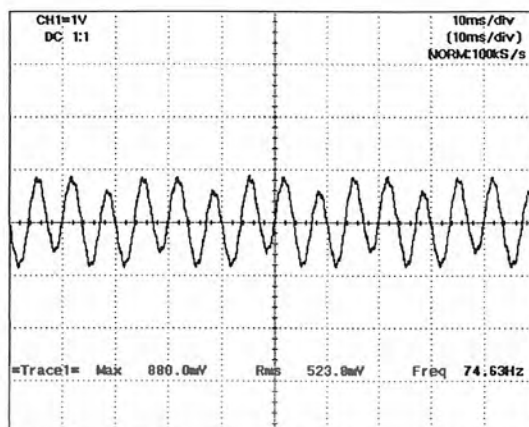
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ที่ค่าสลิปต่างกัน

จากรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้น ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลองในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะมีการะต่างกัน ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

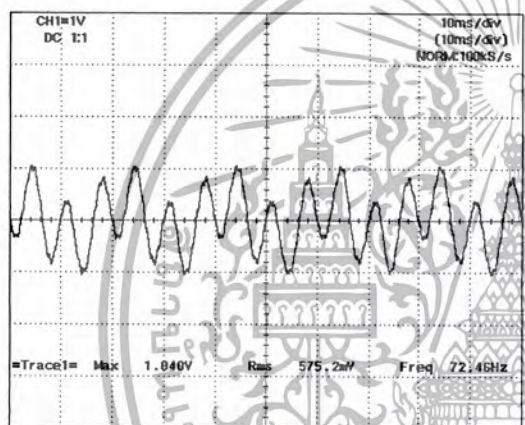
### 5.3 ผลของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากมอเตอร์ 5 แรงม้า



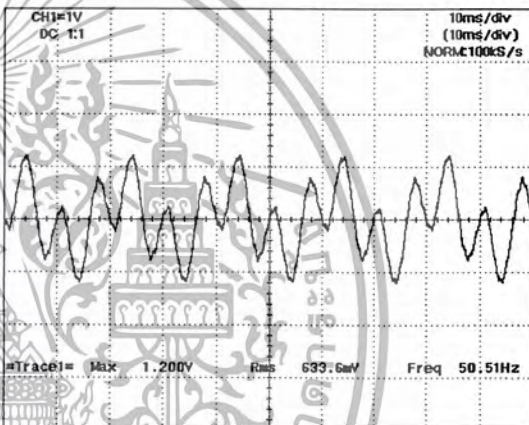
ไม่มีการลัดรอบ



ลัดรอบ 2รอบ



ลัดรอบ 4รอบ



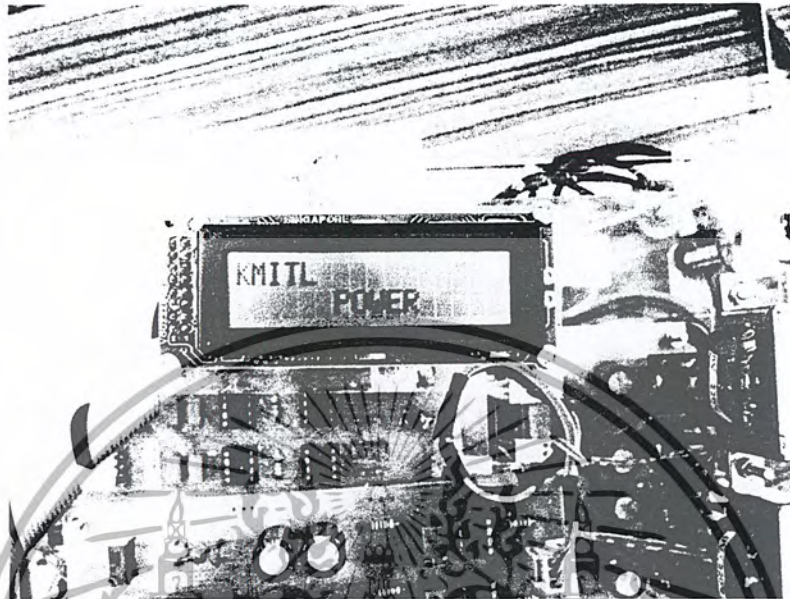
ลัดรอบ 6รอบ

รูปที่ 5.14 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นกับตัวมอเตอร์ 5 แรงม้า ที่ตรวจจับได้จากชุดทดลองในส่วนของภาคตรวจสอบมอเตอร์ โดยสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวบ่งบอกการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ภาวะแรงดันสมดุล ขณะไม่มีภาระ ซึ่งสัญญาณของแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขดลวดมีการลัดรอบมากขึ้น

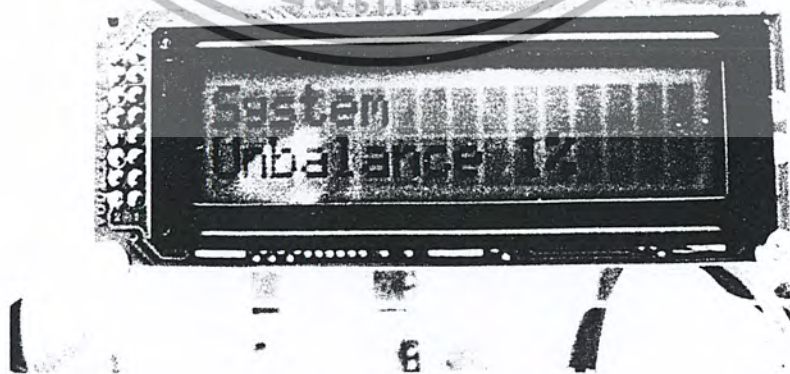
## 5.4 การแสดงผลจากหน้าจอ (LCD)

เมื่อเครื่องเริ่มการทำงานจอ LCD แสดงได้ดังรูป



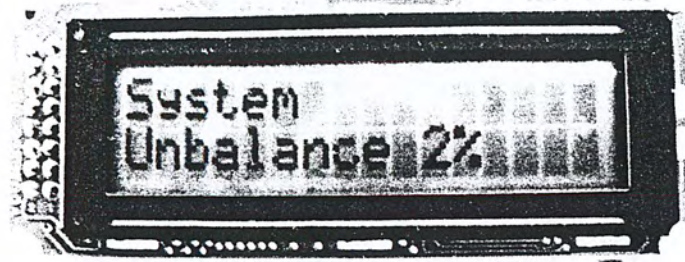
รูปที่ 5.15 แสดงการเริ่มทำงานของเครื่อง

เมื่อแรงดันจากระบบอยู่ในสภาวะ ไม่สมดุลจอ LCD แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.16 แสดงสภาวะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

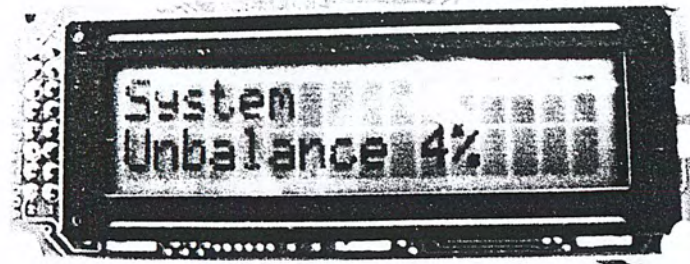


รูปที่ 5.17 แสดงสถานะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%



รูปที่ 5.18 แสดงสถานะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงสถานะแรงดันไม่สมดุลของระบบ 2%



รูปที่ 5.20 แสดงสถานะแรงดันไม่สมดุลของระบบมากกว่า 5%

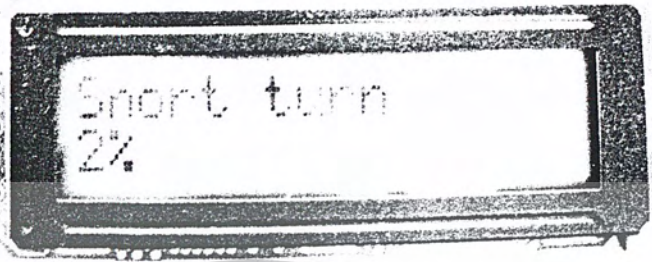
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลึกรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์ต่างกัน(แรงดันอยู่ในภาวะสมดุล)จอLCDแสดงดังรูป



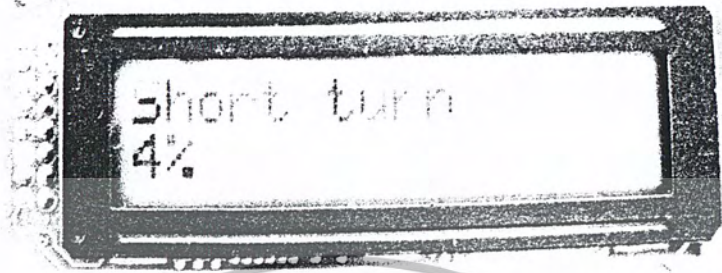
รูปที่ 5.22 แสดงการลึกรอบของขดลวดสเตเตอร์ 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงการล้อมของขดลวดสเตเตอร์ 3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

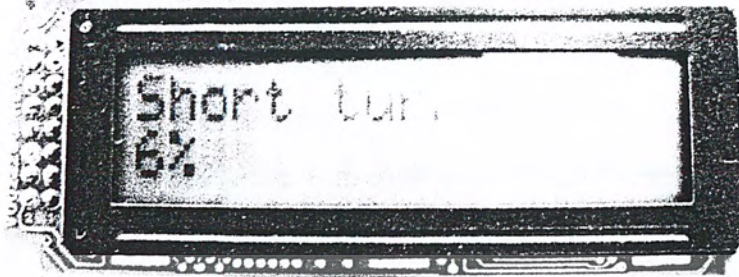


รูปที่ 5.25 แสดงการฉัตรอบของขดลวดสเตเตอร์ 4%



รูปที่ 5.26 แสดงการฉัตรอบของขดลวดสเตเตอร์ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 แสดงการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์มากกว่า 7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

ปัญหาหลักที่พบในการทดลองเพื่อนำไปสร้างเครื่องตรวจสอบจนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส คือ สัญญาณแรงดันที่ใช้ทั้ง 3 เฟส จะต้องควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 220 Vrms อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากแรงดันที่รับเข้ามาจากระบบของการไฟฟ้าจะแกว่งไปมาไม่คงที่ ซึ่งในบางครั้งก็เป็นการยากที่ต้องคอยควบคุมให้แรงดันสมดุลกัน

#### 1. ส่วนของระบบ

ค่าของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ จากส่วนของชุดทดลองที่ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมดุลของระบบ จะมีค่าไม่เท่ากับ 0 โดยจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด เมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล และจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระบบมีความไม่สมดุลมากขึ้น

ดังนั้น เราสามารถตรวจสอบความสมดุล และความไม่สมดุลของระบบได้จาก ค่าสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

#### 2. ส่วนของการตรวจสอบมอเตอร์ (กรณีมอเตอร์ไม่มีภาระ)

จากการทดลองเพื่อจัดทำเครื่องตรวจสอบจนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้สามารถทราบได้ว่า เมื่อมอเตอร์มีการลัดรอบเกิดขึ้นจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขดลวด ณ เฟสที่เกิดการลัดรอบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลทำให้สัญญาณแรงดัน ( $\tilde{V}_{sum}$ ) จากสมการ  $\tilde{V}_{sum} = \tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

ค่าของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้ จากส่วนของชุดทดลองที่ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์ของขดลวดสเตเตอร์ จะมีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อขดลวดมีการลัดรอบเกิดขึ้น โดยค่าของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้นั้น จะมีค่ามากขึ้น เมื่อมีการลัดรอบมากขึ้น

กรณีการตรวจสอบการลัดรอบขณะระบบไม่สมดุล ค่าของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากส่วนของชุดทดลองที่ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์ของขดลวดสเตเตอร์ จะมีผลในลักษณะเดียวกับกรณีของการตรวจสอบการลัดรอบของขดลวด ในขณะที่ระบบมีความสมดุลซึ่งก็คือ เมื่อขดลวดมีการลัดรอบเกิดขึ้นค่าของสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจสอบมอเตอร์ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการลัดรอบมากขึ้น แต่ข้อแตกต่างระหว่างการตรวจสอบการลัดรอบของขดลวดในขณะที่ระบบมีความสมดุลและไม่สมดุล ก็คือค่าของแรงดันที่ตรวจได้จะมีความแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การลัดรอบจำนวนเท่ากันก็ตาม หรือกล่าวได้ว่ากรณีมอเตอร์มีการลัดรอบ 3 % เท่ากัน ผลของสัญญาณแรงดันที่เก็บได้ในกรณีที่ระบบมีความสมดุลจะมีค่าไม่เท่ากับกรณีที่ระบบมีความไม่สมดุล

### 3. ส่วนของการตรวจสอบมอเตอร์ (กรณีมอเตอร์มีภาระ)

จากการทดสอบเก็บค่าสัญญาณแรงดันที่ได้จากชุดตรวจสอบมอเตอร์ เมื่อขดลวดสเตเตอร์มีการลัดรอบ ในขณะที่มอเตอร์มีภาระ ผลการทดสอบที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง หรือกล่าวได้ว่ามีค่าเท่ากับผลการทดลองครั้งที่สรุปในข้อ 2 ทุกประการ ทั้งกรณีที่ระบบมีความสมดุลและไม่สมดุล

ดังนั้นผลสรุปโดยรวมของโครงการวิจัยนี้ก็คือ สัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้จะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเกิดการลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์ และสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ไม่ขึ้นอยู่กับค่าสลิปโดยประสิทธิภาพและความถูกต้องจะมากขึ้นเมื่อนำชุดทดสอบนี้ไปตรวจสอบการลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์ ในขณะที่ระบบมีความสมดุล

จากเทคนิคการตรวจจับสัญญาณสเตเตอร์โดยใช้สัญญาณแรงดันไลน์-นิวตรอล ที่ได้นำมาเป็นแนวคิดในการสร้างเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ถึงแม้ว่าเครื่องนี้จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อมีการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์จนถึงทีเปอร์เซ็นต์จึงจะเป็นอันตรายต่อตัวมอเตอร์ แต่เราก็ยังสามารถนำเครื่องต้นแบบนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ กล่าวคือ ถ้าเราต้องการตรวจสอบว่ามอเตอร์ที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมตัวไหนที่สมควรจะได้รับการดูแลเป็นพิเศษ ก็สามารถให้เครื่องนี้ตรวจสอบโดยนำเปอร์เซ็นต์ของการลัดรอบมาเปรียบเทียบกับ ถ้าหากว่ามอเตอร์ตัวใดมีเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่า หรือค่าผิดปกติไปจากมอเตอร์ตัวอื่นๆ ก็จะทำให้เราสามารถประเมินมอเตอร์เหล่านั้นได้ว่าควรจะมีการเตรียมการป้องกันอย่างไร เพื่อไม่ให้มอเตอร์เกิดการหยุดทำงานกลางคัน หรือส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม อันเนื่องมาจากปัญหาจุดเล็กๆ เพียงจุดเดียว

ในส่วนของแนวทางการพัฒนาเครื่องตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนี้ เราจะต้องมีการควบคุมตัวแปรหลายๆ ส่วนให้ได้คือ ในส่วนของระบบไฟ 3 เฟส จะต้องมีความสมดุลกันอย่างคงที่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบวงจรต่างๆ ในเครื่องนี้ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ก็ควรจะต้องเลือกใช้ในส่วนที่ผลิตมาจากล็อตเดียวกันทั้งหมด ควรให้มีคุณภาพที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณแรงดันที่เราต้องนำมาพิจารณา

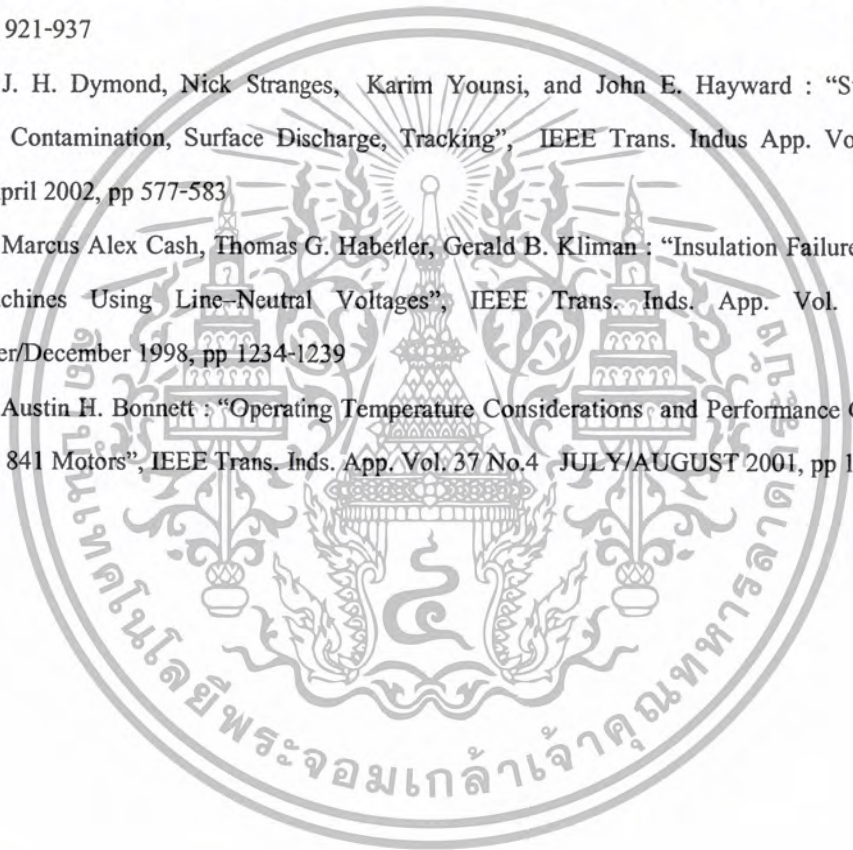
ควรจะศึกษาถึงปัจจัยแวดล้อมของตัวมอเตอร์ ที่อาจส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความผิดพลาด เช่น คุณภาพของขดลวด ส่วนของร่องสลอต ร่องลื่น หรือฝุ่นละอองต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายใน เป็นต้น การจำลองการลัดรอบก็เช่นกัน จะต้องมีการควบคุมให้เปอร์เซ็นต์การลัดรอบที่เปอร์เซ็นต์เดียวกันแต่ต่างเฟสกันให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดหรือเท่ากันได้จะยิ่งดี

จะต้องมีการเก็บข้อมูล และผลการทดสอบจากมอเตอร์หลายๆ แรงม้าด้วย เพื่อที่จะได้นำมาวิเคราะห์ร่วมกัน

ในแนวทางต่างๆ เหล่านี้ ผู้วิจัยหวังว่าจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาสร้างตรวจสอบฉนวนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สมบูรณ์แบบได้ต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] M.E.H. Benbouzid and G.B. Kliman, "What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis" IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.18, NO.2, June 2003, pp 238-244
- [2] S. Nandi and H.A. Toliyat, "Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults in induction machines using stator-induced voltages after switch-off" IEEE Trans. Ind. App. Vol. 38, No.1, Jan./Feb. 2002, pp 101-109
- [3] Austin H. Bonnett, George C. Soukup : "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans. Indus App. Vol. 28, NO. 4, July / August 1992, pp 921-937
- [4] J. H. Dymond, Nick Stranges, Karim Younsi, and John E. Hayward : "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking", IEEE Trans. Indus App. Vol. 38, NO. 2, March/April 2002, pp 577-583
- [5] Marcus Alex Cash, Thomas G. Habetler, Gerald B. Kliman : "Insulation Failure Prediction in AC Machines Using Line-Neutral Voltages", IEEE Trans. Inds. App. Vol. 34, NO. 6, November/December 1998, pp 1234-1239
- [6] Austin H. Bonnett : "Operating Temperature Considerations and Performance Characteristics for IEEE 841 Motors", IEEE Trans. Inds. App. Vol. 37 No.4 JULY/AUGUST 2001, pp 1120-1131





## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INCLUDE "modedefs.bas"

DEFINE OSC 20

Define LCD_DREG PORTD
Define LCD_RSREG PORTC
Define LCD_RSBIT 2
Define LCD_EREG PORTC
Define LCD_EBIT 3
Define LCD_BITS 8

Vsys var word
sys var word

Vmotor var word
motor var word

TRISD = %00000000
TRISC = %00000000
TRISA = %11111111
ADCON1 = %10000010
ADCON0 = %11000001
Pause 500
system1: ADCON0.2 = 1
notdone: Pause 5
IF ADCON0.2 = 1 Then notdone

sys.highbyte = ADRESH
sys.lowbyte = ADRESL
Vsys = sys
pause 50

if (Vsys<=75) then goto kmitl
IF (Vsys >137) AND ( Vsys < 266) THEN goto unbalance1
IF (Vsys >= 266) AND ( Vsys < 397) THEN goto unbalance2
IF (Vsys >= 397) AND ( Vsys < 529) THEN goto unbalance3
IF (Vsys >= 529) AND ( Vsys < 676) THEN goto unbalance4
IF (Vsys >= 676) AND ( Vsys < 860) THEN goto unbalance5
IF (Vsys >= 860) THEN goto unbalance6

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF (Vsys >= 75) and (Vsys <= 137) THEN gosub A2D_MOTOR
ADCON1 = %10000010
ADCON0 = %11000001
pause 500
goto system1

```

```
A2D_MOTOR:  ADRESL = %00000000
```

```
ADRESH = %00000000
```

```
ADCON1 = %10001001
```

```
ADCON0 = %11101001
```

```
PAUSE 500
```

```
MOTOR1: ADCON0.2 = 1
```

```
WAIT1: Pause 5
```

```
if ADCON0.2 = 1 Then WAIT1
```

```
motor.highbyte = ADRESH
```

```
motor.lowbyte = ADRESL
```

```
Vmotor = motor
```

```
pause 50
```

```
if (Vmotor >= 0) AND ( Vmotor < 102 ) THEN GOSUB HEALTY
```

```
IF (Vmotor >= 102) AND ( Vmotor < 266) THEN GOSUB SHORT1
```

```
IF (Vmotor >= 266) AND ( Vmotor < 344) THEN GOSUB SHORT2
```

```
IF (Vmotor >= 344) AND ( Vmotor < 410) THEN GOSUB SHORT3
```

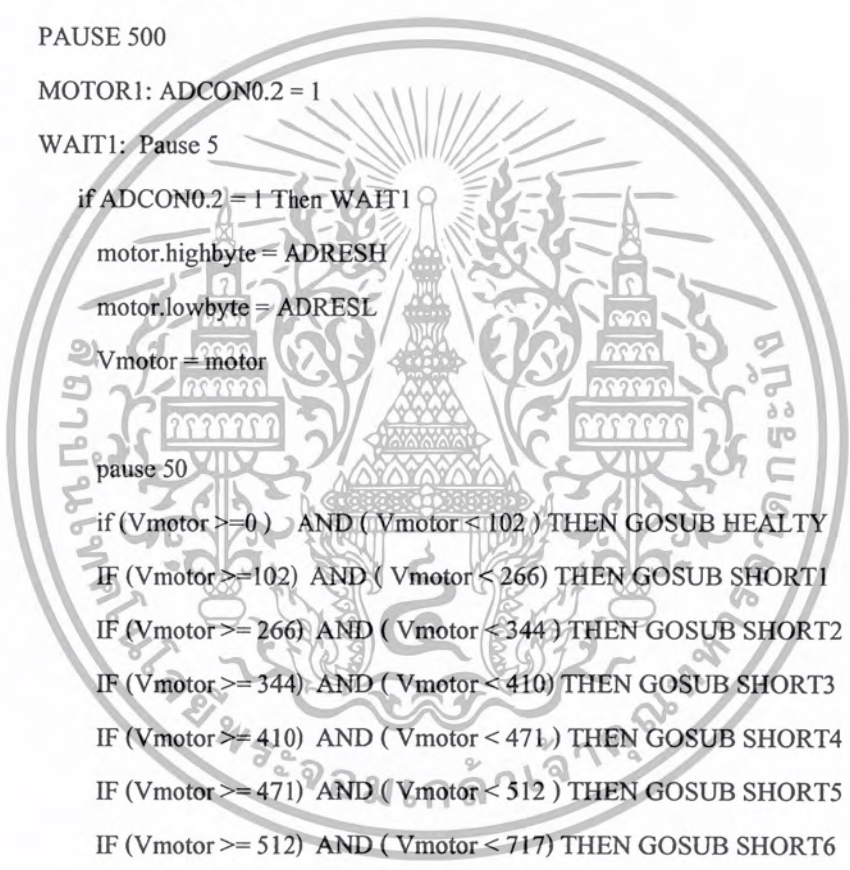
```
IF (Vmotor >= 410) AND ( Vmotor < 471) THEN GOSUB SHORT4
```

```
IF (Vmotor >= 471) AND ( Vmotor < 512 ) THEN GOSUB SHORT5
```

```
IF (Vmotor >= 512) AND ( Vmotor < 717) THEN GOSUB SHORT6
```

```
IF Vmotor > 717 THEN GOSUB SHORT7
```

```
RETURN
```



```

kmitl: LCDOut $fe, 1
      LCDOut "KMITL"
      Pause 1000
      LCDOut $fe,$C0
      LCDOut " POWER"
      Pause 1000
      ADCON1 = %10000010
      ADCON0 = %11000001
      pause 500
      goto system1

```

```

unbalance1:LCDOut $fe, 1
      LCDOut "System"
      Pause 1000
      LCDOut $fe,$C0
      LCDOut "Unbalance 1%"
      Pause 1000
      ADCON1 = %10000010
      ADCON0 = %11000001
      pause 500
      goto system1

```

```

unbalance2:LCDOut $fe, 1
      LCDOut "System"
      Pause 1000
      LCDOut $fe,$C0
      LCDOut "Unbalance 2%"
      Pause 1000
      ADCON1 = %10000010
      ADCON0 = %11000001
      pause 500
      goto system1

```

```

unbalance3:LCDOut $fe, 1
      LCDOut "System"
      Pause 1000

```



```

LCDOut  $fe,$C0
LCDOut  "Unbalance 3% "
Pause   1000
ADCON1 = %10000010
ADCON0 = %11000001
pause 500
goto system1

unbalance4:LCDOut  $fe, 1
LCDOut  "System"
Pause   1000
LCDOut  $fe,$C0
LCDOut  "Unbalance 4%"
Pause   1000
ADCON1 = %10000010
ADCON0 = %11000001
pause 500
goto system1

unbalance5:LCDOut  $fe, 1
LCDOut  "System"
Pause   1000
LCDOut  $fe,$C0
LCDOut  "Unbalance 5%"
Pause   1000
ADCON1 = %10000010
ADCON0 = %11000001
pause 500
goto system1

unbalance6:LCDOut  $fe, 1
LCDOut  "System"
Pause   1000
LCDOut  $fe,$C0
LCDOut  "Unbalance >5%"
Pause   1000
ADCON1 = %10000010

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADCON0 = %11000001

pause 500

goto system1

HEALTY: lcdout  $fe, 1 ,"HEALTY"

pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ," MOTOR"

pause 1000

return

SHORT1:  lcdout  $fe, 1 ,"Short turn"

pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ,"1%"

pause 1000

return

SHORT2:  lcdout  $fe, 1 ,"Short turn"

pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ,"2%"

pause 1000

return

SHORT3:  lcdout  $fe, 1 ,"Short turn"

pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ,"3%"

pause 1000

return

SHORT4:  lcdout  $fe, 1 ,"Short turn"

pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ,"4%"

pause 1000

return

SHORT5:  lcdout  $fe, 1 ,"Short turn"

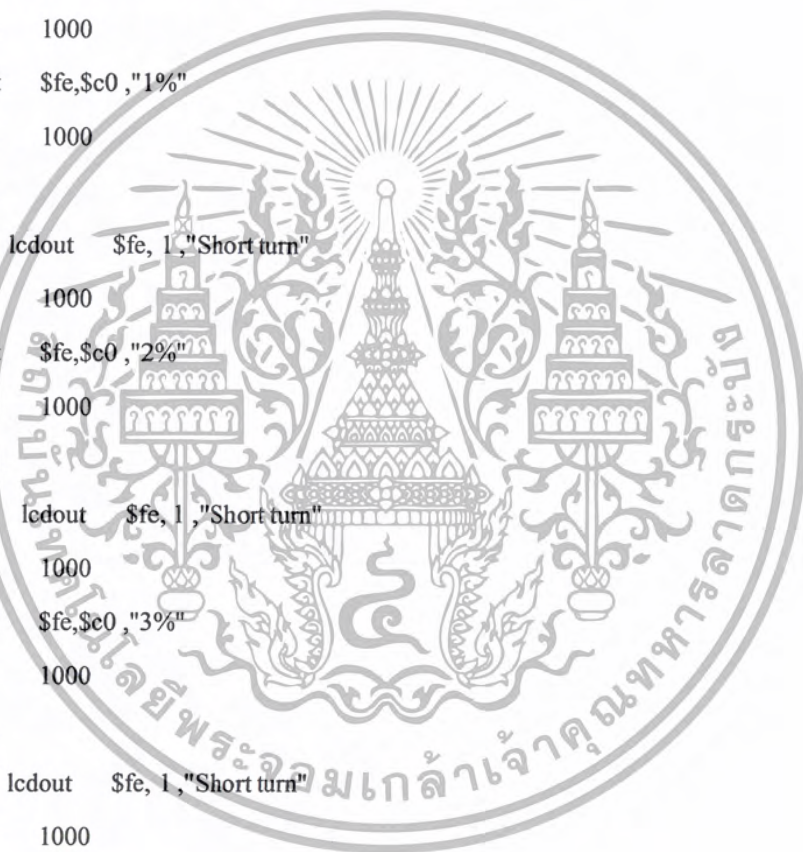
pause 1000

lcdout  $fe,$c0 ,"5%"

pause 1000

return

```



SHORT6: lcdout \$fe, 1, "Short turn"

pause 1000

lcdout \$fe,\$c0, "6%"

pause 1000

return

SHORT7: lcdout \$fe, 1, "Short turn"

pause 1000

lcdout \$fe,\$c0, ">7%"

pause 1000

return

End



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้