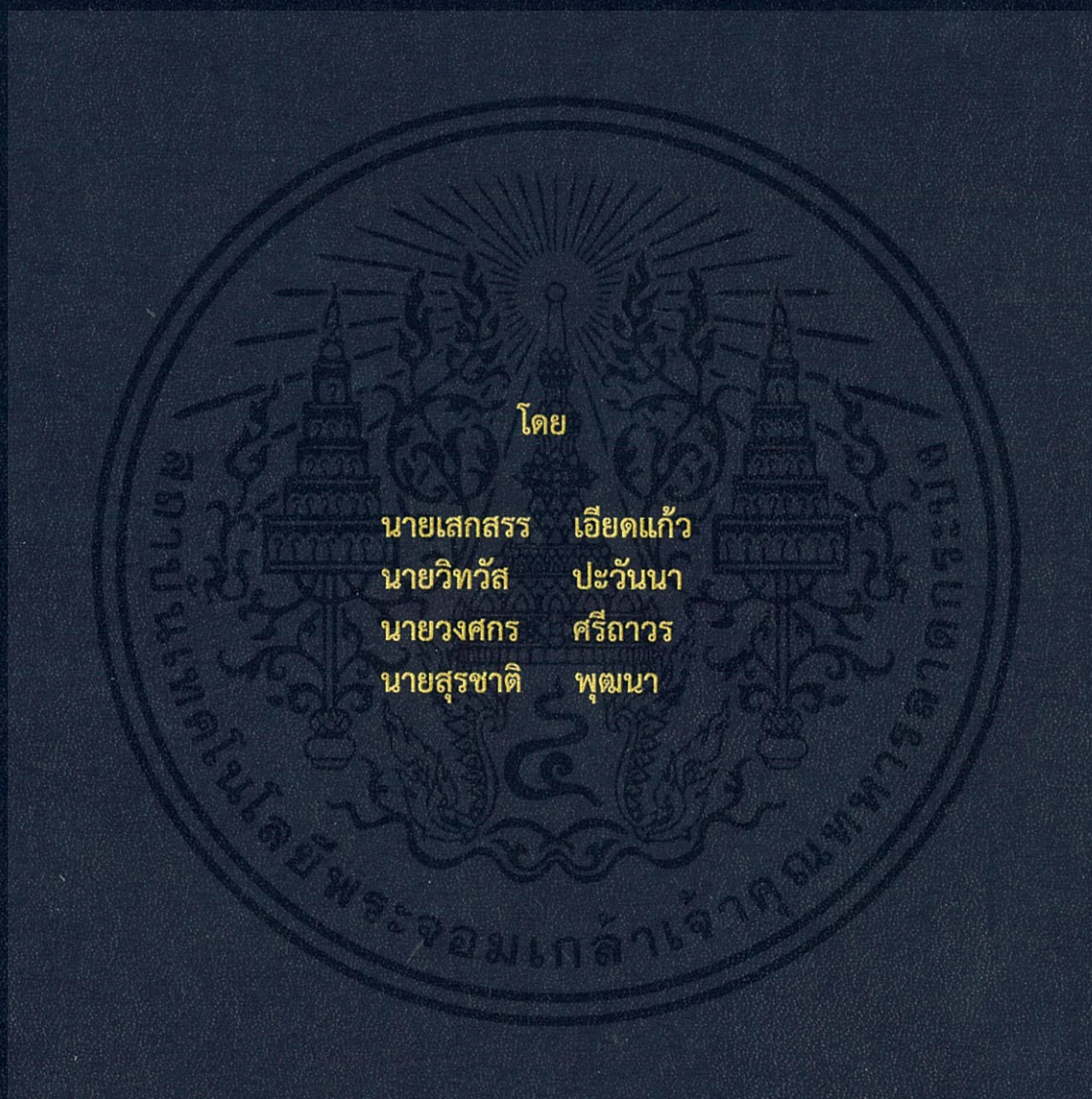


การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน  
A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING  
CONDITION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน

A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING  
CONDITION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING  
CONDITION



THIS PROJET SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REUIREMENT  
FOR BACHELOR DEGREE ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELETRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน

A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING  
CONDITION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ พิเชิต สำยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษานามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน

ผู้จัดทำ

1. นายเสกสรร เอียดแก้ว
2. นายวิทวัส ปะวันนา
3. นายวงศกร ศรีถาวร
4. นายสุรชาติ พุฒนา

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ำยอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน

นายเสกสรร	เอียดแก้ว	
นายวิทวัส	ปะวันนา	
นายวงศกร	ศรีถาวร	
นายสุรชาติ	พุดนา	
รศ. พิชิต	ลำยอง	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์		อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก ขณะมอเตอร์กำลังทำงาน โดยมอเตอร์ที่นำมาทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า 3 เฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก เริ่มต้นทำการศึกษาคูณลักษณะของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะหยุดนิ่ง โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 1 เฟสและแรงดันกระแสตรงแบบหกเหลี่ยมตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาคูณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนขณะที่มอเตอร์ทำงานโดยการติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับแรงบิดของมอเตอร์ที่ภาระต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่งสนามแม่เหล็กหมุนจะมีขนาดสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาตำแหน่งต่าง ๆ ใน ช่องว่างอากาศ และพบว่าการป้อนแรงดันกระแสตรงหกเหลี่ยม ที่จำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสใน 1 คาบ ผลที่ได้คือทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเกิดการหมุนครบ 1 รอบทางไฟฟ้า สำหรับการศึกษาในสภาวะที่มอเตอร์ทำงาน ผลที่ได้คือขนาดและมุมของสนามแม่เหล็กจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของภาระทางกลของมอเตอร์

# A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING CONDITION

Seksan	Eiadkaew	
Wittawat	Pawanna	
Vongsakorn	Srithaworn	
Surachat	Puttana	
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Advisor
Asst.Prof.Dr.Piampoom	Sarikprueck	Co-Advisor
Year 2018		

## Abstract

This project is to study the behavior of rotating magnetic field of 3-phase squirrel cage induction motors at operating condition. The tested motor is 1hp, 3 phase 4 poles. First of all, the rotating magnetic field characteristics in the stand still induction motor is studied by applying 3-phases, 1-phase AC supplies and 6-pattern DC supply, respectively. After that, the study of rotating magnetic field at operating condition is employed using hall sensors to find the relation between rotating magnetic field and motor torque at various mechanical loads. The results show that, as stand still condition, rotating magnetic field is almost constant in every air-gap position, and the magnetic field completely rotates in one electric cycle as applying with one cycle of 6-pattern DC voltage. As for the operating condition, the amplitude and phase shift of rotating magnetic field are strongly related to the mechanical load of motor.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ขอขอบคุณ นายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ และพี่ๆ ปริญญาโทในห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนและนายวัชระ ศรีประภาพงศ์, นายเสกฐฎุฒิ ยิวเที่ยง, นายวิษณุภาส ไชยศรียา และนายอภิวัฒน์ ภูปลื้ม ซึ่งเป็นสมาชิกภายในห้อง Innogen ที่ให้แนวคิดและอุปกรณ์ภายในห้อง Innogen ในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

นายเสกสรร	เอียดแก้ว
นายวิทวัส	ปะวันนา
นายวงศกร	ศรีถาวร
นายสุรชาติ	พุดนา

## สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.2 วงจรแม่เหล็ก	7
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
2.3.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส	8
2.3.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส	9
2.4 ความต้านทานแม่เหล็ก	10
2.5 ความเร็วซิงโครนัส	12
2.6 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน	13

## สารบัญ(ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
2.6.1 การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	13
2.6.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	17
2.7 แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	20
2.8 กระแสและฟลักซ์ในโพลีเฟส induction motor	22
2.9 แรงบิดของ induction motor ขณะมอเตอร์ทำงาน	24
2.10 ปรากฏการณ์ฮอลล์	25
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	29
3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์	29
3.1.1 V Method	30
3.1.2 No-load test	31
3.1.3 Block-rotor test	31
3.2 การทดสอบป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กใน Airgap โดยใช้ search coil	32
3.3 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กขั้วของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส โดยใช้ search coil และความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์	35
3.4 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กกับสัญญาณ 6 รูปแบบ	36
3.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลดและมีโหลด	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	40
4.1 ผลการทดลองหาจอร์สมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า	40
4.1.1 V Method	40
4.1.2 No-load test	41
4.1.3 Block-rotor test	42

## สารบัญ(ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
4.2 การทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กใน Airgap โดยใช้ search coil	44
4.3 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กลัพท์ของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟสโดยใช้ Search coil และความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส และ 3 เฟส	51
4.4 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กกับการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบ	52
4.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลด และมีโหลด	54
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	90
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	92
<b>ภาคผนวก</b>	93
ภาคผนวก ก	94
ภาคผนวก ข	96
ภาคผนวก ค	101
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	109

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	6
2.3 โครงสร้างของโรเตอร์แบบการพันขดลวด	6
2.4 โครงสร้างสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	7
2.5 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบเป็นวงรอบปิด	8
2.6 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบมีช่องอากาศบางส่วน	8
2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส 2 รูปแบบ	9
2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส	10
2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์	10
2.10 แกนเหล็กเป็นรูปวงแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ	11
2.11 โครงสร้างแบบขดลวดเฟสเดียว	14
2.12 สัญญาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศของขดลวดแบบเฟสเดียว	16
2.13 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสองขั้ว	16
2.14 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส	17
2.15 สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา)	19
2.16 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ขั้วแม่เหล็กที่มีช่องอากาศสม่ำเสมอ	20
2.17 Reactions of a squirrel-cage rotor in two-pole field	23
2.18 วงจรโรเตอร์ต่อเฟส	24
2.19 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	26
2.20 การวัดแรงฮอลล์ที่เกิดในสารกึ่งตัวนำ	27
3.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์	29
3.2 วงจรการต่อ induction motor 3 เฟส 1 แรงม้า	32
3.3 แสดงการพันขดลวด search coil	32

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 กระดานมุมที่ใช้ในการหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็ก	33
3.5 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็ก	34
3.6 วงจรการต่อ induction motor ด้วยแรงดัน 1 เฟส	35
3.7 วงจรการต่อสัญญาณรูปแบบที่ 1 $+V_c, -V_c, -V_c$	36
3.8 สเปซเวกเตอร์ของสัญญาณ 6 รูปแบบ	37
3.9 วงจรการทดสอบสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ทำงาน	38
3.10 การติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์	38
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I	40
4.2 No-load test จากออสซิลโลสโคป	41
4.3 Block-rotor test จากออสซิลโลสโคป	42
4.4 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	43
4.5 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 0 องศา	44
4.6 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 30 องศา	44
4.7 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 60 องศา	45
4.8 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 90 องศา	45
4.9 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 120 องศา	46
4.10 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 150 องศา	46
4.11 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 180 องศา	47
4.12 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 210 องศา	47
4.13 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 240 องศา	48
4.14 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 270 องศา	48
4.15 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 300 องศา	49
4.16 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 330 องศา	49

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

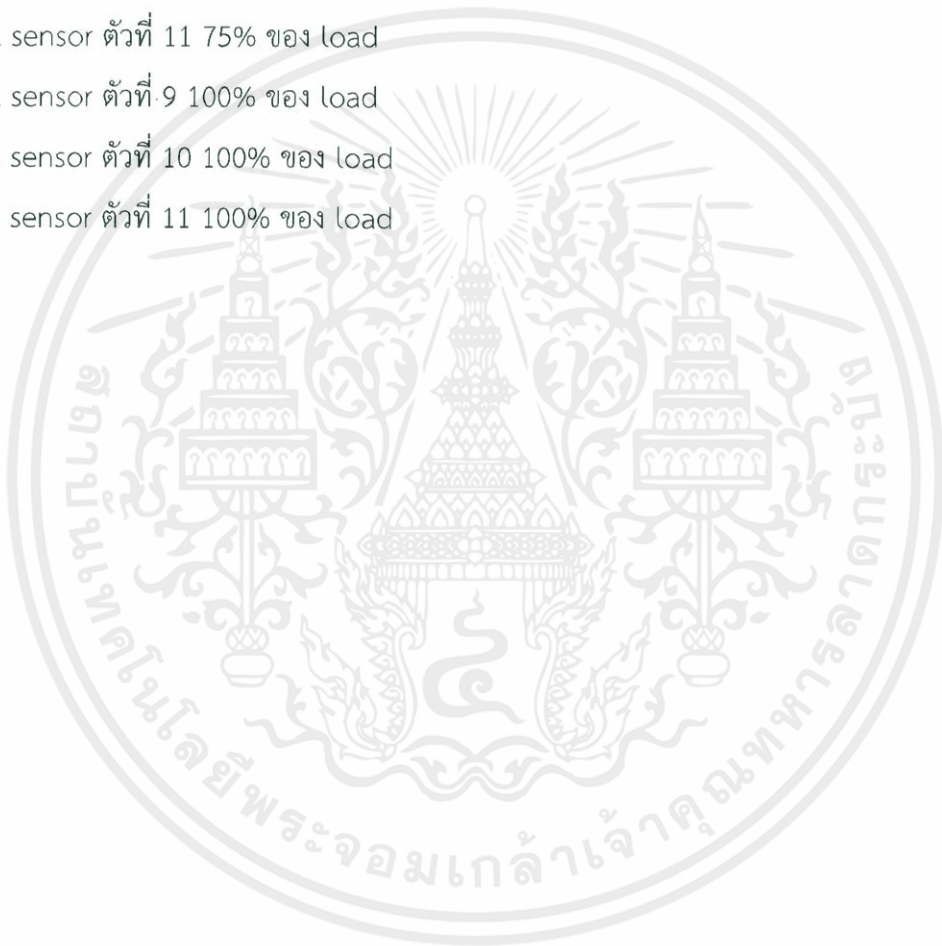
รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับตำแหน่งการวาง search coil ในแต่ละองศา	50
4.18 สัญญาณจาก oscilloscope ที่ตำแหน่งระดับแรงดันสูงสุดของเฟส A	52
4.19 การทดลองใช้เข็มทิศเลื่อนหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กกลับ	53
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 1 และ 2	54
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 3 และ 4	55
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 5 และ 6	56
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 7 และ 8	57
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 9 และ 10	58
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 11 และ 12	59
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 13 และ 14	60
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 15 และ 16	61
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 17 และ 18	62
4.29 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 0 Volt	64
4.30 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 20 Volt	65
4.31 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 40 Volt	65
4.32 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 60 Volt	66
4.33 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 80 Volt	66

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 100 Volt	67
4.35 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 120 Volt	67
4.36 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 140 Volt	68
4.37 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 160 Volt	68
4.38 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 180 Volt	69
4.39 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 200 Volt	69
4.40 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 220 Volt	70
4.41 0% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์	74
4.42 25% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์	74
4.43 50% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์	75
4.44 75% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์	75
4.45 100% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์	76
4.46 0% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์	76
4.47 25% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์	77
4.48 50% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์	77
4.49 75% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์	78
4.50 100% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์	78
4.51 Hall sensor ตัวที่ 9 0% ของ load	81
4.52 Hall sensor ตัวที่ 10 0% ของ load	82
4.53 Hall sensor ตัวที่ 11 0% ของ load	82
4.54 Hall sensor ตัวที่ 9 25% ของ load	83
4.55 Hall sensor ตัวที่ 10 25% ของ load	83
4.56 Hall sensor ตัวที่ 11 25% ของ load	84

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 Hall sensor ตัวที่ 9 50% ของ load	84
4.58 Hall sensor ตัวที่ 10 50% ของ load	85
4.59 Hall sensor ตัวที่ 11 50% ของ load	85
4.60 Hall sensor ตัวที่ 9 75% ของ load	86
4.61 Hall sensor ตัวที่ 10 75% ของ load	86
4.62 Hall sensor ตัวที่ 11 75% ของ load	87
4.63 Hall sensor ตัวที่ 9 100% ของ load	87
4.64 Hall sensor ตัวที่ 10 100% ของ load	88
4.65 Hall sensor ตัวที่ 11 100% ของ load	88



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
3.1 สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบ	37
4.1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับค่ากระแส	40
4.1.2 ผลการทดลอง No-load test	41
4.1.3 ผลการทดลอง Block-rotor test	42
4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับตำแหน่งการวาง search coil ในแต่ละองศา	50
4.3.1 ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ในการป้อนแรงดัน 1 เฟสของแต่ละเฟส	51
4.4.1 ตำแหน่งของขั้วเหนือและขั้วใต้เมื่อทำการป้อนแรงดัน 6 รูปแบบโดยขั้วเหนือ (+) และ ขั้วใต้ (-)	52
4.5.1 ผลการทดสอบ Hall sensor ณ สภาวะ No-load	54
4.5.2 แสดงผลต่างระหว่างมุมของ Hall sensor แต่ละตัว เทียบกับแรงดันที่เฟส a	63
4.5.3 การทดสอบหา Hall sensor ณ สภาวะมี load ที่แรงดัน 220 โวลต์	71
4.5.4 การทดสอบหาค่ามุม Hall sensor ณ สภาวะมี load	79
4.5.5 ผลต่างมุมของ Hall sensor ณ สภาวะมี load	80
4.5.6 แสดงค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มโหลดมากขึ้น	81

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้านั้นถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆมากมาย ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานในด้านต่างๆ เช่น รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า โรงอุตสาหกรรม เป็นต้น แทนการใช้ น้ำมัน เนื่องจากการสันดาปของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงนั้นส่งผลทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก รวมถึงราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และทรัพยากรน้ำมันเริ่มลดลง จึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน

มอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกเพราะ เป็นมอเตอร์ที่ป้อนไฟเข้าเพียงด้านเดียวคือด้านสเตเตอร์ ทำให้สะดวกต่อการนำมาใช้งาน ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก จะทำงานได้ต้องอาศัยการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์โดยมีสนามแม่เหล็กหมุนมาเหนี่ยวนำ ดังนั้นความรู้ความเข้าใจในเรื่องของสนามแม่เหล็กหมุนจึงมีความสำคัญเพราะเป็นสนามแม่เหล็กที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน ในโครงการนี้จึงขอเสนอการศึกษาทิศทางและขนาดของสนามแม่เหล็กหมุน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้งานจริง โดยเปรียบเทียบที่แรงบิดค่าต่าง ๆ ของมอเตอร์

### 1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการ

1.2.1 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.2.2 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะมอเตอร์ทำงาน

1.2.3 สามารถออกแบบวงจรที่ใช้กับ Hall sensor และออกแบบตำแหน่งในการติดตั้ง Hall sensor ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1.3.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เบื้องต้นจากมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดพิกัด 750 วัตต์ 50 เฮิร์ตซ์ 380 โวลต์ และความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที

1.3.2 ศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้แก่ ทดสอบ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทิศทางสนามแม่เหล็กเพื่อหาแกน วัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟส การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กหมุนภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะหมุนที่นำมาทดสอบ

1.3.3 ออกแบบและติดตั้ง Hall sensor เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยพิจารณาจากโครงสร้างจริงที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.4.2 ศึกษาหลักการทำงานที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้แก่ หางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส หาทิศทางของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์โดยใช้ขดลวดค้นหาและการป้อนแรงดันกระแสตรงแบบ Six Step

1.4.3 ออกแบบและติดตั้ง Hall sensor เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยพิจารณาจากโครงสร้างจริงที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น

1.4.4 ทดสอบและวัดค่าสนามแม่เหล็กหมุน ขณะมอเตอร์กำลังทำงานโดยการเปลี่ยนโพลของมอเตอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสนามแม่เหล็กหมุน

1.4.5 สรุปผลการทดสอบ

1.4.6 รวบรวมข้อมูลการศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1/2561				ภาคเรียนที่ 2/2561		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส							
2. ทดสอบมอเตอร์เบื้องต้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส							
3. ทดสอบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบ เพื่อหาแกนเฟส							
4. ทดสอบป้อนแรงดัน 1 เฟสเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ Search coil							
5. ทดสอบป้อนแรงดัน 3 เฟสเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ Search coil							
6. ออกแบบและติดตั้ง Hall sensor เพื่อประกอบการศึกษาการพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส							
7. ทดสอบและวัดค่าสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ค่าแรงบิดต่างๆ							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. รวบรวมข้อมูลและจัดทำปริญญานิพนธ์							
-------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

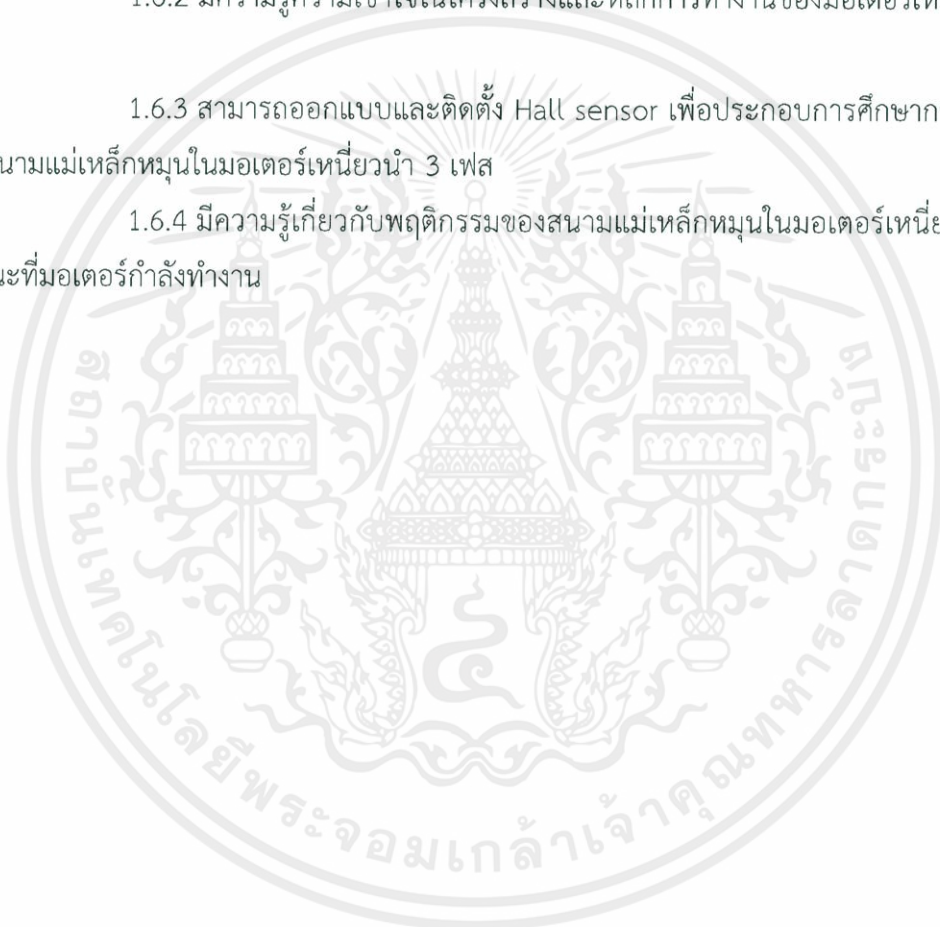
### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของ Hall sensor ในการวัดสนามแม่เหล็ก

1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.6.3 สามารถออกแบบและติดตั้ง Hall sensor เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.6.4 มีความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ณ ขณะที่มีมอเตอร์กำลังทำงาน

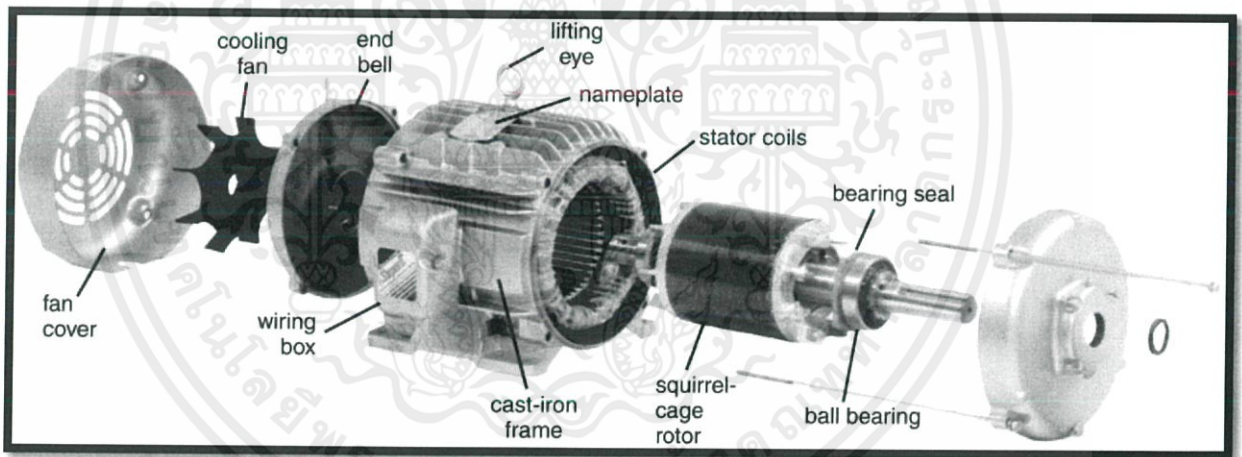


## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

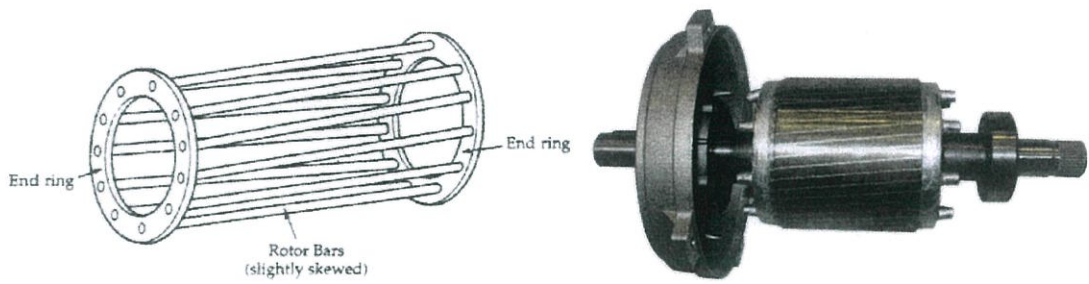
#### 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Construction)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน โดยโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ โรเตอร์และสเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 โดยโครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีลักษณะเป็นแท่งตัวนำวางเรียงอยู่ในแนวตามยาวของโรเตอร์ และมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าโดยการลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.2 เรียกโครงสร้างของโรเตอร์แบบนี้ว่าแบบกรงกระรอก(Squirrel-cage rotor) และมีโครงสร้างโรเตอร์อีกแบบที่มีลักษณะเป็นการพันขดลวด(Wound rotor) ซึ่งโรเตอร์แบบนี้จะสามารถเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าภายนอกได้โดยการใช้วงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน (Brush) ดังรูปที่ 2.3



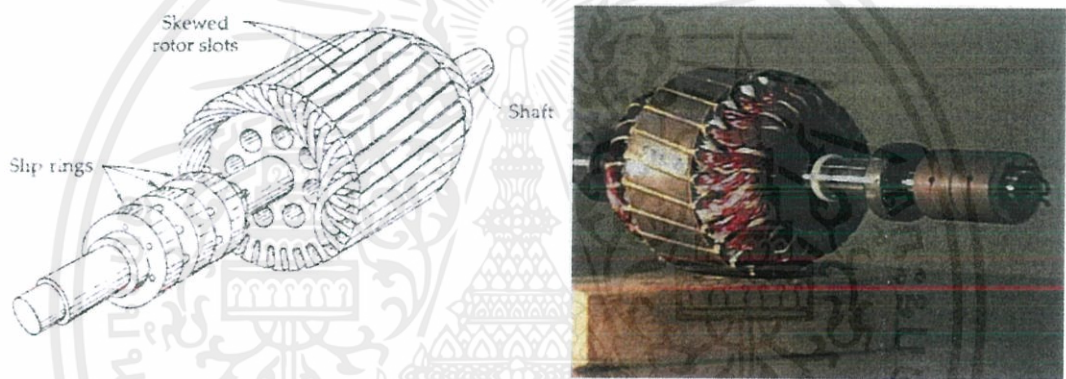
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(ที่มา: <http://electricalacademia.com/induction-motor/three-phase-induction-motor-construction/>)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

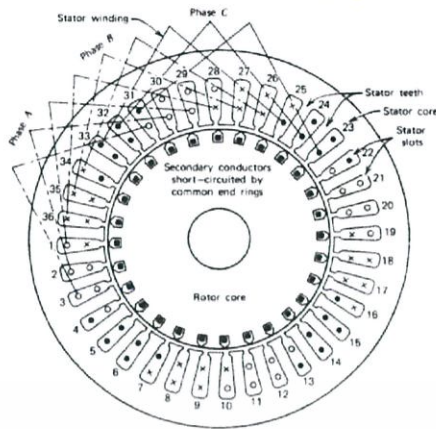
(ที่มา: <https://www.quora.com/Why-is-skewing-done-in-a-3-phase-squirrel-cage-induction-motor> และ <https://eastcoastmotor.com/wp-content/uploads/2018/02/AC-Squirrel-Cage-Electric-Motors.gif>)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโรเตอร์แบบการพันขดลวด

(ที่มา: <https://www.theengineeringprojects.com/wp-content/uploads/2016/10/wound-type-induction.jpg> และ <http://emadrlc.blogspot.com/2012/12/three-phase-wound-rotor-induction-motor.html>)

โครงสร้างสเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส(a,b,c)และมีการต่อกันทั้งแบบสตาร์และแบบเดลต้า ดังรูปที่ 2.4 เมื่อขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายภายจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน



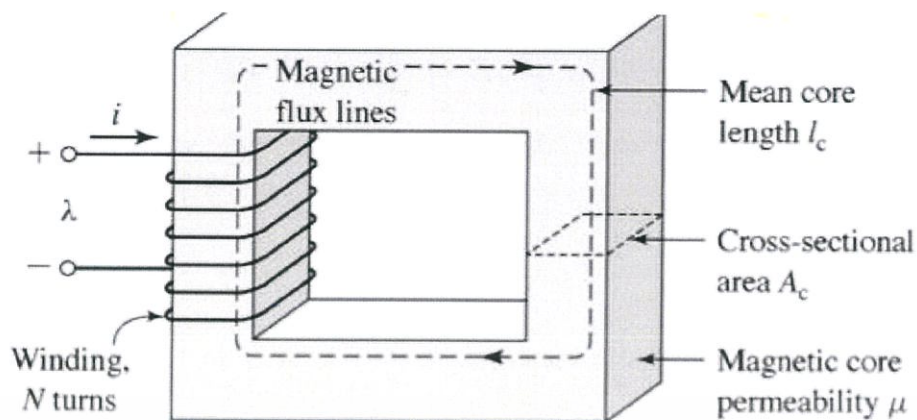
รูปที่ 2.4 โครงสร้างสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

(ที่มา:file:///C:/Users/lenovo%20Z50/Desktop/2018%20Dr.%20Chaiwut%20Chapter%203%20Electrical%20Machines%20II.pdf และ <https://www.ebay.com/itm/Yaskawa-E3S5501-3-Ph-Induction-Motor-Stator-230-460V-1720-RPM-4-Pole-Kito-Hoist-/272413232272>)

## 2.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

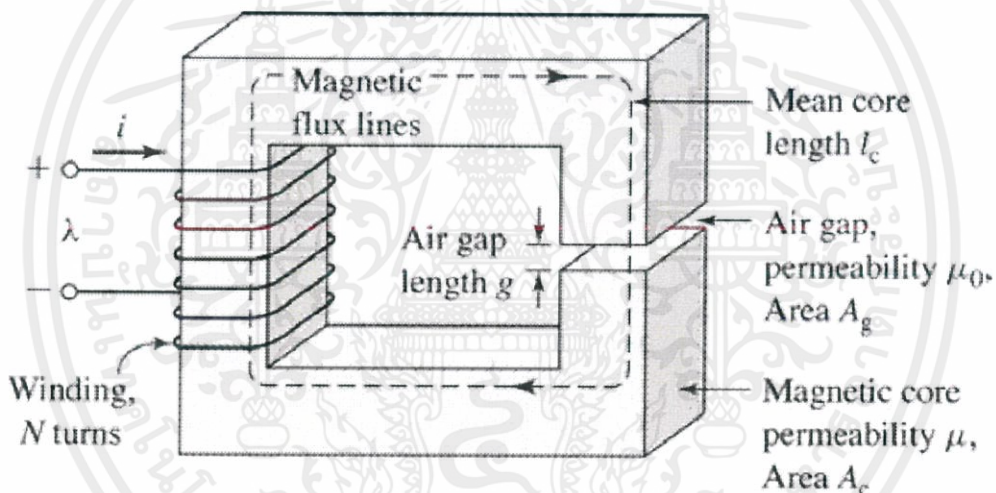
ในการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า) วงจรแม่เหล็กมีความสำคัญมากในการศึกษาเรื่องนี้ เพราะเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้องอาศัยวงจรแม่เหล็กเป็นทางผ่านในการเปลี่ยนรูปพลังงานในเครื่องกลไฟฟ้า โดยอาศัยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านวงจรแม่เหล็ก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กก่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของพลังงาน เช่น ในมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงาน ไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เพื่อให้สามารถสร้างและควบคุมสนามไฟฟ้าได้ ในวงจรแม่เหล็กมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance) ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านพลังงานในแกนเหล็ก ดังนั้นวงจรแม่เหล็กที่ดีต้องมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่ต่ำที่สุด เพื่อทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านพลังงานน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบเป็นวงรอบปิด

(ที่มา: <http://www.polytechnichub.com/wp-content/uploads/2018/08/Magnetic-circuit.jpg>)



รูปที่ 2.6 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบมีช่องอากาศบางส่วน

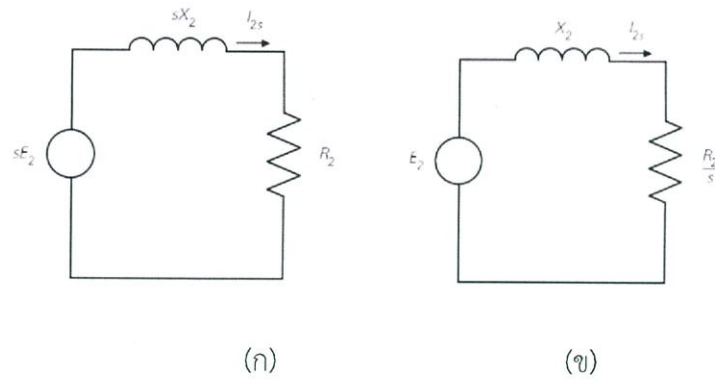
(ที่มา: <https://i.stack.imgur.com/kfxk6.png>)

## 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Equivalent Circuit)

### 2.3.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)

ความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าสลิป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส 2 รูปแบบ

$$X_{2s} = sX_2 \quad (2.3.1)$$

เมื่อ  $X_{2s}$  และ  $X_2$  เป็นค่า leakage reactance ของโรเตอร์ ที่ค่าสลิปใดๆ และ ขณะหยุด  
นิ่งตามลำดับ

$$E_{2s} = sE_2 \quad (2.3.2)$$

เมื่อ  $E_{2s}$  และ  $E_2$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ ที่ค่าสลิปใดๆ และ ขณะหยุด  
นิ่งตามลำดับ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 จากรูปที่ 2.7 ก)  
จะได้ว่า

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (2.3.3)$$

เมื่อ  $I_{2s}$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ และ  $R_2$  เป็นความต้านทาน  
ไฟฟ้าของโรเตอร์ จัดรูปสมการที่ 2.3.2

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (X_2)^2}} \quad (2.3.4)$$

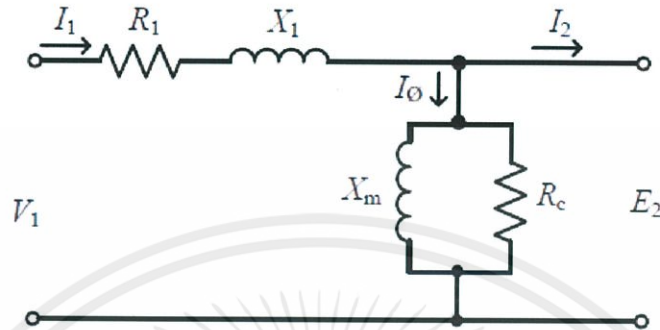
ซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลไฟฟ้าใหม่ได้ดังรูปที่ 2.7 ข)

### 2.3.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 กำหนดให้  $V_1$ ,  $I_1$ ,  
 $R_1$  และ  $X_1$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าพิกัด ค่ากระแส ความต้านทานไฟฟ้า และความต้านทานเสมือน  
(Leakage reactance) ขณะหยุดนิ่งของสเตเตอร์ตามลำดับ  $R_c$  และ  $X_m$  เป็นค่าความต้านทาน  
ไฟฟ้าการสูญเสียในแกนเหล็ก ( Core loss resistance ) และค่าความต้านทานเสมือนการสร้าง

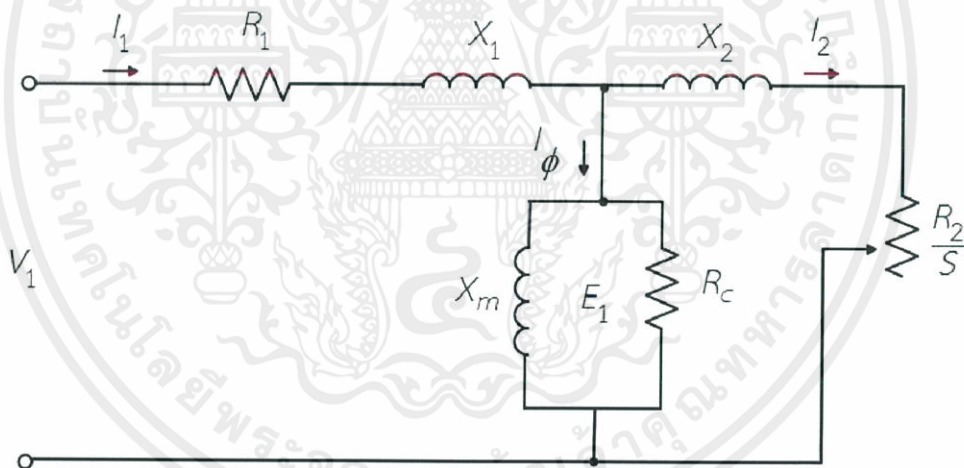
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็ก ( Magnetizing reactance ) ของสเตเตอร์ ตามลำดับ จากการพิจารณารวมวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 และ 2.8 จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.9 โดยกำหนดให้ค่า  $E_2$ ,  $I_2$ ,  $R_2$  และ  $X_2$  เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้ว



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส

(ที่มา: เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรกลไฟฟ้า รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์

#### 2.4 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)

เมื่อทำการป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto-motive force : mmf หรือ  $M_i$ ) ให้กับวงจรแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic Flux :  $\phi$ ) ในแกนเหล็กที่เป็นวงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.10 แกนเหล็กเป็นรูปวงแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดที่พัน  $N$  รอบ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กบนแกน toroid และเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านออกมาด้านนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

toroid เรียกว่าเส้นแรงรั่ว (leakage flux) โดยทั่วไปมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ซึ่งความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Ni$  กับ  $\Phi$  จากกฎของแอมแปร์

$$\text{นั่นคือ } Ni = \oint H \cdot dl = Hl \quad (2.4.1)$$

ในวงจรแม่เหล็กที่มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ในแกนเหล็กคงที่ในทุกๆ ตำแหน่งของวงจรแม่เหล็ก และสามารถหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้จากผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับค่าระยะทางรอบวงปิดของวงจรแม่เหล็ก

(1)



รูปที่ 2.10 แกนเหล็กเป็นรูปร่างแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ

(ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-toroidal-electromagnetic-coil\\_fig14\\_269767835](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-toroidal-electromagnetic-coil_fig14_269767835))

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density :  $B$ ) ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก จะสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ )

$$B = \mu H \quad (2.4.2)$$

เมื่อ  $\mu = \mu_0 \mu_r$

$\mu_0$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของสุญญากาศ มีค่าคงที่ เท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  (Weber/Amp-turn-m, Henry/m)

$\mu$ , คือค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของแกนหรือสารตัวกลาง เช่น สุญญากาศ อากาศ วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (ทองแดง อลูมิเนียม) และวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) จะสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ตามสมการข้างล่าง

$$\phi = \iint_s B \cdot dA = BA \quad (2.4.3)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)

จากสมการที่ 2.4.1, 2.4.2 และ 2.4.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $N_i$ ) กับค่าเส้นแรงแม่เหล็ก( $\phi$ ) ตามสมการข้างล่าง

$$N_i = \frac{\phi}{\mu A} \quad (2.4.4)$$

กำหนดให้ค่า  $\frac{1}{\mu A}$  เท่ากับ  $\mathcal{R}$  และเรียกว่าความต้านแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Amp-turn/Weber

## 2.5 ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์และการหมุนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ให้ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกล ( $\theta_e$ ) กับมุมทางไฟฟ้า ( $\theta_m$ ) หน่วย เรเดียน ตามสมการข้างล่าง

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.5.1)$$

ถ้ากำหนดให้ค่า  $\theta_e$  และ  $\theta_m$  เป็นค่าของมุมที่เกิดจากการหมุนตัวโรเตอร์ในเวลา 1 วินาที สามารถเขียนความเร็วเชิงมุมเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมทางกลกับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าในหน่วย เรเดียนต่อวินาที ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.5.2)$$

ถ้านำสมการที่ 2.5.2 มาหารด้วย  $2\pi$  สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทางไฟฟ้ากับความถี่ทางกลในหน่วย Hz หรือ รอบต่อวินาที

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad (2.5.3)$$

ถ้านำสมการที่ 2.5.3 มาทำการแปลงหน่วยความถี่ให้เป็นหน่วย รอบต่อนาทีจะได้ตามสมการ

ข้างล่าง 
$$f_e = \frac{P}{2} \left( \frac{n_s}{60} \right) \quad (2.5.4)$$

จะได้สมการของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.5.5)$$

โดยที่  $n_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) หน่วย rpm

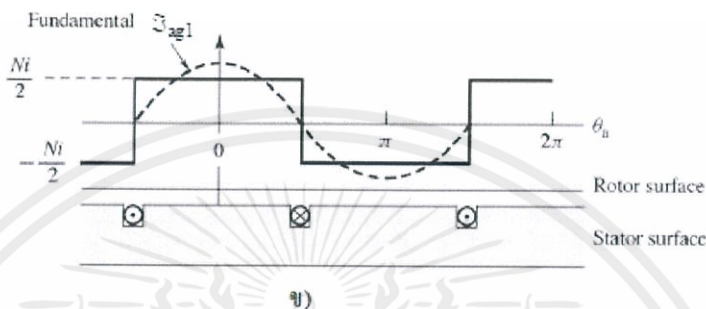
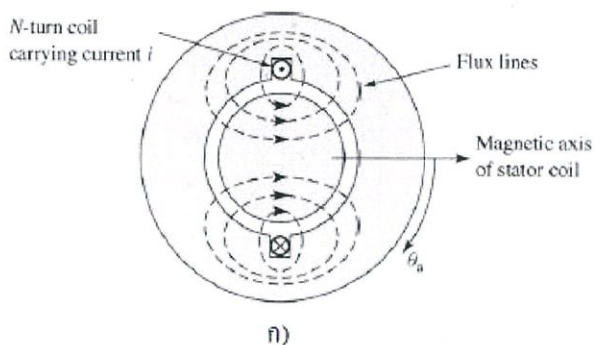
$f$  คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนขดอาร์มาเจอร์ หน่วย Hz

$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

## 2.6 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

### 2.6.1 การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟส เริ่มต้นศึกษาการเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) จากเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ขั้วแม่เหล็ก ขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นแบบเฟสเดียวมีจำนวน  $N$  รอบ พันแบบ full-pitch (ห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า) ดังแสดงในรูป 2.11 กัน 180 องศาทาง



รูปที่ 2.11 โครงสร้างแบบขดลวดเฟสเดียว ก) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศที่สม่ำเสมอ ข) ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ (ที่มา : เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรกลไฟฟ้า รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)

วิเคราะห์ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศโดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ จากรูปที่ 2.6.1 ข แรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศมีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เมื่อแยกอนุกรมฟูเรียร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะได้ว่า

$$S_{ag1} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{Ni}{2} \right) \cos \theta_a \tag{2.6.1}$$

โดยที่  $\theta_a$  เป็นมุมที่วัดจากแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์  
 ในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์มี P ขั้วและมีการพันแบบกระจายตัวจะทำให้เกิดค่า Winding factor เกิดขึ้นเท่ากับ  $K_w$  แรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเป็นดังสมการ

$$S_{ag1} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{K_w Ni}{P} \right) \cos \left( \frac{P}{2} \theta_a \right) \tag{2.6.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนกระแสสลับตามสมการที่ 2.6.2 เข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์และพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐานซึ่งจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $\mathfrak{F}_{ag1}(\theta, t)$  ที่มุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน

$$i(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2.6.3)$$

$$\mathfrak{F}_{ag1} = \mathfrak{F}_m \cos(\theta_{ae}) \cos(\omega t) \quad (2.6.4)$$

โดยที่  $\mathfrak{F}_m = \frac{4}{\pi} \left( \frac{K_w N}{P} \right) I_m$  และ  $\theta_{ae} = \frac{P}{2} \theta_a$  และจาก

$$\cos(\alpha)\cos(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \quad \text{เมื่อนำมาเขียนสมการใหม่จะได้ว่า}$$

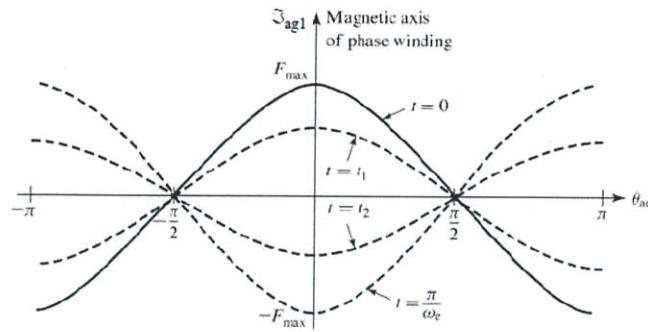
$$\mathfrak{F}_{ag1} = \mathfrak{F}_m \left[ \frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta_{ae} + \omega t) \right] \quad (2.6.5)$$

เขียนแยกเป็น 2 คลื่นประกอบด้วย  $\mathfrak{F}_{ag1}^+$  เคลื่อนที่ไปทิศทาง  $+\theta_{ae}$  และ  $\mathfrak{F}_{ag1}^-$  เคลื่อนที่ไปทิศทาง  $-\theta_{ae}$

$$\mathfrak{F}_{ag1}^+ = \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta_{ae} - \omega t) \quad (2.6.6)$$

$$\mathfrak{F}_{ag1}^- = \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta_{ae} + \omega t) \quad (2.6.7)$$

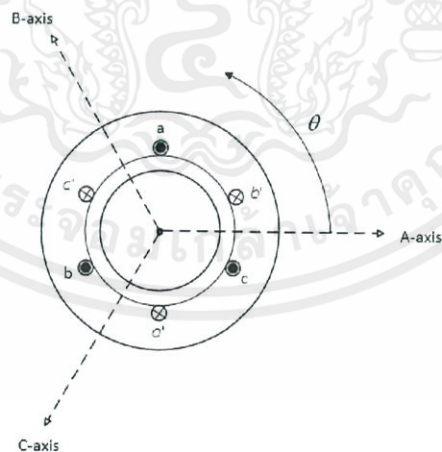
คลื่น  $\mathfrak{F}_{ag1}^+$  และ  $\mathfrak{F}_{ag1}^-$  มีขนาดเท่ากันแต่เคลื่อนที่ไปในช่องอากาศในทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน มีผลทำให้การจ่ายกระแสสลับ 1 เฟสเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์เฟสใดเพียงเฟสเดียว แรงเคลื่อนแม่เหล็กจะไม่มีเคลื่อนที่ไปจากแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีทิศทางสลับไปมาในแนวแกนสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศของขดลวดแบบเฟสเดียว

(ที่มา : เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรกลไฟฟ้า รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)

จะเห็นว่าเมื่อป้อนกระแสสลับ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบได้เป็น 2 องค์ประกอบที่มีขนาดเท่ากันแต่เคลื่อนในทิศทางตรงกันข้าม แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จึงไม่มีการเคลื่อนที่ ในกรณีที่ต้องการให้สนามแม่เหล็กลัพธ์เคลื่อนไปด้านใดด้านหนึ่ง ต้องจ่ายกระแสเข้าไปในขดลวดเฟสอื่นและให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดของเฟสอื่น มาหักล้างทิศของสนามแม่เหล็กทิศทางที่ไม่ต้องการ โดยปกติจะวางขดลวด 3 ขด ทำมุมระหว่างกันเท่ากันและป้อนกระแสสลับ 3 เฟส จากโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ได้มีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสอยู่ที่สเตเตอร์ โดยที่ขดลวดอาร์มาเจอร์จะวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

โดยกำหนดให้ แกนของขดลวดเฟส a อยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศา

แกนของขดลวดเฟส b อยู่ที่ตำแหน่ง 120 องศา

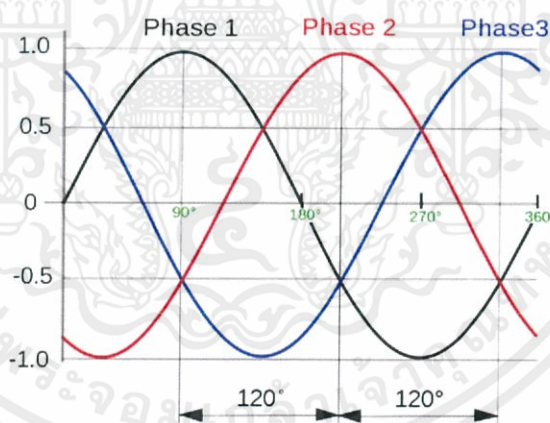
แกนของขดลวดเฟส c อยู่ที่ตำแหน่ง 240 องศา

เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสสลับที่ตำแหน่งขดลวดที่ได้กำหนดไว้ในแต่ละเฟส ส่งผลให้แกนของขดลวดแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า โดยกระแสสามเฟสจะมีค่าดังนี้

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \quad (2.6.8)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.6.9)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.6.10)$$



รูปที่ 2.14 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส

(ที่มา: ปริญญาธิพนธ์ เรื่องการพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส)

ส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_o(t)$  เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเฟส a โดยที่ขดลวดเฟสอยู่ตำแหน่ง 0 องศาทางไฟฟ้า มีค่าดังสมการ

$$\mathfrak{F}_o(\theta, t) = \mathfrak{F}_m \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.6.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathfrak{F}_a(\theta, t) = \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta + \omega t) \quad (2.6.12)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_b(t)$  เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเฟส b โดยที่ขดลวดเฟสอยู่ตำแหน่ง 120 องศาทางไฟฟ้า มีค่าดังสมการ

$$\mathfrak{F}_b(\theta, t) = \mathfrak{F}_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.6.13)$$

$$\mathfrak{F}_b(\theta, t) = \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad (2.6.14)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_c(t)$  เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเฟส c โดยที่ขดลวดเฟสอยู่ตำแหน่ง 240 องศาทางไฟฟ้า มีค่าดังสมการ

$$\mathfrak{F}_c(\theta, t) = \mathfrak{F}_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.6.15)$$

$$\mathfrak{F}_c(\theta, t) = \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.6.16)$$

เมื่อทำการรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสามเฟสเข้าด้วยกัน จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กกลัฟ (Rotating mmf wave) ที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังสมการ

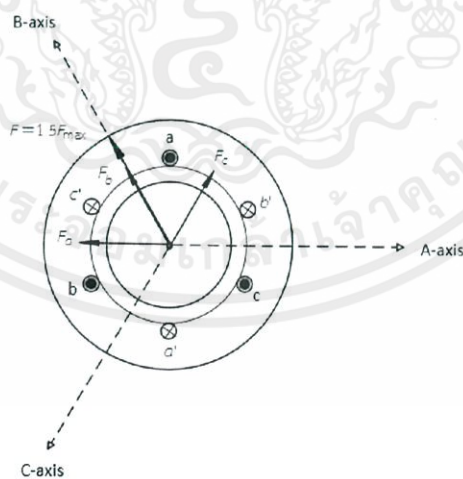
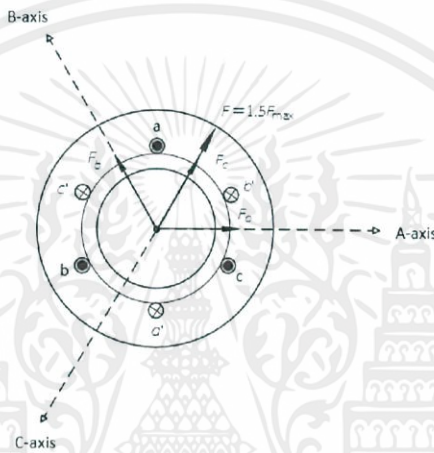
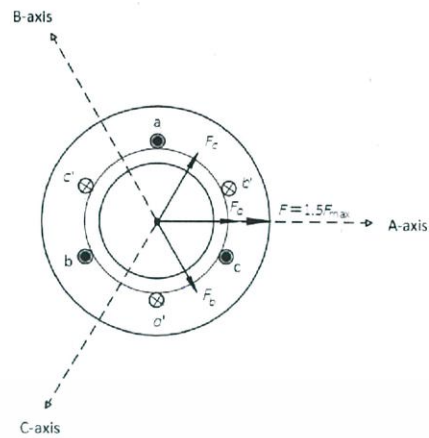
$$\mathfrak{F}_{total} = \mathfrak{F}_a(\theta, t) + \mathfrak{F}_b(\theta, t) + \mathfrak{F}_c(\theta, t) \quad (2.6.17)$$

จะการรวมกันของไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสทำให้เทอมของ

$$\frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) + \frac{1}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) = 0$$

$$\text{และได้ผลลัพธ์ } \mathfrak{F}_{total}(\theta, t) = \frac{3}{2} \mathfrak{F}_m \cos(\theta - \omega t) \quad (2.6.18)$$

เมื่อ  $\mathfrak{F}_{total}(\theta, t)$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กกลัฟ (Rotating mmf wave) ที่มีมุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ



รูปที่ 2.15 สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา)

(ที่มา: ปริชญานินพนธ์ เรื่องการพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

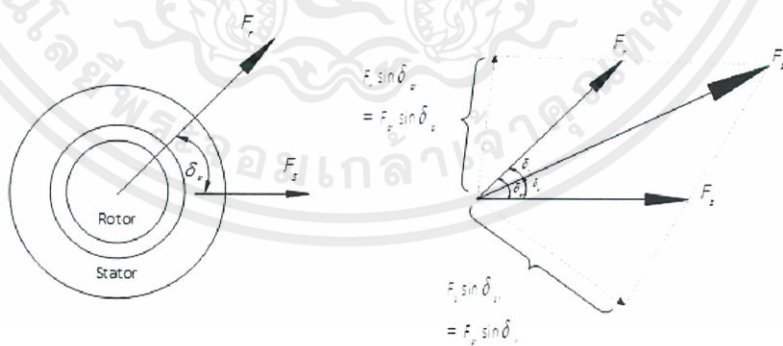
## 2.7 แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Torque)

ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องจักรกลสามารถอธิบายได้ 2 แนวทาง มุมมองแรกเป็นการอธิบายในลักษณะที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกันทาง สนามแม่เหล็กในรูปของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ  $\lambda$  และพลังงานร่วมของสนามแม่เหล็กจะแสดงอยู่ในเทอมของค่ากระแสและความเหนี่ยวนำไฟฟ้า แรงบิดคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ ของพลังงานหรือพลังงานร่วมเมื่อเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์ อีกมุมมองหนึ่งจะอธิบายการทำงานในลักษณะที่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งสร้างโดยขดลวด 2 ชุดอยู่ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ แรงบิดจะพิจารณาจากการพยายามจัดวางแนวแกนสนามแม่เหล็กทั้งสองให้ เป็นแนวเดียวกัน

ในกรณีนี้เป็นการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กสองสนาม คือ จากสเตเตอร์  $F_s$  และจากโรเตอร์  $F_r$  ซึ่งทำมุมกัน  $\delta_{sr}$  ดังรูปที่ xxx ก) และเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กทั้งสองสามารถรวมกันได้ดังรูปที่ xxx ข) ดังนี้

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad (2.7.1)$$

โดยที่  $F$  แต่ละค่าเป็นค่าสูงสุดของแต่ละแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_{max}$  ถ้ากำหนดให้  $g$  เป็นความยาวของช่องอากาศ  $l$  เป็นความยาวของแนวแกน และ  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของช่องอากาศ จะได้ว่าค่าความเข้ม



สนามแม่เหล็กลัพธ์สูงสุดในช่องอากาศ สามารถพิจารณาได้จาก

$$(H_{ag})_{peak} = \frac{F_r}{g} \quad (2.7.2)$$

ก.) แนวแกนสนามแม่เหล็ก    ข.) เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ขั้วแม่เหล็กที่มีช่องอากาศสม่ำเสมอ (มุมมอง  
สนามแม่เหล็ก)

(ที่มา : เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรกลไฟฟ้า รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นต่อปริมาตรของพลังงานร่วม (Average co-energy density)

$$W'_{fld,v} = \frac{1}{2} \mu_0 (\text{Average value of } H_{ag}^2) \quad (2.7.3)$$

เมื่อ  $\text{Average value of } H_{ag}^2 = \frac{1}{2} (H_{ag}^2)_{peak}^2$  ดังนั้น

$$W'_{fld,v} = \frac{\mu_0}{2} \frac{(H_{ag}^2)_{peak}^2}{2} = \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \quad (2.7.4)$$

พลังงานร่วมทั้งหมด

$W'_{fld} = W'_{fld,v} \times$  ปริมาตรช่องอากาศ

$$\begin{aligned} W'_{fld} &= \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D l g = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2 \\ &= \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr}) \end{aligned} \quad (2.7.5)$$

เมื่อ  $\delta_{sr,m} = \frac{2}{p} \delta_{sr}$  และค่าแรงบิดจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงของมุมทางไฟฟ้า  $\delta_{sr}$  ระหว่าง  $F_s$  และ  $F_r$   
ดังนั้น

$$T_{fld} = \left. \frac{\partial W'_{fld}(F_s, F_r, \delta_{sr,m})}{\partial \delta_{sr,m}} \right|_{F_s, F_r}$$

$$T_{fld} = - \left( \frac{p}{2} \right) \left( \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.7.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าถ้า  $\delta_{sr}$  เป็นบวก ( $F_r$  นำหน้า  $F_s$ ) ค่าแรงบิดจะเป็นลบ เครื่องจักรจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และถ้า  $\delta_{sr}$  เป็นลบ ( $F_s$  นำหน้า  $F_r$ ) ค่าแรงบิดจะเป็นบวก เครื่องจักรจะทำงานเป็นมอเตอร์

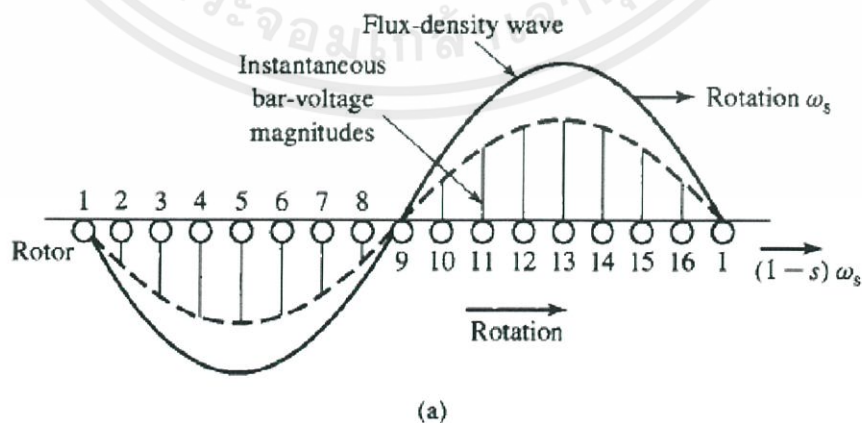
จากรูปที่ 2.18 ข) กำหนดให้มุม  $\delta_r$  วัดจากแนวแกนสนามแม่เหล็กถึงแนวแกนสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และมุม  $\delta_s$  วัดจากแนวแกนสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ถึงแนวแกนสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้  $F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r$  และ  $F_r \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_s$

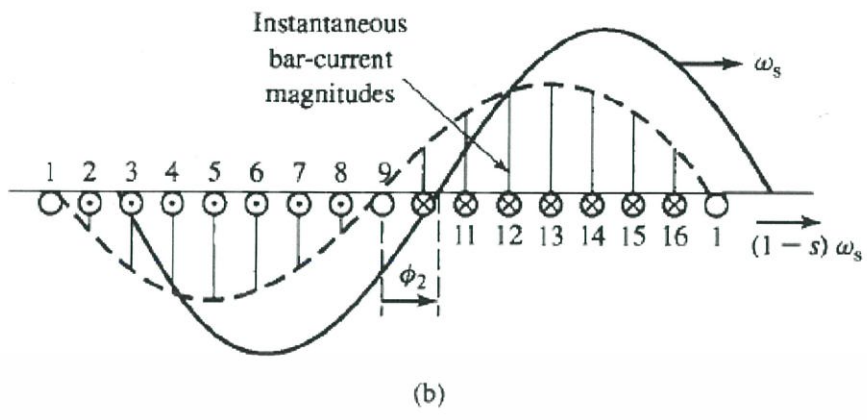
$$T_{fld} = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}\right) F_s F_{sr} \sin \delta_s \tag{2.7.7}$$

$$T_{fld} = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}\right) F_r F_{sr} \sin \delta_r \tag{2.7.8}$$

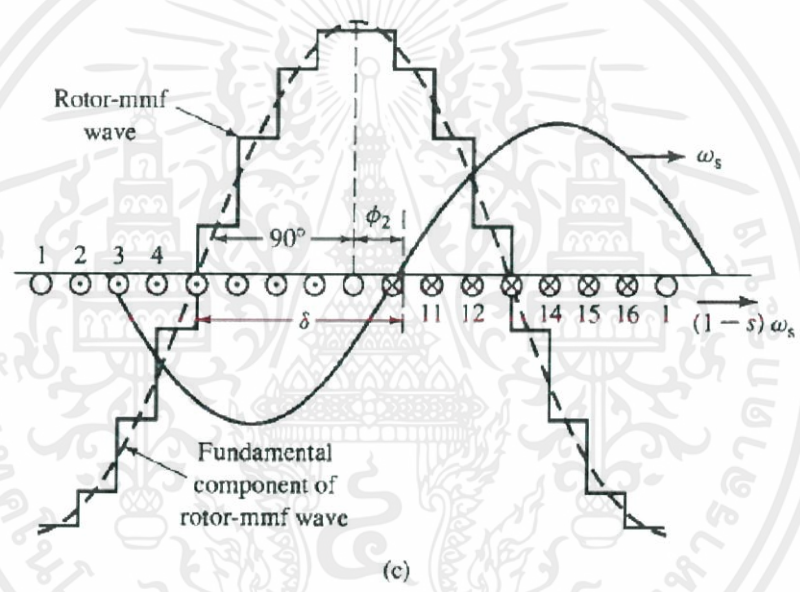
ถ้าสนามแม่เหล็กไม่อิ่มตัว ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดต่อขั้วในช่องอากาศที่สม่ำเสมอมีค่า  $B_{sr} = \frac{\mu_0 F_{sr}}{g}$  จะได้ว่า  $T_{fld} = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\pi D l}{2g}\right) B_{sr} F_r \sin \delta_r$  (2.7.9)

### 2.8 กระแสและฟลักซ์ในโพลีเฟส induction motor





(b)



(c)

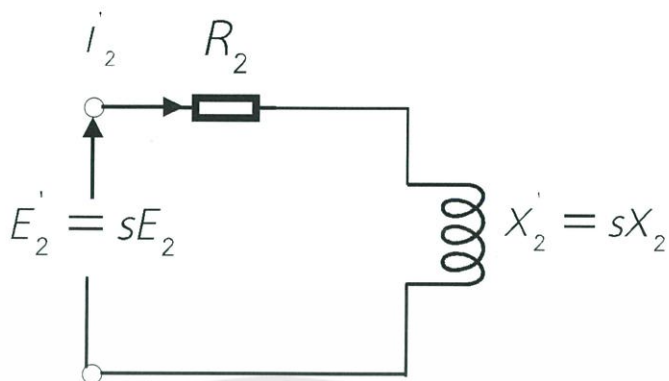
รูปที่ 2.17 Reactions of a squirrel-cage rotor in two-pole field.

(ที่มา : Fitzgerald, A.E.(Arthur Eugene), Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans.---6<sup>th</sup> ed.---(McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy).)

ปฏิกิริยาของ squirrel-cage rotor 2 pole ในรอบอ้างอิงสเตเตอร์ จากรูป 2.17a แสดงการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์ที่เหนี่ยวนำแรงดันในแต่ละแท่งที่แสดงขนาดของแรงดัน ณ เวลานั้นๆ ในช่วงเวลาต่อมาแท่งแสดงขนาดกระแสแสดงในรูปที่ 2.17b เนื่องจาก leakage inductance ทำให้กระแส lag กับแรงดัน สอดคล้องกับ power factor เป็นมุม  $\phi_2$  ในขณะที่ความหนาแน่นฟลักซ์เคลื่อนในทิศทางของการหมุนตามรูปที่ 2.17b แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์แบบ step wave และองค์ประกอบมูลฐานแสดงในรูป ที่ 2.17c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แรงบิดของ Induction Motor ขณะมอเตอร์ทำงาน



รูปที่ 2.18 วงจรโรเตอร์ต่อเฟส

จากรูปวงจรโรเตอร์ต่อเฟส ที่ slip s

เมื่อ

$$E'_2 = sE_2$$

rotor e.m.f./phase ขณะมอเตอร์ทำงาน

$$X'_2 = sX_2$$

rotor reactance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน

$$R_2$$

rotor resistance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน

$$Z'_2 = \sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}$$

rotor impedance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน

ทำงาน

Rotor current/phase,

$$i'_2 = \frac{E'_2}{Z'_2} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

Rotor p.f.,

$$\cos \phi'_2 = \frac{R_2}{Z'_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

torque/phase ที่ slip  $s$  (ขณะมอเตอร์ทำงาน)

$$T_r = \frac{KsE_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \quad (2.9.1)$$

เมื่อ

$$k = \frac{3}{2\pi N_s}$$

ถ้าจ่าย voltage คงที่  $E_2$  ก็คงที่

$$T_r = \frac{K_1 s R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \quad (2.9.2)$$

เมื่อ

$$k_1 = KE_2^2$$

ขณะมอเตอร์ทำงาน

เมื่อ slip เพิ่มขึ้น ความเร็วมอเตอร์ลดลง แรงบิดก็เพิ่มขึ้น

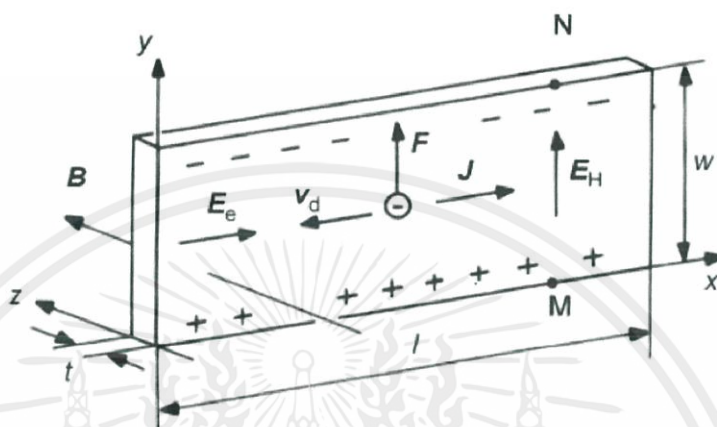
Torque แปรผันตรงกับแรงดันป้อนเข้า

## 2.10 ปรากฏการณ์ฮอลล์ ( Hall Effect )

ในปี ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ ( Edwin Hall ) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.19 ซึ่งในรูปแบบแสดงถึงอุปกรณ์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่มีความกว้าง  $w$  ยาว  $l$  และหนา  $t$  เมื่ออุปกรณ์ได้รับสนามไฟฟ้า  $E_x$  ในทิศทาง  $+x$  จะทำให้เกิดแรงกระทำกับประจุพาหะ สารกึ่งตัวนำชนิด N พาหะส่วนมากคือ อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ เมื่อได้รับแรงกระทำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วย “ความเร็ว drift” (Drift velocity:  $v_d$ ) ทิศทางจะตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศ  $-x$  การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า  $I_x$  ไหลในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อให้สนามแม่เหล็ก  $B$  ในทิศทาง  $+z$  และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส  $I_x$  จะมีแรงกระทำต่อพาหะเพิ่มขึ้นอีกชนิดหนึ่ง เรียกแรงชนิดนี้ว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force:  $F_L$ )” ซึ่งมีทิศ  $+y$  การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเบี่ยงเบนทิศทางไปในทิศ  $+y$  ขณะเดียวกันใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศ  $-y$  ของแผ่นอุปกรณ์จะปรากฏประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามอีกชนิดหนึ่งก็คือ โฮล (hole) การรวมตัวกันของประจุลบทางด้าน  $+y$  และประจุบวกทางด้าน  $-y$  จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์  $E_H$  มีทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้เกิดแรง  $F_E$  กระทำต่อพาหะในทิศทาง  $-y$  เมื่อแรงที่กระทำต่อประจุทั้ง 2 แรงเท่ากันแล้วจะทำให้การเคลื่อนของอิเล็กตรอนมีทิศ  $-x$  เช่นเดิม



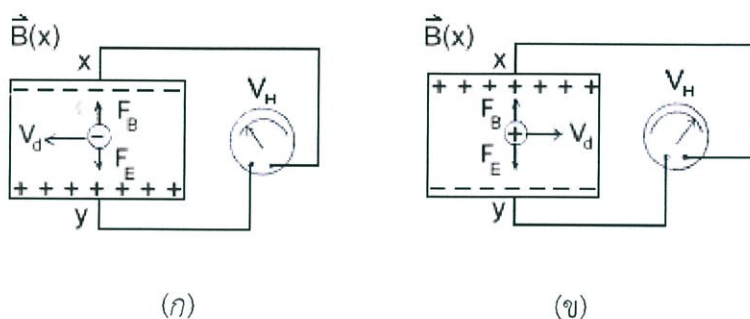
รูปที่ 2.19 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

(ที่มา : [www.doi.nrct.go.th](http://www.doi.nrct.go.th))

เมื่อทำการวัดแรงดันที่จุด  $x$  และ  $y$  โดยต่อโวลต์มิเตอร์ดังรูปที่ 2.19 จะมีแรงดันค่าหนึ่งเรียกว่า “แรงดันฮอลล์” (Hall Voltage:  $V_H$ ) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดตามสมการดังนี้

$$V_H = E_H w \quad (2.10.1)$$

โดยที่  $w$  คือความกว้างของอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.19 ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ทิศของ  $V_D$  และ  $E_H$  จะตรงกันข้ามกับในรูปที่ 2.19 (ก) แต่ทิศของ  $F_L$  กับ  $F_E$  ยังคงเดิม



รูปที่ 2.20 การวัดแรงฮอลล์ที่เกิดในสารกึ่งตัวนำ

(ที่มา: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/hall/hall.htm>)

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะที่แรงลอเรนซ์และแรงทางไฟฟ้าเท่ากันแล้วนั้นจะได้ว่า

$$(-e)E_H = (-e)V_d B$$

$$E_H = V_d B \quad (2.10.2)$$

จากสมการที่ 2.10.2

$$V_H = E_H w$$

$$V_H = V_d B w \quad (2.10.3)$$

เนื่องจากความเร็วดริฟ  $V_d$  มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.10.4)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร หรือความหนาแน่นของประจุ และ  $A$  คือพื้นที่ของแผ่นตัวนำ แทนสมการ 2.10.4 ลงในสมการ 2.10.3 จะได้

$$V_H = \frac{IBw}{neA} \quad (2.10.5)$$

เนื่องจาก  $t = \frac{A}{w}$  คือความหนาของแผ่นตัวนำดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.10.6)$$

จะได้ว่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการดังนี้

$$B = netV_H(l)^{-1} \quad (2.10.7)$$

ค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ จากการศึกษาพบสารกึ่งตัวนำมี  $n \cong 10^{22} m^{-3}$  และ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่  $1T = 10^4 G$

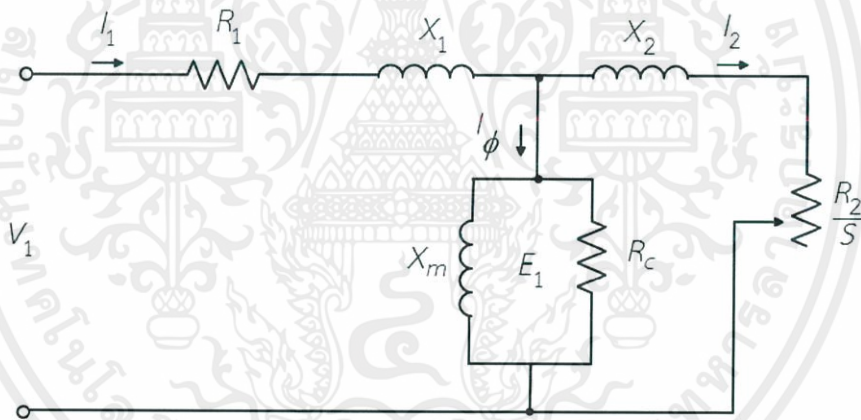


### บทที่ 3

#### วิธีการทดลอง

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ เหล่านั้น มาประยุกต์ในการออกแบบวิธีการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 1 แรงม้า ซึ่งเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เพื่อหาจรรยาสมมูลของมอเตอร์ ทดสอบสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส และ 3 เฟส โดยใช้ search coil เพื่อศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การจ่ายแรงดัน DC ด้วยสัญญาณ 6 รูปแบบ การปรับเทียบค่าและการติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์ และพฤติกรรมสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลดและมีโหลด

#### 3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์

- เมื่อ  $V_1$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อเฟส
- $I_1$  คือค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ต่อเฟส
- $R_1$  คือค่าความต้านทานสเตเตอร์
- $R_2$  คือค่าความต้านทานโรเตอร์

$X_1$  คือค่า Reactance ร็วไหลที่สเตเตอร์

$X_2$  คือค่า Reactance ร็วไหลที่โรเตอร์

$X_m$  คือค่า Reactance สนามแม่เหล็ก

$R_c$  คือค่าความต้านทานที่สูญเสียในแกนเหล็ก

### อุปกรณ์การทดลอง

1. DC power supply
2. 3-Phase Variac
3. 3-Phase Induction Motor 1 HP
4. Oscilloscope
5. Junction box
6. Multi-meter
7. Voltage probe
8. Current probe

#### 3.1.1 VI Method

การทำ IV Method เป็นเทคนิคการหาค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำของขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งจะใช้หาค่าความต้านทานของ stator resistance โดยทำการป้อนแรงดันกระแสตรง เพื่อหาค่าแรงดัน (V) กระแส (I) นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส ซึ่งค่า Slope ของกราฟเป็นค่าความต้านทานของสเตเตอร์

### 3.1.2 No-load test

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า  $R_c$  และ  $jX_m$  โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดขณะมอเตอร์ไม่มีภาระทางกลทำการบันทึกค่า No-load phase input voltage ( $V_0$ ), No-load phase input current ( $I_0$ ) และมุมระหว่าง  $V_0$  กับ  $I_0$  ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า  $R_c$  และ  $jX_m$  ได้จาก

$$R_c = \frac{V_0}{I_0 \cos \phi_0} \quad (3.1)$$

และ

$$X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \phi_0} \quad (3.2)$$

### 3.1.3 Block-rotor test

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า  $R_1 + R_2$  และ  $X_1 + X_2$  โดยการยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่กับที่แล้วค่อยๆ ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนกระแสที่ป้อนเข้าเท่ากับค่าพิกัดแล้วบันทึกค่า Block-rotor phase input voltage ( $V_b$ ), Block-rotor phase input current ( $I_b$ ) และมุมระหว่าง  $V_b$  กับ  $I_b$  ซึ่งนำไปคำนวณหาค่า  $R_1 + R_2$  และ  $X_1 + X_2$  ได้จาก

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{V_b \angle \theta_v^\circ}{I_b \angle \theta_i^\circ} \\ &= R_b + jX_b \end{aligned} \quad (3.3)$$

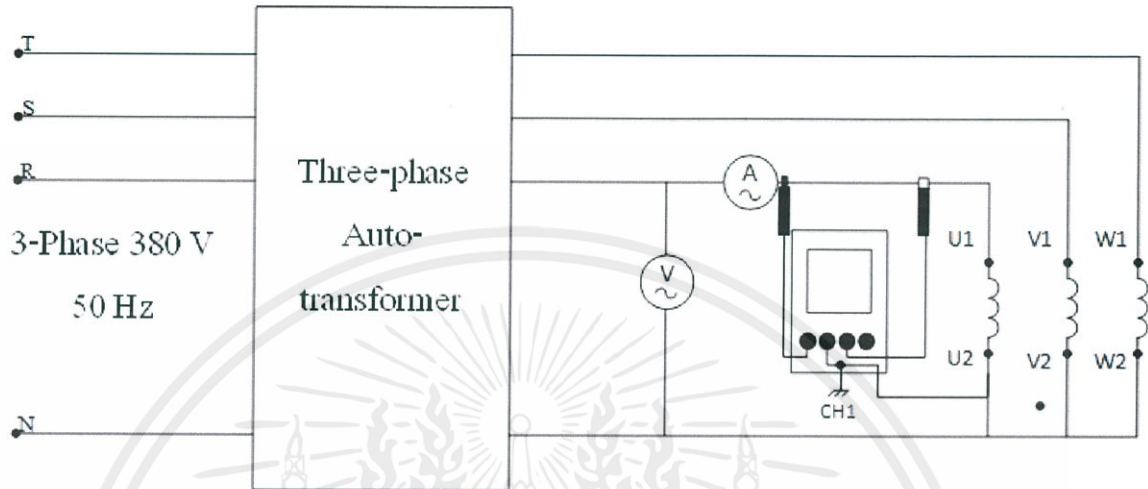
ซึ่งค่า  $R_b$  และ  $X_b$  สามารถแยกได้เป็น

$$R_b = R_1 + R_2 \quad (3.4)$$

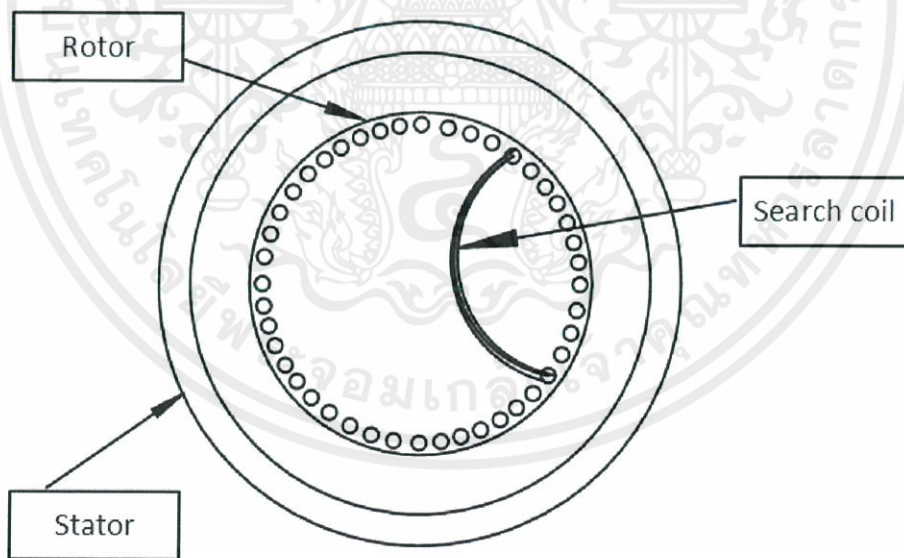
และ

$$X_b = X_1 + X_2 \quad (3.5)$$

### 3.2 การทดสอบป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กใน Airgap โดยใช้ search coil



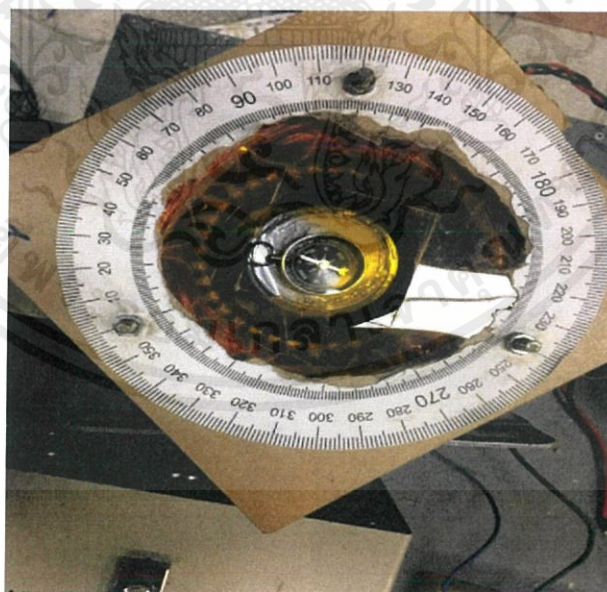
รูปที่ 3.2 วงจรการต่อ induction motor 3 เฟส 1 แรงม้า



รูปที่ 3.3 การพันขดลวด search coil

## อุปกรณ์การทดลอง

1. 3-Phase Variac
2. Oscilloscope
3. Stator of 3-Phase Induction Motor 1 HP
4. Rotor of 3-Phase Induction Motor 1 HP
5. Multi-meter
6. Voltage probe
7. Current probe
8. Junction box
9. Search coil
10. กระดานวัดมุม แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระดานมุมที่ใช้ในการหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลอง

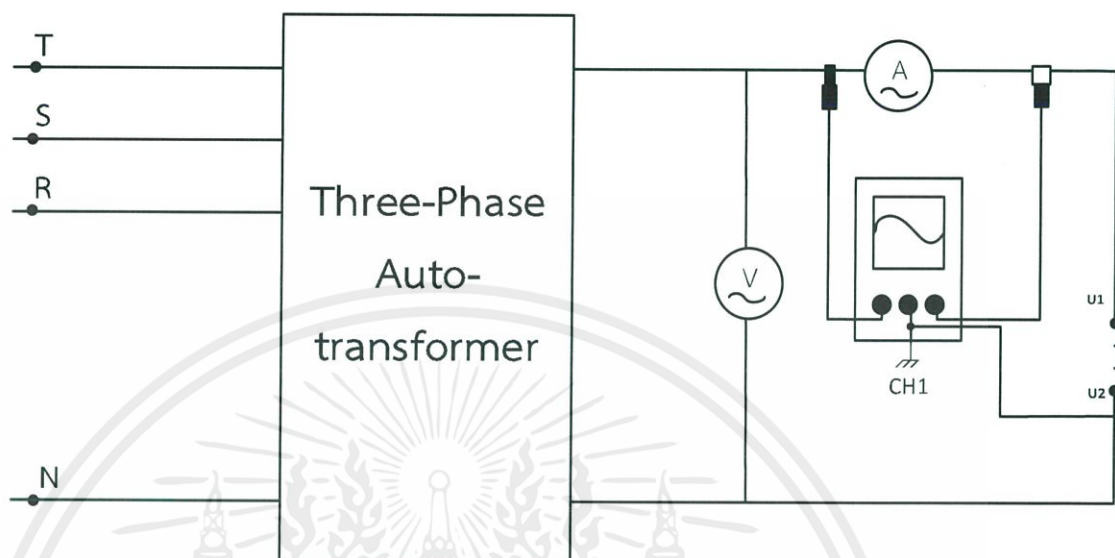
- 1) เชื่อมต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อวงจรตามรูปที่ 3.2
- 2) พันขดลวด search coil ในร่องสลีตของโรเตอร์ ระยะห่าง 11 ร่องสลีต จำนวนรอบ 3 รอบ ดังรูปที่ 3.3 พร้อมทั้งประกอบเข้ากับสเตเตอร์และกระดานวัดมุม
- 3) เริ่มจ่ายแรงดันทำการทดลองวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำใน airgap โดยป้อนแรงดัน 3 เฟสเข้ามอเตอร์ โดยทำการทดลองที่แรงดัน 100 V วัดค่าโดยดูค่าจากออสซิลโลสโคปและบันทึกผลตาราง
- 4) ลดแรงดันให้เป็นศูนย์แล้วหมุนเปลี่ยนตำแหน่งโรเตอร์ให้ต่างจากจุดเดิม 30 องศา วัดค่าและบันทึกผลตาราง
- 5) หมุนเปลี่ยนตำแหน่งโรเตอร์ทุกๆ 30 องศา เป็นมุม 60,90,120,150,180,210,240,270,300,330 ของจุดเดิมจากข้อ 2 ค่าแรงดันเหนี่ยวนำใน airgap และบันทึกค่าลงในตาราง



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กหลักของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส โดยใช้ search coil และความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์

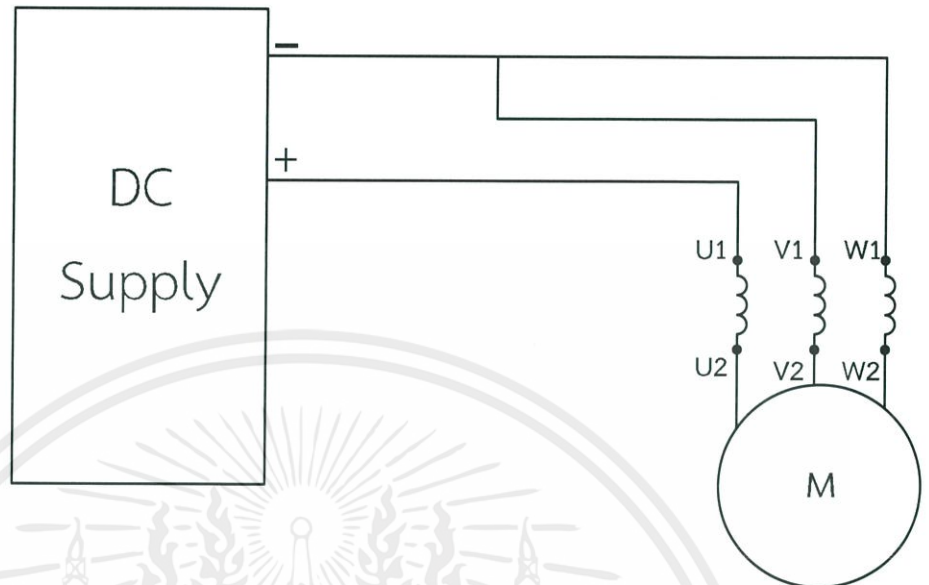


รูปที่ 3.6 วงจรการต่อ induction motor ด้วยแรงดัน 1 เฟส

#### ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เชื่อมต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อวงจรตามรูปที่ 3.6
- 2) พันขดลวด search coil ในร่องสลิตของโรเตอร์ ระยะห่าง 11 ร่องสลิต จำนวนรอบ 3 รอบ พร้อมทั้งประกอบเข้ากับสเตเตอร์และกระดานวัดมุม
- 3) เริ่มจ่ายแรงดันทำการทดลองวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำใน airgap โดยป้อนแรงดัน 1 เฟสเข้ามอเตอร์ โดยจ่ายที่แรงดันต่ำๆ เพื่อให้สามารถหามุมหาตำแหน่งที่มีฟลักซ์แม่เหล็กมากที่สุด
- 4) ทำการทดลองจ่ายแรงดันที่ 100 V เนื่องจากเป็นระดับแรงดันที่ความหนาแน่นฟลักซ์ยังไม่อิ่มตัว ในตำแหน่งที่มีฟลักซ์แม่เหล็กมากที่สุด พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำใน airgap ที่ได้จากออสซิลโลสโคปและบันทึกค่าลงในตาราง

### 3.4 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กกับการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบ



รูปที่ 3.7 วงจรการต่อสัญญาณรูปแบบที่ 1  $+V_a, -V_b, -V_c$

#### อุปกรณ์การทดลอง

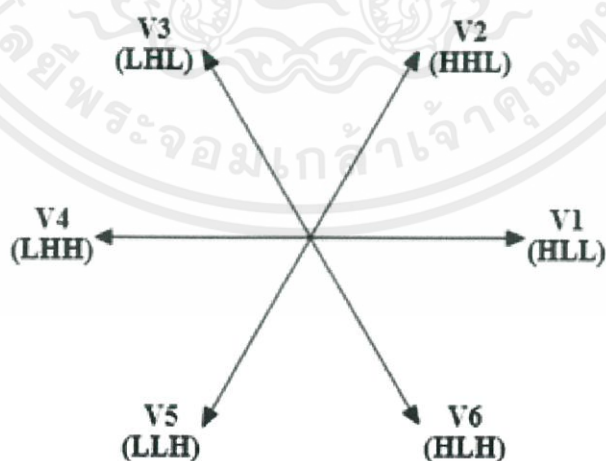
1. Stator of 3-Phase Induction Motor 1 HP
2. Multi-meter
3. Junction box
4. เชื้อมทิศ
5. DC power supply

### ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เชื่อมต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำกับแหล่งจ่ายกระแสตรง ( DC Supply ) ตามรูปที่ 3.7
- 2) ทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบตามตารางที่ 3.4.1 เพื่อหาพล็อตแม่เหล็กลิฟท์ในแต่ละเฟส

ตารางที่ 3.1 สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบ

Patterns	Phase A	Phase B	Phase C
1	$+V_a$	$-V_b$	$-V_c$
2	$+V_a$	$+V_b$	$-V_c$
3	$-V_a$	$+V_b$	$-V_c$
4	$-V_a$	$+V_b$	$+V_c$
5	$-V_a$	$-V_b$	$+V_c$
6	$+V_a$	$-V_b$	$+V_c$

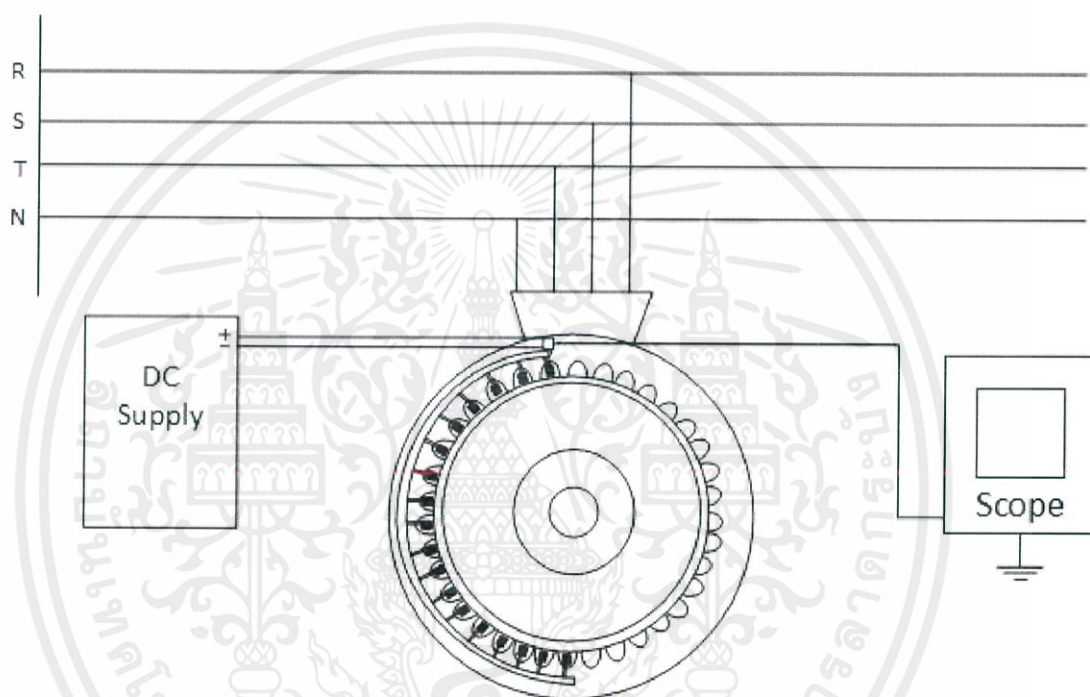


รูปที่ 3.8 สเปซเวกเตอร์ของสัญญาณ 6 รูปแบบ

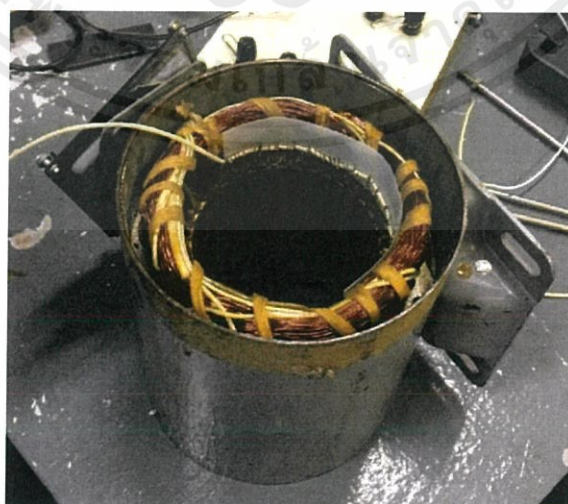
3) ใช้เข็มทิศเลื่อนหาตำแหน่งฟลักแม่เหล็กที่รอบๆภายในสเตเตอร์ โดยตำแหน่งที่เข็มทิศชี้เป็นฟลักซ์แม่เหล็กในแต่ละเฟสของแต่ละรูปแบบ

4) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ได้จากการทดลองกับการทดลองที่ 3.3

### 3.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลดและมีโหลด



รูปที่ 3.9 วงจรการทดสอบสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ทำงาน



รูปที่ 3.10 การติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์การทดลอง

1. 3-Phase Variac
2. DC power supply
3. Multi-meter
4. 3-Phase Induction Motor 1 HP ที่ติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์และวงจรสำหรับการทดสอบ
5. Oscilloscope
6. Voltage probe
7. Current probe
8. ลูกตุ้มน้ำหนัก

## ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เชื่อมต่อวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำกับ DC Supply และ Variac 3 เฟส ตามรูปที่ 3.9
- 2) จ่ายแรงดัน DC 5V เข้าฮอลล์เซ็นเซอร์ โดยตำแหน่งการติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์แสดงในรูปที่ 3.10 โดยที่ ฮอลล์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 จะอยู่ที่ตำแหน่งแกนของเฟส a และฮอลล์เซ็นเซอร์ตัวที่ 2 จะอยู่ถัดจากตัวที่ 1 ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา
- 3) ป้อนแรงดัน 3 เฟสเข้ามอเตอร์ โดยทำการป้อนทีละ 20 V จนถึง 220 V วัดค่าแรงดันฮอลล์เซ็นเซอร์แต่ละตัวที่ได้จากออสซิลโลสโคปทั้งหมด 18 ตัว พร้อมทั้งบันทึกค่าลงในตาราง
- 4) ต่อมาทำการเพิ่มโหลด โดยการใส่ลูกตุ้มน้ำหนักเริ่มที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของโหลด วัดค่าแรงดันฮอลล์เซ็นเซอร์พร้อมทั้งบันทึกค่าลงในตาราง
- 5) เปรียบเทียบค่าแรงดันฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ได้ระหว่างไม่มีโหลดกับมีโหลด

## บทที่ 4

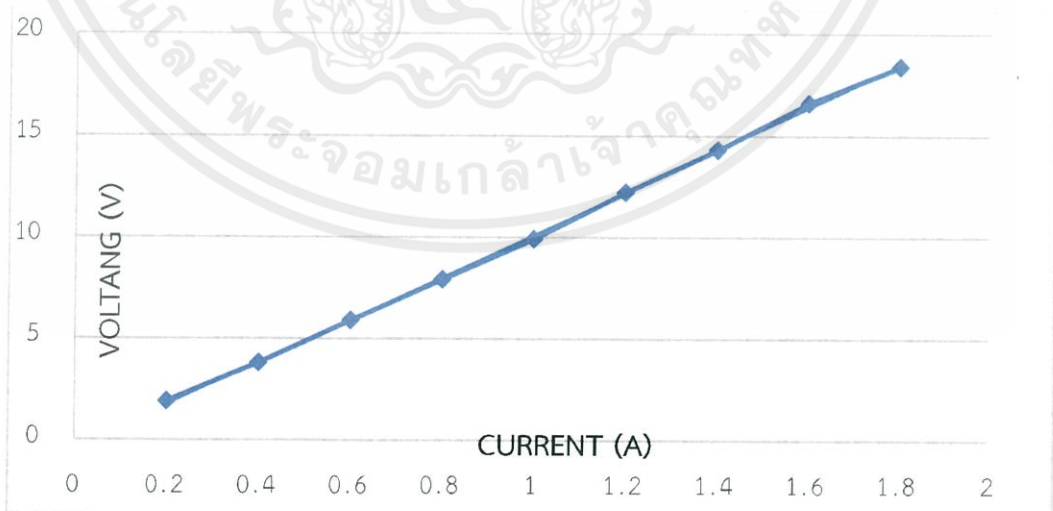
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบหาจรรยาสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

##### 4.1.1 VI Method

ตารางที่ 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับค่ากระแส

Voltage (V)	Current (A)
1.9	0.2
3.8	0.4
5.9	0.6
7.9	0.8
9.9	1.0
12.2	1.2
14.3	1.4
16.6	1.6
18.4	1.8



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I

จากการทดลอง VI Method ได้ค่า  $R_1 = 10.458 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

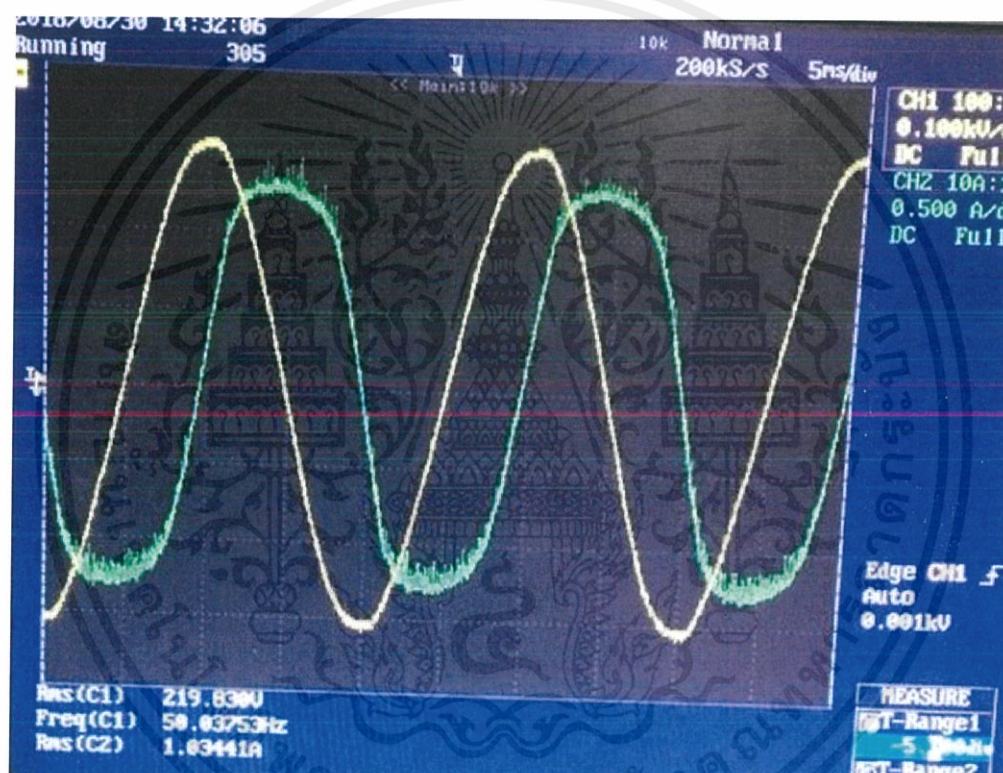
## 4.1.2 No-load test

ตารางที่ 4.1.2 ผลการทดลอง No-load test

Voltage (V)	Current (I)	Power Factor	$\phi_0$ (Degrees)
221.29	1.18	0.1564	$81^\circ$

จากการทดลอง No-load test ได้ค่า  $R_c = 1198.8 \Omega$

$$jX_m = 189.87 \Omega$$



รูปที่ 4.2 No-load test จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.3 Block-rotor test

ตารางที่ 4.1.3 ผลการทดลอง Block-rotor test

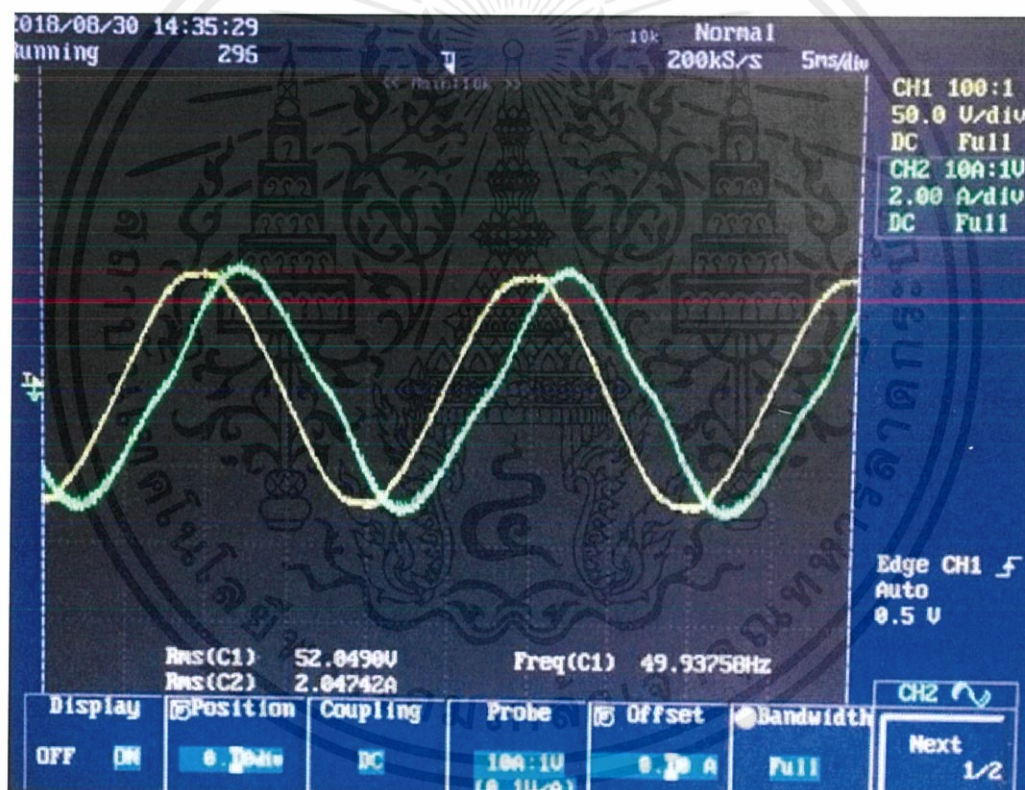
Voltage (V)	Current (I)	$\cos \phi$	$\phi$
49.68	2.06	0.72	44

$$Z_b = 17.34 + j16.75$$

$$\text{Motor class B: } X_1 + X_2 = 0.4X_b + 0.6X_b$$

จากการทดลอง Block-rotor test ได้ค่า  $R_1 = 10.458 \, \Omega$ ,  $R_2 = 6.882 \, \Omega$ ,  $X_1 = 6.7 \, \Omega$ ,

$$X_2 = 10.05 \, \Omega$$

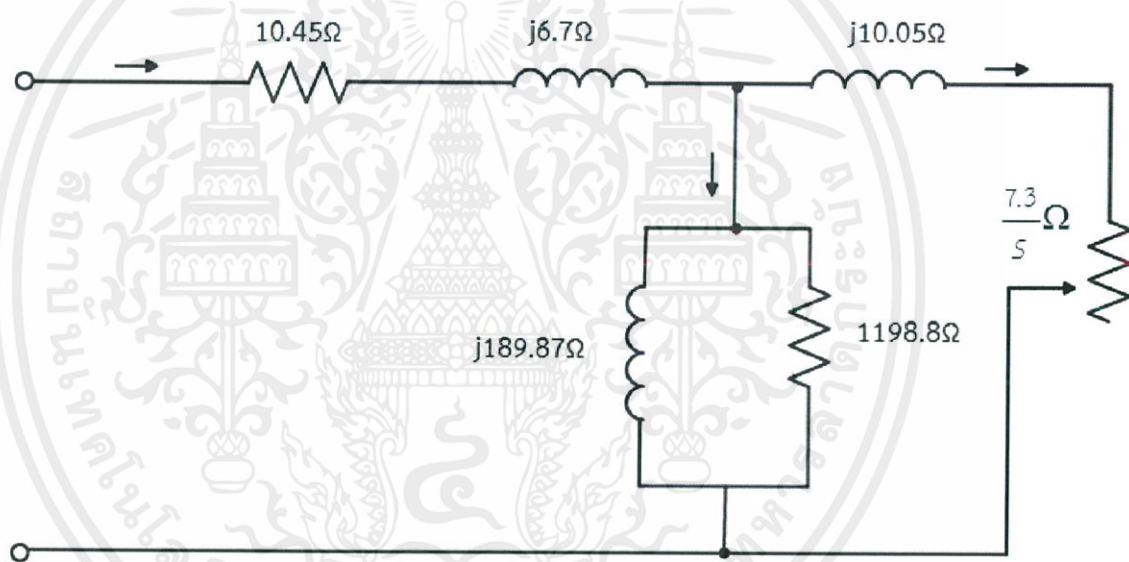


รูปที่ 4.3 Block-rotor test จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อภิปรายผลการทดลอง

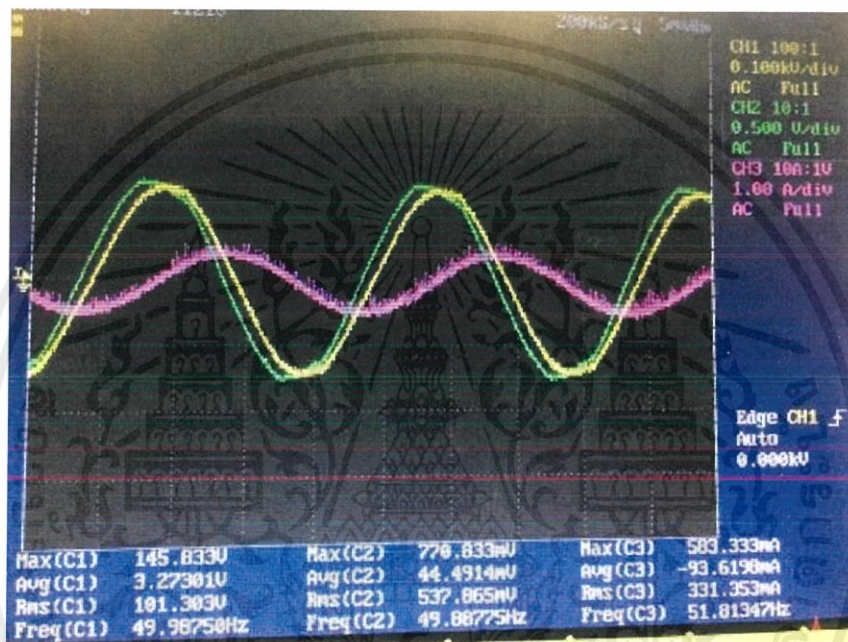
การทดลองที่ 4.1 จากผลการทดลองหาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ทำการทดลอง ทั้ง 3 วิธีคือ วิธี VI Method ได้ค่าความต้านทานสเตเตอร์ ( $R_1$ ) มีค่าเท่ากับ 10.458  $\Omega$  วิธี No-load test ได้ค่าความต้านทานที่สูญเสียในแกนเหล็ก ( $R_c$ ) และค่า Reactance สนามแม่เหล็ก ( $X_m$ ) มีค่าเท่ากับ 1198.8  $\Omega$  และ 189.87  $\Omega$  ตามลำดับ และวิธี Block-rotor test ได้ค่าความต้านทานโรเตอร์ ( $R_2$ ), Reactance รั้วไหลที่สเตเตอร์ ( $X_1$ ) และ Reactance รั้วไหลที่โรเตอร์ ( $X_2$ ) มีค่าเท่ากับ 6.882  $\Omega$ , 6.7  $\Omega$  และ 10.05  $\Omega$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปวาดเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามรูปที่ 4.4



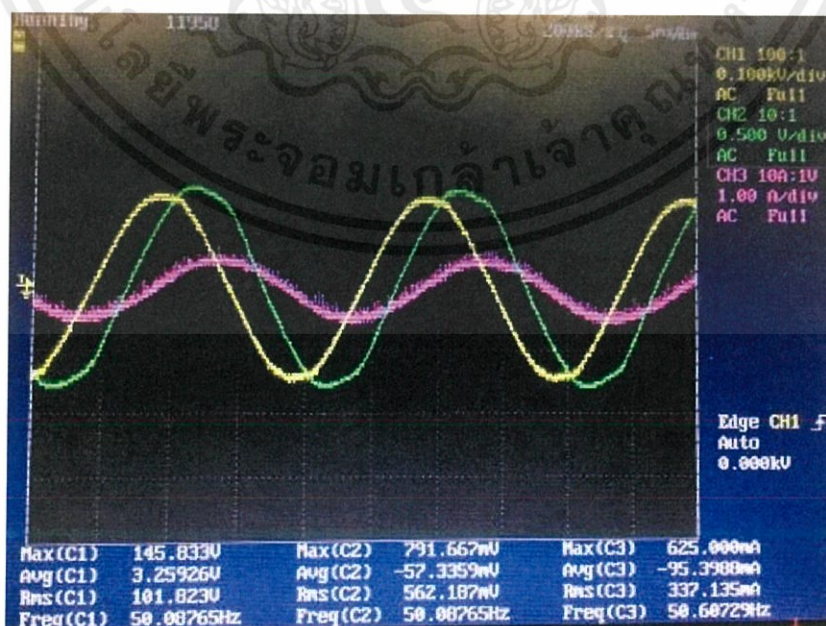
รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 4.2 การทดสอบป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กใน Airgap โดยใช้ search coil

การทดลองที่ 4.2 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อศึกษาค่าฟลักซ์แม่เหล็กในแต่ละตำแหน่ง รอบ ๆ airgap โดยการพัน search coil ที่ 11 ร่องสลิตและพัน 3 รอบ โดยเริ่มจากการวาง search coil ที่มุม 0 องศา และเปลี่ยนตำแหน่งไปครั้งละ 30 องศาจนครบ 360 องศาหรือ 1 รอบทางกล ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.5 – 4.16 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าใน Ch.2



รูปที่ 4.5 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 0 องศา

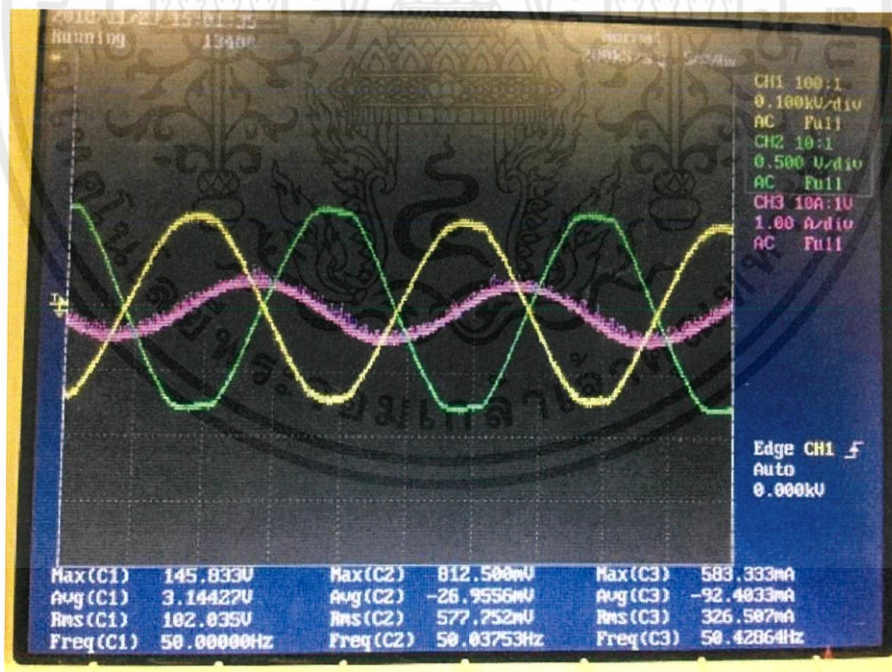


รูปที่ 4.6 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

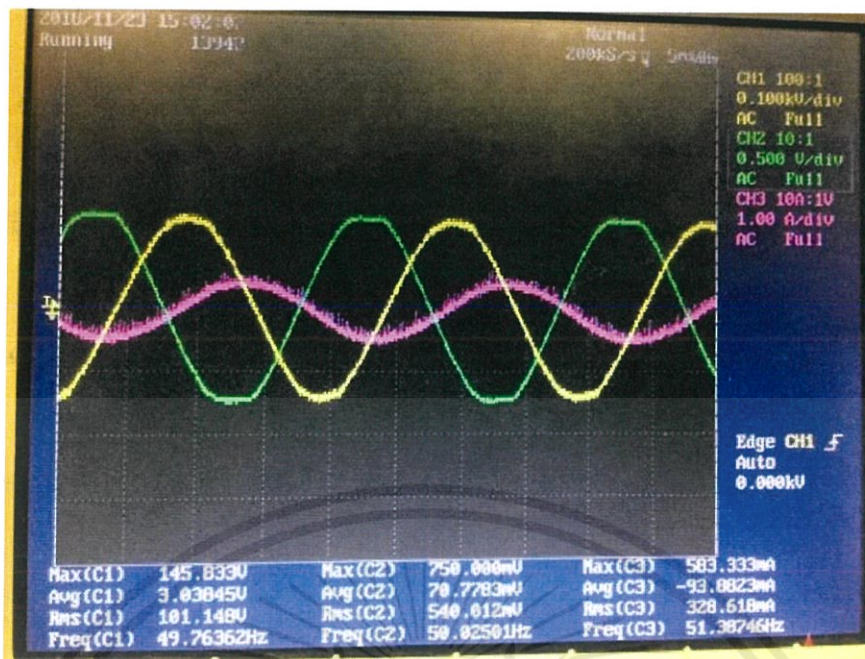


รูปที่ 4.7 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 60 องศา

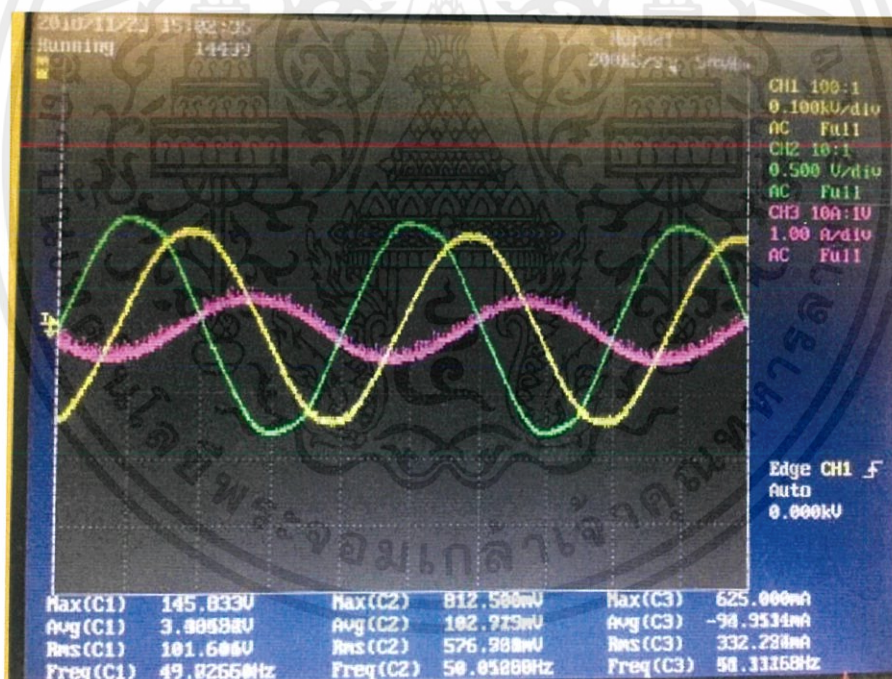


รูปที่ 4.8 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

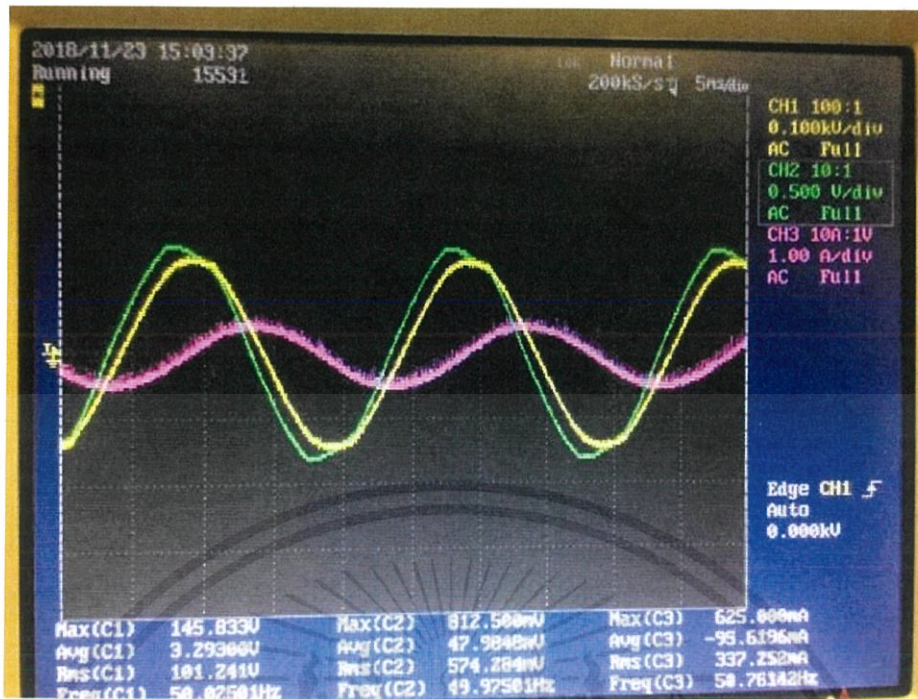


รูปที่ 4.9 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 120 องศา



รูปที่ 4.10 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 150 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

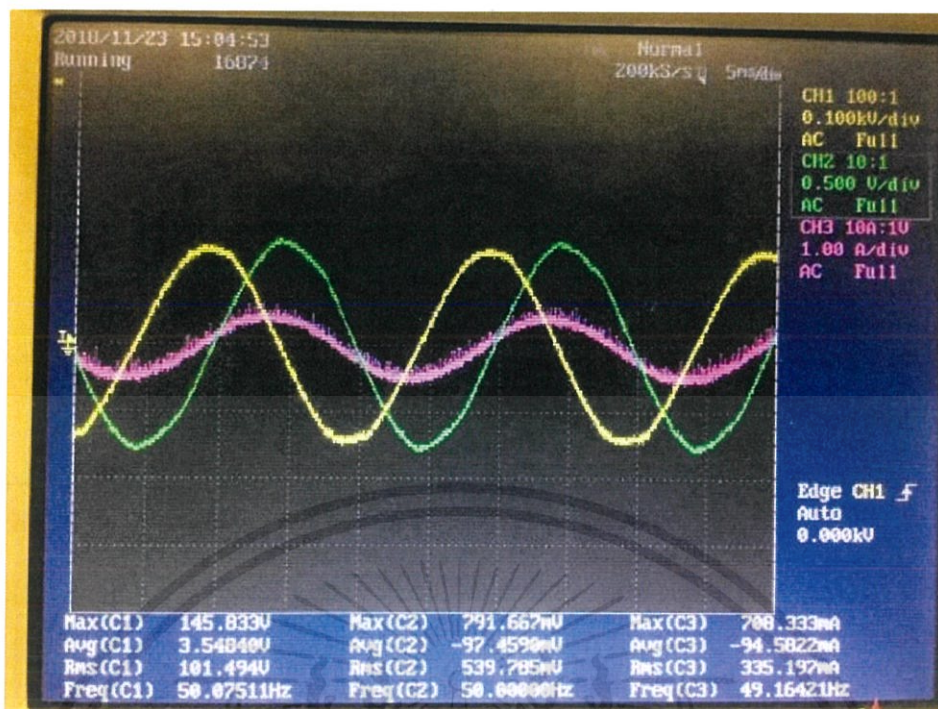


รูปที่ 4.11 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 180 องศา

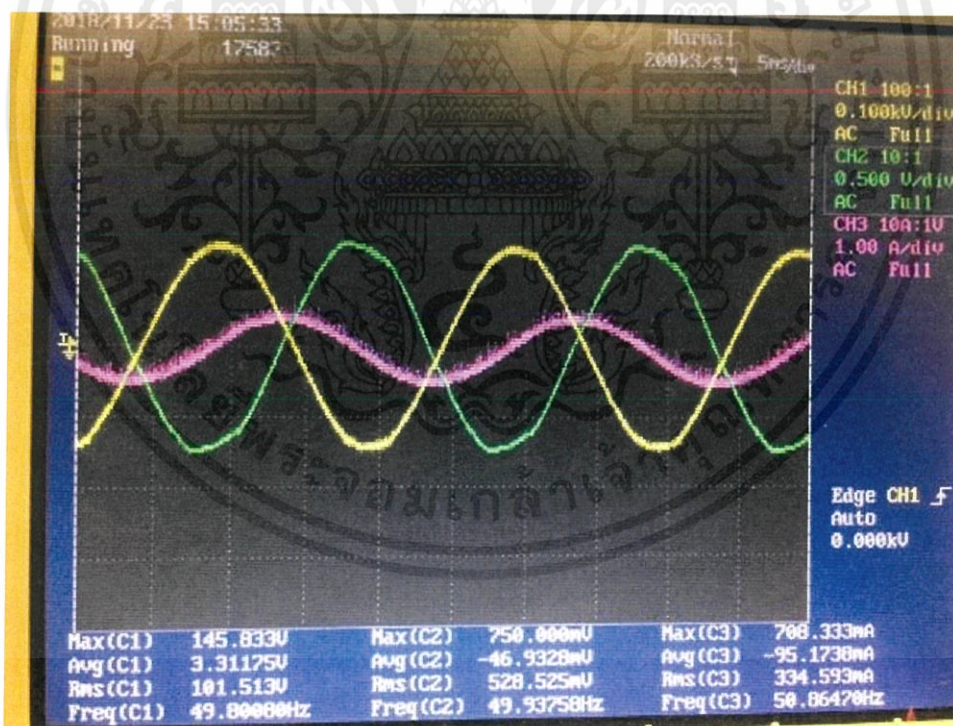


รูปที่ 4.12 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 210 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

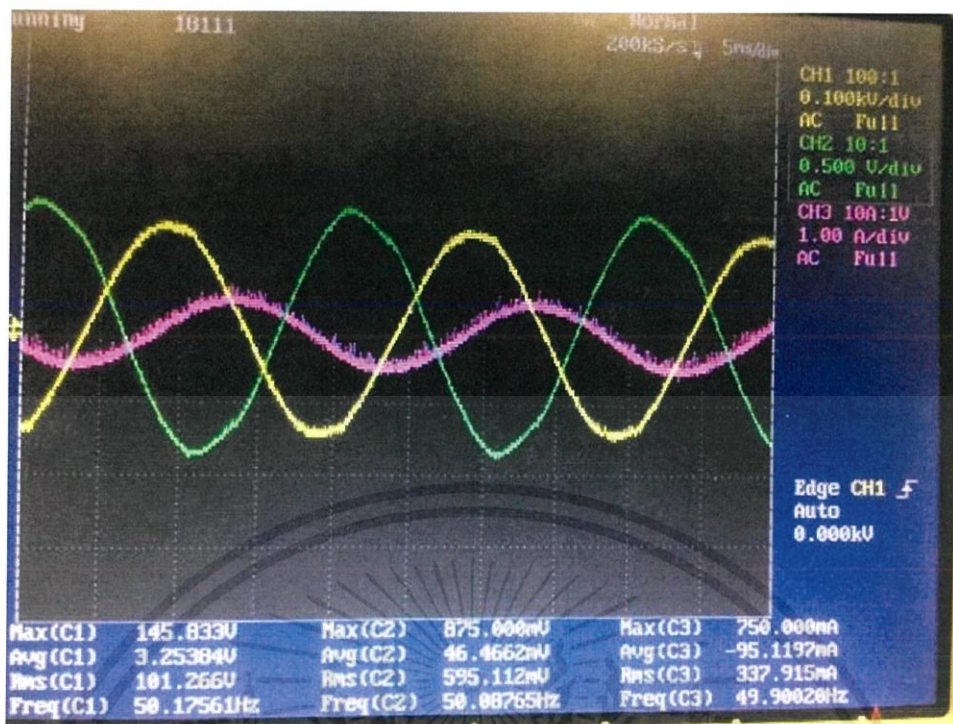


รูปที่ 4.13 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 240 องศา

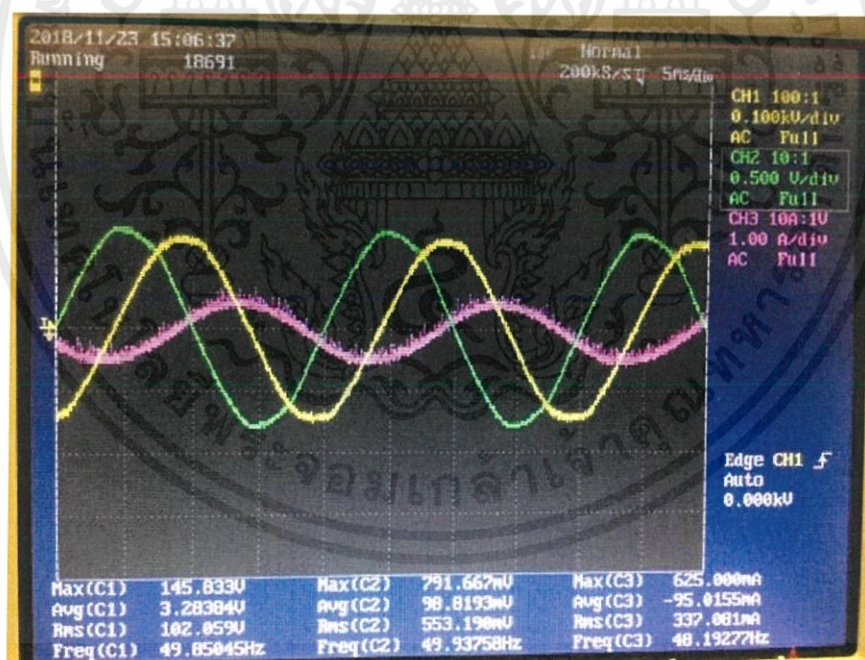


รูปที่ 4.14 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 300 องศา



รูปที่ 4.16 สัญญาณจาก oscilloscope ที่มุม 330 องศา

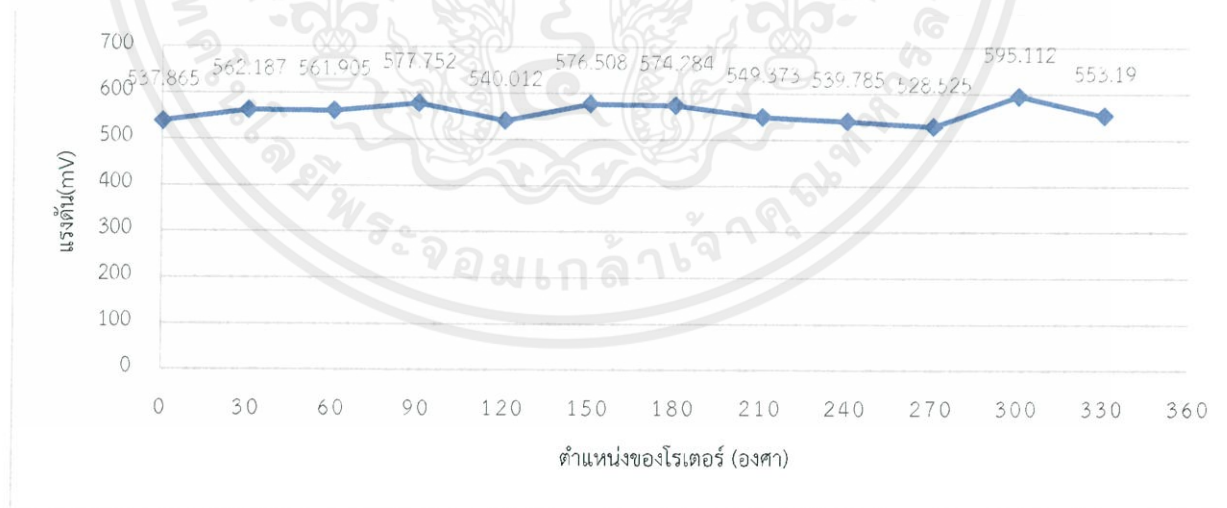
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.5-4.16 นำค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นค่า rms มาเปรียบเทียบกับตำแหน่งการวาง search coil ในแต่ละองศา ตามตารางที่ 4.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับตำแหน่งการวาง

search coil ในแต่ละองศา

มุมของโรเตอร์ (องศา)	แรงดันเหนี่ยวนำที่วัดได้เป็นค่า rms ( mV )
0	537.865
30	562.187
60	561.905
90	577.752
120	540.012
150	576.508
180	574.284
210	549.373
240	539.785
270	528.525
300	595.112
330	553.190



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับตำแหน่งการวาง search coil ในแต่ละ

องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อภิปรายผลการทดลอง

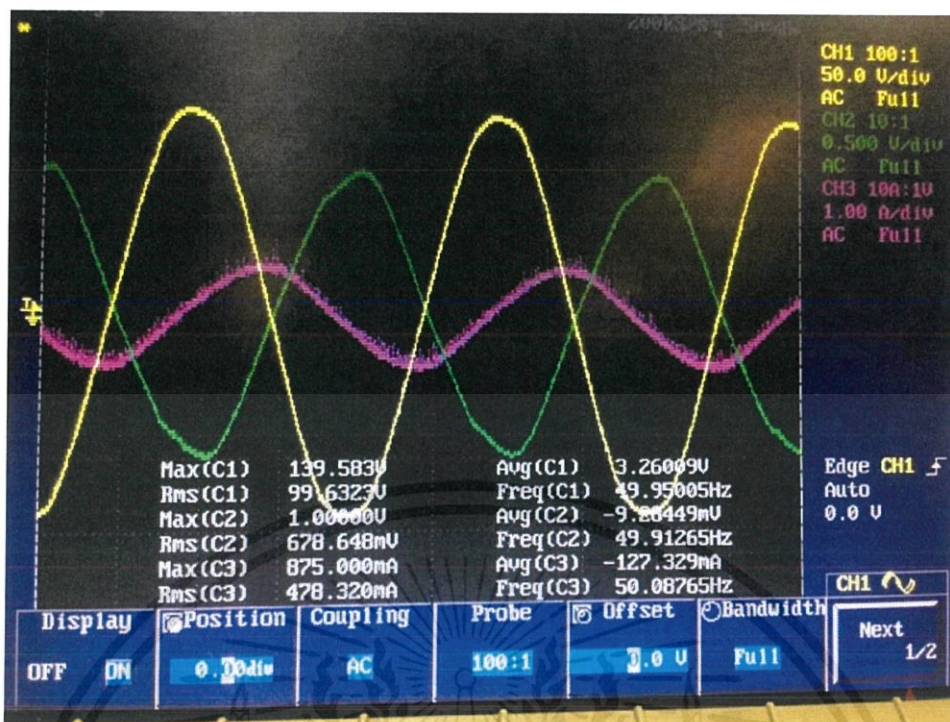
การทดลองที่ 4.2 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่าน search coil กับค่ามุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของโรเตอร์ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัด ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าทุกๆมุมของโรเตอร์มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สม่ำเสมอ

4.3 การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กลัพท์ของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส โดยใช้ search coil และความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส และ 3 เฟส

ผลการทดลองที่ 4.3 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส เพื่อหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่มากที่สุดและค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยที่สุดของแต่ละเฟส ซึ่งค่าที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.3.1 และในรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.3.1 ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ในการป้อนแรงดัน 1 เฟสของแต่ละเฟส

Phase A		Phase B		Phase C	
Max	0°	Max	60°	Max	33°
0	55°	0	105°	0	86°
Max	92°	Max	155°	Max	127°
0	138°	0	195°	0	168°
Max	185°	Max	245°	Max	215°
0	228°	0	288°	0	260°
Max	274°	Max	335°	Max	308°
0	324°	0	20°	0	355°



รูปที่ 4.18 สัญญาณจาก oscilloscope ที่ตำแหน่งระดับแรงดันสูงสุดของเฟส A อภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 4.3 เพื่อหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่มากที่สุดและค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยที่สุดของแต่ละเฟส ได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่มากที่สุด 4 ค่า และได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยที่สุด 4 ค่า โดยที่เฟส a ได้ค่ามากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งของโรเตอร์ 0, 95, 185 และ 274 องศา และค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งของโรเตอร์ 55, 138, 228 และ 324 องศา ซึ่งค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่มากที่สุด 4 ค่านั้นคือแกนของฟลักซ์แม่เหล็กแต่ละเฟส

#### 4.4 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กกับการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบ

ผลการทดลองที่ 4.4 การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบเพื่อดูตำแหน่งของขดลวดทั้ง 3 เฟสที่อยู่บนสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ผลการทดลองได้ตามตารางที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.4.1 ตำแหน่งของขั้วเหนือและขั้วใต้เมื่อทำการป้อนแรงดัน 6 รูปแบบโดยขั้วเหนือ(+) และขั้วใต้(-)

Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
-0°	-330°	-300°	-270°	-240°	-210°
+90°	+70°	+40°	+0°	+330°	+300°
-180°	-150°	-120°	-90°	-70°	-40°
+270°	+240°	+210°	+180°	+150°	+120°



รูปที่ 4.19 การทดลองใช้เข็มทิศเลื่อนหาตำแหน่งฟลักแม่เหล็กลัพธ์

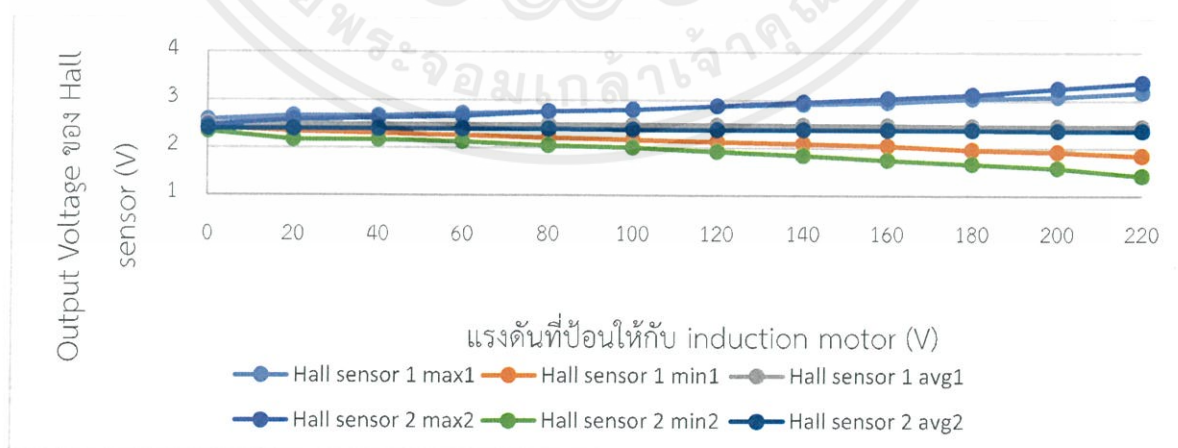
#### อภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 4.4 จากการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบแล้วใช้เข็มทิศเลื่อนหาแกนของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยที่แกนแม่เหล็กของขดลวดเฟส a อยู่ที่ตำแหน่งมุม 0, 90, 180 และ 270 องศา เฟส b อยู่ที่ตำแหน่ง มุม 40, 130, 210 และ 300 องศา และเฟส c ขดลวดอยู่ที่ตำแหน่งมุม 70, 150, 240 และ 330 องศา ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 4.3

4.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลดและมีโหลด  
ผลการทดลองที่ 4.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มี  
โหลด ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5.1

ตารางที่ 4.5.1 ผลการทดสอบ Hall sensor ณ สภาวะ No-load

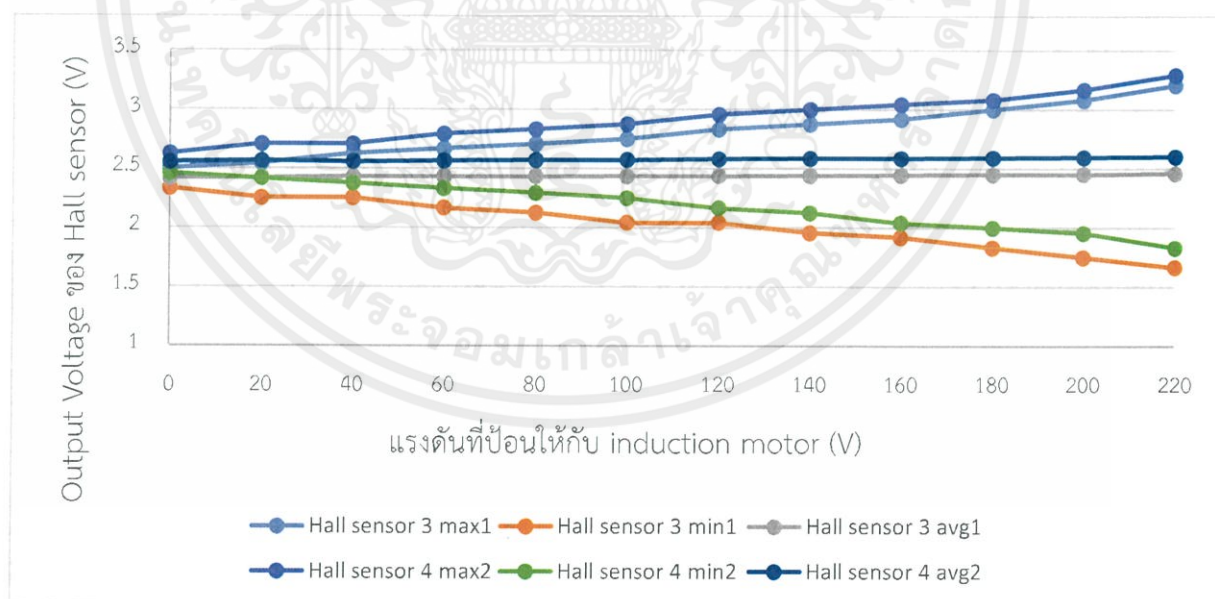
Hall sensor 1				Hall sensor 2			
Voltage	max1	min1	avg1	Voltage	max2	min2	avg2
0	2.58333	2.41667	2.49544	0	2.45833	2.33333	2.39376
20	2.66667	2.33333	2.49054	20	2.58333	2.16667	2.38877
40	2.66667	2.29167	2.48844	40	2.625	2.16667	2.38909
60	2.70833	2.25	2.48497	60	2.66667	2.125	2.3862
80	2.75	2.20833	2.48397	80	2.75	2.04167	2.38713
100	2.79167	2.16667	2.47831	100	2.79167	2	2.38282
120	2.875	2.125	2.47282	120	2.875	1.91667	2.37645
140	2.91667	2.08333	2.47015	140	2.95833	1.83333	2.37998
160	2.95833	2.04167	2.46654	160	3.04167	1.75	2.37346
180	3.04167	1.95833	2.46361	180	3.125	1.66667	2.37329
200	3.08333	1.91667	2.45702	200	3.25	1.58333	2.36551
220	3.16667	1.83333	2.45189	220	3.375	1.41667	2.36086



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

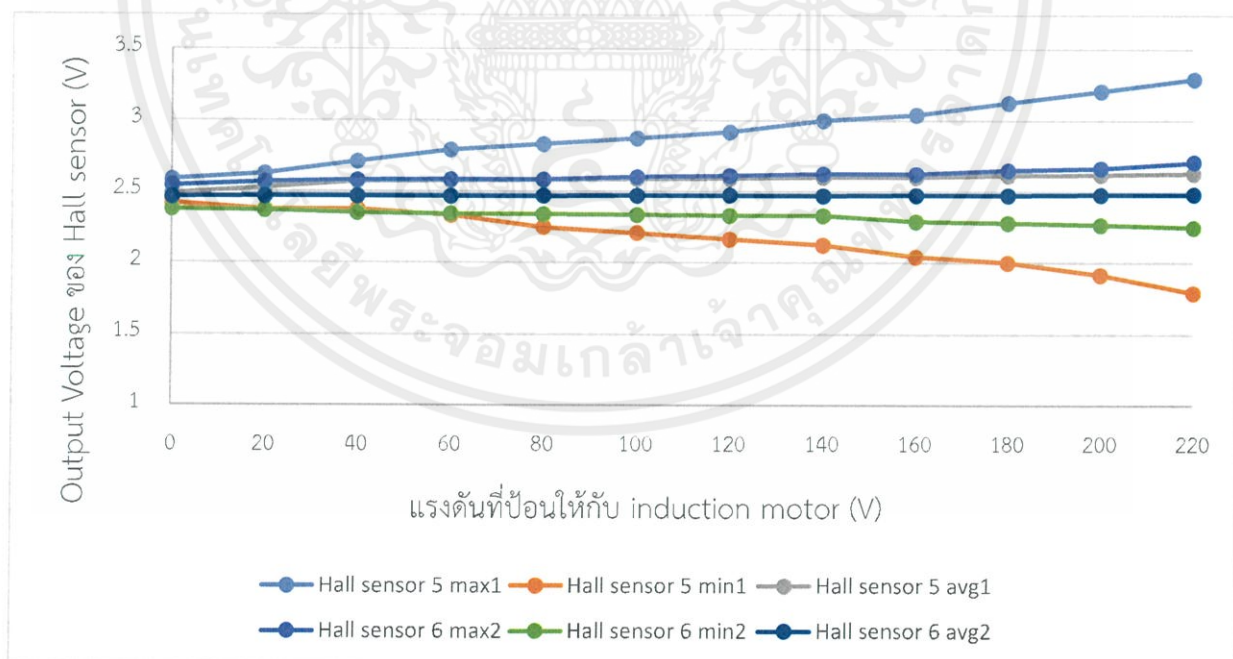
Hall sensor 3				Hall sensor 4			
Voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.5	2.33333	2.41891	0	2.625	2.45833	2.55558
20	2.54167	2.25	2.4233	20	2.70833	2.41667	2.56324
40	2.625	2.25	2.4284	40	2.70833	2.375	2.55882
60	2.66667	2.16667	2.4331	60	2.79167	2.33333	2.5669
80	2.70833	2.125	2.43346	80	2.83333	2.29167	2.57269
100	2.75	2.04167	2.4361	100	2.875	2.25	2.57538
120	2.83333	2.04167	2.43834	120	2.95833	2.16667	2.57986
140	2.875	1.95833	2.44078	140	3	2.125	2.58455
160	2.91667	1.91667	2.44377	160	3.04167	2.04167	2.58846
180	3	1.83333	2.45076	180	3.08333	2	2.59406
200	3.08333	1.75	2.45471	200	3.16667	1.95833	2.59689
220	3.20833	1.66667	2.46138	220	3.29167	1.83333	2.60524



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

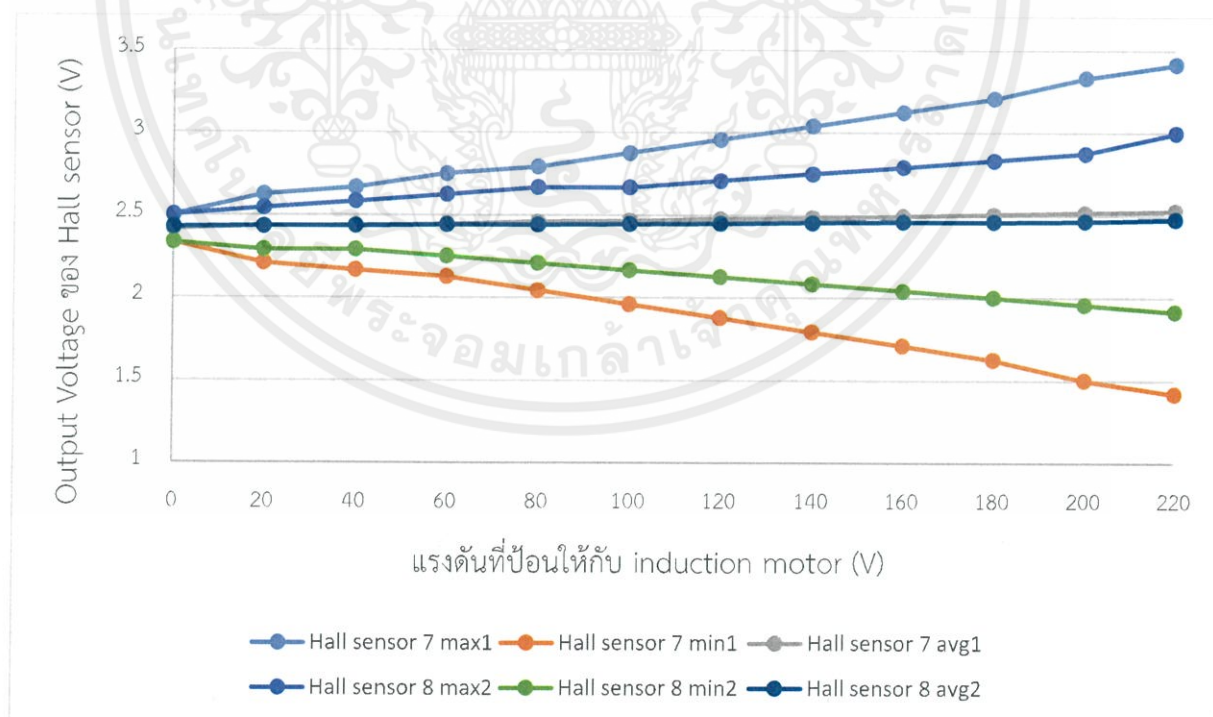
Hall sensor 5				Hall sensor 6			
Voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.58333	2.41667	2.48554	0	2.54167	2.375	2.46229
20	2.625	2.375	2.52764	20	2.56667	2.36667	2.46522
40	2.70833	2.375	2.56996	40	2.57777	2.35	2.46755
60	2.79167	2.33333	2.57536	60	2.58333	2.34333	2.46752
80	2.83333	2.25	2.5812	80	2.58333	2.34112	2.46935
100	2.875	2.20833	2.58764	100	2.6	2.33667	2.47281
120	2.91667	2.16667	2.59365	120	2.61245	2.33333	2.47363
140	3	2.125	2.60113	140	2.62333	2.33333	2.47165
160	3.04167	2.04167	2.60171	160	2.625	2.29167	2.47632
180	3.125	2	2.61682	180	2.65	2.28333	2.47791
200	3.20833	1.91667	2.61953	200	2.66667	2.26667	2.4791
220	3.29167	1.79167	2.63085	220	2.70833	2.25	2.48368



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 5 และ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

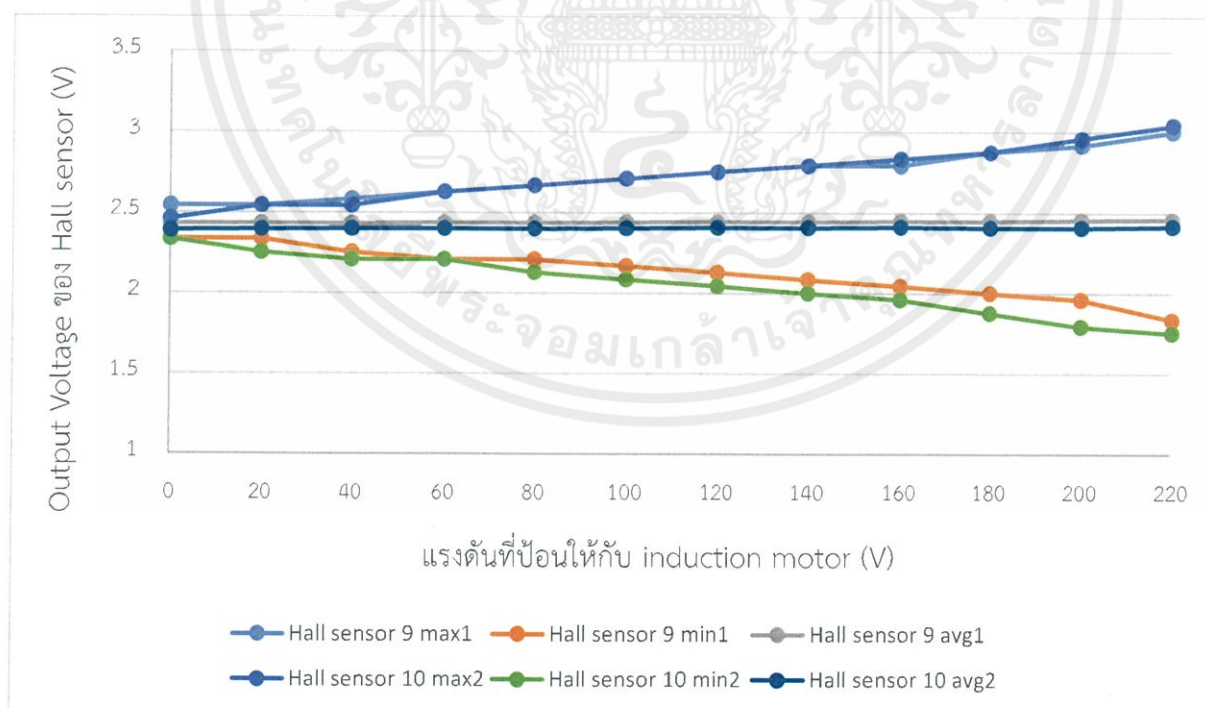
Hall sensor 7				Hall sensor 8			
Voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.5	2.33333	2.41525	0	2.5	2.33333	2.4255
20	2.625	2.20833	2.43143	20	2.54167	2.29167	2.43111
40	2.66667	2.16667	2.43753	40	2.58333	2.29167	2.43516
60	2.75	2.125	2.44648	60	2.625	2.25	2.44023
80	2.79167	2.04167	2.45792	80	2.66667	2.20833	2.44166
100	2.875	1.95833	2.46561	100	2.66667	2.16667	2.44507
120	2.95833	1.875	2.47651	120	2.70833	2.125	2.44785
140	3.04167	1.79167	2.48567	140	2.75	2.08333	2.45431
160	3.125	1.70833	2.49627	160	2.79167	2.04167	2.45968
180	3.20833	1.625	2.50545	180	2.83333	2	2.46178
200	3.33333	1.5	2.51674	200	2.875	1.95833	2.46683
220	3.41667	1.41667	2.52833	220	3	1.91667	2.47594



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 7 และ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

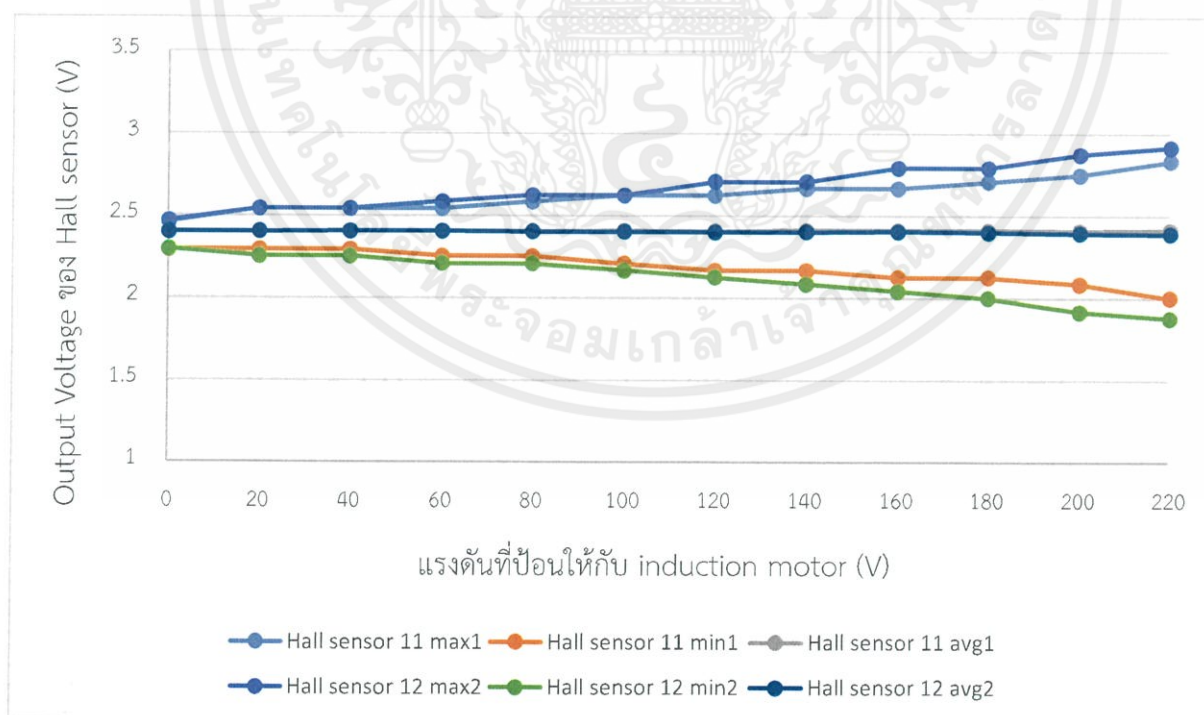
Hall sensor 9				Hall sensor 10			
voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.54167	2.33333	2.42984	0	2.45833	2.33333	2.38771
20	2.54167	2.33333	2.42842	20	2.54167	2.25	2.3956
40	2.58333	2.25	2.43169	40	2.54167	2.20833	2.3969
60	2.625	2.20833	2.43295	60	2.625	2.20833	2.39941
80	2.66667	2.20833	2.43506	80	2.66667	2.125	2.39864
100	2.70833	2.16667	2.43668	100	2.70833	2.08333	2.40167
120	2.75	2.125	2.43885	120	2.75	2.04167	2.40567
140	2.79167	2.08333	2.44212	140	2.79167	2	2.40764
160	2.79167	2.04167	2.44453	160	2.83333	1.95833	2.41105
180	2.875	2	2.44691	180	2.875	1.875	2.40556
200	2.91667	1.95833	2.45032	200	2.95833	1.79167	2.40827
220	3	1.83333	2.45548	220	3.04167	1.75	2.4124



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 9 และ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

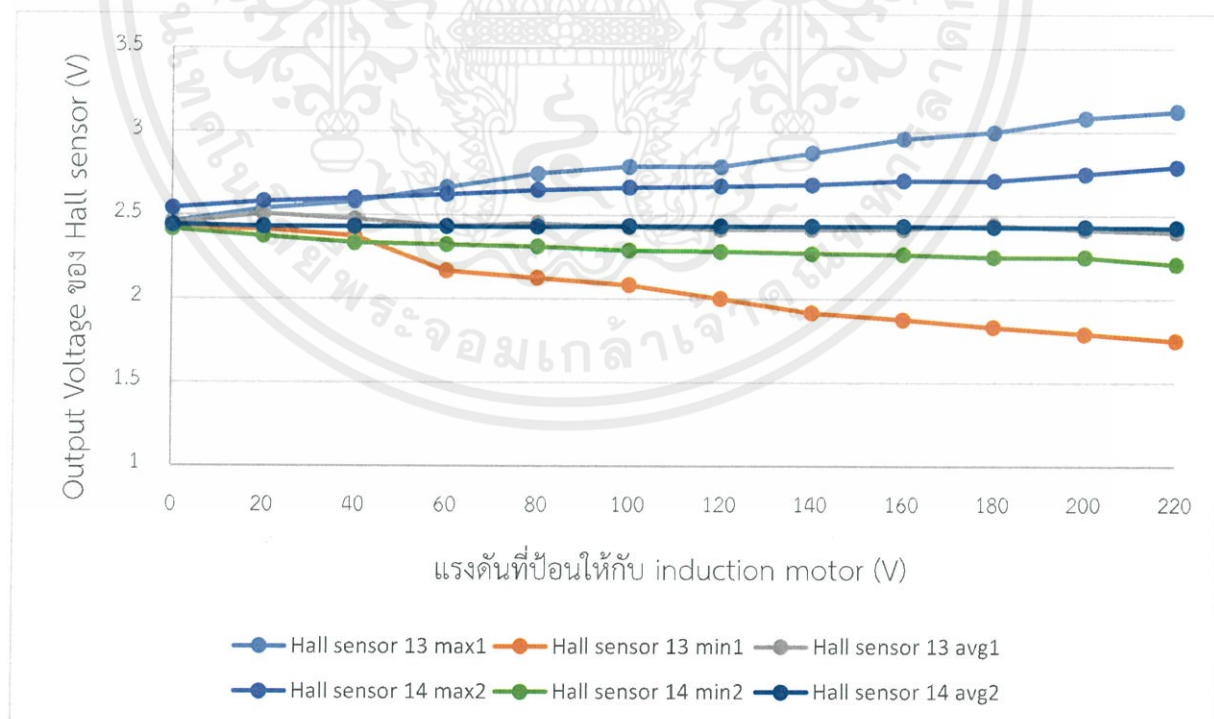
Hall sensor 11				Hall sensor 12			
Voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.45833	2.29167	2.40251	0	2.46833	2.29383	2.39968
20	2.54167	2.29167	2.40365	20	2.54167	2.25	2.40346
40	2.54167	2.29167	2.40452	40	2.54167	2.25	2.40485
60	2.54167	2.25	2.40426	60	2.58333	2.20833	2.40425
80	2.58333	2.25	2.40647	80	2.625	2.20833	2.40327
100	2.625	2.20833	2.40822	100	2.625	2.16667	2.40238
120	2.625	2.16667	2.40743	120	2.70833	2.125	2.4014
140	2.66667	2.16667	2.41008	140	2.70833	2.08333	2.40275
160	2.66667	2.125	2.41147	160	2.79167	2.04167	2.40498
180	2.70833	2.125	2.41034	180	2.79167	2	2.3985
200	2.75	2.08333	2.40996	200	2.875	1.91667	2.39453
220	2.83333	2	2.41285	220	2.91667	1.875	2.39131



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 11 และ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

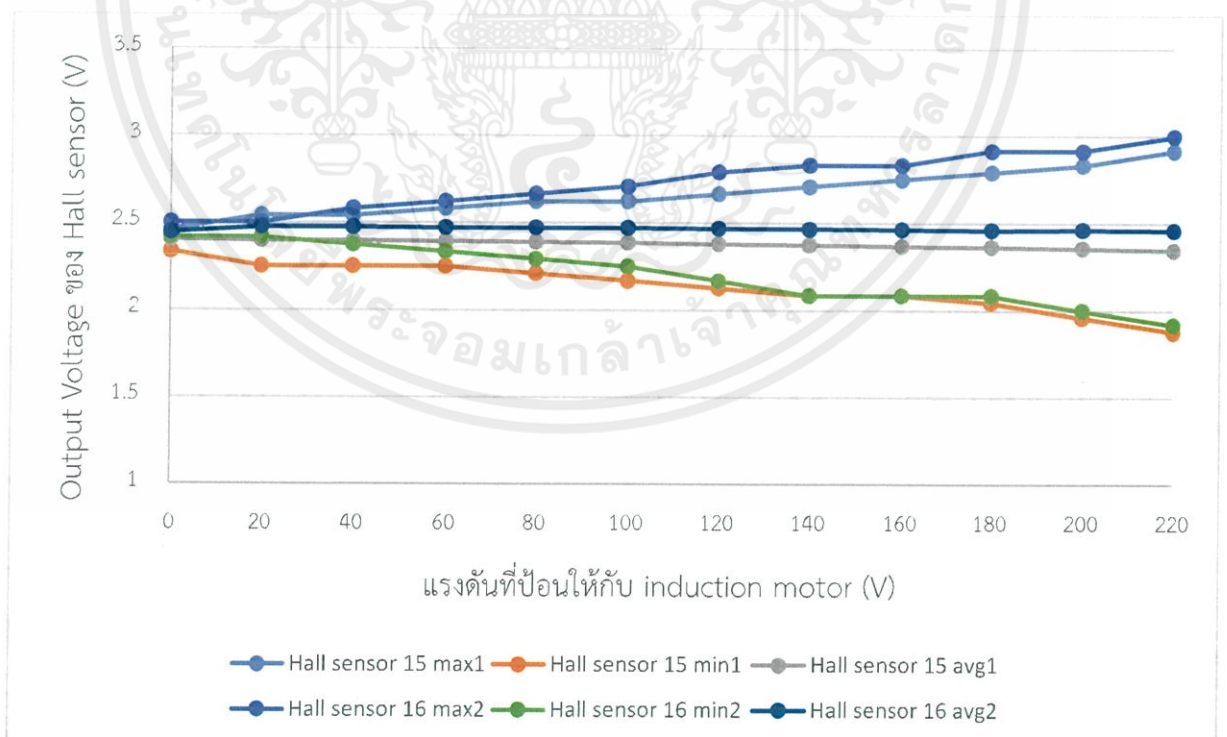
Hall sensor 13				Hall sensor 14			
voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.45833	2.41667	2.45	0	2.54167	2.41667	2.44167
20	2.54167	2.41667	2.50884	20	2.58333	2.375	2.4325
40	2.58333	2.375	2.47619	40	2.6	2.33333	2.43143
60	2.66667	2.16667	2.43628	60	2.625	2.32333	2.43333
80	2.75	2.125	2.45061	80	2.65	2.31333	2.43143
100	2.79167	2.08333	2.42989	100	2.66667	2.29167	2.43676
120	2.79167	2	2.41538	120	2.67667	2.28333	2.4345
140	2.875	1.91667	2.41671	140	2.68333	2.27167	2.43757
160	2.95833	1.875	2.41893	160	2.70833	2.26667	2.43547
180	3	1.83333	2.44246	180	2.70833	2.25	2.43286
200	3.08333	1.79167	2.41603	200	2.75	2.25	2.43191
220	3.125	1.75	2.40136	220	2.79167	2.20833	2.42784



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 13 และ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

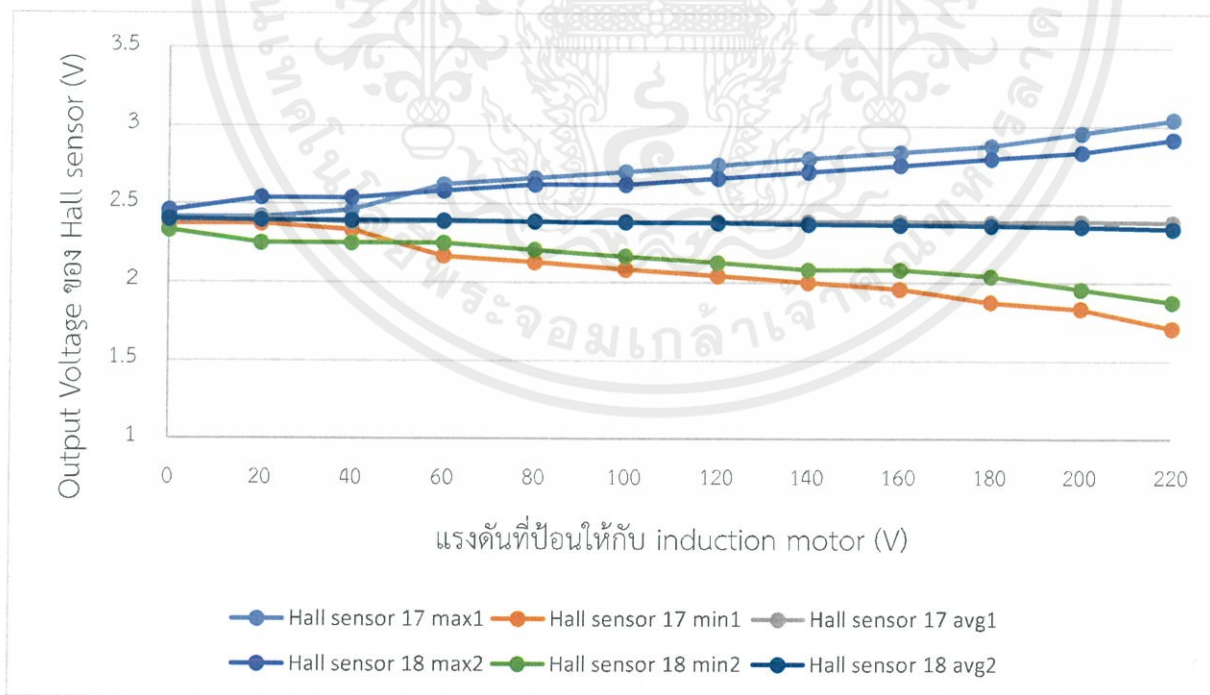
Hall sensor 15				Hall sensor 16			
voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.45833	2.33333	2.40403	0	2.5	2.41667	2.44473
20	2.54167	2.25	2.3978	20	2.5	2.41667	2.4759
40	2.54167	2.25	2.39496	40	2.58333	2.375	2.47423
60	2.58333	2.25	2.3928	60	2.625	2.33333	2.47192
80	2.625	2.20833	2.38874	80	2.66667	2.29167	2.47209
100	2.625	2.16667	2.38512	100	2.708333	2.25	2.47149
120	2.66667	2.125	2.38058	120	2.79167	2.16667	2.46976
140	2.70833	2.08333	2.3749	140	2.83333	2.08333	2.46585
160	2.75	2.08333	2.37007	160	2.83333	2.08333	2.46416
180	2.79167	2.04167	2.36553	180	2.91667	2.08333	2.46205
200	2.83333	1.95833	2.35911	200	2.91667	2	2.46335
220	2.91667	1.875	2.34516	220	3	1.91667	2.45906



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 15 และ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hall sensor 17				Hall sensor 18			
voltage	max1	min1	avg1	voltage	max2	min2	avg2
0	2.41667	2.375	2.39236	0	2.45833	2.33333	2.40403
20	2.41667	2.375	2.40625	20	2.54167	2.25	2.3978
40	2.45833	2.33333	2.38426	40	2.54167	2.25	2.39496
60	2.625	2.16667	2.38737	60	2.58333	2.25	2.3928
80	2.66667	2.125	2.38607	80	2.625	2.20833	2.38874
100	2.70833	2.08333	2.38802	100	2.625	2.16667	2.38512
120	2.75	2.04167	2.38941	120	2.66667	2.125	2.38058
140	2.79167	2	2.39145	140	2.70833	2.08333	2.3749
160	2.83333	1.95833	2.3912	160	2.75	2.08333	2.37007
180	2.875	1.875	2.38657	180	2.79167	2.04167	2.36553
200	2.95833	1.83333	2.38993	200	2.83333	1.95833	2.35911
220	3.04167	1.70833	2.38613	220	2.91667	1.875	2.34516



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Input Voltage กับ Output Voltage ของ Hall sensor ตัวที่ 17 และ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

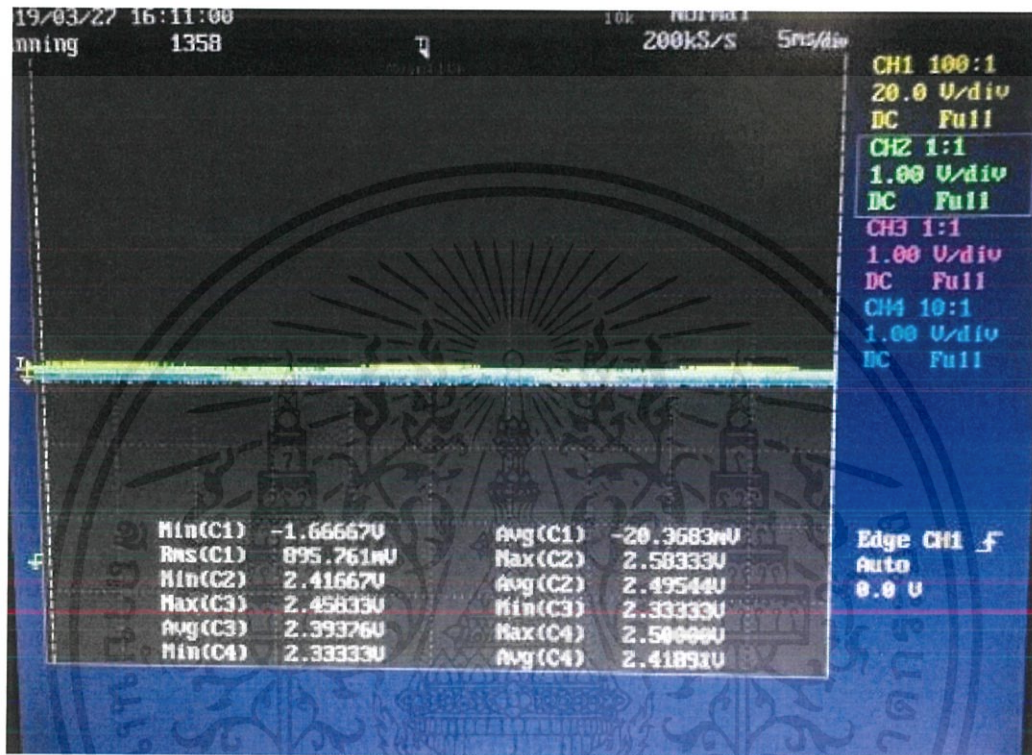
ผลการทดลองที่ 4.5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลด ทำให้สามารถแสดงได้ว่า ฮอลล์เซ็นเซอร์แต่ละตัวมีผลต่างระหว่างมุมเป็นอย่างไร ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5.2

ตารางที่ 4.5.2 แสดงผลต่างระหว่างมุมของ Hall sensor แต่ละตัว เทียบกับแรงดันที่เฟส a

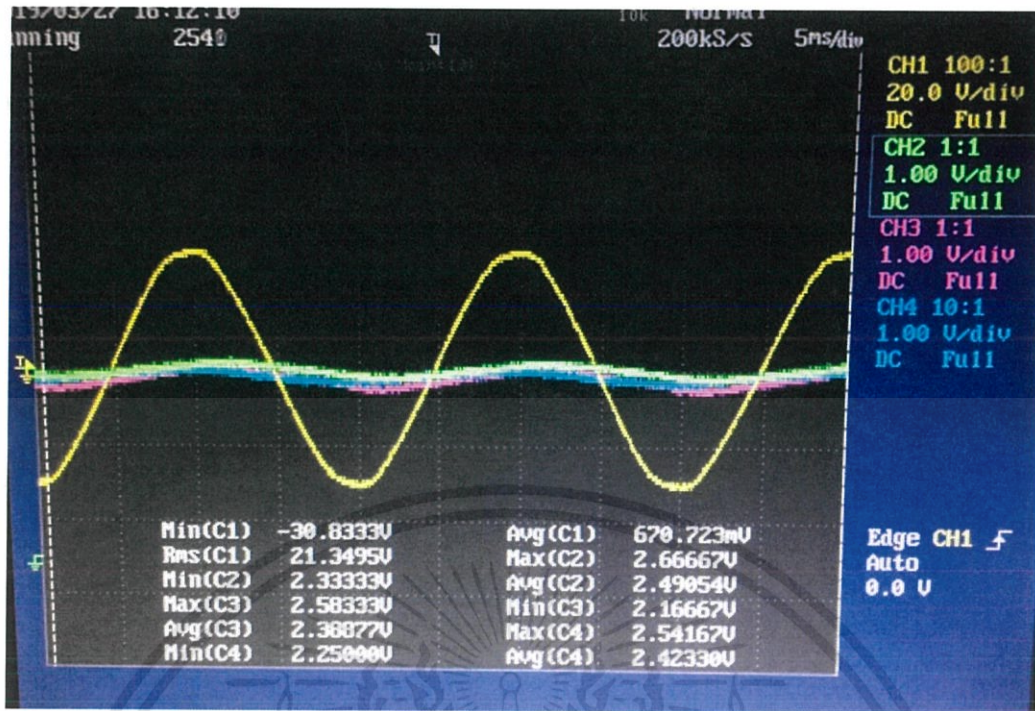
Hall sensor	Delta cursor (ms)	มุมเริ่มต้นเทียบกับแรงดันเฟส a (องศา)	ผลต่างมุมของ Hall sensor แต่ละตัว (องศา)
1	4.9	88.2	-
2	5.75	103.5	15.3
3	6.95	125.1	21.6
4	8.25	148.5	23.4
5	9.505	171.09	22.59
6	10.355	186.39	15.3
7	11.055	198.99	12.6
8	12.155	218.79	19.8
9	12.855	231.39	12.6
10	13.515	243.27	11.88
11	14.515	261.27	18
12	15.565	280.17	18.9
13	16.765	301.77	21.6
14	18.015	324.27	22.5
15	19.325	347.85	23.58
16	20.695	372.51	24.66
17	22.195	399.51	27
18	23.695	426.51	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

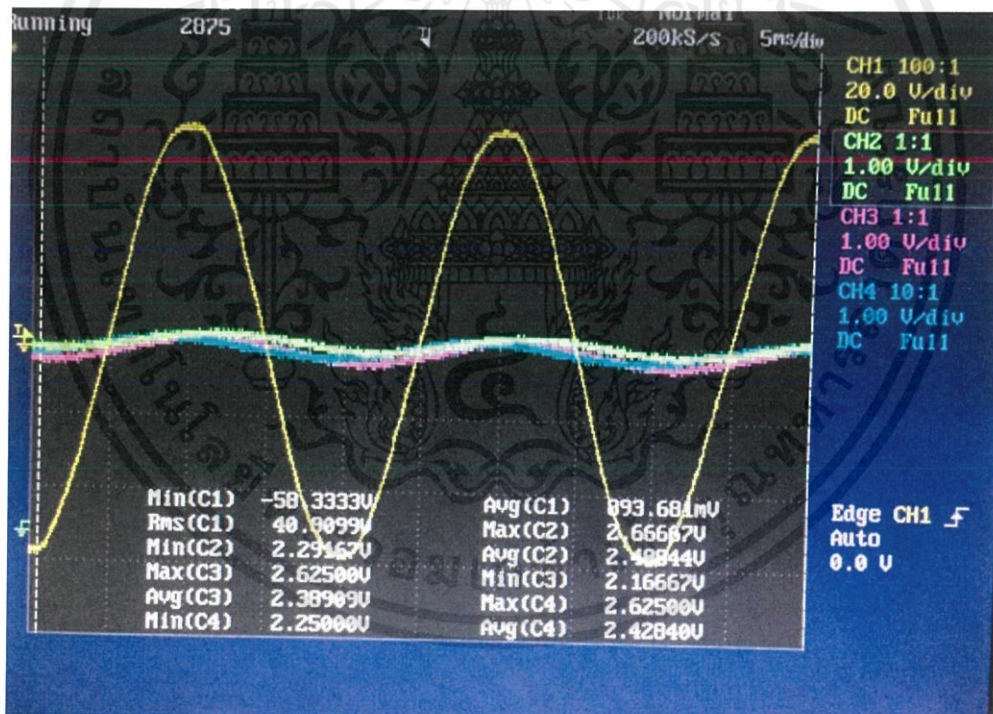
การทดลองที่ 4.5 พฏิกกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลด โดยทำการป้อนที่ละ 20 V จนถึง 220 V วัดค่าแรงดันฮอลล์เซ็นเซอร์แต่ละตัวที่ได้จากออสซิลโลสโคปทั้งหมด 18 ตัว ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.29 – 4.40 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวการป้อนคือค่าใน Ch.1 ค่าแรงดันที่วัดได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 คือค่าใน Ch.2 ตัวที่ 2 คือค่าใน Ch.3 และตัวที่ 3 คือค่าใน Ch.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 0 Volt

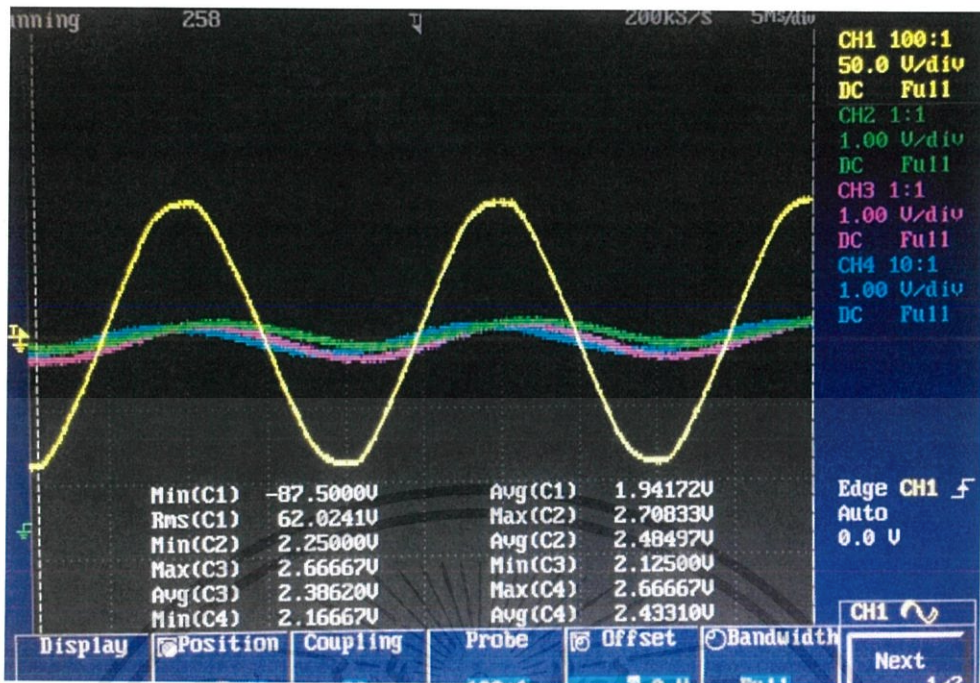


รูปที่ 4.30 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 20 Volt

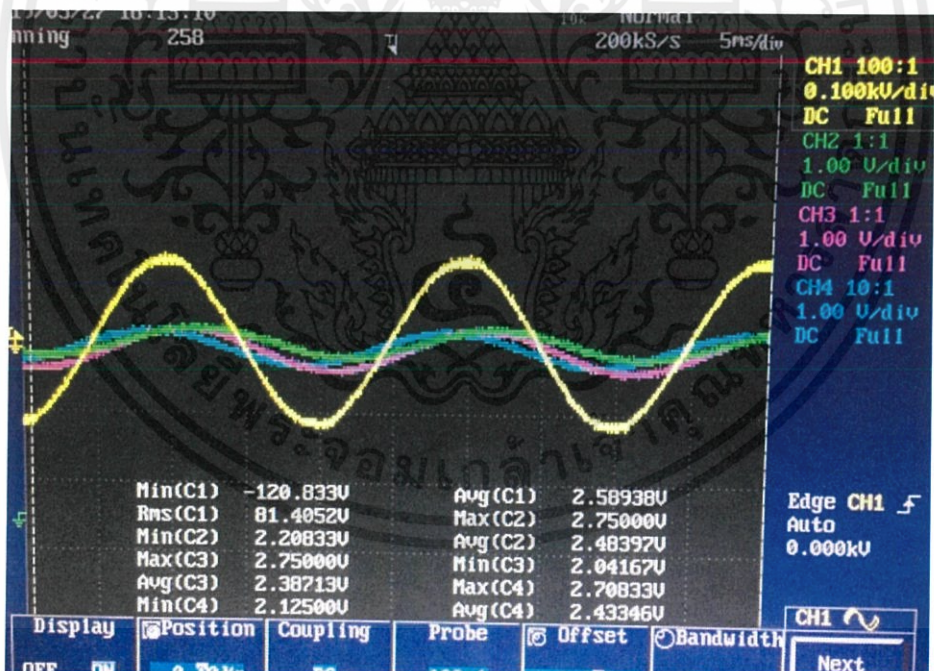


รูปที่ 4.31 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 40 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

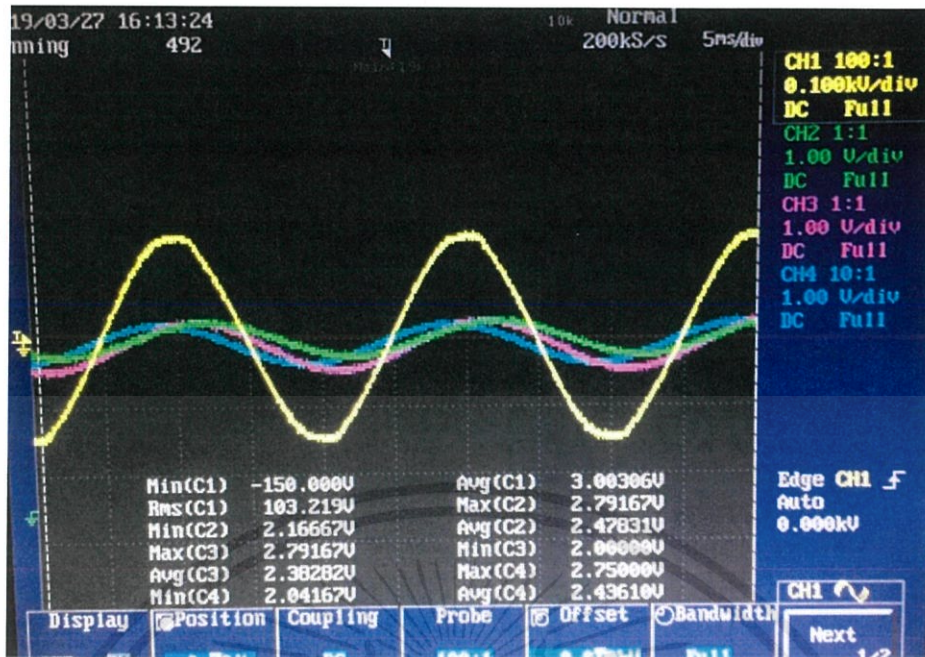


รูปที่ 4.32 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 60 Volt

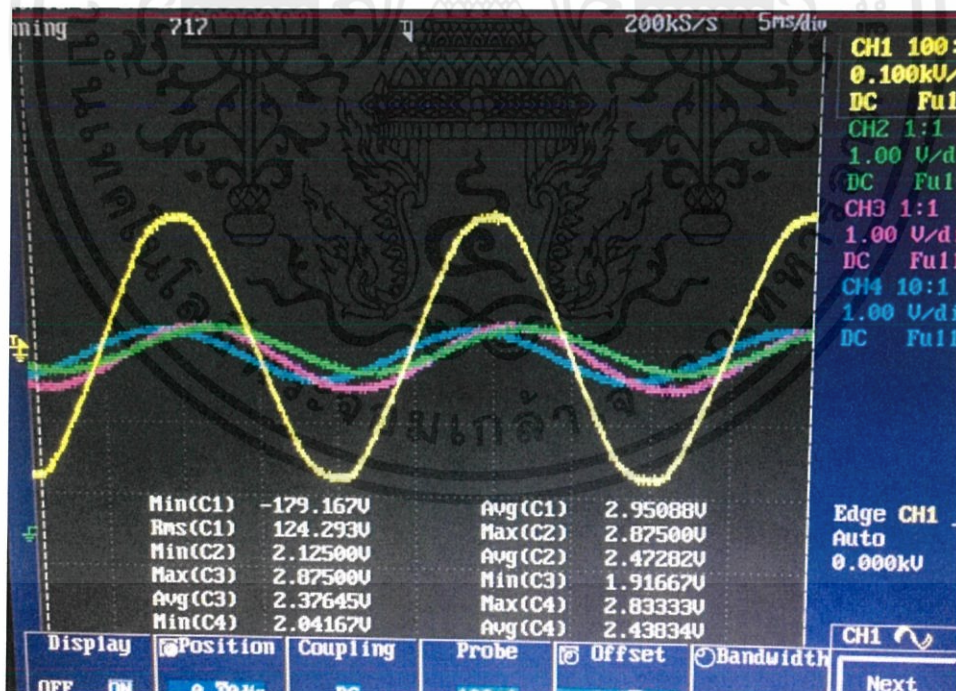


รูปที่ 4.33 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 80 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

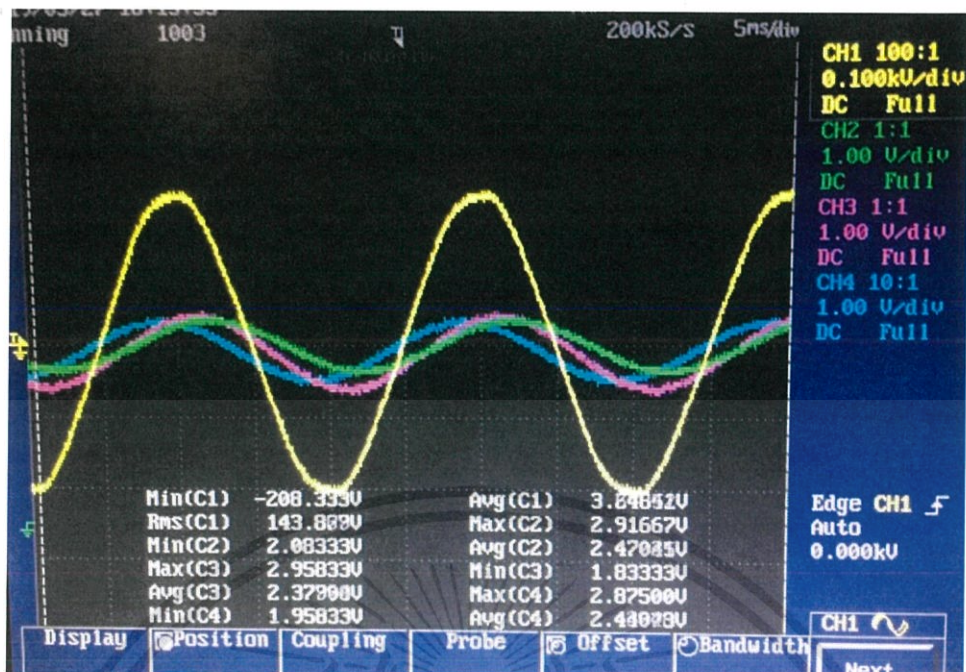


รูปที่ 4.34 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 100 Volt

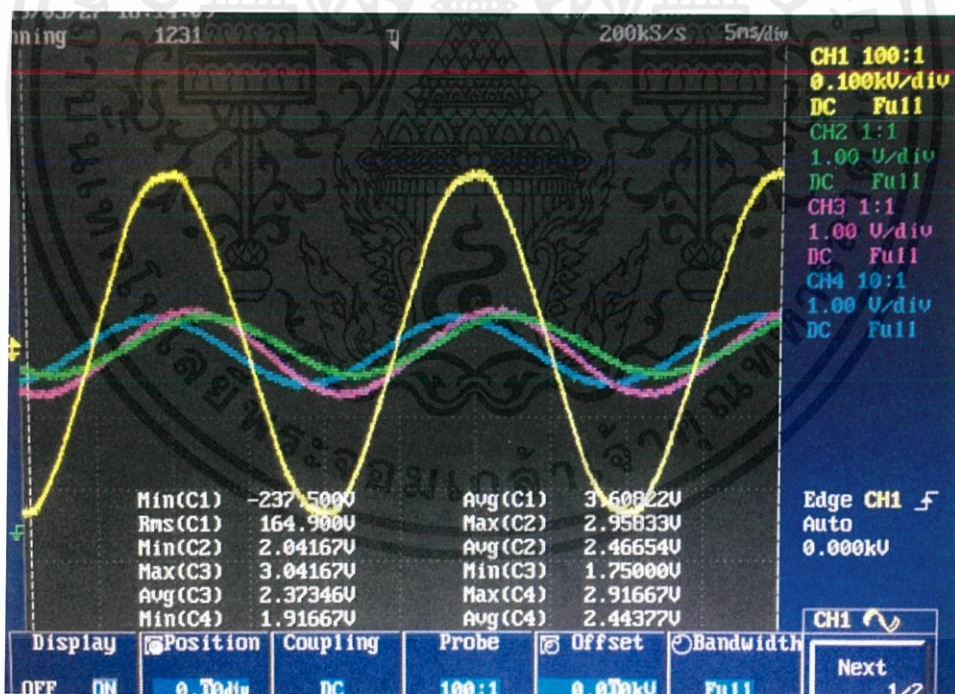


รูปที่ 4.35 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 120 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

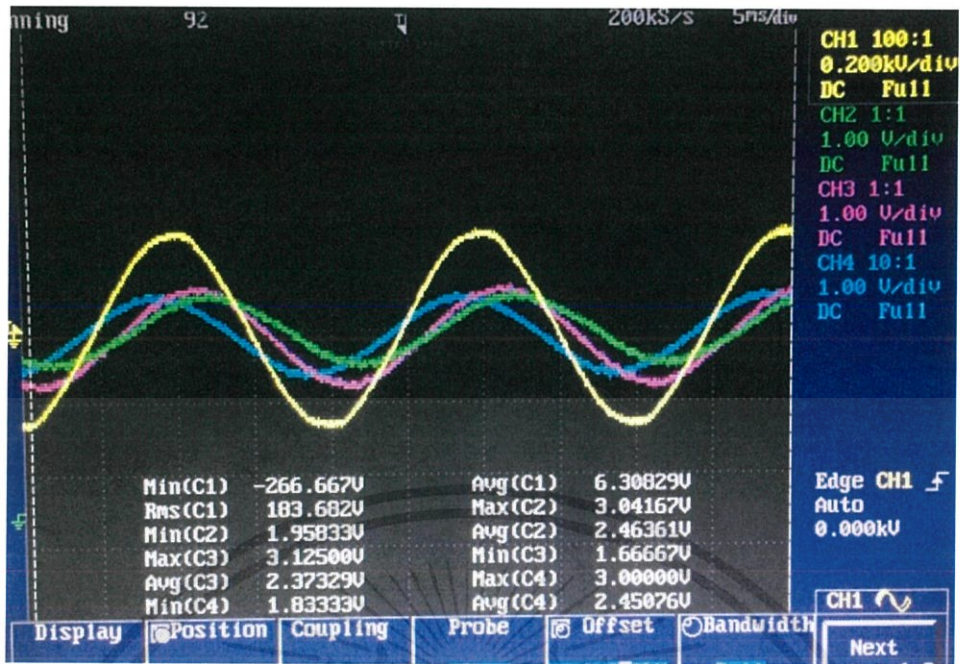


รูปที่ 4.36 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 140 Volt

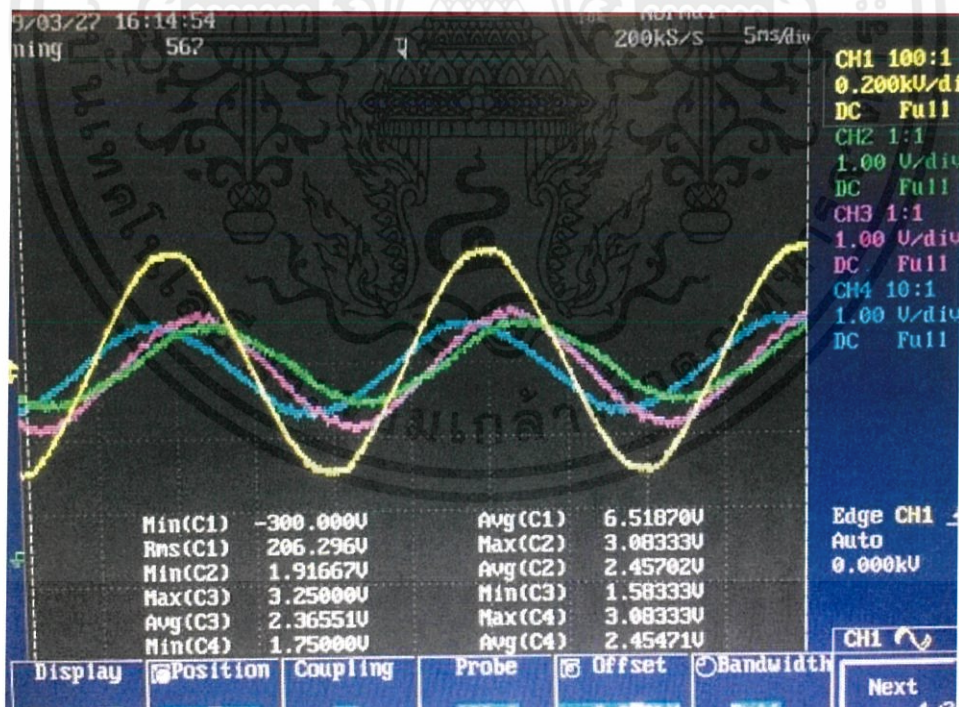


รูปที่ 4.37 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 160 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

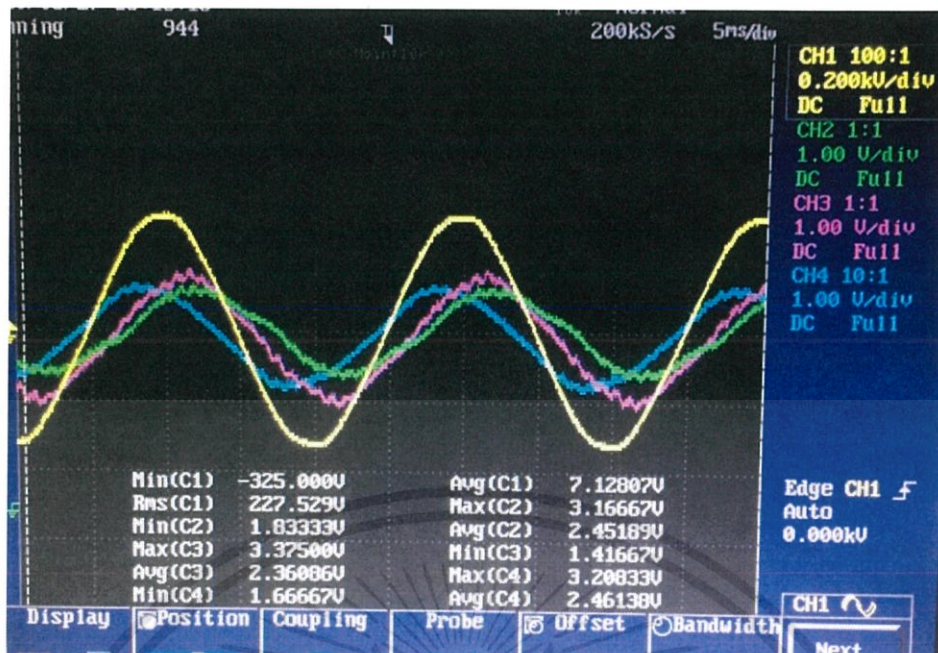


รูปที่ 4.38 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 180 Volt



รูปที่ 4.39 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 200 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 Hall sensor ตัวที่ 1-3 ที่ 220 Volt

#### อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 4.5 จากการศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor 18 ตัว ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลด โดยค่าแรงดัน output เริ่มต้นของ Hall sensor มีค่าอยู่ระหว่าง 2.3-2.5 โวลต์ จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันขึ้นทีละ 20 โวลต์จนถึงแรงดันพิกัดที่ 220 โวลต์ พบว่า hall sensor ทั้ง 18 ตัว มีกราฟของแรงดัน output เป็นรูป sinusoidal มีค่า max เพิ่มขึ้น ค่า min ลดลง แบบเป็นเชิงเส้น และมีค่าใกล้เคียงกันที่ 18 ตัว ซึ่งทำให้เห็นว่าตำแหน่งของ hall sensor ที่ทำการติดตั้งไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดลงของค่าแรงดัน output ของ Hall sensor แต่ตำแหน่งของ hall sensor มีผลต่อมุมของแรงดัน output เมื่อเทียบกับแรงดันที่เฟส a โดยจากการทดลองพบว่าค่าแรงดัน output ของ hall sensor ตัวที่ 1 ชีฟเฟส กับ แรงดันที่เฟส a 90 องศา และผลต่างของมุมระหว่าง hall sensor แต่ละตัวมีค่า 11.88-27 องศา

**ผลการทดลองที่ 4.5** การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งผลที่ได้ไปตามตารางที่ 4.5.2 ,4.5.3 และ 4.5.4

**ตารางที่ 4.5.3** การทดสอบหา Hall sensor ณ สภาวะมี load ที่แรงดัน 220 โวลต์

Hall sensor 1				Hall sensor 2			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3.16667	1.83333	2.45055	0	3.375	1.45833	2.38317
25	3.25	1.70833	2.44838	25	3.54167	1.25	2.37881
50	3.375	1.625	2.44881	50	3.66667	1.08333	2.38141
75	3.45833	1.5	2.44783	75	3.875	0.95833	2.37629
100	3.54167	1.45833	2.44575	100	4	0.875	2.37499

Hall sensor 3				Hall sensor 4			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3.0	1.93333	2.44045	0	3.16667	1.625	2.39397
25	3.04833	1.87534	2.43828	25	3.25	1.5	2.38871
50	3.08333	1.83333	2.43801	50	3.33879	1.45833	2.39151
75	3.16667	1.70833	2.43703	75	3.45833	1.25	2.38649
100	3.25	1.625	2.43545	100	3.66667	1.0833	2.38439

Hall sensor 5				Hall sensor 6			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3.25	1.875	2.5648	0	2.66667	2.25	2.47184
25	3.25	1.875	2.55786	25	2.70833	2.25	2.46299
50	3.29167	1.875	2.5638	50	2.70833	2.20833	2.467
75	3.33333	1.79167	2.56102	75	2.75	2.20833	2.46804
100	3.375	1.70833	2.55835	100	2.75	2.16667	2.45785

Hall sensor 7				Hall sensor 8			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3.45833	1.375	2.53463	0	2.95833	1.875	2.47191
25	3.625	1.25	2.55501	25	3	1.83333	2.47687
50	3.75	1.08333	2.57055	50	3.04167	1.79167	2.4805
75	3.875	0.95833	2.58428	75	3.08333	1.79167	2.4844
100	4.04167	0.91667	2.60004	100	3.08333	1.75	2.48852

Hall sensor 9				Hall sensor 10			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3.04167	1.91667	2.48375	0	3.04167	1.75	2.4204
25	3.04167	1.875	2.47757	25	3.08333	1.66667	2.42011
50	3.08333	1.875	2.48177	50	3.125	1.625	2.41853
75	3.08333	1.875	2.48005	75	3.20833	1.54167	2.42348
100	3.125	1.83333	2.48058	100	3.29167	1.5	2.42294

Hall sensor 11				Hall sensor 12			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	2.79167	2	2.41773	0	2.91667	1.875	2.38728
25	2.875	1.95833	2.41939	25	3	1.79167	2.38851
50	2.91667	1.91667	2.41856	50	3.08333	1.70833	2.38668
75	2.95833	1.83333	2.42125	75	3.16667	1.625	2.38778
100	3	1.83333	2.41925	100	3.25	1.54167	2.38322

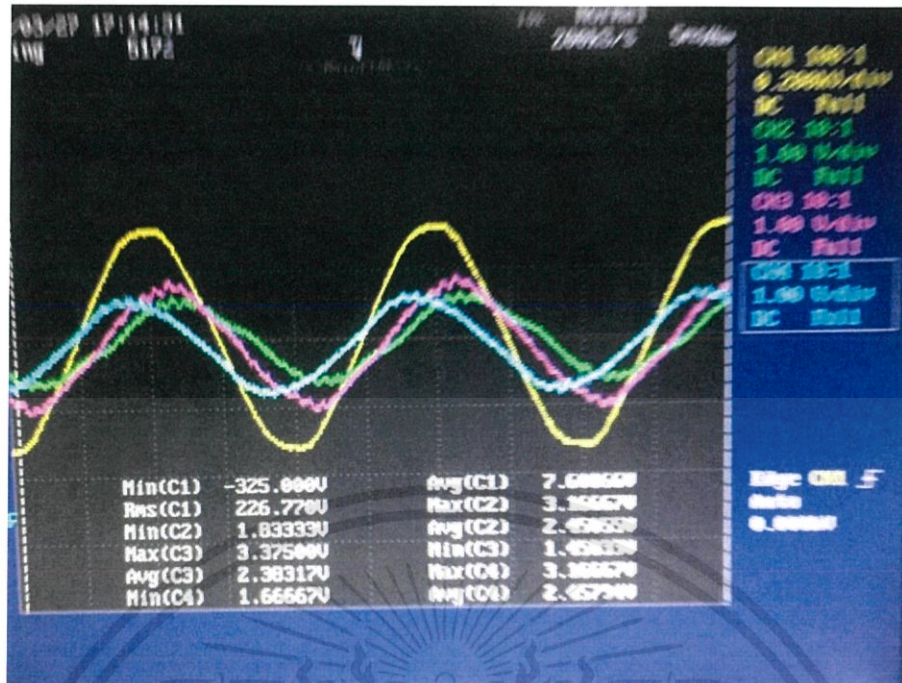
Hall sensor 13				Hall sensor 14			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	2.79167	2.16667	2.46142	0	2.79833	2.20833	2.43821
25	2.83333	2.125	2.4581	25	2.79833	2.16667	2.43716
50	2.83333	2.125	2.45381	50	2.83333	2.16667	2.43386
75	2.875	2.08333	2.45147	75	2.83333	2.16667	2.43217
100	2.91667	2.04167	2.45002	100	2.875	2.125	2.43104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

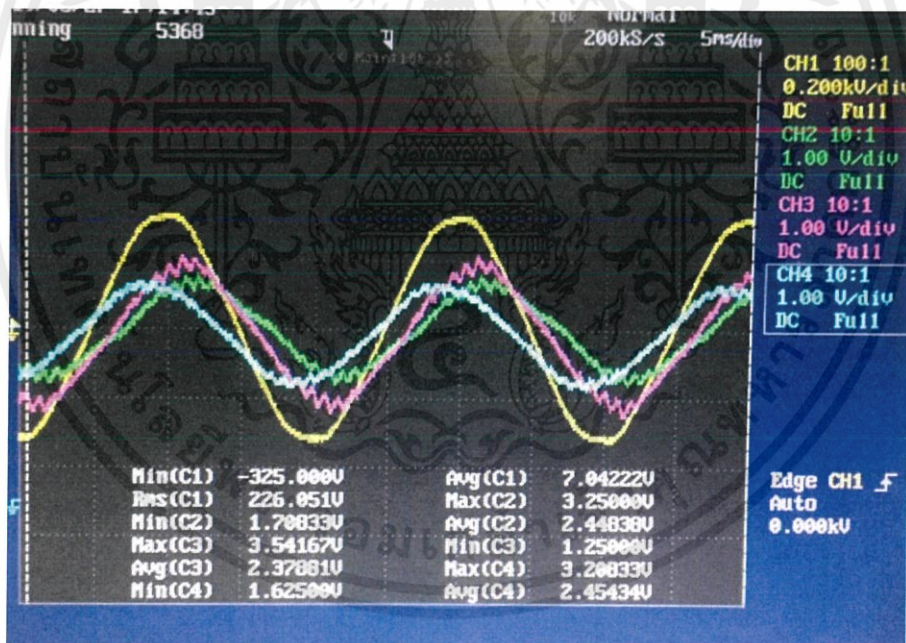
Hall sensor 15				Hall sensor 16			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	2.66667	2.0833	2.40352	0	2.95833	1.875	2.46176
25	2.625	2.20833	2.40601	25	3	1.83333	2.46439
50	2.625	2.20833	2.40776	50	3.04167	1.75	2.46803
75	2.625	2.08333	2.40918	75	3.125	1.66667	2.46312
100	2.625	2.25	2.41107	100	3.20833	1.625	2.46473

Hall sensor 17				Hall sensor 18			
%load	max1	min1	avg1	%load	max2	min2	avg2
0	3	1.75	2.35837	0	3.04167	1.91667	2.46682
25	3.04167	1.66667	2.35896	25	3.08333	1.91667	2.46848
50	3.08333	1.66667	2.36073	50	3.125	1.875	2.46803
75	3.08333	1.66667	2.35908	75	3.125	1.83333	2.4669
100	3.125	1.58333	2.32896	100	3.125	1.75	2.46462

ผลการทดลองที่ 4.5 การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งผลเป็นทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.41-4.50 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวการป้อนคือค่าใน Ch.1 ค่าแรงดันที่วัดได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 คือค่าใน Ch.2 ตัวที่ 2 คือค่าใน Ch.3 และตัวที่ 3 คือค่าใน Ch.4 ตามลำดับ

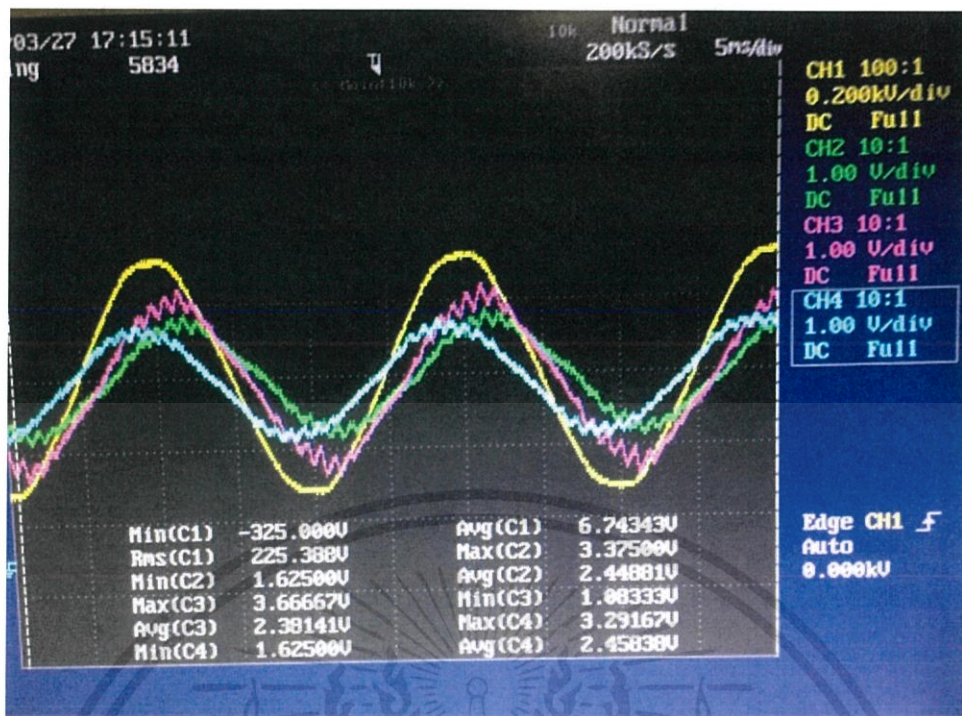


รูปที่ 4.41 0% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์

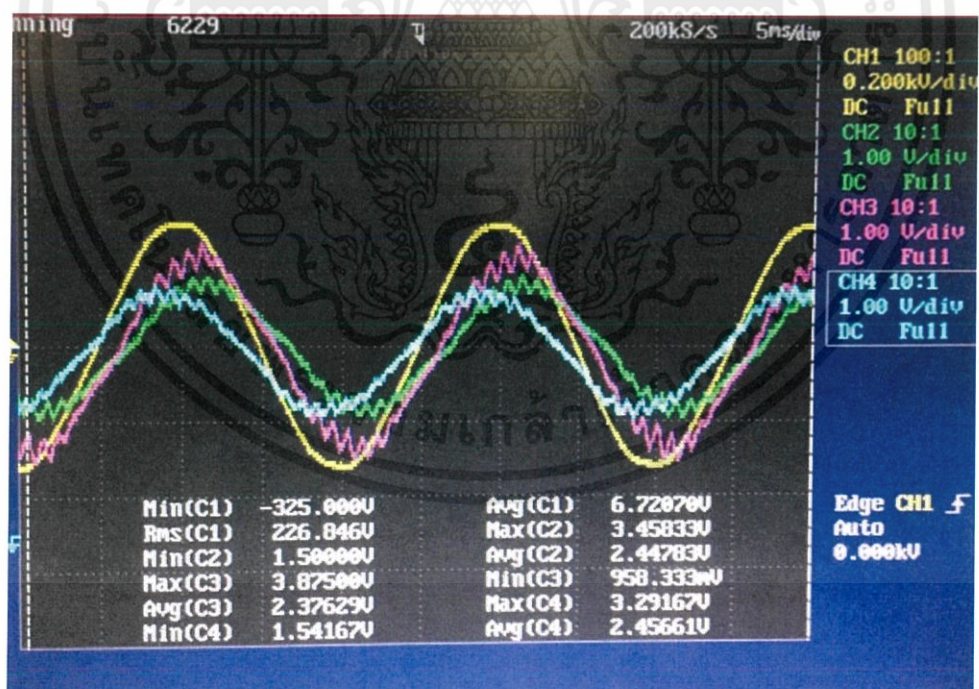


รูปที่ 4.42 25% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

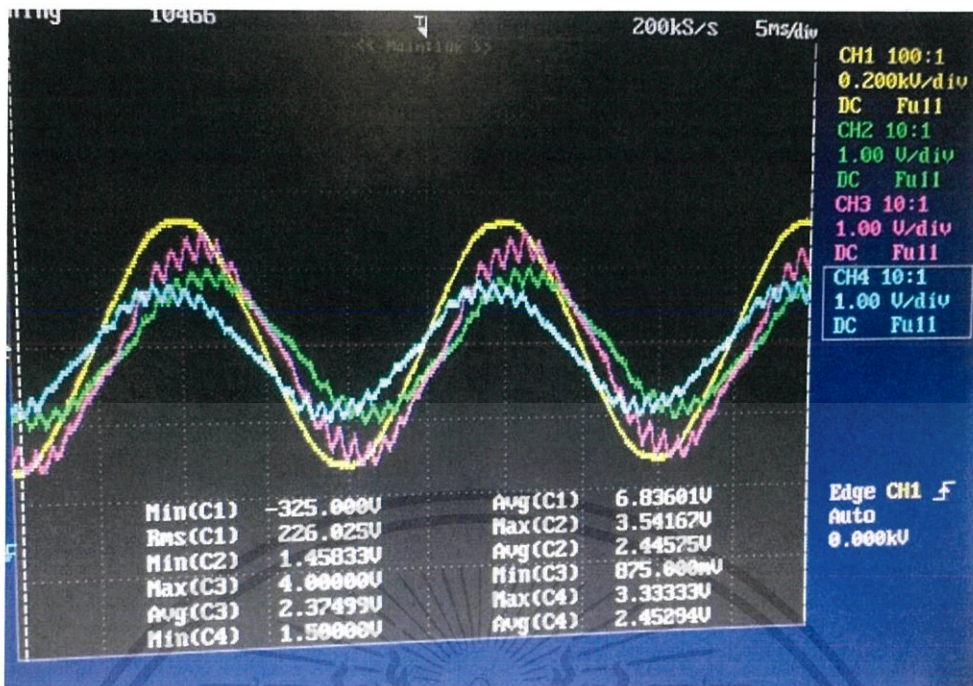


รูปที่ 4.43 50% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์

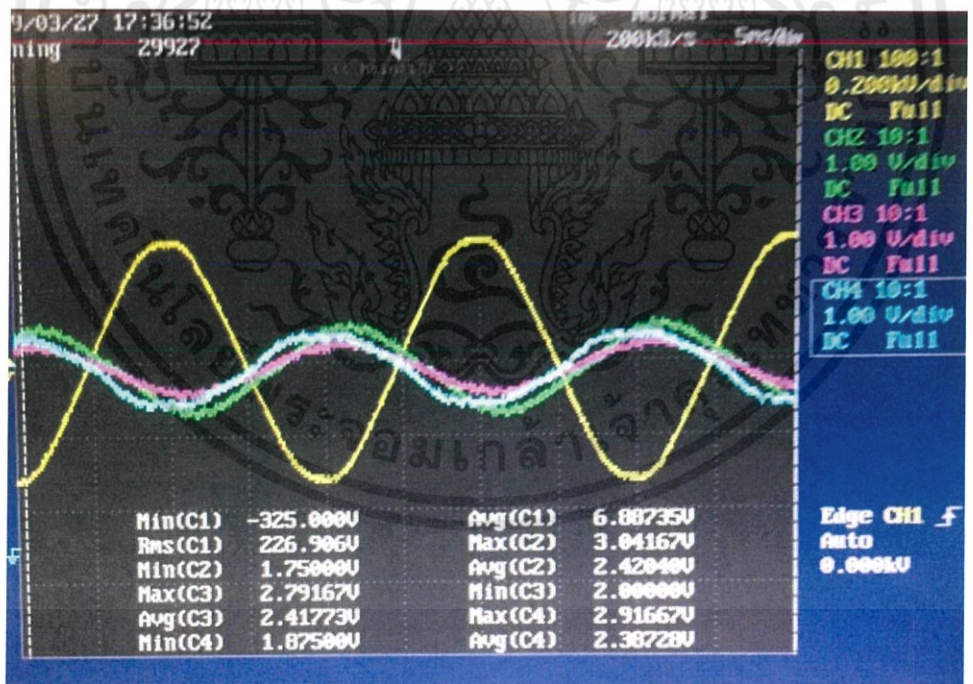


รูปที่ 4.44 75% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

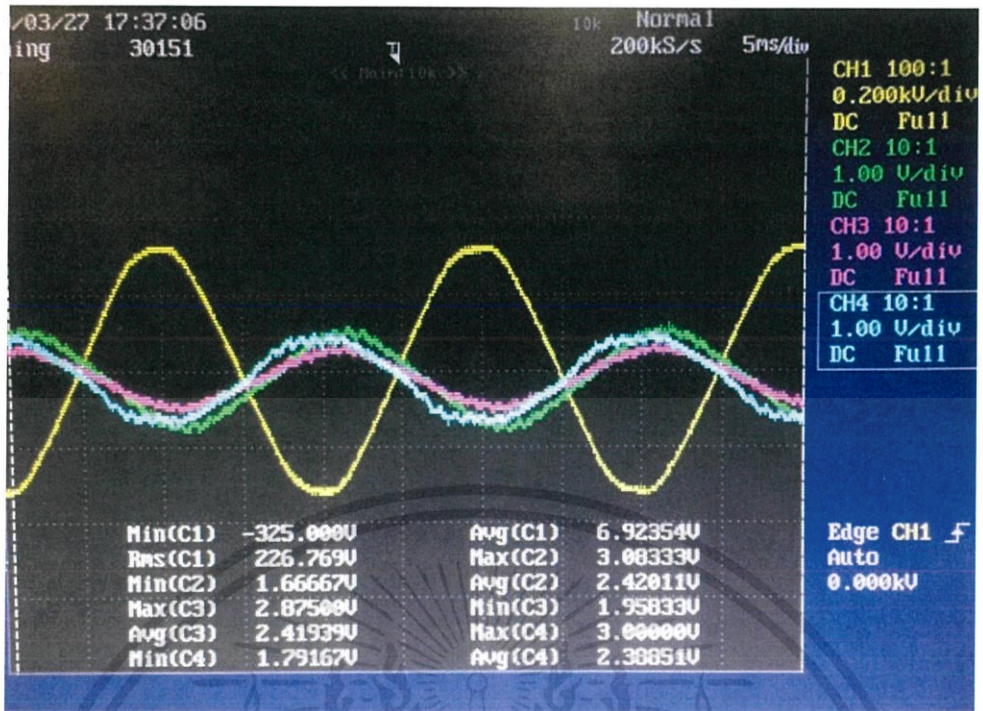


รูปที่ 4.45 100% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 1,2 และ 3 ที่แรงดัน 220 โวลต์

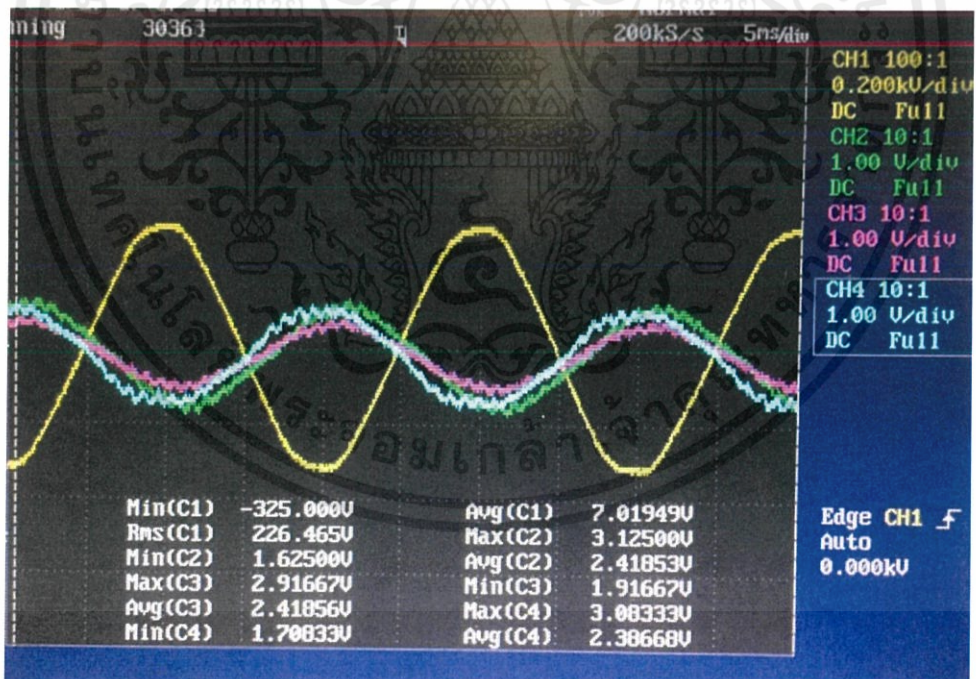


รูปที่ 4.46 0% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

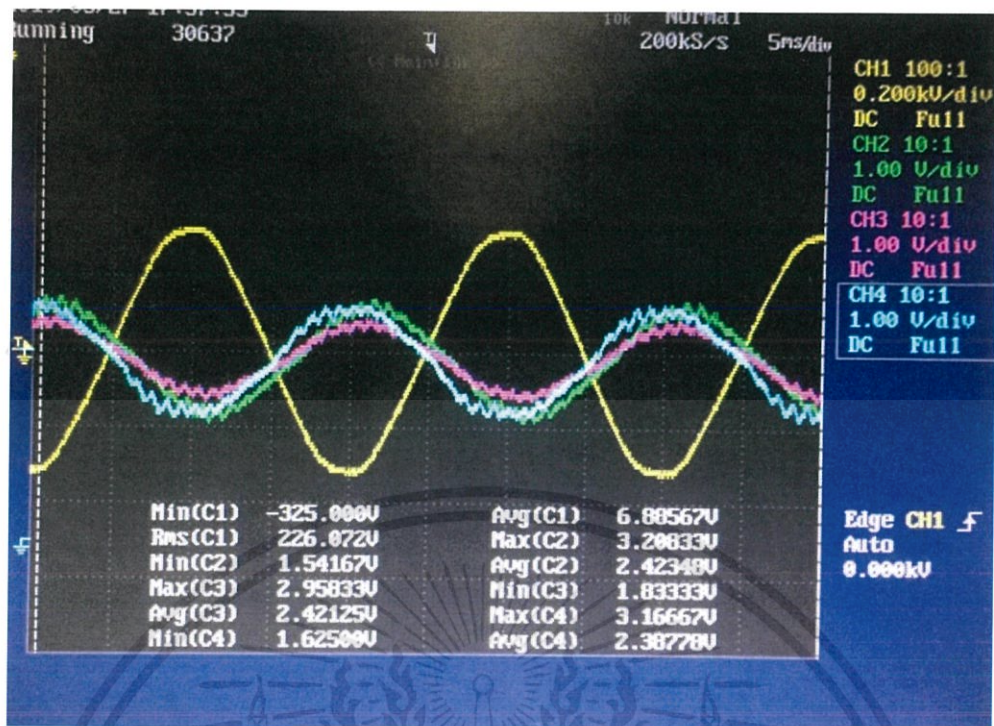


รูปที่ 4.47 25% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์

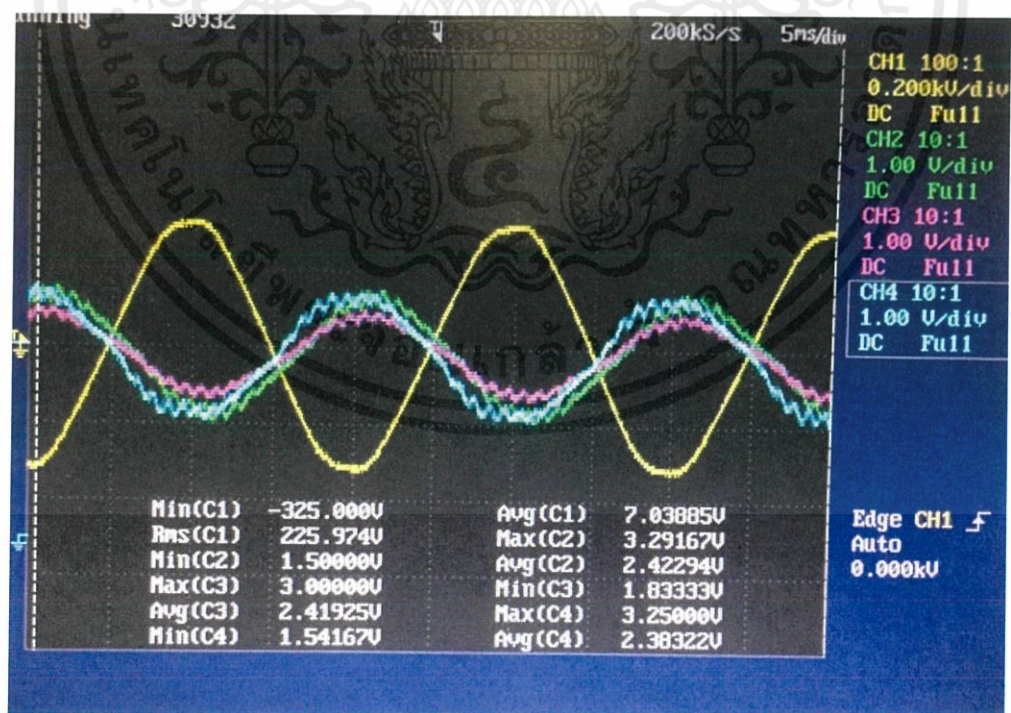


รูปที่ 4.48 50% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 75% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์



รูปที่ 4.50 100% ของ load ของ Hall sensor ตัวที่ 10,11 และ 12 ที่แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5.4 การทดสอบหาค่ามุม Hall sensor ณ สภาวะมี load

hall sensor	มุม no-load (องศา)	มุม25%load (องศา)	มุม 50%load (องศา)	มุม75%load (องศา)	มุม100%load (องศา)
1	88.2	90.18	91.98	93.15	94.41
2	103.5	104.58	105.48	106.65	108
3	125.1	126.99	128.79	130.41	132.21
4	148.5	150.48	151.74	153.45	155.25
5	171.09	172.89	175.05	176.49	178.29
6	186.39	188.19	189.45	191.07	192.78
7	198.99	200.07	201.78	203.49	205.11
8	218.79	220.05	222.39	224.01	225.27
9	231.39	233.37	234.99	236.43	238.23
10	243.27	245.07	246.24	247.68	249.39
11	261.27	262.44	263.7	265.68	266.67
12	280.17	281.07	282.33	283.23	284.4
13	301.77	303.57	304.83	306.63	308.16
14	324.27	326.07	327.33	329.13	330.66
15	347.85	349.38	351	352.71	354.42
16	372.51	373.41	375.3	377.19	378.63
17	399.51	400.68	402.21	404.1	405.63
18	426.51	428.31	430.11	431.46	432.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5.5 ผลต่างมุมของ Hall sensor ณ สภาวะมี load

Hall sensor	มุมผลต่าง 25%กับ 0% (องศา)	มุมผลต่าง 50%กับ0% (องศา)	มุมผลต่าง 75%กับ0% (องศา)	มุมผลต่าง 100%กับ0% (องศา)
1	1.98	3.78	4.95	6.21
2	1.08	1.98	3.15	4.5
3	1.89	3.69	5.31	7.11
4	1.98	3.24	4.95	6.75
5	1.8	3.96	5.40	7.2
6	1.8	3.06	4.68	6.39
7	1.08	2.79	4.50	6.12
8	1.26	3.60	5.22	6.48
9	1.98	3.60	5.04	6.84
10	1.8	2.97	4.41	6.12
11	1.17	2.43	4.41	5.4
12	0.9	2.16	3.06	4.23
13	1.8	3.06	4.86	6.39
14	1.8	3.06	4.86	6.39
15	1.53	3.15	4.86	6.57
16	0.9	2.79	4.68	6.12
17	1.17	2.70	4.59	6.12
18	1.8	3.6	4.95	6.12

ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตร pf ของ Rotor

$$\cos \phi = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \text{ โดยค่า } R_2 \text{ และ } X_2 \text{ ได้จากการผลทดลองที่ 4.1 จะได้ว่าค่า}$$

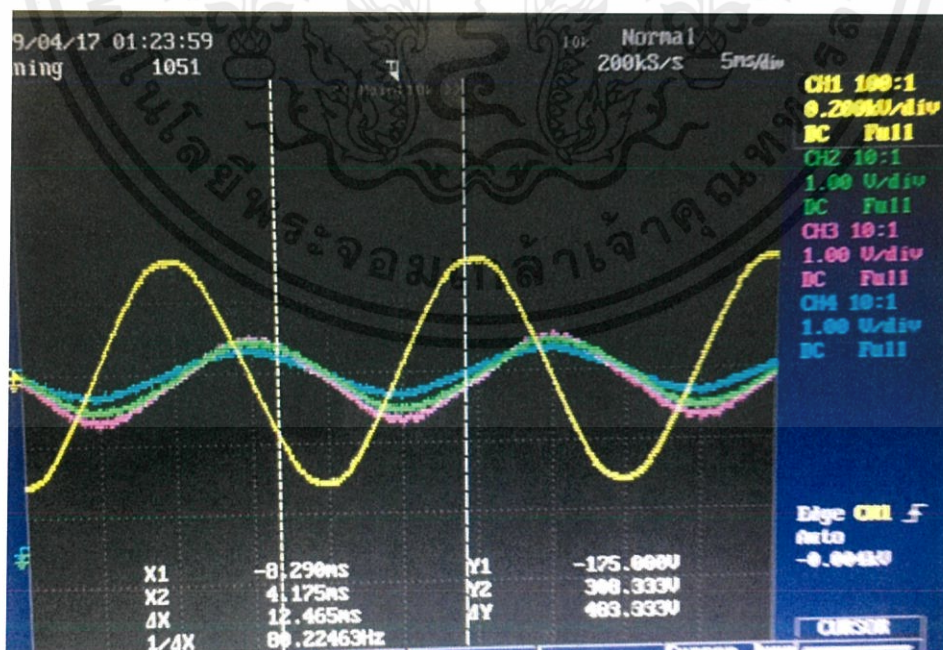
$R_2 = 6.882 \text{ } \Omega$  และค่า  $X_2 = 10.05 \text{ } \Omega$  ผลจากการคำนวณได้ตามตารางที่ 4.5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5.6 แสดงค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มโหลดมากขึ้น

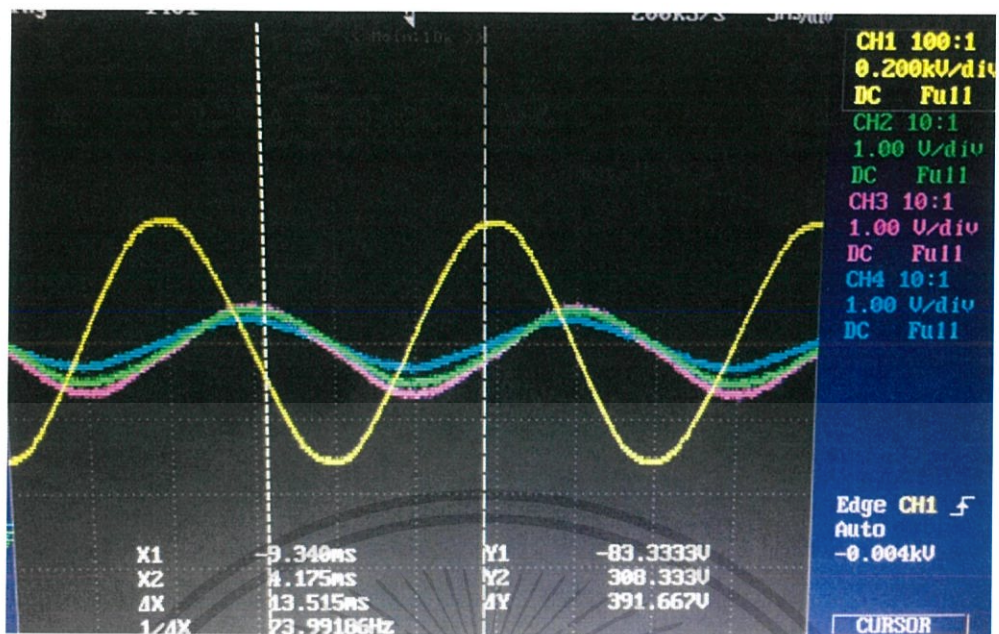
%load	Nr1 (r/min)	Nr2 (r/min)	Nr3 (r/min)	ค่าเฉลี่ย Nr(r/min)	Ns (r/min)	มุมที่เปลี่ยนแปลง เทียบ no-load (องศา)
0	1495	1492	1492	1493	1500	0.39
25	1473	1473	1473	1473	1500	1.51
50	1456	1454	1455	1455	1500	2.51
75	1430	1435	1435	1433.3	1500	3.71
100	1418	1419	1417	1418	1500	4.56

ผลการทดลองที่ 4.5 การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ พบว่ามีมุมระหว่างแรงดันที่ป้อนในกับมอเตอร์กับค่าแรงดันจากฮอลล์เซ็นเซอร์มีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งผลเป็นไปตามรูปที่ 4.51-4.55 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวการป้อนคือค่าใน Ch.1 ค่าแรงดันที่วัดได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ตัวที่ 9 คือค่าใน Ch.2 ตัวที่ 10 คือค่าใน Ch.3 และตัวที่ 11 คือค่าใน Ch.4 ตามลำดับ

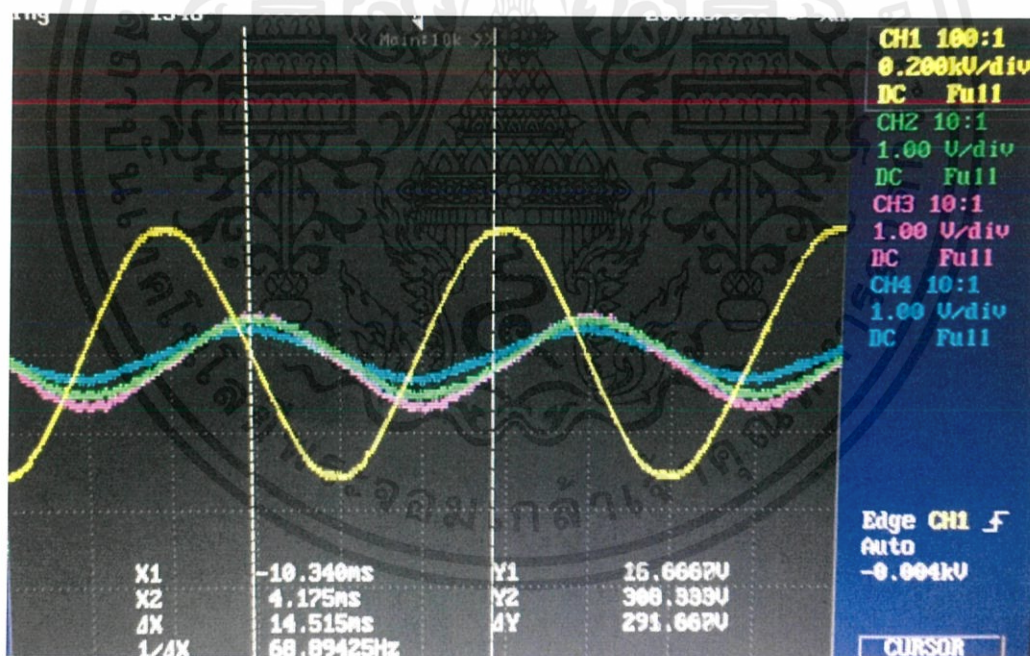


รูปที่ 4.51 Hall sensor ตัวที่ 9 0% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

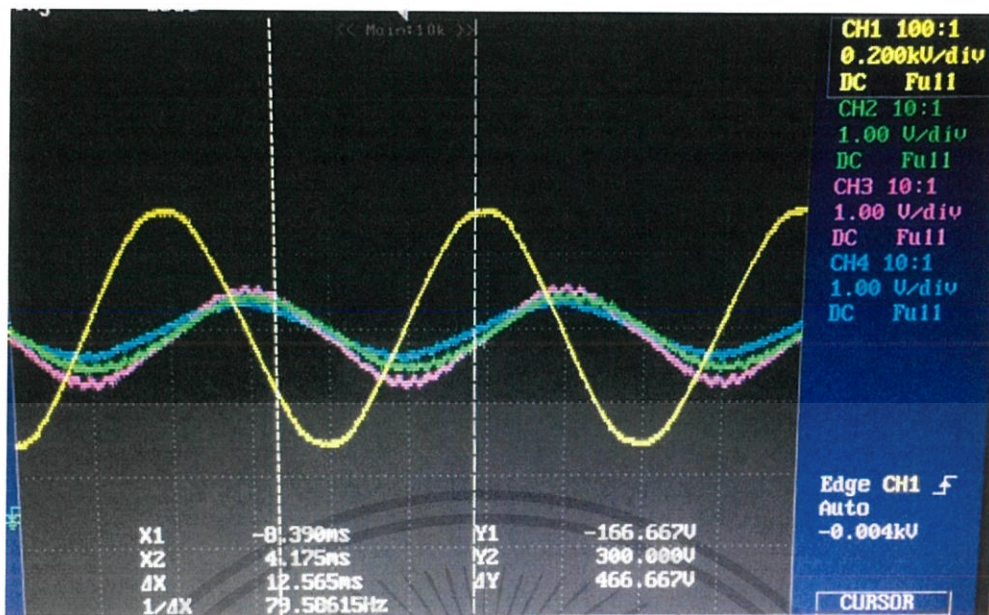


รูปที่ 4.52 Hall sensor ตัวที่ 10 0% ของ load

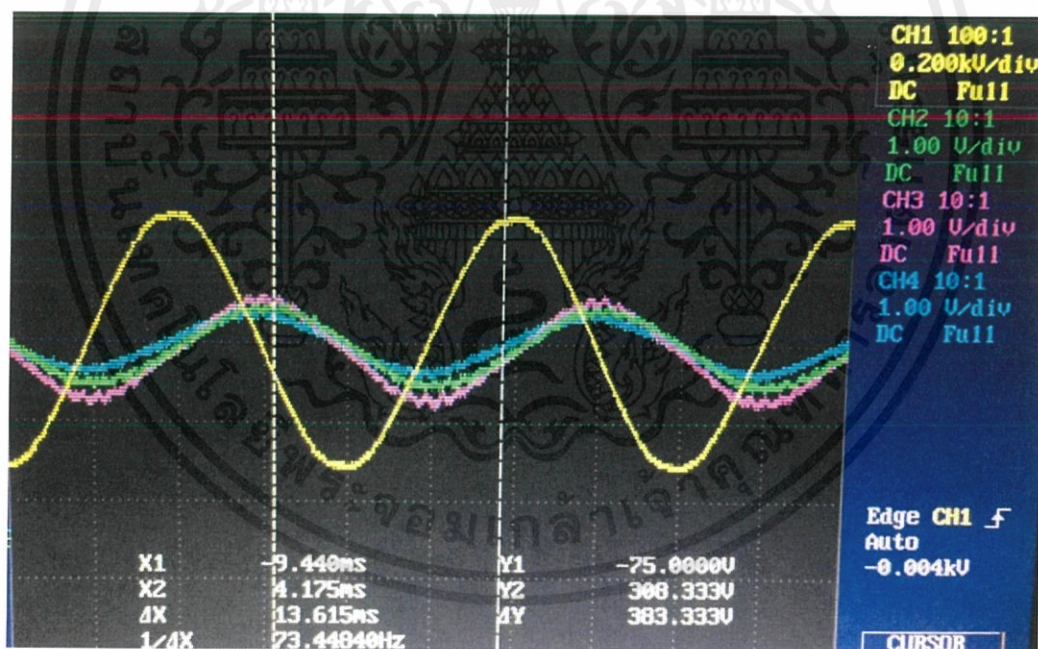


รูปที่ 4.53 Hall sensor ตัวที่ 11 0% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

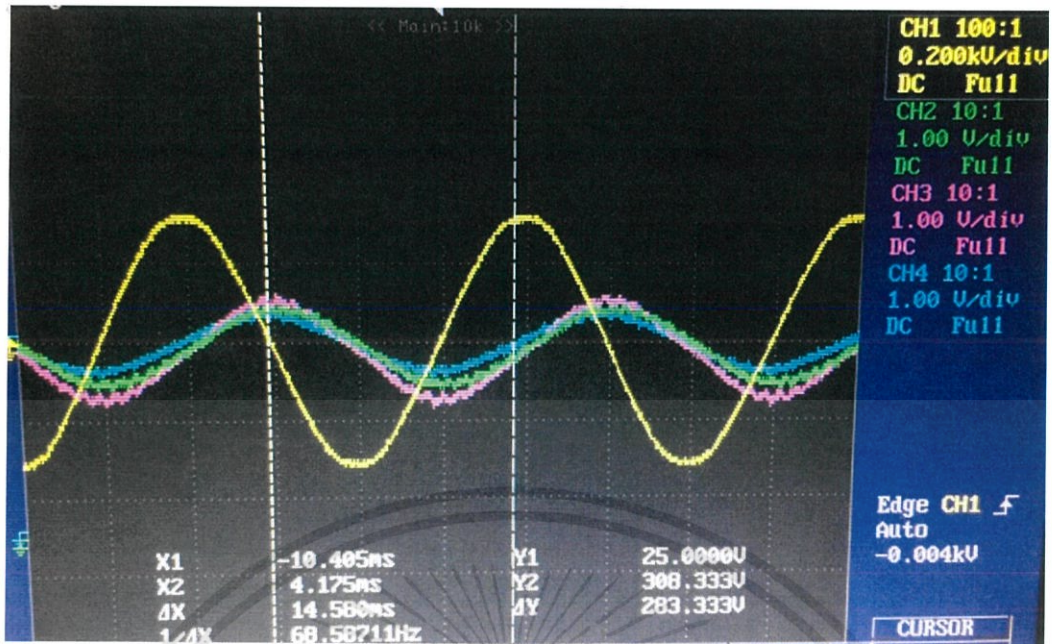


รูปที่ 4.54 Hall sensor ตัวที่ 9 25% ของ load

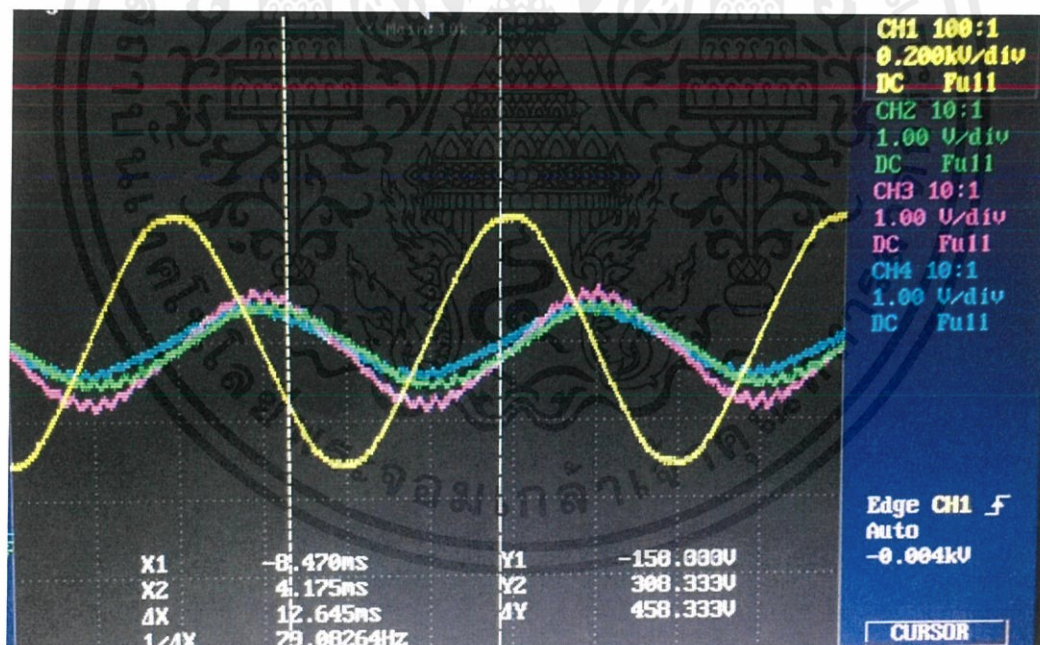


รูปที่ 4.55 Hall sensor ตัวที่ 10 25% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

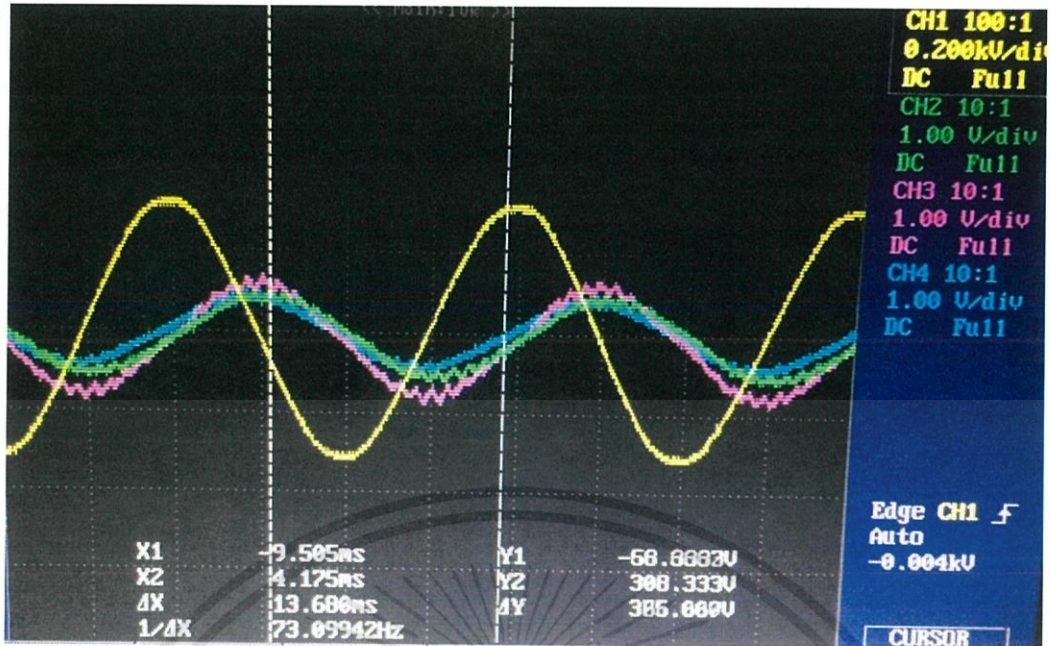


รูปที่ 4.56 Hall sensor ตัวที่ 11 25% ของ load

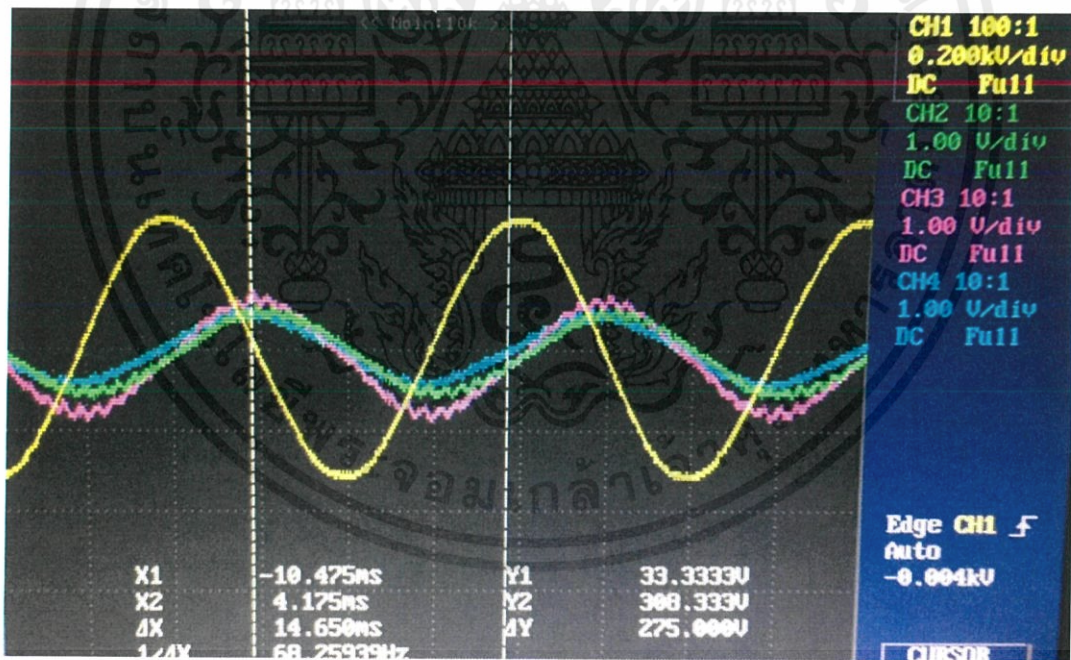


รูปที่ 4.57 Hall sensor ตัวที่ 9 50% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

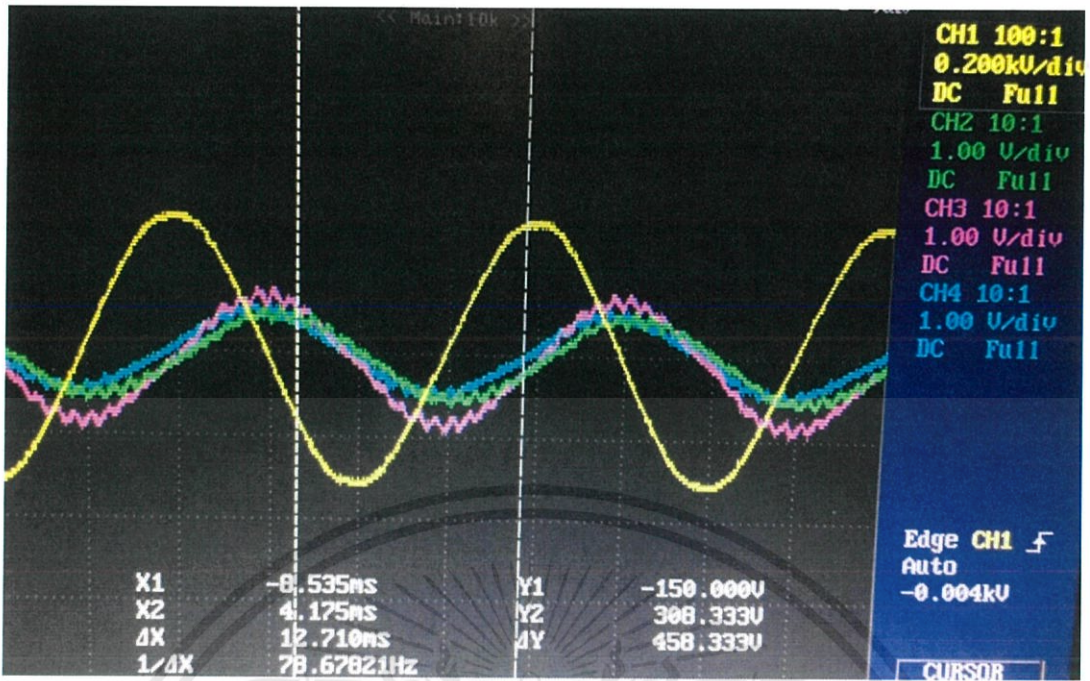


รูปที่ 4.58 Hall sensor ตัวที่ 10 50% ของ load

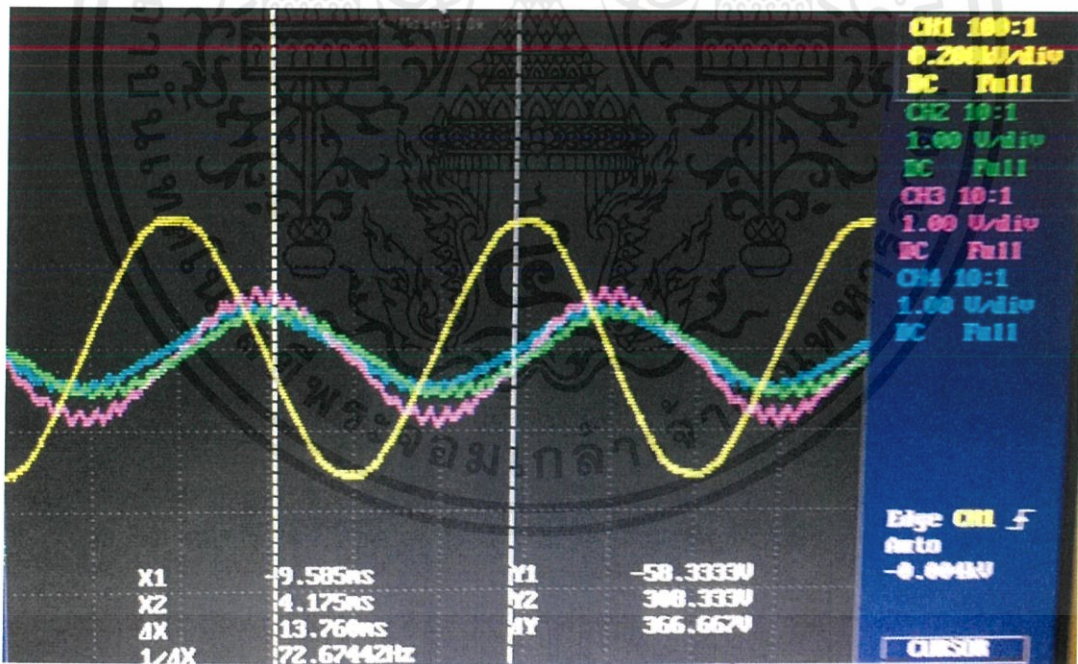


รูปที่ 4.59 Hall sensor ตัวที่ 11 50% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

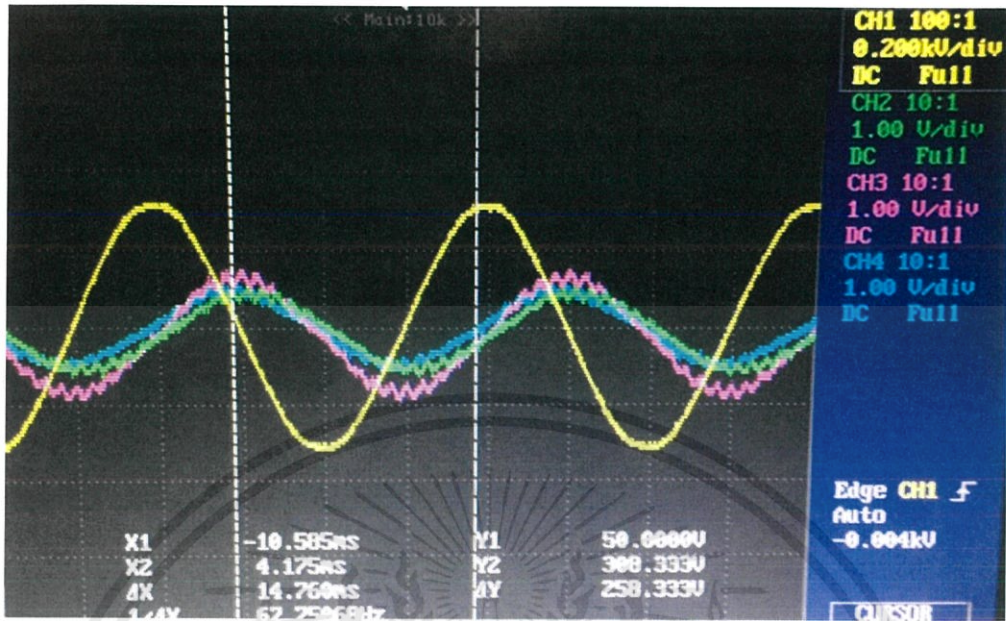


รูปที่ 4.60 Hall sensor ตัวที่ 9 75% ของ load

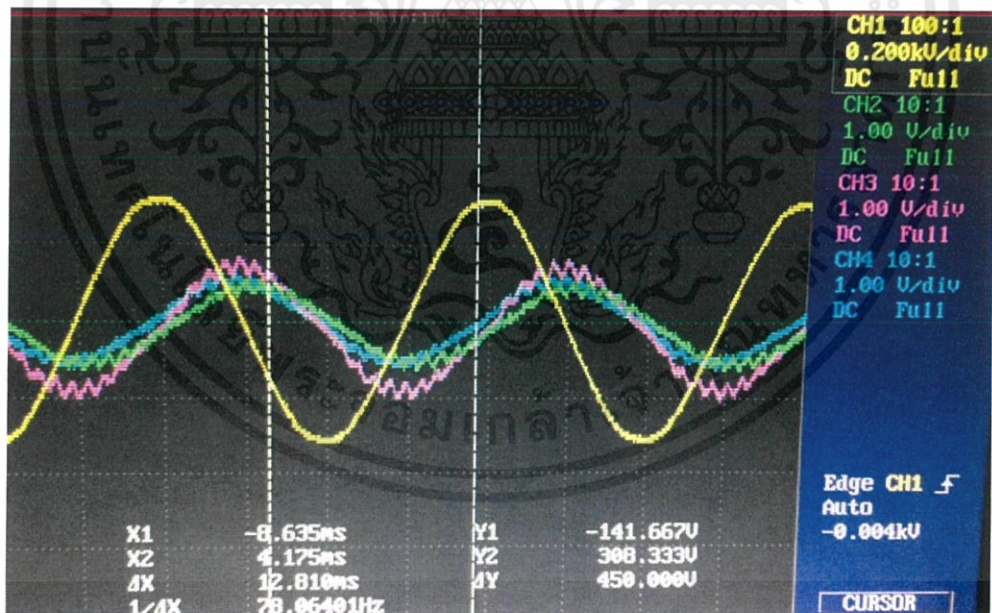


รูปที่ 4.61 Hall sensor ตัวที่ 10 75% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

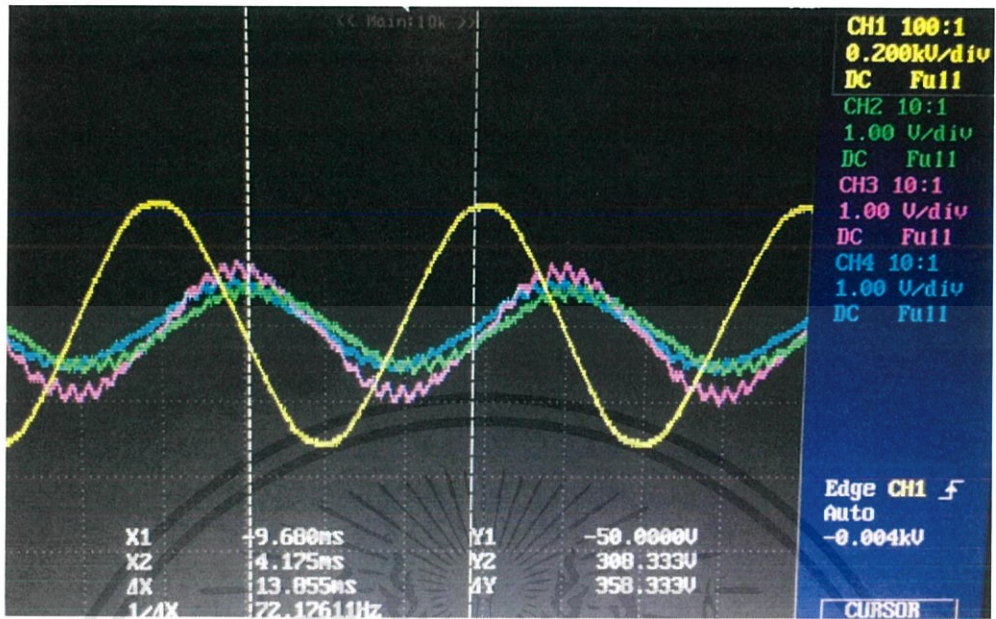


รูปที่ 4.62 Hall sensor ตัวที่ 11 75% ของ load

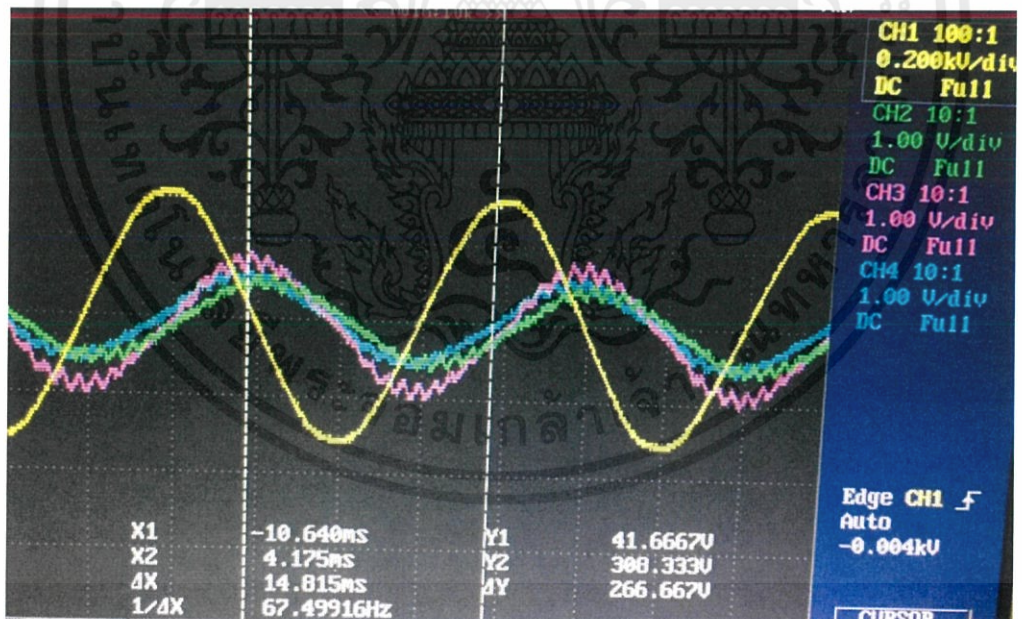


รูปที่ 4.63 Hall sensor ตัวที่ 9 100% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 Hall sensor ตัวที่ 10 100% ของ load

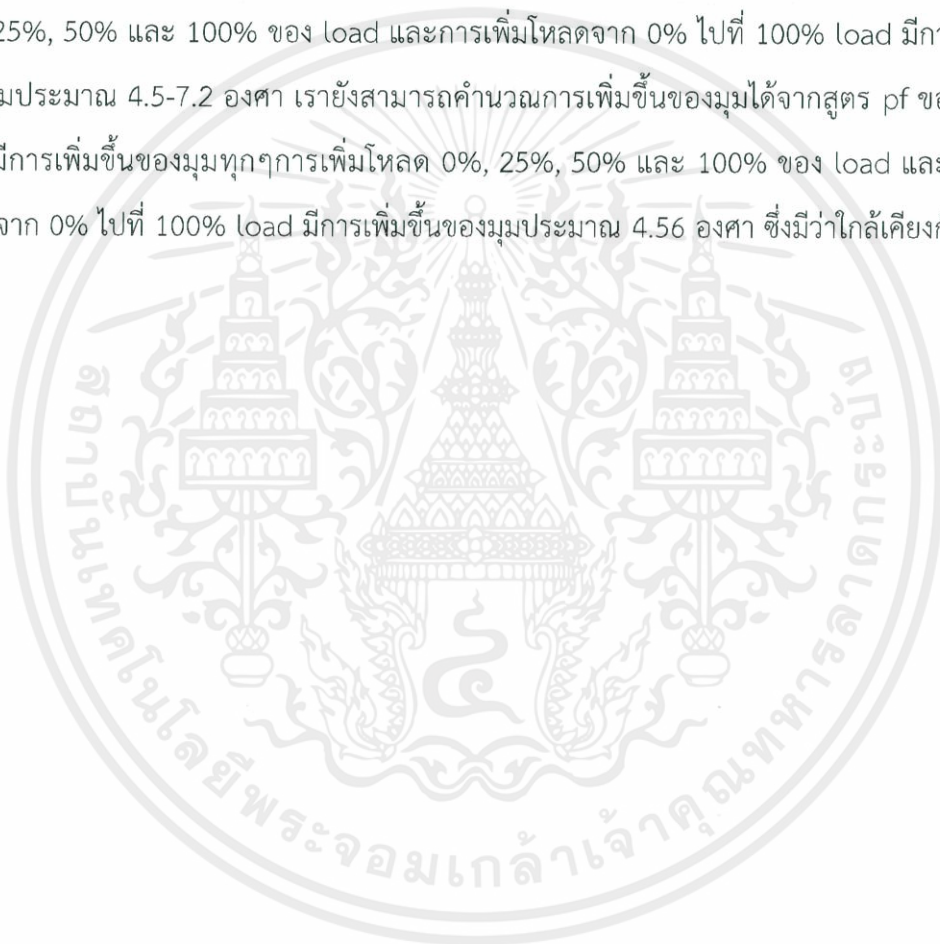


รูปที่ 4.65 Hall sensor ตัวที่ 11 100% ของ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 4.5 การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสถานะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่ม load มากขึ้นค่าแรงดันจาก Hall sensor จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจาก Hall sensor เป็นแบบเชิงเส้น เหมือนกับการทดลองแบบ no-load แล้วเพิ่มแรงดัน และการเพิ่ม load มากขึ้น ค่ามุมระหว่างแรงดันขาเข้าของเฟส a กับค่าแรงดันจาก Hall sensor มีการเพิ่มตามไปด้วย มีการเพิ่มขึ้นของมุมทุกๆการเพิ่มโหลด 0%, 25%, 50% และ 100% ของ load และการเพิ่มโหลดจาก 0% ไปที่ 100% load มีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 4.5-7.2 องศา เรายังสามารถคำนวณการเพิ่มขึ้นของมุมได้จากสูตร pf ของ Rotor ได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของมุมทุกๆการเพิ่มโหลด 0%, 25%, 50% และ 100% ของ load และการเพิ่มโหลดจาก 0% ไปที่ 100% load มีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 4.56 องศา ซึ่งมีว่าใกล้เคียงกัน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

**การทดลองที่ 1** การทดสอบหาวงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

จากการทดลองจะได้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ซึ่งค่าที่ได้จากวงจรสมมูลนี้จะนำไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์และมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสในโรเตอร์เพื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป

**การทดลองที่ 2** การทดสอบป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กใน Airgap โดยใช้ search coil

จากการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดค้นหาที่วัดในแต่ละตำแหน่งรอบ ๆ Airgap มีค่าที่ใกล้เคียงกันทำให้ทราบว่าสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์สนามแม่เหล็กภายในมีค่าสม่ำเสมอในทุกๆตำแหน่ง

**การทดลองที่ 3** การทดสอบหาตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กลัพท์ของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส โดยใช้ search coil และความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟส และ 3 เฟส

จากการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดค้นหาเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสให้กับมอเตอร์มีค่า rms สูงสุดอยู่ 4 ตำแหน่งและมีค่าเป็น 0 อยู่ 4 ตำแหน่ง ทำให้ทราบว่ามอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีแกนของแม่เหล็ก 2 แกนต่อเฟส แต่ละแกนห่างกัน 360 องศาทางไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่ามอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมี 4 ขั้ว

**การทดลองที่ 4** พฤติกรรมสนามแม่เหล็กกับการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 6 รูปแบบ

จากการทดลองเป็นการป้อนแรงดันกระแสตรง 6 รูปแบบที่จำลองแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับมอเตอร์เพื่อตรวจสอบขั้วแม่เหล็กในแต่ละตำแหน่งโดยใช้เข็มทิศและพบว่า การป้อนแรงดันกระแสตรงในแต่ละรูปแบบ จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วเป็นขั้ว N 2 ขั้วและขั้ว S 2 ขั้ว สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนไป 60 องศาทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนและจะหมุนครบ 360 องศาทางไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันครบทั้ง 6 รูปแบบ

## การทดลองที่ 5 พฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor ขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลด และมีโหลด

จากการทดลองทำการวัดแรงดัน output ของ hall sensor ที่นำไปติดตั้งในสเตเตอร์ของมอเตอร์พบว่าแรงดันที่วัดได้อยู่ในรูป sinusoidal ซึ่งเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นแรงดัน DC หมายความว่าสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์นั้นมีการกระจายตัวของขั้วแม่เหล็กขั้ว N และขั้ว S เป็นแบบ sinusoidal ตัดผ่าน hall sensor และมีความถี่ของสัญญาณเป็น 50 Hz แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กหมุนภายในหมุนด้วยความเร็ว synchronous speed นั่นคือ 1500 rpm ขนาดของสัญญาณค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์รับกระแสมากขึ้นทำให้ทราบว่าสนามแม่เหล็กภายในแปรผันตรงกับกระแสของมอเตอร์และ hall sensor ตัวที่ 1 ติดตั้งในตำแหน่งแกนแม่เหล็กของเฟส a ทำให้สัญญาณมีเฟสชิฟ 90 องศา กับแรงดันเฟส a รวมไปถึงแรงดัน out put จาก hall sensor แต่ละตัวจะชิฟกัน 20 องศาทางไฟฟ้าเพราะว่า 1 ร่องสลิตที่ติดตั้ง hall sensor ห่างกัน 20 องศาทางไฟฟ้า

จากการทดลองทำการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 0% - 100% เพื่อทำการวัดระหว่างสัญญาณแรงดัน output จาก hall sensor กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าในเฟส a พบว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดมากขึ้นค่าของมุมระหว่างแรงดัน output จาก hall sensor กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าในเฟส a จะมีค่ามากขึ้น มีการสัมพันธ์แบบแปรผันตรง และมีการเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น เป็นผลมาจากเมื่อทำการเพิ่มโหลด induce voltage ที่ rotor เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่โรเตอร์มีค่าเพิ่ม เกิด MMF ที่โรเตอร์เป็นผลให้สนามแม่เหล็กที่โรเตอร์เปลี่ยนแปลงและการเพิ่มโหลดทำให้ค่า  $Nr$  มีค่าลดลง เป็นผลให้ค่า  $s$  เพิ่มขึ้น และจากสูตรของ pf ของโรเตอร์  $\cos \phi = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$  ทำให้มุมมีการเปลี่ยนแปลงตรงนี้ ทำให้มุมระหว่าง stator และ rotor ที่เปลี่ยนไป แต่เราวัดมุม pf ที่โรเตอร์ ไม่ได้ จึงใช้การคำนวณมาเปรียบเทียบ ซึ่งใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

### ข้อเสนอแนะ

1. ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองอาจจะสามารถนำไปเป็นเงื่อนไขในการควบคุมมอเตอร์ในอนาคต
2. สามารถนำ hall sensor แบบ continuous time วัดรูปคลื่นสนามแม่เหล็กเพื่อศึกษาในมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ ได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เอกสารประกอบการทดลอง Electrical Engineering Laboratory IV, 2560
- [2] รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรกลไฟฟ้า, 2018
- [3] A.E. Fitzgerald (Arthur Eugene), Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, **Electric Machinery** ---6<sup>th</sup> ed.---(McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy), 2002
- [4] Fitzgerald, Kingsley and Umans, McGraw-Hill, **Electric Machinery**, 7<sup>th</sup> edition, 2003
- [5] John Wiley and Sons Sen, **Principles of Electric Machines and Power Electrics**, 2<sup>nd</sup> edition, 1997
- [6] Sarma and Pathak, **Electric Machines**, 2<sup>nd</sup> edition, Cengage Learning, 2009



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING CONDITION

Seksan Eiadkaew, Surachat Puttana, Wittawat Pawanna  
and Vongsakorn Srithaworn

### Abstract

This project is to study the behavior of rotating magnetic field of 3-phase squirrel cage induction motors at operating condition. The tested motor is 1hp, 3 phase 4 poles. First of all, the rotating magnetic field characteristics in the stand still induction motor is studied by applying 3-phases, 1-phase AC supplies and 6-pattern DC supply, respectively. After that, the study of rotating magnetic field at operating condition is employed using hall sensors to find the relation between rotating magnetic field and motor torque at various mechanical loads. The results show that, as stand still condition, rotating magnetic field is almost constant in every air-gap position, and the magnetic field completely rotates in one electric cycle as applying with one cycle of 6-pattern DC voltage. As for the operating condition, the amplitude and phase shift of rotating magnetic field are strongly related to the mechanical load of motor.

### Introduction

Over the years, induction motors have been used in various applications. These induction motors is operating based on the principle of rotating magnetic field. Therefore, understanding the magnetic field rotation is important. In this paper, the study of the behavior of the rotating magnetic field and the relationship between rotating magnetic field and torque of the induction motor are proposed.

### Methodology

#### 1. Experimental Setup

The 3 phase induction motor which is designed for studying magnetic field as running operation is shown in Fig. 1. It is embedded with 18 hall sensors in stator slots.



Fig.1. The designed 3 phase induction motor

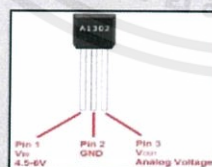


Fig.2. Hall sensor A1302

Fig.2. presents the hall sensors that install at stator slots. Using 18 hall sensors for studying magnetic field in the tested 3 phase induction motor is shown in Fig.3. The testing circuit for the experiment as shown in Fig. 4 include a DC voltage supply for hall sensors and 3 phase AC voltage supply to the tested motor, and an oscilloscope used for measuring the hall signal.



Fig.3. hall sensors installation

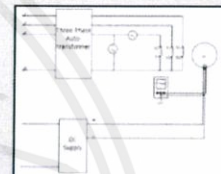


Fig.4. experimental circuit for magnetic field testing

### Results

The signal of hall sensors as no load and load conditions are illustrated in Fig.5.



Fig.5. The signal of hall sensor while loading and no load

Load sensor No.1	Delta (ms)	Angle (degree)	Delta(degree)
load 0%	4.900	89.20	0
load 25%	5.010	90.18	1.98
load 50%	5.110	91.98	1.80
load 75%	5.175	93.15	1.17
load 100%	5.245	94.41	1.26

Table 1. the phase shift angle that is changed in each 25% load

### Conclusion

- The tested 4 poles induction motor has 2 magnetic axes with 360 electrical degrees difference and the magnetic field in this machine rotate in 1 electrical cycle as applying by 1 cycle of three phase voltage.
- The distribution of magnetic field in the motor is the sinusoidal both in N and S poles. The different angle between magnetic field and its axis in the motor is 90 degree leading or lagging condition.
- If the mechanical load of motor is increased, the angle between phase A supplied voltage and hall sensor voltage is also linearly increased. This increasing angle from the experiment is approximate to the calculated angle based on theoretical principle.

### References

- [1] Fitzgerald, A.E.(Arthur Eugene), Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans.--6<sup>th</sup> ed.--(McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy).
- [2] Electric Machinery, 7<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Fitzgerald, Kingsley and Umans.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะทำงาน

## A STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD IN AC MACHINE AT OPERATING CONDITION

เสกสรร เอียดแก้ว, วิทวัส ปะวันนา, วงศกร ศรีถาวร และ สุรชาติ พุฒนา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกขณะมอเตอร์กำลังทำงาน โดยมอเตอร์ที่นำมาทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า 3 เฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก เริ่มต้นทำการศึกษาคูณลักษณะของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะหยุดนิ่ง โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 1 เฟสและแรงดันกระแสตรงแบบทกรูปแบบตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาคูณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนขณะที่มอเตอร์ทำงานโดยการติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับแรงบิดของมอเตอร์ที่ภาระต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่งสนามแม่เหล็กหมุนจะมีขนาดสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาตำแหน่งต่าง ๆ ใน ช่องว่างอากาศ และพบว่าการป้อนแรงดันกระแสตรงทกรูปแบบ ที่จำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ใน 1 คาบ ผลที่ได้คือทิศทางของสนามแม่เหล็กเกิดการหมุนครบ 1 รอบทางไฟฟ้า สำหรับการศึกษาในสภาวะที่มอเตอร์ทำงาน ผลที่ได้คือขนาดและมุมของสนามแม่เหล็กจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของภาระทางกลของมอเตอร์

### Abstract

This project is to study the behavior of rotating magnetic field of 3-phase squirrel cage induction motors at operating condition. The tested motor is 1hp, 3 phase 4 poles. First of all, the rotating magnetic field characteristics in the stand still induction motor is studied by applying 3-phases, 1-phase AC supplies and 6-pattern DC supply, respectively. After that, the study of rotating magnetic field at operating condition is employed using hall sensors to find the relation between rotating magnetic field and motor torque at various mechanical loads. The results show that, as stand still condition, rotating magnetic field is almost constant in every air-gap

phase shift of rotating magnetic field are strongly related to the mechanical load of motor.

### 1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้านั้นถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆมากมาย ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานในด้านต่างๆ เช่น รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า โรงอุตสาหกรรม เป็นต้น แทนการใช้น้ำมัน เนื่องจากการสิ้นดาบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงนั้นส่งผลทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก รวมถึงราคามันที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และทรัพยากรน้ำมันเริ่มลดลง จึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน

### ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เบื้องต้นจากมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดพิกัด 750 วัตต์ 50 เฮิร์ตซ์ 380 โวลต์ และความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที
2. ศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้แก่ ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทิศทางสนามแม่เหล็กเพื่อหาแกน วัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส และ 3 เฟส การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กหมุนภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะหมุนที่นำมาทดสอบ
3. ออกแบบและติดตั้ง Hall sensor เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยพิจารณาจากโครงสร้างจริงที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

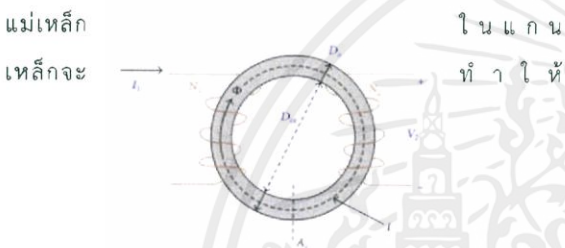
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Construction) มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน โดยโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ โรเตอร์และสเตเตอร์

2.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) ในการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า) วงจรแม่เหล็กมีความสำคัญมากในการศึกษาเรื่องนี้ เพราะเครื่องจักรกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าต้องอาศัยวงจรแม่เหล็กเป็นทางผ่านในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ในเครื่องกลไฟฟ้า โดยอาศัยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านวงจรแม่เหล็ก ปฏิภาณระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กก่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของพลังงาน

2.3 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) เมื่อทำการป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto-motive force : mmf หรือ  $Ni$ ) ให้กับวงจรแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic Flux :  $\Phi$ ) ในแกนเหล็กที่เป็นวงจรมแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.10 แกนเหล็กเป็นรูปวงแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดที่พัน N รอบ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กบนแกน toroid และเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านออกมาด้านนอก toroid เรียกว่าเส้นแรงแรรั่ว (leakage flux) ซึ่งความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็กจะ



สนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ  
รูปที่ 2.10 แกนเหล็กเป็นรูปวงแหวน เรียกว่า toroid และมีขดลวดพันอยู่รอบ

(ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-toroidal-electromagnetic-coil\\_fig14\\_269767835](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-toroidal-electromagnetic-coil_fig14_269767835))

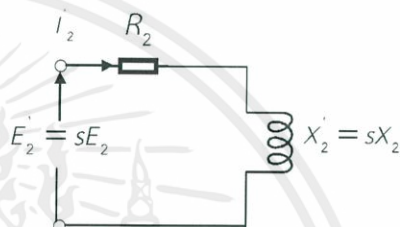
2.4 ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์และการหมุนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

2.5 สนามแม่เหล็กหมุน สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส เกิดจากการจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวด 3 ชุด คือ ชุด A, ชุด B, ชุด C ที่พันอยู่ในร่องแกนเหล็กที่สเตเตอร์ โดยวางมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าซึ่งกันและกัน มีการต่อใช้งานได้ทั้งแบบสตาร์และเดลต้า นอกจากนี้ขดลวด 3 ชุดจะมีคุณลักษณะทั้งขนาด ความต้านทาน และรีแอคแตนซ์ของขดลวดที่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นเมื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดจะทำให้เกิด

กระแสไฟฟ้าและไหลในขดลวดทั้ง 3 ชุด ทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

2.6 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ และนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้

2.7 แรงบิดของ Induction Motor ขณะมอเตอร์ทำงาน

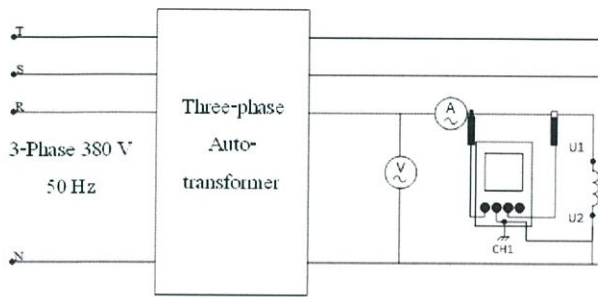


$E_2 = sE_2$  rotor e.m.f./phase ขณะมอเตอร์ทำงาน  
 $X_2 = sX_2$  rotor reactance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน  
 $R_2$  rotor resistance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน  
 $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}$  rotor impedance/phase ขณะมอเตอร์ทำงาน

$$\text{Rotor p.f. } \cos \phi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

### 3. วิธีการทดลอง

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ เหล่านั้น มาประยุกต์ในการออกแบบวิธีการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 1 แรงม้า ซึ่งเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เพื่อหา วงจรสมมูลของมอเตอร์ ทดสอบสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดัน 1 เฟสและ 3 เฟส โดยใช้ search coil เพื่อศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การจ่ายแรงดัน DC ด้วยสัญญาณ 6 รูปแบบ การปรับเทียบค่าและการติดตั้งฮอลล์เซ็นเซอร์ และพฤติกรรมสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ทำงานเมื่อไม่มีโหลดและมีโหลด



รูปที่ 3.2 วงจรการต่อ induction motor 3 เฟส 1 แรงม้า

4. ผลการทดลอง

การทดลองที่ 4.1 จากผลการทดลองทางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ทำการทดลอง ทั้ง 3 วิธีคือ วิธี VI Method ได้ค่าความต้านทานสเตเตอร์ ( $R_1$ ) มีค่าเท่ากับ 10.458  $\Omega$  วิธี No-load test ได้ค่าค่าความต้านทานที่สูญเสียในแกนเหล็ก ( $R_c$ ) และค่า Reactance สนามแม่เหล็ก ( $X_m$ ) มีค่าเท่ากับ 1198.8  $\Omega$  และ 189.97  $\Omega$  ตามลำดับ และวิธี Block-rotor test ได้ค่าความต้านทานโรเตอร์ ( $R_2$ ), Reactance รั้วไหลที่สเตเตอร์ ( $X$ ) และ Reactance รั้วไหลที่โรเตอร์ ( $X_2$ ) มีค่าเท่ากับ 6.882  $\Omega$  6.7  $\Omega$  และ 10.05  $\Omega$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับตำแหน่งการวาง search coil ในแต่ละองศา

มุมของโรเตอร์ (องศา)	แรงดันเหนี่ยวนำที่วัดได้เป็นค่า rms (mV)
0	537.865
30	562.187
60	561.905
90	577.752
120	540.012
150	576.508
180	574.284
210	549.373
240	539.785
270	528.525
300	595.112
330	553.190

การทดลองที่ 4.2 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่าน search coil กับค่ามุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของโรเตอร์ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัด ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าทุกมุมของโรเตอร์มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.5.2 แสดงผลต่างระหว่างมุมของ Hall sensor แต่ละตัวเทียบกับแรงดันที่เฟส a

Hall sensor	Delta cursor (ms)	มุมเริ่มต้นเทียบกับแรงดันเฟส a (องศา)	ผลต่างมุมของ Hall sensor แต่ละตัว (องศา)
1	4.9	88.2	-
2	5.75	103.5	15.3
3	6.95	125.1	21.6
4	8.25	148.5	23.4
5	9.505	171.09	22.59
6	10.355	186.39	15.3
7	11.055	198.99	12.6
8	12.155	218.79	19.8
9	12.855	231.39	12.6
10	13.515	243.27	11.88
11	14.515	261.27	18
12	15.565	280.17	18.9
13	16.765	301.77	21.6
14	18.015	324.27	22.5
15	19.325	347.85	23.58
16	20.695	372.51	24.66
17	22.195	399.51	27
18	23.695	426.51	27

จากการทดลองที่ 4.5 จากการศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall Sensor 18 ตัว พบว่า hall sensor ทั้ง 18 ตัว มีกราฟของแรงดัน output เป็นรูป sinusoidal มีค่า max เพิ่มขึ้น ค่า min ลดลง แบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้เห็นว่าตำแหน่งของ hall sensor ที่ทำการติดตั้งไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดลงของค่าแรงดัน output ของ Hall sensor แต่ตำแหน่งของ hall sensor มีผลต่อมุมของแรงดัน output เมื่อเทียบกับแรงดันที่เฟส a โดยจากการทดลองพบว่าค่าแรงดัน output ของ hall sensor ตัวที่ 1 ชิฟเฟส กับแรงดันที่เฟส a 90 องศา และผลต่างของมุมระหว่าง hall sensor แต่ละตัวมีค่า 11.88-27 องศา

ตารางที่ 6.2 แสดงค่า Nr ค่า Slip และค่า Rotor power factor ที่สภาวะ load ต่างๆ

%load	Nr(r/min)	Ns(r/min)	Slip	มุมที่เปลี่ยนแปลง เทียบ no-load (องศา)
0	1493	1500	0.005	0.39
25	1473	1500	0.018	1.51
50	1455	1500	0.030	2.51
75	1433	1500	0.045	3.71
100	1418	1500	0.055	4.56

การผลการทดลองที่ 4.5 การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่ม load มากขึ้นค่าแรงดันจาก Hall sensor จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจาก Hall sensor เป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับการทดลองแบบ no-load แล้วเพิ่มแรงดัน และการเพิ่ม load มากขึ้น ค่ามุมระหว่างแรงดันขาเข้าของเฟส a กับค่าแรงดันจาก Hall sensor มีการเพิ่มตามไปด้วย มีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 0.9-2.34 องศา ทุกๆการเพิ่มโหลด 0%, 25%, 50% และ 100% ของ load และการเพิ่มโหลดจาก 0% ไปที่ 100% load มีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 4.5-7.2 องศา เราจะสามารถคำนวณการเพิ่มขึ้นของมุมได้จากสูตร pf ของ Rotor ได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 0.85-1.2 องศา ทุกๆการเพิ่มโหลด 0%, 25%, 50% และ 100% ของ load และการเพิ่มโหลดจาก 0% ไปที่ 100% load มีการเพิ่มขึ้นของมุมประมาณ 4.56 องศา ซึ่งมีว่าใกล้เคียงกัน

#### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤตฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ขอขอบคุณ นายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ และพี่ๆ ปริญญาโทในห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนและนายวัชร ศรีประภาพงค์, นายเสฏฐวุฒิ ยิวเที่ยง, นายวิษณุภัส ไชยศรียา และนายอภิวัฒน์ ภูปลิ้ม ซึ่งเป็นสมาชิกภายในห้อง Innogen ที่ให้แนวคิดและอุปกรณ์ภายในห้อง Innogen ในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

#### บรรณานุกรม

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เอกสารประกอบการทดลอง Electrical Engineering Laboratory IV, 2560

[2] Fitzgerald, A.E.(Arthur Eugene), Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans.---6<sup>th</sup> ed.---(McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy), 2002

[3] Electric Machinery, 7<sup>th</sup> edition, Fitzgerald, Kingsley and Umans, 2003McGraw-Hill, 2003

[4] Principles of Electric Machines and Power Electrics, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Sen, 1997

#### ประวัติผู้เขียน



นายเสกสรร เอียดแก้ว เกิดวันที่ 3 พฤษภาคม 2540 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสภาราชินีจังหวัดตรัง ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายสุรชาติ พุดนา เกิดวันที่ 30 พฤศจิกายน 2539 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีศรีน่าน ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายวิทวัส ปะวันนา เกิดวันที่ 19 มิถุนายน 2539 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฝ่ายมัธยม ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายวงศกร ศรีวาร เกิดวันที่ 6 กันยายน 2539 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยรังสิต ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## DATA SHEET และวิธีการคำนวณ



## A1301 and A1302

*Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs*

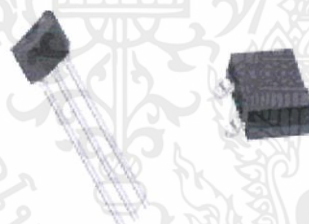
## FEATURES AND BENEFITS

- Low-noise output
- Fast power-on time
- Ratiometric rail-to-rail output
- 4.5 to 6.0 V operation
- Solid-state reliability
- Factory-programmed at end-of-line for optimum performance
- Robust ESD performance

## Packages:

3-Pin SOT23W (suffix LH)

3-Pin SIP (suffix UA)



Not to scale

## DESCRIPTION

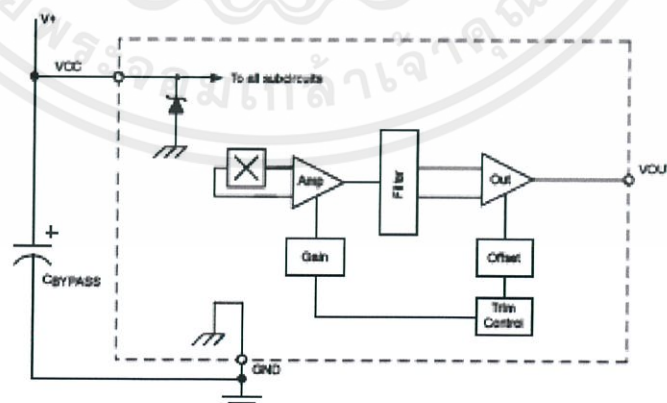
The A1301 and A1302 are continuous-time, ratiometric, linear Hall-effect sensor ICs. They are optimized to accurately provide a voltage output that is proportional to an applied magnetic field. These devices have a quiescent output voltage that is 50% of the supply voltage. Two output sensitivity options are provided: 2.5 mV/G typical for the A1301, and 1.3 mV/G typical for the A1302.

The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall circuit, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall circuit and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog signals.

High precision in output levels is obtained by internal gain and offset trim adjustments made at end-of-line during the manufacturing process.

These features make the A1301 and A1302 ideal for use in position sensing systems, for both linear target motion and rotational target motion. They are well-suited for industrial applications over extended temperature ranges, from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $125^{\circ}\text{C}$ .

Two device package types are available: LH, a 3-pin SOT23W type for surface mount, and UA, a 3-pin ultramini SIP for through-hole mount. They are lead (Pb) free (suffix, -T) with 100% matte tin plated leadframes.



Functional Block Diagram

# A1301 and A1302

## Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

### SPECIFICATIONS

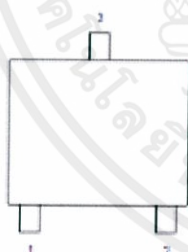
Selection Guide				
Part Number	Packing*	Package	Ambient, $T_A$	Sensitivity (Typical)
A1301EUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	SIP	-40°C to 85°C	2.5 mV/G
A1301KLHLT-T	7-in. reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1301KLHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	Surface Mount		
A1301KUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	SIP	-40°C to 85°C	1.3 mV/G
A1302ELHLT-T	7-in. reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 85°C	
A1302ELHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	Surface Mount		
A1302KLHLT-T	7-in. reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1302KLHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	Surface Mount		
A1302KUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		



\*Contact Allegro™ for additional packing options.

### Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	$V_{CC}$		8	V
Output Voltage	$V_{OUT}$		8	V
Reverse Supply Voltage	$V_{RCC}$		-0.1	V
Reverse Output Voltage	$V_{ROUT}$		-0.1	V
Output Sink Current	$I_{OUT}$		10	mA
Operating Ambient Temperature	$T_A$	Range E	-40 to 85	°C
		Range K	-40 to 125	°C
Maximum Junction Temperature	$T_{J(max)}$		165	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$		-65 to 170	°C



Package LH SOT23W Pin-out Diagram



Package UA, 3-Pin SIP Pin-out Diagram

### Terminal List

Symbol	Number		Description
	Package LH	Package UA	
VCC	1	1	Connects power supply to chip
VOUT	2	3	Output from circuit
GND	3	2	Ground



Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northwest Cutoff  
Worcester, Massachusetts 01615-0006 U.S.A.  
1-508-851-5000, www.allegromicro.com

## A1301 and A1302

## Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

DEVICE CHARACTERISTICS over operating temperature range,  $T_A$ , and  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
<b>Electrical Characteristics</b>						
Supply Voltage	$V_{CC}$	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	$I_{CC}$	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(High)}$	$I_{SOURCE} = -1\text{ mA}$ , Sens = nominal	4.65	4.7	–	V
	$V_{OUT(Low)}$	$I_{SINK} = 1\text{ mA}$ , Sens = nominal	–	0.2	0.25	V
Output Bandwidth	BW		–	20	–	kHz
Power-On Time	$t_{PO}$	$V_{OUT(High)}$ to $0.95 V_{OUT}$ , $B = \pm 1400\text{ G}$ ; Slew rate = $4.5\text{ V}/\mu\text{s}$ to $4.5\text{ V}/100\text{ ns}$	–	3	5	$\mu\text{s}$
Output Resistance	$R_{OUT}$	$I_{SINK} \leq 1\text{ mA}$ , $I_{SOURCE} \leq -1\text{ mA}$	–	2	5	$\Omega$
Wide Band Output Noise, rms	$V_{OUTN}$	External output low pass filter $\leq 10\text{ kHz}$ ; Sens = nominal	–	150	–	$\mu\text{V}$
<b>Ratiometry</b>						
Quiescent Output Voltage Error with respect to $\Delta V_{CC}^1$	$\Delta V_{OUT(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	$\pm 3.0$	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to $\Delta V_{CC}^2$	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	$\pm 3.0$	%
<b>Output</b>						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	$\pm 2.5$	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	$\pm 3.0$	%
<b>Magnetic Characteristics</b>						
Quiescent Output Voltage	$V_{OUTQ}$	$B = 0\text{ G}$ ; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(\Delta T_A)}$	$B = 0\text{ G}$	2.2	–	2.8	V
Magnetic Sensitivity	Sens	A1301; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.0	2.5	3.0	mV/G
		A1302; $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.0	1.3	1.5	mV/G
Magnetic Sensitivity over Operating Temperature Range	Sens $_{(\Delta T_A)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

<sup>1</sup>Refer to equation (4) in Ratiometric section on page 4.

<sup>2</sup>Refer to equation (5) in Ratiometric section on page 4.



Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northeast Cutoff  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.  
1.508.883.5000 www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A1301 and A1302

## Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

### CHARACTERISTIC DEFINITIONS

#### Quiescent Output Voltage

In the quiescent state (no significant magnetic field:  $B = 0$ ), the output,  $V_{OUTQ}$ , equals one half of the supply voltage,  $V_{CC}$ , throughout the entire operating ranges of  $V_{CC}$  and ambient temperature,  $T_A$ . Due to internal component tolerances and thermal considerations, there is a tolerance on the quiescent output voltage,  $\Delta V_{OUTQ}$ , which is a function of both  $\Delta V_{CC}$  and  $\Delta T_A$ . For purposes of specification, the quiescent output voltage as a function of temperature,  $\Delta V_{OUTQ(AT_A)}$ , is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(AT_A)} = \frac{V_{OUTQ(T_A)} - V_{OUTQ(25^\circ\text{C})}}{\text{Sens}_{(25^\circ\text{C})}} \quad (1)$$

where Sens is in mV/G, and the result is the device equivalent accuracy, in gauss (G), applicable over the entire operating temperature range.

#### Sensitivity

The presence of a south-polarity (+B) magnetic field, perpendicular to the branded face of the device package, increases the output voltage,  $V_{OUT+}$ , in proportion to the magnetic field applied, from  $V_{OUTQ}$  toward the  $V_{CC}$  rail. Conversely, the application of a north polarity (-B) magnetic field, in the same orientation, proportionally decreases the output voltage from its quiescent value. This proportionality is specified as the magnetic sensitivity of the device and is defined as:

$$\text{Sens} = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUT(-B)}}{2B} \quad (2)$$

The stability of the device magnetic sensitivity as a function of ambient temperature,  $\Delta \text{Sens}_{(AT_A)}$  (%) is defined as:

$$\Delta \text{Sens}_{(AT_A)} = \frac{\text{Sens}_{(T_A)} - \text{Sens}_{(25^\circ\text{C})}}{\text{Sens}_{(25^\circ\text{C})}} \times 100\% \quad (3)$$

#### Ratiometric

The A1301 and A1302 feature a ratiometric output. This means that the quiescent voltage output,  $V_{OUTQ}$ , and the magnetic sensitivity, Sens, are proportional to the supply voltage,  $V_{CC}$ .

The ratiometric change (%) in the quiescent voltage output is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(\Delta V)} = \frac{V_{OUTQ(V_{CC})} / V_{OUTQ(5V)}}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (4)$$

and the ratiometric change (%) in sensitivity is defined as:

$$\Delta \text{Sens}_{(\Delta V)} = \frac{\text{Sens}_{(V_{CC})} / \text{Sens}_{(5V)}}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (5)$$

#### Linearity and Symmetry

The on-chip output stage is designed to provide linear output at a supply voltage of 5 V. Although the application of very high magnetic fields does not damage these devices, it does force their output into a nonlinear region. Linearity in percent is measured and defined as:

$$L_{lin+} = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

$$L_{lin-} = \frac{V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (7)$$

and output symmetry as:

$$\text{Sym} = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$

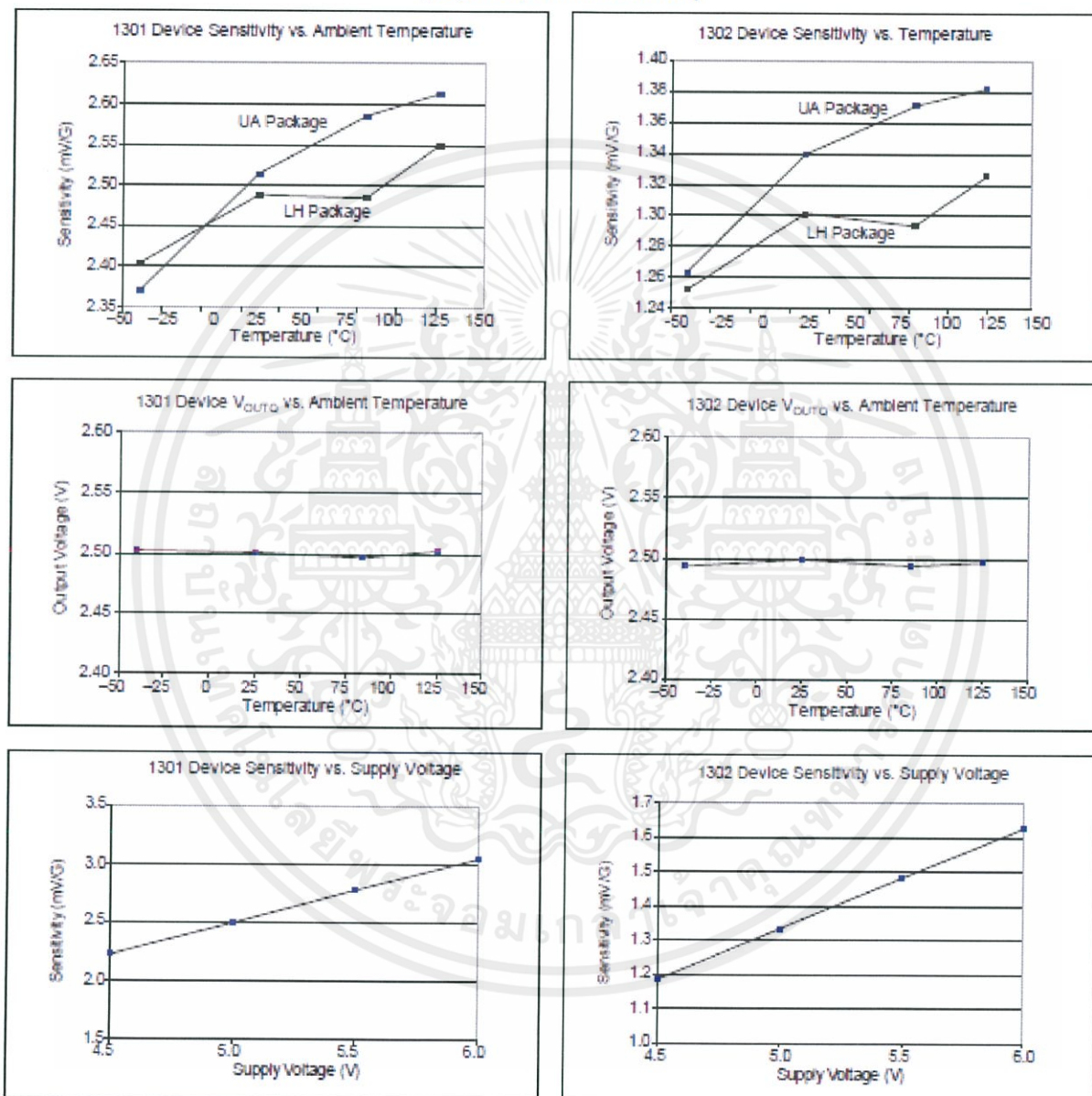


## A1301 and A1302

## Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

### TYPICAL CHARACTERISTICS

(30 pieces, 3 fabrication lots)



Continued on the next page...

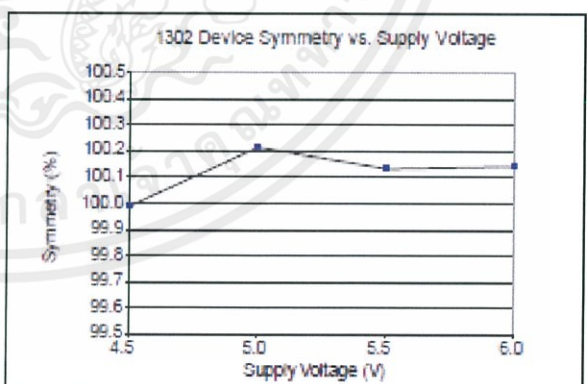
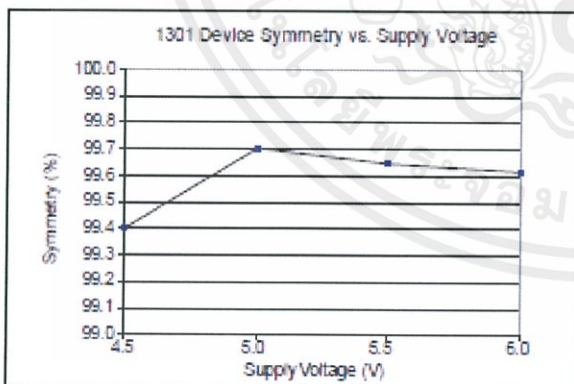
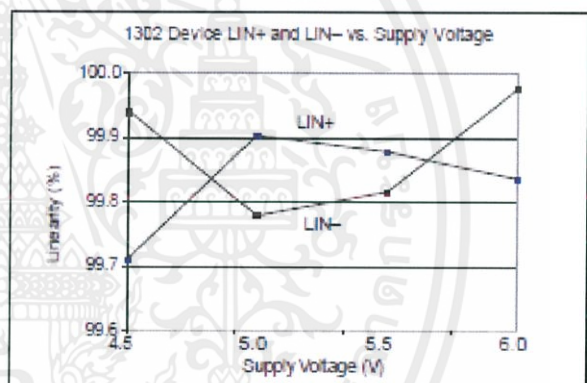
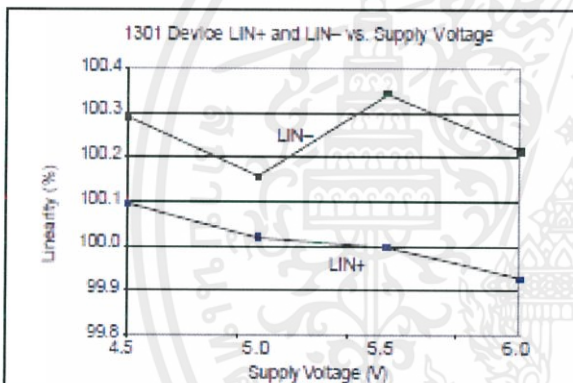
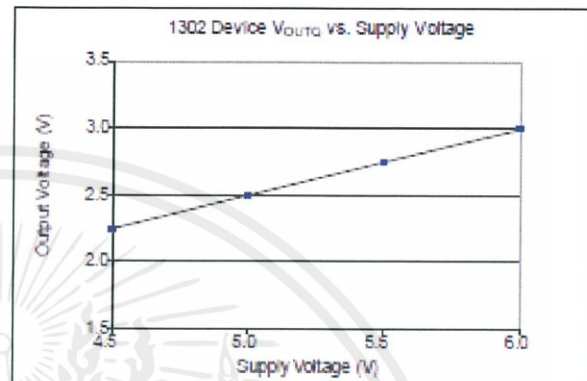
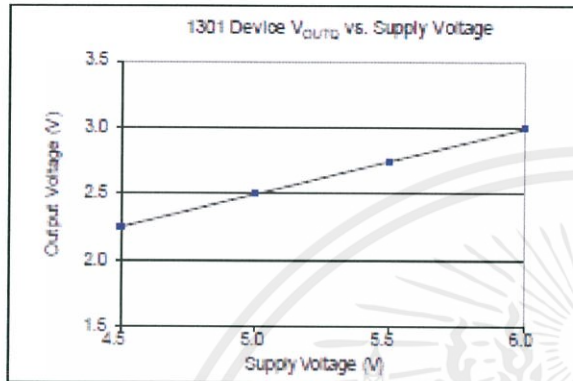


Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northeast Cutoff  
Westborough, Massachusetts 01581-0036 U.S.A.  
1.508.852.8000 www.allegromicro.com

# A1301 and A1302

# Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

## TYPICAL CHARACTERISTICS CONTINUED (30 pieces, 3 fabrication lots)



Allegro Microsystems, LLC  
115 Northeast Cutoff  
Worcester, Massachusetts 01615-0035 U.S.A.  
1.508.853.5300 www.allegromicro.com

## การคำนวณ Rotor power factor

จากเนื้อหาในเรื่อง Torque of Induction Motor under Running Condition ทำให้สามารถคำนวณค่า Rotor power factor ได้จากสูตร

$$\cos\phi_2' = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

จากผลการทดลองที่ 3.1 การทดลองหาจรรยาสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทั้ง 3 วิธี ทำให้ได้ค่า  $R_2$  และ  $X_2$  มีค่าเท่ากับ 6.882  $\Omega$  และ 10.05  $\Omega$  ตามลำดับ และจากการทดลองที่ 3.5 การศึกษาพฤติกรรมสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall sensor ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะมี load ซึ่งทดสอบที่ 0%, 25% 50%, 75% และ 100% ของ load ที่แรงดัน 220 โวลต์ ทำให้ได้ค่า Slip ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า  $N_r$  และค่า Slip ที่สภาวะ load ต่างๆ

%load	$N_r$ (r/min)	$N_s$ (r/min)	Slip
0	1493	1500	0.005
25	1473	1500	0.018
50	1455	1500	0.030
75	1433	1500	0.045
100	1418	1500	0.055

ที่ 0% load ทำให้ได้ค่า

$$\cos\phi_2' = \frac{6.882}{\sqrt{6.882^2 + (0.005 \times 10.05)^2}}$$

$$\cos\phi_2' = 0.997$$

$$\phi_2' = 0.39 \text{ องศา}$$

ตารางที่ 6.2 ค่า  $N_r$  ค่า Slip และค่า Rotor power factor ที่สภาวะ load ต่างๆ

%load	$N_r$ (r/min)	$N_s$ (r/min)	Slip	มุมที่เปลี่ยนแปลงเทียบ no-load (องศา)
0	1493	1500	0.005	0.39
25	1473	1500	0.018	1.51
50	1455	1500	0.030	2.51
75	1433	1500	0.045	3.71
100	1418	1500	0.055	4.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายเสกสรร เอียดแก้ว เกิดวันที่ 3 พฤษภาคม 2540  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสภาราชนิจังหวัดตรัง  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายสุรชาติ พุดนา เกิดวันที่ 30 พฤศจิกายน 2539  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีศรีน่าน  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายวิทวัส ปะวันนา เกิดวันที่ 19 มิถุนายน 2539  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฝ่ายมัธยม  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายวงศ์กร ศรีถาวร เกิดวันที่ 6 กันยายน 2539  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยรังสิต  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้