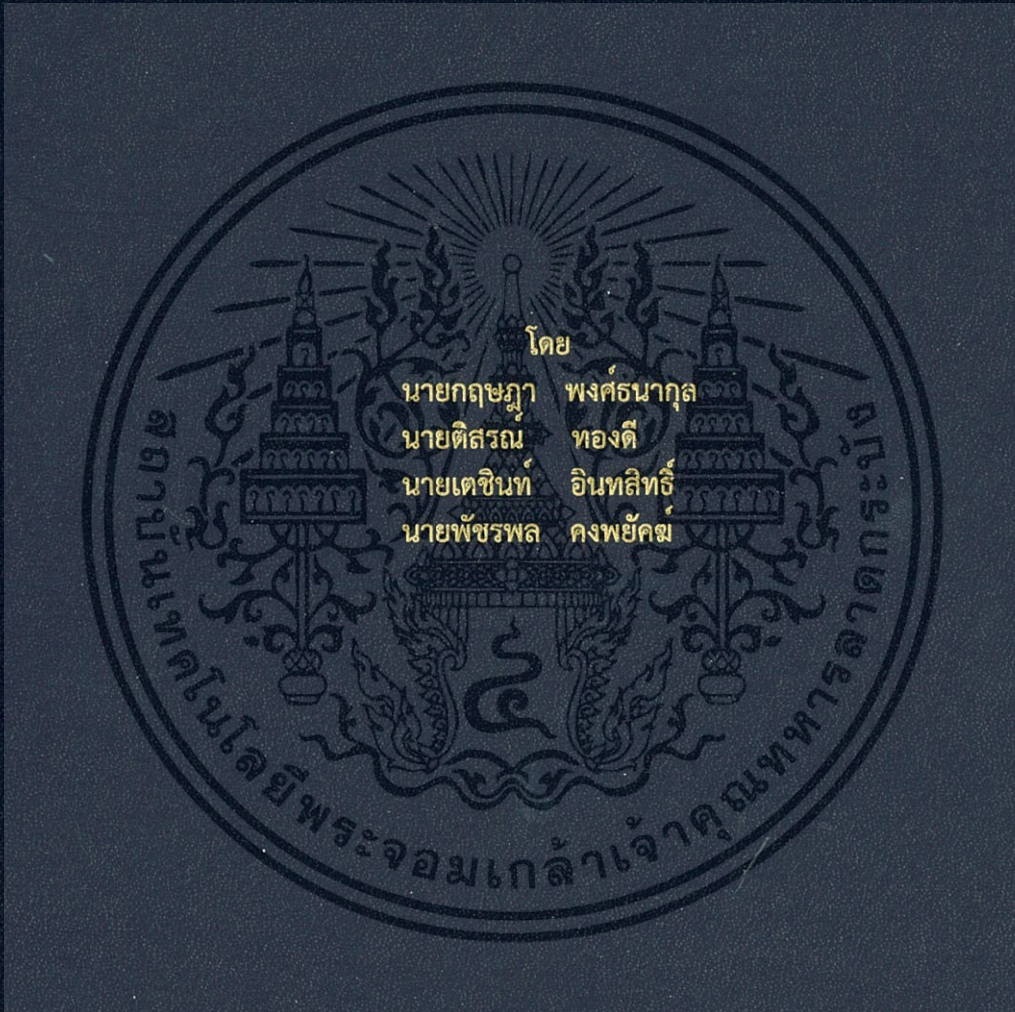


การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

Rotor Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched Reluctance Machine



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาท  
เทียม

Rotor Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched  
Reluctance Machine



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotor Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched  
Reluctance Machine



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
Rotor Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched Reluctance  
Machine



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษฎา พงษ์ธนากุล
2. นายติสรณ์ ทองดี
3. นายเดชินท์ อินทสิทธิ์
4. นายพัชรพล คงพยัคฆ์





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

นายกฤษฎา พงศ์ธนากุล

นายติสรณ์ ทองดี

นายเตชินท์ อินทสิทธิ์

นายพัชรพล คงพยัคฆ์

รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

## บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ในลักษณะที่สเตเตอร์และโรเตอร์มีขั้วยื่น 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนประเภทนี้จะมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถใช้งานที่ความเร็วรอบสูง และมีแรงบิดสูง โดยในการออกแบบนั้นวิธีการวิเคราะห์ทางเส้นแรงแม่เหล็กและวิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีลีเมนต์โดยโปรแกรม FEMM จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล่อง เป็นต้น จากนั้นตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และศึกษาลักษณะโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ารวมถึงดูแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อหาค่าของมุมหรือตำแหน่งต่างๆ ที่กระแสและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปเพื่อประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้อัลกอริทึมมาช่วยในการวิเคราะห์ผลต่างๆมากมายหนึ่งในนั้นคือการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความแน่นอนในการประมวลผล โดยจะนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาฟังก์ชัน น้ำหนัก ค่าไบอัส ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ จากการบันทึกข้อมูลจากโปรแกรม FEM มาช่วยในการประมาณตำแหน่งมุมโรเตอร์แทนตัวตรวจจับ ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ (Encoder) ซึ่งจะช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวตรวจจับลงได้

# Rotor Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched Reluctance Machine

Mr.Kissada Pongtanakul

Mr.Tisorn Tongdee

Mr.Techin Intasit

Mr.Patcharaphon Kongphayak

Assoc.Prof.Dr.Supat Kittiratsatcha Advisor

Year 2016

## ABSTRACT

This thesis presents the study of a four phase Switched Reluctance Machine which its stator and rotor have 12 and 8 salient-poles respectively. This type of electrical rotating machine has a very simple structure, high operating speed and producing high electromechanical torque. In this study, flux tube analysis and finite element analysis using Finite Element Method Magnetic program are used to calculate some of machine variables, such as magnetic flux density and flux linkage. These variables from the two following methods are used to analyze. Artificial Neural Network (ANN) is implemented to find the angles or rotor positions at difference of current and flux for estimation the position of rotor.

There are several algorithms helping to analyze the results. One of them is the artificial neural networks. The artificial neural network has precisely computation. The artificial neural network is used to find the appropriate bias weight function for the given data. By recording data from the FEMM program, it helps to estimate the position of the rotor angle instead of the conventional position encoder. The angle of the rotor (Encoder), which will help to save the cost of the position encoder.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
กิตติกรรมประกาศ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.6 แผนการดำเนินโครงการ	4
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์	5
2.1.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์	5
2.1.2 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์	6
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งโรเตอร์	8
2.1.4 วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก	9
2.1.5 วงจรถ่ายเทพลังงาน	13
2.2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	14
2.2.1 ข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	14
2.2.2 ข้อเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	15
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม	15
2.3.1 หลักการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทเทียม	16
2.3.2 Back propagation Algorithm Back-propagation	17
บทที่ 3 การใช้โปรแกรมสำหรับการศึกษาและจำลองผล	18
3.1 การวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEMM)	18
3.1.1 การวาดโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า	18
3.1.2 การกำหนดวัสดุของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า	19
3.1.3 การกำหนดเมช	22
3.1.4 การแก้ปัญหา	23
3.1.5 การดูผลเฉลย	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.6 ตัวอย่างผลจากการ Simulation ของตำแหน่ง Aligned	24
3.1.7 ตัวอย่างผลจากการ Simulation ของตำแหน่ง Unaligned	25
3.1.8 ผลที่ได้จากการทำไฟไนท์เอลิเมนต์	25
3.2 การนำค่าที่ได้จากการทำไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ใน Lookup table	26
3.3 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในเครื่องจักรกลสวิทช์รีลักแตนซ์	29
3.3.1 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)	29
3.3.2 พิจารณาสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	31
3.3.3 การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูล	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
4.1 บทนำ	34
4.2 การทดลองหมุน SRM ในสภาวะการทำงานโหมดมอเตอร์	34
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	34
4.2.2 กราฟของกระแสและแรงดันในการทำงานสภาวะมอเตอร์	36
4.3 ผลการทดลองการหาความสัมพันธ์กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ	36
4.3.1 สมการที่เกี่ยวข้องในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ	36
4.3.2 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้จากการใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์	37
4.3.3 การเปรียบเทียบกราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับกระแสในการทำงาน	
โหมดมอเตอร์	38
4.4 ผลการทดลองการหา Energy Conversion Loop	38
4.4.1 Energy Conversion Loop ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์	38
4.4.2 การเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop ในการทำงานโหมดมอเตอร์	39
4.5 ผลการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ามุมของโรเตอร์	40
บทที่ 5	43
5.1 สรุปผล	43
5.2 ปัญหาที่พบ	44
5.3 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก Code ที่ใช้ในการทดลอง	47
ภาคผนวก ข ชุดวิจัย Switched Reluctance Machine	50
ภาคผนวก ค ชุดแบบแปลนจำลองของ Switched Reluctance Machine	55
ภาคผนวก ง บทความวิชาการ	59
ประวัติผู้เขียน	64

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟสแบบ 8/6	5
รูปที่ 2.2 ทิศทางการหมุนของโรเตอร์เมื่อขดลวดเฟส A ถูกกระตุ้น	6
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของโรเตอร์ (a) Unaligned Position, (b) Aligned Position	6
รูปที่ 2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned	7
รูปที่ 2.5 กราฟ Magnetizing ของ 8/6 SRM	9
รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.7 แกนเหล็กที่มีช่องอากาศอนุกรมกัน	10
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กที่ช่องอากาศต่ออนุกรมกัน	11
รูปที่ 2.9 แกนเหล็กที่มีช่องอากาศวางตัวแบบขนานกัน	11
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กที่ช่องอากาศต่อขนานกัน	12
รูปที่ 2.11 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเฟสในช่วงความชันเป็นบวก	13
รูปที่ 2.12 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน ( ก )	13
รูปที่ 2.12 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน ( ข )	13
รูปที่ 2.12 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน ( ค )	14
รูปที่ 2.13 ชั้นโครงสร้างโครงข่ายใยประสาทเทียม	16
รูปที่ 2.14 รูปแบบ Back-propagation neural network	17
รูปที่ 3.1 หน้าต่างหลักของ FEMM	18
รูปที่ 3.2 หน้าต่างเลือกประเภทของปัญหา	19
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า	19
รูปที่ 3.4 หน้าต่างของคุณสมบัติของวัสดุ	20
รูปที่ 3.5 แสดงการกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เลือกไว้	20
รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่างๆ	20
รูปที่ 3.7 การกำหนดค่ากระแสเฟส	21
รูปที่ 3.8 การกำหนดกระแสให้ขดลวด	21
รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงรูปจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าพร้อมที่จะหาค่าผลตอบ	21
รูปที่ 3.10 การกำหนด Boundary condition	22
รูปที่ 3.11 การตั้งค่า Boundary ให้กับขอบนอกของสเตเตอร์	22
รูปที่ 3.12 เมชที่สร้างจากโปรแกรม FEMM	23
รูปที่ 3.13 แสดงเส้นแรงแม่เหล็ก	23
รูปที่ 3.14 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	24
รูปที่ 3.15 ความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่ง Aligned	24
รูปที่ 3.16 ค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตำแหน่ง Unaligned	25
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละองศาต่างๆ ที่กระแส 30 A	26
รูปที่ 3.18 Lookup table block diagram	26
รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการกรองค่าที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์	27
รูปที่ 3.20 การกรองค่าอินพุตทั้งสองจุด	27

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.21 หน้าต่างข้อมูล	28
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับมุมของโรเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระแสและมุมต่างๆ	28
รูปที่ 3.23 แบบจำลองการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ (SRM)	29
รูปที่ 3.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง	30
รูปที่ 3.25 แสดงอินพุตเข้าเป็น กระแส และฟลักซ์ เอาท์พุทเป็น มุมของโรเตอร์	30
รูปที่ 3.26 แบบจำลองโครงข่ายเทียมที่ใช้ในการทดลอง	31
รูปที่ 3.27 แสดงหน้าจอของ Neural Network Training	32
รูปที่ 3.28 แสดง Best Validation Performance โดยอยู่ในครั้งที่ 75	32
รูปที่ 3.29 แสดง Validation ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกสอนแล้ว	33
รูปที่ 4.1 สวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์ ชนิด 4 phase, 8/6 SRM ที่ใช้ในการทดลอง	34
รูปที่ 4.2 Digital Oscilloscope	35
รูปที่ 4.3 Multimeter	35
รูปที่ 4.4 Current Probe	35
รูปที่ 4.5 Differential Probe	36
รูปที่ 4.6 กราฟของกระแสและแรงดัน	36
รูปที่ 4.7 กราฟแนวโน้มของเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ, ค่าความเหนี่ยวนำ, Torque และกระแส	37
รูปที่ 4.8 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำจากโปรแกรม Matlab	38
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับกระแส	38
รูปที่ 4.10 Energy Conversion Loop ตามทฤษฎี	39
รูปที่ 4.11 Energy Conversion Loop จาก Matlab	39
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop และ Magnetizing Curve	40
รูปที่ 4.13 เส้นที่ 1 คือแรงดันระหว่างขดลวดเฟส A เส้นที่ 2 คือกระแส เฟส A	40
รูปที่ 4.14 เส้นสีน้ำเงินคือตำแหน่งโรเตอร์จากการคำนวณในช่วง 1 loop เส้นสีแดงคือตำแหน่งโรเตอร์จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	41
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน จากการประมาณตำแหน่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	41
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าตำแหน่ง	43
รูปที่ ข.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์ (ซ้าย) มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า (ขวา)	51
รูปที่ ข.2 ภาพรวมของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์	51
รูปที่ ข.3 ตัวประมวลผล DSP320F2812	52
รูปที่ ข.4 วงจร IGBT Gate Drives	52
รูปที่ ข.5 วงจร Asymmetrical Half- Bridge Converter	53
รูปที่ ข.6 วงจรวัดกระแสแต่ละเฟส	53
รูปที่ ข.7 Inverter (บน) และ Rectifier (ล่าง)	54
รูปที่ ค.1 แบบจำลองมอเตอร์ SRM	56

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ ค.2 แบบจำลองสเตเตอร์ SRM  
รูปที่ ค.3 แบบจำลองโรเตอร์ SRM

หน้า  
57  
58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	คุณลักษณะเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดรีล็กแตนซ์	1
ตารางที่ 1.2	คุณลักษณะด้อยของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดรีล็กแตนซ์	1
ตารางที่ 1.3	แผนการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก	9
ตารางที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม	16
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ SRM	18
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์ที่กระแส 30 A	25
ตารางที่ 4.1	พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ	34



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ประสบผลสำเร็จไปด้วยดี ไม่ได้มาจากความรู้ความสามารถ และความตั้งใจของสมาชิกภายในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากการให้ความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายจึงขออนุญาตกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ และความรู้ต่างๆ เพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้าตลอดระยะเวลาเรื่อยมา

ขอขอบพระคุณ MEIDENSHA ที่ใช้งบประมาณในการสนับสนุนทุนในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ พี่ไพวรรณ เกิดตรวจ ที่ได้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ (PEARL LAB) ที่คอยเอาใจใส่และคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆห้องปฏิบัติการอื่นๆที่คอยสอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

และที่สำคัญโครงการนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยถ้าปราศจากพ่อและแม่ที่คอยสนับสนุนไม่ว่าจะเป็นทางด้านทุนทรัพย์ หรือการให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการนี้หวังว่าทุกท่านที่ได้กล่าวมา คงมีความสุข และประสบความสำเร็จในหน้าที่การงาน รวมถึงการดำเนินชีวิต โดยคณะผู้จัดทำหวังว่าอนาคตถ้ามีโอกาสหน้า คงได้ร่วมงานกับทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นนี้อีกต่อไป

คณะผู้จัดทำ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่ายประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วยื่น มอเตอร์ชนิดนี้ถูกค้นพบมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา เพราะถึงแม้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์จะง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เช่นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง เพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดที่ใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

โดยในตารางที่ 1.1 และตารางที่ 1.2 นั้นได้แสดงรายละเอียดของข้อดี และ ข้อด้อยของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ และเนื่องจากว่า SRM นั้นมีโครงสร้างแบบง่ายๆ ทำให้ต้นทุนในการผลิตไม่แพงมาก มีประสิทธิภาพในการทำงาน และ ให้แรงบิดสูงในทุกย่านความเร็ว เมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลประเภทอื่นๆ

#### ตารางที่ 1.1 คุณลักษณะเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดรีลักแตนซ์

ลักษณะเด่นของ SRM
1. ต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีโครงสร้างที่แข็งแรง
2. สามารถทำงานได้แม้ใดเฟสหนึ่งจะชำรุด
3. มีความหนาแน่นของพลังงานสูง
4. ประสิทธิภาพสูงในทุกย่านความเร็ว

#### ตารางที่ 1.2 คุณลักษณะด้อยของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดรีลักแตนซ์

ลักษณะด้อยของ SRM
1. มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง
2. การกระเพื่อมของแรงบิดสูง
3. การกระเพื่อมของกระแสเฟสสูง
4. จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการนำโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กสวิตซ์รีลักแตนซ์

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEMM) กับทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

1.2.4 เพื่อใช้ Neural Network เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6

## 1.3 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้

1.3.1 มีความเข้าใจหลักการทฤษฎีพื้นฐานและการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6

1.3.2 สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6 โดย Artificial Neural Network

จากที่กล่าวมา เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ ถือว่ามีคุณสมบัติบางประการต่างจากเครื่องจักรกลชนิดอื่นๆ ที่เรารู้จักกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานบางงานที่มีลักษณะเฉพาะที่ขอบเขตความสามารถของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ เพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีเก่าหรือเทคโนโลยีใหม่ๆ ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวกับการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6 โดยเริ่มจากการเรียนรู้พื้นฐานทางวงจรแม่เหล็ก รวมถึงการอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีผลต่อการควบคุมแรงบิดและการส่งถ่ายพลังงาน

1.4.2 ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ ซึ่งเป็นการเรียนรู้เบื้องต้น โดยศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพลังงานที่ได้จากเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1.4.3 ศึกษาการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น แรงบิดหรือความหนาแน่นของ ฟลักซ์ เป็นต้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ในทางทฤษฎี

1.4.4 ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6 ด้วยโปรแกรม Matlab จาก Artificial Neural Network

1.4.5 ทำการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 8/6 ด้วยหลักการที่ได้ศึกษาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีของเครื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ เพื่อให้เข้าใจ และสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการดำเนินโครงการ

1.5.2 คำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก

ในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ จำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น เส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิดทางไฟฟ้า กระแส ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นสามารถใช้ในการออกแบบการควบคุมได้จริง

1.5.3 การใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM

ในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์จำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น เส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิดทางไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถใช้ในการควบคุมได้จริง เราจึงใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ทำให้ต้องทำการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากทฤษฎีกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

1.5.4 การใช้โปรแกรม Matlab เพื่อประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้ ANN

ในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์จำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการทำงานของ SRM ซึ่งจะแบ่งการทำงานของโปรแกรม Matlab ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของค่าที่ได้จากโปรแกรม FEMM มาวิเคราะห์ในรูปของตาราง และ ส่วนของ Neural Network จะเป็นการวิเคราะห์จากค่าที่ได้จากโปรแกรม FEMM มาอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ขั้นสูง จากปัจจัยต่างๆเช่น ค่ากระแส, ฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นต้น

## 1.6 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงาน

หัวข้อ (ภาคเรียนที่ 1)	ช่วงเวลา							
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.
ศึกษาทฤษฎีของ SRM	↔							
	←-----→							
ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรม FEMM	↔	→						
	←-----→							
ใช้โปรแกรม FEMM เพื่อหาค่าต่างๆเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี			↔					
			←-----→					
การใช้ Neural Network ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ SRM					←-----→	→		
					←-----→	→		
ทดลองการควบคุม SRM						←-----→		
						←-----→		
ปรับปรุงและแก้ไข						←-----→		←-----→
						←-----→		←-----→
สรุปผล								↔
								←-----→



คือการดำเนินงานโครงการตามแผนงาน



คือการดำเนินงานโครงการตามเวลาจริง

## 1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานพนธ์

ปฏิญานพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ บทที่ 1 ความเป็นมาของโครงการ วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ วิธีการที่ใช้ แผนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง วงจรสมมูลทางแม่เหล็กทฤษฎีพื้นฐานเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด สวิตซ์รีลักแตนซ์

บทที่ 3 การคำนวณและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบ การวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก โปรแกรม FEMM

บทที่ 4 การใช้ Matlab ด้วยคำสั่ง Neural Network ในการศึกษาพฤติกรรมของ SRM

บทที่ 5 ผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Rotor) และ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) โดยมีแรงบิดที่เกิดจากการที่ส่วนเคลื่อนที่ได้หมุนไปยังตำแหน่งที่ทำให้ค่า ความเหนี่ยวนำมากที่สุดและสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ให้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุด ใน ตำแหน่งอื่นๆได้โดยการเลือกป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดชุดที่อยู่ในตำแหน่งถัดไป

#### 2.1.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด สวิตซ์รีลักแตนซ์นี้จะมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์และส่วนที่เคลื่อนที่หรือเรียกว่าโรเตอร์โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจำนวน 2 ชุดวางอยู่บนขั้วสเตเตอร์ที่ตรงข้ามกัน ซึ่งขดลวดทั้งสองชุดนี้อาจจะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนานก็ได้ แต่จะไม่มีขดลวดสนามหรือแม่เหล็กที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้การสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้นั้น ทำได้ง่ายและราคาถูกกว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทอื่นโดย ที่ขั้วสเตเตอร์และ ขั้วโรเตอร์นั้น จะมี ลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) ลักษณะดังกล่าวแสดงใน รูปที่ 2.1 นั้นเป็นเครื่องจักรกล แบบ 4 เฟส ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ



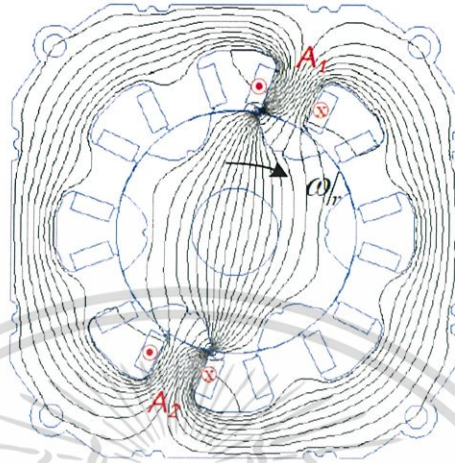
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟสแบบ 8/6 [1]  
โครงสร้างของเครื่องจักรกลชนิดนี้สามารถสร้างกี่เฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ จำนวนขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเฟส และจังหวะการสวิตซ์ในหนึ่งรอบ (Number of Stock per Revolution, ) โดยจำนวนจังหวะสวิตซ์ในหนึ่งรอบ ดังในสมการที่ 2.1

$$N_t = \frac{N_r N_s}{2} \quad (2.1)$$

โดยที่  $N_t$  คือจำนวนจังหวะการสวิตซ์ในหนึ่งรอบการหมุนของโรเตอร์,  $N_r$ คือจำนวนขั้วของโรเตอร์, และ  $N_s$  คือจำนวนขั้วของสเตเตอร์

### 2.1.2 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์

เนื่องจากว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์นี้มีโครงสร้างเป็นแบบขั้วยื่นทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ดังนั้นการทำงานจึงมีลักษณะคล้ายๆ กับสแต็ปป์มอเตอร์ โดยจะทำการกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ทีละเฟส โดยเรียงลำดับไปตามทิศทางการหมุน โดยพิจารณาการทำงานดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ทิศทางการหมุนของโรเตอร์เมื่อขดลวดเฟส A ถูกกระตุ้น [1]



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของโรเตอร์ (a) Unaligned Position, (b) Aligned Position [1]

#### 2.1.2.1 ตำแหน่ง Aligned

ณ ตำแหน่ง aligned นี้คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ดังรูปที่ 2.3 (b) ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะวางตัวอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุด และถ้าหากลองเคลื่อนโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่ง aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)

จากสมการที่ 2.2 พบว่า ถ้าความกว้างของช่องอากาศระหว่างขั้วของโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์ (Air-gap) มีค่าน้อยที่สุดจะส่งผลให้ค่ารีลักแตนซ์ ( $\mathcal{R}$ ) มีค่าต่ำที่สุดด้วย

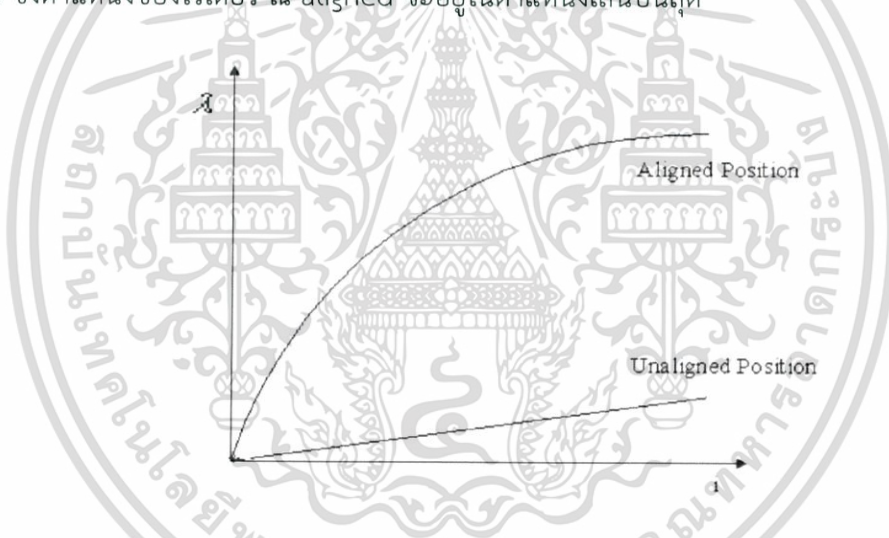
$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.2)$$

โดยที่  $l$  คือความกว้างของช่องอากาศ ค่า  $\mu$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และค่า  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านในแนวตั้งฉาก เมื่อค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำที่สุด จะส่งผลให้ค่าเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าสูงที่สุด ตามสมการที่ 2.3

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{total}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำของวงจร  $N$  คือจำนวนรอบของขดลวด และ  $\mathcal{R}_{total}$  คือ ค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจร

โดยปกติแล้วแล้ววัสดุที่นำมาใช้ทำมอเตอร์ จะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวขึ้น โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้จากเส้นกราฟ magnetizing ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งตำแหน่งของโรเตอร์ ณ aligned จะอยู่ในตำแหน่งเส้นบนสุด



รูปที่ 2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned [1]

### 2.1.2.2 ตำแหน่ง Unaligned

ณ ตำแหน่งนี้บริเวณตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) จะอยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3(a)

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดของเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์และถ้าหากลองเคลื่อนโรเตอร์ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพียงเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะเริ่มหมุนออกจากตำแหน่งนี้และไปหยุดที่ตำแหน่ง aligned ดังนั้น ณ จุด unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

จากรูปที่ 2.3(a) พบว่า การวางตัวของโรเตอร์ในลักษณะนี้จะทำให้ค่าความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าต่ำที่สุดด้วย ส่วนเส้นกราฟ magnetizing จะอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งนี้เส้นกราฟ magnetizing จะเป็นเส้นตรงและไม่มีปรากฏการอิ่มตัวเกิดขึ้น เนื่องจากค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศมีค่า มากกว่าค่ารีลักแตนซ์ของมอเตอร์มากพอสมควร ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{core} + \mathfrak{R}_{gap}} \quad (2.4)$$

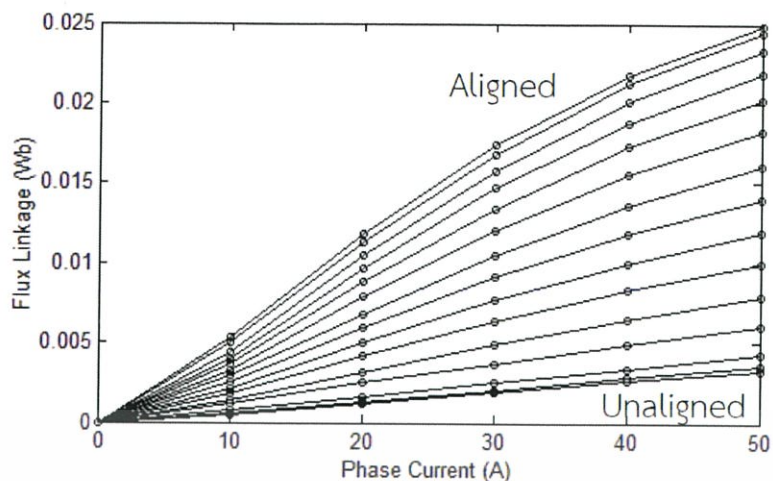
### 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์คู่ใดมีตำแหน่งตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณา เราจะเรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance,  $\mathfrak{R}$ ) ค่าน้อยที่สุด กลับกันถ้าตำแหน่งขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณานั้นอยู่ระหว่างขั้วของโรเตอร์นั้น จะเรียกตำแหน่งนี้ว่าอันอะไลน์ (Unaligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด นอกจากตำแหน่งของโรเตอร์ จะมีผลกับค่าความเหนี่ยวนำ (inductance,  $L$ ) แล้ว ยังมีตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีผลกับค่าความเหนี่ยวนำ นั่นก็คือกระแสฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ โดยความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถเขียน เป็นเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetizing Curves) โดยเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ เครื่องจักรกลแต่ละตัวจะลักษณะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้ทำโรเตอร์และ สเตเตอร์ ตัวอย่างของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กนั้นแสดงดังในรูปที่ 2.5 โดยจะแสดงความสัมพันธ์ ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ (flux linkage,  $\lambda$ ) จากตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ไปยังตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) ที่ค่ากระแสต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่บริเวณตำแหน่ง อันอะไลน์ นั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจะมีความเป็นเชิงเส้น เนื่องจากบริเวณนี้มีช่องอากาศสูง เนื่องจากอากาศมีความซาบซึม (permeability,  $\mu$ ) คงที่ แต่บริเวณตำแหน่งอะไลน์นั้น จะมีความ เป็นเชิงเส้นที่กระแสค่าต่ำๆ เท่านั้น เนื่องจากบริเวณนี้มีช่องอากาศแคบ ผลของแกนเหล็กต่อค่ารีลักแตนซ์จึงมากขึ้น ในการใช้งานเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นั้น จะต้องทำการสวิตซ์จ่าย กระแสให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์มีค่าเป็นบวก

$$\frac{dL_a}{d\theta_a} > 0$$

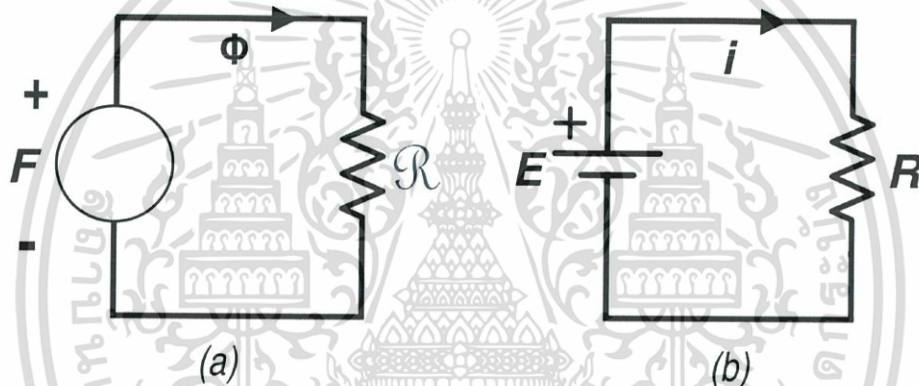
และสำหรับการใช้งานในลักษณะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะต้องทำการ สวิตซ์จ่ายแรงดันให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของ โรเตอร์มีค่าเป็นลบ

$$\frac{dL_a}{d\theta_a} < 0$$



รูปที่ 2.5 กราฟ Magnetizing ของ 8/6 SRM [1]

#### 2.1.4 วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้า [2]

วงจรสมมูลทางแม่เหล็กจะมีลักษณะคล้ายกับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.1 และจากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้หลักการคำนวณหาผลเฉลยของวงจรสมมูลทางแม่เหล็กได้โดยอาศัยหลักการคำนวณเดียวกับวงจรไฟฟ้าชนิดตัวต้านทาน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

วงจรสมมูลทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก
Voltage (E)	Magnetomotive Force (mmf) ( $\mathfrak{F}$ )
Current (i)	Magnetic Flux ( $\phi$ )
Resistance (R)	Reluctance ( $\mathfrak{R}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

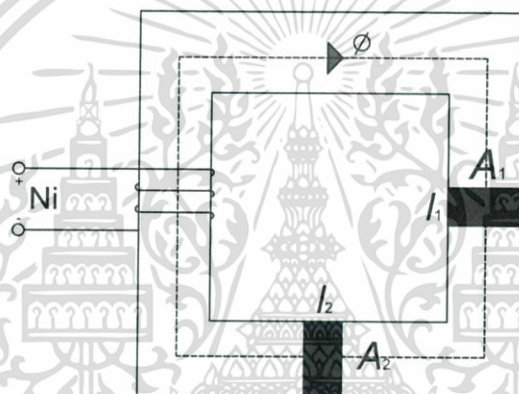
เมื่อ mmf เปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathfrak{F} = Ni \quad (2.10)$$

โดย  $N$  คือจำนวนรอบ และ  $i$  คือกระแสในขดลวด และเส้นแรงแม่เหล็กจะเปรียบเสมือนกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเราสามารถกำหนดนิยามของรีลักแตนซ์ได้ดังนี้

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\phi} = \frac{N^2}{L} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.11)$$

โดยที่  $l$  คือขนาดความยาวของวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่าน และการรวมของรีลักแตนซ์สามารถรวมได้สองรูปแบบคือ แบบอนุกรมและแบบขนาน โดยมีลักษณะการรวมเช่นเดียวกับตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 2.7 แกนเหล็กที่มีช่องอากาศอนุกรมกัน [2]

เมื่อเปรียบเทียบค่ารีลักแตนซ์ของแกนเหล็กและช่องว่างอากาศ จะพบว่าค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างอากาศจะมีค่าสูงกว่าค่ารีลักแตนซ์ของแกนเหล็กมาก ดังนั้นในการคำนวณจะกำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กนี้มีค่าเป็นอนันต์ และจากรูปที่ 2.7 สามารถหาค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างอากาศทั้งสองที่อนุกรมกันได้ดังนี้

ค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศที่ 1 คือ

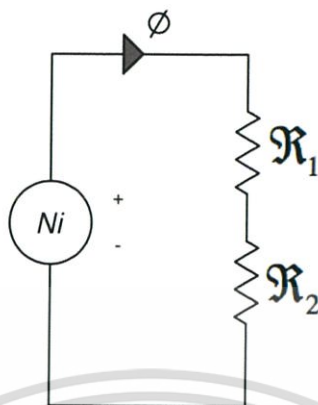
$$\mathfrak{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_0 A_1} \quad (2.12)$$

ค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศที่ 2 คือ

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_0 A_2} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 เราจะสามารถเขียนวงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ 2 ช่องต่ออนุกรมกันได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กที่ช่องอากาศต่ออนุกรมกัน [2]  
 ดังนั้นจากวงจรสมมูล เราจะสามารถคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi$ ) ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{R_1 + R_2} \tag{2.14}$$

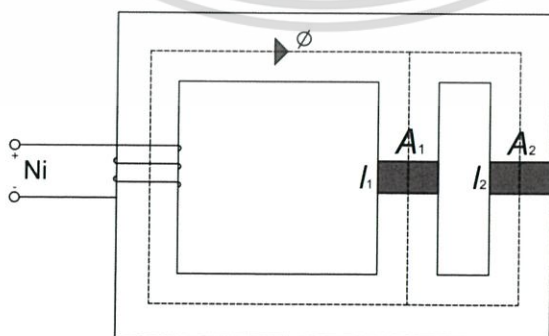
และค่าความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จาก

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{R_1 + R_2} \tag{2.15}$$

ในอีกกรณีหนึ่ง หากแกนเหล็กมีช่องอากาศสองช่องโดยวางตัวต่อกันในลักษณะขนานกัน ดังรูปที่ 2.4 การหาค่ารีลักแตนซ์รวมจึงเป็นการรวมค่ารีลักแตนซ์แบบขนาน ซึ่งเราจะนิยามส่วนกลับของค่ารีลักแตนซ์ว่าเป็น ค่า Permeance ( $\mathcal{P}$ )

ดังนั้น ค่า Permeance ( $\mathcal{P}$ ) จึงสามารถหาได้จาก

$$\mathcal{P} = \frac{1}{R} = \frac{\mu A}{l} \tag{2.16}$$



รูปที่ 2.9 แกนเหล็กที่มีช่องอากาศวางตัวแบบขนานกัน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

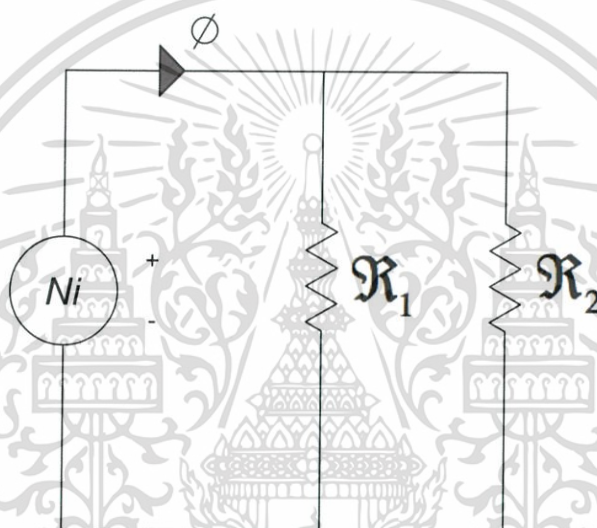
ค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศที่ 1 คือ

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_0 A_1} = \frac{1}{\wp_1} \quad (2.17)$$

ค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศที่ 2 คือ

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_0 A_2} = \frac{1}{\wp_2} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.9 เราจะสามารถเขียนวงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ 2 ช่องต่อขนานกันได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กที่ช่องอากาศต่อขนานกัน [2]

ดังนั้นจากวงจรสมมูล เราสามารถคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi$ ) ได้ดังนี้

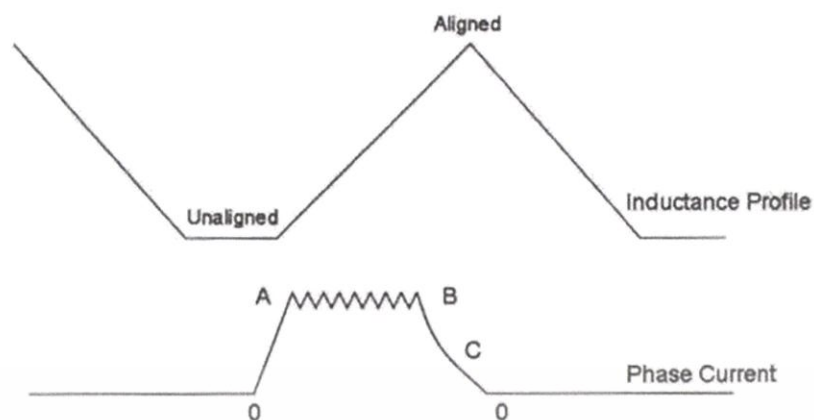
$$\phi = \mathcal{N}(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.19)$$

และค่าความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จาก

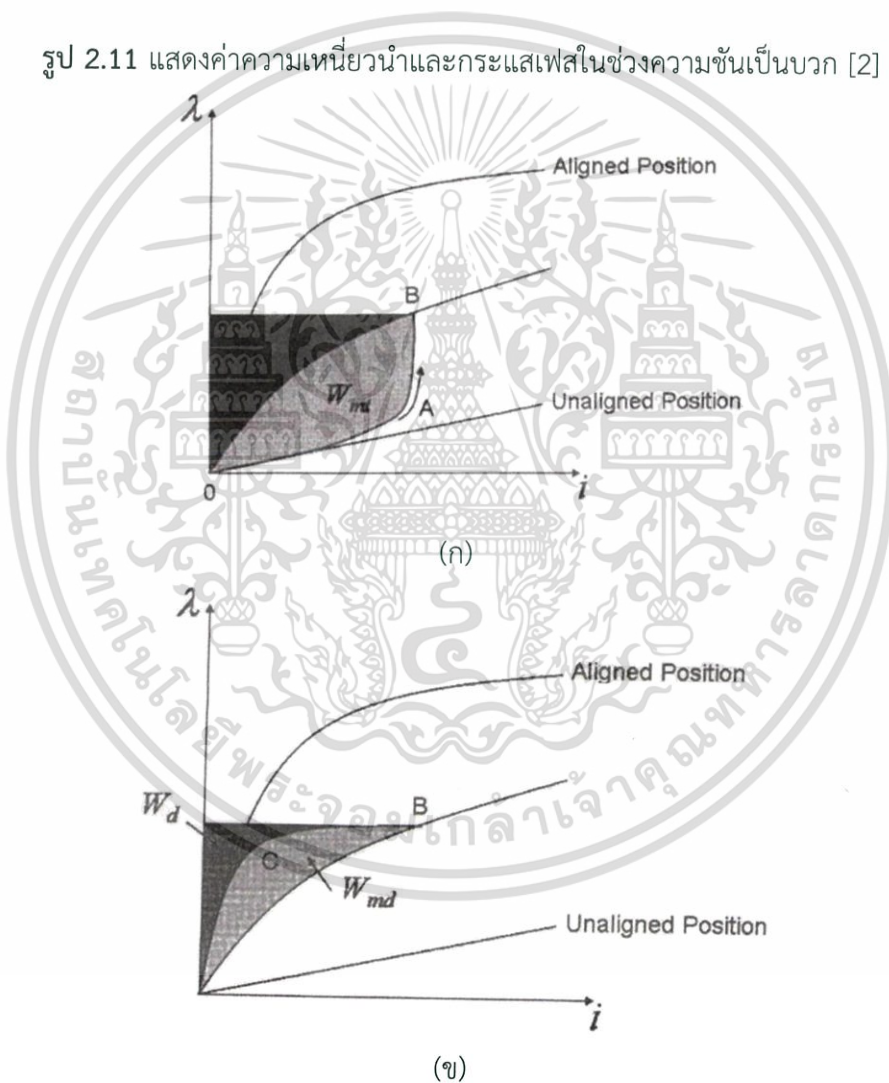
$$L = \frac{N\phi}{i} = N^2(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

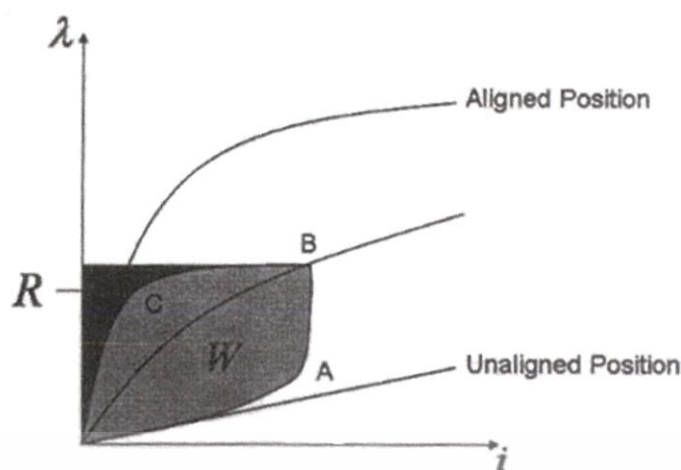
## 2.1.5 วงจรถ่ายเทพลังงาน



รูป 2.11 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเฟสในช่วงความชันเป็นบวก [2]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูป 2.12 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน [2]

เมื่อป้อนแรงดันดีซีลิงค์ค่าบวกให้กับขดลวด เฟสของกระแสจะเพิ่มขึ้นจากจุด 0 ไปยังจุด A ในขณะที่ โรเตอร์เคลื่อนไปเป็นมุมเพียงเล็กน้อยและเมื่อขั้วของโรเตอร์กับสเตเตอร์เริ่มทับซ้อนกัน ค่าความเหนี่ยวนำของเฟสและแรงดันต้านกลับจะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสลดลง และจากจุด A ไปยังจุด B จะควบคุมกระแสให้คงที่แต่เส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากรูป 2.12 ก จะเห็นว่าจากจุด 0 ถึงจุด B จะมีพลังงานจากแหล่งจ่ายเท่ากับ  $W_{fc} + W_{mt}$  โดยพื้นที่  $W_{fc}$  คือ stored field energy และ พื้นที่ของ  $W_{mt}$  คือพลังงานที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้โดยทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายเพียงครั้งเดียว จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกล จากรูป 2.12 ข เมื่อต้องการลดกระแสสู่ศูนย์ขดลวดเฟสจะถูกต่อเข้ากับค่าลบของดีซีลิงค์ จากจุด B ไปยังจุด C นั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จากจุด C ไปยังจุด 0 อัตราการลดลงของกระแสจะลดลงเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าแรงดันต้านกลับที่สูงขึ้น พลังงานส่วนพื้นที่  $W_d$  จะถูกถ่ายคืนกลับสู่แหล่งจ่ายและพื้นที่  $W_{md}$  จะเป็นส่วนที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ และจากรูป 2.12 ค จะเห็นว่าเมื่อพิจารณามอเตอร์ครบรอบแล้วจะได้ว่า พลังงานที่เปลี่ยนเป็นพลังงานกลจะมีค่าเท่ากับพื้นที่  $W$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $W_{mt} + W_{md}$  และพลังงานที่ถูกถ่ายคืนกลับสู่แหล่งจ่ายเท่ากับพื้นที่  $R$  และพลังงานที่ได้รับจากแหล่งจ่ายทั้งหมดเท่ากับ พื้นที่  $W + R$

## 2.2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

### 2.2.1 ข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีลักษณะพิเศษเฉพาะที่ถูกสร้างขึ้นมาให้มีความแข็งแรงกว่า AC และ DC มอเตอร์และมีหลายความเร็วในการหมุน ซึ่งข้อดีข้อของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ กล่าวได้ดังนี้

- 1) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโครงสร้างง่ายและมีราคาถูก ไม่มีขดลวดที่โรเตอร์และแม่เหล็กถาวร
- 2) ไม่ลัดวงจรถึงกันระหว่าง DC bus เพราะขดลวดต่ออนุกรมกัน
- 3) การระบายความร้อนทำได้ง่าย

- 4) คุณสมบัติของ Torque – Speed ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สามารถออกแบบสำหรับการใช้งานเฉพาะได้ง่ายกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ
- 5) แรงบิดเริ่มเดินสูง
- 6) แรงดันเปิดวงจร และกระแสลัดวงจรในขณะที่เกิดฟอลต์ เป็นศูนย์หรือน้อยมาก
- 7) โรเตอร์ทนความร้อนได้สูงมาก เนื่องจากไม่มีแม่เหล็กถาวร
- 8) สามารถออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้ใช้งานที่ทั้งความเร็วรอบสูงและความเร็วรอบต่ำได้
- 9) ขดลวดสเตเตอร์แยกอิสระต่อกัน
- 10) เมื่อมีเฟสใดเฟสหนึ่งเสียหายก็สามารถทำงานต่อได้

### 2.2.2 ข้อเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

- 1) เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ต้องการช่องอากาศ (Air gap) ที่แคบ ซึ่งมีผลกับกำลังและแรงบิด ทำให้ยุ่งยากในการผลิต ดังนั้นแรงบิดที่สร้างจึงมีการกระเพื่อมของแรงบิดสูง
- 2) ต้องการการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่แม่นยำ
- 3) ค่าใช้จ่ายสูงในส่วนของ การออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน
- 4) เกิดปัญหาเสียงรบกวน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของโรเตอร์
- 5) สายไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีจำนวนมาก
- 6) ไม่สามารถใช้งานกับไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับได้โดยตรง ต้องมีวงจรขับเคลื่อนทำงานร่วมกัน
- 7) กระแสที่แหล่งจ่ายกระแสตรงมีการกระเพื่อมมากจึงจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่หรือต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีความถี่สูง

### 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นแนวคิดที่ถูกออกแบบให้ทำงานเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล (Processing Elements) ซึ่งมีเซลล์หลายๆตัวที่ทำหน้าที่คล้ายกับเซลล์สมองของมนุษย์ โดยที่แต่ละเซลล์จะโยงใยติดต่อกันโดยส่งสัญญาณออกเป็นเอาต์พุตออกมาในส่วนที่เรียกว่า แอ็กซอน (Axon) ในแต่ละเซลล์จะรับรู้ข้อมูลข้อมูลจากหลายทาง แล้วส่งต่อไปยังเซลล์อื่นๆ โดยใช้หลักการ Synaptic Strength ของการเชื่อมโยงเซลล์สมอง ส่วนวิธีการประมวลผลภายใน โดยเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีจุดเชื่อมโยงระหว่างการทำงาน เป็น 2 ลักษณะ คือลักษณะ การกระตุ้น (Excitatory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามา มีความถี่สูงขึ้น และลักษณะการยับยั้ง (Inhibitory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามามีความถี่ลดลง ซึ่งแบบจำลองของ Neural Network จะมีอัตราขยายหรือหดได้เมื่อถูกกำหนดด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง เซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

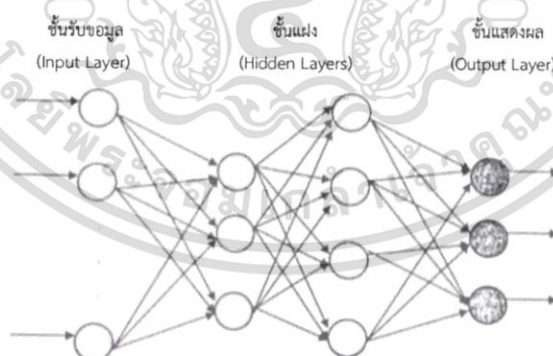
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง เซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม [2]

ลำดับ	เซลล์ประสาท	เซลล์ประสาทเทียม
1	ตัวเซลล์ (Cell Body)	ยูนิต (Unit)
2	เดนไดรต์ (Dendrites)	ตัวแปรอินพุต (Input)
3	แอกซอน (Axon)	ตัวแปรเอาต์พุต (Output)
4	ไซแนปส์ (Synapse)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางที่มีโครงสร้าง เป็นลักษณะของโครงข่ายเชื่อมโยงกันระหว่างหน่วย ซึ่งสามารถที่จะรับข้อมูลและปรับตัวเข้ากับ สถานการณ์หรือสิ่งแวดล้อมที่กำลังเผชิญอยู่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการสร้างระบบคอมพิวเตอร์อัจฉริยะ (Intelligent Computer System) อย่างได้ผล นอกจากนี้ ANNs ยังเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณและการจดจำ เช่น การจำแนกข้อมูล (Data Classification) การทำนายเหตุการณ์ (Forecasting) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression) การกรองสัญญาณ Noise (Noise Filtering) เป็นต้น

### 2.3.1 หลักการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

การจำลองระบบโครงสร้างประสาทเทียม มีการจำลองเป็นชั้น ๆ โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) ชั้นแฝง (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output Layer) ในแต่ละชั้น ประกอบด้วยหน่วย (Node) ในชั้นแฝงประกอบด้วยหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลไปสู่ชั้นแสดงผล และใน ชั้นแต่ละชั้นแสดงผล และในชั้นแสดงผลประกอบด้วยหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งตัวแปรด้านออก (Output) ใน ระหว่างชั้นแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมต่อ (Link) แต่ละการเชื่อมต่อจะมีค่าน้ำหนัก (Weights) เฉพาะสำหรับทำหน้าที่แทนค่าความแข็งแรง (Strength) ของการเชื่อมต่อของเซลล์สมองมนุษย์ โครงสร้างของระบบ โครงสร้างข่ายประสาทเทียมแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ชั้นโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ Neural networks คือเมื่อมี input เข้ามายัง network ก็เอา input มาคูณกับ weight ของแต่ละขา ผลที่ได้จาก input ทุก ๆ ขาของ neuron จะเอามารวมกัน แล้วก็เอามาเทียบกับ threshold ที่ กำหนดไว้ ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่า threshold แล้ว neuron ก็จะ ส่ง output ออกไป output นี้ก็จะถูกส่งไปยัง input ของ neuron อื่น ๆ ที่เชื่อมกันใน network ถ้า ค่า น้อยกว่า threshold ก็จะไม่เกิด output เขียนออกมาได้ดังนี้

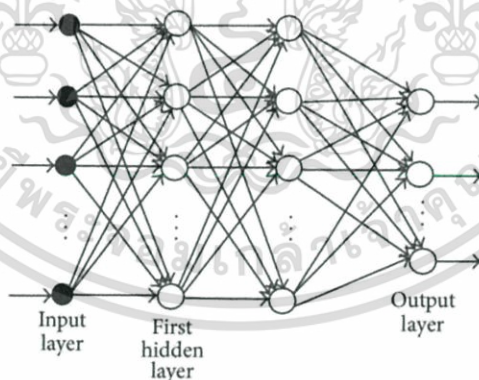
$$\text{if (sum(input * weight) > threshold) then output}$$

(2.11)

สิ่งสำคัญคือเราต้องทราบค่า weight และ threshold สำหรับสิ่งที่เราต้องการ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ รู้จำ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้ โดยการสอนให้มัน รู้จัก pattern ของ สิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จำ เรียกว่า "back propagation" ซึ่ง เป็นกระบวนการ ย้อนกลับของการรู้จำ ในการฝึก feed-forward neural networks จะมีการใช้ อัลกอริทึมแบบ back-propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนัก คะแนนของเครือข่าย (network weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ค่าที่ได้รับ (output) จาก เครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความ ผิดพลาด ซึ่งค่า ความผิดพลาดนั้นจะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

### 2.3.2 Back propagation Algorithm Back-propagation

เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทวิธี หนึ่งทีนิยมใช้ใน multilayer perceptron เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้ เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อจะ ขึ้นกับ ความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ ต้องการ พิจารณารูปต่อไปนี้ ประกอบ



รูปที่ 2.14 รูปแบบ Back-propagation neural network [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การใช้โปรแกรมสำหรับการศึกษาและจำลองผล

ในบทนี้จะเป็นการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEMM) เพื่อการวิเคราะห์หาเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มุมมองต่างๆ รวมถึงที่กระแสต่างๆ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ใน Lookup table ใน MATLAB เพื่อหากราฟแนวโน้มของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

#### 3.1 การวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์

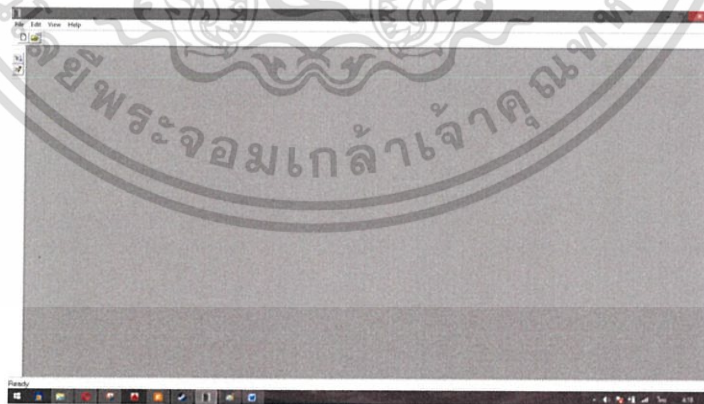
ในการเก็บข้อมูลคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM นี้จะใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEMM) ในการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กของ SRM โดย SRM ที่ใช้นั้นเป็นแบบ 8/6 โดยในการวิเคราะห์นั้น จะอาศัยข้อมูลจากผู้ผลิตด้วย เช่น ขนาดของโรเตอร์ , ขนาดของสเตเตอร์ รวมไปถึงชนิดของแกนเหล็ก โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ SRM จะแสดงไว้ในตารางข้างล่าง ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ SRM


กำลังไฟฟ้าพิกัด (Power)	2.32 kW
ความเร็วรอบพิกัด (Speed)	6000 rpm
แรงดันไฟฟ้าพิกัด (V)	48 VDC

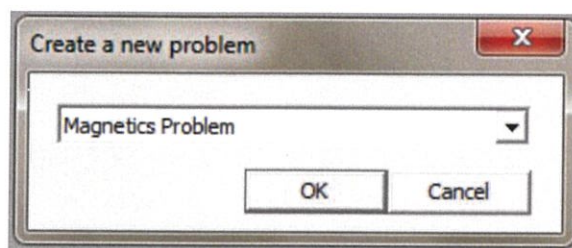
##### 3.1.1 การวาดโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ FEMM คือการนำโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์จากโปรแกรม Auto CAD เข้าสู่โปรแกรม FEMM โดยไฟล์ของโครงสร้างจะต้องเป็นไฟล์ .dxf ให้เริ่มต้นโดยการเปิดโปรแกรม FEMM จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.1



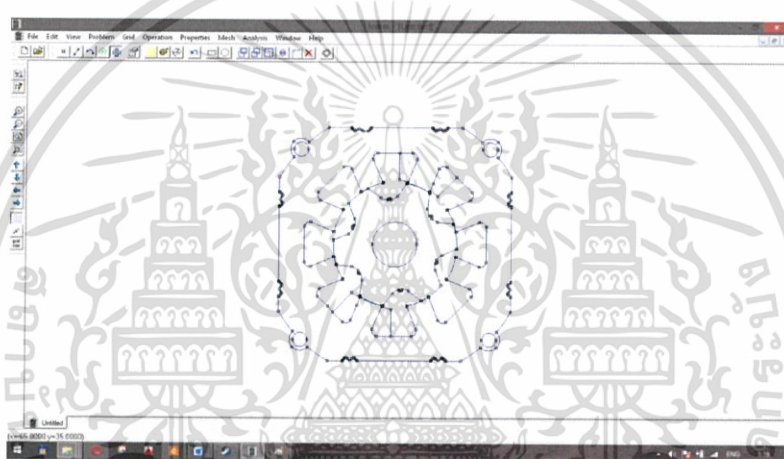
รูปที่ 3.1 หน้าต่างหลักของ FEMM

กดปุ่ม  เพื่อเปิดปัญหาใหม่ จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกดังรูปที่ 3.2 ให้เลือกเป็นปัญหาทางแม่เหล็ก “Magnetics Problem”  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 หน้าต่างเลือกประเภทของปัญหา

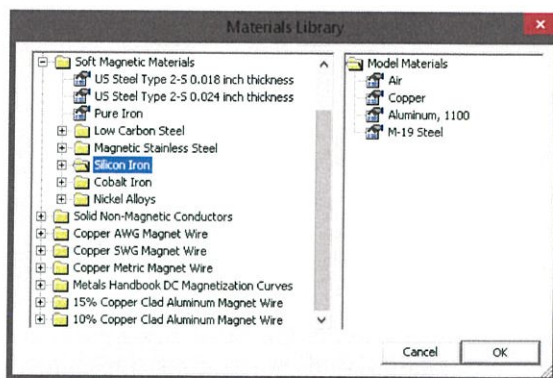
ทำการนำเข้าโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้ทำโดยโปรแกรม AutoCAD มาสู่โปรแกรม FEMM ตามแบบที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า

### 3.1.2 การกำหนดวัสดุของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ขั้นตอนต่อไปเป็นการเลือกชนิดของวัสดุเข้ามาในแบบจำลองที่วาดขึ้นให้เลือก "Properties" และ "Material Library" ก็จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.4 ให้เลือก Air, Copper, M-19 Steel และ Aluminium, 1100 จาก Library ทางช่องซ้ายมือแล้วลากมาใส่ในช่องขวามือ สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า



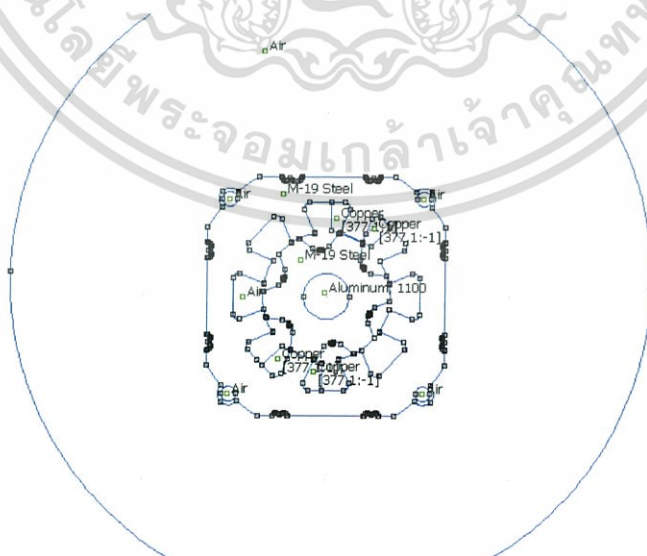
รูปที่ 3.4 หน้าต่างของคุณสมบัติของวัสดุ

ในการกำหนดวัสดุให้กับจุดคุณสมบัติ ให้เลือกปุ่ม  และคลิกเมาส์ปุ่มขวาที่จุดคุณสมบัติและจุด จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.5 ให้เลือกวัสดุในช่อง “Block Type”



รูปที่ 3.5 แสดงการกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เลือกไว้

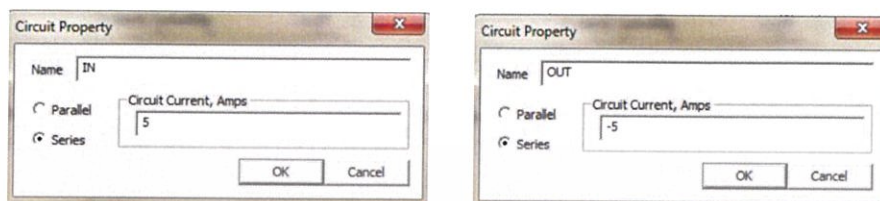
ให้กำหนดวัสดุต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่างๆ

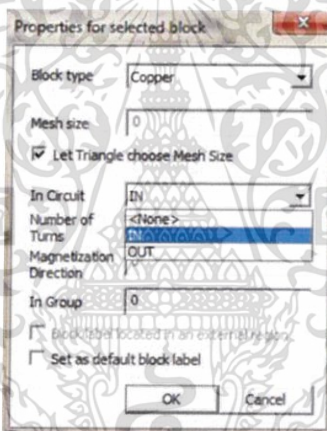
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่อง สล็อต ที่กำหนดเป็น Copper นั้นจะเป็นขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเราจะกำหนดเฟสเดียวเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกระแสขาเข้าและกระแสขาออก วิธีการกำหนดพิกัดและทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขดลวด ให้เลือก “Properties” “Circuits” และ “Add Properties” จะปรากฏหน้าต่างดังรูป 3.7 กำหนดให้กระแสไหลเข้าเป็นบวก และกระแสไหลออกเป็นลบ

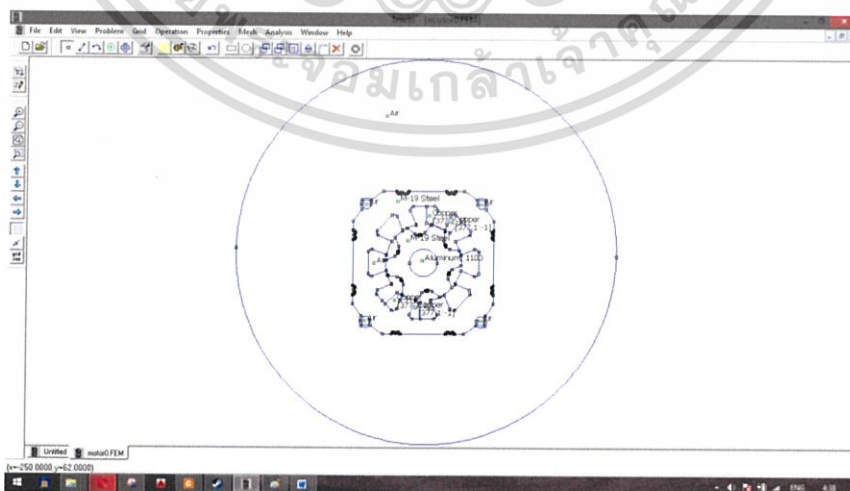


รูปที่ 3.7 การกำหนดค่ากระแสเฟส

หลังจากนี้ให้กำหนดคุณสมบัติของขดลวดในจุดคุณสมบัติ Copper ในช่อง “In Circuit” ดังแสดงในหน้าต่างคุณสมบัติดังรูปที่ 3.8 สุดท้ายจะได้รูปจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังรูปที่ 3.9



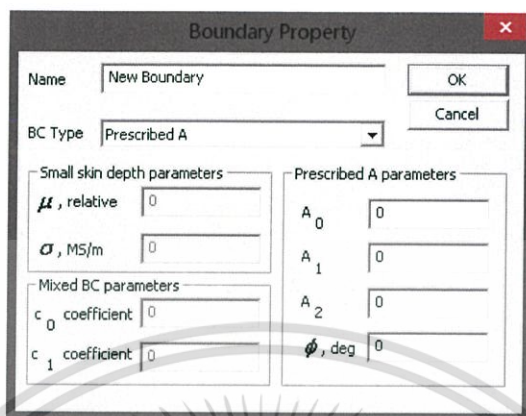
รูปที่ 3.8 การกำหนดกระแสให้ขดลวด



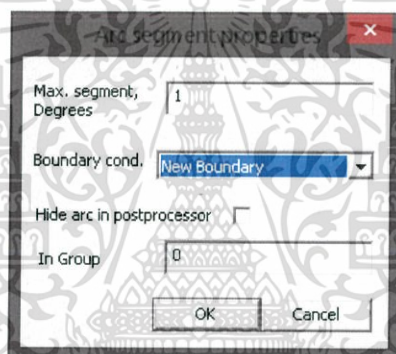
รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงรูปจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าพร้อมที่จะหาผลตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดท้ายสุดก่อนวิเคราะห์ คือ การกำหนดคุณสมบัติขอบเขต หรือ “Boundary Conditions” ซึ่งถ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า นั้นจะกำหนดให้เป็นแบบ วิธีการสร้างคุณสมบัติขอบเขตให้เลือก “Properties” “Boundary” และ “Add Properties” กำหนดค่าต่างๆดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 การกำหนด Boundary condition

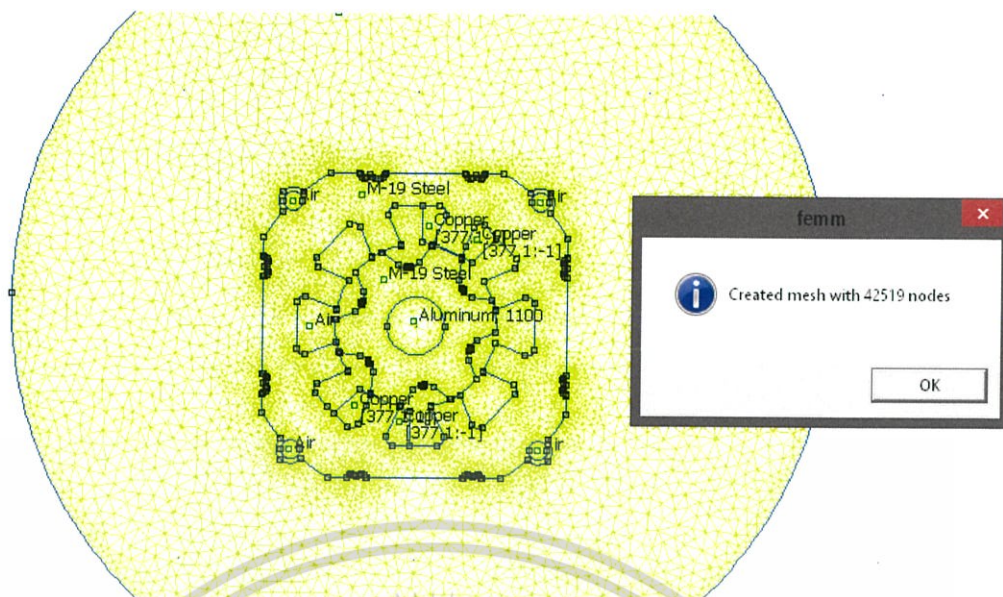


รูปที่ 3.11 การตั้งค่า Boundary ให้กับขอบนอกของสเตเตอร์

### 3.1.3 การกำหนดเมช

ต่อไปให้สร้างเมช หรือ Mesh สำหรับการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถสร้างได้โดยกดปุ่ม ตัวโปรแกรมจะสร้างเมชขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังรูปที่ 3.12 เราสามารถ กำหนดขนาดของเมชขึ้นมาได้โดยการคลิกเมาส์ปุ่มขวา เส้นที่เลือกดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสีแดง ที่หน้าต่างคุณสมบัติ ให้เลือกเครื่องหมายถูกของ “Choosing Mesh- Spacing- Automatically” ออก จากนั้นให้กำหนดจำนวนเมชที่ “Local element size long line” ซึ่งค่าอย่างน้อยหมายความว่า จำนวนเมชยิ่งมาก บริเวณพื้นที่ไหนต้องการความละเอียดหรือความถูกต้องของคำตอบสูง จำเป็นต้องมีจำนวนเมชนั้นยิ่งมาก เช่น ที่บริเวณช่องอากาศหรือมุมของขั้วของโรเตอร์ หรือ ขั้วสเตเตอร์ ซึ่งยิ่งโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สร้างมีจำนวนเมชมากเท่าไร ความละเอียดและความถูกต้องของคำตอบก็ยิ่งมากขึ้นเช่นกัน แต่ยังมีจำนวนเมชมากโปรแกรมก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้น ผู้ใช้จึงจำเป็นต้องเลือกกำหนดจำนวนเมชให้เหมาะสมกับปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



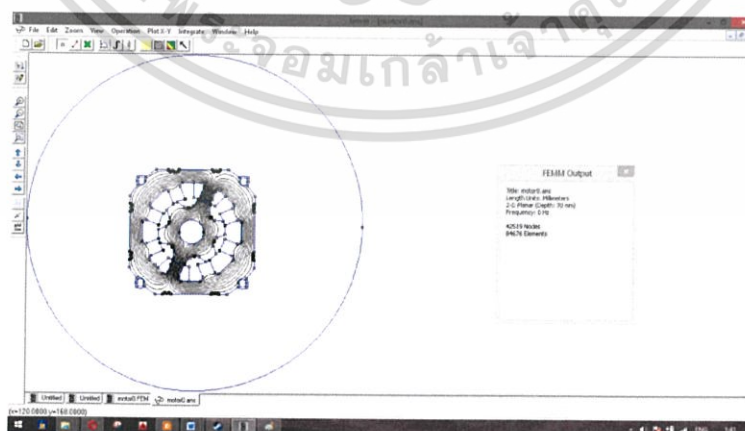
รูปที่ 3.12 เมชที่สร้างจากโปรแกรม FEMM

### 3.1.4 การแก้ปัญหา

หลังจากที่ได้กำหนดจำนวนเมชแล้วให้เลือกที่ปุ่ม  เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณหาผลเฉลย จำนวนเมชจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ระหว่างการคำนวณจะปรากฏหน้าต่างแสดงจำนวน ครั้งของ Iteration และความก้าวหน้าของการคำนวณ เมื่อคำนวณเสร็จหน้าต่างดังกล่าวจะหายไป จะสามารถดูผลเฉลยต่อไปได้

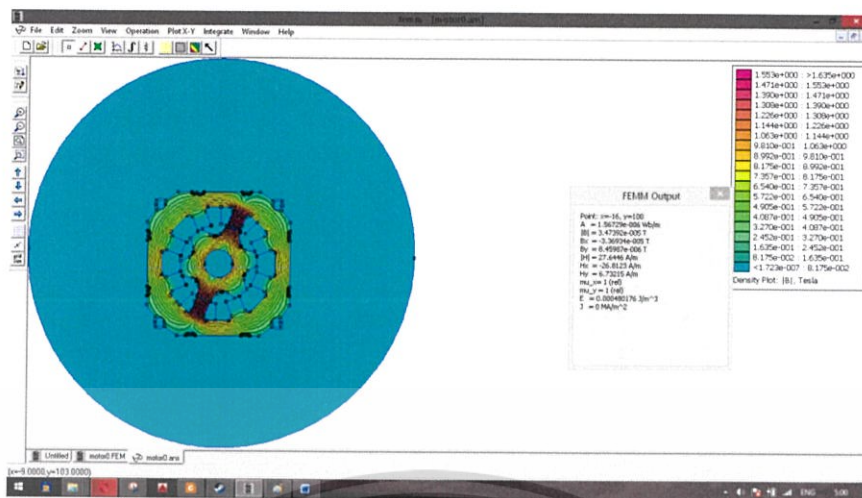
### 3.1.5 การดูผลเฉลย

เมื่อกดปุ่ม จะปรากฏเส้น Equipotential Flux Line ขึ้นมาดังรูปที่ 3.13 ผู้ใช้สามารถเลือกดูผลเฉลยอย่างอื่นได้โดยการเลือก “View” ตัวอย่างเช่น ต้องการดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เลือก “View” “Density Plot” จะปรากฏหน้าต่าง Dialog ให้เลือก “Flux Density Plot” ผลเฉลยจะปรากฏดังแสดงในรูปที่ 3.13



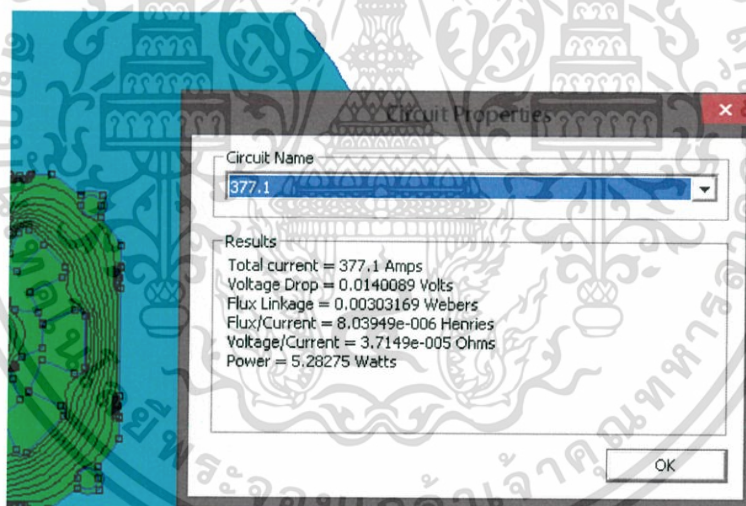
รูปที่ 3.13 แสดงเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

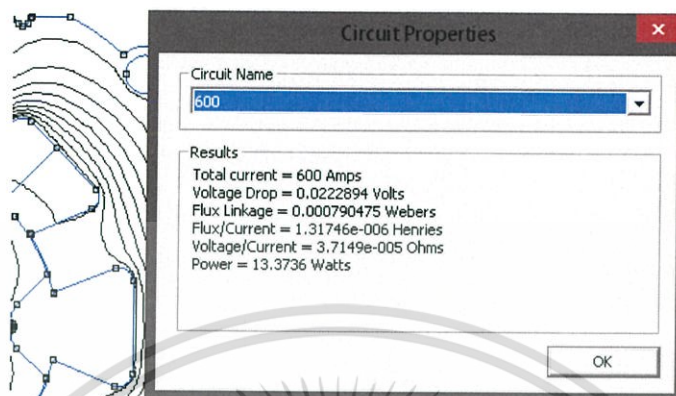
### 3.1.6 ตัวอย่างผลจากการ Simulation ของตำแหน่ง Aligned ความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่ง Aligned



รูปที่ 3.15 ความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่ง Aligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 ตัวอย่างผลจากการ Simulation ของตำแหน่ง Unaligned ความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่ง Unaligned

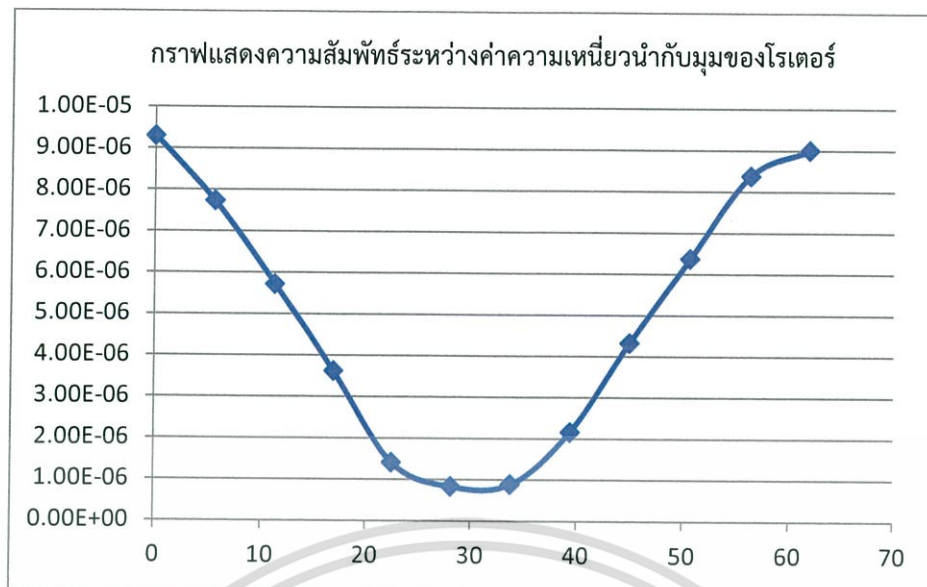


รูปที่ 3.16 ค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตำแหน่ง Unaligned

### 3.1.8 ผลที่ได้จากการทำไฟไนท์เอลิเมนต์ ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์ที่กระแส 30 A

Rotor Position	Inductance
0	9.30E-06
5.625	7.73E-06
11.25	5.72E-06
16.875	3.62E-06
22.5	1.41E-06
28.125	8.32E-07
33.75	8.85E-07
39.375	2.16E-06
45	4.32E-06
50.625	6.37E-06
56.25	8.38E-06
61.875	9.00E-06

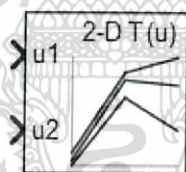
จากการรวมค่าความซึมซาบของแม่เหล็กในตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ ทำให้ทราบถึงลักษณะการประพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำของมอเตอร์จากตำแหน่ง aligned ไปยังตำแหน่ง unaligned ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงพฤติกรรมของตัวเหนียวนำในแต่ละองศาต่างๆ ที่กระแส 30 A

### 3.2 การนำค่าที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ใน Lookup table

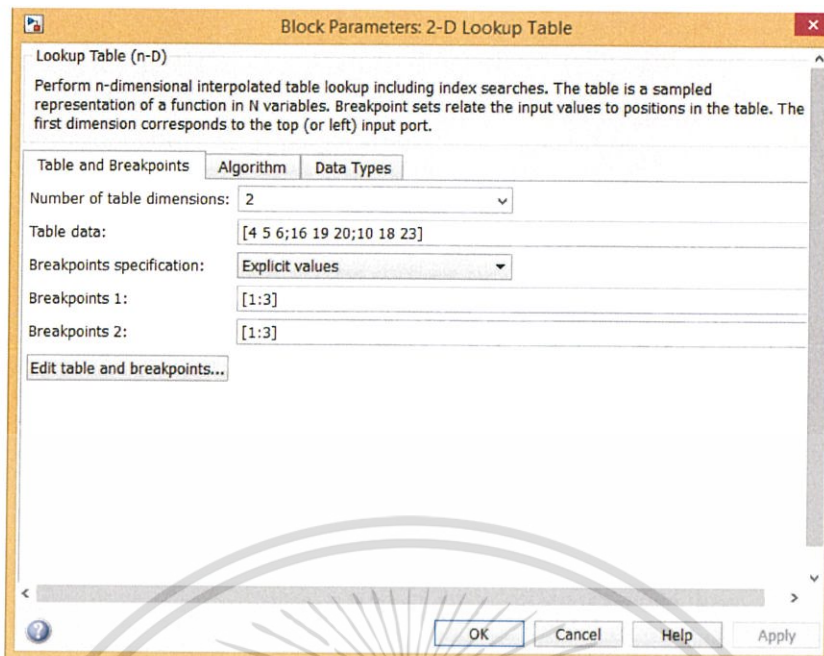
ในการใช้ Lookup table ของ Mat lab นั้นจะเป็นการเก็บข้อมูลต่างๆ ไว้ใน block diagram โดยในการเก็บค่านั้นจะเก็บเป็นเมตริกซ์และในการเรียกใช้ค่านั้นจะต้องป้อนค่าอินพุตเข้าไปสองค่าโดยอินพุตที่ป้อนเข้าจะต้องมีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 3.18 Lookup table block diagram

#### 3.2.1 ขั้นตอนการทำและกราฟที่ได้จาก Lookup table

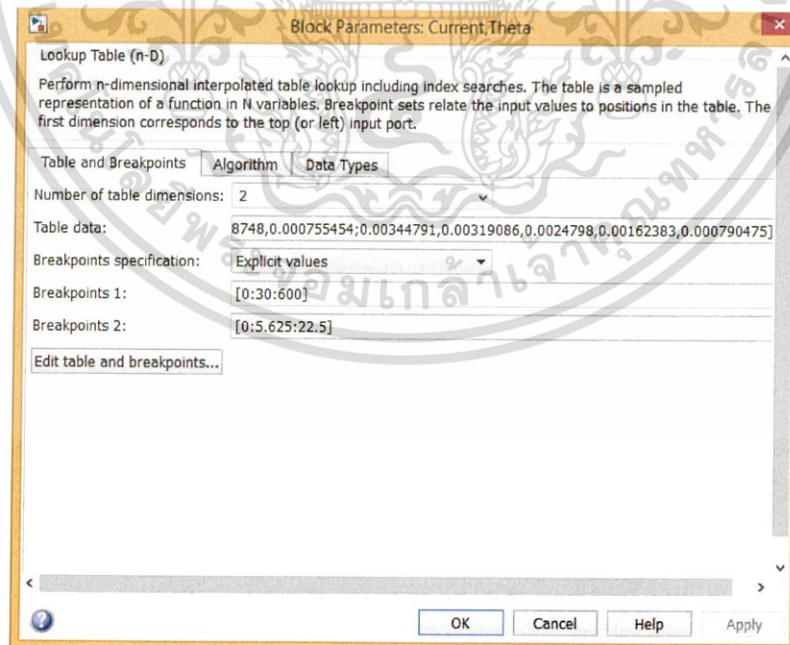
นำค่าที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในช่อง Table data โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะอยู่ในรูปแบบของตารางโดยมีเครื่องหมาย “ ; ” เป็นตัวบอกว่าขึ้นบรรทัดใหม่



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการกรองค่าที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.2.2 การนำค่าอินพุตมาป้อนใส่โดยจาก block diagram

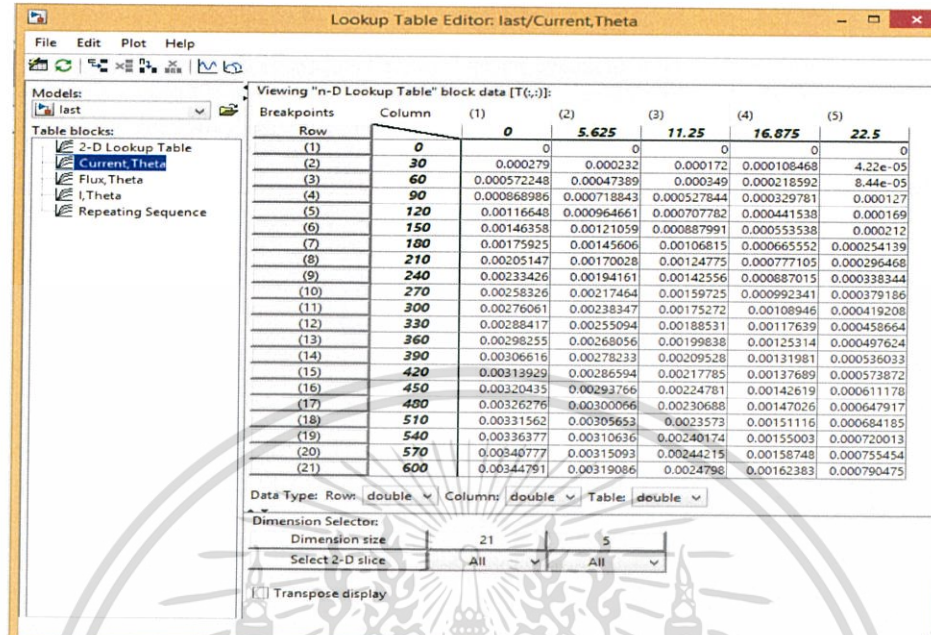
ที่ใช้นั้นจะใช้ 2 อินพุตเป็นตัวรับค่าเข้าและได้ 1 เอาท์พุทออกมาโดยค่าเอาท์พุทที่ได้นั้นจะเป็นค่าที่ได้นั้นจะเป็นค่าที่ได้จากการ interpolate ของข้อมูลแล้ว โดยค่าอินพุตที่ใส่เข้าไปนั้นจะใส่ในช่อง Breakpoint 1 กำหนดให้เป็นค่าของกระแสฟ้า และ Breakpoint 2 กำหนดให้เป็นมุมของโรเตอร์ โดยค่าที่ใส่เข้านั้นมีค่าเท่ากับ [0:30:600] และ [0:5.625:22.5] ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 การกรอกค่าอินพุตทั้งสองจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

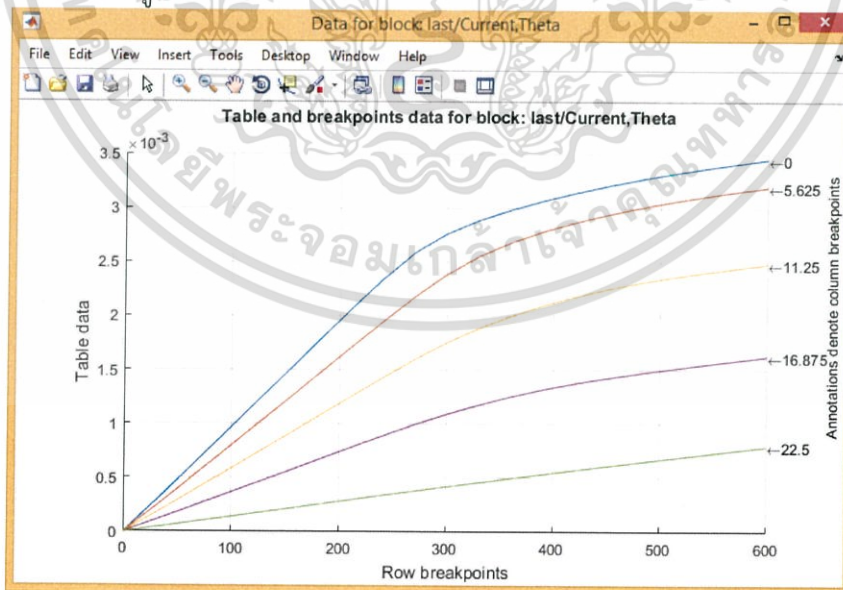
3.2.3 ข้อมูลที่ได้จากการป้อนอินพุตทั้งสองเข้าไปกับค่าที่มีใน Table data โดยค่าที่ใส่ใน Table data นั้นจะได้รับการจำลองโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีรูปแบบตาราง ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หน้าต่างข้อมูล

หมายเหตุ หน้าต่างการแสดงผลข้อมูลดังรูปที่ 3.21 จะไม่สามารถเปิดขึ้นมาได้ถ้าข้อมูลไม่ครบตามที่กำหนดไว้

3.2.4 การแสดงกราฟของข้อมูลที่ได้จากตารางเข้าไปที่  โดยผลที่ได้จากการ simulation จะดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับมุมของโรเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระแสและมุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

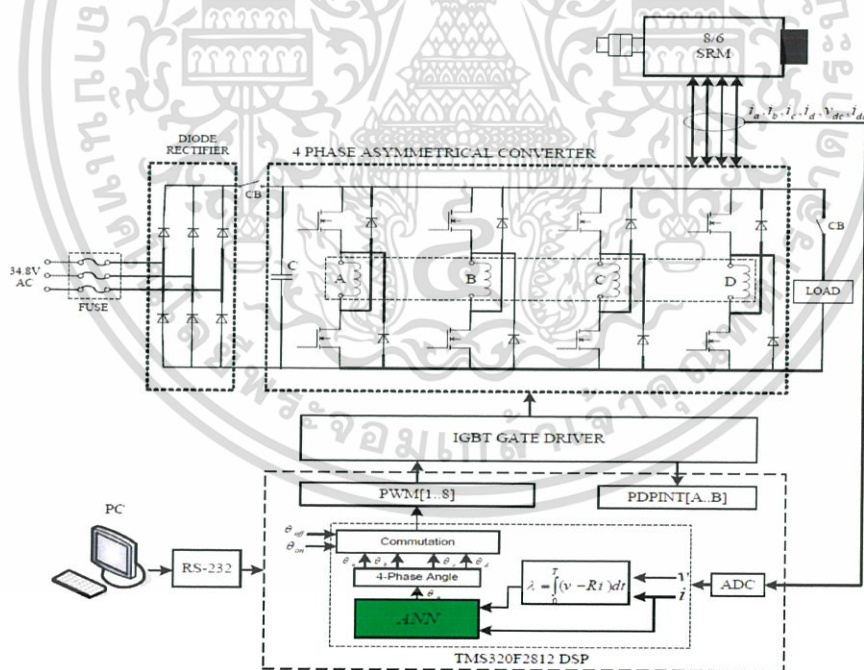
จะเห็นได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำ จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าค่อยๆ ลดลงแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมองค่าของตำแหน่งโรเตอร์มีกระเป๋เปลี่ยนไป รวมถึงค่าของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกันที่กระเป๋มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าจะมีค่าเพิ่มด้วย แต่พอใกล้จะถึงจุดอิมตัวของแกนเหล็กค่าของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละเล็กละน้อย

### 3.3 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในเครื่องจักรกลสวิตซ์รีลักแตนซ์

#### 3.3.1 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

การทำงานในสภาวะปกติจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจจับ (Sensor) ในการตรวจจับ ตำแหน่งมุมของโรเตอร์เพื่อจะใช้ในการสั่งการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) โดยทั่วไปจะใช้ Encoder ในการตรวจจับมุมของโรเตอร์และนำมาประมวลผลเปรียบเทียบกับในDSP (Digital Signal Processing)

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้อัลกอริทึมมาช่วยในการวิเคราะห์ผลต่างๆ มากมายหนึ่งในนั้นคือการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความแน่นอนในการประมวลผล โดยจะนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาฟังก์ชัน น้ำหนัก ค่าไบอัส ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ จากการบันทึกข้อมูลจากโปรแกรม FEM มาช่วยในการประมาณตำแหน่งมุมโรเตอร์แทนตัวตรวจจับ ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ (Encoder) ซึ่งจะช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวตรวจจับลงได้

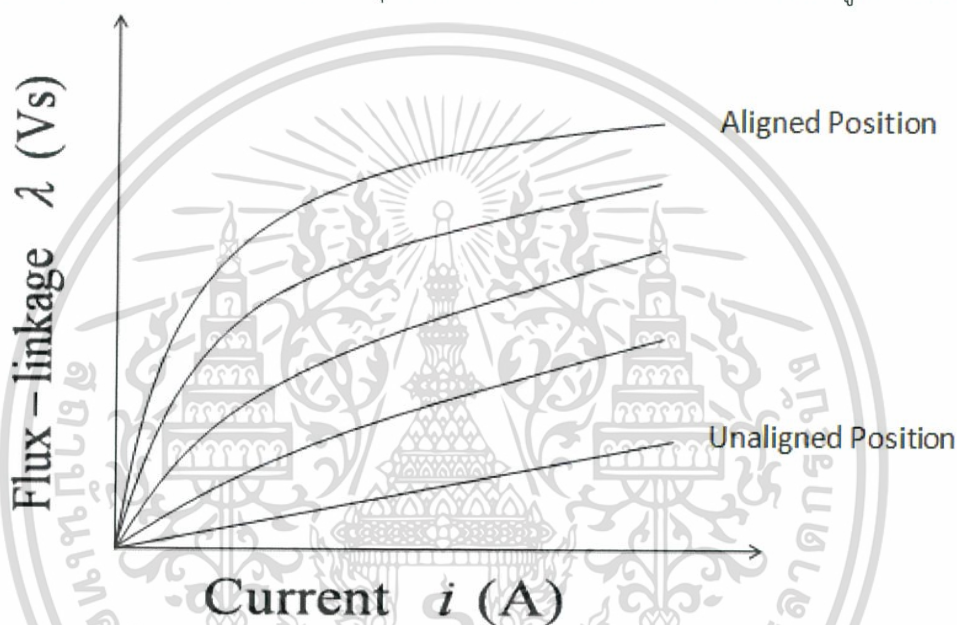


รูปที่ 3.23 แบบจำลองการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ (SRM)

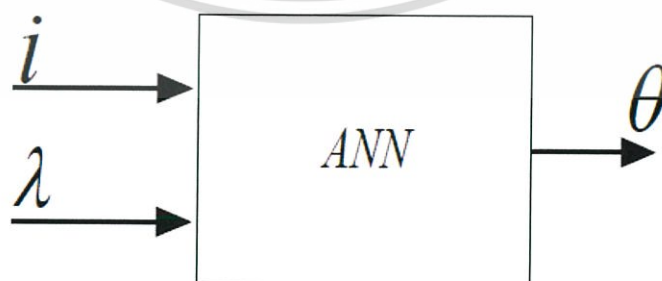
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.23 แสดงให้เห็นถึงระบบรวมที่ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมแทนตัวตรวจจับโดยจะมีตัววัดกระแสและแรงดัน โดยจะใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ และนำค่ากระแสกับเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำมาใช้ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยผ่านโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

ในตอนี้ จะกล่าวถึงการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับข้อมูลและผลตอบสนองที่ต้องการ ซึ่งประโยชน์จากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำหน้าที่แทนเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับมุมของโรเตอร์ได้ โดยการสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลและผลตอบสนองที่ต้องการและโครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าน้ำหนักและค่าไบอัสให้เหมาะสมกับผลตอบสนองที่ต้องการ โดยจะป้อนข้อมูล กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการคือ มุมของโรเตอร์ โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปต่อไปนี้



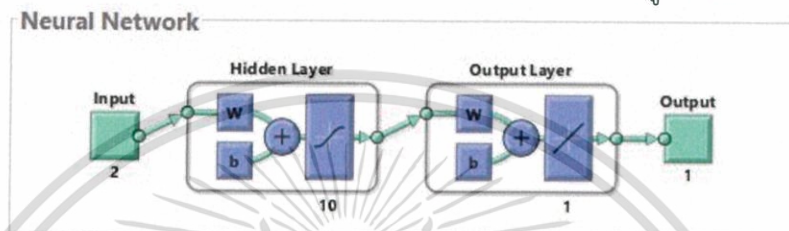
รูปที่ 3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ จากรูปที่ 3.24 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งมุมของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่ากระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ โดยที่กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำหนึ่งชุดจะได้ผลตอบสนองตำแหน่งมุมของโรเตอร์หนึ่งค่า การประมาณตำแหน่งมุมของโรเตอร์ด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมนี้มีความสำคัญอย่างมากในการแทนเซ็นเซอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์



รูปที่ 3.25 อินพุตเข้าเป็น กระแส และฟลักซ์ เอาท์พุทเป็น มุมของโรเตอร์

### 3.3.2 พิจารณาสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

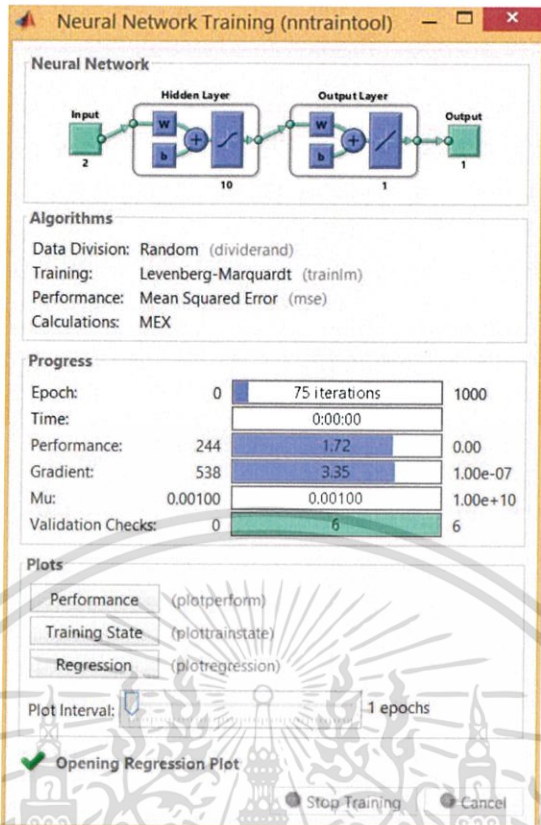
จากรายละเอียดที่อธิบายในเบื้องต้น เราจะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีตัวแปรขาเข้าอยู่ 2 ตัว คือ ฟลักซ์และกระแส และตัวแปรขาออกอยู่ 1 ตัว คือ มุมของโรเตอร์ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะการทำงานแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward Neural Network) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) และฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ ฟังก์ชันลิเนียร์ (Linear Function) และฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid Function) เนื่องจากฟังก์ชันกระตุ้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความสามารถในการสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่มีลักษณะส่วนโค้งได้ จึงสามารถทดสอบกับรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ซับซ้อนได้ โดยมีโครงสร้างดังรูป 3.26



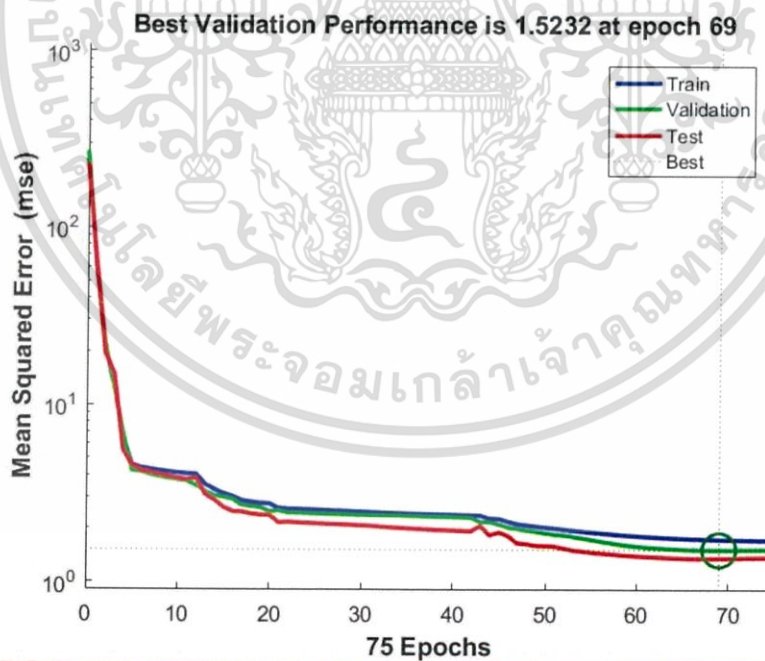
รูปที่ 3.26 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง  
จากรูปที่ 3.26 นั้นจะเห็นว่าได้กำหนดให้มีตัวแปรขาเข้า 2 ตัวแปร และมี 10 Hidden Layer และมี 1 Output Layer ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนี้จะถูกสอนโดยใช้ Levenberg-Marquardt Back-propagation Algorithm (*trainlm*)

### 3.3.3 การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูล

การสอนข้อมูลให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ โดยการใช้การเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt สามารถทำได้โดยการโปรแกรม Matlab ซึ่งสามารถบรรยายได้โดยใช้คำสั่งตามภาคผนวก XX โดยสามารถกำหนดรูปแบบการเรียนรู้ จำนวนนิวรอนของโครงข่าย ฟังก์ชันแต่ละชั้น (Layer) โดยจะต้องมีข้อมูลป้อนเข้า (Input) และ ข้อมูลที่ต้องการ (target) ซึ่งในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลนี้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักและค่าไบอัสให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่สอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ จะได้ผลของค่าน้ำหนักและไบอัส

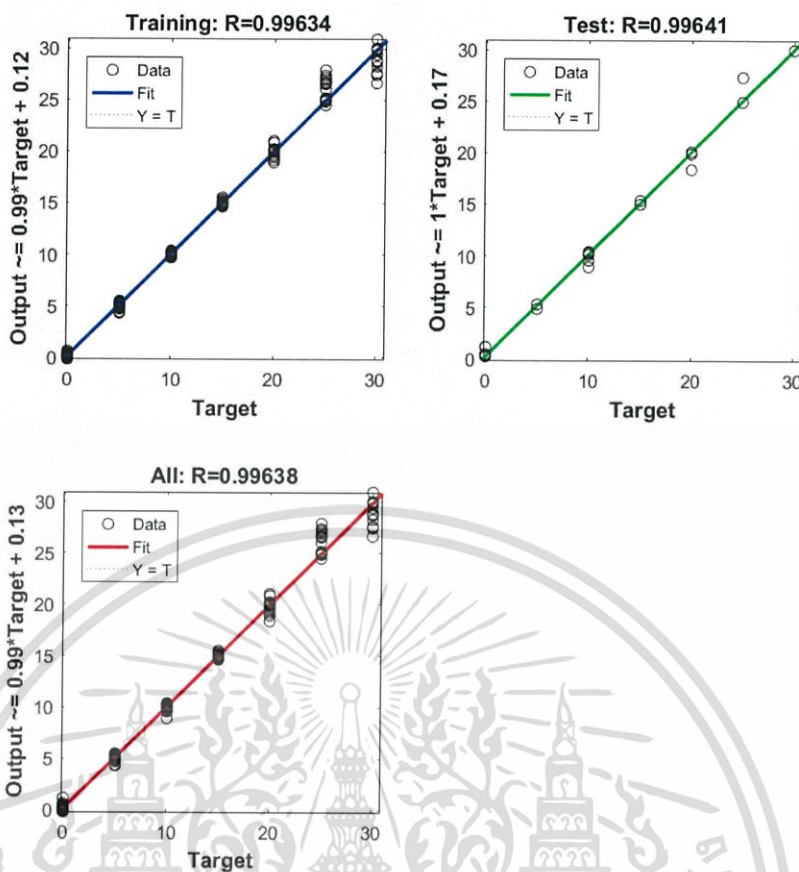


รูปที่ 3.27 หน้าจอของ Neural Network Training



รูปที่ 3.28 Best Validation Performance โดยอยู่ในครั้งที่ 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 Validation ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกรสอนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองการทำงานในสภาวะโหมดมอเตอร์ของสวิตซ์รีลักแตนซ์แมชชีน จากการสร้างกราฟและเปรียบเทียบกราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อการวิเคราะห์ความสอดคล้องกับทฤษฎี

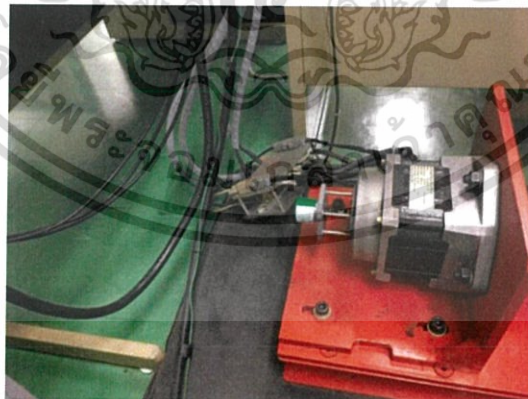
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ

Number of Phase : 4	Rated Power : 3 Hp
Rated Voltage : 48 V	Phase Resistance : 15 mΩ
Base Speed : 6,000 rpm	La : 340 μH
Pole Configuration : 8/6	Lu : 62 μH

#### 4.2 การทดลองหมุน SRM ในสภาวะการทำงานโหมดมอเตอร์

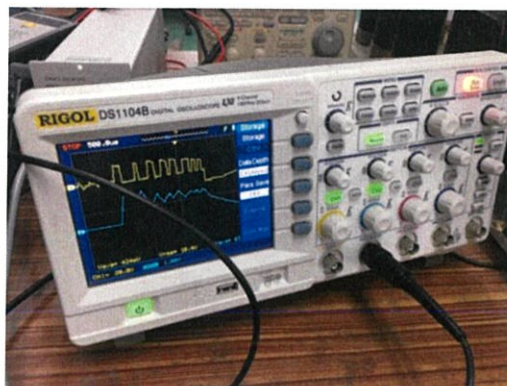
##### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดการทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง Flux linkage (Experimental setup for Flux linkage Measure)



รูปที่ 4.1 สวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ชนิด 4 phase,8/6 SRM ที่ใช้ในการทดลอง

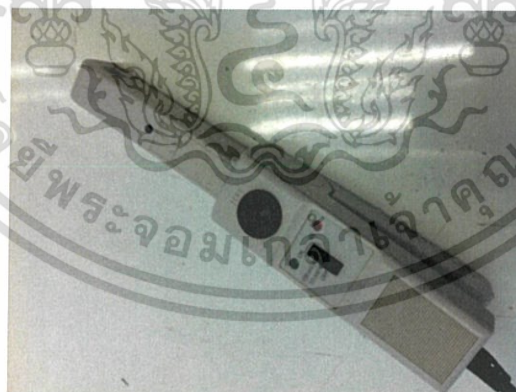
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 Digital Oscilloscope



รูปที่ 4.3 Multimeter



รูปที่ 4.4 Current Probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 Differential Probe

#### 4.2.2 กราฟของกระแสและแรงดันในการทำงานสภาวะมอเตอร์

กราฟของกระแสและแรงดันที่  $\theta_{on} = 1200$  ,  $\theta_{off} = 2400$  การทำงานแบบ Soft Chopping จะได้ดังรูป 4.6 ซึ่งเป็นกราฟที่ Low-Speed Motor



รูปที่ 4.6 กราฟของแรงดัน(1) และกระแส(2)

#### 4.3 ผลการทดลองการหาความสัมพันธ์กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

4.3.1 สมการที่เกี่ยวข้องในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำแรงดันเฟสของ SRM สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$V = iR + \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถหา Flux linkage ได้โดย

$$\lambda = \int_{t_0}^t (V - iR)dt \quad (4.2)$$

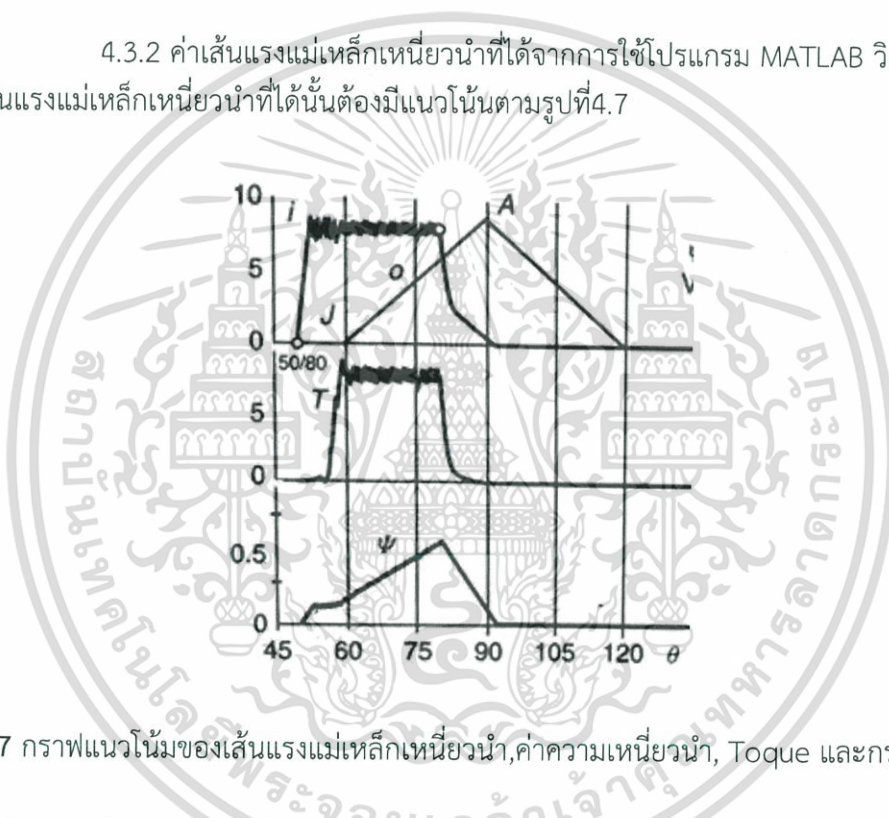
เมื่อ  $V$  คือแรงดันเฟส

$R$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดเฟส

$\lambda$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของขดลวดเฟส

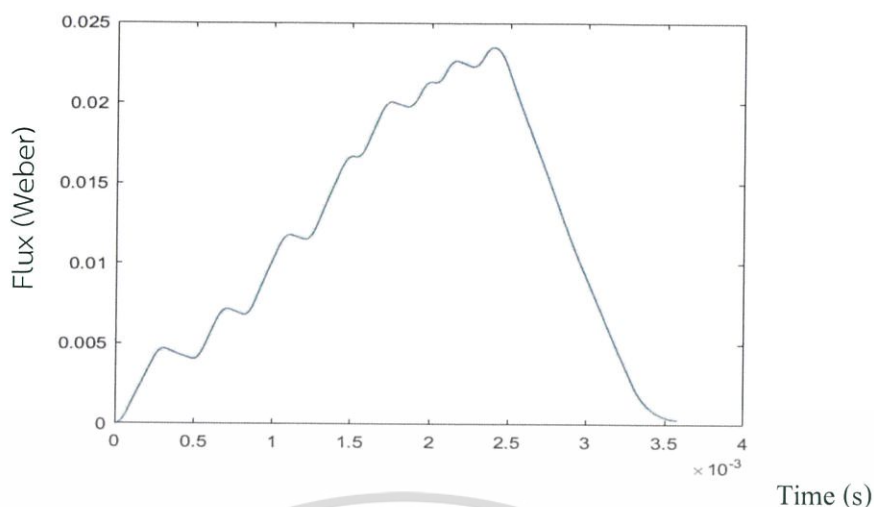
$i$  คือ กระแสเฟส

4.3.2 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้นั้นต้องมีแนวโน้มตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแนวโน้มของเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ, ค่าความเหนี่ยวนำ, Torque และกระแส [5]

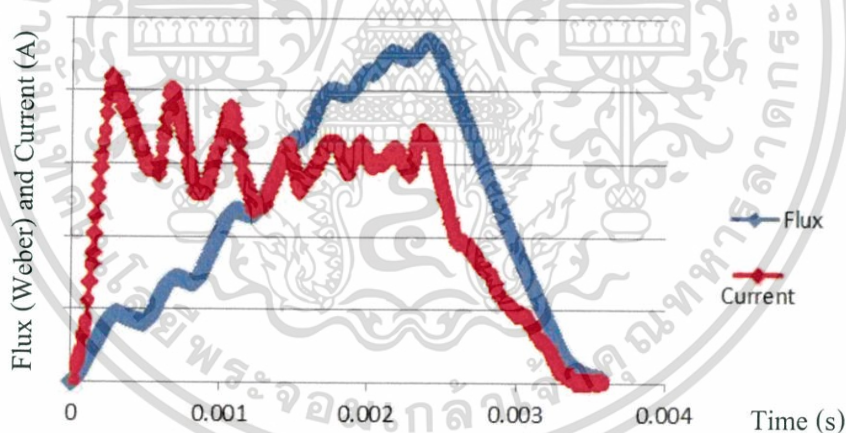
ซึ่งกราฟที่ได้จากการนำค่ากระแสและแรงดันจากการหมุนในโหมตมอเตอร์ แล้วนำมา วิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำจากโปรแกรม MATLAB

#### 4.3.3 การเปรียบเทียบกราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับกระแสในการทำงานโหมตมอเตอร์

จากรูปที่ 4.7 เมื่อนำกราฟกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้จาก MATLAB มาวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีดังรูปที่ 4.9

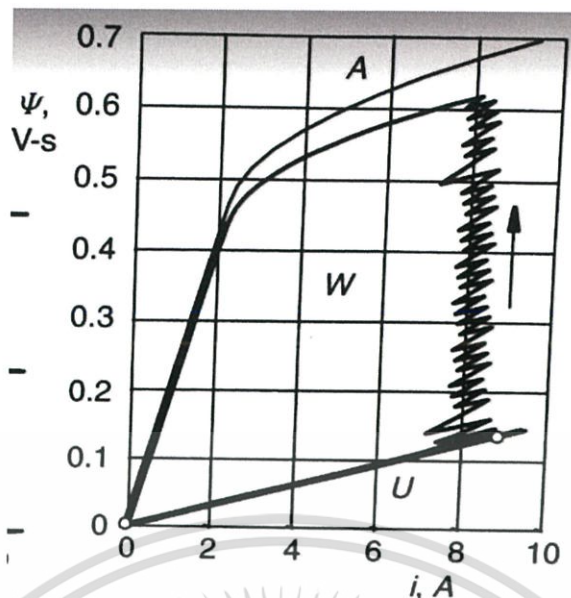


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบพลักซ์กับกระแส

### 4.4 ผลการทดลองการทำ Energy Conversion Loop

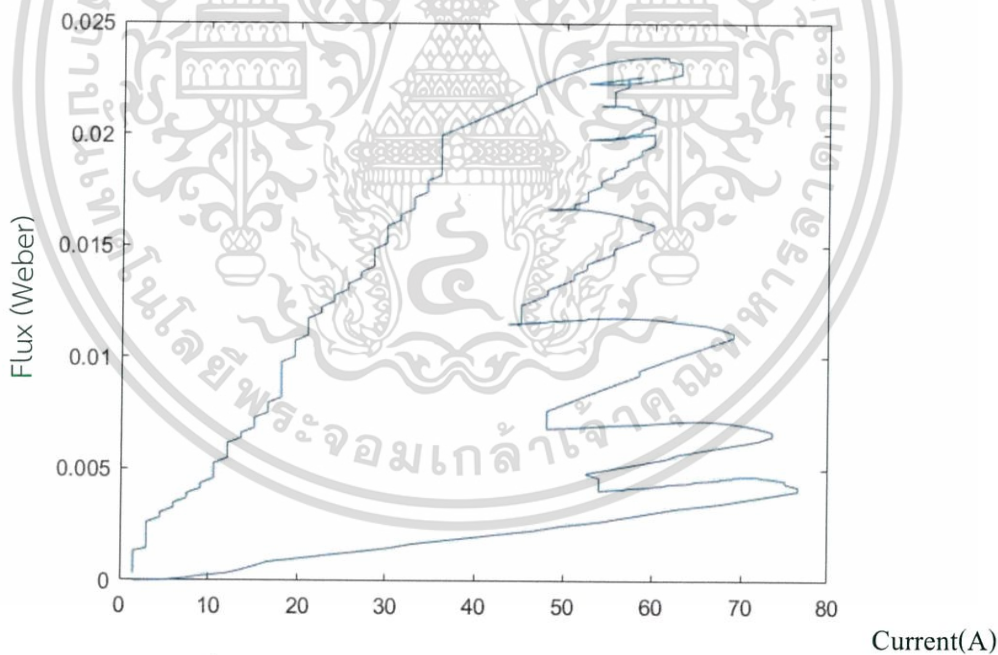
4.4.1 Energy Conversion Loop ที่ได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์กราฟ Energy Conversion Loop ที่ได้นั้นจะต้องหรือมีแนวโน้มตาม รูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 Energy Conversion Loop ตามทฤษฎี [5]

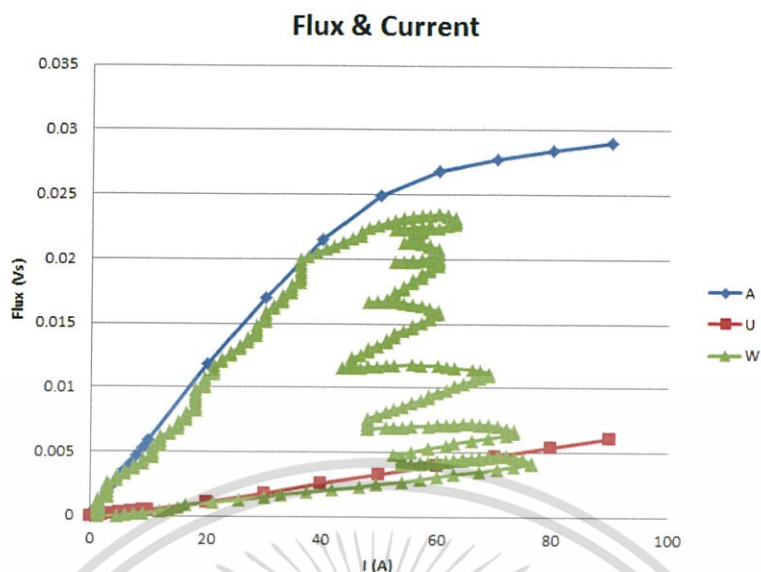
Energy Conversion Loop สามารถเกิด loop ได้จากการนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และกระแสมา Plot ค่า ดังนั้นจะได้กราฟตามรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 Energy Conversion Loop จาก Matlab

4.4.2 การเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop ในการทำงานหมอดอเตอร์ จากรูปที่ 4.10 เมื่อนำกราฟ Energy Conversion Loop และ Magnetizing Curve ที่ได้ จาก Matlab มาวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีดังรูปที่ 4.12

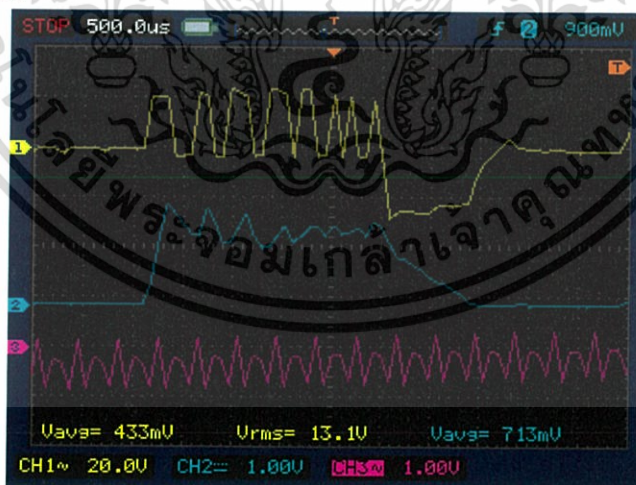
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.12 กราฟเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop และ Magnetizing Curve

#### 4.5 ผลการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ามุมของโรเตอร์

การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ โดยกำหนดให้มุม on อยู่ที่ unaligned มุม off อยู่ที่ aligned โดยมุม on อยู่ที่ 30 องศา และมุม off อยู่ที่ 60องศา สำหรับตำแหน่งโรเตอร์ที่เราได้มาจากการจำลองพิจารณาเฉพาะ เฟส A



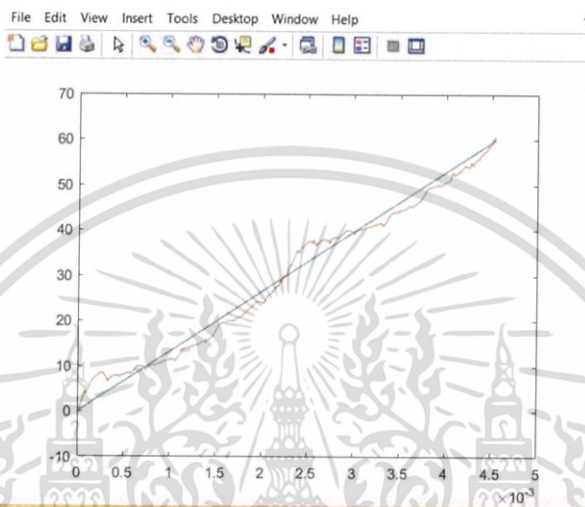
รูปที่4.13 เส้นที่1 คือแรงดันระหว่างขดลวดเฟส A เส้นที่ 2 คือกระแส เฟสA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 เราจะได้ค่า flux จาก

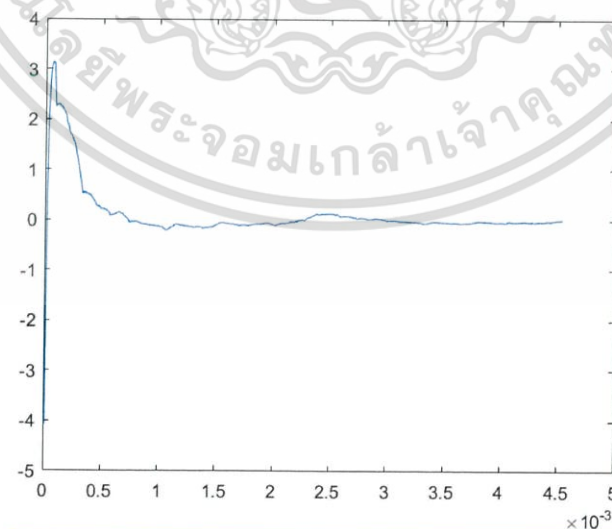
$$\lambda = \int_{t_0}^t (V - iR) dt$$

และเมื่อนำค่า flux และ  $i$  ไปเข้าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เราจะได้ค่ามุมของโรเตอร์ออกมา



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบตำแหน่งของโรเตอร์จากการคำนวณตำแหน่งใน 1 cycle กับค่าจากโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (สีแดง) เทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จากการคำนวณในช่วง 1 cycle (สีน้ำเงิน) จะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน โดยมีค่าผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่าความคลาดเคลื่อน จากการประมาณตำแหน่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งในช่วงแรกมีค่าความผิดพลาดสูงมากประมาณ 3 % เป็นผลเนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

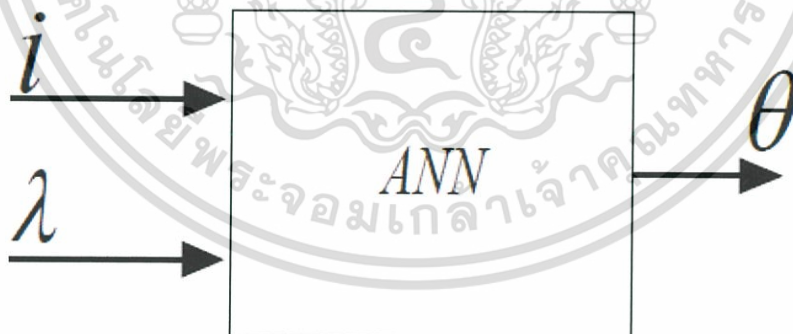
#### 5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นการทำงานควบคู่กันระหว่างเครื่องจักรหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์และโปรแกรมควบคุมรวมถึงการประมาณตำแหน่งโดยในทั่วไปแล้วนั้นการใช้การเครื่องจักรหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์นั้นจะต้องใช้คู่กับตัวตรวจจับตำแหน่งเพื่อที่จะได้รู้ว่าตำแหน่งของโรเตอร์หมุนไปอยู่ ณ จุดใดหลังจากนั้นจึงจ่ายไฟเข้าตัวของเครื่องจักรซึ่งในปัจจุบันตัวตรวจจับตำแหน่งนั้นมีราคาที่สูง ดังนั้นการหาวิธีในการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จะช่วยลดราคาจากตัวตรวจจับตำแหน่งซึ่งในการหาวิธีนั้นจะต้องศึกษาทฤษฎีขั้นพื้นฐานต่างๆของเครื่องจักรหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์และโปรแกรมที่ใช้ต่างๆ เช่น FEMM , MATLAB เป็นต้น โดย FEMM นั้นจะใช้ในการศึกษาหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเครื่องจักรรวมถึงกำหนดคุณสมบัติและชนิดของแกนเหล็กว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร จากนั้นรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการจำลองโดย FEMM มาใช้ใน MATLAB ในการจำลอง

จากการทดลองประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ Magnetizing Curve ที่เก็บค่ามาเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการเก็บค่ากระแสและแรงดันจากการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 8/6 ในการทำงานสภาวะแบบ Soft Chopping ที่ความเร็วต่ำ มาวิเคราะห์หาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำโดยใช้สมการ 5.1

$$\lambda = \int_{t_0}^t (V - iR) dt \quad (5.1)$$

หลังจากนั้นนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จากสมการ 5.1 และค่ากระแสที่วัดได้ นำมาเข้าใน Matlab แล้วใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์ชุดข้อมูลโดยการเทรนนิ่งเพื่อที่จะให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆของเครื่องจักรกลสวิตช์รีลักแตนซ์



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าตำแหน่ง

จากการทดลองพบว่าตำแหน่งของโรเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับตำแหน่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับตำแหน่งของโรเตอร์จากการคำนวณ 1 cycle (60 องศาทางกล) แล้วยังนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำและค่ากระแสที่ได้มา Plot กราฟ Energy Conversion Loop ตามบทที่ 4 ได้อีกด้วย

## 5.2 ปัญหาที่พบ

- เนื่องจากจำนวนนักศึกษามีมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ในห้อง นักศึกษาจำเป็นต้องมีการหมุนเวียนผลัดเปลี่ยนกันใช้อุปกรณ์ ทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน
- เป็นโปรเจกต์ที่ทำต่อเนื่องมาจากรุ่นก่อน ทำให้การศึกษาศึกษาทฤษฎีเฉพาะเป็นไปได้อย่างยากลำบาก

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมซึ่งสามารถลดราคาในส่วนของตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ลงได้อย่างมหาศาล
- การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทดลอง ควรจะมีจำนวนข้อมูลที่จะนำมาเทรนเยอะกว่านี้ จะมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพวรรณ เกิดตรวจ, “การควบคุมกำลังขาออกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ที่แปรผันความเร็วโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, 2558
- [2] วัชรกร ชัยสงคราม, วัชรพล วิศาลาณิษฐ์ และวัชระ จันทินอก, “แบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, 2550
- [3] David A. Torrey ,”Switched Reluctance Generators and their Control”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.49, NO.1, February 2002
- [4] Erkan Mese and David A. Torrey ,” An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.17, NO.1, January 2002
- [5] T.J.E. Miller, “Electronic Control of Switched Reluctance Machine”, Oxford: Newnes Power Engineering Series, 2001
- [6] T.J.E. Miller, “Switched Reluctance Motors and their Control”, Magna physics publishing and clarendon press Oxford, 1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.Data training

% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network

% This script assumes these variables are defined:

% input1 - input data.

% target1 - target data.

inputs = input1;

targets = target1;

% Create a Fitting Network

net=newff(inputs,targets,10);

% Train the Network

net=trainlm(net,inputs,targets);

% Test the Network

outputs = net(inputs);

errors = gsubtract(targets,outputs);

performance = perform(net,targets,outputs);

% View the Network

view(net)

## 2.Flux Current data

% current1 - current data.

% volt1 - voltage data.

% time1 - time data.

i = curent1;

v = volt1;

t = time1;

r=0.015;

ir = i\*r;

vir = v-ir;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% integrated (v-ir)dt.
Flux = cumtrapz(t,vir);
plot(t,flux)
plot(i,flux)
```

### 3.หาค่ามุมของโรเตอร์จากโครงข่ายประสาทเทียม

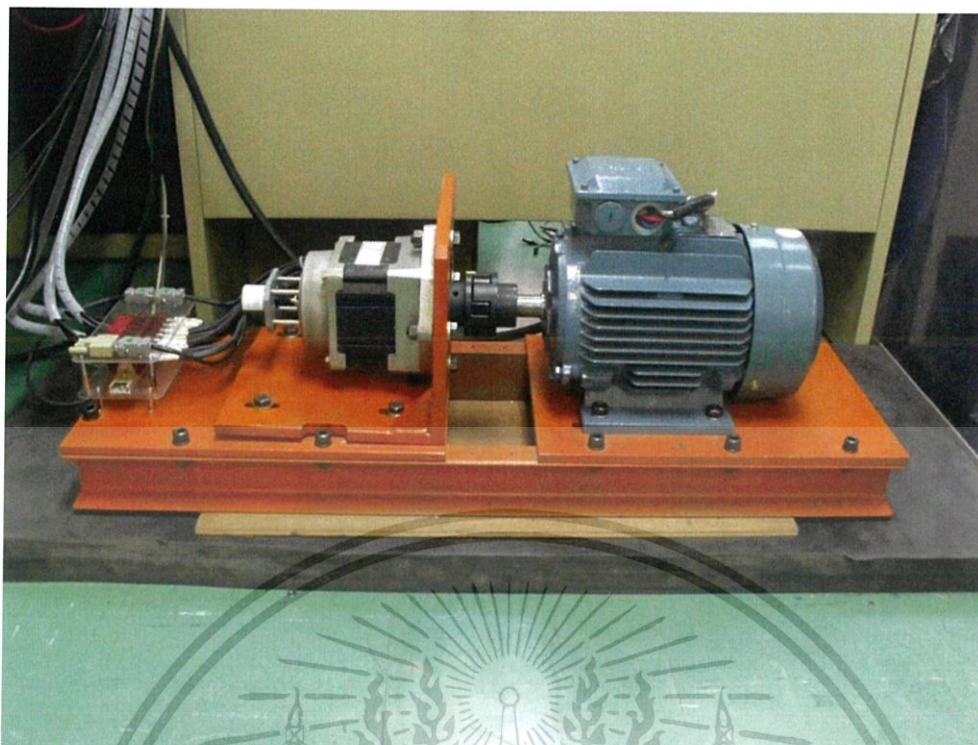
```
% simulate ANN
rotor = sim(net,[i ; flux]);
plot(t,rotor)
```



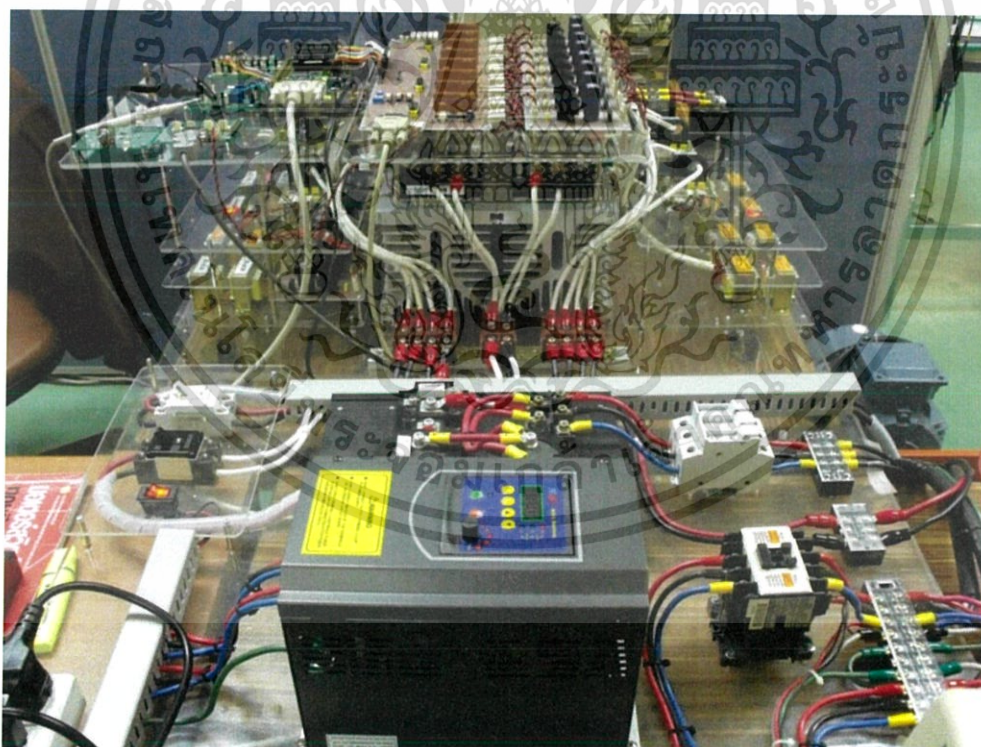
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

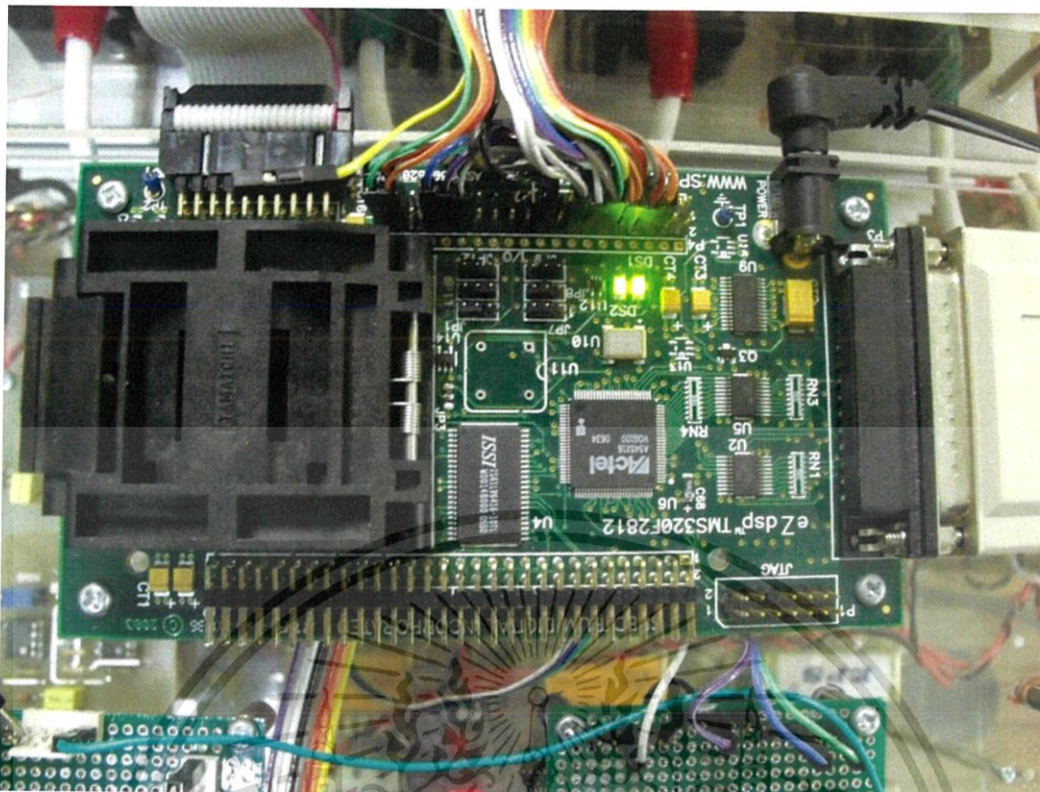


ภาพที่ ข.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ (ซ้าย) มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า (ขวา)

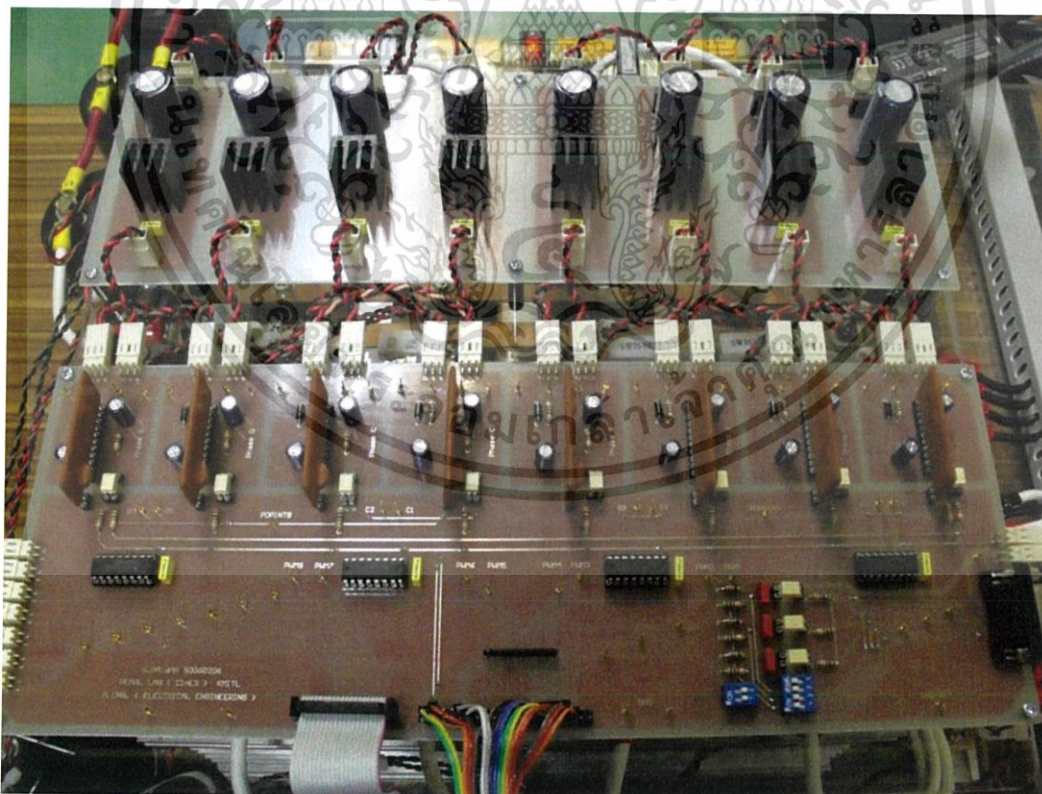


ภาพที่ ข.2 ภาพรวมของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

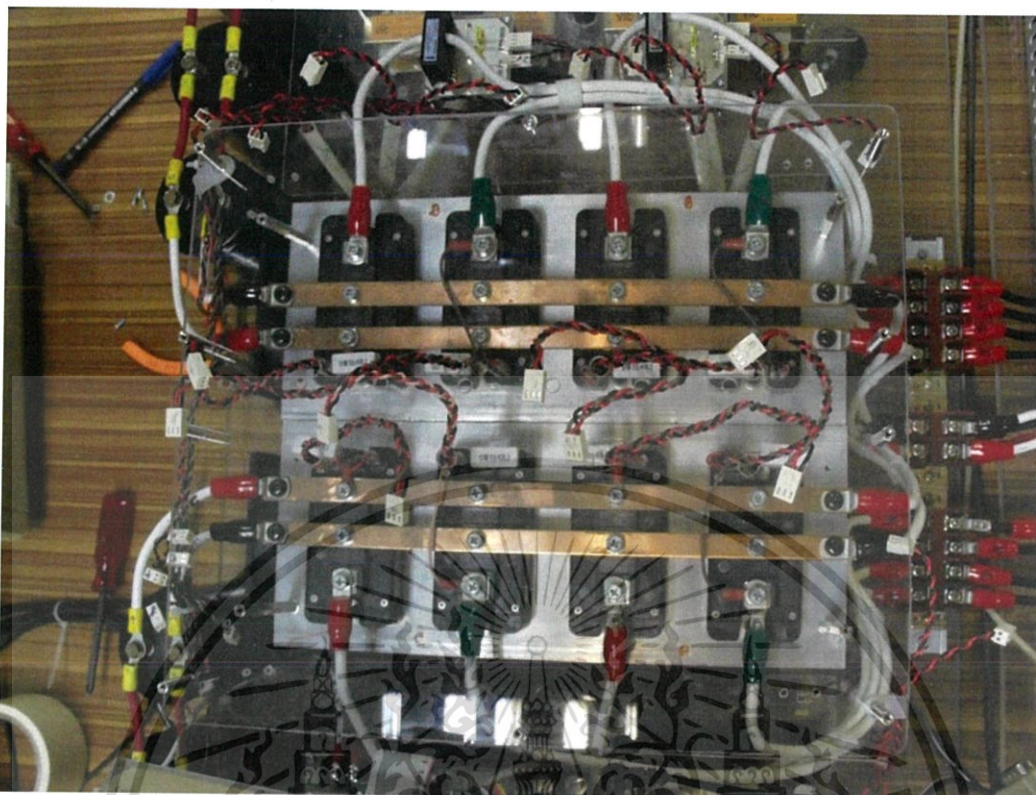


ภาพที่ ข.3 ตัวประมวลผล DSP320F2812



ภาพที่ ข.4 วงจร IGBT Gate Drives

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

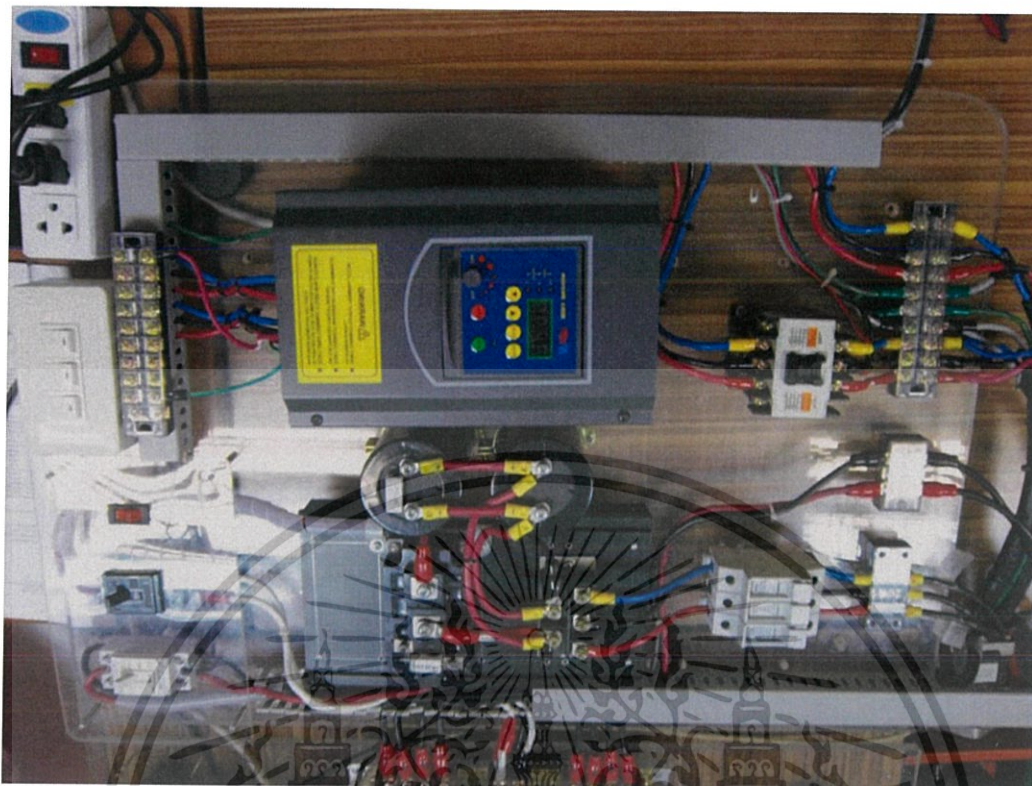


ภาพที่ ข.5 วงจร Asymmetrical Half- Bridge Converter



ภาพที่ ข.6 วงจรวัดกระแสแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



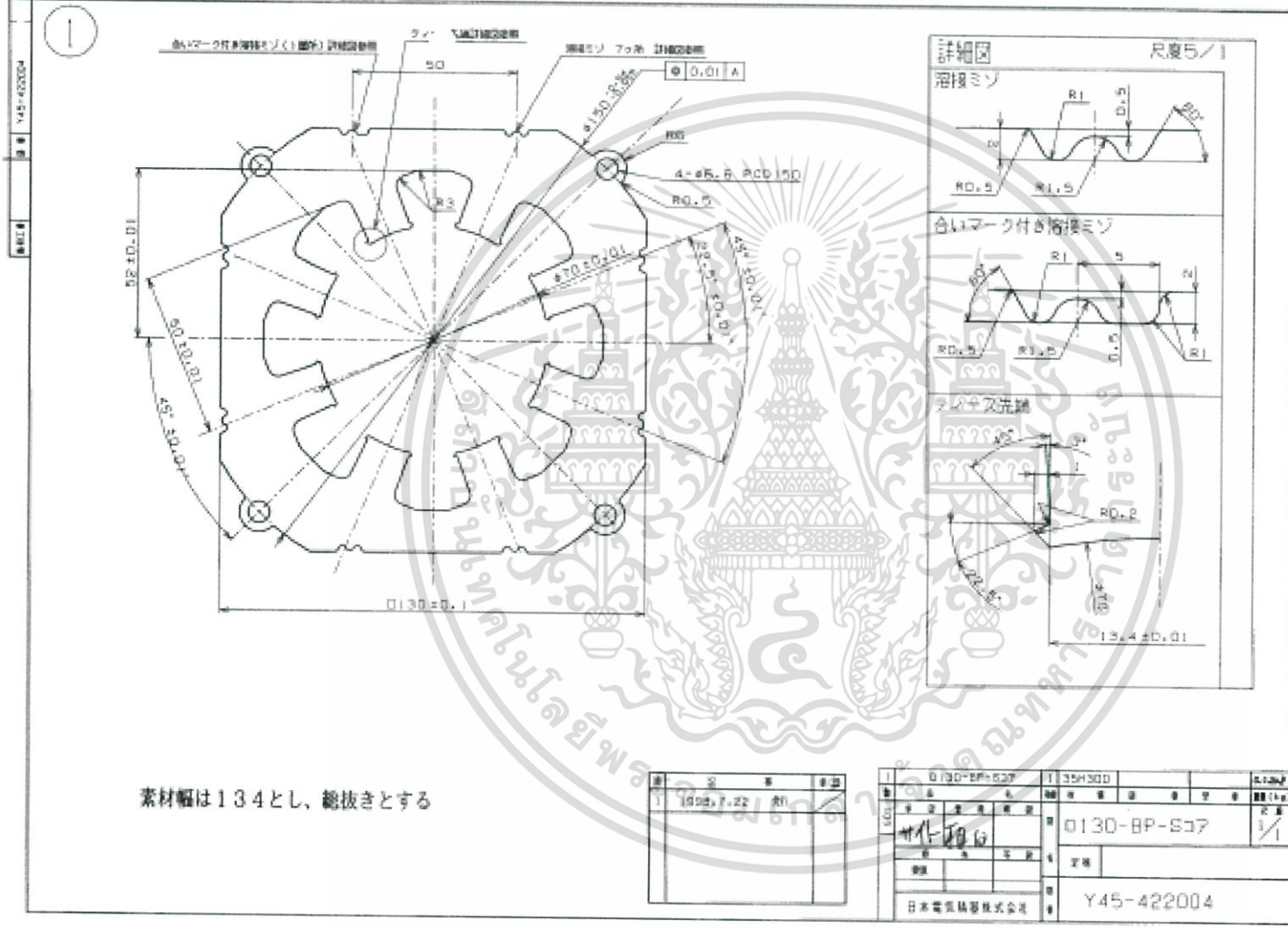
ภาพที่ ข.7 Inverter (บน) และ Rectifier (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ภาพที่ ค.2 แบบจำลองสเตเตอร์ SRM





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรหมุนสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม Rotor

## Position estimation using Artificial Neural Network for a Switched Reluctance Machine

กฤษฎา พงศ์ธนากุล, ดิสรณ์ ทองดี, เติชินท์ อินทสิทธิ์, พัชรพล คงพยัคฆ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ลาดกระบัง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: Techin.94@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ปริญญาโทนี้เป็นการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ในลักษณะที่สเตเตอร์และโรเตอร์มีขั้วขึ้น 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนประเภทนี้จะมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถใช้งานที่ความเร็วรอบสูง และมีแรงบิดสูง โดยในการออกแบบนั้น วิธีการวิเคราะห์ทางเส้นแรงแม่เหล็กและวิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีลีเมนต์โดยโปรแกรม FEMM จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กเกยวคดต้องเป็นต้น จากนั้นค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และศึกษาลักษณะ โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ารวมถึงคุณลักษณะของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อหาค่าของมุมหรือตำแหน่งต่างๆ ที่กระแสและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปเพื่อประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

### Abstract

This thesis presents the study of a four phases Switched Reluctance Machine which its stator and rotor have 12 salient-poles and 8 salient-poles. This type of electrical rotating machines has a very simple structure, high operated speed and can produce high electromechanical torque. In the cast of study, flux tube analysis and finite element analysis by Finite Element Method Magnetic program are used to calculate some of machine variables, such as electromechanical torque, magnetic flux density, flux linkage etc. These variables from the two following methods are used to analyze and used variables in Artificial Neural Network (ANN) to find angle or position at difference of current and flux for estimation the position of rotor.

**Keywords** Switched Reluctance Machine, Artificial Neural Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่ายประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้ถูกค้นพบมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา เพราะถึงแม้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์จะง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เช่นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง เพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดที่ใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลง จึงทำให้มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

### ลักษณะเด่นของ SRM

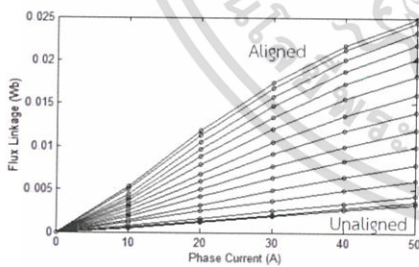
1. ต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีโครงสร้างที่แข็งแรง
2. สามารถทำงานได้แม้ใดเฟสหนึ่งจะชำรุด
3. มีความหนาแน่นของพลังงานสูง
4. ประสิทธิภาพสูงในทุกย่านความเร็ว

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์คูใดมีตำแหน่งตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณา เราจะเรียก ตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำ สูงสุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance,  $\mathcal{R}$ ) ค่าน้อยที่สุด กลับกันถ้าตำแหน่งขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณานั้นอยู่ระหว่างขั้วของโรเตอร์นั้น จะเรียกตำแหน่งนี้ว่าอันอะไลน์ (Unaligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด นอกจากตำแหน่งของโรเตอร์ จะมีผลกับ

ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance,  $L$ ) แล้ว ยังมีตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีผลกับค่าความเหนี่ยวนำนั่นก็คือกระแสฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ โดยความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถเขียน เป็นเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetizing Curves) โดยเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ เครื่องจักรกลแต่ละตัวจะลักษณะแตกต่างกันไปตาม โครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้ทำโรเตอร์และ สเตเตอร์ ตัวอย่างของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กนั้นแสดงดังในรูปที่ 2.1 โดยจะแสดงความสัมพันธ์ ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับฟลักซ์ (flux linkage,  $\lambda$ ) จากตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ไปยังตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) ที่ค่ากระแสต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่า ที่บริเวณตำแหน่ง อันอะไลน์ นั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับฟลักซ์จะมีความเป็นเชิงเส้น เนื่องบริเวณนี้มีช่องอากาศสูง เนื่องจากอากาศมีความซาบซึม (permeability,  $\mu$ ) คงที่ แต่บริเวณตำแหน่งอะไลน์ นั้น จะมีความ เป็นเชิงเส้นที่กระแสค่าต่ำ เท่านั้น เนื่องจากบริเวณนี้มีช่องอากาศแคบ ผลของแกนเหล็กต่อค่ารีลักแตนซ์จึงมากขึ้น ในการใช้งานเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นั้น นั้น จะต้องทำการสวิตซ์จ่าย กระแสให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่ การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของ โรเตอร์มีค่าเป็นบวก  $\frac{dL_a}{d\theta_a} > 0$  และสำหรับการใช้งานในลักษณะเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั้น จะต้องทำการ สวิตซ์จ่ายแรงดันให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของ โรเตอร์มีค่าเป็นลบ  $\frac{dL_a}{d\theta_a} < 0$



รูปที่ 2.1 กราฟ Magnetizing ของ 8/6 SRM

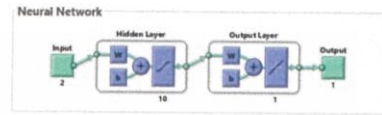
### 3. การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ใน เครื่องจักรกลสวิตซ์รีลักแตนซ์

#### 3.1 พิจารณาสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากรายละเอียดที่อธิบายในเบื้องต้น เราจะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีตัวแปรขาเข้าอยู่ 2 ตัว คือ ฟลักซ์และกระแส และตัวแปรขาออกอยู่ 1 ตัว คือ มุมของ โรเตอร์ แบบจำลอง

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองที่ การศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

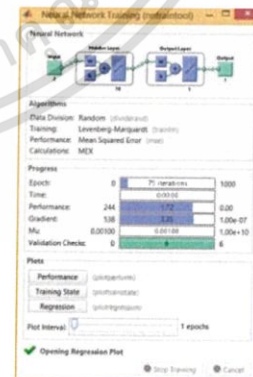
โครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะการทำงานแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward Neural Network ) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) และฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ ฟังก์ชันลิเนียร์ (Linear Function) และ ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid Function) เนื่องจาก ฟังก์ชันกระตุ้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความสามารถในการสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่มีลักษณะส่วนโค้งได้ จึงสามารถทดสอบกับรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ซับซ้อน ได้ โดยมี โครงสร้างดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง จากรูปที่ 3.1 นั้นจะเห็นว่าได้กำหนดให้มีตัวแปรขาเข้า 2 ตัวแปร และมี 10 Hidden Layer และมี 1 Output Layer ซึ่ง โครงข่ายประสาทเทียมนี้จะถูกสอนโดยใช้ Levenberg-Marquardt Back-propagation Algorithm (*trainlm*)

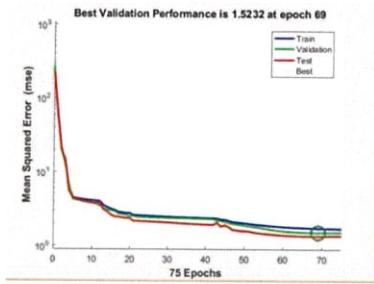
#### 3.2 การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูล

การสอนข้อมูลให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ โดยใช้การเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt สามารถทำได้โดยการ โปรแกรม Matlab ซึ่งสามารถบรรยายได้โดยใช้คำสั่งตามภาคผนวก ก โดยสามารถกำหนดรูปแบบการเรียนรู้ จำนวน นิวรอนของ โครงข่าย ฟังก์ชันแต่ละชั้น (Layer) โดยจะต้องมี ข้อมูลป้อนเข้า (Input) และ ข้อมูลที่ต้องการ (target) ซึ่งในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลนี้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักและค่าไบอัสให้เหมาะกับชุดข้อมูลที่สอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ จะได้ผลของค่าน้ำหนัก และไบอัส



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าจอของ Neural Network Training

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดง Best Validation Performance โดยอยู่ในครั้งที่ 75

4. การทดลองและผลการทดลอง

กราฟของกระแสและแรงดันในการทำงานสภาวะมอเตอร์

กราฟของกระแสและแรงดันที่  $\theta_{on} = 1200$ ,  $\theta_{off} = 2400$  การทำงานแบบ Soft Chopping จะได้ดังรูป 4.1 ซึ่งเป็นกราฟที่ Low-Speed Motor



รูปที่ 4.1 กราฟของกระแสและแรงดัน

4.1 ผลการทดลองการหาความสัมพันธ์กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

4.1.1 สมการที่เกี่ยวข้องในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

$$\lambda = \int_{t_0}^t (V - iR) dt \tag{4.1}$$

เมื่อ  $V$  คือแรงดันเฟส

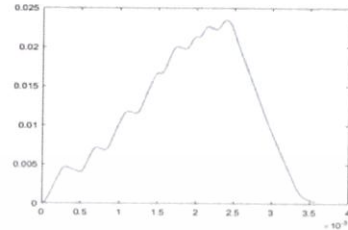
$R$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดเฟส

$\lambda$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของขดลวดเฟส

$i$  คือ กระแสเฟส

4.2 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้จากการใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์

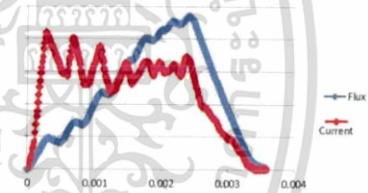
กราฟที่ได้จากการนำค่ากระแสและแรงดันจากการหมุนในโหมดมอเตอร์ แล้วนำมาวิเคราะห์ในโปรแกรม Matlab จะได้กราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำจากโปรแกรม Matlab

4.3 การเปรียบเทียบกราฟเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับกระแสในการทำงานโหมดมอเตอร์

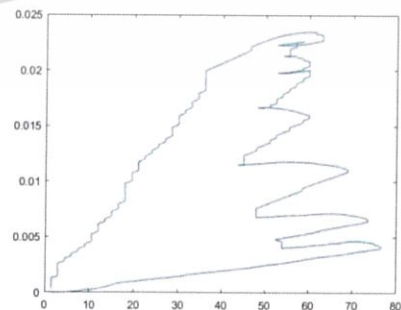
เมื่อนำกราฟกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ได้จาก Matlab มาวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน ทฤษฎีดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟไปเปรียบเทียบปลั๊กซ์กับกระแส

4.4 ผลการทดลองการหา Energy Conversion Loop

Energy Conversion Loop สามารถเกิด loop ได้จากการนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำและกระแสมา Plot ค่า ดังนั้นจะได้กราฟตามรูปที่ 4.4



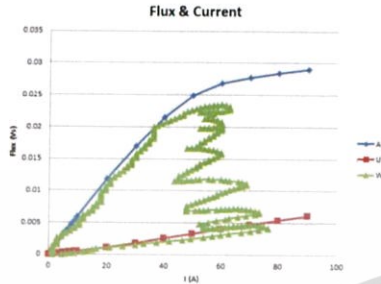
รูปที่ 4.4 Energy Conversion Loop จาก Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop ในการทำงาน

โหมมดอมเตอร์

เมื่อนำกราฟ Energy Conversion Loop และ Magnetizing Curve ที่ได้จาก Matlab มาวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีดังรูปที่ 4.5



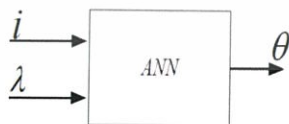
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบ Energy Conversion Loop และ Magnetizing Curve

5. สรุปผล

จากการทดลองประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ Magnetizing Curve ที่เก็บค่ามาเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการเก็บค่ากระแสและแรงดันจากการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 8/6 ในการทำงานสภาวะแบบ Soft Chopping ที่ความเร็วต่ำ มาวิเคราะห์หาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำโดยใช้สมการ 5.1

$$\lambda = \int_{t_0}^t (V - iR) dt \tag{5.1}$$

หลังจากนั้นนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จากสมการ 5.1 และค่ากระแสที่วัดได้ นำมาเข้าใน Matlab แล้วใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์หาค่าข้อมูล โดยการเทรนนิ่งเพื่อที่จะให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆของเครื่องจักรกลสวิตซ์รีลักแตนซ์



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าตำแหน่ง

จากการทดลองพบว่าตำแหน่งของโรเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับตำแหน่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับตำแหน่งของโรเตอร์จากการคำนวณ 1 cycle (60 องศาทางกล) แล้วยังนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำและค่ากระแสที่ได้มา Plot หากกราฟ Energy Conversion Loop ตามบทที่ 4 ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปด้วยดี ไม่ได้มาจากความรู้ความสามารถและความตั้งใจของสมาชิกภายในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากการให้ความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายจึงขออนุญาตกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณรศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์ สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ เพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้าตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ MEIDENSHA ที่ให้งบประมาณในการสนับสนุนทุนในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ พี่ไวยรรณ เกิดตรวจ ที่ได้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ไวยรรณ เกิดตรวจ, “การควบคุมกำลังขาออกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่แปรผันความเร็วโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, 2558
- [2] วิชกร ชัยสงคราม, วิชพล วิชาลาวิชัย และวัชร จันทินอก, “แบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์”, ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, 2550
- [3] David A. Torrey, “Switched Reluctance Generators and their Control”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.49, NO.1, February 2002
- [4] Erkan Mese and David A. Torrey, “An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.17, NO.1, January 2002
- [5] T.J.E. Miller, “Electronic Control of Switched Reluctance Machine”, Oxford: Newnes Power Engineering Series, 2001
- [6] T.J.E. Miller, “Switched Reluctance Motors and their Control”, Magna physics publishing and clarendon press : Oxford, 1993

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นายกฤษฎา พงศ์ธนากุล  
 วัน เดือน ปีเกิด 9 มีนาคม พ.ศ. 2538  
 ที่อยู่ 29/8 ถนน เมืองใหม่ ต.มุกดาหาร อ.เมืองมุกดาหาร จ.มุกดาหาร 49000  
 ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนเซนต์ยอแซฟมุกดาหาร  
 ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนมุกดาหาร  
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 E-mail [P\\_kissada@outlook.com](mailto:P_kissada@outlook.com)



ชื่อ-สกุล นายติสรณ์ ทองดี  
 วัน เดือน ปีเกิด 18 ตุลาคม พ.ศ. 2537  
 ที่อยู่ 186 หมู่2 ต.บางหมาก อ.เมือง จ.ชุมพร 86000  
 ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลชุมพร  
 ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนศรีราษฎร์ จ.ชุมพร  
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 E-mail [tichiw@hotmail.com](mailto:tichiw@hotmail.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-สกุล นายเตชินท์ อินทสิทธิ์  
 วัน เดือน ปีเกิด 20 ธันวาคม พ.ศ. 2537  
 ที่อยู่ 216/1 ม.15 ต.บ้านพระ อ.เมืองปราจีนบุรี จ.ปราจีนบุรี 25230  
 ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนฉัตรลิตราศึกษา  
 ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนมารีวิทยา  
 ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนปราจีนราษฎร์บำรุง จ.ปราจีนบุรี  
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 E-mail [Techin.94@hotmail.com](mailto:Techin.94@hotmail.com)



ชื่อ-สกุล นายพิชรพล คงพยัคฆ์  
 วัน เดือน ปีเกิด 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2537  
 ที่อยู่ 18/20 ถ.แสงชูโต ต.ท่ามะขาม อ.เมือง จ.กาญจนบุรี 71000  
 ประวัติการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนวิสุทธรังษี กาญจนบุรี  
 ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิสุทธรังษี กาญจนบุรี  
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 E-mail [p.kongphayak@gmail.com](mailto:p.kongphayak@gmail.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้