

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์ reluctance แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor



ปริญญาโท วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

ผู้จัดทำ

1. นาย นพชัย ภิรมย์
2. นาย นฤเบศร์ รัตนฤทธิ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแทนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

นาย นพชัย ภิรมย์

นาย นฤเบศร์ รัตนฤทธิ

รศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงวิธีการที่จะควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแทนซ์โดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ทำได้โดยการใช้วิธีที่เรียกว่าระบบโครงข่ายประสาทเทียม ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ที่มีลักษณะของฟลักซ์และกระแสไม่เป็นเส้นตรง ถ้าหากใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถประมาณตำแหน่งของโรเตอร์โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ได้ กลุ่มข้อมูลที่นำมาฝึกฝนให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมคือฟลักซ์เกี่ยวกับคล่อง กระแสสเตเตอร์ และมุมตำแหน่งของโรเตอร์ โดยจะให้ กระแสสเตเตอร์และฟลักซ์เกี่ยวกับคล่อง เป็นตัวแปรต้น ส่วนมุมตำแหน่งของโรเตอร์เป็นตัวแปรตาม ถ้าหากข้อมูลที่นำมาฝึกฝนระบบโครงข่ายประสาทเทียมยังมีมาก ความผิดพลาดของมุมตำแหน่งโรเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากระบบโครงข่ายประสาทเทียมก็จะมีค่าน้อย โดยโครงงานนี้จะใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการหาตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์สี่เฟส

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor

Mr. Noppachai Pirom

Mr. Naruebet Rattanarit

Assoc.Prof.Dr.Supat Kittiratsatcha Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

This paper presents a new approach to the sensorless control of the switched-reluctance motor (SRM). The basic premise of the method is that an artificial neural network (ANN) forms a very efficient mapping structure for the nonlinear SRM. Through measurement of the phase flux linkages and phase currents the neural network is able to estimate the rotor position, thereby facilitating elimination of the rotor position sensor. The ANN training data set is comprised of magnetization data for the SRM with flux linkage and current as inputs and the corresponding position as out put in this set. Given a sufficiently large training data set, the ANN can build up a correlation among and for an appropriate network architecture. This paper presents the development, implementation, and operation of an ANN-based position estimator for a four-phase SRM.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา และอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้าเรื่อยมา ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านเหล่านี้ โครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณพี่เจี๊ยบ และพวกพี่ๆที่ห้อง PEARL LAB และคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมห้องปฏิบัติการ (PEARL LAB) ที่คอยเอาใจใส่และคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆห้องโครงการอื่นๆที่คอยสอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

และที่สำคัญโครงการนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยถ้าปราศจากพ่อและแม่ ที่คอยสนับสนุนไม่ว่าจะเป็นทางด้านทุนทรัพย์ หรือการให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการนี้หวังว่าทุกท่านที่ได้กล่าวมาของจริงมีความสุข และประสบความสำเร็จในหน้าที่การงาน รวมถึงการดำเนินชีวิต โดยคณะผู้จัดทำหวังว่าอนาคตถ้ามีโอกาสอีกครั้ง คงได้ร่วมงานกับทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นนี้อีกต่อไป

ขอขอบคุณ
คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ชื่อโครงการ	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.3 โครงการที่น่าสนใจ	1
1.4 วัตถุประสงค์และผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้	2
1.6 ขอบเขตของโครงการ	2
1.7 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.7.1 ศึกษาทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	2
1.7.2 ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรม MATLAB	2
1.7.3 สร้างแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียม	2
1.7.4 นำแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้ ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	3
1.7.5 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบ สวิตช์รีลักแตนซ์	3
1.7.6 วัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ใน แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส	3
1.8 แผนการดำเนินโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ และโครงข่ายประสาทเทียม	5

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	5
2.1.1 ค่ารีลักแตนซ์	6
2.1.2 วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	7
2.1.3 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	9
2.1.4 ตำแหน่ง Aligned	10
2.1.5 ตำแหน่ง Unaligned	10
2.1.6 แรงบิด	11
2.1.7 วงจรถ่ายเทพลังงาน	13
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม	16
2.2.1 หลักการทำงานระบบโครงข่ายประสาทเทียม	17
2.2.2 Back propagation Algorithm	18
2.2.3 การเรียนรู้สำหรับ Neural Network	19
2.2.4 Feedforward network	19
2.3 ทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้อง	20
2.3.1 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	20
2.3.2 Levenberg-Marquardt Method	21
2.3.3 สมการปรับขนาดตัวแปร (Transfer-function)	21
2.3.4 โปรแกรม Finite Element Method Magnetics	22
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์	23
3.1 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	23
3.1.1 บทนำ	23
3.1.2 พิจารณาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	25
3.1.3 พิจารณาฟังก์ชันในการสอน	25
3.1.4 การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูล	27
3.1.5 การออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	27
3.2 การทดลองข้อมูล Magnetizing	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ชุดข้อมูลทดสอบ	32
3.2.2 การสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้กลุ่มข้อมูล	35
3.2.3 ผลการทดสอบสำหรับกลุ่มข้อมูล	35
3.2.4 สรุปการทดสอบ	37
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบใช้การ ประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยโครงข่ายประสาทเทียม	39
3.3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	39
3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ โดยโครงข่ายประสาทเทียมต่อเฟส	42
3.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัก แตนซ์ 4 เฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง	43
3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัก แตนซ์ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง 4 เฟสโดย ใช้โปรแกรม Matlab	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	46
4.1 บทนำ	46
4.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 2500 rpm	46
4.2.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่งที่ความเร็ว 2500 rpm	46
4.2.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่ง	51
4.3 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 7500 rpm	54
4.3.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่ง	54
4.3.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่ง	58
4.4 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่ง	61
4.4.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการตรวจจับตำแหน่ง	66
4.5 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากผลการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมใน Matlab กับรูปคลื่นจริงจากการทดลอง	69
4.5.1 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน การประมาณตำแหน่งกับรูปคลื่นจากการทดสอบการทำงานจริงแบบ Single pulse	69
4.5.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประ มาณตำแหน่งกับผลจากการทดสอบการทำงานจริงแบบHardchopping	72
บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผล	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก กระบวนการเก็บข้อมูลกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า	78
ภาคผนวก ข ข้อมูลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	85
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	110
ประวัติผู้เขียน	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ	5
2.2 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก	6
2.3 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	7
2.4 กราฟ Magnetizing	9
2.5 SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Aligned ที่เฟส A	10
2.6 SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Unaligned ที่เฟส A	11
2.7 ค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส	11
2.8 ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของ SRM แบบ 8/6	12
2.9 แสดงค่าพลังงานสะสมและ Co-energy	13
2.10 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเฟสในช่วงความชันเป็นบวก	13
2.11 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน	14
2.12 ชั้นโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	17
2.13 รูปแบบ Back-propagation neural network	18
2.14 การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised Learning)	19
2.15 สถาปัตยกรรมของ Feedforward network	20
2.16 เอ็นโค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument	20
2.17 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์	21
2.18 ค่าของความหนาแน่นของฟลักซ์ในเครื่องจักรสวิตซ์รีลักแตนซ์	22
2.19 ปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์ในแต่ละสี	22
3.1 แบบจำลองการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ (SRM)	23
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อย	24
3.3 แบบจำลองโครงข่ายเทียมที่ใช้ในการทดลอง	25
3.4 Performance ของการสอนโดยใช้ฟังก์ชันต่างๆ	26
3.5 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในเรียนรู้	27
3.6 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกสร้างขึ้นมา	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 โครงสร้างแบบจำลองด้านในของโครงข่ายประสาทเทียม	28
3.8 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมย่อขนาดข้อมูล (Process Input)	28
3.9 โครงสร้างภายในของชั้นซ่อน (Hidden Layer) หรือ ชั้น1 (Layer 1)	28
3.10 โครงสร้างค่าน้ำหนักชั้นซ่อน (Hidden Layer) หรือ ชั้น 1 (Layer 1)	29
3.11 โครงสร้างภายในของชั้นผลิต (Output Layer) หรือ ชั้น2 (Layer 2)	30
3.12 โครงสร้างค่าน้ำหนักชั้นผลิต (Output Layer) หรือ ชั้น 2 (Layer 2)	30
3.13 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมการขยายขนาดข้อมูล (Process Output)	31
3.14 โครงสร้างการทดสอบกลุ่มข้อมูล Magnetizing	31
3.15 กระบวนการออกแบบและเก็บข้อมูลกระแสและเส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ	32
3.16 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โปรแกรม Catia	32
3.17 ตัวอย่างแบบจำลองจากโปรแกรม Finite Element Method (FEM)	33
3.18 กราฟ Magnetization Curve จากการเก็บข้อมูลจาก FEMM	34
3.19 3D Magnetization Curve จากการเก็บข้อมูลจาก FEMM	34
3.20 3D Output Estimate Position จาก โครงข่ายประสาทเทียม	35
3.21 3D Error Estimate position จาก โครงข่ายประสาทเทียม	36
3.22 แผนภูมิแท่งแสดงถึงความผิดพลาดของข้อมูล	37
3.23 กราฟความเหมาะสม	38
3.24 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	39
3.25 วงจรสมมูลย์ 1 เฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	40
3.26 แบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	41
3.27 แบบจำลองพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	42
3.28 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่าตำแหน่งต่อเฟส	43
3.29 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง 4 เฟส	43
3.30 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งโดยใช้ โปรแกรม Matlab ในการออกแบบ	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm	47
4.2 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่ง โรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm	47
4.3 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm	48
4.4 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 2500 rpm	48
4.5 ความเหนียวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 2500 rpm	49
4.6 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 2500 rpm	49
4.7 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวคล้อยจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 2500 rpm	50
4.8 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 2500 rpm	50
4.9 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมใน ลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm	51
4.10 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 2500 rpm	52
4.11 ความเหนียวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm	52
4.12 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวคล้อยจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm	53
4.13 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm	53
4.14 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm	54
4.16 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่ง โรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm	55
4.17 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm	55
4.18 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 7500 rpm	56
4.19 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 7500 rpm	57
4.20 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 7500 rpm	57
4.21 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 7500 rpm	57
4.22 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ 7500 rpm	58
4.23 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมใน ลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm	59
4.24 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 7500 rpm	59
4.25 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm	60
4.26 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm	60
4.27 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm	61
4.28 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	62
4.30 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่ง โรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	62
4.31 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	63
4.32 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	63
4.33 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	64
4.34 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	65
4.35 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	65
4.36 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	65
4.37 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมใน ลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	66
4.38 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	67
4.39 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	67
4.40 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	68
4.41 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ ทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm	69
4.43 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	69
4.44 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	70
4.45 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	70
4.46 เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของกระแสเฟส A ที่มุม $\theta_{on} = 32.5$ $\theta_{off} = 47.5$	71
4.47 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	72
4.48 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	72
4.49 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encorder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A	73
4.50 เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของกระแสเฟส A ที่มุม $\theta_{on} = 32.5$ $\theta_{off} = 47.5$	74
ก.1 แบบโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	79
ก.2 โครงสร้างสวิตช์รีลักแตนซ์จากโปรแกรม CATIA	80
ก.3 กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในโครงสร้างของสวิตช์รีลักแตนซ์	81
ก.4 กำหนดขอบเขตในการวิเคราะห์ข้อมูล Boundary	81
ก.5 กำหนดค่ากระแสในการทดลอง	82
ก.6 กำหนดจำนวนขดลวดของเฟส A ตามแบบข้อมูลจริง	82
ก.7 แสดงจุดในการวิเคราะห์ข้อมูล	83
ก.8 วิเคราะห์ข้อมูลโดยการยิงกระแสเข้าไปในขดลวดเฟส A	83
ก.9 ผลจากการวิเคราะห์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กได้	84
ก.10 วัดค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส	84

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานโครงการ	3
2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและแม่เหล็ก	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม	16
ข.1 ข้อมูลสำหรับฝึกสอน	89
ข.2 ผลจากการสอนข้อมูลให้โครงข่ายประสาทเทียม	96
ข.3 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่ง	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อโครงการ

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง
(Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor)

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วยื่น มอเตอร์ชนิดนี้ถูกค้นพบมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา เพราะถึงแม้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์จะง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เช่นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

1.3 โครงการที่นำเสนอ

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิธีการในการหาตำแหน่งโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์โดยไม่มีเซนเซอร์ แต่จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) ในการหาตำแหน่งของโรเตอร์แทนโดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ ฟลักซ์เกี่ยวค้ำ (flux linkage) และกระแส ของแต่ละเฟส เป็นตัวแปรต้น และตำแหน่งของโรเตอร์ที่สอดคล้อง เป็นตัวแปรตาม จากนั้น ทำการป้อนชุดข้อมูลของ ฟลักซ์เกี่ยวค้ำ กระแส และตำแหน่งของโรเตอร์ ให้มากพอ เพื่อให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) สามารถประมวลผลและประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์ ที่เหมาะสมได้

1.4 วัตถุประสงค์และผลงานที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบมอเตอร์

1.4.2 เพื่อศึกษาระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.3 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์

1.5 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้

1.5.1 มีความเข้าใจหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์แบบมอเตอร์

1.5.2 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เพื่อนำไปใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์

1.5.3 ได้เรียนรู้ถึงหลักการการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทเทียมและสามารถเขียนโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมได้

1.5.4 เข้าใจพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์ ในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring)

จากที่กล่าวมา มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนต์ถือว่ามีคุณสมบัติบางประการต่างจากมอเตอร์ที่เรารู้จักกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานบางงานที่ขอบเขตความสามารถของมอเตอร์ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ เพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีเก่าหรือสร้างเทคโนโลยีใหม่ๆให้เกิดขึ้นเป็นประโยชน์ต่อไป

1.6 ขอบเขตของโครงการ

เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์

1.7 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1.7.1 ศึกษาทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์

ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนต์ในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring) เพื่อให้เข้าใจ และสามารถนำไปใช้ในการดำเนินโครงการ

1.7.2 ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรม MATLAB

วิเคราะห์ลักษณะการทำงานในช่วงที่เป็นมอเตอร์ และการควบคุมกระแส เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองที่ได้ออกมามีความถูกต้อง เราจำเป็นต้องทำการศึกษาวิธีการใช้ เครื่องมือต่างๆของโปรแกรม เงื่อนไขการทำงาน เพื่อให้สอดคล้องกับสิ่งที่เราทำการวิเคราะห์ต่อไป

1.7.3 สร้างแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ทำการหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยการเลือกวิธีการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทเทียม วิธีการสอนการเรียนรู้ของระบบโครงข่ายประสาทเทียม ฟังก์ชันการกระตุ้นของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7.4 สร้างระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำไปใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ทำการสร้างแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Networks)โดยใช้โปรแกรม MATLAB ทำการจำลองระบบและทำการหาค่าน้ำหนักเริ่มต้น ค่าไบอัสเริ่มต้น ชนิดของฟังก์ชัน และ ขนาดของโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

1.7.5 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์โดยใช้สัมประสิทธิ์สไปนเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1.7.6 วัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส

นำแบบจำลองของระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring) โดยการกระแสของสเตเตอร์และค่าฟลักซ์เกี่ยวค้ำเป็นตัวแทน

1.8 แผนการดำเนินโครงการ

หัวข้อ(ภาคเรียนที่1)	กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
สัปดาห์ที่																
ศึกษาทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	←————→															
ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรม MATLAB					←————→											
ศึกษาระบบโครงข่ายประสาทเทียม									←————→							
สร้างระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำไปใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์													←————→			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ(ภาคเรียนที่2)	ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
สัปดาห์ที่	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	↔															
วัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส				↔												
ปรับปรุงและแก้ไข						↔										
สรุปผล									↔							
จัดทำรูปเล่ม													↔			
นำเสนอผลงาน															↔	

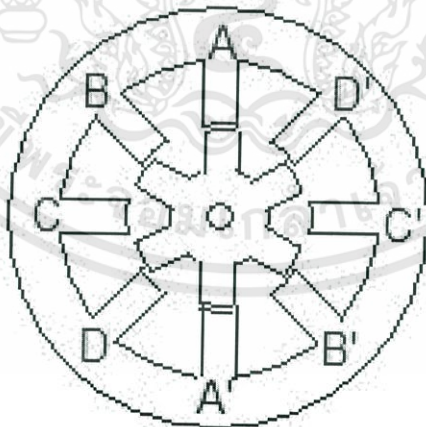
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์และโครงข่ายประสาทเทียม

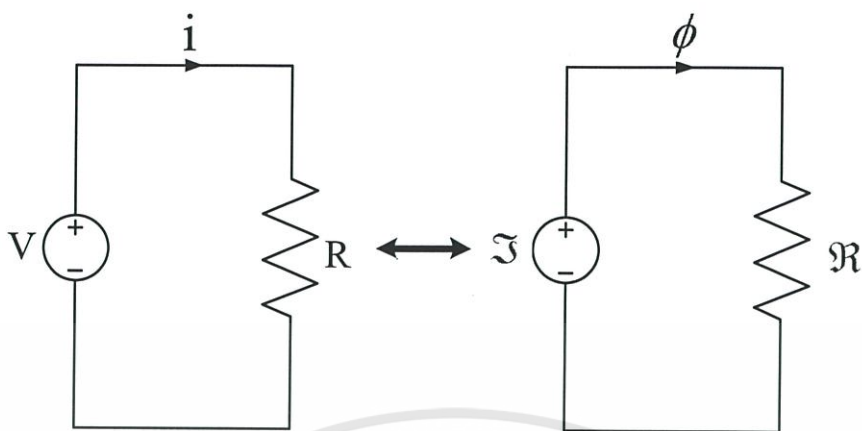
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ส่วนโรเตอร์ซึ่งไม่มีขดลวดสร้างสนามซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลชนิดนี้นั้นทำได้ง่ายและราคาถูก โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) สำหรับหลักทำงานเป็นการเหนี่ยวนำขั้วที่สเตเตอร์เป็นแม่เหล็กดูดเหล็ก (ตัวโรเตอร์) จะได้แรงบิดเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ส่วนของโรเตอร์เคลื่อนที่ เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดซึ่งจะคงตำแหน่งนี้ไว้หากป้อนกระแสที่เฟสเดิมไว้ และสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการหยุดป้อนกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเฟสเดิมแล้วกระตุ้นให้กับขดลวดที่อยู่ในเฟสถัดไปในช่วงการทำงานเป็นมอเตอร์จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าต้องการให้ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์จะมีกระแสไหลเข้าในแต่ละเฟสเพียงทิศทางเดียวและแต่ละเฟสยังเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นซึ่งทำให้ยากต่อการลัดวงจร จึงเหมาะในงานที่มีความต้องการเฉพาะเจาะจงเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีจุดเด่นคือมีความเร็วรอบและความหนาแน่นสูงแต่ยากต่อการควบคุม



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ

2.1.1 ค่ารีล็กแตนซ์



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก

วงจรสมมูลทางแม่เหล็กจะมีหลักการเหมือนกับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบมีเฉพาะความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยค่า Reluctance เปรียบเสมือนค่าความต้านทานในวงจรสมมูลทางไฟฟ้า mmf จะเปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า โดยที่

$$\mathfrak{F} = Ni \quad (2.1)$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบ และ i คือกระแสไฟฟ้าในขดลวดเส้นแรงแม่เหล็กจะเปรียบเสมือนกับกระแสไฟฟ้างั้นเราสามารถกำหนดนิยามของรีล็กแตนซ์ได้ดังนี้

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\phi} = \frac{N^2}{L} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและแม่เหล็ก

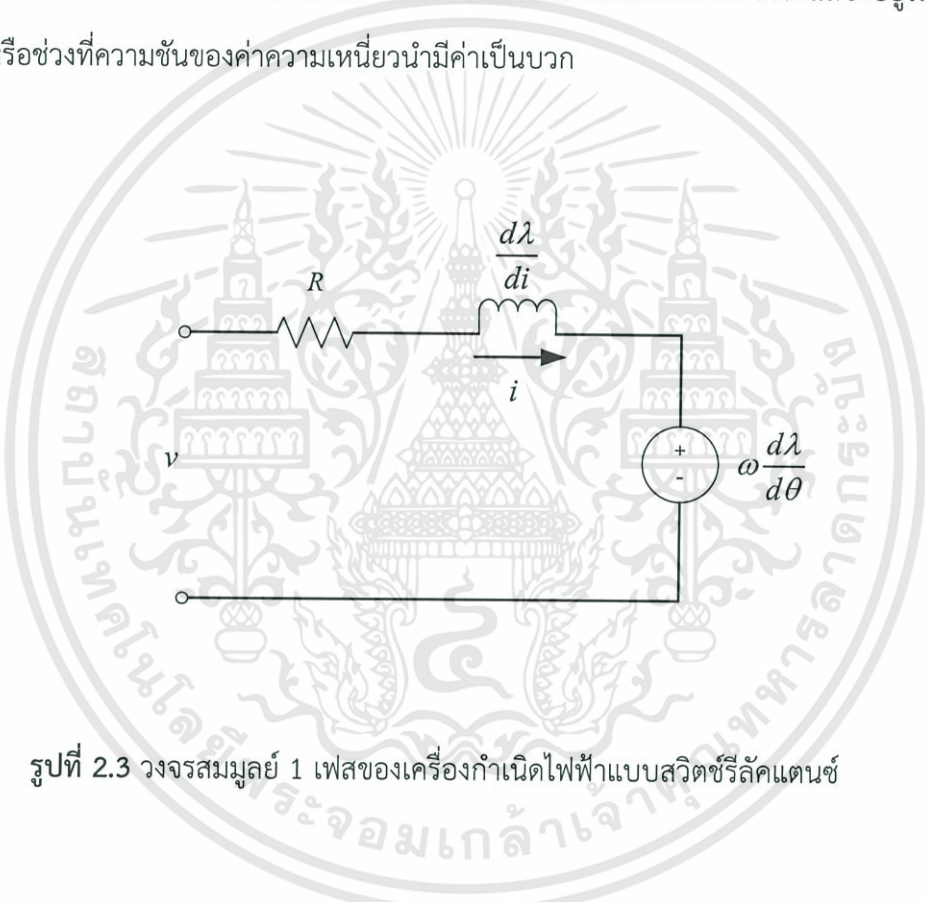
วงจรสมมูลทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก
Voltage, v	Magnetomotive Force (mmf), \mathfrak{F}
Current, i	Magnetic Flux, ϕ
Resistance, R	Reluctance, \mathfrak{R}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ L คือความยาวของวัตถุตามแนวเส้นแรงแม่เหล็ก และ A คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ดังนั้นการรวมรีลักแตนซ์ จึงสามารถรวมได้สองรูปแบบคือแบบอนุกรมและแบบขนานเหมือนกับตัวต้านทาน

2.1.2 วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ นั้นสามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดและมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของการนำกระแสของชุดขั้วเคลื่อน โดยขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามุมของการนำกระแสจะอยู่ในช่วงที่ $\frac{dL}{d\theta} < 0$ หรือเป็นช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ ส่วนการทำงานขณะที่เป็นมอเตอร์การนำกระแสจะอยู่ในช่วงที่ $\frac{dL}{d\theta} > 0$ หรือช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ทางพลวัตของ SRG ซึ่งเมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.3 สามารถเขียนสมการทางแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (2.4)$$

หรือแทนค่า $\omega = d\theta/dt$ ใน สมการที่ (2.4) จะได้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (2.5)$$

ในเทอมที่ 3 ของสมการที่ (2.5) คือค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (*bemf*)

$$bemf = i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (2.6)$$

โดยที่ v คือ แรงดันเฟส

i คือกระแสเฟส

R คือความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$L(i, \theta)$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส

θ คือตำแหน่งของโรเตอร์ และ ω คือความเร็วรอบของโรเตอร์

โดยปกติทิศทางการไหลของกระแสเฟสนั้นจะเป็นบวกเสมอ เนื่องจากว่าเครื่องหมายของค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนั้นขึ้นกับค่า $\frac{dL}{d\theta}$ ซึ่งเมื่อค่า $\frac{dL}{d\theta} > 0$ แล้วค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าเป็นบวก ผลทำให้กระแสมีค่าลดลง ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงนี้จะเป็นมอเตอร์ ขณะที่ $\frac{dL}{d\theta} < 0$ นั้นค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าเป็นลบ ผลจะทำให้กระแสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการทำงานในช่วงนี้จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของโรเตอร์ (ω) และกระแสเฟส (i) ในขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

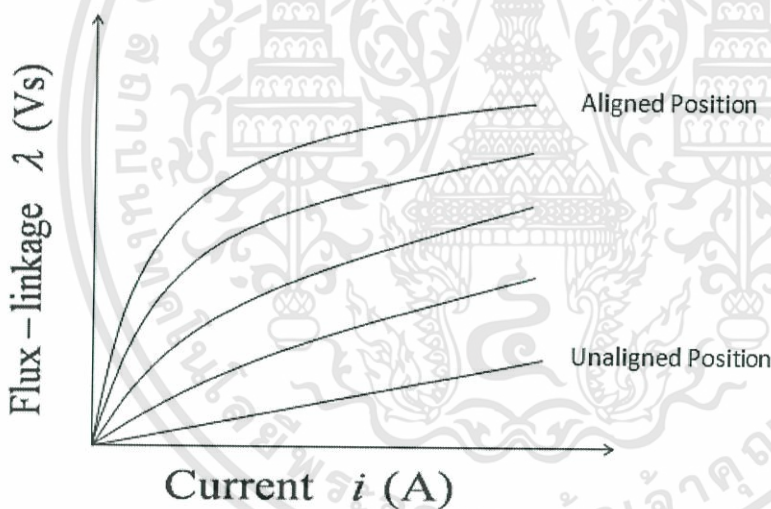
2.1.3 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นเอกลักษณ์ดังต่อไปนี้

- 1) ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) ดังแสดงในภาพที่ 2.1
- 2) ที่แต่ละขั้วสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่จำนวน 1 ขดเท่านั้น และสามารถนำขดลวดที่ขั้วต่างๆ ที่เหมาะสมมาต่อเข้าด้วยกันได้ทั้งแบบอนุกรมหรือขนาน และเรียกรวมว่าขดลวดเฟส (Phase Windings)
- 3) ที่ขั้วของโรเตอร์ไม่ได้เป็นแม่เหล็กถาวรและไม่มีขดลวดพันอยู่
- 4) จำนวนขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$N_s = 2 \cdot \text{phase} \cdot \text{polepair} \quad (2.7)$$

$$N_r = 2 \cdot (\text{phase}-1) \cdot \text{polepair} \text{ or } 2 \cdot (\text{phase}+1) \cdot \text{polepair} \quad (2.8)$$

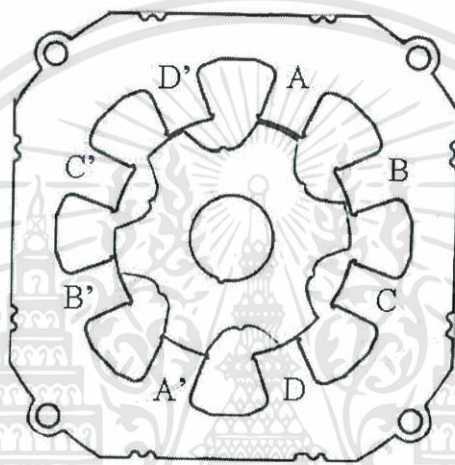


รูปที่ 2.4 กราฟ Magnetizing

กราฟ Magnetizing คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง λ กับ กระแสในขดลวดเฟส i เมื่อแต่ละเส้นคือตำแหน่งโรเตอร์ใดๆซึ่งตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ก็ได้ตั้งแต่ตำแหน่ง unaligned จนถึงตำแหน่ง aligned จึงทำให้เส้นกราฟมีได้หลายเส้นตามตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ตามแต่จะพิจารณา จึงกล่าวได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องเป็นฟังก์ชันของกระแสเฟส และตำแหน่งของโรเตอร์, $\lambda(i, \theta)$ ดังแสดงในภาพที่ 2.4

2.1.4 ตำแหน่ง Aligned

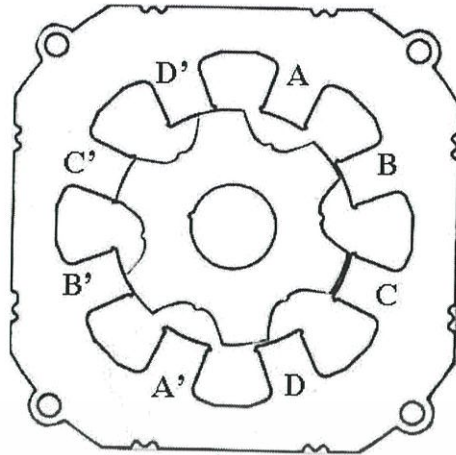
ณ ตำแหน่ง aligned นี้คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆวางอยู่ในแนวเดียวกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในภาพที่ 2.5 แสดงถึงมอเตอร์สี่เฟสชนิด 8/6 โดยกำหนดให้เฟสที่ A คือเฟสในแนวตั้งฉาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขั้วของโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ A ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟสที่ A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีความเหนียวแน่นที่สุดและถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังตำแหน่ง aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)



รูปที่ 2.5 SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Aligned ที่เฟส A

2.1.5 ตำแหน่ง Unaligned

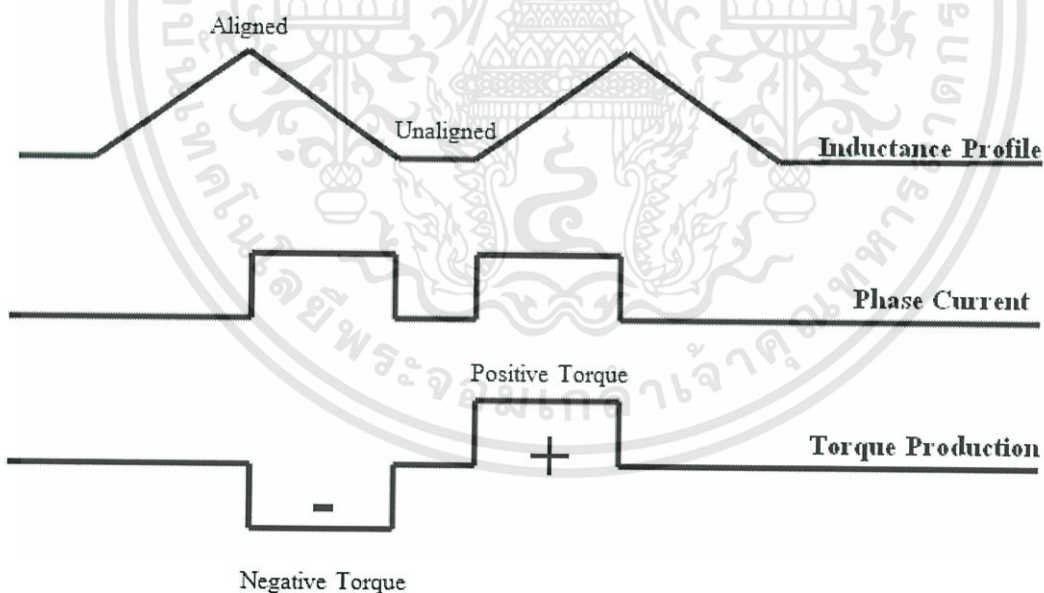
ณ ตำแหน่งนี้แกนตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟส A ดังภาพที่ 2.6 เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสที่ A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่องจากความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด จึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุด ส่งผลให้ค่าความเหนียวแน่นของวงจรมีค่าต่ำที่สุด และถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดที่ตำแหน่ง aligned ดังนั้น ณ จุด unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)



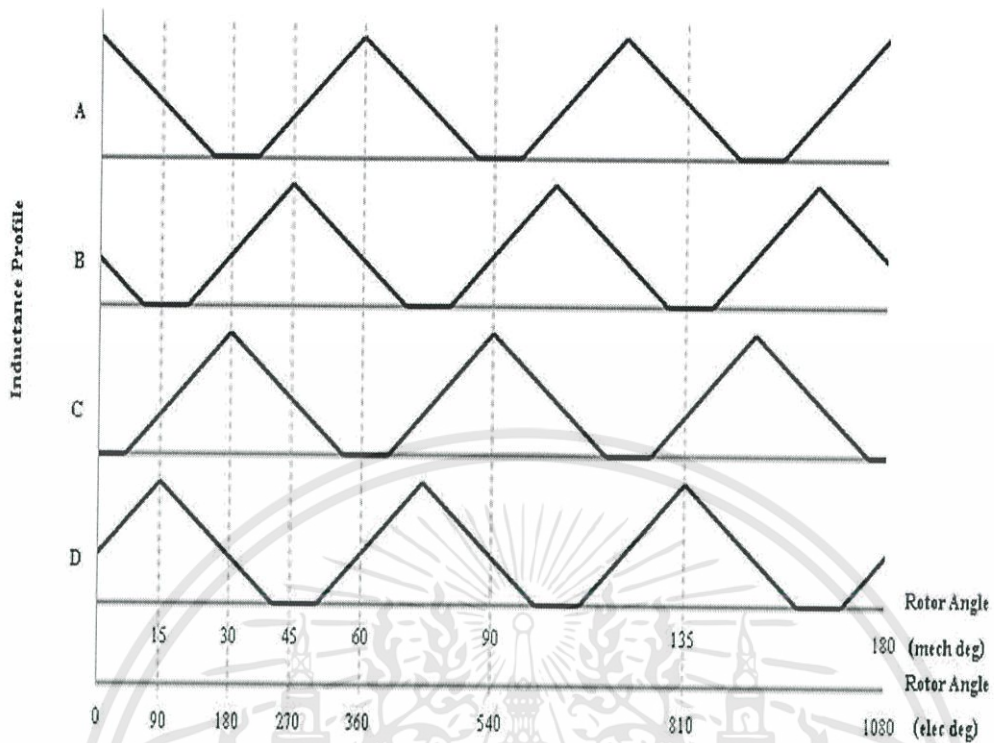
รูปที่ 2.6 SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Unaligned ที่เฟส A

2.1.6 แรงบิด

เมื่อเราป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดเฟสใดขดหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงบิดส่งผลให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งกล่าวง่าย ๆ ก็คือ แรงบิดจะทำให้โรเตอร์หมุนเข้าหาตำแหน่ง aligned และจะหยุดที่ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด ซึ่งก็คือที่ตำแหน่ง aligned นั่นเอง ณ จุดนี้ แรงบิดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งโรเตอร์จะรักษาการมีสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium) โดยที่แรงบิดจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด



รูปที่ 2.7 ค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส



รูปที่ 2.8 ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของ SRM แบบ 8/6

จากภาพที่ 2.7 ถ้าป้อนกระแสเข้าขดลวดในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์เป็นค่าบวกจะได้แรงบิดที่มีค่าเป็นบวก (Positive Torque) แรงบิดนี้เรียกว่าแรงบิดแบบมอเตอร์ (Motoring Torque) แต่ในทางกลับกัน ถ้าป้อนกระแสเข้าขดลวดในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์เป็นค่าลบจะได้แรงบิดที่มีค่าเป็นลบ (Negative Torque) แรงบิดนี้จะถูกเรียกว่าแรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating Torque)

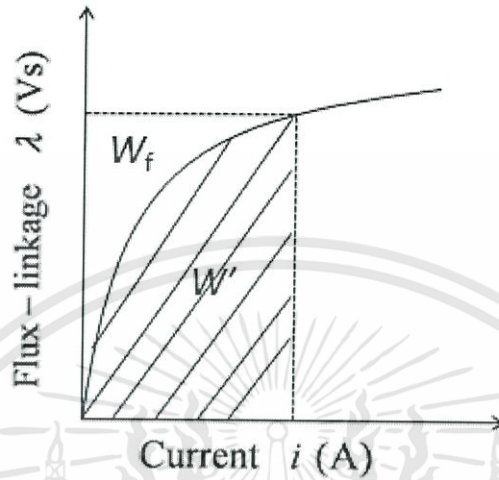
สมการแรงบิดที่เกิดขึ้นของเฟสใดเฟสหนึ่ง ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ จะสามารถหาได้จาก สมการที่ 2.9 ดังนี้

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{constant}} \quad (2.9)$$

โดยที่ W' คือ Co-energy ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Magnetizing และ θ คือ ตำแหน่งของโรเตอร์

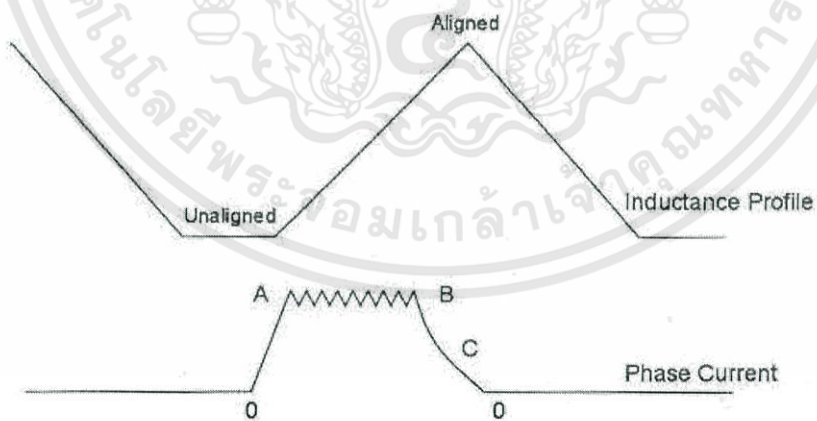
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W' = \int_0^{i_i} \lambda di \Big|_{\theta=const} \quad (2.10)$$



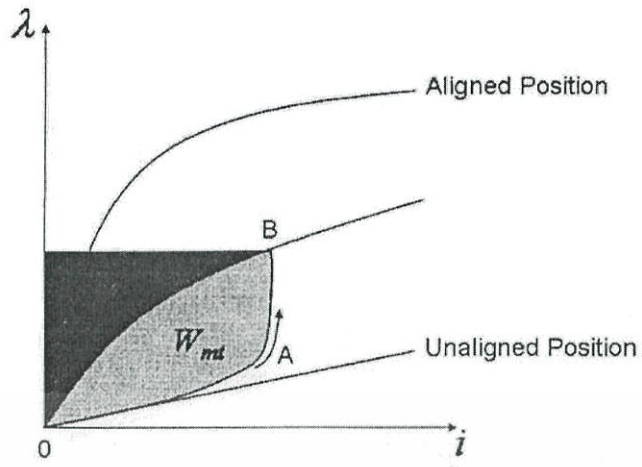
รูปที่ 2.9 แสดงค่าพลังงานสะสมและ Co-energy

2.1.7 วงจรถ่ายเทพลังงาน

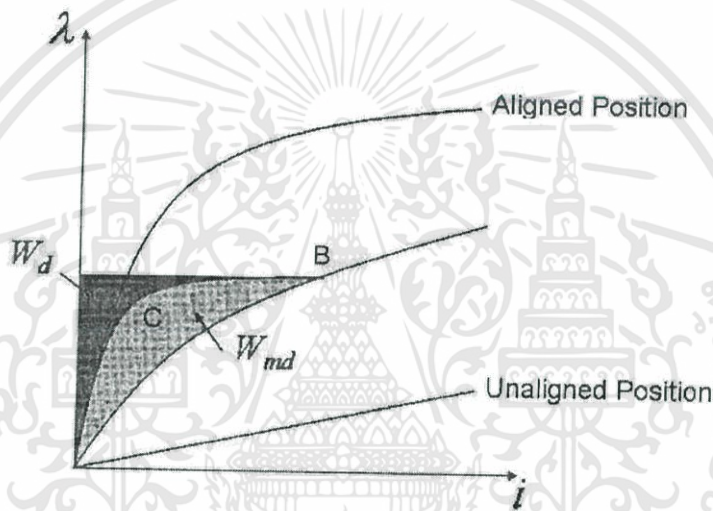


รูป 2.10 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเฟสในช่วงความชันเป็นบวก

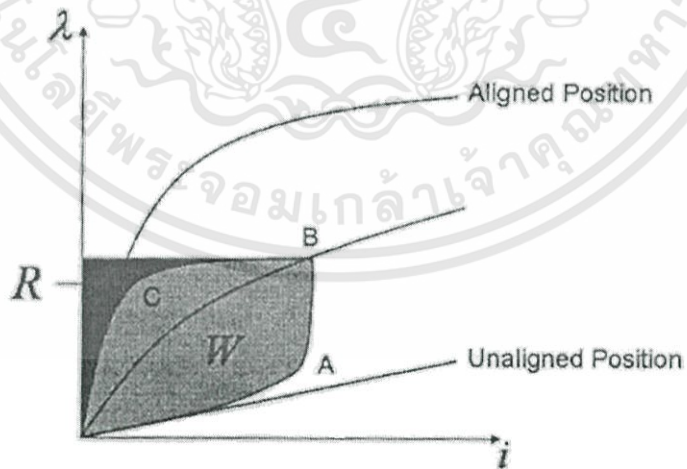
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 2.11 แสดงวงรอบการทำงานของวงจรถ่ายเทพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนแรงดันดีซีลิงค์ค่าบวกให้กับขดลวด เฟสของกระแสจะเพิ่มขึ้นจากจุด 0 ไปยังจุด A ในขณะที่โรเตอร์เคลื่อนไปเป็นมุมเพียงเล็กน้อยและเมื่อขั้วของโรเตอร์กับสเตเตอร์เริ่มทับซ้อนกัน ค่าความเหนี่ยวนำของเฟสและแรงดันต้านกลับจะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสลดลง และจากจุด A ไปยังจุด B จะควบคุมกระแสให้คงที่แต่เส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากรูป 2.11 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 2.11 ข เมื่อต้องการลดกระแสสู่ศูนย์ขดลวดเฟสจะถูกต่อเข้ากับค่าลบของดีซีลิงค์ จากจุด B ไปยังจุด C นั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จากจุด C ไปยังจุด 0 อัตราการลดลงของกระแสจะลดลงเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าแรงดันต้านกลับที่สูงขึ้น พลังงานส่วนพื้นที่ w_d จะถูกถ่ายคืนกลับสู่แหล่งจ่ายและพื้นที่ w_{md} จะเป็นส่วนที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้และจากรูป 2.11 ค จะเห็นว่าเมื่อพิจารณามอเตอร์ครบแล้วจะเห็นว่า พลังงานที่เปลี่ยนเป็นพลังงานกลจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ w ซึ่งมีค่าเท่ากับ $w_{mt} + w_{md}$ และพลังงานที่ถูกถ่ายคืนกลับสู่แหล่งจ่ายเท่ากับพื้นที่ R และพลังงานที่ได้รับจากแหล่งจ่ายทั้งหมดเท่ากับพื้นที่ $w + R$

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นแนวคิดที่ถูกออกแบบให้ทำงานเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ ซึ่ง ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล (Processing Elements) ซึ่งมีเซลล์หลายๆ ตัวที่ทำหน้าที่คล้ายกับเซลล์ สมองของมนุษย์ โดยที่แต่ละเซลล์จะโยงใยติดต่อกันโดยส่งสัญญาณออกเป็นเอาทพุต (Output) ของส่วนที่ เรียกว่า เดนไดรต (Dendrites) และเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลจะได้เอาทพุตออกมาในส่วนที่เรียกว่า แอ็กซอน (Axon) ในแต่ละเซลล์จะรับรู้ข้อมูลจากหลายทาง แล้วส่งต่อไปยังเซลล์อื่นๆ โดยใช้หลักการ Synaptic Strength ของการเชื่อมโยงเซลล์สมอง

ส่วนวิธีการประมวลผลภายใน โดยเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีจุดเชื่อมโยงระหว่างการทำงาน เป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการกระตุ้น (Excitatory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามา มีความถี่สูงขึ้น และลักษณะการยับยั้ง (Inhibitory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามา มีความถี่ลดลง ซึ่งแบบจำลองของ Neural Network จะมีอัตราขยายหรือหดได้เมื่อถูกกำหนดด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง เซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม

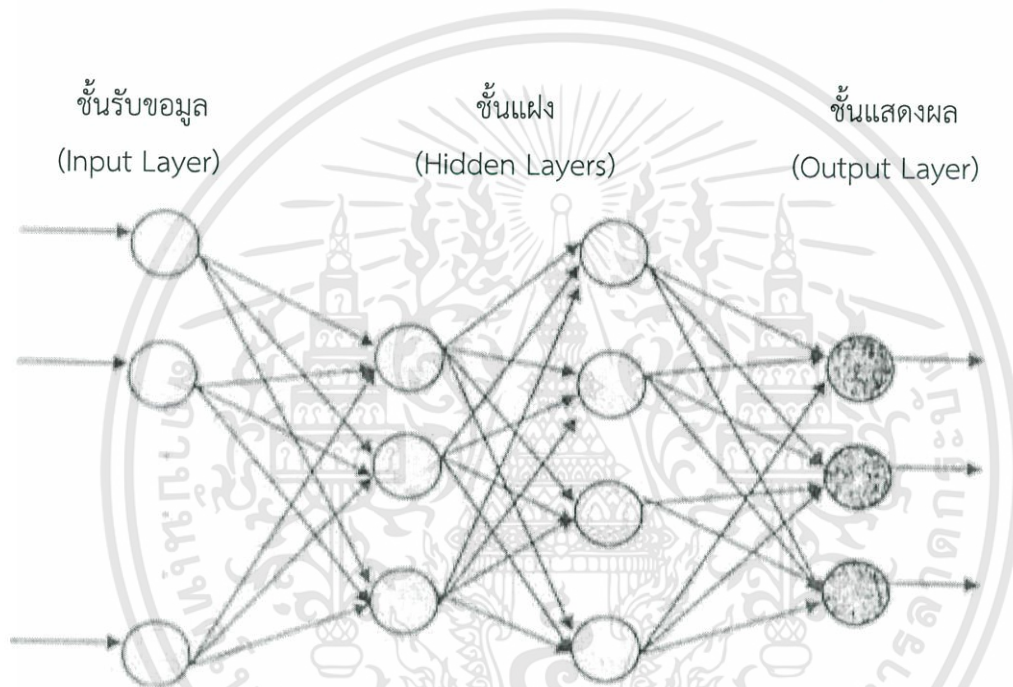
ลำดับ	เซลล์ประสาท	เซลล์ประสาทเทียม
1	ตัวเซลล์ (Cell Body)	ยูนิต (Unit)
2	เดนไดรต (Dendrites)	ตัวแปรอินพุต (Input)
3	แอ็กซอน (Axon)	ตัวแปรเอาทพุต (Output)
4	ไซแนปส์ (Synapse)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางที่มีโครงสร้าง เป็นลักษณะของโครงข่ายเชื่อมโยงกันระหว่างหน่วย ซึ่งสามารถที่จะรับข้อมูลและปรับตัวเข้ากับ สถานการณ์หรือสิ่งแวดล้อมที่กำลังเผชิญอยู่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการสร้างระบบคอมพิวเตอร์อัจฉริยะ (Intelligent Computer System) อย่าง ใฝ่ผล นอกจากนี้ ANNs ยังเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ คำนวณและการจดจำ เช่น การจำแนกข้อมูล (Data Classification) การทำนายเหตุการณ์ (Forecasting) การ บีบอัดข้อมูล (Data Compression) การกรองสัญญาณ Noise (Noise Filtering) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 หลักการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

การจำลองระบบโครงสร้างประสาทเทียม มีการจำลองเป็นชั้น ๆ โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) ชั้นแฝง (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output Layer) ในแต่ละชั้น ประกอบด้วยหน่วย (Node) ในชั้นแฝงประกอบด้วยหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลไปสู่ชั้นแสดงผล และในชั้นแต่ละชั้นแสดงผล และในชั้นแสดงผลประกอบด้วยหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งตัวแปรदानออก (Output) ในระหว่างชั้นแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมต่อ (Link) แต่ละการเชื่อมต่อจะมีค่าน้ำหนัก (Weights) เฉพาะสำหรับทำหน้าที่แทนค่าความแข็งแรง (Strength) ของการเชื่อมต่อของเซลล์สมองมนุษย์ โครงสร้างของระบบ โครงข่ายประสาทเทียมแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ชั้นโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

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 ก็จะส่ง output ออกไป output นี้ก็จะถูกส่งไปยัง input ของ neuron อื่น ๆ ที่เชื่อมกันใน network ถ้าค่าน้อยกว่า threshold ก็จะไม่เกิด output เขียนออกมาได้ดังนี้

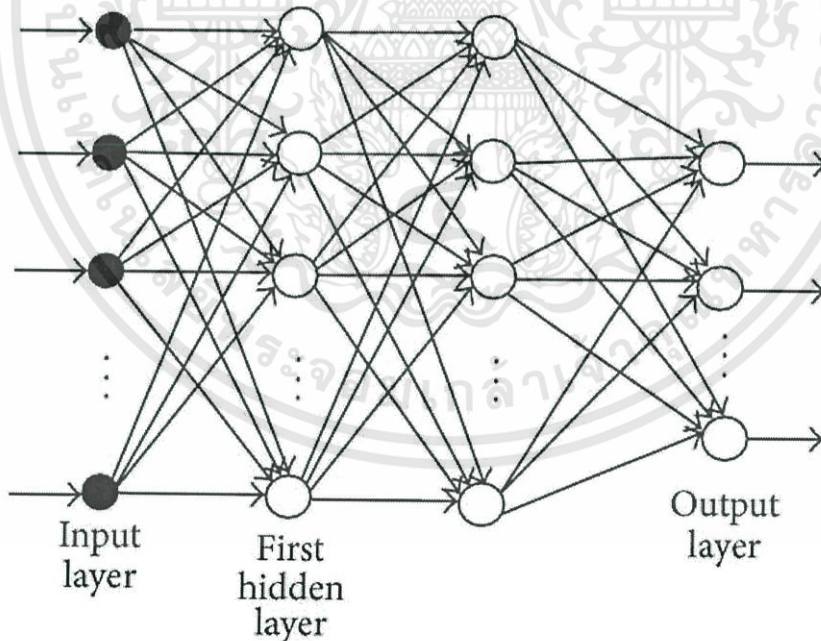
$$\text{if (sum(input * weight) > threshold) then output} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญคือเราต้องทราบค่า weight และ threshold สำหรับสิ่งที่เราต้องการ เพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้จัก ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้ โดยการสอนให้มันรู้จัก pattern ของสิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จัก เรียกว่า "back propagation" ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จัก ในการฝึก feed-forward neural networks จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบ back-propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนัก คะแนนของเครือข่าย (network weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ค่าที่ได้รับ (output) จากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความ ผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนั้นจะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

2.2.2 Back propagation Algorithm

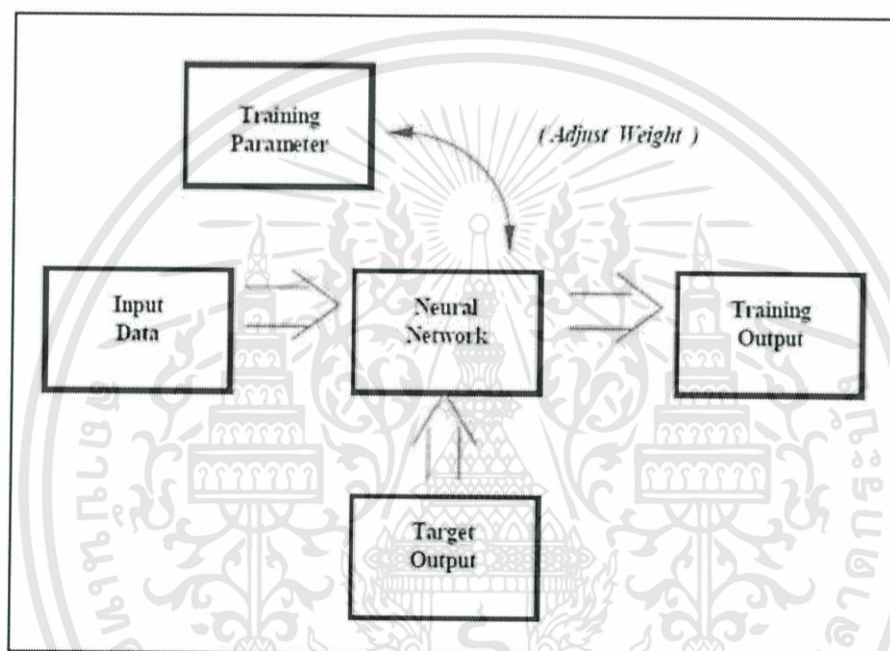
Back-propagation เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ใน multilayer perceptron เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาจขึ้นกับ ความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ พิจารณารูปต่อไปนี้ประกอบ



รูปที่ 2.13 รูปแบบ Back-propagation neural network

2.2.3 การเรียนรู้สำหรับ Neural Network

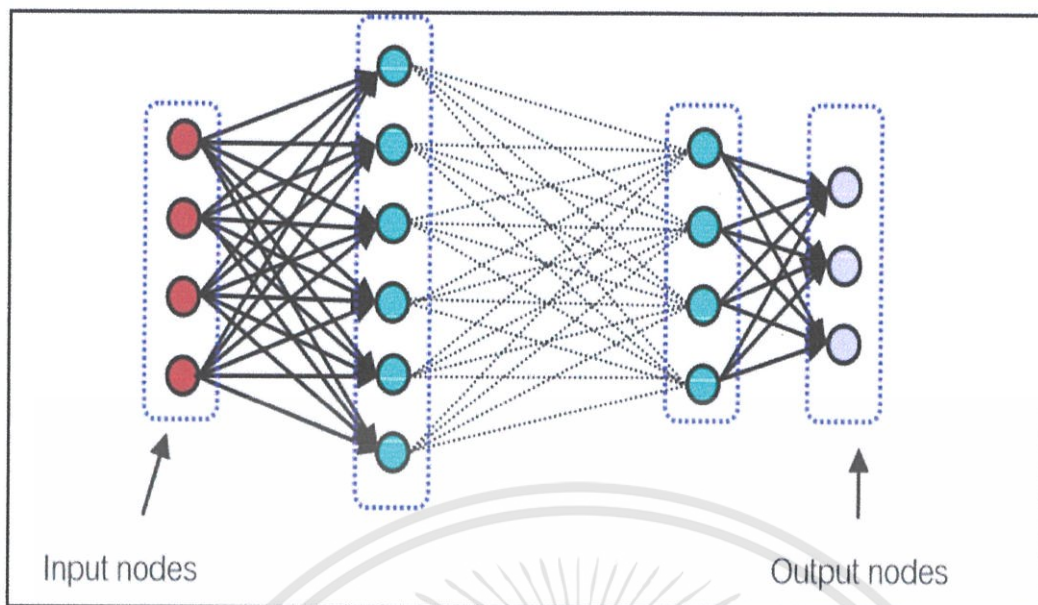
Supervised Learning การเรียนแบบมีการสอนเป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้วงจรข่ายปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใช้สอนวงจรข่ายจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าวงจรข่ายให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก วงจรข่ายก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน เหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ)



รูปที่ 2.14 การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised Learning)

2.2.4 Feedforward network

ข้อมูลที่ประมวลผลในวงจรข่ายจะถูกส่งไปในทิศทางเดียวจาก Input nodes ส่งต่อมาเรื่อย ๆ จนถึง output nodes โดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล หรือแม้แต่ Nodes ใน layer เดียวกันก็ไม่มี的连接ต่อกัน

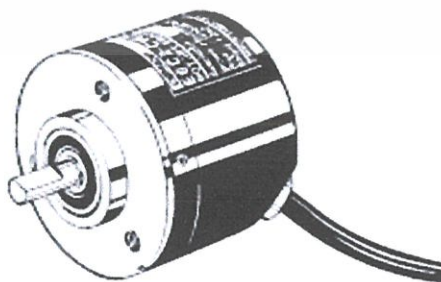


รูปที่ 2.15 สถาปัตยกรรมของ Feedforward network

2.3 ทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

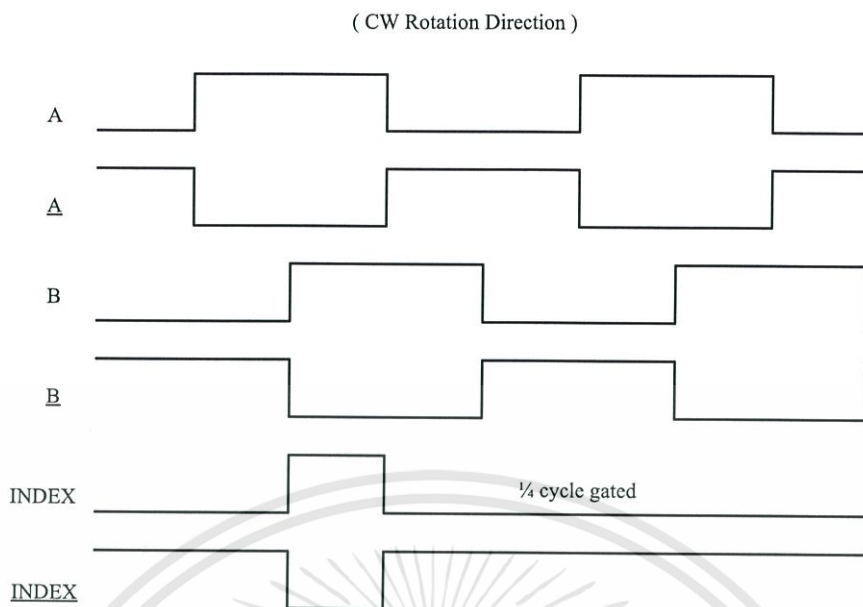
2.3.1 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Incremental Encoder)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบ Incremental Encoder เบอร์ R137S ของบริษัท Gurley Precision Instruments ลักษณะทั่วไปของเอ็นโค้ดเดอร์นี้แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งขณะทำงานเมื่อหมุน 1 รอบจะมีเอาต์พุตออกมา 2 เฟสคือ เฟส A และ B โดยแต่ละเฟสจะมีพัลส์เอาต์พุต 3600 พัลส์ และทุกๆรอบของการหมุนจะมีสัญญาณอ้างอิง (INDEX) 1 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งในการทำงานต้องการแหล่งจ่าย +5 โวลต์เป็นไฟเลี้ยง รูปร่างของสัญญาณจะมีสองเฟสคือ A และ B จะต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 เอ็นโค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็นโคดเดอร์

2.3.2 Levenberg-Marquardt Method

Levenberg-Marquardt เป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมกับวิธีเกาส์นิวตันในการหาค่าต่ำสุดของการทำงานของฟังก์ชัน เป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์สมการไม่เชิงเส้นซึ่งเป็สมการขนาดกลาง และเป็นสมการต่อเนื่องที่อนุพันธ์อันดับสอง เมื่อนำมาใช้กับกับโครงข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จะเป็นวิธีการเรียนรู้ที่หาคำตอบได้รวดเร็ว

$$f(x) = (0.5)(r_1^2(x) + r_2^2(x) + r_3^2(x) + \dots + r_n^2(x)) \quad (2.12)$$

2.3.3 สมการปรับขนาดตัวแปร (Transfer-function)

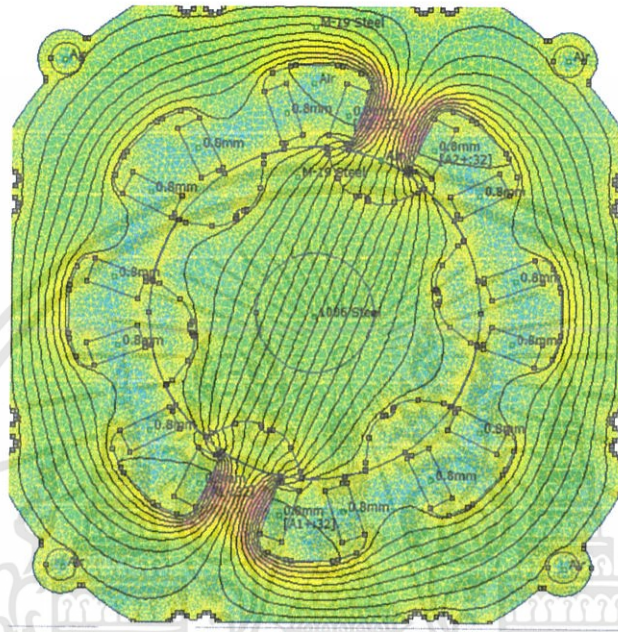
Transfer-fuction ที่ใช้ในบทความนี้มี 2 ประเภทคือ Tan-sigmoid และ Purelin โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดย Tan-sigmoid จะถูกใช้ใน Hidden layer เพราะมีช่วงที่กว้างกว่า ส่วน Output layer นั้นใช้ Purelin ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น

$$F(n) = (1 - e^{-n}) / (1 + e^{-n}) \quad (2.13)$$

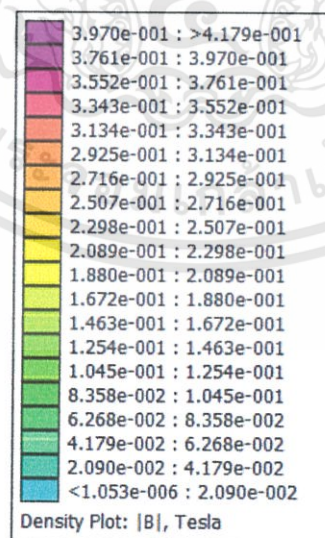
$$F(n) = n \quad (2.14)$$

2.3.4 โปรแกรม Finite Element Method Magnetics

โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (Femm) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองเส้นแรงของฟลักซ์ โดยในโครงงานนี้ได้มีการป้อนกระแสเพื่อหาข้อมูลของฟลักซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 และทำการวัดค่าของฟลักซ์เพื่อนำมาเป็นข้อมูล สำหรับการสอนของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 2.18 แสดงค่าของความหนาแน่นของฟลักซ์ในเครื่องจักรสวิตช์รีลักแตนซ์



รูปที่ 2.19 แสดงปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์ในแต่ละสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

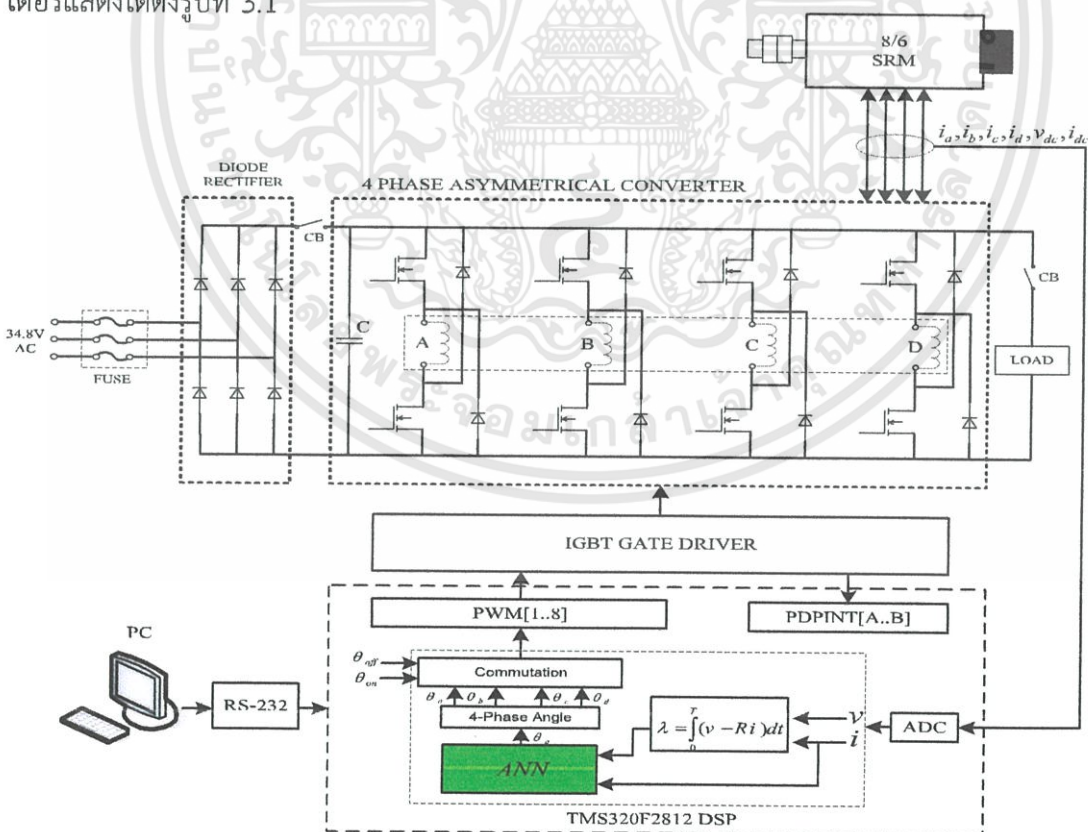
3.1 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

3.1.1 บทนำ

การทำงานในสภาวะปกติจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจจับ (Sensor) ในการตรวจจับตำแหน่งมุมของโรเตอร์เพื่อจะใช้ในการสั่งการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง (IGBT) โดยทั่วไปจะใช้ Encoder ในการตรวจจับมุมของโรเตอร์และนำมาประมวลผลเปรียบเทียบภายใน DSP (Digital Signal Processing)

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้อัลกอริทึมมาช่วยในการวิเคราะห์ผลต่างๆ มากมายหนึ่งในนั้นคือ การใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความแน่นอนในการประมวลผล โดยจะนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาฟังก์ชัน น้ำหนัก ค่าไบอัส ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการบันทึกข้อมูลจากโปรแกรม FEM มาช่วยในการประมาณตำแหน่งมุมโรเตอร์แทนตัวตรวจจับตำแหน่งมุมของโรเตอร์ (Encoder) ซึ่งจะช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวตรวจจับลงได้

แบบจำลองสำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาแทนตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1

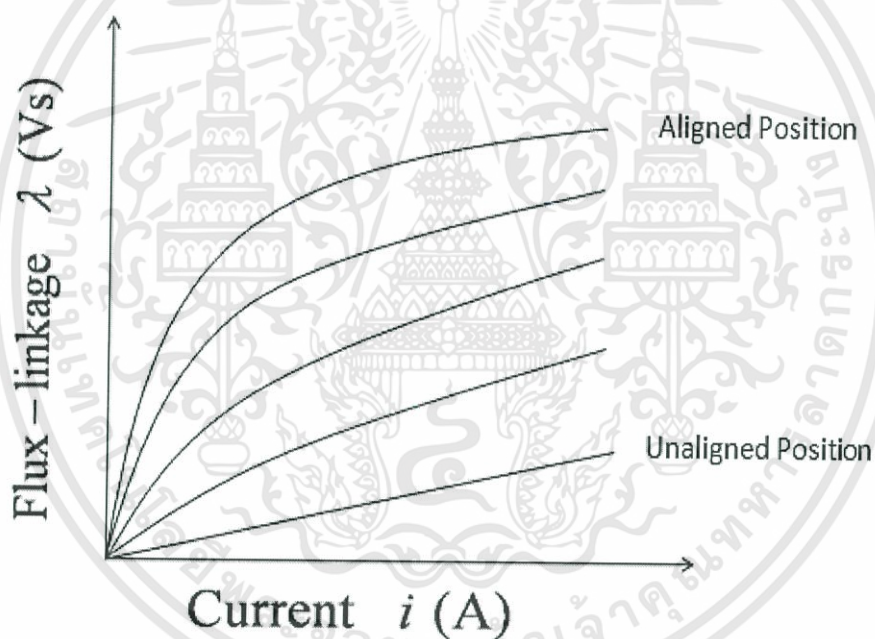


รูปที่ 3.1 แบบจำลองการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ (SRM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงระบบรวมที่ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมแทนตัวตรวจจับ โดยจะมีตัววัดกระแสและแรงดัน โดยจะใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ และนำค่ากระแสกับเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำมาใช้ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยผ่านโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับข้อมูลและผลตอบสนองที่ต้องการ ซึ่งประโยชน์จากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำหน้าที่แทนเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับมุมของโรเตอร์ได้ โดยการสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลและผลตอบสนองที่ต้องการและโครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าน้ำหนักและค่าไบอัสให้เหมาะสมกับผลตอบสนองที่ต้องการ โดยจะป้อนข้อมูล กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการคือ มุมของโรเตอร์ โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งมุมของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่ากระแส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ โดยที่กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำหนึ่งชุดจะได้ผลตอบสนองตำแหน่งมุมของโรเตอร์หนึ่งค่า การประมาณตำแหน่งมุมของโรเตอร์ด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมนี้มีความสำคัญอย่างมากในการแทนเซ็นเซอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

3.1.2 พิจารณาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้เลือกใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะในการทำงานแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward Neural Network) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) และฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น (Linear Active Function) ได้แก่ ฟังก์ชันลิเนียร์ (Linear Function) และฟังก์ชันกระตุ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Active Function) ได้แก่ ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid Function) เนื่องจากฟังก์ชันกระตุ้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความสามารถในการสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่มีลักษณะส่วนโค้งได้ จึงสามารถทดสอบกับรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ซับซ้อนได้ โดยมีโครงสร้างดังรูป 3.3

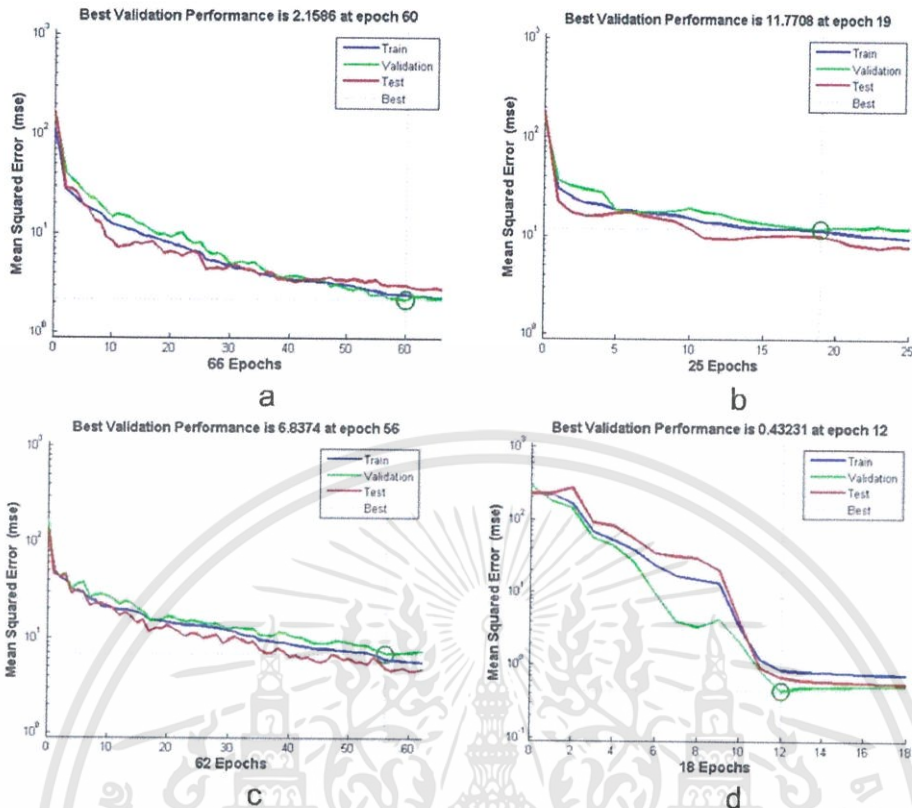


รูปที่ 3.3 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.3 เป็นแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่จัดเตรียมเพื่อใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งของมุมโรเตอร์ โดยโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ชั้น คือ ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid) เป็นฟังก์ชันกระตุ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น และ ชั้นผลิต (Output Layer) หรือ ชั้นสุดท้าย ใช้ฟังก์ชันลิเนียร์ (Linear Function) โดยมีการป้อนข้อมูลกระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคล่อง และผลตอบสนองที่ได้คือตำแหน่งมุมของโรเตอร์

3.1.3 พิจารณาฟังก์ชันในการสอน

เนื่องจากฟังก์ชันในการสอนสามารถเลือกได้หลายฟังก์ชันซึ่งขั้นตอนการพิจารณาค่าความผิดพลาดจะมีวิธีของแต่ละฟังก์ชันต่างกันออกไป ดังนั้นการจะเลือกใช้ฟังก์ชันที่จะให้ผลเฉลยได้ตรงมากที่สุดหรือค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดสามารถพิจารณาจากค่าที่เหมาะสม (Performance) โดยจะทดสอบข้อมูลหนึ่งชุดและหาค่าเหมาะสม Performance แต่ละฟังก์ชัน โดยจะเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละฟังก์ชันดังนี้



รูปที่ 3.4 Performance ของการสอนโดยใช้ฟังก์ชันต่างๆ

จากรูปที่ 3.4a จะเห็นได้ว่าการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainGP มีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1586 โดยอยู่ในครั้งที่ 60 ของการปรับค่าน้ำหนักและไบอัส รูปที่ 3.4b Performance ของการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainSCG จะเห็นได้ว่าการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainSCG มีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 11.7708 โดยอยู่ในครั้งที่ 19 ของการปรับค่าน้ำหนักและไบอัส รูปที่ 3.4c Performance ของการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainOSS จะเห็นได้ว่าการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainOSS มีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 6.8374 โดยอยู่ในครั้งที่ 62 ของการปรับค่าน้ำหนักและไบอัส และรูปที่ 3.4d Performance ของการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainLM จะเห็นได้ว่าการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน TrainLM มีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 0.43231 โดยอยู่ในครั้งที่ 18 ของการปรับค่าน้ำหนักและไบอัส

จากการพิจารณาฟังก์ชันในการสอนโดยใช้ฟังก์ชันในการสอนหลายๆรูปแบบด้วยกัน ดังเช่น TrainGP TrainSCG TrainOSS TrainLM พบว่ารูปแบบ Performance ของแต่ละฟังก์ชัน ต่างกันดังรูปที่ 3.4a 3.4b 3.4c และ 3.4d ซึ่งค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยย่อมต่างกัน โดยจากรูปที่ 3.4d พบว่ามีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้ฟังก์ชัน TrainLM ในการใช้งานกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกกำหนดไว้

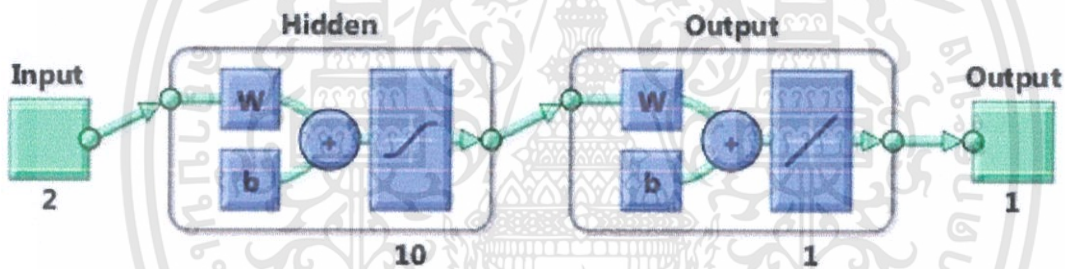
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูล

การสอนข้อมูลให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ โดยใช้การเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt สามารถทำได้โดยใช้ภาษาทาง Matlab ซึ่งสามารถบรรยายได้โดยใช้คำสั่งตามภาคผนวก ข โดยสามารถกำหนดรูปแบบการเรียนรู้ จำนวนนิวรอน ฟังก์ชันแต่ละชั้น (Layer) โดยจะต้องมีข้อมูลป้อนเข้า (Input) และ ข้อมูลที่ต้องการ (target) ซึ่งในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลนี้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักและค่าไบอัสให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่สอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ จะได้ผลของค่าน้ำหนักและไบอัส

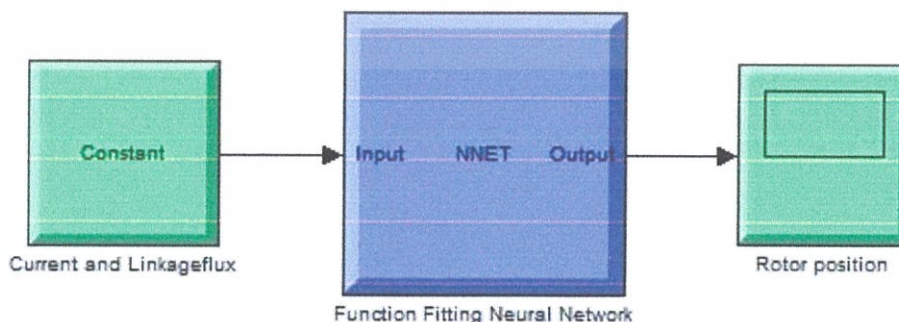
3.1.5 การออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ใช้โครงสร้างแบบจำลองที่ทำงานแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward Neural Network) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) โดยจะใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) 10 ตัวและชั้นผลิต (Output Layer) จะใช้จำนวนนิวรอน 1 ตัว ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในเรียนรู้

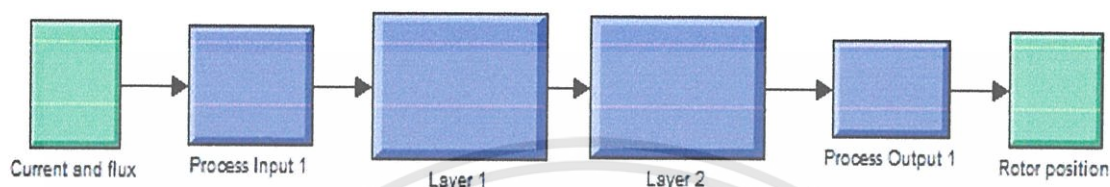
เราสามารถจำลองโครงสร้างใน Matlab โดยใช้การซิมมูลิ่ง (Simulink) เพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นได้ดังรูปที่ 3.6



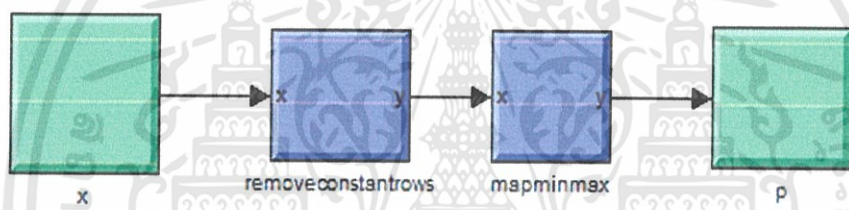
รูปที่ 3.6 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างด้านในของโครงข่ายประสาทเทียมก่อนข้างมีความซับซ้อนและจะประกอบด้วย 2 ชั้น นั่นคือชั้น 1 หรือชั้นซ่อน (Layer 1) กับ ชั้นผลิต (Layer 2) หรือชั้น 2 โดยมีกระบวนการย่อขนาดของข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ (Process input) และขยายข้อมูลกลับเพื่อนำไปใช้ (Process Output) ดังรูปที่ 3.7

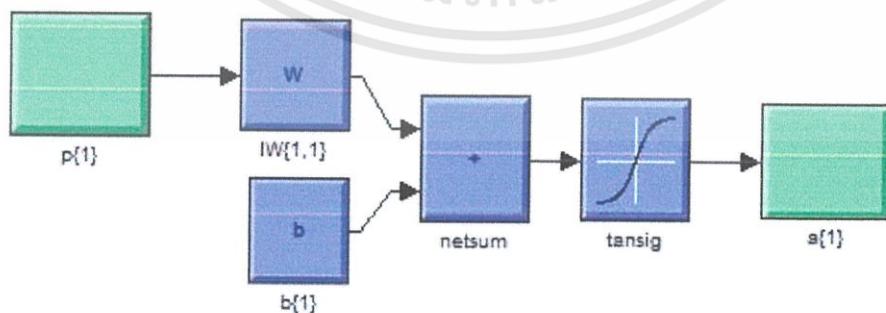


รูปที่ 3.7 โครงสร้างแบบจำลองด้านในของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมย่อขนาดข้อมูล (Process Input)

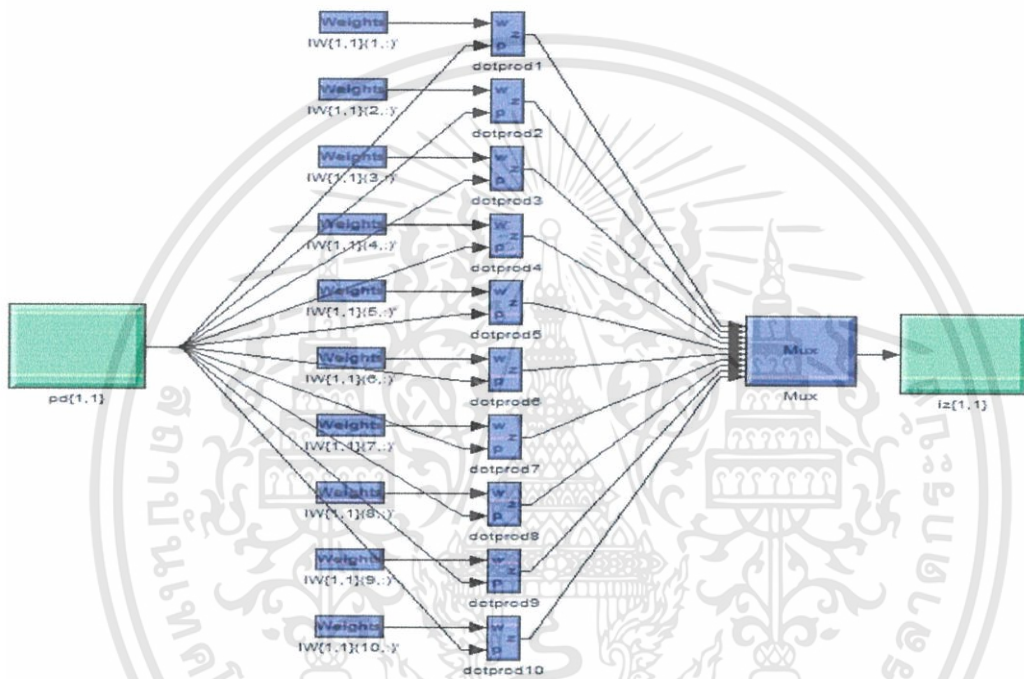
รูปที่ 3.8 เป็นบล็อกไดอะแกรมภายในกระบวนการย่อขนาดข้อมูลด้านขาเข้า (Process Input) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการย่อขนาดของข้อมูลลง (Normalization) เพื่อให้ข้อมูลอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 เพื่อให้ข้อมูลสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid Function)



รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในของชั้นซ่อน (Hidden Layer) หรือ ชั้น 1 (Layer 1)

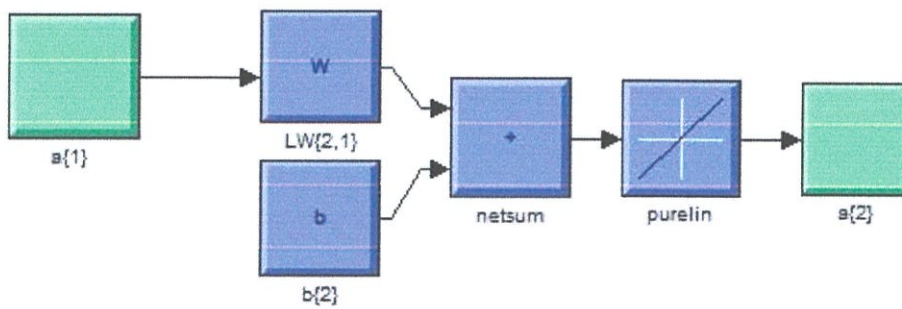
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมในชั้นซ่อน (Layer 1) จะประกอบด้วย ค่าน้ำหนัก ค่าไบอัส และฟังก์ชัน โดยฟังก์ชันที่ออกแบบจะให้ป็นฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid) ซึ่งฟังก์ชันนี้สามารถสร้างขอบเขตการตัดสินใจในส่วนที่โค้งมนได้ดี ส่วนค่าไบอัสสามารถบรรยายโดยใช้สัญลักษณ์ $b\{1\}$ ซึ่งจะประกอบด้วยค่าไบอัสจำนวน 10 ชุด และ ค่าน้ำหนักชั้นซ่อน (Layer 1) หรือ สามารถบรรยายโดยใช้สัญลักษณ์ $IW\{1,1\}$ ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลจำนวน 10 ชุด เนื่องจากใช้จำนวน 10 นิวรอน ในชั้นซ่อน (Layer 1) ในการออกแบบ



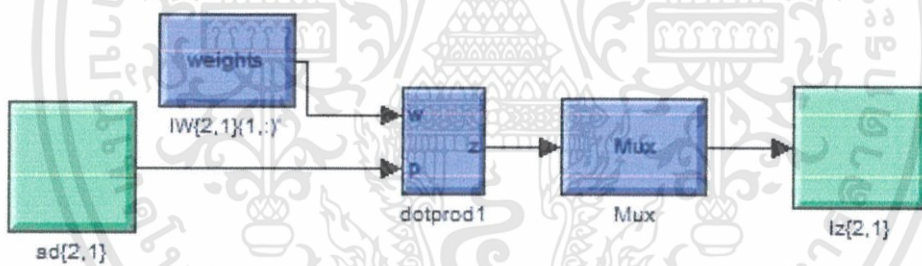
รูปที่ 3.10 โครงสร้างค่าน้ำหนักชั้นซ่อน (Hidden Layer) หรือ ชั้น 1 (Layer 1)

รูปที่ 3.10 เป็นค่าน้ำหนักภายในบล็อกไดอะแกรม $IW\{1,1\}$ โดย ค่าน้ำหนักจะประกอบด้วย 10 ชุด เนื่องจากมี 10 นิวรอนโดยค่าน้ำหนักทั้ง 10 ชุด จะถูกสร้างขึ้นโดยการให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลทั้งหมดที่ป้อนเข้าไปจากการใช้คำสั่งตามภาคผนวก ข และ ค่าน้ำหนักจะปรับค่าตามความถูกต้องของข้อมูลโดยใช้หลักการของการเรียนรู้แบบ Levenberg Marquardt



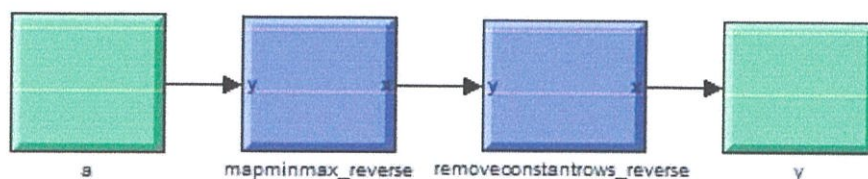
รูปที่ 3.11 โครงสร้างภายในของชั้นผลิต (Output Layer) หรือ ชั้น 2 (Layer 2)

รูปที่ 3.11 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมในชั้นผลิต (Layer 2) จะประกอบด้วย คำน้ำหนัก ค่าไบอัส และฟังก์ชัน โดยฟังก์ชันที่ออกแบบจะให้ป็นฟังก์ชันเพียวริน (Purelin) ซึ่งฟังก์ชันนี้สามารถกระตุ้นแบบเชิงเส้น ส่วนค่าไบอัสสามารถบรรยายโดยใช้สัญลักษณ์ $b\{2\}$ ซึ่งจะประกอบด้วยค่าไบอัสจำนวน 1 ชุด และ คำน้ำหนักชั้นผลิต (Layer 2) หรือ สามารถบรรยายโดยใช้สัญลักษณ์ $IW\{2,1\}$ ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลจำนวน 1 ชุด ในการออกแบบ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างค่าน้ำหนักชั้นผลิต (Output Layer) หรือ ชั้น 2 (Layer 2)

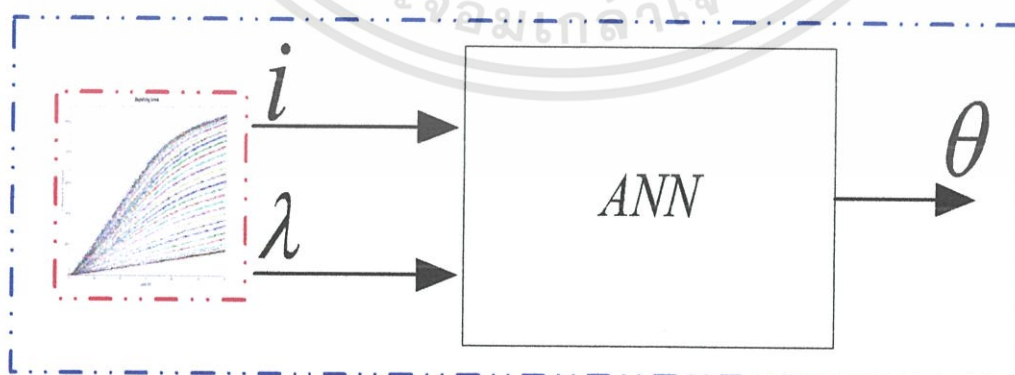
รูปที่ 3.12 เป็นค่าน้ำหนักภายในบล็อกไดอะแกรม $IW\{2,1\}$ โดย ค่าน้ำหนักจะประกอบด้วย 1 ชุด เนื่องจากมี 1 นิวรอนโดยค่าน้ำหนักทั้ง 1 ชุด จะถูกสร้างขึ้นโดยการให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลทั้งหมดที่ป้อนเข้าไปจากการใช้คำสั่งตามภาคผนวก ข และ ค่าน้ำหนักจะปรับค่าตามความถูกต้องของข้อมูลโดยใช้หลักการของการเรียนรู้แบบ Levenberg Marquardt



รูปที่ 3.13 โครงสร้างภายในบล็อกไดอะแกรมการขยายขนาดข้อมูล (Process Output)

รูปที่ 3.13 เป็นบล็อกไดอะแกรมภายในกระบวนการขยายขนาดข้อมูลด้านขาออก (Process Output) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการขยายขนาดของข้อมูลที่เกิดจากการย่อขนาดข้อมูลด้านขาเข้า (Normalization) เพื่อให้ข้อมูลที่ออกมามีความถูกต้องและแม่นยำ

จากการออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมโดยการซิมูลิง (Simulink) โดยข้อมูลป้อนเข้าประกอบด้วย กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ และข้อมูลที่ต้องการคือ ตำแหน่งมุมโรเตอร์ โดยค่าน้ำหนัก และ ค่าไบอัส ได้มาจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยกระบวนการ Levenberg Marquardt โดยคำสั่งตามภาคผนวก ข ด้วยข้อมูล กระแส เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ และ ตำแหน่งมุมโรเตอร์ ซึ่งความถูกต้องของผลลัพธ์โครงข่ายประสาทเทียมจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับชุดข้อมูลที่ใช้ในการสอน ข้อมูลมากจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น นั่นคือ ค่าน้ำหนัก และ ค่าไบอัส ที่ถูกบรรจุลงในบล็อกไดอะแกรมภายในรูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.12 ทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมาค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนต่อไปจะกล่าวถึงการนำข้อมูลมาทดสอบในแบบจำลองเพื่อจะนำไปใช้ในการแทนตัวตรวจจับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สไปนเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งโครงสร้างการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 3.14

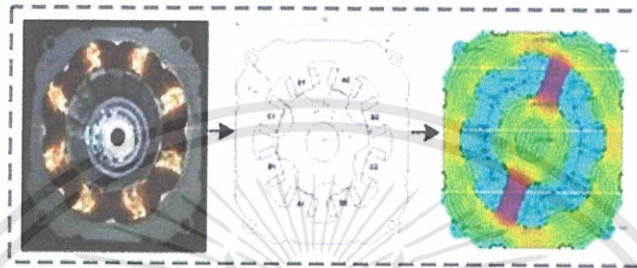


รูปที่ 3.14 โครงสร้างการทดสอบกลุ่มข้อมูล Magnetizing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบกลุ่มข้อมูล Magnetizing

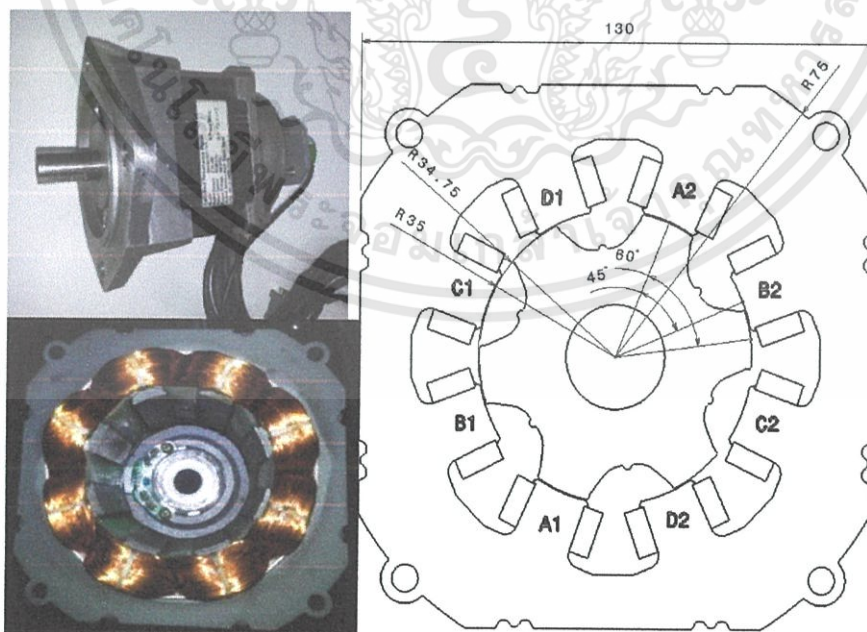
การทดสอบข้อมูลนั้นจะเริ่มด้วยการเก็บข้อมูลกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ โดยใช้โปรแกรม Catia ออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์ตามแบบจริงและใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetic (FEMM) ในการป้อนกระแสเพื่อวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กระบวนการออกแบบและเก็บข้อมูลกระแสและเส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ

3.2.1 ชุดข้อมูลทดสอบ

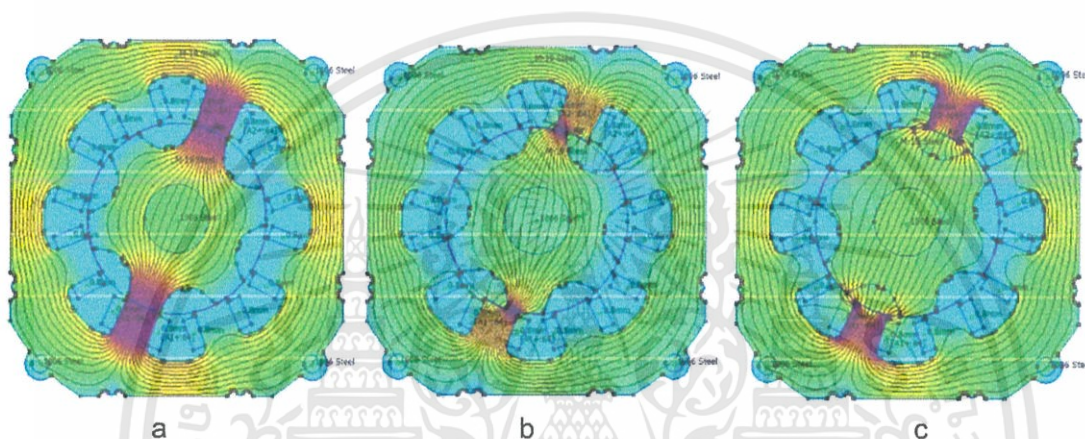
ชุดข้อมูลในการทดสอบนี้ได้ใช้การจำลองโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์จากข้อมูลจริงตามภาคผนวก ก โดยใช้โปรแกรม Catia (Auto Cad) ในการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์โดยใช้โปรแกรม Catia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

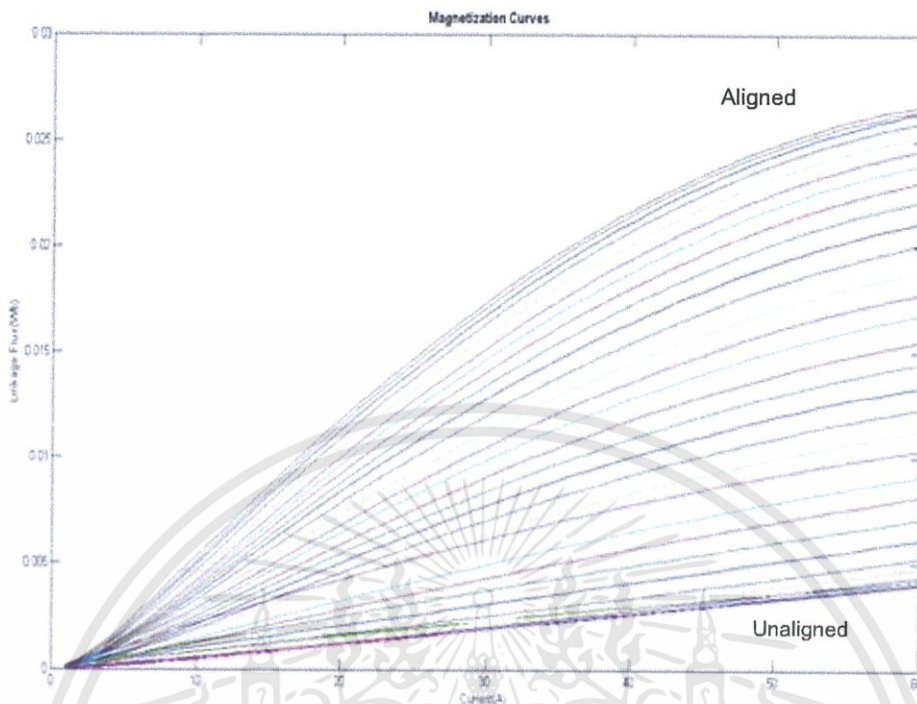
รูปที่ 3.16 เป็นการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โปรแกรม Catia ในการออกแบบ และจะกำหนดให้ตรงตามข้อมูลตามภาคผนวก ก ซึ่งจะสร้างแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ทั้งหมด 30 องศาด้วยกัน หลังจากนั้นจะใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetic (FEMM) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ โดยจะนำโครงสร้างที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Catia ไปป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟส A เพื่อวัดค่า เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับค้ำของ สเตเตอร์ ของเฟส A โดยจะทดลองป้อนกระแสทั้งหมด 60 ค่าด้วยกันดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างแบบจำลองจากโปรแกรม Finite Element Method Magnetic (FEMM)

รูปที่ 3.17 เป็นตัวอย่างแบบจำลองเพื่อหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับค้ำจากการป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟส A จำนวน 60 ค่าในแต่ละมุมทางกล ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.17a เป็นการป้อนกระแสเข้าไปในตำแหน่ง Aligned รูปที่ 3.17b เป็นการป้อนกระแสเข้าไปในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตำแหน่ง Aligned และ ตำแหน่ง Unaligned ซึ่งจะมีค่าแรงบิดที่สูง และในรูปที่ 3.17c เป็นการป้อนกระแสไปในตำแหน่ง Unaligned

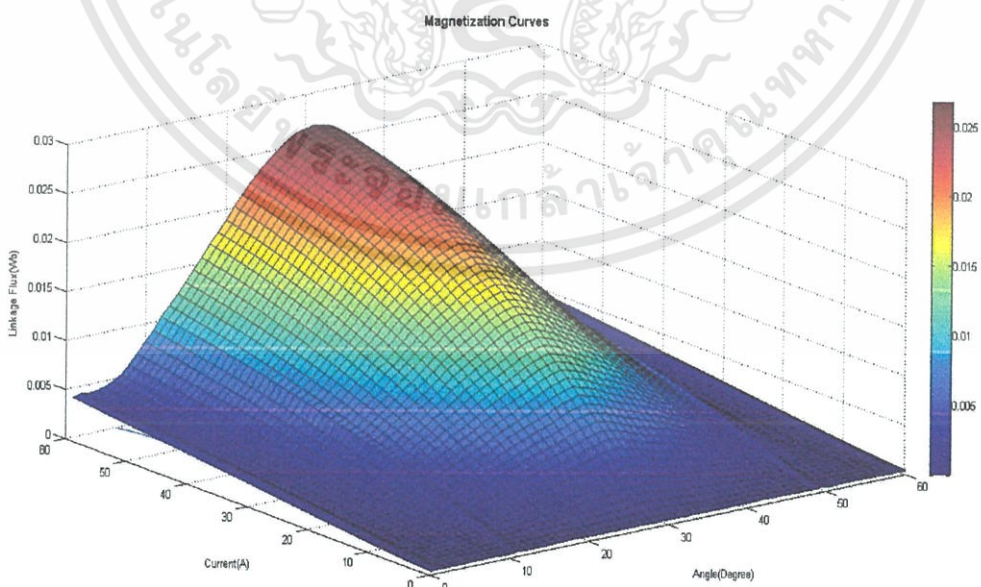
จากการจำลองหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับค้ำจากโปรแกรม Finite Element Method Magnetic (FEMM) จะได้ข้อมูลทั้งหมดจากตำแหน่ง Aligned จนถึงตำแหน่ง UnAligned โดยจะกำหนดให้ตำแหน่ง UnAligned คือตำแหน่งทางกลที่ 30 องศา และ กำหนดให้ตำแหน่ง Aligned ตรงกับตำแหน่งทางกลที่ 60 หรือ 0 องศา ซึ่งเมื่อทำการวัดทุกๆมุมโดยการป้อนกระแสจำนวน 60 ค่าเข้าไปในแต่ละมุมแล้วจะได้ข้อมูลดังภาคผนวก ข โดยสามารถแสดงเป็นกราฟ Magnetization Curve ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟ Magnetization Curve จากการเก็บข้อมูลจาก FEMM

จากรูปที่ 3.18 สามารถแสดงเป็นรูปแบบ Magnetization Curve เป็นแบบ 3 มิติ

ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 3D Magnetization Curve จากการเก็บข้อมูลจาก FEMM

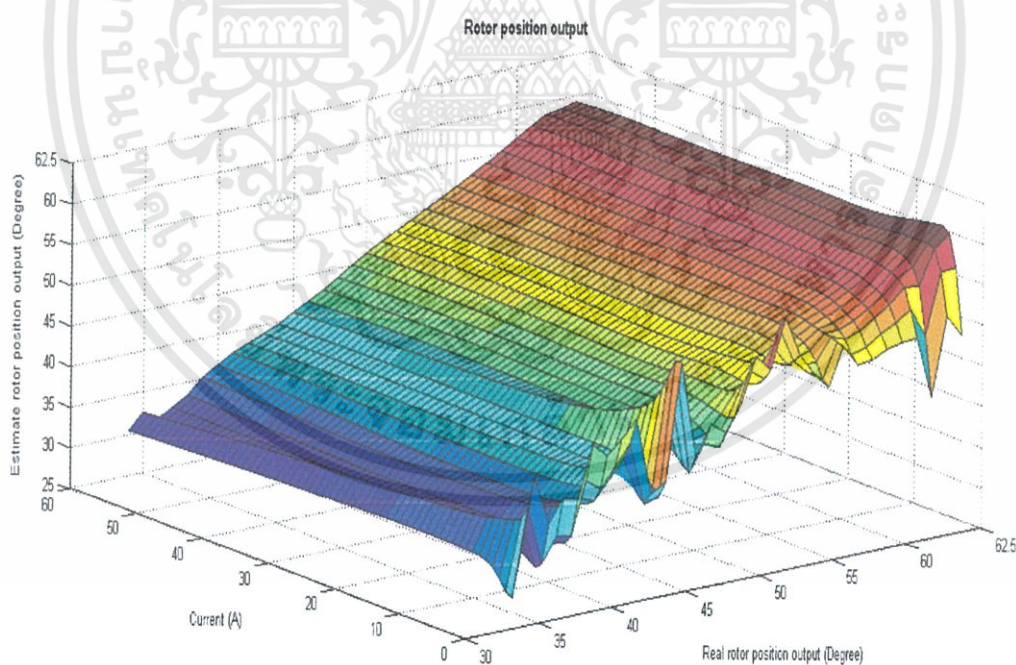
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้กลุ่มข้อมูล

การสอนข้อมูลให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ สามารถทำได้โดยใช้ภาษาทาง Matlab ซึ่งสามารถบรรยายได้โดยใช้คำสั่ง ตามภาคผนวก ข โดยกำหนดรูปแบบการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt และจำนวนนิวรอน 10 ตัว ใน ชั้นแรก (Layer 1) จำนวนนิวรอน 1 ตัว ในชั้นสอง (Layer 2) โดยป้อนข้อมูล (Input) และ ข้อมูลที่ต้องการ (target) ตามภาคผนวก ข ซึ่งในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลนี้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับแก้ค่าน้ำหนักและค่าไบอัสในแต่ละรอบโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ซึ่งกำหนดให้ค่า MSE ไม่เกิน 2 โดยจากการทดลองนี้ได้ค่า MSE คือ 1.9051 และได้ผลของค่าน้ำหนักและไบอัส ตามภาคผนวก ข

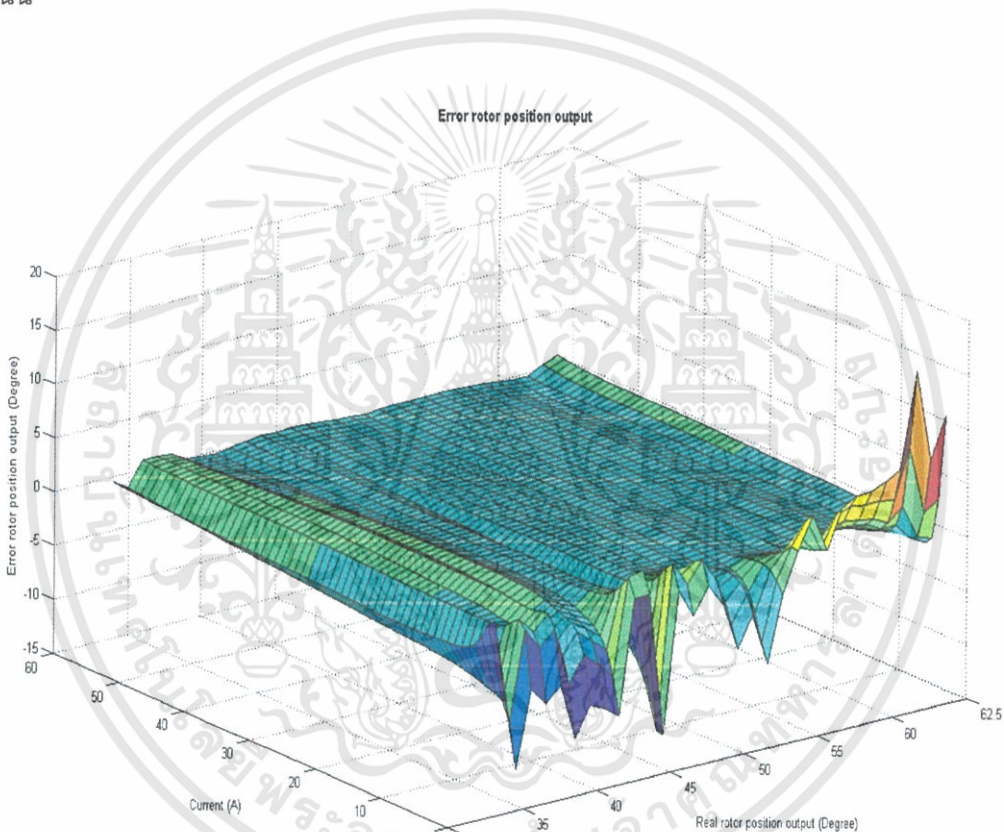
3.2.3 ผลการทดสอบสำหรับกลุ่มข้อมูล

เมื่อกระบวนการเรียนรู้เสร็จสิ้นลงสิ่งที่ได้รับมาหลังจากการป้อนชุดข้อมูลจากภาคผนวก ข คือผลเฉลย (Output) ซึ่งค่าที่ออกมาควรจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ (Target) ในตารางภาคผนวก ข เนื่องจากระบบโครงข่ายประสาทไม่สามารถปรับค่าน้ำหนักและไบอัสเพื่อให้เหมาะสมกับค่าที่ต้องการได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลเฉลย (Output) ออกมาเป็นดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 3D Output Estimate Position จาก โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 3.20 ผลเฉลยที่ได้จากการโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละกระแสและมุมที่ได้ป้อนเข้าไปตามภาคผนวก ข ซึ่ง มุม (Target) ในแกนแนวนอนนั้นจะเป็นมุมที่ถูกกำหนดไว้ ในแต่ละกระแสที่ป้อนเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียม โดยผลลัพธ์ (Output) หรือ มุม ที่ได้จากการประมาณโดยโครงข่ายประสาทเทียมถูกแสดงในแกนตั้ง โดยแท้จริงแล้วค่า มุมตามเป้าหมาย (Target) ในแกนแนวนอนและมุมที่ได้จากการประมาณในแกนตั้ง (Output) ควรจะมีค่าตรงกันหรือเป็นแนว 45 องศาตามแกนแนวนอนและแกนตั้ง แต่เนื่องจากโครงข่ายประสาทไม่สามารถปรับค่าน้ำหนักและไบอัสเพื่อให้เหมาะสมกับค่าที่ต้องการได้ ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นตามภาคผนวก ข และสามารถแสดงในรูปแบบ 3 มิติได้ดังนั้น



รูปที่ 3.21 3D Error Estimate position จาก โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 3.21 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละกระแสและมุมที่ได้ป้อนเข้าไปตามภาคผนวก ข ซึ่ง มุม (Target) ในแกนแนวนอนนั้นจะเป็นมุมที่ถูกกำหนดไว้ ในแต่ละกระแสที่ป้อนเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียม โดยค่าความผิดพลาด (Error) ได้จากการเอาค่ามุมที่ต้องการ (Target) ลบ ค่ามุมที่ได้จากการประมาณ (Output) ซึ่งควรจะเป็นศูนย์ทั้งแนวระนาบ แต่จะเห็นว่ากระแสในช่วง 1-3 A จะมีค่าความผิดพลาดสูง อันเนื่องจากความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้เก็บค่ามา

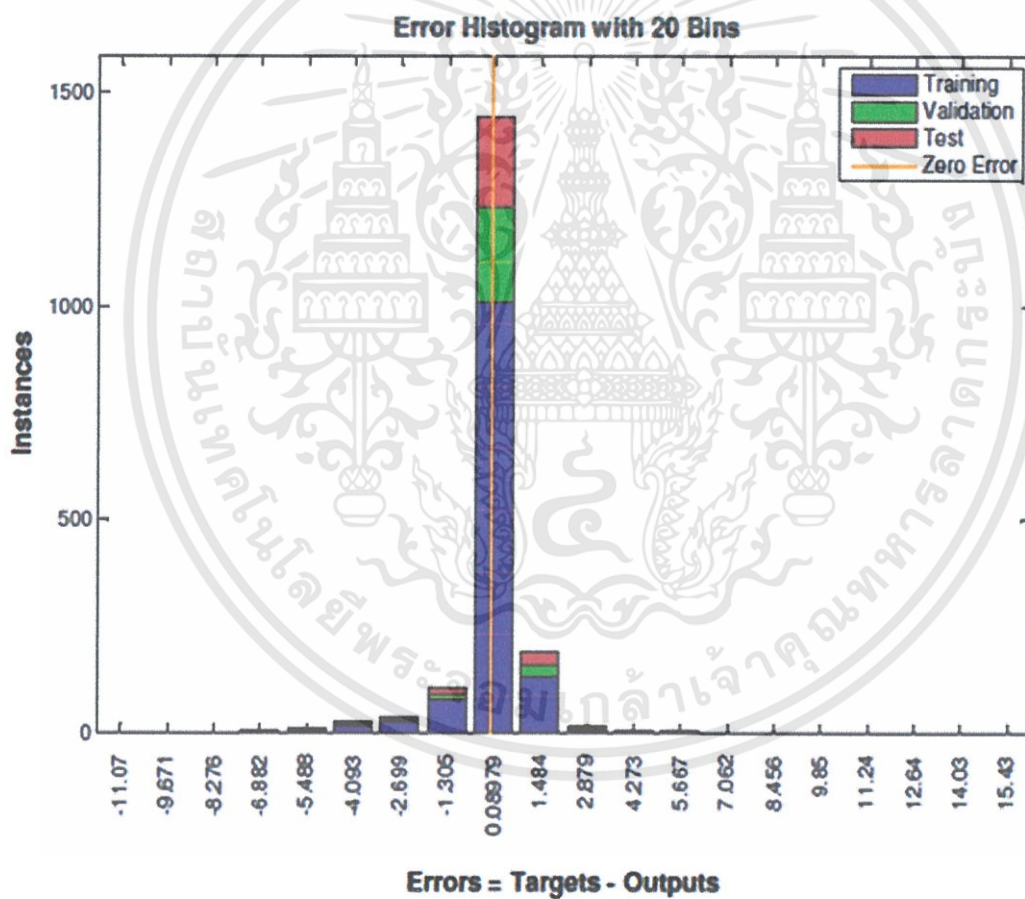
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 สรุปการทดสอบ

จากการเตรียมชุดข้อมูลและตลอดจนการสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ โดยใช้การสอนแบบ Levenberg Marquardt ได้ผลเฉลยออกมา โดยผลเฉลยที่ได้อาจจะมีความผิดพลาดไม่ตรงกับเป้าหมายที่ต้องการ แต่เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งเราสามารถแสดงในรูปแบบของค่าสถิติของความผิดพลาด (Error Histogram) และ ความเหมาะสม (Regression)

3.2.4.1 ค่าสถิติของความผิดพลาด (Error Histogram)

กราฟแสดงสถิติความผิดพลาดโดยข้อมูลการเรียนรู้บรรยายโดยแท่งสีน้ำเงิน ข้อมูลที่ตรวจสอบความถูกต้องบรรยายโดยแท่งสีเขียว ข้อมูลการทดสอบบรรยายโดยแท่งสีแดง แผนภูมิแท่ง (Histogram) แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดของข้อมูลแต่ละรูปแบบ



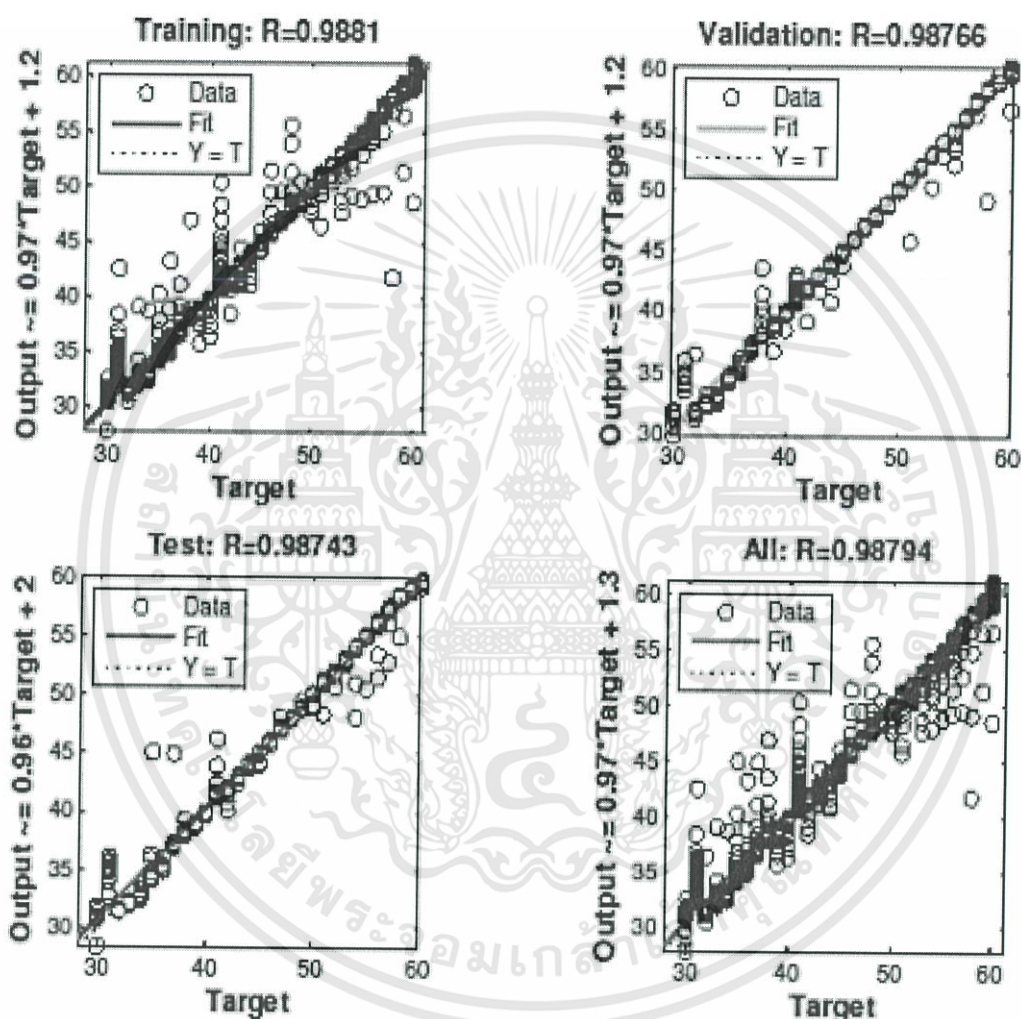
รูปที่ 3.22 แผนภูมิแท่งแสดงถึงความผิดพลาดของข้อมูล

รูปที่ 3.20 แสดงถึงค่าความผิดพลาดซึ่งจะเห็นได้ว่า ข้อมูลจากการเรียนรู้ส่วนใหญ่จะมีค่าผิดพลาดอยู่ที่ -0.08879 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความผิดพลาดน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 ความเหมาะสม(Regression)

แสดงถึงความเหมาะสมของผลเฉลยที่ถูกคาดหวังให้ใกล้เคียงค่าที่ต้องการสำหรับการเรียนรู้ข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้องข้อมูล การทดสอบข้อมูล สำหรับผลลัพธ์ที่ดีค่า R ควรมีค่าใกล้เคียง 1 โดยทำมุม 45 องศาจากจุดกำเนิด



รูปที่ 3.23 กราฟความเหมาะสม

รูปที่ 3.23 เห็นได้ว่าการเรียนรู้ข้อมูล มีความละเอียดสูงทำให้ ค่าที่ออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกับเป้าหมายโดยข้อมูลในการเรียนรู้มีค่า R เท่ากับ 0.98794 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 และความเข้มของข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวเส้นตรง 45 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่ามุมที่ต้องการ (Target) ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าผลลัพธ์ (Output)

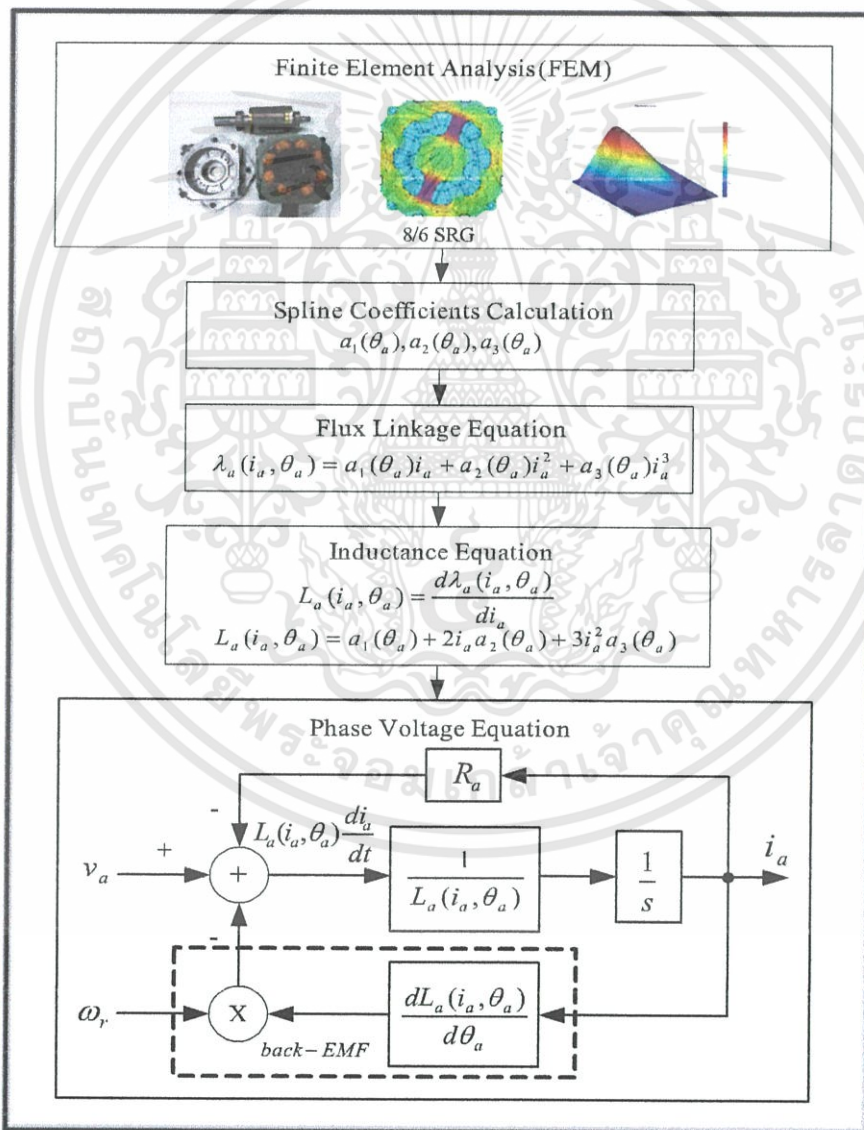
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบใช้การประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยโครงข่ายประสาทเทียม

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบใช้การประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยโครงข่ายประสาทเทียม

3.3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการเก็บข้อมูลจะได้ข้อมูล กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคูลอง ซึ่งสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สัมประสิทธิ์สี่ไปลงนี้ได้ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 แสดงกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลจากโปรแกรม Finite Element Method Magnetic ซึ่งจะได้ข้อมูลของ กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับภาคผนวก ข โดยค่าที่ได้สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์สไปล์ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ โดยสามารถคำนวณได้โดยใช้คำสั่ง csapi ใน Matlab

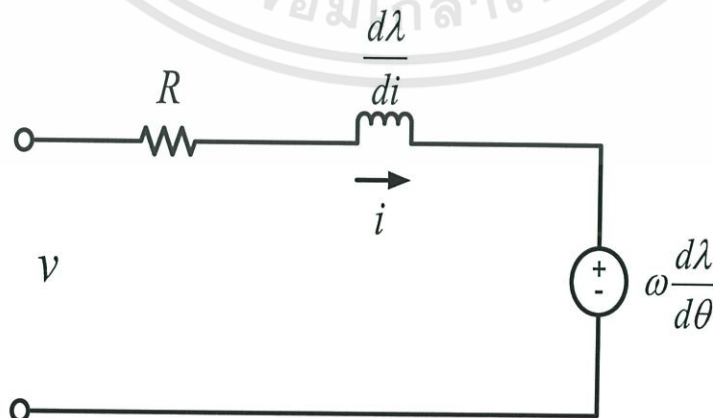
โดยการหาสัมประสิทธิ์สไปล์ จะแบ่งตำแหน่งของโรเตอร์ออกเป็นช่วง โดยแต่ละช่วงจะห่างกัน 5 องศา ซึ่งจะได้ค่าของสัมประสิทธิ์สไปล์ดังกล่าว ภาคผนวก ค โดยที่ตำแหน่ง Unaligned หรือตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง Unaligned พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้นนั่นเองแต่เมื่อขั้วของโรเตอร์เริ่มซ้อนทับกับขั้วของสเตเตอร์และเข้าใกล้กับตำแหน่ง Aligned เส้นกราฟมีลักษณะ ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการอ้อมตัวของแกนเหล็กเกิดขึ้นเพราะฉะนั้นสมการที่ใช้จะต้องประกอบไปด้วยเทอมที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยจะใช้สมการที่ 3.1

$$\lambda(i, \theta) = a_1(\theta)i + a_2(\theta)i^2 + a_3(\theta)i^3 \quad (3.1)$$

โดยสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 3.2

$$L(i, \theta) = \frac{d\lambda(i, \theta)}{di} = L(i, \theta) = a_1(\theta) + 2i a_2(\theta) + 3i^2 a_3(\theta) \quad (3.2)$$

จากการนำค่าสัมประสิทธิ์สไปล์พิจารณาค่าของ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ ค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละช่วงของมุม ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นได้จากวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 วงจรสมมูล 1 เฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมุติ 1 เฟส สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (3.3)$$

โดยที่ v คือ แรงดัน DC-link หรือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดต่อขั้ว

λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของขดลวดนั้น

เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของกระแสและตำแหน่งโรเตอร์ ดังนั้นสมการที่ (3.3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

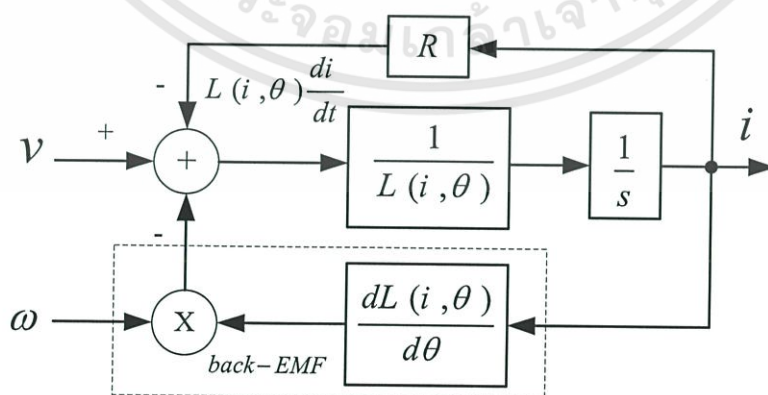
$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(i, \theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.4)$$

หรือแทนค่า $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ในสมการที่ (3.4) จะได้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (3.5)$$

ซึ่งเทอม $i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta}$ คือค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (bemf)

จากสมการที่ (3.5) สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 3.26

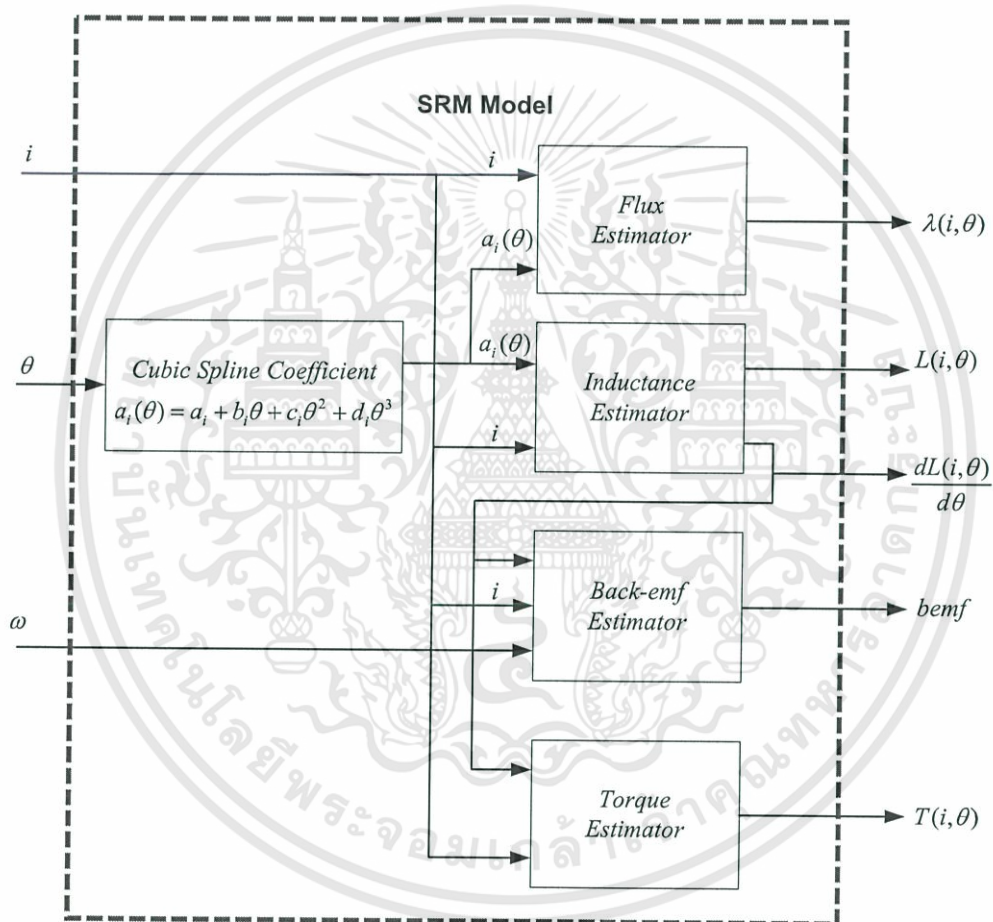


รูปที่ 3.26 แบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดย โครงข่ายประสาทเทียม ต่อ เฟส

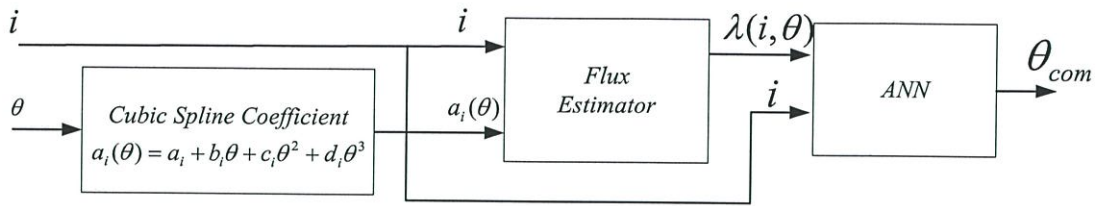
การนำข้อมูลคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สไปล์ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ และสมการเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจน ค่าความเหนี่ยวนำ สามารถนำไปสู่การจำลองค่าพารามิเตอร์ของค่าแรงบิด แรงดันต้านกลับ และการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำต่อตำแหน่งมุม ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แบบจำลองพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

จากรูปที่ 3.27 จะเห็นค่าพารามิเตอร์ด้านขาเข้านั้นคือกระแสซึ่งคือกระแสขาออกจากรูปที่ 3.26 และ ค่าแรงดันต้านกลับจากแบบจำลองพารามิเตอร์จะถูกส่งไปยังรูปที่ 3.26 ซึ่งจะมีความเกี่ยวเนื่องกัน จากค่าของกระแสและค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง สามารถเชื่อมกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังรูปที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

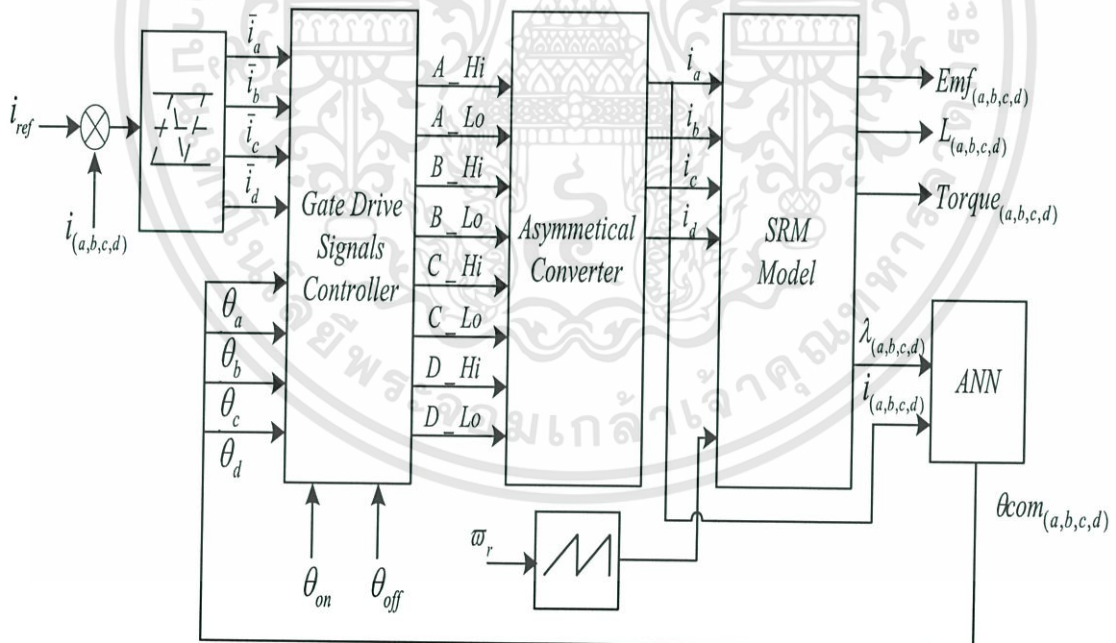


รูปที่ 3.28 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่าตำแหน่งต่อเฟส

รูปที่ 3.28 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกเชื่อมต่อกับโครงสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยใช้กระแส และ เส้นแรงแม่เหล็กในการประมาณตำแหน่งของมุมโรเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการสับสวิตซ์ของ IGBT แทน Encoder

3.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง

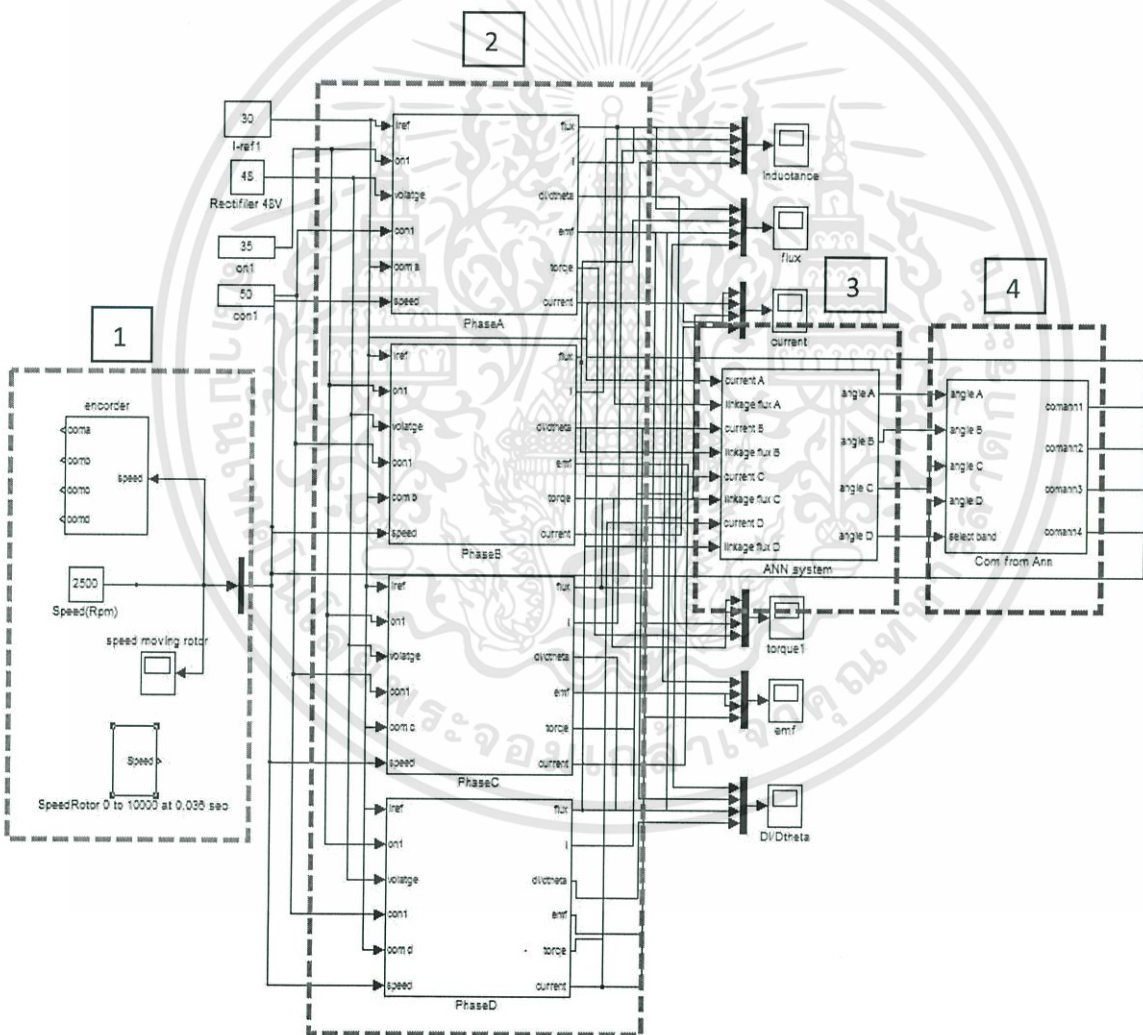
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4 เฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งมุมเพื่อใช้ในการสับสวิตซ์ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง 4 เฟส

3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง 4 เฟสโดยใช้โปรแกรม Matlab ออกแบบ

ในการออกแบบโดยโปรแกรม Matlab จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนควบคุมความเร็วของโรเตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ซึ่งภายในจะประกอบด้วย แบบจำลองคอนเวอเตอร์ แบบจำลองคอมมิวเตชัน รูปที่ 3.26 และ รูปที่ 3.27 ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 3.28 และในส่วนที่ 4 เป็นการปรับเฟสเพื่อสร้างตำแหน่งมุมโรเตอร์ทั้ง 60 องศาหรือ 1 รอบทางไฟฟ้าของเฟส A โดยจะส่งมุมที่ได้ไปใช้ในคอมมิวเตชันแทนที่ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลอง Simulink ใน Matlab ดังรูปที่ 3.26 มีการควบคุมกระแสที่ 30A และป้อนแรงดัน 48V โดยมีมูนนำกระแส 15 องศา ซึ่งสามารถหาผลการทดลองได้โดยจะกล่าวถึงในบทที่ 4 และมีข้อจำกัดในการทดลองดังต่อไปนี้

1. มุมที่ใช้ในการนำกระแสต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 15 องศา เพราะการประมาณตำแหน่งในแต่ละเฟสนั้นจะเชื่อมรอยต่อของมูนสำหรับขับ IGBT ได้อย่างถูกต้อง
2. การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำต่อมูนโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะต้องเป็นบวกเพราะเป็นส่วนของมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

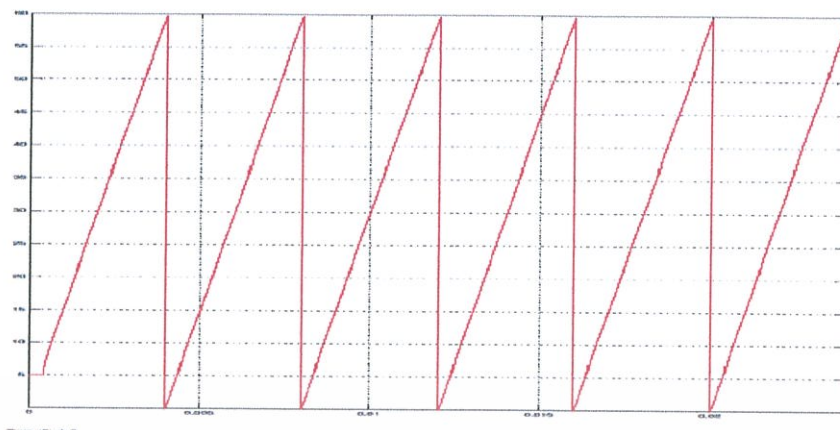
4.1 บทนำ

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งด้วย Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.30 เพื่อตรวจสอบว่าผลที่ได้จากการประมาณค่าจากโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับผลจากทางทฤษฎี ซึ่งผลจากการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งจะประกอบไปด้วยค่าของ ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder กระแส แรงดัน เส้นแรงแม่เหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และแรงบิด ซึ่งมาจากการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้สัมประสิทธิ์สโปลน์เป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring) โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ช่วงด้วยกันนั่นคือที่ความเร็ว 2500 rpm 7500 rpm และ 0 ถึง 10000 rpm

4.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 2500 rpm

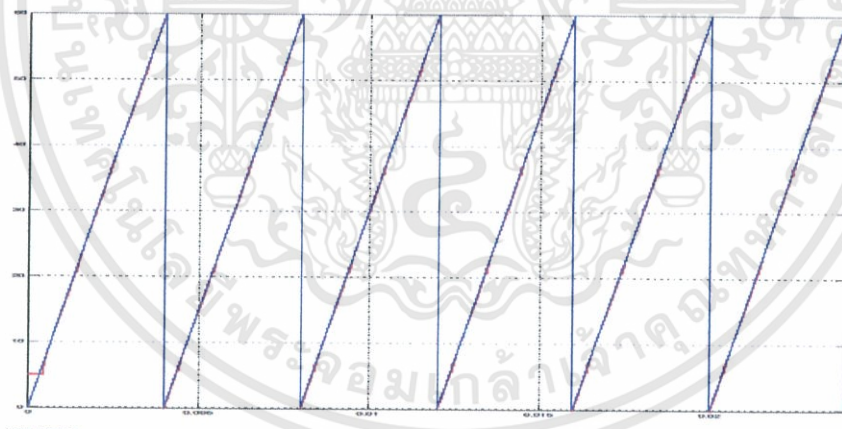
4.2.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งที่ความเร็ว 2500 rpm (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 1 เฟส)

การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณาช่วงการกำหนดมุม on และมุม off ให้อยู่ในช่วงหลังจากจุด Unaligned จนถึงก่อนจุด Aligned ซึ่งเป็นช่วงที่ให้แรงบิดออกมาเป็นค่าบวก ในการทดลองเรากำหนดให้ on มุมนำกระแสมีค่า เท่ากับ 35 องศา และกำหนด off มุมนำกระแสมีค่า เท่ากับ 50 องศา สำหรับตำแหน่งโรเตอร์เราได้มาจากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการจำลองในขณะที่แบบจำลองมอเตอร์ทางคณิตศาสตร์มีความเร็วรอบที่ 2500 rpm โดยเราพิจารณาเฉพาะของเฟส A



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม
ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm

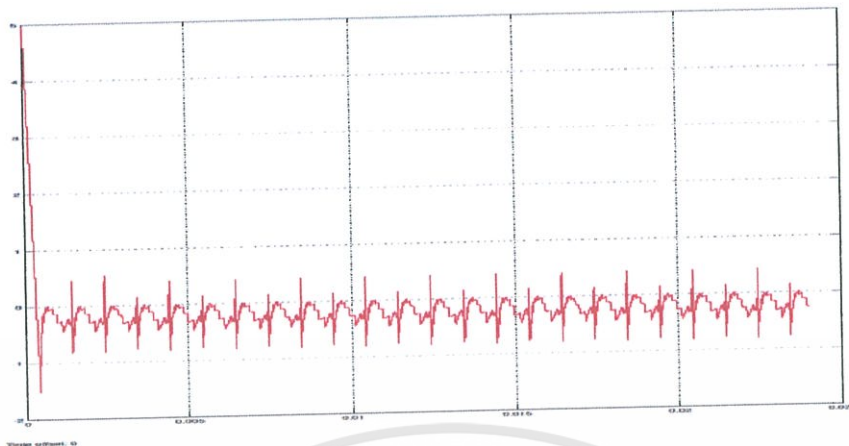
จากรูปที่ 4.1 เป็นตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำมุมทางไฟฟ้าเป็นมุมทางกล ขณะทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียว โดยที่มุม 0 และ 60 องศา คือ ตำแหน่ง Aligned ส่วนมุม 30 องศา คือ ตำแหน่ง Unaligned



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ
ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm

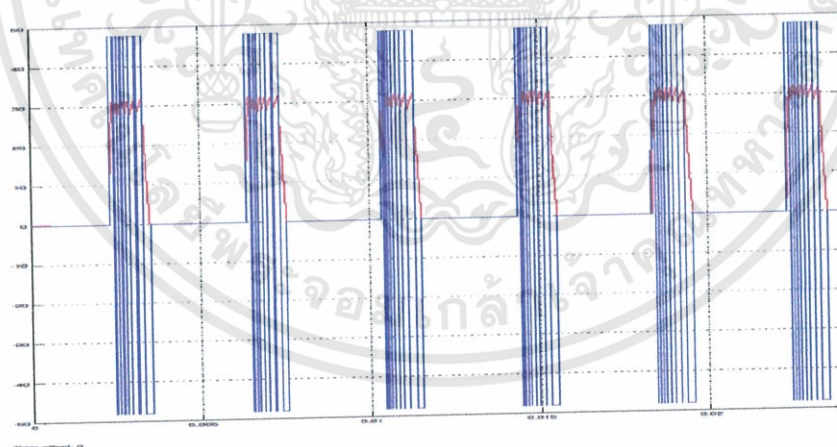
จากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม (สีแดง) เทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder (สีน้ำเงิน) จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมากโดยจะมีค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 2500 rpm

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งช่วงแรกนั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูงมากประมาณ 5 องศา ด้วยกัน เป็นผลเนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมในสภาวะชั่วขณะ และในช่วงสภาวะคงที่จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา

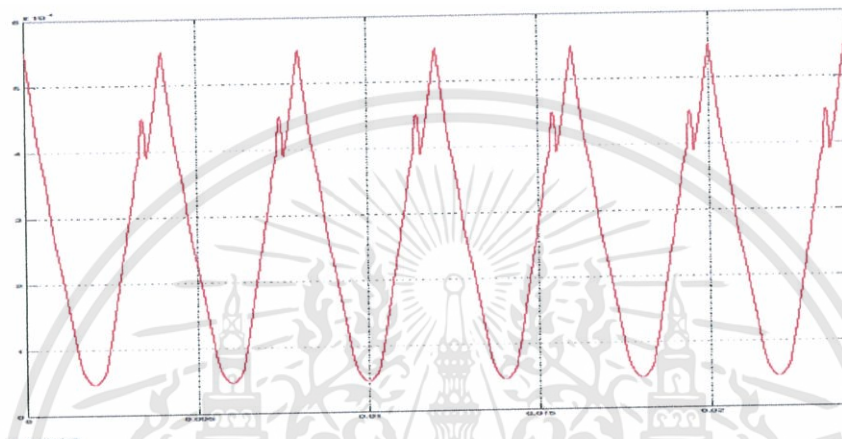


รูปที่ 4.4 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 2500 rpm

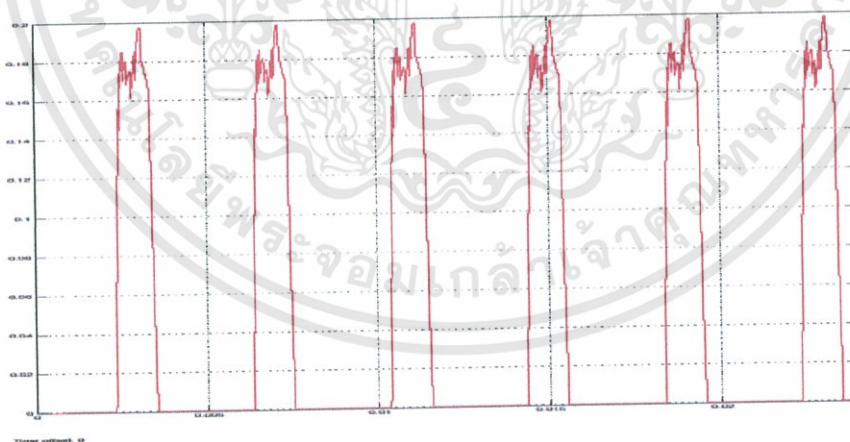
ในการจำลองนี้ได้ทำการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมกระแส แบบ Hard Chopping โดยจะควบคุมกระแสไว้ที่ 30 A กระแสจะถูกควบคุมแบบ ฮิสเตอร์ซิสซึ่งก็ยอมทำให้กระแสไม่เรียบดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 เป็นการจำลองการขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์จะใช้แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสเพราะว่าวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ซึ่ง วงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี โดยแรงดันได้มาจากการ ควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส โดยจะมีค่าบวกแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์นำกระแสทั้ง 2 ตัว และจะมีค่า ลบแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสทั้ง 2 ตัว ซึ่งเรียกโหมดการควบคุมกระแสแบบนี้ว่า Hard Chopping

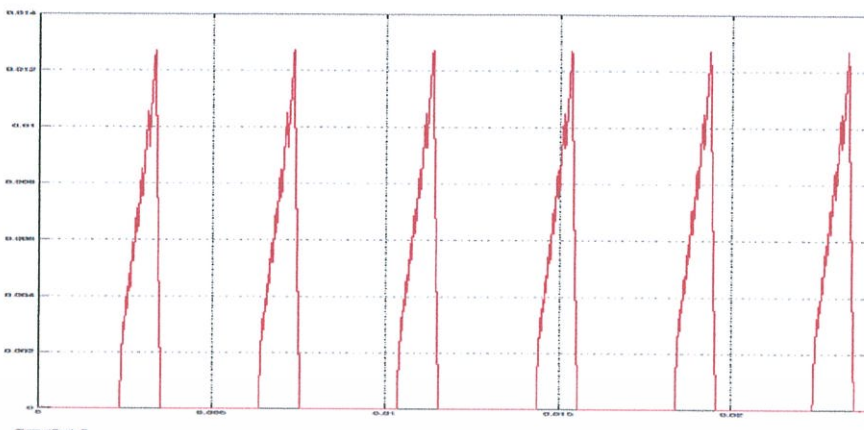


รูปที่ 4.5 ความเหนียวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 2500 rpm

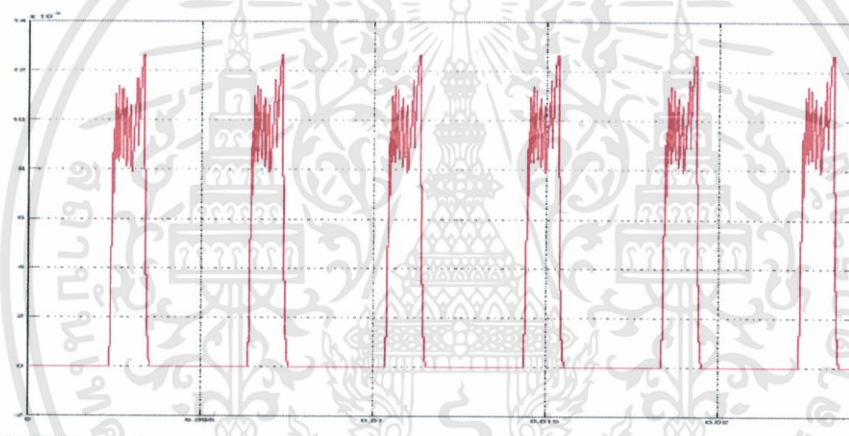


รูปที่ 4.6 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 2500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 2500 rpm



รูปที่ 4.8 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 2500 rpm

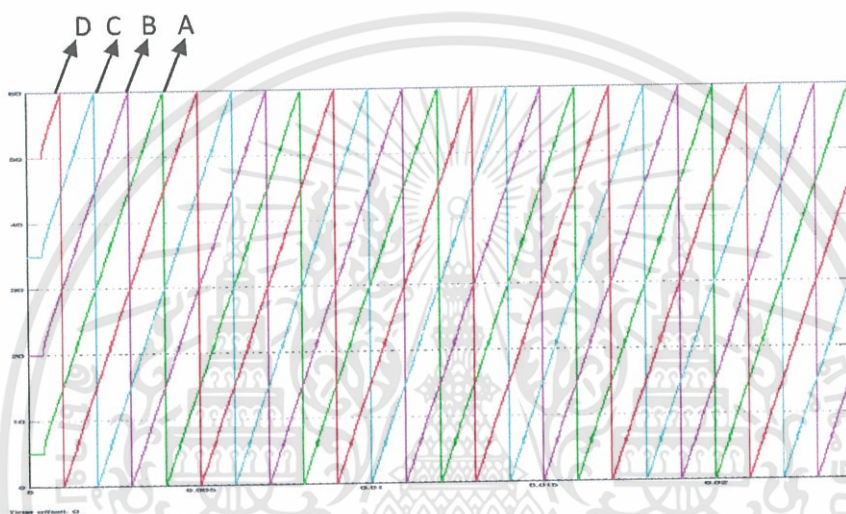
จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดและกระแสมีความสัมพันธ์กัน หมายความว่า รูปร่างของกระแสและแรงบิดนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดจะมีค่าเป็นบวก เนื่องจากเราทำการ on และ off มุมนำกระแสอยู่ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หมุนแบบสวิทช์รีลักแตนซ์ ซึ่งจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี

จากผลการทดลองที่ความเร็ว 2500 rpm ข้างต้นเราทำการพิจารณาโดยเฉพาะของเฟส A เมื่อนำเอาผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี ผลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงและสอดคล้องกับทางทฤษฎี จึงสามารถสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง ซึ่งเราสามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประมาณตำแหน่งจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

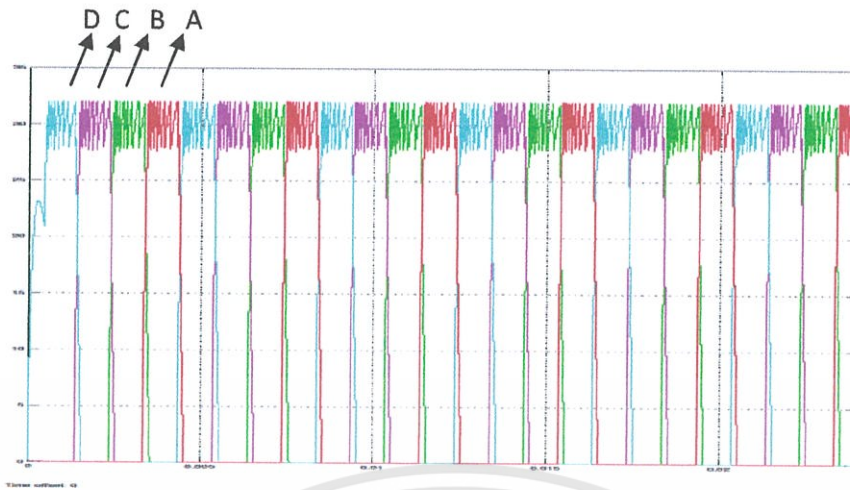
4.2.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 4 เฟส)

การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณารูปคลื่นสัญญาณทั้ง 4 เฟสซึ่งผลจากการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งจะประกอบไปด้วยค่าของ ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม กระแส เส้นแรงแม่เหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และ แรงบิด

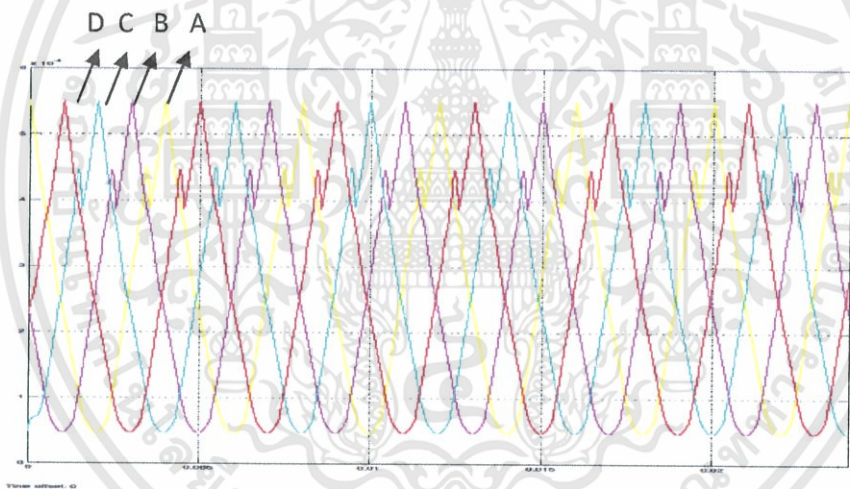


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม
ในลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm

จากรูปที่ 4.9 เป็นรูปที่แสดงตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 4 เฟส โดยจะประกอบไปด้วย ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส B ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส C และตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส D ซึ่งมีมุมทางไฟฟ้าต่างกันอยู่ 90 องศาตามลำดับเฟส เมื่อเทียบเป็นมุมทางกลแล้วจะต่างกัน 15 องศาตามลำดับเฟส

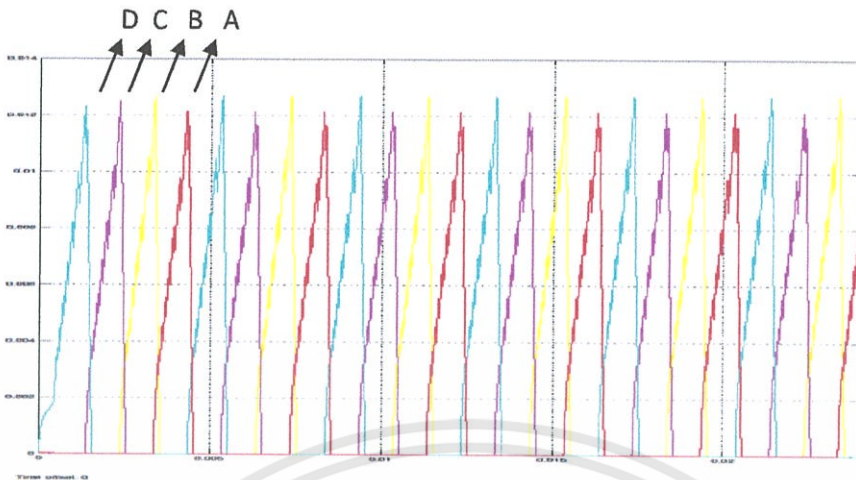


รูปที่ 4.10 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 2500 rpm

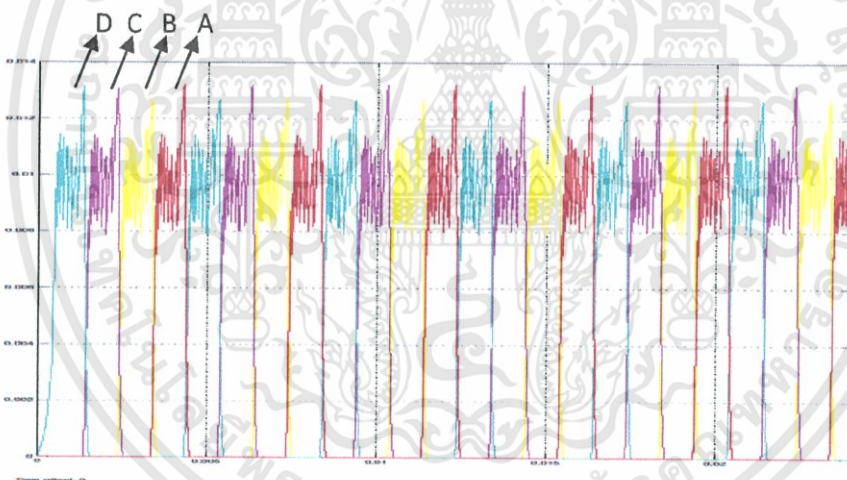


รูปที่ 4.11 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

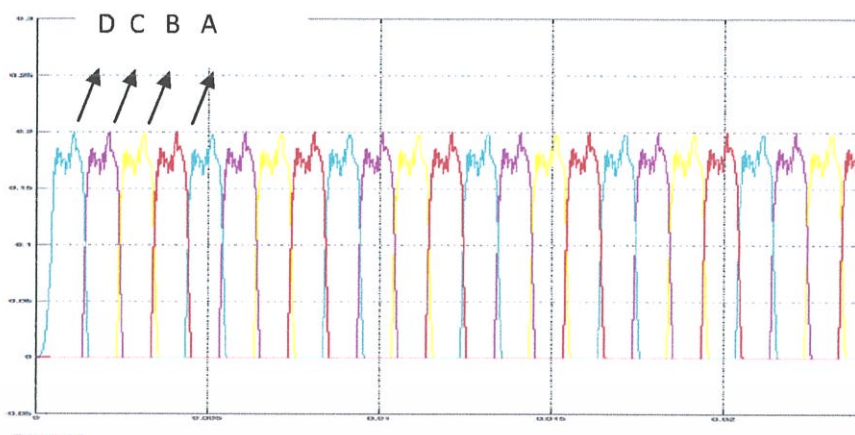


รูปที่ 4.12 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับคลั่งจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm



รูปที่ 4.13 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



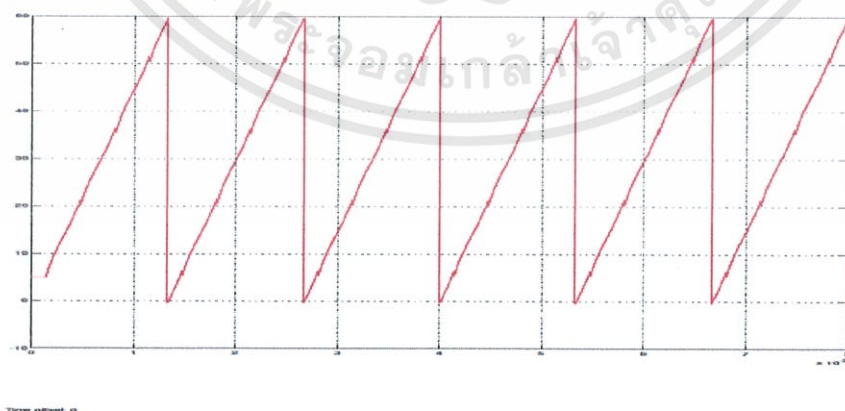
รูปที่ 4.14 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 2500 rpm

4.3 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 7500 rpm

4.3.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน

การตรวจจับตำแหน่ง (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 1 เฟส)

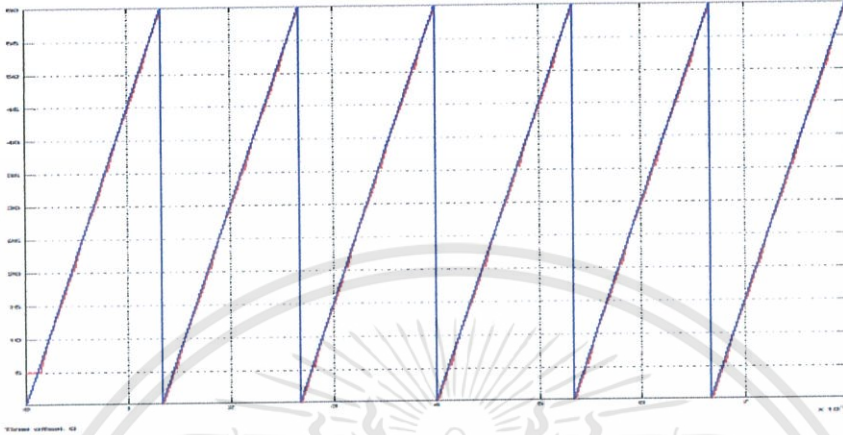
การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณาช่วงการกำหนดมุม on และมุม off ให้อยู่ในช่วงหลังจากจุด unaligned จนถึงก่อนจุด aligned ซึ่งเป็นช่วงที่ให้แรงบิดออกมาเป็นค่าบวก ในการทดลองนี้เรากำหนดให้ on มุมนำกระแสมีค่า เท่ากับ 35 องศา และกำหนด off มุมนำกระแสมีค่าเท่ากับ 50 องศา สำหรับตำแหน่งโรเตอร์เราได้มาจากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการจำลองในขณะที่แบบจำลองมอเตอร์มีความเร็วรอบที่ 7500 rpm โดยเราพิจารณาเฉพาะของเฟส A



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm

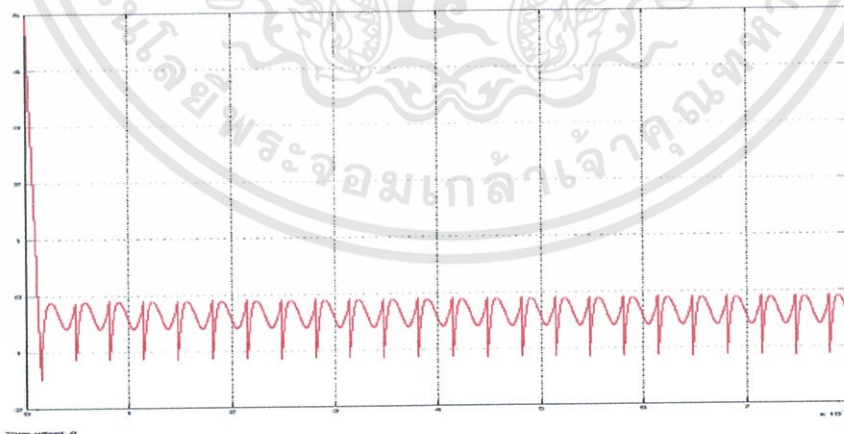
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 เป็นตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำมุมทางไฟฟ้าเป็นมุมทางกล ขณะทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียว โดยที่มุม 0 และ 60 องศา คือ ตำแหน่ง aligned ส่วนมุม 30 องศา คือตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm

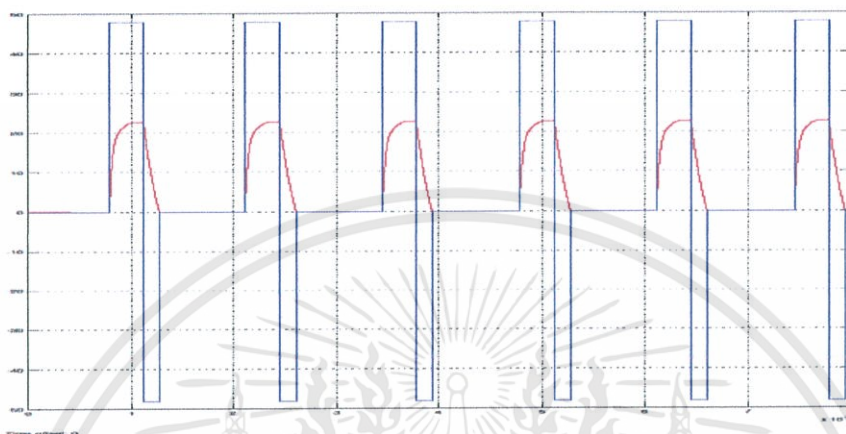
จากรูปที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมากโดยจะมีความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ 7500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

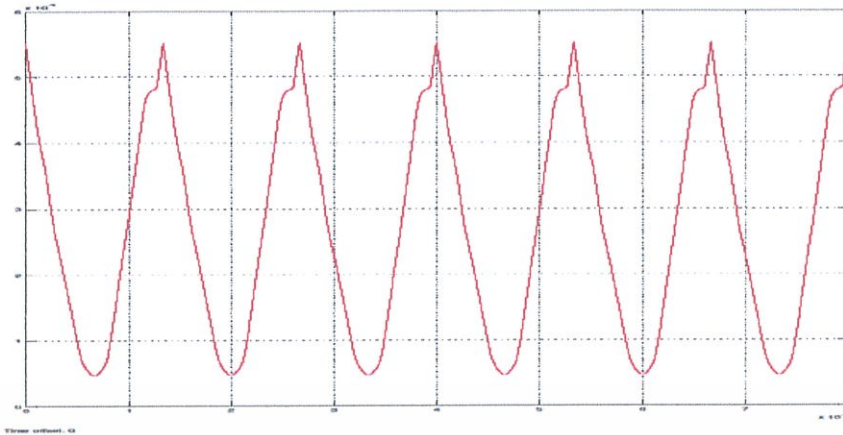
จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งช่วงแรกนั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูงมากประมาณ 5 องศาด้วยกัน เป็นผลเนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมในสภาวะชั่วคราว และในช่วงสภาวะคงที่จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1.5 องศา



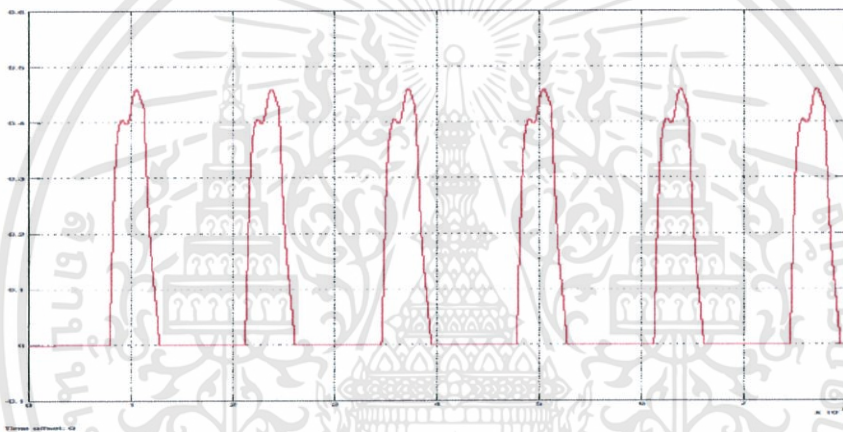
รูปที่ 4.18 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ ที่ 7500 rpm

ในการจำลองนี้ได้ทำการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Single pulse โดยจะควบคุมกระแสไว้ที่ 30 A ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นกระแสจะลดลงเนื่องจากผลของแรงดันต้านกลับทำให้กระแสไม่ถึงค่ากระแสที่ควบคุม ดังนั้นรูปคลื่นกระแสจึงเป็นแบบ Single pulse

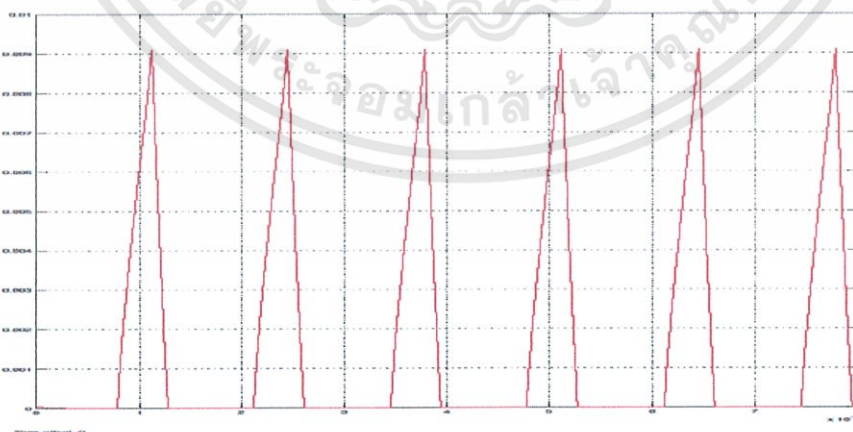
จากรูปที่ 4.18 เป็นการจำลองการขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะใช้แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสเช่นเดียวกับขณะทำงานเป็นมอเตอร์ แต่การสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดนั้นจะต่างกัน ในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้เพียงแค่ค่าบวก และค่าลบ หรือที่เรียกว่า โหมดการควบคุมกระแสแบบ Single pulse Mode โดยแรงดันคร่อมขดลวดเฟสจะมีค่าบวกแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์นำกระแสทั้ง 2 ตัว และจะมีค่าลบแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสทั้ง 2 ตัว



รูปที่ 4.19 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 7500 rpm

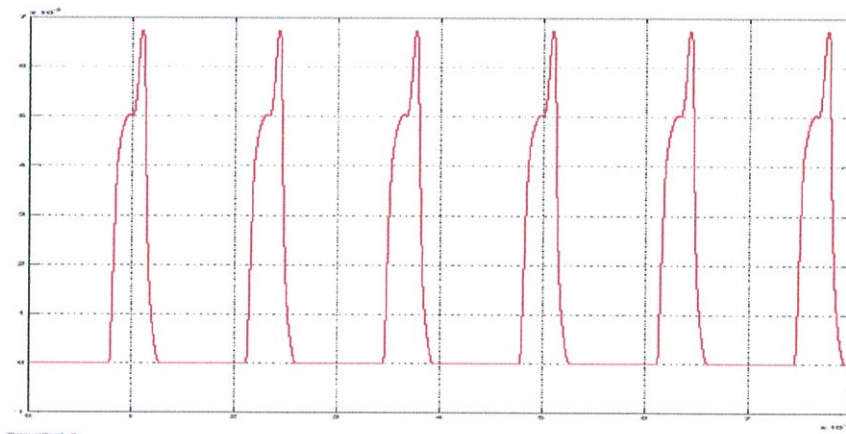


รูปที่ 4.20 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 7500 rpm



รูปที่ 4.21 เส้นแม่เหล็กจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 7500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



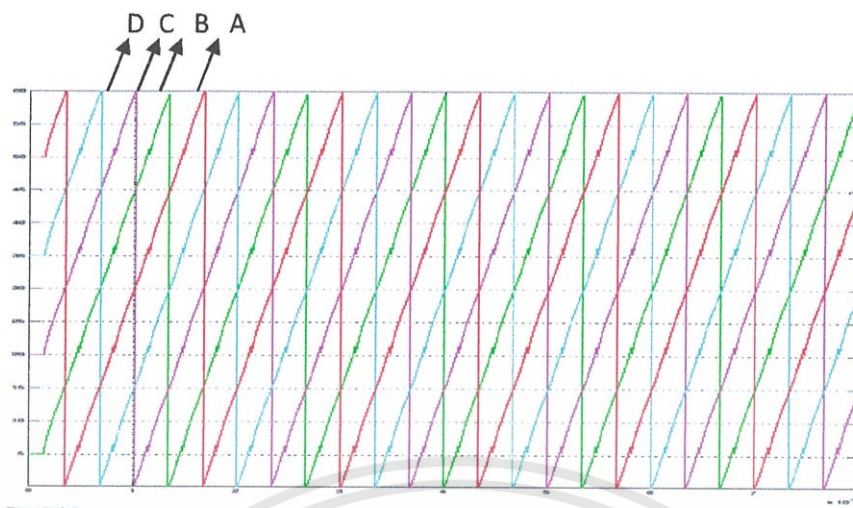
รูปที่ 4.22 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ 7500 rpm

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดและกระแสมีความสัมพันธ์กัน หมายความว่า รูปร่างของกระแสและแรงบิดนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดจะมีค่าเป็นบวก เนื่องจากเราทำการ on และ off มุมนำกระแสอยู่ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ซึ่งจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี

จากผลการทดลองที่ความเร็ว 7500 rpm ข้างต้นเราทำการพิจารณาโดยเฉพาะของ เฟส A เมื่อนำเอาผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี ผลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะใกล้เคียง และสอดคล้องกับทางทฤษฎี จึงสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง ซึ่งเราสามารถนำ โครงข่ายประสาทเทียมไปประมาณตำแหน่งจริงได้

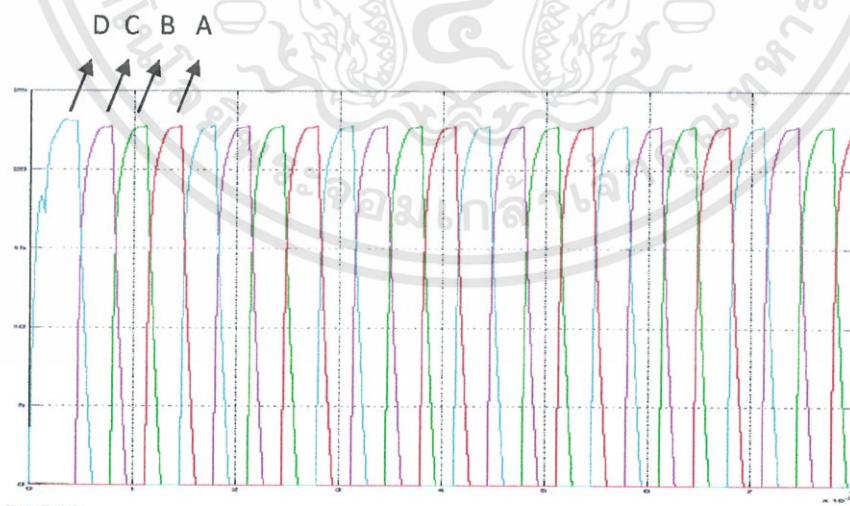
4.3.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 4 เฟส)

การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณารูป คลื่นสัญญาณทั้ง 4 เฟสซึ่งผลจากการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลหมุน ไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งจะประกอบไปด้วย ค่าของ ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม กระแส เส้นแรงแม่เหล็ก ค่า ความเหนี่ยวนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และ แรงบิด



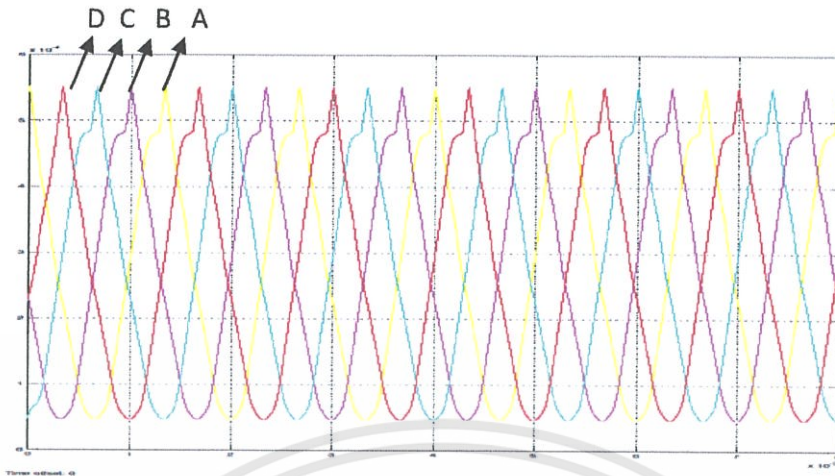
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม
ในลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm

จากรูปที่ 4.23 เป็นรูปที่แสดงตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 4 เฟส โดยจะประกอบไปด้วย ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส B ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส C และตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส D ซึ่งมีมุมทางไฟฟ้าต่างกันอยู่ 90 องศาตามลำดับเฟส เมื่อเทียบเป็นมุมทางกลแล้วจะต่างกัน 15 องศาตามลำดับเฟส

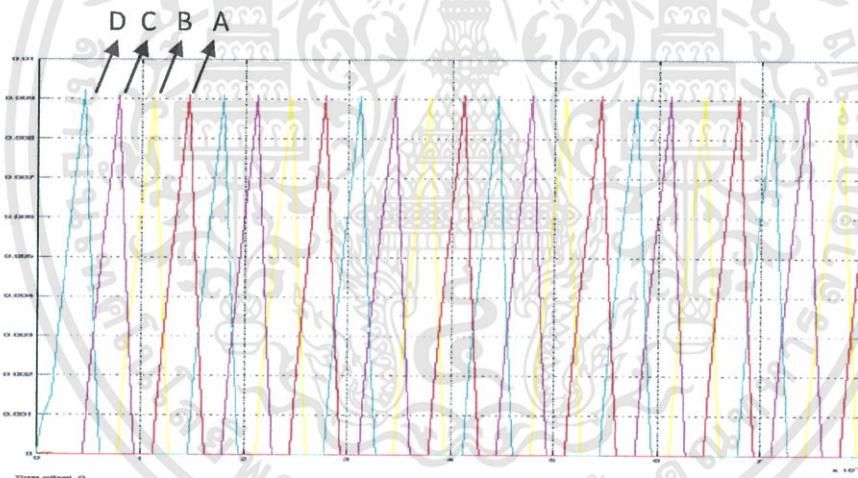


รูปที่ 4.24 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะ
ทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ 7500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

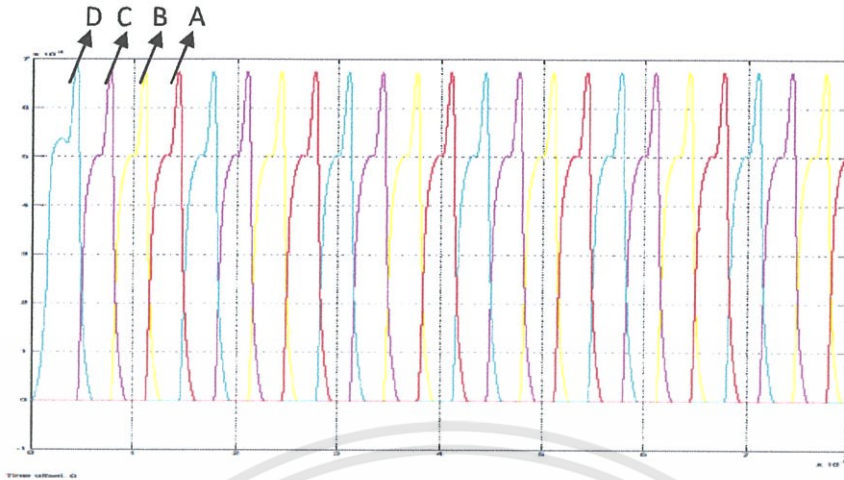


รูปที่ 4.25 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงาน
เป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm

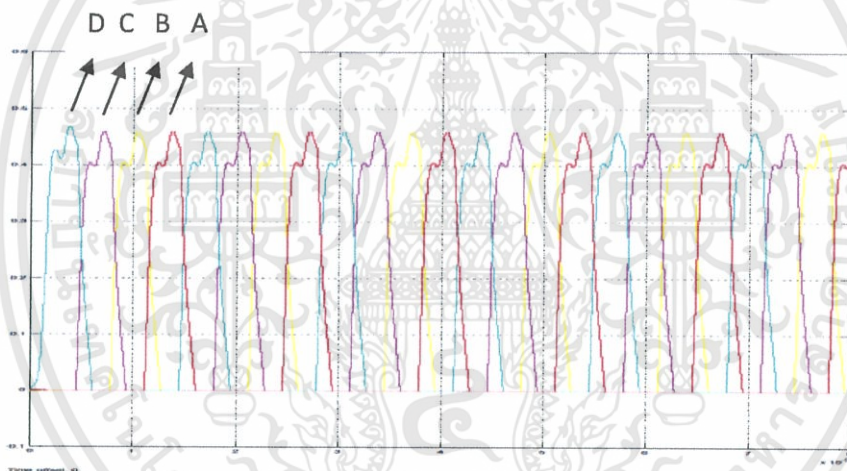


รูปที่ 4.26 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคล่องจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm



รูปที่ 4.28 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ 7500 rpm

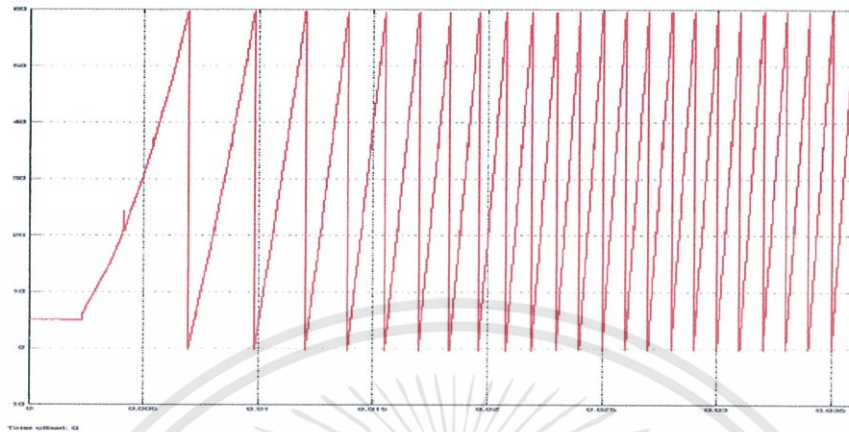
4.4 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

4.4.1 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 1 เฟส)

การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณาช่วงการกำหนดมุม on และมุม off ให้อยู่ในช่วงหลังจากจุด unaligned จนถึงก่อนจุด aligned ซึ่งเป็นช่วงที่ให้แรงบิดออกมาเป็นค่าบวก ในการทดลองเรากำหนดให้ on มุมนำกระแสมีค่า เท่ากับ 35 องศา และกำหนด off มุมนำกระแสมีค่า

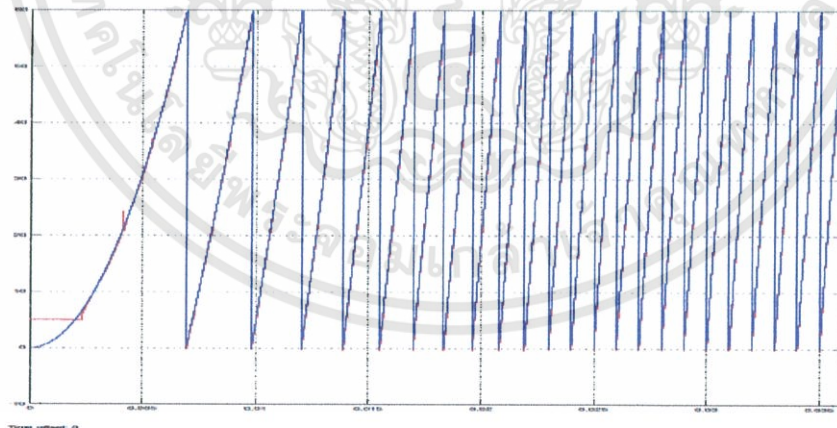
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 50 องศา สำหรับตำแหน่งโรเตอร์เราได้มาจากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการจำลองในขณะที่มอเตอร์มีความเร็วรอบจาก 0 ถึง 10000 rpm โดยเราพิจารณาเฉพาะของเฟส A



รูปที่ 4.29 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม
ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

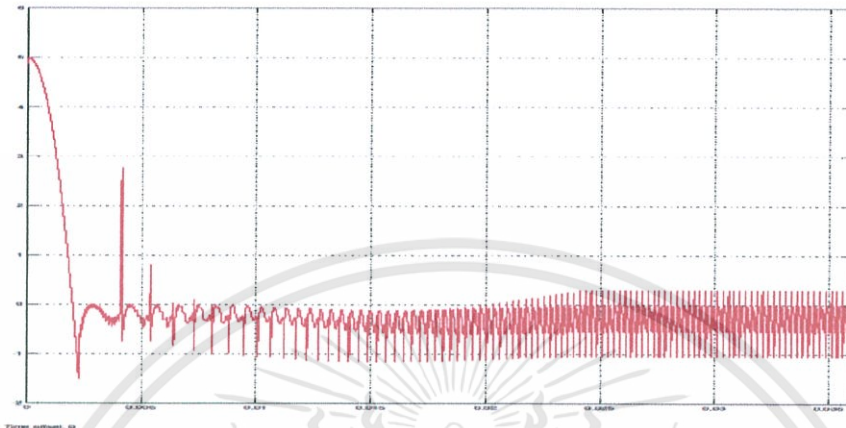
จากรูปที่ 4.29 เป็นตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำมุมทางไฟฟ้าเป็นมุมทางกล
ขณะทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียว โดยที่มุม 0 และ 60 องศา คือ ตำแหน่ง aligned ส่วนมุม 30 องศา
คือตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ
ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

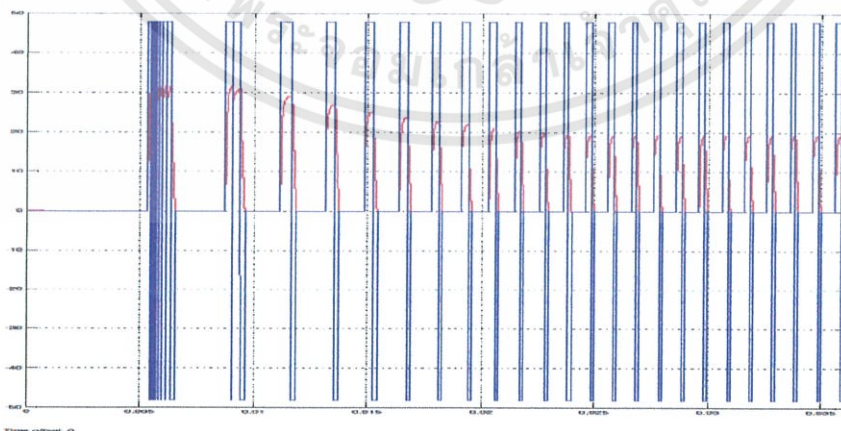
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดย
 โครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมากโดยจะ
 มีค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ
 ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

จากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของ
 โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งช่วงแรกนั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูงมากประมาณ 5 องศาด้วยกัน เป็นผล
 เนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมในสภาวะชั่วขณะ และ
 ในช่วงสภาวะคงที่จะเห็นว่าเมื่อความเร็วมากขึ้นค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
 โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้น



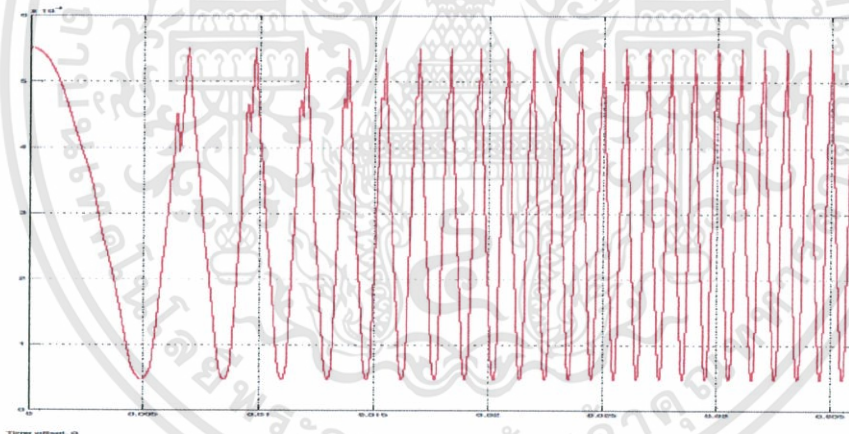
รูปที่ 4.32 รูปกระแสและแรงดันเฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

ขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

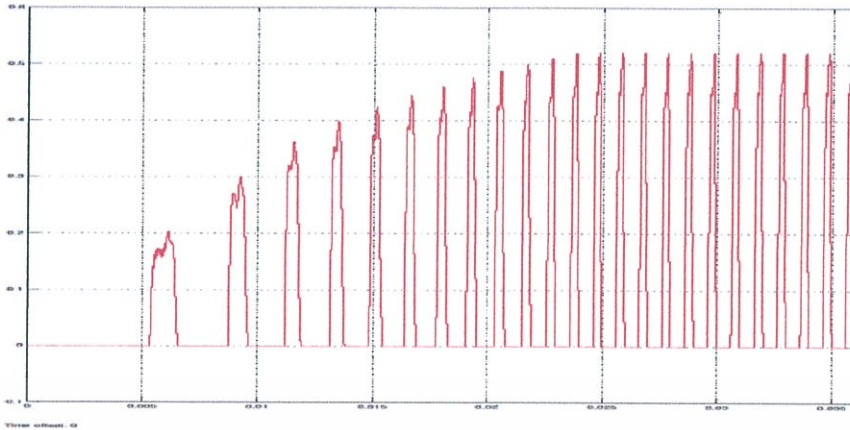
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองนี้ได้ทำการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมกระแส โดยจะควบคุมกระแสไว้ที่ 30 A ในช่วงแรกหรือความเร็วต่ำเป็นแบบ Hard Chopping เนื่องจากกระแสสูงจะถูกควบคุมแบบ ฮิสเตอร์ซิสซึ่งก็ยอมทำให้กระแสไม่เรียบ แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้น กระแสลดลงเนื่องจากแรงดันต้านกลับทำให้การทำงานเป็นแบบ Single pulse โดยกระแสจะน้อยกว่าที่จะควบคุม ดังรูปที่ 4.32

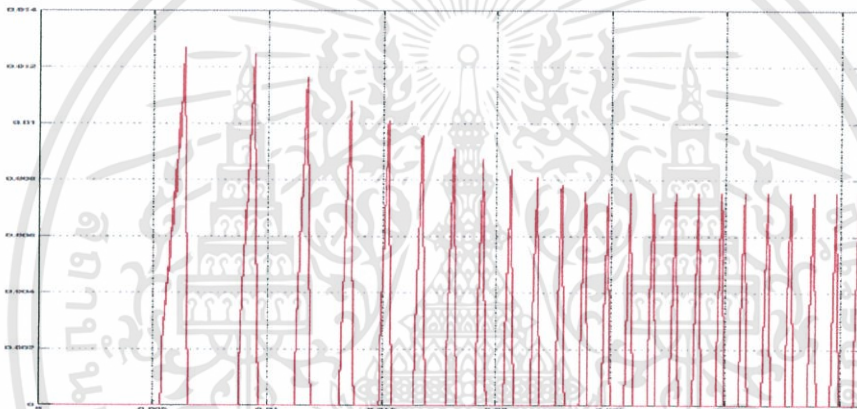
จากรูปที่ 4.32 เป็นการจำลองการขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์จะใช้แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสเพราะว่าวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี โดยแรงดันในช่วงความเร็วต่ำได้มาจากการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์ซิส โดยจะมีค่าบวกแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์นำกระแสทั้ง 2 ตัว และจะมีค่าลบแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสทั้ง 2 ตัว ซึ่งเรียกโหมดการควบคุมกระแสแบบนี้ว่า Hard chopping แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้น แรงดันจะทำงานในโหมดการควบคุมกระแสแบบ Single pulse Mode โดยแรงดันคร่อมขดลวดเฟสจะมีค่าบวกแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์นำกระแสทั้ง 2 ตัว และจะมีค่าลบแหล่งจ่าย เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสทั้ง 2 ตัว



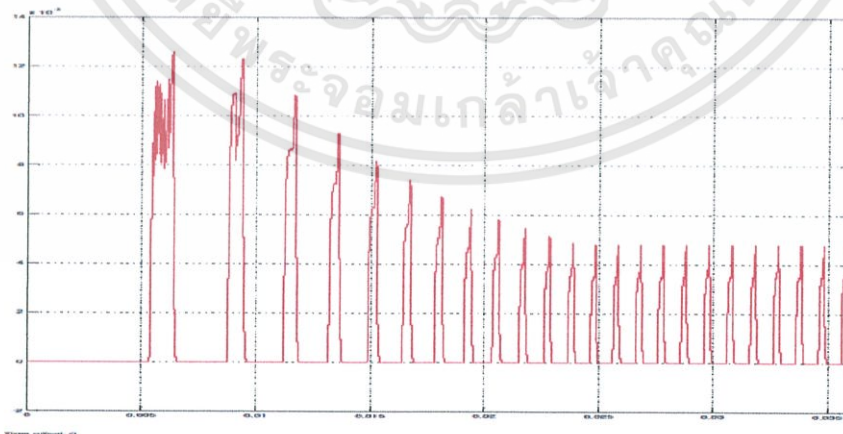
รูปที่ 4.33 ความเหนี่ยวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm



รูปที่ 4.34 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm



รูปที่ 4.35 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm



รูปที่ 4.36 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์
ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

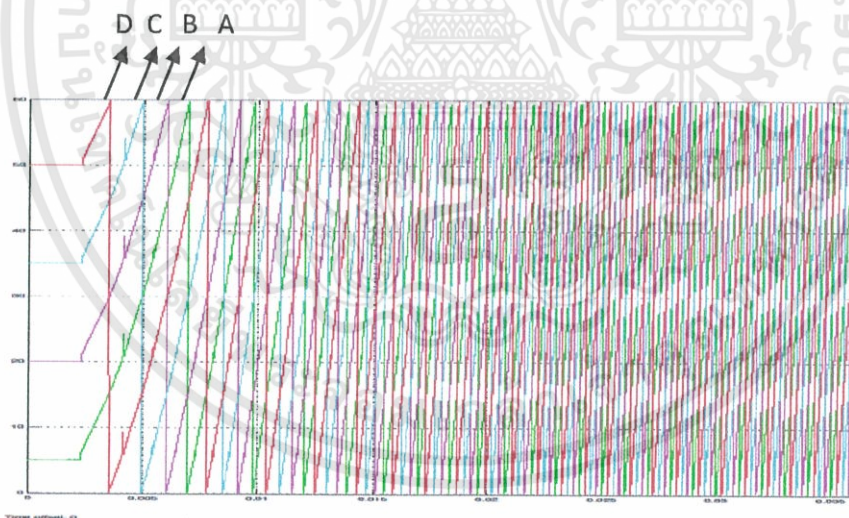
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดและกระแสมีความสัมพันธ์กัน หมายความว่า รูปร่างของกระแสและแรงบิดนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดจะมีค่าเป็นบวก เนื่องจากเราทำการ on และ off มุมนำกระแสอยู่ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ซึ่งจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี

จากผลการทดลองที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm ข้างต้นเราทำการพิจารณา โดยเฉพาะของเฟส A เมื่อนำเอาผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี ผลที่ได้จากการทดลองมี ลักษณะใกล้เคียงและสอดคล้องกับทางทฤษฎี จึงสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง ซึ่งเราสามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประมาณตำแหน่งจริงได้

4.4.2 ผลการจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง (โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 4 เฟส)

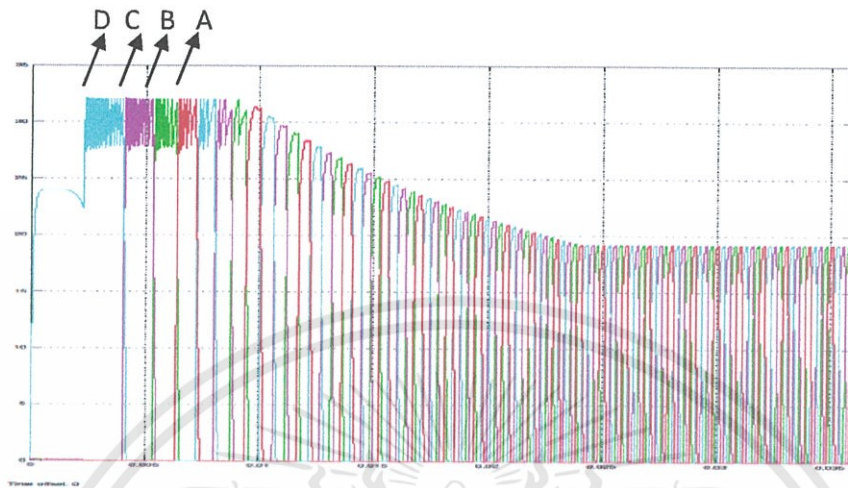
การจำลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์โดยพิจารณารูปคลื่นสัญญาณทั้ง 4 เฟสซึ่งผลจากการประมาณค่า จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่งจะประกอบไปด้วยค่าของ ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม กระแส เส้นแรงแม่เหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และ แรงบิด



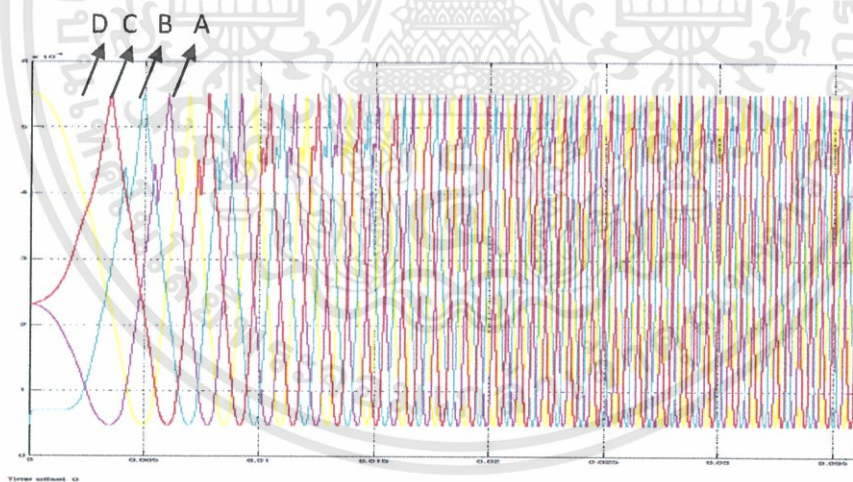
รูปที่ 4.37 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ในลักษณะมุมทางกลทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

จากรูปที่ 4.37 เป็นรูปที่แสดงตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 4 เฟส โดยจะประกอบไปด้วย ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส A ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส B

ตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส C และตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมของเฟส D ซึ่งมีมุมทางไฟฟ้าต่างกันอยู่ 90 องศาตามลำดับเฟส เมื่อเทียบเป็นมุมทางกลแล้วจะต่างกัน 15 องศาตามลำดับเฟส

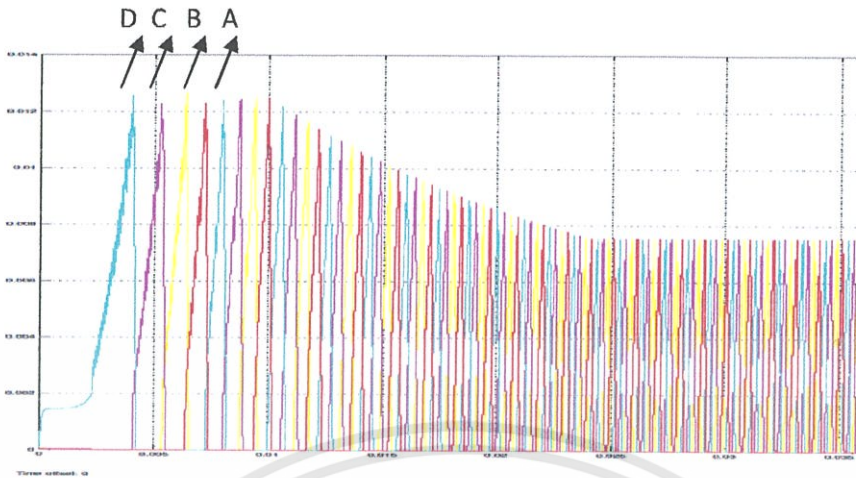


รูปที่ 4.38 รูปกระแสทั้ง 4 เฟสจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์โดยจะควบคุมกระแสที่ 30 A ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

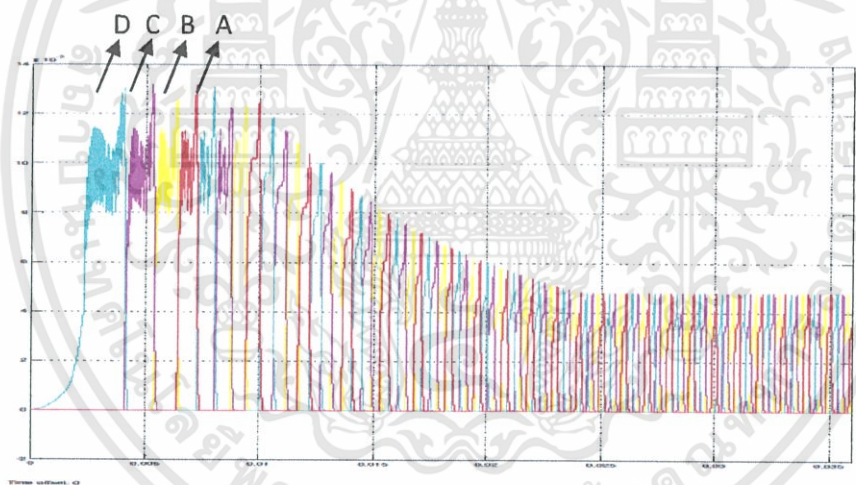


รูปที่ 4.39 ความเหนียวนำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

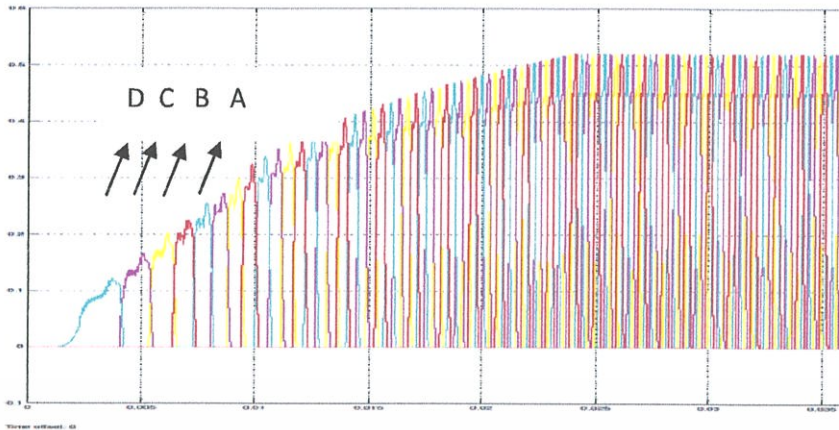


รูปที่ 4.40 เส้นแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm



รูปที่ 4.41 แรงบิดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



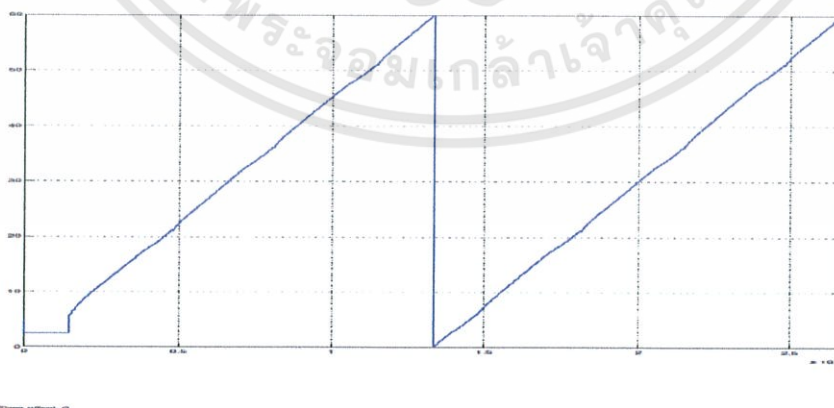
รูปที่ 4.42 แรงดันต้านกลับจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำงานเป็นมอเตอร์ของทั้ง 4 เฟส ที่ความเร็ว 0 ถึง 10000 rpm

4.5 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากผลการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมใน Matlab กับรูปคลื่นจริงจากการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแส แรงดัน จากแบบจำลองที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สไปนเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์เทียบกับรูปคลื่นกระแสและแรงดันจากการทดลองจริง

4.5.1 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งกับรูปคลื่นจากการทดสอบการทำงานจริงแบบ Single pulse

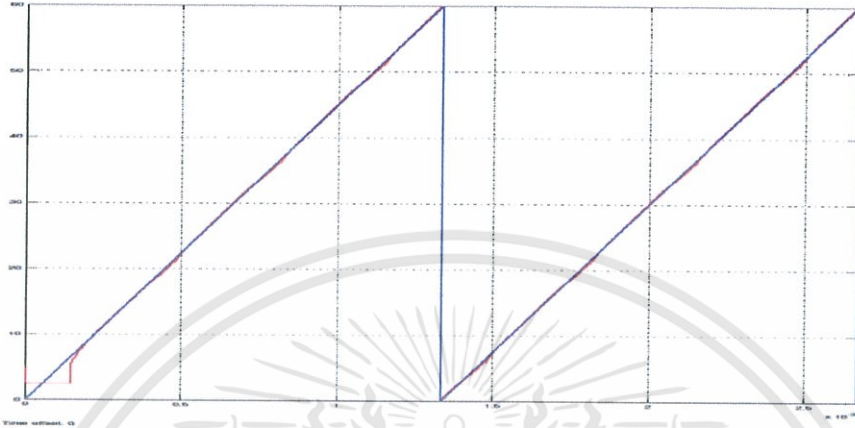
ในการทดลองเรากำหนดให้ on มุมนำกระแสมีค่าเท่ากับ 32.5 องศา และกำหนด off มุมนำกระแสมีค่าเท่ากับ 47.5 องศา จะสามารถหาตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้มาจากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

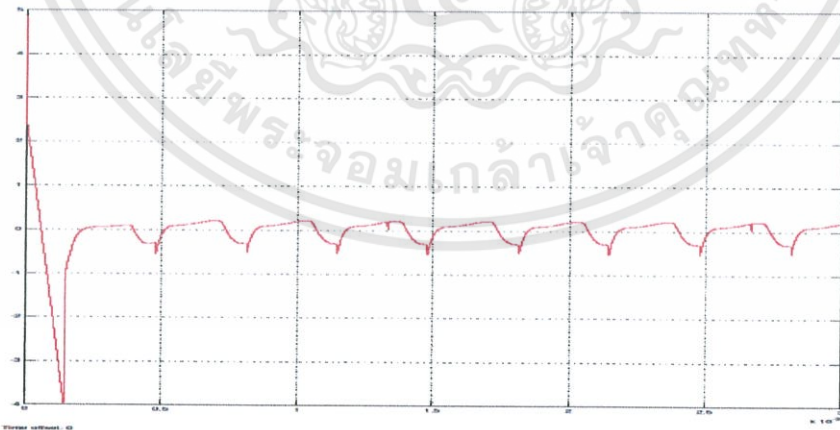
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.43 เป็นตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำมุมทางไฟฟ้าเป็นมุมทางกล ขณะทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียว โดยที่มุม 0 และ 60 องศา คือ ตำแหน่ง aligned ส่วนมุม 30 องศา คือตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 4.44 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

จากรูปที่ 4.44 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder จากรูปที่ 4.44 จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมากโดยจะมีความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.45

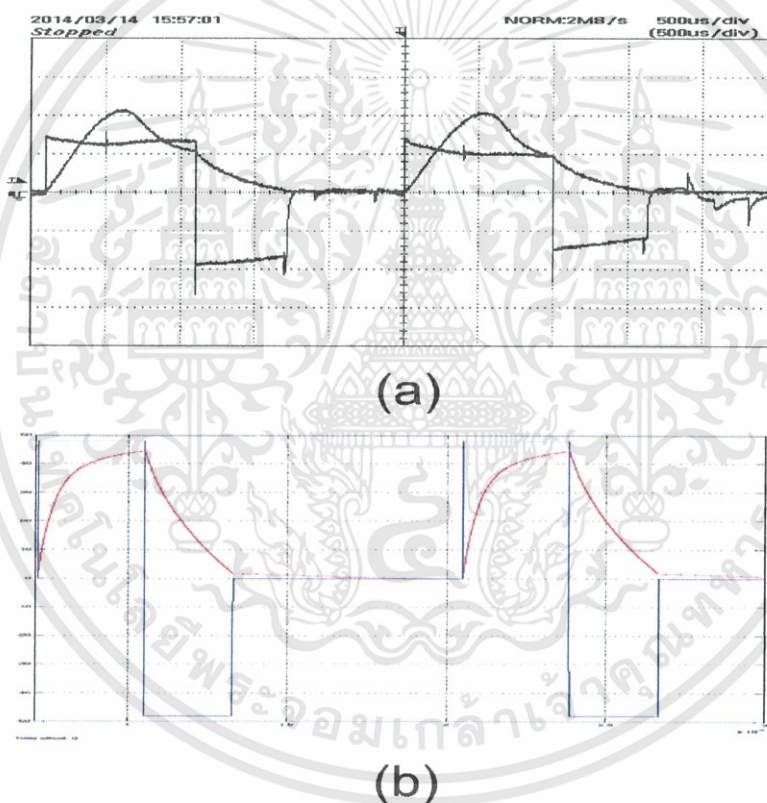


รูปที่ 4.45 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.45 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งช่วงแรกนั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูงมากประมาณ 5 องศาด้วยกัน เป็นผลเนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมในสภาวะชั่วคราว และในช่วงสภาวะคงที่จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา

การเปรียบเทียบกระแสและแรงดันเฟส จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink กับรูปคลื่นของผลจากการทดลองจริง ในโหมดการทำงานแบบ Single pulse โดยจะทำการเปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของกราฟกระแสเฟส ที่เงื่อนไขเดียวกัน



รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของกระแสเฟส A

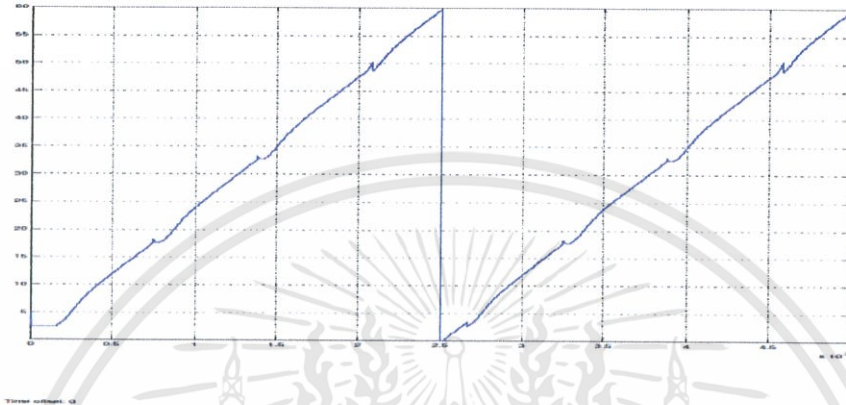
$$\text{ที่มุมนำกระแสที่ } \theta_{\text{on}} = 32.5 \quad \theta_{\text{off}} = 47.5$$

- (a) ผลจากการทดสอบการทำงานจริงของ SRM
 (b) ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

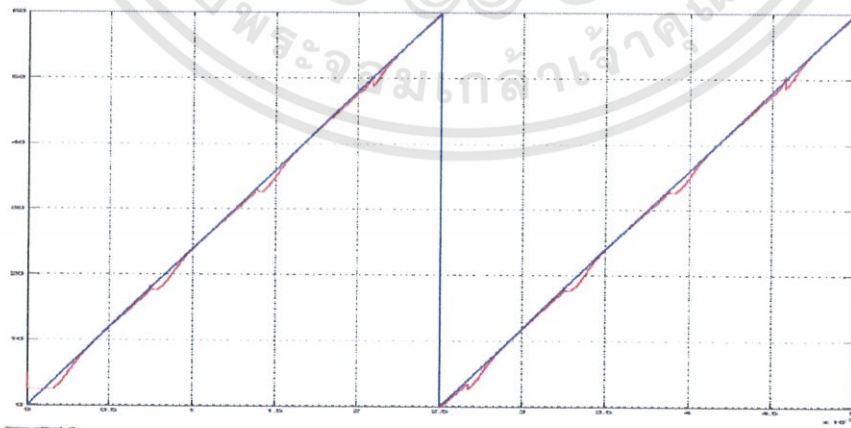
4.5.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งกับผลจากการทดสอบการทำงานจริงแบบ Hard chopping

ในการทดลองเรากำหนดให้ on มุมนำกระแสมีค่า เท่ากับ 32.5 องศา และกำหนด off มุมนำกระแสมีค่าเท่ากับ 47.5 องศา จะสามารถหาตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้มาจากการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม
ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

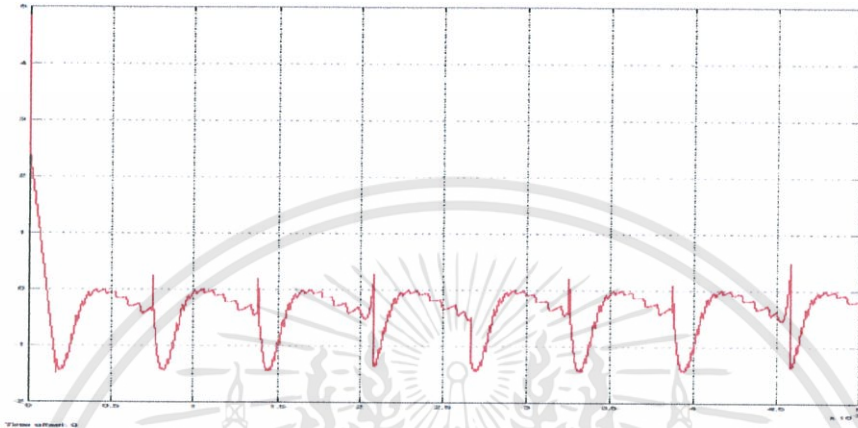
จากรูปที่ 4.47 เป็นตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำมุมทางไฟฟ้าเป็นมุมทางกล ขณะทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียว โดยที่มุม 0 และ 60 องศา คือ ตำแหน่ง aligned ส่วนมุม 30 องศา คือตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 4.48 ตำแหน่งของโรเตอร์จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ
ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

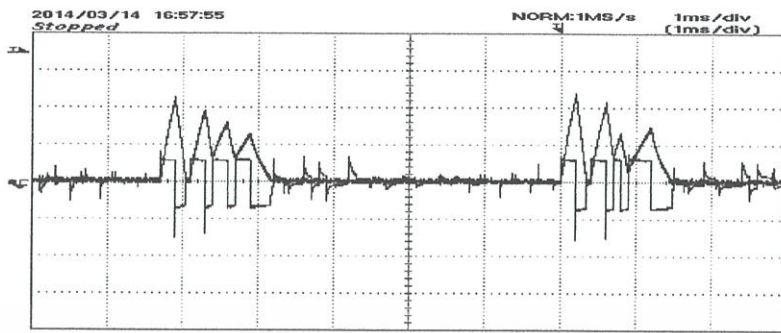
จากรูปที่ 4.48 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งโรเตอร์จากการประมาณค่าโดย
 โครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder จากรูปที่ 4.48 จะเห็นว่ามีความ
 ใกล้เคียงกันมากโดยจะมีความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.49



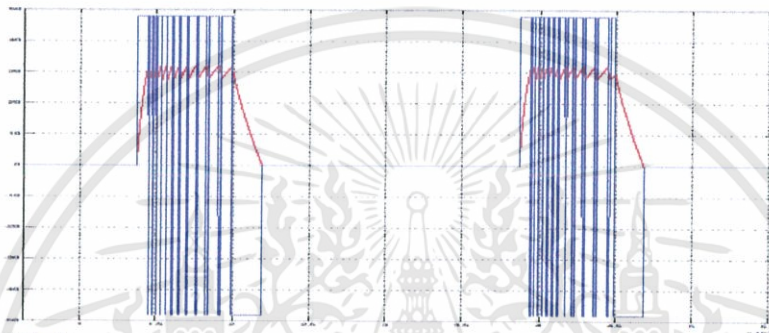
รูปที่ 4.49 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับ
 ตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ในลักษณะมุมทางกลของเฟส A

จากรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งของ
 โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งช่วงแรกนั้นจะมีความผิดพลาดสูงมากประมาณ 5 องศาด้วยกัน เป็นผล
 เนื่องจากการเริ่มต้นของการตรวจจับตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมในสภาวะชั่วขณะ และ
 ในช่วงสภาวะคงที่จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา

การเปรียบเทียบกระแสและแรงดันเฟส จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้
 โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink กับรูปคลื่น
 ของผลจากการทดลองจริง ในโหมดการทำงานแบบ Hard Chopping โดยจะทำการเปรียบเทียบ
 รูปร่างและขนาดของกราฟกระแสเฟส ที่เงื่อนไขเดียวกัน



(a)



(b)

รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของกระแสเฟส A

ที่มุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 32.5$ $\theta_{off} = 47.5$

- (a) ผลจากการทดสอบการทำงานจริงของ SRM
- (b) ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้สัมประสิทธิ์สไปนน์เป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆพบว่าที่ความเร็วต่ำสามารถประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ได้แม่นยำมากกว่าความเร็วสูง โดยความเร็วต่ำค่ากระแสจะถูกควบคุมแบบ Hard chopping และเมื่อมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์มีความเร็วสูงทำให้แรงดันต้านกลับสูงขึ้นซึ่งเป็นผลให้ค่ากระแสต่ำกว่ากระแสควบคุมจึงทำให้ที่ความเร็วสูงกระแสเป็นแบบ Single pulse โดยการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ 8/6 จะต้องมีส่วนในการนำกระแสไม่น้อยกว่า 15 องศา เนื่องจาก 1 รอบทางไฟฟ้าของเฟส A คือ 60 องศาทางกล โดยการประมาณตำแหน่งโรเตอร์นั้นจะพิจารณาเฟส A โดยที่เฟส B,C,D เกิดจากการเลื่อนเฟสไป 15 องศาจากเฟส A ดังนั้นเพื่อประมาณตำแหน่งทางกลจะต้องอาศัยการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในทุกเฟสเพื่อสามารถประมาณค่าทุกตำแหน่งใน 60 องศาทางกลได้อย่างสมบูรณ์

ในการนำเสนอค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการตรวจจับตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมแทนที่ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ของแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ขณะที่ทำงานในช่วงที่เป็นมอเตอร์ เช่น กระแส แรงดัน เส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิด ค่าความเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับโดยการใช้สัมประสิทธิ์สไปนน์เป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการตรวจจับตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตัวตรวจจับ (Encoder)

5.2 ข้อเสนอแนะ

- มุมในการนำกระแสของแต่ละเฟสไม่ควรต่ำกว่า 15 องศา มิฉะนั้นจะไม่สามารถทำการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ได้ เนื่องจากขาดช่วงของการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเฟส
- สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมซึ่งสามารถลดราคาในส่วนของตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ลงได้อย่างมหาศาล

บรรณานุกรม

- [1] David A. Torrey and Erkan Mese, “An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks,” **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, Vol. 17, No.1, 2002.
- [2] Howard B. Demuth, Mark Beale, and Martin T. Hagan, **Neural Network Design**, PWS Publishing Company, 1996.
- [3] T.J.E. Miller, **Electronic Control of Switched Reluctance Machine**, Oxford: Newnes Power Engineering Series, 2001.
- [4] T.J.E. Miller, **Switched Reluctance Motors and their Control**, Magna physics publishing and clarendon press : Oxford, 1993.
- [5] จิรายุทธ กรุดสอน, เจนณรงค์ บุญปั้นผล, ชัยนันท์ วัชรพิชิตชัย และ ณีภูษฎ์ กุลประเสริฐ, “Mathematical Model of A Switched Reluctance Generator,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [6] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, **มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ : ทฤษฎีและการออกแบบ**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เมษายน 2550.
- [7] ไพวรรณ เกิดตรวจ, “การศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [8] ไพวรรณ เกิดตรวจ และ สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, “แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์”, **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON32)**, 28-30 ตุลาคม 2552.



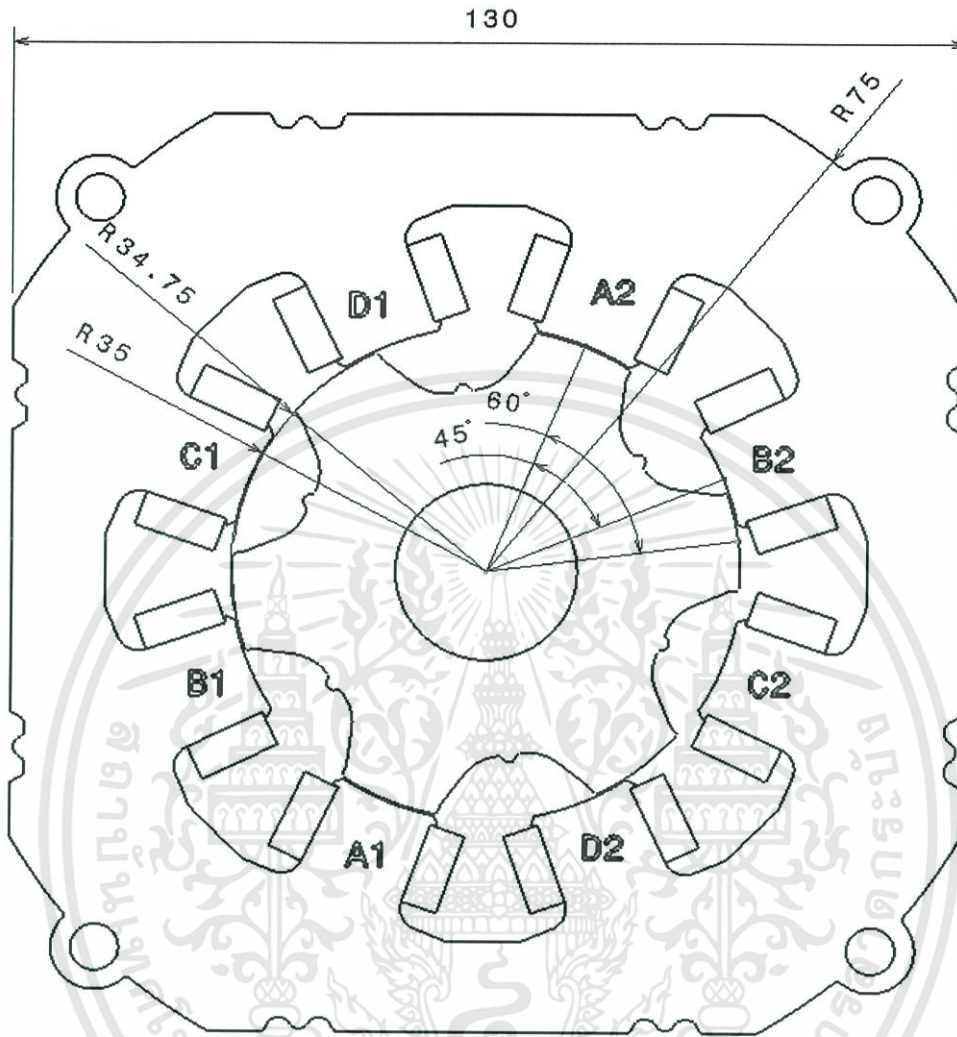
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.เขียนแบบจากโครงสร้างจริงโดยใช้โปรแกรม CATIA จะได้โครงสร้างดังรูปที่ ก.2

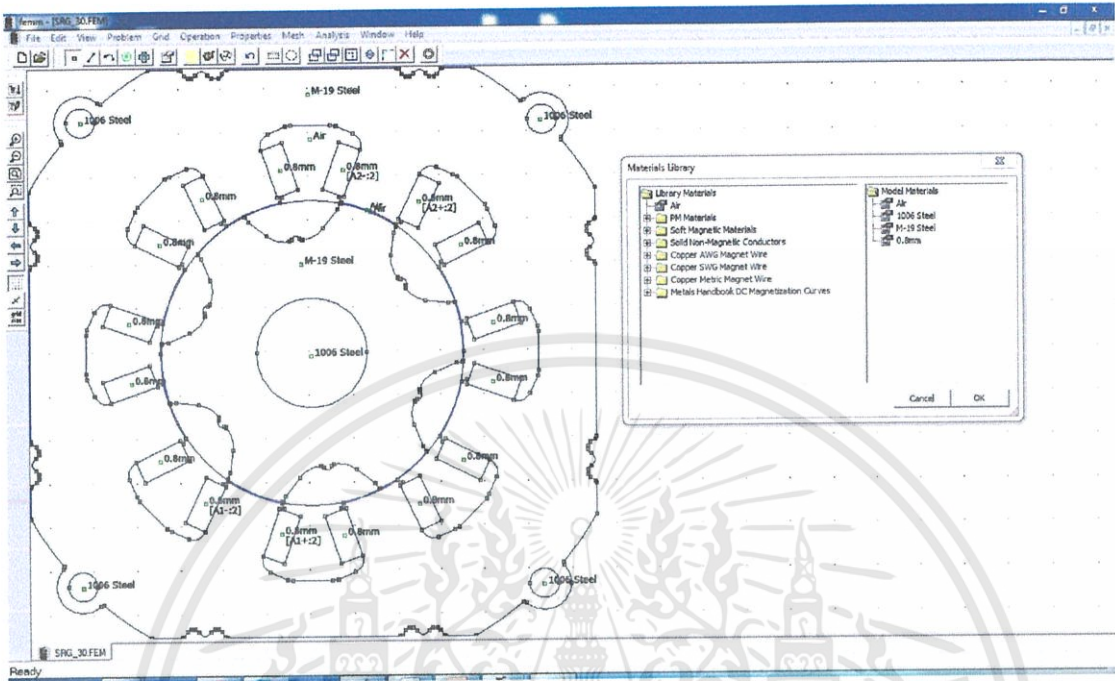


รูปที่ ก.2 โครงสร้างสวิตช์รีลักแทนซ์จากโปรแกรม CATIA

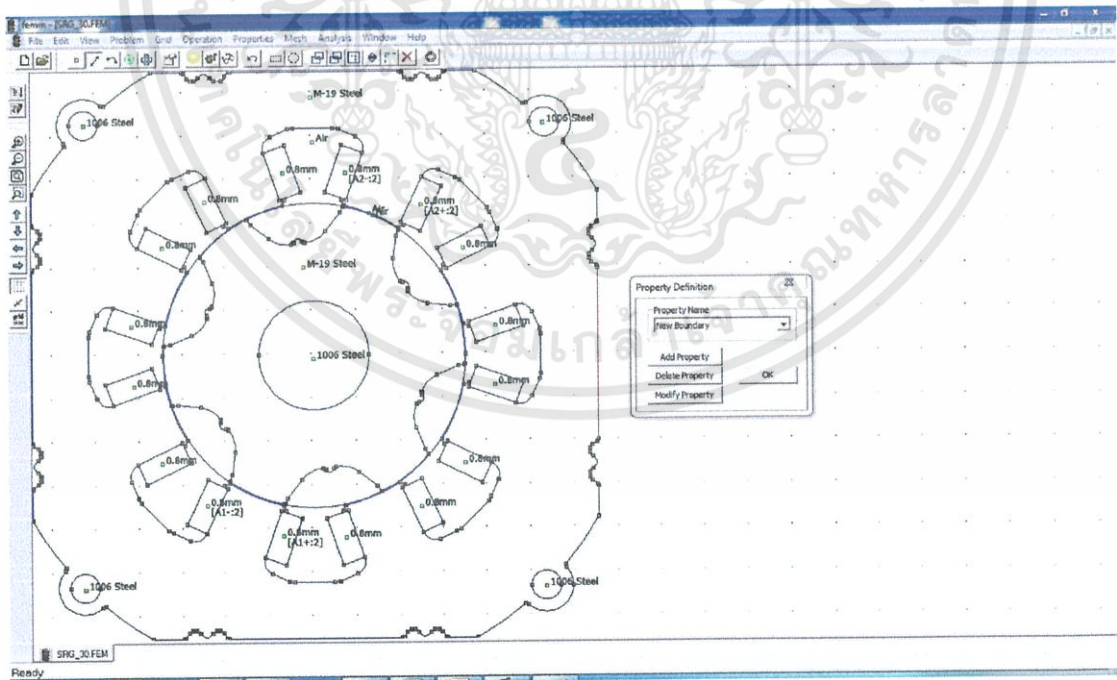
ในการเขียนแบบโครงสร้างสวิตช์รีลักแทนซ์นั้น จะเขียนทั้งหมด 30 องศาทางกล โดยจะเลื่อนโรเตอร์ไปที่ละหนึ่งตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำโครงสร้างมาวิเคราะห์ที่เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในโปรแกรม FEMM โดยมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

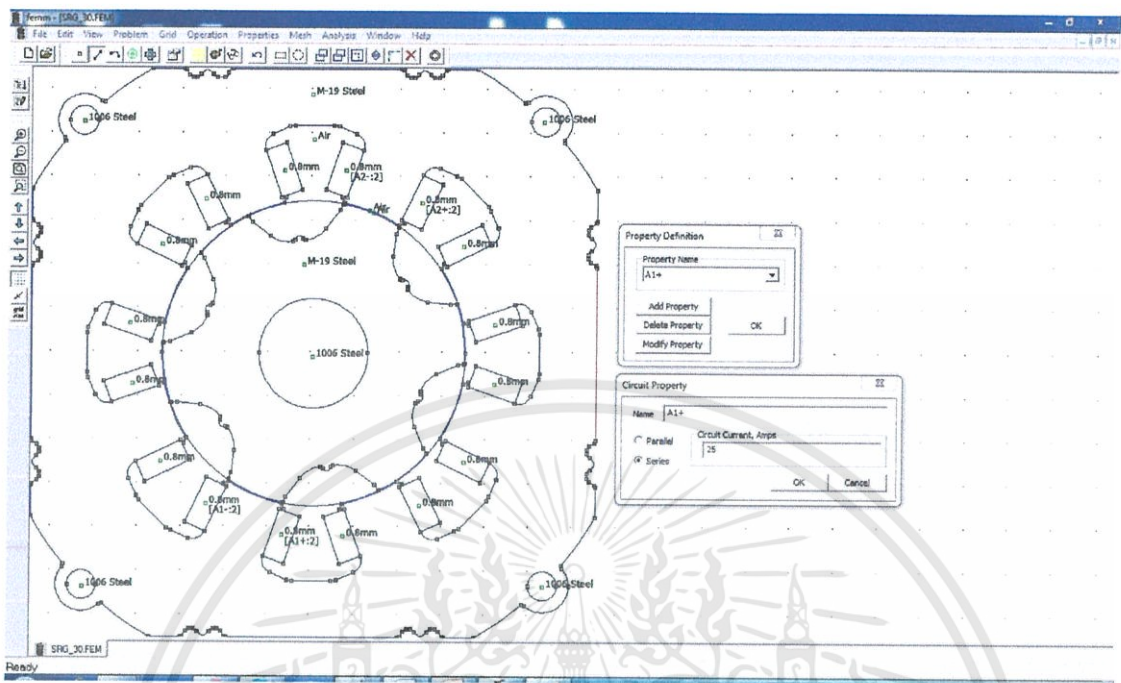


รูปที่ ก.3 กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในโครงสร้างของสวิทช์รีลักแทนซ์

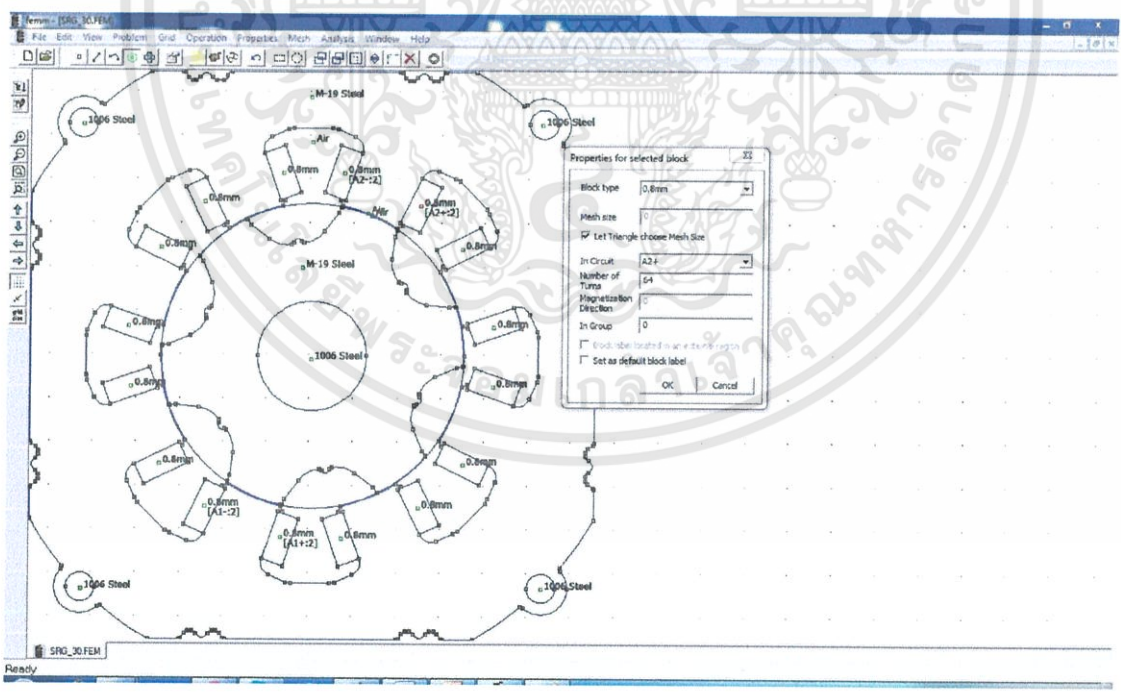


รูปที่ ก.4 กำหนดขอบเขตในการวิเคราะห์ข้อมูล Boundary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

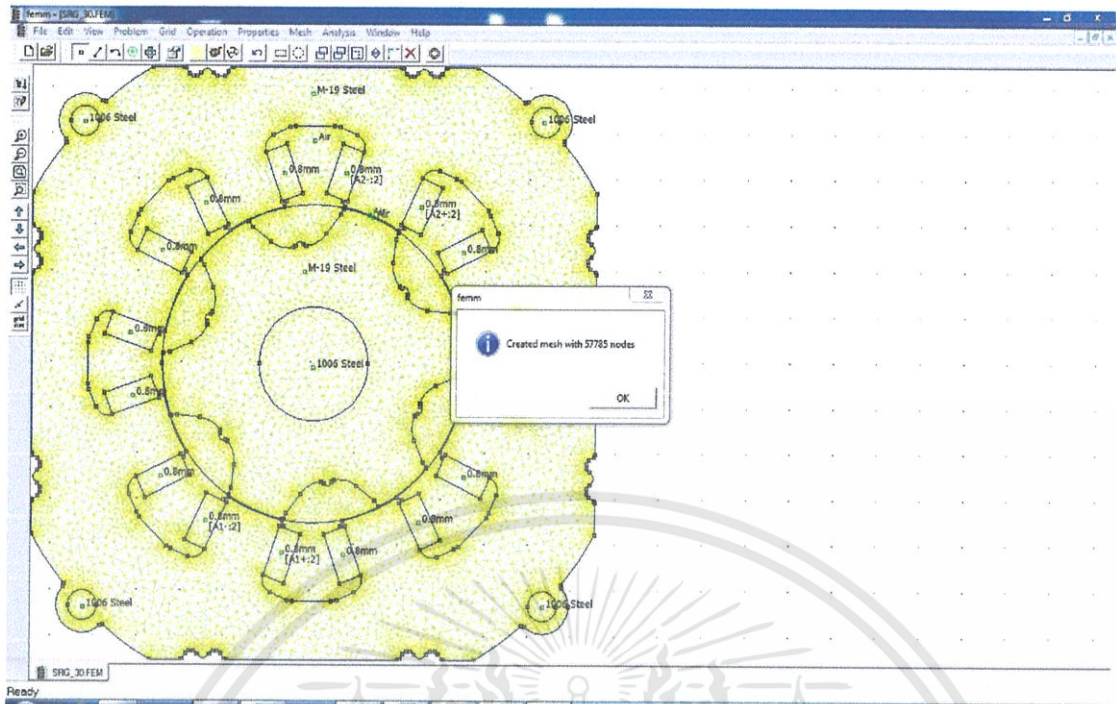


รูปที่ ก.5 กำหนดค่ากระแสในการทดลอง

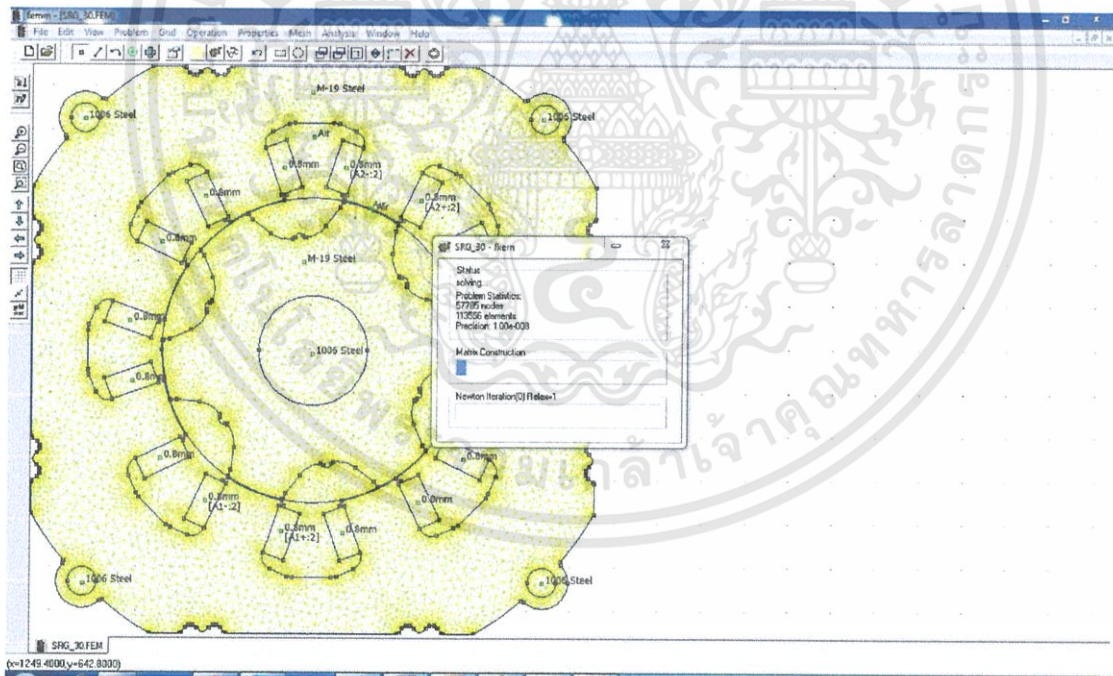


รูปที่ ก.6 กำหนดจำนวนขดลวดของเฟส A ตามแบบข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

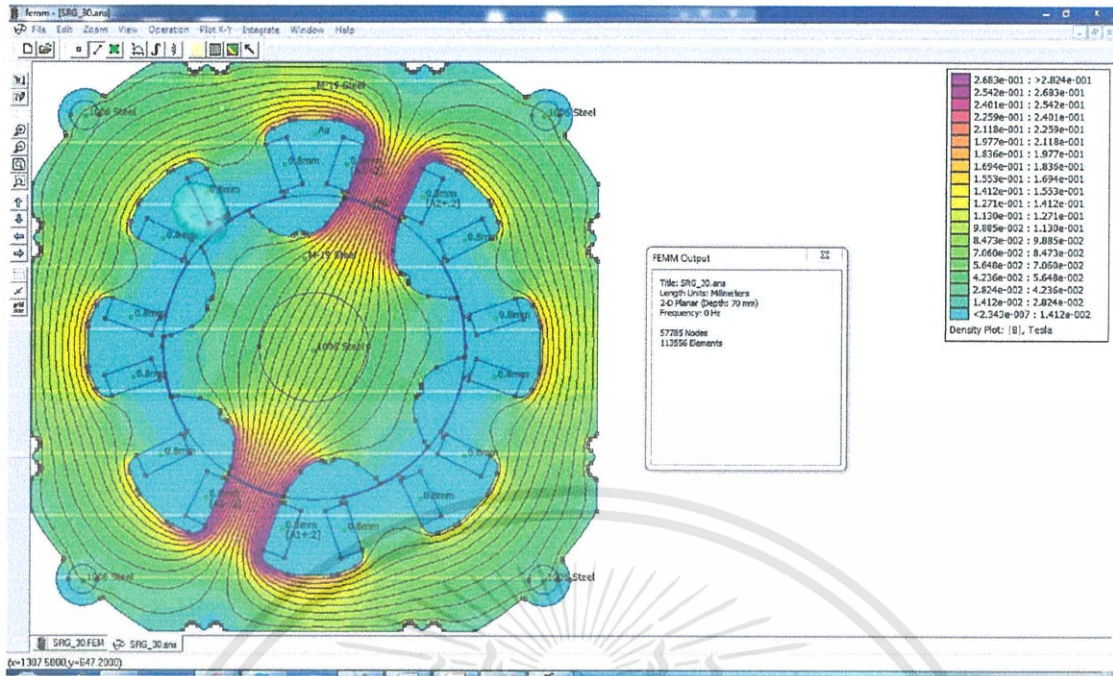


รูปที่ ก.7 แสดงจุดในการวิเคราะห์ข้อมูล

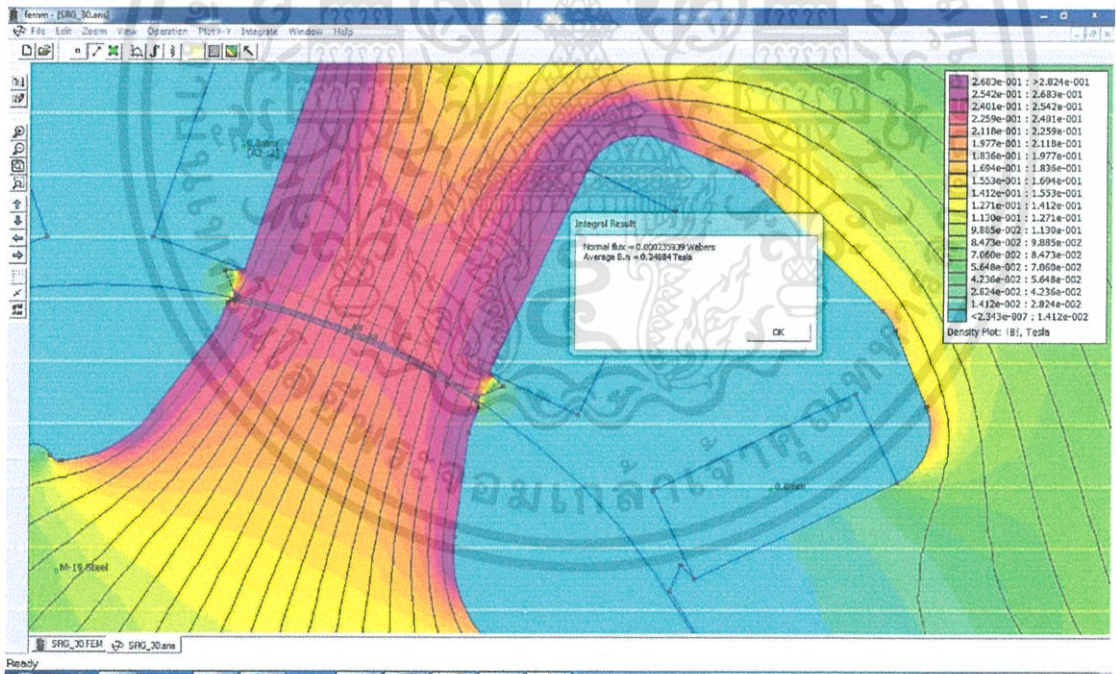


รูปที่ ก.8 วิเคราะห์ข้อมูลโดยการยิงกระสุนเข้าไปในขดลวดเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ผลจากการวิเคราะห์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กได้



รูปที่ ก.10 วัดค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ข้อมูลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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
hiddenLayerSize = 10;
net = fitnet(hiddenLayerSize);

% Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
% For a list of all processing functions type: help nnprocess
net.inputs{1}.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.outputs{2}.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
% For a list of all data division functions type: help nndivide
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% For help on training function 'trainlm' type: help trainlm
% For a list of all training functions type: help nntrain
net.trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt

% Choose a Performance Function
% For a list of all performance functions type: help nnperformance
net.performFcn = 'mse'; % Mean squared error

% Choose Plot Functions
% For a list of all plot functions type: help nnplot
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression','plotfit'};

% Train the Network
[net,tr] = train(net,inputs,targets);

% Test the Network
outputs = net(inputs);
errors = gsubtract(targets,outputs);
performance = perform(net,targets,outputs)

% Recalculate Training, Validation and Test Performance
trainTargets = targets .* tr.trainMask{1};
valTargets = targets .* tr.valMask{1};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

testTargets = targets .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net,trainTargets,outputs)
valPerformance = perform(net,valTargets,outputs)
testPerformance = perform(net,testTargets,outputs)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotfit(net,inputs,targets)
%figure, plotregression(targets,outputs)
%figure, ploterrhist(errors)

```

2.Data weight and bias

Weight layer 1

```

[0.18402201040462512;2.4586504318164231]
[1.977779333943225;-11.372388562765916]
[-0.79349228056191234;2.033884962923207]
[2.6887768577019036;2.7869566446787908]
[9.7161804291866165;9.4507195610004402]
[-4.0990356667390211;0.90480597529555185]
[-14.436242786275852;4.2853894195620716]
[-0.39536102230170622;1.6239185668702076]
[-2.0543241794027733;1.4397117365019758]
[3.3216719969295037;-2.9639938220772395]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bias layer 1

[2.6857427354327856;-11.235919063373691;0.90644856198010848;6.0645818168810415;
20.094263541811877;-3.7876360053173337;-10.899770466712368;-2.3919824238654872;
-1.5696615853943596;4.4018497079193244]

Weight layer 2

[0.44643816787672586;2.7444133453349129;0.40849906122806101;5.5196858115659113
;15.330719578927091;5.2274804491131208;9.7259782802378556;3.5155063536246094;
2.9699861951208137;-1.3410178892628324]

Bias layer 2

-1.4243214082568461



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Data input

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสำหรับฝึกสอน

	มมโรเตอร์									
	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51
1	0.000134	0.000157	7.74618E-05	0.000141	0.000139	0.000136	0.000128	0.000126	0.000149	0.00011
2	0.000438	0.000436	0.00032211	0.000376	0.000357	0.000342	0.000323	0.000315	0.000345	0.000283
3	0.000891	0.000846	0.000721534	0.000728	0.000678	0.000643	0.00061	0.000592	0.000611	0.000538
4	0.001437	0.00135	0.001220769	0.001172	0.001088	0.001029	0.000978	0.000946	0.000944	0.000865
5	0.002037	0.001915	0.001781895	0.001683	0.001564	0.001478	0.001407	0.001358	0.00133	0.001244
6	0.00267	0.002521	0.002381967	0.002239	0.002086	0.001973	0.001882	0.001813	0.001756	0.00166
7	0.003324	0.003152	0.003006767	0.002826	0.002641	0.002501	0.00239	0.002299	0.002212	0.002103
8	0.003991	0.0038	0.003647063	0.003434	0.00322	0.003052	0.00292	0.002806	0.002689	0.002565
9	0.004664	0.004458	0.004296583	0.004056	0.003814	0.003619	0.003467	0.003329	0.003182	0.00304
10	0.005339	0.005121	0.004950893	0.004686	0.004419	0.004197	0.004024	0.003863	0.003685	0.003523
11	0.006014	0.005786	0.005606754	0.005322	0.00503	0.004783	0.004589	0.004403	0.004196	0.004013
12	0.006686	0.006451	0.006261734	0.005959	0.005645	0.005372	0.005158	0.004948	0.004711	0.004505
13	0.007354	0.007113	0.006913961	0.006597	0.006261	0.005962	0.005729	0.005494	0.005229	0.004999
14	0.008016	0.007771	0.007561963	0.007232	0.006875	0.006553	0.0063	0.00604	0.005747	0.005493
15	0.008671	0.008423	0.008204569	0.007863	0.007487	0.007141	0.006869	0.006585	0.006265	0.005986
16	0.009319	0.009069	0.008840824	0.008489	0.008095	0.007726	0.007435	0.007127	0.006781	0.006476
17	0.009959	0.009708	0.009469946	0.00911	0.008699	0.008307	0.007998	0.007665	0.007293	0.006963
18	0.01059	0.010338	0.010091283	0.009724	0.009296	0.008883	0.008556	0.0082	0.007802	0.007446
19	0.011212	0.01096	0.010704288	0.010331	0.009887	0.009453	0.009108	0.008729	0.008307	0.007924
20	0.011824	0.011573	0.011308496	0.010929	0.010471	0.010017	0.009654	0.009252	0.008807	0.008398
21	0.012426	0.012176	0.011903511	0.01152	0.011047	0.010574	0.010194	0.00977	0.009301	0.008866

กระแส	22	0.013018	0.012769	0.012488988	0.012101	0.011615	0.011123	0.010727	0.01028	0.009789	0.009328
	23	0.013599	0.013352	0.013064631	0.012673	0.012174	0.011664	0.011252	0.010784	0.01027	0.009784
	24	0.014169	0.013924	0.013630179	0.013235	0.012725	0.012197	0.011769	0.011281	0.010745	0.010234
	25	0.014729	0.014485	0.014185404	0.013788	0.013266	0.012721	0.012278	0.011769	0.011213	0.010678
	26	0.015277	0.015036	0.014730105	0.01433	0.013797	0.013237	0.012779	0.01225	0.011674	0.011114
	27	0.015813	0.015575	0.015264102	0.014862	0.014319	0.013743	0.013271	0.012723	0.012127	0.011543
	28	0.016339	0.016102	0.015787236	0.015384	0.014831	0.01424	0.013754	0.013188	0.012573	0.011965
	29	0.016852	0.016619	0.016299363	0.015894	0.015333	0.014728	0.014228	0.013644	0.013011	0.01238
	30	0.017354	0.017123	0.016800354	0.016394	0.015824	0.015206	0.014693	0.014091	0.01344	0.012787
	31	0.017844	0.017616	0.017290095	0.016882	0.016305	0.015674	0.015148	0.014529	0.013862	0.013187
	32	0.018321	0.018096	0.01776848	0.017359	0.016774	0.016132	0.015594	0.014959	0.014275	0.013579
	33	0.018787	0.018565	0.018235413	0.017825	0.017234	0.01658	0.01603	0.01538	0.014679	0.013963
	34	0.019241	0.019021	0.018690808	0.01828	0.017682	0.017018	0.016457	0.015791	0.015076	0.014339
	35	0.019683	0.019465	0.019134585	0.018722	0.018119	0.017445	0.016873	0.016193	0.015463	0.014707
	36	0.020112	0.019897	0.019566672	0.019153	0.018545	0.017862	0.017279	0.016585	0.015842	0.015067
	37	0.020529	0.020316	0.019987001	0.019573	0.018959	0.018268	0.017676	0.016969	0.016211	0.015418
	38	0.020933	0.020723	0.020395512	0.01998	0.019363	0.018663	0.018062	0.017342	0.016572	0.015762
	39	0.021325	0.021118	0.020792148	0.020376	0.019755	0.019048	0.018438	0.017706	0.016924	0.016097
	40	0.021705	0.0215	0.021176856	0.020759	0.020135	0.019422	0.018803	0.01806	0.017266	0.016424
	41	0.022072	0.021869	0.021549588	0.021131	0.020504	0.019785	0.019158	0.018405	0.0176	0.016742
42	0.022427	0.022225	0.021910299	0.02149	0.020861	0.020138	0.019503	0.01874	0.017924	0.017052	
43	0.022769	0.022569	0.022258947	0.021838	0.021206	0.020479	0.019837	0.019064	0.018239	0.017353	
44	0.023098	0.0229	0.022595494	0.022173	0.02154	0.020809	0.02016	0.019379	0.018545	0.017646	
45	0.023415	0.023218	0.022919902	0.022495	0.021862	0.021128	0.020473	0.019684	0.018841	0.01793	
46	0.023719	0.023524	0.023232138	0.022806	0.022172	0.021436	0.020775	0.019979	0.019128	0.018205	
47	0.024011	0.023816	0.02353217	0.023104	0.02247	0.021733	0.021066	0.020264	0.019406	0.018472	
48	0.024289	0.024096	0.023819969	0.02339	0.022756	0.022018	0.021347	0.020538	0.019674	0.01873	
49	0.024555	0.024362	0.024095506	0.023663	0.023031	0.022293	0.021616	0.020803	0.019932	0.018979	

กระแสน์	50	0.024808	0.024616	0.024358755	0.023924	0.023293	0.022555	0.021875	0.021057	0.020181	0.019219
	51	0.025049	0.024857	0.024609692	0.024172	0.023543	0.022807	0.022123	0.021302	0.02042	0.019451
	52	0.025276	0.025084	0.024848292	0.024408	0.023781	0.023047	0.02236	0.021536	0.020649	0.019674
	53	0.025491	0.025299	0.025074536	0.024631	0.024007	0.023276	0.022586	0.021759	0.020869	0.019888
	54	0.025692	0.0255	0.025288401	0.024842	0.024221	0.023493	0.022802	0.021973	0.02108	0.020093
	55	0.025881	0.025688	0.025489868	0.02504	0.024423	0.023699	0.023006	0.022176	0.02128	0.020289
	56	0.026057	0.025864	0.025678918	0.025226	0.024612	0.023894	0.023199	0.022369	0.021471	0.020476
	57	0.02622	0.026026	0.025855535	0.025398	0.024789	0.024076	0.023381	0.022551	0.021652	0.020654
	58	0.02637	0.026175	0.026019701	0.025559	0.024954	0.024248	0.023552	0.022723	0.021823	0.020823
	59	0.026508	0.02631	0.026171401	0.025706	0.025107	0.024407	0.023712	0.022884	0.021984	0.020984
60	0.026632	0.026433	0.026310619	0.025841	0.025248	0.024556	0.02386	0.023036	0.022136	0.021135	
กระแสน์	มุมโรเตอร์										
		50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
	1	0.000134	0.000157	7.74618E-05	0.000141	0.000139	0.000136	0.000128	0.000126	0.000149	0.00011
	2	0.000438	0.000436	0.00032211	0.000376	0.000357	0.000342	0.000323	0.000315	0.000345	0.000283
	3	0.000891	0.000846	0.000721534	0.000728	0.000678	0.000643	0.00061	0.000592	0.000611	0.000538
	4	0.001437	0.00135	0.001220769	0.001172	0.001088	0.001029	0.000978	0.000946	0.000944	0.000865
	5	0.002037	0.001915	0.001781895	0.001683	0.001564	0.001478	0.001407	0.001358	0.00133	0.001244
	6	0.00267	0.002521	0.002381967	0.002239	0.002086	0.001973	0.001882	0.001813	0.001756	0.00166
	7	0.003324	0.003152	0.003006767	0.002826	0.002641	0.002501	0.00239	0.002299	0.002212	0.002103
	8	0.003991	0.0038	0.003647063	0.003434	0.00322	0.003052	0.00292	0.002806	0.002689	0.002565
	9	0.004664	0.004458	0.004296583	0.004056	0.003814	0.003619	0.003467	0.003329	0.003182	0.00304
	10	0.005339	0.005121	0.004950893	0.004686	0.004419	0.004197	0.004024	0.003863	0.003685	0.003523
	11	0.006014	0.005786	0.005606754	0.005322	0.00503	0.004783	0.004589	0.004403	0.004196	0.004013
	12	0.006686	0.006451	0.006261734	0.005959	0.005645	0.005372	0.005158	0.004948	0.004711	0.004505
	13	0.007354	0.007113	0.006913961	0.006597	0.006261	0.005962	0.005729	0.005494	0.005229	0.004999
14	0.008016	0.007771	0.007561963	0.007232	0.006875	0.006553	0.0063	0.00604	0.005747	0.005493	
15	0.008671	0.008423	0.008204569	0.007863	0.007487	0.007141	0.006869	0.006585	0.006265	0.005986	

กระแส	16	0.009319	0.009069	0.008840824	0.008489	0.008095	0.007726	0.007435	0.007127	0.006781	0.006476
	17	0.009959	0.009708	0.009469946	0.00911	0.008699	0.008307	0.007998	0.007665	0.007293	0.006963
	18	0.01059	0.010338	0.010091283	0.009724	0.009296	0.008883	0.008556	0.0082	0.007802	0.007446
	19	0.011212	0.01096	0.010704288	0.010331	0.009887	0.009453	0.009108	0.008729	0.008307	0.007924
	20	0.011824	0.011573	0.011308496	0.010929	0.010471	0.010017	0.009654	0.009252	0.008807	0.008398
	21	0.012426	0.012176	0.011903511	0.01152	0.011047	0.010574	0.010194	0.00977	0.009301	0.008866
	22	0.013018	0.012769	0.012488988	0.012101	0.011615	0.011123	0.010727	0.01028	0.009789	0.009328
	23	0.013599	0.013352	0.013064631	0.012673	0.012174	0.011664	0.011252	0.010784	0.01027	0.009784
	24	0.014169	0.013924	0.013630179	0.013235	0.012725	0.012197	0.011769	0.011281	0.010745	0.010234
	25	0.014729	0.014485	0.014185404	0.013788	0.013266	0.012721	0.012278	0.011769	0.011213	0.010678
	26	0.015277	0.015036	0.014730105	0.01433	0.013797	0.013237	0.012779	0.01225	0.011674	0.011114
	27	0.015813	0.015575	0.015264102	0.014862	0.014319	0.013743	0.013271	0.012723	0.012127	0.011543
	28	0.016339	0.016102	0.015787236	0.015384	0.014831	0.01424	0.013754	0.013188	0.012573	0.011965
	29	0.016852	0.016619	0.016299363	0.015894	0.015333	0.014728	0.014228	0.013644	0.013011	0.01238
	30	0.017354	0.017123	0.016800354	0.016394	0.015824	0.015206	0.014693	0.014091	0.01344	0.012787
	31	0.017844	0.017616	0.017290095	0.016882	0.016305	0.015674	0.015148	0.014529	0.013862	0.013187
	32	0.018321	0.018096	0.01776848	0.017359	0.016774	0.016132	0.015594	0.014959	0.014275	0.013579
	33	0.018787	0.018565	0.018235413	0.017825	0.017234	0.01658	0.01603	0.01538	0.014679	0.013963
	34	0.019241	0.019021	0.018690808	0.01828	0.017682	0.017018	0.016457	0.015791	0.015076	0.014339
	35	0.019683	0.019465	0.019134585	0.018722	0.018119	0.017445	0.016873	0.016193	0.015463	0.014707
	36	0.020112	0.019897	0.019566672	0.019153	0.018545	0.017862	0.017279	0.016585	0.015842	0.015067
	37	0.020529	0.020316	0.019987001	0.019573	0.018959	0.018268	0.017676	0.016969	0.016211	0.015418
	38	0.020933	0.020723	0.020395512	0.01998	0.019363	0.018663	0.018062	0.017342	0.016572	0.015762
	39	0.021325	0.021118	0.020792148	0.020376	0.019755	0.019048	0.018438	0.017706	0.016924	0.016097
	40	0.021705	0.0215	0.021176856	0.020759	0.020135	0.019422	0.018803	0.01806	0.017266	0.016424
	41	0.022072	0.021869	0.021549588	0.021131	0.020504	0.019785	0.019158	0.018405	0.0176	0.016742
	42	0.022427	0.022225	0.021910299	0.02149	0.020861	0.020138	0.019503	0.01874	0.017924	0.017052
	43	0.022769	0.022569	0.022258947	0.021838	0.021206	0.020479	0.019837	0.019064	0.018239	0.017353

กระแสน้ำ	44	0.023098	0.0229	0.022595494	0.022173	0.02154	0.020809	0.02016	0.019379	0.018545	0.017646	
	45	0.023415	0.023218	0.022919902	0.022495	0.021862	0.021128	0.020473	0.019684	0.018841	0.01793	
	46	0.023719	0.023524	0.023232138	0.022806	0.022172	0.021436	0.020775	0.019979	0.019128	0.018205	
	47	0.024011	0.023816	0.02353217	0.023104	0.02247	0.021733	0.021066	0.020264	0.019406	0.018472	
	48	0.024289	0.024096	0.023819969	0.02339	0.022756	0.022018	0.021347	0.020538	0.019674	0.01873	
	49	0.024555	0.024362	0.024095506	0.023663	0.023031	0.022293	0.021616	0.020803	0.019932	0.018979	
	50	0.024808	0.024616	0.024358755	0.023924	0.023293	0.022555	0.021875	0.021057	0.020181	0.019219	
	51	0.025049	0.024857	0.024609692	0.024172	0.023543	0.022807	0.022123	0.021302	0.02042	0.019451	
	52	0.025276	0.025084	0.024848292	0.024408	0.023781	0.023047	0.02236	0.021536	0.020649	0.019674	
	53	0.025491	0.025299	0.025074536	0.024631	0.024007	0.023276	0.022586	0.021759	0.020869	0.019888	
	54	0.025692	0.0255	0.025288401	0.024842	0.024221	0.023493	0.022802	0.021973	0.02108	0.020093	
	55	0.025881	0.025688	0.025489868	0.02504	0.024423	0.023699	0.023006	0.022176	0.02128	0.020289	
	56	0.026057	0.025864	0.025678918	0.025226	0.024612	0.023894	0.023199	0.022369	0.021471	0.020476	
	57	0.02622	0.026026	0.025855535	0.025398	0.024789	0.024076	0.023381	0.022551	0.021652	0.020654	
	58	0.02637	0.026175	0.026019701	0.025559	0.024954	0.024248	0.023552	0.022723	0.021823	0.020823	
	59	0.026508	0.02631	0.026171401	0.025706	0.025107	0.024407	0.023712	0.022884	0.021984	0.020984	
	60	0.026632	0.026433	0.026310619	0.025841	0.025248	0.024556	0.02386	0.023036	0.022136	0.021135	
	มุมโรเตอร์											
		40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	
	1	4.99E-05	4.17E-05	0.00012	0.000103	8.89E-05	0.000103	5.24E-05	5.51E-05	3.40E-05	8.34E-05	
2	0.000139	0.000131	0.00024	0.000205	0.000174	0.000193	0.000105	0.000111	7.12E-05	0.000167		
3	0.000263	0.000249	0.000361	0.000308	0.000257	0.000276	0.000159	0.000167	0.000113	0.000252		
4	0.000408	0.000382	0.000484	0.00041	0.000339	0.000354	0.000214	0.000224	0.000159	0.000336		
5	0.000566	0.000522	0.000608	0.000513	0.000421	0.000429	0.00027	0.000282	0.00021	0.000421		
6	0.000733	0.000668	0.000733	0.000616	0.000502	0.000504	0.000328	0.000341	0.000264	0.000505		
7	0.000905	0.000817	0.000858	0.000719	0.000583	0.000577	0.000387	0.000401	0.000321	0.000588		
8	0.00108	0.000969	0.000984	0.000821	0.000663	0.00065	0.000448	0.000462	0.00038	0.000672		
9	0.001259	0.001122	0.001111	0.000924	0.000745	0.000723	0.00051	0.000524	0.000441	0.000754		

กระแส	10	0.001438	0.001275	0.001237	0.001027	0.000826	0.000796	0.000573	0.000586	0.000504	0.000836
	11	0.001619	0.001429	0.001363	0.001129	0.000907	0.000868	0.000637	0.00065	0.000567	0.000917
	12	0.001801	0.001584	0.00149	0.001232	0.000989	0.000941	0.000703	0.000714	0.000632	0.000997
	13	0.001982	0.001738	0.001616	0.001335	0.00107	0.001013	0.000769	0.000779	0.000698	0.001077
	14	0.002164	0.001893	0.001742	0.001437	0.001152	0.001086	0.000836	0.000844	0.000765	0.001155
	15	0.002345	0.002047	0.001868	0.00154	0.001234	0.001159	0.000905	0.00091	0.000832	0.001232
	16	0.002525	0.002201	0.001994	0.001642	0.001317	0.001232	0.000974	0.000977	0.0009	0.001309
	17	0.002705	0.002354	0.002119	0.001745	0.0014	0.001305	0.001043	0.001044	0.000968	0.001384
	18	0.002884	0.002507	0.002244	0.001847	0.001483	0.001379	0.001114	0.001111	0.001037	0.001459
	19	0.003062	0.00266	0.002369	0.00195	0.001566	0.001453	0.001185	0.001179	0.001107	0.001532
	20	0.003239	0.002811	0.002493	0.002052	0.001649	0.001527	0.001256	0.001248	0.001176	0.001605
	21	0.003415	0.002962	0.002617	0.002154	0.001733	0.001601	0.001328	0.001316	0.001246	0.001677
	22	0.00359	0.003113	0.002741	0.002256	0.001817	0.001676	0.001401	0.001386	0.001317	0.001748
	23	0.003764	0.003262	0.002864	0.002359	0.001902	0.001751	0.001474	0.001455	0.001387	0.001818
	24	0.003936	0.003411	0.002987	0.002461	0.001987	0.001827	0.001548	0.001525	0.001458	0.001888
	25	0.004107	0.00356	0.003109	0.002563	0.002072	0.001902	0.001622	0.001595	0.001529	0.001957
	26	0.004277	0.003707	0.003231	0.002665	0.002157	0.001978	0.001696	0.001666	0.001601	0.002025
	27	0.004445	0.003854	0.003353	0.002767	0.002242	0.002055	0.001771	0.001737	0.001672	0.002093
	28	0.004612	0.003999	0.003474	0.002869	0.002328	0.002132	0.001846	0.001808	0.001744	0.00216
	29	0.004778	0.004144	0.003594	0.002971	0.002415	0.002209	0.001921	0.001879	0.001816	0.002227
	30	0.004942	0.004288	0.003714	0.003073	0.002501	0.002286	0.001997	0.001951	0.001888	0.002293
	31	0.005104	0.004431	0.003834	0.003174	0.002588	0.002364	0.002073	0.002023	0.00196	0.002359
	32	0.005266	0.004574	0.003953	0.003276	0.002675	0.002442	0.00215	0.002095	0.002032	0.002424
	33	0.005425	0.004715	0.004072	0.003378	0.002763	0.002521	0.002226	0.002167	0.002104	0.002489
	34	0.005583	0.004855	0.00419	0.00348	0.00285	0.0026	0.002303	0.00224	0.002177	0.002554
	35	0.00574	0.004995	0.004308	0.003581	0.002938	0.002679	0.002381	0.002313	0.002249	0.002619
	36	0.005894	0.005134	0.004425	0.003683	0.003027	0.002759	0.002458	0.002386	0.002322	0.002683
	37	0.020529	0.020316	0.019987001	0.019573	0.018959	0.018268	0.017676	0.016969	0.016211	0.015418

กระแส	38	0.020933	0.020723	0.020395512	0.01998	0.019363	0.018663	0.018062	0.017342	0.016572	0.015762
	39	0.021325	0.021118	0.020792148	0.020376	0.019755	0.019048	0.018438	0.017706	0.016924	0.016097
	40	0.021705	0.0215	0.021176856	0.020759	0.020135	0.019422	0.018803	0.01806	0.017266	0.016424
	41	0.022072	0.021869	0.021549588	0.021131	0.020504	0.019785	0.019158	0.018405	0.0176	0.016742
	42	0.022427	0.022225	0.021910299	0.02149	0.020861	0.020138	0.019503	0.01874	0.017924	0.017052
	43	0.022769	0.022569	0.022258947	0.021838	0.021206	0.020479	0.019837	0.019064	0.018239	0.017353
	44	0.023098	0.0229	0.022595494	0.022173	0.02154	0.020809	0.02016	0.019379	0.018545	0.017646
	45	0.023415	0.023218	0.022919902	0.022495	0.021862	0.021128	0.020473	0.019684	0.018841	0.01793
	46	0.023719	0.023524	0.023232138	0.022806	0.022172	0.021436	0.020775	0.019979	0.019128	0.018205
	47	0.024011	0.023816	0.02353217	0.023104	0.02247	0.021733	0.021066	0.020264	0.019406	0.018472
	48	0.024289	0.024096	0.023819969	0.02339	0.022756	0.022018	0.021347	0.020538	0.019674	0.01873
	49	0.024555	0.024362	0.024095506	0.023663	0.023031	0.022293	0.021616	0.020803	0.019932	0.018979
	50	0.024808	0.024616	0.024358755	0.023924	0.023293	0.022555	0.021875	0.021057	0.020181	0.019219
	51	0.025049	0.024857	0.024609692	0.024172	0.023543	0.022807	0.022123	0.021302	0.02042	0.019451
	52	0.025276	0.025084	0.024848292	0.024408	0.023781	0.023047	0.02236	0.021536	0.020649	0.019674
	53	0.025491	0.025299	0.025074536	0.024631	0.024007	0.023276	0.022586	0.021759	0.020869	0.019888
	54	0.025692	0.0255	0.025288401	0.024842	0.024221	0.023493	0.022802	0.021973	0.02108	0.020093
	55	0.025881	0.025688	0.025489868	0.02504	0.024423	0.023699	0.023006	0.022176	0.02128	0.020289
	56	0.026057	0.025864	0.025678918	0.025226	0.024612	0.023894	0.023199	0.022369	0.021471	0.020476
	57	0.02622	0.026026	0.025855535	0.025398	0.024789	0.024076	0.023381	0.022551	0.021652	0.020654
58	0.02637	0.026175	0.026019701	0.025559	0.024954	0.024248	0.023552	0.022723	0.021823	0.020823	
59	0.026508	0.02631	0.026171401	0.025706	0.025107	0.024407	0.023712	0.022884	0.021984	0.020984	
60	0.026632	0.026433	0.026310619	0.025841	0.025248	0.024556	0.02386	0.023036	0.022136	0.021135	

4. Data Output

ตารางที่ ข.2 ผลจากการสอนข้อมูลให้โครงข่ายประสาทเทียม

	มมโรเตอร์									
	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51
1	48.65575	51.38842	41.87508	49.5104	49.35814	48.9273	48.03483	47.77829	50.44747	45.82063
2	56.6649	56.51495	49.18797	52.71715	51.47632	50.47593	49.24722	48.74557	50.66812	46.53131
3	60.6152	59.11428	54.89874	55.11282	53.38783	52.15498	50.94824	50.31053	50.99624	48.33276
4	61.25483	59.53378	56.93413	55.94758	54.20379	52.96454	51.87218	51.18695	51.14864	49.41805
5	61.14726	59.49124	57.66396	56.29929	54.6374	53.43318	52.42769	51.71754	51.31203	50.04815
6	61.0031	59.47433	58.05881	56.59312	55.01853	53.8459	52.89518	52.16272	51.55667	50.52285
7	60.86566	59.47022	58.29955	56.83814	55.34443	54.19917	53.28585	52.53384	51.80909	50.89381
8	60.70653	59.43083	58.41526	56.99757	55.57479	54.45306	53.56722	52.79889	52.00051	51.14821
9	60.52593	59.35081	58.43652	57.07303	55.70879	54.60539	53.73945	52.95661	52.11031	51.29058
10	60.34044	59.24769	58.40043	57.08965	55.77138	54.68029	53.82761	53.03053	52.15074	51.34534
11	60.16707	59.14178	58.33914	57.07566	55.79235	54.70783	53.86272	53.05076	52.14544	51.34269
12	60.01716	59.04791	58.27495	57.05295	55.79579	54.71306	53.871	53.0433	52.1169	51.30909
13	59.89583	58.97407	58.22072	57.03513	55.79752	54.71301	53.87061	53.0265	52.08174	51.26378
14	59.8035	58.9228	58.1822	57.02893	55.80605	54.71734	53.87228	53.01148	52.05025	51.21892
15	59.73759	58.89302	58.16042	57.0362	55.82465	54.73025	53.88102	53.00371	52.02763	51.18106
16	59.69399	58.88164	58.15371	57.05585	55.8532	54.75234	53.89812	53.00484	52.0155	51.15284
17	59.66803	58.88469	58.15903	57.08527	55.88976	54.78214	53.92256	53.01419	52.01321	51.13441
18	59.6551	58.89807	58.17293	57.12125	55.93153	54.81719	53.95223	53.02986	52.01892	51.1245
19	59.65103	58.91795	58.19205	57.1606	55.97561	54.85475	53.98459	53.04946	52.03026	51.12119
20	59.65222	58.94105	58.21342	57.20048	56.0193	54.89222	54.01715	53.07057	52.04481	51.12236
21	59.65573	58.96465	58.23459	57.23854	56.06038	54.92738	54.04776	53.09103	52.06037	51.12601

กระแส	22	59.65927	58.98667	58.25367	57.27298	56.0971	54.95849	54.07467	53.10908	52.07508	51.13038
	23	59.66115	59.00559	58.26932	57.30254	56.12827	54.98431	54.09663	53.12336	52.08749	51.13409
	24	59.66018	59.02039	58.28068	57.32645	56.15316	55.00409	54.11283	53.133	52.09656	51.13607
	25	59.65567	59.03051	58.2873	57.34436	56.17148	55.01748	54.12288	53.13748	52.10165	51.13561
	26	59.64732	59.03575	58.28914	57.35628	56.18327	55.02449	54.12675	53.13665	52.10244	51.1323
	27	59.63514	59.03624	58.2864	57.36251	56.18888	55.02544	54.12468	53.13063	52.09889	51.12597
	28	59.61942	59.03235	58.27957	57.36357	56.18889	55.02086	54.11716	53.1198	52.0912	51.11669
	29	59.60064	59.02463	58.2693	57.36018	56.18404	55.01146	54.10484	53.10467	52.07975	51.10466
	30	59.57945	59.01379	58.25636	57.35316	56.17519	54.99809	54.0885	53.08591	52.06502	51.09023
	31	59.55661	59.00063	58.24163	57.34343	56.16328	54.98163	54.06898	53.06426	52.04762	51.07382
	32	59.53291	58.98599	58.22603	57.33192	56.14928	54.96305	54.04719	53.04049	52.02819	51.05591
	33	59.50919	58.97074	58.21047	57.3196	56.13417	54.94329	54.02401	53.01541	52.00738	51.037
	34	59.48627	58.9557	58.19587	57.30738	56.11889	54.92325	54.00032	52.98978	51.98585	51.01758
	35	59.46488	58.94166	58.18306	57.29612	56.10432	54.90383	53.97694	52.96434	51.96422	50.99815
	36	59.44573	58.92933	58.1728	57.2866	56.09126	54.88579	53.95462	52.93977	51.94308	50.97914
	37	59.42939	58.91929	58.16575	57.27951	56.08043	54.86986	53.93405	52.91668	51.92295	50.96097
	38	59.4163	58.91202	58.16246	57.27538	56.07241	54.85663	53.91579	52.89559	51.90428	50.94399
	39	59.40677	58.90782	58.1633	57.27463	56.06767	54.84658	53.90032	52.87693	51.88744	50.92847
	40	59.40097	58.90688	58.16852	57.27754	56.06652	54.84006	53.888	52.86103	51.87274	50.91465
	41	59.39887	58.9092	58.17819	57.28422	56.06914	54.8373	53.87905	52.84813	51.86037	50.90268
	42	59.40029	58.91461	58.19224	57.2946	56.07555	54.83839	53.87359	52.83833	51.85046	50.89264
	43	59.40488	58.92276	58.2104	57.30848	56.08564	54.84328	53.87163	52.83168	51.84305	50.88456
	44	59.41211	58.93317	58.23226	57.32548	56.09912	54.8518	53.87302	52.82808	51.83808	50.87838
	45	59.42131	58.94515	58.25722	57.34507	56.11557	54.86363	53.87755	52.82736	51.83542	50.874
	46	59.43164	58.9579	58.28455	57.36657	56.13444	54.87834	53.88485	52.82925	51.83487	50.87125
	47	59.44211	58.97045	58.31337	57.38918	56.15503	54.89539	53.89447	52.8334	51.83614	50.8699
	48	59.45163	58.98173	58.34268	57.41195	56.17655	54.91412	53.90588	52.83937	51.8389	50.86968
	49	59.45899	58.99057	58.37136	57.43384	56.19809	54.93379	53.91844	52.84666	51.84275	50.87028

กระแส	50	59.4629	58.99568	58.39819	57.45372	56.21867	54.95358	53.93146	52.85471	51.84724	50.87133
	51	59.46201	58.99574	58.42189	57.4704	56.23722	54.97258	53.94418	52.86289	51.85186	50.87244
	52	59.45493	58.9894	58.44112	57.48262	56.25264	54.98986	53.95579	52.87055	51.85611	50.8732
	53	59.44023	58.97525	58.45452	57.4891	56.26378	55.00444	53.96547	52.87701	51.85941	50.87318
	54	59.41651	58.95193	58.4607	57.48858	56.26949	55.01533	53.97235	52.88156	51.8612	50.87192
	55	59.3824	58.9181	58.4583	57.47977	56.26863	55.02151	53.97557	52.88349	51.8609	50.86896
	56	59.33657	58.87247	58.44599	57.46145	56.26005	55.02199	53.97428	52.88208	51.85793	50.86383
	57	59.27778	58.81383	58.42249	57.43245	56.24269	55.01582	53.96763	52.87663	51.8517	50.85607
	58	59.20488	58.74106	58.38662	57.39167	56.21552	55.00207	53.95483	52.86646	51.84164	50.84522
	59	59.11684	58.65319	58.33725	57.3381	56.17759	54.97986	53.93509	52.8509	51.82722	50.83084
60	59.01275	58.54934	58.27341	57.27085	56.12804	54.9484	53.90772	52.82935	51.8079	50.81249	
กระแส	มมโรเตอร์										
		50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
	1	47.82021	50.48695	55.57193	49.53973	51.52559	46.0963	43.01588	44.43875	40.80397	52.76227
	2	47.6561	49.46728	53.97403	48.04949	49.52531	44.14495	40.83714	41.75469	38.50941	52.64972
	3	48.32899	48.78552	51.38119	47.18468	47.64615	43.79543	41.1539	41.23248	39.15218	50.38991
	4	48.81995	48.48067	49.67703	46.83453	46.60457	43.95089	41.89542	41.44345	40.10209	48.37706
	5	49.17457	48.43729	48.79958	46.76688	46.13768	44.18809	42.49272	41.75362	40.76958	47.02055
	6	49.50836	48.56135	48.41991	46.85813	45.98952	44.43791	42.94982	42.04463	41.21654	46.13337
	7	49.80168	48.73848	48.27749	47.0021	45.98412	44.66769	43.3073	42.30029	41.53335	45.50709
	8	50.01349	48.88695	48.21801	47.12546	46.01609	44.84759	43.57632	42.50968	41.76127	45.01542
	9	50.13311	48.97417	48.16901	47.19664	46.0349	44.96422	43.7621	42.66596	41.91817	44.59675
	10	50.17557	49.0016	48.1068	47.21413	46.02529	45.02117	43.87563	42.77056	42.01684	44.22503
	11	50.16553	48.98554	48.03109	47.19075	45.99006	45.03154	43.93283	42.8315	42.07006	43.89066
	12	50.12646	48.94468	47.94976	47.14272	45.93861	45.01089	43.95057	42.85971	42.09035	43.59032
	13	50.07628	48.89441	47.87132	47.08415	45.88083	44.97309	43.94372	42.86601	42.08881	43.32244
14	50.02671	48.8453	47.80211	47.02525	45.82452	44.92877	43.92385	42.85952	42.07439	43.08552	
15	49.98435	48.80353	47.74576	46.97242	45.77483	44.88513	43.89915	42.84712	42.05375	42.87756	

กระแสด	16	49.95207	48.77196	47.70357	46.929	45.73455	44.84654	43.87496	42.83357	42.03153	42.69619
	17	49.93033	48.7512	47.67527	46.89619	45.70471	44.81524	43.85438	42.82187	42.01071	42.53878
	18	49.91815	48.74048	47.65953	46.87381	45.68517	44.79204	43.83896	42.81369	41.993	42.40262
	19	49.91386	48.73834	47.65457	46.86092	45.67509	44.77681	43.82923	42.80974	41.97925	42.28512
	20	49.9155	48.74302	47.6584	46.8562	45.67327	44.76891	43.82505	42.81015	41.96969	42.1838
	21	49.92119	48.75273	47.66909	46.85819	45.6784	44.76746	43.82595	42.81464	41.96418	42.09642
	22	49.92922	48.76585	47.6849	46.86554	45.68919	44.77149	43.83126	42.82275	41.96235	42.02097
	23	49.93816	48.78099	47.70428	46.87697	45.70446	44.78004	43.84028	42.83392	41.96373	41.95567
	24	49.9469	48.797	47.72598	46.89143	45.72317	44.79225	43.85231	42.84756	41.96777	41.89895
	25	49.9546	48.81299	47.74897	46.90802	45.74444	44.80735	43.8667	42.86311	41.97396	41.84943
	26	49.96071	48.82832	47.77245	46.926	45.76753	44.82467	43.88289	42.88006	41.9818	41.80595
	27	49.96491	48.84253	47.79582	46.94483	45.79183	44.84366	43.90038	42.89794	41.99081	41.76745
	28	49.96707	48.85537	47.81864	46.96406	45.81687	44.86383	43.91873	42.91634	42.00058	41.73306
	29	49.96721	48.86671	47.84064	46.98336	45.84224	44.8848	43.93758	42.9349	42.01074	41.70201
	30	49.96549	48.87654	47.86162	47.00251	45.86764	44.90623	43.95659	42.95331	42.02097	41.67361
	31	49.96214	48.88493	47.8815	47.02132	45.89282	44.92785	43.97551	42.9713	42.03096	41.64729
	32	49.95746	48.89201	47.90024	47.03969	45.91757	44.9494	43.99408	42.98863	42.04046	41.62254
	33	49.95176	48.89796	47.91787	47.05754	45.94173	44.97069	44.01208	43.00507	42.04925	41.59891
	34	49.94539	48.90297	47.93442	47.07482	45.96516	44.99152	44.02932	43.02043	42.05712	41.57602
	35	49.93869	48.90724	47.94997	47.09147	45.98774	45.01172	44.04562	43.03455	42.06388	41.55353
	36	49.93196	48.91095	47.96459	47.10748	46.00935	45.03113	44.06081	43.04724	42.06938	41.53113
	37	49.9255	48.91428	47.97832	47.12281	46.02989	45.04961	44.07472	43.05836	42.07346	41.50857
	38	49.91956	48.91738	47.99124	47.13742	46.04925	45.06699	44.08719	43.06776	42.07599	41.4856
	39	49.91434	48.92037	48.00338	47.15127	46.06732	45.08314	44.09807	43.0753	42.07685	41.46202
	40	49.91	48.92335	48.01475	47.1643	46.084	45.09791	44.10722	43.08084	42.07591	41.43765
	41	49.90666	48.92635	48.02536	47.17644	46.09917	45.11115	44.11448	43.08426	42.07307	41.41234
	42	49.90437	48.92941	48.03518	47.18761	46.1127	45.12273	44.1197	43.08542	42.06823	41.38592
	43	49.90315	48.9325	48.04416	47.19771	46.12448	45.13249	44.12275	43.08421	42.06129	41.35829

กระแสน้ำ	44	49.90294	48.93556	48.05222	47.20663	46.13435	45.14029	44.12347	43.0805	42.05217	41.32933	
	45	49.90368	48.93852	48.05926	47.21424	46.14218	45.14597	44.12172	43.07417	42.04079	41.29895	
	46	49.90522	48.94124	48.06517	47.22042	46.14783	45.14939	44.11736	43.06512	42.02707	41.26706	
	47	49.9074	48.94358	48.0698	47.22499	46.15112	45.15039	44.11025	43.05323	42.01094	41.2336	
	48	49.91001	48.94536	48.07298	47.22781	46.15191	45.14882	44.10026	43.0384	41.99234	41.1985	
	49	49.9128	48.94638	48.07454	47.22869	46.15001	45.14452	44.08723	43.02053	41.97121	41.16171	
	50	49.9155	48.9464	48.07428	47.22746	46.14527	45.13735	44.07104	42.99951	41.94749	41.1232	
	51	49.91781	48.94518	48.07198	47.22391	46.13749	45.12714	44.05156	42.97525	41.92114	41.08293	
	52	49.91941	48.94246	48.06742	47.21785	46.12649	45.11374	44.02866	42.94767	41.89211	41.04087	
	53	49.91997	48.93797	48.06035	47.20907	46.11209	45.09701	44.0022	42.91667	41.86036	40.99702	
	54	49.91913	48.93141	48.05053	47.19736	46.0941	45.07677	43.97207	42.88219	41.82587	40.95137	
	55	49.91653	48.92249	48.03771	47.18249	46.07231	45.05288	43.93815	42.84414	41.7886	40.90391	
	56	49.91182	48.91092	48.02162	47.16424	46.04654	45.0252	43.90032	42.80246	41.74854	40.85465	
	57	49.90461	48.89638	48.00199	47.14238	46.01659	44.99356	43.85847	42.7571	41.70566	40.8036	
	58	49.89454	48.87856	47.97855	47.11669	45.98225	44.95782	43.81249	42.70798	41.65997	40.75079	
	59	49.88126	48.85717	47.95102	47.08693	45.94333	44.91783	43.76229	42.65507	41.61146	40.69623	
	60	49.86439	48.83188	47.91912	47.05286	45.89961	44.87345	43.70777	42.59833	41.56013	40.63995	
	มุมโรเตอร์											
		40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	
	1	38.45777	37.43753	46.99632	44.93344	43.27296	45.02586	38.76643	39.11115	36.4699	42.60393	
2	36.38277	35.77007	43.59252	41.14779	38.9328	40.31458	33.82166	34.23205	31.21395	38.43264		
3	37.31025	36.69977	41.43435	39.21495	37.05919	37.84771	32.65401	33.01686	30.48903	36.81339		
4	38.32366	37.60257	40.33833	38.38855	36.42573	36.82933	32.76033	33.06253	31.07053	36.33805		
5	38.9481	38.12341	39.72302	37.94667	36.12692	36.30437	32.96021	33.21606	31.60801	36.12612		
6	39.30524	38.38937	39.3097	37.62151	35.87613	35.91003	33.00512	33.22846	31.87198	35.92463		
7	39.52281	38.52811	38.99976	37.35126	35.63585	35.5671	32.9373	33.13632	31.94869	35.71314		
8	39.66634	38.60872	38.75882	37.12927	35.42275	35.27346	32.83054	33.00908	31.94285	35.51541		
9	39.76448	38.66194	38.57086	36.95468	35.24981	35.0338	32.72977	32.88926	31.9167	35.34759		

กระแส	10	39.83061	38.70029	38.42473	36.82283	35.11871	34.8457	32.65225	32.79303	31.89651	35.21312
	11	39.87273	38.72893	38.31135	36.72637	35.02405	34.70128	32.59943	32.72143	31.88848	35.10793
	12	39.89696	38.75045	38.22326	36.6575	34.95799	34.5909	32.56618	32.6692	31.89015	35.02523
	13	39.90843	38.76662	38.1546	36.60931	34.91293	34.50556	32.54593	32.62971	31.8967	34.95821
	14	39.91142	38.77891	38.10096	36.57637	34.88265	34.43792	32.53299	32.59722	31.90364	34.90127
	15	39.90933	38.78866	38.05907	36.55463	34.86256	34.38253	32.52325	32.56757	31.90782	34.85025
	16	39.90476	38.79699	38.02658	36.54124	34.84952	34.33562	32.51412	32.53808	31.90743	34.8023
	17	39.89957	38.8048	38.00176	36.53424	34.84154	34.29472	32.50426	32.50736	31.9018	34.75561
	18	39.89502	38.81278	37.98336	36.53234	34.83742	34.25834	32.49321	32.47487	31.89098	34.7091
	19	39.89187	38.82141	37.97041	36.53467	34.83654	34.22566	32.48108	32.44066	31.87555	34.66222
	20	39.89053	38.83097	37.96213	36.54063	34.8386	34.19629	32.4683	32.40513	31.85631	34.61474
	21	39.89115	38.8416	37.95791	36.5498	34.84349	34.17009	32.45544	32.36884	31.83415	34.56663
	22	39.89367	38.85332	37.95718	36.56186	34.85123	34.14708	32.44312	32.33239	31.80995	34.51793
	23	39.89793	38.86604	37.95946	36.57652	34.86182	34.12734	32.43191	32.29638	31.78451	34.46876
	24	39.90366	38.87963	37.9643	36.59354	34.87531	34.11093	32.42232	32.26132	31.75851	34.41923
	25	39.91058	38.89389	37.97128	36.61266	34.89168	34.09795	32.41475	32.22766	31.73251	34.36943
	26	39.91837	38.90862	37.98002	36.63365	34.91088	34.08843	32.40952	32.19575	31.70697	34.31941
	27	39.92672	38.92359	37.99014	36.65624	34.93284	34.08236	32.40684	32.16585	31.6822	34.26923
	28	39.93534	38.93857	38.00131	36.6802	34.95743	34.07972	32.40684	32.13815	31.65844	34.21889
	29	39.94394	38.95334	38.01321	36.70527	34.98451	34.08044	32.40959	32.11274	31.63583	34.16836
	30	39.95225	38.9677	38.02556	36.73122	35.01391	34.08441	32.41508	32.08969	31.61445	34.11762
	31	39.96005	38.98145	38.03808	36.7578	35.04544	34.09152	32.42327	32.069	31.59432	34.06661
	32	39.96712	38.99442	38.05056	36.78481	35.07889	34.10162	32.43407	32.05063	31.57539	34.01526
	33	39.97329	39.00646	38.06276	36.81202	35.11406	34.11457	32.44736	32.03452	31.55762	33.96351
	34	39.97838	39.01742	38.0745	36.83924	35.15074	34.1302	32.46302	32.02059	31.5409	33.91128
	35	39.98226	39.02719	38.08563	36.8663	35.18872	34.14834	32.48088	32.00874	31.52514	33.8585
	36	39.98482	39.03566	38.09599	36.89303	35.22781	34.16883	32.5008	31.99885	31.51021	33.80509
	37	39.98594	39.04277	38.10547	36.91929	35.2678	34.19151	32.52261	31.99082	31.49599	33.75099

กระแส	38	39.98555	39.04844	38.11397	36.94494	35.30852	34.2162	32.54615	31.98452	31.48236	33.69615
	39	39.98358	39.05263	38.12141	36.96987	35.3498	34.24276	32.57128	31.97985	31.46917	33.64051
	40	39.97997	39.05529	38.12772	36.994	35.39146	34.27104	32.59784	31.97668	31.45632	33.58404
	41	39.97469	39.0564	38.13285	37.01722	35.43335	34.30088	32.62568	31.97492	31.44367	33.5267
	42	39.9677	39.05595	38.13677	37.03948	35.47534	34.33216	32.65467	31.97446	31.43113	33.46848
	43	39.95899	39.05394	38.13945	37.06073	35.51731	34.36475	32.68468	31.97522	31.41858	33.40937
	44	39.94853	39.05037	38.14089	37.08091	35.55912	34.39852	32.71559	31.97709	31.40592	33.34937
	45	39.93632	39.04525	38.14107	37.09999	35.60068	34.43336	32.74729	31.98002	31.39307	33.2885
	46	39.92237	39.0386	38.14002	37.11796	35.64189	34.46917	32.77969	31.98391	31.37993	33.22679
	47	39.90668	39.03045	38.13773	37.1348	35.68267	34.50584	32.81269	31.98871	31.36644	33.16427
	48	39.88926	39.02082	38.13423	37.1505	35.72294	34.54328	32.84619	31.99436	31.35253	33.101
	49	39.87014	39.00976	38.12955	37.16506	35.76262	34.5814	32.88014	32.0008	31.33813	33.03702
	50	39.84934	38.9973	38.12372	37.17849	35.80168	34.62012	32.91446	32.008	31.32318	32.97242
	51	39.82687	38.98347	38.11677	37.19081	35.84004	34.65936	32.94908	32.01591	31.30765	32.90726
	52	39.80277	38.96833	38.10874	37.20203	35.87766	34.69905	32.98394	32.02449	31.29149	32.84165
	53	39.77708	38.95191	38.09967	37.21217	35.91452	34.73912	33.01901	32.03372	31.27465	32.77567
	54	39.74982	38.93426	38.0896	37.22126	35.95056	34.77951	33.05424	32.04357	31.25711	32.70944
	55	39.72103	38.91544	38.07858	37.22932	35.98578	34.82015	33.08958	32.05402	31.23884	32.64306
	56	39.69076	38.89548	38.06665	37.23639	36.02013	34.86099	33.12499	32.06505	31.21982	32.57667
	57	39.65904	38.87444	38.05385	37.2425	36.05361	34.90197	33.16046	32.07665	31.20001	32.51039
58	39.62592	38.85236	38.04024	37.24767	36.0862	34.94304	33.19595	32.0888	31.17942	32.44435	
59	39.59145	38.82929	38.02586	37.25195	36.11788	34.98415	33.23144	32.10149	31.15802	32.3787	
60	39.55566	38.80529	38.01074	37.25538	36.14866	35.02526	33.26691	32.11473	31.1358	32.3136	

5.Data error

ตารางที่ ข.3 ค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่ง

	มุมโรเตอร์									
	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51
1	11.34425	7.611576	16.12492	7.489602	6.641861	6.0727	5.965168	5.22171	1.552525	5.179375
2	3.3351	2.485055	8.812032	4.282846	4.523677	4.524074	4.752784	4.254426	1.331878	4.468693
3	-0.6152	-0.11428	3.101257	1.887183	2.612175	2.845023	3.051762	2.689472	1.003762	2.667239
4	-1.25483	-0.53378	1.065875	1.052423	1.796208	2.035456	2.127821	1.813049	0.851363	1.581955
5	-1.14726	-0.49124	0.336036	0.700714	1.3626	1.566818	1.572312	1.282464	0.687972	0.951853
6	-1.0031	-0.47433	-0.05881	0.406875	0.981472	1.154103	1.104817	0.837275	0.443332	0.477149
7	-0.86566	-0.47022	-0.29955	0.161864	0.655568	0.800834	0.714153	0.466161	0.190912	0.106195
8	-0.70653	-0.43083	-0.41526	0.002426	0.425209	0.546943	0.432775	0.201113	-0.00051	-0.14821
9	-0.52593	-0.35081	-0.43652	-0.07303	0.291213	0.394614	0.26055	0.043389	-0.11031	-0.29058
10	-0.34044	-0.24769	-0.40043	-0.08965	0.228618	0.319708	0.172393	-0.03053	-0.15074	-0.34534
11	-0.16707	-0.14178	-0.33914	-0.07566	0.207646	0.292173	0.137281	-0.05076	-0.14544	-0.34269
12	-0.01716	-0.04791	-0.27495	-0.05295	0.204206	0.286942	0.129004	-0.0433	-0.1169	-0.30909
13	0.104166	0.025931	-0.22072	-0.03513	0.202483	0.286993	0.129386	-0.0265	-0.08174	-0.26378
14	0.196498	0.077203	-0.1822	-0.02893	0.193947	0.282657	0.127725	-0.01148	-0.05025	-0.21892
15	0.262406	0.10698	-0.16042	-0.0362	0.17535	0.269746	0.118977	-0.00371	-0.02763	-0.18106
16	0.306005	0.118359	-0.15371	-0.05585	0.146795	0.247656	0.101885	-0.00484	-0.0155	-0.15284
17	0.331967	0.115307	-0.15903	-0.08527	0.110243	0.217856	0.077437	-0.01419	-0.01321	-0.13441
18	0.344895	0.101932	-0.17293	-0.12125	0.068467	0.182806	0.047766	-0.02986	-0.01892	-0.1245
19	0.348971	0.082048	-0.19205	-0.1606	0.024391	0.145249	0.015409	-0.04946	-0.03026	-0.12119
20	0.347783	0.058953	-0.21342	-0.20048	-0.0193	0.107782	-0.01715	-0.07057	-0.04481	-0.12236
21	0.344269	0.035349	-0.23459	-0.23854	-0.06038	0.072625	-0.04776	-0.09103	-0.06037	-0.12601

กระแส	22	0.340726	0.013328	-0.25367	-0.27298	-0.0971	0.041514	-0.07467	-0.10908	-0.07508	-0.13038
	23	0.338854	-0.00559	-0.26932	-0.30254	-0.12827	0.015688	-0.09663	-0.12336	-0.08749	-0.13409
	24	0.33982	-0.02039	-0.28068	-0.32645	-0.15316	-0.00409	-0.11283	-0.133	-0.09656	-0.13607
	25	0.344325	-0.03051	-0.2873	-0.34436	-0.17148	-0.01748	-0.12288	-0.13748	-0.10165	-0.13561
	26	0.352678	-0.03575	-0.28914	-0.35628	-0.18327	-0.02449	-0.12675	-0.13665	-0.10244	-0.1323
	27	0.364859	-0.03624	-0.2864	-0.36251	-0.18888	-0.02544	-0.12468	-0.13063	-0.09889	-0.12597
	28	0.380584	-0.03235	-0.27957	-0.36357	-0.18889	-0.02086	-0.11716	-0.1198	-0.0912	-0.11669
	29	0.399361	-0.02463	-0.2693	-0.36018	-0.18404	-0.01146	-0.10484	-0.10467	-0.07975	-0.10466
	30	0.420547	-0.01379	-0.25636	-0.35316	-0.17519	0.001914	-0.0885	-0.08591	-0.06502	-0.09023
	31	0.443392	-0.00063	-0.24163	-0.34343	-0.16328	0.018366	-0.06898	-0.06426	-0.04762	-0.07382
	32	0.467087	0.014007	-0.22603	-0.33192	-0.14928	0.036948	-0.04719	-0.04049	-0.02819	-0.05591
	33	0.490805	0.029263	-0.21047	-0.3196	-0.13417	0.056715	-0.02401	-0.01541	-0.00738	-0.037
	34	0.513735	0.0443	-0.19587	-0.30738	-0.11889	0.076746	-0.00032	0.010222	0.014153	-0.01758
	35	0.535116	0.058335	-0.18306	-0.29612	-0.10432	0.096174	0.023064	0.03566	0.03578	0.001855
	36	0.554268	0.070669	-0.1728	-0.2866	-0.09126	0.114205	0.045378	0.060227	0.05692	0.020858
	37	0.570614	0.080708	-0.16575	-0.27951	-0.08043	0.130136	0.06595	0.083316	0.077052	0.039027
	38	0.583703	0.087985	-0.16246	-0.27538	-0.07241	0.143368	0.084206	0.104406	0.095723	0.056013
	39	0.593227	0.092176	-0.1633	-0.27463	-0.06767	0.153422	0.099676	0.123066	0.112557	0.071527
	40	0.599032	0.093115	-0.16852	-0.27754	-0.06652	0.15994	0.112004	0.138966	0.127261	0.085347
	41	0.601133	0.090799	-0.17819	-0.28422	-0.06914	0.1627	0.120953	0.151874	0.139628	0.097319
	42	0.599711	0.085394	-0.19224	-0.2946	-0.07555	0.161611	0.126408	0.161668	0.149536	0.107356
	43	0.595121	0.077238	-0.2104	-0.30848	-0.08564	0.156719	0.128375	0.168324	0.156951	0.115439
	44	0.587885	0.066835	-0.23226	-0.32548	-0.09912	0.148204	0.126976	0.171922	0.161923	0.121615
	45	0.578687	0.054851	-0.25722	-0.34507	-0.11557	0.136373	0.122453	0.17264	0.164582	0.125995
	46	0.568365	0.042105	-0.28455	-0.36657	-0.13444	0.12166	0.115154	0.170747	0.165134	0.128748
	47	0.557893	0.029551	-0.31337	-0.38918	-0.15503	0.104612	0.10553	0.166598	0.163858	0.130097
	48	0.548374	0.018267	-0.34268	-0.41195	-0.17655	0.085879	0.094124	0.160626	0.161095	0.130316
	49	0.541012	0.009435	-0.37136	-0.43384	-0.19809	0.066208	0.081563	0.153337	0.157247	0.129723

กระแส	50	0.537097	0.004322	-0.39819	-0.45372	-0.21867	0.046425	0.068544	0.145294	0.152763	0.128674
	51	0.537986	0.004256	-0.42189	-0.4704	-0.23722	0.02742	0.055825	0.137112	0.148136	0.12756
	52	0.545074	0.010604	-0.44112	-0.48262	-0.25264	0.010138	0.044208	0.129448	0.143894	0.126795
	53	0.559773	0.02475	-0.45452	-0.4891	-0.26378	-0.00444	0.034531	0.122988	0.140591	0.126818
	54	0.58349	0.048067	-0.4607	-0.48858	-0.26949	-0.01533	0.02765	0.118436	0.138798	0.12808
	55	0.617601	0.081899	-0.4583	-0.47977	-0.26863	-0.02151	0.024427	0.116509	0.139098	0.131042
	56	0.663427	0.127531	-0.44599	-0.46145	-0.26005	-0.02199	0.02572	0.117919	0.142073	0.136171
	57	0.722215	0.186173	-0.42249	-0.43245	-0.24269	-0.01582	0.032367	0.12337	0.148304	0.143929
	58	0.795115	0.258935	-0.38662	-0.39167	-0.21552	-0.00207	0.045174	0.133544	0.158357	0.154776
	59	0.883161	0.346811	-0.33725	-0.3381	-0.17759	0.020136	0.064906	0.149097	0.17278	0.169159
60	0.987253	0.450657	-0.27341	-0.27085	-0.12804	0.0516	0.092278	0.170648	0.1921	0.187513	
กระแส	มุมโรเตอร์										
		50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
	1	2.179786	-1.48695	-7.57193	-2.53973	-5.52559	-1.0963	0.984116	-1.43875	1.196027	-11.7623
	2	2.3439	-0.46728	-5.97403	-1.04949	-3.52531	0.855055	3.162855	1.245306	3.490589	-11.6497
	3	1.671008	0.214483	-3.38119	-0.18468	-1.64615	1.204571	2.846103	1.767516	2.847815	-9.38991
	4	1.18005	0.519326	-1.67703	0.165467	-0.60457	1.049107	2.104584	1.556555	1.897912	-7.37706
	5	0.825431	0.562714	-0.79958	0.233117	-0.13768	0.811911	1.507282	1.246379	1.230422	-6.02055
	6	0.49164	0.438649	-0.41991	0.141867	0.010476	0.56209	1.050179	0.955365	0.78346	-5.13337
	7	0.198321	0.261515	-0.27749	-0.0021	0.015881	0.332306	0.692704	0.699713	0.466646	-4.50709
	8	-0.01349	0.113048	-0.21801	-0.12546	-0.01609	0.152413	0.423681	0.490317	0.238731	-4.01542
	9	-0.13311	0.025827	-0.16901	-0.19664	-0.0349	0.03578	0.2379	0.334037	0.081828	-3.59675
	10	-0.17557	-0.0016	-0.1068	-0.21413	-0.02529	-0.02117	0.124374	0.229443	-0.01684	-3.22503
	11	-0.16553	0.014457	-0.03109	-0.19075	0.009944	-0.03154	0.067173	0.168499	-0.07006	-2.89066
	12	-0.12646	0.055315	0.050238	-0.14272	0.061389	-0.01089	0.049426	0.140286	-0.09035	-2.59032
	13	-0.07628	0.105589	0.128678	-0.08415	0.119168	0.026909	0.056276	0.133986	-0.08881	-2.32244
14	-0.02671	0.154702	0.197887	-0.02525	0.175477	0.071234	0.076149	0.14048	-0.07439	-2.08552	
15	0.015648	0.196471	0.254244	0.027585	0.225169	0.114874	0.100846	0.15288	-0.05375	-1.87756	

กระแส	16	0.047927	0.22804	0.296426	0.071004	0.265451	0.153462	0.125043	0.166427	-0.03153	-1.69619
	17	0.06967	0.248803	0.324734	0.103814	0.295289	0.184755	0.145624	0.178126	-0.01071	-1.53878
	18	0.081846	0.259516	0.340466	0.126187	0.314828	0.207958	0.161038	0.186313	0.006999	-1.40262
	19	0.086142	0.261656	0.34543	0.139076	0.32491	0.22319	0.170771	0.190259	0.020752	-1.28512
	20	0.084495	0.256984	0.341601	0.143805	0.32673	0.231086	0.174946	0.189854	0.030311	-1.1838
	21	0.078807	0.247273	0.330907	0.141807	0.321601	0.232537	0.174049	0.18536	0.03582	-1.09642
	22	0.07078	0.234148	0.315104	0.134465	0.310811	0.228512	0.168737	0.177247	0.037645	-1.02097
	23	0.061838	0.21901	0.295717	0.123027	0.29554	0.219958	0.159721	0.166079	0.036272	-0.95567
	24	0.053103	0.203001	0.274016	0.108569	0.276828	0.207747	0.147694	0.152438	0.032226	-0.89895
	25	0.045401	0.187008	0.251027	0.091984	0.25556	0.192649	0.133299	0.136885	0.026036	-0.84943
	26	0.03929	0.171683	0.227549	0.073995	0.232472	0.175327	0.117108	0.119938	0.018205	-0.80595
	27	0.035091	0.157468	0.204181	0.05517	0.208168	0.156342	0.099621	0.102061	0.009194	-0.76745
	28	0.032933	0.144629	0.181355	0.035942	0.183134	0.136168	0.08127	0.083662	-0.00058	-0.73306
	29	0.032787	0.133291	0.159362	0.016638	0.157761	0.115199	0.062425	0.0651	-0.01074	-0.70201
	30	0.034507	0.123464	0.138381	-0.00251	0.132361	0.093767	0.043406	0.046687	-0.02097	-0.67361
	31	0.037856	0.115074	0.118504	-0.02132	0.107184	0.072153	0.02449	0.028698	-0.03096	-0.64729
	32	0.042542	0.107989	0.099761	-0.03969	0.082431	0.050598	0.005922	0.011375	-0.04046	-0.62254
	33	0.048239	0.102038	0.082135	-0.05754	0.058268	0.029311	-0.01208	-0.00507	-0.04925	-0.59891
	34	0.054607	0.097027	0.065577	-0.07482	0.034837	0.008481	-0.02932	-0.02043	-0.05712	-0.57602
	35	0.061313	0.092762	0.050026	-0.09147	0.012259	-0.01172	-0.04562	-0.03455	-0.06388	-0.55353
	36	0.068039	0.08905	0.035414	-0.10748	-0.00935	-0.03113	-0.06081	-0.04724	-0.06938	-0.53113
	37	0.074499	0.085719	0.021676	-0.12281	-0.02989	-0.04961	-0.07472	-0.05836	-0.07346	-0.50857
	38	0.080442	0.082618	0.008758	-0.13742	-0.04925	-0.06699	-0.08719	-0.06776	-0.07599	-0.4856
	39	0.085662	0.079626	-0.00338	-0.15127	-0.06732	-0.08314	-0.09807	-0.0753	-0.07685	-0.46202
	40	0.089998	0.076654	-0.01475	-0.1643	-0.084	-0.09791	-0.10722	-0.08084	-0.07591	-0.43765
	41	0.09334	0.073649	-0.02536	-0.17644	-0.09917	-0.11115	-0.11448	-0.08426	-0.07307	-0.41234
	42	0.095629	0.070592	-0.03518	-0.18761	-0.1127	-0.12273	-0.1197	-0.08542	-0.06823	-0.38592
	43	0.096855	0.067503	-0.04416	-0.19771	-0.12448	-0.13249	-0.12275	-0.08421	-0.06129	-0.35829

กระแส	44	0.097056	0.064437	-0.05222	-0.20663	-0.13435	-0.14029	-0.12347	-0.0805	-0.05217	-0.32933	
	45	0.096319	0.061481	-0.05926	-0.21424	-0.14218	-0.14597	-0.12172	-0.07417	-0.04079	-0.29895	
	46	0.094775	0.058756	-0.06517	-0.22042	-0.14783	-0.14939	-0.11736	-0.06512	-0.02707	-0.26706	
	47	0.092596	0.056415	-0.0698	-0.22499	-0.15112	-0.15039	-0.11025	-0.05323	-0.01094	-0.2336	
	48	0.08999	0.054636	-0.07298	-0.22781	-0.15191	-0.14882	-0.10026	-0.0384	0.007657	-0.1985	
	49	0.087202	0.053623	-0.07454	-0.22869	-0.15001	-0.14452	-0.08723	-0.02053	0.028789	-0.16171	
	50	0.084503	0.053603	-0.07428	-0.22746	-0.14527	-0.13735	-0.07104	0.000495	0.052508	-0.1232	
	51	0.082192	0.054821	-0.07198	-0.22391	-0.13749	-0.12714	-0.05156	0.024752	0.078862	-0.08293	
	52	0.08059	0.057539	-0.06742	-0.21785	-0.12649	-0.11374	-0.02866	0.052335	0.107893	-0.04087	
	53	0.080033	0.062033	-0.06035	-0.20907	-0.11209	-0.09701	-0.0022	0.083329	0.139639	0.002975	
	54	0.080872	0.06859	-0.05053	-0.19736	-0.0941	-0.07677	0.027926	0.117812	0.174133	0.048629	
	55	0.083468	0.077505	-0.03771	-0.18249	-0.07231	-0.05288	0.061848	0.155858	0.211402	0.096089	
	56	0.088185	0.08908	-0.02162	-0.16424	-0.04654	-0.0252	0.099679	0.197535	0.251465	0.145348	
	57	0.095392	0.103621	-0.00199	-0.14238	-0.01659	0.006442	0.14153	0.242904	0.294337	0.196395	
	58	0.105457	0.121435	0.021453	-0.11669	0.01775	0.042183	0.187506	0.292018	0.340029	0.249212	
	59	0.118744	0.142832	0.048984	-0.08693	0.056674	0.082172	0.237707	0.344925	0.388541	0.303773	
	60	0.135611	0.16812	0.080883	-0.05286	0.100386	0.126553	0.292229	0.401665	0.439871	0.36005	
	มุมโรเตอร์											
		40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	
	1	1.542226	1.562465	-8.99632	-7.93344	-7.27296	-10.0259	-4.76643	-6.11115	-4.4699	-11.6039	
2	3.617226	3.229932	-5.59252	-4.14779	-2.9328	-5.31458	0.178336	-1.23205	0.786054	-7.43264		
3	2.68975	2.300232	-3.43435	-2.21495	-1.05919	-2.84771	1.345993	-0.01686	1.510971	-5.81339		
4	1.676337	1.397431	-2.33833	-1.38855	-0.42573	-1.82933	1.239667	-0.06253	0.929472	-5.33805		
5	1.051904	0.876592	-1.72302	-0.94667	-0.12692	-1.30437	1.039788	-0.21606	0.391986	-5.12612		
6	0.694759	0.610633	-1.3097	-0.62151	0.123872	-0.91003	0.994881	-0.22846	0.128017	-4.92463		
7	0.477188	0.471894	-0.99976	-0.35126	0.364149	-0.5671	1.062703	-0.13632	0.051309	-4.71314		
8	0.33366	0.391281	-0.75882	-0.12927	0.577249	-0.27346	1.169464	-0.00908	0.057149	-4.51541		
9	0.235519	0.338059	-0.57086	0.045319	0.750185	-0.0338	1.270235	0.110739	0.083302	-4.34759		

กระแส	10	0.169394	0.299713	-0.42473	0.177166	0.881292	0.154302	1.347753	0.206968	0.103491	-4.21312
	11	0.127275	0.27107	-0.31135	0.273625	0.975952	0.298722	1.400572	0.278567	0.111524	-4.10793
	12	0.103043	0.249549	-0.22326	0.342504	1.042011	0.409099	1.433825	0.330805	0.109846	-4.02523
	13	0.09157	0.233385	-0.1546	0.390686	1.087073	0.494442	1.454072	0.370294	0.103302	-3.95821
	14	0.088582	0.221086	-0.10096	0.423629	1.117354	0.562082	1.467007	0.402777	0.096359	-3.90127
	15	0.090669	0.211337	-0.05907	0.445371	1.137443	0.617469	1.476752	0.432435	0.092181	-3.85025
	16	0.095239	0.203011	-0.02658	0.458765	1.150478	0.664383	1.485883	0.461919	0.092565	-3.8023
	17	0.100428	0.195199	-0.00176	0.465758	1.15846	0.705283	1.495741	0.492643	0.098204	-3.75561
	18	0.104984	0.187217	0.016637	0.467656	1.162575	0.74166	1.506787	0.525134	0.109017	-3.7091
	19	0.108132	0.178589	0.029592	0.465329	1.163459	0.774339	1.518915	0.55934	0.124447	-3.66222
	20	0.109466	0.169028	0.037866	0.459368	1.161403	0.803711	1.531698	0.594869	0.143687	-3.61474
	21	0.108848	0.158396	0.042093	0.450197	1.156508	0.829907	1.544557	0.631162	0.165846	-3.56663
	22	0.106326	0.14668	0.042821	0.438142	1.148775	0.852916	1.55688	0.66761	0.190045	-3.51793
	23	0.102074	0.133958	0.04054	0.423479	1.138175	0.872665	1.568087	0.703623	0.215489	-3.46876
	24	0.096342	0.120371	0.0357	0.406462	1.124688	0.889066	1.577678	0.738678	0.241491	-3.41923
	25	0.089424	0.106108	0.028717	0.387338	1.108321	0.902049	1.585246	0.772336	0.267486	-3.36943
	26	0.081631	0.091381	0.019983	0.366355	1.089118	0.911574	1.590478	0.804246	0.293033	-3.31941
	27	0.073277	0.076414	0.009861	0.34376	1.067161	0.917639	1.59316	0.834146	0.317802	-3.26923
	28	0.06466	0.061433	-0.00131	0.319802	1.042568	0.920279	1.593157	0.861855	0.341561	-3.21889
	29	0.056064	0.046659	-0.01321	0.294729	1.015487	0.919562	1.590409	0.887261	0.364168	-3.16836
	30	0.047749	0.0323	-0.02556	0.268783	0.98609	0.915589	1.584916	0.910312	0.385547	-3.11762
	31	0.03995	0.018548	-0.03808	0.242196	0.954565	0.90848	1.576727	0.931004	0.405684	-3.06661
	32	0.032875	0.005577	-0.05056	0.215192	0.921114	0.898375	1.565928	0.949371	0.424608	-3.01526
	33	0.026711	-0.00646	-0.06276	0.18798	0.885944	0.885429	1.552635	0.965477	0.442382	-2.96351
	34	0.021619	-0.01742	-0.0745	0.160756	0.849264	0.869802	1.536983	0.979407	0.459096	-2.91128
	35	0.017737	-0.02719	-0.08563	0.133698	0.81128	0.851659	1.51912	0.99126	0.474858	-2.8585
	36	0.015185	-0.03566	-0.09599	0.106968	0.772193	0.831169	1.499203	1.001147	0.489786	-2.80509
	37	0.014062	-0.04277	-0.10547	0.080713	0.732196	0.808495	1.477392	1.009181	0.504005	-2.75099

กระแส	38	0.014452	-0.04844	-0.11397	0.055062	0.691476	0.7838	1.453845	1.015479	0.517644	-2.69615
	39	0.016422	-0.05263	-0.12141	0.030127	0.650204	0.757239	1.428719	1.020155	0.530828	-2.64051
	40	0.020027	-0.05529	-0.12772	0.006005	0.608545	0.728965	1.402164	1.02332	0.543683	-2.58404
	41	0.025308	-0.0564	-0.13285	-0.01722	0.566649	0.699119	1.374324	1.025081	0.556325	-2.5267
	42	0.032297	-0.05595	-0.13677	-0.03948	0.524656	0.667838	1.345335	1.025538	0.568869	-2.46848
	43	0.041015	-0.05394	-0.13945	-0.06073	0.482695	0.635251	1.315324	1.024784	0.581421	-2.40937
	44	0.051474	-0.05037	-0.14089	-0.08091	0.440881	0.60148	1.284411	1.022907	0.594078	-2.34937
	45	0.063681	-0.04525	-0.14107	-0.09999	0.39932	0.566638	1.252706	1.019985	0.606932	-2.2885
	46	0.077632	-0.0386	-0.14002	-0.11796	0.358108	0.530832	1.220309	1.016091	0.620067	-2.22679
	47	0.093321	-0.03045	-0.13773	-0.1348	0.317331	0.494162	1.187314	1.01129	0.633557	-2.16427
	48	0.110735	-0.02082	-0.13423	-0.1505	0.277064	0.456723	1.153805	1.005641	0.647472	-2.101
	49	0.129856	-0.00976	-0.12955	-0.16506	0.237376	0.418602	1.119859	0.999195	0.661873	-2.03702
	50	0.150663	0.002703	-0.12372	-0.17849	0.198324	0.379883	1.085545	0.991998	0.676816	-1.97242
	51	0.173129	0.016529	-0.11677	-0.19081	0.159963	0.340642	1.050925	0.984091	0.692348	-1.90726
	52	0.197226	0.031672	-0.10874	-0.20203	0.122336	0.300951	1.016056	0.975507	0.708512	-1.84165
	53	0.222921	0.04809	-0.09967	-0.21217	0.085483	0.260881	0.980987	0.966278	0.725348	-1.77567
	54	0.25018	0.065736	-0.0896	-0.22126	0.049437	0.220494	0.945763	0.956428	0.742887	-1.70944
	55	0.278966	0.084562	-0.07858	-0.22932	0.014225	0.179853	0.910424	0.945979	0.761157	-1.64306
	56	0.309238	0.104521	-0.06665	-0.23639	-0.02013	0.139014	0.875005	0.934949	0.780183	-1.57667
	57	0.340956	0.125565	-0.05385	-0.2425	-0.05361	0.098033	0.839537	0.923353	0.799985	-1.51039
58	0.374076	0.147644	-0.04024	-0.24767	-0.0862	0.056962	0.804046	0.911203	0.82058	-1.44435	
59	0.408553	0.17071	-0.02586	-0.25195	-0.11788	0.01585	0.768557	0.898507	0.841983	-1.3787	
60	0.44434	0.194714	-0.01074	-0.25538	-0.14866	-0.02526	0.73309	0.885274	0.864204	-1.3136	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

Sensorless Control of a Switched Reluctance Motor

นพชัย ภิรมย์ และ นฤเบศร์ รัตนฤทธิ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ถลองกรุง 1 ถนนถลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ : 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail : narubate.rat@hotmail.com, empire_tik@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงวิธีการที่จะควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์โดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ ทำได้โดยการใช้วิธีที่เรียกว่าระบบโครงข่ายประสาทเทียม ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีลักษณะของฟลักซ์และกระแสไม่เป็นเส้นตรง ถ้าหากใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถประมาณตำแหน่งของโรเตอร์โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ได้ กลุ่มข้อมูลที่นำมาฝึกฝนให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม คือ ฟลักซ์ที่เกี่ยวคด้อย กระแสสเตเตอร์ และมุมตำแหน่งของโรเตอร์ โดยจะให้ กระแสสเตเตอร์และฟลักซ์ที่เกี่ยวคด้อย เป็นตัวแปรต้น ส่วนมุมตำแหน่งของโรเตอร์เป็นตัวแปรตาม ถ้าหากข้อมูลที่นำมาฝึกฝนระบบโครงข่ายประสาทเทียมยังมีมาก ความผิดพลาดของมุมตำแหน่งโรเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากระบบโครงข่ายประสาทเทียมก็จะยิ่งมีค่าน้อย โดยโครงงานนี้จะใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการหาตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยวิธีเฟส

คำสำคัญ: เครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์, โครงข่ายประสาทเทียม, เส้นแรงแม่เหล็ก, กระแสไฟฟ้า, ตำแหน่งมุมโรเตอร์

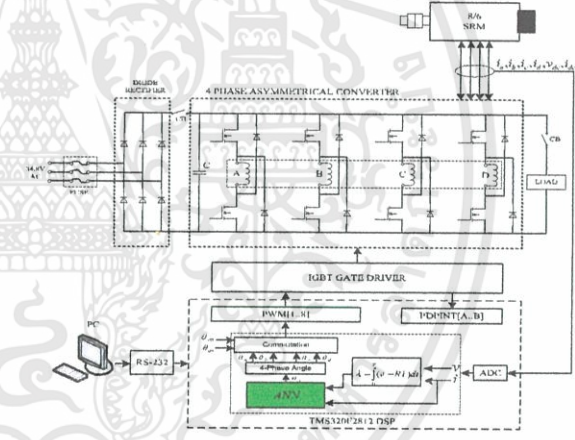
Abstract

This paper presents a new approach to the sensorless control of the switched-reluctance motor (SRM). The basic premise of the method is that an artificial neural network (ANN) forms a very efficient mapping structure for the nonlinear SRM. Through measurement of the phase flux linkages and phase currents the neural network is able to estimate the rotor position, thereby facilitating elimination of the rotor position sensor. The ANN training data set is comprised of magnetization data for the SRM with flux linkage and current as inputs and the corresponding position as output in this set. Given a sufficiently large training data set, the ANN can build up a correlation among and for an appropriate network architecture. This paper presents the development, implementation, and operation of an ANN-based position estimator for a four-phase SRM.

Keywords: Switched Reluctance Machine (SRM), artificial neural network, Flux Linkage, Electric Current, Rotor Position

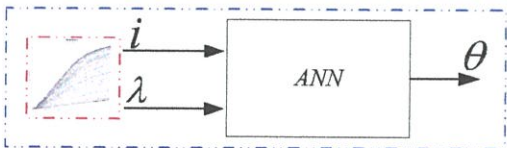
1. บทนำ

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์ในสภาพปกติจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจจับ (Sensor) ในการตรวจจับตำแหน่งมุมของโรเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้ Encoder ในการวัดตำแหน่งมุมโรเตอร์และนำมาประมวลผลเปรียบเทียบภายใน DSP (Digital Signal Processing) ในปริณิณานี้ได้ใช้ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการประมาณตำแหน่งมุมโรเตอร์แทนตัวตรวจจับตำแหน่งมุมของโรเตอร์ (Sensor) โดยมีโครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์

การหาตำแหน่งของโรเตอร์แทนโดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ ฟลักซ์ที่เกี่ยวคด้อย (flux linkage) และกระแส ของแต่ละเฟส เป็นตัวแปรต้น และตำแหน่งของโรเตอร์ที่สอดคล้อง เป็นตัวแปรตาม จากนั้นทำการป้อนชุดข้อมูลของ ฟลักซ์ที่เกี่ยวคด้อย กระแส และ ตำแหน่งของโรเตอร์ ให้มากพอ เพื่อให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) สามารถประมวลผลและประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์ที่เหมาะสมได้



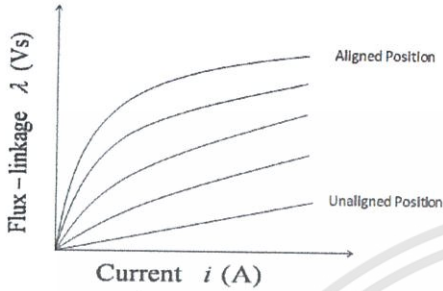
รูปที่ 2 โครงสร้างประสาทเทียมสำหรับสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีพื้นฐานของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีงและ โครงข่ายประสาทเทียม

2.1 ทฤษฎีของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีง

แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีง (λ) กับ กระแสในขดลวดเฟส (I) ที่ตำแหน่งมุมโรเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีตั้งแต่ มุม Unaligned จนถึงมุม Aligned ดังรูปที่ 3

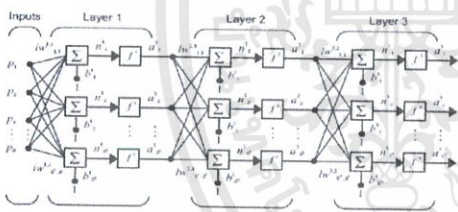


รูปที่ 3 กราฟ Magnetizing

2.2 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท

โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Networks) ดังรูปที่ 4 ที่นิยมใช้กัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นนำเข้า (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output)

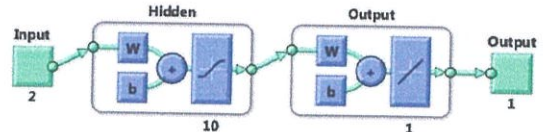


รูปที่ 4 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 พิจารณาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

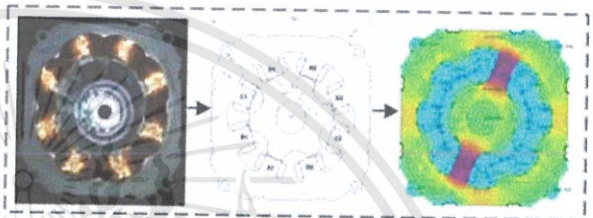
เลือกใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะในการทำงานแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feed Forward Neural Network) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) และฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น (Linear Active Function) ได้แก่ ฟังก์ชันลิเนียร์ (Linear Function) และฟังก์ชันกระตุ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Active Function) ได้แก่ ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจน (Tansigmoid Function) โดยจะใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) 10 ตัวและชั้นผลติ (Output Layer) จะใช้จำนวนนิวรอน 1 ตัว โดยใช้การเรียนรู้แบบ Levenberg Marquardt ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

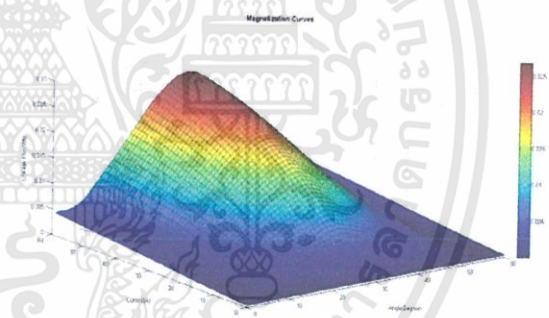
3.2 การทดสอบกลุ่มข้อมูล Magnetizing

การทดสอบข้อมูลนั้นจะเริ่มด้วยการเก็บข้อมูลกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีง โดยใช้โปรแกรม CATIA ออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลิกแดนซ์ตามแบบจริงและใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetic ในการป้อนกระแสเพื่อวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีง ดังรูปที่ 6

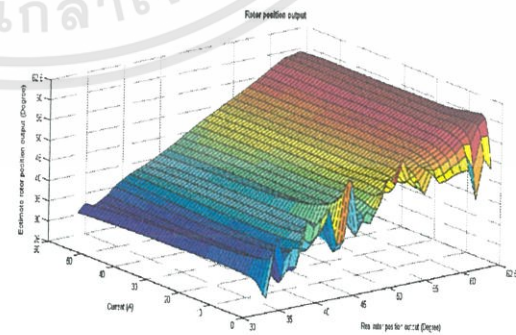


รูปที่ 6 กระบวนการเก็บข้อมูล Magnetizing

หลังจากการวิเคราะห์ใน Finite Element Method Magnetic จะได้ข้อมูลกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ข้อมูลกระแส เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลีง และ มุมโรเตอร์ จากรูปที่ 7 นำข้อมูลไปสอนในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เรียนรู้รูปแบบ ซึ่งจะได้อุมโรเตอร์จากโครงข่ายประสาทเทียมมาดังรูปที่ 8

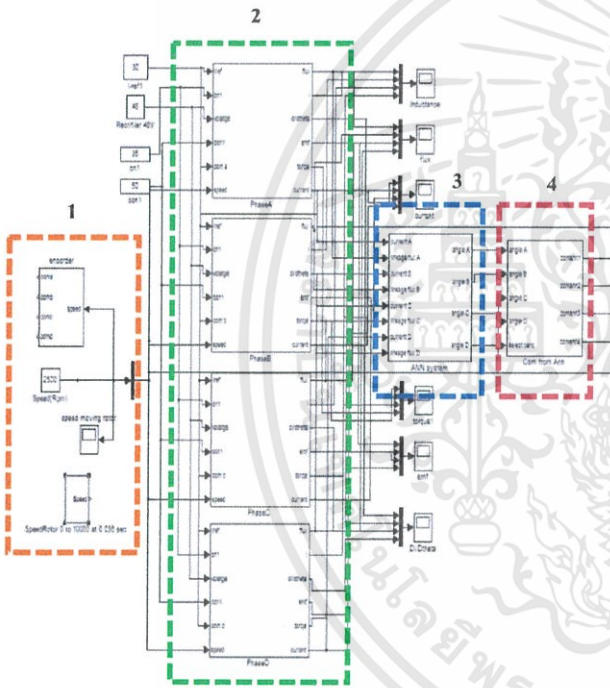


รูปที่ 8 มุมโรเตอร์จากโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 8 จะเห็นได้ชัดเจนว่าในช่วงกระแสต่ำจะมีการประมาณตำแหน่งที่ผิดพลาดเนื่องจากชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนต์ซ์ 4 เฟสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สไปล์เป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณตำแหน่งแทนตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ในแบบจำลอง Simulink จาก Matlab นี้จะแบ่งเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ส่วนที่ 1 เป็นการควบคุมความเร็วของโรเตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของ Hardware ซึ่งภายในจะประกอบด้วย แบบจำลองมอเตอร์ แบบจำลองคอนเวอเตอร์ และแบบจำลองคอมมิวเตชัน ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และในส่วนที่ 4 เป็นการปรับเฟสเพื่อสร้างตำแหน่งมุมโรเตอร์ทั้ง 6 องศาหรือ 1 รอบทางไฟฟ้าของเฟส A โดยจะส่งมุมที่ได้ไปใช้ในคอมมิวเตชันแทนที่ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ดังรูปที่ 3.9

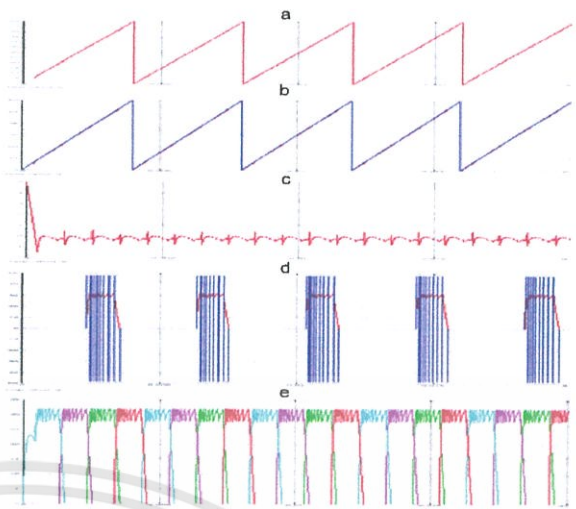


รูปที่ 9 แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนต์ซ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับตำแหน่ง 4 เฟส

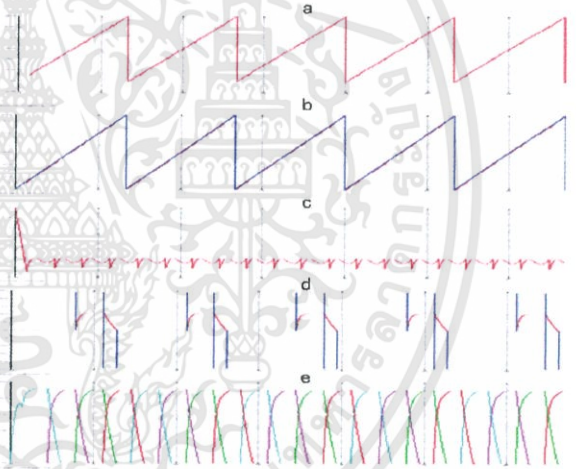
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองแบบจำลองจาก Simulink

ผลการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือความเร็วที่ 2500 rpm และที่ความเร็ว 7500 rpm ซึ่งที่ความเร็วต่ำนั้นจะทำงานในโหมด Hard Chopping เนื่องจากผลของแรงคืนด้านกลับทำให้กระแสต่ำกว่ากระแสที่ควบคุม และที่ความเร็วสูงจะทำงานในโหมด Single pulse โดยกำหนดให้มุมนำกระแส 15 องศาโดย $\theta_{on} = 35$ องศา และ $\theta_{off} = 50$ องศา โดยจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 10 และ รูปที่ 11



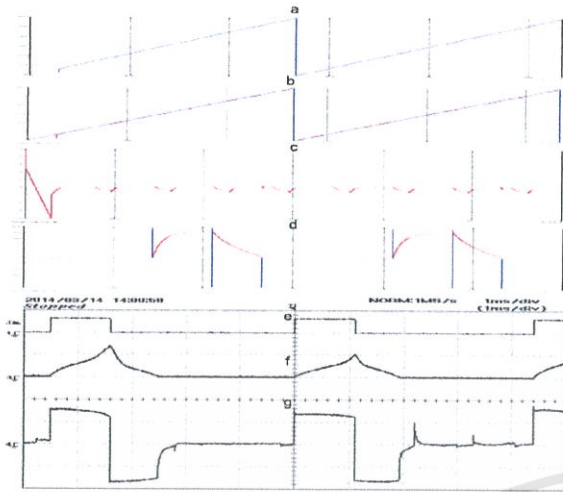
รูปที่ 10 ผลจากแบบจำลองแบบ Hard Chopping ที่ความเร็ว 2500 rpm โดย (a) ตำแหน่งจากการประมาณ (b) ตำแหน่งจริงเทียบกับตำแหน่งจากการประมาณ (c) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการประมาณ (d) กระแสและแรงดันเฟส A (e) กระแส 4 เฟส



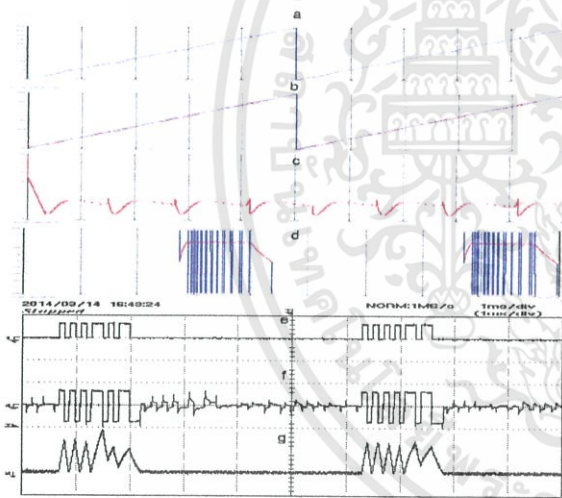
รูปที่ 11 ผลจากแบบจำลองแบบ Single pulse ที่ความเร็ว 7500 rpm โดย (a) ตำแหน่งจากการประมาณ (b) ตำแหน่งจริงเทียบกับตำแหน่งจากการประมาณ (c) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการประมาณ (d) กระแสและแรงดันเฟส A (e) กระแส 4 เฟส

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองจากแบบจำลองจาก Simulink กับผลการทดลองจริง

ผลการทดลองนี้เปรียบเทียบกับรูปคลื่นจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมโดยไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและรูปคลื่นจากการทดลองจริงโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโดยจะแบ่งผลการทดลองเป็น 2 โหมดคือ โหมดการทำงาน Single pulse และ โหมด Hard chopping โดยกำหนดให้มุมนำกระแสทั้ง 2 รูปแบบคือ 15 องศาโดย $\theta_{on} = 32.5$ องศา และ $\theta_{off} = 47.5$ องศา ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12



รูปที่ 12 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากแบบจำลองและรูปคลื่นจากผลการทดลองจริงในโหมด Single pulse โดย (a) ตำแหน่งจากการประมาณ (b) ตำแหน่งจริงเทียบกับตำแหน่งจากการประมาณ (c) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการประมาณ (d) รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส A จากการประมาณ (e) สัญญาณขับเคลื่อนจากการทดลองจริง (f) รูปคลื่นกระแสจากการทดลองจริง (g) รูปคลื่นแรงดันจากการทดลองจริง



รูปที่ 13 เปรียบเทียบรูปคลื่นจากแบบจำลองและรูปคลื่นจากผลการทดลองจริงในโหมด Hard chopping โดย (a) ตำแหน่งจากการประมาณ (b) ตำแหน่งจริงเทียบกับตำแหน่งจากการประมาณ (c) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการประมาณ (d) รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟส A จากการประมาณ (e) สัญญาณขับเคลื่อนจากการทดลองจริง (f) รูปคลื่นกระแสจากการทดลองจริง (g) รูปคลื่นแรงดันจากการทดลองจริง

5.สรุปผลการทดลอง

ในการนำเสนอค่าพารามิเตอร์จากการตรวจจับตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมแทนที่ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ของ

แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์ขณะทำงานในช่วงที่เป็นมอเตอร์ เช่น กระแส แรงดัน เส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิด ค่าความเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าด้านกลับ โดยการใช้สัมประสิทธิ์สไปลนเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการตรวจจับตำแหน่งโดยโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตัวตรวจจับ (Encoder) และมีรูปคลื่นเช่นเดียวกับรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองจริงตามทฤษฎี

6.ข้อเสนอแนะ

ด้วยความแม่นยำของแบบจำลองการประมาณตำแหน่งของโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้สัมประสิทธิ์สไปลนในการประมาณค่าพารามิเตอร์ทำให้สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้ในการประมาณตำแหน่งแทนที่ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) เพื่อขับสวิตซ์ IGBT จริงในอนาคตได้โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) ลงได้อย่างมาก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] David A. Torrey and Erkan Mese, "An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 17, No.1, 2002.
 [2] Howard B. Demuth, Mark Beale, and Martin T. Hagan, Neural Network Design, PWS Publishing Company, 1996.
 [3] T.J.E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machine, Oxford: Newnes Power Engineering Series, 2001.
 [4] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สังจา, มอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ : ทฤษฎีและการออกแบบ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เมษายน 2550.

ประวัติผู้เขียน



นาย นฤเบศร์ รัตนฤทธิ์
 ที่อยู่ 304 หมู่ 3 ซ.สยาม ด.ท่าศาลา
 อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
 narubate.rat@hotmail.com



นาย นพชัย ภิรมย์
 ที่อยู่ 63/1115 หมู่7 แขวง สะพานสูง
 เขต สะพานสูง กรุงเทพมหานคร
 empire_tik@hotmail.com

ประวัติผู้เขียน



นาย นฤเบศร์ รัตน์ฤทธิ รหัสนักศึกษา 53010817

วัน/เดือน/ปีเกิด 2 ธันวาคม 2534

ที่อยู่ 304 หมู่ 3 ต.ท่าศาลา อ.ท่าศาลา

จ.นครศรีธรรมราช

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก

โรงเรียนท่าศาลาประสิทธิ์ศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนเบญจมราชูทิศ

E-mail : narubate.rat@hotmail.com



นาย นพชัย ภิรมย์ รหัสนักศึกษา 530784

วัน/เดือน/ปีเกิด 3 กันยายน 2534

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 63/1115 หมู่ 7 แขวง สะพานสูง

เขต สะพานสูง กรุงเทพมหานคร

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง

E-mail : empire_tik@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้