

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
วิธีการประมาณค่าแรงบิดสำหรับเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

A TORQUE ESTIMATION METHOD FOR A SWITCHED RELUCTANCE
MACHINE



จพ.
ค 722
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61650
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

b. 11600883
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2397-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A TORQUE ESTIMATION METHOD FOR A SWITCHED RELUCTANCE
MACHINE**



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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ระบุไว้ ISBN 974-15-2397-1 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการประมาณค่าแรงบิดสำหรับเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์
นักศึกษา นายสิทธิชัย แก้วไทย
รหัสนักศึกษา 47060221
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ. 2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดขณะหนึ่ง ในสถานะที่ใช้งานอยู่ โดยการจำลองสมการแรงบิดขึ้นมาใหม่จากสมการพื้นฐานเดิม และนำเทคนิคคิวบิกสไปลน์มาช่วยในการจำลองซึ่งทำให้มีความเร็วในการประมาณค่าแรงบิดและทำให้การเก็บข้อมูลสำหรับการจำลองน้อย จากนั้นได้ทำการนำวิธีการประมาณนี้มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และได้ทำการทดลองใช้ดีเอสพีประมาณค่าขณะใช้งาน โดยนำผลแรงบิดที่ได้มาเปรียบเทียบกับแรงบิดที่วัดจากโปรแกรมเอพไอเอ็ม ซึ่งผลที่ได้มีความถูกต้องทั้งการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการใช้ดีเอสพีประมาณ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ได้ทั้งการจำลองการทำงานและการใช้งานจริง โดยเฉพาะการใช้งานจริงที่ใช้ดีเอสพีประมาณนั้นมีความเร็วในการประมวลผล จึงเป็นวิธีการประมาณแรงบิดที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงบิดต่อไป โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองนำวิธีทำการประมาณดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลในการปรับรูปร่างของกระแสในการควบคุมแบบลดแรงบิดกระแสเฟือง ซึ่งผลที่ประมาณค่าแรงบิดได้หลังทำการควบคุมแบบลดแรงบิดกระแสเฟืองนั้นการกระแสเฟืองของแรงบิดลดลง

Thesis Title A Torque Estimation Method for a Switched Reluctance Machine
Student Mr. Sittichai Kaewthai
Student ID 47060221
Degree Master of Engineering
Programme Electrical of Engineering
Year 2005
Thesis Advisor Asst .Prof. Dr. Supat Kittiratsatcha

ABSTRACT

This thesis proposes the estimation of online instantaneous torque of a 12/8 three-phase switched-reluctance machine (SRM). The torque estimator achieved from the cubic spline interpolation technique. By using this method, we could reduce the need of too many input data which spending much time for data collection. The machine model is simulated in Matlab/Simulink to observe the dynamic behavior and also implemented using ADMC401 fixed-point digital signal processing (DSP) to verify the model. The agreement between Finite-element analysis (FEA) and both simulation and experiment results has confirmed the accuracy of the proposed model and could be applied in various torque control applications. So, in this research, we applied the torque estimation to be the data for reducing torque ripple by controlling phase current. As a result, the ripple of the torque is reduced.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้แนะนำในการศึกษาต่อ ข้าพเจ้ารู้สึก ทราบซึ่งในความอนุเคราะห์ด้านต่าง ๆ จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ท้าวสี่สรวาด โคตรปัญญา ที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจ เวลาที่มีปัญหาต่าง ๆ ขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ห้อง Power Electronic Applications and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL) Room ECC 407 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิทธิชัย แก้วไทย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 พื้นฐานเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์.....	4
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์.....	4
2.2 การทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลัคแตนซ์.....	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์ กับ ตำแหน่งโรเตอร์.....	6
2.4 แรงบิดขณะหนึ่ง.....	9
2.5 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและสมการพื้นฐาน.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วง โดยคิวบิกสไปลน์.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 ทฤษฎีคิวบิกสไปลน์.....	15
3.3 ตัวอย่างการใช้งาน.....	21
3.4 สรุป.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	56
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	57
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการขับเคลื่อนและประมาณค่าแรงบิด.....	61
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน	106



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปลน์ทั้งหมดของ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$	28
4.2 แสดงข้อมูลสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปลน์ที่ใช้ในการประมาณค่าแรงบิด.....	32



สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5	แบบจำลองทางกลสำหรับ Matlab / Simulink.....37
5.6	การจำลองทางพลศาสตร์ของ 3-Phase SRM สำหรับ Matlab / Simulink.....38
5.7	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบบจำลองทางไฟฟ้าแต่ละเฟส.....38
5.8	แสดงค่า $\theta, \theta_A, \theta_B$ และ θ_C จาก Commutation Block.....38
5.9	แสดงกระแสเฟสจากการจำลอง.....39
5.10	แสดงแรงบิดเฟสจากการจำลอง.....39
5.11	แสดงค่าผลรวมของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลอง.....40
6.1	แสดงการจัดวางขาของ ADMC-40142
6.2	แสดงบอร์ดของ ADMC-401 ที่ใช้ในการทดลอง.....42
6.3	แสดงการต่ออุปกรณ์ตรวจจับกระแสใช้งาน..... 43
6.4	แสดงอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่ใช้งาน.....43
6.5	แสดงสัญญาณที่ได้จาก Encoder..... 44
6.6	ค่าที่ DSP ประมวลได้จากสัญญาณเอาต์พุตของ Encoder.....45
6.7	แสดง Encoder ที่ใช้ในการทดลอง.....45
6.8	แสดงวงจรที่ใช้ในการขับมอเตอร์.....46
6.9	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....46
6.10	แสดงลักษณะ โครงสร้างและพารามิเตอร์ของ 12/8 SRM ที่ใช้ทดลอง.....47
6.11	แสดงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดลอง.....48
6.12	แสดงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดลอง.....48
6.13	แผนผังวงจรการทดลอง.....49
6.14	โพลาร์ชาร์ตของโปรแกรมหลัก (a) และ โปรแกรมขัดจังหวะ (Interrupt) (b).....50
6.15	โพลาร์ชาร์ตของการประมาณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ารวม.....51
6.16	โพลาร์ชาร์ตของ โปรแกรมขัดจังหวะเมื่อทำการลดแรงบิดกระแสเพิ่ม.....52
6.17	แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะขับเคลื่อนโดยควบคุมกระแสที่ 10 A.....53
6.18	แรงบิดที่ประมาณได้ขณะขับเคลื่อนโดยควบคุมกระแสที่ 10 A.....53
6.19	แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสที่ยังไม่ได้ควบคุมแบบลดแรงบิดกระแสเพิ่ม.....54
6.20	แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะควบคุมแบบลดแรงบิดกระแสเพิ่ม.....54
6.21	เปรียบเทียบแรงบิดที่ประมาณได้ก่อนและหลังการควบคุมแบบลดแรงบิด.....55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังยังไม่ค่อยได้รับการพัฒนามากนัก เครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ (SRM) จึงไม่ได้นำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากในการขับเคลื่อน SRM จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง แต่ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังก้าวหน้าขึ้นมาก ดังนั้น SRM จึงมีการนำมาใช้งานแพร่หลายมากขึ้นในด้านอุตสาหกรรม เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน รถไฟฟ้า อากาศยาน ฯลฯ แต่ SRM ยังมีปัญหาในเรื่องของแรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบให้ SRM มีจำนวนเฟสและโพลมากขึ้น หรือแก้ด้วยวิธีการควบคุมแรงบิด (Torque control) ซึ่งในการควบคุมแรงบิด จำเป็นต้องทราบค่าแรงบิดขณะใช้งาน ซึ่งถ้าใช้ Torque transducer ก็จะมีราคาแพงไม่คุ้มกับค่าใช้จ่าย ดังนั้นถ้าเราสามารถประมาณค่าแรงบิดในขณะที่ใช้งานได้ก็จะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการควบคุม งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าแรงบิดขณะใช้งานของ SRM ขึ้น ในการประมาณนั้นจะประมาณแบบแรงบิดขณะหนึ่ง (Instantaneous torque) ซึ่งจะทำได้ทั้งการจำลองการทำงาน (Simulation) และการใช้งานจริง ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ DSP ที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนอยู่แล้วในการประมาณค่าแรงบิด และในการประมาณค่าแรงบิดจะใช้กระแสแต่ละเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ในการประมาณ ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องทราบอยู่แล้วในการขับเคลื่อน SRM

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในอนาคตเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีพัฒนาไปมากกว่านี้ SRM จะนำมาใช้มากขึ้น เพราะ SRM มีโครงสร้างง่ายและราคาถูก ซึ่งการควบคุมแรงบิดจะเป็นการควบคุมอย่างหนึ่งที่ทำให้ SRM มีเสถียรภาพมากขึ้น เพราะฉะนั้นการประมาณค่าแรงบิดขณะใช้งานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการขับเคลื่อน SRM

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าแรงบิด ด้วยการทำให้แบบจำลองสมการขึ้นมาใหม่ จากสมการพื้นฐานเดิม จึงทำให้มีความรวดเร็วในการประมวลผล ซึ่งแบบเดิมที่ใช้การเก็บข้อมูลแบบตาราง(Look-Up Table) จะใช้ข้อมูลมากทำให้เสียเวลาในการเก็บข้อมูล และต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีหน่วยความจำสูงมากสำหรับเก็บข้อมูล นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเทคนิคคิวบิคสไปลน์ มาช่วยในการประมาณค่าในช่วงข้อมูล จึงทำให้การเก็บข้อมูลน้อย ซึ่งแบบเดิมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ต้องเก็บข้อมูลและเสียเวลาในการฝึกสอนมาก[9] โดยทั่วไปโครงข่ายที่ให้คำตอบได้คตินั้นจะมีจำนวนโหนดและชั้นเชื่อมต่อ (Layer) มาก ทำให้เวลาในการประมวลผลนาน จึงต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความรวดเร็วสูงเพื่อให้สามารถประมวลผลได้ทันกับคาบเวลาการแซมพลิง

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดขณะหนึ่ง ในสถานะที่ใช้งานอยู่ โดยการจำลองสมการแรงบิดขึ้นมาใหม่จากสมการพื้นฐานเดิม และนำเทคนิคคิวบิคสไปลน์มาช่วยในการจำลอง โดยได้นำวิธีการประมาณนี้มาจำลองการทำงานด้วย Matlab/Simulink และได้ทำการทดลองใช้ DSP ประมาณค่าขณะใช้งาน โดยนำผลแรงบิดที่ได้มาเปรียบเทียบกับแรงบิดที่วัดจากโปรแกรม Finite-element analysis (FEA)[13] เพื่อทดสอบความถูกต้อง จากนั้นได้ทดสอบการขับ เคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์ โดยการควบคุมแบบลดแรงบิดกระเพื่อมโดยวิธีปรับรูปร่างของกระแส(Current wave shaping) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าแรงบิดมาใช้ปรับรูปร่างของกระแส

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ลำดับการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาพื้นฐานเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์
2. ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์เบื้องต้น
3. ศึกษาวิธีการประมาณค่าแรงบิด และลำดับขั้นตอนการประมาณค่าแรงบิด
4. ศึกษาการประมาณค่าในช่วงโดยคิวบิคสไปลน์และการนำมาใช้
5. ศึกษาการใช้งาน Matlab/Simulink
6. ศึกษาการจำลองทางพลศาสตร์ของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์ 3 เฟสสำหรับ Matlab/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
7. ทดลอง จำลองการประมาณแรงบิดด้วย Matlab/Simulink

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ศึกษาตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)
9. ศึกษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง
10. ทดลองโดยใช้ DSP สำหรับการประมาณค่าแรงบิด
11. เก็บผลการทดลอง และ วิเคราะห์ผลการทดลอง



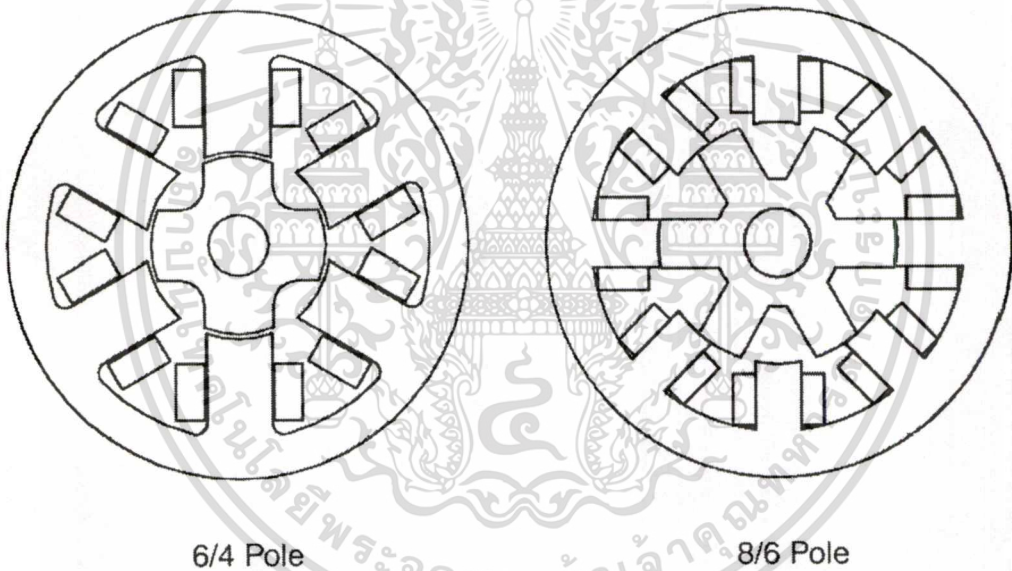
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

พื้นฐานเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแทนซ์

2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแทนซ์

เครื่องจักรกลชนิดนี้จะมีโครงสร้างสองส่วนเหมือนเครื่องจักรกลชนิดอื่นคือจะประกอบไปด้วย สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ แต่จะไม่มีขดลวดสนามหรือแม่เหล็กที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลชนิดนี้นั้นมีความง่าย โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์มีลักษณะแบบขั้วยื่น(Salient poles) ลักษณะดังกล่าวของเครื่องจักรกลแสดงอยู่ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแทนซ์แบบ 3 เฟส 6/4 โพล และแบบ 4 เฟส 8/6 โพล

เครื่องจักรกลชนิดนี้สามารถสร้างที่เฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ จำนวนของสเตเตอร์โพลและโรเตอร์โพลก็ขึ้นอยู่กับ เฟส และจำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ(Number of strokes per revolution, N_r) โดยจำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ จะมีดังสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ N_r คือ จำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ

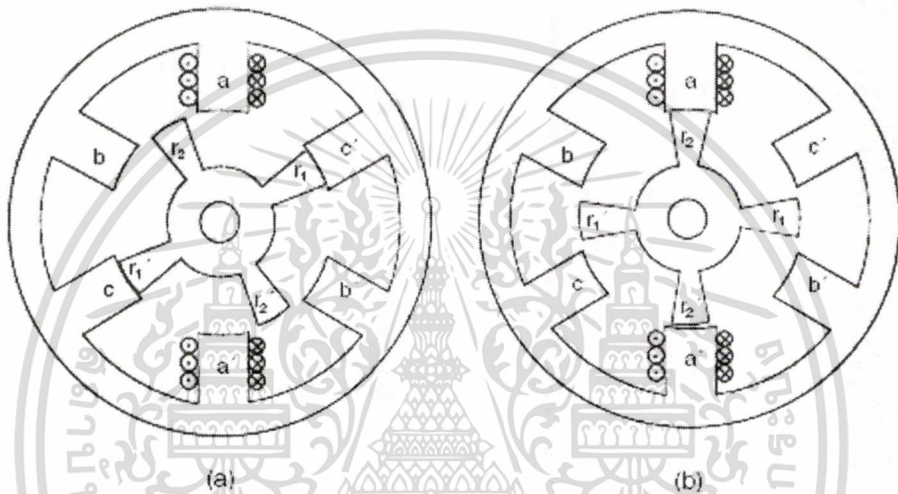
N_r คือ จำนวนของสเตเตอร์โพล

และ N_s คือ จำนวนของโรเตอร์โพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์

พิจารณาที่ขั้วของโรเตอร์ r_1 และ r_1' และ ขั้วสเตเตอร์ c และ c' อยู่ที่ระนาบเดียวกันกับโรเตอร์ จ่ายกระแสไปที่เฟส a โดยที่ทิศทางของกระแสแสดงดังรูปที่ 2.2 (a) เส้นแรงแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นผ่านขั้วสเตเตอร์ a และ a' และ โรเตอร์ r_2 และ r_2' ซึ่งจะทำการดึงโรเตอร์ r_2 และ r_2' ไปหาขั้วสเตเตอร์ a และ a' ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 การทำงานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์

(a) เฟส c อยู่ที่ตำแหน่งระนาบ

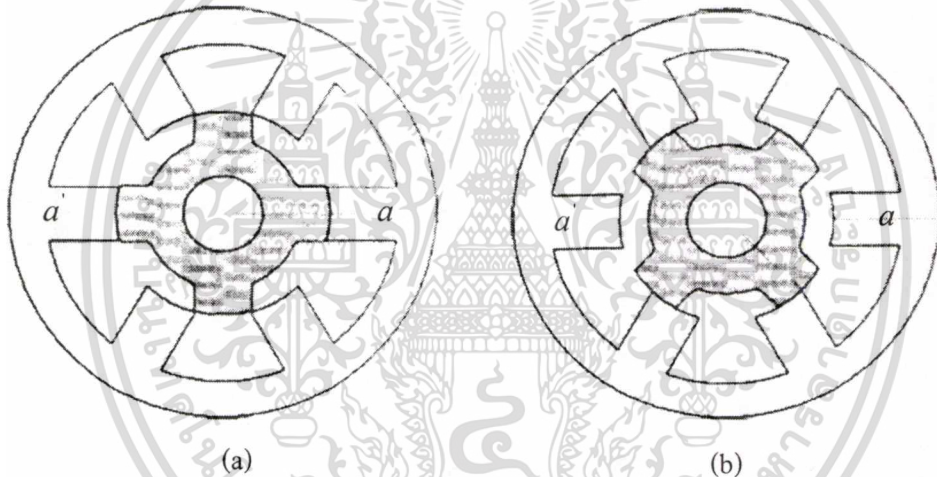
(b) เฟส a อยู่ที่ตำแหน่งระนาบ

เมื่อขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ดังกล่าวอยู่ในระนาบเดียวกันแล้ว กระแสจะถูกหยุดจ่ายพลังงานซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 2.2 (b) ในตอนนี้ขดลวดของสเตเตอร์เฟส b ถูกจ่ายให้พลังงาน โรเตอร์ r_1 และ r_1' กำลังถูกดึงเข้าหาสเตเตอร์ b และ b' ตามลำดับ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ในทำนองเดียวกันการจ่ายพลังงานของขดลวดเฟส c ทำให้ r_2 และ r_2' กับ c และ c' อยู่ในตำแหน่งระนาบเดียวกันระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ ดังนั้นการจ่ายพลังงานให้กับทั้ง 3 เฟสอย่างเป็นลำดับเพื่อเคลื่อนโรเตอร์ไป 1 รอบของการเคลื่อนเป็นผลมาจากการสวิตช์ค่ากระแส ในแต่ละเฟส การสวิตช์ซึ่งค่ากระแสอย่างเป็นลำดับ $a-b-c$ ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะตามเข็มนาฬิกา และ การสวิตช์ซึ่งค่ากระแสอย่างเป็นลำดับ $b-a-c$ ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์กับตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อขั้วของโรเตอร์คู่ใดก็ได้มีตำแหน่งตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณา เรา จะเรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีค่า อินดักแตนซ์สูงสุด ดังรูปที่ 2.3 (a) ซึ่งจะเห็นว่าเฟส a นั้นอยู่ในตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ที่ตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ค่าอินดักแตนซ์ในเฟสจะมีค่ามากที่สุด เพราะ ความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance, \mathcal{R}) มีค่าน้อยที่สุด ในทางกลับกันถ้าตำแหน่งขั้วของสเต เตอร์ของเฟสที่พิจารณาอยู่ระหว่างโรเตอร์โพล ตำแหน่งนี้จะเรียกว่าตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์ต่ำสุด ดังรูปที่ 2.3 (b) ซึ่งจะเห็นว่า เฟส a นั้นอยู่ในตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position)



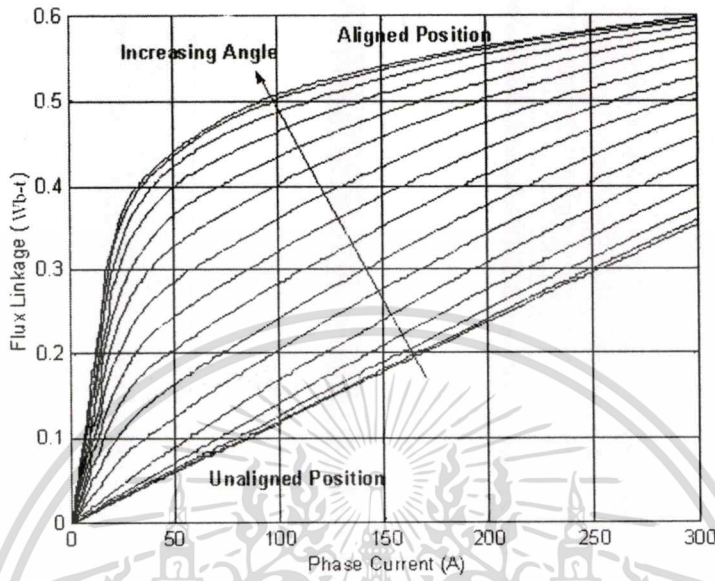
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งโรเตอร์ที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดและต่ำสุด

(a) ตำแหน่งอะไลน์ (aligned position)

(b) ตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position)

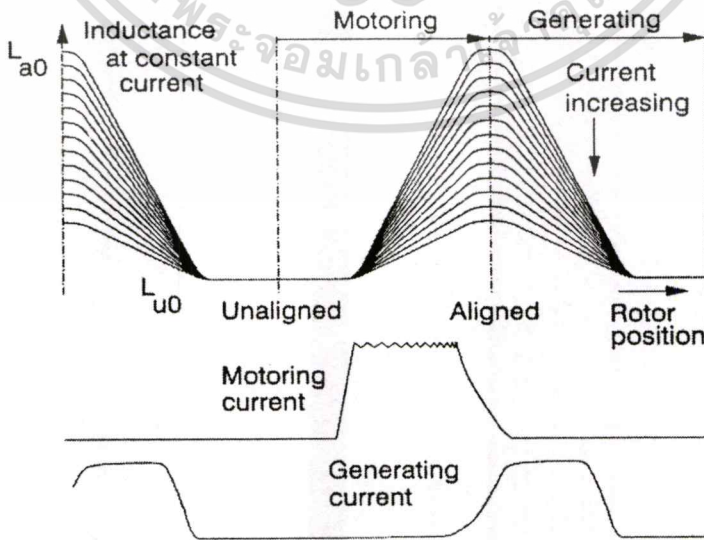
นอกจากตำแหน่งจะมีผลกับค่าอินดักแตนซ์แล้ว ยังมีตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีผลกับค่า อินดักแตนซ์นั่นก็คือค่าของกระแสเฟสของขดลวดสเตเตอร์ โดยความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ สามารถเขียนเป็นเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetization curves) โดยเส้นโค้งคุณสมบัติ ทางแม่เหล็กนี้ เครื่องจักรกลแบบสวิตช์ลัดแดนซ์แต่ละตัวก็จะมีค่าต่างกัน ไปซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และ วัสดุที่ใช้ทำโรเตอร์และสเตเตอร์ แสดงตัวอย่างเส้นโค้งคุณสมบัติทาง แม่เหล็กดังรูปที่ 2.4 โดยเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กนั้นจะแสดงค่าเส้นแรงแม่เหล็กคด้อย เกี่ยว (Flux Linkage, λ) จากตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position) ไปยังตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ที่ค่ากระแสต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าที่บริเวณตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position) ค่าเส้นแรงแม่เหล็กคด้อยจะมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นเพราะว่าบริเวณนี้มีช่อง

อากาศสูงเนื่องจากอากาศนั้นจะมีค่าความซาบซึม(permeability, μ) คงที่ [3] แต่ที่บริเวณตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) จะมีความเป็นเชิงเส้นที่ค่ากระแสต่ำ ๆ เท่านั้นเนื่องจากบริเวณนี้มีช่วงอากาศแคบ ผลของแกนเหล็กต่อค่ารีลัคแตนซ์จึงมากขึ้น



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetization curves)

ในการใช้งานเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์เป็นมอเตอร์นั้นจะต้องทำการสวิตซ์จ่ายกระแสในช่วงที่มีค่าความชันของอินดักแตนซ์เป็นบวก และการใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องทำการสวิตซ์จ่ายกระแสในช่วงที่มีค่าความชันของอินดักแตนซ์เป็นลบ แสดงดังรูปที่ 2.5

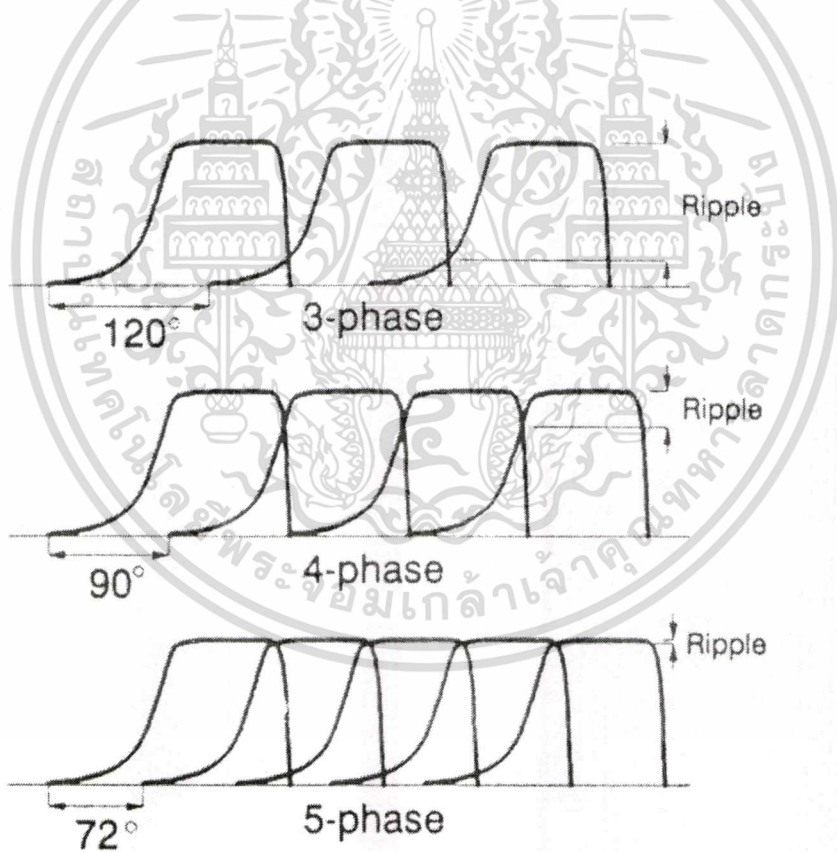


รูปที่ 2.5 อินดักแตนซ์แปรผันกับตำแหน่งกระแสของโหมคมอเตอร์และโหมคเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์จึงต้องทราบตำแหน่งของโรเตอร์และการจ่ายกระแสให้กับขดลวดสเตเตอร์ไม่สามารถจ่ายแรงดันตรง ๆ ได้เนื่องจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอินดักแตนซ์นั้นจะทำให้เกิดการอิ่มตัวและอินดักแตนซ์จะอยู่ในภาวะคงตัวคือลัดวงจร ดังนั้นจึงต้องมีสวิตซ์ในการควบคุมกระแส ด้วยเหตุนี้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์จึงต้องมีอุปกรณ์ตรวจจ่ายกระแสเพื่อที่จะสามารถสวิตซ์ควบคุมกระแสได้

จากรูปที่ 2.5 สามารถพิจารณาได้ว่าจากตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position) ไปยังตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) จะมีช่วงที่มีความชันของอินดักแตนซ์เป็นศูนย์ซึ่งไม่สามารถสร้างแรงบิดได้จึงทำให้เกิดแรงบิดกระเพื่อมขึ้นซึ่งสามารถแก้ไขให้แรงบิดกระเพื่อมน้อยลงได้โดยการควบคุมรูปร่างของกระแส หรือออกแบบให้มอเตอร์มีจำนวนเฟสและโพลมากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการช่อกันของเฟส ดังรูปที่ 2.6 แสดงการกระเพื่อมของแรงบิดที่มีจำนวนเฟสต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 แรงบิดกระเพื่อมที่เกิดขึ้นจาก มอเตอร์ขนาด 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส

2.4 แรงบิดขณะหนึ่ง

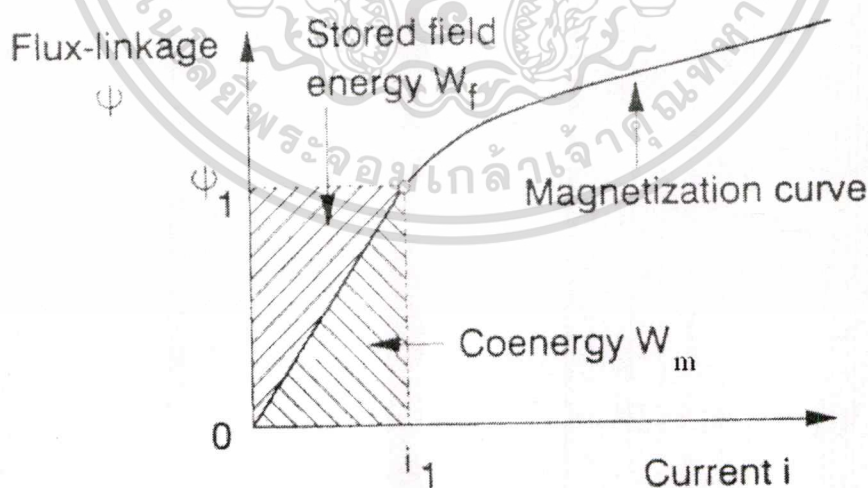
การสร้างแรงบิดในมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์สามารถอธิบายได้ดังนี้คือเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดสเตเตอร์ ขดลวดจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น โดย พลังงานไฟฟ้าทางด้าน อินพุตสามารถหาได้ดังนี้

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = \int F d\Phi \quad (2.2)$$

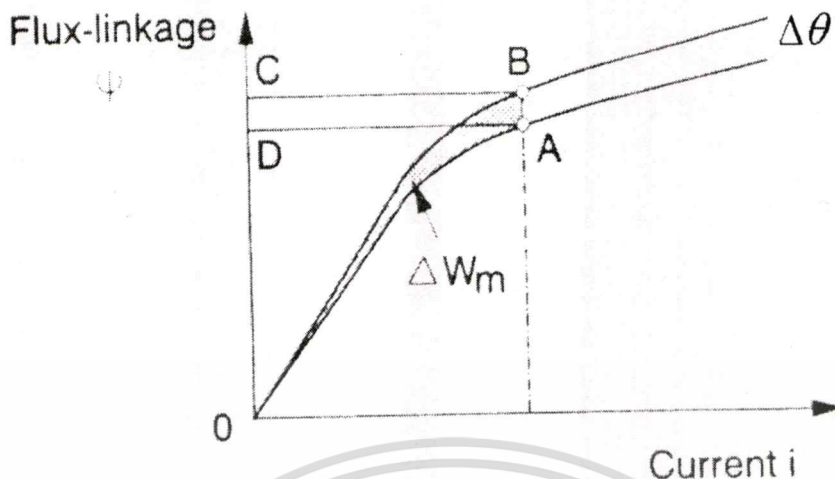
เมื่อ e คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ i คือกระแสเฟส และ ค่า F เป็นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า อินพุตพลังงานทางไฟฟ้านี้ W_e มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ถูกเก็บอยู่ในขดลวด (stored field energy, W_f) และพลังงานที่ถูกแปรสภาพไปอยู่ในรูปของพลังงานกล (co energy, W_m) สมการของอินพุตพลังงานทางไฟฟ้า คือ

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.3)$$

จากสมการแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยพลังงานที่ถูกแปรสภาพไปอยู่ในรูปของพลังงานกลจะอยู่ด้านล่างของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetization curves) และพลังงานที่ถูกเก็บอยู่ในขดลวดจะอยู่ด้านบนของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 พลังงานที่ถูกแปรสภาพไปอยู่ในรูปของพลังงานกลและพลังงานที่สะสมในขดลวด



รูปที่ 2.8 แรงบิดชั่วขณะจากการเปลี่ยนแปลงของ co - energy ที่กระแสดงที่

โดยแรงบิดชั่วขณะนั้น จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ถูกแปรสภาพไปอยู่ในรูปของพลังงานกล (ΔW_m) หาด้วยตำแหน่งที่โรเตอร์หมุนไปคือ ($\Delta\theta$) เมื่อกระแสที่นั่นคืองานที่ค่อยๆเกิดขึ้น ดังนั้นจึงกำหนดได้ดังนี้

$\Delta\theta$ คือ การเคลื่อนที่จาก A ถึง B ในรูปที่ 2.9 ในขณะที่กระแสที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่แหล่งจ่าย (ΔW_e) จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ ABCD และพลังงานแม่เหล็กสะสมที่ถูกเปลี่ยนแปลง (ΔW_f) จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ OBC - OAD เพราะฉะนั้นส่วนเพิ่มขึ้นของพลังงานทางกลในรูปของแรงบิดทางแม่เหล็ก (Electromagnetic torque) และการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งโรเตอร์แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 \Delta W_m &= T_e \Delta\theta & (2.4) \\
 &= \Delta W_e - \Delta W_f \\
 &= \text{ABCD} - (\text{OBC} - \text{OAD}) \\
 &= (\text{ABCD} + \text{OAD}) - \text{OBC} \\
 &= \text{OAB}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่จ่าย ไม่ใช่พลังงานทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงเป็นงานทางกลได้ แต่จะถูกสะสมในรูปของสนามแม่เหล็กและพลังงานที่สะสมในรูปสนามแม่เหล็กจะไม่สูญหายไปไหนแต่จะคืนกลับแหล่งจ่ายนั่นเอง ดังนั้นการออกแบบอินเวอร์เตอร์จึงต้องมีไดโอดไว้สำหรับการคืนพลังงานกลับสู่แหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.4) เมื่อ T_e คือแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า และ $\Delta\theta$ คือ ส่วนที่เพิ่มขึ้นของตำแหน่งโรเตอร์ ดังนั้นแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงแสดงให้อยู่ในรูปของ

$$T_e = \left. \frac{\partial W_m(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=const} \quad (2.5)$$

เมื่อ W_m คือพลังงานที่ถูกแปรสภาพไปอยู่ในรูปของพลังงานกลที่ตำแหน่งใดๆ นั้นคือพื้นที่ด้านล่างของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetization curves) ดังรูปที่ 2.7 โดยมีค่าดังสมการ

$$W_m = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \Big|_{\theta=const} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะได้สมการทั่วไปที่ใช้หาแรงบิดดังนี้

$$T_e = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \quad (2.8)$$

ดังนั้นสมการทั่วไปที่ใช้หาแรงบิดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (2.9)$$

2.5 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและสมการพื้นฐาน

วงจรสมมูลย์เบื้องต้นของ มอเตอร์แบบสวิตซ์รีล็คแตนซ์ สามารถหาได้โดยไม่พิจารณาผลของค่าอินดักแตนซ์ร่วมระหว่างเฟส ดังนั้นแรงดันแหล่งจ่าย ที่จ่ายให้กับเฟสมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กคล็องเก็ว ซึ่งแสดงได้ดังสมการนี้

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_s คือ ค่าความต้านทานต่อเฟส และ λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กคล่องเกี่ยวข้องกับเฟส

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \quad (2.11)$$

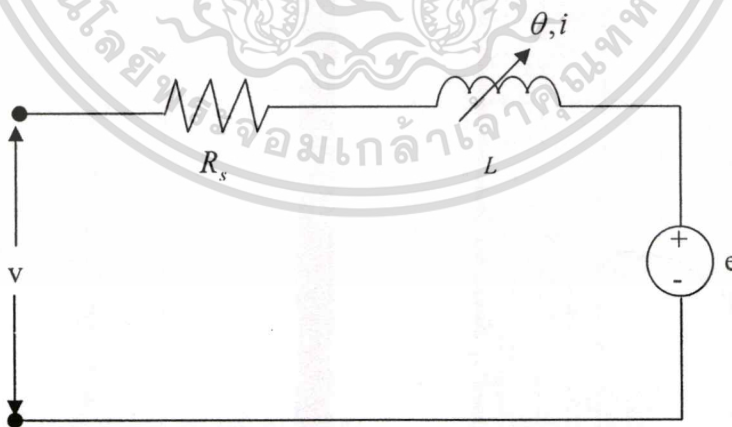
เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ ที่ขึ้นอยู่กับค่าตำแหน่ง โรเตอร์ และ กระแสเฟส ซึ่งสมการแรงดันที่เฟส คือ

$$\begin{aligned} v &= R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)i\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\ &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \end{aligned} \quad (2.12)$$

ในสมการของแรงดันทั้ง 3 เทอม ประกอบด้วยค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่ความต้านทานแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และ และ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ(back-emf) ดังนั้นสามารถหาแรงดันไฟฟ้าต้านกลับได้ดังนี้

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (2.13)$$

สังเกตว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ(back-emf) จะขึ้นอยู่กับค่ากระแส ความเร็วและอินดักแตนซ์โปร ไฟล์ จากสมการแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ทำให้วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเฟสเดียวของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

การแทนค่าของเส้นแรงเชื่อมโยงในสมการแรงดัน แล้วคูณด้วยค่าของกระแสในสมการของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะทางด้านอินพุต

$$p_i = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (2.14)$$

ตอนนี้ในทอมสุดท้ายของสมการไม่สามารถนิยามในทางฟิสิกส์ได้ เพื่อจะที่ทำให้ความหมายกับทอมดังกล่าวนั้นเราจึงแสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรดังแสดงดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.15)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.16)$$

เมื่อ p_i คือ กำลังไฟฟ้าชั่วขณะทางด้านอินพุต ความหมายของกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต คือ ผลรวมของการสูญเสียในขดลวด $R_s i^2$, อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนามแม่เหล็ก (P_f) และ กำลังสูญเสียในช่องอากาศ (P_g)

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนามแม่เหล็กมีค่าดังนี้

$$P_f = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) \quad (2.17)$$

จากผลของกำลังสูญเสียที่ช่องอากาศ คือ

$$P_g = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.18)$$

และ ในทอมของตำแหน่งโรเตอร์และความเร็ว แสดงได้ดังนี้

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลของกำลังสูญเสียที่ช่องอากาศจะได้ดังนี้คือ

$$P_g = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m$$

กำลังสูญเสียที่ช่องอากาศคือผลคูณของแรงบิดทางแม่เหล็ก และ ความเร็วโรเตอร์

$$P_g = \omega_m T_e \quad (2.20)$$

จึงได้ค่าสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.21)$$

จากสมการแรงบิดที่ได้จะเห็นว่าสมการแรงบิดทั้งสองคือ สมการที่ (9) และ สมการที่ (21) นั้นมีค่าเท่ากัน



บทที่ 3

ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงโดยคิวกัสไปลน์

3.1 บทนำ

คิวกัสไปลน์เป็นวิธีในการประมาณในช่วงข้อมูลวิธีหนึ่ง[10] ซึ่งจะเป็นกราฟที่มีรูปร่างโค้งเรียบผ่านข้อมูลทุกจุด โดยเส้นโค้งระหว่างจุดจะอยู่ในรูปของสมการพหุนามลำดับสาม โดยในการหาคำตอบนั้นจะต้องแบ่งข้อมูลออกเป็นท่อน ๆ แต่ละท่อนจะอยู่ระหว่างจุด จากนั้นต้องหาสัมประสิทธิ์แต่ละท่อน เมื่อได้สัมประสิทธิ์ก็จะนำไปใช้ในการหาคำตอบ โดยรายละเอียดของสมการพหุนามลำดับสาม และการหาสัมประสิทธิ์แต่ละท่อนแสดงดังต่อไปนี้

3.2 ทฤษฎีคิวกัสไปลน์

รูปแบบสมการพหุนามในการหาคำตอบดังนี้

$$S(x) = \begin{cases} s_1(x) & \text{if } x_1 \leq x \leq x_2 \\ s_2(x) & \text{if } x_2 \leq x \leq x_3 \\ \vdots & \vdots \\ s_{n-1}(x) & \text{if } x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (3.1)$$

จาก s_i คือ สมการพหุนามลำดับสามกำหนดโดยสมการ

$$s_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad (3.2)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$ อนุพันธ์อันดับที่ 1 และ 2 ของ $n-1$ เป็นสมการที่มีกระบวนการดังนี้

$$s'_i(x) = 3a_i(x-x_i)^2 + 2b_i(x-x_i) + c_i \quad (3.3)$$

$$s''_i(x) = 6a_i(x-x_i) + 2b_i \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $i = 1, 2, \dots, n - 1$

คิวบิกสไปลน์มีข้อกำหนดดังนี้

1. ส่วนประกอบของ $S(x)$ ต้องแทนตำแหน่งข้อมูลได้ทั้งหมด
2. $S(x)$ ต้องมีความต่อเนื่องในช่วงระหว่าง $[x_1, x_n]$
3. $S'(x)$ ต้องมีความต่อเนื่องในช่วงระหว่าง $[x_1, x_n]$
4. $S''(x)$ ต้องมีความต่อเนื่องในช่วงระหว่าง $[x_1, x_n]$

เนื่องด้วยแต่ละท่อนเป็นส่วนประกอบ $S(x)$ การประมาณค่าตำแหน่งข้อมูลทั้งหมด, สามารถสรุปได้โดย

$$S(x_i) = y_i \quad (3.5)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n - 1$. ตั้งแต่ $x_i \in [x_i, x_{i+1}]$, $S(x_i) = s_i(x_i)$ และสามารถใช้สมการ (3.2) แสดงดังนี้

$$\begin{aligned} y_i &= s_i(x_i) \\ y_i &= a_i(x_i - x_i)^3 + b_i(x_i - x_i)^2 + c_i(x_i - x_i) + d_i \\ y_i &= d_i \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

เนื่องด้วย เส้นโค้ง $S(x)$ ต้องมีความต่อเนื่องของระหว่างช่วงทั้งหมด จึงสามารถสรุป โดยต้องนำตำแหน่งข้อมูลทั้งหมดมารวมกัน ดังนี้

$$s_i(x_i) = s_{i-1}(x_i) \quad (3.7)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

จากสมการ (3.2),

$$s_i(x_i) = d_i \quad (3.8)$$

และ

$$s_{i-1}(x_i) = a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^3 + b_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + c_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + d_{i-1}$$

ดังนั้น

$$d_i = a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^3 + b_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + c_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + d_{i-1} \quad (3.9)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n - 1$. ให้ $h = x_i - x_{i-1}$ ในสมการที่ (3.8) จะได้

$$d_i = a_{i-1}h^3 + b_{i-1}h^2 + c_{i-1}h + d_{i-1} \quad (3.10)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$.

เนื่องจาก การทำให้กราฟเรียบ อนุพันธ์ต้องเท่ากันกับตำแหน่งข้อมูล นั่นคือ

$$s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i) \quad (3.11)$$

อย่างไรก็ตาม ใช้สมการ (3.3)

$$s'_i(x_i) = c_i$$

และ

$$s'_{i-1}(x_i) = 3a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + c_{i-1}$$

ดังนั้น

$$c_i = 3a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + c_{i-1} \quad (3.12)$$

ให้ $h = x_i - x_{i-1}$, เราต้องเข้าใจสมการ

$$c_i = 3a_{i-1}h^2 + 2b_{i-1}h + c_{i-1} \quad (3.13)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$.

จากสมการ

$$(3.4), s'_i(x) = 6a_i(x - x_i) + 2b_i \quad \text{ดังนั้น}$$

$$s''_i(x) = 6a_i$$

$$s''_i(x_i) = 6a_i(x_i - x_i) + 2b_i$$

$$s''_i(x_i) = 2b_i$$

(3.14)

โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$.

สรุปเนื่องจาก $s''_i(x)$ มีความต่อเนื่องระหว่างช่วง $s''_i(x_i) = s''_{i+1}(x_i)$ โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$. สมการ(3.14) ใช้เป็นสมการหลัก

$$s''_i(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \quad (3.15)$$

$$s''_{i+1}(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \quad (3.16)$$

ให้ $h = x_{i+1} - x_i$ สรุปการใช้รูปแบบสมการ (3.14) และ (3.16)

$$s''_{i+1}(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \quad (3.17)$$

$$2b_{i+1} = 6a_i h + 2b_i \quad (3.18)$$

$$s_i''(x_i) = 2b_i \quad (3.19)$$

$$M_i = 2b_i$$

$$b_i = \frac{M_i}{2}$$

และ d , ถูกกำหนด โดย

$$d_i = y_i \quad (3.20)$$

สมการ a , สามารถเขียนดังนี้

$$2b_{i+1} = 6a_i h + 2b_i \quad (3.21)$$

$$6a_i h = 2b_{i+1} - 2b_i$$

$$a_i = \frac{2b_{i+1} - 2b_i}{6h}$$

$$a_i = \frac{2\left(\frac{M_{i+1}}{2}\right) - 2\left(\frac{M_i}{2}\right)}{6h}$$

$$a_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{6h}$$

และ c , สามารถเขียนดังนี้

$$d_{i+1} = a_i h^3 + b_i h^2 + c_i h + d_i \quad (3.22)$$

$$c_i h = -a_i h^3 - b_i h^2 - d_i + d_{i+1}$$

$$c_i = \frac{-a_i h^3 - b_i h^2 - d_i + d_{i+1}}{h}$$

$$c_i = \frac{-a_i h^3 - b_i h^2}{h} + \frac{-d_i + d_{i+1}}{h}$$

$$c_i = (-a_i h^2 - b_i h) - \frac{d_i - d_{i+1}}{h}$$

$$c_i = -\left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6h} h^2 + \frac{M_i}{2} h\right) - \frac{y_i - y_{i+1}}{h}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6} h + \frac{3M_i}{6} h \right)$$

$$c_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} - M_i + 3M_i}{6} \right) h$$

$$c_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6} \right) h$$

เรามีสมการที่กำหนดน้ำหนักโดย $n-1$ ดังสมการ

$$a_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{6h} \quad (3.23)$$

$$b_i = \frac{M_i}{2}$$

$$c_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6} \right) h$$

$$d_i = y_i$$

ระบบนี้สามารถใช้รูปแบบเมตริกซ์ที่เหมาะสม ดังนี้

$$c_{i+1} = 3a_i h^2 + 2b_i h + c_i \quad (3.24)$$

$$3\left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6h}\right)h^2 + 2\left(\frac{M_i}{2}\right)h + \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6}\right)h = \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h} - \left(\frac{M_{i+2} + 2M_{i+1}}{6}\right)h$$

$$3\left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6h}\right)h^2 + 2\left(\frac{M_i}{2}\right)h - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6}\right)h + \left(\frac{M_{i+2} + 2M_{i+1}}{6}\right)h = -\frac{y_{i+1} - y_i}{h} + \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h}$$

$$h\left(\frac{3M_{i+1} - 3M_i}{6h} + \frac{6M_i}{6} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6}\right) + \left(\frac{M_{i+2} + 2M_{i+1}}{6}\right)\right) = \frac{y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}}{h}$$

$$\frac{h}{6}(M_i + 4M_{i+1} + M_{i+2}) = \frac{y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}}{h}$$

$$(M_i + 4M_{i+1} + M_{i+2}) = 6\left(\frac{y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}}{h^2}\right)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n-1$.

ซึ่งสมการหลักของเมตริกซ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \frac{6}{h^2} \begin{bmatrix} y_1 - 2y_2 + y_3 \\ y_2 - 2y_3 + y_4 \\ y_3 - 2y_4 + y_5 \\ \vdots \\ y_{n-4} - 2y_{n-3} + y_{n-2} \\ y_{n-3} - 2y_{n-2} + y_{n-1} \\ y_{n-2} - 2y_{n-1} + y_n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ระบบนี้มี $n-2$ เป็นแถว และ n เป็นหลัก และภายใต้การกำหนด โดยทั่วไปมีลักษณะเฉพาะของคิวบิกสไปลอนที่มีเงื่อนไขต้องกำหนดดังนี้

$$M_1 = M_n = 0 \quad (3.26)$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{6}{h^2} \begin{bmatrix} y_1 - 2y_2 + y_3 \\ y_2 - 2y_3 + y_4 \\ y_3 - 2y_4 + y_5 \\ \vdots \\ y_{n-4} - 2y_{n-3} + y_{n-2} \\ y_{n-3} - 2y_{n-2} + y_{n-1} \\ y_{n-2} - 2y_{n-1} + y_n \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

หลักแรกและหลักสุดท้ายของเมทริกซ์สามารถกำจัดได้ โดย M_1 และ M_n มีลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเป็นศูนย์ทั้งคู่

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{6}{h^2} \begin{bmatrix} y_1 - 2y_2 + y_3 \\ y_2 - 2y_3 + y_4 \\ y_3 - 2y_4 + y_5 \\ \vdots \\ y_{n-4} - 2y_{n-3} + y_{n-2} \\ y_{n-3} - 2y_{n-2} + y_{n-1} \\ y_{n-2} - 2y_{n-1} + y_n \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

ผลลัพธ์จะได้ขนาด $n-2$ เมตริกซ์ ซึ่งสามารถนำไปหาค่า a_i, b_i, c_i และ d_i แต่ละท่อนได้

3.3 ตัวอย่างการใช้งาน

ตัวอย่างที่ 3.1

หาสไปลน์โดยกำหนดจุดคังนี้ $(0, 0)$, $(1, 0.5)$, $(2, 2)$, และ $(3, 1.5)$

วิธีทำ

สมการ (3.28) เราสามารถหา M_2 and M_3 คือ

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \frac{6}{1^2} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.4 \\ -3.6 \end{bmatrix}$$

โดยลักษณะของ Natural spline $M_1 = M_4 = 0$, เราสามารถใช้สมการ (3.23) ได้
คังนี้คือ

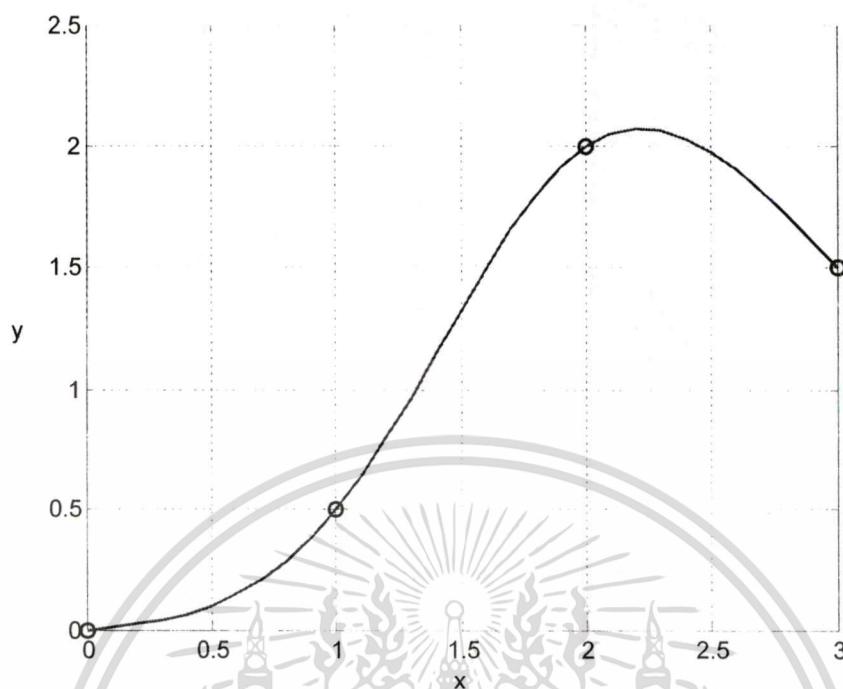
$$s_1(x) = 0.4x^3 + 0.1x \quad \text{for } 0 \leq x \leq 1$$

$$s_2(x) = -(x-1)^3 + 1.2(x-1)^2 + 1.3(x-1) + 0.5 \quad \text{for } 1 \leq x \leq 2$$

$$s_3(x) = 0.6(x-2)^3 - 1.8(x-2)^2 + 0.7(x-2) + 2 \quad \text{for } 2 \leq x \leq 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ได้จากสไปลน์แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟที่ได้จากการใช้สไปลน์ประมาณค่าในช่วงข้อมูล

3.4 สรุป

คิวบิกสไปลน์เป็นวิธีในการประมาณในช่วงข้อมูลวิธีหนึ่ง ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการพหุนามลำดับสาม โดยในการหาคำตอบนั้นจะใช้สัมประสิทธิ์ของแต่ละท่อนในการหาคำตอบ แต่จะมีเงื่อนไขว่าข้อมูลนั้นจะต้องต่อเนื่องกันและการใช้งานจะได้ผลดีกับข้อมูลที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง

บทที่ 4

การประมาณค่าแรงบิดขณะหนึ่ง

4.1 บทนำ

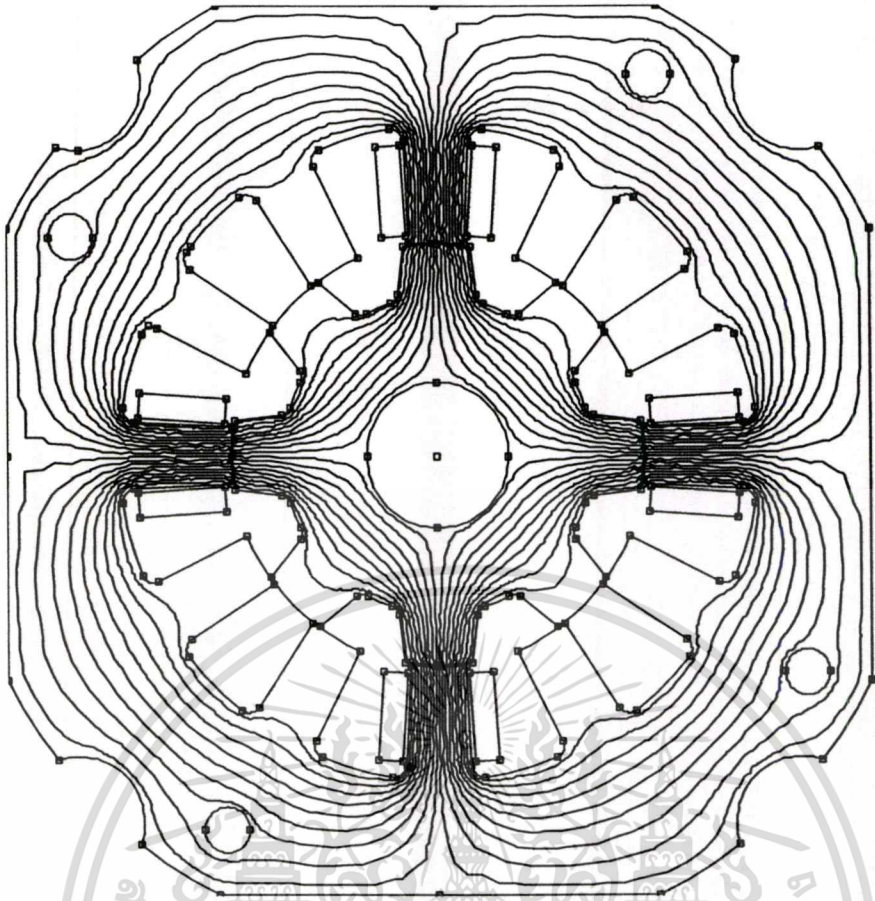
การประมาณค่าแรงบิดในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีจำลองสมการแรงบิดขึ้นมาใหม่จากสมการพื้นฐานเดิม และได้นำเทคนิคคิวบิกสไปไลน์ในการประมาณค่าในช่วงข้อมูล ดังนั้นวิธีการนำเสนอจึงทำให้มีความเร็วในการประมาณผล และทำการเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กของ SRM นั้นไม่ต้องเก็บข้อมูลมาก

4.2 วิธีการประมาณค่าแรงบิด และลำดับขั้นตอนการประเมินค่าแรงบิด

ลำดับวิธีการสำหรับประมาณค่าแรงบิดนั้น จะต้องทำการเก็บข้อมูลคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM ก่อนจากนั้นแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการหาเส้นกราฟที่แทนค่าข้อมูล (Curves Fitting) โดยค่าที่ได้จะมีเฉพาะตรงจุดที่ทำเส้นกราฟที่แทนค่าข้อมูล ซึ่งในการประมาณค่าแรงบิดเราจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางแม่เหล็กทุกตำแหน่ง ดังนั้นจึงใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วงโดยนำคิวบิกสไปไลน์มาหาค่าระหว่างจุด จึงทำให้เราทราบค่าได้ทุกตำแหน่ง จากนั้นนำสมการที่จำลองขึ้นไปแทนในสมการแรงบิดพื้นฐานและจะได้สมการแรงบิดใหม่ โดยสมการแรงบิดใหม่ที่ได้นั้น จะอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปไลน์โดยค่าแรงบิดนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสขดลวดแต่ละเฟสและตำแหน่งโรเตอร์ ดังนั้นสิ่งที่ต้องทราบในการประมาณค่าแรงบิดวิธีนี้คือ กระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์

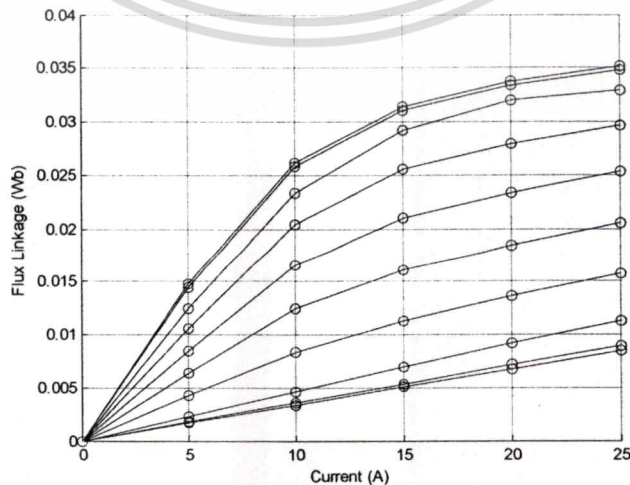
4.2.1 การใช้โปรแกรม FEA เก็บข้อมูลคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

ในการเก็บข้อมูลคุณสมบัติทางแม่เหล็กจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยโดยโปรแกรมที่ใช้คือ FEA ซึ่งเราจะวาดลักษณะมอเตอร์เป็น 2 มิติและกำหนดความลึกซึ่งเป็นมิติที่สาม จากนั้นกำหนดชนิดของโลหะหรือวัสดุลงไปแล้วกำหนดตัวนำและทิศทางของกระแสขดลวด โดยค่ากระแสขดลวดสามารถกำหนดได้เช่นกัน แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดง SRM ที่จำลองอยู่บน FEA และเส้นแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่ง 0 องศา

ในการเก็บข้อมูลจะเก็บค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้ำเกี่ยว (Flux linkage) ที่ตำแหน่งมอเตอร์ทั้งหมด 19 ตำแหน่งจาก $0^\circ - 45^\circ$ โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 2.5° และแต่ละตำแหน่งจะเก็บที่ค่ากระแส 6 ค่าคือ 0, 5, 10, 15, 20, และ 25 ดังรูปที่ 4.2

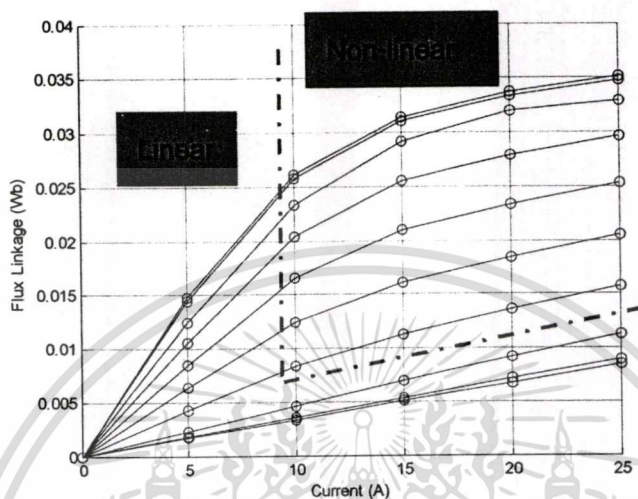


รูปที่ 4.2 แสดงค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้ำเกี่ยว ที่ได้จาก FEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้องเกี่ยว และการทำ Curves Fitting

เมื่อได้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้องเกี่ยว (λ_x) จากการเก็บข้อมูล ลำดับต่อไปคือการจำลองค่าที่ได้มาด้วยสมการ โดยในการเลือกสมการนั้นจะต้องพิจารณาจากข้อมูล ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.3 แสดงส่วนเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้องเกี่ยวที่ได้จาก FEA

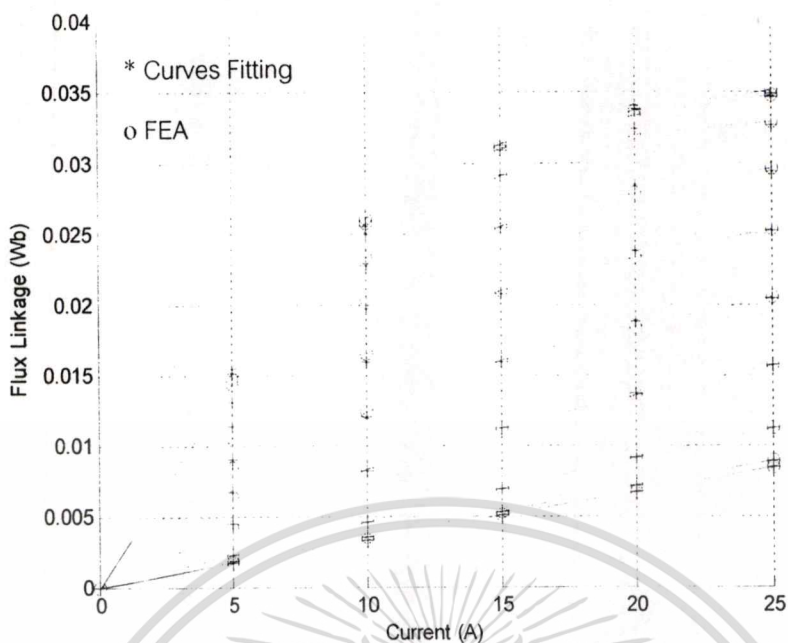
ดังนั้นในการเลือกสมการจะต้องประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ในที่นี้จะเลือกสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการพหุนาม (polynomial equation) ลำดับสาม ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่มีอยู่จะเห็นว่าส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเป็นแค่เส้นโค้งธรรมดา ดังนั้นสมการพหุนามลำดับสามจึงเพียงพอที่จะจำลองข้อมูล

$$\lambda(i, \theta) = a_1(\theta)i + a_2(\theta)i^2 + a_3(\theta)i^3 \quad (4.1)$$

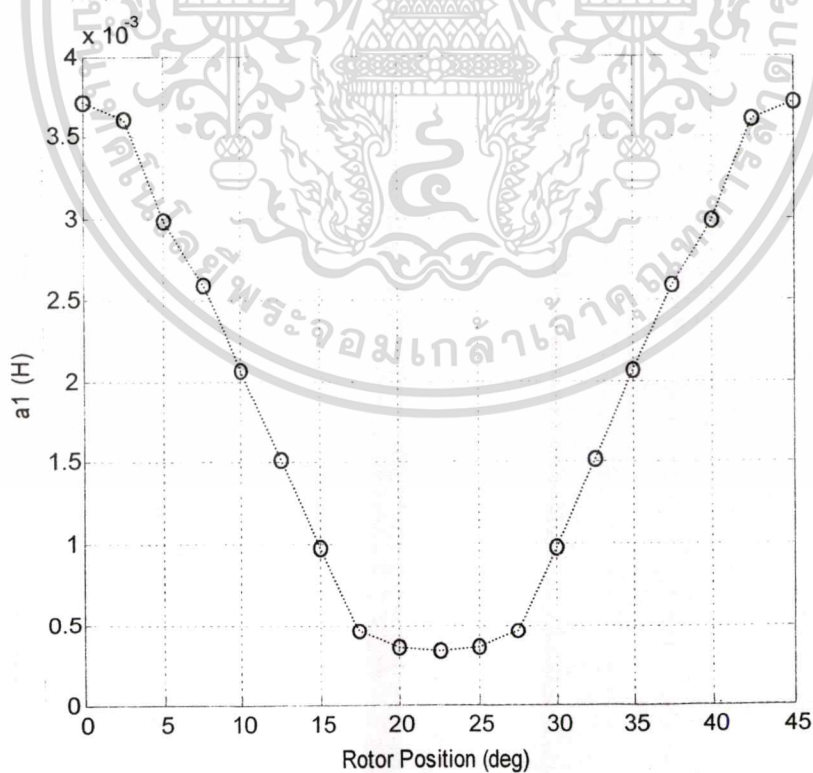
และเหตุผลอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญในการเลือกใช้สมการพหุนามคือ ในการหาค่าแรงบิด จะต้องทำการหาค่าอนุพันธ์ ซึ่งถ้าอยู่ในรูปสมการพหุนามจะสามารถทำได้ง่าย

จากนั้นใช้วิธีการ Curve Fitting หาค่าจุด $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ ที่แทนในสมการที่ 4.1 แล้วได้ $\lambda(i, \theta)$ ทับกับจุดที่ได้จาก FEA แต่ถ้าขั้นตอนนี้ไม่สามารถทำให้จุดที่ได้จากการทำ Curve Fitting ทับหรือใกล้เคียงกับจุดที่ได้จาก FEA ได้ แสดงว่าสมการที่เลือกใช้ไม่เหมาะสมหรืออาจจะต้องเพิ่มลำดับของสมการพหุนาม แต่ในที่นี้ทับกันดี แสดงว่าสมการที่เลือกสามารถใช้ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 และค่า $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ แสดงดังรูปที่ 4.5,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

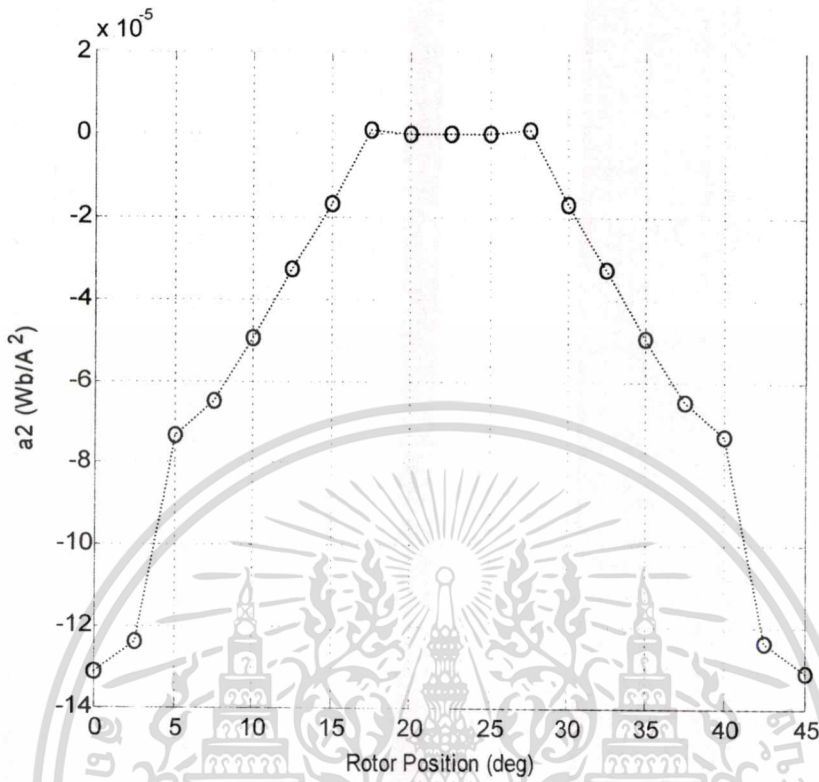


รูปที่ 4.4 แสดงค่าเส้นแรงแม่เหล็กคี่ที่เกี่ยวข้องที่ได้จาก FEA และ Curve Fitting

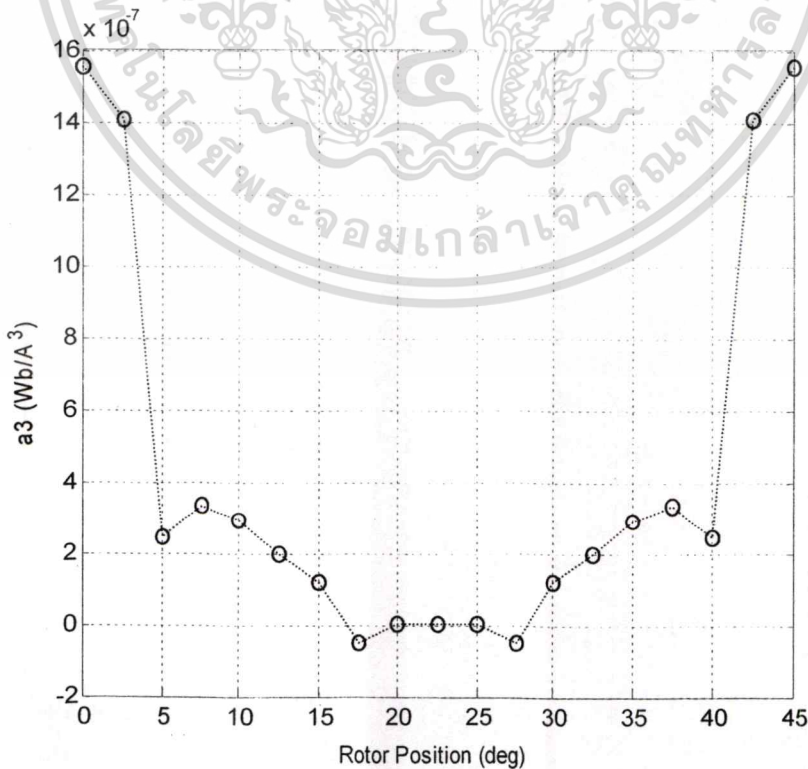


รูปที่ 4.5 แสดงค่า $a_1(\theta)$ ที่ได้จากการทำ Curve Fitting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงค่า $a_2(\theta)$ ที่ได้จากการทำ Curve Fitting



รูปที่ 4.7 แสดงค่า $a_3(\theta)$ ที่ได้จากการทำ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานที่วารสารศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การนำเทคนิคการประมาณค่าในช่วงโดยคิวกิสไปลดมาใช้งาน

จากขั้นตอนที่ผ่านมาเราทราบว่า $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ เฉพาะจุดที่ทำ Curve-Fitting เท่านั้น แต่เราไม่ทราบค่าระหว่างจุด เพราะฉะนั้นในการหาค่าระหว่างจุดเราจึงใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วงโดยคิวกิสไปลดในการหาค่าระหว่างจุด

จากค่า $a_1(\theta)$ เรามีข้อมูลทั้งหมด 19 จุดสามารถแบ่งได้เป็น 18 ท่อนในแต่ละท่อนจะมีสัมประสิทธิ์ 1 ชุดคือ A_i, B_i, C_i และ D_i ซึ่งจะนำมาหาค่าแต่ละตำแหน่งในแต่ละช่วงด้วยสมการที่ 4.2

$$Y_i(x) = A_i + B_i x + C_i x^2 + D_i x^3 \quad (4.2)$$

เมื่อ A_i, B_i, C_i, D_i คือ สัมประสิทธิ์ของคิวกิสไปลด
 x เป็น พารามิเตอร์ $\in [0,1]$

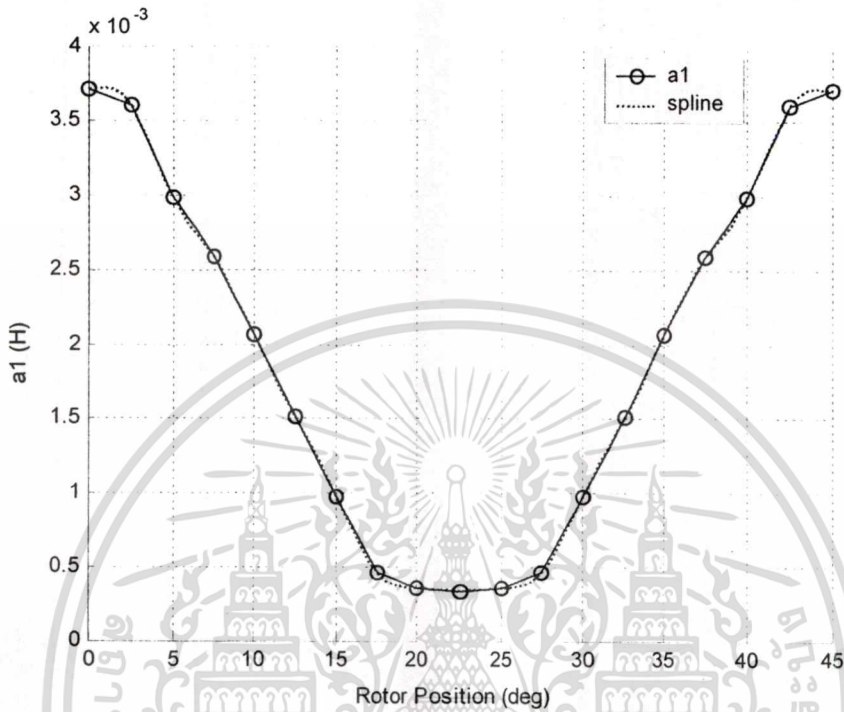
ดังนั้น $a_1(\theta)$ จะมีสัมประสิทธิ์ 18 ชุด $a_2(\theta)$ จะมีสัมประสิทธิ์ 18 ชุด และ $a_3(\theta)$ จะมีสัมประสิทธิ์ 18 ชุดเช่นเดียวกัน แต่ละชุดจะมี 4 ค่าเพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์ของคิวกิสไปลดทั้งหมดของ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ คือ 216 ค่าแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของคิวกิสไปลดทั้งหมดของ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$

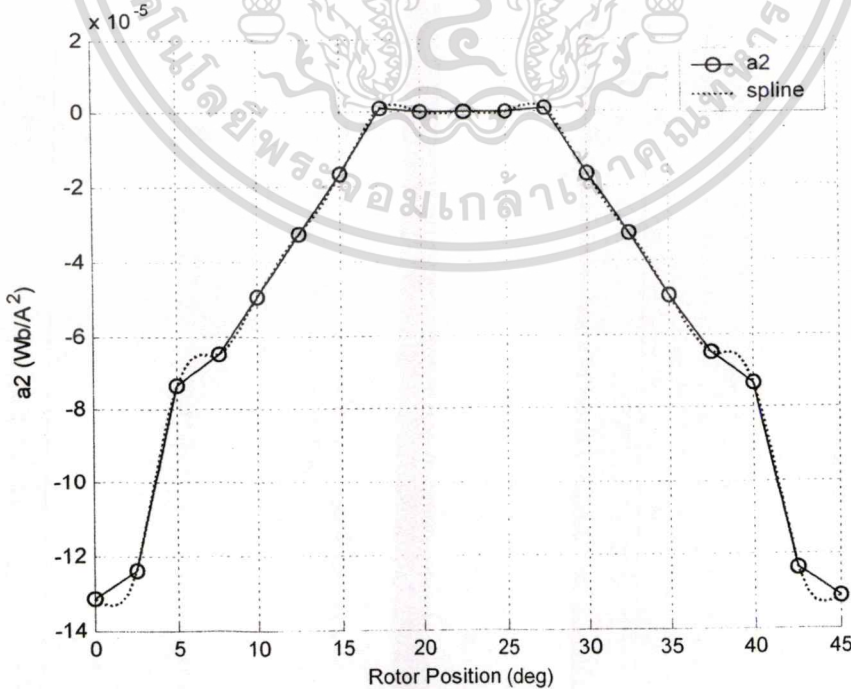
$a_1(\theta)$				$a_2(\theta)$				$a_3(\theta)$			
A_i	B_i	C_i	D_i	A_i	B_i	C_i	D_i	A_i	B_i	C_i	D_i
-1.01E-05	0	2.33E-05	3.71E-03	9.54E-07	0	-3.08E-06	-1.31E-04	-2.34E-08	0	8.82E-08	1.55E-06
1.73E-05	-7.61E-05	-1.67E-04	3.61E-03	-1.97E-06	7.15E-06	1.48E-05	-1.24E-04	5.16E-08	-1.75E-07	-3.50E-07	1.41E-06
-1.13E-05	5.38E-05	-2.23E-04	2.99E-03	1.40E-06	-7.62E-06	1.36E-05	-7.31E-05	-3.77E-08	2.12E-07	-2.59E-07	2.44E-07
4.66E-06	-3.06E-05	-1.65E-04	2.59E-03	-4.50E-07	2.88E-06	1.78E-06	-6.48E-05	1.08E-08	-7.11E-08	9.37E-08	3.33E-07
-6.62E-08	4.40E-06	-2.30E-04	2.06E-03	3.13E-08	-4.92E-07	7.75E-06	-4.94E-05	-6.77E-10	9.87E-09	-5.93E-08	2.92E-07
-2.27E-06	3.90E-06	-2.09E-04	1.51E-03	1.70E-07	-2.57E-07	5.87E-06	-3.26E-05	-3.34E-09	4.79E-09	-2.26E-08	1.95E-07
9.13E-06	-1.31E-05	-2.32E-04	9.78E-04	-5.06E-07	1.02E-06	7.78E-06	-1.69E-05	7.37E-09	-2.03E-08	-6.14E-08	1.16E-07
-8.23E-06	5.54E-05	-1.27E-04	4.58E-04	4.94E-07	-2.77E-06	3.41E-06	1.07E-06	-6.91E-09	3.50E-08	-2.46E-08	-4.93E-08
1.91E-06	-6.35E-06	-4.13E-06	3.58E-04	-1.87E-07	9.36E-07	-1.17E-06	7.17E-09	3.36E-09	-1.68E-08	2.10E-08	1.82E-10
-1.91E-06	8.00E-06	0.00E+00	3.38E-04	1.87E-07	-4.67E-07	1.39E-22	3.72E-09	-3.36E-09	8.38E-09	1.46E-24	2.11E-10
8.23E-06	-6.35E-06	4.13E-06	3.58E-04	-4.94E-07	9.36E-07	1.17E-06	7.17E-09	6.91E-09	-1.68E-08	-2.10E-08	1.82E-10
-9.13E-06	5.54E-05	1.27E-04	4.58E-04	5.06E-07	-2.77E-06	-3.41E-06	1.07E-06	-7.37E-09	3.50E-08	2.46E-08	-4.93E-08
2.27E-06	-1.31E-05	2.32E-04	9.78E-04	-1.70E-07	1.02E-06	-7.78E-06	-1.69E-05	3.34E-09	-2.03E-08	6.14E-08	1.16E-07
6.62E-08	3.90E-06	2.09E-04	1.51E-03	-3.13E-08	-2.57E-07	-5.87E-06	-3.26E-05	6.77E-10	4.79E-09	2.26E-08	1.95E-07
-4.66E-06	4.40E-06	2.30E-04	2.06E-03	4.50E-07	-4.92E-07	-7.75E-06	-4.94E-05	-1.08E-08	9.87E-09	5.93E-08	2.92E-07
1.13E-05	-3.06E-05	1.65E-04	2.59E-03	-1.40E-06	2.88E-06	-1.78E-06	-6.48E-05	3.77E-08	-7.11E-08	-9.37E-08	3.33E-07
-1.73E-05	5.38E-05	2.23E-04	2.99E-03	1.97E-06	-7.62E-06	-1.36E-05	-7.31E-05	-5.16E-08	2.12E-07	2.59E-07	2.44E-07
1.01E-05	-7.61E-05	1.67E-04	3.61E-03	-9.54E-07	7.15E-06	-1.48E-05	-1.24E-04	2.34E-08	-1.75E-07	3.50E-07	1.41E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสัมประสิทธิ์ของคิวกิตสไปลน์ ทั้งหมดมาใช้หาค่าทุกตำแหน่งก็จะได้ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ ดังรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าสามารถหาได้ทุกตำแหน่งโดยใช้สัมประสิทธิ์ของแต่ละท่อน ซึ่งเราจะแทนค่า x ในสมการด้วยค่าในระหว่าง 0 ถึง 1



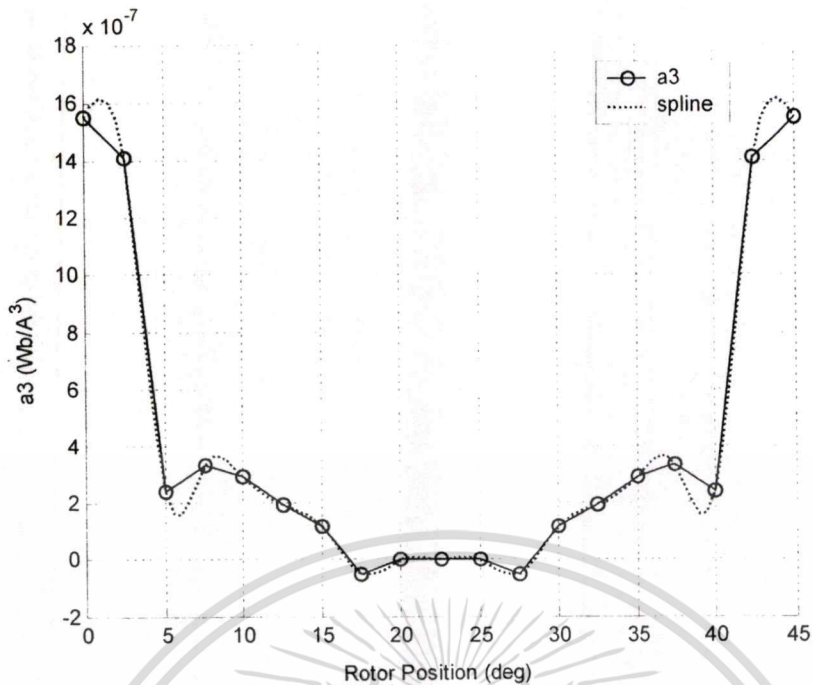
รูปที่ 4.8 แสดงค่า $a_1(\theta)$ ที่ได้จากการทำ Curve Fitting และการใช้สัมประสิทธิ์ของสไปลน์



รูปที่ 4.9 แสดงค่า $a_2(\theta)$ ที่ได้จากการทำ Curve Fitting และการใช้สัมประสิทธิ์ของสไปลน์

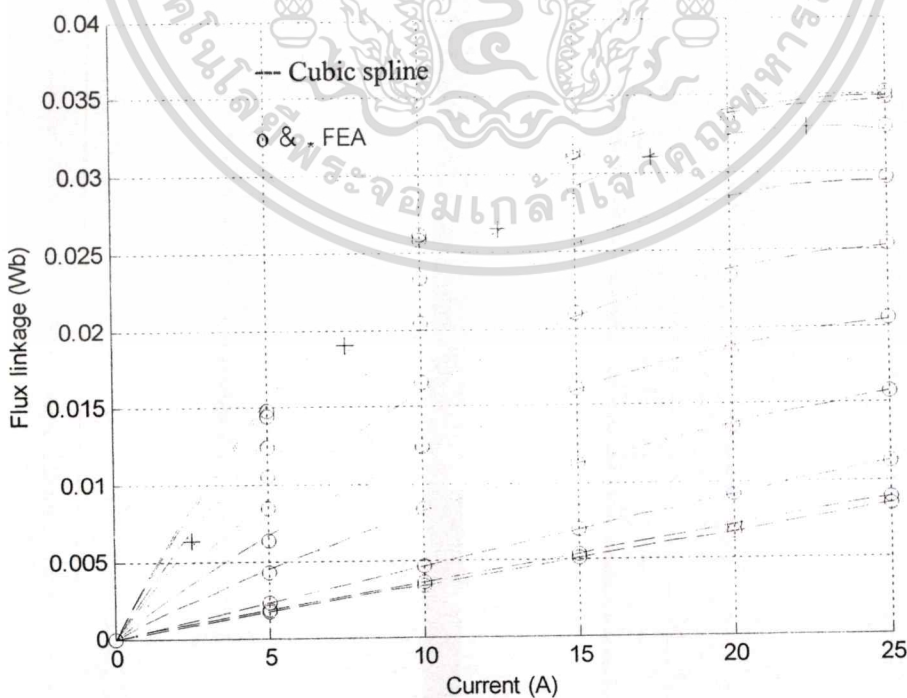
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงค่า $a_2(\theta)$ ที่ได้จากการทำ Curve Fitting และการใช้สัมประสิทธิ์ของสไปน์

เมื่อเราทราบค่า $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, และ $a_3(\theta)$ ทุกจุดแล้วเมื่อนำไปแทนค่าในสมการ เส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งเกี่ยว (λ_x) ที่เราจำลองขึ้นก็จะทำให้สามารถหาค่า λ_x ได้ทุกๆ ตำแหน่งและทุกๆ ค่ากระแส ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดง Magnetizing curves ที่ได้จาก FEA และจากการใช้สัมประสิทธิ์คิวบิกสไปน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการเผยแพร่ทางอื่น ยกเว้นที่พิมพ์เผยแพร่แบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กค้ำยันที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการใช้ สัมประสิทธิ์คิวบิกสไปล์นั้นลากผ่านจุดที่ได้จาก FEA ทุกจุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการจำลองเส้นแรงแม่เหล็กค้ำยันนั้นมีความถูกต้องจึงสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าแรงบิดได้ต่อไป

4.2.4 การประมาณค่าแรงบิดโดยใช้สัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปล์

ในการประมาณค่าแรงบิดนั้นจะใช้สมการหาค่าแรงบิดพื้นฐานดังสมการที่ 4.3 ซึ่งจากสมการจะเห็นว่าอยู่ในรูปของเส้นแรงแม่เหล็กค้ำยัน ดังนั้นเราจึงแทนสมการแรงบิดนี้ด้วยสมการ เส้นแรงแม่เหล็กค้ำยันที่เราจำลองขึ้น จะได้สมการหาค่าแรงบิดใหม่ดังสมการที่ 4.4

$$T_x = \frac{\partial}{\partial \theta_x} \int_0^{l_x} \lambda_x(i_x, \theta_x) di \quad (4.3)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{da_1(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{3} i^3 \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{4} i^4 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \quad (4.4)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ 4.4 ที่ได้มาจากการแทนสมการที่ 4.1 ลงในสมการที่ 4.3 นั้นเป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าแรงบิดซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการกระแส และอนุพันธ์ของ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ โดยในการหาอนุพันธ์ของ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ นั้นสามารถทำได้ง่ายโดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 4.2 ซึ่งจะได้สมการที่ 4.5

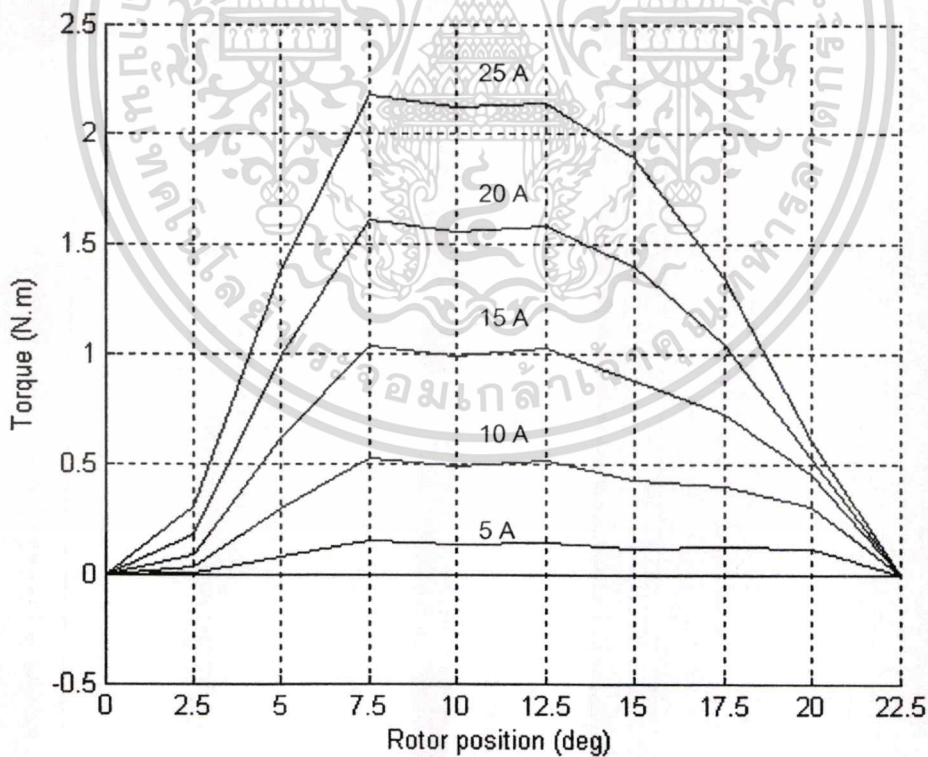
$$Y_i(x) = B_i + 2C_i x + 3D_i x^2 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 จะเห็นว่าในการหาอนุพันธ์จะทำให้ A_i หายไป ดังนั้น A_i เราไม่ต้องใช้และจากค่า $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ สมมาตรเราจึงใช้สัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปล์ช่วง $0 - 25^\circ$ เท่านั้นก็พอ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ที่ใช้ประมาณค่าแรงบิดทั้งหมดเท่ากับ 81 ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลสัมประสิทธิ์ของคิวกิวิตไปลน์ที่ใช้ในการประมาณค่าแรงบิด

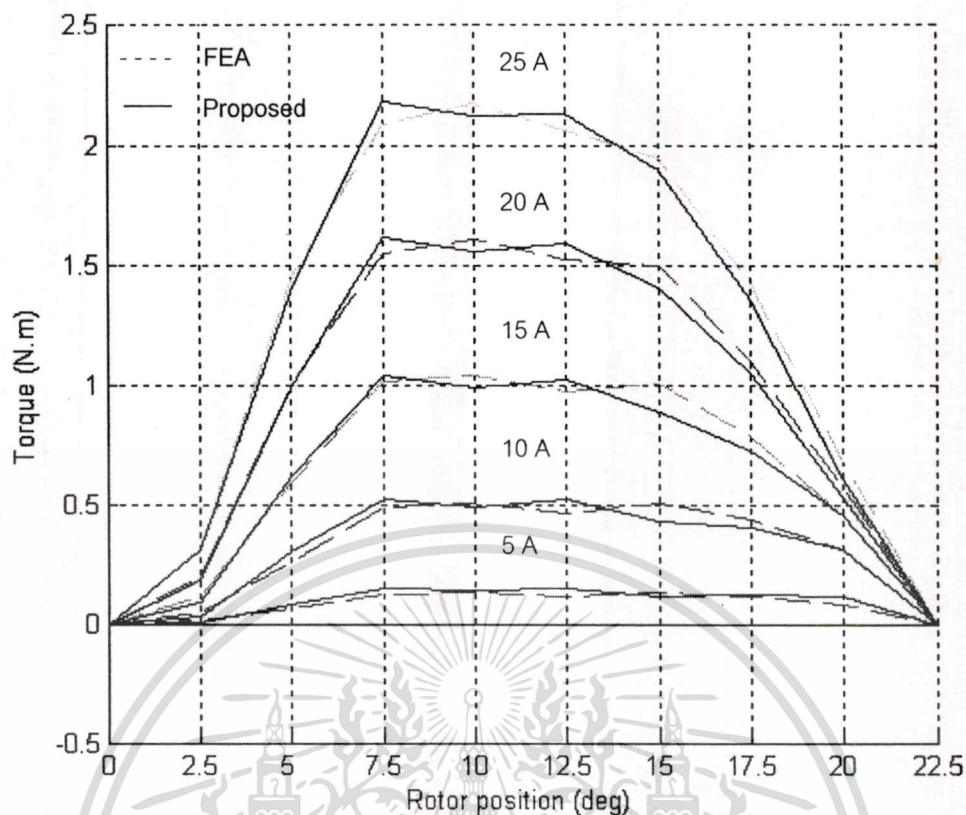
$a_1(\theta)$			$a_2(\theta)$			$a_3(\theta)$		
B_i	C_i	D_i	B_i	C_i	D_i	B_i	C_i	D_i
0	2.33E-05	3.71E-03	0	-3.08E-06	-1.31E-04	0	8.82E-08	1.55E-06
-7.61E-05	-1.67E-04	3.61E-03	7.15E-06	1.48E-05	-1.24E-04	-1.75E-07	-3.50E-07	1.41E-06
5.38E-05	-2.23E-04	2.99E-03	-7.62E-06	1.36E-05	-7.31E-05	2.12E-07	-2.59E-07	2.44E-07
-3.06E-05	-1.65E-04	2.59E-03	2.88E-06	1.78E-06	-6.48E-05	-7.11E-08	9.37E-08	3.33E-07
4.40E-06	-2.30E-04	2.06E-03	-4.92E-07	7.75E-06	-4.94E-05	9.87E-09	-5.93E-08	2.92E-07
3.90E-06	-2.09E-04	1.51E-03	-2.57E-07	5.87E-06	-3.26E-05	4.79E-09	-2.26E-08	1.95E-07
-1.31E-05	-2.32E-04	9.78E-04	1.02E-06	7.78E-06	-1.69E-05	-2.03E-08	-6.14E-08	1.16E-07
5.54E-05	-1.27E-04	4.58E-04	-2.77E-06	3.41E-06	1.07E-06	3.50E-08	-2.46E-08	-4.93E-08
-6.35E-06	-4.13E-06	3.58E-04	9.36E-07	-1.17E-06	7.17E-09	-1.68E-08	2.10E-08	1.82E-10

เพราะฉะนั้นในการหาค่าแรงบิดก็ต้องทราบตำแหน่งของมอเตอร์ และค่ากระแสเฟสโดยสมการที่ 4.4 นั้นจะใช้หาค่าแรงบิดเฟสเท่านั้น โดยการแทนค่ากระแสและตำแหน่งของเฟสนั้นลงไป จากนั้นก็นำแรงบิดแต่ละเฟสรวมกันก็จะได้แรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งรูปที่ 4.12 จะแสดงแรงบิดเฟสของมอเตอร์ที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีข้างต้นที่ 5A, 10A และ 15A



รูปที่ 4.12 แสดงแรงบิดเฟสที่ได้จากการประมาณตามวิธีที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่ได้จากการนำเสนอและที่ได้จาก FEA

จากรูปที่ 4.13 เมื่อนำแรงบิดที่ได้นำเสนอด้วยวิธีการประมาณข้างต้นมาเปรียบเทียบกับแรงบิดที่ได้มาจาก FEA จะเห็นว่าการประมาณมีความถูกต้อง ซึ่งมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่ำกว่า 10% จึงเป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณได้จริง

บทที่ 5

การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำวิธีการประเมินค่าแรงบิดมาจำลองการทำงานด้วย Matlab/Simulink เพื่อทดสอบแบบจำลองของแรงบิดก่อนที่จะนำไปประมาณค่าจริง เพื่อตรวจสอบว่าสามารถใช้งานได้จริงหรือไม่ โดยในการจำลอง (simulation) การทำงานนั้นเราต้องสร้างแบบจำลองโดยรวมของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ขึ้น โดยจะประกอบไปด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ของมอเตอร์และแบบจำลองการขับเคลื่อน ซึ่งแบบจำลองทางพลศาสตร์นั้นจะประกอบไปด้วยแบบจำลองทางไฟฟ้าและแบบจำลองทางกล โดยแบบจำลองทางไฟฟ้านั้นจะใช้วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่นำเสนอในการจำลอง ส่วนแบบจำลองการขับเคลื่อนนั้นก็จะประกอบไปด้วยส่วนควบคุมกระแสและส่วนตรวจจับตำแหน่ง

5.2 การสร้างแบบจำลองของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

มอเตอร์ทุกชนิดสิ่งที่เราได้รับคือแรงบิดและความเร็วของเพลลา ในการจำลองจึงต้องจำลองให้ได้ผลลัพธ์ทั้งแรงบิดและความเร็ว โดยมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นั้นเราจะสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า และเราจะสร้างแบบจำลองทางกลขึ้นมา ซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือความเร็วของมอเตอร์ เมื่อนำแบบจำลองสองส่วนนี้มารวมกันก็จะได้แบบจำลองของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ขึ้น

5.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

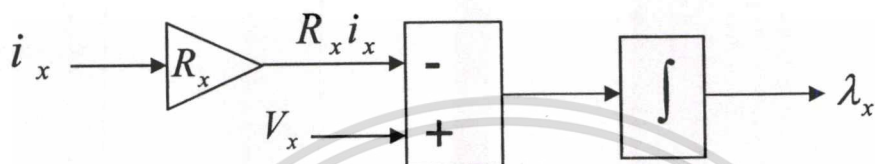
ในการจำลองจะใช้วิธีการประมาณที่นำเสนอในการหาค่าแรงบิดเฟสโดยใช้สมการที่ 4.4 ซึ่งสิ่งที่ต้องการเป็นอินพุตคือ กระแสเฟสและตำแหน่งของเฟส โดยตำแหน่งของเฟสได้มาจากการนำความเร็วเชิงมุมมาทำการอินทิเกรต ส่วนค่ากระแสเราต้องจำลองขึ้นมา โดยในที่นี้จะใช้วิธีเปิดตาราง (Look up Table) ในการเปิดตารางค่ากระแสก็ต้องใช้ค่าอินพุต 2 ค่าคือเส้นแรงคดโค้งเกี่ยว (Flux linkage) และตำแหน่งของเฟส โดยค่าเส้นแรงคดโค้งเกี่ยวนั้นจะประมาณมาจากสมการที่ 5.1

$$\lambda_x = \int (v_x - R_x i_x) \cdot dt \quad (5.1)$$

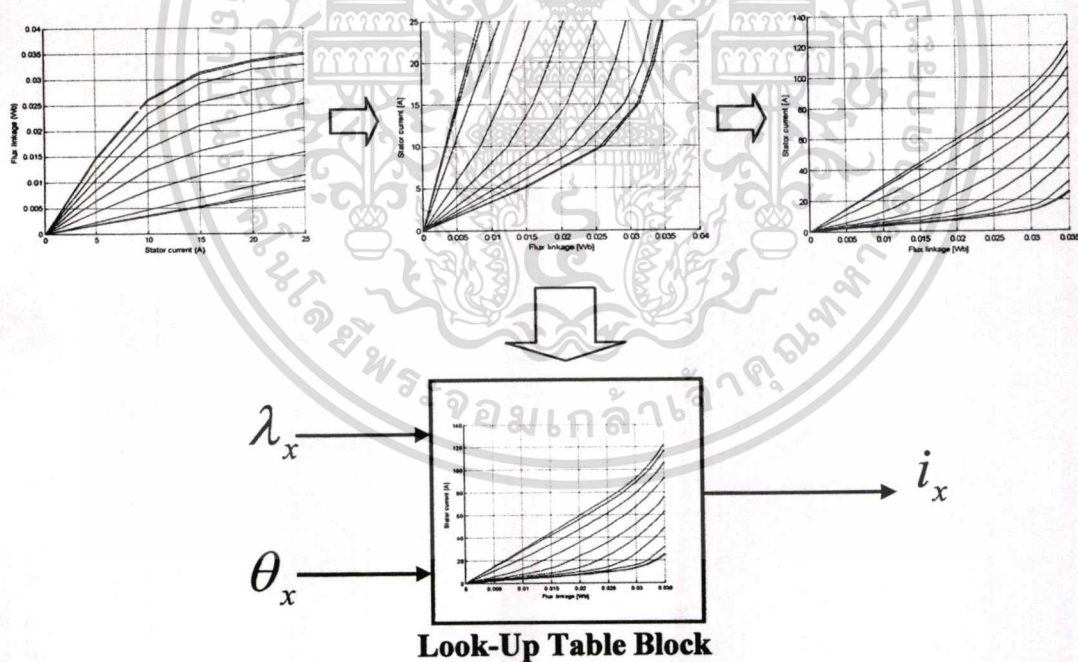
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ λ_x เป็นเส้นแรงค้ำงเกี่ยวแต่ละเฟส
 v_x เป็น แรงค้ำงที่จ้ำยให้กั้บขดลวดแต่ละเฟส
 i_x เป็น กระแสเฟส
 R_x เป็นความค้ำงทานขดลวดแต่ละเฟส

จากสมการที่ 5.1 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรม สำหรับ Matlab / Simulink ได้รูปที่ 5.1



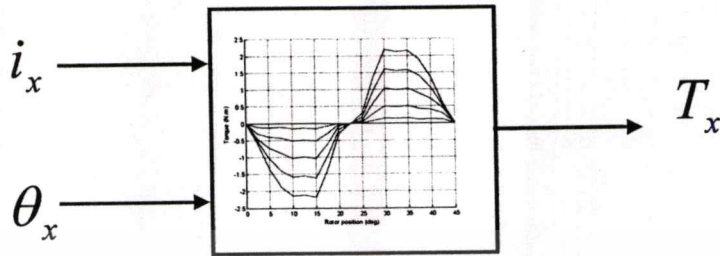
รูปที่ 5.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการประมาณค่า Flux linkage



รูปที่ 5.2 แสดงที่มาของตารางกระแส

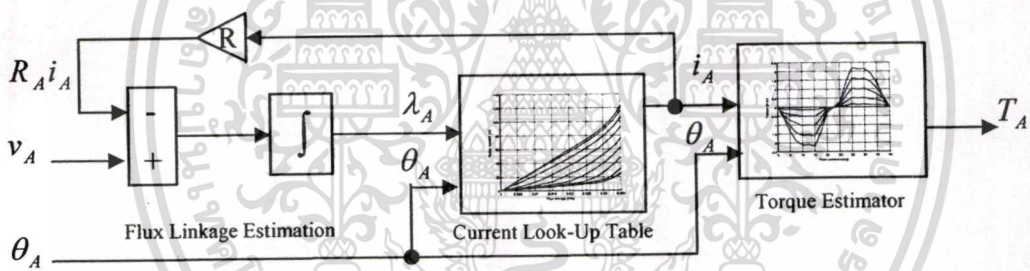
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 ในการจะสร้างตารางของกระแสที่นำตารางของเส้นแรงค้ำเกี่ยวมา กลับแกนและเก็บข้อมูลเพิ่ม ส่วนในการประมาณค่าแรงบิดจะนำสมการที่ 4.4 มาเขียนลงใน S-Function Block ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดง S-Function Block ของการประมาณแรงบิด

เมื่อนำทุกส่วนมารวมกันก็จะได้อบล็อกไออะแกรมสำหรับ Matlab / Simulink ของการจำลองทางไฟฟ้าของเฟส ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงการจำลองทางไฟฟ้าของเฟส A

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าแบบจำลองทางไฟฟ้าของเฟส A นั้น อินพุตก็คือแรงดันที่จ่ายให้กับเฟส A และตำแหน่งของเฟส A โดยในการทดลองจะใช้ SRM ชนิด 3 เฟส ดังนั้นแบบจำลองทางไฟฟ้าของเฟสอื่นก็จะเหมือนกันแต่ต่างกันตรงอินพุตคือจะเป็นของเฟส B และ C

5.2.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์

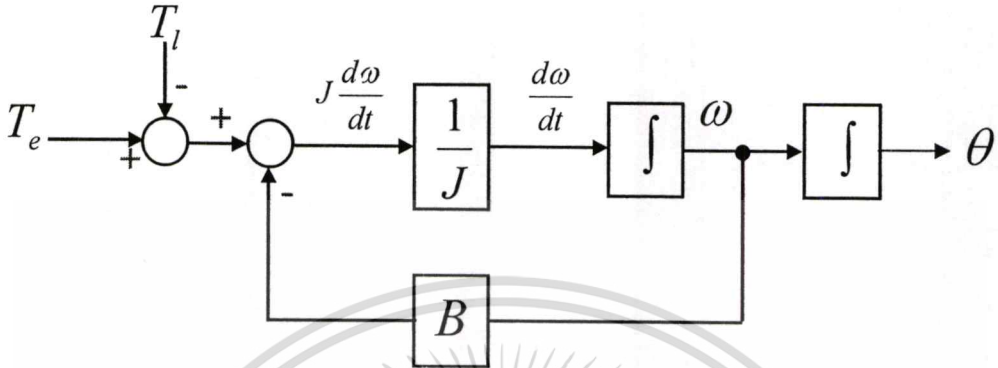
ในการจำลองทางกลจะใช้สมการที่ 5.2 และสมการที่ 5.3 ในการสร้างแบบจำลองสำหรับ Matlab / Simulink โดยความเร็วของมอเตอร์จะใช้สมการที่ 5.3 ในการจำลอง และจะใช้สมการที่ 5.2 ในการหาตำแหน่งของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.5

$$\frac{d\theta_x}{dt} = \omega \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (5.3)$$

$$T_e = \sum_{x=1}^n T_x(\theta, i_x) \quad (5.4)$$

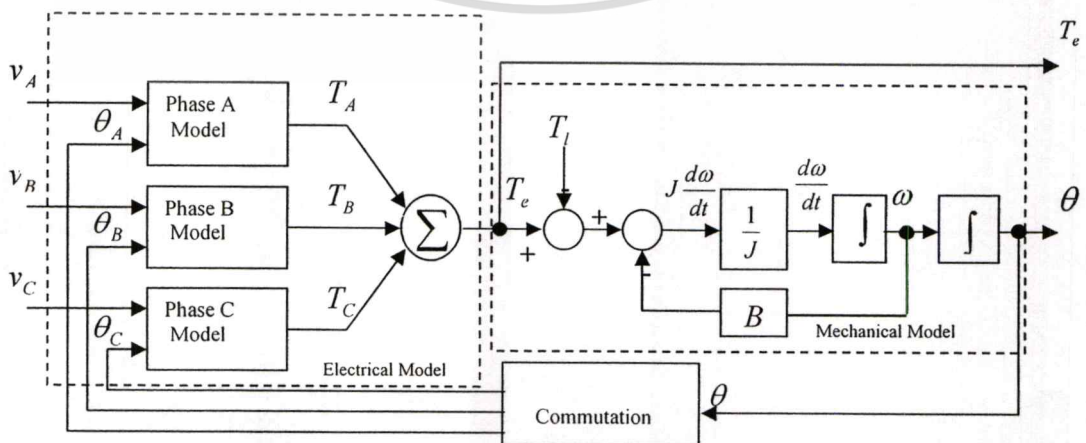


รูปที่ 5.5 แบบจำลองทางกลสำหรับ Matlab / Simulink

จากรูปที่ 5.5 ค่าผลรวมของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) จะได้มาจากการนำแบบจำลองทางไฟฟ้าของแต่ละเฟสมารวมกัน โดยสมการที่ 5.4 ส่วน T_l ก็คือค่าแรงบิดโหลดที่ต่ออยู่กับเพลาและค่า J เป็นโมเมนต์ความเฉื่อย ซึ่งจะได้มา โดยการคำนวณจากขนาดของมู่เล่ย์และโรเตอร์ส่วนค่า B เป็นสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ในที่นี้ได้มาโดยทำการสุ่มค่าในแบบจำลองแล้วดูผลตอบสนองทางพลศาสตร์ แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองของระบบจริงให้มีค่าตรงกัน

5.3 การจำลองทางพลศาสตร์ของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส

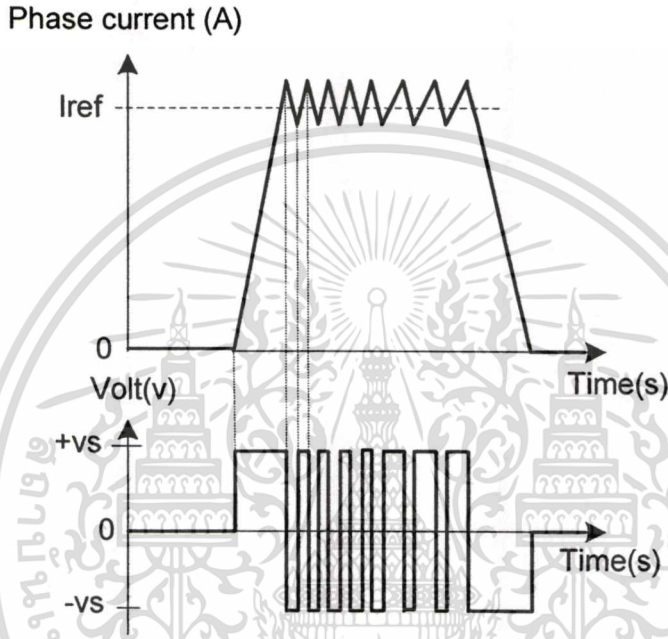
แบบจำลองทางพลศาสตร์นั้นได้มาจากการนำแบบจำลองต่าง ๆ มารวมกัน ซึ่งจะรวมไปถึงระบบควบคุมการขับเคลื่อนด้วย โดยระบบการจำลองทางพลศาสตร์นั้นจะแสดงดังรูปที่ 5.6



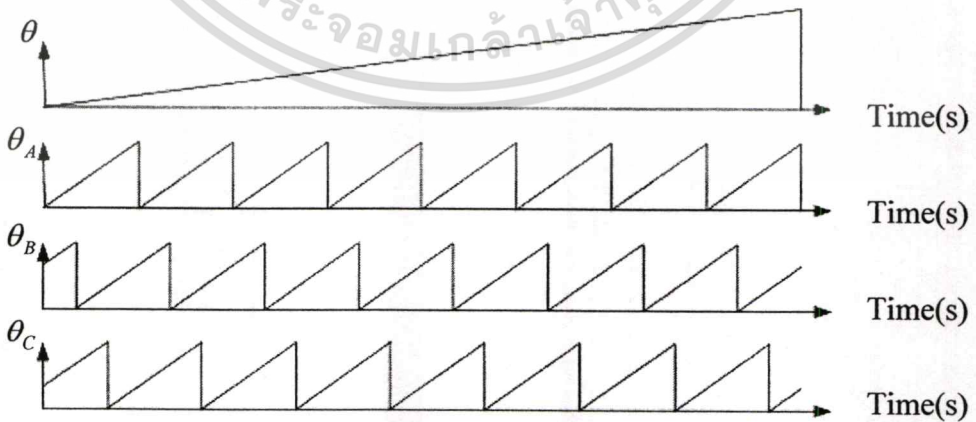
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.6 การจำลองทางพลศาสตร์ของ 3-Phase SRM สำหรับ Matlab / Simulink

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปที่ 5.6 นั้น V_A, V_B และ V_C จะได้มาจากการควบคุมกระแสแบบ ฮิสเตอร์ซิส โดยจะมีค่าเท่ากับบอกลงง่าย เมื่อสวิตช์นำกระแส และจะมีค่าเท่ากับลบลงง่าย เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสในกรณีที่จำลองอินเวอร์เตอร์เป็นแบบทั่วไปคือใช้สวิตช์ 2 ตัวและ ไดโอด 2 ตัว ต่อเฟส แสดงดังรูปที่ 5.7 ในส่วนของ Commutation Block นั้นจะเป็นส่วนที่นำตำแหน่งของมอเตอร์มาหาตำแหน่งของแต่ละเฟสแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบบจำลองทางไฟฟ้าแต่ละเฟส

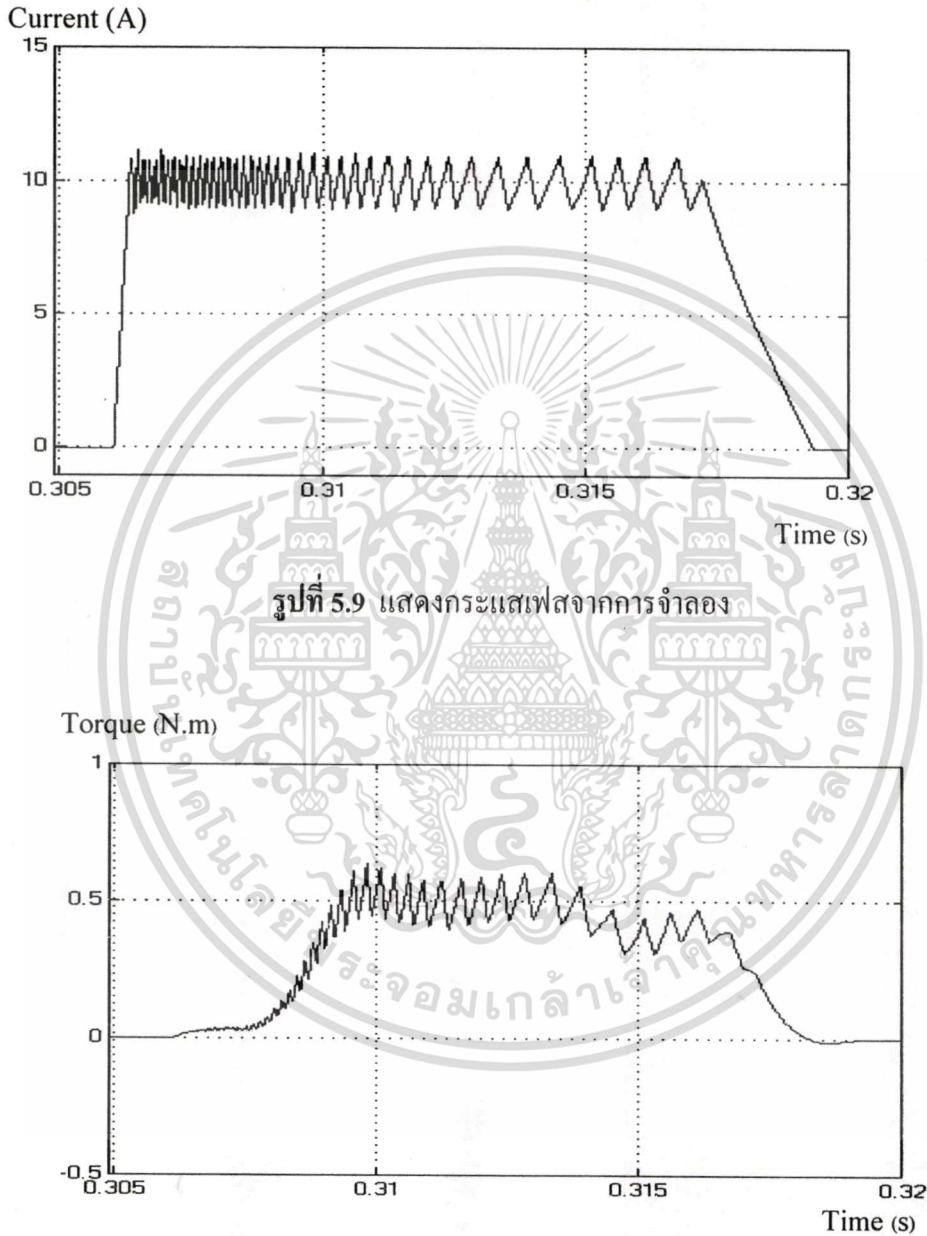


รูปที่ 5.8 แสดงค่า $\theta, \theta_A, \theta_B$ และ θ_C จาก Commutation Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

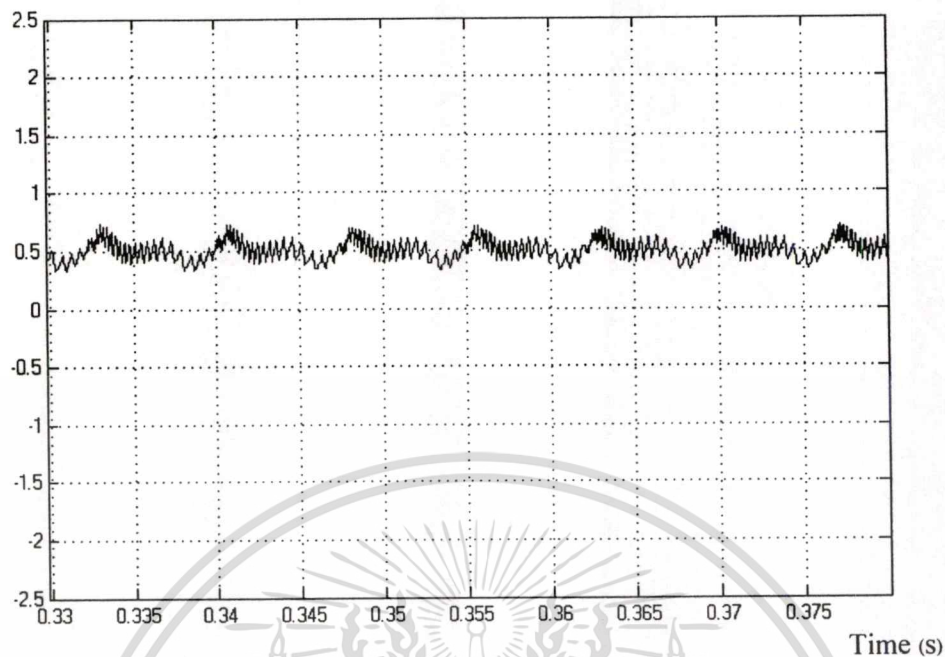
5.4 ผลการทดลอง

ในการทดลองจะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมกระแส โดยจะควบคุมกระแสที่ 10A ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.9 ส่วนค่าแรงบิดที่ประมาณได้แสดงดังรูปที่ 5.10 และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ารวมแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงแรงบิดเฟสจากการจำลอง

Torque (N.m)



รูปที่ 5.11 แสดงค่าผลรวมของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลอง

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดที่ได้มีความถูกต้อง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก FEA ส่วนลักษณะรูปร่างของแรงบิดที่เพิ่มขึ้นนั้นก็เพราะค่าแรงบิดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่ากระแส เมื่อค่ากระแสควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิสกซ์ยอมทำให้ค่ากระแสไม่เรียงดังรูปที่ 5.9 ดังนั้นแรงบิดจึงมีรูปร่างที่เป็นไปตามค่ากระแสด้วย ในการประมาณค่าแรงบิดในการจำลองนั้นจะใช้สมการที่ 4.4 โดยในการทดลองจริงก็จะใช้สมการนี้เหมือนกัน เมื่อในการจำลองมีความถูกต้อง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการประมาณแรงบิดที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้ได้ในการทดลองจริง

บทที่ 6

การทดลองโดยใช้ DSP ประมวลผลค่าแรงบิด

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการทดลองประมวลผลค่าแรงบิดด้วย DSP ในขณะที่ทำการขับเคลื่อนอยู่ โดยในการขับเคลื่อนนั้นจะทำการควบคุมแบบควบคุมกระแส และค่าที่ประมวลได้นั้นจะแสดงออกมาในรูปของแรงดัน โดยใช้ การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยในการประมวลนั้นจะอ่านค่าอินพุตจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสและอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนอยู่แล้ว จากนั้นได้ทำการลดค่าแรงบิดกระแสเพิ่มโดยวิธี Current Wave Shaping และใช้การประมวลผลค่าแรงบิดมาแสดงค่าแรงบิดที่ได้

6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

6.2.1 ตัวประมวลผลกลาง

ตัวประมวลผลกลางที่ใช้คือ Digital Signal Processing (DSP) ของบริษัท Analog Devices เบอร์ ADMC-401 โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

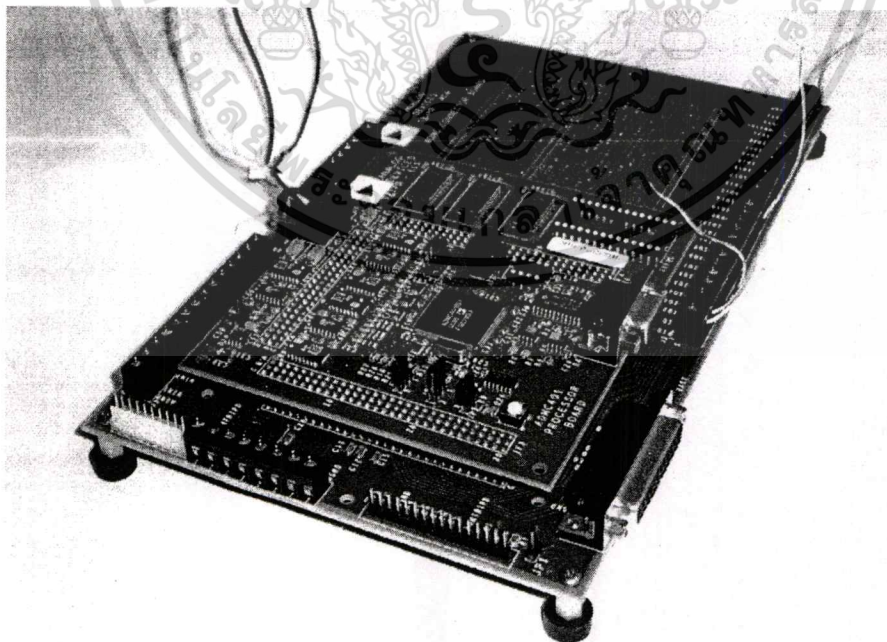
1. ใน 1 แมกซ์ซีไอเคิลมีความเร็วในการทำงานเท่ากับ $38.5 \mu\text{s}$
2. ความสามารถในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (ALU) เท่ากับ 16 บิต
3. มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิดแฟลชใน $2\text{k} \times 24$ บิต
4. มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิดรอมภายใน $2\text{k} \times 24$ บิต
5. มีหน่วยความจำข้อมูลชนิดแฟลชใน $1\text{k} \times 16$ บิต
6. การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต ที่แรงดัน $\pm 2\text{V}$
7. สามารถสร้างสัญญาณ PWM 3 เฟส ขนาด 16 บิตได้

ซึ่ง ADMC-401 ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกมากมายแต่ในที่นี้ไม่ได้งานจึงไม่ขอพูดถึง และในการใช้งาน ADMC-401 นั้นจะมี Connector Board ที่จะใช้ร่วมกับ ADMC-401 Board โดยในส่วนของ Connector Board นั้นจะมีส่วนแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกที่แรงดัน 0 - 4 V อยู่ และจะมีส่วนของ Encoder Interface อยู่ที่บอร์ดส่วนนี้ด้วย โดยส่วนแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกนี้จะใช้ในการแสดงค่าแรงบิดที่ประมวลได้ และ Encoder Interface จะใช้ในการแปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง โดย ADMC-401 นั้นมีจำนวนขาทั้งหมด 144 ขา แสดงการจัดวางขาของ ADMC-401 ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 แสดงบอร์ดของ ADMC-401 ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 แสดงการจัดวางขาของ ADMC-401

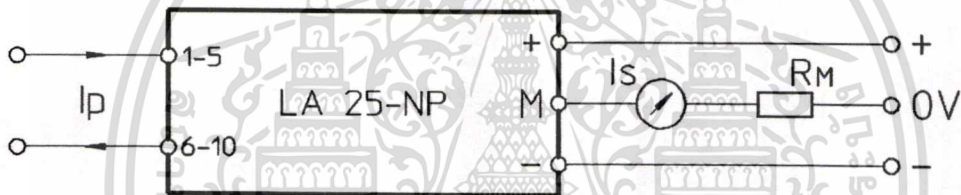


รูปที่ 6.2 แสดงบอร์ดของ ADMC-401 ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 อุปกรณ์ตรวจจ็กระแส (Current Sensor)

อุปกรณ์ตรวจจ็กระแสที่ใช้เป็นของ LEM เบอร์ LA 25-NP สามารถตรวจจ็กระแสสูงสุดได้ ± 25 A โดยที่ ± 25 A จะได้กระแสเอาต์พุตออกมา 25 mA เพราะฉะนั้นอัตราส่วนคือ 1/1000 เท่า และการต่อใช้งานจะต้องต่อความต้านทาน (R_m) หนึ่งตัวที่เราจะต้องต่อเปลี่ยนจากกระแสเป็นแรงดัน โดยเมื่อต่อ $R_m = 100\ \Omega$ จะได้แรงดันเท่ากับ 2.5 V ที่ 25 A แต่ส่วนแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกรับสัญญาณได้ ± 2 V ดังนั้นชุดตรวจจ็กระแสแรงดันต้องไม่เกิน ± 2 V ดังนั้นชุดตรวจจ็กระแสจึงใช้งานได้ ± 20 A โดยในการทดลองจะนำไปตรวจจ็กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดแต่ละเฟส และ SRM ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 3 เฟส ดังนั้นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจ็กระแสทั้งหมด 3 ตัว โดยแสดงการต่ออุปกรณ์ตรวจจ็กระแสดังรูปที่ 6.3 และแสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจ็กระแสดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 แสดงการต่ออุปกรณ์ตรวจจ็กระแสใช้งาน

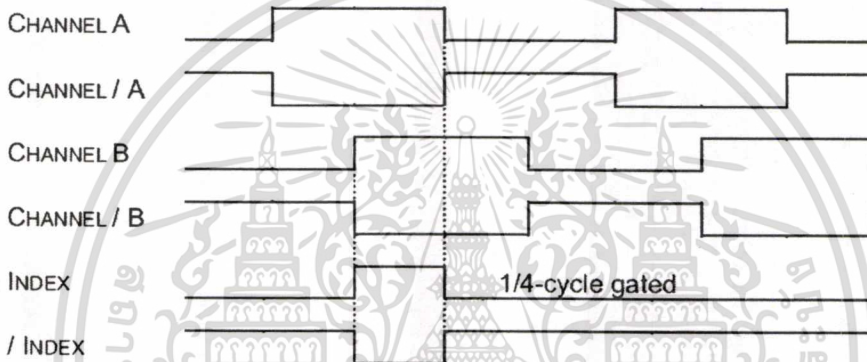


รูปที่ 6.4 แสดงอุปกรณ์ตรวจจ็กระแสที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

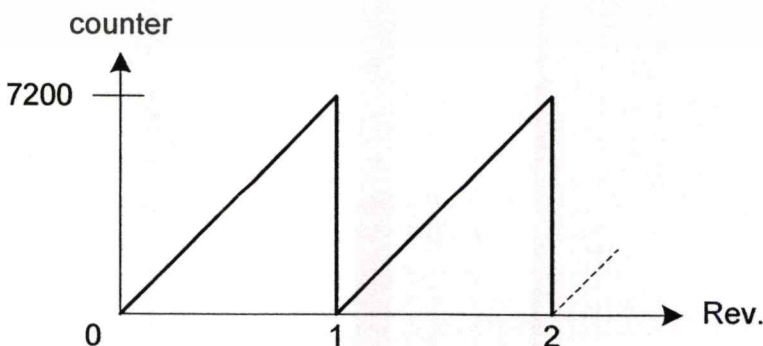
6.2.3 อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง

อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง(Encoder) ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นชนิดที่มีเอาต์พุตเป็นพัลส์ โดยอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งหมุน 1 รอบจะมีพัลส์ออกมา 3600 ลูกและจะมีสัญญาณดัชนี(Index) เป็นจุดอ้างอิงอีกสัญญาณ อีกทั้งสัญญาณ 3600 ลูกที่ออกมาจะมีสัญญาณ A และ B โดยจะวางห่างกัน 90° ทางไฟฟ้า ทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าหมุนซ้ายหรือหมุนขวา โดยสัญญาณทั้งหมดของอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งจะแสดงดังรูปที่ 6.5 และการใช้งานนั้นจะยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์ให้หมุนไปพร้อมกันจึงสามารถบอกตำแหน่งได้ แต่ตอนติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งกับเพลลานั้นจุดอ้างอิงของมอเตอร์ควรจะเป็นจุดเดียวกับตำแหน่งดัชนีของอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งเพื่อให้ง่ายกับการบอกตำแหน่ง



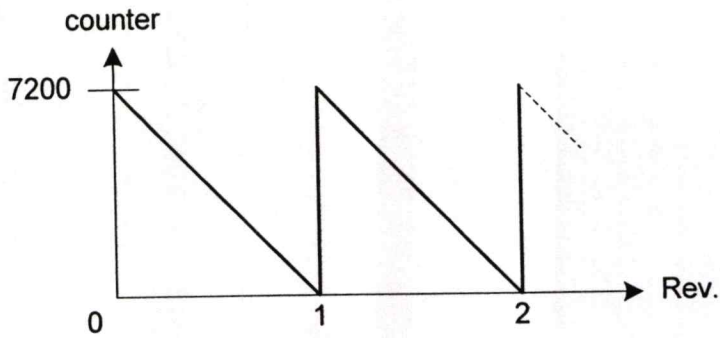
รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Encoder

จากสัญญาณดังรูปที่ 6.5 เมื่อนำไปให้ DSP ประมวลผลก็จะได้สัญญาณดังรูปที่ 6.6 โดยหนึ่งรอบการหมุนของเพลลาจะนับพัลส์ได้ 7200 ค่า เนื่องจากจะนับทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลงของพัลส์



ก.) ขณะมอเตอร์หมุนขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.) ขณะมอเตอร์หมุนซ้าย

รูปที่ 6.6 ค่าที่ DSP ประมวลได้จากสัญญาณเอาต์พุตของ Encoder

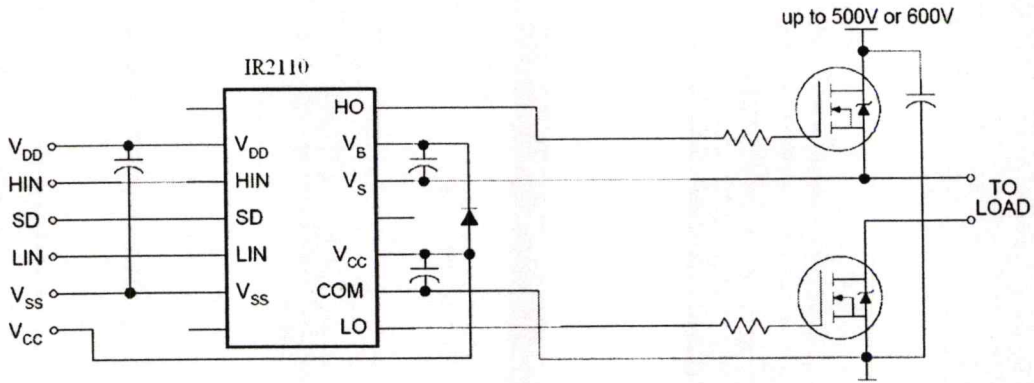


รูปที่ 6.7 แสดง Encoder ที่ใช้ในการทดลอง

6.2.4 ชุดขับเคลื่อน

สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากตัวประมวลผลกลาง นั้นไม่สามารถที่จะนำไปจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ได้โดยตรง เนื่องจากแรงดันและกระแสไม่ได้ตามขนาดของมอสเฟตที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ต้องการ และในการควบคุมควรจะแยกกราวนด์ของส่วนวงจรควบคุมและวงจรกำลังออกจากกัน เพราะในกรณีที่ส่วนกำลังเสียหายจะได้ไม่ทำให้ส่วนควบคุมเกิดความเสียหายไปด้วย ดังนั้นเราต้องออกแบบวงจรขับเคลื่อนให้สามารถที่จะขับเคลื่อนให้มอสเฟตทำงานในช่วงที่เป็นสวิตช์ได้ และวงจรขับเคลื่อนนั้นต้องแยกสัญญาณที่ได้จากตัวประมวลผลกลางออกจากวงจรกำลังด้วย ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ IR2110 โดยหนึ่งตัวสามารถขับมอสเฟตในกึ่งเดียวกันได้สองตัว ดังนั้นหนึ่งเฟสจึงใช้ IR2110 หนึ่งตัว ในการทดลอง SRM เป็นแบบ 3 เฟสจึงใช้ทั้งหมดสามตัว แสดงวงจรการใช้งานดังรูปที่ 6.8

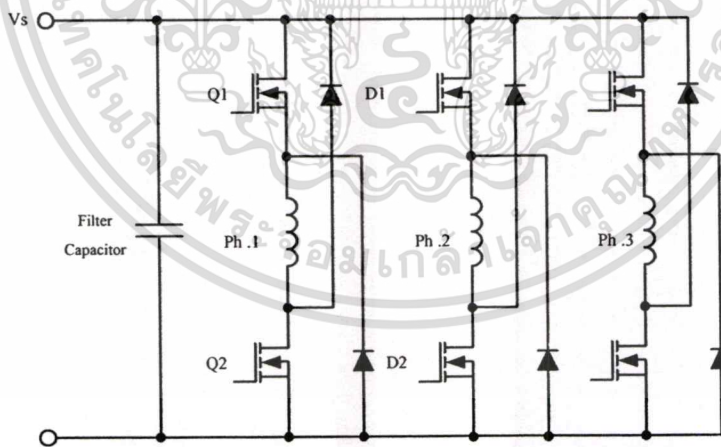
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการขับมอสเฟต

6.2.5 อินเวอร์เตอร์

ในการทดลองจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบที่นิยมใช้กันทั่วไปคือจะมีสวิทช์ 2 ตัวและ ไดโอด 2 ตัว โดยสวิทช์นั้นจะใช้มอสเฟตเบอร์ IRFZ44N และไดโอดจะใช้เบอร์ UQ149 ส่วนแรงดันที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์จะได้รับจากแบตเตอรี่ 12 V โดยจะต่อคาปาซิเตอร์เข้าไป เพื่อช่วยให้รักษาระดับแรงดันแหล่งจ่ายให้คงที่ และลดสัญญาณรบกวน แสดงวงจร อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 6.9

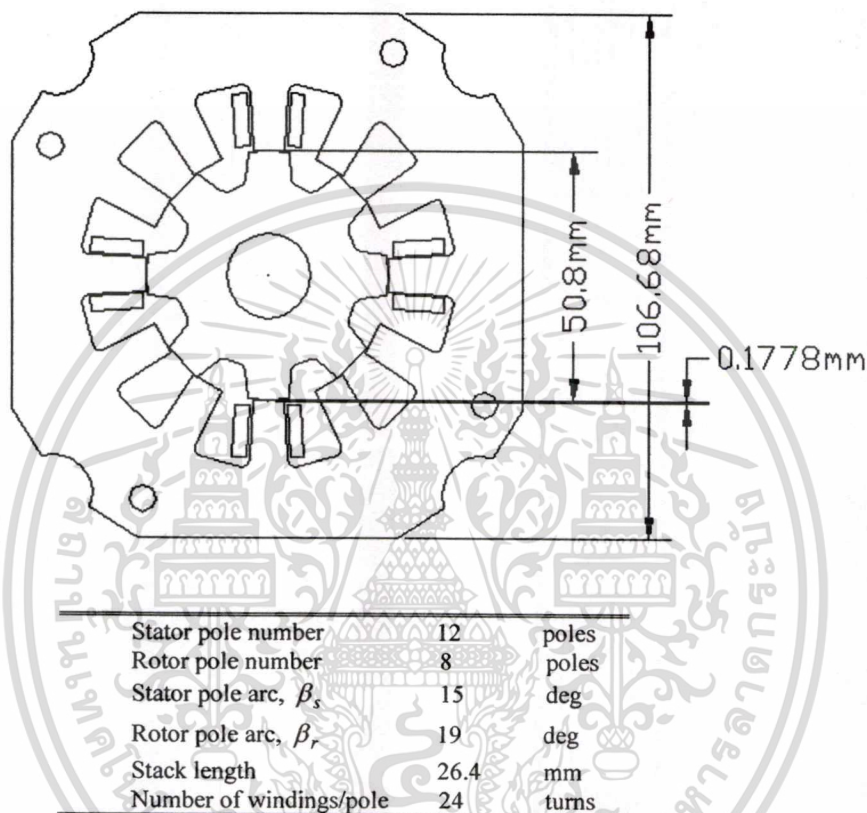


รูปที่ 6.9 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

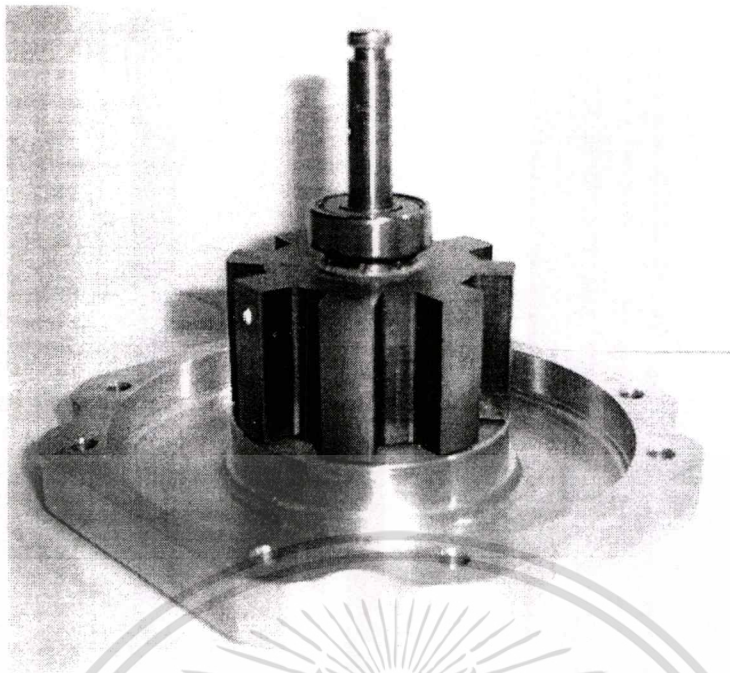
6.2.6 เครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์ ชนิด 3 เฟส

ในการทดลองจะใช้ 12/8 SRM ชนิด 3 เฟส ขนาด 1/4 แรงม้า ซึ่งเป็นชนิดและขนาดเดียวกับที่ทำการประมาณแรงบิดไว้ข้างต้น โดยลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์และค่าพารามิเตอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 6.10

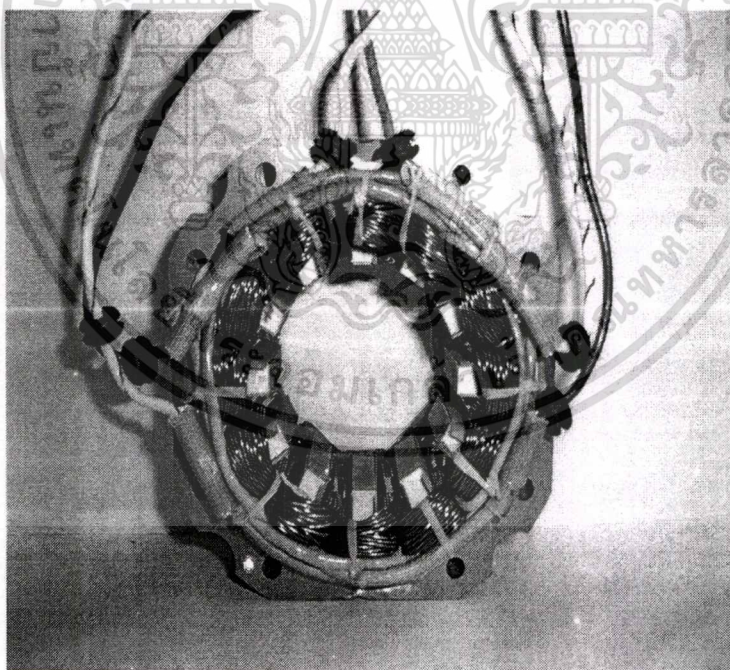


รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะโครงสร้างและพารามิเตอร์ของ 12/8 SRM ที่ใช้ทดลอง

ลักษณะโรเตอร์ของ SRM จริง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.11 ซึ่งจะเห็นว่าโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์นั้นจะไม่มีขดลวด ดังนั้นโครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์จึงสร้างได้ง่ายและราคาถูกลงตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนสเตเตอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.11 แสดงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดลอง

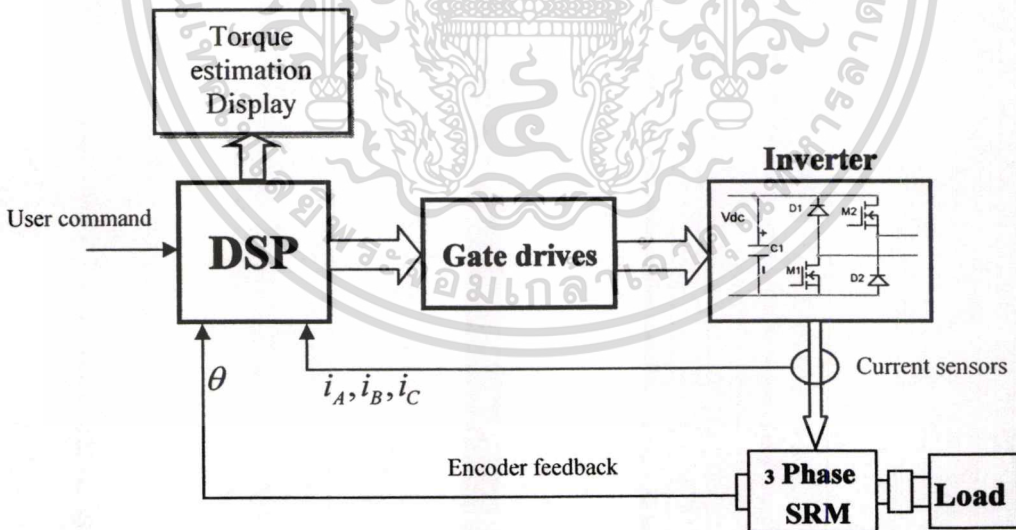


รูปที่ 6.12 แสดงสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

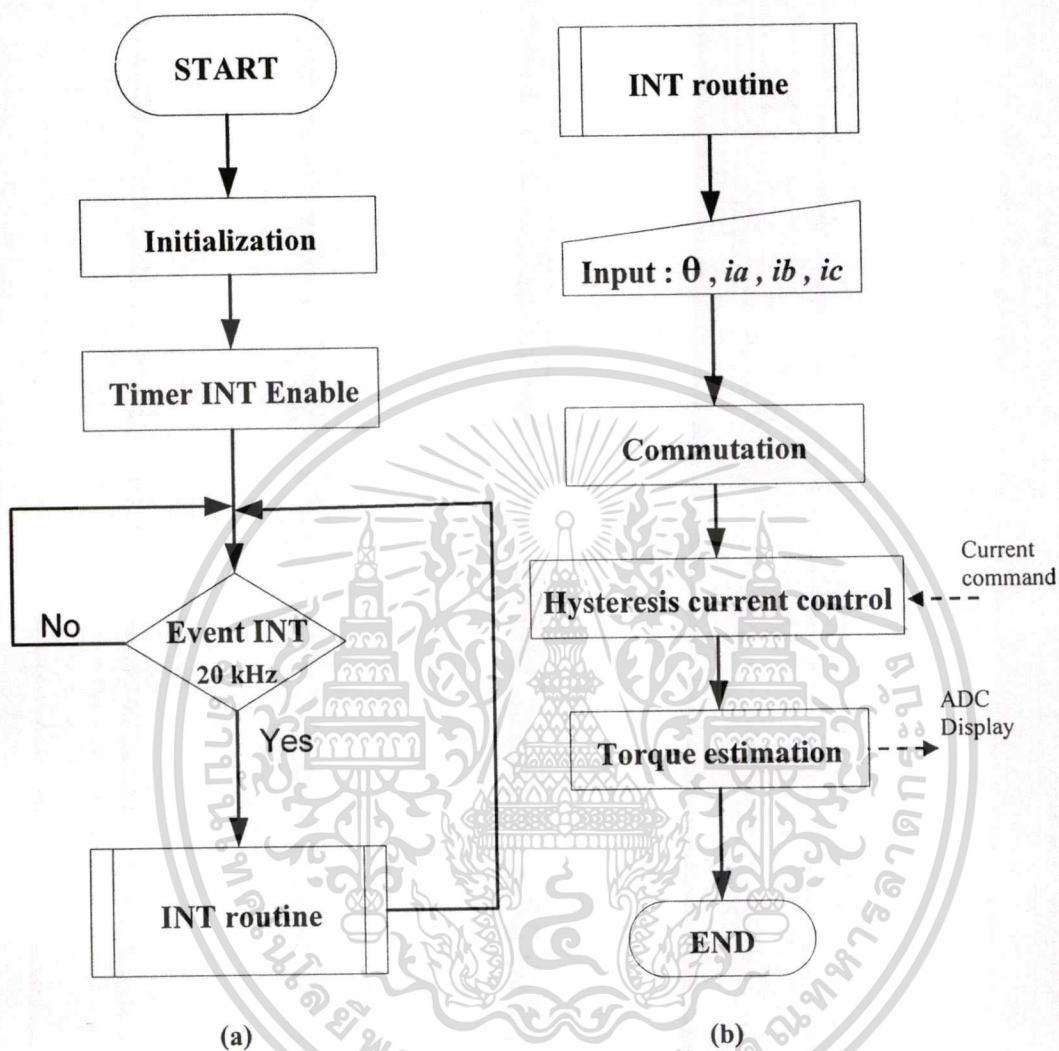
6.3 แผนผังวงจรการทดลอง

ในการทำการทดลองประมาณค่าแรงบิดขณะหนึ่ง ในขณะที่ใช้งานอยู่นั้นจะใช้ DSP ในการประมาณค่าแรงบิดขณะหนึ่ง ซึ่งเป็น DSP ที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนอยู่แล้ว โดยในการประมาณจะอ่านค่ากระแสแต่ละเฟสโดยใช้ อุปกรณ์ตรวจจับกระแสและหาค่าตำแหน่ง โรเตอร์โดยใช้ อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดังรูปที่ 6.13 โดยเมื่อได้ค่าตำแหน่งและค่ากระแสแต่ละเฟสมาแล้ว DSP จะทำการประมวลผลและจ่ายสัญญาณ PWM ให้กับชุดสัญญาณขับเคลื่อน และผ่านไปขับอินเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณ PWM ที่ได้มานั้นจะได้มาจากการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ SRM โดยที่เพลลาของ SRM จะต่อโหลดอยู่ ในการทดลองจะใช้โหลดเป็นลูกตุ้มน้ำหนัก โดยแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์นั้นจะเป็นแบตเตอรี่ 12 V ในการทดลองทำการขับเคลื่อนแบบควบคุมกระแส ดังนั้น User command ที่จ่ายให้กับ DSP นั้นจะเป็นค่าของกระแสอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส และในขณะเดียวกันที่ทำการขับเคลื่อน SRM อยู่นั้นเราจะทำการประมาณค่าแรงบิดออกมาด้วยโดยใช้ค่าตำแหน่งและค่าของกระแส ซึ่งแผนผังวงจรการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แผนผังวงจรการทดลอง

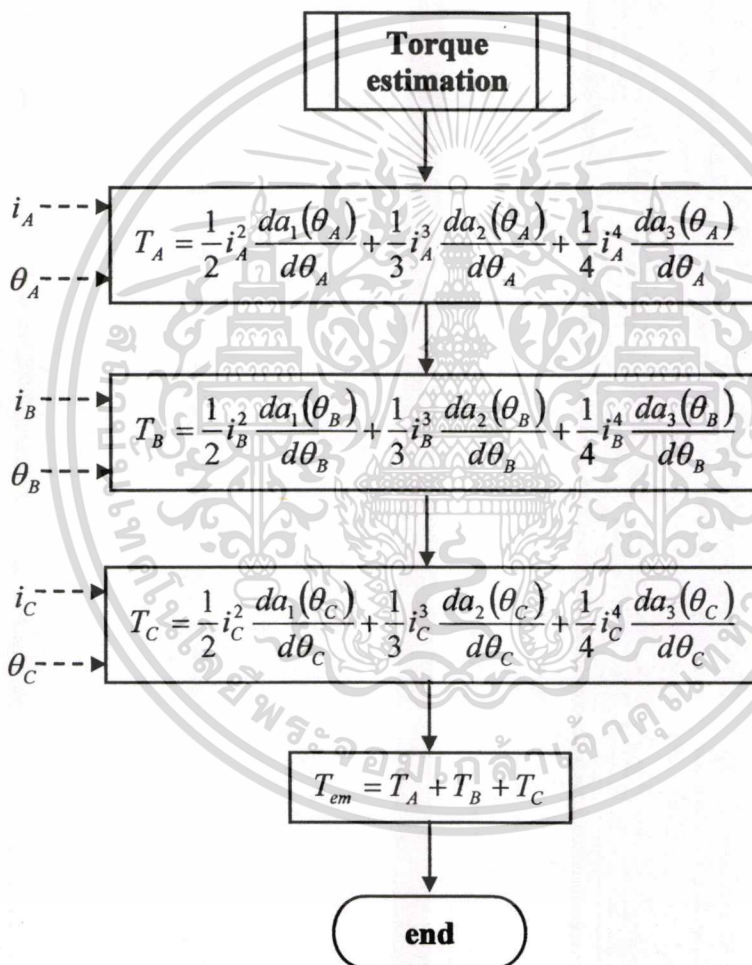
6.4 แผนผังการเขียนโปรแกรมควบคุมและการประมาณค่าแรงบิด



รูปที่ 6.14 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมหลัก (a) และ โปรแกรมขัดจังหวะ (Interrupt) (b)

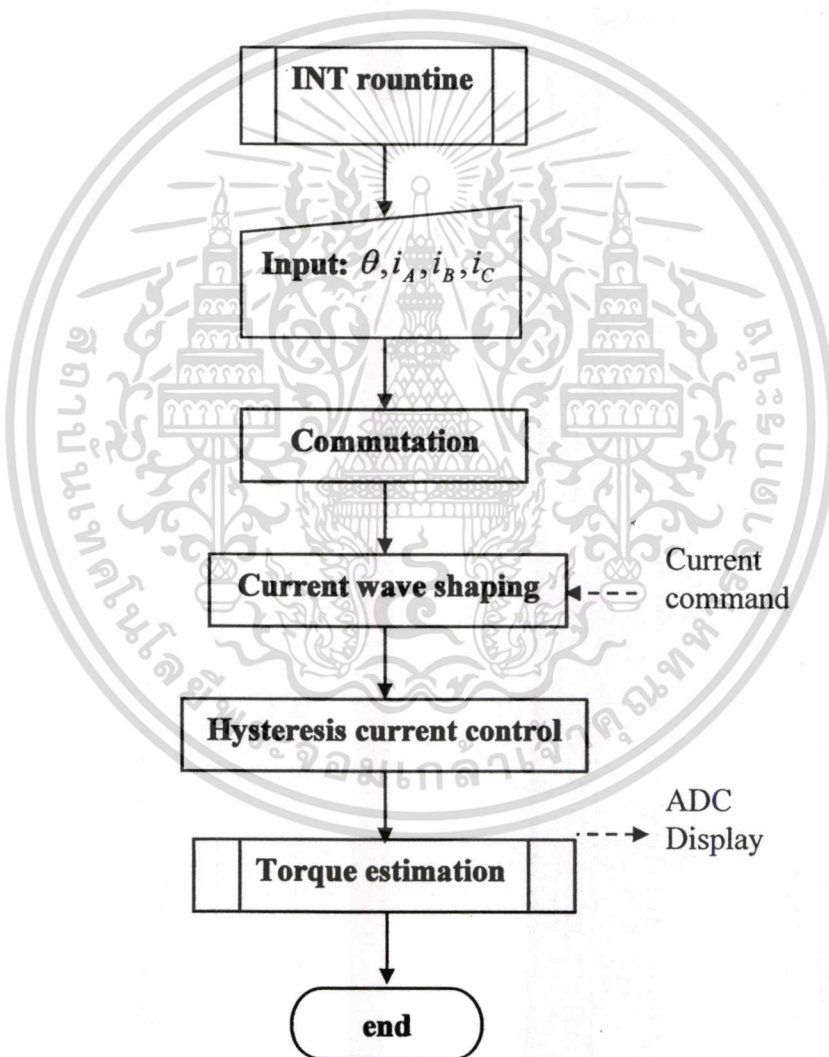
ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานนั้นจะเขียนในลักษณะแชนพลิง โดยการใช้การขัดจังหวะจากตัวนับเวลา(Timer Interrupt) ในการจับเวลาให้ทำงานส่วนโปรแกรมขัดจังหวะ 20 kHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.14 (b) และในส่วนของโปรแกรมการขัดจังหวะนั้นมีการทำงานดังนี้คือ เริ่มจากการอ่านค่าตำแหน่งของโรเตอร์จากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง และค่ากระแสแต่ละเฟสจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแส จากนั้นจะทำในส่วนของ Commutation คือจะนำค่าตำแหน่งของโรเตอร์ (θ) มาหาตำแหน่งของเฟส A (θ_A), ตำแหน่งของเฟส B (θ_B) และตำแหน่งของเฟส C (θ_C) จากนั้นจะนำตำแหน่งของแต่ละเฟสและค่ากระแสแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเฟสสร้าง PWM สำหรับการขับเคลื่อน โดยใช้การควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis current control) ซึ่งขั้นตอนนี้ผ่านมาเป็นส่วนการขับเคลื่อน SRM จากนั้นได้นำตำแหน่งแต่ละเฟสและกระแสแต่ละเฟสมาประมาณค่าแรงบิด โดยค่าแรงบิดที่ประมาณได้นั้นจะอยู่ในรูปของคิจิตอลซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมแรงบิดแบบต่าง ๆ ได้เลยซึ่งในที่นี้ไม่ได้นำแรงบิดไปใช้ต่อแต่นำมาแสดงผลโดยแปลงสัญญาณจากคิจิตอลเป็นอนาล็อกโดยแผนผังประมาณค่าแรงบิด (Torque estimation) แสดงดังรูปที่ 6.15



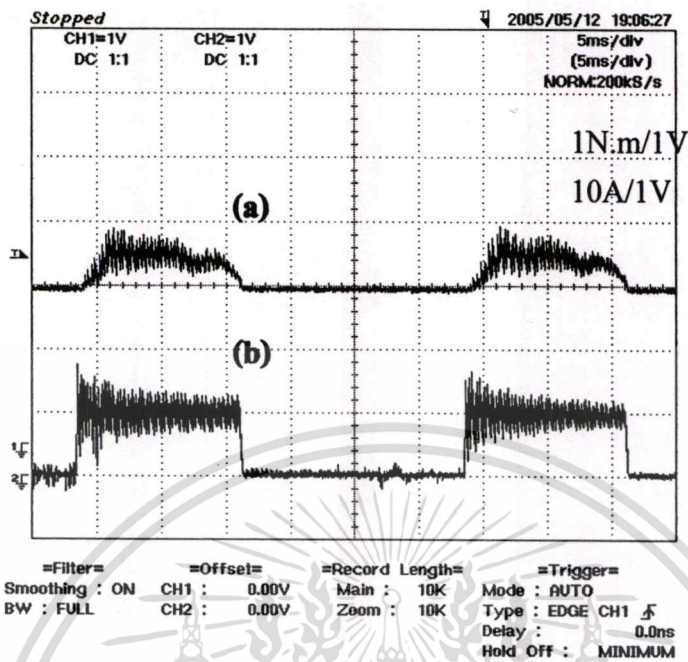
รูปที่ 6.15 โพล์ชาร์ตของการประมาณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ารวม

ในการทดลองได้ทำการทดสอบควบคุมแรงบิดกระแสเพิ่ม(Torque ripple control) ด้วยวิธีกำหนดรูปร่างรูปคลื่นของกระแส (Current Wave Shaping) ซึ่งจะใช้วิธีการประมาณที่นำเสนอมากำหนดรูปคลื่นของกระแสใหม่จากกระแสอ้างอิง โดยในการทดลองนั้นจะทดลองที่กระแสอ้างอิง 10 A และค่ารูปร่างกระแสอ้างอิงใหม่ที่ได้นั้นจะได้อมาจากการบวกกระแสชดเชยเข้าไป ทำให้แรงบิดที่ประมาณได้เรียบขึ้น โดยการหาค่ากระแสชดเชยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคิดและขณะทดลองก็จะใช้วิธีการประมาณแรงบิดที่นำเสนอมาส่งค่าแรงบิดที่ได้ ซึ่งแผนผังการเขียนโปรแกรมควบคุมนั้นจะเพิ่มเข้าไปในส่วนโปรแกรมขัดจังหวะแสดงดังรูปที่ 6.16



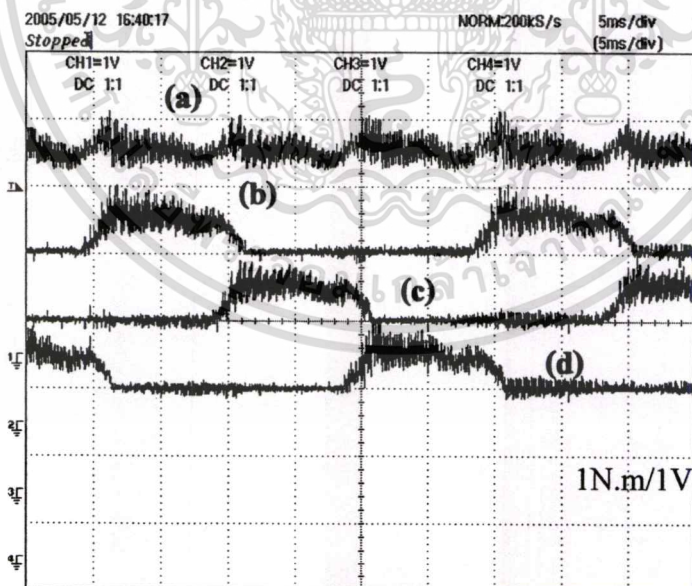
รูปที่ 6.16 โพล์ซาร์ตของโปรแกรมขัดจังหวะเมื่อทำการลดแรงบิดกระแสเพิ่ม

6.5 ผลการทดลอง



รูปที่ 6.17 แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะขับเคลื่อนโดยควบคุมกระแสที่ 10 A

(a) แรงบิดเฟสที่ประมาณได้ (b) กระแสเฟส



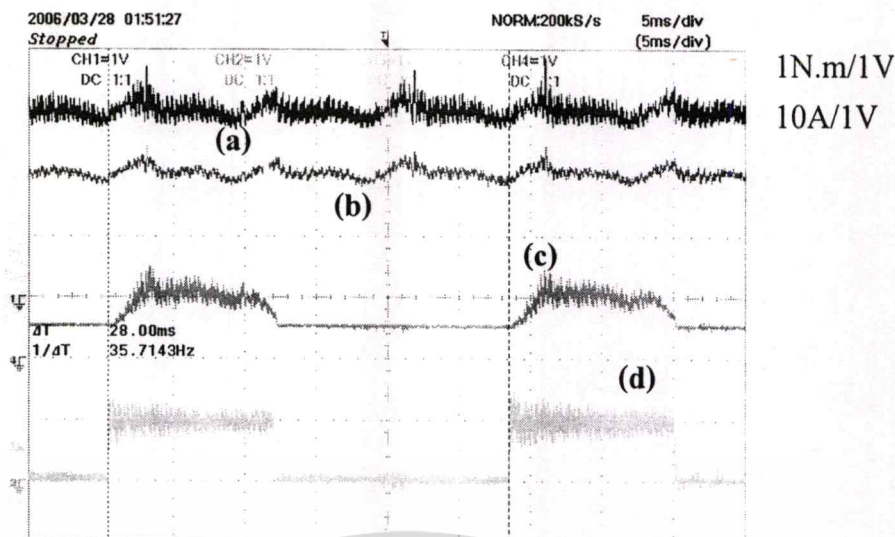
รูปที่ 6.18 แรงบิดที่ประมาณได้ขณะขับเคลื่อนโดยควบคุมกระแสที่ 10 A

(a) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้

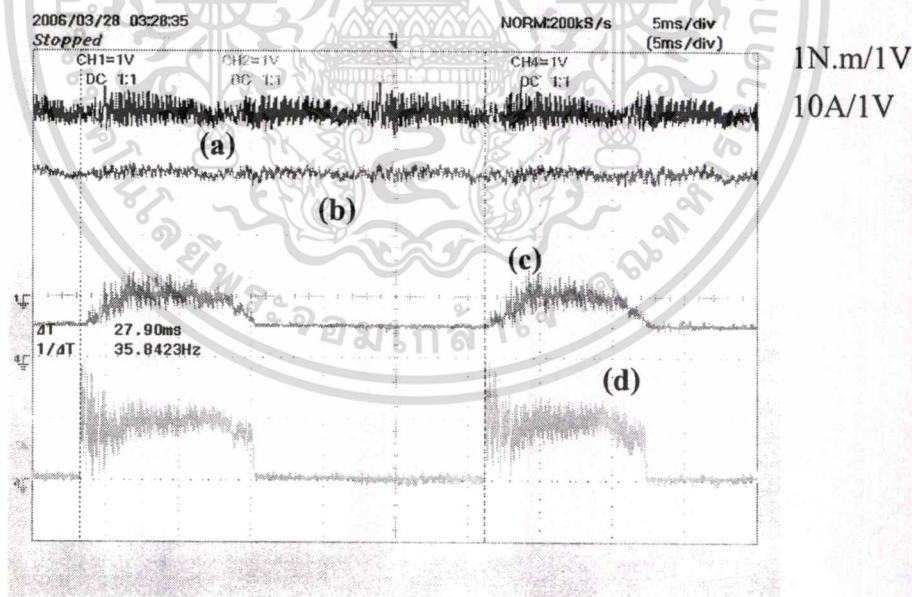
(b),(c) และ (d) แรงบิดแต่ละเฟสที่ประมาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



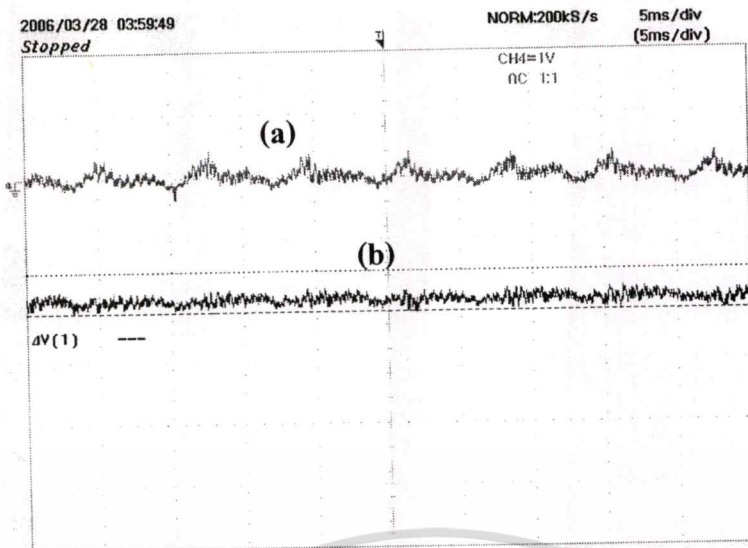
รูปที่ 6.19 แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะที่ยังไม่ได้ควบคุมแบบลดแรงบิดกระเพื่อม
 (a) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้
 (b) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้เมื่อนำวงจรกรองแบบโลว์พาส
 (c) แรงบิดเฟสที่ประมาณได้ (d) กระแสเฟส



รูปที่ 6.20 แรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะควบคุมแบบลดแรงบิดกระเพื่อม
 (a) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้
 (b) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้เมื่อนำวงจรกรองแบบ โลว์พาส
 (c) แรงบิดเฟสที่ประมาณได้ (d) กระแสเฟสจากการควบคุมด้วยวิธี Current wave shaping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 เปรียบเทียบแรงบิดที่ประมาณได้ก่อนและหลังการควบคุมแบบลดแรงบิด กระพ้อด้วยวิธี Current wave shaping

- (a) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้ก่อนการควบคุม
 (b) แรงบิดสนามสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้หลังการควบคุม

ในการทดลองจะทำการจับเคลื่อนโดยควบคุมกระแสที่ 10 A โดยค่ากระแสเฟสและแรงบิดเฟสที่ประมาณได้แสดงดังรูปที่ 6.17 และแรงบิดที่ประมาณได้แต่ละเฟสแสดงดังรูปที่ 6.18 ส่วนรูปที่ 6.19 แสดงแรงบิดที่ประมาณได้และกระแสขณะที่ยังไม่ได้ควบคุมแบบลดแรงบิดกระพ้อ จากนั้นแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมที่ประมาณได้หลังจากที่ได้ทำการลดแรงบิดกระพ้อโดยวิธี Current Wave Shaping แสดงดังรูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 เปรียบเทียบแรงบิดที่ประมาณได้ก่อนและหลังการควบคุมแบบลดแรงบิด

6.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดที่ประมาณจาก DSP นั้นมีความถูกต้องเมื่อเทียบกับแรงบิดที่ได้จาก FEA แต่ค่าที่ได้นั้นจะไม่ค่อยเรียบ อันมีผลมาจากการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส และในส่วนของ การควบคุมให้แรงบิดกระพ้อลดลงนั้นจะเห็นว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจคือการกระพ้อนั้นจะลดลงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ โดยมีความต้องการที่จะพัฒนาระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ให้มีเสถียรภาพสูงขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ที่จะนำมาใช้มากขึ้นในอนาคตเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังพัฒนาไปมากกว่านี้ โดยการประมาณค่าแรงบิดที่นำเสนอจะเน้นการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงบิด ในการประมาณนั้นจะประมาณแบบแรงบิดขณะหนึ่ง (Instantaneous torque) ซึ่งจะทำได้ทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงบิดได้หลายแบบ ทั้งการควบคุมแรงบิดขณะหนึ่ง การควบคุมแรงบิดเฉลี่ย และการควบคุมแรงบิดกระแสเฟือง แต่จะเน้นไปที่การนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงบิดกระแสเฟือง เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้จะมีแรงบิดกระแสเฟืองสูง

จากผลการทดลองที่ผ่านมา การประมาณแรงบิดด้วยวิธีที่นำเสนอ ที่จำลองสมการแรงบิดขึ้นมาใหม่จากสมการแรงบิดพื้นฐานและนำเทคนิคการประมาณค่าในช่วงโดยคิวบิกสไปไลน์ นั้นได้ตรวจสอบความถูกต้องกับการคำนวณด้วยโปรแกรม FEA ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าแรงบิดจริง ๆ แล้วควรตรวจสอบด้วย ทอร์กทรานส์ดิวเซอร์อีกที แต่ในที่นี้ไม่ได้ทดสอบ แต่การใช้โปรแกรม FEA ตรวจสอบความถูกต้องนั้นก็มีความน่าเชื่อถือเพียงพอแล้ว เพราะการออกแบบเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ตั้งแต่ที่แรกก่อนที่จะสร้างขึ้นมา ก็มักจะใช้โปรแกรม FEA ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องกับการคำนวณด้วยโปรแกรม FEA จึงได้นำมาใช้ในการยืนยันความถูกต้องของการประมาณนี้ โดยจากการนำแรงบิดที่ประมาณได้ตามวิธีที่นำเสนอมาเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEA มีความคลาดเคลื่อนกันประมาณ 0-7 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริง เนื่องจากการเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กที่น้อย และการประมวลผลในการประมาณนั้นมีความรวดเร็ว จึงทำให้ตัวประมวลผลกลางที่ใช้ไม่ต้องมีพื้นที่หน่วยความจำสูงและความเร็วในการประมวลผลก็ไม่ต้องสูงมากเช่นกัน และจากที่ได้ทำการทดลองนำไปประยุกต์ใช้ในการลดแรงบิดกระแสเฟือง ซึ่งผลที่ได้แรงบิดกระแสเฟืองลดลงประมาณ 40 % ซึ่งถือว่าลดลงมาก จากการนำเสนอและทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่างานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นอย่างมาก

7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. สามารถนำวิธีการประมาณแรงบิดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ควบคุมแรงบิดแบบต่างๆ ได้
2. สามารถนำวิธีการจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็กค้ำเกี่ยว(Flux linkage) ไปประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนแบบ ไม่มีอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง(Sensorless)ได้
3. สามารถนำวิธีการประมาณแรงบิดดังกล่าวไปสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักเตนซ์โดยโปรแกรมต่าง ๆ เพื่อจำลองการทำงานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Magna Physics Publishing and Clarendon Press Oxford, 1993.
- [2] T.J.E. Miller, " Electronic Control of Switched Reluctance Machines," Newnes Power Engineering Series, Oxford: 2001.
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. , Stephen D. Umans " Electric Machinery," McGraw-Hill, Sixth Edition: 2003.
- [4] Timothy L. Skvarenina, "The Power Electronics Handbook," Industrial Electronics Series, CRC: 2001.
- [5] S. Kittiratsatcha, D. A. Torrey, "A Design Method of a Two-phase Switched-Reluctance Machine," Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 2, 17-20 Nov. 2003 Page(s):1599 – 1604.
- [6] Wenzhe Lu, Keyhani. A, Fardoun. A, "Neural Network-Based Modeling and Parameter Identification of Switched Reluctance Motors," Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 18. Issue 2, June 2003 Page(s):284 – 290.
- [7] Liu Shanshan, Zhao Zhengming, Meng Shuo, Chai Jianyun, "A Non-Linear "Analysis Model For Switched Reluctance Motor," TENCON '02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Communications, Control and Power Engineering Volume 3, 28-31 Oct. 2002. Page(s):2034 - 2037 vol.3.
- [8] D. A. Torrey, "Switched Reluctance Generators and Their Control, " Industrial Electronics, IEE Transactions on Volume 49, Issue 1, Feb. 2002 Page(s):3 – 14.
- [9] Kano. Y, Kosaka. T, Matsui. N, "Magnetization characteristics analysis of SRM by simplified non-linear magnetic analysis," Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002. Proceedings of the Volume 2, 2-5 April 2002 Page(s):689 - 694 vol.2.
- [10] Eri W. Weisstein, "Cubic Spline," *From MathWorld* [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/CubicSpline.html>
- [11] S. K Sahoo, S. K. Panda, and J. X. Xu "Model-base Torque Estimator for Switched Reluctance Motors," Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 2, 17-20 Nov. 2003 Page(s):959 - 963 Vol.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Stiebler. M, Ke Liu, “An analytical model of switched reluctance machines,” Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 4, Dec. 1999 Page(s):1100 – 1107.
- [13] David Meeker, Ph.D.” Finite-element analysis,” Available: <http://femm.foster-miller.net/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการขับเคลื่อนและประมาณค่าแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODULE/RAM/SEG=USER_PM1/ABS=0x60 MAIN_program;
```

```

{*****}
{
  Include both ADMC401 and example specific constants
}
{*****}
#include <stdincl.h>;
#include <adc401.h>;
#include <dac401.h>;
#include <pwm401.h>;
#include <mysc_enc.h>;
#include <mathfun.h>;
#include <ir_reset.h>;
#include <pi.h>;
#include <trigono.h>;

{*****}
{
  Subroutines defined in this module
}
{*****}
.ENTRY PWMSYNC_ISR;
.ENTRY PWMTRIP_ISR;
.ENTRY ETU_ISR;
{*****}
{
  CONSTANT
}
{*****}
!.CONST    max_pul      = 7200;    {7200 pulses per 1 rev.}
!.CONST    max_ir_cnt   = 10;      {10 interrupts for ir_cnt}
!.CONST    max_elec     = 1200;    {1200 pulses per 360 elec.degree}
.CONST     PIO_setting  = 0x00ff;  {set PIO as output}
.CONST     init_IO_data = 0x0000;  {initialize PIODATA reg}
{*****}
{
  Variable definition block in this module
}
{*****}
.VAR/DM      i_offset[60];
.VAR/RAM/DM  speed;          {current speed}
.VAR/RAM/DM  ir_cnt;        {interrupt loop count}
.VAR/RAM/DM  delta_cnt;    {EIUCNT differnces}
.VAR/DM/RAM  pos1;         {dummy for position}
.VAR/RAM/DM  new_pos;      {store new position}
.VAR/RAM/DM  old_pos;      {store old position}
.VAR/RAM/DM  full_et;      {EETT reg, no use here}
.VAR/RAM/DM  delta_et;     {EETDELAT reg, no use here}
.VAR/RAM/DM  elec_pos_a;   {electical angle of phase A}
.VAR/RAM/DM  elec_pos_b;   {electical angle of phase B}
.VAR/RAM/DM  elec_pos_c;
.VAR/RAM/DM  elec_pos_RPM;
.VAR/RAM/DM  theta_on_a;   {presented in elec. ang}
.VAR/RAM/DM  theta_off_a;  {presented in elec. ang}

```

เอกสารงานวิจัยนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเท่านั้นและสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.VAR/RAM/DM theta_on_b;      {presented in elec. ang}
.VAR/RAM/DM theta_off_b;     {presented in elec. ang}
.VAR/RAM/DM theta_on_c;
.VAR/RAM/DM theta_off_c;
.VAR/RAM/DM theta_on_RPM;
.VAR/RAM/DM theta_off_RPM;
.VAR/RAM/DM gate_a;         {Gate signal phase A}
.VAR/RAM/DM gate_b;         {Gate signal phase B}
.VAR/RAM/DM gate_c;
.VAR/RAM/DM i_line_test_A;   {line current test ;ake do 29/10/46 }
.VAR/RAM/DM i_line_test_B;
.VAR/RAM/DM i_line_test_C;
.VAR/RAM/DM i_line_test_up_a; {line current test upper=5.1A }
.VAR/RAM/DM i_line_test_lo_a; {line current test lower=4.9A }
.VAR/RAM/DM i_line_test_up_b;
.VAR/RAM/DM i_line_test_lo_b;
.VAR/RAM/DM i_line_test_up_c;
.VAR/RAM/DM i_line_test_lo_c;
.VAR/RAM/DM i_line_test_up;
.VAR/RAM/DM i_line_test_lc;
.VAR/RAM/DM check_A;
.VAR/RAM/DM check_B;
.VAR/RAM/DM check_C;
.VAR/RAM/DM hy_sto_A;
.VAR/RAM/DM hy_control;
.VAR/RAM/DM hy_sto_C;
.VAR/RAM/DM KI;
.VAR/RAM/DM KP;
.VAR/RAM/DM i_PI_new;
.VAR/RAM/DM i_PI_old;
.VAR/RAM/DM ERR_RPM;
.VAR/RAM/DM SPEED_REF_AKE;
.VAR/RAM/DM KI_SOME;
.VAR/RAM/DM KP_MUL;
.VAR/RAM/DM CH_UP;          {USE , SO AUTO UP}
.VAR/RAM/DM count_rpm;
.VAR/RAM/DM ref_div;

```

```
{***** }
```

```

.VAR/RAM/DM COU;
.VAR/RAM/DM u;
.VAR/RAM/DM v;

```

```

.VAR/RAM/DM da11;
.VAR/RAM/DM da12;
.VAR/RAM/DM da13 ;
.VAR/RAM/DM da_1;

```

```

.VAR/RAM/DM da21;
.VAR/RAM/DM da22;
.VAR/RAM/DM da23 ;
.VAR/RAM/DM da_2;

```

```

.VAR/RAM/DM da31;
.VAR/RAM/DM da32;

```

```
.VAR/RAM/DM da33;
.VAR/RAM/DM da_3;
```

```
.VAR/RAM/DM t11;
.VAR/RAM/DM t12;
.VAR/RAM/DM t13;
.VAR/RAM/DM t14;
```

```
.VAR/RAM/DM t1;
```

```
.VAR/RAM/DM t21;
.VAR/RAM/DM t22;
.VAR/RAM/DM t23;
.VAR/RAM/DM t24;
.VAR/RAM/DM t25;
.VAR/RAM/DM t26;
.VAR/RAM/DM t27;
.VAR/RAM/DM t2;
```

```
.VAR/RAM/DM t31;
.VAR/RAM/DM t32;
.VAR/RAM/DM t33;
.VAR/RAM/DM t34;
.VAR/RAM/DM t35;
.VAR/RAM/DM t3;
```

```
.VAR/RAM/DM TA;
.VAR/RAM/DM TAA;
.VAR/RAM/DM TBB;
.VAR/RAM/DM TCC;
.VAR/RAM/DM T;
```

```
.VAR/RAM/DM sto1;
.VAR/RAM/DM sto2;
.VAR/RAM/DM sto3;
.VAR/RAM/DM sto4;
.VAR/RAM/DM CH15;
.VAR/RAM/DM CH16;
```

```
{*****}
{
{          Variable initialization in this module          }
{
{*****}
.INIT i_offset:          00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00,
                        00, 00, 00, 100, 50,-100,-100,-180,-180,-50,
                        -50, 00,-10,-20,-30,-20,-20,-10, 15, 30,
                        50, 30, 00,-100,-300,-200,-300,00,00,00,
                        00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00,
                        00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00;
```

```
.init speed:          0x0000;
.init ir_cnt:          0;
.init delta_cnt:       0x0000;
.init pos1:            0x0000;
.init new_pos:         0x0000;
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.init old_pos:          0x0000;
.init elec_pos_a:      0;
.init elec_pos_b:      0;
.init elec_pos_c:      0;
.init elec_pos_RPM:    0;
.init theta_on_a:      1025; {500,300}
.init theta_on_b:      1025;
.init theta_on_c:      1025;
.init theta_on_RPM:    500;
.init theta_off_a:     1775;
.init theta_off_b:     1775; {1100,1200}
.init theta_off_c:     1775;
.init theta_off_RPM:   4000;
.init gate_a:          0x0000;
.init gate_b:          0x0000;
.init gate_c:          0x0000;
.init i_line_test_A:   0x0000; {line current test ;ake do 29/10/46 }
.init i_line_test_B:   0x0000;
.init i_line_test_C:   0x0000;
.init i_line_test_up:  0x3130; {line current test upper=5.1A = 100 0001 0011
0000 }
.init i_line_test_lo:  0x3000; {line current test lower=4.9A = 11 1110 1011
0000 }
.init check_A:        0x0000;
.init check_B:        0x0000;
.init check_C:        0x0000;
.init hy_sto_A:       0x0000;
.init hy_control:     0x0000;
.init hy_sto_C:       0x0000;
.init KI:             0x0111; {0x00a3=0.05 ,0x0147=0.01 OK1 AT 0057 }
.init KP:             0x002f; {0x00a3=0.005 ,0x0020 = 0.001 OK1AT 0020 }
.init i_PI_new:       0x0000;
.init i_PI_old:       0x0000;
.init ERR_RPM:        0x0000;
.init SPEED_REF_AKE:  0x0000;
.init KI_SOME:        0x0000;
.init KP_MUL:         0x0000;
.init CH_UP:          0x0000;
.init count_rpm:      0x0000;
.init ref_div:        0x0000;
.init COU:            0;
.init u:              00;
.init v:              1000;
.init da11:           0;
.init da12:           0;
.init da13:           0;
.init da_1:           0;

.init da21:           0;
.init da22:           0;
.init da23:           0;
.init da_2:           0;

.init da31:           0;
.init da32:           0;

```

```

.init da33:           0;
.init da_3:          0;

.init t11:           0;
.init t12:           0;
.init t13:           0;
.init t14:           0;
.init t1 :           0;

.init t21:           0;
.init t22:           0;
.init t23:           0;
.init t24:           0;
.init t25:           0;
.init t26:           0;
.init t27:           0;
.init t2:            0;

.init t31 :          0;
.init t32:           0;
.init t33:           0;
.init t34:           0;
.init t35:           0;
.init t3:            0;

.init TA:            0;
.init TAA:           0;
.init TBB:           0;
.init TCC:           0;
.init T:             0;

.init sto1:          0;
.init sto2:          0;
.init sto3:          0;
.init sto4:          0;
.init CH15:          0;
.init CH16:          0;

write_dm(PIODIR, PIO_setting);    {activate PIO as output to measure}
write_dm(PIODATA, init_IO_data);  {all PIO off}

```

STARTUP:

```

CALL PIO3_RESET_IR;
CALL INIT_PWM_Interrupt;    {initialize PWM interrupt}
CALL Init_PWM;              {Initialize PWM registers and ISRs}
CALL Init_ADC;              {Initialize ADC registers}
CALL Init_DAC;              {Initialize DAC registers}
CALL init_sc_encoder;       {Initialize EIU registers}

```

```

AR    = DM(MODECTRL);
AR    = SETBIT 8 OF AR;    {activate independent AUXPWM}
DM(MODECTRL)    = AR;
AY0   = 0x00D8;          {set AUXPWM to be 60kHz}

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AY0    = 0;
DM(AUXCH0) = AY0;      {turn off AUXCH0}
DM(AUXCH1) = AY0;      {turn off AUXCH1}

```

```

MAINLOOP:      {Wait interrupt to occur}

```

```

NOP;
NOP;
jump  MAINLOOP;

```

```

RTS;

```

```

{*****}
{
  Interrupt Service Routine for PWM block
}
{*****}

```

```

PWMSYNC_ISR:

```

```

Call pause_dac;

```

```

{-----use to measure time elapse during interrupt-----}

```

```

AX0    = DM(PIODATA);
AY0    = 0x0008; {0000 0000 1000}
AR     = AX0 OR AY0;

```

```

write_dm(PIODATA,AR);

```

```

{-----}

```

```

{*****}
{SPEED ESTIMATION-----}
{*****}

```

```

CALL  resume_dac;      {start DAC}
AX0   = 20;            {max interrupt count = 30}
AY0   = DM(ir_cnt);
AR    = AX0-AY0;      {check the # of interrupts}
if    GT JUMP  add_one;
AR    = PASS 0;
DM(ir_cnt) = AR;      {reset ir_cnt to zero}
AY0   = DM(pos1);    {store old position}
DM(old_pos) = AY0;
GetPosition(new_pos,full_et,delta_et); {get new position}
AX0   = DM(new_pos); {store new position for next calculation}
DM(pos1) = AX0;
AY0   = DM(old_pos);
AR    = AX0-AY0;     {find differences between new_pos and
old_pos}

```

```

IF GE JUMP get_speed;
AX1   = 7199;        {max pulses per 1 rev. = 7200}
AY0   = DM(old_pos);
AY1   = DM(new_pos);

```

```

AR    = AX1-AY0;    {7200 - old_pos}
AR    = AR+AY1;     {add new_pos, then we get speed}

```

```

get_speed:

```

```

DM(speed) = AR;     {store speed}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SI      = AR;
SR      = LSHIFT SI by 3(LO);          {multiply by 8,old_sh3}
MX0     = SR0;      {START Q15}
MY0     = 0x42AA;
AX0     = 0x0001;
AY0     = 0x0001;
AR      = AX0 - AY0 ;
IF EQ MR = MX0 * MY0 (UU);
AR      = MR1;      {END Q15}
SI      = AR;
SR      = LSHIFT SI by 2(LO); { SHIFT6 5V=2047*1.0415 IF SHIFT5
                                   5V=4094*1.0415 , sh2 of q15}

AR      = SR0;
PUT_DAC(6,AR);          {display speed to DAC1}
DM(speed) = AR;          {store speed}

```

```
{END SPEED ESTIMATION-----}
```

```
{*****}
{POSITION ESTIMATION-----}
{*****}
```

```
pos_est:
```

```

GetPosition(new_pos,full_et,delta_et); {get new position}
AR      = DM(new_pos);          {get current position, mech degree}

SI      = AR;
SR      = LSHIFT SI by 0(LO);    {multiply by 4}
AR      = SR0;
PUT_DAC(1,AR);          {display mech-deg to DAC2}
AR = DM(new_pos);          {get current position, mech degree}
AY0 = 1800;              {max_elec = 1200}
AR = AR - AY0;          {find elec. ang by subtracting 1200}
IF LE JUMP get_elec_degree; {do until finding negative value}
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;
IF LE JUMP get_elec_degree;
AR = AR - AY0;

```

```
get_elec_degree:
```

```

AR = AR + AY0;          {plus negative value by 1200}
DM(elec_pos_a) = AR;    {store value of elec. Ang. of phase A}

```

```
SI = AR;
```

```
SR = LSHIFT SI by 4(LO); {multiply by 16}
```

เอกสารนี้เป็นงานที่จัดทำขึ้นโดยไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
AR = SR0;
PUT_DAC(2,AR);
```

{ Next we will find electrical angle of phase B. Since we know that our motor has 2 phase. And phase B will lead phase A 30 degree(mech) or 600 quadrature pulses.

```
}
AR = DM(elec_pos_a);           {get value from phase A elec.ang.}
AY0 = 600;                     {180 elec.ang. = 600 pulses}
AR = AR + AY0;                 {plus to find phase B elec.ang.}
AY1 = 1800;                    {1200 = 360 elec.ang}
AR = AR - AY1;                {check if it exceeds 360 degree}
IF GE JUMP get_elec_b;        {yes...then jump}
AR = AR + AY1;                {no...plus 1200 to get it}
get_elec_b:
DM(elec_pos_b) = AR;          {store value of elec. Ang. of phase B}
```

```
SI = AR;
SR = LSHIFT SI by 4(LO);      {multiply by 16}
AR = SR0;
PUT_DAC(3,AR);
```

{ Next we will find electrical angle of phase C. Since we know that our motor has 3 phase. And phase B will lead phase A 30 degree(mech) or 600 quadrature pulses.

```
}
AR = DM(elec_pos_a);           {get value from phase A elec.ang.}
AY0 = 1200;                    {180 elec.ang. = 600 pulses}
AR = AR + AY0;                 {plus to find phase B elec.ang.}
AY1 = 1800;                    {1200 = 360 elec.ang}
AR = AR - AY1;                {check if it exceeds 360 degree}
IF GE JUMP get_elec_c;        {yes...then jump}
AR = AR + AY1;                {no...plus 1200 to get it}
get_elec_c:
DM(elec_pos_c) = AR;          {store value of elec. Ang. of phase B}
```

```
SI = AR;
SR = LSHIFT SI by 4(LO);      {multiply by 16}
AR = SR0;
PUT_DAC(4,AR);
```

{*****COMMUTATOR.....Right now I will use fixed turn on-off*****}

{*****PHASE A commutator*****}

```
AX0 = DM(elec_pos_b);          {**get elec. position phase A}
AY0 = DM(theta_on_a);          {read turn on ang. phase A}
AR = AX0 - AY0;                {find the section according to my note}
IF LT JUMP gate_lo_a;          {it is section 1}
AY0 = DM(theta_off_a);         {it is section 2 or 3, get theta_off_A}
AR = AX0 - AY0;                {see if it is section 2 or 3}
IF LE JUMP gate_hi_a;          {it is section 2}
gate_lo_a:
AY0 = 0xfffb;                  {7D = 1111011}
```

```
!DM(gate_a) = AY0;
AX0 = DM(PIODATA);
AR = AX0 AND AY0;
```

```
DM(PIODATA) = AR;
```

```
AR = DM(PWMSEG);           {turn off AH}
AR = SETBIT 4 OF AR;       {turn off AH}
AR = SETBIT 5 OF AR;       {turn off AL}
DM(PWMSEG) = AR;          {turn off AH}
```

```
JUMP skip_1;
```

```
gate_hi_a:
  AY0 = 0x0004;             {02 = 0000100}
  !DM(gate_a) = AY0;
  AX0 = DM(PIODATA);
  AR = AX0 OR AY0;
  DM(PIODATA) = AR;        {PIO #1}
```

```
AR = DM(PWMSEG);           {turn on AH}
AR = CLRBIT 4 OF AR;       {turn on AH}
AR = CLRBIT 5 OF AR;       {turn on AL}
DM(PWMSEG) = AR;          {turn on AH}
```

```
skip_1:
```

```
{*****PHASE B commutator*****}
  AX0 = DM(elec_pos_c);     {***get elec. position phase A}
  AY0 = DM(theta_on_b);     {read turn on ang. phase A}
  AR = AX0 - AY0;           {find the section according to my note}
  IF LT JUMP gate_lo_b;     {it is section 1}
  AY0 = DM(theta_off_b);    {it is section 2 or 3, get theta_off_A}
  AR = AX0 - AY0;           {see if it is section 2 or 3}
  IF LE JUMP gate_hi_b;     {it is section 2}
```

```
gate_lo_b:
  AY0 = 0xffff;             {7B = 1111101}
  !DM(gate_a) = AY0;
  AX0 = DM(PIODATA);
  AR = AX0 AND AY0;
  DM(PIODATA) = AR;
  AR = DM(PWMSEG);          {turn off BH}
  AR = SETBIT 2 OF AR;      {turn off BH}
  DM(PWMSEG) = AR;          {turn off BH}
  JUMP skip_2;
```

```
gate_hi_b:
  AY0 = 0x0002;             {04 = 0000010}
  !DM(gate_a) = AY0;
  AX0 = DM(PIODATA);
  AR = AX0 OR AY0;
  DM(PIODATA) = AR;        {PIO #1}
  AR = DM(PWMSEG);          {turn on BH}
  AR = CLRBIT 2 OF AR;      {turn on BH}
  DM(PWMSEG) = AR;          {turn on BH}
```

```
skip_2:
```

```
{*****PHASE C commutator*****}
  AX0 = DM(elec_pos_a);     {***get elec. position phase A}
  AY0 = DM(theta_on_C);     {read turn on ang. phase A}
  AR = AX0 - AY0;           {find the section according to my note}
  IF LT JUMP gate_lo_C;     {it is section 1}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    AY0 = DM(theta_off_C);           {it is section 2 or 3, get theta_off_A}
    AR = AX0 - AY0;                  {see if it is section 2 or 3}
    IF LE JUMP gate_hi_C;           {it is section 2}
gate_lo_C:
    AY0 = 0xffff;                   {7e= 1111110}
    !DM(gate_a) = AY0;
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR = AX0 AND AY0;
    DM(PIODATA) = AR;               {PIO #0}
    AR = DM(PWMSEG);                {turn off CH}
    AR = SETBIT 0 OF AR;            {turn off CH}
    DM(PWMSEG) = AR;               {turn off CH}
    JUMP skip_3;
gate_hi_C:
    AY0 = 0x0001;                   {01 = 0000001}
    !DM(gate_a) = AY0;
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR = AX0 OR AY0;
    DM(PIODATA) = AR;              {PIO #0}
    AR = DM(PWMSEG);                {turn on CH}
    AR = CLRBIT 0 OF AR;            {turn on CH}
    DM(PWMSEG) = AR;               {turn on CH}
skip_3:
{*****}
{ CURRENT WAVE SHAPING }
{*****}
    AR = 1000;                       {10 A Command}
    SI = AR;
    SR = LSHIFT SI by 4(LO);         {multiply by 16}
    AR = SR0;
    DM(i_line_test_lo) = AR;
    AX0 = AR;
    AY0 = 0x0005;
    AR = AX0 + AY0;
    DM(i_line_test_up) = AR;
{ current wave shaping Ph A }
    I0 = ^i_offset;
    AR = DM(elec_pos_a);
    SI = AR;
    SR = LSHIFT SI by -5(HI);       {multiply by 127}
    AR = SR1;
    AX0 = I0;
    AY0 = AR;
    AR = AX0 + AY0;
    I0 = AR;
    M0 = 0;
    MX0 = DM(I0,M0);

    AX0 = 1000;
    AY0 = MX0;
    AR = AX0 + AY0;
    SI = AR;
    SR = LSHIFT SI by 4(LO); {multiply by 16}
    AR = SR0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DM(i_line_test_lo_a) = AR;
AX0 = AR;
AY0 = 0x0005 ;
AR = AX0 + AY0 ;
DM(i_line_test_up_a) = AR;

{ current wave shaping Ph B}
  IO = ^i_offset;
  AR = DM(elec_pos_b);
  SI = AR;
  SR = LSHIFT SI by -5(HI); {multiply by 127}
  AR = SR1;
  AX0 = IO;
  AY0 = AR;
  AR = AX0 + AY0;
  IO = AR;
  M0 = 0;
  MX0 = DM(IO, M0);

  AX0 = 1000;
  AY0 = MX0;
  AR = AX0 + AY0;
  SI = AR;
  SR = LSHIFT SI by 4(LO); {multiply by 16}
  AR = SR0;
  DM(i_line_test_lo_b) = AR;
  AX0 = AR;
  AY0 = 0x0005 ;
  AR = AX0 + AY0 ;
  DM(i_line_test_up_b) = AR;

{ current wave shaping Ph C}
  IO = ^i_offset;
  AR = DM(elec_pos_c);
  SI = AR;
  SR = LSHIFT SI by -5(HI); {multiply by 127}
  AR = SR1;
  AX0 = IO;
  AY0 = AR;
  AR = AX0 + AY0;
  IO = AR;
  M0 = 0;
  MX0 = DM(IO, M0);

  AX0 = 1000;
  AY0 = MX0;
  AR = AX0 + AY0;
  SI = AR;
  SR = LSHIFT SI by 4(LO); {multiply by 16}
  AR = SR0;
  DM(i_line_test_lo_c) = AR;
  AX0 = AR;
  AY0 = 0x0005 ;
  AR = AX0 + AY0 ;
  DM(i_line_test_up_c) = AR;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{*****}
{PHASE A Hysteresis }
{*****}
    CALL READ_ADC1;
    DM(i_line_test_A) = AR;
    AX0 = 0x0001;
    AY0 = DM(check_A);
    AR = AX0 - AY0;
    IF NE JUMP lo_com_A;
up_com_A:
    AX0 = DM(i_line_test_A);
    AY0 = DM(i_line_test_up_a);
    AR = AX0 - AY0;      {find the section according to my note}
    IF LE JUMP hi_ake_A;
    JUMP lo_ake_A;

lo_com_A:
    AX0 = DM(i_line_test_A);
    AY0 = DM(i_line_test_lo_a);
    AR = AX0 - AY0;
    IF GE JUMP lo_ake_A;
    JUMP hi_ake_A;
lo_ake_A:
    AR = 0X0001;
    DM(check_A) = AR;
    AY0 = 0x00bf;      {3f = 011 1111}
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR = AX0 AND AY0;
    DM(PIODATA) = AR;
    JUMP out_test_A;
hi_ake_A:
    AR = 0x0000;
    DM(check_A) = AR;
    AY0 = 0x0040;      {20 = 0100 0000}
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR = AX0 OR AY0;
    DM(PIODATA) = AR;      {PIO #6}
out_test_A:

{*****}
{ PHASE B Hysteresis }
{*****}
    CALL READ_ADC2;
    DM(i_line_test_B) = AR;
    AX0 = 0x0001;
    AY0 = DM(check_B);
    AR = AX0 - AY0;
    IF NE JUMP lo_com_B;
up_com_B:
    AX0 = DM(i_line_test_B);
    AY0 = DM(i_line_test_up_b);
    AR = AX0 - AY0;      {find the section according to my note}
    IF LE JUMP hi_ake_B;
    JUMP lo_ake_B;

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lo_com_B:
    AX0 = DM(i_line_test_B);
    AY0 = DM(i_line_test_lo_b);
    AR  = AX0 - AY0;
    IF GE JUMP lo_ake_B;
    JUMP hi_ake_B;

lo_ake_B:
    AR  = 0X0001;
    DM(check_B) = AR;
    AY0 = 0x00df;           {5f = 101 1111}
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR  = AX0 AND AY0;
    DM(PIODATA) = AR;
    JUMP out_test_B;

hi_ake_B:
    AR  = 0x0000;
    DM(check_B) = AR;
    AY0 = 0x0020;           {20= 0010 0000}
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR  = AX0 OR AY0;
    DM(PIODATA) = AR;      {PIO #5}

out_test_B:
{*****}
{PHASE C Hysteresis }
{*****}
    CALL READ_ADC3;
    DM(i_line_test_C) = AR;

    AX0 = 0x0001;
    AY0 = DM(check_C);
    AR  = AX0 - AY0;
    IF NE JUMP lo_com_C;

up_com_C:
    AX0 = DM(i_line_test_C);
    AY0 = DM(i_line_test_up_c);
    AR  = AX0 - AY0;       {find the section according to my note}
    IF LE JUMP hi_ake_C;
    JUMP lo_ake_C;

lo_com_C:
    AX0 = DM(i_line_test_C);
    AY0 = DM(i_line_test_lo_c);
    AR  = AX0 - AY0;
    IF GE JUMP lo_ake_C;
    JUMP hi_ake_C;

lo_ake_C:
    AR  = 0X0001;
    DM(check_B) = AR;
    AY0 = 0x00ef;           {5f = 110 1111}
    AX0 = DM(PIODATA);
    AR  = AX0 AND AY0;
    DM(PIODATA) = AR;
    JUMP out_test_C;

hi_ake_C:
    AR  = 0x0000;

```

```

DM(check_C) = AR;
AY0 = 0x0010; {20= 0001 0000}
AX0 = DM(PIODATA);
AR = AX0 OR AY0;
DM(PIODATA) = AR; {PIO #5}
out_test_C:
AY0 = DM(hy_sto_A);
AX0 = DM(PIODATA);
AR = AX0 AND AY0;
DM(PIODATA) = AR;

{***** FIND TORQUE PH A, PH B , PH C *****}
{ TORQUE }
{ TORQUE }
{*****}
AR = DM(i_line_test_A);
DM(sto1) = AR;
AR = DM(elec_pos_b);
DM(sto2) = AR;
CALL FIND_T;
AR = DM(TA);
SI = AR;
SR = LSHIFT SI by 4(LO); { MUL 16}
AR = SR0;
DM(TAA) = AR;
Put_DAC(5,AR); { TAA }
AR = DM(i_line_test_B);
DM(sto1) = AR;
AR = DM(elec_pos_C);
DM(sto2) = AR;

CALL FIND_T;
AR = DM(TA);
SI = AR;
SR = LSHIFT SI by 4(LO); { MUL 16}
AR = SR0;
DM(TBB) = AR;
Put_DAC(6,AR); { TBB }

AR = DM(i_line_test_C);
DM(sto1) = AR;
AR = DM(elec_pos_A);
DM(sto2) = AR;

CALL FIND_T;
AR = DM(TA);
SI = AR;
SR = LSHIFT SI by 4(LO); { MUL 16}
AR = SR0;
DM(TCC) = AR;
Put_DAC(7,AR); { TCC }

AX0 = DM(TAA);
AY0 = DM(TBB);
AR = AX0 + AY0;

```

```

AX0 = AR ;
AY0 = DM(TCC);
AR = AX0 + AY0;
DM(T) = AR ;
Put_DAC(8,AR);    { T }

```

```

{fraction} CALL FRACTION ;
{*****}
CALL update_dac;    {DAC ends}

{-----use to measure time elapse-----}
AX0 = DM(PIODATA);
AY0 = 0xff7;           {77 = 1110111}
AR = AX0 AND AY0;
write_dm(PIODATA,AR);
{-----}

```

```
RTI;
```

```

{*****}
{          PWM_TRIP interruptroutine          }
{*****}

```

```
PWMTRIP_ISR:
```

```

NOP;    {do nothing for this interrupt}
NOP;

```

```
RTI;
```

```

{*****}
{          Event Timer Unit interrupt routine          }
{*****}

```

```
{I will use for speed command later}
```

```
ETU_ISR:
```

```
    NOP;
```

```
RTI;
```

```
{*****TA_10*****}
```

```
TA_10:
```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0;    {u*u}

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x00BC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;    {*****dall}
DM(dall) = AR;

```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 2;
MR = MX0 * MY0 (UU);

```

```
DM(sto1) = MR0; {u*2 }
```

```
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*2}
MY0 = 0x6666;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = DM(da12);
AY0 = DM(da11);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0;
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{//////}
MX0 = DM(sto2); {U*U}
MY0 = 0x0012;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da21}
DM(da21) = AR;
AX0 = DM(u);
AY0 = DM(u);
AR = AX0 + AY0 ;
MX0 = AR; {U*2}
MY0 = 0x05FB;
MR = MX0 * MY0 (UU); AR = MR1;
{*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0 = DM(da21);
AY0 = DM(da22);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0;
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1 }

MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x0021;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da31) = MR0; {*****da31}
```

```

MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x0036;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da32) = MR0; {*****da32}
AX0 = DM(da31);
AY0 = DM(da32);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0; {*****da33}
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_3}
DM(da_3) = AR; { q15}

```

```
CALL TORQUE;
```

```

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AR = AX0 - AY0 ;
IF GE JUMP T10_OK ;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = 0x0090;
MY0 = DM(v);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto3) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(sto3);
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR0;
T10_OK: DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END*****TA_10}
RTS;

```

```

{*****}
{*****TA_11*****}

```

```
TA_11:
```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u*u}
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x0329;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da11}
DM(da11) = AR;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 2;

```

เอกสารนี้เป็น MYO ที่ 2; ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MR    = MX0 * MY0 (UU);
(sto1) = MR0;    {u*2 }
{fraction} CALL FRACTION;
MX0   =    MR0; {U*2}
MY0   = 0x5158;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;    {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0   = DM(da11);
AY0   = DM(da12);
AR    = AX0 - AY0 ;
AX0   = AR;
AY0   = 41;
AR    = AX0 + AY0 ; {*****da_1}
MX0   =    AR;
MY0   = 0x0CCC;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;
DM(da_1) = AR;    {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
MX0   = DM(sto2); {U*U}
MY0   = 0x0030;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;    {*****da21}
DM(da21) = AR;
AX0   = DM(u);
AY0   = DM(u);
AR    = AX0 + AY0 ;
MX0   = AR;    {U*2}
MY0   = 0x0BFD;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;    {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0   = DM(da21);
AY0   = DM(da22);
AR    = AX0 - AY0 ;
AX0   = AR;
AY0   = 12;
AR    = AX0 - AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0   =    DM(u); {U*0.1}
MY0   = 0x0CCC;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0   = DM(sto1);
MY0   = DM(sto1);
MR    = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0;    {u0.1*u0.1 }

```

```
!{fraction} CALL FRACTION;
```

```
MX0 = DM(sto2); {U*2}
```

```
MY0 = 0x0043;
```

```
MR = MX0 * MY0 (UU);
```

```
DM(da31) = MR0; {*****da31}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x006E;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da32) = MR0; { *****da32}
AX0 = DM(da32);
AY0 = 0x1AE3;
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da31); { *****da33}
AR = AX0 - AY0 ; { *****da_3}
DM(da_3) = AR; { q15}

```

```
CALL TORQUE;
```

```

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AR = AX0 - AY0 ;
DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END*****TA_11}
RTS;
{*****}
{*****TA_12*****}
TA_12:
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u*u}

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x0382;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; { *****da11}
DM(da11) = AR;

```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 6;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR0; {u*6 }

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*6}
MY0 = 0xEC49;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; { *****da12}
DM(da12) = AR;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร AX0 = DM(da12); การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AY0 = DM(da11);
AR  = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 1267;
AR  = AX0 + AY0 ; {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
AR  = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
MX0 = DM(sto2); {U*U}
MY0 = 0x0031;
MR  = MX0 * MY0 (U^J);
AR  = MR1; {*****da21}
DM(da21) = AR;

```

```

AX0 = DM(u);
AY0 = DM(u);
AR  = AX0 + AY0 ;
MX0 = AR; {U*2}
MY0 = 0x2379;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
AR  = MR1; {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0 = 34;
AY0 = DM(da22);
AR  = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da21);
AR  = AX0 - AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR  = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1}
MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x0048;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
DM(da31) = MR0; {*****da31}
MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x00E5;
MR  = MX0 * MY0 (U^J);
DM(da32) = MR0; {*****da32}
AX0 = DM(da32);
AY0 = DM(da31);
AR  = AX0 - AY0 ;

```

```

AX0 = AR;
AY0 = 0x1F8B ; {*****da33}
AR  = AX0 + AY0 ; {*****da_3}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DM(da_3) = AR; { q15}

CALL TORQUE;

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AR = AX0 + AY0 ;
DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END *****TA_12}
RTS;
{*****}
{***** TA_13*****}
TA_13:
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u*u}

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x00E2;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da11}
DM(da11) = AR;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 2;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR0; {u*2 }

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*2}
MY0 = 0xA8B7;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = DM(da11);
AY0 = DM(da12);
AR = AX0 - AY0 ;

AX0 = AR;
AY0 = 2321;
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์การเชิงเทคนิคที่จัดทำขึ้นโดยผู้ดูแลระบบให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{//////////////////////////////////////////////////////////////////}
MX0 = DM(sto2); {U*U}
MY0 = 0x0011;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da21}
DM(da21) = AR;
MX0 = DM(sto1); {U*2}
MY0 = 0x0D22;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0 = 78;
AY0 = DM(da22);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da21);
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1}
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x0021;
MR = MX0 * MY0 (UU);
SI = MR0;
SR = LSHIFT SI by -1(LO); {MUL 16}
DM(da31) = SR0; {*****da31}
MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x0085;
MR = MX0 * MY0 (UU);
SI = MR0;
SR = LSHIFT SI by -1(LO); {MUL 16}
DM(da32) = SR0; {*****da32}

AX0 = DM(da31);
AY0 = 0x4e5a ; {*****da33}
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da32);
AR = AX0 - AY0 ; {*****da_36}
DM(da_3) = AR; { q15}

```

CALL TORQUE;

```

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AR = AX0 + AY0 ;
DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END*****TA13}
RTS;
{*****}
{*****TA_14*****}
TA_14:
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u*u}

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x0004;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da11}
DM(da11) = AR;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 2;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR0; {u*2 }

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*2}
MY0 = 0x3333;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = DM(da12);
AY0 = DM(da11);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 2094;
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
MX0 = DM(sto2); {U*U}
MY0 = 0x0001;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da21}
DM(da21) = AR;
AX0 = DM(u);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AY0 = DM(u);
AR  = AX0 + AY0 ;
MX0 = AR; {U*2}
MY0 = 0x0388;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
AR  = MR1; {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0 = DM(da21);
AY0 = DM(da22);
AR  = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 59;
AR  = AX0 + AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR  = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR  = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1}

MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x0003;
MR  = MX0 * MY0 (UU);

DM(da31) = MR0; {*****da31}
MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x0033;
MR  = MX0 * MY0 (UU);

DM(da32) = MR0; {*****da32}

AX0 = DM(da31);
AY0 = DM(da32);
AR  = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0x1DDB ; {*****da33}
AR  = AX0 + AY0 ; {*****da_3}
DM(da_3) = AR; { q15}

CALL TORQUE;

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR  = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AR  = AX0 + AY0 ;
DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 MY0 = 0x0755; รัฐบาลการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1;      {END*****TA_14}
RTS;
{*****}
{*****TA_15*****}
TA_15:
{integer}    CALL  INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0;   {u*u}

{fraction}   CALL  FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x01A1;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;   {*****da11}
DM(da11) = AR;
{integer}    CALL  INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 2;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR0;   {u*2}

{fraction}   CALL  FRACTION;
MX0 = MR0; {U*2}
MY0 = 0x2F5C;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;   {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = 2290;
AY0 = DM(da11);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da12);
AR = AX0 + AY0 ;   {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;
DM(da_1) = AR;   {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
MX0 = DM(sto2), {U*U}
MY0 = 0x0027;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;   {*****da21}
DM(da21) = AR;
AX0 = DM(u);
AY0 = DM(u);
AR = AX0 + AY0 ;
MX0 = AR; {U*2}
MY0 = 0x0565;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;   {*****da22}
DM(da22) = AR;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AX0 = DM(da22);
AY0 = 76;
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da21);
AR = AX0 - AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1}

!{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x005E;
MR = MX0 * MY0 (UU);

DM(da31) = MR0; {*****da31}
MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x0034;
MR = MX0 * MY0 (UU);

DM(da32) = MR0; {*****da32}

AX0 = DM(da31);
AY0 = DM(da32);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0x4885 ; {*****da33}
AR = AX0 - AY0 ; {*****da_3}
{A} IF GE JUMP WET2 ;
{A} DM(sto2) = AR ;
AR = 1;
DM(CH15) = AR;
AR = DM(sto2);
{A} AY0 = AR ;
{A} AX0 = 0 ;
{A} AR = AX0 - AY0 ;
{A} WET2:
DM(da_3) = AR; { q15}

CALL TORQUE;

AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
AX1 = 1;
AY1 = DM(CH16);

```

```

    AR  = AX1 - AY1;
    IF EQ JUMP DO_SUB2 ;
    AR  = AX0 - AY0; { OLD}
JUMP NNT2;
DO_SUB2: AR  = AX0 + AY0;
NNT2:
    DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;
    MX0 = DM(TA);
    MY0 = 0x0755;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    DM(TA) = MR1; {END*****TA_15}
    RTS;
{*****}
{*****TA_16*****}
TA_16:
{integer} CALL INTEGER;
    MX0 = DM(u);
    MY0 = DM(u);
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    DM(sto2) = MR0; {u*u}

{fraction} CALL FRACTION;
    MX0 = MR0; {U*U}
    MY0 = 0x03B9;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    AR  = MR1; {*****da11}
    DM(da11) = AR;
{integer} CALL INTEGER;
    MX0 = DM(u);
    MY0 = 6;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    DM(sto1) = MR0; {u*6}

{fraction} CALL FRACTION;
    MX0 = MR0; {U*6}
    MY0 = 0x77E5;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    AR  = MR1; {*****da12}
    DM(da12) = AR;
    AX0 = 1680;
    AY0 = DM(da11);
    AR  = AX0 + AY0;
    AX0 = AR;
    AY0 = DM(da12);
    AR  = AX0 - AY0; {*****da_1}
    MX0 = AR;
    MY0 = 0x0CCC;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);
    AR  = MR1;
    DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
    MX0 = DM(sto2); {U*U}
    MY0 = 0x0079;
    MR  = MX0 * MY0 (UU);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AR    = MR1;    {*****da21}
DM(da21) = AR;

AX0   = DM(u);
AY0   = DM(u);
AR    = AX0 + AY0 ;
MX0   = AR;    {U*2}
MY0   = 0x2181;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;    {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0   = DM(da21);
AY0   = DM(da22);
AR    = AX0 - AY0 ;
AX0   = AR;
AY0   = 21;
AR    = AX0 + AY0 ;    {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0   =    DM(u);    {U*0.1}
MY0   = 0x0CCC;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer}    CALL    INTEGER;
MX0   = DM(sto1);
MY0   = DM(sto1);
MR    = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0;    {u0.1*u0.1 }

MX0   = DM(sto2);    {U*2}
MY0   = 0x007D;
MR    = MX0 * MY0 (UU);

DM(da31) = MR0;    {*****da31}
MX0   = DM(u);    {U}
MY0   = 0x008C;
MR    = MX0 * MY0 (UU);

DM(da32) = MR0;    {*****da32}

AX0   = DM(da31);
AY0   = DM(da32);
AR    = AX0 - AY0 ;
AX0   = AR;
AY0   = 0x23D6 ;    {*****da33}
AR    = AX0 - AY0 ;    {*****da_3}
{A}    IF GE JUMP WET ;
{A}    DM(sto2) = AR ;
AR    = 1;
DM(CH16) = AR;
AR    = DM(sto2);
{A}    AY0   = AR ;
{A}    AX0   = 0 ;
{A}    AR    = AX0 - AY0 ;
{A}    WET:   MX0 = AR;    {da_3/3}
MY0   = 0x0003;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da_3) = MR0; { q15}
```

```
CALL TORQUE;
```

```
AX0 = DM(t1);
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t3);
```

```
AX1 = 1;
AY1 = DM(CH16);
AR = AX1 - AY1;
IF EQ JUMP DO_SUB ;
AR = AX0 + AY0 ; { OLD}
JUMP NNT;
```

```
DO_SUB: AR = AX0 - AY0 ;
```

```
NNT: DM(TA) = AR;
```

```
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END*****TA_16}
AX0 = DM(u);
AY0 = 232 ;
AR = AX0 - AY0 ;
IF LE JUMP NOT_OFFSET ;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0xB000;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1;
```

```
NOT_OFFSET: AR = 0;
DM(CH16) = AR;
RTS;
```

```
{*****}
{*****TA_17*****}
```

```
TA_17:
```

```
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = DM(u);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u*u}
```

```
{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*U}
MY0 = 0x046C;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****dal1}
DM(dal1) = AR;
```

```
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 6;
```

เอกสารนี้เป็น MR ที่ = MX0 * MY0 (UU); และเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DM(sto1) = MR0; {u*6 }

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*6}
MY0 = 0xBE7F;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = 2094;
AY0 = DM(da12);
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da11);
AR = AX0 - AY0 ; {*****da_1}
MX0 = AR;
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}
MX0 = DM(sto2); {U*U}
MY0 = 0x0084;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da21}
DM(da21) = AR;

AX0 = DM(u);
AY0 = DM(u);
AR = AX0 + AY0 ;
MX0 = AR; {U*2}
MY0 = 0x5504;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0 = DM(da22);
AY0 = DM(da21);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 122;
AR = AX0 + AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;
MX0 = DM(u); {U*0.1}
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(sto1);
MY0 = DM(sto1);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto2) = MR0; {u0.1*u0.1 }

MX0 = DM(sto2); {U*2}
MY0 = 0x0023;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da31) = MR0; {*****da31}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x007A;
MR = MX0 * MY0 (UU);

```

```

DM(da32) = MR0; { *****da32}

```

```

AX0 = DM(da32);
AY0 = DM(da31);
AR = AX0 - AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = 0x1C75 ; { *****da33}
AR = AX0 + AY0 ; { *****da_3}
DM(da_3) = AR; { q15}

```

```

CALL TORQUE;

```

```

{integer}          CALL INTEGER;
{t3*10}           MX0 = DM(t3);
{t3*10}           MY0 = 10;
{t3*10}           MR = MX0 * MY0 (UU);
{t3*10}           DM(t3) = MR0;

AX0 = DM(t3);
AY0 = DM(t1);
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
DM(TA) = AR;
{fraction}       CALL FRACTION;
MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1;    {END*****TA_17}
RTS;
{*****}
{*****TA_18*****}
TA_18:
{integer}          CALL INTEGER;
MX0 = DM(u);
MY0 = 6;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(sto1) = MR0;   {u*6}

```

```

{fraction}       CALL FRACTION;
MX0 = MR0; {U*6}
MY0 = 0xB23B;
MR = MX0 * MY0 (UU);
AR = MR1; { *****da12}
DM(da12) = AR;
AX0 = 0;
AY0 = 2166;
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da12);

```

```

AR    = AX0 - AY0 ; {*****da_1}
MX0   =    AR;
MY0   = 0x0CCC;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1;
DM(da_1) = AR; {*****da_1*0.1}
{////////////////////////////////////}

AX0   = DM(u);
AY0   = DM(u);
AR    = AX0 + AY0 ;
MX0   = AR; {U*2}
MY0   = 0x2CC5;
MR    = MX0 * MY0 (UU);
AR    = MR1; {*****da22}
DM(da22) = AR;
AX0   = 0;
AY0   = 200;
AR    = AX0 + AY0 ;
AX0   = AR;
AY0   = DM(da22);
AR    = AX0 - AY0 ; {*****da_2}
DM(da_2) = AR;

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(u); {U}
MY0 = 0x0035;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(da32) = MR0; {*****da32}
AX0 = 0;
AY0 = 0x3E25;
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(da32); {*****da33}
AR = AX0 - AY0 ; {*****da_3}
DM(da_3) = AR; { q15}

CALL TORQUE;

{integer} CALL INTEGER;
{t3*10} MX0 = DM(t3);
{t3*10} MY0 = 10;
{t3*10} MR = MX0 * MY0 (UU);
{t3*10} DM(t3) = MR0;

AX0 = DM(t3);
AY0 = DM(t1);
AR = AX0 + AY0 ;
AX0 = AR;
AY0 = DM(t2);
AR = AX0 - AY0 ;
IF GE JUMP T18_OK ;
AR = 0;

T18_OK: DM(TA) = AR;
{fraction} CALL FRACTION;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MX0 = DM(TA);
MY0 = 0x0755;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(TA) = MR1; {END*****TA_18}
RTS;

```

```

{*****}
{*****TORQUE*****}

```

TORQUE:

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(v);
MY0 = 0x028F;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t11) = MR1;
MY0 = 0x0333;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t12) = MR1;

```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(t11);
MY0 = DM(t12);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t13) = MR0;

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(t13);
MY0 = 0x0CCC;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t14) = MR1;

```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(t14);
MY0 = DM(da 1);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t1) = MR0; {*****t1}
MX0 = DM(t11);
MY0 = DM(t11);
MR = MX0 * MY0 (UJ);
DM(t23) = MR0; {*****}

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(t23);
MY0 = 0x0444;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t24) = MR1;
MX0 = DM(v);
MY0 = 0x0666;
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t25) = MR1;

```

```

{integer} CALL INTEGER;
MX0 = DM(t24);
MY0 = DM(t25);
MR = MX0 * MY0 (UU);
DM(t26) = MR0;

```

```

{fraction} CALL FRACTION;
MX0 = DM(t26);
MY0 = 0x0666;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MR    = MX0 * MY0 (UU);
DM(t27) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0    = DM(t27);
MY0    = DM(da_2);
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t2) = MR0;          {*****t2}

{fraction} CALL FRACTION;
MX0    = DM(v);
MY0    = 0x0147;
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t31) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0    = DM(t31);
MY0    = DM(t31);
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t32) = MR0;
MX0    = DM(t32);
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t33) = MR0;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0    = DM(t33);
MY0    = 0x0333;
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t34) = MR1;
{integer} CALL INTEGER;
MX0    = DM(t34);
MY0    = DM(t31);
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t35) = MR0;
{fraction} CALL FRACTION;
MX0    = DM(t35);
MY0    = DM(da_3);
MR     = MX0 * MY0 (UU);
DM(t3) = MR1;          {*****t3}
RTS;
{*****}
INTEGER:
{integer} AR=MSTAT;
{integer} AR=SETBIT 4 of AR;
{integer} MSTAT =AR;
RTS;

FRACTION:
{fraction} AR=MSTAT;
{fraction} AR=CLRBIT 4 of AR;
{fraction} MSTAT =AR;
RTS;

TA_CPL:
{} AX0 = 0;
{} AY0 = DM(TA);
{} AR = AX0 - AY0 ;
{} DM(TA) = AR;

```

เอกสารนี้เป็น DM(TA) = AR; สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

RTS;
{*****FIND_T*****}
FIND_T:
    AR    = DM(sto1);
    SI    = AR;
    SR    = LSHIFT SI by -4(LO); { DIV 16 = 1024 => 1000 }
    AR    = SR0;
{fraction} CALL FRACTION;
    MX0   = SR0;
    MY0   = 0x7D00;
    MR    = MX0 * MY0 (UU);
    DM(v) = MR1; {*****Ia 10A = 1000}
    AX0   = DM(sto2);
    AY0   = 25 ;
    AR    = AX0 -AY0 ;
    MX0   = AR;
    MY0   = 0xA000;
    MR    = MX0 * MY0 (UU);
    SI    = MR1; { }
    SR    = LSHIFT SI by 1(LO); { MUL 2 }
    AR    = SR0;
    DM(COU) = AR;

{*****}
{*****CALL*****}
    AX0   = DM(COU);
    AY0   = 2562; { AT 1025 }
           AR    = AX0 -AY0 ;
           IF GE JUMP DO_CNN ;

    AR    = 0;
    DM(TA) = AR ;
    JUMP OUT_T ;

DO_CNN: AX0   = DM(v) ;
        AY0   = 20 ;
           AR    = AX0 -AY0 ;
           IF GT JUMP DO_CN ;

    AR    = 0;
    DM(TA) = AR ;
    JUMP OUT_T ;

DO_CN: AX0   = DM(COU);
        AY0   = 2500;
           AR    = AX0-AY0;
           if GT JUMP DO_CN1; ,

    AX0   = DM(COU);
    AY0   = 2250;
    AR    = AX0 -AY0 ;
    DM(u) = AR;
    CALL TA_10;
    JUMP OUT_T ;

DO_CN1: AY0   = 2750;
        AR    = AX0-AY0;
        if GT JUMP DO_CN2;

```

เอกสารนี้เป็น AX0 หรือ DM(COU) การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AY0 = 2500;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_11;
JUMP OUT_T;
DO_CN2: AY0 = 3000;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN3;
AX0 = DM(COU);
AY0 = 2750;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_12;
JUMP OUT_T;
DO_CN3: AY0 = 3250;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN4;
AX0 = DM(COU);
AY0 = 3000;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_13;
JUMP OUT_T;
DO_CN4: AY0 = 3500;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN5;
AX0 = DM(COU);
AY0 = 3250;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_14;
JUMP OUT_T;
DO_CN5: AY0 = 3750;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN6;
AX0 = DM(COU);
AY0 = 3500;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_15;
JUMP OUT_T;
DO_CN6: AY0 = 4000;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN7;
AX0 = DM(COU);
AY0 = 3750;
AR = AX0 - AY0;
DM(u) = AR;
CALL TA_16;
JUMP OUT_T;
DO_CN7: AY0 = 4250;
      AR = AX0 - AY0;
      if GT JUMP DO_CN8;
AX0 = DM(COU);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 4000 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AR      = AX0 - AY0 ;
DM(u)   = AR;
CALL TA_17;
JUMP OUT_T ;
DO_CN8: AY0 = 4500;
        AR = AX0-AY0;
        if GT JUMP DO_CN9 ;
AX0     = DM(COU);
AY0     = 4250;
AR      = AX0 - AY0 ;
DM(u)   = AR;
CALL TA_18;
JUMP OUT_T ;

DO_CN9: AR = 0;
        DM(TA) = AR ;
OUT_T :
RTS;
{*****}
.ENDMOD;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Sixth International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS 2005



Proceedings

28 Nov – 1 Dec 2005
Renaissance Hotel
Kuala Lumpur, Malaysia



Organiser:

Universiti Teknologi Malaysia

Co-organisers:



IEEE PELS/IAS/IES Joint Chapter, Malaysia Section
and
IEEE IAS/PELS Joint Chapter, Singapore Section

Technical Co-Sponsors:



IEEE Industry Applications Society

and



IEEE Power Electronics Society

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Torque Estimation Method for a Switched Reluctance Machine

S. Kaewthai

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
s7060221@kmitl.ac.th

S. Kittiratsatcha

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
kksupat@kmitl.ac.th

Abstract — This paper proposes the estimation of online instantaneous torque of a 12/8 three-phase switched-reluctance machine (SRM). The torque estimator achieved from the cubic spline interpolation technique. By using this method, we could reduce the need of too many input data which spending much time for data collection. The machine model is simulated in Matlab/Simulink to observe the dynamic behavior and also implemented using ADMC401 fixed-point digital signal processing (DSP) to verify the model. The agreement between simulation and experiment results has confirmed the accuracy of the proposed model and could be applied in various torque control applications.

Index Terms—Torque estimation, switched-reluctance machine, Cubic spline.

I. INTRODUCTION

The switched reluctance machine (SRM) has been known for a long time. However, the interest among researchers has only grown remarkably during the last two decades [1]-[6] due to the rapid development in microelectronics and power electronics and the inherent advantages of the motor. In order to design an efficient low cost SRM motor drive system and accurate nonlinear analysis by computer simulation to predict its dynamic performance is necessary.

From previous work [1], the authors propose the dynamic model of SRM based on current look up table and torque look up table. As a result, we found that the current lookup table used too much time for data collection (101 data for flux linkage and 115 data for rotor positions) [1]. Therefore, it is not suitable for optimum design, and it requires large amount of online storage space [2]. The key to achieve an effective SRM modeling is to use a methodology that allows the nonlinearity of its magnetization characteristics to be represented while maximizing the simulation speed [3]. This paper demonstrates the development of a SRM drives in Matlab/Simulink by reducing data collection (15 data for flux linkage and 10 data for rotor position). Cubic spline interpolation technique has been used for current look up table. And S-Function block has been implemented for torque estimation. Section II discusses about the dynamic characteristics of a SRM which will be used in the computer simulation. Torque estimation is found in section III. Section

IV is a simulation and the experimental setup. Section V is the conclusion.

II. DYNAMIC CHARACTERISTIC OF SRM

A dynamic model of a SRM is composed of a set of electrical equation for each phase and equation of mechanical system [1]. In typical n-phase SRM, if negligible phase interaction (no mutual coupling) is assumed, the machine's voltage equation can be expressed as:

$$v_x = R_x i_x + \frac{d\lambda_x(i_x, \theta_x)}{dt}, \quad x = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

where v_x is the terminal voltage of phase x ,

i_x is phase current,

R_x is phase winding resistor,

θ_x is rotor position,

and λ_x is the flux linkage.

However, the flux linkage is a function of current and the rotor position. Therefore, the voltage equation can be written as:

$$v_x = R_x i_x + \frac{\partial \lambda_x}{\partial i_x} \frac{di_x}{dt} + \frac{\partial \lambda_x}{\partial \theta_x} \frac{d\theta_x}{dt} \quad (2)$$

Then, the dynamics of phase current can be found as in (3):

$$\frac{di_x}{dt} = \left(\frac{\partial \lambda_x}{\partial i_x} \right)^{-1} \left(v_x - R_x i_x - \frac{\partial \lambda_x}{\partial \theta_x} \omega \right) \quad (3)$$

The mechanical equations of the SRM are

$$\frac{d\theta_x}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T_{em} - T_L(\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + B \omega \quad (5)$$

and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$T_{em} = \sum_{x=1}^n T_x(\theta, i_x) \quad (6)$$

where T_{em} is the total electromagnetic torque, T_x is the torque of each phase, T_L is load torque, ω is angular velocity. Meanwhile, J and B represent moment of inertia and coefficient of friction, respectively. From (4),(5) and (6), the acceleration of the motor is

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\sum_{x=1}^n T_x(\theta, i_x) - T_L - B\omega \right) \quad (7)$$

Thus (3), (4) and (7) will form the dynamic model that is used in a current loop up table and the simulation. From current look up table, we use the cubic spline interpolation technique to eliminate the need of much data collection as introduced in [1].

It should be noted that the instantaneous phase torque can be found from co-energy as given in (8):

$$T_x = \left. \frac{\partial W_{c_x}(i_x, \theta_x)}{\partial \theta_x} \right|_{i_x = \text{const}} \quad (8)$$

where

$$W_{c_x} = \int_0^{i_x} \lambda_x(i_x, \theta_x) di \quad (9)$$

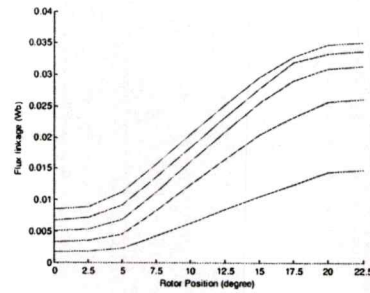
Thus, the phase torque can be represented as:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial \theta_x} \int_0^{i_x} \lambda_x(i_x, \theta_x) di \quad (10)$$

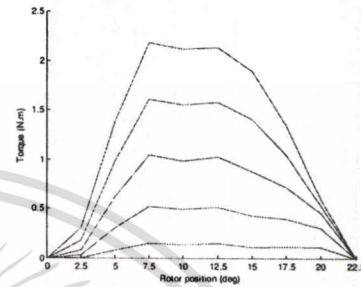
III. TORQUE ESTIMATION

The first step in modeling the nonlinear properties of the SRM is to predict the flux linkage curves as a function of rotor position and phase winding current. Static flux linkage and torque curves of the candidate machine are shown in Fig. 1 as a function of the rotor position and the phase current. The curve function has been identified in [4]. Rotor position is chosen to be zero when it is completely unaligned with the stator pole. In this position most of the stator flux finds its way through air. Hence, the resulting variation of the flux-linkages with current is almost linear. Whereas, at $\theta = 22.5^\circ$, the rotor is completely aligned with the stator pole. Due to highly permeable flux path through rotor pole, fluxes cross the air gap mainly through the rotor pole. This results in saturated iron core. The general phase flux linkage equation of a SRM is introduced in [4] as shown in (11).

$$\lambda(i, \theta) = a_1(\theta)i + a_2(\theta)i^2 + a_3(\theta)i^3 \quad (11)$$



(a)



(b)

Figure 1. Flux linkage (a) and torque production (b) as a function of current and rotor position.

where the coefficients a_1 , a_2 and a_3 are functions of rotor position. The data of Fig. 1, has been fit to (11) using MATLAB. The coefficient a_1 represents the unsaturated inductance of the coil while coefficient a_2 and a_3 represent the nonlinearity of the core.

Substituting (11) in (10), the torque of each phase becomes:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{da_1(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{3} i^3 \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{4} i^4 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \quad (12)$$

Equation (12) represents the electromagnetic torque developed by one phase of the machine. The other phases are also represented by the same set of equations with corresponding phase shifts and currents. The total electromagnetic torque developed by the motor is the sum of the instantaneous torques of the individual phase.

From (12), the instantaneous torque of each phase can be estimated by taking derivative of the coefficients a_1 , a_2 and a_3 . The values of a_1 , a_2 and a_3 proposed here are estimated by cubic spline interpolation technique. Let the i_{th} piece of the spline be represented by:

$$Y_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \quad (13)$$

where a_i, b_i, c_i, d_i are spline coefficients and x is parameter $\in [0, 1]$. Therefore, the derivatives of coefficients a_1, a_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

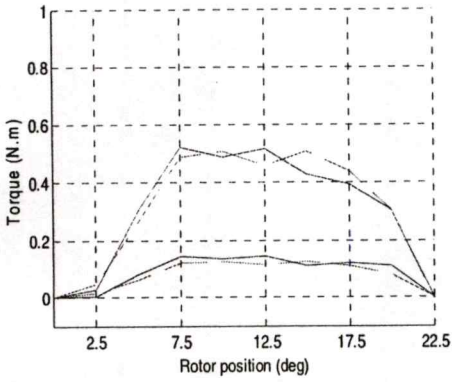


Figure 2. Comparison between proposed torque model in solid line and FEA in dashed line.

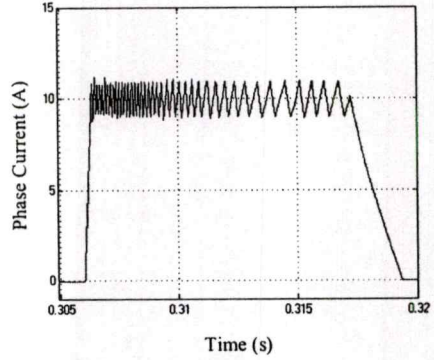


Figure 4. Simulated phase current.

and a_3 are the derivatives of cubic spline in each piece which becomes:

$$Y_i(x) = b_i + 2c_i x + 3d_i x^2 \quad (14)$$

Using (14) and the spline coefficients with (12) yield the torque value at particular position. Fig. 2 depicts the static torque from FEA compared with the results from (12) using spline coefficients. The fit is quite good. At 10A phase current, the torque production is about 0.5 N.m.

IV. COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENTAL SETUP

A. Computer Simulation

The proposed dynamic model of SRM utilizes the look-up table of measured characteristics to estimate the phase current when the input voltage and the rotor position are known. For torque estimation, the proposed cubic spline interpolation technique is used to get ride of much data collection. Fig. 7 shows the schematic diagram of the one-phase dynamic model. It can be noticed that flux linkage as input to the current look up table can be found in (15):

$$\lambda_x = \int (v_x - R_x i_x) . dt \quad (15)$$

All the models are integrated and the mechanical subsystem is included, a complete nonlinear dynamic model of the SRM is shown in Fig. 8.

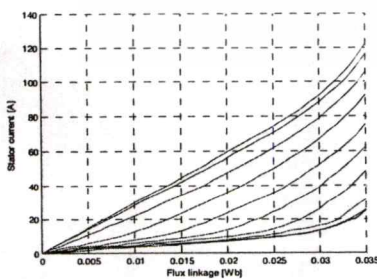


Figure 3. Current look-up table, generated from measure data.

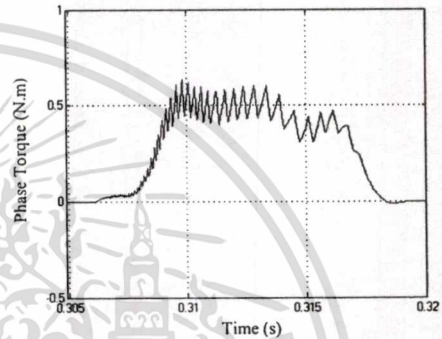


Figure 5. Simulated torque production from proposed torque estimation.

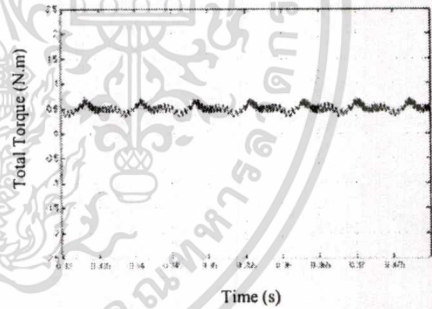


Figure 6. Simulated total electromagnetic torque

Fig. 3 shows the raw data of the flux linkage used in the simulation. These data are obtained from FEA at 10 rotor position and 15 different flux linkage values. These data are the magnetic property of the machine. To estimate the torque production, it requires two input data which are phase current and rotor position as shown in Fig. 7. Integrating (12) and (14) provides the torque production of each phase. Fig. 4 depicts the phase current which is controlled by current regulator at 10A. The estimated torque from proposed estimator is about 0.5 Nm and agrees with the result from FEA in Fig. 2. The total torque of the machine is simply summing up of all three phases as shown in Fig. 6.

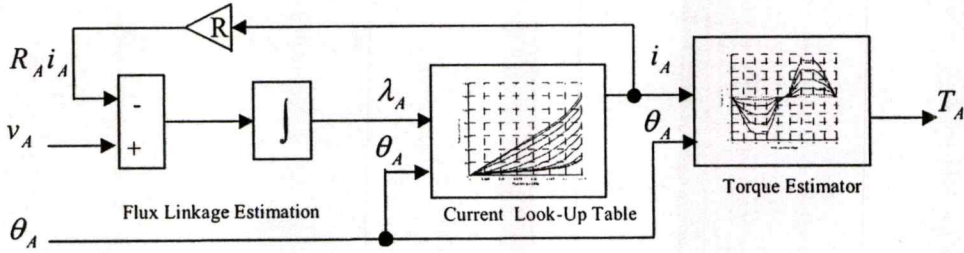


Figure 7. One phase electrical model of a SRM

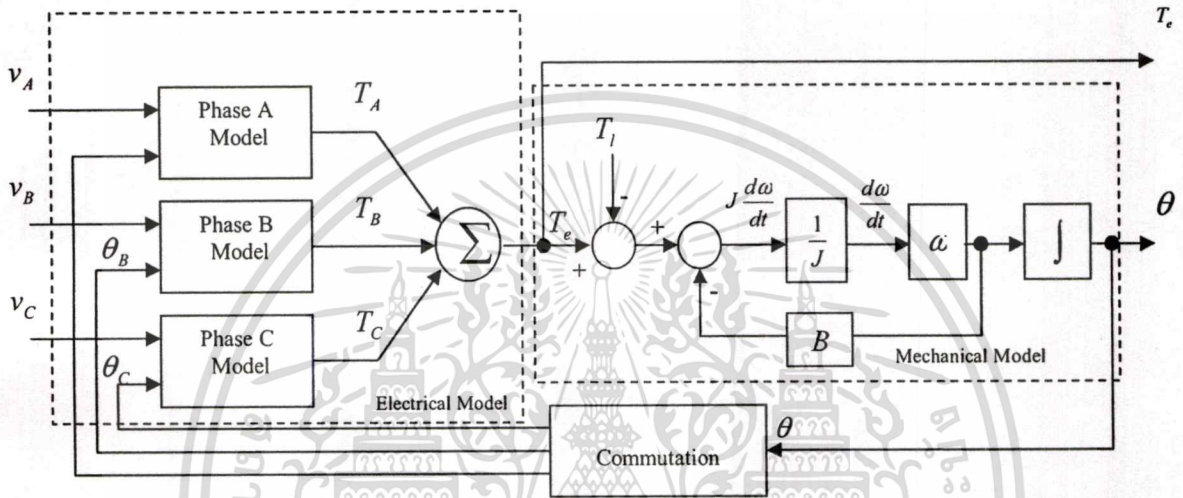


Figure 8. Dynamic model of a 3-Phase SRM using MATLAB/SIMULINK.

B. Experimental Setup

The experiment is set to implement the proposed model using a 1/4 hp 12/8 SRM. The machine parameter has been shown in Table 1. The experimental setup is shown in Fig. 9. The torque estimation is implemented in an ADMC401 DSP. The torque estimation has been obtained when the rotor position are known.

Each phase current has been collected by current sensors. An encoder has been connected to the shaft of rotor to obtain the rotor position. The estimation of torque production at 10A phase current is shown in Fig. 10.

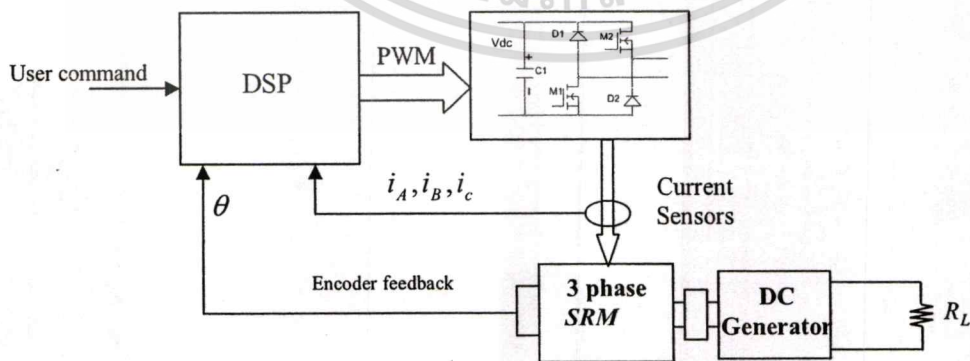


Figure 9. Block diagram of the SRM drive system.

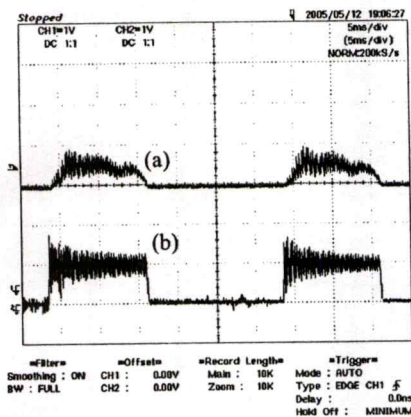


Figure 10. Experiment waveform of (a) phase torque, (b) phase current with current command at 10A.

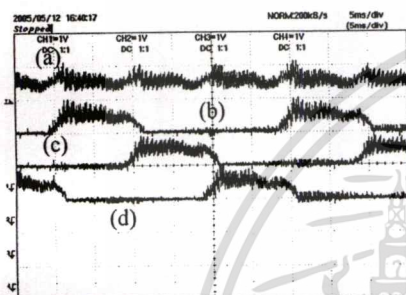


Figure 11. Total electromagnetic torque (a), torque of phase A (b), B (c), C (d) respectively.

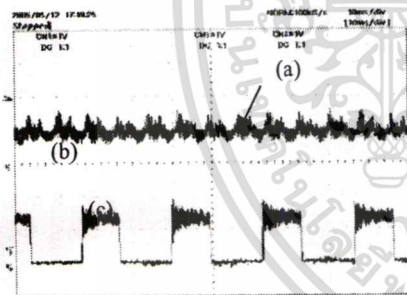


Figure 12. Command torque at 1 Nm (a), total electromagnetic torque (b), and phase current (c).

Fig. 11 depicts the result of estimation of total electromagnetic torque and torque production of each phase where command current is 10A and speed is 250 rpm. Close loop torque control has been tested on 1Nm of command with speed of 300 rpm. The result has been shown in Fig. 12.

V. CONCLUSION

This paper presents an analysis of torque estimation of SRM by using torque model integrated with the cubic spline interpolation technique to reduce the unnecessary input data. MATLAB/SIMULINK toolbox has been used to observe the dynamic of the SRM drives. The estimation has been imple-

TABLE 1: 12/8 SRM PARAMETERS.

Stator pole number	12	poles
Rotor pole number	8	poles
Stator pole arc, β_s	15	deg
Rotor pole arc, β_r	19	deg
Stack length	25.4	mm
Number of windings/pole	24	turns

mented in a DSP. The effective dynamic model has been developed using current look-up table generated from its measured data. Both computer simulation and the experiment are giving satisfactory results. The model is useful in further torque control design.

REFERENCES

- [1] P. Chanchareonsook, M. F. Rahman, "Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-up Tables," IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th, Annual Conference of the Volume 1, 5-8 Nov, 2002. Page(s): 491-496.
- [2] Sahoo, S. K, Zheng, Q, Penda, S. K, Xu, J. X, "Model-based torque estimator for switched reluctance motors," Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 2, 17-20 Nov, 2003. Page(s): 959-963.
- [3] Soares, F, Costa Branco, P. J, "Simulation of a 6/4 switched reluctance motor on Matlab/Simulink environment," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Volume 37, Issue 3, July 2001 Page(s):989 - 1009.
- [4] S. Kittiratsatcha, D. A. Torrey, "A Design Method of a Two-phase Switched-Reluctance Machine," Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 2, 17-20 Nov, 2003 Page(s):1599 - 1604.
- [5] Cui, P, Zhu, J. G, Ha, Q. P, Hunter, G. P, Ramsden, V. S, "Simulation of nonlinear switched reluctance motor drives with PSIM," Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Volume 2, 18-20 Aug. 2001 Page(s):1061 - 1064, vol.2.
- [6] Rahman, K. M, Rajarathnam, A. V, Ehsani, M, "Optimized instantaneous torque control of switched reluctance motor by neural network," Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE, Volume 1, 5-9 Oct. 1997 Page(s):556 - 563, vol.1.

ประวัติผู้เขียน

นายสิทธิชัย แก้วไทย เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้