สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบ 12/8

Determination of the Flux Linkage and Torque Characteristics of a 3-phase 12/8 SRM

โดย

นางสาวพัทธานันท์ เผื่อนเอี่ยม

นายพิเชษฐ สุนทรมณีโชติ

นายภาสกร วิญญูตระกูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2551
W547n
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 82940
วัน,เดือน,ปี 29 ก.ค. 2551

b 11956732
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบ 12/8

Determination of the Flux Linkage and Torque Characteristics of a 3-phase 12/8 SRM

โดย

นางสาวพัทธานันท์ เผื่อนเอี่ยม

นายพิเชษฐ สุนทรมณีโชติ

นายภาสกร วิญญูตระกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบ 12/8

ผู้จัดทำ

1.นางสาวพัทธานันท์ เผื่อนเอี่ยม

2.นายพิเชษฐ สุนทรมณีโชติ

3.นายภาสกร วิญญูตระกูล



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบ 12/8

นางสาวพัทธานันท์ เผื่อนเอี่ยม
นายพิเชษฐ สุนทรมณีโชติ
นายภาสกร วิญญูตระกูล
ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8 ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมีลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยเป็นฟังก์ชั่นของกระแสและตำแหน่งโรเตอร์ โครงงานนี้ได้มีการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อจำลองมอเตอร์บนคอมพิวเตอร์ และทำการจัดสร้างชุดทดลองเพื่อวัดฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดสถิต ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดและแม่นยำสูง ซึ่งจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้ในระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Determination of the Flux Linkage and Torque Characteristics of a 3-phase 12/8 SRM

Pattanan Phuen-eam
Pichet Soontronmaneechot
Passakorn Winyutrakul
Dr. Phop Chancharoensook Supervisor
2007

ABSTRACT

This thesis presents the determination of flux linkage and static torque characteristics of a 3-phase 12/8 switched reluctance machine. Such characteristics are highly nonlinear functions of current and rotor position. In this project, computer simulation using a finite element analysis program was done. Furthermore, experimental setups were built to measure flux linkage and static torque. Very fine and accurate data were obtained and stored in computer format. These machine's characteristics can be effectively used in high performance control of SRM, especially instantaneous torque control and sensorless operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงงานรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวความคิด รวมทั้งข้อมูลต่างๆ พร้อมทั้งขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านเหล่านี้โครงงานนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมโครงงานทุกคนที่ได้ร่วมกันทำงานอย่างเต็มที่ เพื่อให้งานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่วางเอาไว้ และขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมห้องปฏิบัติการวิจัย ECC-406 ทุกคนที่คอยเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดเวลา และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้

สุดท้ายนี้หวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คงเป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางสำหรับน้องรุ่นต่อไป และผู้ที่ต้องการศึกษาเพื่อที่จะพัฒนาโครงงานนี้ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..... I
ABSTRACT..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญภาพ..... VI
สารบัญตาราง..... X
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... 1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน..... 1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน..... 2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน..... 2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย..... 3
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 วงจรแม่เหล็กสมมูลย์ (Magnetic Equivalent Circuit)..... 4
2.2 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)..... 5
2.3 ทฤษฎีของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 7
2.3.1 ข้อดี ข้อเสีย ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์..... 9
2.3.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 10
2.3.3 การทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 11
2.3.4 กราฟ Magnetizing..... 12
2.3.5 แรงบิดชั่วขณะ (Instantaneous torque)..... 14
2.3.6 แรงบิดเฉลี่ย (Average torque)..... 20

บทที่ 3 การจำลองหาค่าคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิด
ด้วยโปรแกรม Finite element (Ansoft)..... 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง..... 29
การทดลองที่ 1 ชุดทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง Flux linkage..... 29
การทดลองที่ 2 ชุดทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง แรงบิดสถิตย์ 47

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน..... 65

บรรณานุกรม..... 66

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 วงจรแม่เหล็กของทอรอยด์..... 4

2.2 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า..... 5

2.3 ความเหนี่ยวนำ..... 6

2.4 M_{21} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 1 กระทำต่อขดลวดที่ 2 โดยกระแส i_1..... 6

2.5 M_{12} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 2 กระทำต่อขดลวดที่ 1 โดยกระแส i_2..... 7

2.6 แสดงสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ขนาดที่มีขนาด สเตเตอร์ 8 โพล และโรเตอร์ 6 โพล..... 7

2.7 SRM 3 phase 12/8..... 10

2.8 การทำงานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 6/4..... 11

2.9 แสดงกราฟ Magnetizing..... 12

2.10 ตำแหน่ง Aligned ของ SRM แบบ 12/8 ($\theta=0^{\circ}$)..... 13

2.11 ตำแหน่ง Unaligned ของ SRM แบบ 12/8 ($\theta=\pm 22.5^{\circ}$)..... 14

2.12 Co-energy และพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็ก..... 15

2.13 รูปการเปลี่ยนแปลงของ co-energy..... 15

2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์..... 16

2.15 การเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำและแรงบิด ด้วยตำแหน่งขอโรเตอร์ กระแสที่ขดลวดคงที่..... 17

2.16 การเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำ, กระแส, ฟลักซ์ลิงค์เกจ, แรงบิดemf ของตำแหน่งโรเตอร์, พัลส์ทางอุดมคติ unidirection current..... 18

2.17 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์..... 19

2.18 แสดงสภาวะที่จ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายทั้งหมดที่จ่ายให้มอเตอร์..... 20

2.19 แสดงสภาวะที่หยุดจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์..... 21

2.20 แสดงสภาวะที่มอเตอร์ทำงานครบ 1 ลูป การทำงาน 22

3.1 SRM 3 phase แบบ 12/8..... 23

3.2 แสดงขนาดของสเตเตอร์..... 24

3.3 แสดงขนาดของโรเตอร์..... 24

3.4 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์ ที่ Aligned position (0°)..... 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.5 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์ ที่ Intermediate position (11°)..... 25

3.6 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์..... 26

3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)..... 27

3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจ กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)..... 27

3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง flux linkage กับ กระแสกระตุ้น โดยมีตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)..... 28

3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง inductance กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)..... 28

4.1 ชุดทดลองการหาฟลักซ์ลิงค์เกจ..... 29

4.2 โปรเทกเตอร์ชนิดวงกลมใช้ระบุตำแหน่งของโรเตอร์..... 30

4.3 ตัวจับยึดเพื่อล็อกตำแหน่งของโรเตอร์..... 30

4.4 วงจรการทดลองการหาฟลักซ์ลิงค์เกจ..... 31

4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสที่ Aligned position..... 32

4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสที่ Unaligned position..... 33

4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5°..... 34

4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5°..... 34

4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5°..... 35

4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5°..... 35

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5°..... 36

4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5°..... 36

4.13 ผลการทดลองเมื่อใช้ค่าความต้านทานเท่ากันตลอด..... 37

4.14 ผลการทดลองเมื่อใช้ค่าความต้านทานเท่ากันตลอดและมีผลของค่า Offset..... 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.15 การขยายผลการทดลองเมื่อมีผลของค่า Offset..... 38

4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5° 39

4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5° 39

4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5° 40

4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5° 40

4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5° 41

4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5° 41

4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5° 42

4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5° 43

4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5° 43

4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5° 44

4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5° 44

4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส
ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5° 45

4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ เฟส A 45

4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ เฟส B 46

4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ เฟส C 46

4.31 ชุดทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง แรงบิดสถิตย์..... 48

4.32 DC Chopper (Buck Converter)..... 48

4.33 ตาชั่งและมวล..... 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.34 รูปวงจรการทดลองเพื่อหาค่าแรงบิดสถิตย์	49
4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส ของเฟส A ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°	51
4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส ของเฟส B ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°	51
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส ของเฟส C ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°	52
4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ที่ตำแหน่ง Aligned และ Unaligned	60
4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส A	61
4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส B	62
4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส C	62
4.42 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส A	63
4.43 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส B	63
4.44 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส C	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับ ซิงโครนัสมอเตอร์.....	8
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์.....	8
4.1 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส A มุมด้านลบ.....	53
4.2 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส A มุมด้านบวก.....	54
4.3 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส B มุมด้านลบ.....	55
4.4 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส B มุมด้านบวก.....	56
4.5 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส C มุมด้านลบ.....	57
4.6 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่าง ๆ ของเฟส C มุมด้านบวก.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์(SRM) ในอดีตนั้นไม่ค่อยได้รับความสนใจหรือมีการพัฒนามากนักเนื่องจากมีการควบคุมที่ยาก เพราะต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ แต่เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในปัจจุบันนี้ มีการสูญเสียเนื่องจากแปรงถ่าน และมีขีดจำกัดทางแรงดันด้านอินพุทที่ทำการจ่ายให้กับมอเตอร์ เพราะมอเตอร์กระแสตรงจะเกิดการอาร์คบริเวณคอมมิวเตเตอร์ที่แปรงถ่าน ส่วนมอเตอร์กระแสสลับนั้นจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ามอเตอร์กระแสตรงที่พิกัดขนาดเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสร้างสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ขึ้นมาใช้งานในปัจจุบันอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์มีแรงบิดสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสสลับที่พิกัดขนาดเดียวกัน และความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบันนั้นได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปมาก ดังนั้นจึงได้มีการทำโครงงานนี้ขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาชุดควบคุมสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์เพื่อที่จะสามารถควบคุมให้สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและการทำงานของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ชนิด 3-phase, 12/8 SRM โดยการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป

2. เพื่อทำการวัดหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และคุณลักษณะของแรงบิดโดยการสร้างชุดทดลองขึ้นมา แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ทำการศึกษาการทำงานและคุณลักษณะของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ด้วยโปรแกรม Finite Element Analysis

2. ทำการออกแบบชุดทดลองเพื่อวัดหาคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิดของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 เฟสแบบ 12/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการทำงานของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์
2. ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์เบื้องต้น
3. ทำการวัดขนาดโครงสร้างของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ที่จะทำการศึกษา
4. นำข้อมูลของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดไปทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม AutoCAD
5. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Ansoft
6. ทดลองจำลองการหาค่าแรงบิด และฟลักซ์ลิงค์เกจ ด้วยโปรแกรม Ansoft
7. สร้างชุดทดลองขึ้นมาเพื่อนำมาทำการทดลองหาค่าของแรงบิด และคุณลักษณะฟลักซ์ลิงค์เกจของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ชนิด 3-phase, 12/8 SRM
8. ทำการทดลองและเก็บผลการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะของแรงบิด และฟลักซ์ลิงค์เกจ

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน (ภาคเรียนที่ 1)	ระยะเวลาในการดำเนินงาน									
	มิถุนายน		กรกฎาคม		สิงหาคม		กันยายน		ตุลาคม	
	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4
ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการทำงานของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์	←	→								
ทำการวัดขนาดโครงสร้างของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์		←	→							
ทำการจำลองหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิด ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์			←	→		←	→			
ศึกษาทฤษฎีการวัดและการทดลองที่เกี่ยวข้อง						←	→			
ทดลองหาคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ทำมอเตอร์							←	→		
ทดลองหาค่าฟลักซ์ลิงค์เกจด้วยชุดทดลองอย่างง่าย							←	→		
จัดทำรายงานความก้าวหน้าของโครงงาน							←	→		

ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน (ภาคเรียนที่ 2)	ระยะเวลาในการดำเนินงาน									
	พฤศจิกายน		ธันวาคม		มกราคม		กุมภาพันธ์		มีนาคม	
	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4	สัปดาห์ 1-2	สัปดาห์ 3-4
จัดทำชุดทดลองหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ	←			→						
ทำการทดลองหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ					←		→			
รวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลอง							←	→		
จัดทำชุดทดลองหาคุณลักษณะของแรงบิด						←	→			
ทำการทดลองหาคุณลักษณะของแรงบิด							←	→		
รวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลอง								→		
สรุปผลการทดลองการหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิด								→		
จัดทำปริญญานิพนธ์								→		→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถรู้โครงสร้างและหลักการทำงานเบื้องต้นของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ได้

2. สามารถหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และคุณลักษณะของแรงบิด ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ได้ ทั้งจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ และจากการวัดด้วยชุดทดลองที่ได้มีการออกแบบสร้างขึ้น

3. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงและพัฒนาสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์และชุดควบคุมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นบทนำ

บทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำโครงการ โดยจะเริ่มกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของวงจรแม่เหล็กก่อน หลังจากนั้นจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับโครงสร้าง และการทำงานของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

บทที่ 3 เป็นการศึกษาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิดของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 เฟสแบบ 12/8 โดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ และผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม

บทที่ 4 เป็นการศึกษาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิดของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 เฟสแบบ 12/8 ด้วยชุดทดลองที่สร้างขึ้นและผลการทดลองที่ได้

บทที่ 5 บทสรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ

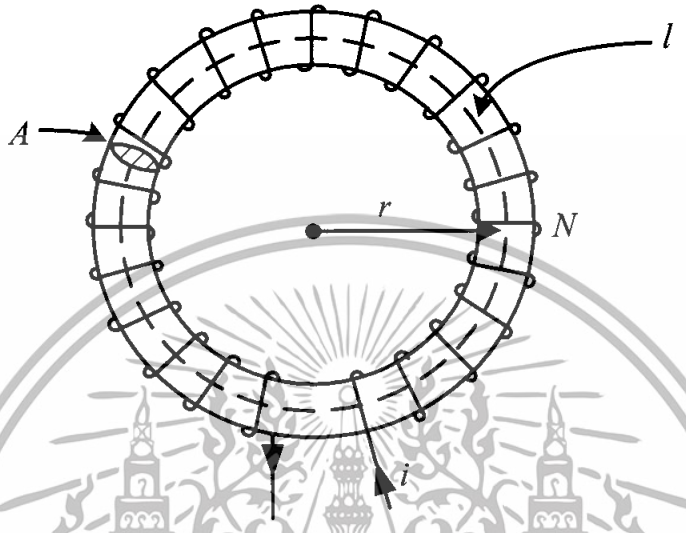
บรรณานุกรม

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรแม่เหล็กสมมูลย์ (Magnetic Equivalent Circuit)



ภาพที่ 2.1 วงจรแม่เหล็กของทอรอยด์

การพิจารณาทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่รัศมี r ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก(H) คำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ นั่นคือ $\int Hdl = Ni$ (1)

ดังนั้น $H = \frac{N}{l} i$ At/m (2)

โดย mmf = F = Hl = Ni (3)

ดังนั้น $B = \frac{\mu Ni}{l}$ Tesla (4)

เส้นแรงแม่เหล็กตัดขวาง (Flux crossing) บนพื้นที่หน้าตัดทอรอยด์ คำนวณได้ดังนี้

$$\phi = \int BdA = BA \text{ Wb} \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงเฉลี่ยในแกน และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของทอรอยด์

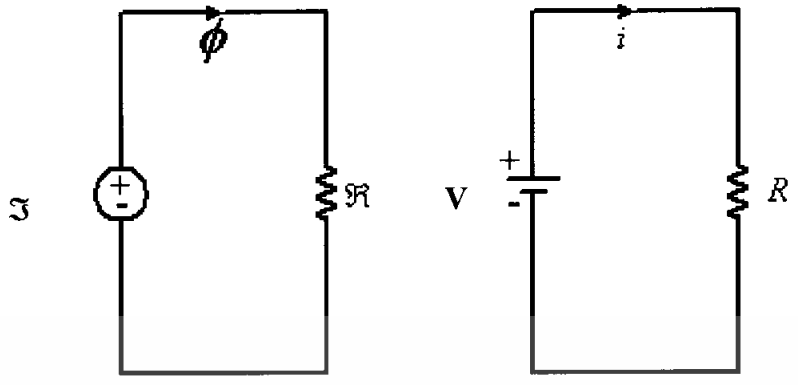
$$\phi = \frac{\mu Ni}{l} A = \frac{Ni}{l/\mu A} \quad (6)$$

$$\Re = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{P} \quad (7)$$

โดยที่ $\Re$ คือ ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance of magnetic)

P คือ ความนำแม่เหล็ก (Permeance of magnetic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรแม่เหล็ก (ข) วงจรไฟฟ้า

ภาพที่ 2.2 [3] เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก
Voltage, V	Magnetomotive Force (mmf), $\mathfrak{I}$
Current, i	Magnetic Flux, ϕ
Resistance, R	Reluctance, $\mathfrak{R}$

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก [3]

2.2 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

- ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance)

วงจรแม่เหล็กภาพที่ 2.3 (ก) มีขดลวดพันอยู่บนแกนแม่เหล็กจำนวน N รอบ ซึ่งขดลวดดังกล่าวนี้ เรียกว่า ความเหนี่ยวนำตัวเอง หรือความเหนี่ยวนำ และวงจรสมมูลย์แสดงได้ดังภาพที่ 2.3 (ข) โดยที่กำหนดให้เส้นแรงเชื่อมโยง (flux linkage) ขดลวดต่อแอมแปร์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ดังสมการ (8)

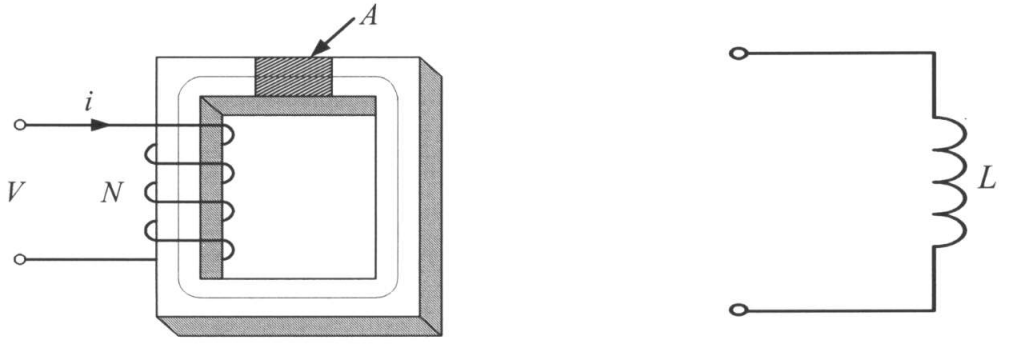
$$\lambda = N\phi \tag{8}$$

$$L = \frac{\lambda}{i} \tag{9}$$

ดังนั้น $$L = \frac{N\phi}{i} \tag{10}$$

นั่นคือ $$L = \frac{N^2}{\Re} \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



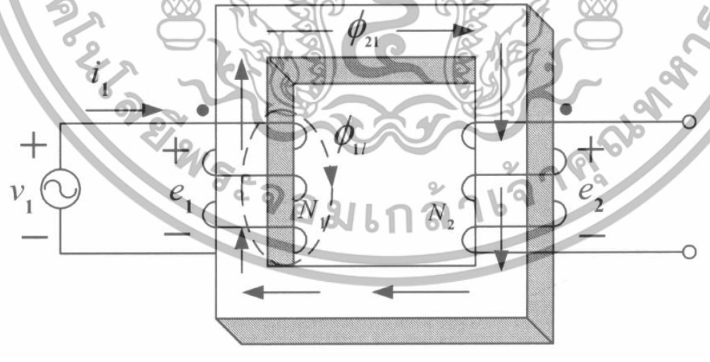
(ก) กลุ่มขดลวด – แกน (ข) วงจรสมมูลย์ของค่าความเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 2.3 ความเหนี่ยวนำ

- ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

การพิจารณาวงจรแม่เหล็กในภาพที่ 2.4 นั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแส i_1 ที่ไหลในขดลวดที่ 1 ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_1 ขณะที่เปิดวงจรด้านขดลวดที่ 2 โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 1 สำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{21} ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสเข้าไปยังขดลวดที่ 1 นั้นเป็นการเชื่อมโยงของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดที่ 1 ไปยังขดลวดที่ 2 และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{21} ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 2

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_1} \tag{12}$$

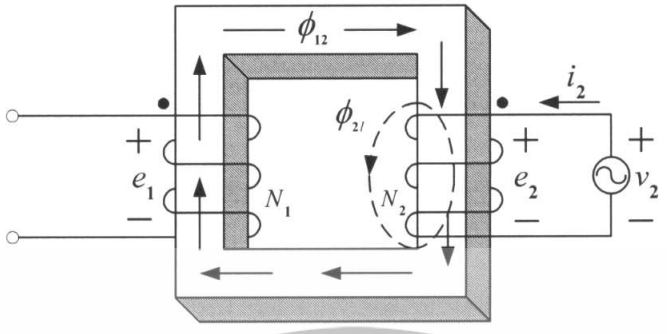


ภาพที่ 2.4 M_{21} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 1 กระทำต่อขดลวดที่ 2 โดยกระแส i_1

และในลักษณะเดียวกันจากภาพที่ 2.5 ถ้าผ่านกระแส i_2เข้าไปยังขดลวดที่ 2 ขณะที่ขดลวดที่ 1 เปิดวงจรจะมีผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_1 และแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 2 โดยที่การเชื่อมโยงเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่ 2 ไปยังขดลวดที่ 1 ส่งผลให้มีเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{12} ไหลผ่านไปยังขดลวดที่ 1 และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่ 1

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_2} \tag{13}$$

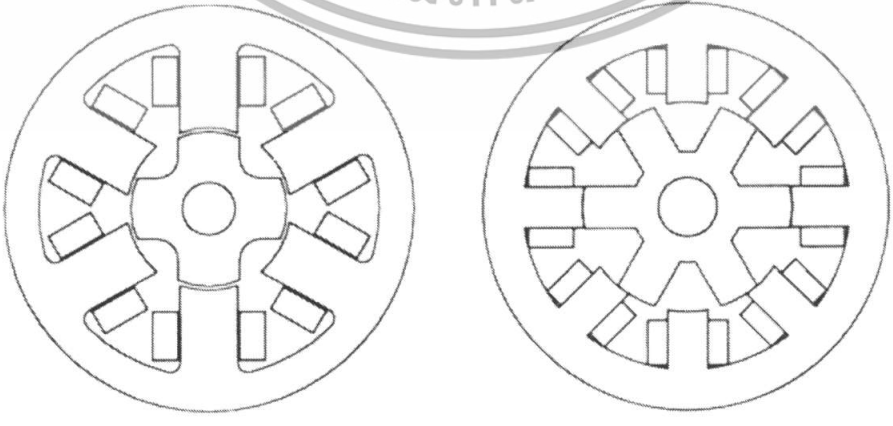


ภาพที่ 2.5 M_{12} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 2 กระทำต่อขดลวดที่ 1 โดยกระแส i_2

2.3 ทฤษฎีของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ [1]

สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ คือ มอเตอร์ไฟฟ้าที่สร้างแรงบิดโดยการป้อนกระแสพัลส์ ทำให้หมุนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด และทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่

การเคลื่อนที่จะเป็นแบบหมุนหรือเคลื่อนที่ในแนวราบเป็นเส้นตรง โดยที่โรเตอร์อาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกก็ได้ ที่สเตเตอร์จะถูกพันด้วยขดลวดซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรทางไฟฟ้าเฟส หรือแยกขดแต่ละเฟส สามารถป้อนกระแสแยกเป็นอิสระต่อกัน ในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ ขดลวดแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นด้วยกระแสพัลส์ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น และในขณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่ถูกกระตุ้นกระแสพัลส์ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์



ภาพที่ 2.6 แสดงสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ขนาดที่มีขนาด สเตเตอร์ 8 โพล และโรเตอร์ 6 โพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับซิงโครนัสมอเตอร์ และเสต็ปปิ้งมอเตอร์ในทางอุดมคติ

มอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดมีความคล้ายคลึงกัน และแตกต่างกันดังจะอธิบายดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับ ซิงโครนัสมอเตอร์

Switched reluctance motor	Synchronous reluctance motor
1. stator และ rotor เป็นแบบ salient pole 2. ขดลวดที่สเตเตอร์จะรวมกันเป็นชุดหรือ coil แต่ละชุดจะพันเป็น 1 ขั้วแม่เหล็ก 3. ในการกระตุ้นแต่ละเฟสนั้นจะใช้ลำดับเฟสของกระแสพัลส์ 4. ในขณะที่มอเตอร์หมุน flux linkage จะเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมหรือ saw tooth แต่จะไม่เปลี่ยนตามกระแส	1. สเตเตอร์จะเรียงทำเป็น slot 2. สเตเตอร์มีขดลวด 3 เฟส ซึ่งขดลวดจะกระจายออกและเป็นรูป sine โดยประมาณ 3. การกระตุ้นทั้ง 3 เฟส จะใช้สัญญาณกระแส sine wave แบบสมดุล (phase balance) 4. ค่า L ภายใน จะเปลี่ยนตามสัญญาณ sine ตามตำแหน่งของโรเตอร์ แต่ไม่เปลี่ยนตามกระแส

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับ ซิงโครนัสมอเตอร์

2. ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์

สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์มีองค์ประกอบทางด้านโครงสร้างและส่วนของวงจรทางแม่เหล็ก เหมือนกับ สเต็ปปิ้งมอเตอร์ ดังภาพที่ 2.6 แต่จะแตกต่างกันที่การออกแบบวิธีการในการควบคุมและสมรรถนะของคุณลักษณะในการใช้งานซึ่งข้อแตกต่างจะกล่าวดังต่อไปนี้

Switched reluctance motor	VR stepper motor
1. ในการทำงานปกติจะต้องทำการตรวจจับตำแหน่งเพลา และทำการป้อนกลับมายังระบบ โดยให้กระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ไปพร้อมๆ กัน 2. ออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูง	1. ในการทำงานปกติมอเตอร์จะหมุนแบบ open loop โดยไม่ต้องทำการตรวจจับตำแหน่งของเพลา 2. ออกแบบให้มี step มาสมบูรณ์แล้วเมื่อได้รับการป้อนพลังงาน

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ข้อดี ข้อเสีย ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

ข้อดี ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์มีลักษณะเฉพาะพิเศษที่ถูกสร้างขึ้นมาให้มีความแข็งแรงกว่า AC และ DC มอเตอร์และมีหลายความเร็วในการหมุน ซึ่งข้อดีของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ กล่าวได้ดังนี้

1. เป็นเครื่องกลที่มีโครงสร้างง่าย และราคาถูก ไม่มีขดลวดที่โรเตอร์และแม่เหล็กถาวร
2. ไม่ช็อตถึงกันกันระหว่าง DC buses เพราะแต่ละขดลวดต่ออนุกรมกัน
3. การระบายความร้อนทำได้ง่าย
4. คุณสมบัติของ torque – speed ของมอเตอร์ สามารถออกแบบสำหรับใช้งานเฉพาะได้ง่ายกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ
5. แรงบิดเริ่มเดินสูง และไม่มีปัญหากระแสอินรัส (inrush current) เพราะค่า L ภายในสูงมาก
6. แรงดันเปิดวงจร และกระแสลัดวงจรในขณะที่เกิดฟอลต์ เป็นศูนย์หรือน้อยมาก
7. โรเตอร์ทนความร้อนได้สูงมาก เนื่องจากไม่มีแม่เหล็กถาวร
8. สามารถออกแบบมอเตอร์ให้ใช้งานที่ความเร็วรอบสูงในขณะที่ทำงานในช่วงกำลังคงที่ได้
9. ขดลวดของสเตเตอร์แยกอิสระต่อกัน ขับแยกเฟสเดียวกันหรือมากกว่านั้นพร้อมกันได้
10. เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งล้มเหลวก็ยังสามารถหมุนต่อไปได้

ข้อเสียของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

1. มีแรงบิดริบเปิลสูงมากเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น
2. กระแสที่แหล่งจ่ายกระแสตรงมี ริบเปิล มากจำเป็นต้องใช้คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ตัวใหญ่ หรือสามารถแก้โดยต้องเพิ่มตัวเก็บประจุความถี่สูงเข้าไป
3. เกิดเสียงดังจากการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์สูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น
4. ต้องการเครื่องมือตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ [2]

เครื่องจักรกลชนิดนี้จะมีโครงสร้างสองส่วนเหมือนเครื่องจักรกลชนิดอื่นๆ คือ จะประกอบไปด้วย สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ ส่วนที่โรเตอร์นั้นจะไม่มีขดลวด ซึ่งสาเหตุนี้ทำให้เครื่องจักรแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ นั้นมีข้อดีในด้านที่มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยที่สเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์นั้น จะมีลักษณะเป็นขั้วยื่น (Salient Pole) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 SRM 3 phase 12/8

เครื่องจักรกลชนิดนี้สามารถสร้างกี่เฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ จำนวนของสเตเตอร์โพลและโรเตอร์โพลก็ขึ้นอยู่กับจำนวนเฟสของเครื่องจักรกล และจำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ (Number of strokes per revolution, N_t) โดยจำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_t = (N_s N_r)/2 \qquad (14)$$

N_t คือ จำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ

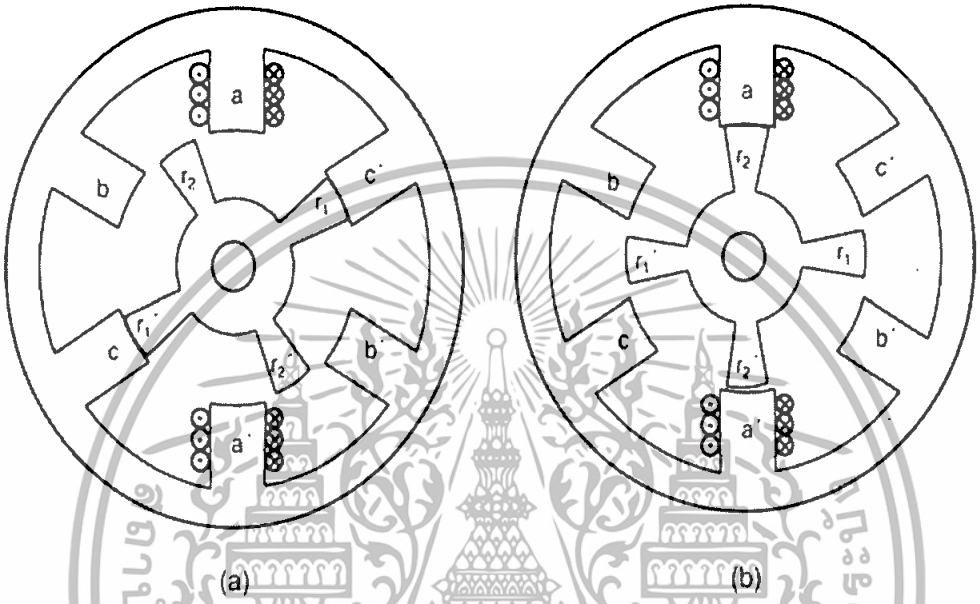
N_s คือ จำนวนของสเตเตอร์โพล

N_r คือ จำนวนของโรเตอร์โพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ [2]

พิจารณาที่ขั้วของโรเตอร์ r_1 และ r_1' และขั้วสเตเตอร์ c และ c' อยู่ที่ระนาบเดียวกันกับโรเตอร์ จ่ายกระแสไปที่เฟส a โดยที่ทิศทางของกระแสดังรูป เส้นแรงแม่เหล็กถูกสร้างผ่านสเตเตอร์ a และ a' และ โรเตอร์ r_2 และ r_2' ซึ่งจะทำการดึงโรเตอร์ r_2 และ r_2' ไปหาขั้วสเตเตอร์ a และ a' ตามลำดับ



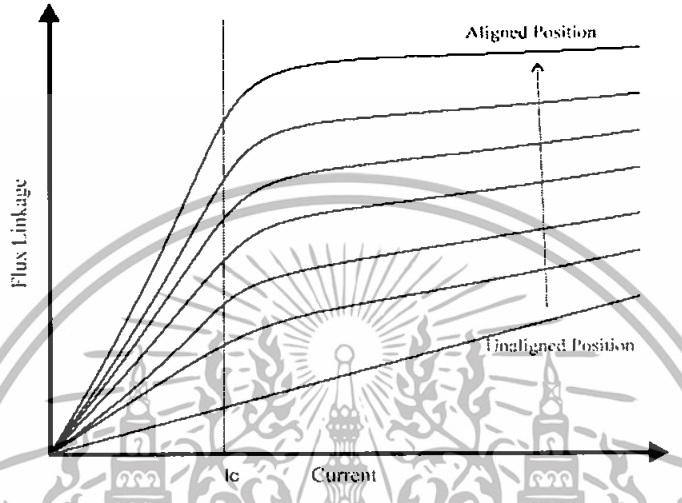
ภาพที่ 2.8 การทำงานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 6/4 [4]
(a) เฟส c อยู่ที่ตำแหน่งระนาบ
(b) เฟส c อยู่ที่ตำแหน่งระนาบ

เมื่อขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ดังกล่าวอยู่ในระนาบเดียวกันแล้ว กระแสจะถูกหยุดจ่ายพลังงานซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 2.8(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 รอบ ของการเคลื่อนเป็นผลมาจากการสวิตช์ค่ากระแสในแต่ละเฟส การสวิตช์ซิ่งค่ากระแสอย่างเป็นลำดับ a-b-c ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะตามเข็มนาฬิกาและการสวิตช์ซิ่งค่ากระแสอย่างเป็นลำดับ b-a-c ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 กราฟ Magnetizing

คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง λ ในแนวตั้ง และกระแสในขดลวดเฟส ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เส้นกราฟเหล่านี้สามารถมีได้หลายเส้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วย ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง จึงเป็นทั้งฟังก์ชันของกระแสเฟส และตำแหน่งของโรเตอร์



ภาพที่ 2.9 แสดงกราฟ Magnetizing

- ตำแหน่งแนวตั้ง (Aligned position)

ณ ตำแหน่ง Aligned นี้ คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นภาพที่ 2.10 แสดงถึงมอเตอร์ 3 เฟสชนิด 12/8 หมายความว่าเป็นมอเตอร์แบบสามเฟสที่มีสเตเตอร์จำนวน 12 ขั้ว และโรเตอร์จำนวน 8 ขั้ว โดยกำหนดให้เฟสที่ 1 คือเฟสในแนวตั้งฉาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขั้วของโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุด ถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อย จะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่ง Aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)

จากสมการ (15) พบว่า ถ้าความกว้างของช่องอากาศระหว่างขั้วของโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์มีค่าน้อยที่สุด จะทำให้ค่ารีลักแตนซ์ $\mathcal{R}$ มีค่าต่ำที่สุดด้วย

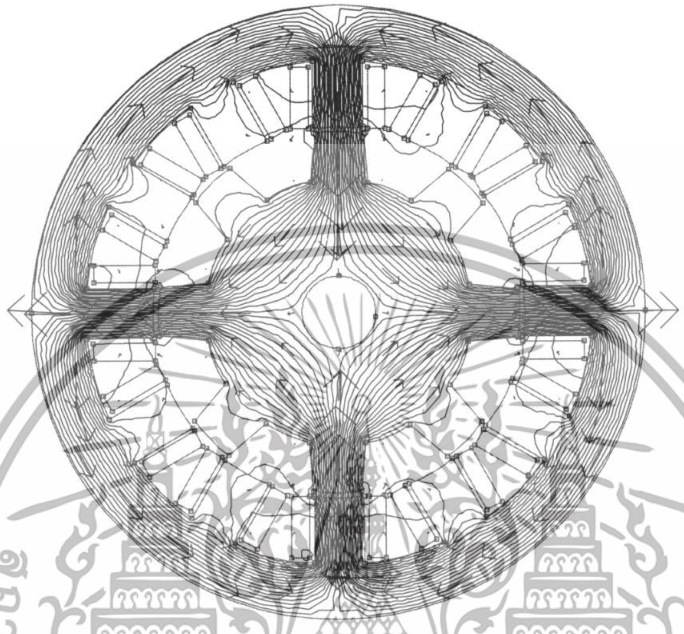
$$\mathcal{R} = l / \mu A \qquad (15)$$

โดยที่ l คือความกว้างของช่องอากาศ ค่า μ คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และ A คือค่าพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำที่สุด ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าสูงสุด ตามสมการ (16)

$$L = \frac{N^2}{\Re_{total}} \tag{16}$$



ภาพที่ 2.10 ตำแหน่ง Aligned ของ SRM แบบ 12/8 (θ=0°)

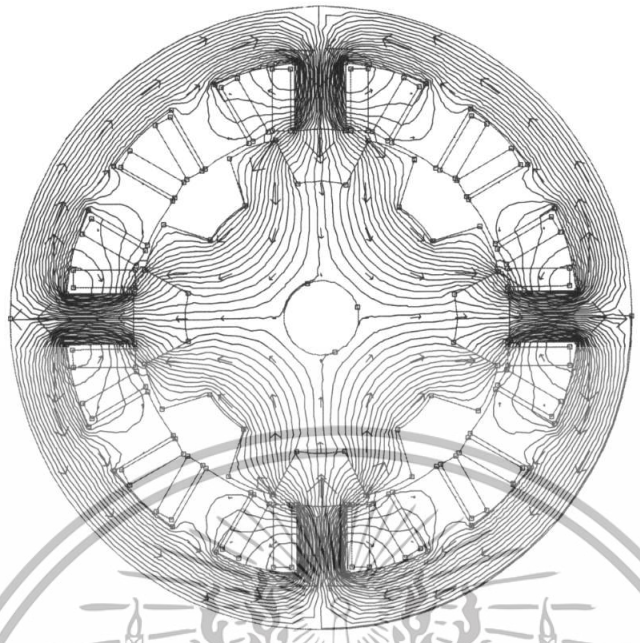
- ตำแหน่งที่ไม่ใช่แนวตั้ง (Unaligned position)

เมื่อแกนของโรเตอร์ไม่อยู่ตรงกับขั้วของเฟส 1 ของสเตเตอร์ เราจะเรียกตำแหน่งนี้ว่า unaligned position ดังภาพที่ 2.10 เมื่อมีกระแสไหลในเฟส 1 จะไม่เกิดแรงบิดที่ตำแหน่งนี้ แต่ถ้าเมื่อลองขยับโรเตอร์เพียงเล็กน้อย พบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดอยู่ที่ตำแหน่ง Aligned ดังนั้น ณ จุด Unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

จากภาพที่ 2.11 พบว่า ค่าความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจำทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุดที่สุด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรต่ำที่สุดด้วย ส่วนเส้นกราฟ magnetizing จะอยู่ในตำแหน่งดังภาพที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งนี้ เส้นกราฟ magnetizing จะเป็นเส้นตรง และไม่ปรากฏการณ์อิ่มตัวเกิดขึ้น เนื่องจากค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศมีค่ามากกว่าของแกนมอเตอร์มาก ดังแสดงในสมการที่ (17)

$$L = N^2 \left(\frac{1}{\Re_{core} + \Re_{gap}} \right) \tag{17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ตำแหน่ง Unaligned ของ SRM แบบ 12/8 ($\theta=\pm 22.5^{\circ}$)

ตำแหน่ง Intermediate

คือตำแหน่งของโรเตอร์ที่อยู่ระหว่างตำแหน่ง Aligned และตำแหน่ง Unaligned จะพบว่าเส้นกราฟ magnetizing จะเริ่มปรากฏการณ์อิ่มตัว ณ ตำแหน่งเมื่อขั้วของโรเตอร์ซ้อนทับกับขั้วของสเตเตอร์

2.3.5 แรงบิดชั่วขณะ (Instantaneous torque)

เมื่อกระแสไหลในเฟสหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงบิดและทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางหนึ่ง มีผลทำให้ค่า L มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงตำแหน่งที่ค่า L มีค่าสูงสุด ทิศทางของแรงบิดจะเกิดใกล้ๆ กับ aligned position เพราะฉะนั้นจะสามารถสร้างแรงบิดที่เป็นบวกได้ ถ้าโรเตอร์อยู่ระหว่าง unaligned position กับ aligned position ถัดไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะเดียวกัน มอเตอร์มีแรงบิด ค่า L จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 2.11 ถ้าขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์สมมาตรกัน แต่ละเฟสจะสามารถสร้างแรงบิดไปในทิศทางเดียวกันได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะ pole-pitch

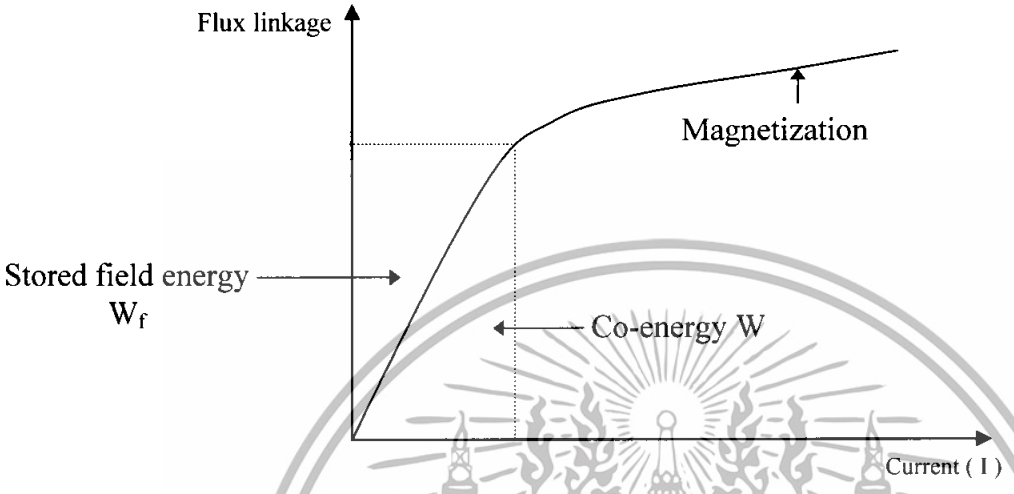
สมการทั่วไปที่ใช้หาแรงบิดที่เกิดขึ้นใน 1 เฟส ณ ตำแหน่งใดๆ ก็ได้

$$T = \left[\partial W' / \partial \theta\right]_{I=CONT} \tag{18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W' คือ Co-energy ที่ตำแหน่งใดๆ Co-energy คือพื้นที่ด้านล่างของกราฟอำนาจแม่เหล็ก (magnetization curve)

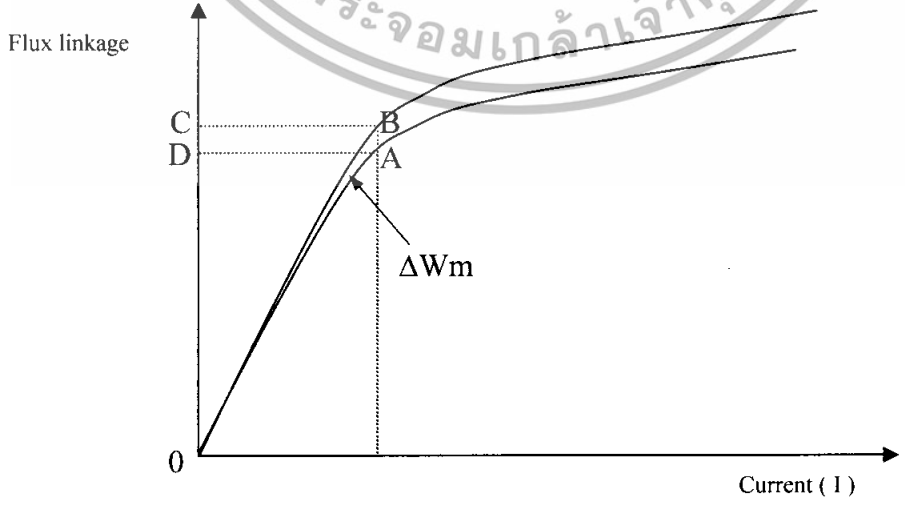
$$W' = \int_0^{\pi} \Psi di \tag{19}$$



ภาพที่ 2.12 Co-energy และพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็ก [1]

จากสมการแรงบิดชั่วขณะ สามารถหาได้จาก

เมื่องาน (ΔWm) หารด้วย ($\Delta\theta$) และเมื่อ (ΔWm) คืองานที่ค่อยๆ เกิดขึ้น เมื่อกระแสคงที่ตำแหน่งที่โรเตอร์หมุนไปคือ ($\Delta\theta$) จากภาพที่ 2.13 จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแหล่งจ่าย และเปลี่ยนในรูปของพลังงานสนามแม่เหล็กสะสม ดังนั้นงานทางกลจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy ดังนั้นจึงกำหนดได้ดังนี้



ภาพที่ 2.13 รูปการเปลี่ยนแปลงของ co-energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta\theta$ คือการเคลื่อนที่จาก A ถึง B ในภาพที่ 2.13

พลังงานแลกเปลี่ยนที่แหล่งจ่าย คือ

$$\Delta We = ABCD \tag{20}$$

พลังงานแม่เหล็กสะสมที่ถูกแลกเปลี่ยน คือ

$$\Delta Wf \text{ คือ } OBC - OAD \tag{21}$$

เพราะฉะนั้นงานทางกลที่ได้ คือ

$$\Delta Wm = T\Delta\theta \tag{22}$$

$$= \Delta We - \Delta Wf$$

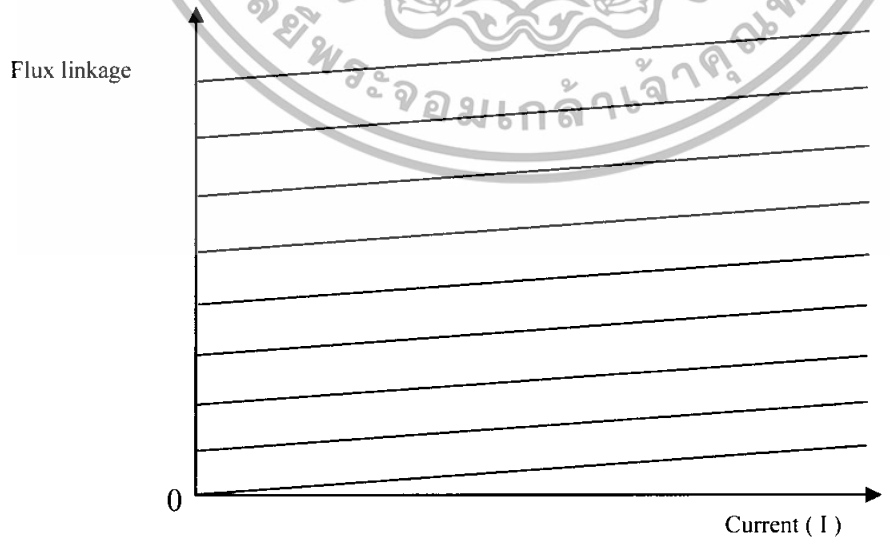
$$= ABCD - (OBC - OAD)$$

$$= (ABCD + OAD) - OBC$$

$$= OAB \tag{23}$$

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่แหล่งจ่ายไม่ใช่พลังงานทั้งหมด ที่เปลี่ยนแปลงเป็นงานทางกลได้ แต่จะถูกสะสมในรูปของสนามแม่เหล็กและพลังงานที่สะสมในรูปสนามแม่เหล็กจะไม่สูญหายไปไหน แต่พลังงานที่เปลี่ยนจากการหมุนจาก A ถึง B ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ สิ่งที่สำคัญ คือจะทำให้ C filter มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

ในภาพที่ 2.14 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์ ซึ่งจะอธิบายได้ว่า เมื่อโรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง aligned position จะมีค่า flux-linkage สูง และเมื่อโรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง unaligned position จะมีค่า flux-linkage ต่ำ ค่า L เพิ่มขึ้นจาก 0 (unaligned) ถึง (aligned) เป็นสภาวะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring) หลังจากนั้น ถ้าจ่ายกระแส แรงบิดจะเป็นลบ (-) เป็นสภาวะ Generating



ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปรผันความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์

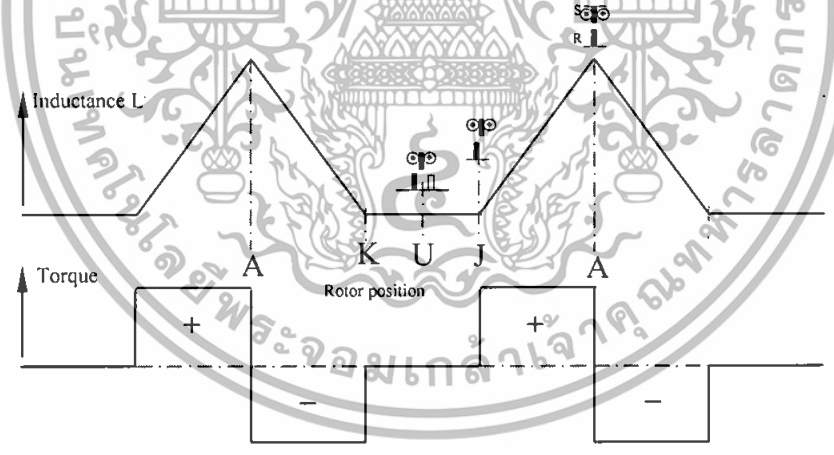
เมื่อมอเตอร์หมุนไปในทิศทางบวก คือ การหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สมมุติว่าขดลวดให้กระแสคงที่ เมื่อมอเตอร์หมุนไปในทิศทางบวกจะทำให้เกิดแรงบิดและทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นที่ในขณะที่โรเตอร์ใกล้เข้าสู่สภาวะตำแหน่งแบบเรียงเป็นแนวเดียวกัน (Aligned)

คือค่าระหว่างตำแหน่ง J และ A ที่ตำแหน่ง J เมื่อขอบของขั้วโรเตอร์นำหน้าเรียงเป็นแนวเดียวกันกับขอบของขั้วสเตเตอร์ เริ่มแรกที่ตำแหน่ง A เมื่อขั้วของโรเตอร์และขั้วของสเตเตอร์อยู่ตรงกัน ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าที่ J เป็นจุดเริ่มต้นของการซ้อนกัน ที่จุด A เป็นจุดที่มีการซ้อนกันสูงสุด และที่ K เป็นจุดสิ้นสุดของการเหลื่อมซ้อนกัน

แรงบิดเปลี่ยนทิศทางที่ตำแหน่งเรียงเป็นแนวเดียวกัน ถ้าโรเตอร์อยู่ติดกับส่วน A จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วทำให้แรงบิดลดลง

ถ้าเครื่องจักรหมุนด้วยกระแสในขดลวดที่แรงบิดอิมพัลส์ทั้งบวก และลบ จะหักล้างกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยในไซเคิลนั้นจะเป็นศูนย์พอดี การที่จะกำจัดแรงบิดอิมพัลส์ที่เป็นลบนั้น ต้องทำการหยุดจ่ายกระแส ขณะที่ขั้วแยกออกจากกัน

รูปคลื่นของกระแสทางอุดมคติจะมีความต่อเนื่องกันของช่องว่างระหว่างพัลส์ซิงโครไนซ์กับการเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น และรูปคลื่นของแรงบิดในทางอุดมคติจะคล้ายกับรูปคลื่นของกระแส

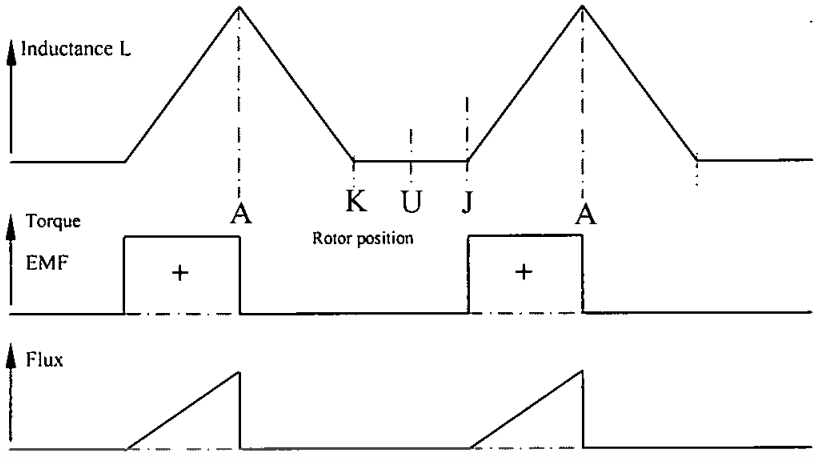


ภาพที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำและแรงบิด
ด้วยตำแหน่งขอโรเตอร์ กระแสที่ขดลวดคงที่ [1]

รูปเล็กแสดงตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของขั้วโรเตอร์และ ขั้วสเตเตอร์ โรเตอร์หมุนไปทางขวา

เมื่อ A คือ ตำแหน่งที่เรียงเป็นแนวเดียวกัน
U คือ ตำแหน่งที่เรียงไม่เป็นแนวเดียวกัน
J คือ จุดเริ่มต้นจองการเหลื่อมซ้อนกัน
K คือ จุดสิ้นสุดของการเหลื่อมซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
82940



ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำ, กระแส, ฟลักซ์ลิงค์เกจ, แรงบิดemf ของตำแหน่งโรเตอร์, พัลส์ทางอุดมคติ unidirection current [1]

รูปคลื่นของกระแสและความเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม

$$\psi = Li \tag{24}$$

ดังนั้นรูปคลื่นไม่สามารถทำงานเพราะสนามแม่เหล็ก และกระแสเกิดการสูญเสียอย่างรวดเร็ว จะทำให้แรงดันเป็นลบมากๆ (Infinite)

$$d\psi / dt = -\infty \tag{25}$$

การวิเคราะห์เส้นตรงของแรงดัน

การสมมุติค่าความเหนี่ยวนำไม่มีผลกระทบต่อกระแส คือไม่มีสนามแม่เหล็กอิ่มตัว ผลกระทบของการโก่งตัวออกของสนามแม่เหล็กรอบๆ มุมตรงขั้ว และสมมุติว่าสนามแม่เหล็กทั้งหมดข้ามช่องว่างอากาศในทิศทางของรัศมีทางกล การเชื่อมต่อระหว่างเฟสโดยปกติเป็นศูนย์หรือเล็กมากๆ และไม่สนใจ

สมการแรงดันสำหรับ 1 เฟส

$$V = \frac{d\psi}{dt} + \frac{d\psi}{dt} = Ri = \omega_m \frac{d\psi}{d\theta}$$

$$= Ri = \omega_m \frac{d(Li)}{d\theta} = Ri + Ldi + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \tag{26}$$

V เป็นแรงดันที่ขั้ว

I เป็นกระแส

ψ เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ใน volt seconds

R เป็นค่าความเหนี่ยวนำ

θ เป็นตำแหน่งของโรเตอร์

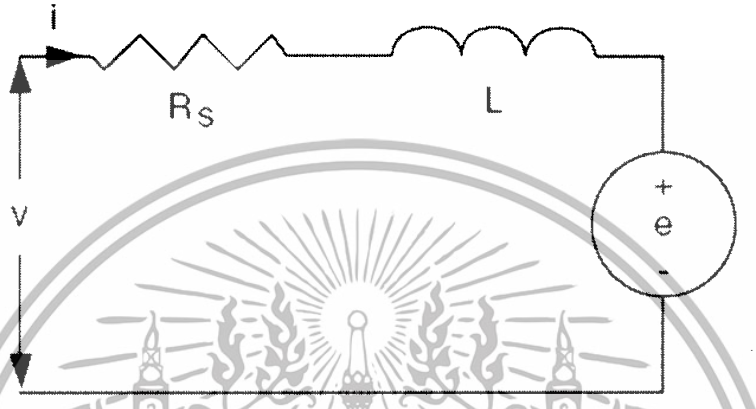
ω_m เป็นความเร็วเชิงมุม rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมหลังเป็นการอธิบาย back emf

$$e = \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \tag{27}$$

สังเกตว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ(back emf) จะขึ้นอยู่กับค่ากระแส ความเร็วและอินดักแตนซ์ จากสมการแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ ทำให้วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ สามารถแสดงได้ดังรูป



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์

มันช่วยให้เข้าใจถึงแหล่งจ่ายแรงดันที่ตกคร่อมใน 3 เทอม คร่อมในความด้านทาน L di/dt, back emf

กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดโดย Vi

$$Vi = Ri^2 + Li\frac{di}{d\theta} + \omega_m i^2 \frac{dL}{d\theta} \tag{28}$$

ระดับของการเปลี่ยนพลังงานสนามไฟฟ้าที่ทันทีทันใด โดย

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{Li^2}{2}\right) = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta} + Li\frac{di}{dt} = \frac{1}{2}i^2\omega_m + i^2\frac{dL}{d\theta} + Li\frac{di}{dt} \tag{29}$$

จากกำลังงานทางกล $P=\omega_m T_e$ ทางด้านซ้ายเป็นค่าการสูญเสีย i^2R และเปลี่ยนระดับพลังงานสะสมเป็นลบจากกำลังงานที่ป้อนให้ Vi, Te เป็นค่าแรงบิดทางไฟฟ้าชั่วขณะ จากสมการที่ (27) และ (28) เขียนได้เป็น

$$T_e = \frac{P}{\omega_m} = Vi - Ri^2 - \frac{d}{dt}\left(\frac{Li^2}{2}\right)$$

$$T_e = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta} \tag{30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 แรงบิดเฉลี่ย (Average torque)

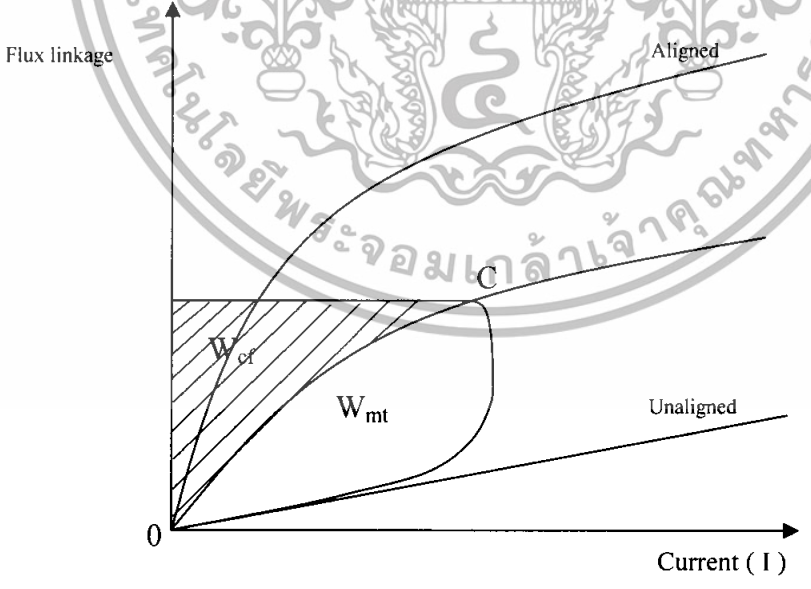
จากหัวข้อที่แล้วแรงบิดชั่วขณะไม่จำเป็นต้องคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วจะทำให้เกิด torque ripple ขึ้น ผู้ใช้งานจะให้ความสนใจกับแรงบิดเฉลี่ยมากกว่า ซึ่งแรงบิดเฉลี่ยสามารถหาได้จากการอินทริเกตสมการ (31) โดยหาจากกราฟการแปรรูปพลังงาน (energy-convertion diagram) ซึ่งเราจะทำการพิจารณาทีละขั้นตอนดังภาพที่ 2.18 ถึงภาพที่ 2.19

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ แรงดันจะจ่ายให้เฟสที่ 1 ซึ่งจะใกล้กับ Unaligned position (θu) ฟลักซ์คล้องจะเพิ่มขึ้นดังสมการ

$$\psi = \int (Vs - Ri)dt = \frac{1}{\omega}\int (Vs - Ri)d\theta \qquad (31)$$

พิจารณาสภาวะที่ 1

ถ้าแหล่งจ่ายแรงดัน Vs มีค่าคงที่ และความต้านทานในแต่ละเฟสมีค่าน้อยมาก ψ จะเพิ่มขึ้นใกล้กับตำแหน่งของโรเตอร์ กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น พลังงานจากแหล่งจ่ายทั้งหมดจะเท่ากับพื้นที่รวม (total area) U = Wm + Wfc เมื่อ Wfc เท่ากับพลังงานสะสมในแม่เหล็ก และ Wmt เท่ากับงานทางกลระหว่าง 0 ถึง C พลังงานครึ่งหนึ่งถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลอีกครึ่งหนึ่ง ถูกเก็บไว้ในสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 2.18

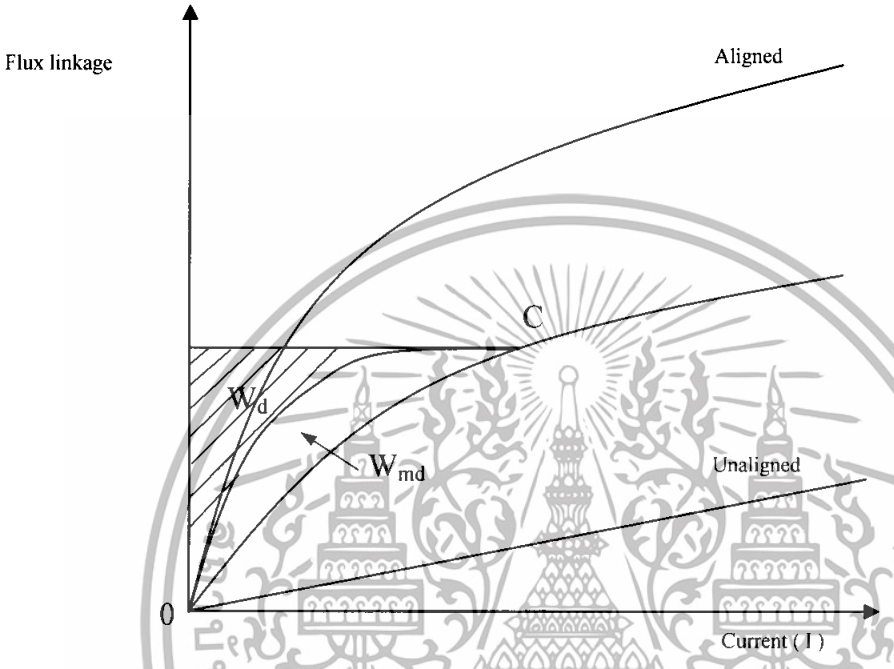


ภาพที่ 2.18 แสดงสภาวะที่จ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายทั้งหมดที่จ่ายให้มอเตอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสภาวะที่ 2

แหล่งจ่ายกลับทิศในที่นี้ คือ เราทำการหยุดจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์ พลังงาน Wd ที่สะสมอยู่ในแกนเหล็ก จะไหลกลับสู่แหล่งจ่าย ที่จุด 0 กระแส และฟลักซ์จะไม่ถูกเก็บในรูปพลังงานแม่เหล็ก เพราะฉะนั้นงานทางกลจาก C ถึง 0 คือ $W_{md} = W_{fc} - W_d$ จากภาพที่ 2.19 งานที่ได้น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานสะสมทั้งหมดในแม่เหล็ก W_{fc}

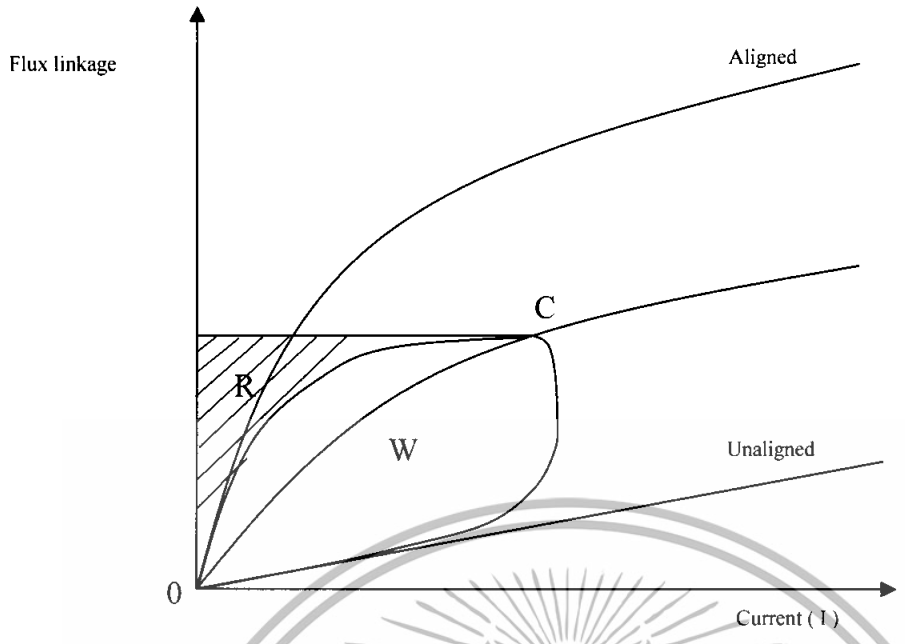


ภาพที่ 2.19 แสดงสภาวะที่หยุดจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์ [1]

พิจารณาในสภาวะที่ 3

ในกรณีนี้พลังงานถูกประมาณการให้เท่ากับ ภาพที่ 2.18 และภาพที่ 2.19 พลังงานที่แหล่งจ่ายจะถูกควบคุมโดย "fluxing" สภาวะที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน (transistor condition period) ระหว่าง 0 ถึง C คือ $U = W_{fc} + W_{md} = 10J$ โดยที่พลังงาน 5 J ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกล และพลังงาน 5 J ถูกเก็บไว้ในสนามแม่เหล็ก ในช่วง "de-fluxing" สภาวะที่ไดโอดทำงาน (diode condition period) ระหว่าง C ถึง 0 พลังงาน $W_d = 3.5$ J จะคืนกลับสู่แหล่งจ่าย และพลังงาน $W_{md} = 1.5$ J ถูกเปลี่ยนพลังงานทางกล เพราะฉะนั้นงานทางกลรวม คือ $W = W_{mt} + W_{md} = 5 + 1.5 = 6.5$ J (65%) พลังงานที่กลับสู่แหล่งจ่าย และพลังงานที่กลับสู่แหล่งจ่าย คือ $W_d = 3.5$ J (35%) ซึ่งการทำงานที่อธิบายดังกล่าวนี้เป็นการทำงาน 1 ลูปการทำงาน ดังภาพที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 แสดงสภาวะที่มอเตอร์ทำงานครบ 1 ลูป การทำงาน [1]

จากภาพที่ 2.20 เป็นการรวม 2 รูปแรกที่กล่าวไว้ตอนต้นพลังงานที่ถูกเปลี่ยนแปลง คือ พื้นที่ W พลังงานที่ไหลกลับสู่แหล่งจ่าย คือ R = W_s เพราะฉะนั้นพลังงานที่จ่ายเข้าไป คือ U = W + R โดยที่อัตราส่วนของพลังงาน (energy ratio) คือ E ดังนั้นพลังงานที่เหมาะสมที่จะใช้จ่าย คือ

$$E = \frac{W}{(W+R)} = \frac{W}{U} \tag{32}$$

อัตราส่วนของพลังงาน (Energy ratio) คล้ายกับ power factor ของ AC machine แต่ที่จริงแล้วเป็นพื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์พลังงานที่ไหลในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ (AC machine) แต่ที่พิจารณาก่อนหน้านี้ E = 0.65

แรงบิดโดยเฉลี่ยสามารถหาได้จาก จำนวนของลูปของพลังงานที่แปรเปลี่ยนต่อความเร็วในการหมุน เมื่อจำนวนของ stroke ต่อ ความเร็วในการหมุนรอบทางกล คือ m Nr ความเร็วที่หมุน Nr, m คือจำนวน phase เพราะฉะนั้นเราจะได้แรงบิดเฉลี่ยเมื่อหมุนคือ

$$T = \frac{mNr.W}{2\pi} \tag{33}$$

ถ้า W (หน่วย จูล) และ T (N-m) เมื่อ [1 N-m = 0.736 ft-lb]

ทฤษฎีนี้สมมติว่าเป็น พลังงานที่ถูกเปลี่ยนแปลงจากทุกเฟส ในทางปฏิบัติอาจจะมีผลกับมุมระหว่างเฟส และปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นทางอุดมคติของเครื่องกลไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การจำลองหาค่าคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิด ด้วยโปรแกรม Finite element (Ansoft)

ในบทที่ 2 นั้นได้กล่าวถึงความหมาย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิด (Torque) มาบ้างแล้ว ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการหาคุณลักษณะของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ โดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งการหาค่า flux linkage และ Torque

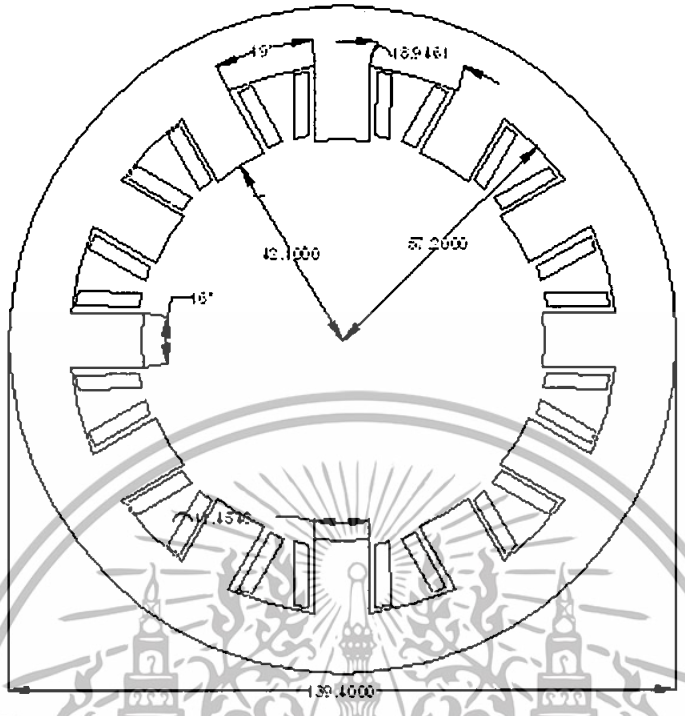
สำหรับการจำลองหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และแรงบิด ด้วยโปรแกรม Finite element (Ansoft) เราต้องทำการวัดค่ามิติต่างๆของ SRM 3 phase 12/8 เพื่อที่จะนำไปเขียนโครงสร้างของ SRM ในโปรกรม Auto Cad ได้ดังนี้



ภาพที่ 3.1 SRM 3 phase แบบ 12/8

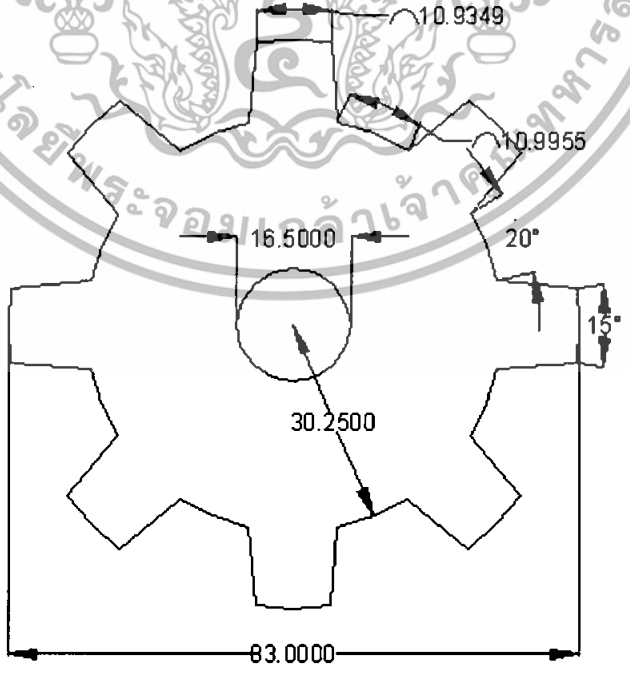
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของ Stator



ภาพที่ 3.2 แสดงขนาดของสเตเตอร์

ขนาดของ Rotor



ภาพที่ 3.3 แสดงขนาดของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

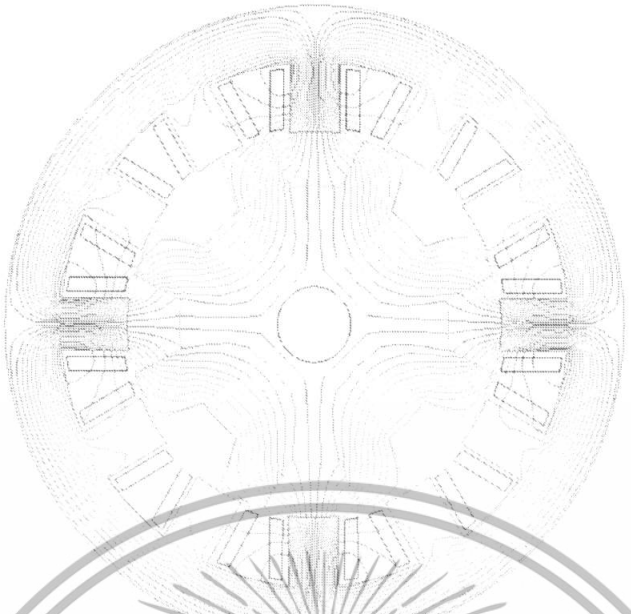
หลังจากที่ทำการวาดโครงสร้างของ SRM ใน Auto Cad เราก็จะนำไปใช้งานในโปรแกรม Ansoft ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถหาผลเฉลยได้หลายรูปแบบ สำหรับในโครงงานนี้เราจะทำการหาผลเฉลยของ ความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์, คุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิด และค่าความเหนี่ยวนำ ดังรูป



ภาพที่ 3.4 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์ที่ Aligned position (0°)

ภาพที่ 3.5 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์ที่ Intermediate position (11°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



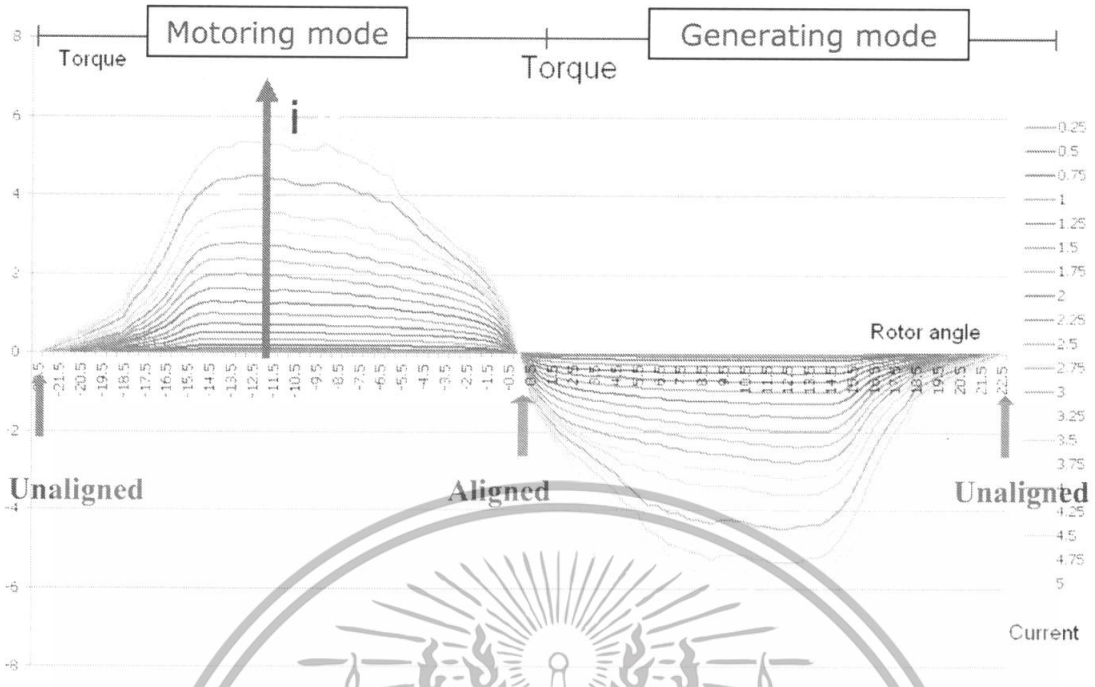
ภาพที่ 3.6 แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์และเส้นทางเดินของฟลักซ์ ที่ Unaligned position (22.5°)

สำหรับการหาค่า Flux linkage นั้น เราต้องทำการ export ไฟล์เพื่อนำค่า Flux ไปคำนวณนอกโปรแกรม โดยใช้สมการ

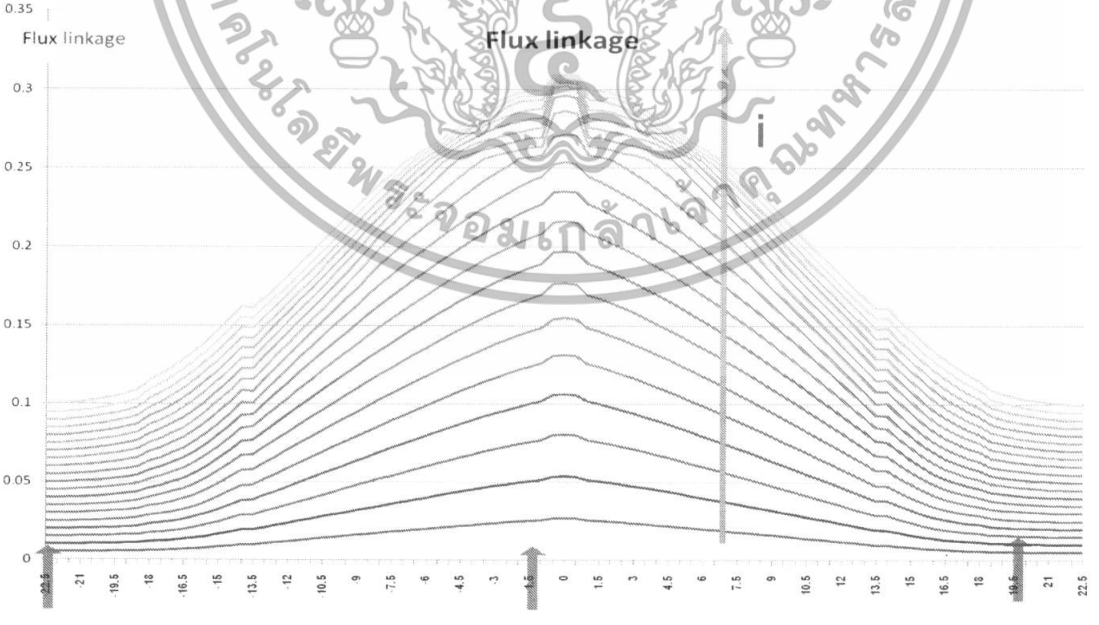
$$\lambda = N^{*}\phi \tag{34}$$

ดังนั้น จากการจำลองหาคุณลักษณะของ Flux linkage และ Torque ด้วยโปรแกรม Finite element (Ansoft) จะสามารถพล็อตกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

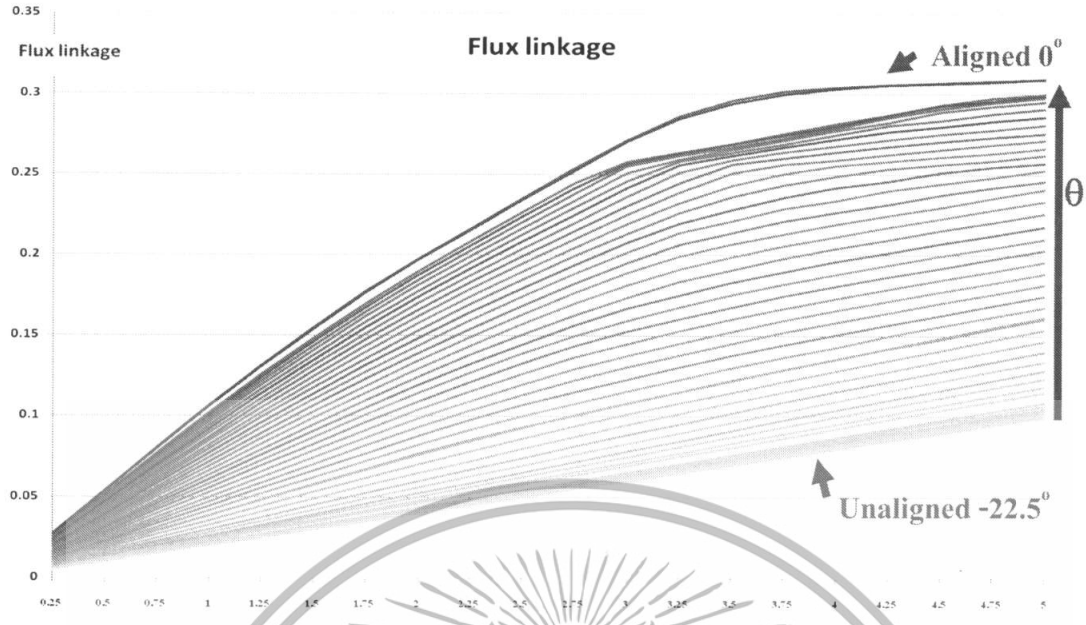


ภาพที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)

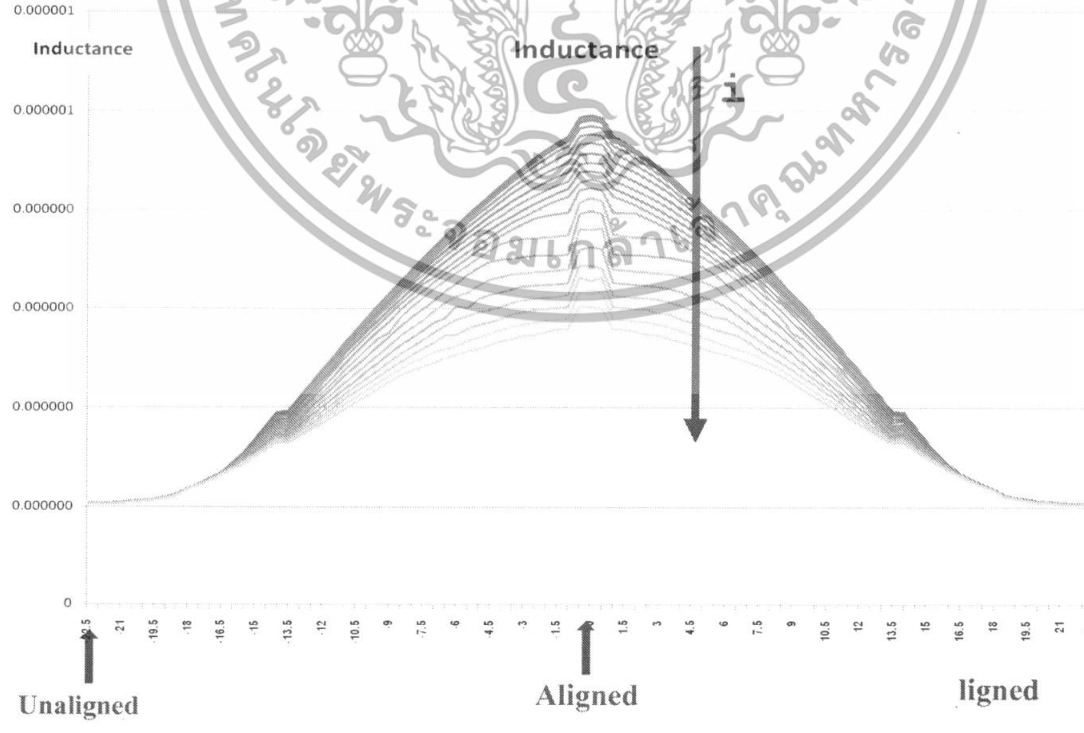


ภาพที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจ กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง flux linkage กับ กระแสกระตุ้น โดยมีตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)



ภาพที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง inductance กับ ตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีกระแสกระตุ้นเป็นตัวแปร (ผลการจำลองด้วย FEA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

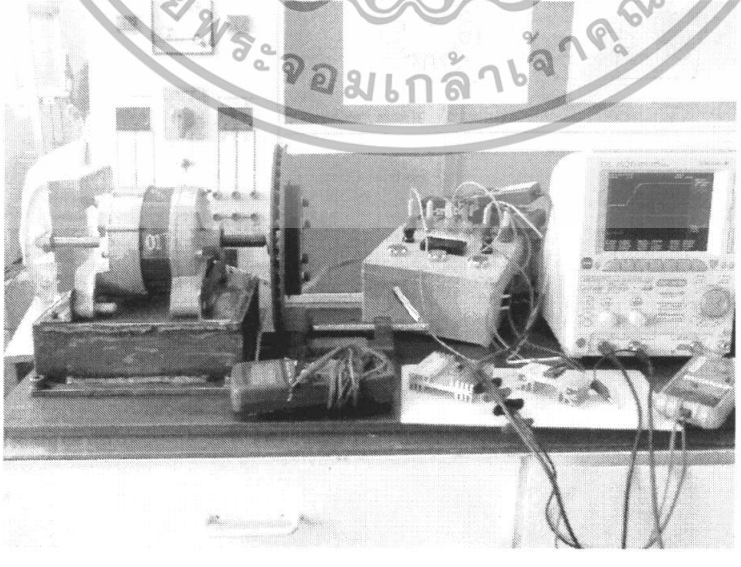
การทดลองที่ 1

ชุดการทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง Flux linkage (Experimental setup for Flux linkage Measurement)

<u>อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง</u>

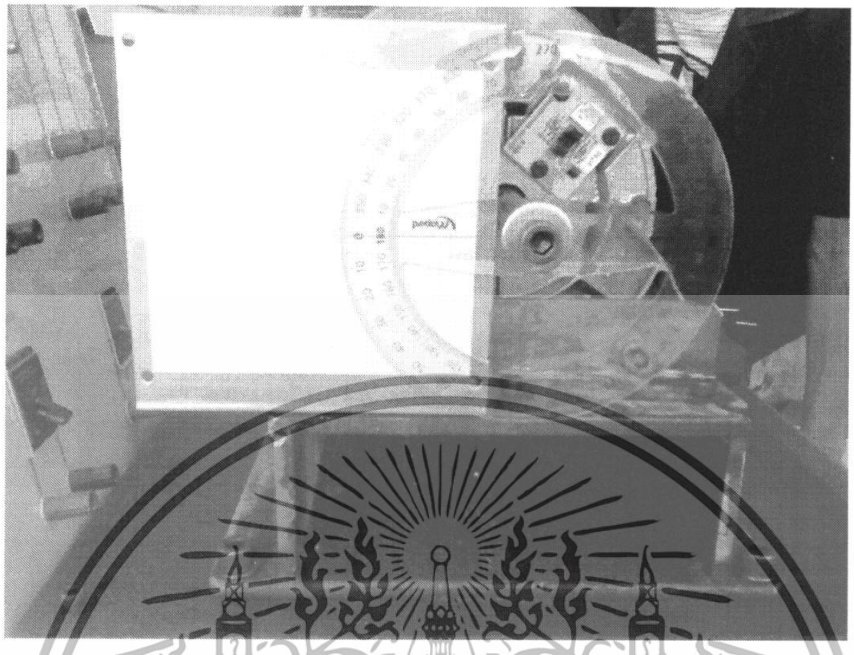
1. สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ชนิด 3-phase,12/8 SRM ที่ใช้ในการทดลองซึ่งได้มีการติดตั้งชุดยึดมอเตอร์ และติดแผ่นโปรเทกเตอร์ชนิดวงกลมเพื่อใช้ในการวัดมุมของโรเตอร์แต่ละตำแหน่ง
2. 3-phase Switch Box
3. Diode
4. Current Probe
5. Differential Probe
6. Multimeter
7. Digital Storage Oscilloscope
8. Battery 12 V. 2 ลูก
9. Diskette 2 แผ่น
10. USB Portable Diskette Drive

<u>ชุดทดลอง</u>

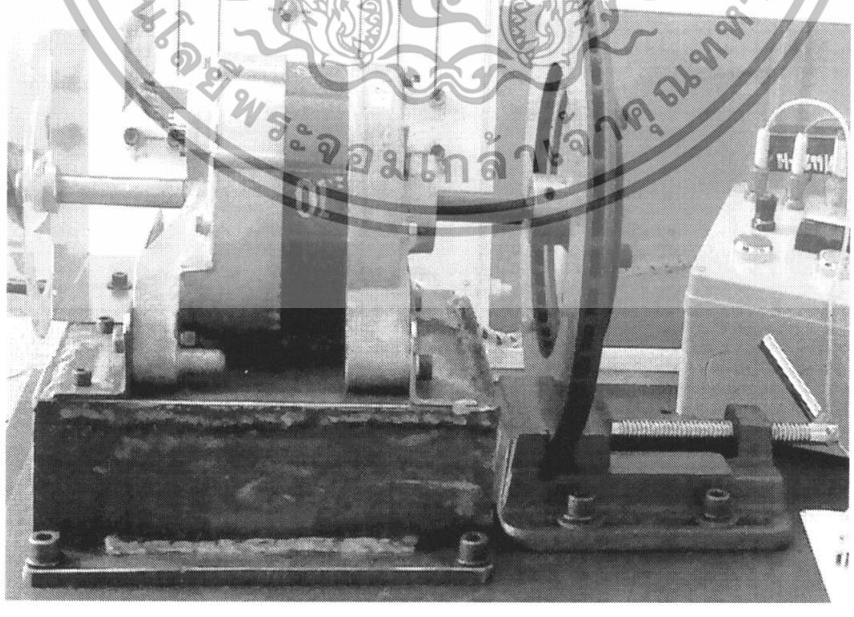


ภาพที่ 4.1 ชุดทดลองการหาฟลักซ์ลิงค์เกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 โปรแทกเตอร์ชนิดวงกลมใช้ระบุตำแหน่งของโรเตอร์

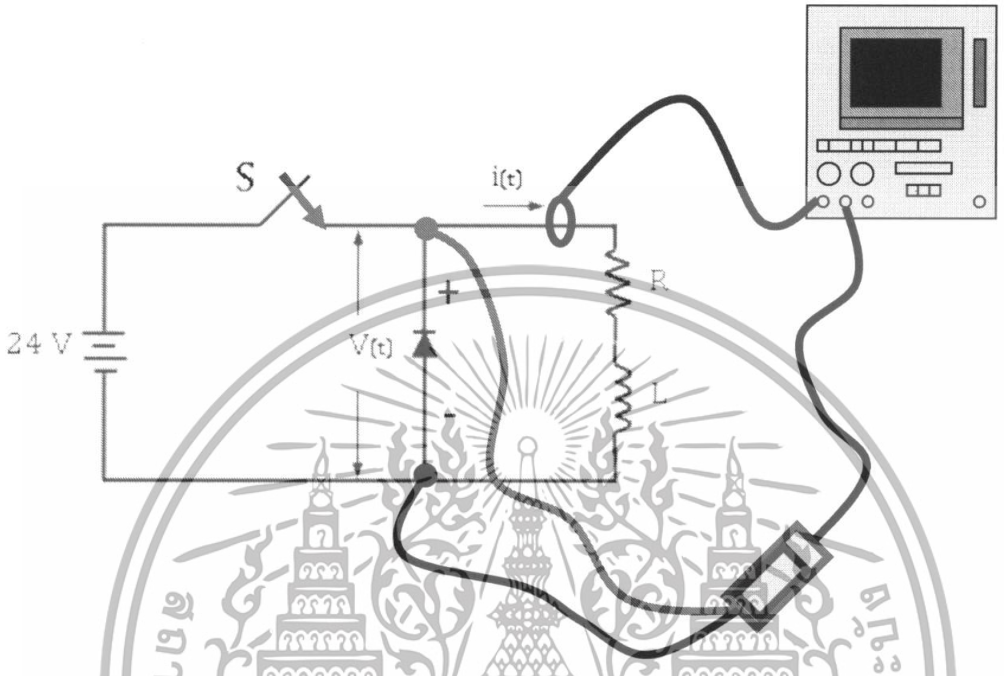


ภาพที่ 4.3 ตัวจับยึดเพื่อล็อกตำแหน่งของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่ออุปกรณ์ตามรูปวงจร ดังรูป



ภาพที่ 4.4 วงจรการทดลองการหาฟลักซ์ลิงค์เกจ

2. เริ่มทำการทดลองที่เฟส A โดยการจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ 24 VDC เข้าที่ 3 - phase Switch Box ใช้ Current Probe วัดกระแสที่ไหลผ่านเฟส A และใช้ Differential Probe ต่อวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมเฟส A

3. ทำการหาตำแหน่ง Aligned ของเฟส A ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีแรงบิด ถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อย จะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่ง Aligned นี้ แล้วทำการล็อกโรเตอร์ที่ตำแหน่งนี้ และกำหนดให้เป็นมุม 0 องศา

4. กด Switch ของเฟส A จะได้ค่าของกระแสและแรงดันของเฟส A ซึ่งอ่านได้จาก Oscilloscope แล้วทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 แต่ปรับมุมของโรเตอร์เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 องศา ในทิศตามเข็มนาฬิกา ทำการทดลองจนถึงมุม 22.5 องศา

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 แต่ปรับมุมของโรเตอร์เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 องศา ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ทำการทดลองจนถึงมุม 22.5 องศา

7. ทำการทดลองของ เฟส B และเฟส C ตามการทดลองของเฟส A

8. นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่า flux linkage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

แรงดันเฟสของ SRM สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V = iR + \frac{d\lambda}{dt} \tag{35}$$

ดังนั้นสามารถหา Flux linkage ได้โดย

$$\lambda = \int_{t_0}^{t} (V - iR)dt \tag{36}$$

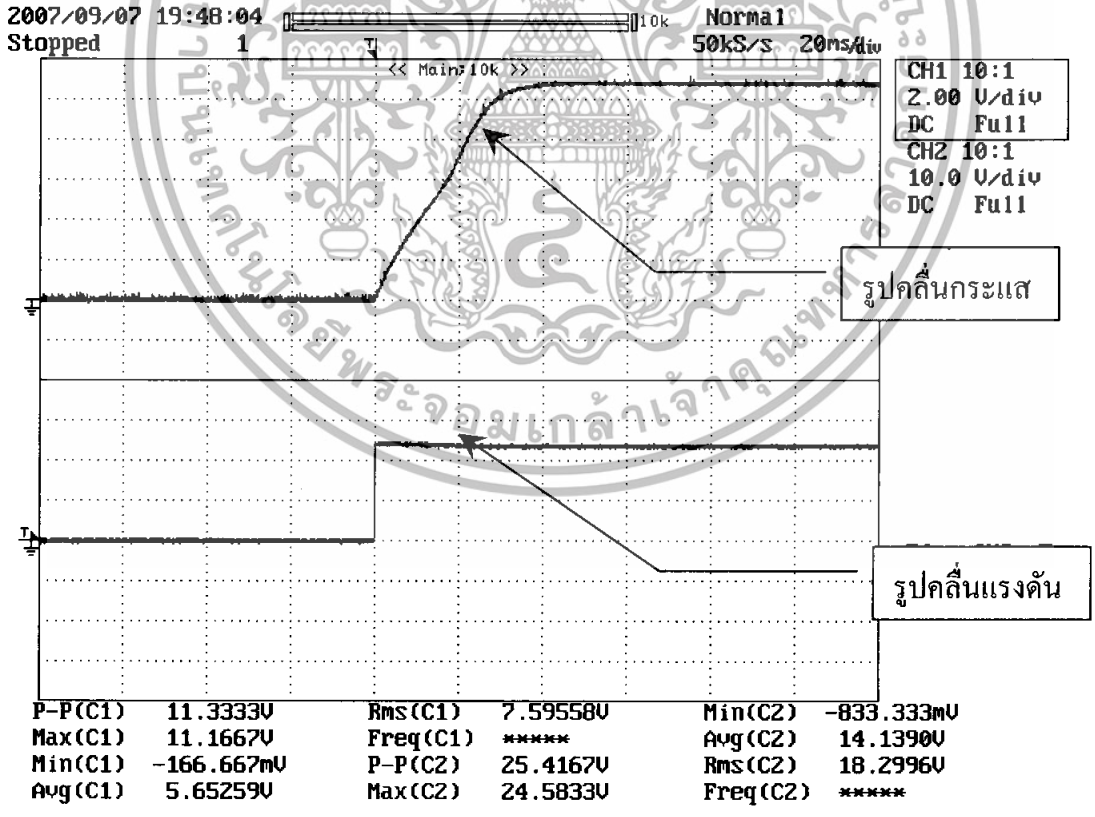
เมื่อ V คือ แรงดันเฟส

R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดเฟส

λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของขดลวดเฟส

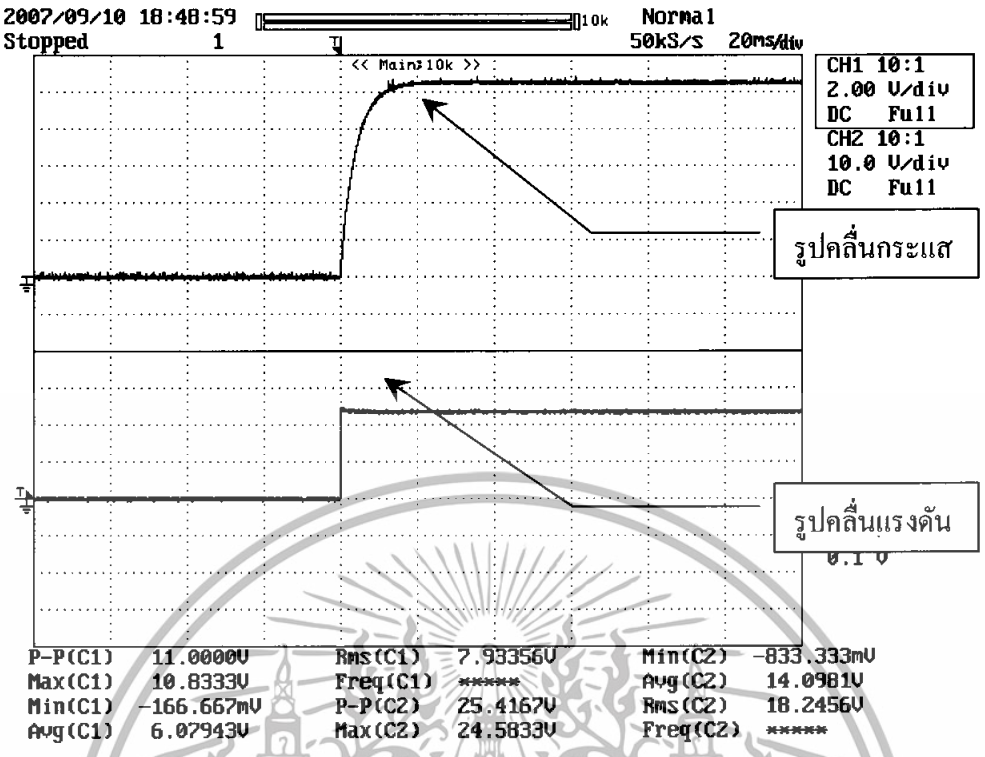
i คือ กระแสเฟส

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส



ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสที่ Aligned position

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

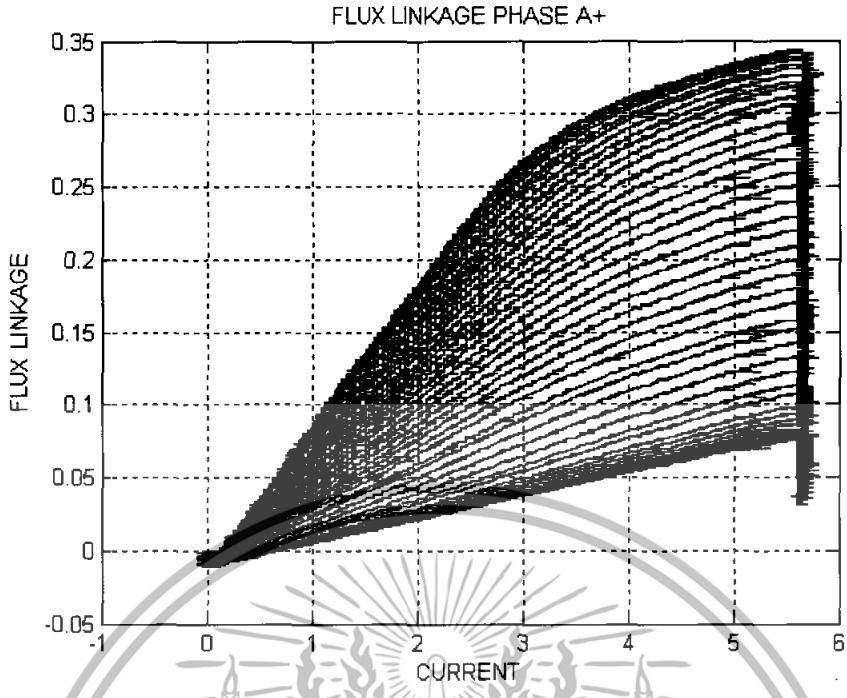


ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสที่ Unaligned position

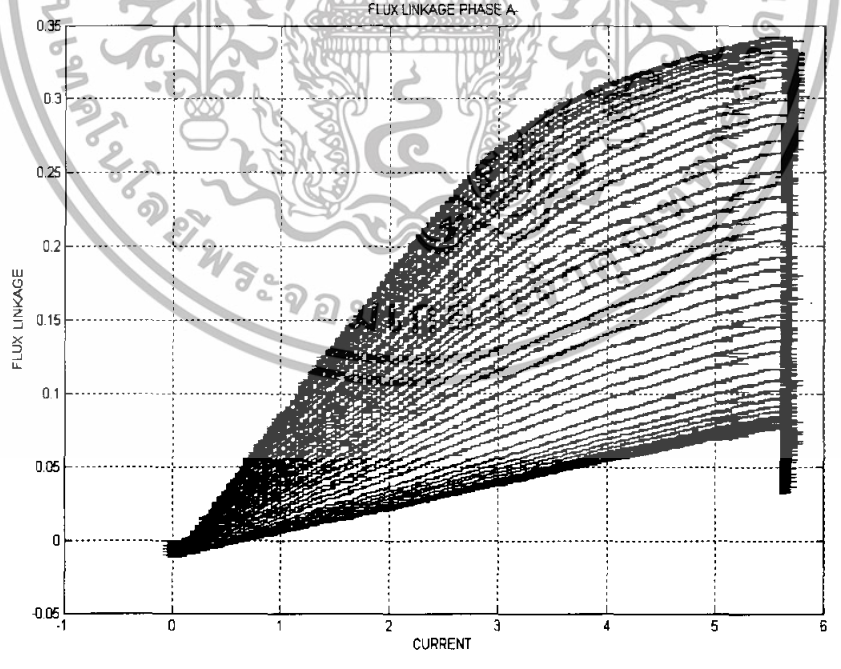
ผลการทดลอง

หลังจากการทำการทดลองเพื่อเก็บค่าของแรงดันและกระแสเฟสที่เข้าขดลวดที่ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ตั้งแต่ aligned position จนถึง unaligned position ของทั้งเฟส A, เฟส B และเฟส C ทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยสมการแรงดันเฟสของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

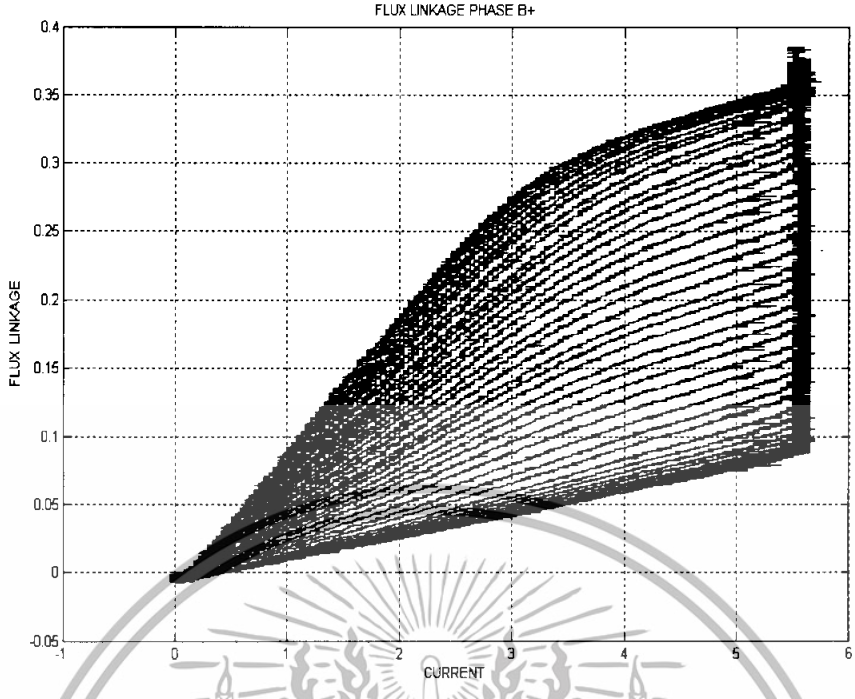


ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5°

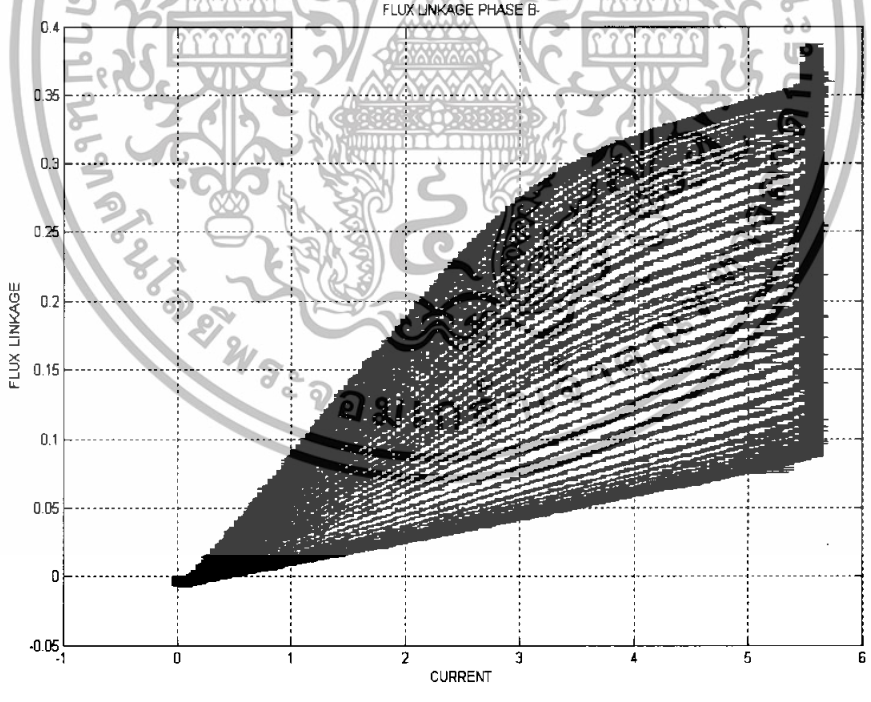


ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

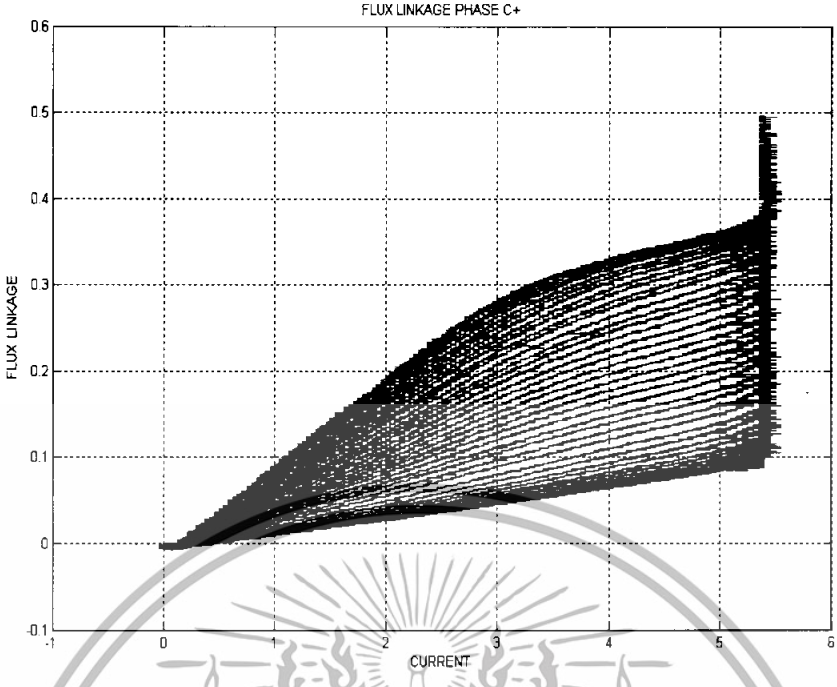


ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5°

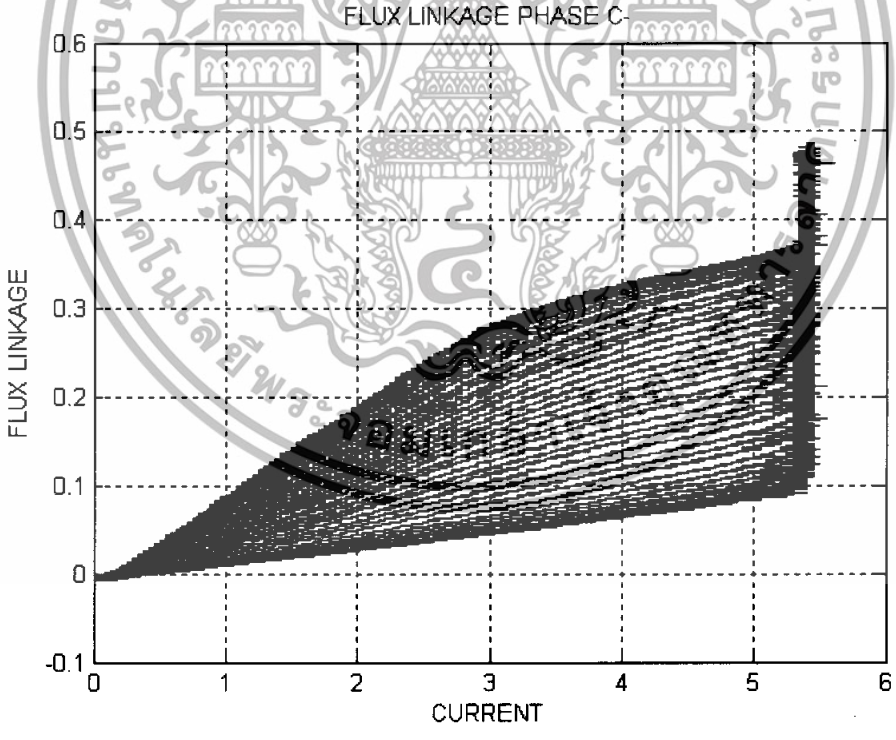


ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5°



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

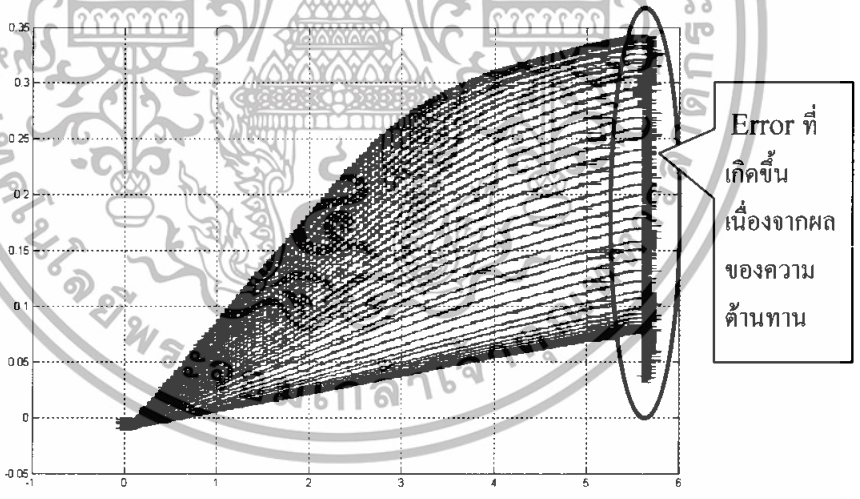
จากการทดลองหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจของ SRM 3 phase แบบ 12/8 พบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลอง ซึ่งอาจจะส่งผลถึงความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดลองได้ โดยสามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

- ผลของความต้านทานของขดลวด

ค่าความต้านทานของขดลวดเฟส (R) นั้นจะมีผลต่อผลการทดลอง เนื่องจากเราต้องนำค่าความต้านทานนี้มาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาฟลักซ์ลิงค์เกจ จากการทดลองพบว่า เราไม่สามารถใช้ค่าความต้านทานของขดลวดที่มีค่าเท่ากันตลอดได้ เนื่องจากเมื่อเวลาในการทำการทดลองผ่านไป ค่าความต้านทานจะมีค่าที่เปลี่ยนไป โดยอาจจะมีผลจากความร้อนของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดลองเป็นเวลานานๆ และยังอาจจะมีผลจากอุณหภูมิแวดล้อมที่ไม่เท่ากันในแต่ละช่วงการทดลอง ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวจะทำให้ผลการทดลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

สำหรับการแก้ไขนั้นเราสามารถทำได้โดยการวัดค่าความต้านทานของขดลวดทุกครั้งก่อนที่จะทำการทดลอง ซึ่งวิธีนี้จะให้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำแต่จะเสียเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก

นอกจากนี้เราสามารถใช้วิธีปรับค่าความต้านของขดลวดในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้กราฟที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น ถึงแม้จะเป็นวิธีที่ให้ผลการทดลองได้ไม่แม่นยำเหมือนวิธีแรกแต่ก็เป็นวิธีที่สามารถรับได้



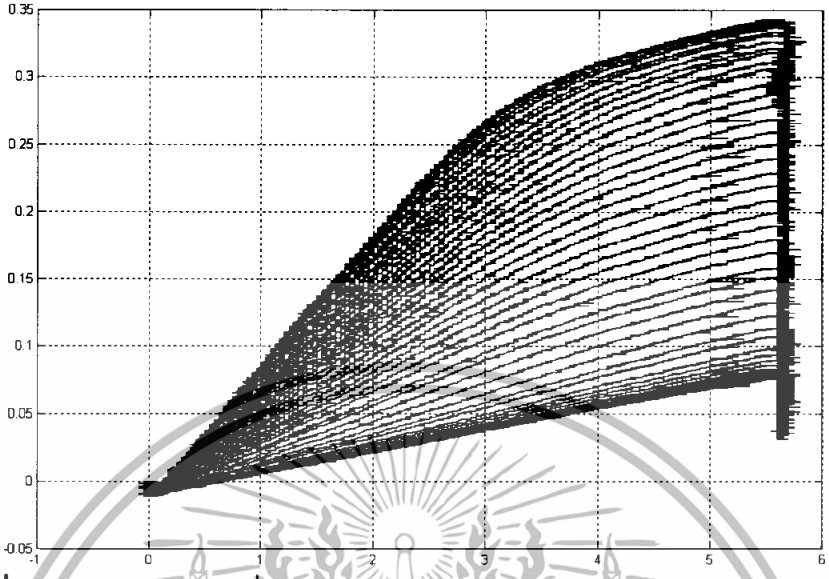
ภาพที่ 4.13 ผลการทดลองเมื่อใช้ค่าความต้านทานเท่ากันตลอด

- ผลของค่า Offset ของ differential probe และ current sensor

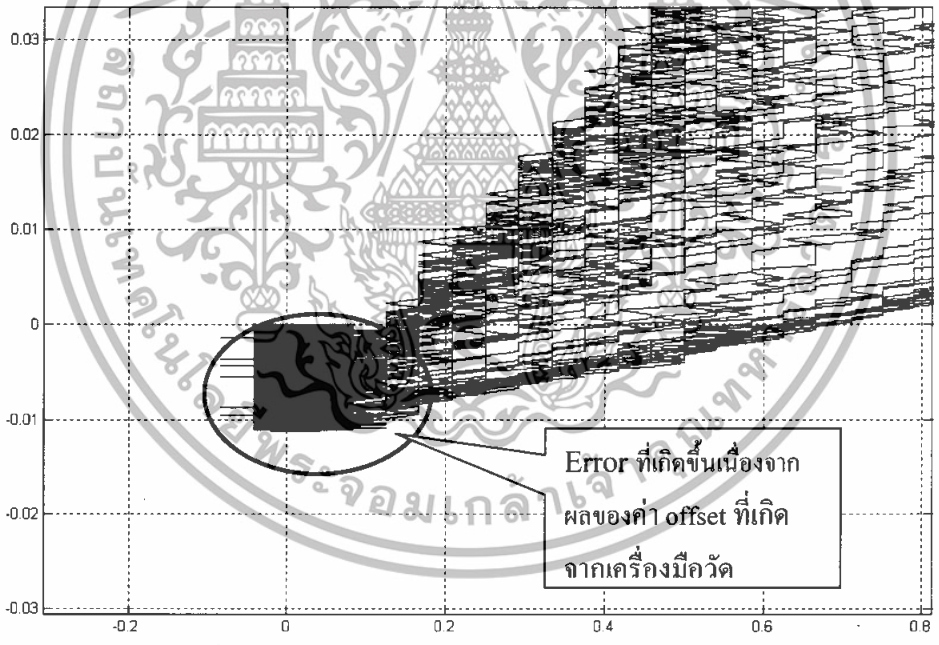
ผลของค่า Offset ที่เกิดจากเครื่องมือวัดนั้นจะส่งผลต่อผลการทดลอง โดยค่า Offset นี้จะทำให้ผลการทดลองมีค่าน้อยกว่าผลที่แท้จริง เนื่องจากค่า Offset จะดึงให้จุดกำเนิดของกราฟต่ำลงกว่าจุดกำเนิดที่แท้จริง คือ จุด 0,0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแก้ไขนั้นเราสามารถทำได้โดยการบวกค่าคงที่เข้าไปในโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อทำการยกระดับของผลการทดลองให้มีจุดกำเนิดอยู่ที่ 0,0 ซึ่งก็จะทำให้ผลการทดลองมีค่าที่ถูกต้อง



ภาพที่ 4.14 ผลการทดลองเมื่อใช้ค่าความต้านทานเท่ากันตลอดและมีผลของค่า Offset



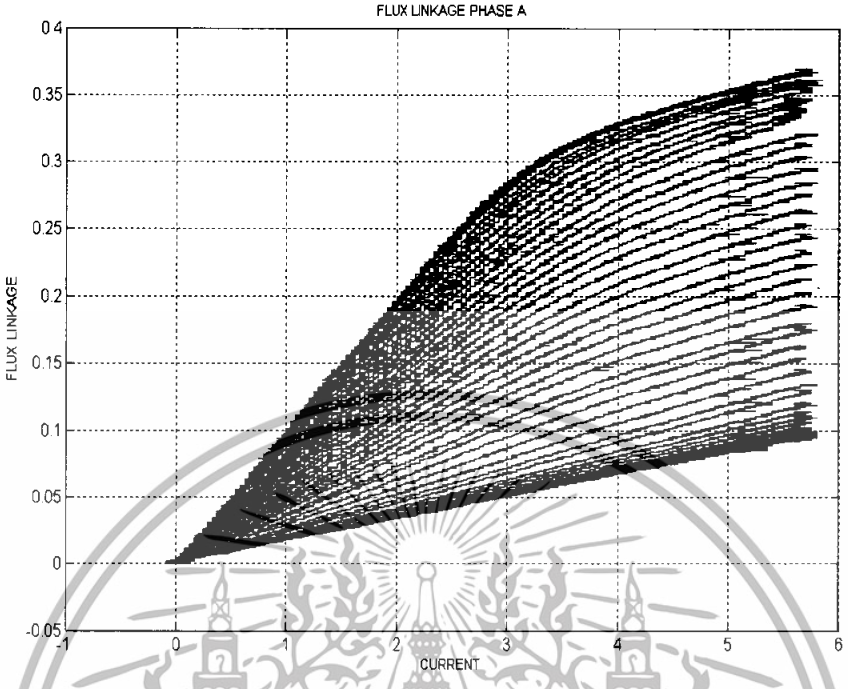
ภาพที่ 4.15 การขยายผลการทดลองเมื่อมีผลของค่า Offset

ผลการทดลองหลังจากการปรับปรุง

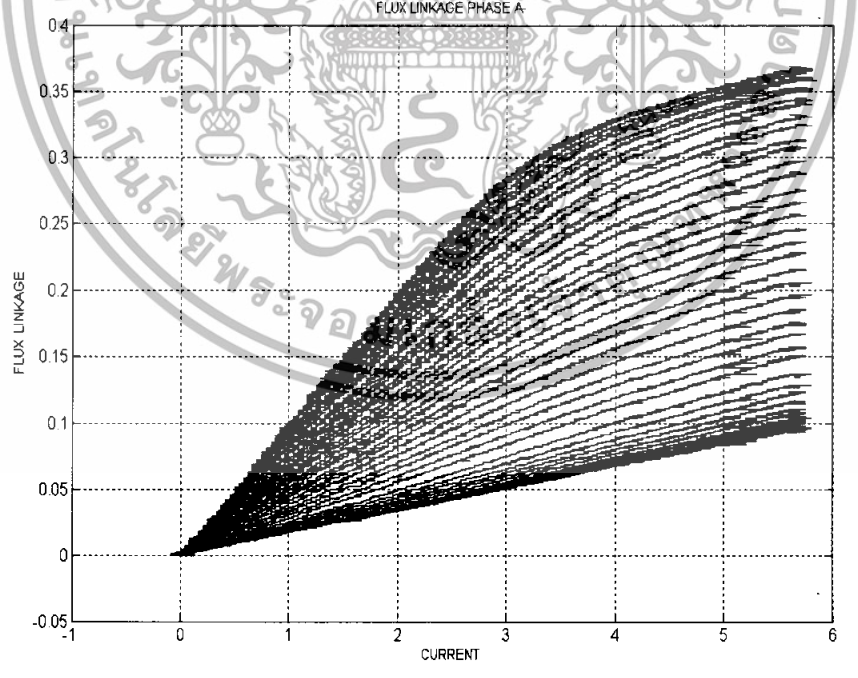
จากกราฟผลการทดลองในข้างต้นจะพบเห็นข้อผิดพลาดของผลการทดลอง เราจึงต้องมีการทำการปรับปรุงแก้ไขให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น โดยหลังจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงผลการทดลองด้วยวิธีการที่กล่าวมาด้านบน เราจะได้กราฟที่มีความถูกต้องและสวยงามมากขึ้นดังนี้

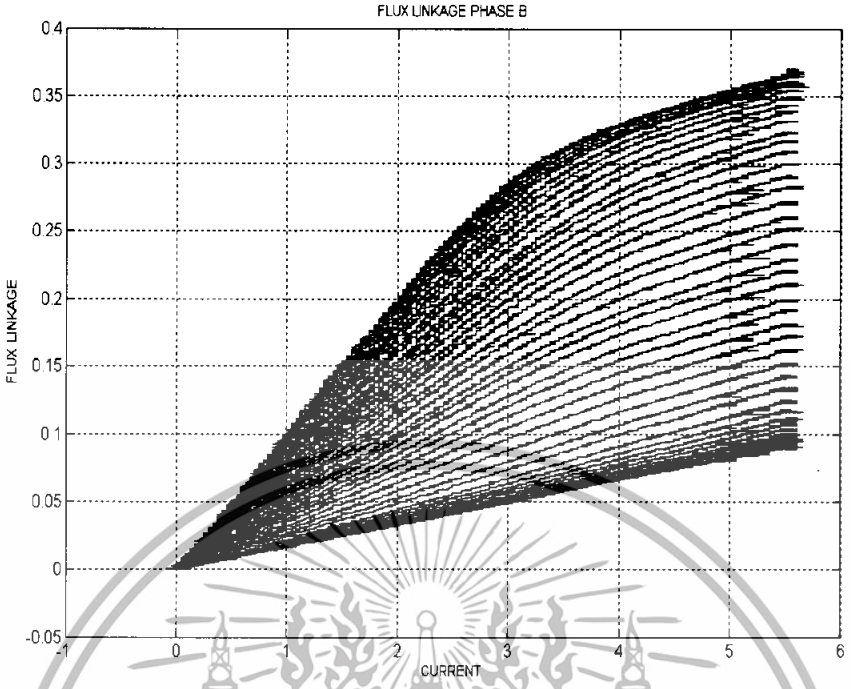


ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5°

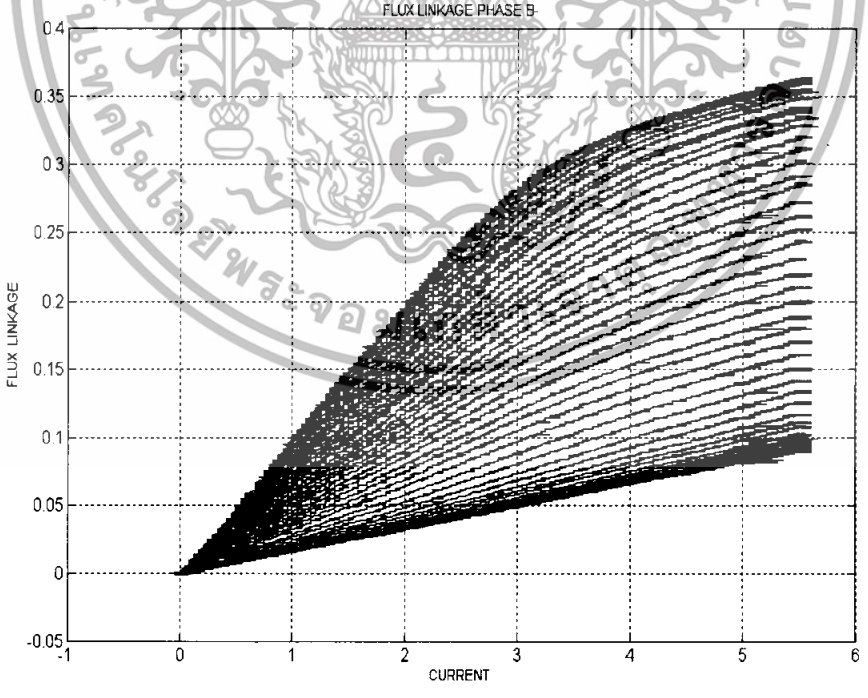


ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

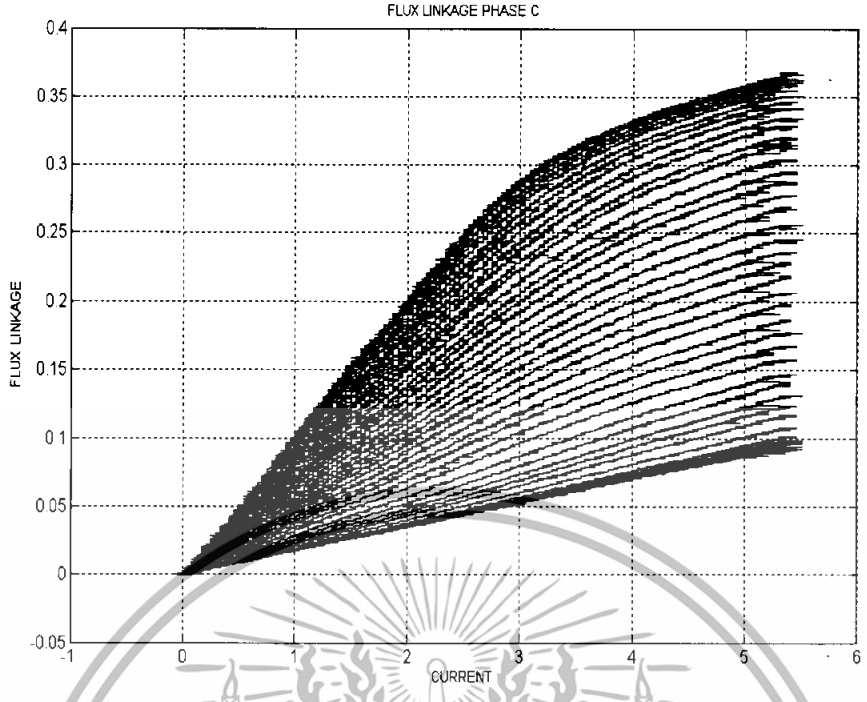


ภาพที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5°

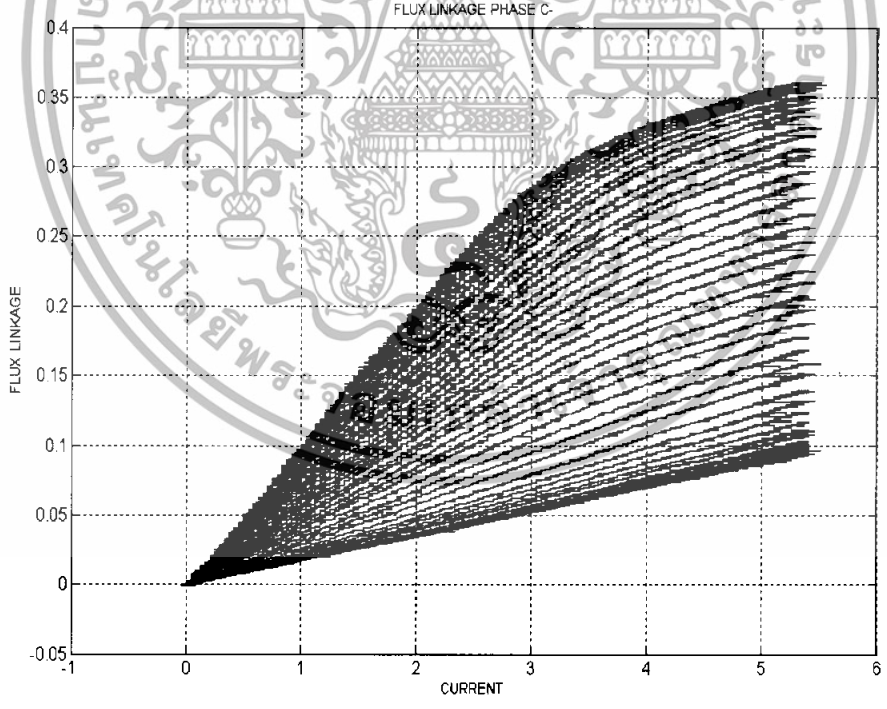


ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5°

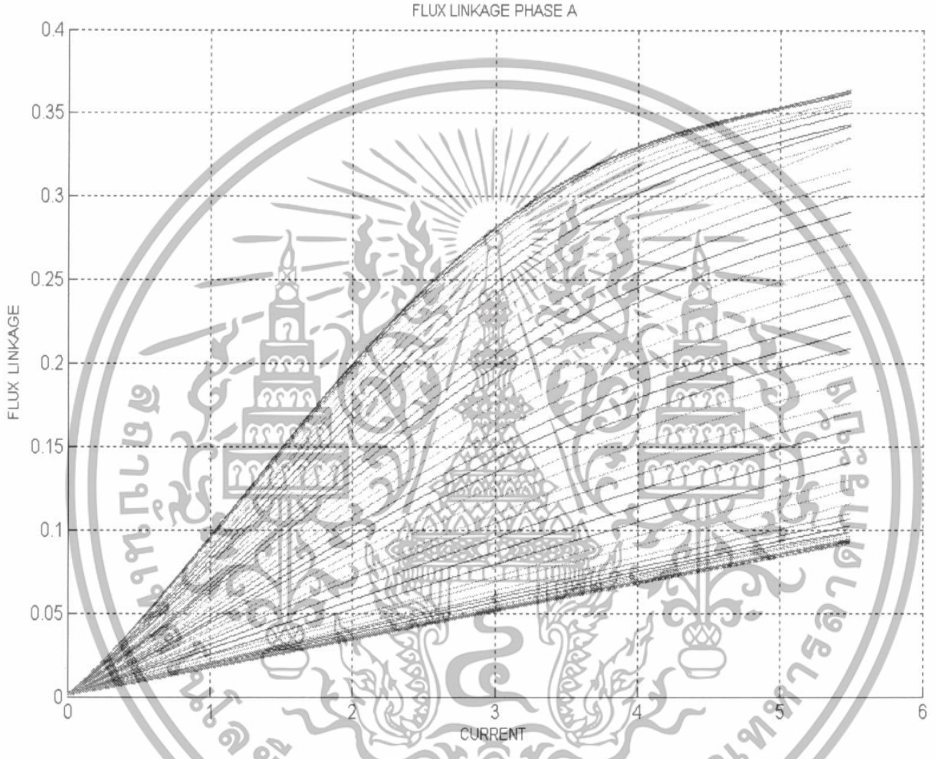


ภาพที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

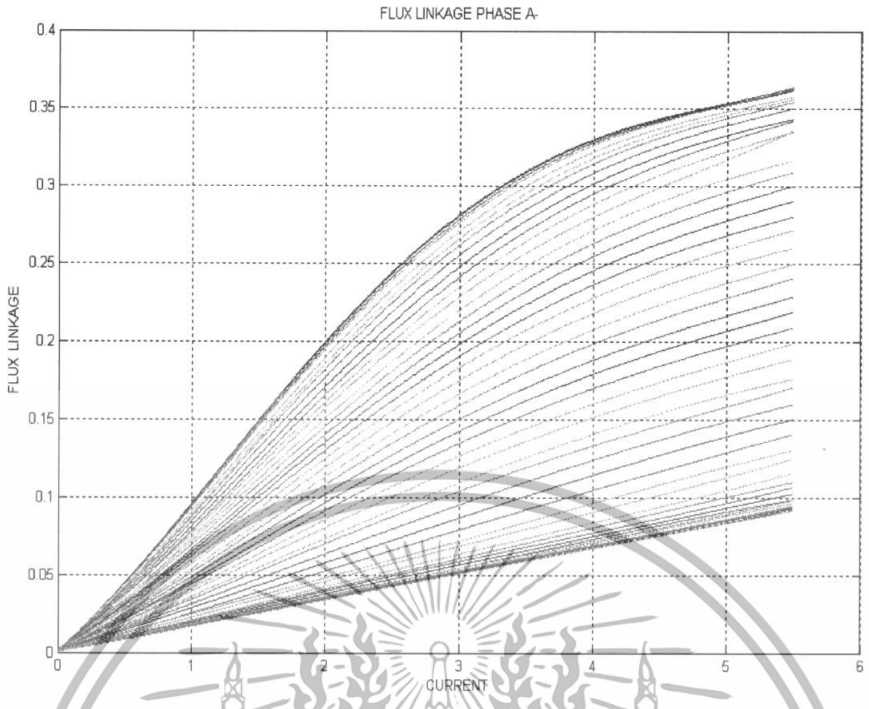
การกรองข้อมูลด้วย MATLAB

จากผลการทดลองหลังการปรับปรุงนั้นจะเห็นได้ว่า ผลการทดลองที่ได้นั้นยังไม่เรียบและมีขนาดของข้อมูลในแต่ละชุดที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องทำการ Fitting ข้อมูลผลการทดลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลเป็นตัว Fitting ข้อมูล เพื่อทำให้ได้ผลการทดลองที่มีขนาดของข้อมูลเท่ากันในทุกชุด เพื่อนำไปเป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม (Control Program) SRM ต่อไป โดยหลังจากการ Fitting เราก็จะได้ผลการทดลองดังนี้

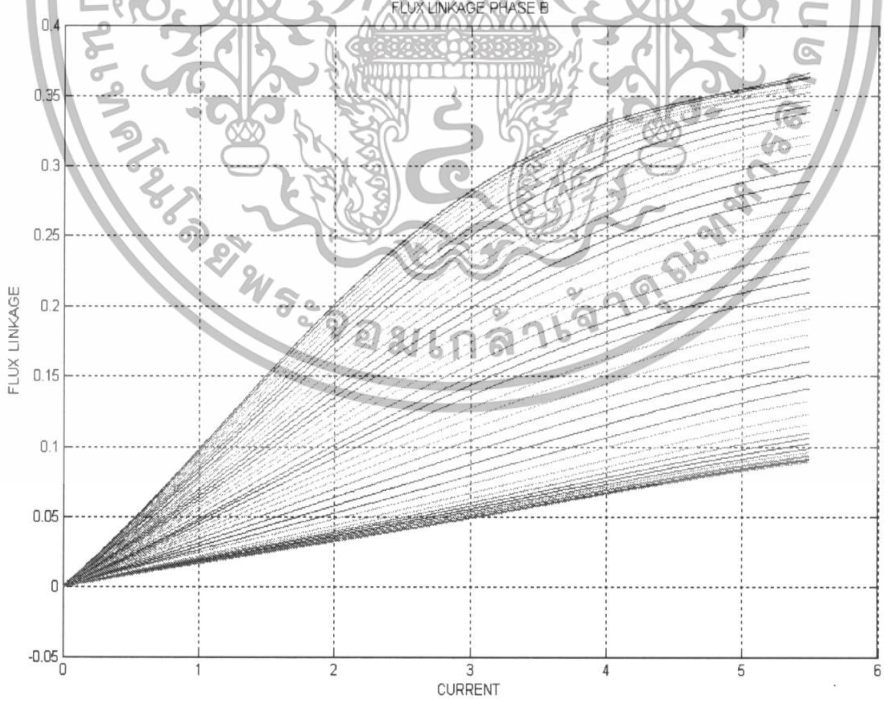


ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง 22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

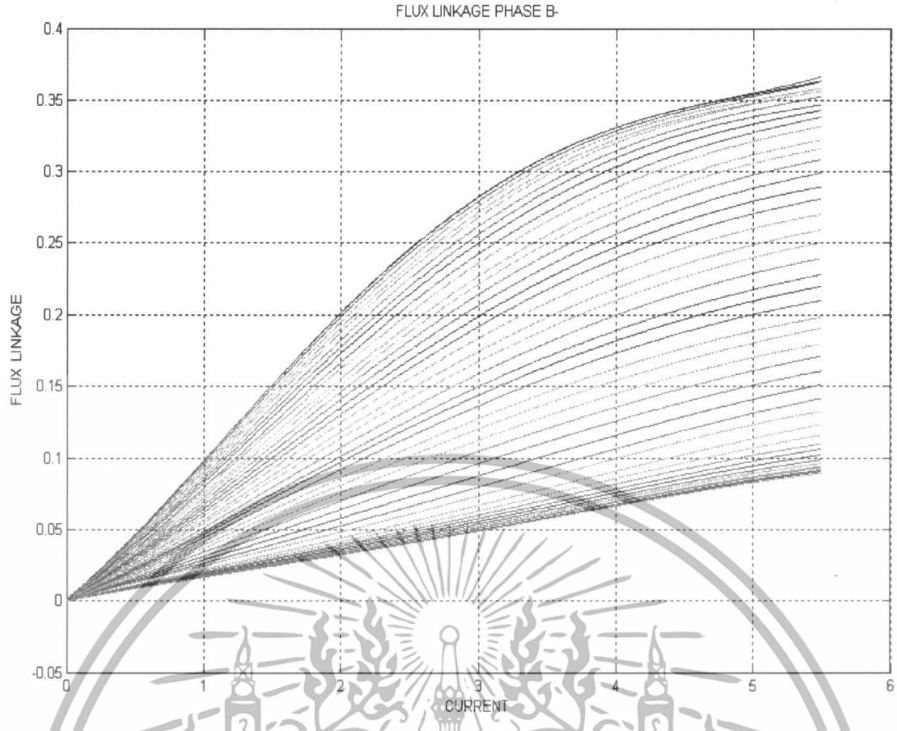


ภาพที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส A ที่มุม 0 ถึง -22.5°

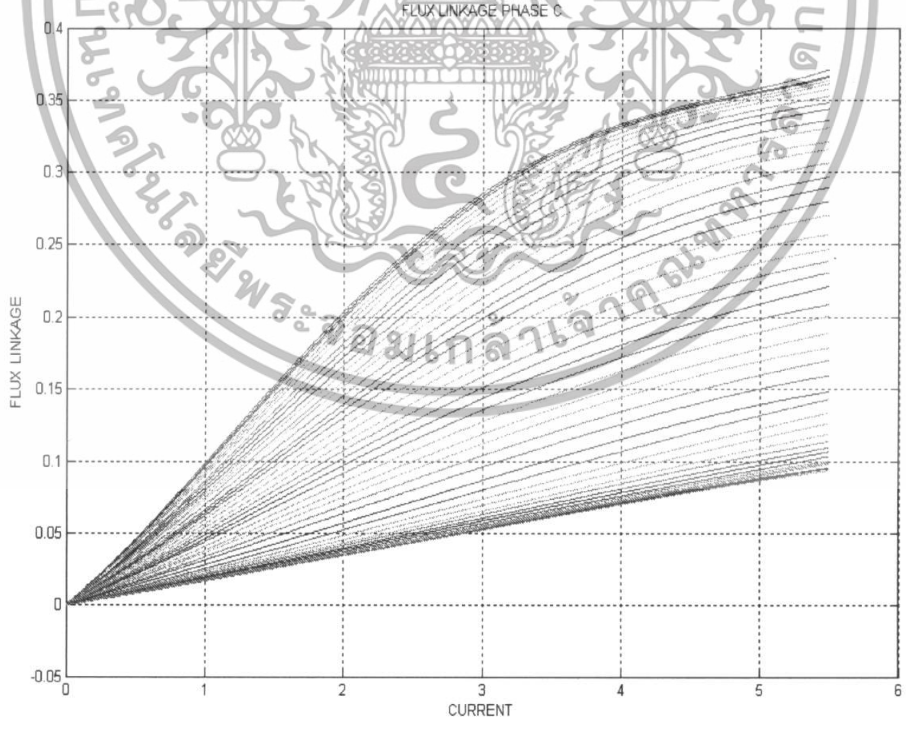


ภาพที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง 22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

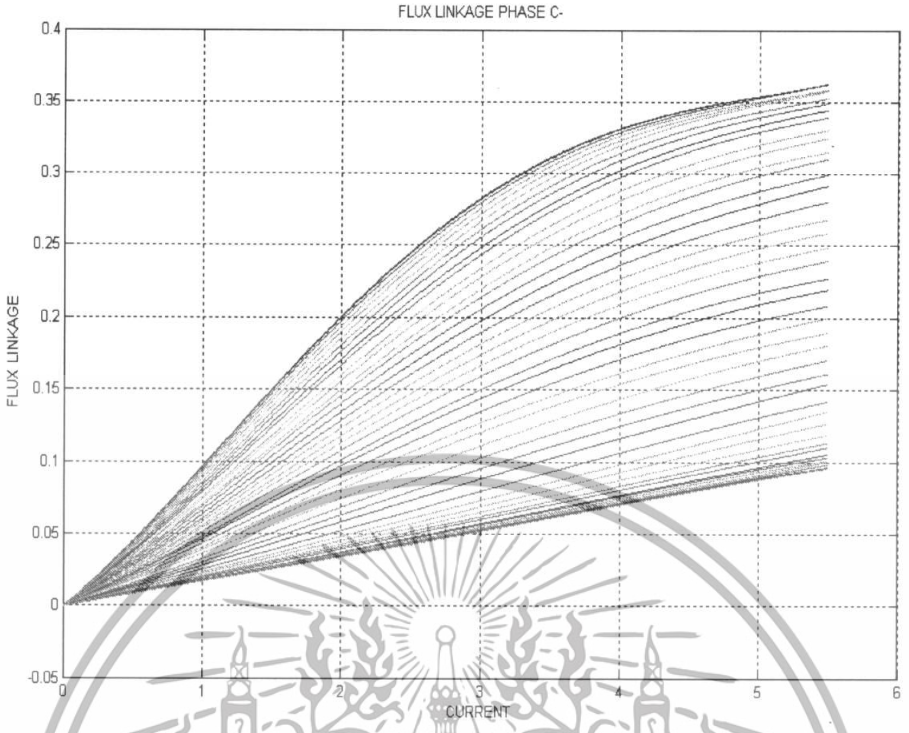


ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส B ที่มุม 0 ถึง -22.5°

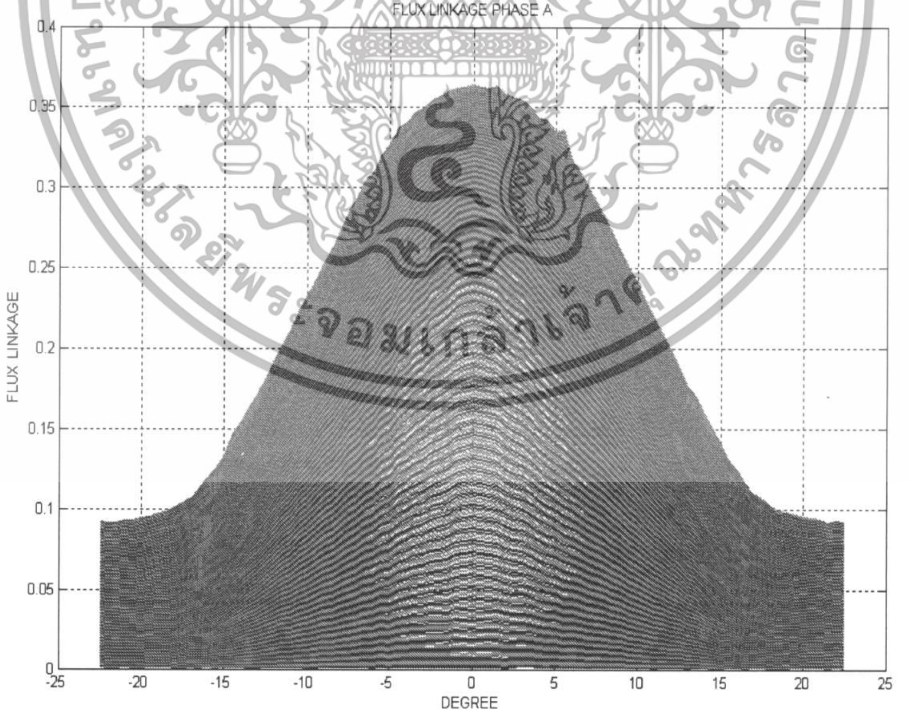


ภาพที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง 22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

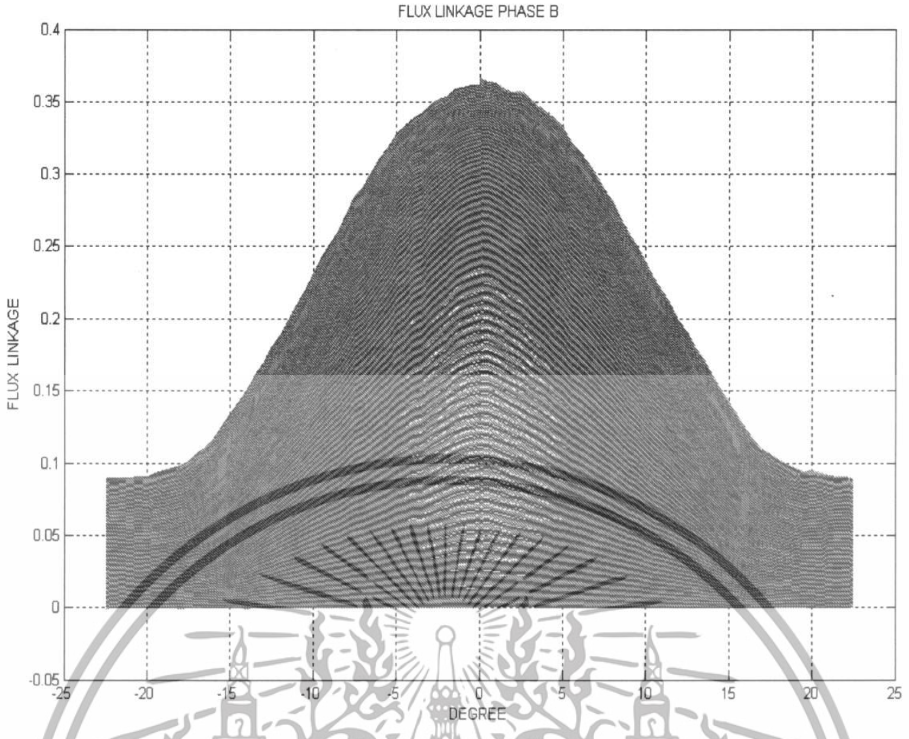


ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับกระแส ของเฟส C ที่มุม 0 ถึง -22.5°

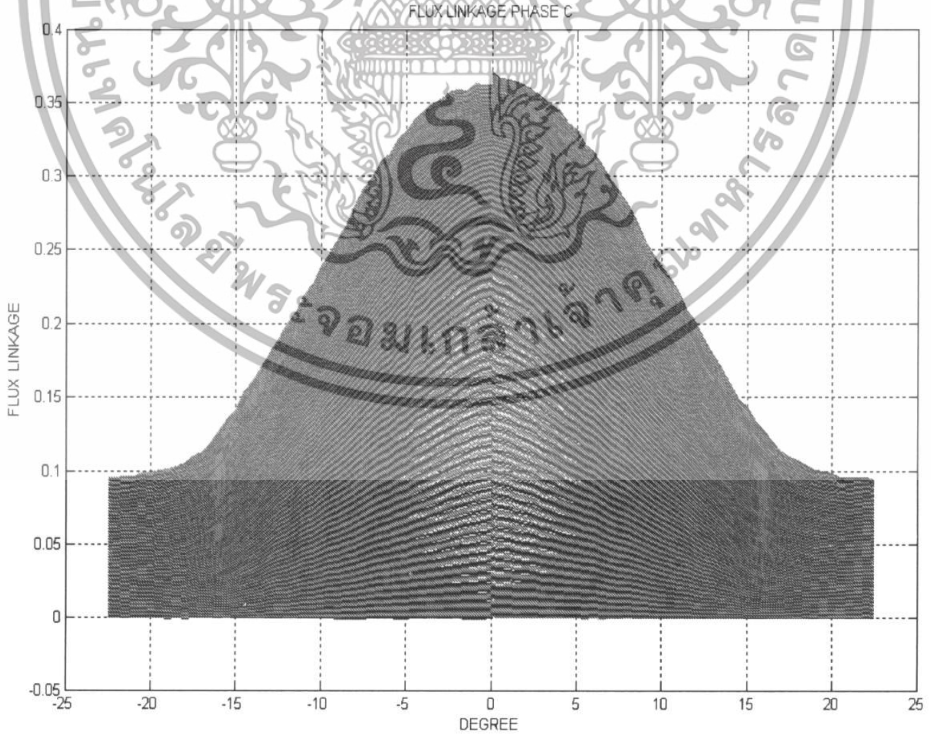


ภาพที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส B



ภาพที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2

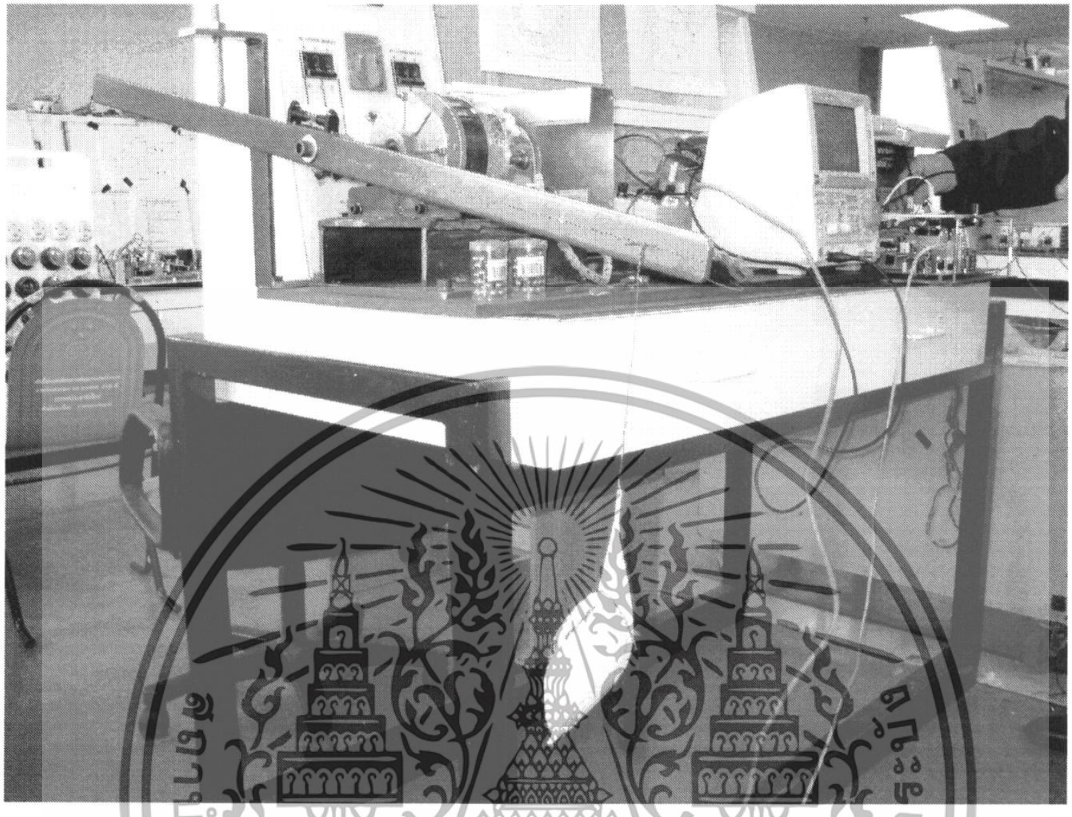
ชุดทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง แรงบิดสถิตย์ (Experimental setup for Static Torque Measurement)

<u>อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง</u>

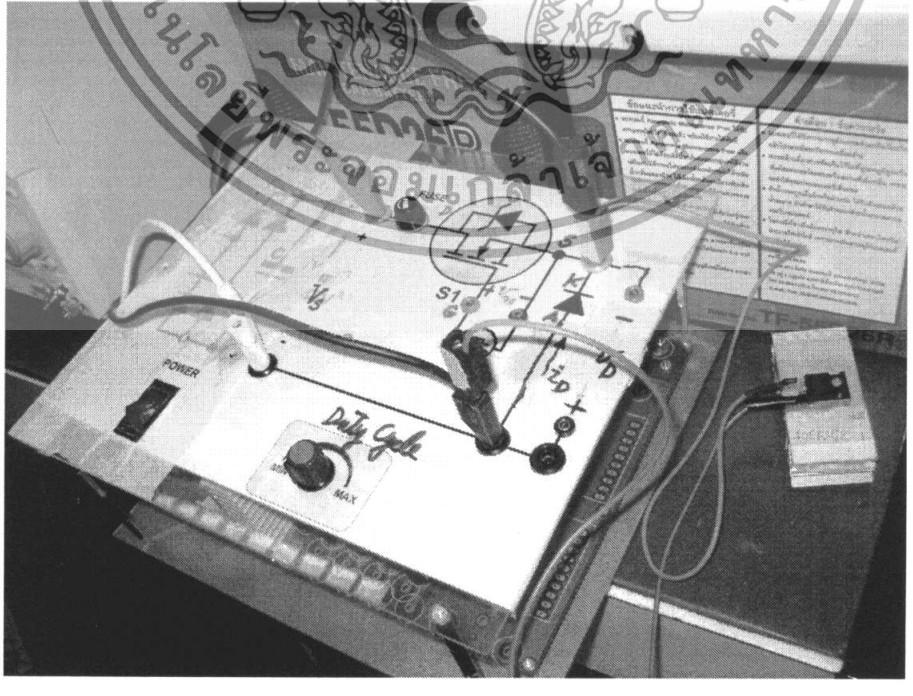
1. สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ชนิด 3-phase,12/8 SRM ที่ใช้ในการทดลองซึ่งได้ทำการปรับแต่งให้มีความเหมาะสม โดยมีการติดตั้งชุดยึดมอเตอร์ และติดโปรเทกเตอร์ชนิดวงกลมเพื่อใช้ในการวัดมุมของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป ได้ติดตั้งคานเหล็กวัดระยะทางที่เจาะรูซึ่งแต่ละรูมีระยะห่างเท่ากันเป็นระยะ 0.5 เซนติเมตร และติดสายวัดระยะเพื่อจะได้รู้ระยะที่แน่นอน รวมทั้งได้ติดที่วัดระดับน้ำ (ดูความสมดุลของคาน) ไว้ที่ตรงกึ่งกลางของคานวัด
2. 3-phase Switch Box
3. Diode
4. Current Probe
5. ชุดทดสอบความสว่างของหลอดไฟ
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก
7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก เช่น ลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก, แท่งเหล็กน้ำหนัก 500 กรัม, ตัวยึดลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักกับคานเหล็ก
8. Digital Storage Oscilloscope
9. Battery 12 V. 2 ลูก
10. Power Supply
11. ขั้วต่อเชื่อม Battery
12. DC Chopper
13. สายไฟต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดการทดลอง



ภาพที่ 4.31 ชุดทดลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทาง แรงบิดสถิตย์



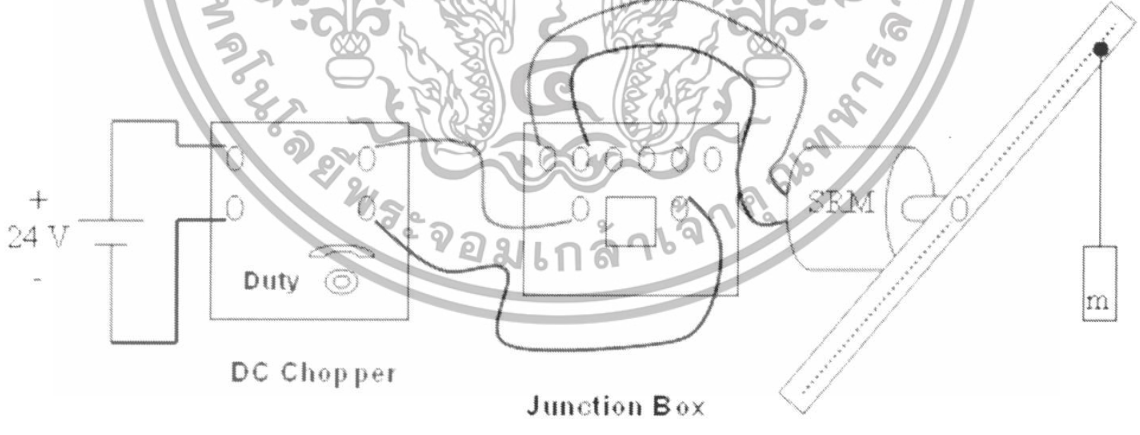
ภาพที่ 4.32 DC Chopper (Buck Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 ตาชั่งและมวล

ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 4.34 รูปวงจรการทดลองเพื่อหาค่าแรงบิดสถิตย์

1. ต่อวงจรตามรูป

2. เริ่มทำการทดลองที่เฟส A โดยทำการหาตำแหน่ง Alignedment ที่ตำแหน่งนี้ปรับให้เป็นมุมศูนย์องศา โดยให้คานเหล็กอยู่ในระดับสมดุลด้วย

3. ปรับค่ากระแสที่ DC Converter Chopper โดยการปรับ Duty cycle ซึ่งเราทำการทดลองตั้งแต่ค่ากระแส 0 A จนถึง 6.5 A (ปรับเพิ่มทีละ 0.5 A) จากนั้นถ่วงน้ำหนักบนคานด้านที่เจาะรูโดยค่อย ๆ ปรับเลื่อนระยะทางพร้อมกับการปรับน้ำหนักที่ใช้ถ่วง จนถึงจุดสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จุดที่แรงบิดของมอเตอร์ มีความสมดุลกับค่าของแรงบิดที่เกิดจากการถ่วงน้ำหนักที่ระยะทางนั้น ๆ) คือ คานด้านที่ไม่ได้ถ่วงน้ำหนักไปแตะตรงจุดที่ใช้เป็นสัญญาณไฟ โดยทำให้ไฟติดพอดี

4. บันทึกค่าของระยะทาง, น้ำหนักที่ใช้ถ่วง และค่ากระแสที่ใช้ นำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม Excel เพื่อหาค่าของแรงบิดของมอเตอร์

5. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนมุมของโรเตอร์ (ปรับมุมของโปรเทกเตอร์) ไปทีละ 1 องศา ทำการทดลองจนถึงมุม 22.5 องศา

6. นำค่าแรงบิดมอเตอร์ของแต่ละมุมมาพล็อตในกราฟเดียวกัน จะได้กราฟ Torque รวม

7. ทำการทดลองแบบเดียวกันในส่วนของ เฟส B และเฟส C

ผลการทดลอง

แรงบิดสถิตย์ของ SRM สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$T = mgl\cos\theta \tag{37}$$

เมื่อ T คือ แรงบิดสถิตย์

m คือ มวล

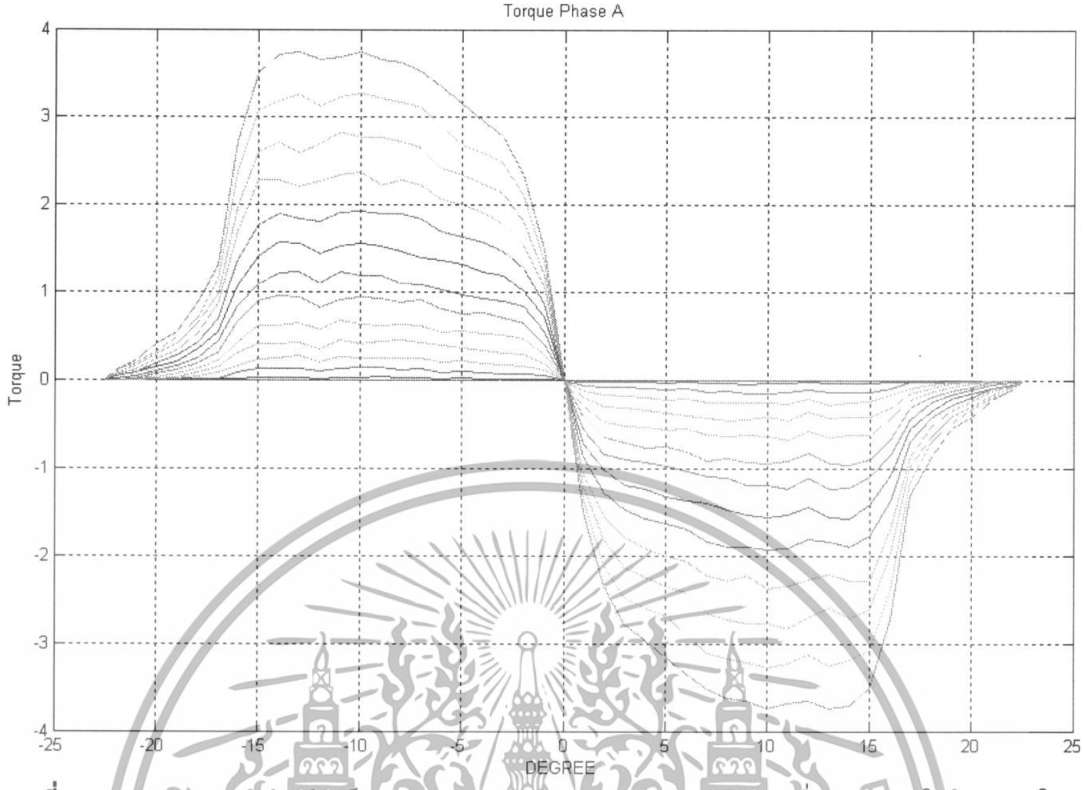
g คือ constant of gravity ($g = 9.81 m/s^2$)

l คือ ระยะถ่วงของมวลจากจุดศูนย์กลาง

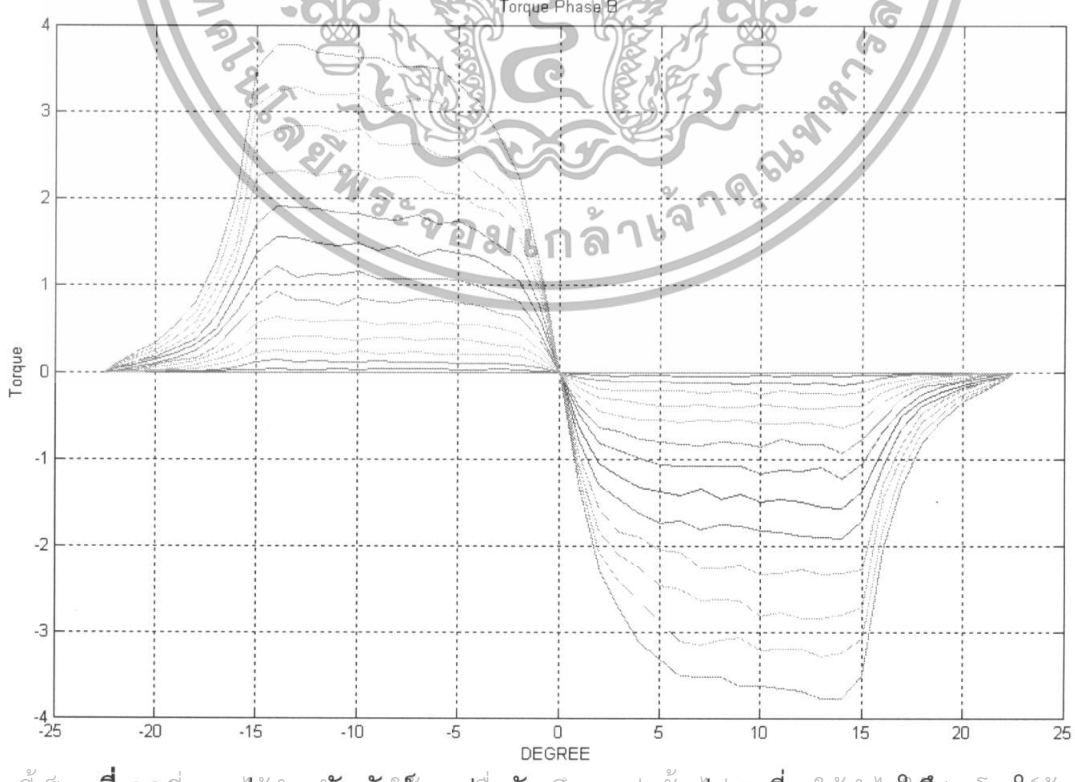
θ คือ Rotor angle

หลังจากการทำการทดลองเพื่อเก็บค่าของน้ำหนักที่ใช้ถ่วง ระยะทางที่ถ่วงและกระแสเฟสที่เข้าขดลวดที่ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ตั้งแต่ Aligned position จนถึง Unaligned position ของทั้งเฟส A, เฟส B และเฟส C ทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งจะได้ผลการทดลองเพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้น คือ ค่าแรงบิดที่มุม 0°-22.5° หลังจากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการ flip ค่า ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองที่สมบูรณ์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

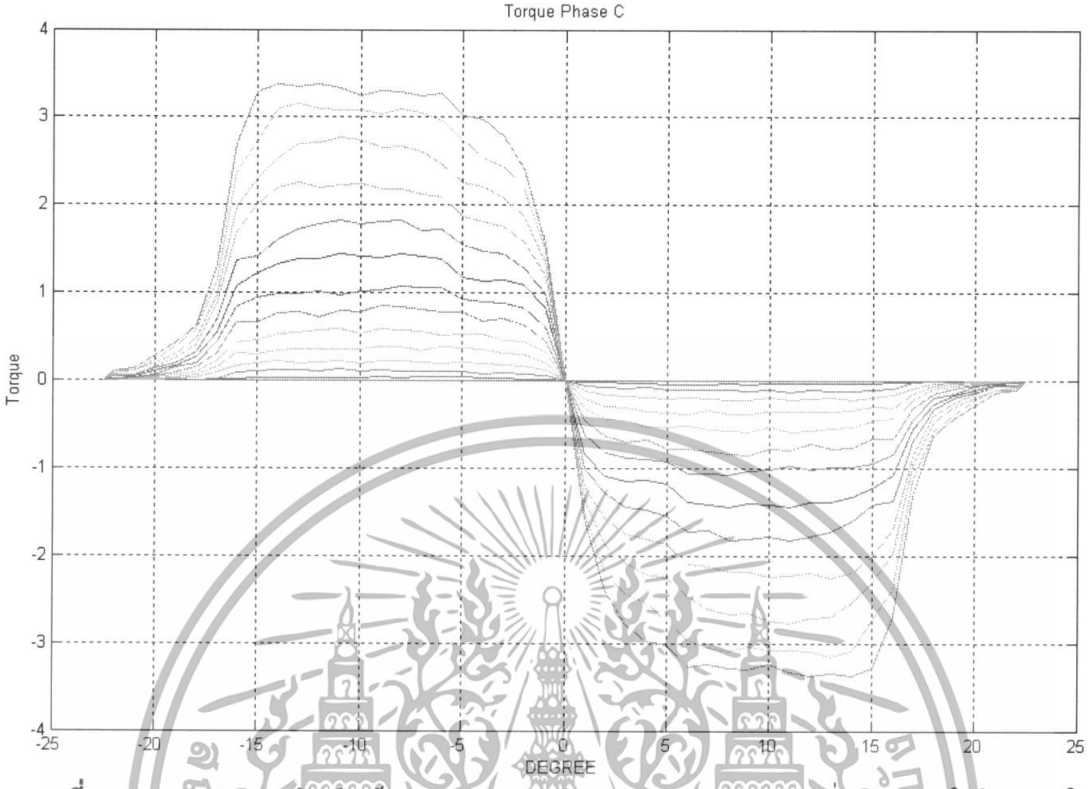


ภาพที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส ของเฟส A ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°



ภาพที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกับกระแส ของเฟส B ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส ของเฟส C ที่มุม -22.5° ถึง 22.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของเซนเซอร์ A ในน้ำเกลือ

angle	current													
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
-22.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-22.00	0	0	0	0.002274	0.002683	0.002956	0.003638	0.01569	0.040749	0.050936	0.062578	0.080042	0.097506	0.108239
-21.00	0	0	0	0	0.004121	0.011906	0.016485	0.042861	0.084074	0.095614	0.12199	0.15562	0.191228	0.220993
-20.00	0	0	0	0.008297	0.017699	0.02854	0.074669	0.099559	0.150582	0.189622	0.234239	0.292592	0.330018	0.40819
-19.00	0	0	0.00742	0.01345	0.034227	0.073045	0.122715	0.162786	0.211482	0.276736	0.33763	0.410999	0.47936	0.550002
-18.00	0	0.00793	0.013528	0.041844	0.083689	0.132811	0.194668	0.256944	0.360739	0.431273	0.534041	0.641895	0.711402	0.888203
-17.00	0	0.007505	0.019701	0.082744	0.144901	0.213895	0.315213	0.4428	0.544118	0.691875	0.871246	0.965435	1.153812	1.308698
-16.00	0	0.01886	0.084493	0.166722	0.302665	0.433025	0.65859	0.833044	1.07464	1.365084	1.695133	1.980295	2.367301	2.72432
-15.00	0	0.024637	0.125048	0.241631	0.413218	0.621779	0.901995	1.091889	1.409705	1.775184	2.278724	2.611038	3.085772	3.513033
-14.00	0	0.035466	0.131071	0.252433	0.416534	0.619946	0.953764	1.215716	1.573234	1.906195	2.290556	2.718227	3.185114	3.715967
-13.00	0	0.033551	0.126747	0.272093	0.431569	0.652372	0.946203	1.242136	1.566172	1.836201	2.212044	2.585976	3.256414	3.735298
-12.00	0	0.015353	0.103633	0.210432	0.358589	0.578041	0.818891	1.107911	1.445102	1.806377	2.263992	2.694452	3.124816	3.653631
-11.00	0	0.030304	0.138669	0.26347	0.450451	0.683617	0.917235	1.236365	1.536795	1.920993	2.335699	2.828839	3.227511	3.688584
-10.00	0	0.032644	0.148392	0.252151	0.417643	0.635691	0.943393	1.194965	1.566912	1.927362	2.370656	2.764968	3.264833	3.738793
-9.00	0	0.039997	0.140494	0.257733	0.43834	0.620837	0.925811	1.186542	1.539036	1.900057	2.231089	2.76356	3.210766	3.65865
-8.00	0	0.027686	0.116283	0.244806	0.452891	0.62717	0.879388	1.103571	1.479329	1.896276	2.288938	2.722594	3.164557	3.627794
-7.00	0	0.036805	0.136901	0.251504	0.431003	0.620434	0.907089	1.084688	1.399676	1.835207	2.22994	2.647944	3.102169	3.51696
-6.00	0	0.015805	0.089758	0.201516	0.401568	0.550253	0.816599	1.025188	1.367242	1.69954	2.05662	2.418967	2.892243	3.350592
-5.00	0	0.028585	0.099095	0.218517	0.385498	0.554892	0.757284	0.978244	1.322829	1.634919	1.997534	2.341776	2.686409	3.155644
-4.00	0	0.011743	0.082203	0.187893	0.344471	0.52845	0.768131	0.923319	1.244205	1.57522	1.90829	2.240039	2.594198	2.967538
-3.00	0	0.009797	0.078372	0.176338	0.316429	0.510205	0.706998	0.905985	1.16891	1.468896	1.781014	2.130163	2.468732	2.777324
-2.00	0	0.019608	0.080295	0.160002	0.294121	0.464319	0.647968	0.838832	1.022952	1.285308	1.548546	1.815068	2.100267	2.349289
-1.00	0	0.014713	0.056497	0.119173	0.188814	0.295628	0.411222	0.563989	0.721906	0.868543	1.050299	1.206348	1.354064	1.50178
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของเซนเซอร์ A ในน้ำนิ่ง

angle	current													
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
1.00	0	-0.01471	-0.0565	-0.11917	-0.18881	-0.29563	-0.41122	-0.56399	-0.72191	-0.86854	-1.0603	-1.20635	-1.35406	-1.50178
2.00	0	-0.01961	-0.08029	-0.16000	-0.29412	-0.46432	-0.64797	-0.83883	-1.02295	-1.28531	-1.54855	-1.81507	-2.10027	-2.34929
3.00	0	-0.0098	-0.07837	-0.17634	-0.31643	-0.5102	-0.70700	-0.90599	-1.18891	-1.4689	-1.78101	-2.13016	-2.46873	-2.77732
4.00	0	-0.01174	-0.0822	-0.18789	-0.34447	-0.52845	-0.76813	-0.92332	-1.24421	-1.57522	-1.90829	-2.24004	-2.59420	-2.96754
5.00	0	-0.02859	-0.09909	-0.21852	-0.3655	-0.55489	-0.75728	-0.97824	-1.32283	-1.63492	-1.99753	-2.34178	-2.68641	-3.15564
6.00	0	-0.01581	-0.08976	-0.20152	-0.40157	-0.55025	-0.81660	-1.02519	-1.36724	-1.69954	-2.05662	-2.41897	-2.89224	-3.35059
7.00	0	-0.03681	-0.1369	-0.2515	-0.431	-0.62043	-0.90709	-1.08469	-1.39908	-1.83521	-2.22994	-2.64794	-3.10217	-3.51696
8.00	0	-0.02769	-0.11628	-0.24481	-0.45289	-0.62717	-0.87839	-1.10357	-1.47933	-1.89628	-2.28894	-2.72259	-3.16456	-3.62779
9.00	0	-0.04000	-0.14049	-0.25773	-0.43834	-0.62064	-0.92561	-1.18054	-1.53904	-1.90006	-2.23109	-2.76356	-3.21077	-3.65865
10.00	0	-0.03264	-0.14839	-0.25215	-0.41764	-0.63569	-0.94339	-1.19490	-1.56691	-1.92736	-2.37066	-2.76497	-3.26463	-3.73879
11.00	0	-0.0363	-0.13867	-0.26347	-0.45645	-0.68362	-0.91723	-1.23637	-1.53679	-1.92099	-2.3357	-2.82884	-3.22751	-3.68858
12.00	0	-0.01535	-0.10363	-0.21043	-0.35859	-0.57804	-0.81889	-1.10791	-1.4451	-1.80638	-2.26399	-2.69445	-3.12482	-3.65363
13.00	0	-0.03355	-0.12675	-0.27299	-0.43157	-0.65237	-0.94620	-1.24214	-1.56617	-1.8362	-2.21204	-2.58598	-3.25641	-3.73530
14.00	0	-0.03547	-0.13107	-0.25243	-0.41653	-0.61995	-0.95376	-1.21572	-1.57323	-1.9062	-2.29056	-2.71823	-3.18511	-3.71597
15.00	0	-0.02464	-0.12565	-0.24163	-0.41322	-0.62178	-0.90199	-1.09189	-1.4097	-1.77518	-2.27872	-2.61104	-3.08577	-3.51303
16.00	0	-0.01886	-0.08449	-0.16672	-0.30266	-0.43302	-0.65859	-0.83304	-1.07464	-1.36508	-1.69513	-1.9803	-2.36730	-2.72432
17.00	0	-0.00751	-0.0197	-0.08274	-0.1448	-0.21389	-0.31521	-0.4428	-0.54412	-0.69187	-0.87125	-0.96543	-1.15381	-1.30870
18.00	0	-0.00793	-0.01353	-0.04184	-0.08369	-0.13281	-0.19467	-0.25694	-0.36074	-0.43127	-0.53404	-0.64189	-0.71140	-0.88820
19.00	0	0	-0.00742	-0.01345	-0.03423	-0.07304	-0.12272	-0.16279	-0.21148	-0.27674	-0.33763	-0.411	-0.47936	-0.55000
20.00	0	0	0	-0.0083	-0.0177	-0.02854	-0.07467	-0.09956	-0.15058	-0.18962	-0.23424	-0.29259	-0.33002	-0.40819
21.00	0	0	0	0	-0.00412	-0.01191	-0.01649	-0.04286	-0.08407	-0.09561	-0.12199	-0.15562	-0.19123	-0.22099
22.00	0	0	0	-0.00227	-0.00268	-0.00296	-0.00364	-0.01569	-0.04075	-0.05094	-0.06258	-0.08004	-0.09751	-0.10824
22.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

angle	current															
	0.00000	0.50000	1.00000	1.50000	2.00000	2.50000	3.00000	3.50000	4.00000	4.50000	5.00000	5.50000	6.00000	6.50000
-22.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-22.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00227	0.00296	0.00773	0.02047	0.03820	0.04457	0.05476	0.07004	0.08532	0.08914
-21.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00504	0.01191	0.02931	0.03434	0.06462	0.08719	0.11686	0.12199	0.15562	0.19123	0.21751
-20.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.01014	0.02507	0.05232	0.08297	0.10841	0.15058	0.17709	0.20907	0.25655	0.29499	0.34205
-19.00	0.00000	0.00696	0.01929	0.02597	0.05009	0.08441	0.13023	0.15917	0.21853	0.28216	0.32789	0.40321	0.46967	0.53888
-18.00	0.00000	0.00187	0.02006	0.04614	0.08369	0.13281	0.16374	0.24435	0.32449	0.38112	0.47862	0.58172	0.69507	0.80414
-17.00	0.00000	0.00751	0.03283	0.08274	0.14480	0.21389	0.29157	0.42066	0.50859	0.64262	0.82772	0.97378	1.13538	1.31714
-16.00	0.00000	0.02829	0.06337	0.13466	0.21878	0.33344	0.53466	0.67179	0.88100	1.08492	1.29214	1.46165	1.80961	2.04961
-15.00	0.00000	0.03459	0.11826	0.22742	0.37922	0.56600	0.76412	1.03905	1.36621	1.70753	2.27531	2.71195	3.07961	3.50602
-14.00	0.00000	0.04860	0.14906	0.25243	0.38408	0.63356	0.92597	1.22752	1.55953	1.91705	2.30845	2.80504	3.23537	3.77460
-13.00	0.00000	0.03231	0.11805	0.24088	0.41365	0.59554	0.83198	1.08356	1.54261	1.89795	2.32445	2.83890	3.28241	3.76512
-12.00	0.00000	0.03167	0.12666	0.23778	0.40829	0.57864	0.82668	1.13440	1.48540	1.88914	2.27301	2.84798	3.19342	3.68280
-11.00	0.00000	0.04131	0.11093	0.21263	0.39001	0.58510	0.76090	1.11344	1.46055	1.83495	2.31403	2.77684	3.19510	3.65161
-10.00	0.00000	0.03475	0.12057	0.24375	0.39082	0.58971	0.85500	1.17110	1.49354	1.83172	2.32501	2.81714	3.21617	3.62286
-9.00	0.00000	0.03837	0.12596	0.20541	0.39111	0.55156	0.81438	1.07696	1.39409	1.77022	2.21859	2.63004	3.06422	3.62435
-8.00	0.00000	0.03740	0.11220	0.22149	0.40131	0.56422	0.79805	1.07831	1.45572	1.75231	2.25528	2.61671	3.10088	3.52637
-7.00	0.00000	0.03043	0.12240	0.23953	0.37214	0.54419	0.84024	1.06911	1.33882	1.80716	2.25243	2.64079	3.15475	3.51988
-6.00	0.00000	0.03863	0.11317	0.20649	0.38245	0.58147	0.81953	1.08114	1.41027	1.71222	2.08394	2.49750	3.11225	3.51128
-5.00	0.00000	0.03225	0.10418	0.20327	0.37625	0.54492	0.79950	1.05520	1.37335	1.73240	2.05226	2.46271	2.88040	3.31440
-4.00	0.00000	0.03621	0.10178	0.20942	0.35093	0.54430	0.77310	0.99084	1.32826	1.61358	1.90535	2.26059	2.61817	3.12372
-3.00	0.00000	0.03919	0.10580	0.20769	0.31843	0.49502	0.68270	0.90599	1.19092	1.45089	1.83685	2.10195	2.42171	2.72442
-2.00	0.00000	0.03431	0.09059	0.19500	0.29412	0.44549	0.63216	0.80996	1.04290	1.29207	1.55913	1.82404	2.06208	2.25826
-1.00	0.00000	0.01962	0.05826	0.10593	0.18366	0.26973	0.38253	0.47810	0.62461	0.77036	0.93122	1.06569	1.16966	1.27303
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่างๆ ของเฟส B มุมด้านลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

angle	current														
	0.00000	0.50000	1.00000	1.50000	2.00000	2.50000	3.00000	3.50000	4.00000	4.50000	5.00000	5.50000	6.00000	6.50000
1.00	0.00000	-0.01962	-0.05826	-0.10593	-0.18366	-0.26973	-0.38253	-0.47816	-0.62461	-0.77036	-0.93122	-1.06569	-1.16966	-1.27363
2.00	0.00000	-0.03431	-0.09059	-0.19500	-0.29412	-0.44540	-0.63216	-0.80996	-1.04290	-1.29207	-1.55913	-1.82404	-2.00208	-2.25826
3.00	0.00000	-0.03919	-0.10580	-0.20700	-0.31643	-0.49502	-0.68270	-0.90599	-1.19092	-1.45689	-1.83685	-2.10195	-2.42171	-2.72442
4.00	0.00000	-0.03621	-0.10178	-0.20942	-0.35093	-0.54430	-0.77310	-0.99084	-1.32626	-1.61358	-1.90535	-2.26059	-2.61817	-3.12372
5.00	0.00000	-0.03225	-0.10418	-0.20327	-0.37025	-0.54492	-0.79950	-1.05520	-1.37335	-1.73240	-2.05226	-2.46271	-2.88049	-3.31440
6.00	0.00000	-0.03863	-0.11317	-0.20649	-0.38245	-0.58147	-0.81953	-1.08114	-1.41027	-1.71222	-2.08394	-2.49750	-3.11225	-3.51128
7.00	0.00000	-0.03943	-0.12240	-0.23953	-0.37214	-0.54419	-0.84024	-1.06911	-1.33882	-1.80716	-2.25243	-2.64079	-3.15475	-3.51988
8.00	0.00000	-0.03740	-0.11220	-0.22149	-0.40131	-0.56422	-0.79805	-1.07831	-1.45572	-1.75231	-2.25528	-2.61671	-3.10088	-3.52637
9.00	0.00000	-0.03837	-0.12506	-0.20541	-0.39111	-0.55156	-0.81438	-1.07606	-1.39409	-1.77022	-2.21859	-2.63004	-3.06422	-3.62435
10.00	0.00000	-0.03475	-0.12057	-0.24375	-0.38982	-0.58971	-0.85500	-1.17170	-1.49354	-1.83172	-2.32501	-2.81714	-3.21517	-3.62286
11.00	0.00000	-0.04131	-0.11093	-0.21263	-0.39001	-0.58510	-0.76090	-1.11344	-1.46055	-1.83495	-2.31403	-2.77684	-3.19516	-3.65161
12.00	0.00000	-0.03167	-0.12666	-0.23778	-0.40829	-0.57804	-0.82668	-1.13440	-1.48540	-1.88914	-2.27301	-2.84708	-3.19342	-3.68280
13.00	0.00000	-0.03231	-0.11805	-0.24068	-0.41365	-0.59554	-0.83198	-1.08356	-1.54261	-1.89795	-2.32445	-2.83890	-3.28241	-3.76512
14.00	0.00000	-0.04860	-0.14906	-0.25243	-0.38408	-0.60356	-0.82597	-1.22752	-1.55953	-1.91705	-2.30845	-2.80504	-3.23537	-3.77460
15.00	0.00000	-0.03459	-0.11826	-0.22742	-0.37922	-0.56600	-0.76412	-1.03905	-1.36621	-1.70753	-2.27531	-2.71195	-3.07961	-3.50602
16.00	0.00000	-0.02829	-0.06337	-0.13466	-0.21878	-0.33344	-0.53408	-0.67179	-0.88700	-1.08492	-1.29214	-1.46165	-1.80961	-2.04961
17.00	0.00000	-0.00751	-0.03283	-0.08274	-0.14490	-0.21389	-0.29157	-0.42066	-0.50659	-0.64262	-0.82772	-0.97378	-1.13538	-1.31714
18.00	0.00000	-0.00187	-0.02006	-0.04614	-0.08360	-0.13281	-0.18374	-0.24435	-0.32449	-0.38112	-0.47802	-0.58172	-0.69507	-0.80414
19.00	0.00000	-0.00696	-0.01929	-0.02597	-0.05009	-0.08441	-0.13023	-0.15917	-0.21853	-0.28216	-0.32780	-0.40321	-0.46967	-0.53888
20.00	0.00000	0.00000	0.00000	-0.01014	-0.02507	-0.05232	-0.08297	-0.10841	-0.15058	-0.17709	-0.20907	-0.25655	-0.29499	-0.34205
21.00	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00504	-0.01101	-0.02931	-0.03434	-0.06462	-0.08719	-0.11686	-0.12199	-0.15562	-0.19123	-0.21751
22.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00227	-0.00296	-0.00773	-0.02047	-0.03820	-0.04457	-0.05476	-0.07004	-0.08532	-0.08914
22.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่างๆ ของเฟส B มุมด้านบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

angle	current														
	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
-22.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-22.00	0	0	0	0.002274	0.002683	0.002956	0.003638	0.01569	0.040749	0.050936	0.062578	0.080042	0.097506	0.108239
-21.00	0	0	0	0	0.013738	0.02198	0.030223	0.033428	0.044876	0.053577	0.05953	0.096713	0.105505	0.137376
-20.00	0	0	0	0.006453	0.017699	0.02854	0.049779	0.05531	0.102048	0.133206	0.150997	0.190821	0.213867	0.275006
-19.00	0	0	0.00742	0.018511	0.033392	0.058436	0.090158	0.141061	0.158612	0.189917	0.251599	0.299071	0.380529	0.431266
-18.00	0	0	0	0.034987	0.064936	0.091433	0.141907	0.196497	0.258904	0.320947	0.398012	0.465374	0.569122	0.622302
-17.00	0	0.007505	0.019701	0.082744	0.144801	0.213865	0.315213	0.4428	0.544118	0.661875	0.871246	0.965435	1.130265	1.308098
-16.00	0	0.01886	0.084403	0.166722	0.302665	0.433025	0.65859	0.933044	1.07464	1.305084	1.695133	1.980295	2.307301	2.698859
-15.00	0	0.024637	0.098548	0.180515	0.203748	0.462416	0.664028	0.940468	1.220001	1.415201	2.000601	2.293601	2.732801	3.283341
-14.00	0	0.035466	0.118221	0.222735	0.345716	0.52457	0.763011	0.980476	1.327417	1.605217	2.193086	2.527474	3.086596	3.369299
-13.00	0	0.033551	0.111835	0.193501	0.347932	0.544839	0.776156	0.984533	1.391728	1.717484	2.254198	2.700296	3.158152	3.347411
-12.00	0	0.029267	0.103633	0.212495	0.355038	0.578041	0.726809	1.013059	1.38369	1.788385	2.191402	2.712588	3.098188	3.376701
-11.00	0	0.02966	0.132891	0.21407	0.357553	0.584382	0.794937	0.969043	1.438282	1.822481	2.23189	2.776453	3.07382	3.328913
-10.00	0	0.029949	0.105111	0.191287	0.351659	0.534734	0.776162	1.011666	1.418954	1.78124	2.233711	2.738883	3.079191	3.240287
-9.00	0	0.039997	0.116271	0.22479	0.389216	0.591527	0.858078	1.037716	1.398217	1.805102	2.179961	2.657269	3.030595	3.297242
-8.00	0	0.034001	0.110163	0.22732	0.384598	0.578695	0.84633	1.078313	1.442008	1.822203	2.181835	2.667513	3.087035	3.283317
-7.00	0	0.039434	0.108079	0.203306	0.338843	0.562597	0.81634	1.067162	1.411847	1.71369	2.120692	2.612161	3.054948	3.236538
-6.00	0	0.043903	0.103416	0.194052	0.382445	0.519033	0.76294	1.064896	1.379194	1.717297	2.08784	2.463846	2.964683	3.273225
-5.00	0	0.03738	0.099095	0.203272	0.370873	0.531633	0.778393	0.926938	1.174186	1.545792	1.869903	2.258708	2.741234	3.026107
-4.00	0	0.027401	0.078289	0.185936	0.348777	0.533734	0.681113	0.892493	1.135433	1.474521	1.805536	2.205005	2.541206	2.970278
-3.00	0	0.035268	0.08621	0.176338	0.307122	0.481614	0.704568	0.884041	1.148744	1.440094	1.748685	2.073735	2.433464	2.790549
-2.00	0	0.022059	0.078236	0.166668	0.289219	0.445495	0.631379	0.825156	1.088247	1.285308	1.572369	1.868892	2.174631	2.404437
-1.00	0	0.016184	0.056497	0.12447	0.202546	0.319365	0.459038	0.617936	0.838039	1.008265	1.207819	1.350533	1.507813	1.576423
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่างๆ ของเฟส C มุมด้านลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

angle	current															
	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
1.00	0	-0.01618	-0.0565	-0.12447	-0.20255	-0.31936	-0.45904	-0.61794	-0.83804	-1.00827	-1.20782	-1.35053	-1.50781	-1.57642
2.00	0	-0.02206	-0.07824	-0.16667	-0.28922	-0.44540	-0.63138	-0.82516	-1.08825	-1.28531	-1.57237	-1.86889	-2.17463	-2.40444
3.00	0	-0.03527	-0.08621	-0.17634	-0.30712	-0.46161	-0.70457	-0.89404	-1.14874	-1.44009	-1.74869	-2.07373	-2.43346	-2.79055
4.00	0	-0.0274	-0.07829	-0.16594	-0.34878	-0.53373	-0.68111	-0.89249	-1.13543	-1.47452	-1.80554	-2.205	-2.54121	-2.97028
5.00	0	-0.03738	-0.09009	-0.20327	-0.37087	-0.53163	-0.77839	-0.92694	-1.17419	-1.54579	-1.8699	-2.25871	-2.74123	-3.02611
6.00	0	-0.0439	-0.10342	-0.19405	-0.38245	-0.51903	-0.78294	-1.0649	-1.37919	-1.7173	-2.09784	-2.46385	-2.96468	-3.27323
7.00	0	-0.03943	-0.10808	-0.20331	-0.33884	-0.5626	-0.81634	-1.06716	-1.41185	-1.71369	-2.12069	-2.61216	-3.05485	-3.23654
8.00	0	-0.034	-0.11016	-0.22732	-0.3846	-0.57869	-0.84633	-1.07831	-1.44261	-1.8222	-2.19183	-2.66751	-3.08703	-3.28332
9.00	0	-0.04	-0.11627	-0.22479	-0.38922	-0.59153	-0.85808	-1.03772	-1.39622	-1.8051	-2.17896	-2.65727	-3.0306	-3.29724
10.00	0	-0.02905	-0.10511	-0.19129	-0.35166	-0.53473	-0.77616	-1.0117	-1.41895	-1.78124	-2.23371	-2.73888	-3.07919	-3.24029
11.00	0	-0.02966	-0.13289	-0.21407	-0.35755	-0.58438	-0.79494	-0.96904	-1.43828	-1.82248	-2.23189	-2.77645	-3.07382	-3.32891
12.00	0	-0.02927	-0.10383	-0.2125	-0.35504	-0.57804	-0.72687	-1.01306	-1.38369	-1.78839	-2.1914	-2.71259	-3.09819	-3.3767
13.00	0	-0.03355	-0.11184	-0.19356	-0.34793	-0.54484	-0.77616	-0.98453	-1.39173	-1.71748	-2.2542	-2.7003	-3.15815	-3.34741
14.00	0	-0.03547	-0.11822	-0.22274	-0.34572	-0.52457	-0.76301	-0.98042	-1.32742	-1.80522	-2.19309	-2.52747	-3.0886	-3.3693
15.00	0	-0.02464	-0.09855	-0.18951	-0.29375	-0.46242	-0.66463	-0.94047	-1.22	-1.4152	-2.0008	-2.2936	-2.7328	-3.28334
16.00	0	-0.01886	-0.08446	-0.16672	-0.30206	-0.43302	-0.65858	-0.83304	-1.07464	-1.36508	-1.69513	-1.9803	-2.3673	-2.69886
17.00	0	-0.00751	-0.0197	-0.08274	-0.1448	-0.21389	-0.31521	-0.4428	-0.54412	-0.69187	-0.87125	-0.96543	-1.13027	-1.3087
18.00	0	0	0	-0.03409	-0.06494	-0.09143	-0.14191	-0.19649	-0.2589	-0.32095	-0.39801	-0.46537	-0.56012	-0.6223
19.00	0	0	-0.00742	-0.01655	-0.03339	-0.05844	-0.09016	-0.14108	-0.15881	-0.18992	-0.2516	-0.29997	-0.38053	-0.43127
20.00	0	0	0	-0.00645	-0.0177	-0.02854	-0.04978	-0.05531	-0.10205	-0.13321	-0.151	-0.19082	-0.21387	-0.27591
21.00	0	0	0	0	-0.01374	-0.02198	-0.03022	-0.03343	-0.04488	-0.05358	-0.05953	-0.09671	-0.10551	-0.13738
22.00	0	0	0	-0.00227	-0.00268	-0.00296	-0.00364	-0.01569	-0.04075	-0.05094	-0.08258	-0.08004	-0.09751	-0.10824
22.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าของแรงบิดที่พิกัดต่างๆ ของเฟส C มุมด้านบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของเฟส A, B, C ที่มุม -22.5° ถึง 22.5° จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าแรงบิดสถิตย์ของมอเตอร์จะมีค่ามากอยู่ในช่วง 10° - 15° ที่กระแส 6.5 A โดยค่าแรงบิดที่เฟส A มีค่าสูงสุดประมาณ 3.7 N.m ที่มุมของโรเตอร์เป็น 13° ขนาดกระแสเป็น 6.5 A ส่วนที่เฟส B มีค่าแรงบิดสูงสุดประมาณ 3.7 N.m ที่มุมของโรเตอร์เป็น 14° ขนาดกระแสเป็น 6.5 A และเฟส C มีค่าแรงบิดสูงสุดประมาณ 3.3 N.m ที่มุมของโรเตอร์เป็น 12° ขนาดกระแสเป็น 6.5 A ส่วนที่มุมของโรเตอร์เป็น 0°, 22.5°, -22.5° ของทั้งเฟส A, B และ C จะได้ค่าของแรงบิดสถิตย์ของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ ไม่ว่าจะทำการทดลองที่ขนาดกระแสเท่าใดก็ตาม และจะพบว่าที่มุมโรเตอร์เดียวกัน ขนาดของกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดเฟสขนาดเท่ากัน อาจจะได้ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลอง ซึ่งอาจจะส่งผลถึงความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดลองได้ โดยสามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

- การตั้งค่าตำแหน่ง Alignedment กับมุม 0° อาจไม่แม่นยำนักทำให้ค่าแรงบิดสถิตย์ ที่ได้ในแต่ละเฟสอาจไม่เท่ากัน

- การปรับค่ากระแสนั้นไม่สามารถที่จะปรับให้ตรงกับค่าที่ต้องการได้ทีเดียว เพราะค่าของกระแสจะไม่นิ่ง ทำให้การทดลองที่มุมเดียวกันแต่ค่ากระแสที่เราทดสอบอาจไม่เท่ากัน ทำให้ค่าแรงบิดที่ได้อาจไม่เท่ากัน

- การสังเกตว่าค่าแรงบิดสถิตย์ของมอเตอร์นั้นสมดุลกับค่าแรงบิดที่เกิดจากการถ่วงน้ำหนักที่ระยะทางต่าง ๆ สังเกตจากการติดหรือดับของหลอดไฟที่ใช้เป็นสัญญาณ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดความผิดพลาด ทำให้ได้ค่าระยะทางและน้ำหนักที่ไม่ถูกต้องเป็นผลให้อาจได้ค่าแรงบิดที่ไม่แม่นยำ

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก ใช้เป็นเครื่องชั่งแบบธรรมดา ทำให้ในการชั่งในแต่ละครั้ง อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

- มุมของโรเตอร์บางมุมที่ขนาดของกระแสค่าน้อย ๆ อาจมีผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดบริเวณจุดที่ใช้เป็นสัญญาณไฟ ซึ่งเกิดแรงดึงดูดกับคานเหล็ก ทำให้ต้องใช้น้ำหนักหรือระยะทางที่มากกว่าปกติในการที่จะเอาชนะแรงดึงดูดของแม่เหล็กด้วย

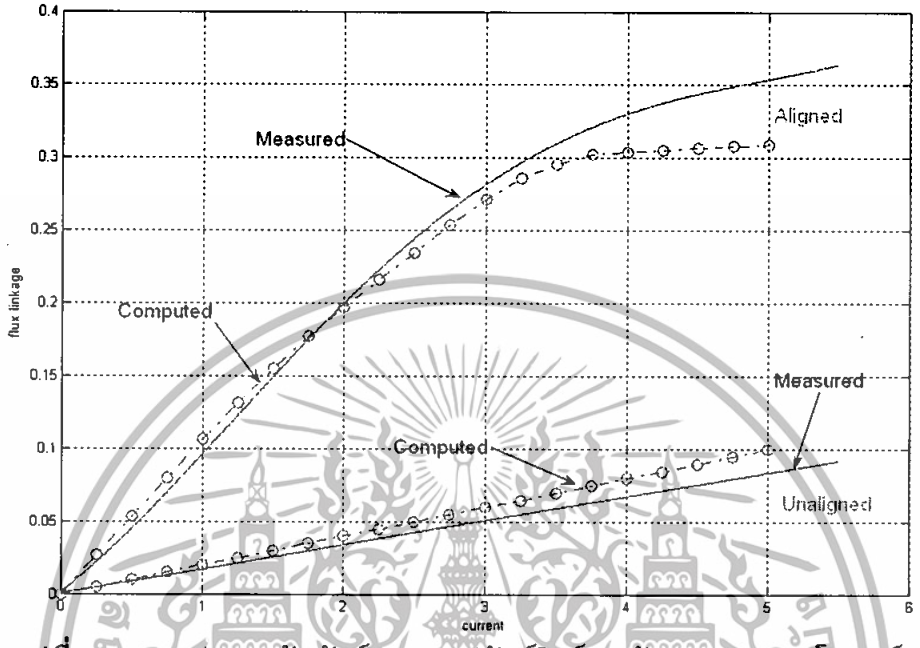
- เมื่อทำการทดลองติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ มอเตอร์จะมีความร้อนเกิดขึ้น ทำให้ต้องจ่ายกระแสเข้าไปในมอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้ค่าแรงบิดสถิตย์สูงขึ้นได้

- ในการทำการทดลองทุกครั้งต้องอาศัยความละเอียดรอบคอบ และความชำนาญ ซึ่งผู้ทดลองต้องมีสภาพร่างกายที่พร้อมในการทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบผลการทดลองจากชุดทดลอง กับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

ทางฟลักซ์ลิงค์เกจ

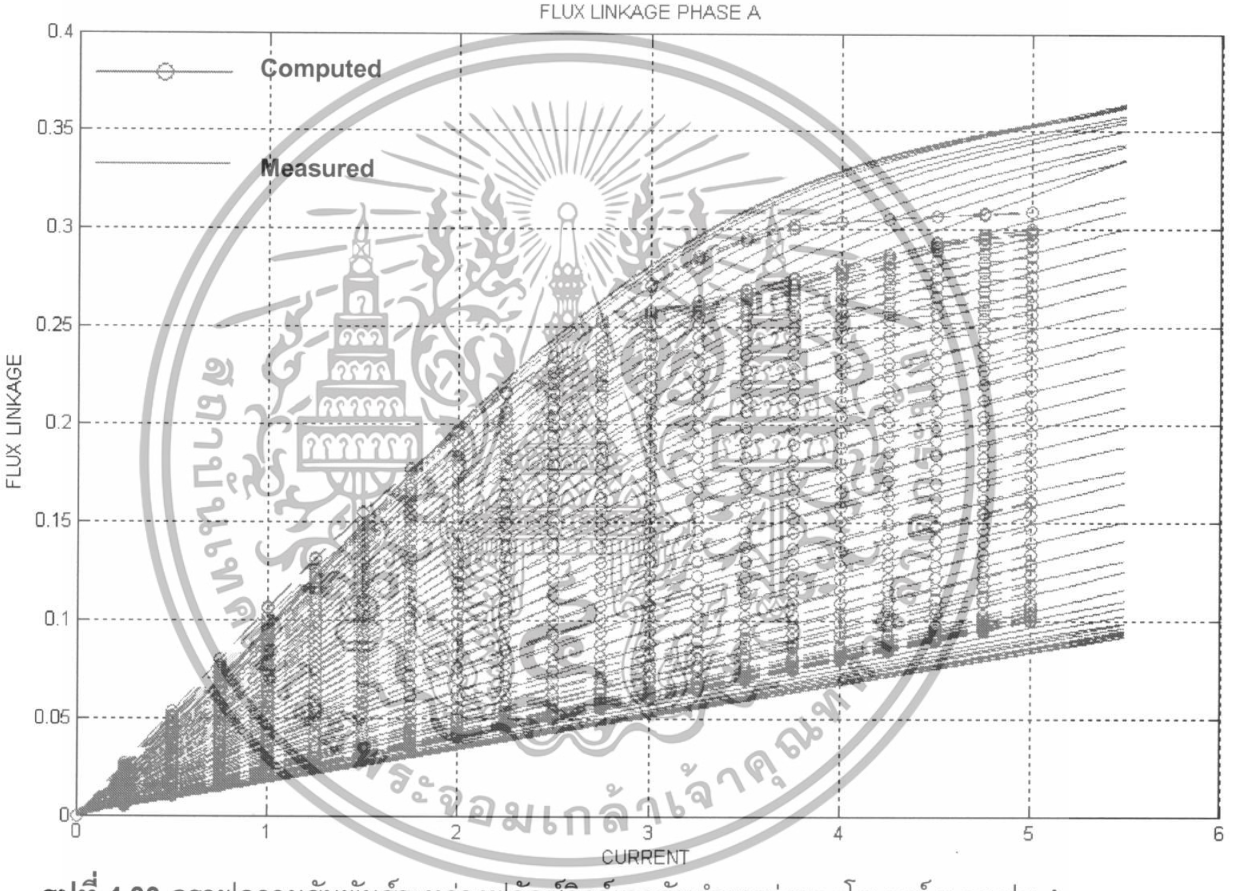


รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ที่ตำแหน่ง Aligned และ Unaligned

จากกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจ กับตำแหน่งของโรเตอร์ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์จะพบว่า ที่ตำแหน่ง Aligned ขณะที่ป้อนขนาดกระแสเท่ากันค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลองจะมีค่าไม่เท่ากับที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ แต่มีแนวโน้มของกราฟเป็นลักษณะเดียวกัน โดยที่ขนาดกระแสเดียวกันค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลอง (เส้นทึบ) จะมีค่ามากกว่าค่า ฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (เส้นประ) เช่นที่กระแสกระตุ้นขนาด 5 A ค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 0.35 Wb. ส่วนค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์มค่าประมาณ 0.3 Wb. เป็นต้น ส่วนที่ตำแหน่ง Unaligned ที่ขนาดกระแสเดียวกันค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลอง (เส้นทึบ) จะมีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (เส้นประ) เช่นที่กระแสกระตุ้นขนาด 5 A ค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 0.08 Wb. ส่วนค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์มีค่าประมาณ 0.1 Wb. เป็นต้น ส่วนที่ตำแหน่งอื่นๆ ก็เป็นลักษณะเดียวกัน คือ ที่ตำแหน่งเดียวกันแต่ได้ค่า ฟลักซ์ลิงค์เกจไม่เท่ากัน สาเหตุที่ทำให้ค่าฟลักซ์ลิงค์เกจที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์มีค่าไม่เท่ากันอาจมีหลายสาเหตุ

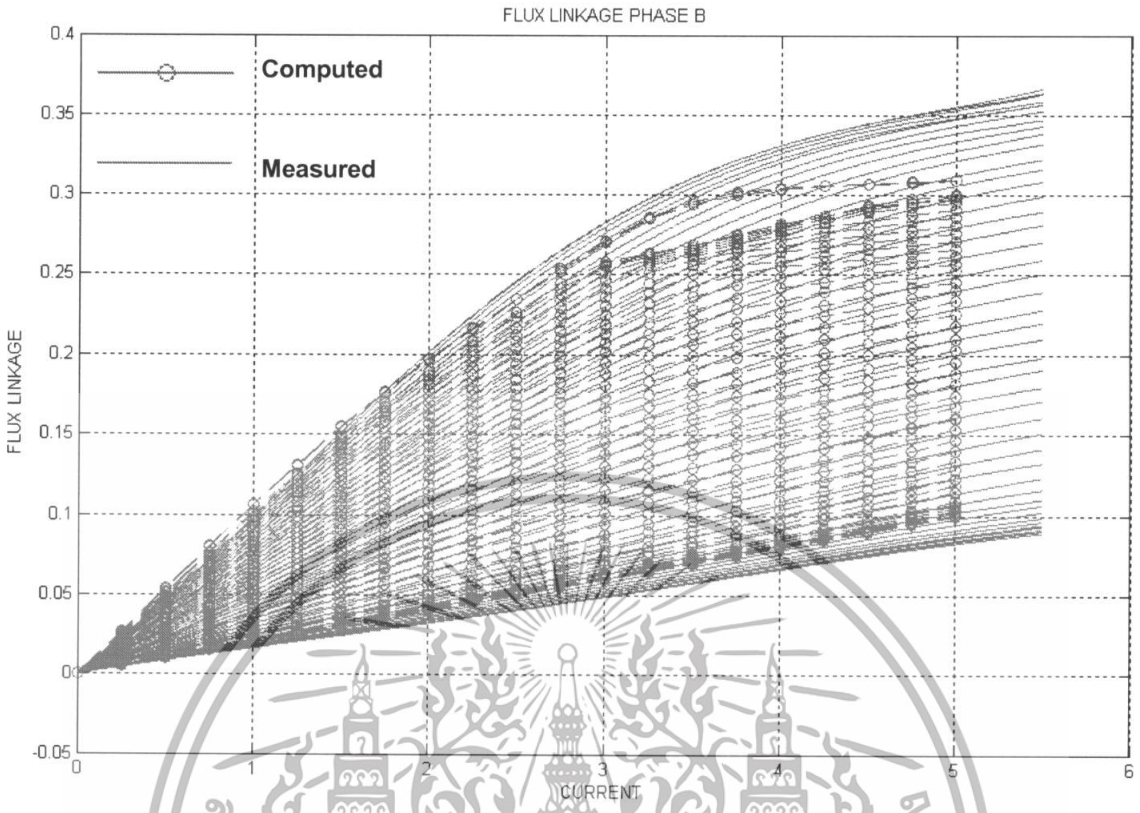
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุของความแตกต่างระหว่างผลการทดลองจากชุดทดลอง กับผลการทดลองจากไฟไนท์เอลิเมนต์นั้น อาจมาจากโครงสร้างมอเตอร์ที่นำไปจำลองด้วยโปรแกรม ไฟไนท์เอลิเมนต์ไม่ถูกต้อง คือขนาดที่ผู้ทำการทดลองได้วัดจากมอเตอร์นั้น อาจไม่แม่นยำ เนื่องจากลักษณะของมอเตอร์ ที่ไม่ได้กลมสม่ำเสมอ หรือ อาจเป็นเพราะเราไม่ทราบวัสดุของมอเตอร์ในการจำลองทางโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ทำให้ผลในการจำลองอาจไม่ตรงกับการทดลองจริง จึงเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ลิงค์เกจทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน

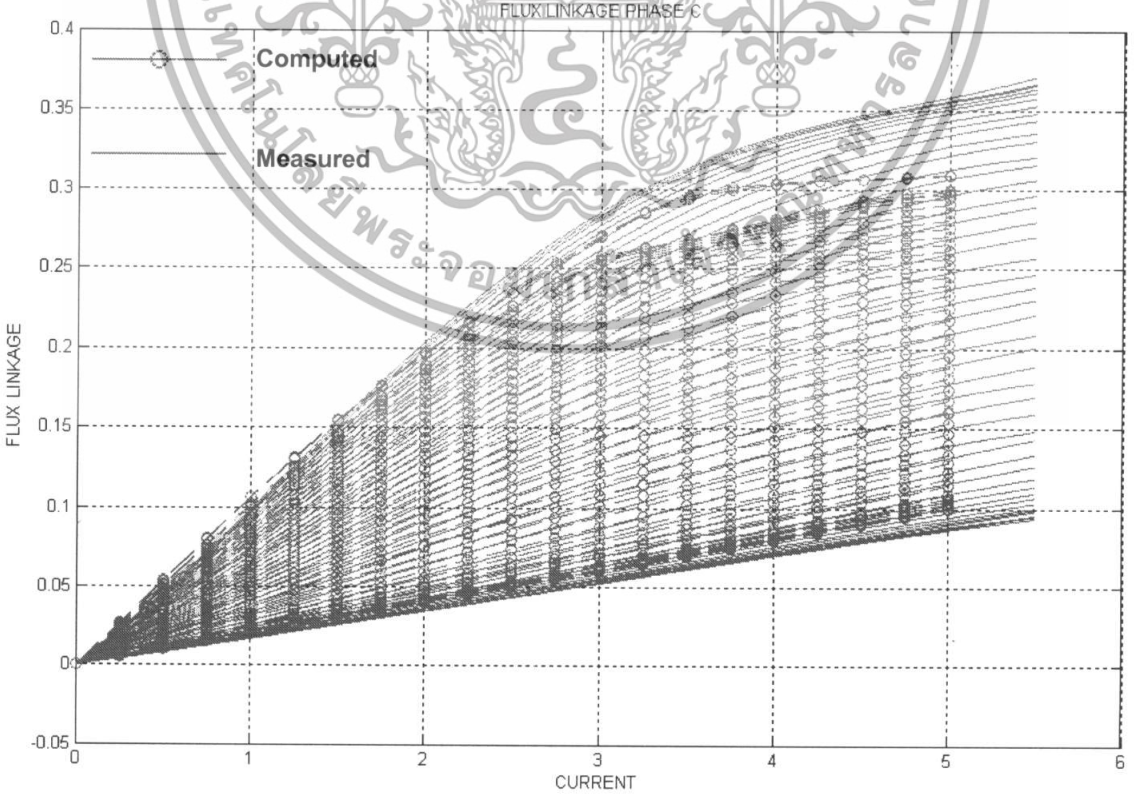


รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



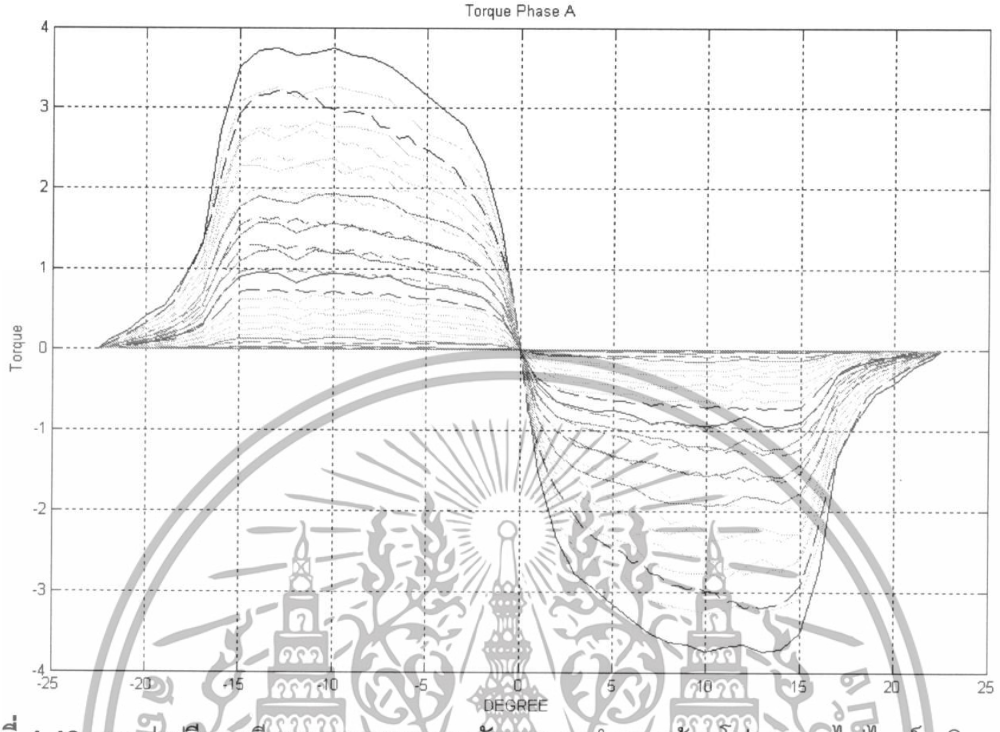
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส B



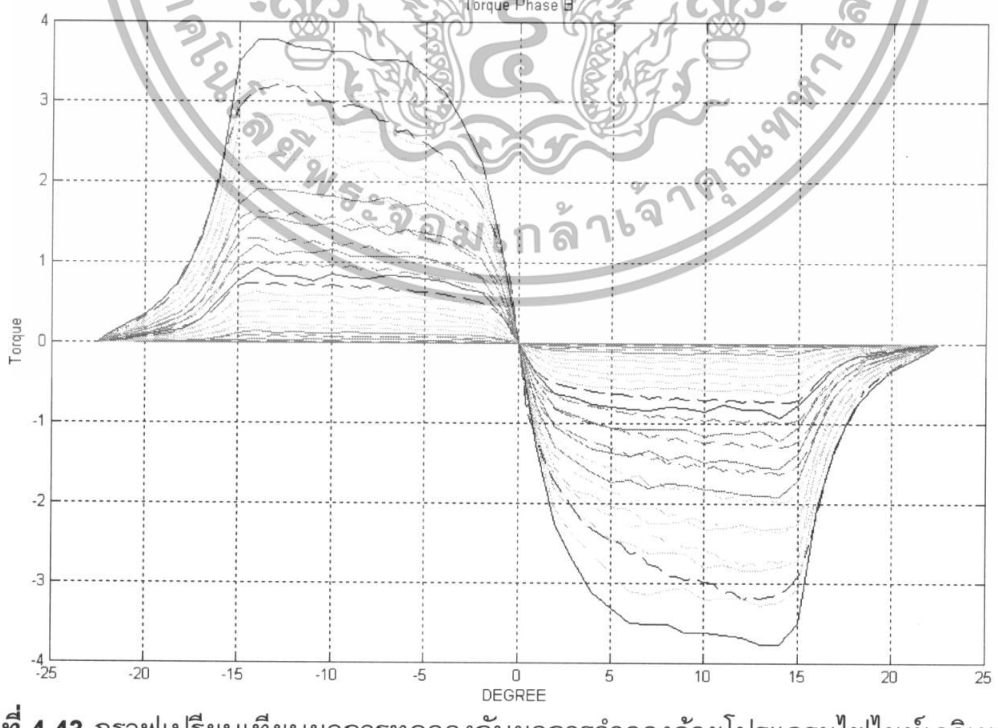
รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ลิงค์เกจกับตำแหน่งของโรเตอร์ ของเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางแรงบิดของมอเตอร์

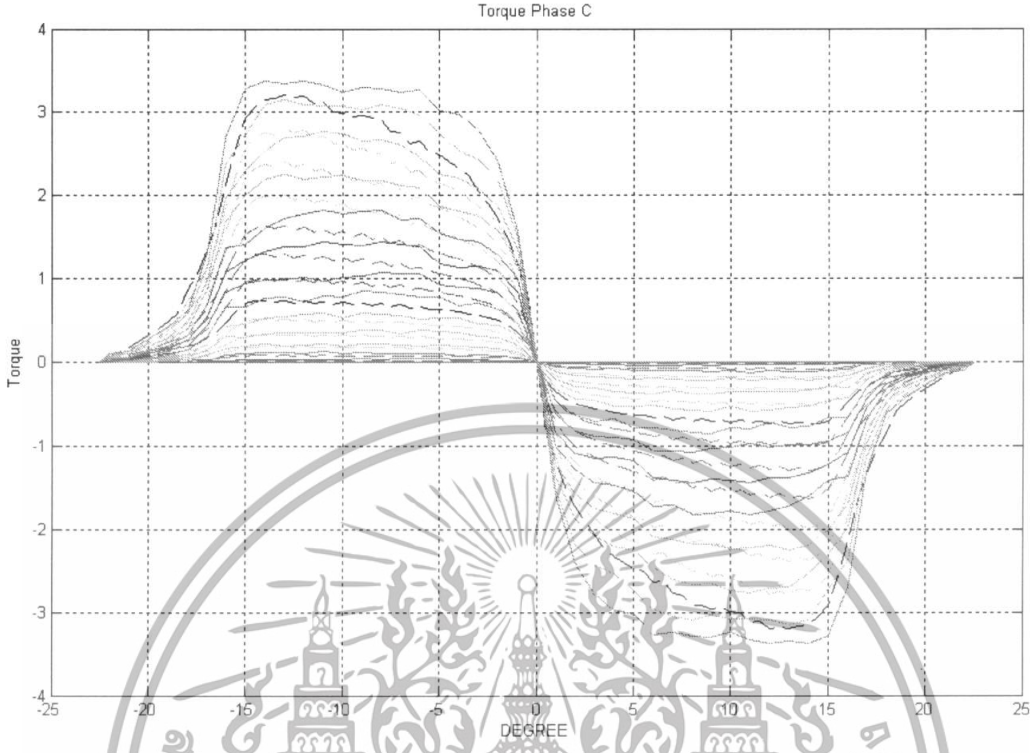


รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส A



รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ของเฟส C

จากกราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์จะพบว่า ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากัน แต่มีแนวโน้มของกราฟเป็นลักษณะเดียวกัน โดยที่มุมของโรเตอร์เดียวกันค่าแรงบิดสถิตย์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (เส้นทึบ) มีค่ามากกว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ไฟไนท์เอลิเมนต์ (เส้นประ) เช่นที่เฟส A ที่มุม 13° ขนาดกระแส 6.5 A ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 3.7 N.m ส่วนค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างมอเตอร์ที่นำไปจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ไม่ถูกต้อง เพราะไม่มีขนาดโครงสร้างของมอเตอร์ที่แท้จริง โดยผู้ทดลองเป็นคนวัดขนาดโครงสร้างของมอเตอร์ซึ่งอาจวัดได้ไม่แม่นยำ ทำให้ไม่ได้โครงสร้างที่แท้จริงของมอเตอร์ เป็นผลให้ค่าแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินโครงงานการหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ แบบ 3 เฟส 12/8 สามารถทำตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ก็คือ การใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ในการจำลองการทำงานและสร้างชุดทดลองขึ้น 2 ชุด เพื่อหาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิด นอกจากนี้ได้จัดการทดลองขึ้นเพื่อเก็บรวบรวมค่าของฟลักซ์ลิงค์เกจและแรงบิดของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ แบบ 3 เฟส 12/8 นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งปรากฏว่า ผลที่ได้จะมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแต่จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างของมอเตอร์และวัสดุที่เลือกใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ไม่ถูกต้อง เพราะไม่มีขนาดโครงสร้างของมอเตอร์ที่แท้จริง โดยผู้ทดลองเป็นคนวัดขนาดโครงสร้างของมอเตอร์ซึ่งอาจวัดได้ไม่แม่นยำ ทำให้ไม่ได้โครงสร้างที่แท้จริงของมอเตอร์ เป็นผลให้ค่าฟลักซ์ลิงค์เกจและค่าแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงมีความน่าเชื่อถือกว่า

อย่างไรก็ตามเทคนิคที่ได้จากโครงงานสามารถใช้หาคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และคุณลักษณะของแรงบิด ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ได้ ทั้งจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ และจากการวัดด้วยชุดทดลองที่ได้มีการออกแบบสร้างขึ้นและสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงและพัฒนาสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์และโปรแกรมควบคุมแรงบิด ความเร็วรอบ, การควบคุมแบบไร้เอนโคดเดอร์วัดตำแหน่ง ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต

<u>แนวทางที่จะดำเนินการต่อไป</u>

ปรับปรุงและพัฒนาการวัดคุณลักษณะของฟลักซ์ลิงค์เกจ และคุณลักษณะของแรงบิด ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ให้เป็นแบบออโตเมติกเต็มขั้น ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องใช้มอเตอร์ไฟตรงเพื่อขับโรเตอร์, ติดตั้ง Absolute encoder และใช้ทอร์คเซ็นเซอร์ รวมทั้งการเชื่อมต่อเพื่อเก็บข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] พรชัย ชินาสัย และคณะ, "การขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ (Switch reluctance motor drives)", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] สิทธิชัย แก้วไทย, "วิธีการประมาณค่าแรงบิดสำหรับเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ (A Torque estimation method for a switched reluctance machine)" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[3] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, "มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์: ทฤษฎีและการออกแบบ" ภาควิชาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and their Control", MAGNA PHYSICS PUBLISHING OXFORD SCIENCE PUBLICATION

[5] V. Ramanarayanan, L. Venkatesha and D. Panda, "Flux linkage characteristics of switched reluctance motors," in Proc. IEEE Conf. PEDES '96, New Delhi, India, Jan. 1996, pp. 281-285.

[6] W.F. Ray and F. Erfan, "A new method of flux or inductance measurement for switched reluctance motors," in Proc. IEE Conf. Power Electronics Variable Speed Drives, Oct. 1994, pp. 137-140.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Motor Information

Numbers of Phases	Three Phase
Numbers of poles (Stator/Rotor)	12/8
Output power	0.5 hp or 375 W.
Rotor speed	700-11000 rpm.
Input voltage	165 V DC.
Phase resistance	2 Ohms.
Stator Outer Diameter	139.4 mm.
Stator Yoke Depth	11.5 mm.
Stator Inner Diameter	84.2 mm.
Stator Pole Arc	16 Degree
Air Gap Length	0.6 mm.
Rotor Inner Diameter	30.25 mm.
Rotor Pole Arc	15 Degree
Shaft Diameter	16.5 mm.
Aligned inductance of phase	100 mH.
Unaligned inductance of phase	15 mH.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานโปรแกรม Ansoft

หลังจากที่ทำการวาดโครงสร้างของ SRM ใน Auto Cad เราก็จะเข้าสู่การใช้งานด้วยโปรแกรม Ansoft ซึ่งมีลำดับการทำงานดังนี้

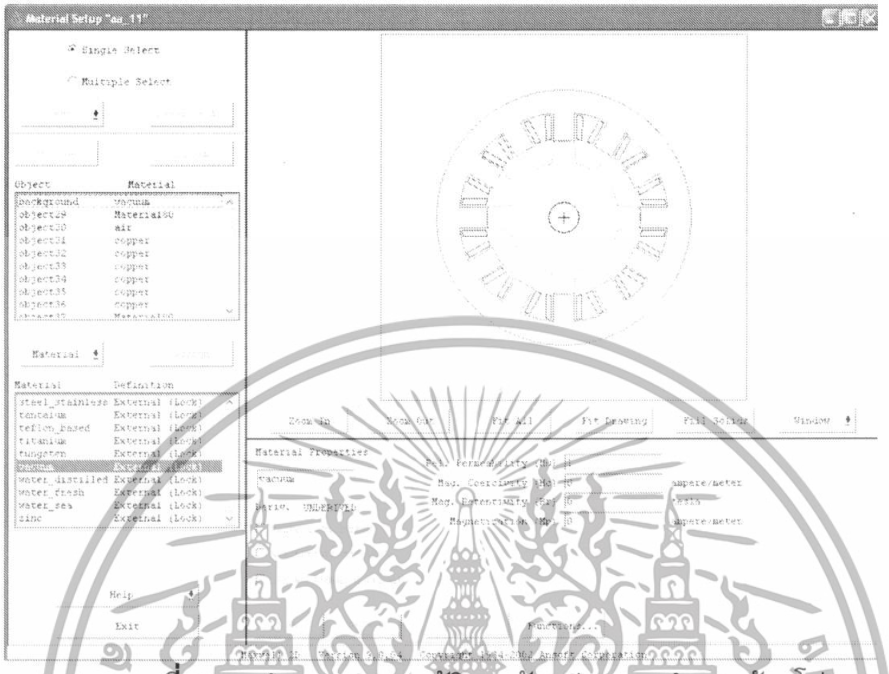
1. **Define Model** โดยการ import file โครงสร้างของมอเตอร์ในโปรแกรม Auto Cad มาลงในโปรแกรม Ansoft หลังจากนั้นทำการตั้งค่าตัวแปรสำหรับการหมุนของมอเตอร์ โดยเข้าไปที่ constraint แล้ว เลือก add ⟶ rotation เพื่อกำหนดมุมอ้างอิงในการหมุน



ภาพที่ 1 การวาดโครงสร้างของมอเตอร์ลงในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **Setup Materials** ทำการกำหนดคุณสมบัติของ material ต่างๆของมอเตอร์ โดยกำหนดให้ stator และ rotor เป็น non-linear material ซึ่งมี B-H curve ตามการทดสอบ, ลวดตัวนำ เป็น copper, shaft เป็น steel_stanless และ พื้นที่ว่างระหว่าง stator และ rotor เป็น air



ภาพที่ 2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุก่อนการจำลองด้วยโปรแกรม

3. **Setup Boundary/Source** เป็นการกำหนดวงจรในการป้อนกระแสกระตุ้นให้กับมอเตอร์ โดยจะกำหนดกระแสกระตุ้นเป็น Function เพื่อที่จะกวาดกระแสกระตุ้นได้หลายๆค่า

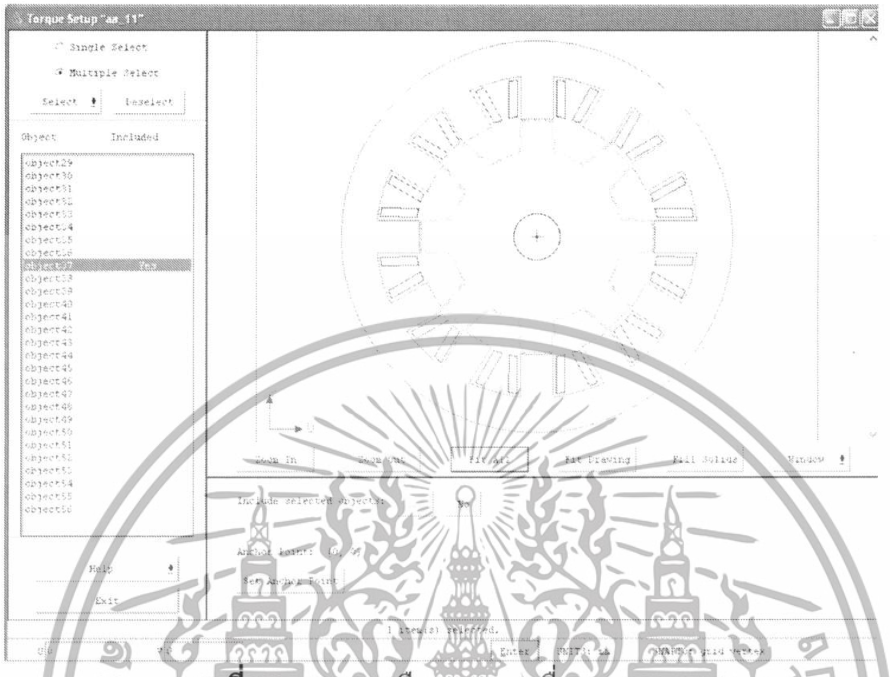


ภาพที่ 3 การกำหนดวงจรในการป้อนกระแสกระตุ้นให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

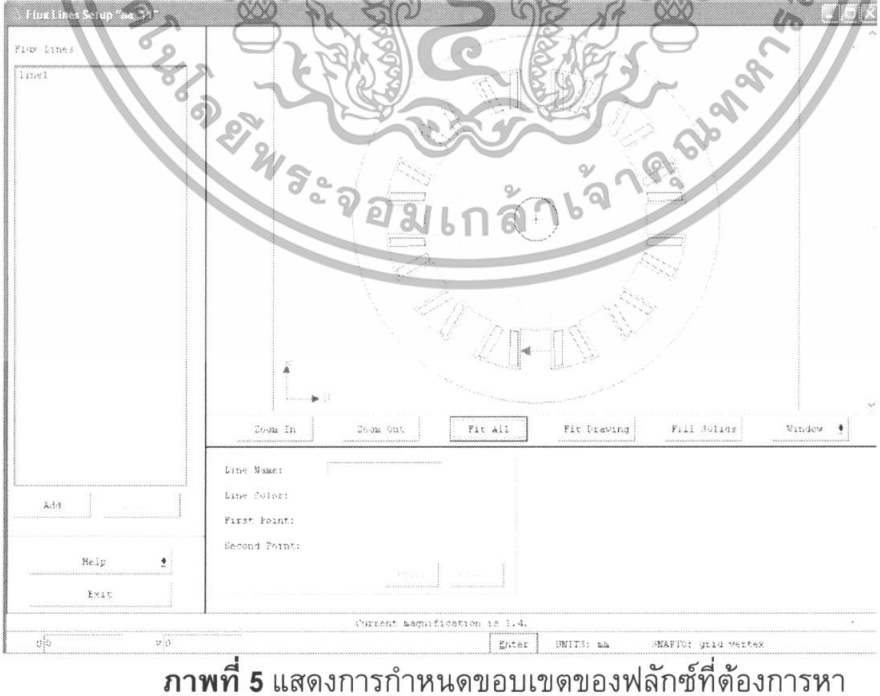
4. Setup Executive Parameters

4.1 **Torque** ทำการเลือกที่ rotor เพื่อที่จะดูค่า torque ที่เกิดขึ้นที่ rotor



ภาพที่ 4 แสดงการเลือก rotor เพื่อหาผลเฉลยของ torque

4.2 **Flux Line** ทำการกำหนดขอบเขตของฟลักซ์ที่ต้องการหา

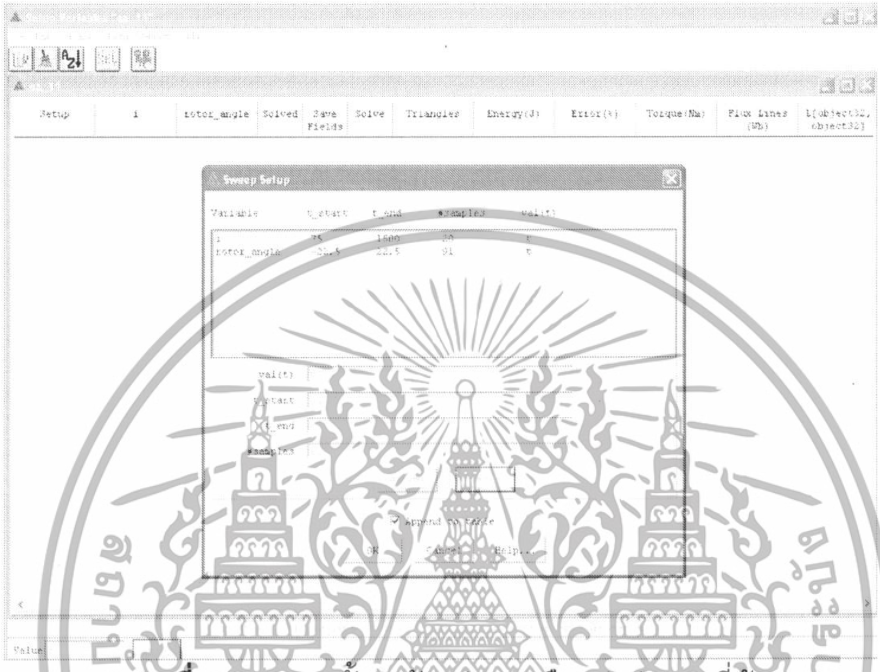


ภาพที่ 5 แสดงการกำหนดขอบเขตของฟลักซ์ที่ต้องการหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. **Setup Solution**

- Variables ทำการตั้งค่าตัวแปรและเลือกค่าต่างๆที่ต้องการทราบ สำหรับการทดลองนี้จะทำการตั้งค่ากระแสตั้งแต่ 75 A.t เพิ่มขึ้นทีละ 75 A.t จนถึง 1500 A.t ส่วนมุมการหมุนของโรเตอร์จะกวาดตั้งแต่ -22.5° จนถึง 22.5°



ภาพที่ 6 แสดงการตั้งค่าตัวแปรและเลือกค่าต่าง ๆ ที่ต้องการทราบ

เมื่อทำการตั้งค่าเรียบร้อยแล้วจะได้เป็นตารางดังรูปด้านล่าง

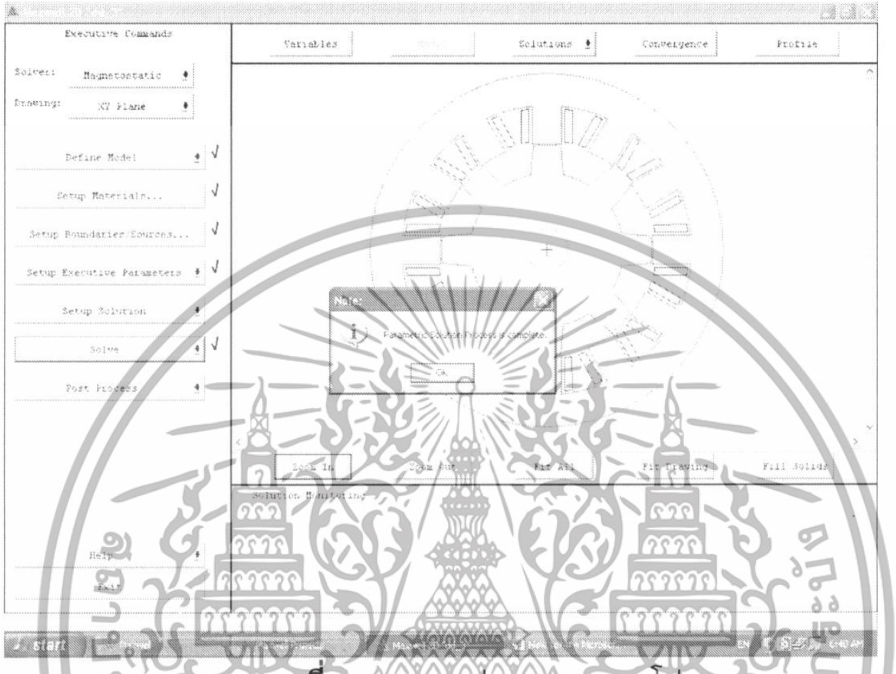


ภาพที่ 7 แสดงค่าต่าง ๆ ที่เราได้ทำการตั้งค่าไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. **Solve**

- Variables เมื่อทำการตั้งค่าเสร็จเรียบร้อยแล้วโปรแกรมก็จะทำการประมวลผลตามค่าที่ตั้งไว้



ภาพที่ 8 แสดงการประมวลผลของโปรแกรม

7. **Post Process**

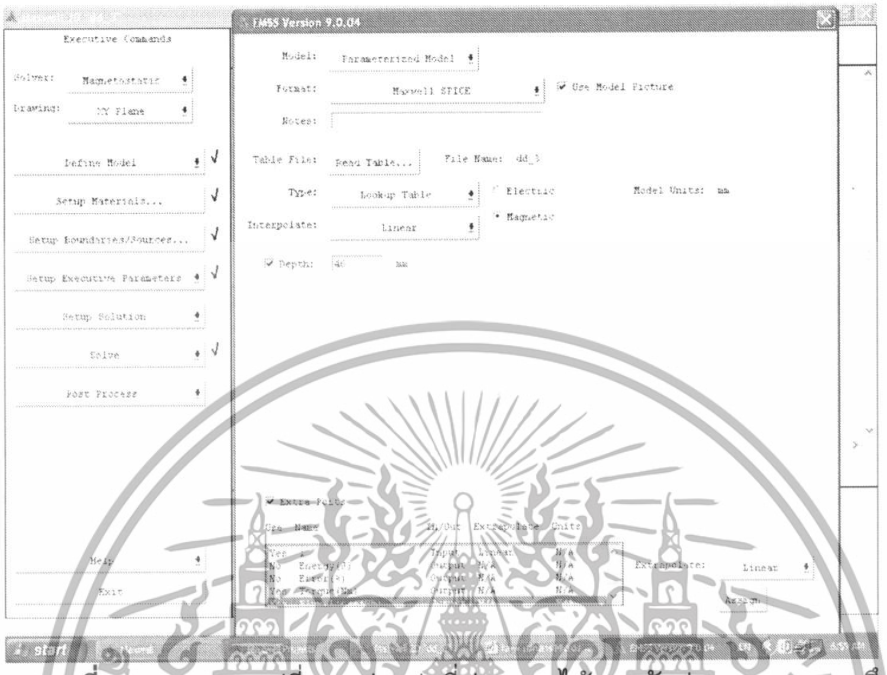
- Variables เป็นผลที่ได้จากขั้นตอนที่เราตั้งค่าไว้



ภาพที่ 9 แสดงผลเฉลี่ยที่ได้จากโปรแกรม

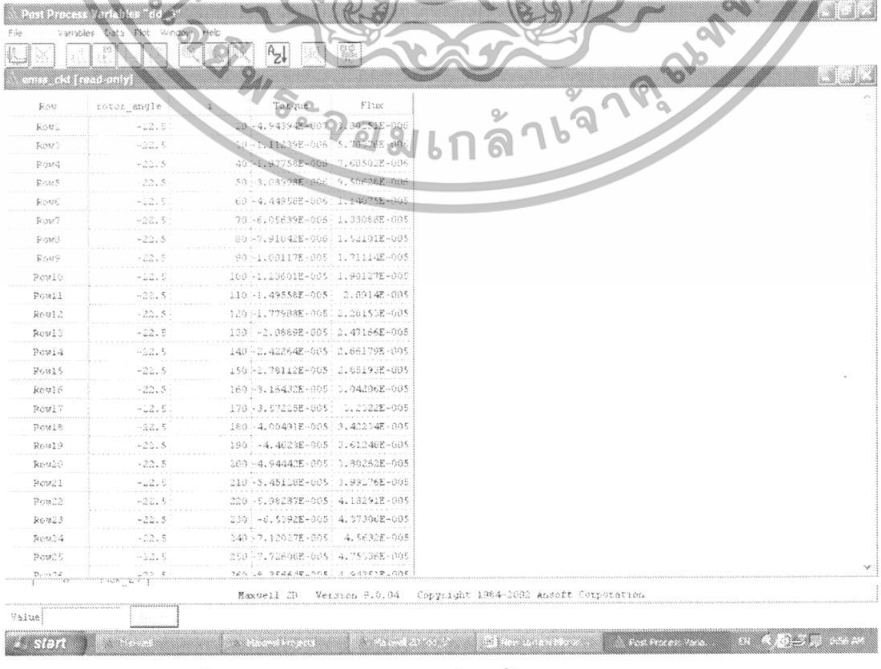
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Export Circuit Equivalent จะเป็นการนำเอาค่าที่ประมวลผลได้จากขั้นตอนด้านบนมาทำการเปลี่ยนแปลงค่าตามสัดส่วนขนาดความลึกของ stator (Stator Yoke Depth) ซึ่งมีขนาด 46 มิลลิเมตร



ภาพที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าที่ประมวลได้ตามสัดส่วนขนาดความลึกของสเตเตอร์

เมื่อเราทำขั้นตอนด้านบนเสร็จแล้ว เราก็จะได้ค่าต่างๆที่ได้ตั้งไว้ตามขนาดของมอเตอร์จริงๆ โดยทำการเปิดที่ไฟล์ Emss_ckt



ภาพที่ 11 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้ตั้งไว้ตามขนาดของมอเตอร์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การใช้งานโปรแกรม MATLAB

ฟังก์ชันที่ใช้งานในโปรแกรม MATLAB

MATLAB Function Reference

cumtrapz

Cumulative trapezoidal numerical integration

Syntax

```
Z = cumtrapz(Y)
Z = cumtrapz(X,Y)
Z = cumtrapz(... dim)
```

Description

`Z = cumtrapz(Y)` computes an approximation of the cumulative integral of `Y` via the trapezoidal method with unit spacing. To compute the integral with other than unit spacing, multiply `Z` by the spacing increment.

For vectors, `cumtrapz(Y)` is a vector containing the cumulative integral of `Y`.

For matrices, `cumtrapz(Y)` is a matrix the same size as `Y` with the cumulative integral over each column.

For multidimensional arrays, `cumtrapz(Y)` works across the first nonsingleton dimension.

`Z = cumtrapz(X,Y)` computes the cumulative integral of `Y` with respect to `X` using trapezoidal integration. `X` and `Y` must be vectors of the same length, or `X` must be a column vector and `Y` an array whose first nonsingleton dimension is `length(X)`. `cumtrapz` operates across this dimension.

If `X` is a column vector and `Y` an array whose first nonsingleton dimension is `length(X)`, `cumtrapz(X,Y)` operates across this dimension.

`Z = cumtrapz(X,Y,dim)` or `cumtrapz(Y,DIM)` integrates across the dimension of `Y` specified by scalar `dim`. The length of `X` must be the same as `size(Y,dim)`.

Polynomial Curve Fitting

`polyfit` finds the coefficients of a polynomial that fits a set of data in a lea

```
p = polyfit(x,y,n)
```

`x` and `y` are vectors containing the `x` and `y` data to be fitted, and `n` is the orde
consider the x-y test data.

```
x = [1 2 3 4 5]; y = [5.5 43.1 128 290.7 498.4];
```

A third order polynomial that approximately fits the data is

```
p = polyfit(x,y,3)

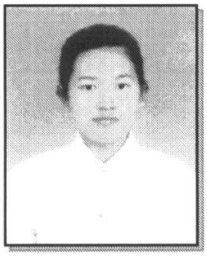
p =
   -0.1917   31.5821  -60.3262   35.3400
```

Compute the values of the `polyfit` estimate over a finer range, and plot the
comparison.

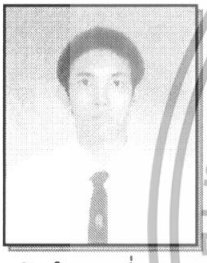
```
x2 = 1:.1:5;
y2 = polyval(p,x2);
plot(x,y,'o',x2,y2)
grid on
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นางสาว พัทธานันท์ เผื่อนเอี่ยม เกิดวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529
ที่จังหวัดสมุทรปราการ
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนราชวินิตบางแก้ว สมุทรปราการ
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชวินิตบางแก้ว สมุทรปราการ
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในปี พ.ศ. 2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง
ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office,MATLAB,PSPICE
ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ
ฝึกงานที่บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด ระหว่างวันที่ 2 เมษายน – 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2550



นาย พิเชษฐ สุนทรมณีโชติ เกิดวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2528
ที่จังหวัดราชบุรี
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดราชบุรี
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดราชบุรี
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในปี พ.ศ. 2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง
ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office,MATLAB,PSPICE
ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ
ฝึกงานที่บริษัท พี.เอส.พัฒนกร จำกัด ระหว่างวันที่ 2 เมษายน – 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2550



นาย ภาสกร วิญญูตระกูล เกิดวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2528
ที่จังหวัดชุมพร
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนศรียาภัย จังหวัดชุมพร
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 กรุงเทพมหานคร
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในปี พ.ศ. 2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง
ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม MS Office,AutoCad,MATLAB,Ansoft
ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ
ฝึกงานที่บริษัท ผลิตไฟฟ้าอิสระ(ประเทศไทย) จำกัด ระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้