



รายงานฉบับสมบูรณ์

ของโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2550

ชื่อโครงการ

การออกแบบและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์พร้อมระบบขับเคลื่อน
(DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR
AND ITS DRIVE SYSTEM)

ผู้รับผิดชอบโครงการวิจัย

ผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

1.1 ชื่อโครงการ

การออกแบบและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์พร้อมระบบขับเคลื่อน

(DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND ITS DRIVE SYSTEM)

1.2 ส่วนนำ

1.2.1 ความสำคัญที่มา

มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วยื่น มอเตอร์ชนิดนี้ถูกค้นพบมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา เพราะถึงแม้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์จะง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยาก ซับซ้อน เช่นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

1.2.2 โครงการที่นำเสนอ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์การออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์และการออกแบบวงจรควบคุม ออกแบบโดยการดูลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านภายในแกนสเตเตอร์และโรเตอร์ด้วยโปรแกรมFEMM (โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์) โดยผู้ออกแบบจะผู้กำหนดขนาดของแรงบิดตามที่ต้องการ ส่วนในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์แบบต่างๆจากสมการแรงบิดของมอเตอร์พบว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลอยู่ในเฟสนั้นๆ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ ($\frac{dL}{d\theta}$) นั้นหมายความว่าไม่จำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ใช้เพียงแค่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งข้อดีของการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงคือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะต่ำและทำให้การออกแบบของวงจรกำลังจะมีความง่ายขึ้น ดังนั้นวงจรกำลังสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์จะต้องมีความสามารถในการจ่ายกระแสตรง รวมทั้งมีความสามารถในการควบคุมขนาดของกระแสที่ไหลในขดลวดได้ด้วย

RCH
TK
2787
๐831๗

เลขที่.....
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
เลขที่.....
ไม่อาจรู้โดยทั่วไป 22 ต.ค. 2551
วัน เดือน ปี.....

11/10/51
11/10/51
11/10/51

1.3 วัตถุประสงค์และผลงานที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 วัตถุประสงค์

1.3.1.1 เพื่อออกแบบและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์แบบ 3 เฟส

1.3.1.2 เพื่อออกแบบและสร้างวงจรกำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

1.3.1.3 เพื่อออกแบบและสร้างวงจรควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

1.3.1.4 เพื่อให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ได้มีเครื่องต้นแบบสำหรับการวิจัยด้าน SRM

ต่อไปในอนาคต

เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถนำเครื่องต้นแบบนี้ไปพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้

1. มีความเข้าใจหลักการพื้นฐานและการออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

2. สามารถออกแบบและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ดังนี้

- ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles)

- ที่แต่ละขั้วสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่จำนวน 1 ขดเท่านั้น สามารถนำขดลวดที่ขั้วต่าง ๆ ที่เหมาะสมมาต่อเข้าด้วยกันได้ทั้งแบบขนานหรืออนุกรม และเรียกรวมว่าขดลวดเฟส (Phase Windings)

- ลักษณะการจ่ายพลังงานเข้าขดลวดเฟสจะเป็นลักษณะการเรียงลำดับเฟส เช่น มอเตอร์แบบสามเฟส ก็จะป้อนพลังงานหรือกระแสเข้าขดลวดเฟสในลำดับเฟสเพื่อให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการได้

- ในขณะที่โรเตอร์หมุนนั้น เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) ของเฟสนั้นๆ จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม

จากที่กล่าวมา มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ถือว่ามีคุณสมบัติบางประการต่างจากมอเตอร์ที่เรารู้จักกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานบางงานที่ชอบเขตความสามารถของมอเตอร์ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ เพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีเก่าหรือสร้างเทคโนโลยีใหม่ๆ ให้เกิดขึ้นเป็นประโยชน์ต่อไป

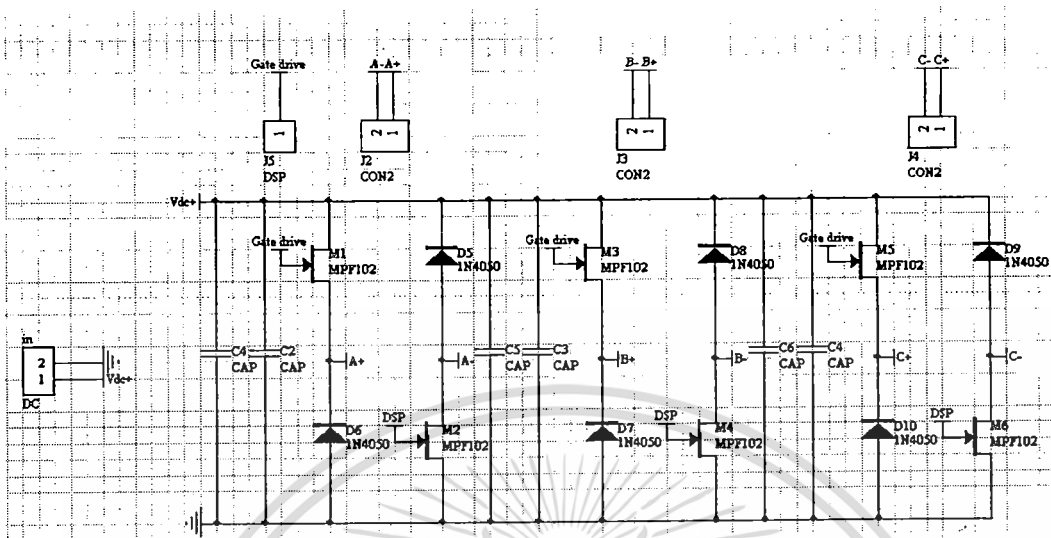
1.5 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยเริ่มจากการเรียนรู้พื้นฐานทางด้านวงจรแม่เหล็ก รวมถึงการอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของมอเตอร์ที่มีผลต่อการสร้างแรงบิดและการส่งถ่ายพลังงาน

2. ศึกษาวงจรขับเคลื่อนแบบต่างๆ ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และเรียนรู้วงจรขับเคลื่อนต่างๆ ที่มีหลักการในการใช้งานอย่างไร แต่ที่นำมาใช้คือวงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส โดยที่เลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับจึงเลือกใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะความสูญเสียในแกนเหล็กจะต่ำและการออกแบบวงจรกำลังจะง่ายขึ้นโดยจะใช้วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสโดยเลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตช์เพราะมีความสามารถในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

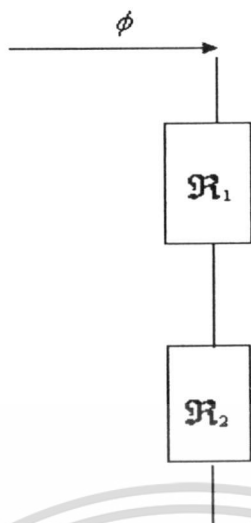


รูปที่ 1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

1.6.5 สร้าง ประกอบมอเตอร์

ก่อนทำการสร้างมอเตอร์ จำเป็นต้องมีการศึกษาส่วนประกอบส่วนต่างๆนอกเหนือจากส่วนที่ได้ทำการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดต่างๆของมอเตอร์ วาดแบบและสร้างออกมา

เนื่องจากว่าค่า รีลักแตนซ์ ทั้งสองต่อเนื่องกันอยู่ เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อค่ารีลักแตนซ์

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ สามารถคำนวณได้ดังนี้

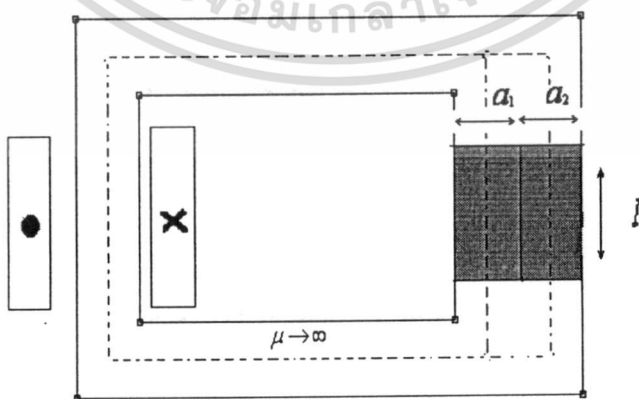
$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.5)$$

และค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.6)$$

แต่ในรูปที่ 2.4 ปรากฏว่ามีช่องว่างสองช่องขนานกันอยู่ ดังนั้นการหาค่า รีลักแตนซ์รวมจึงเป็นแบบขนาน ซึ่งเราจะนิยามส่วนกลับของค่า รีลักแตนซ์ ว่าเป็นค่า Permeance $\wp$ โดยที่

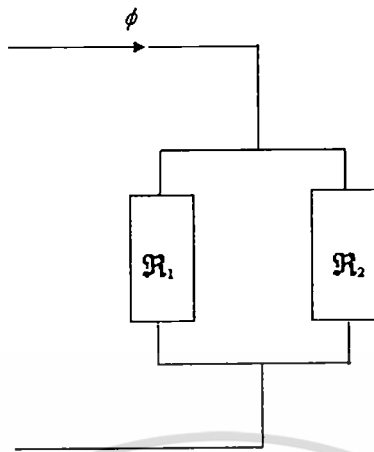
$$\wp = \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{\mu A}{l} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.4 แสดงแกนเหล็กที่มีวัดตุสองชนิดวางแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การต่อค่ารีลักแตนซ์แบบขนาน

ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 1 คือ

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 a_1 D} = \frac{1}{\wp_1} \quad (2.8)$$

ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 2 คือ

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_2 a_2 D} = \frac{1}{\wp_2} \quad (2.9)$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่ได้คือ

$$\phi = \Im(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.10)$$

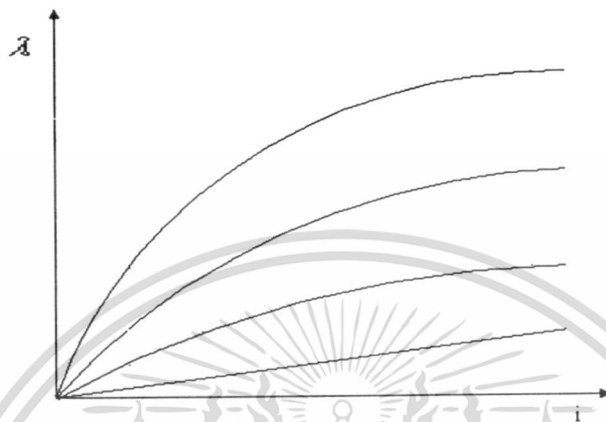
และค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้คือ

$$L = \frac{N\phi}{i} = N^2(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ Magnetizing

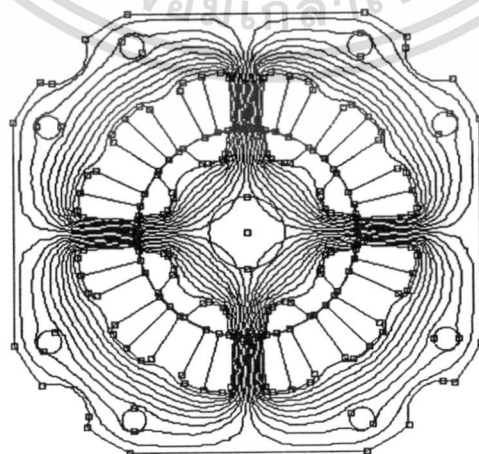
คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคล่อง λ ในแนวตั้งฉาก และกระแสในขดลวดเฟส i ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟเหล่านี้สามารถมีได้หลายเส้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วย ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับ จึงเป็นทั้งฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 2.6 กราฟ Magnetizing

ตำแหน่ง Aligned

ณ ตำแหน่ง aligned นี่คือการตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.7 แสดงถึงมอเตอร์สามเฟสชนิด 12/8 หมายความว่า เป็นมอเตอร์แบบสามเฟสที่มีสเตเตอร์จำนวน 12 ขั้วและโรเตอร์จำนวน 8 ขั้ว โดยกำหนดให้เฟสที่ 1 คือเฟสในแนวระนาบและแนวตั้งฉาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุด ถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่ง aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)



รูปที่ 2.7 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Aligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๒ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

จากสมการที่ 2.12 พบว่า ถ้าความกว้างของช่องอากาศระหว่างขั้วของโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์มีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ค่ารีลักแตนซ์ $\mathcal{R}$ มีค่าต่ำที่สุดด้วย

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.12)$$

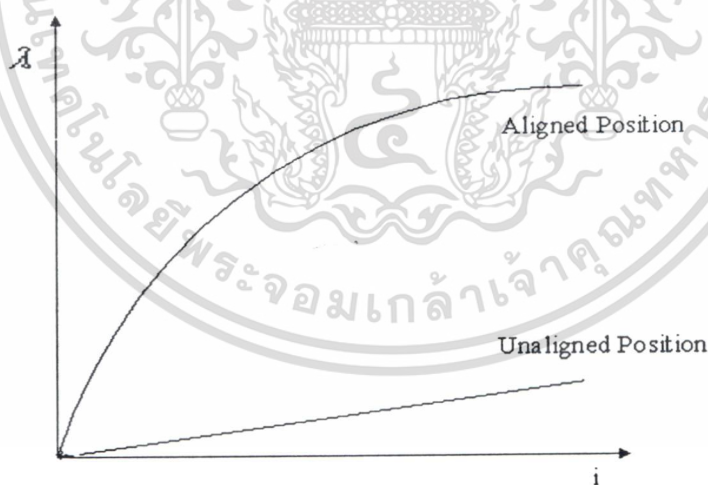
โดยที่ l คือความกว้างของช่องอากาศ ค่า μ คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และ A คือค่าพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแบบตั้งฉาก เมื่อค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำสุดทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าสูงสุด

ตามสมการที่ 2.13

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{total}} \quad (2.13)$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำของวงจร N คือจำนวนรอบขดลวดของเฟส และ $\mathcal{R}_{total}$ คือค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจร

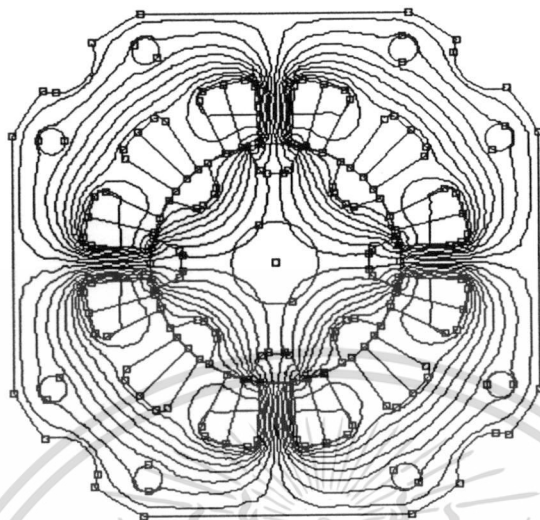
โดยปกติแล้วแล้ววัสดุที่นำมาใช้ทำแกนของมอเตอร์จะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวเกิดขึ้น ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟ magnetizing ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งตำแหน่งของโรเตอร์ ณ aligned จะอยู่ตำแหน่งเส้นบนสุด



รูปที่ 2.8 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned

ตำแหน่ง Unaligned

ณ ตำแหน่งนี้แกนตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Unaligned

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเมื่อลองขยับโรเตอร์เพียงเล็กน้อยพบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดที่ตำแหน่ง aligned ดังนั้น ณ จุด unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

จากรูปที่ 2.9 พบว่า ค่าความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรต่ำที่สุดด้วย ส่วนเส้นกราฟ magnetizing จะอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งนี้เส้นกราฟ magnetizing จะเป็นเส้นตรงและไม่ปรากฏการอิ่มตัวเกิดขึ้น เนื่องจากค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศมีค่ามากกว่าของแกนมอเตอร์มาก ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$L = N^2 \left(\frac{1}{\mathcal{R}_{core} + \mathcal{R}_{gap}} \right) \quad (2.14)$$

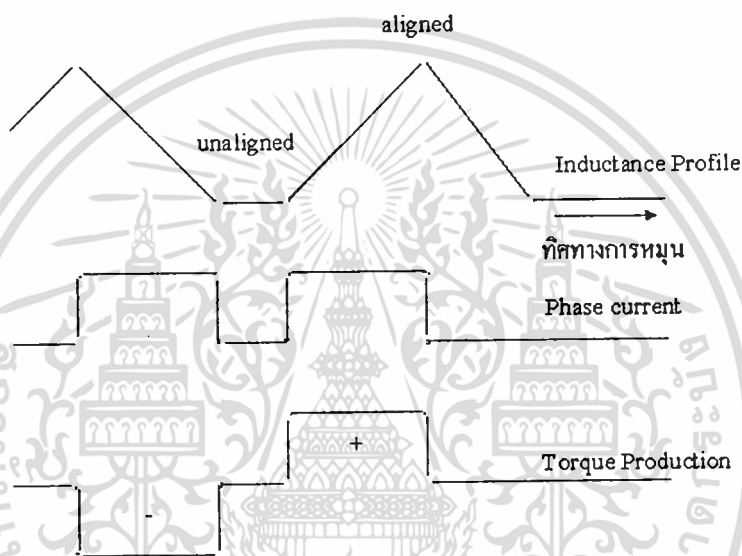
ตำแหน่ง Intermediate

คือตำแหน่งของโรเตอร์ที่อยู่ระหว่าง และ ตำแหน่ง unaligned จะพบว่าเส้นกราฟ magnetizing จะเริ่มปรากฏให้เห็นปรากฏการณ์อิ่มตัว ณ ตำแหน่งเมื่อขั้วของโรเตอร์เริ่มซ้อนทับกับขั้วของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิด

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสใดเฟสหนึ่ง จะเกิดแรงบิดทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด โดยที่แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าขดลวด แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวก (Positive Torque) ถ้ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดอยู่ในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าบวกตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้เรียกว่าเป็นแรงบิดแบบมอเตอร์ (Motoring Torque) แต่ถ้าป้อนกระแสเข้าในช่วงที่ค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าลบตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้จะถูกเรียกว่าแรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating torque) และมีค่าเป็นลบ (Negative torque)



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส

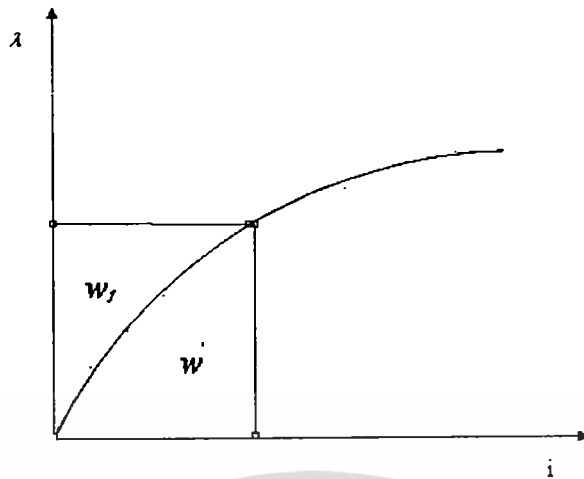
สมการที่ 2.15 แสดงถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นของเฟสใดเฟสหนึ่ง ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i = \text{const}} \quad (2.15)$$

เมื่อ W' คือ coenergy ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ magnetizing ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$W' = \int_0^{i_i} \lambda di \quad (2.16)$$

โดยพื้นที่เหนือกราฟนั้นคือก็คือ stored field energy , W_f ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงค่าพลังงานสะสมและCo-energy

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 เราสามารถอธิบายว่า instantaneous torque ได้โดยการใช้รูปที่ 2.12 กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง θ_1 ไปยังตำแหน่ง θ_2 โดยที่กระแสที่ไหลในเฟสยังมีค่าคงที่ ในขณะที่นั้นมอเตอร์จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับแหล่งจ่ายและมีการเปลี่ยนแปลงของทั้ง stored field energy และ coenergy และ instantaneous torque สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของ coenergy ΔW_m และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตำแหน่งของโรเตอร์ $\Delta\theta$ พลังงานที่เปลี่ยนถ่ายกับแหล่งจ่ายคือ

$$\Delta W_e = ABCD \quad (2.17)$$

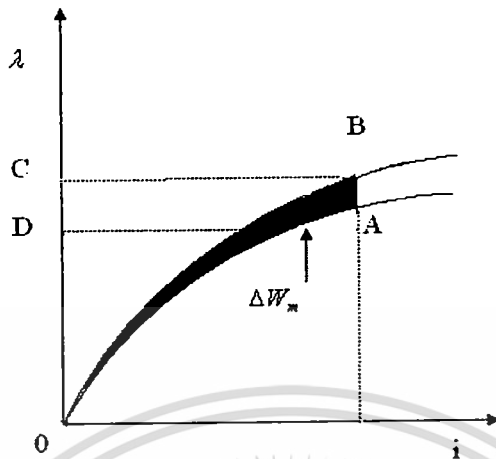
การเปลี่ยนแปลงของ coenergy สามารถที่อธิบายได้ดังนี้

$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (2.18)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ coenergy ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล คือ

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= \Delta W_e - \Delta W_f \\ &= ABCD - (OBC - OAD) \\ &= (ABCD + OAD) - OBC \\ &= OAB \end{aligned} \quad (2.19)$$

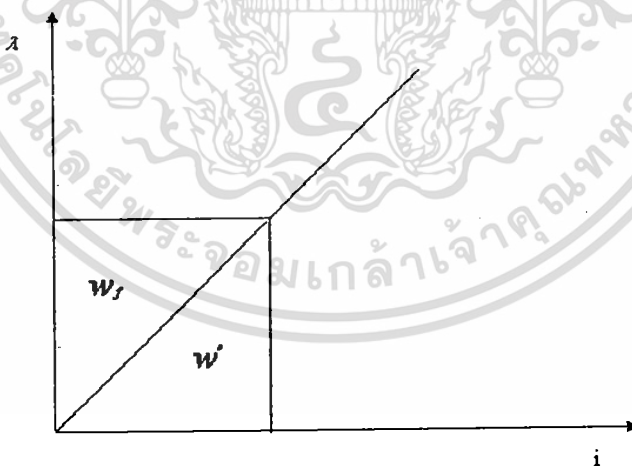
จะเห็นว่าพลังงานทั้งหมดที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลทั้งหมด บางส่วนถูกเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy

มอเตอร์แบบไม่อึดตัว

ถ้าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กที่ใช้ทำมอเตอร์เป็นแบบเชิงเส้น หมายความว่าไม่เกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังนั้นเส้น magnetizing จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟ Magnetizing แบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น stored field energy และ coenergy จะมีขนาดเท่ากัน คือ พื้นที่สามเหลี่ยมใต้หรือเหนือเส้นกราฟ จะได้ว่า

$$W' = \frac{1}{2} i \lambda \quad (2.20)$$

แต่

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$W' = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2.22)$$

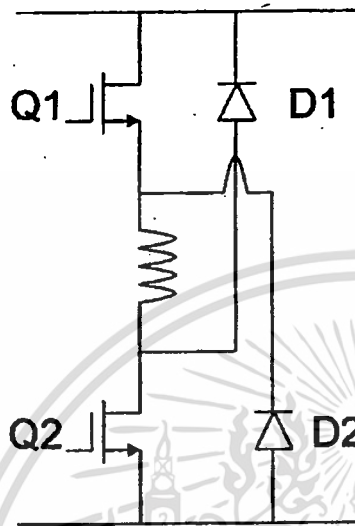
เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ 2.22 ลงในสมการที่ 2.15 จะได้สมการของ instantaneous torque ดังนี้

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.23)$$

จากสมการแรงบิดของมอเตอร์แบบเชิงเส้น พบว่า แรงบิดจะไม่ขึ้นอยู่กับการทิศทางของกระแส เนื่องจากว่าตัวแปร i ยกกำลังสอง และเครื่องหมายหรือทิศทางของแรงบิดจะขึ้นอยู่กับ $\frac{dL}{d\theta}$ ถ้าความชันนี้เป็นค่าบวกในทิศทางของโรเตอร์ไปข้างหน้า แรงบิดจะเป็นแบบเสริม แต่ถ้าความชันเป็นลบในทิศทางของโรเตอร์ไปข้างหน้าจะได้แรงบิดเป็นแบบต้านมอเตอร์แบบอ้อมตัว สมมติว่ามอเตอร์มีคุณสมบัติของความอ้อมตัวสูง นั้นหมายความว่า เมื่อโรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ stored field energy มีค่าน้อยมาก หรือ อาจจะประมาณว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น พลังงานทั้งหมดที่ได้มาจากแหล่งจ่าย จะเป็น coenergy สำหรับใช้ในการเปลี่ยนเป็นพลังงานกลทั้งหมด

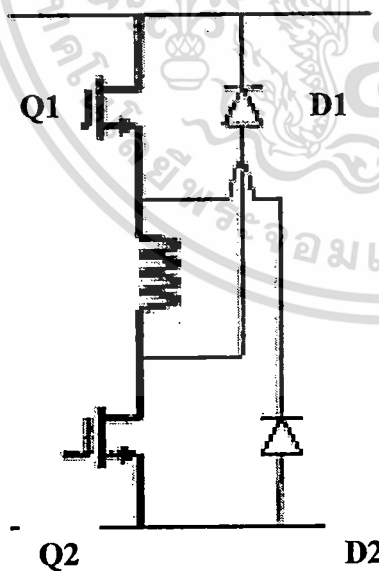
2.3 ทฤษฎีที่ 2 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์จะใช้แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสเพราะว่าวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหาย เฟสที่เหลือยังสามารถทำงานต่อไปได้



รูปที่ 2.14 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟส

การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี กรณีที่ 1 เมื่อ สวิตช์ Q1 และ Q2 ทั้งคู่ ON แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีลิงค์ กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูป

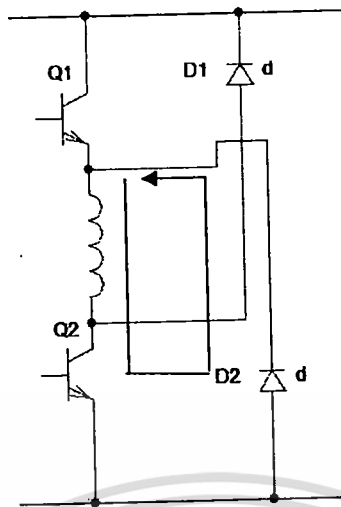


รูปที่ 2.15 วงจรขับเคลื่อนสี่สวิตช์ต่อเฟส
ขณะเพิ่มพลังงาน

กรณีที่ 2 ถ้าสวิตช์ Q1 OFF ในขณะที่สวิตช์ Q2 ON กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D2 แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะ ON มีค่าน้อยมากในทำนองเดียวกันถ้าสวิตช์ Q1 ON ในขณะที่ Q2

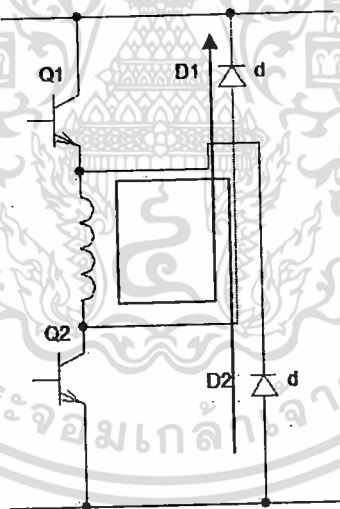
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OFF กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D1 แรงดันตกคร่อมขดลวดก็มีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่แสดง



รูปที่ 2.16 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

กรณีที่ 3 ถ้าต้องการสร้างแรงดันค่าลบคร่อมขดลวดเพิ่มลดกระแส หรือเส้นแรงแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการ OFF สวิตช์ Q1 และ Q2 กระแสจะไหลผ่านไดโอดทั้งคู่และกินพลังงานสู่แหล่งจ่ายดังรูป



รูปที่ 2.17 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

แต่ในการทำงานจริงจำเป็นต้องติดตัวเก็บประจุเข้าไปโดยติดตัวเก็บประจุแบบ electrolyte และ ชนิด film ขนานกันเพื่อเป็นตัวรองรับพลังงานที่จะมีการคืนในกรณีที่ 3 ที่ต้องนำมาขนาดกันนั้นเพราะว่า ตัวเก็บประจุชนิด electrolyte ทำงานที่ความถี่ต่ำ แต่ในการทำงานของวงจรนี้มีความถี่ของการสวิตช์สูงซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุชนิด electrolyte การเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการขนานตัวเก็บประจุชนิด film เข้าไปเพื่อให้ตัวเก็บประจุยังคงสภาพเป็นตัวเก็บประจุต่อไปที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ

ในบทนี้จะเป็นการใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการดูผลตอบจากมิติของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทราบตัวแปรต่างๆ อย่างใกล้เคียงเพื่อยืนยันความถูกต้อง ก่อนที่จะมีการสร้างมอเตอร์ต้นแบบ

โปรแกรม FEMM

การออกแบบสวิตช์หลักแฉนมอเตอร์นั้น จะใช้โปรแกรม FEMM เวอร์ชัน 4.0 ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite Element Analysis แบบสองมิติ

3.1 การวาดโครงสร้างมอเตอร์

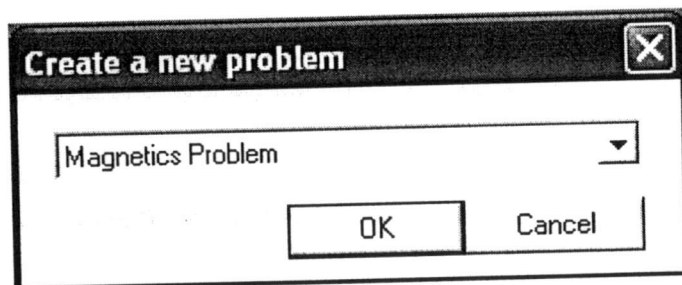
ขั้นตอนแรกของการทำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การวาดโครงสร้างของมอเตอร์ลงในโปรแกรม ซึ่งโปรแกรม FEMM จะมี Graphic Editor อยู่ ให้เริ่มต้นโดยการเปิดโปรแกรม FEMM จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.1



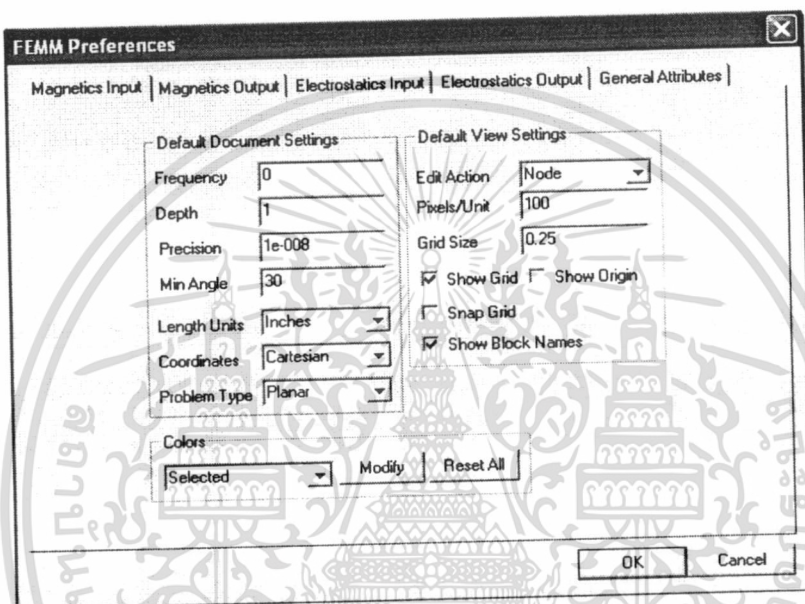
รูปที่ 3.1 หน้าต่างหลักของ FEMM

กดปุ่ม  เพื่อเปิดปัญหาใหม่ จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกดังรูปที่ 2.14 ให้เลือกเป็นปัญหาทางแม่เหล็ก "Magnetics Problem"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

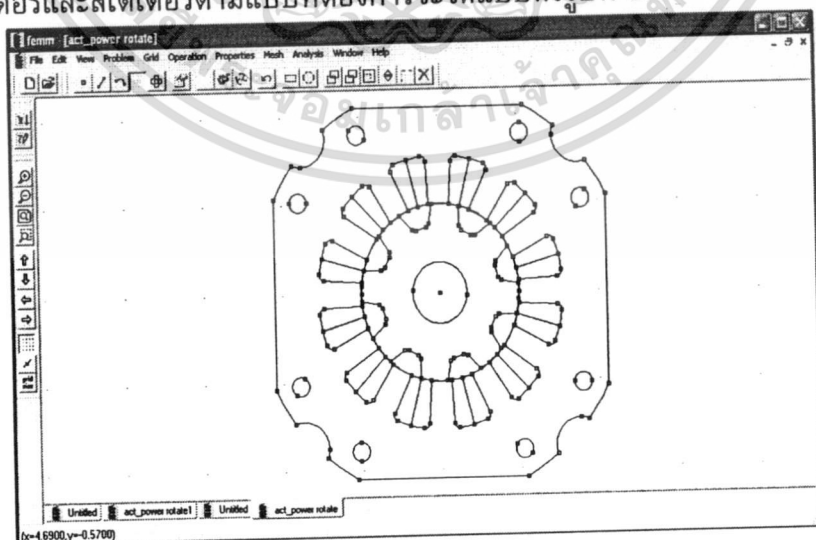


รูปที่ 3.2 หน้าต่างเลือกประเภทของปัญหา
กดปุ่ม "Edit" และเลือก "Preferences" ให้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์หลัก

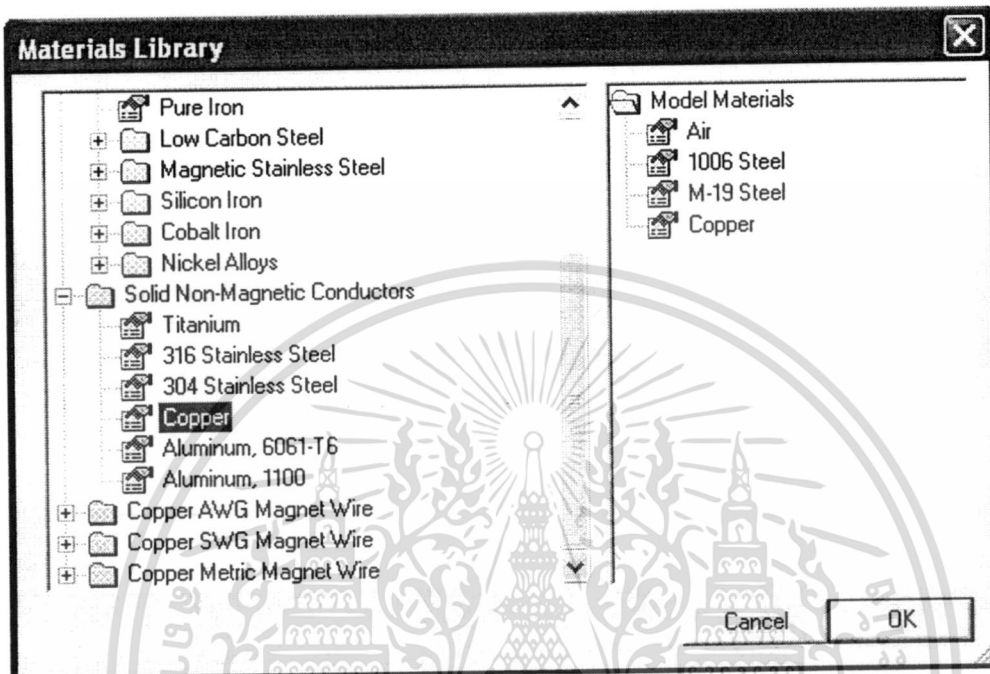
ทำการวาดโรเตอร์และสเตเตอร์ตามแบบที่ต้องการจะได้แบบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์

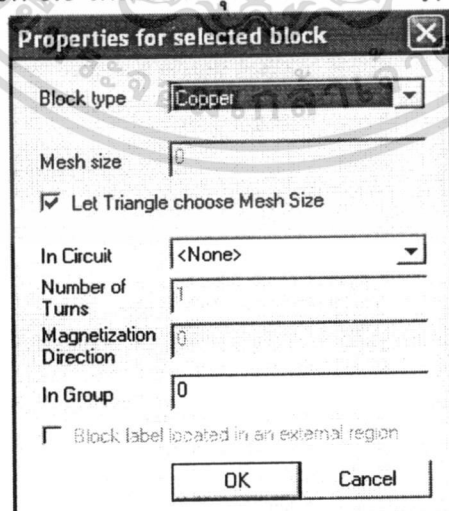
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไป เป็นการเลือกชนิดของวัสดุเข้ามาในแบบจำลองที่วาดขึ้น ให้เลือก “Properties” และ “Materials Library” ก็จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.5 ให้เลือก Air, Copper, M-19 Steel และ 1006 Steel จาก Library ทางช่องซ้ายมือแล้วลากมาใส่ในช่องขวามือ สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ของมอเตอร์



รูปที่ 3.5 หน้าต่างของคุณสมบัติของวัตถุ

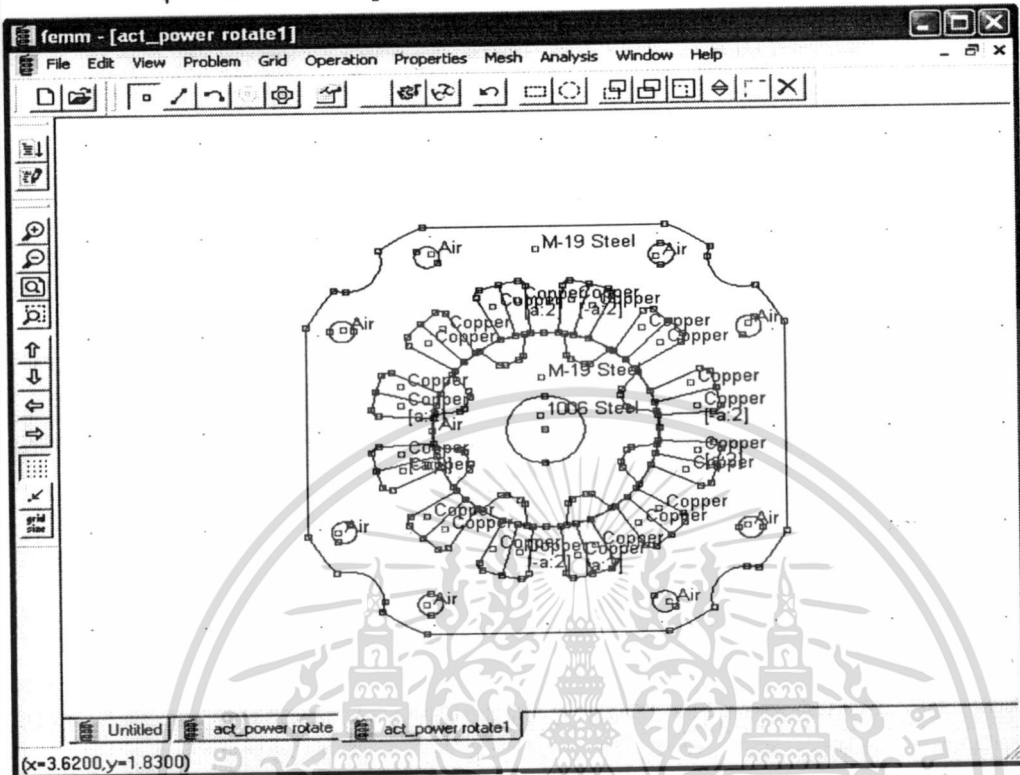
ในการกำหนดวัสดุให้กับจุดคุณสมบัติ ให้เลือกปุ่ม  และคลิกเมาส์ปุ่มขวาที่จุดคุณสมบัติและจุด จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.6 ให้เลือกวัสดุในช่อง “Block Type”



รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนต่างๆของมอเตอร์ที่เลือกไว้

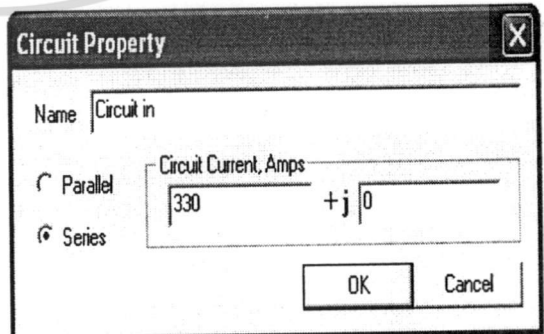
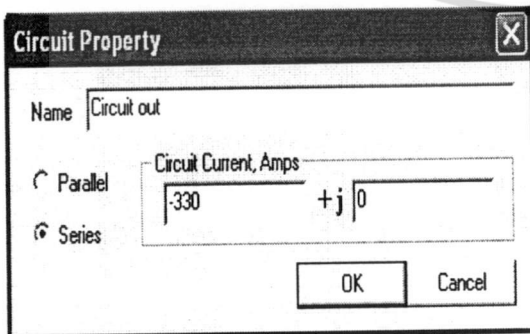
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กำหนดวัสดุต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่างๆ

สำหรับช่อง slot ที่กำหนดเป็น Copper นั้นจะเป็นขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเราจะกำหนดเฟสเดียวเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกระแสเข้า และกระแสออก วิธีการกำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขดลวด ให้เลือก "Properties" "Circuits" และ "Add property" จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.8 กำหนดให้กระแสไหลเข้าเป็นค่าบวก และกระแสขาออกเป็นค่าลบ



รูปที่ 3.8 การกำหนดค่ากระแสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนี้ให้กำหนดคุณสมบัติของขดลวดในจุดคุณสมบัติ Copper ในช่อง "In Circuit" ดังแสดงในหน้าต่างคุณสมบัติดังรูปที่ 3.9 สุดท้ายก็จะได้นักตาของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.10

Properties for selected block

Block type: Copper

Mesh size: 0

☒ Let Triangle choose Mesh Size

In Circuit: Circuit in

Number of Turns: 1

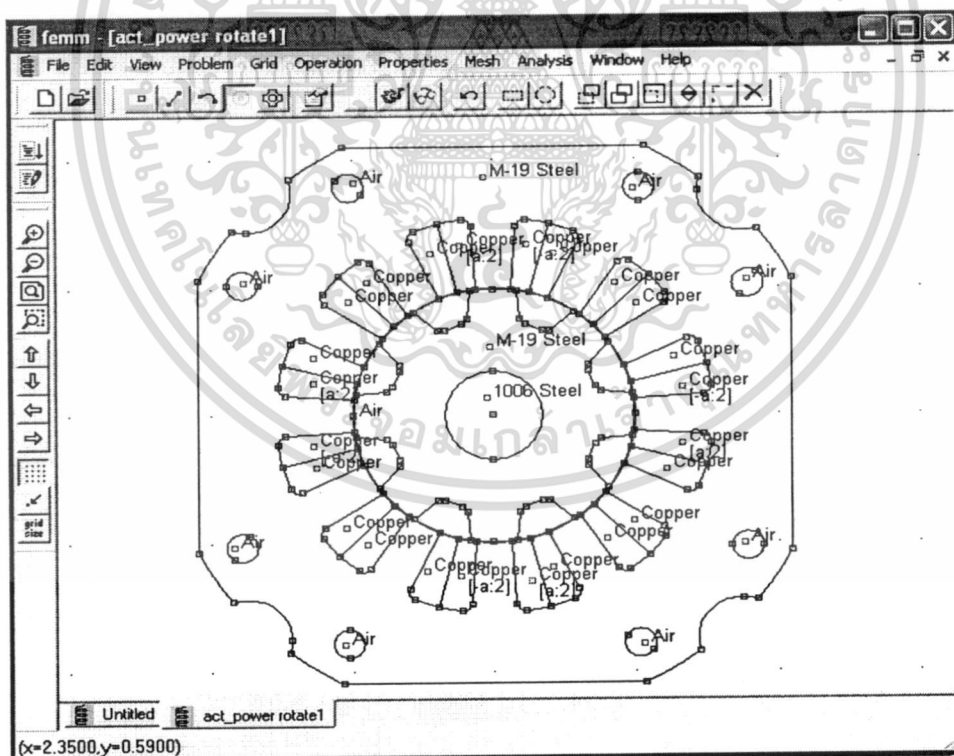
Magnetization Direction: 0

In Group: 0

☐ Block label located in an external region

OK Cancel

รูปที่ 3.9 การกำหนดกระแสให้กับขดลวด



รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงรูปวาดมอเตอร์พร้อมที่จะหาผลตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดท้ายสุดก่อนวิเคราะห์คือการกำหนดคุณสมบัติขอบเขต หรือ Boundary Condition ซึ่งถ้าเป็นมอเตอร์นั้นจะกำหนดให้เป็นแบบ

วิธีการสร้างคุณสมบัติขอบเขตให้เลือก “Properties” “Boundary” และ “Add Property” กำหนดค่าต่างดังรูปที่ 3.11

Boundary Property

Name: New Boundary

BC Type: Prescribed A

Small skin depth parameters:

- μ , relative: 0
- σ , MS/m: 0

Mixed BC parameters:

- c_0 coefficient: 0
- c_1 coefficient: 0

Prescribed A parameters:

- A_0 : 0
- A_1 : 0
- A_2 : 0
- ϕ , deg: 0

OK Cancel

รูปที่ 3.11 การกำหนด Boundary Condition

ให้กำหนด Boundary Condition ที่เส้นโค้งด้านนอกของสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.12

Arc segment properties

Max. segment, Degrees: 5

Boundary cond.: New Boundary

Hide arc in postprocessor: ☐

In Group: 2

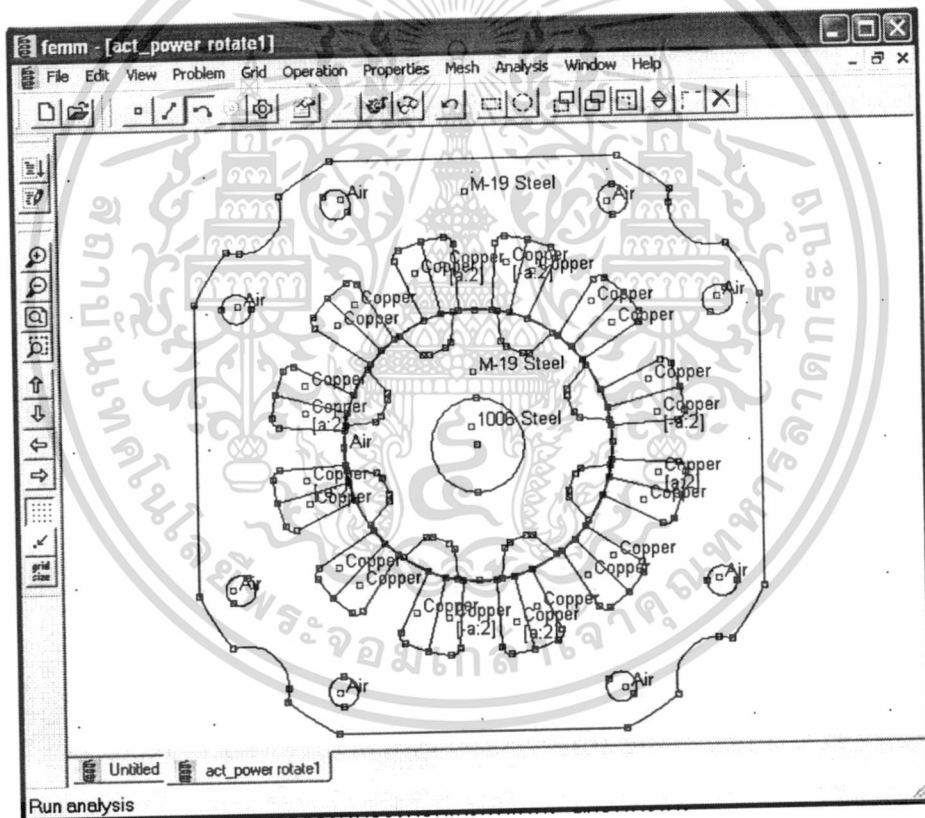
OK Cancel

รูปที่ 3.12 การตั้งค่า Boundary ให้กับขอบนอกของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำเนิดเมช

ต่อไปให้สร้างเมช หรือ Mesh สำหรับการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี Finite Element ซึ่งสามารถสร้างได้โดยกดปุ่ม  ตัวโปรแกรมจะสร้างเมชขึ้นมาโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.13 เราสามารถกำหนดขนาดของเมชขึ้นมาได้โดยการคลิกเมาส์ปุ่มขวา เส้นที่เลือกดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสีแดง ที่หน้าต่างคุณสมบัติ ให้เลือกเครื่องหมายถูกของ "Choosing Mesh Spacing Automatically" ออก จากนั้นให้กำหนดจำนวนเมชที่ "Local element size long line" ซึ่งค่าอย่างน้อยหมายความว่าจำนวนเมชยิ่งมากบริเวณพื้นที่ไหนต้องการความละเอียดหรือความถูกต้องของคำตอบสูง จำเป็นต้องให้มีจำนวนเมชนั้นยิ่งมาก เช่นที่บริเวณช่องอากาศหรือมุมของหัวของโรเตอร์หรือหัวสเตเตอร์ ซึ่งยิ่งโครงสร้างของมอเตอร์ที่สร้างมีจำนวนเมชมากเท่าไร ความละเอียดและความถูกต้องของคำตอบก็ยิ่งมากขึ้นเช่นกัน แต่ยังมีจำนวนเมชมากโปรแกรมก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากนั้นผู้ใช้จึงจำเป็นต้องเลือกกำหนดจำนวนเมชให้เหมาะสมกับปัญหา

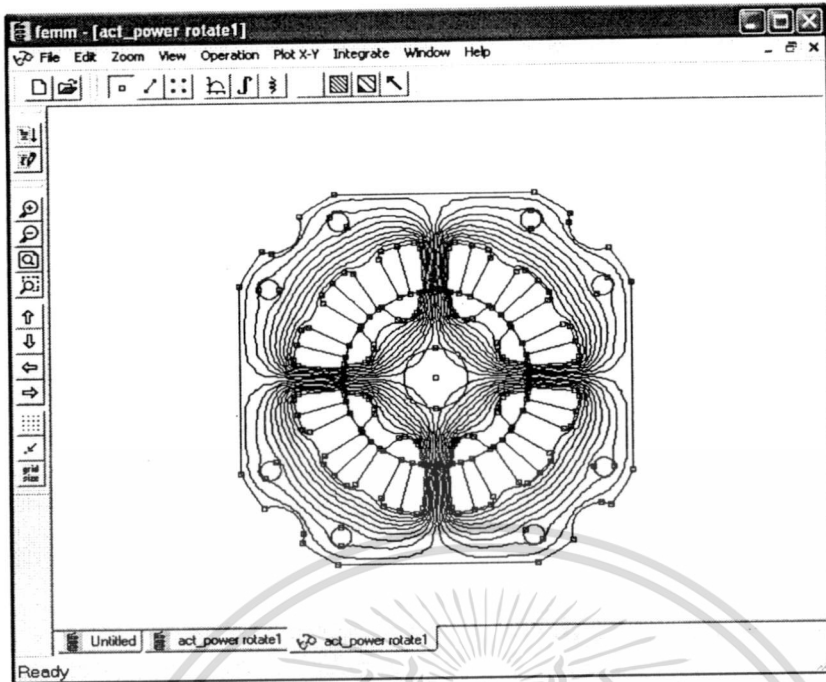


รูปที่ 3.13 เมชที่สร้างจากเครื่องกำเนิดเมช

3.3 การแก้ปัญหา

หลังจากที่ได้กำหนดจำนวนเมชแล้ว ให้เลือกที่ปุ่ม  เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณหาผลเฉลย จำนวนเมชจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ระหว่างการคำนวณจะปรากฏหน้าต่างแสดงจำนวนครั้งของ Iteration และความก้าวหน้าของการคำนวณเมื่อคำนวณเสร็จหน้าต่างดังกล่าวจะหายไป จะสามารถดูผลเฉลยต่อไปได้

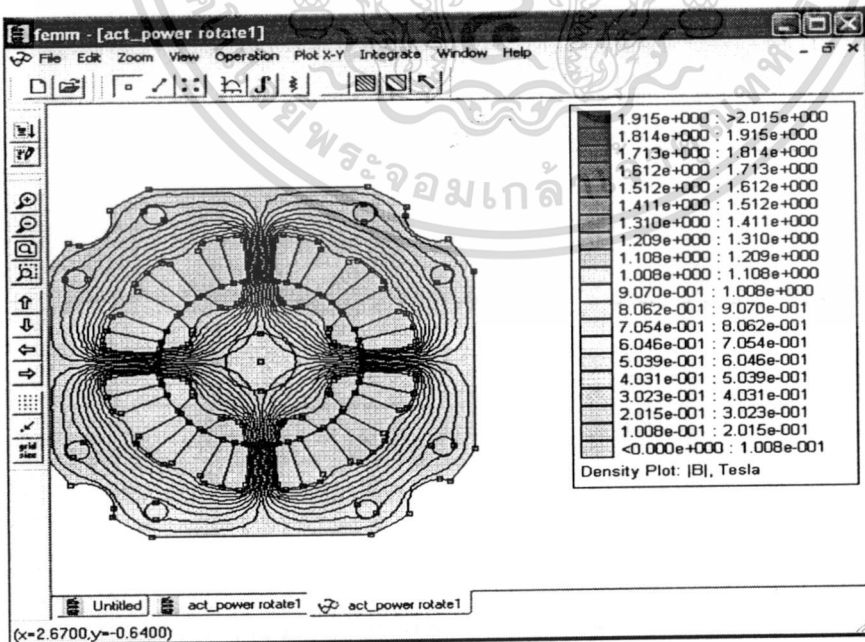
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กสมตักย์

3.4 การดูผลเฉลย

เมื่อกดปุ่ม  จะปรากฏเส้น Equipotential Flux Line ขึ้นมาดังรูปที่ 3.14 ผู้ใช้สามารถเลือกดูผลเฉลยอย่างอื่น ได้โดยการเลือก "View" ตัวอย่างเช่น ต้องการดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เลือก "View" "Density Plot" จะปรากฏหน้าต่าง Dialog ให้เลือก "Flux Density Plot" ผลเฉลยจะปรากฏดังแสดงในรูปที่ 3.15

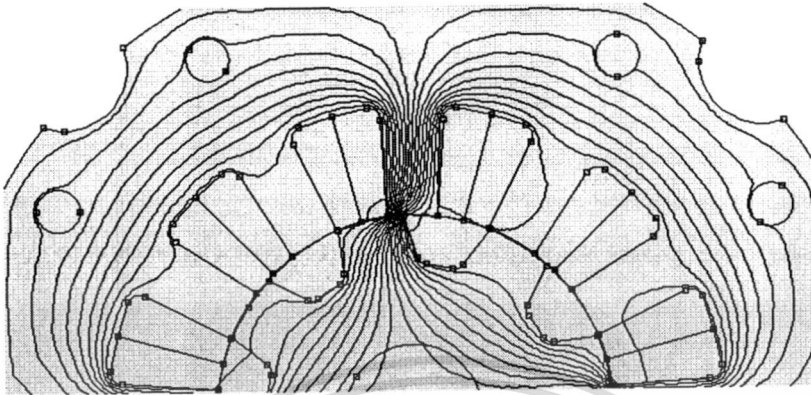


รูปที่ 3.15 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

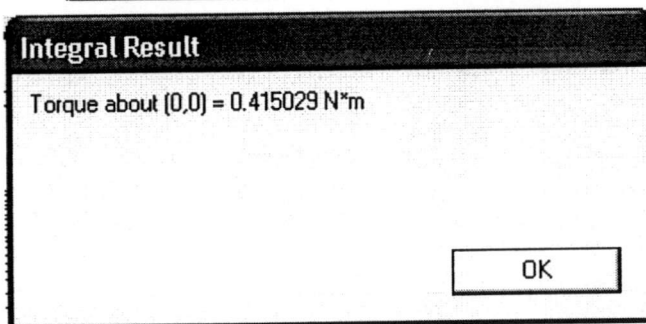
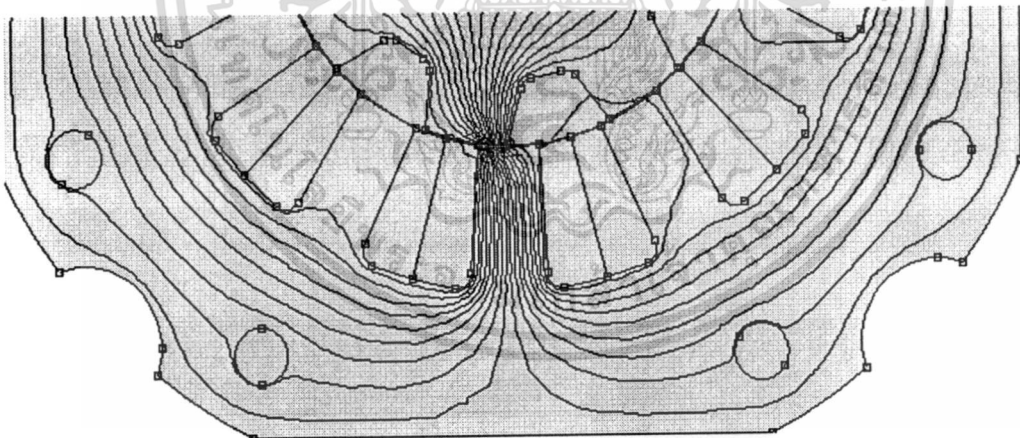
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ตัวอย่างผลจากการ simulation ของตำแหน่ง Unaligned

1. Torque ที่ตำแหน่ง Unaligned

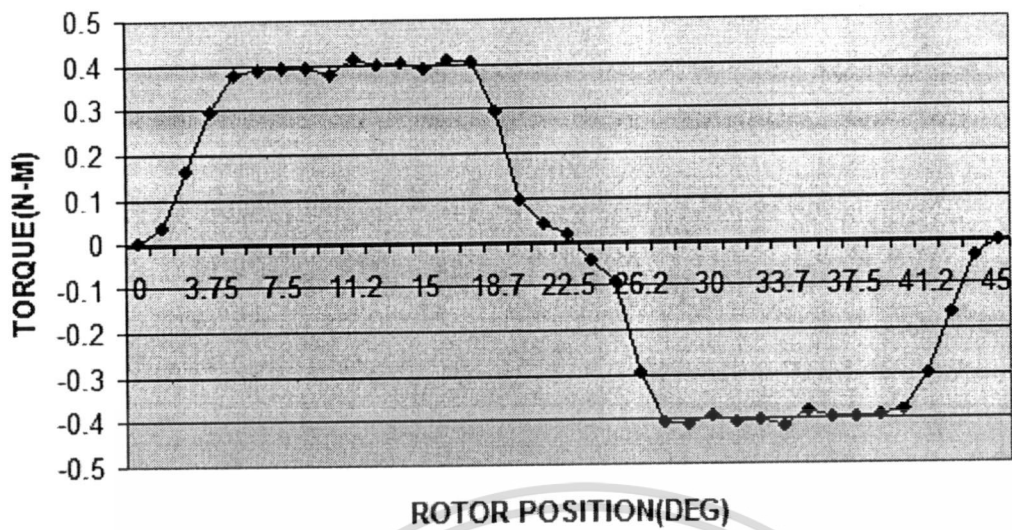


รูปที่ 3.16 Torque ที่ตำแหน่ง Unaligned



รูปที่ 3.17 Torque ที่ตำแหน่ง 12.25 องศา

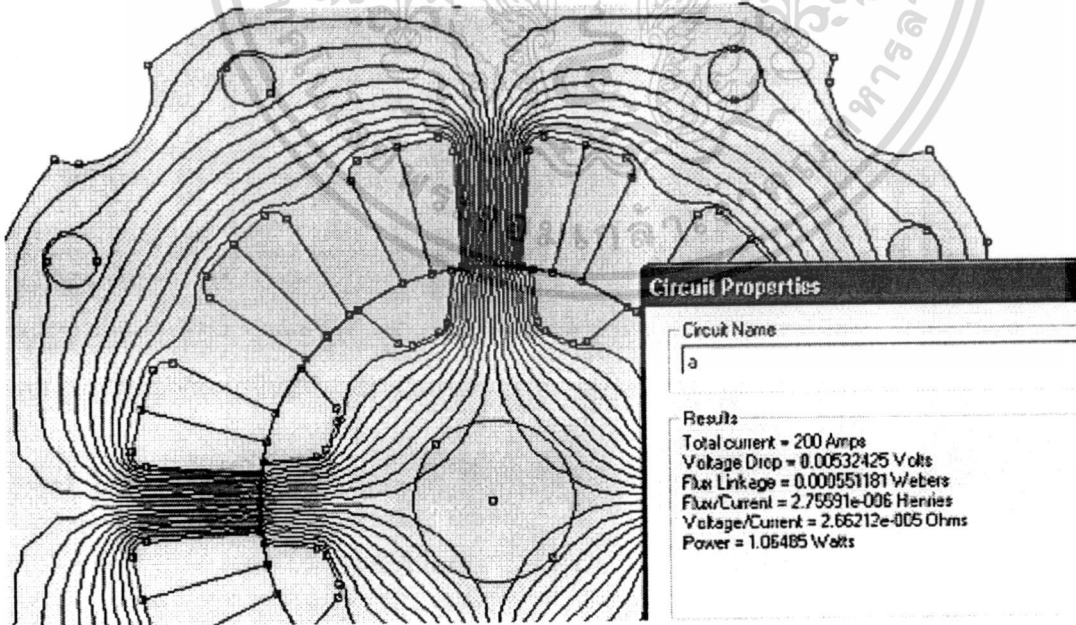
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 Torque ที่ได้จากการทดลอง

3.6 ตัวอย่างผลจากการ simulation ที่ตำแหน่ง Aligned

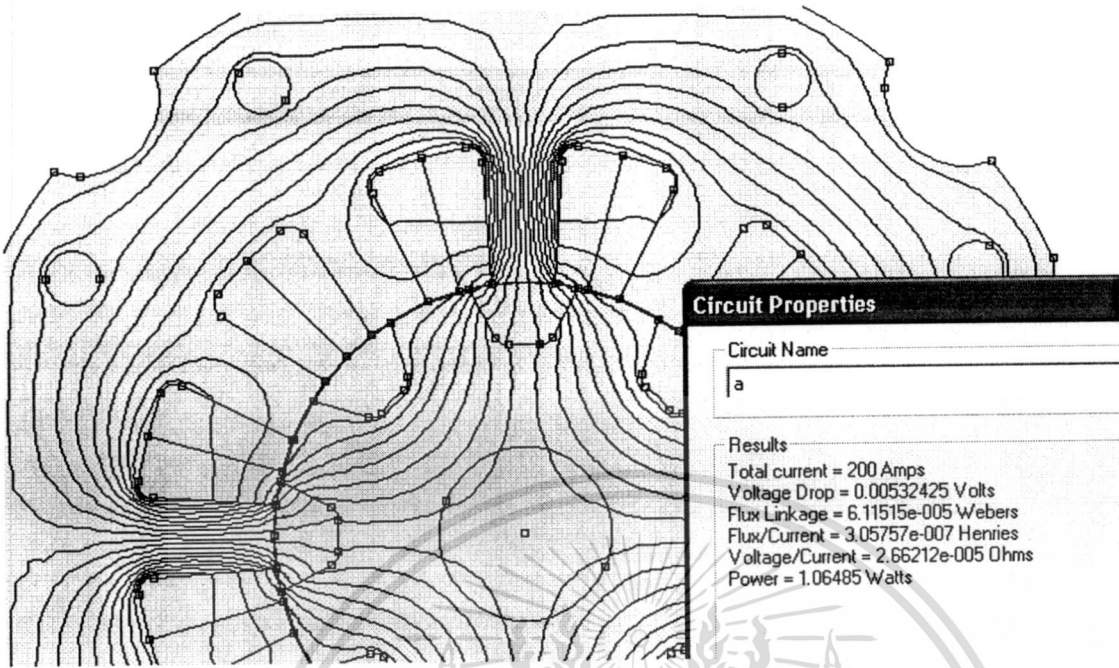
2. Torque ที่ตำแหน่ง Aligned



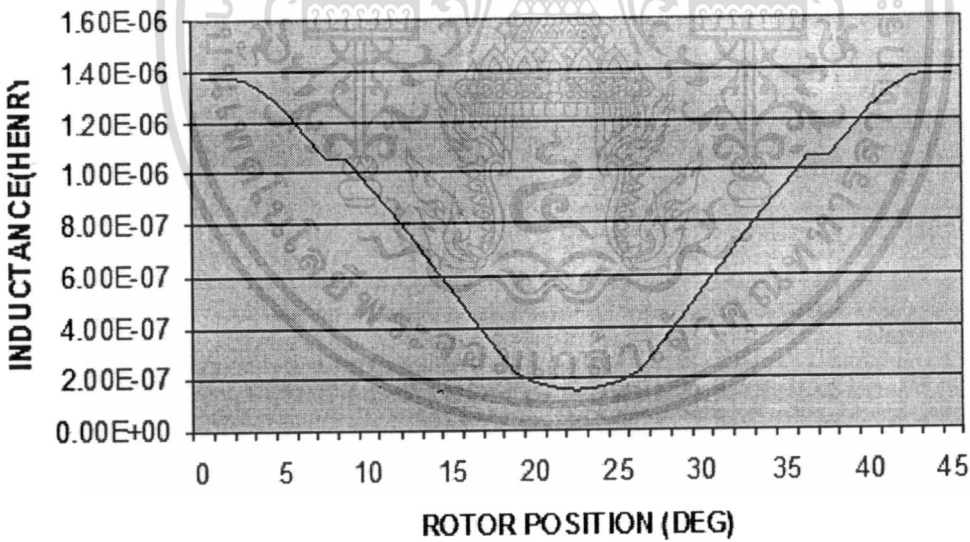
รูปที่ 3.19 Inductance ที่ตำแหน่ง Aligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Inductance ที่ตำแหน่ง Unaligned



รูปที่ 3.20 Inductance ที่ตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 3.21 กราฟแสดง Inductance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulation

Rotor position (Deg)	inductance			Torque (N.m)
	a(+)	a(-)		
0	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	0.000458
1.25	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	0.035956
2.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	0.16215
3.75	2.63E-06	2.64E-06	1.32E-06	0.299195
5	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	0.378237
6.25	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	0.389279
7.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.395885
8.75	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.39588
10	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	0.378935
11.25	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	0.411259
12.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	0.399759
13.75	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	0.405042
15	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	0.386532
16.25	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	0.40705
17.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	0.404344
18.75	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	0.294272
20	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	0.092024
21.25	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	0.04248
22.5	3.10E-07	3.10E-07	1.55E-07	0.017606
23.75	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	-0.04248
25	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	-0.09024
26.25	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	-0.29427
27.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	-0.40434
28.75	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	-0.40705
30	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	-0.38653
31.25	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	-0.40504
32.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	-0.39976
33.75	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	-0.41126
35	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	-0.37894
36.25	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39588
37.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39589
38.75	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	-0.38928
40	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	-0.37824
41.25	2.64E-06	2.64E-06	1.32E-06	-0.2992
42.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	-0.16215
43.75	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	-0.03596
45	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	-0.00046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบมอเตอร์และชุดขับเคลื่อน

4.1 แรงบิด

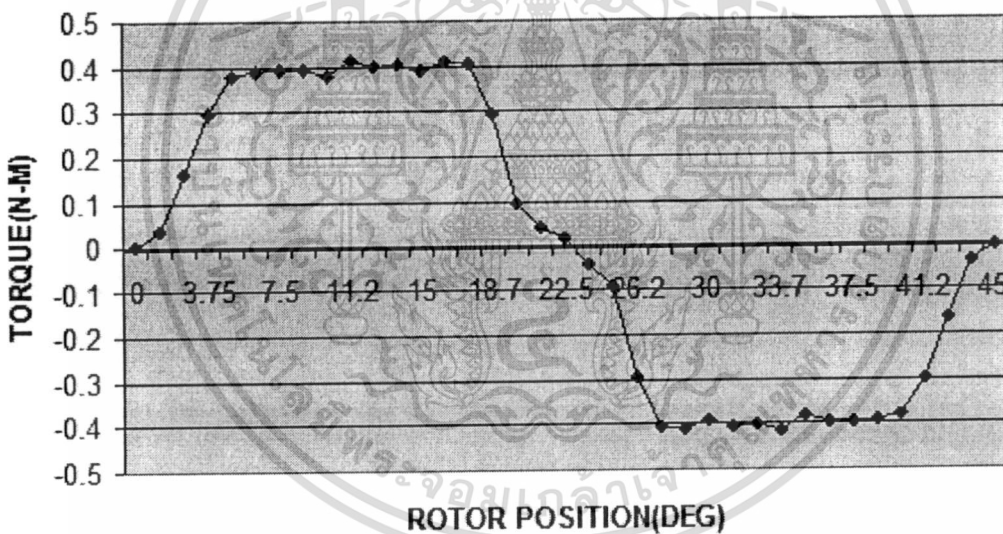
เราสามารถใส่โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าแรงบิดได้ แต่เนื่องจากโปรแกรมไม่สามารถวิเคราะห์แบบไดนามิกได้ เราจึงจำเป็นต้องทำการหาค่าแรงบิดในแต่ละตำแหน่งของโรเตอร์

Rotor position	inductance			Torque (N.m)
(Deg)	a(+)	a(-)		
0	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	0.000458
1.25	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	0.035956
2.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	0.16215
3.75	2.63E-06	2.64E-06	1.32E-06	0.299195
5	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	0.378237
6.25	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	0.389279
7.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.395885
8.75	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.39588
10	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	0.378935
11.25	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	0.411259
12.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	0.399759
13.75	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	0.405042
15	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	0.386532
16.25	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	0.40705
17.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	0.404344
18.75	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	0.294272
20	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	0.092024
21.25	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	0.04248
22.5	3.10E-07	3.10E-07	1.55E-07	0.017606
23.75	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	-0.04248
25	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	-0.09024
26.25	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	-0.29427
27.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	-0.40434
28.75	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	-0.40705

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	-0.38653
31.25	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	-0.40504
32.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	-0.39976
33.75	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	-0.41126
35	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	-0.37894
36.25	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39588
37.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39589
38.75	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	-0.38928
40	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	-0.37824
41.25	2.64E-06	2.64E-06	1.32E-06	-0.2992
42.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	-0.16215
43.75	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	-0.03596
45	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	-0.00046

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulation



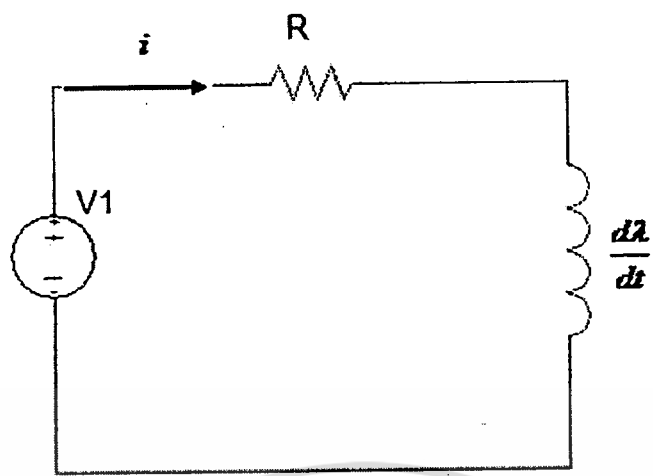
รูปที่ 4.1 แสดงค่าแรงบิด ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ

4.2 การคำนวณจำนวนรอบ

ในทางปฏิบัตินั้น ขดลวดเฟสจะถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นในการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ จะต้องมีการใช้ Current Regulator สำหรับการควบคุมระดับกระแสในเฟส เนื่องจากว่าขดลวดเฟสมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานต่ออนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ ดังนั้นจึงเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องกับขดลวด ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเฟส

โดยหลักการแล้ว การคำนวณจำนวนรอบต้องการความสมดุลระหว่างระดับแรงดันขาเข้ากับคุณสมบัติแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งยานการทำงานแรงบิดคงที่สามารถทำได้จนถึงความเร็วโดยที่กระแสในเฟสนั้นจะคงควบคุม (regulate) ได้ ณ ความเร็วนี้ ค่าแรงดันต้านกลับ (back emf) จะมีค่าสูงเข้าใกล้กับแรงดันขาเข้า จนไม่สามารถทำให้กระแสในเฟสสามารถควบคุมได้ ณ ตอนนี้รูปร่างของกระแสจะมีลักษณะที่เรียกว่า Flat top และ current regulator จะหยุดทำงาน ความเร็วดังกล่าวมีชื่อว่า Base speed จากวงจรสมมูลสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v = iR + \frac{d\lambda}{dt} \tag{4.1}$$

โดยที่ v คือแรงดันของดีซีลิงค์ R คือค่าความต้านทานของขดลวดต่อขั้ว λ คือเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงของขดลวดนั้น สำหรับมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของโรเตอร์และกระแสเฟส ดังนั้น

$$v = iR + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \tag{4.2}$$

$$= iR + \frac{d\lambda}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \tag{4.3}$$

$$= iR + L \frac{di}{dt} + \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \tag{4.4}$$

เทอม $\omega \frac{d\lambda}{d\theta}$ เรียกว่าแรงดันต้านกลับ หรือ back electromotive force (back emf)

ณ ความเร็ว Base speed รูปร่างของกระแสเป็นแบบ Flat top นั้นหมายความว่า ความชันของกระแส หรือ $\frac{di}{dt}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และถ้าสมมติให้ค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นเทอม iR หรือแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานของขดลวดเป็นศูนย์ดังนั้น $\frac{d\lambda}{dt} i$

$$v = \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (4.5)$$

เราสามารถใช้สมการข้างบนในการคำนวณเลือกจำนวนรอบของขดลวดได้เนื่องจากว่าค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงเป็นฟังก์ชันกำลังสองของจำนวนรอบ ในทางปฏิบัติการออกแบบค่าแรงดันต้านกลับจะให้อยู่ประมาณ 80-90% ของแรงดันดีซีลิงค์เพราะจะได้มีส่วนต่างของแรงดันเพื่อให้ current regulator ยังสามารถทำงานได้

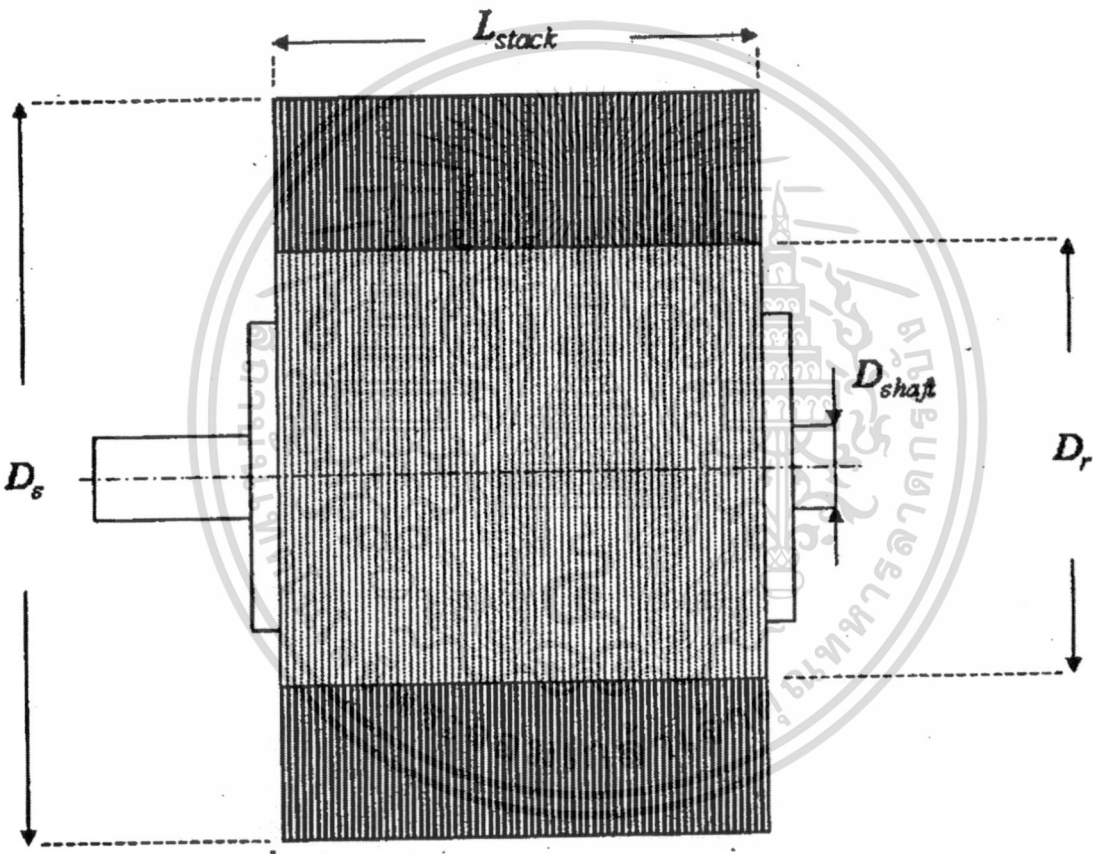
ตารางการคำนวณ							
rpm	w	Ni	N	N²	dL/dθ	V	i
1500	157	200	1	1	0.00000311	0.10	200.00
1500	157	200	2	4	0.00000311	0.39	100.00
1500	157	200	3	9	0.00000311	0.88	66.67
1500	157	200	4	16	0.00000311	1.56	50.00
1500	157	200	5	25	0.00000311	2.44	40.00
1500	157	200	6	36	0.00000311	3.52	33.33
1500	157	200	7	49	0.00000311	4.79	28.57
1500	157	200	8	64	0.00000311	6.25	25.00
1500	157	200	9	81	0.00000311	7.91	22.22
1500	157	200	10	100	0.00000311	9.77	20.00
1500	157	200	11	121	0.00000311	11.82	18.18
1500	157	200	12	144	0.00000311	14.06	16.67
1500	157	200	13	169	0.00000311	16.50	15.38
1500	157	200	14	196	0.00000311	19.14	14.29
1500	157	200	15	225	0.00000311	21.97	13.33
1500	157	200	16	256	0.00000311	25.00	12.50
1500	157	200	17	289	0.00000311	28.22	11.76
1500	157	200	18	324	0.00000311	31.64	11.11
1500	157	200	19	361	0.00000311	35.25	10.53
1500	157	200	20	400	0.00000311	39.06	10.00
1500	157	200	21	441	0.00000311	43.07	9.52
1500	157	200	22	484	0.00000311	47.26	9.09
1500	157	200	23	529	0.00000311	51.66	8.70
1500	157	200	24	576	0.00000311	56.25	8.33
1500	157	200	25	625	0.00000311	61.03	8.00
1500	157	200	26	676	0.00000311	66.01	7.69
1500	157	200	27	729	0.00000311	71.19	7.41
1500	157	200	28	784	0.00000311	76.56	7.14
1500	157	200	29	841	0.00000311	82.13	6.90
1500	157	200	30	900	0.00000311	87.89	6.67
1500	157	200	31	961	0.00000311	93.85	6.45

ตารางที่ 4.2 ตารางการคำนวณการพันขดลวด และการคำนวณกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความกว้างของช่องอากาศ

สวิตช์รีลักแตนท์มอเตอร์ต้องการช่องอากาศที่มีลักษณะ Uniform และมีความ Concentric สูงเพื่อที่จะรักษาสมดุลให้กับกระแสในเฟส และช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับเรื่องเสียง (Acoustic Noise) นอกจากนี้ช่องอากาศยังต้องการให้มีขนาดเล็กที่สุดอีกด้วยเพราะว่าช่องอากาศขนาดเล็ก ค่าของความเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่ง Aligned ยังมีค่าสูง นั้นหมายความว่าแรงบิดจะมีค่าสูงตามอีกด้วย อีกทั้งต้องการ Volt-Ampere ยังต่ำลงอีก ช่องอากาศนี้สามารถถูกออกแบบให้แคบถึงขนาด 0.1 mm หรือ 4 mil แต่จะต้องมีการกลึงผิวหน้าของขั้วโรเตอร์และสเตเตอร์โดยให้มีจุดศูนย์กลางเดียวกันจะมีความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 4.3 แสดงมิติของโรเตอร์

แนวทางการเลือกขนาดของช่องอากาศ g คือประมาณ 0.5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์โดยที่อัตราส่วนระหว่างความยาวของสเตเตอร์ต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ L_{STACK} / D_r เท่ากับ 1 แต่ถ้าอัตราส่วนนี้เปลี่ยนแปลงไปก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังแสดงในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g = \frac{0.5}{100} D_r \left(\frac{L_{stack}}{D_r} \right) \quad (4.6)$$

4.4 ความลึกของ slot ของโรเตอร์

ความลึก slot ของโรเตอร์ d_r แสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$D_r = r_1 - r_0 \quad (4.7)$$

โดยที่ r_1 คือครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ ดังนั้น

$$r_1 = \frac{D_r}{2} \quad (4.8)$$

และโดยทั่วไปแล้วความลึก d_r ควรจะมีค่ามากกว่า 20-30 เท่าของความยาวช่องอากาศ g เพื่อที่จะทำให้ค่าความเหนียวหน้าที่ตำแหน่ง Unaligned มีค่าต่ำ และมักจะนิยมให้มากกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้างของขั้วสเตเตอร์ด้วย

4.5 ความหนาของโรเตอร์ Yoke

การออกแบบความหนาของ Rotor Yoke y_r ควรให้เพียงพอที่จะรองรับค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านได้โดยไม่เกิดการอิ่มตัว เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กไหลใน Rotor Yoke จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในขั้วยื่น ดังรูปข้างล่าง ดังนั้นความหนาของโรเตอร์ ควรจะมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้างของขั้วยื่นประมาณ 20-40%

4.6 เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา D_{shaft} ควรมีค่าใหญ่เพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงต่อแรงบิดระหว่างไหลดกับโรเตอร์ โดยสามารถคำนวณได้สูตรดังนี้

$$D_{shaft} = D_r - 2(d_r + y_r) \quad (4.9)$$

นอกจากนี้ยังต้องมีการคำนวณความเร็ววิกฤต Critical Speed (n_c) เพื่อดูว่าความเร็วในการใช้งานของมอเตอร์ยังต่ำกว่าความเร็ววิกฤตหรือไม่ ถ้าสูงกว่าโอกาสที่เพลลาจะไม่สามารถรองรับการใช้งานได้โดยปกติ

$$n_c = 1.55 \times 10^6 \frac{d_{shaft}^2}{\sqrt{Wl}} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ l คือความยาวระหว่างร่องลื่น Bearing ที่ Endbell ทั้งสองตัว หน่วยเป็นนิ้ว ค่า W คือน้ำหนักของโรเตอร์หน่วยเป็น ปอนด์

4.7 ความหนาของสเตเตอร์ Yoke

มีข้อพิจารณาเช่นเดียวกันกับความหนาของ Rotor Yoke คือความหนาของ Stator Yoke y_s ควรจะมีความหนามากกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้างของขั้วสเตเตอร์ประมาณ 20-40%

4.8 ความลึกของ Slot ของสเตเตอร์

ความลึกของ stator slot d_s จะต้องมีค่ามากเพียงพอเพื่อที่จะใส่ขดลวดลงไปได้ โดยที่ขนาดของลวดและจำนวนรอบของขดลวดนั้นได้ถูกออกแบบมาเพื่อลดค่าความสูญเสียของทองแดง สามารถคำนวณได้ดังนี้

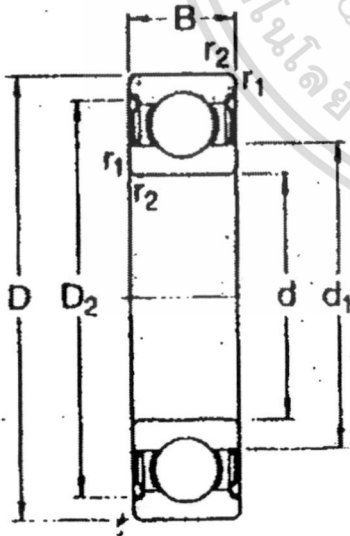
$$d_s = \frac{1}{2} (D_s - D_r - 2(g + y_s)) \tag{4.11}$$

4.9 ตลับลูกปืน (Bearing)

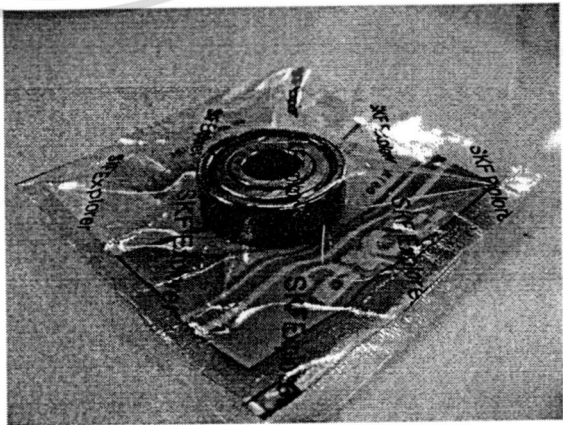
เราจำเป็นต้องหาตลับลูกปืนที่มีขายทั่วไปมาก่อน เพราะว่าเราไม่สามารถออกแบบขึ้นมาใหม่ได้ เลือกขนาดตลับลูกปืนโดยหาขนาดที่มีความใกล้เคียงกับการออกแบบเดิม เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ต้องการ สำหรับโครงงานนี้จะใช้ตลับลูกปืน 608 2Z มีลักษณะเป็นตลับฝาครอบเหล็กกันฝุ่นสองฝา

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบ

- $d = 8 \text{ mm}$
- $D = 22 \text{ mm}$
- $B = 7 \text{ mm}$



แบบมีแผ่นหรือฝากันฝุ่น

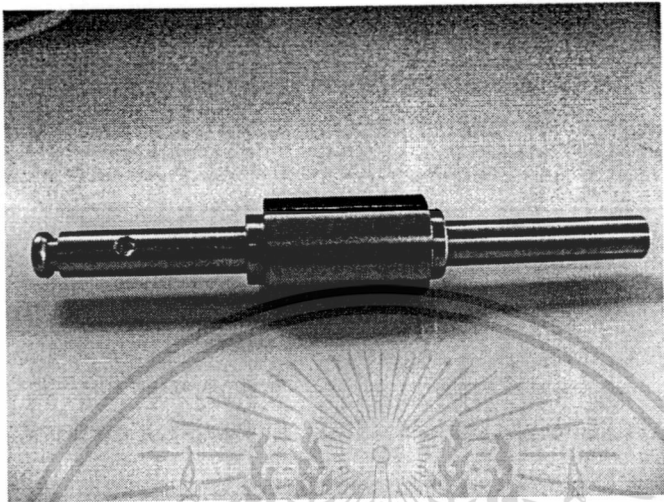


รูปที่ 4.4 ตลับลูกปืน

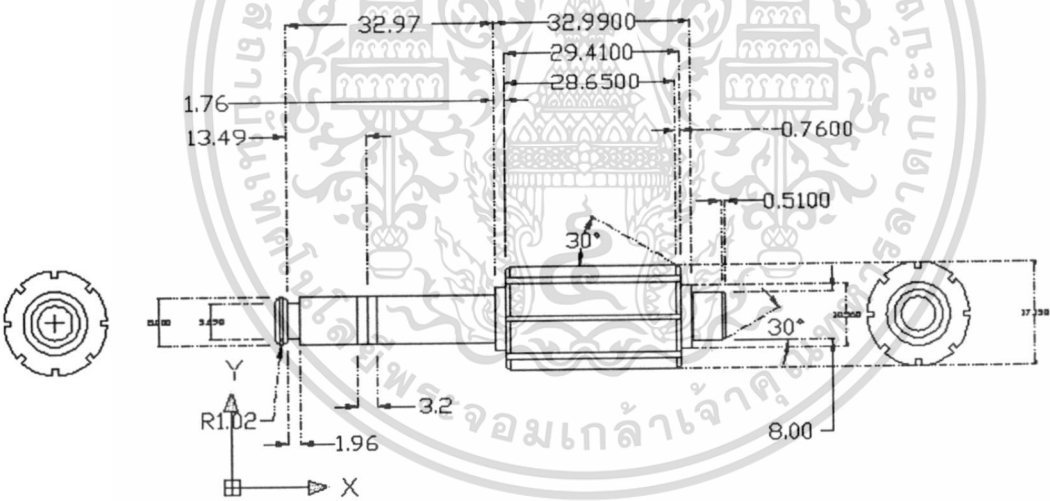
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 เฟลาโรเตอร์ (Shaft)

การออกแบบจะอ้างอิงจากแบบที่มีอยู่ ประกอบกับขนาดความกว้างของโรเตอร์และขนาดของตลับลูกปืนอันใหม่ โดยจะต้องมีร่องตามแนวแกนเพื่อให้สามารถทากันลงไปได้และเพิ่มความยาวของแกนเพื่อให้สามารถนำไปต่อกับ encoder ในการพิจารณาตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 4.5 แกนโรเตอร์ที่ทำการกลึงขึ้นมาใหม่



รูปที่ 4.6 แสดงการออกแบบของเฟลา

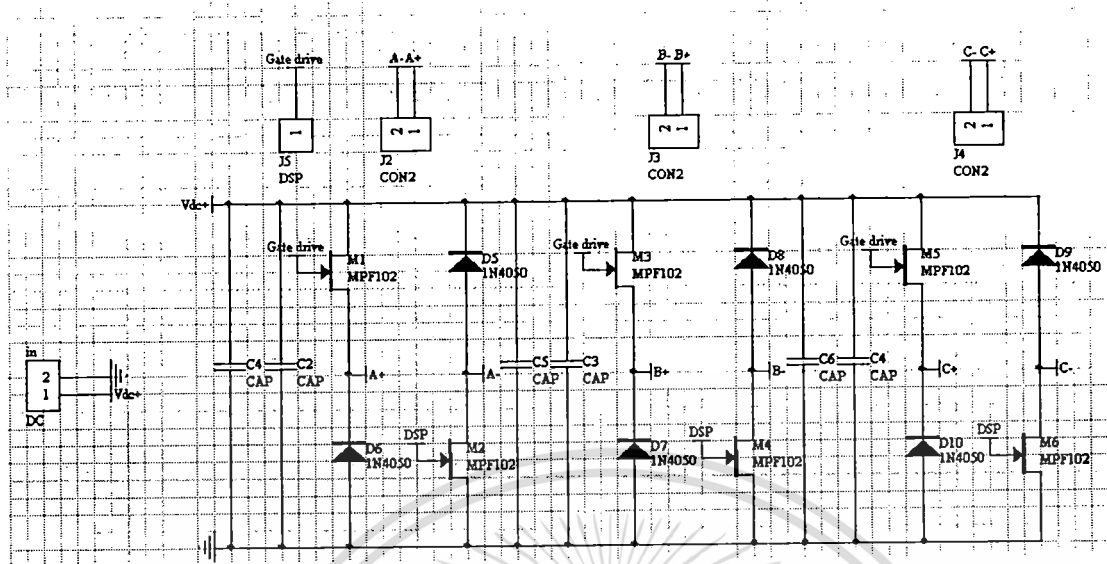
4.11 ฝาครอบมอเตอร์ (Endbell)

Endbell มีหน้าที่ยึดส่วนประกอบของมอเตอร์ไม่ให้แยกออกจากกัน และยึดให้โรเตอร์สามารถหมุนอยู่ในแนวแกนกลางได้ โดยที่ endbell จะต้องมียึดสำหรับการพันขดลวดที่เหมาะสม

การออกแบบฝาครอบมอเตอร์จะอ้างอิงกับตลับลูกปืน ขนาดขดลวด จำนวนรอบของขดลวด และสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

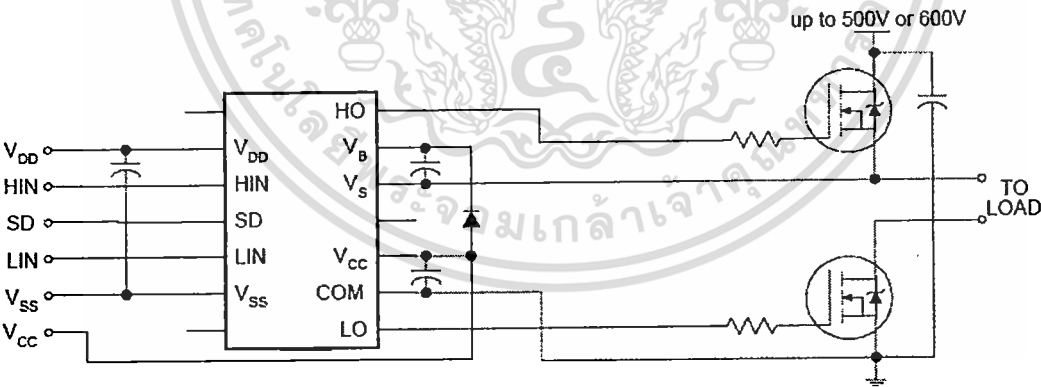
โดยวงจรที่ออกแบบเป็นดังนี้



รูปที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อน

4.13 วงจรขับเคลื่อน

วงจรนี้ใช้สำหรับเป็นตัวสั่งให้ MOSFET ที่วงจรขับเคลื่อนทำงานซึ่งมีรูปแบบดังนี้โดย
ใช้ IR 2110 ไม่มีตัวแยกกราวด์ (Isolate) ของวงจรกำลังกับวงจรควบคุม



รูปที่ 4.9 วงจรขับนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

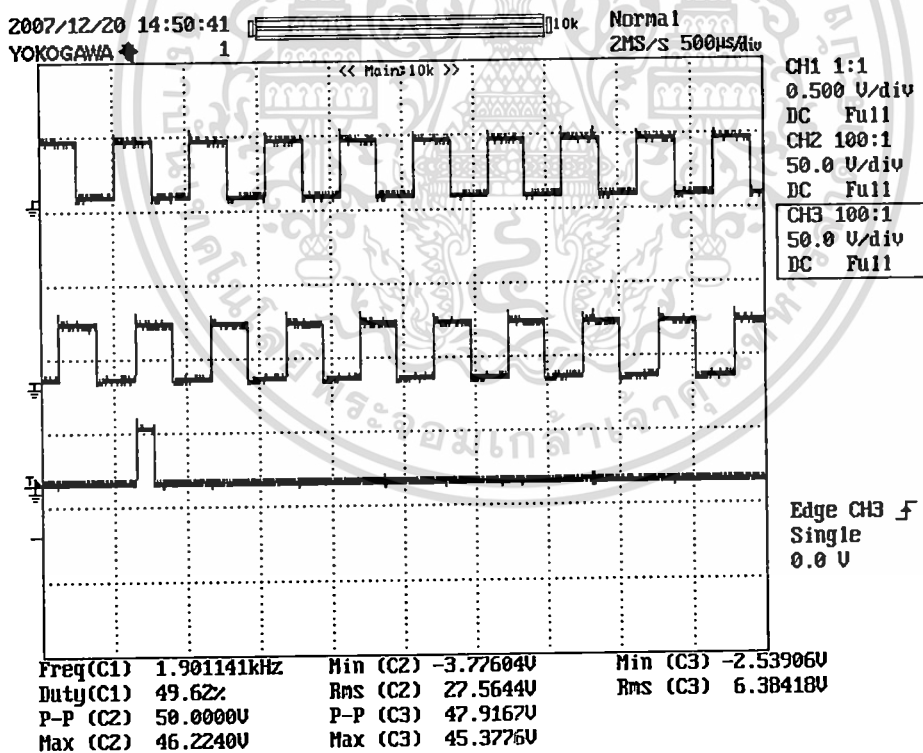
บทที่ 5

ผลการทดลอง

การทดลองในโครงงานจะเป็นการทดลองเพื่อพิจารณาความถูกต้องในการดำเนินโครงงาน

5.1 การทดลองที่ 1 สัญญาณ encoder

การทดลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของตัวเข้ารหัสอินครีเมนตัล (incremental encoder) ซึ่งจะทำงานเป็นสัญญาณ 3 เส้นคือ สัญญาณเฟส A,B และ INDEX โดยสัญญาณของเฟส A และ B มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งสามารถพิจารณาการทิศทางการหมุนของ encoder ได้จากมุมต่างเฟสได้ ถ้าหากสัญญาณเฟส A นำหน้าเฟส B นั้นหมายความว่าทิศทางการหมุนเป็นบวกหรืออาจพิจารณาการหมุนไปข้างหน้า ในทางตรงข้ามหากสัญญาณเฟส A ตามหลังเฟส B ทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะเป็นลบหรือหมุนกลับทิศทาง สำหรับสัญญาณชี้ตำแหน่งหรือ INDEX ใช้สำหรับตรวจจับจุดเริ่มต้นการหมุนโดยจะส่งสัญญาณออกมาเมื่อมีการหมุนครบรอบ



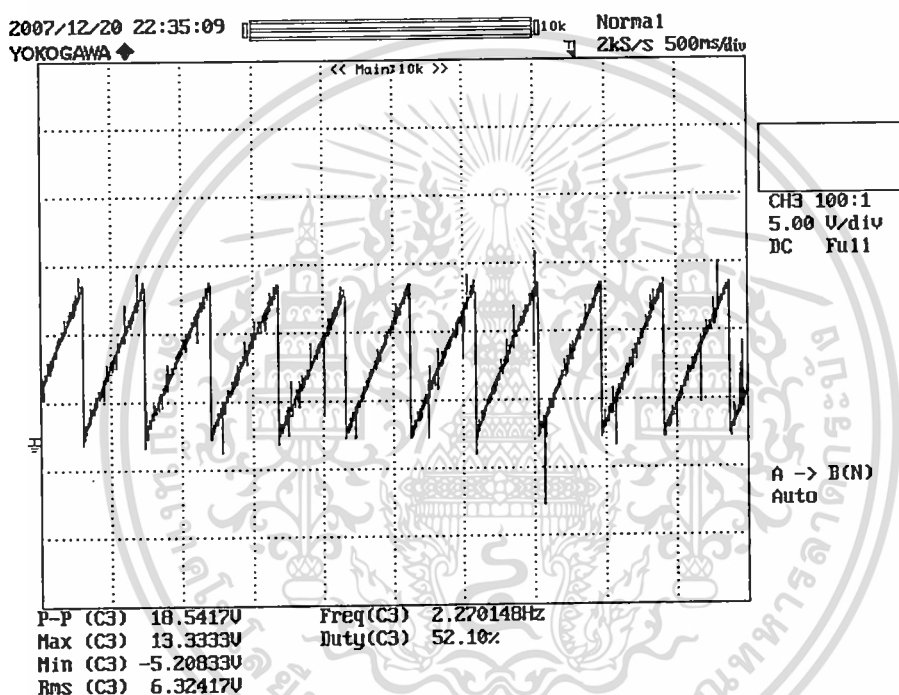
รูปที่ 5.1 สัญญาณ encoder เฟส A (บน),B (กลาง),INDEX (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองที่ 2 การรับค่าสัญญาณ encoder ด้วย dsPIC30F2010

การทดลองนี้เป็นการทดลองการรับและแปลค่าสัญญาณ encoder ของ microcontroller ด้วย โมดูล QEI ใน dsPIC30F2010 ซึ่งได้รับการออกแบบมาให้เชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัส อินทรีย์เมนตัล ทำงานโดยการถอดรหัสของสัญญาณเฟสและสัญญาณซีตำแหน่งออกมาเป็นข้อมูลของจำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้ โดยค่าของการนับจะเพิ่มขึ้นเมื่อแกนหมุนไปในทิศทาง เดิมและลดลงเมื่อกลับทิศทาง ซึ่งจะแปลงค่าการนับค่าการนับของ dsPIC จากค่าดิจิทัลเป็น ค่าอะนาลอกด้วยโมดูล SPI ต่อกับไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอกเบอร์ MCP4922

จากรูปที่ 5.2 ค่าแรงดันอะนาลอกจะเพิ่มขึ้นเป็นรูปสามเหลี่ยมในลักษณะ sawtooth แสดงค่าการนับและการรีเซ็ตค่าการนับสัญญาณตัวเข้ารหัสของ microcontroller



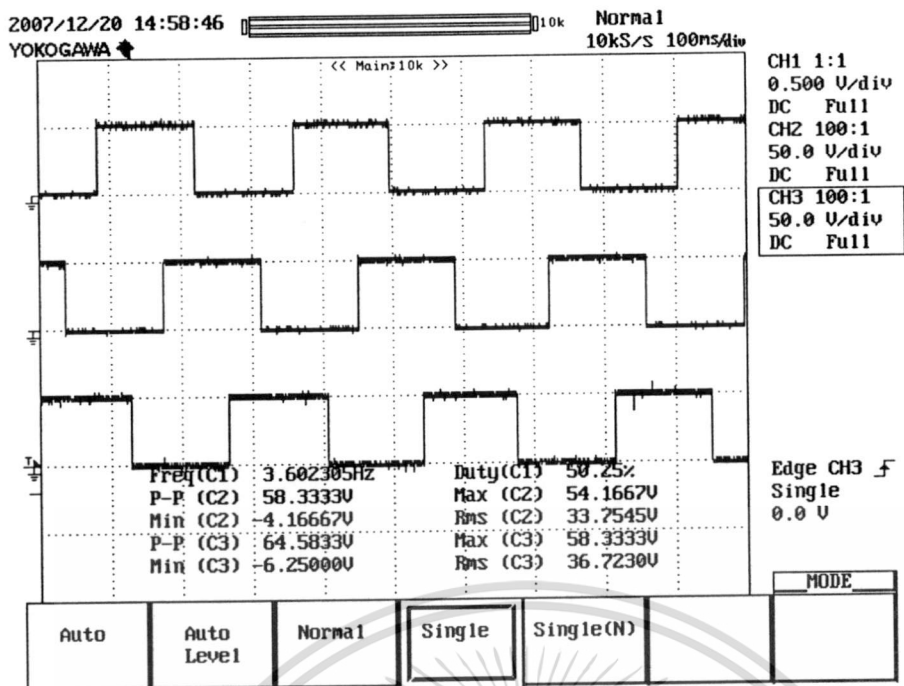
รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งของโรเตอร์โดยแปลงมาจากสัญญาณ encoder โดยใช้ microcontroller คำนวณ

5.3 การทดลองที่ 3 การขับมอเตอร์เฟสด้วยสัญญาณ encoder และ current sensor

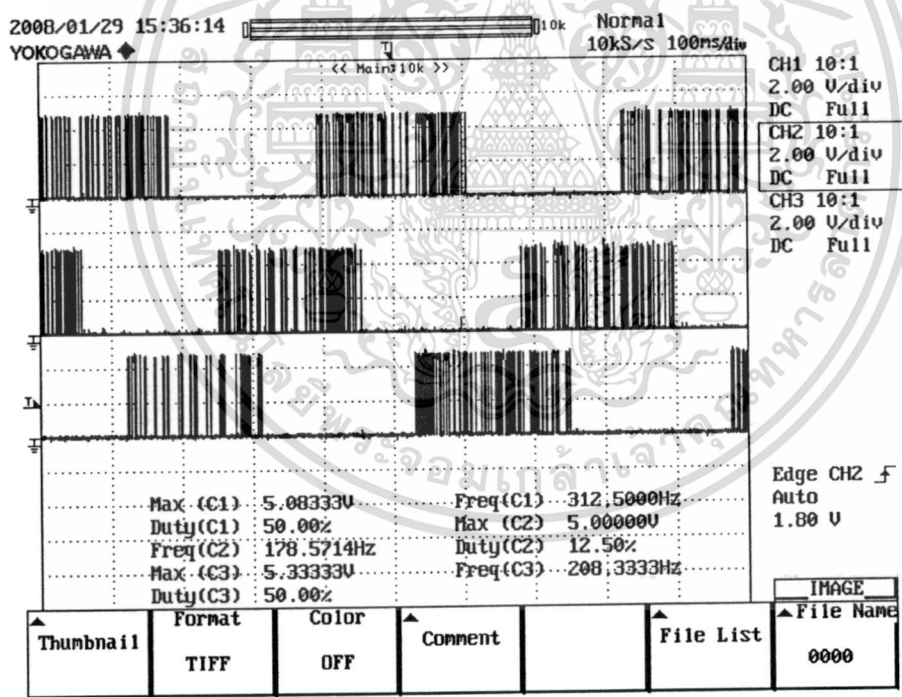
การทดลองนี้เป็นการนำค่าการนับของ microcontroller dsPIC30F2010 เปรียบเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อนำมาพิจารณาการขับมอเตอร์เฟสในการควบคุมการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสให้ไหลในขณะที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำในมอเตอร์แต่ละเฟสเป็นบวก

จากรูปที่ 5.3 เป็นการกำหนดมุมขับนำมอเตอร์เฟสให้ต่างกัน 120 องศาและมีลักษณะซ้อนกันเพื่อลดปัญหาแรงบิดกระเพื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

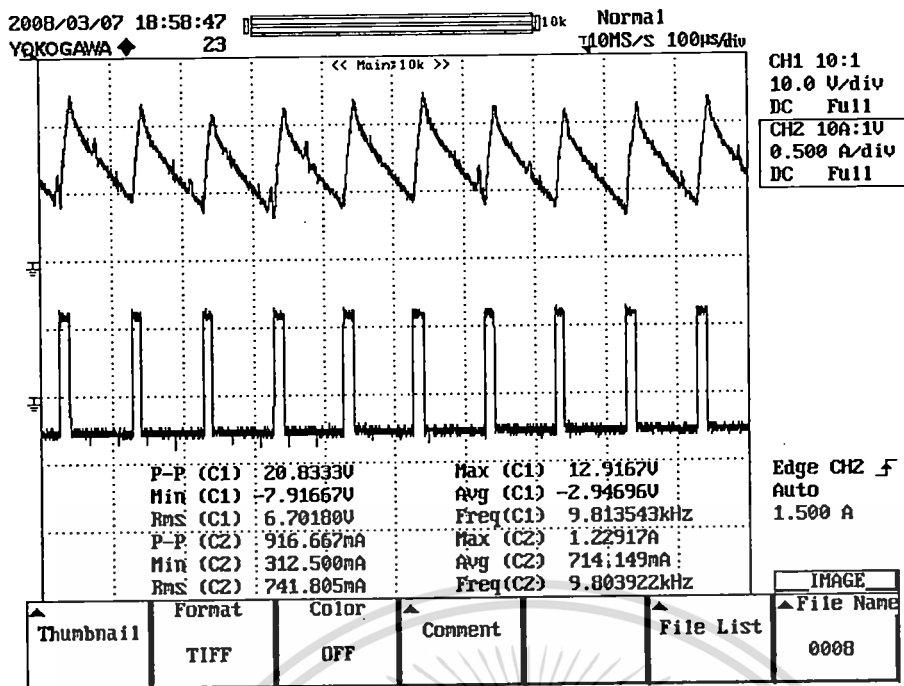


รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณ commutation ของทั้ง 3 เฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง)

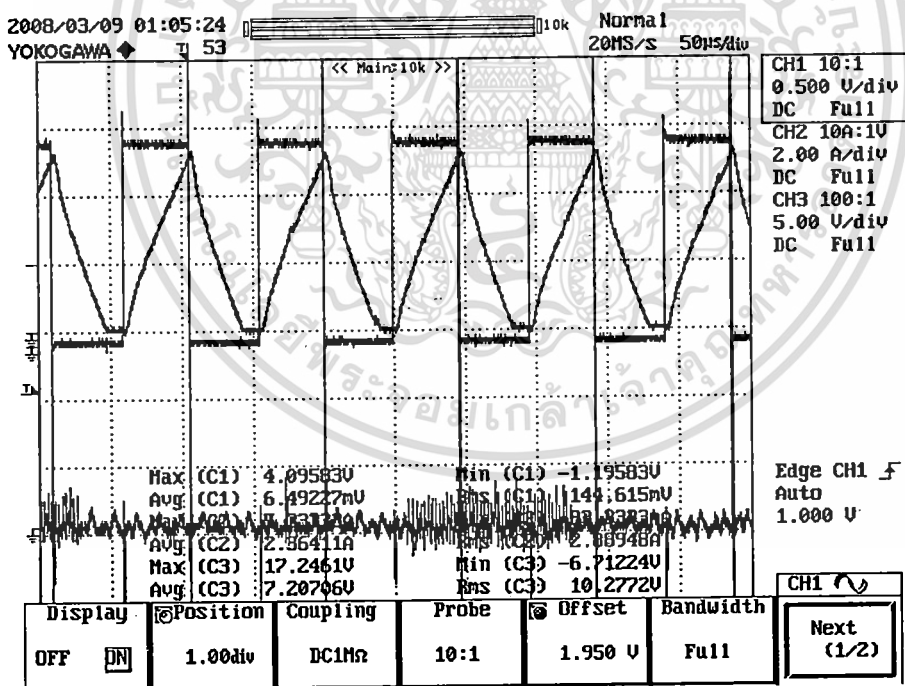


รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณขับเคลื่อนเมื่อการควบคุมกระแสของเฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง)
ด้วยสัญญาณจาก microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



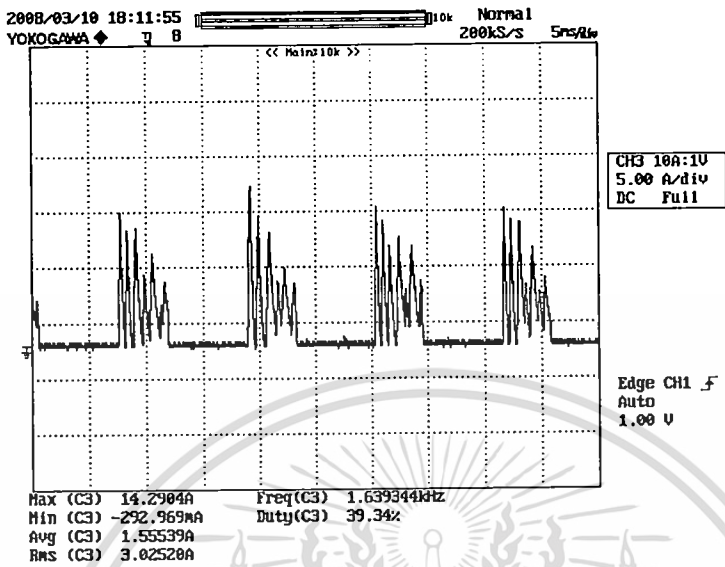
รูปที่ 5.5 แสดงการควบคุมกระแสด้วยการขับนำจากมอสเฟตโดยที่สัญญาณบนแสดงกระแสเฟส และสัญญาณล่างแสดงสัญญาณขับนำ



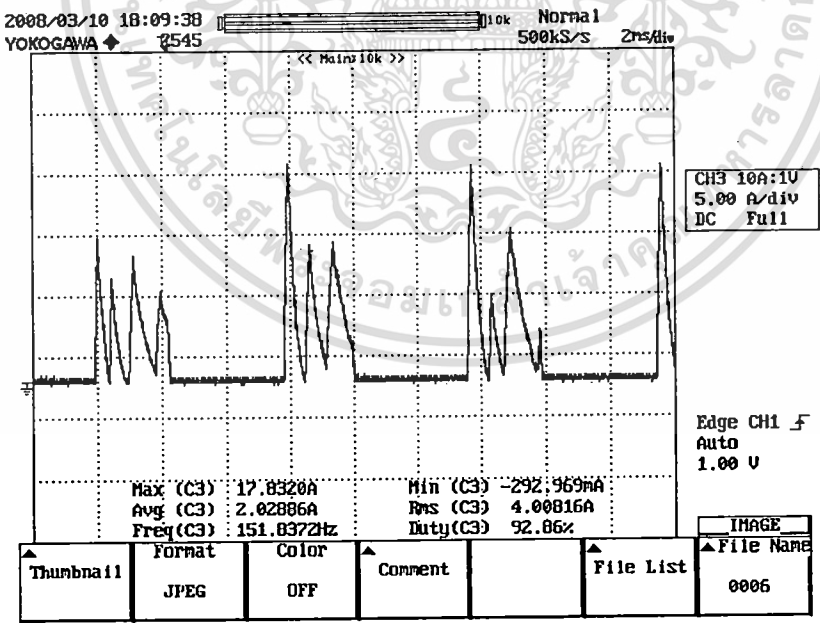
รูปที่ 5.6 แสดงแรงดันตกคร่อมโหลดเทียบกับกระแสขณะลือกเฟสของมอเตอร์

5.4 การทดลองที่ 4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

การทดลองนี้เป็นการจ่ายกระแสพัลส์ให้กับมอเตอร์ครบทั้ง 3 เฟส โดยการใช้ระบบควบคุมแบบเปิด ผลที่ได้จากการวัดกระแส ดังรูป

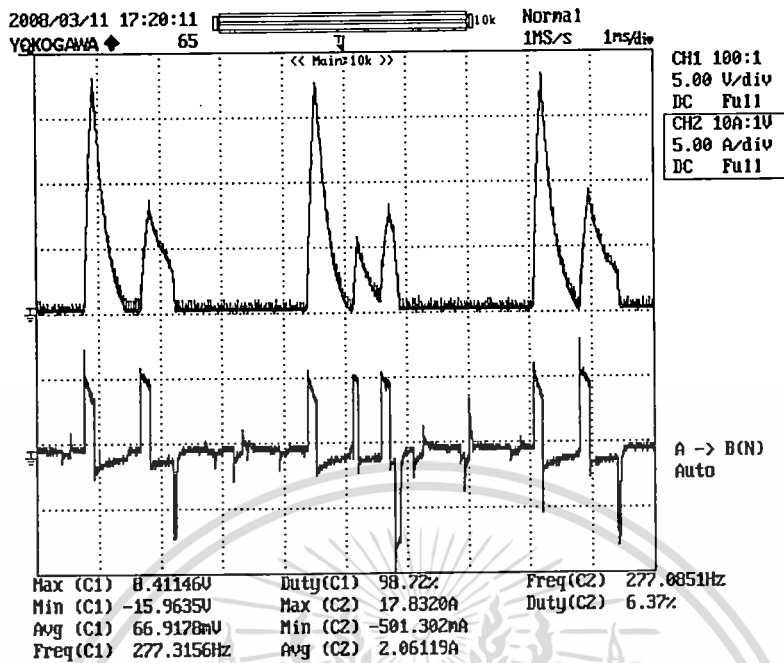


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

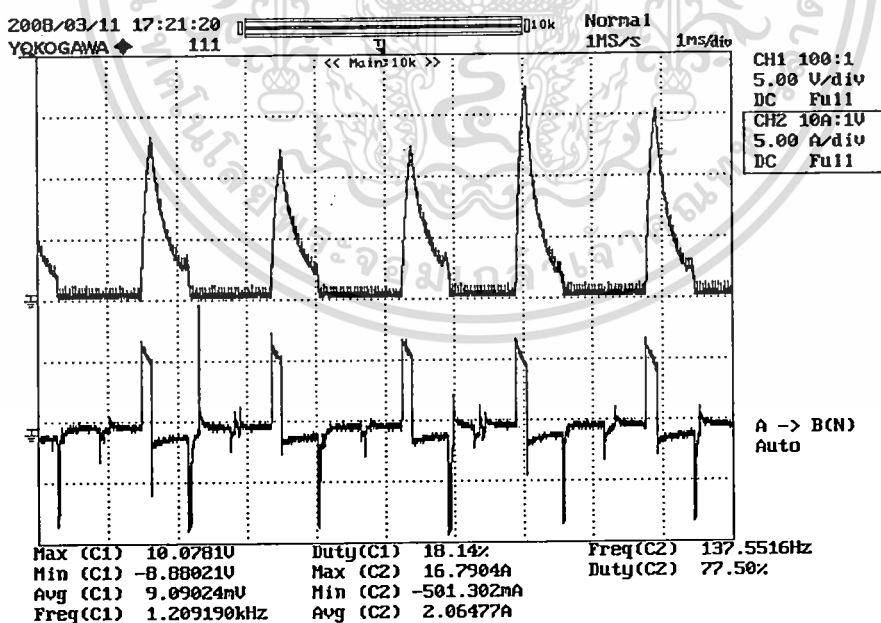


รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในความเร็ว 500 rpm ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

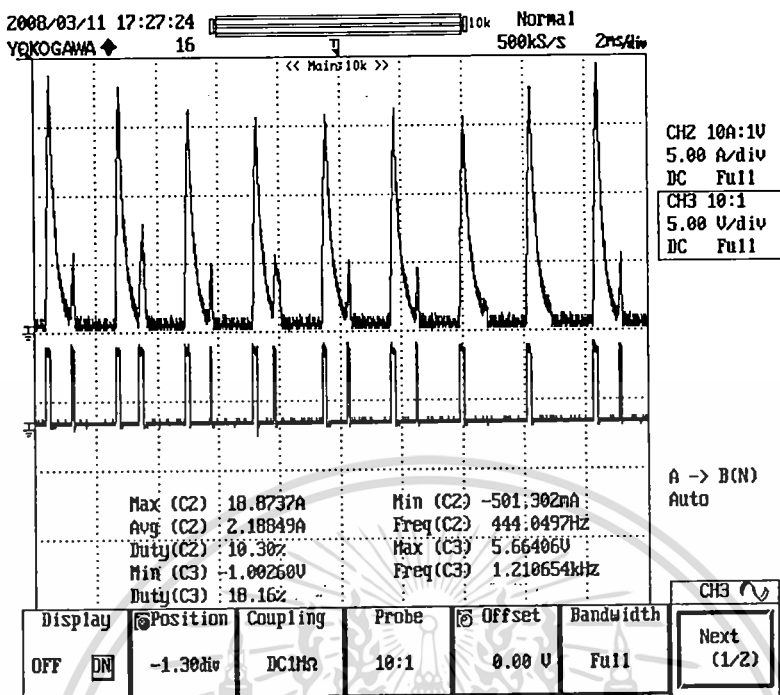


รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 1500 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ 3900 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 2000 rpm กับ สัญญาณขับมอสเฟตจาก microcontroller(ล่าง)