

การศึกษาการสันสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
ในฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

นายสัมฤทธิ์ จันทะนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**STUDY OF MECHANICAL VIBRATIONS IN HARD
DISK OF BRUSHLESS DC MOTOR BY
USING FINITE ELEMENT METHOD**

Sumrit Juntana

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การศึกษาการสันสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์
ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ ฝ่่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ชนัดชัช กุลวรวานิชพงษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



สัมฤทธิ์ จันทะนา : การศึกษาการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรง
ไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (STUDY OF MECHANICAL
VIBRATIONS IN HARD DISK OF BRUSHLESS DC MOTOR BY USING FINITE
ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ,
195 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านหรือสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ โดยใช้แบบจำลองที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ เมื่อพิจารณาเวลาที่ขึ้นกับเวลา เพื่อจำลองผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กตลอดพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เมื่อพิจารณาโรเตอร์หมุนในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์อันเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีการแก้สมการเชิงตัวเลข ในรูปแบบสมการที่มีความซับซ้อนที่ได้รับความนิยมอีกวิธีหนึ่ง และได้มีการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในงานทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง แม้กระทั่งใช้ในการจำลองผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กนี้ วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์สามารถแก้ปัญหาสมการของแมกเวลล์ที่ปรากฏในแบบจำลองของเครื่องจักรกล โดยได้ประยุกต์ใช้การประมาณค่าแบบย้อนหลังกับงานที่ขึ้นกับเวลา มอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองนี้เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ขนาดแรงดัน 12 V 8 ขั้ว 12 สล็อต พันแบบ Y วิทยานิพนธ์นี้ได้นำประโยชน์ของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน และนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลตรวจสอบความถูกต้องกับผลการวัดการสั่นสะเทือน ซึ่งผลที่ปรากฏมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับการดำเนินการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นั้นได้พัฒนาโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2554

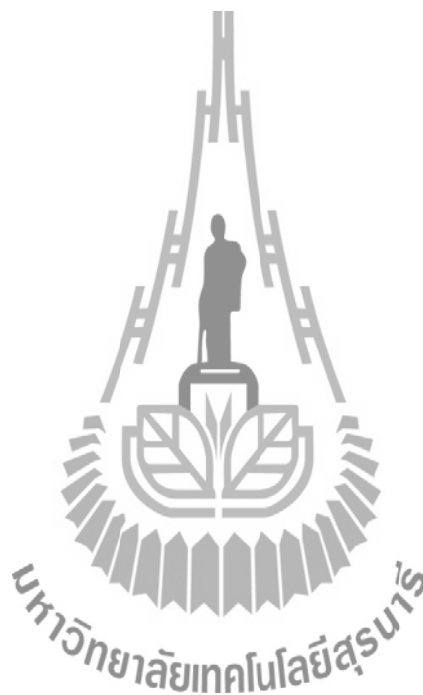
ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SUMRIT JUNTANA : STUDY OF MECHANICAL VIBRATIONS IN
HARD DISK OF BRUSHLESS DC MOTOR BY USING FINITE
ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PADEJ
PAO-LA-OR, Ph.D., 195 PP.

BRUSHLESS DC MOTOR/FINITE ELEMENT METHOD/TIME STEPPING
METHOD/HARD DISK DRIVE/ELECTROMAGNETIC FORCE/VIBRATION

This thesis presents a set of mathematical model of magnetic fields and mechanical vibration in a brushless dc motor (BLDCM) or spindle motor of computer hard disk drive (HDD) by using a set of second-order partial differential equations. Computer-based simulation utilizing the two-dimensional time stepping finite element method is exploited as a tool for visualizing magnetic fields distribution through the cross-sectional area of a BLDCM operating with transient state and steady state rotor movement. The equations such that the solutions of electromagnetic forces across the motor cross sectional area causing vibration could be studied. Finite Element Method is one among popular numerical methods that is able to handle problem complexity in various forms. At present, the finite element method has been widely applied in most engineering fields. Even for problems of magnetic fields distribution, the finite element method is able to estimate solutions of Maxwell's equations governing the machine systems. To solve this time-dependent system, a step-by-step numerical integration of the backward difference algorithm is applied. To evaluate its use, 12-V 8-pole 12-slot and Y-winding BLDCM was tested. This thesis utilizes the advantages of the FEM for handling the mechanical vibration problem in BLDCM. And discusses

about the simulation results show good agreement with the vibration measurement results. The computer simulation based on the use of the finite element method has been developed in MATLAB programming environment.



School of Electrical Engineering

Student's Signature_____

Academic Year 2011

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้าน

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรรณาภิขงษ์ อาจารย์ผู้สอนผู้ถ่ายทอดให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด พร้อมช่วยเหลือให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณประพันธ์ ศักดิ์วี ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ประจำศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และสนับสนุนทางด้านเครื่องมือการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายทุกอย่างในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรัตนพร จันทะนา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สัมฤทธิ์ จันทะนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 สรุป.....	11
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 สนามแม่เหล็ก.....	13
3.2.1 พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็ก.....	13
3.2.2 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก.....	19
3.3 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....	21
3.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	หลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	27
3.3.3	วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	36
3.3.4	การควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	42
3.4	วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	45
3.5	สรุป.....	53
4	การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	54
4.1	บทนำ.....	54
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	54
4.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	56
4.3.1	การแบ่งอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	56
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์.....	58
4.3.3	การสร้างสมการของอิลลิเมนต์.....	59
4.3.4	การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว.....	67
4.3.5	การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	69
4.3.6	ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย.....	69
4.3.7	คำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ.....	69
4.4	สรุป.....	71
5	การคำนวณการสั้นสะพานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	72
5.1	บทนำ.....	72
5.2	การคำนวณการสั้นสะพานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	72
5.2.1	การแบ่งอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	72
5.2.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลลิเมนต์.....	74
5.3	การหาผลเฉลยสำหรับการสั้นสะพาน.....	80
5.4	สรุป.....	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

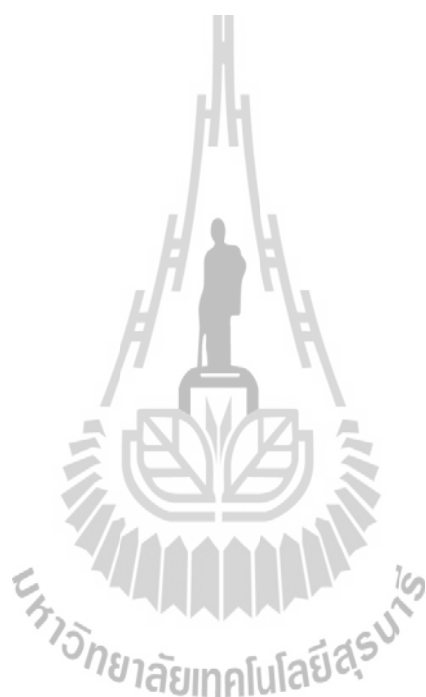
6	โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์	84
6.1	บทนำ.....	84
6.2	พารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	84
6.3	การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์.....	87
6.3.1	แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์.....	87
6.3.2	แบบจำลองทางกลของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์.....	88
6.3.3	การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์.....	89
6.4	โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล.....	95
6.4.1	โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก	95
6.4.2	โปรแกรมคำนวณการสั้นสะท้อน	99
6.5	สรุป	104
7	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์	
	พร้อมเปรียบเทียบกับผลทดสอบ	105
7.1	บทนำ.....	105
7.2	ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก	105
7.2.1	ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและอภิปรายผล	105
7.2.2	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและอภิปรายผล	139
7.3	ลักษณะการจำลองผลการสั้นสะท้อนและการวัดทดสอบ.....	165
7.4	ผลและอภิปรายผลการสั้นสะท้อน.....	166
7.5	การเปรียบเทียบผลการสั้นสะท้อนที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบ.....	168
7.6	สรุป	171
8	สรุปและข้อเสนอแนะ	172
8.1	สรุป	172
8.2	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	173
	รายการอ้างอิง.....	174

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ภาพแสดงเครื่องมือและการจัดการสันสะท้อนของมอเตอร์.....	179
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	186
ประวัติผู้เขียน	195



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง5
3.1	สภาวะการทำงานของโฟโตรีสแตเตอร์กับการหมุนของมอเตอร์ในหนึ่งรอบ.....43
3.2	ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนต์.....47
3.3	ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ48
6.1	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ขนาด 12 V.....84



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์และเครื่องลดการสั่น8
2.2	รูปแบบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน10
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักตาคและฟลักตทงกระบอก16
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักตาคและฟลักตทงกลม18
3.3	โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....23
3.4	ส่วนประกอบสเตเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....24
3.5	การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก.....25
3.6	การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ.....25
3.7	ส่วนประกอบโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....26
3.8	มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์พร้อมขนาด (mm).....27
3.9	กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส.....28
3.10	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา29
3.11	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา.....29
3.12	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา.....30
3.13	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา.....30
3.14	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา.....31
3.15	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา.....31
3.16	การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลพ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา.....	33
3.18 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลพ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา.....	34
3.19 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลพ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา.....	34
3.20 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลพ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา.....	35
3.21 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลพ ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา.....	35
3.22 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงในระนาบแต่ละเฟส	37
3.23 แรงดันต้านกลับและแรงดันแต่ละเฟสเทียบกับมุมที่โรเตอร์หมุน	38
3.24 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์	40
3.25 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์.....	43
3.26 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละเฟส.....	44
3.27 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์.....	46
3.28 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อิลิเมนต์ 4 จุดต่อ	47
3.29 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม.....	48
4.1 มอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์และขนาดในหน่วยมิลลิเมตร	57
4.2 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์	57
4.3 การขยายให้เห็นการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัด 1/4 ของมอเตอร์	58
5.1 มอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์และขนาดในหน่วยมิลลิเมตร	73
5.2 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์	73
5.3 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดวงกว้าง	75
5.4 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น	76
5.5 แผนภูมิการคำนวณการสั้นสะเทือนในมอเตอร์	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	การผันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสในแต่ละเฟส.....86
6.2	ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง.....87
6.3	องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงในระนาบสามเฟส.....88
6.4	แบบจำลองทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์88
6.5	กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละเฟสเทียบกับเวลา90
6.6	กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฟส a เทียบกับเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่...91
6.7	กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านกลับเทียบกับเวลา91
6.8	กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านเฟส a กลับเทียบกับเวลา เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่92
6.9	กราฟกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ92
6.10	กราฟกระแสเฟส a เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่93
6.11	กราฟอัตราเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ94
6.12	กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ94
6.13	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก.....96
6.14	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน.....100
7.1	ตัวอย่างการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัด ของมอเตอร์ในสถานะคงตัว.....106
7.2	กราฟกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ107
7.3	การผันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสในแต่ละเฟส.....107
7.4	ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง.....108
7.5	การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา.....108
7.6	การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 7.5 องศา.....109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.46 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 307.5 องศา.....	129
7.47 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 315 องศา.....	129
7.48 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 322.5 องศา.....	130
7.49 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 330 องศา.....	130
7.50 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 337.5 องศา.....	131
7.51 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 345 องศา.....	131
7.52 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 352.5 องศา.....	132
7.53 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 360 องศา.....	132
7.54 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละเฟส.....	138
7.55 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา.....	139
7.56 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 7.5 องศา.....	140
7.57 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 15 องศา.....	140
7.58 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 22.5 องศา.....	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.98 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 322.5 องศา.....	161
7.99 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 330 องศา.....	161
7.100 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 337.5 องศา.....	162
7.101 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 345 องศา.....	162
7.102 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 352.5 องศา.....	163
7.103 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 360 องศา.....	163
7.104 ตำแหน่งการวัดทดสอบบนมอเตอร์ที่ถูกตัด.....	166
7.105 ตำแหน่งการจำลองของการกระจัดตรงตำแหน่งส่วน โครงสแตเตอร์ของมอเตอร์.....	167
7.106 ผลการจำลองการกระจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาของมอเตอร์.....	168
7.107 ผลการจำลองการกระจัดของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว.....	169
7.108 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว ...	170
ก.1 ฮาร์ดดิสก์เมื่อมองจากด้านบน	180
ก.2 ฮาร์ดดิสก์เมื่อมองจากด้านล่าง	180
ก.3 ภายในของฮาร์ดดิสก์เมื่อมีจานดิสก์.....	181
ก.4 ภายในของฮาร์ดดิสก์เมื่อไม่มีจานดิสก์.....	181
ก.5 สปินเดิลมอเตอร์เมื่อมองจากด้านโรเตอร์.....	182
ก.6 สปินเดิลมอเตอร์เมื่อมองจากด้านสแตเตอร์.....	182
ก.7 แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมเมื่อถ่ายจากด้านหน้า.....	183
ก.8 แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมเมื่อถ่ายจากด้านหลัง.....	183
ก.9 กล่องพร้อมอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน (IMV รุ่น VM-2004Neo).....	184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.10	หัวข้อการสันสะเทือนและพ็อคเก็ตพีซี184
ก.11	การวัดการสันสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดลเมื่อมองจากด้านหน้า.....185
ก.12	การวัดการสันสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดลเมื่อมองจากด้านข้าง185



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสั่นสะเทือน คือปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงกระทำจากภายในที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) โดยสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบ หรือเป็นแรงกระทำจากภายนอกที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) โดยสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ และถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance) นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายขึ้นจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนมักเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการแต่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อดีที่สุดคือพยายามจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือนให้อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor: BLDCM) ในฮาร์ดดิสก์ซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนดิสก์หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) การสั่นสะเทือนอาจเกิดจากการออกแบบและการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน ความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ธรรมชาติของเทคโนโลยีการขับเคลื่อน หรือเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ซึ่งสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ย่อมส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวที่ไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ แล้วส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ทำให้มีการสูญเสียทางกล สมรรถนะในการทำงานและอายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง อย่างไรก็ตาม ณ ปัจจุบันสำหรับประเทศไทย ปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอมพิวเตอร์และใช้กันอย่างแพร่หลาย คงยังถูกมองข้ามและขาดการเอาใจใส่อย่างจริงจัง

ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่ สามารถใช้การอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) สมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) บางรูปแบบอาจหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ยากหรือทำไม่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนี้มีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องมีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการ

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนอย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่า

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่มีความนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม้กระทั่งปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและปัญหาที่มีการผันแปรตามเวลา ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ซึ่งอาจจะประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลายชนิดที่มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน หรือมีค่าเงื่อนไขขอบเขตหลายอย่างผสมกันอยู่ในระบบ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ดำเนินการ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ สนใจมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นมอเตอร์แม่เหล็กถาวร กระแสตรงไร้แปรงถ่าน หรือเรียกว่ามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนดิสก์ที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสปินเดิลมอเตอร์ ชนิด 3 เฟส 8 ขั้ว 12 สล็อต ขนาดแรงดัน 12 V โดยได้คำนวณหาการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ขณะมอเตอร์ทำงานได้อย่างแม่นยำ ซึ่งได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับผลทางปฏิบัติที่ได้จากการวัดทดสอบ การดำเนินงานวิจัยได้คำนวณหาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กอันเป็นผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ด้วย โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปเพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ โดยพิจารณามอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์เป็นแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy) ทั้งในสถานะอยู่ตัว (steady state) และสถานะชั่วคราว (transient state) การประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือน ถูกพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและเอลิเมนต์จากการสร้างกริดโดยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ

Gmesh และส่งค่าข้อมูลที่ได้ให้โปรแกรม MATLAB จำลองผล เพื่อแสดงรูปของผลลัพธ์ที่จำลองได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวตลอดพื้นที่หน้าตัดของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์
- 2) พัฒนาโปรแกรม FEM สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลกับภาคปฏิบัติ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์
- 2) พิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ (ระนาบ xy)
- 3) วัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์มีคุณสมบัติความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ประกอบกับมอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิห้องคงที่ จึงยังไม่พิจารณาผลจากการขยายตัวของวัสดุ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ ทั้งในสถานะชั่วคราว (transient state) และสถานะคงตัว (steady state)
- 2) วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กเป็นแบบ 2 มิติ
- 3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองในทางทฤษฎีกับผลการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ
- 4) สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับมอเตอร์เป็นสัญญาณ multi-step แบบ 4 step

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์
- 2) ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรม FEM ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท และ 2 ภาคผนวก โดยใน *บทที่ 1* เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงาน ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทาง และระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้นจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาประกอบด้วย สนามแม่เหล็ก มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ และวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วยการคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ โดยได้อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

บทที่ 5 มีเนื้อหาว่าด้วยการคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ โดยได้อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

บทที่ 6 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์แบบ 2 มิติ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

บทที่ 7 มีเนื้อหาว่าด้วยผลการจำลองของสนามแม่เหล็กและการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์แบบ 2 มิติ ประกอบกับเปรียบเทียบผลการจำลองการสันสะท้อนจากการจำลองผลกับผลการวัดทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ พร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก. แสดงภาพของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับวัดการสันสะท้อนในมอเตอร์

ภาคผนวก ข. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ คำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการสั่นสะเทือนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งจะนำเสนองานวิจัยดังกล่าวพอสังเขป เพื่อให้เห็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปโดยย่อ เป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1989	Pillay and Krishnan	ศึกษาแบบจำลองกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ จำลองผลและวิเคราะห์ผล
1994	Chan, Jiang, Chen and Chau	ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ เช่น แบบจำลองสมการกระแส สมการแม่เหล็กในแนวรัศมี (B_r) สมการแม่เหล็กในแนวสัมผัส (B_t) แรงแม่เหล็กในแนวรัศมี (F_r) และแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัส (F_t)

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

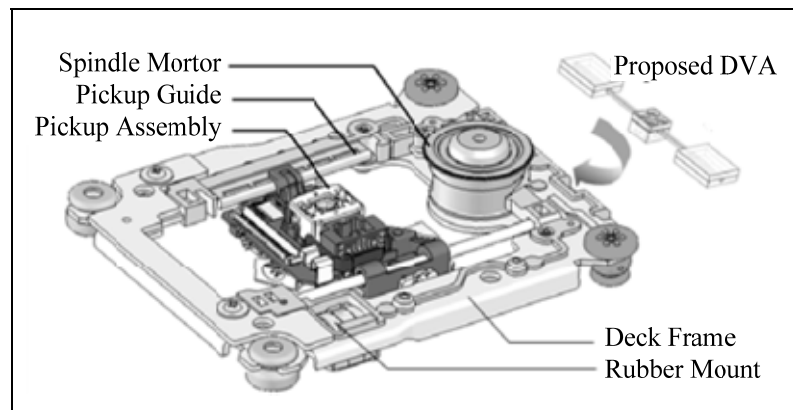
ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1996	Jang and Yoon	วิเคราะห์แรงบิดทางกล และแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
1996	Chan, Chau, Jiang, Xia, Zhu and Zhang	ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เช่น แบบจำลองกระแส ชุดควบคุมกระแส และการกระจายตัวของสัณฐานเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลองผล ขณะมีโหลดและไม่มีโหลดพิจารณาเป็นงานที่มีความถี่เดียว (time-harmonic field)
1999	Park	วิเคราะห์แรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรรอบบริเวณโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 8 ขั้ว 12 สล็อต ที่มีชุดควบคุมกระแส 3 เฟส พิจารณาเป็นงานที่มีความถี่เดียว
1999	Neves, Carison and Bastos	การคำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยอิทธิพลของแรงแม่เหล็ก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2000	Gan, Chau, Wang, Chan and Jiang	วิเคราะห์การวางตัวของขั้วแม่เหล็กถาวรบริเวณโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน พิจารณาเป็นงานที่มีความถี่เดียว
2000	Gan, Chau, Chan and Jiang	วิเคราะห์แรงบิดทางกล การสั่นสะเทือน การกระจายตัวของสัณฐานเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และแรงดันด้านกลับของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พิจารณาเป็นงานที่มีความถี่เดียว
2001	Kim, Kim, Hwang, Kim, Jeong and Hwang	วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองการสั่นสะเทือนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ระหว่างมอเตอร์สมดุค (12 ขั้ว 9 สล็อต) และมอเตอร์ไม่สมดุค (8 ขั้ว 9 สล็อต)
2001	Kim, Kim, Wang, Kim and Jung	เปรียบเทียบแรงแม่เหล็กระหว่างมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีการวางตัวของแม่เหล็กถาวรแบบ interior permanent magnet (IPM) และ surface mounted permanent magnet (SPM)
2002	Heo, Chung and Park	การลดการสั่นสะเทือนและเสียงของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยใช้เครื่องลดการสั่น (dynamic vibration absorber: DVA)

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Chung	ศึกษาการสั่นสะเทือนโดยเปรียบเทียบผลระหว่างมีเครื่องลดการสั่น และไม่มีเครื่องลดการสั่นของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์
2004	Jiao and Rahn	หาแนวทางในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการทราบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เช่น แรงแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2004	Jabbar, Phyu, Liu and Bi	ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เช่น แรงบิดทางกล กระแสไฟฟ้าที่ป้อนผ่านชุดควบคุม (inverter circuit) และความเร็วรอบของมอเตอร์พิจารณาเป็นงานที่มีความถี่เดียว
2009	Lim, Kim and Soh	ออกแบบเครื่องลดการสั่น เพื่อลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่จะดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้าง ๆ ว่ามีคณະนักวิจัยใดได้ศึกษาสิ่งใดไปบ้างแล้ว จากตารางที่ 2.1 สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ในส่วนถัดไปนี้จึงได้ทำการกล่าวถึงงานวิจัยดังกล่าว ซึ่งได้นำทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์อย่างถูกต้องและแม่นยำ และยังมี การเสริมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนั้นๆ โดยย่อ

เริ่มที่งานวิจัยของ Heo, Chung and Park (2002) ศึกษาถึงการลดการสั่นสะเทือนและเสียงของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยใช้เครื่องลดการสั่น (dynamic vibration absorber: DVA) ซึ่งเป็นเครื่องลดการสั่นที่ออกแบบมาเพื่อทำให้ฮาร์ดดิสก์เกิดความสมดุลและสามารถลดการสั่นได้ สำหรับรูปที่ 2.1 คือรูปแบบของเครื่องลดการสั่น โดยการคำนวณได้ใช้สมการการสั่นซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation: ODE) อันดับสอง ซึ่งมีลักษณะสมการดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์และเครื่องลดการสั่น

$$[M] \frac{\partial^2 \{x\}}{\partial t^2} + [D] \frac{\partial \{x\}}{\partial t} + [K] \{x\} = \{F\} \quad (2.1)$$

โดย $[M]$ คือ เมทริกซ์มวล (mass matrix)
 $[D]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วง (damping matrix)
 $[K]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งของสปริง (stiffness matrix)
 $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงหรือโมเมนต์ที่มากระทำ
 $\{x\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดเพื่อใช้หาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง $\frac{\partial \{x\}}{\partial t}$ และสอง $\frac{\partial^2 \{x\}}{\partial t^2}$ เทียบกับเวลาหรืออีกนัยหนึ่งคือเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของความถี่และความเร่งตามลำดับ

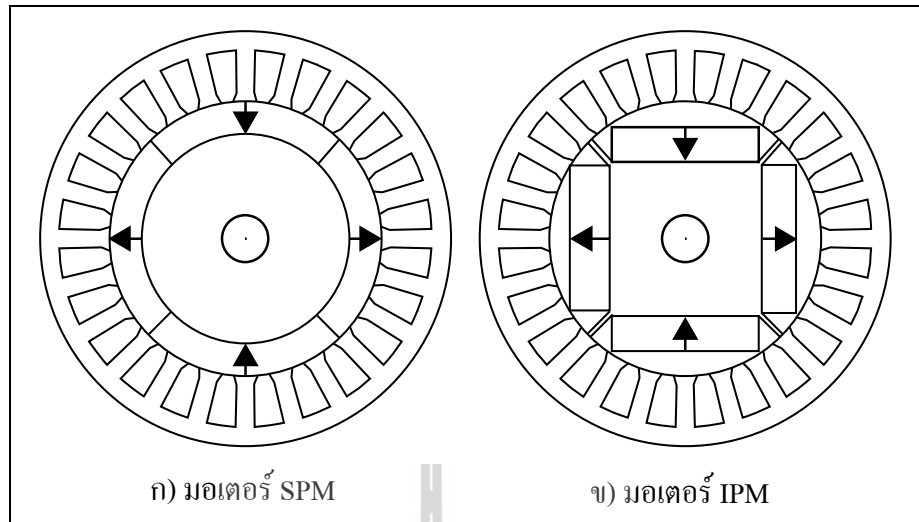
งานวิจัยของ Lim, Kim and Soh (2009) ได้ออกแบบเครื่องลดการสั่น เพื่อลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ สำหรับการคำนวณหาการสั่นสะเทือนที่ใช้สมการที่ (2.1) งานวิจัยของ Chung (2004) ศึกษาการสั่นสะเทือนโดยเปรียบเทียบผลระหว่างมีเครื่องลดการสั่นและไม่มีเครื่องลดการสั่นของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งจากผลการจำลองเมื่อใช้เครื่องลดการสั่นจะทำให้การสั่นลดลงและการสั่นคงที่เร็วขึ้นเมื่อพิจารณาตั้งแต่เริ่มสตาร์ท สำหรับการคำนวณหาการสั่นสะเทือนที่ใช้สมการที่ (2.1) เหมือนกันกับงานวิจัยข้างต้น งานวิจัยของ Neves, Carison and Bastos (1999) ได้คำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยอิทธิพลของแรงแม่เหล็กด้วยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จากผลในการวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์นั้นเกิดจากอิทธิพลของแรงแม่เหล็ก

งานวิจัยของ Kim, Kim, Hwang, Kim, Jeong and Hwang (2001) ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองการสั้นสะเทือนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ระหว่างมอเตอร์สมมูล (12 ขั้ว 9 สล็อต) และมอเตอร์ไม่สมมูล (8 ขั้ว 9 สล็อต) จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้ใช้แรงแม่เหล็กซึ่งนอกจากจะส่งผลให้มอเตอร์หมุนแล้วยังเป็นปัจจัยสำคัญของการสั้นสะเทือนของมอเตอร์ ซึ่งแรงแม่เหล็กคำนวณได้จากค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านดังนี้

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (2.2)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} B_r B_t \quad (2.3)$$

เมื่อ F_r คือแรงแม่เหล็กในแนวรัศมี F_t คือแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัส $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ B_r คือค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี และ B_t คือค่าสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส งานวิจัยของ Kim, Kim, Hwang, Kim and Jung (2001) เปรียบเทียบแรงแม่เหล็กระหว่างมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แบบ SPM และ IPM ดังรูปที่ 2.2 ก) มอเตอร์ SPM คือลักษณะการวางตัวของแม่เหล็กถาวรเรียงตัวเป็นรูปวงกลมตามรูปและมีทิศทางของแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกันไป รูปที่ 2.2 ข) มอเตอร์ IPM คือลักษณะการวางตัวของแม่เหล็กถาวรเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมตามรูปและมีแต่ละด้านเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกันไป สำหรับแรงแม่เหล็กก็ใช้สมการที่ (2.2) และ (2.3) งานวิจัยของ Jiao and Rahn (2004) และงานวิจัยของ Jang and Yoon (1996) ก็ได้ใช้สมการที่ (2.2) และ (2.3) ในการคำนวณแรงแม่เหล็กเหมือนกัน



รูปที่ 2.2 รูปแบบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

สำหรับการคำนวณค่าสนามแม่เหล็ก (B) สามารถดำเนินการได้โดยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (A) ดังนี้

$$B = \nabla \times A \quad (2.4)$$

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์นั้นอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) อันดับสอง ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยมากมาย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Park (1999) งานวิจัยของ Gan, Chau Wang, Chan and Jiang (2000) งานวิจัยของ Jabbar, Phyu, Liu and Bi (2004) งานวิจัยของ Gan, Chau, Chan and Jiang (2000) และงานวิจัยของ Chan, Chau, Jiang, Xia, Zhu and Zhang (1996) ต่างใช้สมการของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_o + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_r คือความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability) โดยจะขึ้นกับวัสดุตัวกลาง H_{cy} คือแรงลอยตัวแม่เหล็กในแนวแกน y และ H_{cx} คือแรงลอยตัวแม่เหล็กในแนวแกน x ซึ่ง

H_{cy} และ H_{cx} เป็นส่วนที่เกิดจากอิทธิพลของแม่เหล็กถาวร (สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรตรงโรเตอร์) จากสมการที่ (2.5) จะเห็นได้ว่าเป็นงานที่พิจารณาในสภาวะคงตัว

สำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณางานในสภาวะชั่วคราว (transient electromagnetic) ซึ่งมีสมการอนุพันธ์ย่อยดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_0 + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity) จากสมการที่ (2.6) เป็นงานสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา จะมีพจน์ที่ขึ้นกับเวลามาเกี่ยวข้องซึ่งจะพิจารณาค่าได้อย่างถูกต้องตั้งแต่ตอนมอเตอร์เริ่มสตาร์ท การเปลี่ยนแปลงของความเร็ว คุณสมบัติต่าง ๆ ตลอดจนการสั่นของมอเตอร์ตั้งแต่ตอนเริ่มสตาร์ทจนกระทั่งมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ยังไม่ได้เน้นพิจารณางานในสภาวะชั่วคราว เพียงแค่พิจารณาในสภาวะคงตัวหรือแค่พิจารณางานขึ้นกับเวลาที่มีความถี่เดียวเท่านั้น

งานวิจัยของ Pillay and Krishnan (1989) และงานวิจัยของ Chan, Jiang, Chen and Chau (1994) ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ เช่น แบบจำลองสมการกระแส สมการแม่เหล็กในแนวรัศมี สมการแม่เหล็กในแนวสัมผัส แรงแม่เหล็กในแนวรัศมีและแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัสเป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยเหล่านี้ทำให้สามารถคำนวณหากระแสในการป้อนเป็นอินพุตให้กับมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่นๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้องระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่นๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันก็จะได้นำมาเป็นแนวทางและตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยนี้จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่ไม่ปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการคำนวณการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยเริ่มพิจารณาตั้งแต่ตอนสตาร์ทซึ่งเป็นงานสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา โดยทั่วไปจะเป็นการคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์เมื่อพิจารณาในสภาวะคงตัวหรือพิจารณางานที่ขึ้นกับเวลาที่มีความถี่เดียวเท่านั้น งานวิจัยชิ้นนี้ยังถือได้ว่าเป็นงานที่พิจารณาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ขึ้นเองสำหรับคำนวณค่า

สนามแม่เหล็กและค่าการสั้นสะเทือน ภายใต้วัตถุประสงค์การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและค่าการสั้นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์อย่างถูกต้องและแม่นยำ



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในงาน และนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัยนั้น ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลักได้แก่ สนามแม่เหล็ก มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจน

3.2 สนามแม่เหล็ก

3.2.1 พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็ก

การบอกถึงปริมาณอย่างหนึ่งอย่างใดของสรรพสิ่งในธรรมชาติ อาจกระทำได้โดยการบอกถึงขนาดแต่เพียงอย่างเดียวซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงสเกลาร์ หรืออาจบอกทั้งขนาดและทิศทางควบคู่กันซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงเวกเตอร์ พื้นฐานสำคัญในการศึกษาสนามแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากทฤษฎีของเวกเตอร์ โดยจะเริ่มต้นด้วยพีชคณิตของเวกเตอร์ ดังนี้

ถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ในระนาบ xyz จะเขียนเวกเตอร์ A ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) ได้ในลักษณะ

$$A = A_x i + A_y j + A_z k \quad (3.1)$$

เมื่อ i j และ k เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ไปในทิศทางบวกของแนวแกน x y และ z ตามลำดับ โดยมี A_x A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉากของ A ในปริภูมิ

ถ้าให้ A และ B คือเวกเตอร์แล้ว $A \cdot B$ คือการคูณกันแบบดอท (dot product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงสเกลาร์ (scalar product) นิยามโดย

$$A \cdot B = |A||B|\cos\theta = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \quad (3.2)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ A กับ B และ $0 \leq \theta \leq \pi$ ส่วน $A \times B$ คือการคูณกันแบบครอส (cross product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงเวกเตอร์ (vector product) นิยามโดย

$$A \times B = |A||B|\sin\theta(\pm n) \quad (3.3)$$

เมื่อ n นิยามให้เป็นเวกเตอร์ตั้งฉากกับเวกเตอร์ A และ B โดยเครื่องหมาย \pm ใช้กำหนดทิศทางของผลคูณเวกเตอร์แบบครอส โดยถ้าเวกเตอร์ A หมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ เข้าหาเวกเตอร์ B จะกำหนดให้ n เป็นบวก ในทางตรงกันข้ามก็กำหนดให้เป็นลบ หรือยึดหลักการของสกรู โดยถ้าขันสกรูให้เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัตถุจะกำหนดให้ n เป็นบวก และถ้าคลายสกรูออกจากเนื้อวัตถุจะกำหนดให้เป็นลบ ซึ่งเทียบได้กับกฎมือขวานั้นเอง

$$A \times B = (A_y B_z - A_z B_y)i + (A_z B_x - A_x B_z)j + (A_x B_y - A_y B_x)k \quad (3.4)$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$A \times B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อทราบวิธีคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์และผลคูณเชิงเวกเตอร์ซึ่งเป็นพื้นฐานเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจึงดำเนินการศึกษาถึงการหาค่าเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชันสเกลาร์และฟังก์ชันเวกเตอร์ (ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย, 2545) ซึ่งจะกล่าวต่อไปดังนี้

ถ้าให้ f เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ 3 ตัวแปร $f(x, y, z)$ แล้ว ค่าเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชัน f สามารถเขียนได้ดังนี้

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz \quad (3.6)$$

และจากการกำหนดตัวดำเนินการอนุพันธ์ที่เรียกว่าเดล (del: ∇) ดังนี้

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.7)$$

ดังนั้นเมื่อนำ ∇ กระทำต่อฟังก์ชัน f จะได้ ∇f ซึ่งเรียกว่าเกรเดียนต์ (gradient) ของฟังก์ชัน f โดยจะมีความหมายในลักษณะ

$$\nabla f = i \frac{\partial f}{\partial x} + j \frac{\partial f}{\partial y} + k \frac{\partial f}{\partial z} \quad (3.8)$$

และถ้ากำหนดให้ A คือเวกเตอร์แล้ว $\nabla \cdot A$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบคอตจจะเรียกว่าไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ของ A นิยามโดย

$$\nabla \cdot A = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (3.9)$$

ส่วน $\nabla \times A$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบครอสจจะเรียกว่าเคิร์ล (curl) ของ A นิยามโดย

$$\nabla \times A = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) k \quad (3.10)$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$\nabla \times A = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

ไดเวอร์เจนซ์และเคิร์ลเป็นเพียงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เราสามารถใช้เดลดำเนินการสองครั้งเพื่อให้ได้อนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งเรียกว่าลาปลาเซียน (laplacian: ∇^2) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.12)$$

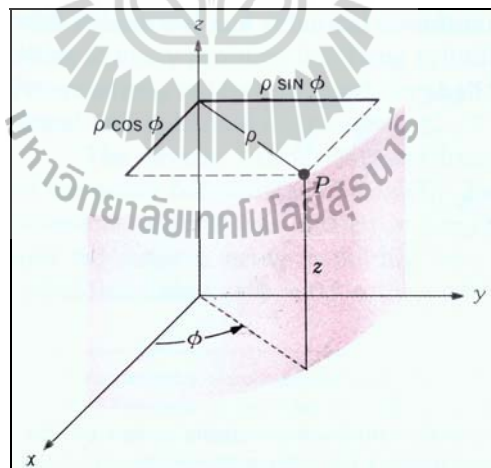
ให้ A คือเวกเตอร์ จะได้ลาปลาเซียนของ A คือ

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} i + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} j + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} k \quad (3.13)$$

เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ที่สำคัญต่อการดำเนินการอนุพันธ์อันดับสองมีอยู่ 2 เอกลักษณ์ดังแสดงด้วยสมการที่ (3.14) และ (3.15) ดังนี้คือ

$$\nabla \cdot (\nabla \times A) = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกระบอก

การแปลงระบบพิกัดที่มีพิกัดตั้งฉากซึ่งกันและกัน (William, 1989) จากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.1 สามารถแสดงได้โดยถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉาก คือ

$$A = A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z \quad (3.16)$$

เมื่อ \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y และ \mathbf{a}_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_x , A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉาก ซึ่งจะต้องถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก โดยถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกระบอก คือ

$$A = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_\phi \mathbf{a}_\phi + A_z \mathbf{a}_z \quad (3.17)$$

เมื่อ \mathbf{a}_ρ , \mathbf{a}_ϕ และ \mathbf{a}_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_ρ , A_ϕ และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า ณ จุด $P(x, y, z)$ หรือ $P(\rho, \phi, z)$ จะได้ว่า

$$x = \rho \cos \phi, \quad y = \rho \sin \phi, \quad z = z$$

จะเห็นว่าตัวแปร x, y, z อยู่ในเทอมของตัวแปร ρ, ϕ, z และในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{y}{x}, \quad z = z$$

ซึ่งจะเห็นว่าตัวแปร ρ , ϕ และ z อยู่ในเทอมของตัวแปร x , y และ z

ในการเปลี่ยนจากระบบพิกัดหนึ่งไปเป็นอีกพิกัดหนึ่ง จะใช้หลักการคูณกันของเวกเตอร์แบบดอท การเปลี่ยนพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกจะต้องหาค่า A_ρ และ A_ϕ ที่อยู่ในเทอมของ A_x และ A_y โดยที่ $A_z = A_z$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$A_\rho = A \cdot \mathbf{a}_\rho = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\rho = A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\rho + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\rho$$

$$A_\rho = A_x \cos \phi + A_y \sin \phi \quad (3.18)$$

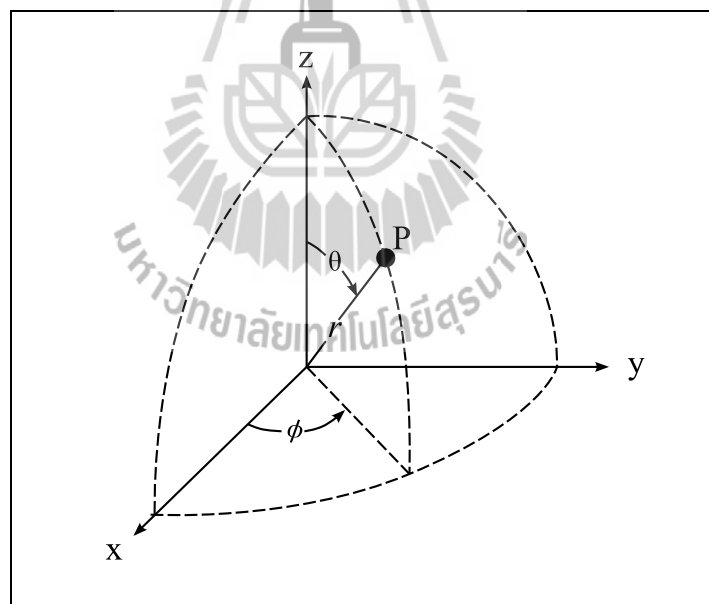
$$A_\phi = A \cdot \mathbf{a}_\phi = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\phi = A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\phi + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\phi$$

$$A_\phi = -A_x \sin\phi + A_y \cos\phi \quad (3.19)$$

ส่วนการแปลงจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.2 สามารถแสดงได้โดย ถ้าให้ A เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกลม คือ

$$A = A_r \mathbf{a}_r + A_\theta \mathbf{a}_\theta + A_\phi \mathbf{a}_\phi \quad (3.20)$$

เมื่อ \mathbf{a}_r , \mathbf{a}_θ และ \mathbf{a}_ϕ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_r , A_θ และ A_ϕ เป็นส่วนประกอบพิกัดทรงกลม



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกลม

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า ณ จุด $P(x, y, z)$ หรือ $P(r, \theta, \phi)$ จะได้ว่า

$$x = r \sin\theta \cos\phi, \quad y = r \sin\theta \sin\phi, \quad z = r \cos\theta$$

จะเห็นว่าตัวแปร x , y และ z อยู่ในเทอมของตัวแปร r , θ และ ϕ ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \theta = \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

ซึ่งจะเห็นว่าตัวแปร r , θ และ ϕ อยู่ในเทอมของตัวแปร x , y และ z

การเปลี่ยนพิกัดจากไปเป็นพิกัดทรงกลม จะต้องหาค่า A_r , A_θ และ A_ϕ ที่อยู่ในเทอมของ A_x , A_y และ A_z ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$A_r = A \cdot a_r = (A_x a_x + A_y a_y + A_z a_z) \cdot a_r = A_x a_x \cdot a_r + A_y a_y \cdot a_r + A_z a_z \cdot a_r$$

$$A_r = A_x \sin\theta \cos\phi + A_y \sin\theta \sin\phi + A_z \cos\theta \quad (3.21)$$

$$A_\theta = A \cdot a_\theta = (A_x a_x + A_y a_y + A_z a_z) \cdot a_\theta = A_x a_x \cdot a_\theta + A_y a_y \cdot a_\theta + A_z a_z \cdot a_\theta$$

$$A_\theta = A_x \cos\theta \cos\phi + A_y \cos\theta \sin\phi + A_z \sin\theta \quad (3.22)$$

$$A_\phi = A \cdot a_\phi = (A_x a_x + A_y a_y + A_z a_z) \cdot a_\phi = A_x a_x \cdot a_\phi + A_y a_y \cdot a_\phi + A_z a_z \cdot a_\phi$$

$$A_\phi = -A_x \sin\phi + A_y \cos\phi \quad (3.23)$$

3.2.2 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

เมื่อทราบทฤษฎีและคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่จำเป็นแล้ว ต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (เฉลิมพล น้ำค้าง, 2538) ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบเวกเตอร์จากข้างต้น

ประจุไฟฟ้า (electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้น ๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (electric force) และถ้าหากประจุ

ไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วย จะเกิดแรงที่เรียกว่าแรงแม่เหล็ก (magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force) ทุก ๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรืออาจเรียกว่าสนามไฟฟ้า (electric field: E) อยู่ปริมาณหนึ่ง ที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่าสนามแม่เหล็ก (magnetic field: B) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่น ๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลง ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

- 1) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น
- 2) เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)
- 3) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)
- 4) เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลางสามารถแสดงได้โดย

$$B = \mu H \quad (3.24)$$

เมื่อ μ คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$ โดยที่ μ_0 คือความซาบซึมได้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} H / m$ และ μ_r คือความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability) โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ส่วน H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) และจากการศึกษาคุณสมบัติของ B พบว่า

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.25)$$

ซึ่งสมการที่ (3.25) นี้คือกฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยถ้านำไปประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ในสมการที่ (3.14) จะสรุปได้ว่าหากไดเวอร์เจนซ์ของ B เท่ากับศูนย์แล้ว ย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งที่เมื่อกระทำเคิร์ลแล้วได้ผลเป็นเวกเตอร์ B เวกเตอร์ใดที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ B จะเรียกว่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential: A) ดังนี้

$$B = \nabla \times A \quad (3.26)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก B จึงเลี่ยงโดยการไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A เท่านั้น

3.3 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

ในบรรดาเครื่องต้นกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน มอเตอร์จะเป็นเครื่องต้นกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งนี้เป็นเพราะมอเตอร์สามารถผันแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้โดยง่าย และมีราคาของพลังงานถูกเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ โดยสามารถแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าตามระบบไฟที่ใช้ ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC motor) เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและมีความเข้าใจในงานวิจัย จึงขอจำแนกชนิดของมอเตอร์แต่ละประเภทดังนี้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีด้วยกันหลายแบบ ถ้าจะแบ่งตามการสร้างสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ ก็จะแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) แบบที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก (permanent DC motor) แบบนี้จะมีแท่งแม่เหล็กอย่างน้อยสองแท่ง เป็นส่วนประกอบของสเตเตอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กใช้ในของเด็กเล่น หรือเครื่องมือขนาดเล็ก ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้สามารถแยกได้อีกตามลักษณะการรับกระแสไฟฟ้า คือ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงมีแปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงชนิดนี้จะใช้แปรงถ่านเป็นตัวกำหนดทิศทางของกระแส เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงไร้แปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงชนิดนี้จะไม่ใช้แปรงถ่านในการกำหนดทิศทางของกระแส แต่จะใช้วงจรควบคุมเป็นตัวกำหนดทิศทางของกระแส
- 2) แบบที่ใช้ขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็ก (wound DC motor) แบบนี้จะมีขดลวดสเตเตอร์ ในการสร้างสนามแม่เหล็ก และมีขั้วต่อออกเพื่อรับการจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งสามารถต่อได้ 2 ลักษณะคือต่ออนุกรมกับขดลวดโรเตอร์ เราเรียกว่า ซีรีส์มอเตอร์ (series motor) และต่อแบบ

ขนานกับโรเตอร์ เรียกว่า ชันท์มอเตอร์ (shunt motor) โดยมอเตอร์แบบนี้จะใช้งานพิเศษที่ต้องการแรงบิดสูง หรือ งานที่ต้องการความเร็วรอบที่คงที่และปรับเปลี่ยนได้ง่ายโดยใช้วิธีควบคุมกระแสที่จ่ายให้ขดลวดนี้

3) แบบใช้ขดลวดพันพิเศษเพื่อหมุนแบบที่ละขั้นทีละจุด มักเรียกกันว่า สเตปปิ่งมอเตอร์ (stepping motor) ซึ่งจะใช้ในการควบคุมแบบพิเศษ เช่น แขนกล หรืออุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมการหมุนแบบละเอียด

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

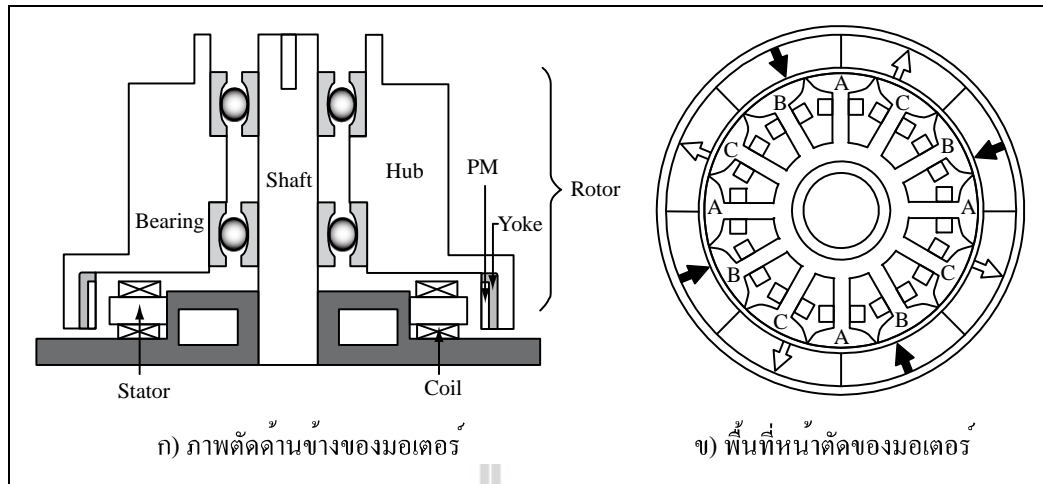
1) มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor)

2) ซิงโครนัสมอเตอร์ (synchronous motor)

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สนใจมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนฮาร์ดดิสก์หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor: BLDCM) ชนิด 3 เฟส แรงดัน 12 V ซึ่งจะมีความแตกต่างกับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงไร้แปรงถ่านทั่วไป คือ สปินเดิลมอเตอร์จะมีแม่เหล็กถาวรบริเวณโรเตอร์ เป็นที่ทราบกันดีว่ามอเตอร์ประเภทนี้จะหมุนด้วยอัตราเร็วที่สูงแต่ก็มีแรงบิดที่ต่ำ สำหรับมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์หรือสปินเดิลมอเตอร์นั้น ไม่ต้องการแรงบิดที่สูงมากนักในการทำงานแต่จำเป็นต้องหมุนด้วยอัตราเร็วที่สูง ดังนั้น BLDCM จึงเหมาะสำหรับงานนี้

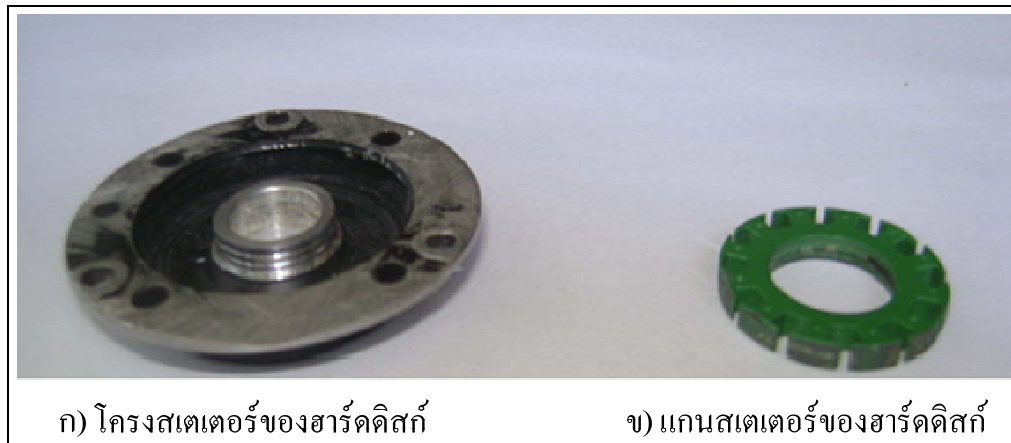
3.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

BLDCM ในฮาร์ดดิสก์มีโครงสร้างแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ สเตเตอร์และโรเตอร์ดังรูปที่ 3.3 ก) ส่วนที่เป็นโรเตอร์จะอยู่รอบนอก และส่วนที่เป็นสเตเตอร์จะยึดติดกับโครงของมอเตอร์อยู่รอบในของมอเตอร์ ส่วนรูปที่ 3.3 ข) เป็นพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ (Jang, Chang, Hong and Kim, 2002) ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างและขนาดของมอเตอร์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในซาร์คิติก

1) สเตเตอร์ซึ่งจะประกอบด้วย โครงสเตเตอร์ (frame or yoke) แกนสเตเตอร์ (stator core) และขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) โครงสเตเตอร์ทำด้วยเหล็กถลุงมีเนื้อห่อรูปทรงคล้ายจานดังรูปที่ 3.4 ก) ซึ่งมีความแข็งแรงไม่มากนักแต่น้ำหนักที่เบาเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อ โครงของสเตเตอร์นี้จะยึดติดกับโครงของซาร์คิติกซึ่งฐานของโครงสเตเตอร์จะอยู่บริเวณขอบจานไว้ยึดติดกับโครงของซาร์คิติก มีรูทางเดินสายไฟออกสู่วงจรรภายนอกอยู่ตรงแฉกของจานดังรูป และโครงจะมีหน้าที่จับยึดแกนสเตเตอร์ให้แน่นอยู่กับที่ ส่วนแกนสเตเตอร์ทำจากแผ่นลามิเนตให้ความหนาของแม่เหล็กมีค่าสูง ซึ่งจะมีความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และกระแสไหลวน (eddy current) ต่ำ แกนสเตเตอร์ถูกเจาะตรงกลางให้มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนเพื่อใช้ยึดกับโครงสเตเตอร์ โดยผิวด้านนอกถูกเจาะเป็นร่องคันด้วยฟันของสเตเตอร์โดยรอบ เพื่อใช้เป็นที่ยึดสำหรับการพันขดลวดสเตเตอร์ แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนสเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.4 ข)

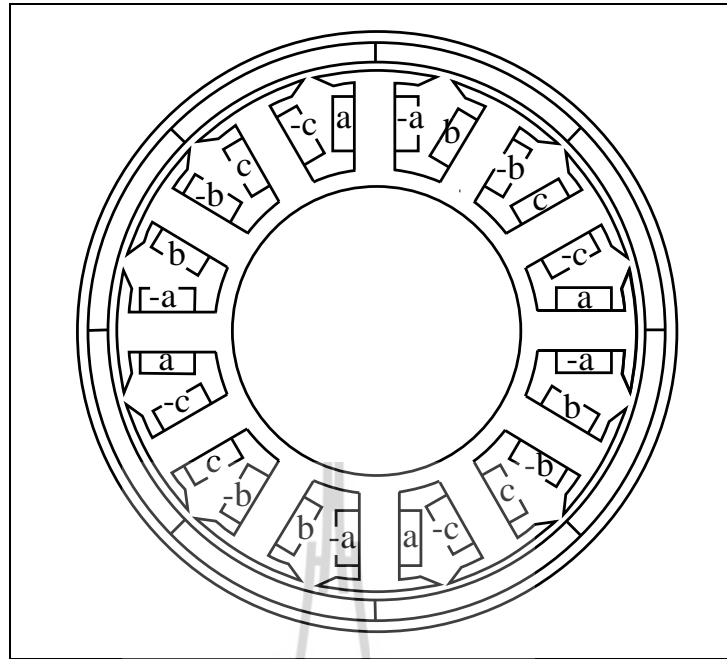


ก) โครงสเตเตอร์ของฮาร์ดดิสก์

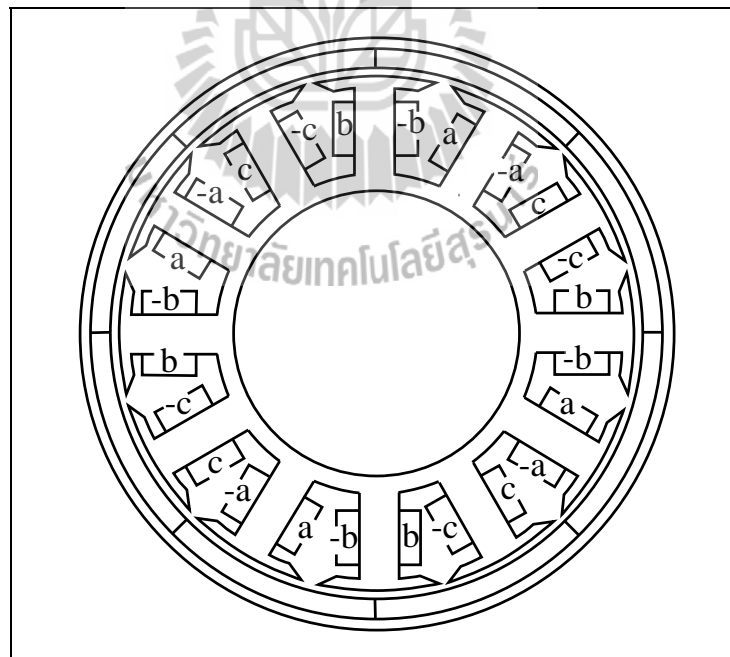
ข) แกนสเตเตอร์ของฮาร์ดดิสก์

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบสเตเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

ส่วนขดลวดสเตเตอร์ จะเป็นลวดทองแดงเส้นเล็ก ๆ ที่ใช้พันเป็นขดลวด เคลือบด้วยน้ำมันวานิชที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยแบ่งจำนวนขดลวดออกเป็นสามชุด ซึ่งแต่ละชุดจะเรียกว่าเฟส ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟสจะนำมาต่อกันแบบสตาร์ (Y) หรือเดลตา (Δ) สำหรับ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปแล้วนิยมต่อเฟสแบบสตาร์เพราะมอเตอร์มีขนาดเล็ก การต่อเฟสแบบสตาร์ซึ่งมีจุดต่อขดลวดเพียงจุดเดียวกระทำได้ง่ายกว่าการต่อแบบเดลตาที่ต้องมีจุดต่อขดลวดถึงสามจุด แล้วต่อออกสู่วงจรภายนอก การสร้างขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟสเกิดจากการพันต่อกันของขดลวดเฟสนั้น ๆ เพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็ก ขั้วเหนือ (N) และ ขั้วใต้ (S) สลับกันไปเรื่อย ๆ เป็นคู่ ๆ ดังรูปที่ 3.5 การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก (positive sequence) ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 3.6 การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ (negative sequence) ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งจะได้กล่าวถึงการหมุนของมอเตอร์ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.5 การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก



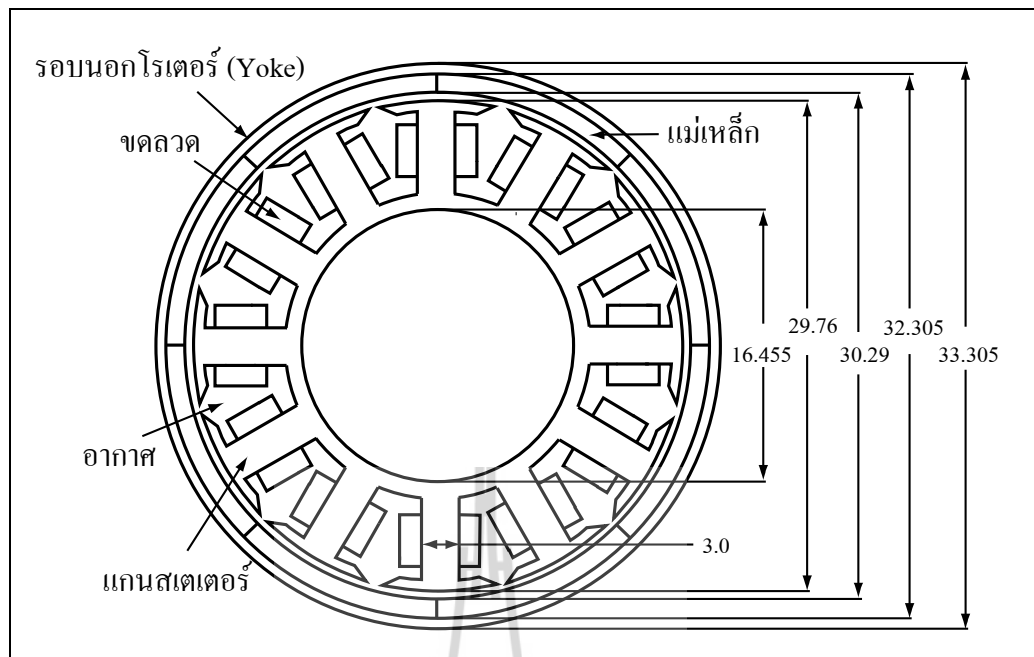
รูปที่ 3.6 การพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ

2) โรเตอร์ ลักษณะโครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์จะประกอบไปด้วย โครงโรเตอร์ แม่เหล็กถาวร และเพลลา โครงโรเตอร์ทำด้วยเหล็กอลูมิเนียมหล่อเหมือนโครงสเตเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7 ก) ซึ่งจะมีแม่เหล็กถาวรวางเรียงสลับขั้วกันอยู่ด้านใน สำหรับเพลลานั้นมีหน้าที่ในการยึดส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์เข้าด้วยกันนอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่ทำให้มอเตอร์หมุนขึ้นอีกด้วยดังรูปที่ 3.7 ข)



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

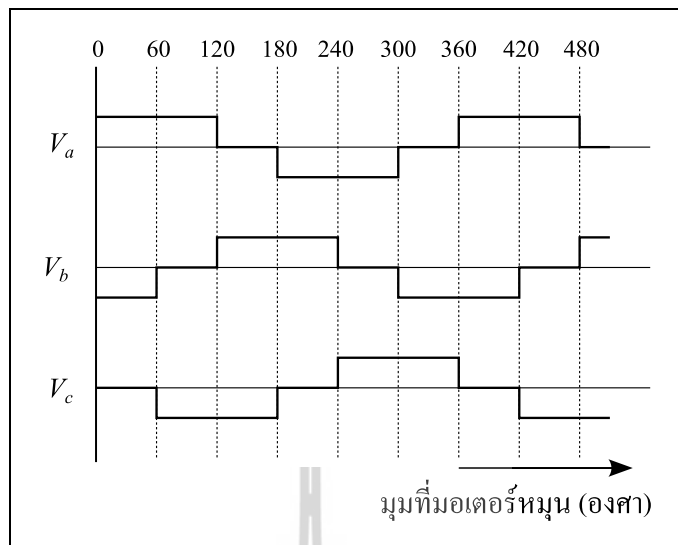
สำหรับขนาดและโครงสร้างของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์นั้นจะพิจารณาในระนาบ 2 มิติเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเมื่อมองตามแนวแกนโรเตอร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการคำนวณหาการสัมผัสเทียนของมอเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์พร้อมขนาด (mm)

3.3.2 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

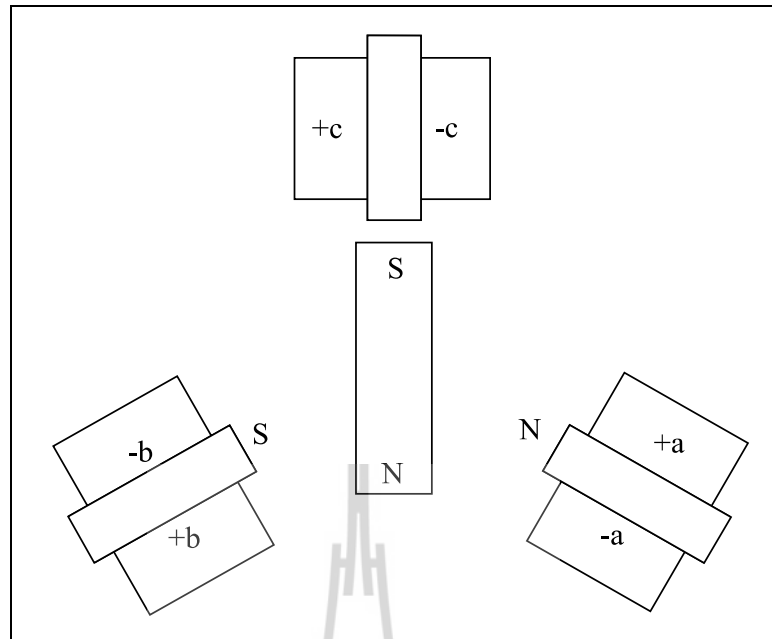
การทำงานของ BLDCM ได้อาศัยกฎพื้นฐานการผันแปลงพลังงานดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการหมุนของมอเตอร์เกิดจากหลักการง่าย ๆ คือ การผลักกันและดึงดูดกันของขั้วแม่เหล็ก ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นจาก 2 ส่วน คือ สนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนสเตเตอร์ที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟที่ขดลวดทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กดังกล่าว และขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรบริเวณโรเตอร์ ต่อไปจะอธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส 3 สล็อต เพื่อเป็นพื้นฐานและความเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์แสดงด้วยรูปที่ 3.9



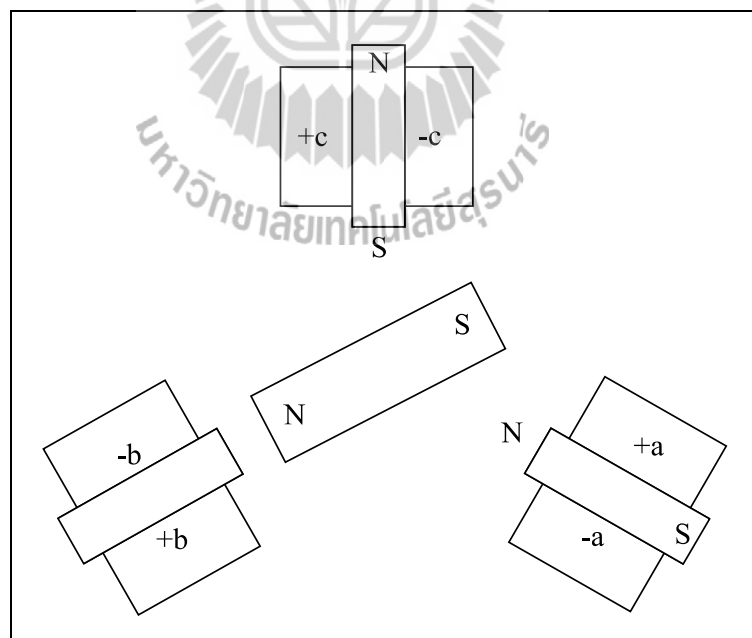
รูปที่ 3.9 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวกและการพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ ซึ่งจะมีผลต่อทิศทางหมุนของมอเตอร์ โดยจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ซึ่งจะได้อธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์โดยละเอียดซึ่งจะแยกการพิจารณาดังนี้

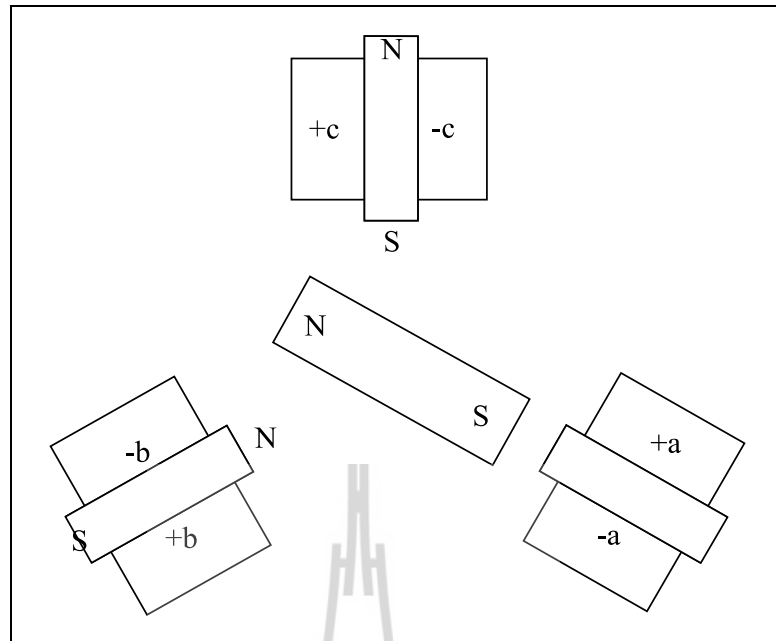
1) หลักการทำงานของ BLDCM เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.15 คือการสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก โดยรับแรงดันอินพุตดังรูปที่ 3.9 โดยรูปที่ 3.10 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา รูปที่ 3.11 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา รูปที่ 3.12 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา รูปที่ 3.13 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา รูปที่ 3.14 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา และรูปที่ 3.15 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา



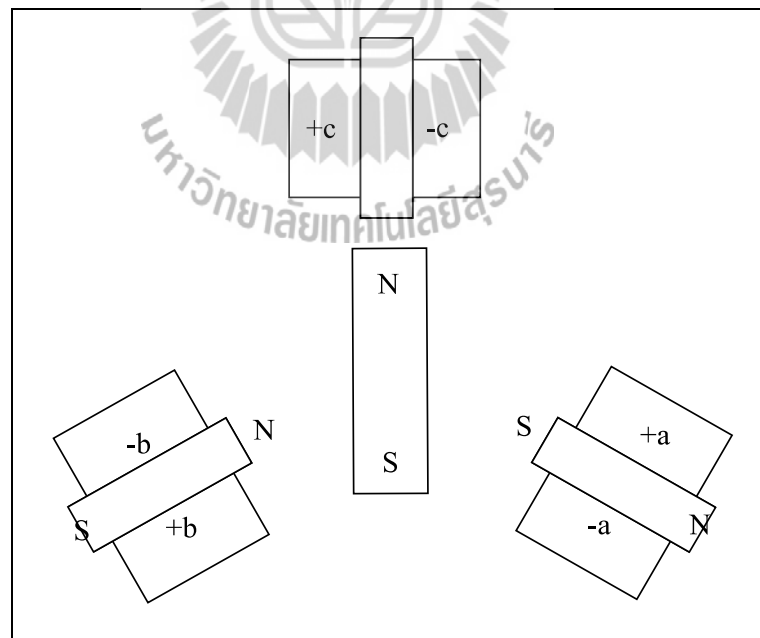
รูปที่ 3.10 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา



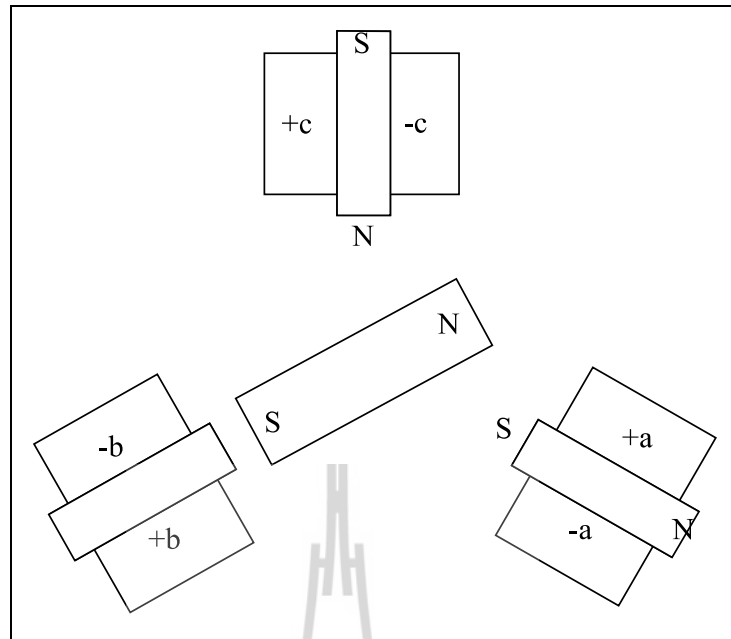
รูปที่ 3.11 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา



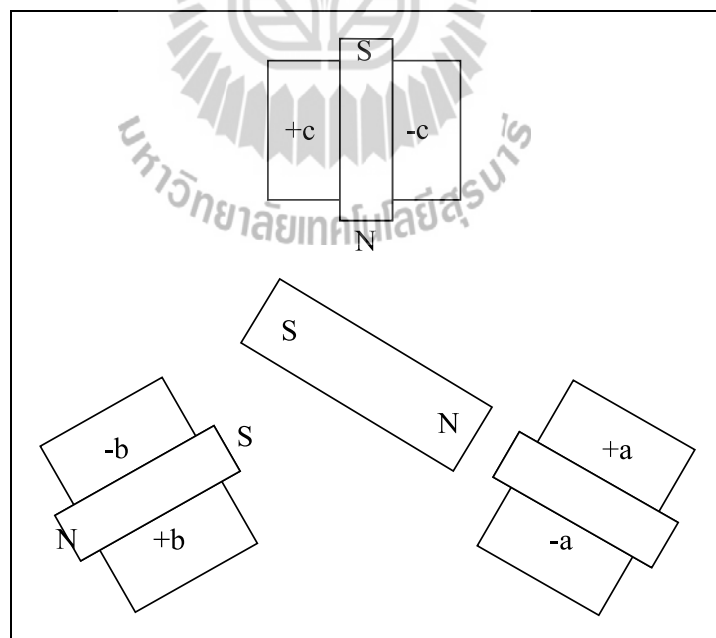
รูปที่ 3.12 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อฟังก์ชันคลาดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา



รูปที่ 3.13 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อฟังก์ชันคลาดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา



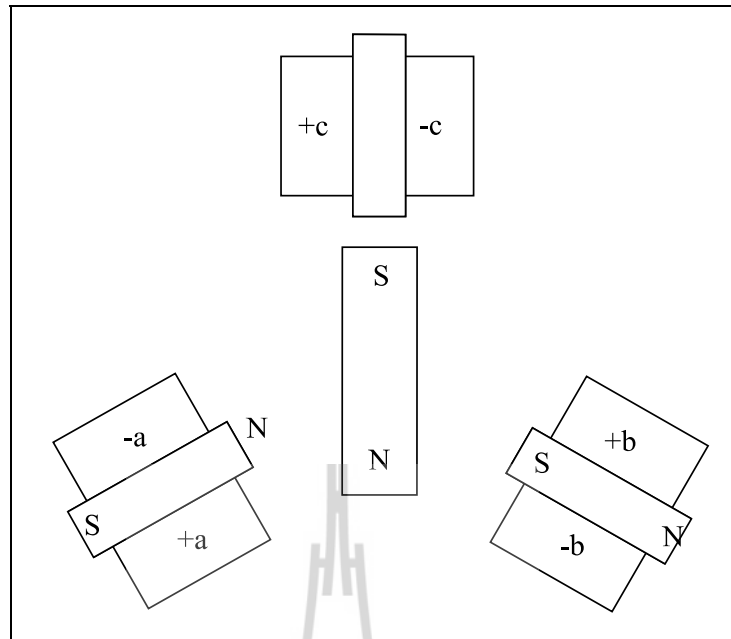
รูปที่ 3.14 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา



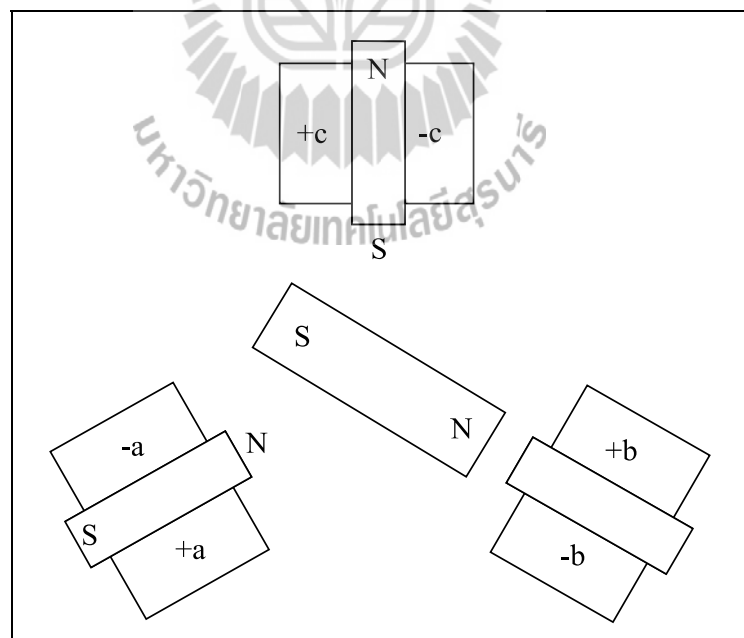
รูปที่ 3.15 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับบวก
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา

จากรูปที่ 3.10 แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = +DC$, $V_b = -DC$ และ $V_c = 0$ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กที่บริเวณสเตเตอร์ดังรูป ซึ่งโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรวางตัวและมีขั้วดังรูป ทำให้เกิดการดึงดูดและผลักกันของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันจะผลักกัน และขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันจะดึงดูดซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ในจังหวะนี้มอเตอร์จะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่วนรูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.15 ก็ใช้หลักการเดียวกัน โดยรูปที่ 3.11 รับแรงดันอินพุตอยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = +DC$, $V_b = 0$ และ $V_c = -DC$ รูปที่ 3.12 รับแรงดันอินพุตอยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = 0$, $V_b = +DC$ และ $V_c = -DC$ รูปที่ 3.13 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = -DC$, $V_b = +DC$ และ $V_c = 0$ รูปที่ 3.14 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = -DC$, $V_b = 0$ และ $V_c = +DC$ และรูปที่ 3.15 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = 0$, $V_b = -DC$ และ $V_c = +DC$ ซึ่งแรงดันอินพุตแต่ละรูปจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณสเตเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักและดึงดูดกันของขั้วแม่เหล็กกับโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนตัวของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อพิจารณาแต่ละรูปแล้วจะสังเกตเห็นว่าโรเตอร์จะหมุนตัวในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

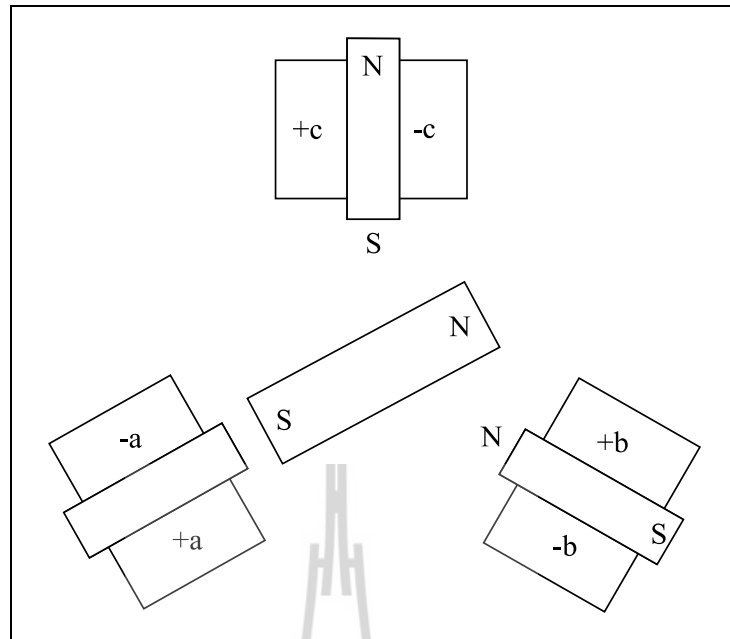
2) หลักการทำงานของ BLDCM เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.21 คือการสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ โดยรับแรงดันอินพุตดังรูปที่ 3.9 โดยรูปที่ 3.16 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา รูปที่ 3.17 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา รูปที่ 3.18 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา รูปที่ 3.19 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา รูปที่ 3.20 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา และรูปที่ 3.21 รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา



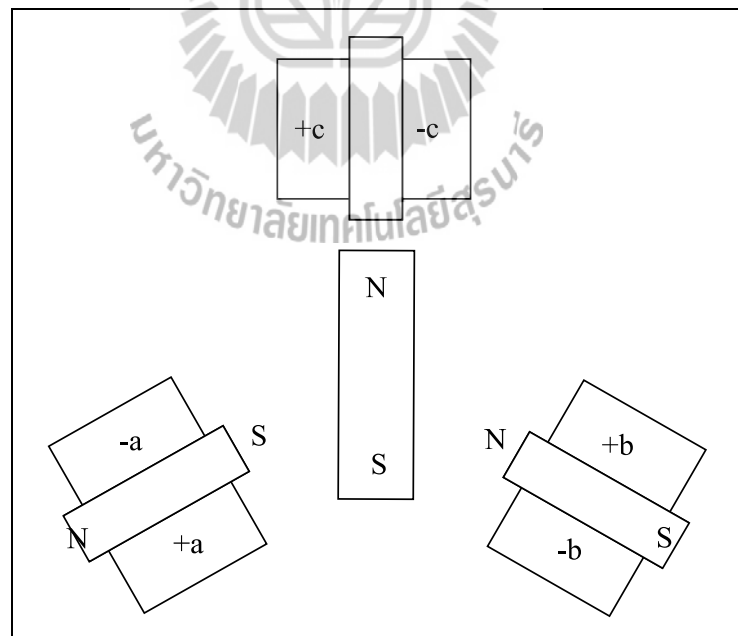
รูปที่ 3.16 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา



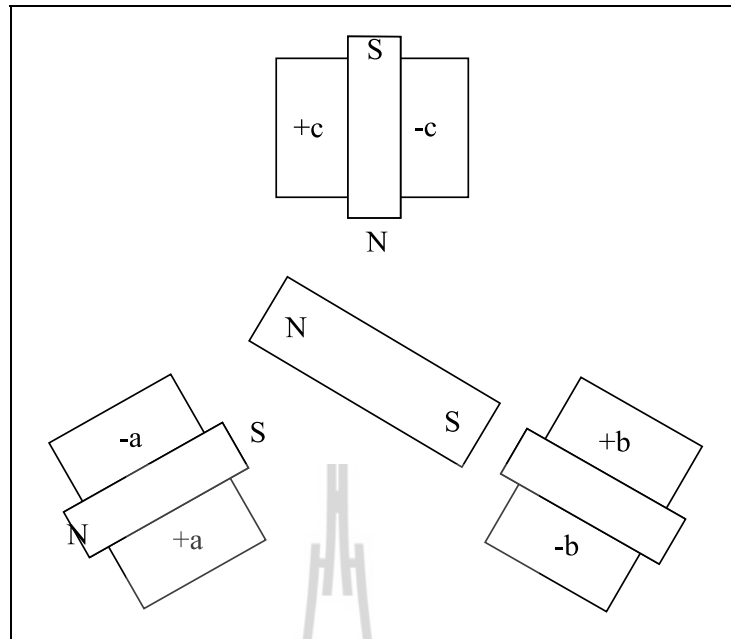
รูปที่ 3.17 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา



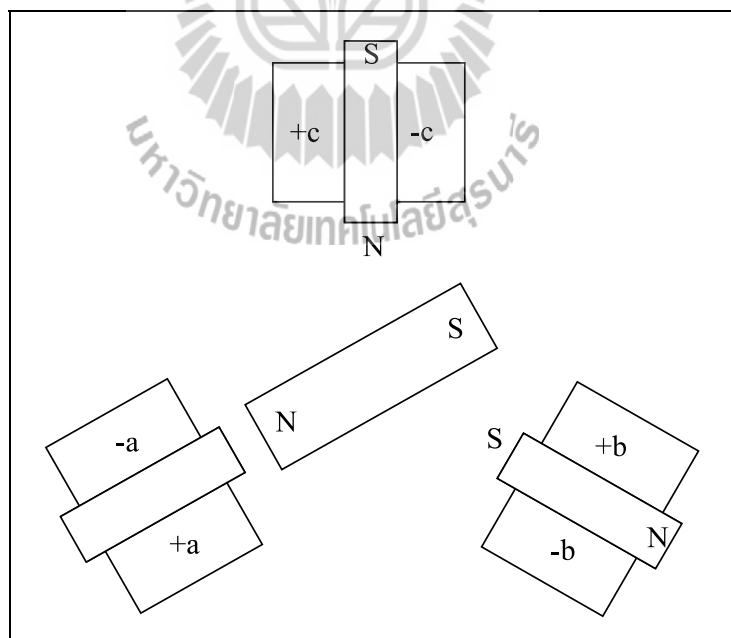
รูปที่ 3.18 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา



รูปที่ 3.19 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา



รูปที่ 3.20 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา



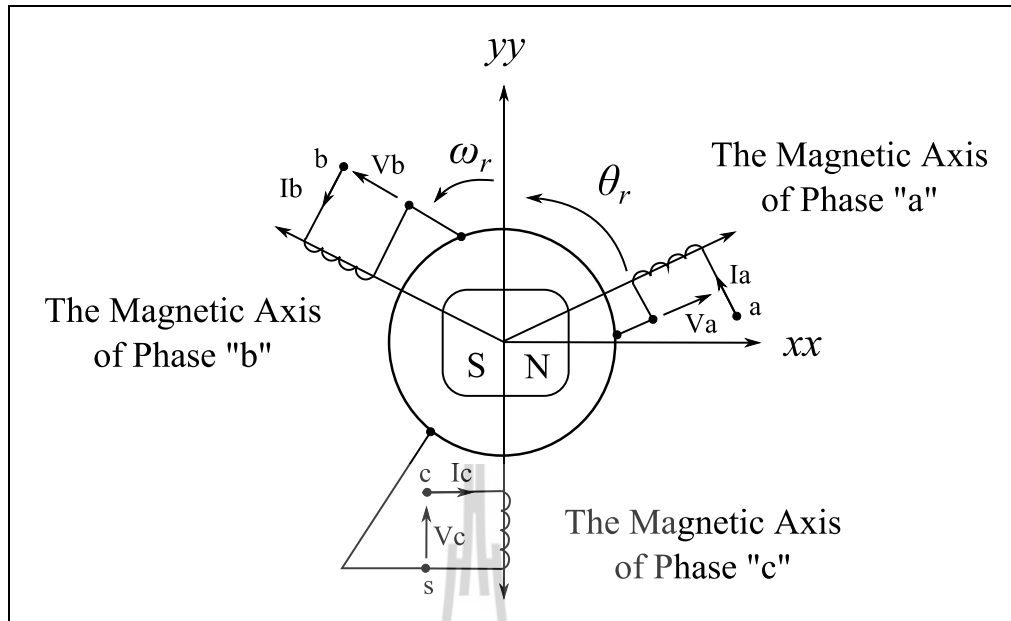
รูปที่ 3.21 การสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพันขดลวดเรียงเฟสแบบลำดับลบ
ที่รับแรงดันในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา

จากรูปที่ 3.16 แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ถึง 60 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = +DC$, $V_b = -DC$ และ $V_c = 0$ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กที่บริเวณสเตเตอร์ดังรูป ซึ่งโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรวางตัวและมีขั้วดังรูป ทำให้เกิดการดึงดูดและผลัดกันของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันจะผลัดกันและขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันจะดึงดูดซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ในจังหวะนี้มอเตอร์จะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.21 ก็ใช้หลักการเดียวกัน โดยรูปที่ 3.17 รับแรงดันอินพุตอยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ถึง 120 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = +DC$, $V_b = 0$ และ $V_c = -DC$ รูปที่ 3.18 รับแรงดันอินพุตอยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ถึง 180 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = 0$, $V_b = +DC$ และ $V_c = -DC$ รูปที่ 3.19 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา ถึง 240 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = -DC$, $V_b = +DC$ และ $V_c = 0$ รูปที่ 3.20 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา ถึง 300 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = -DC$, $V_b = 0$ และ $V_c = +DC$ และรูปที่ 3.21 รับแรงดันอินพุตที่อยู่ในช่วงที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา ถึง 360 องศา ซึ่งมีแรงดันเฟส $V_a = 0$, $V_b = -DC$ และ $V_c = +DC$ ซึ่งแรงดันอินพุตแต่ละรูปจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณสเตเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการผลัดและดึงดูดกันของขั้วแม่เหล็กกับโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนตัวของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อพิจารณาแต่ละรูปแล้วจะสังเกตเห็นว่าโรเตอร์จะหมุนตัวในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

3.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ในซาร์คิสต์หรือสปินเดิลมอเตอร์เป็นมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงไร้แปรงถ่าน ชนิด 3 เฟส ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ BLDCM สามารถพิจารณาจากซิงโครนัสมอเตอร์ 3 เฟส (Chan, Jiang, Wang and Chau, 1994) และ (Pillay and Krishnan, 1989) ซึ่งดูได้จากองค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในรูปที่ 3.22 โดยใช้คุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ก) เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบสตาร์ (Y)
- ข) ขั้วแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์เป็นแบบเซเลียมท์โพล
- ค) ไม่สนใจค่าจากผลการอ้อมตัวของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- ง) ไม่สนใจค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (iron losses) และกำลังงานสูญเสียทางกล (mechanical losses)



รูปที่ 3.22 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงในระนาบแต่ละเฟส

จากรูปที่ 3.22 จะได้สมการแรงดันแต่ละเฟสดังนี้

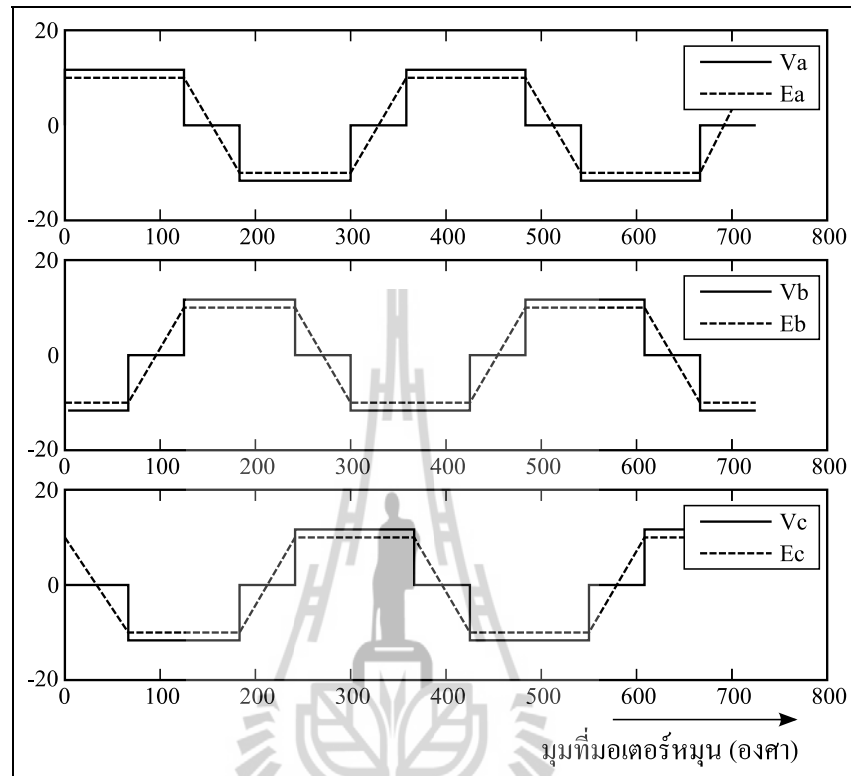
$$V_a = R_a I_a + \frac{d}{dt} \lambda_a + E_a \quad (3.27)$$

$$V_b = R_b I_b + \frac{d}{dt} \lambda_b + E_b \quad (3.28)$$

$$V_c = R_c I_c + \frac{d}{dt} \lambda_c + E_c \quad (3.29)$$

เมื่อ R_a , R_b และ R_c คือความต้านทานเฟส a , b และ c ตามลำดับ I_a , I_b และ I_c คือกระแสของเฟส a , b และ c ตามลำดับ V_a , V_b และ V_c คือแรงดันของเฟส a , b และ c ตามลำดับ มีความถี่ขึ้นอยู่ด้วยความเร็วของโรเตอร์ (ω_r) และแรงดันจะมีระยะห่างระหว่างเฟส 120 องศาซึ่งกันและกัน E_a , E_b และ E_c คือแรงดันต้านกลับซึ่งจะมีลักษณะดังแสดงด้วยรูปที่ 3.23 แรงดันต้านกลับและแรงดันแต่ละเฟสเทียบกับมุมที่โรเตอร์หมุนซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.30) โดยขนาดของแรงดันต้านกลับพีค (E_p) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

ที่ (3.31) สำหรับ λ_a , λ_b และ λ_c คือ ฟลักซ์ลิงก์เกจ (flux linkages) ของมอเตอร์แต่ละเฟสอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.32), (3.33) และ (3.34)



รูปที่ 3.23 แรงดันต้านกลับและแรงดันแต่ละเฟสเทียบกับมุมที่โรเตอร์หมุน

$$E_\phi = \frac{l_\phi}{S_\phi} \left(\iint_{\Omega_\phi^+} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega - \iint_{\Omega_\phi^-} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega \right) \quad (3.30)$$

$$E_b = k_b \omega_r \quad (3.31)$$

$$\lambda_a = L_{aa} I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c \quad (3.32)$$

$$\lambda_b = L_{ba} I_a + L_{bb} I_b + L_{bc} I_c \quad (3.33)$$

$$\lambda_c = L_{ca}I_a + L_{cb}I_b + L_{cc}I_c \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.30) I_ϕ คือของยาวของแกนสแตเตอร์แต่ละซี่ที่เกิดจากการพันขดลวดในทิศทางกระแสพุ่งเข้า (Ω_ϕ^+) และทิศทางกระแสพุ่งออก (Ω_ϕ^-), S_ϕ คือพื้นที่เฉลี่ยของขดลวดแต่ละเฟสที่พันตามทิศ Ω_ϕ^+ และ Ω_ϕ^- ตามลำดับ จากสมการที่ (3.31) คือการหาขนาดของแรงดันต้านกลับฟลัก (E_p) เมื่อ k_b คือค่าคงที่ของแรงดันต้านกลับและ ω_r คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป และจากสมการที่ (3.32) ถึง (3.34) เมื่อ $L_{ab} = L_{ba}$, $L_{ac} = L_{ca}$ และ $L_{cb} = L_{bc}$ คือความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส กำหนดให้ $L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = M$, $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$ และ $R_a = R_b = R_c = R$ แทนสมการที่ (3.32), (3.33) และ (3.34) ลงในสมการที่ (3.27), (3.28) และ (3.29) ตามลำดับจะได้

$$V_a = RI_a + \frac{dLI_a}{dt} + \frac{dMI_b}{dt} + \frac{dMI_c}{dt} + E_a \quad (3.35)$$

$$V_b = RI_b + \frac{dMI_a}{dt} + \frac{dLI_b}{dt} + \frac{dMI_c}{dt} + E_b \quad (3.36)$$

$$V_c = RI_c + \frac{dMI_a}{dt} + \frac{dMI_b}{dt} + \frac{dLI_c}{dt} + E_c \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.35), (3.36) และ (3.37) จะได้

$$\frac{dLI_a}{dt} + \frac{dMI_b}{dt} + \frac{dMI_c}{dt} = V_a - Ri_a - E_a \quad (3.38)$$

$$\frac{dMI_a}{dt} + \frac{dLI_b}{dt} + \frac{dMI_c}{dt} = V_b - Ri_b - E_b \quad (3.39)$$

$$\frac{dMI_a}{dt} + \frac{dMI_b}{dt} + \frac{dLI_c}{dt} = V_c - Ri_c - E_c \quad (3.40)$$

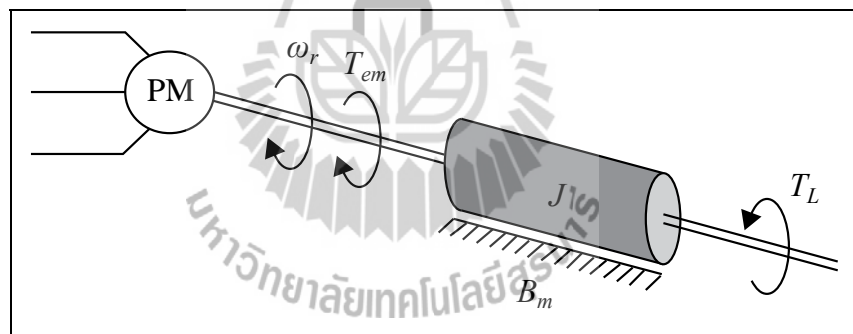
จากสมการที่ (3.38), (3.39) และ (3.40)

$$\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dI_a / dt \\ dI_b / dt \\ dI_c / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} dI_a / dt \\ dI_b / dt \\ dI_c / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \right\}$$

(3.41)

แบบจำลองทางกลของ BLDCM เมื่อมอเตอร์ขับโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

- โดยที่ ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad / sec)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ($Kg \cdot m^2$)
 B_m คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืดของมอเตอร์ ($N \cdot mrad / sec$)
 T_{em} คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ($N \cdot m$)
 T_L คือ แรงบิดของโหลด ($N \cdot m$)

สมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เขียนแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P \cdot T_{em}}{J} - \frac{B_m \cdot \omega_r}{J} - \frac{P \cdot T_L}{J} \quad (3.42)$$

เมื่อ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายโดยละเอียด เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด ๆ ดังนี้

$$T_{em} = \frac{E_a I_a}{\omega_r} + \frac{E_b I_b}{\omega_r} + \frac{E_c I_c}{\omega_r} \quad (3.43)$$

แทนสมการที่ (3.43) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P \cdot E_a \cdot I_a}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_b \cdot I_b}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_c \cdot I_c}{J\omega_r} - \frac{B_m \cdot \omega_r}{J} - \frac{P \cdot T_L}{J} \quad (3.44)$$

จากคุณสมบัติของสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion)

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{P}{2} \omega_r \quad (3.45)$$

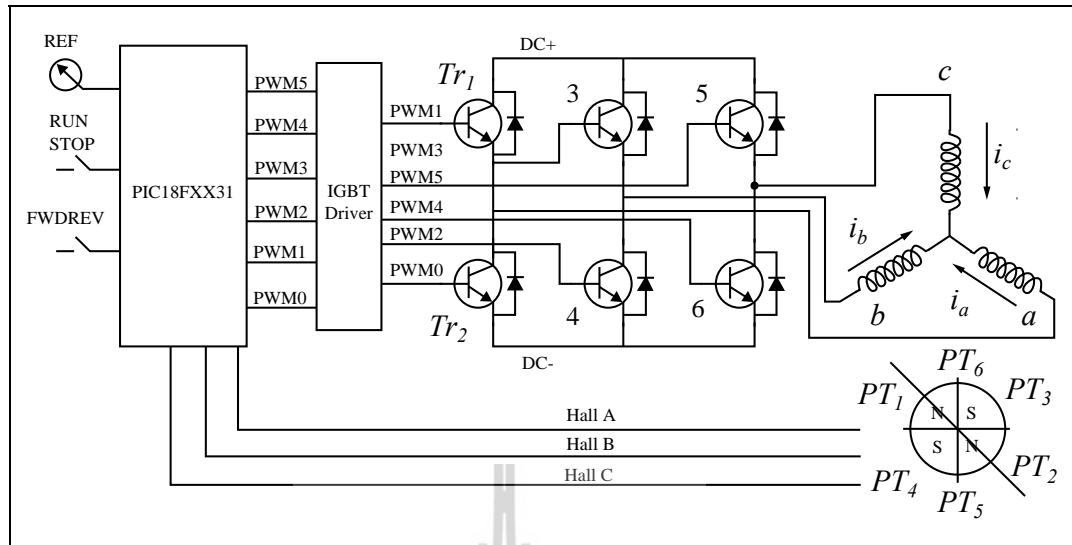
เมื่อ θ_e คือมุมทางไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์กับมุมทางกล (θ_m) คือ $\theta_e = P\theta_m / 2$ จากสมการที่ (3.44) และ (3.45) ประกอบกับสมการที่ (3.41) จะได้

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} dI_a / dt \\ dI_b / dt \\ dI_c / dt \\ d\omega_r / dt \\ d\theta_e / dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &- \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ -P \cdot E_a / \omega_r & -P \cdot E_b / \omega_r & -P \cdot E_c / \omega_r & B_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \\
 &- \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ P \cdot T_L \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.46}
 \end{aligned}$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองดังสมการที่ (3.44) จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

3.3.4 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์เป็นมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงไร้แปรงถ่าน ชนิด 3 เฟส แรงดัน 12 V ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การควบคุมมอเตอร์ดังกล่าวใช้ วงจรบริดจ์ 3 เฟส มีประสิทธิภาพดี โดยอัตราส่วนระหว่างกำลังงานทางด้านเอาต์พุต กับกำลังงานไฟฟ้าทางด้านอินพุต ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าสูง สำหรับขดลวดนั้นได้ต่อแบบวาย รูปที่ 3.25 เป็นการควบคุมโดยใช้ วงจรบริดจ์ 3 เฟส ซึ่งการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor: PT) 6 ตัว เป็นตัวสร้างสัญญาณในการเปิด-ปิด ทรานซิสเตอร์ (Jabbar, Phyu, Liu and Bi, 2004) สำหรับตารางที่ 3.1 เป็นสภาวะการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนในหนึ่งรอบ



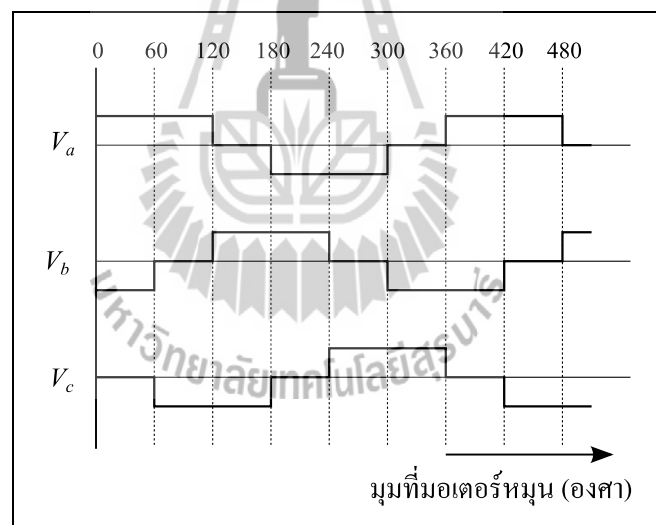
รูปที่ 3.25 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

ตารางที่ 3.1 สถานะการทำงานของไฟโต้ทรานซิสเตอร์กับการหมุนของมอเตอร์ในหนึ่งรอบ

ปิด-เปิด	0°	60°	120°	180°	240°	300°
PT_1	1	1	0	0	0	0
PT_2	0	0	0	1	1	0
PT_3	0	0	1	1	0	0
PT_4	1	0	0	0	0	1
PT_5	0	0	0	0	1	1
PT_6	0	1	1	0	0	0

จากรูปที่ 3.25 และตารางที่ 3.1 อธิบายหลักการการทำงานของวงจรบริดจ์ 3 เฟส ได้ดังนี้ เริ่มพิจารณาที่มุม 0 องศา เมื่อไฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_1 และ PT_4 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_1 และ Tr_4 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด a ไปยังจุด b โดยที่จุด c เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = +DC$, $V_b = -DC$ และ $V_c = 0$ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา ไฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_1 และ PT_6 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_1 และ Tr_6 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด a ไปยังจุด c โดยที่จุด b เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = +DC$, $V_b = 0$ และ $V_c = -DC$ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา ไฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_3 และ PT_6 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_3 และ

Tr_6 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด b ไปยังจุด c โดยที่จุด a เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = 0, V_b = +DC$ และ $V_c = -DC$ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา โฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_2 และ PT_3 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_2 และ Tr_3 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด b ไปยังจุด a โดยที่จุด c เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = -DC, V_b = +DC$ และ $V_c = 0$ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา โฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_2 และ PT_5 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_2 และ Tr_5 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด c ไปยังจุด a โดยที่จุด b เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = -DC, V_b = 0$ และ $V_c = +DC$ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา โฟโต้ทรานซิสเตอร์หมายเลข PT_4 และ PT_5 ทำงานสร้างสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์หมายเลข Tr_4 และ Tr_5 ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด c ไปยังจุด b โดยที่จุด a เป็นศูนย์ ดังนั้นในจังหวะนี้ $V_a = 0, V_b = -DC$ และ $V_c = +DC$ ซึ่งการหมุนได้ครบรอบพอดีสำหรับการทำงานในจังหวะถัดไป กล่าวคือจะได้แรงดัน 3 เฟส ดังรูปที่ 3.26 เป็นกราฟแรงดันที่ได้จากวงจรบริดจ์ 3 เฟส ซึ่งเป็นกราฟแรงดันกระแสตรง 3 เฟส



รูปที่ 3.26 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละเฟส

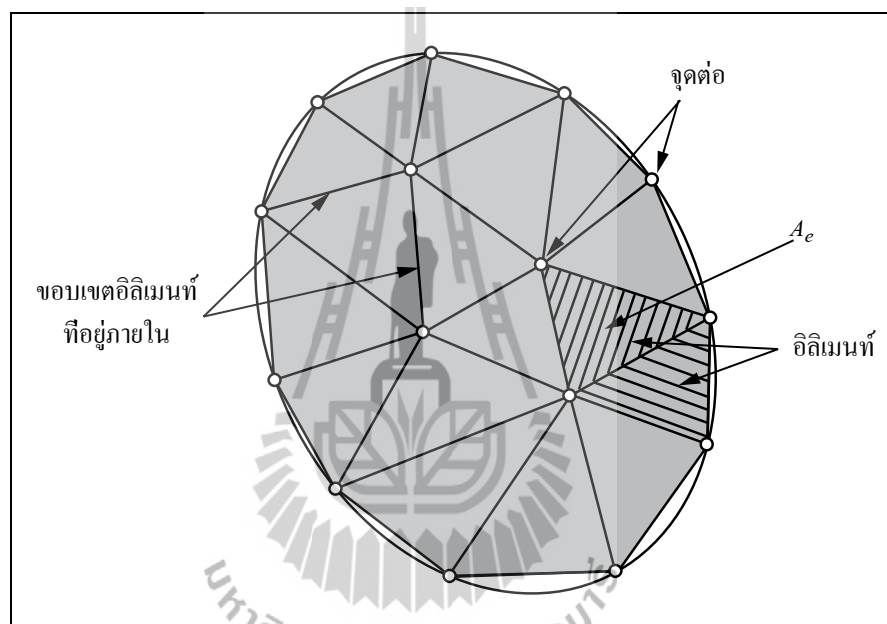
สำหรับการควบคุมทิศทางการหมุนของ BLDCM ในฮาร์ดแวร์นั้นได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.3.2 ในข้างต้นแล้ว ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเรียงเฟสแบบลำดับบวกหรือเรียงเฟสแบบลำดับลบ ก็จะทำให้มอเตอร์นั้นหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ

3.4 วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

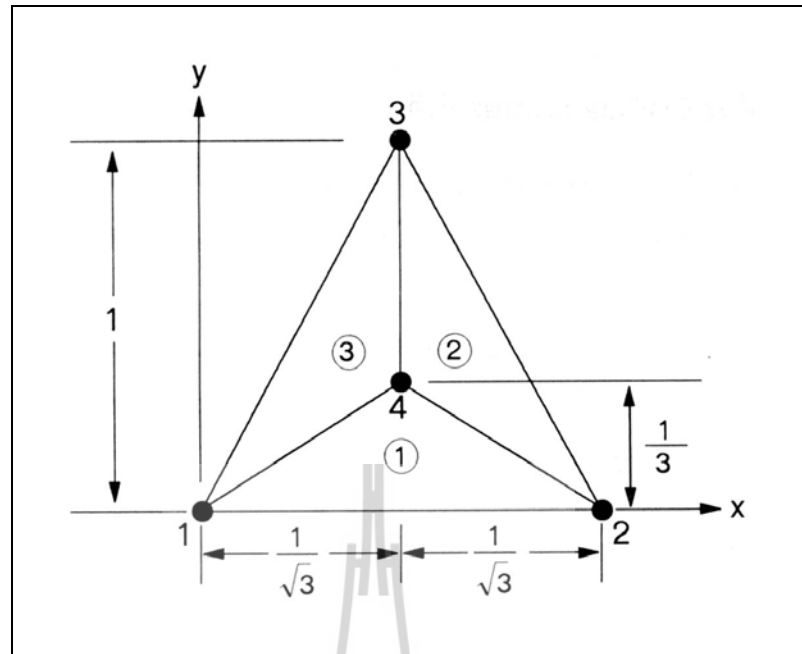
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาก็เป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้มีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่า วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (finite element method: FEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

หลักการของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในขั้นต้นคล้ายกับวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายชิ้นที่เรียกว่าอิลิเมนต์โดยที่การกระจัดและแรงภายในของแต่ละอิลิเมนต์ ณ จุดที่อิลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลิเมนต์ต่าง ๆ นี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งอาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ที่จะคำนวณออกมา จึงมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งความแม่นยำนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2542) ดังต่อไปนี้คือ

1) แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิเลเมนต์ย่อย ๆ (discretization) โดยแต่ละอิเลเมนต์มีพื้นที่ A_e ดังแสดงในรูปที่ 3.27 เป็นรูปแสดงการแบ่งอิเลเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy) โดยใช้อิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ ซึ่งประกอบไปด้วยจุดต่อ (nodes) อิเลเมนต์ (elements) และขอบเขตของอิเลเมนต์ที่อยู่ภายใน (interelement boundaries) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิเลเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมทั้งหมด 3 อิเลเมนต์ ซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์



รูปที่ 3.28 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อลิเมนต์ 4 จุดต่อ

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ต้องการคือ หมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละจุดต่อ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.28 พร้อมทั้งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนต์

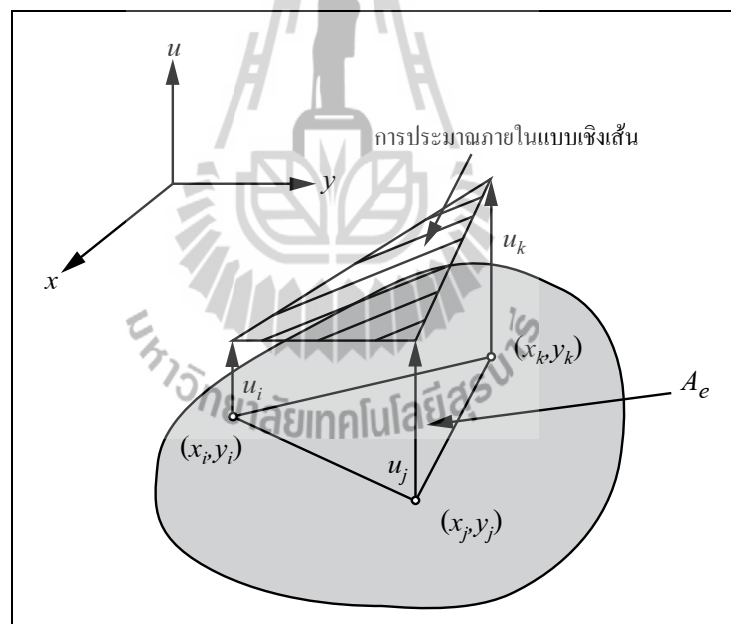
หมายเลข อิลิเมนต์	หมายเลขจุดต่อ		
	จุดต่อ <i>i</i>	จุดต่อ <i>j</i>	จุดต่อ <i>k</i>
1	1	2	4
2	4	2	3
3	1	4	3

หมายเหตุ จุดต่อ *i, j* และ *k* คือหมายเลขของจุดต่อที่ *i, j* และ *k* ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 3.3 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

หมายเลขจุดต่อ	พิกัดแกน x	พิกัดแกน y
1	0	0
2	$2/\sqrt{3}$	0
3	$1/\sqrt{3}$	1
4	$1/\sqrt{3}$	$1/3$

2) เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ (element interpolation function) อย่างในกรณีอีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีตัวห้อย i, j และ k ซึ่งวางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.29 (Bickford, 1994) ซึ่งเป็นการประมาณภายในอีลิเมนต์แบบเชิงเส้น (linear representation)



รูปที่ 3.29 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

ตำแหน่งของจุดต่อ (x_n, y_n) $n = i, j, k$ เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่รู้ค่า u_n โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอีลิเมนต์ $u_e(x, y)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$u_e(x, y) = \alpha + \beta x + \gamma y \quad (3.47)$$

โดยที่ α, β, γ เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสามดังนี้

$$u_e(x_i, y_i) = u_i = \alpha + \beta x_i + \gamma y_i$$

$$u_e(x_j, y_j) = u_j = \alpha + \beta x_j + \gamma y_j$$

$$u_e(x_k, y_k) = u_k = \alpha + \beta x_k + \gamma y_k$$

นำค่า α, β, γ ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสามข้างต้นแทนค่ากลับไปในสมการที่ (3.47) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์เป็น

$$u_e(x, y) = u_i N_i + u_j N_j + u_k N_k \quad (3.48)$$

ซึ่ง $N_n, n = i, j, k$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (element interpolation function)

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2A_e} \quad (3.49)$$

โดยที่ $a_i = x_j y_k - x_k y_j, b_i = y_j - y_k, c_i = x_k - x_j$

$$a_j = x_k y_i - x_i y_k, b_j = y_k - y_i, c_j = x_i - x_k$$

$$a_k = x_i y_j - x_j y_i, b_k = y_i - y_j, c_k = x_j - x_i$$

และ A_e คือ พื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ซึ่ง $2A_e$ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$2A_e = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = x_j(y_k - y_i) + x_i(y_j - y_k) + x_k(y_i - y_j) \quad (3.50)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมาที่มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3) สร้างสมการของอีลิเมนต์ (element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอีลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.28 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix}_e \quad (3.51)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e [u]_e = [f]_e$ โดย $[u]_e$ คือเมทริกซ์ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่า เป็นเมทริกซ์ระดับอีลิเมนต์ ซึ่งสมการของอีลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.49) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูป ทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติ สามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่

สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4) นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (assembly) เป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนที่ 1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}} \quad (3.52)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{\text{sys}}[u]_{\text{sys}} = [f]_{\text{sys}}$ จากสมการที่ (3.52) เมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนจุดต่อเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถประดิษฐ์ให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการ ซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้ เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีเอลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.28 กล่าวคือเราจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ 4 จุดต่อ โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดย เขียนสมการของเอลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของจุดต่อทางแฉนวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละเอลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.28 $[K]_e$ ของเอลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1, 2 และ 4 ส่วน $[K]_e$ ของเอลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข

2, 3 และ 4 และ $[K]_e$ ของอีลิเมนต์ที่ 3 ซึ่งเป็นอีลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1, 3 และ 4 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (4) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (4) \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e2} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (2) & (3) & (4) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (2) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_1 & e_1 & f_1 \\ d_2 & e_2 & f_2 \\ d_3 & e_3 & f_3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e3} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (3) & (4) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} & \begin{bmatrix} g_1 & h_1 & i_1 \\ g_2 & h_2 & i_2 \\ g_3 & h_3 & i_3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแฉวนอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอีลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{sys}$ เช่นค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแฉวนอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของอีลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแฉวนอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{sys} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_1 + g_1 & b_1 & h_1 & c_1 + i_1 \\ a_2 & b_2 + d_1 & e_1 & c_2 + f_1 \\ g_2 & d_2 & e_2 + h_2 & f_2 + i_2 \\ a_3 + g_3 & b_3 + d_3 & e_3 + h_3 & c_3 + f_3 + i_3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

5) ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (initial and boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

6) กำหนดหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่จุดต่อต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ ทฤษฎีของสนามแม่เหล็ก ที่ได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณหาค่าของสนามแม่เหล็ก ทฤษฎีของมอเตอร์ในซาร์คิสต์ซึ่งเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่ว่าด้วยหลักการทำงานและคุณลักษณะของมอเตอร์ และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 บทนำ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor: BLDCM) หรือที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) ที่มีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหา ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ และประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กนี้

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กสามารถดำเนินการได้โดยเล็งไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก่อน เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเท่านั้น ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$B = \nabla \times A \quad (4.1)$$

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ จึงเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก โดยมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์นั้นเป็นมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงไร้แปรงถ่าน ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ดังนั้นการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา (William, 1989) จะมีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองส่วนคือ ขอลวดสแตเตอร์ที่รับกระแสไฟฟ้าเป็นอินพุตและแม่เหล็กถาวรบริเวณ โรเตอร์ ซึ่งทั้งสองจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ดังสมการที่ (4.2)

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j + \nabla \times H_c \quad (4.2)$$

เมื่อ $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, μ_r คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) โดยจะขึ้นกับวัสดุตัวกลาง H_c คือแรงลบล้างแม่เหล็ก และ j คือผลรวมของค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสภายนอก (external current: j_0) และกระแสไหลวน (eddy current: j_{eddy}) ดังสมการที่ (4.3)

$$j = j_0 + j_{eddy} \quad (4.3)$$

เมื่อ $j_{eddy} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$ โดยที่ σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity) นำสมการที่ (4.3) แทนในสมการที่ (4.2) จะได้

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (4.4)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ A พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ในสมการที่ (3.15) จึงได้สมการของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดังสมการที่ (4.5)

$$\frac{1}{\mu} (-\nabla^2 A) = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) เมื่อพิจารณาปัญหาแบบ 2 มิติ จะได้สมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองดังสมการที่ (4.6)

$$\frac{1}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{1}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) = -j_0 + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติตามระนาบพิกัด xy ซึ่งแปรผันตามเวลา จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

ที่ (4.6) ซึ่งเป็นการสมมติให้สนามแม่เหล็กวางตัวตามพื้นที่หน้าตัดในระนาบพิกัด xy ของมอเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาเทอมของ A และ j_0 จะปรากฏเฉพาะส่วนประกอบของแกน z เท่านั้น โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง สำหรับ j_0 นั้น ก็คือกระแสอินพุตที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั่นเอง ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

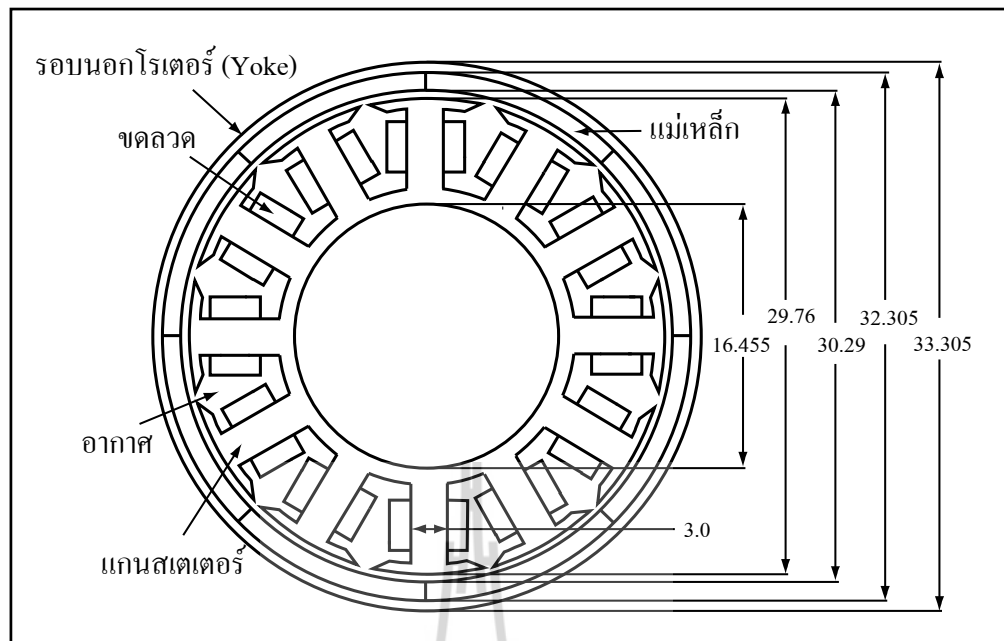
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ ดังแสดงในสมการที่ (4.6) หาผลเฉลยแม่นยำได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

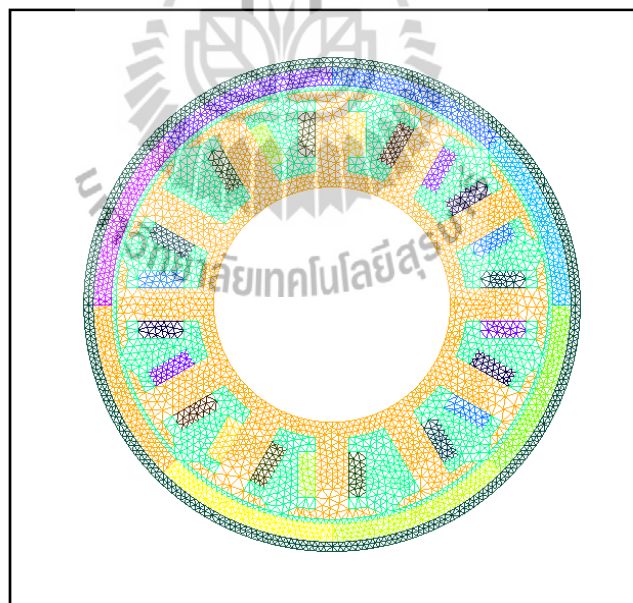
4.3.1 การแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นเอลิเมนต์ รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนเอลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ซึ่งมีขนาดเล็กดัง ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้หยิบยกมาแสดงอีกครั้งเพื่อความเข้าใจในรูปที่ 4.1 การแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Gmesh โดยมีจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์เท่ากับ 1657 จุด และ 3050 เอลิเมนต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์โดยมอเตอร์มีจำนวนร่องของสเตเตอร์ทั้งหมดเท่ากับ 12 ร่อง และมีจำนวนขั้วของแม่เหล็กถาวรเท่ากับ 8 ขั้ว ดังได้กล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 3 ส่วนรูปที่ 4.3 เป็นการขยายให้เห็นการแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดเพียง 1/4 ของมอเตอร์

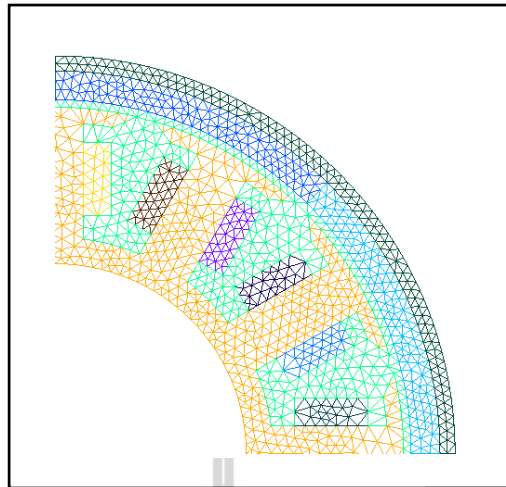
ในงานวิจัยนี้การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นเอลิเมนต์ จะพิจารณาแยกพื้นที่กันออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของพื้นที่สเตเตอร์ ส่วนของพื้นที่โรเตอร์ และส่วนของพื้นที่ช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยส่วนของพื้นที่สเตเตอร์การแบ่งเอลิเมนต์จะกระทำเพียงครั้งเดียว เนื่องจากส่วนของสเตเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่ ในส่วนของพื้นที่โรเตอร์การแบ่งเอลิเมนต์ดำเนินการเพียงครั้งเดียวเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งพิกัดของจุดต่อบนพื้นที่แล้ว จะต้องคำนึงถึงมุมของโรเตอร์ที่หมุนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในส่วนของพื้นที่ช่องอากาศจะอยู่ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์ในบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปให้สอดคล้องตามการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาค่าตำแหน่งพิกัดของจุดต่อบริเวณพื้นที่นี้ จะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังและรอบคอบเป็นพิเศษ



รูปที่ 4.1 มอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์และขนาดในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์



รูปที่ 4.3 การขยายให้เห็นการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัด 1/4 ของมอเตอร์

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็น การเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อ สมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น จะได้

$$A(x, y) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k \quad (4.7)$$

โดยที่ N_n , $n = i, j, k$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์และ A_n , $n = i, j, k$ คือผลลัพธ์ของ ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (i, j, k) ของอิลิเมนต์ ซึ่ง

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j, & b_i &= y_j - y_k, & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k y_i - x_i y_k, & b_j &= y_k - y_i, & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i y_j - x_j y_i, & b_k &= y_i - y_j, & c_k &= x_j - x_i \end{aligned} \quad (4.9)$$

และ Δ_e คือพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอีลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างสมการของอีลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (4.6) ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์รูปแบบทั่วไปของสมการของอีลิเมนต์สำหรับปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถแสดงได้ดังนี้ (Huebner, Dewhirst, Smith, and Byrom, 2001)

$$M\{A^*\} + K\{A\} = \{F\} \quad (4.11)$$

โดย $\{A\}$ คือเวกเตอร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ และ $\{A^*\}$ คือเวกเตอร์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สมการที่ (4.11) นี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ซึ่งถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกไปได้อีกเช่น วิธีของกาลेरคิน (Galerkin) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่

จากสมการที่ (4.4) เป็นสมการเชิงเวกเตอร์ ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการที่ (4.6) ที่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง เมื่อจัดรูปสมการที่ (4.4) ให้สมการด้านขวาเท่ากับศูนย์ และจาก $H_c = \nu\mu_0 M$ โดยที่ M คือ ค่าแรงดึงดูดคูแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร (magnetization of permanent magnet) และ $\nu = \frac{1}{\mu}$ คือ สภาพต้านทานแม่เหล็ก (magnetic reluctivity) จะได้ดังสมการที่ (4.12)

$$\nabla \times \nu(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (\nu\mu_0 M) = 0 \quad (4.12)$$

การสร้างสมการของอิลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4.12) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.13)

$$\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) = R \quad (4.13)$$

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหาเศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุดเพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาลเลอร์กิน (Preston, Reece, and Sangha, 1988) และ (Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function: W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (Ω) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_{\Omega} W_n R d\Omega = 0, \quad n=1,2,3 \quad (4.14)$$

สำหรับอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ จุดที่ไม่รู้ค่ามี 3 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสาม ดังนั้นจึงต้องการ 3 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (4.14) จะต้องมีการ $n=i, j, k$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาลเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.13) ลงในสมการที่ (4.14) จึงได้

$$\iint_{\Omega} N_n \left(\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) \right) dx dy = 0$$

$$\iint_{\Omega} \nabla \times (v(\nabla \times A) - v\mu_0 M) N_n dx dy + \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy = \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy \quad (4.15)$$

พิจารณาการอินทิเกรตทีละพจน์ของสมการที่ (4.15) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสอง ใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (integrate by parts) โดยใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ดังนี้

$$(\nabla \times F)G = \nabla(F \times G) + F(\nabla \times G)$$

$$F = v(\nabla \times A) - v\mu_0 M$$

$$G = N_n$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.15) เมื่อพิจารณาพจน์แรกกับเอกลักษณ์ของเวกเตอร์ข้างต้นจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \nabla \times (v(\nabla \times A) - v\mu_0 M) N_n dx dy &= \iint_{\Omega} (v\nabla \times A - v\mu_0 M) (\nabla \times N_n) dx dy \\ &+ \iint_{\Omega} \nabla (v\nabla \times A - v\mu_0 M) \times N_n dx dy \end{aligned} \quad (4.16)$$

จากสมการทางด้านขวาเทอมสุดท้ายของสมการที่ (4.16) สามารถเขียนในรูปการอินทิเกรตเชิงเส้นได้เป็น

$$\iint_{\Omega} \nabla (v\nabla \times A - v\mu_0 M) \times N_n dx dy = \oint_c \{ (v\nabla \times A - v\mu_0 M) \times N \} \cdot \hat{n} dc \quad (4.17)$$

ใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ดังนี้

$$F \times G = -G \times F$$

และ $(F \times G)T = F(G \times T)$

เมื่อใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ข้างต้นดังกล่าวในสมการที่ (4.17) จะได้

$$\oint_c \{ (v\nabla \times A - v\mu_0 M) \times N \} \cdot \hat{n} dc = \oint_c N \{ (v\mu_0 M - v\nabla \times A) \times \hat{n} \} dc$$

ซึ่งจากการอินทิเกรตพบว่ามีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (4.18)

$$\oint_c N \left\{ (v\mu_0 M - v\nabla \times A) \times \hat{n} \right\} dc = 0 \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.15), (4.16), (4.17) และ (4.18) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} (v\nabla \times A - v\mu_0 M)(\nabla \times N_n) dx dy + \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy &= \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy \\ \iint_{\Omega} (v\nabla \times A)(\nabla \times N_n) dx dy - \iint_{\Omega} (\nabla \times N_n)(v\mu_0 M) dx dy & \\ + \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy &= \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy \end{aligned} \quad (4.19)$$

จากสมการที่ (3.10) ถ้าพิจารณาในระนาบ 2 มิติ (แกน x และ y) จะได้

$$\nabla \times A = \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) i - \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) j$$

และ $\nabla \times N_n = \left(\frac{\partial N_n}{\partial y} \right) i - \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \right) j$

ดังนั้น

$$(\nabla \times A)(\nabla \times N_n) = \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial N_n}{\partial y} \right) \quad (4.20)$$

และจาก $M = M_x i + M_y j$ ดังนั้น

$$M(\nabla \times N_n) = M_x \left(\frac{\partial N_n}{\partial y} \right) - M_y \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \right) \quad (4.21)$$

แทนสมการที่ (4.20) และ (4.21) ลงในสมการที่ (4.19) จะได้

$$\iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} \right) dx dy - \iint_{\Omega} v \mu_0 \left(M_x \frac{\partial N_n}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_n}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy = \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy$$

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy + \iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} \right) dx dy \\ = \iint_{\Omega} v \mu_0 \left(M_x \frac{\partial N_n}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_n}{\partial x} \right) dx dy \\ + \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy \end{aligned} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ (4.22) พิจารณาในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (4.23)

$$[M]_{3 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1} + [K]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1} = \{F\}_{3 \times 1} \quad (4.23)$$

โดย $[M]_{3 \times 3}$ คือ เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า
 $[K]_{3 \times 3}$ คือ เมทริกซ์ความขบเซิมได้ของแม่เหล็ก
 $\{F\}_{3 \times 1}$ คือ โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง

โดยเมื่อแยกพิจารณาสมการที่ (4.22) ทีละพจน์จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้

1) เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{3 \times 3}$ เมื่อพิจารณาพจน์แรกของสมการที่ (4.22) จะ
ได้

$$[M]_{3 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1} = \iint_{\Omega} N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy \quad (4.24)$$

จาก $A(x, y) = \{N\}_{1 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1}$ ดังนั้น

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \{N\}_{1 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1} \quad (4.25)$$

แทนสมการที่ (4.25) ลงในสมการที่ (4.24) จะได้

$$[M]_{3 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1} = \iint_{\Omega} \{N\}_{3 \times 1} \sigma \{N\}_{1 \times 3} dx dy \{A^*\}_{3 \times 1}$$

ดังนั้น $[M]_{3 \times 3} = \iint_{\Omega} \{N\}_{3 \times 1} \sigma \{N\}_{1 \times 3} dx dy$

$$[M]_{3 \times 3} = \sigma \iint_{\Omega} \{N\}_{3 \times 1} \{N\}_{1 \times 3} dx dy \text{ โดยที่ } n, m = i, j, k \quad (4.26)$$

จากสูตรอินทิเกรตรอบพื้นที่

$$\iint N_i^\alpha N_j^\beta N_k^\gamma dx dy = \frac{\alpha! \beta! \gamma!}{(\alpha + \beta + \gamma + 2)!} \cdot 2\Delta_e \quad (4.27)$$

จากสมการที่ (4.26) เมื่อพิจารณาจากสูตรอินทิเกรตรอบพื้นที่ดังสมการที่ (4.27) จะแบ่งได้ 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1: $n = m$ เช่น $n = m = i$ จะได้ $\alpha = 2$ และ $\beta = \gamma = 0$ ดังนี้

$$\iint N_i^2 dx dy = \frac{2!0!0!}{(2+0+0+2)!} \cdot 2\Delta_e = \frac{2\Delta_e}{12}$$

กรณีที่ 2: $n \neq m$ เช่น $n = i, m = j$ ดังนั้น $\alpha = \beta = 1$ และ $\gamma = 0$ ดังนี้

$$\iint N_i N_j dx dy = \frac{1!1!0!}{(1+1+0+2)!} \cdot 2\Delta_e = \frac{\Delta_e}{12}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.26) จะได้ว่า

$$[M]_{3 \times 3} = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

2) เมทริกซ์ความขยับได้ของแม่เหล็ก $[K]_{3 \times 3}$ พิจารณาพจน์ที่สองของสมการที่ (4.22) จะได้ว่า

$$[K]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1} = \iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} \right) dx dy \quad (4.29)$$

จาก $A(x, y) = \{N\}_{1 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}$ ดังนั้น

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}_{1 \times 3} \{A\}_{3 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial A}{\partial y} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}_{1 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}$$

จากสมการที่ (4.29)

$$[K]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1} = v \iint_{\Omega} \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}_{3 \times 1} \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}_{1 \times 3} + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}_{3 \times 1} \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}_{1 \times 3} \right) dx dy \{A\}_{3 \times 1}$$

ดังนั้น

$$[K]_{3 \times 3} = v \iint_{\Omega} \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}_{3 \times 1} \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}_{1 \times 3} + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}_{3 \times 1} \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}_{1 \times 3} \right) dx dy \quad (4.30)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e}$$

ดังนั้น $\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{2\Delta_e}$ และ $\frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{2\Delta_e}$ ซึ่งจากสมการที่ (4.30) จะได้

$$[K]_{3 \times 3} = v \iint_{\Omega} \left(\frac{b_n}{2\Delta_e} \cdot \frac{b_m}{2\Delta_e} + \frac{c_n}{2\Delta_e} \cdot \frac{c_m}{2\Delta_e} \right) dx dy$$

โดยที่ $n, m = i, j, k$

$$[K]_{3 \times 3} = \frac{v}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

3) โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง: $\{F\}_{3 \times 1}$ พิจารณาพจน์ทางด้านขวาของสมการที่ (4.22) จะได้

$$\{F\}_{3 \times 1} = \iint_{\Omega} v\mu_0 \left(M_x \frac{\partial N_n}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_n}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{\Omega} N_n j_0 dx dy \quad (4.32)$$

พิจารณาพจน์ที่ 1: พิจารณาการอินทิเกรตทีละพจน์โดยเริ่มจากพจน์แรกของสมการที่ (4.32) ซึ่งจากฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e}$$

ดังนั้น $\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{2\Delta_e}$ และ $\frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{2\Delta_e}$ โดยที่ $n = i, j, k$

ซึ่งจากพจน์แรกของสมการที่ (4.32) จะได้

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} v\mu_0 \left(M_x \frac{\partial N_n}{\partial y} - M_y \frac{\partial N_n}{\partial x} \right) dx dy &= \iint_{\Omega} v\mu_0 \left(M_x \frac{c_n}{2\Delta_e} - M_y \frac{b_n}{2\Delta_e} \right) dx dy \\ &= \frac{v\mu_0}{2\Delta_e} (M_x c_n - M_y b_n) \iint_{\Omega} dx dy \\ &= \frac{v\mu_0}{2\Delta_e} (M_x c_n - M_y b_n) \cdot \Delta_e \\ &= \frac{v\mu_0}{2} \left(M_x \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4.33)$$

พิจารณาพจน์ที่ 2: พจน์ที่ 2 ของสมการที่ (4.32) ประกอบกับสมการที่ (4.27) ซึ่งเป็นสูตรอินทิเกรตรอบพื้นที่ โดยพิจารณาได้เพียงกรณีเดียว เช่น $n = i$ จะได้ $\alpha = 1$ และ $\beta = \chi = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\iint N_i j_0 dx dy = \frac{1!0!0!}{(1+0+0+2)!} \cdot 2j_0 \Delta_e = \frac{j_0 \Delta_e}{3}$$

ดังนั้นพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (4.32) จะได้

$$\iint N_i j_0 dx dy = \frac{j_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

จากสมการที่ (4.32) (4.33) และ (4.34) จะได้

$$\{F\}_{3 \times 1} = \frac{\nu \mu_0}{2} \left(M_x \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} \right) + \frac{j_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

ซึ่งการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก j_0 ของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ในแต่ละเฟส จะแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ให้ปรากฏในบทต่อไป

4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว

ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาในสถานะชั่วคราว โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ส่วนเวกเตอร์ $\{F\}_{3 \times 1}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ซึ่งการแก้ปัญหาในสถานะชั่วคราวทำได้โดยการแก้สมการที่ (4.23) จากข้างต้น โดยต้องใช้วิธีการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวที่ใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (recurrence relations) เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวจะใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (4.36) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (time step) โดยถ้าเลือกใช้ $\beta = 0$ จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า $\beta = 1/2$ เป็นวิธีของแครังก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า $\beta = 2/3$ เป็นวิธีของกาลเลอร์กิน (Galerkin) และถ้า

$\beta = 1$ จะเรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (backward difference) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกรูปวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังดังสมการที่ (4.37) เนื่องจากวิธีนี้ประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$\beta \{A^*\}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \{A^*\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4.36)$$

$$\{A^*\}^{t+\Delta t} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4.37)$$

จากการเลือกรูปวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง สมการที่ (4.23) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (4.38) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (4.37) ลงในสมการที่ (4.38) จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนต์อีลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (4.39)

$$[M]_{3 \times 3} \{A^*\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} + [K]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} = \{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4.38)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} + [K]_{3 \times 3} \right) \{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}^t + \{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4.39)$$

จากสมการที่ (4.39) เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (4.40)

$$[A]_{3 \times 3} \{X\}_{3 \times 1} = \{B\}_{3 \times 1} \quad (4.40)$$

เมื่อ
$$[A]_{3 \times 3} = \left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} + [K]_{3 \times 3} \right)$$

$$\{B\}_{3 \times 1} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}^t + \{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$$

และ
$$\{X\}_{3 \times 1} = \{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$$

4.3.5 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 แบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เมื่อพิจารณาปัญหาแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราว คือ

$$[A]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} = \{B\}_{n \times 1} \quad (4.41)$$

4.3.6 ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้แก่มอเตอร์ในแต่ละรอบที่มอเตอร์หมุนไป และเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่าง ๆ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาการหมุนของมอเตอร์คือ $A(t=0) = 0$ ส่วนค่าเงื่อนไขขอบเขต จะกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า $A = 0$ (Brunelli, Casadei, Reggiani and Serra, 1983) และ (Fu, 1999)

4.3.7 คำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่จุดต่อต่าง ๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($B = \nabla \times A$) ดังนั้นเมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ ตามระนาบพิกัด xy จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.42) และ (4.43) ตามลำดับ

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k}{2\Delta_e} \quad (4.42)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k}{2\Delta_e} \right) \quad (4.43)$$

การแปลงระบบพิกัดจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (radial flux density,

B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (tangential flux density, B_t) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ที่มีมุม ϕ เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงได้ดังนี้

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (4.44)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (4.45)$$

เมื่อกำหนดหาค่า B_r และ B_t แล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์ หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการสิ้นสะท้อนของ BLDM ใน ฮาร์ ดิ ส กิ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998) และ (Sakamoto, Hirata, Kobayashi, and Kajiwara, 1999) โดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (4.46)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (4.47)$$

$$F_x = \frac{1}{2\mu_0} (B_x^2 - B_y^2) \quad (4.48)$$

$$F_y = \frac{1}{\mu_0} (B_x \cdot B_y) \quad (4.49)$$

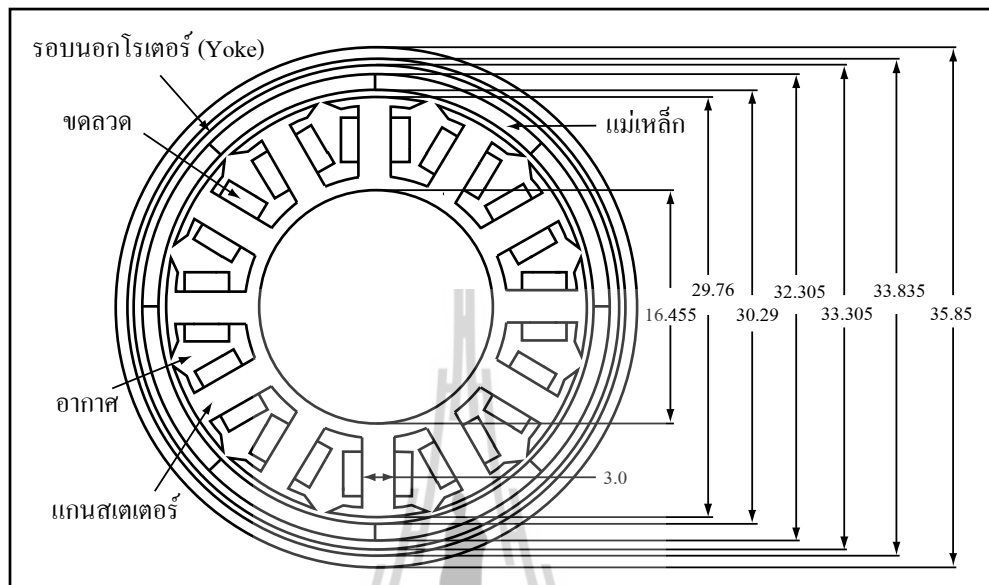
- เมื่อ F_r คือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศในแนวรัศมี
 F_t คือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศในแนวสัมผัส
 F_x คือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศในแนวแกน x
 F_y คือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศในแนวแกน y

4.4 สรุป

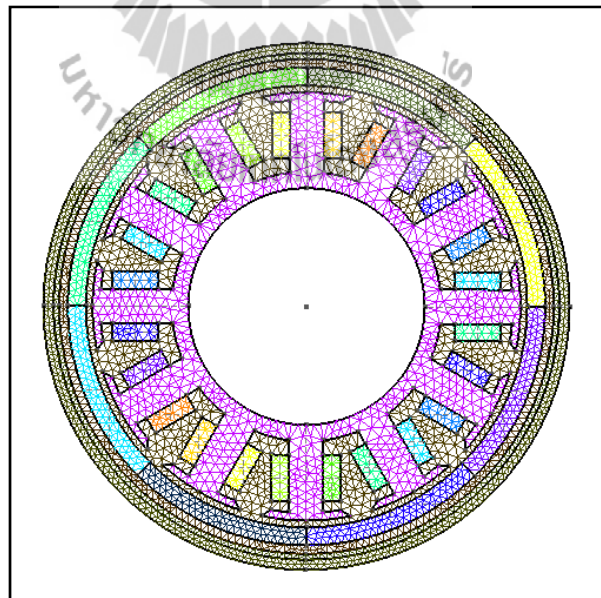
ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อพิจารณามอเตอร์ในสถานะชั่วคราว ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างของกาเลอร์คิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป



โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Gmesh โดยมีจำนวนจุดต่อและอิเลิเมนต์เท่ากับ 2297 จุด และ 4322 อิเลิเมนต์ตามลำดับ ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 มอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์และขนาดในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 5.2 การแบ่งอิเลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์

5.2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลิเมนต์

การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของอิลิเมนต์ เมื่อพิจารณาการสั่นของมอเตอร์ในฟังก์ชันของการกระจัด สมการการเคลื่อนที่ของอิลิเมนต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.1) ซึ่งเป็นสมการไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่มี 6 สมการประกอบรวมกัน

$$[M]_{6 \times 6} \frac{\partial^2 \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{6 \times 6} \frac{\partial \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t} + [K]_{6 \times 6} \{x\}_{6 \times 1} = \{F\}_{6 \times 1} \quad (5.1)$$

โดย $[M]_{6 \times 6}$ คือ เมทริกซ์มวล (mass matrix)

$[D]_{6 \times 6}$ คือ เมทริกซ์ความหน่วง (damping matrix)

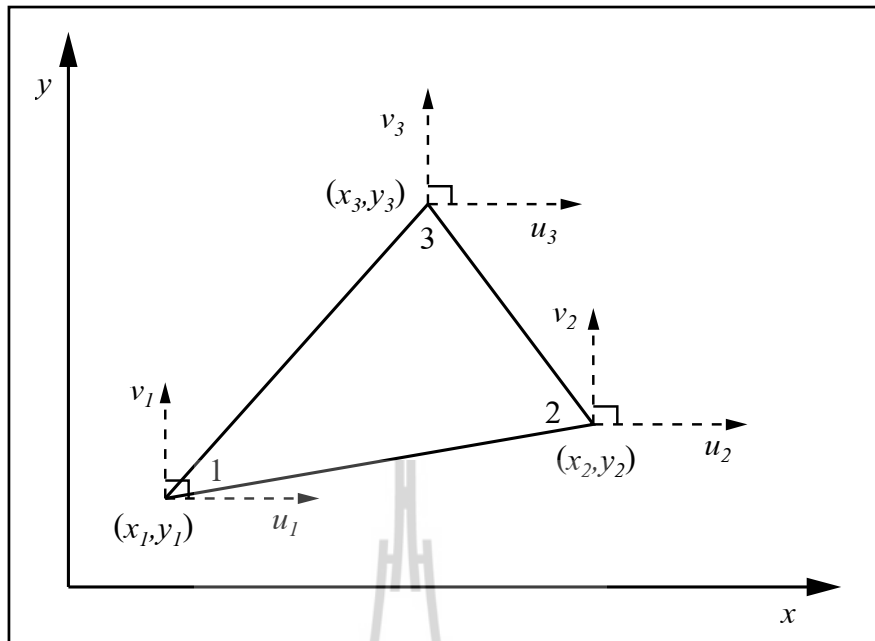
$[K]_{6 \times 6}$ คือ เมทริกซ์ความแข็งของสปริง (stiffness matrix)

$\{F\}_{6 \times 1}$ คือ เวกเตอร์ของแรงหรือโมเมนต์ที่มากระทำ

$\{x\}_{6 \times 1}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดเพื่อใช้หาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง $\frac{\partial \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t}$ และสอง $\frac{\partial^2 \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t^2}$

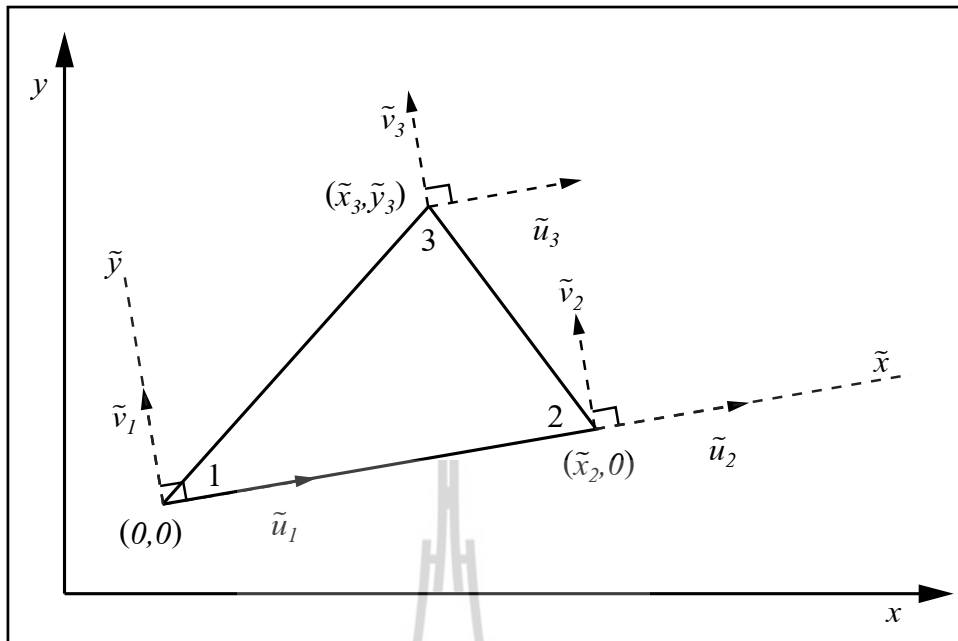
ซึ่งแรงที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าตรงกลางซี่ในแต่ละซี่ของสเตเตอร์ที่ติดกับช่องอากาศ ซึ่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ส่วนเวกเตอร์การกระจัดที่แสดงในสมการที่ (5.2) เป็นการแสดงระยะกระจัดบนจุดต่อหมายเลข 1, 2 และ 3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาต่อหนึ่งอิลิเมนต์ โดย u และ v แทนระยะกระจัดในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งการแสดงระนาบพิกัดในลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่าระนาบพิกัดวงกว้าง (global coordinate)

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.3 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดวงกว้าง

การพิจารณาการจัดของแต่ละอีลิเมนต์ที่มีลักษณะการวางตัวในแต่ละอีลิเมนต์ที่แตกต่างกัน จะต้องพิจารณาการวางตัวของทุกๆ อีลิเมนต์ให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันเสียก่อน ซึ่งดำเนินการได้โดยแปลงระนาบพิกัดวงกว้างให้เป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น (local coordinate) (Rao, 1999) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.4 ซึ่งดำเนินการได้โดย กำหนดให้ที่จุดต่อหมายเลข 1 ของทุกๆ อีลิเมนต์มีพิกัดเฉพาะถิ่น $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ อยู่ที่จุดกำเนิด $(0,0)$ โดยที่แกน \tilde{x} ของทุกๆ อีลิเมนต์บนระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นจะวางตัวตามฐานของสามเหลี่ยมระหว่างจุดต่อหมายเลข 1 และ 2 และแกน \tilde{y} จะตั้งฉากกับแกน \tilde{x} ดังนั้นจุดต่อหมายเลข 2 ของทุกๆ อีลิเมนต์จึงมีพิกัดเฉพาะถิ่น $(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2)$ เป็น $(\tilde{x}_2, 0)$ และ $(\tilde{x}_3, \tilde{y}_3)$ คือจุดต่อหมายเลข 3 ของพิกัดเฉพาะถิ่น โดยมี \tilde{u} และ \tilde{v} ที่จุดต่อหมายเลขต่างๆ แทนระยะการจัดในแนวแกน \tilde{x} และ \tilde{y} ตามลำดับ เมื่อสร้างสมการอีลิเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นเพื่อพิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์แล้ว จากนั้นจึงแปลงกลับไปเป็นสมการอีลิเมนต์ในระนาบพิกัดวงกว้าง (x, y) ดังเดิม



รูปที่ 5.4 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น

การพิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ ยังคงพิจารณาลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอีลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอีลิเมนต์เมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.3) และ (5.4)

$$u(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{u}_1 N_1 + \tilde{u}_2 N_2 + \tilde{u}_3 N_3 \quad (5.3)$$

$$v(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{v}_1 N_1 + \tilde{v}_2 N_2 + \tilde{v}_3 N_3 \quad (5.4)$$

โดยที่ N_n , $n=1, 2, 3$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ และ \tilde{u}_n , \tilde{v}_n เมื่อ $n=1, 2, 3$ คือผลลัพธ์ของการกระจัดในแนวแกน \tilde{x} และ \tilde{y} ในแต่ละจุดต่อ (1, 2, 3) ของอีลิเมนต์ตามลำดับ ซึ่ง

$$N_n = \frac{a_n + \beta_n \tilde{x} + \gamma_n \tilde{y}}{2\Delta_e} \quad (5.5)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= \tilde{x}_2 \tilde{y}_3 - \tilde{x}_3 \tilde{y}_2, \beta_1 = \tilde{y}_2 - \tilde{y}_3, \gamma_1 = \tilde{x}_3 - \tilde{x}_2 \\ a_2 &= \tilde{x}_3 \tilde{y}_1 - \tilde{x}_1 \tilde{y}_3, \beta_2 = \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1, \gamma_2 = \tilde{x}_1 - \tilde{x}_3 \\ a_3 &= \tilde{x}_1 \tilde{y}_2 - \tilde{x}_2 \tilde{y}_1, \beta_3 = \tilde{y}_1 - \tilde{y}_2, \gamma_3 = \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 \end{aligned} \quad (5.6)$$

และ Δ_e คือพื้นที่ของแต่ละอิเลเมนต์ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & \tilde{x}_1 & \tilde{y}_1 \\ 1 & \tilde{x}_2 & \tilde{y}_2 \\ 1 & \tilde{x}_3 & \tilde{y}_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} [\tilde{x}_2(\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) + \tilde{x}_1(\tilde{y}_2 - \tilde{y}_3) + \tilde{x}_3(\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2)] \quad (5.7)$$

จากสมการไฟไนต์อิเลเมนต์ในสมการที่ (5.1) สามารถคำนวณอิเลเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริงและอิเลเมนต์เมทริกซ์มวลได้ดังที่จะอธิบายต่อจากนี้ไป ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาถึงอิเลเมนต์เมทริกซ์ความหน่วงเนื่องจากมีผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ค่อนข้างน้อย ประกอบกับการคำนวณมีความยุ่งยาก (Henneberger, Sattler, Hadrys, and Shen, 1992)

เมทริกซ์ความแข็งของสปริง: $[K]_{6 \times 6}$

ดำเนินการโดยพิจารณาการวางตัวของอิเลเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นเพื่อให้ทุกๆ อิเลเมนต์มีการวางตัวอยู่ในรูปแบบเดียวกันก่อน ซึ่งเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเฉพาะถิ่น (local stiffness matrix, $[\tilde{K}]$) เกิดจากผลรวมของเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเนื่องจากความเค้นในแนวฉาก (normal stress, $[\tilde{K}_n]$) และเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเนื่องจากความเค้นเฉือน (shear stress, $[\tilde{K}_s]$) ดังแสดงได้ในสมการที่ (5.8) (5.9) และ (5.10) ตามลำดับ

$$[\tilde{K}] = [\tilde{K}_n] + [\tilde{K}_s] \quad (5.8)$$

$$[\tilde{K}_n] = \frac{E}{4\Delta_e(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} \beta_1^2 & \nu\beta_1\gamma_1 & \beta_1\beta_2 & \nu\beta_1\gamma_2 & \beta_1\beta_3 & \nu\beta_1\gamma_3 \\ & \gamma_1^2 & \nu\beta_2\gamma_1 & \gamma_1\gamma_2 & \nu\beta_3\gamma_1 & \gamma_1\gamma_3 \\ & & \beta_2^2 & \nu\beta_2\gamma_2 & \beta_2\beta_3 & \nu\beta_2\gamma_3 \\ & & & \gamma_2^2 & \nu\beta_3\gamma_2 & \gamma_2\gamma_3 \\ \text{sym} & & & & \beta_3^2 & \nu\beta_3\gamma_3 \\ & & & & & \gamma_3^2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$[\tilde{K}_s] = \frac{E}{8\Delta_e(1+\nu)} \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & \beta_1\gamma_1 & \gamma_1\gamma_2 & \beta_2\gamma_1 & \gamma_1\gamma_3 & \beta_3\gamma_1 \\ & \beta_1^2 & \beta_1\gamma_2 & \beta_1\beta_2 & \beta_1\gamma_3 & \beta_1\beta_3 \\ & & \gamma_2^2 & \beta_2\gamma_2 & \gamma_2\gamma_3 & \beta_3\gamma_2 \\ & & & \beta_2^2 & \beta_2\gamma_3 & \beta_2\beta_3 \\ \text{sym} & & & & \gamma_3^2 & \beta_3\gamma_3 \\ & & & & & \beta_3^2 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

ซึ่ง E และ ν คือ ค่ามอดุลัส (modulus) และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ตามลำดับ เมื่อคำนวณเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเฉพาะถิ่นได้แล้ว จากนั้นแปลงกลับเป็นเมทริกซ์ความแข็งของสปริงที่แท้จริงได้ในสมการที่ (5.11)

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (5.11)$$

โดยที่

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

จากสมการที่ (5.12) สมาชิกในเมทริกซ์ $[R]$ จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันโคไซน์ระบุทิศทาง (directional cosine) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้าง ดังแสดงด้วยความสัมพันธ์สมการที่ (5.13) ถึง สมการที่ (5.16)

$$\cos(\tilde{x}, x) = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5.13)$$

$$\cos(\tilde{x}, y) = \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5.14)$$

$$\cos(\tilde{y}, x) = -\frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5.15)$$

$$\cos(\tilde{y}, y) = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5.16)$$

เมทริกซ์มวล: $[M]_{6 \times 6}$

ดำเนินการโดยพิจารณาการวางตัวของอิลิเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นก่อน
เช่นกัน ดังแสดงได้ในสมการที่ (5.17)

$$[\tilde{M}] = \frac{\rho \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

ซึ่ง ρ คือค่าความหนาแน่นมวล (mass density) ในแต่ละอิลิเมนต์ จากนั้นแปลงกลับเป็นเมทริกซ์
มวลที่แท้จริงได้ในสมการที่ (5.18)

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (5.18)$$

การนำสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมสำหรับการ
เคลื่อนที่ของระบบ โดยหากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย
 n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อย

จำนวนทั้งสิ้น $2n$ สมการ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.19) ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาการกระจัดจะพิจารณาทั้งแนวแกน x และแกน y ร่วมกัน

$$[M]_{2n \times 2n} \frac{\partial^2 \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{2n \times 2n} \frac{\partial \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t} + [K]_{2n \times 2n} \{x\}_{2n \times 1} = \{F\}_{2n \times 1} \quad (5.19)$$

5.3 การหาผลเฉลยสำหรับการสั่นสะเทือน

ในการวิเคราะห์สถานะชั่วครู่ในขณะที่มอเตอร์หมุนไป ดังสมการการเคลื่อนที่ที่เวลา t ใด ๆ ที่แสดงด้วยสมการที่ (5.20)

$$[M] \frac{\partial^2 \{x\}^t}{\partial t^2} + [D] \frac{\partial \{x\}^t}{\partial t} + [K] \{x\}^t = \{F\}^t \quad (5.20)$$

ซึ่งด้วย t หมายถึงค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]$ $[D]$ และ $[K]$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนไป การแก้สมการสถานะชั่วครู่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีผลต่างกลาง (central difference) เพราะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายสำหรับการแก้สมการการเคลื่อนที่ในสถานะชั่วครู่ (Kwon and Bang, 2000) โดยเมื่อพิจารณาวิธีผลต่างกลาง จะได้

$$\frac{\partial^2 \{x\}^t}{\partial t^2} = \frac{1}{\Delta t^2} [\{x\}^{t+\Delta t} - 2\{x\}^t + \{x\}^{t-\Delta t}] \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial \{x\}^t}{\partial t} = \frac{1}{2\Delta t} [\{x\}^{t+\Delta t} - \{x\}^{t-\Delta t}] \quad (5.22)$$

แทนค่าสมการที่ (5.21) และ (5.22) ลงในสมการที่ (5.20) จะได้

$$[M_{eff}] \{x\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (5.23)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \quad (5.24)$$

$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{x\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \{x\}^{t-\Delta t} \quad (5.25)$$

ซึ่ง $[M_{eff}]$ และ $\{F_{eff}\}$ คือ เมทริกซ์มวลประสิทธิผล (effective mass matrix) และเวกเตอร์แรงประสิทธิผล (effective force matrix) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปเป็นขั้นตอนในการคำนวณหาการสั้นสะท้อนเป็นระยะกระจัดเมื่อมอเตอร์หมุนไปได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 : คำนวณหาเมทริกซ์ระบบสมการรวม $[M]$ $[D]$ และ $[K]$

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ $t=0$ ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์การกระจัด $\{x\}^0$

และเวกเตอร์ความเร็ว $\frac{\partial \{x\}^0}{\partial t}$ พร้อมทั้งรับค่าเวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับมอเตอร์ $\{F\}^0$

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณค่าเวกเตอร์ความเร็ว $\frac{\partial^2 \{x\}^0}{\partial t^2}$ ในสมการที่ (5.20) ซึ่งสามารถแสดงได้

ดังนี้

$$[M] \frac{\partial^2 \{x\}^0}{\partial t^2} = \{F\}^0 - [D] \frac{\partial \{x\}^0}{\partial t} - [K] \{x\}^0 \quad (5.26)$$

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณค่าเวกเตอร์การกระจัดที่เวลา $-\Delta t$ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (5.21) และ (5.22) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\{x\}^{-\Delta t} = \{x\}^0 - \Delta t \frac{\partial \{x\}^0}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 \{x\}^0}{\partial t^2} \quad (5.27)$$

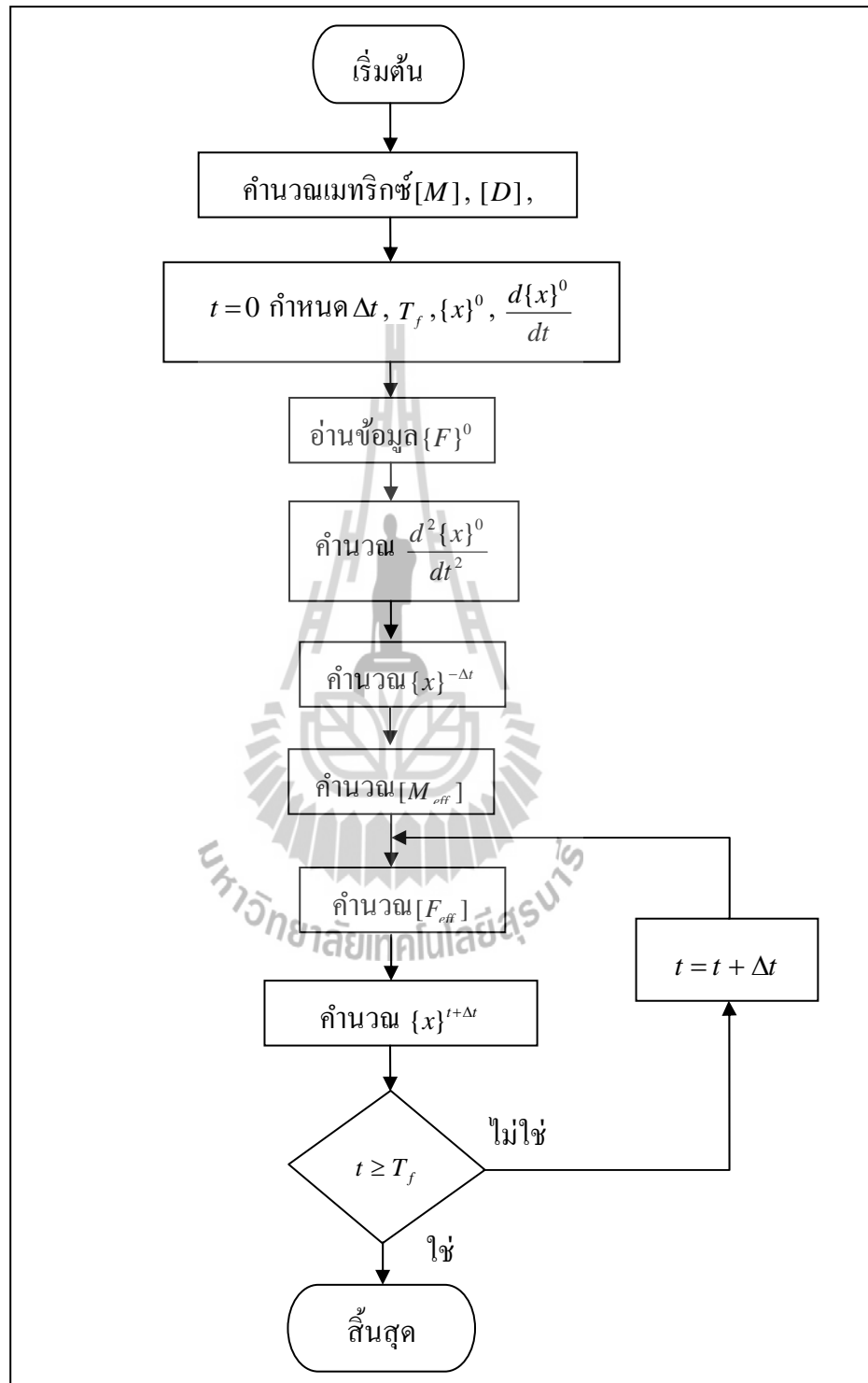
ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณเมทริกซ์มวลประสิทธิผล $[M_{eff}]$ โดยใช้สมการที่ (5.24)

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณเวกเตอร์แรงประสิทธิผล $\{F_{eff}\}$ โดยใช้สมการที่ (5.25)

ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณค่าเวกเตอร์การกระจัดที่เวลาถัดไป $\{x\}^{t+\Delta t}$ ในสมการที่ (5.23)

จากนั้นที่เวลาถัดไป $t + \Delta t$ ดำเนินการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6-7 จนถึงเวลาสิ้นสุด T_f

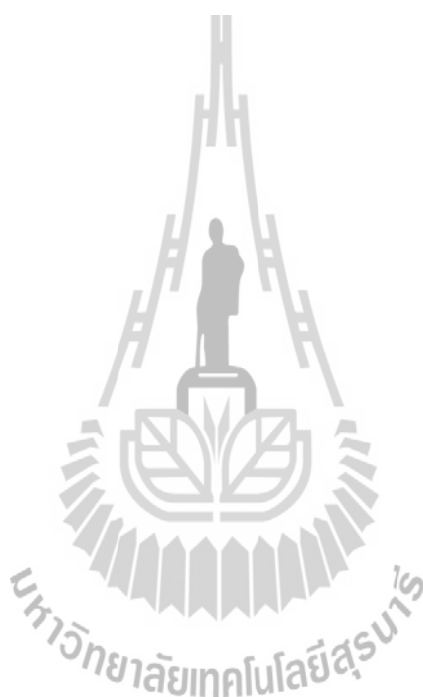
ขั้นตอนต่างๆ ที่ได้อธิบายผ่านมา อาจสรุปรวมในรูปของแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนภูมิการคำนวณการเคลื่อนที่ในมอเตอร์

5.4 สรุป

บทที่ 5 นี้ ได้อธิบายการประยุกต์วิธีไฟไนต์อิเลเมนต์เพื่อคำนวณหาขนาดของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์เมื่อโรเตอร์หมุน โดยพิจารณาในรูปแบบของฟังก์ชันการกระจัดซึ่งอาศัยสมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการอนุพันธ์สามัญอันดับสอง รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือนที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป



บทที่ 6

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

6.1 บทนำ

การจำลองผลเพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) ขนาด 12 V ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Intel Pentium I5 2.4 GHz, 4 GB SD-RAM สำหรับประมวลผล โดยได้ประดิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและสมการการเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์จากการสร้างกริดอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมพีริแวลล์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh การจำลองผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อ โรเตอร์หมุนไป และวิเคราะห์ถึงขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ดังนั้นในบทที่ 6 นี้ จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

6.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

การจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในบทนี้ ได้พิจารณา BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของBLDCMในฮาร์ดดิสก์ขนาด 12 V

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันแหล่งจ่าย	12 V (ต่อแบบสตาร์)
จำนวนขั้ว	8 P
จำนวนร่องของสเตเตอร์	12 ร่อง
ความถี่แหล่งจ่าย	227 Hz
ความเร็วพิกัด	3400 rpm

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของBLDCMในฮาร์ดดิสก์ขนาด 12 V (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	$0.29 \Omega / \phi$
รัศมีของเส้นลวดตัวนำ	0.125 mm
ความเหนียวนำที่ใช้คำนวณ (L-M)	0.365 mH
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.0002265 kgm^2
วัสดุสารแม่เหล็กถาวร	S20
มอดูลัสของแกนสเตเตอร์	$2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
มอดูลัสของโครงสเตเตอร์ (อลูมิเนียม)	$7.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
มอดูลัสของแม่เหล็กถาวร	$1.7 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
ความหนาแน่นมวลของแกนสเตเตอร์	$2.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ความหนาแน่นมวลของโครงสเตเตอร์	$6.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
อัตราส่วนของปิวของ	0.25
จำนวนรอบการพัน/ขดลวด	30 รอบ
สภาพนำทางไฟฟ้าของแม่เหล็กถาวร	$1.1 \times 10^6 \Omega^{-1} / \text{m}$
ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของแม่เหล็กถาวร	1.154
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืด	$0.004 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{sec}$
ขนาดของฟลักซ์ลิงก์เกจ	0.041
แรงลบล้างแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	550000 A/m
ค่าคงที่ของแรงดันต้านกลับ	0.03

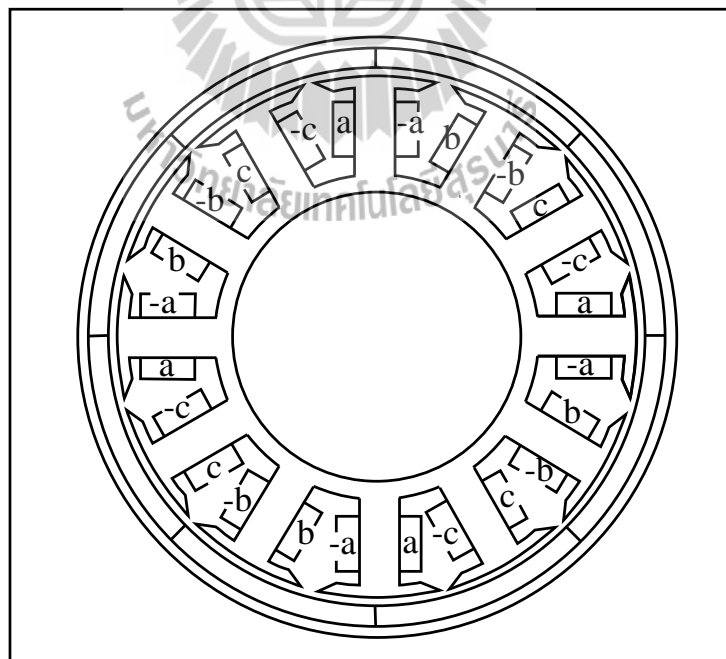
หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล

ลักษณะการพันของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส (a , b และ c) แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 กระแสในแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันอยู่ในแต่ละร่องของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลาโดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและค่าพารามิเตอร์ของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อทราบกระแส I ในแต่ละเฟสจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแส

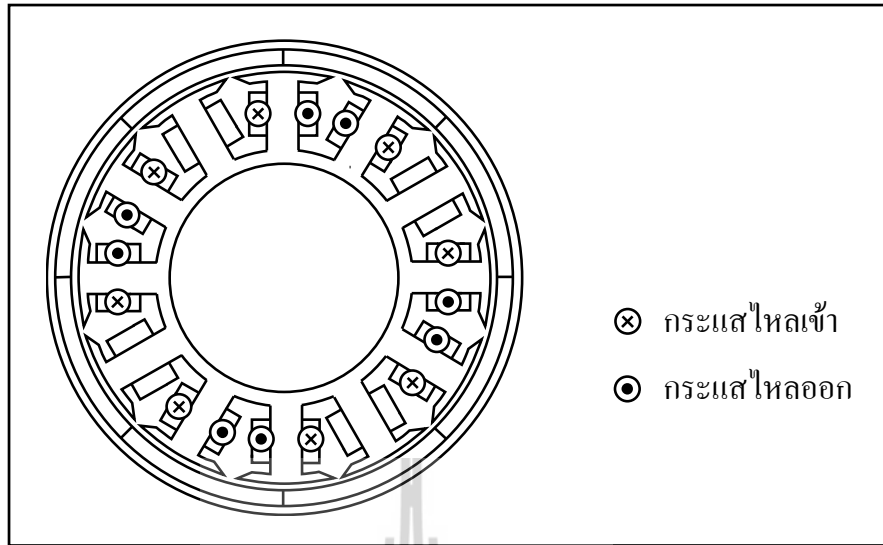
ภายนอก J_0 ที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ได้ตั้งสมการที่ (6.1) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$J_0 = \frac{m \cdot I}{a_l} \quad (6.1)$$

เมื่อ m คือจำนวนรอบการพันของขดลวด และ a_l คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2) โดยการป้อนค่า J_0 ให้แก่โปรแกรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของกระแสด้วยเพราะกระแสที่ใช้ในการคำนวณเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง กรณีที่พิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ (ระนาบ xy) J_0 จะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาษ ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้กระแสที่มีทิศทางวิ่งเข้ากระดาษมีเครื่องหมายบวก และกระแสที่มีทิศทางวิ่งออกกระดาษมีเครื่องหมายลบ สำหรับการคำนวณแล้วสามารถจัดได้โดยง่ายเพราะกระแสในแต่ละจังหวะเวลาหนึ่งๆ จะประกอบด้วยค่ากระแสที่มีค่าเป็นบวก ลบ และศูนย์ ดังนั้นในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุนจะมีทั้งกระแสไหลเข้า ไหลออก และ ไม่มีกระแสไหลตามลำดับดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 การพันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสในแต่ละเฟส



รูปที่ 6.2 ทิศทางการไหลของกระแสเวลาขณะหนึ่ง

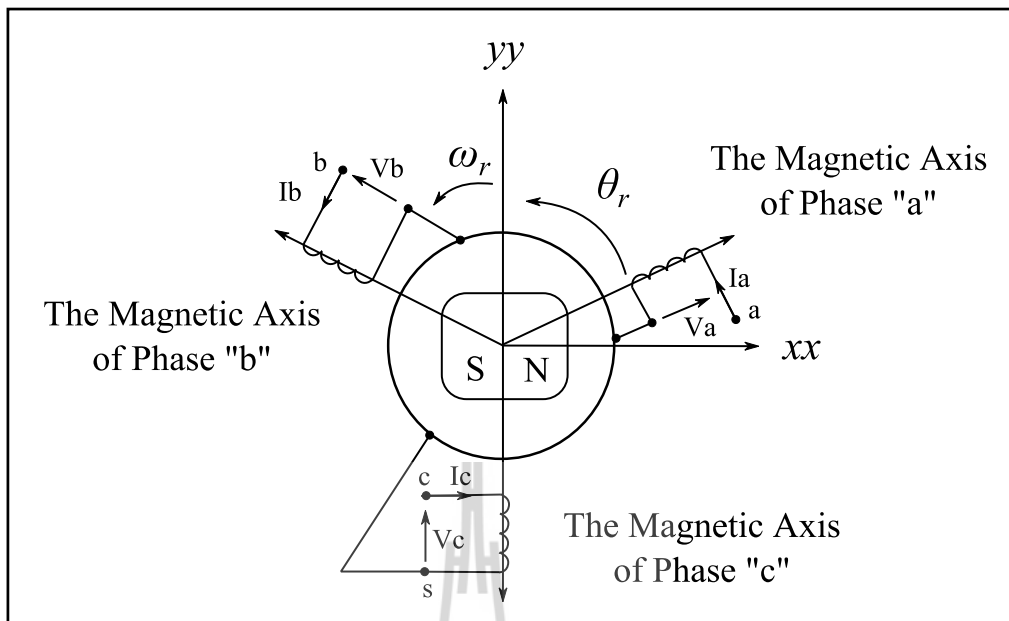
6.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

การคำนวณกระแสของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของ BLDCM ในบทที่ 3 ซึ่งจะขอกกล่าวสรุปถึงแนวทางในการคำนวณค่ากระแสดังต่อไปนี้

6.3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

ขดลวดสเตเตอร์ของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ มีรูปแบบเป็นอิมพีแดนซ์ (RL อนุกรม) ต่อแบบวาย อิมพีแดนซ์แต่ละกิ่งเป็นตัวแทนแกนขดลวดสเตเตอร์ และเป็นการต่ออิมพีแดนซ์แบบสามเฟสสมดุลที่ห้อยอยู่กับที่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.3 ซึ่งจะได้แบบจำลองทางไฟฟ้าดังสมการที่ (3.41) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.2) (สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของ BLDCM ในบทที่ 3)

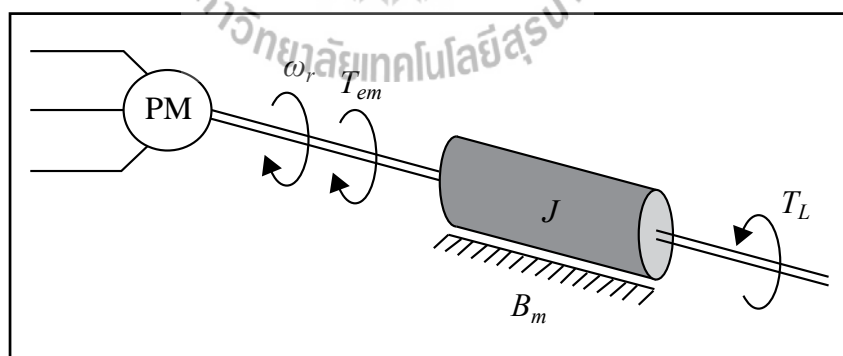
$$\begin{bmatrix} dI_a / dt \\ dI_b / dt \\ dI_c / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \right\} \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.3 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงในระนาบสามเฟส

6.3.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

แบบจำลองทางกลของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์เมื่อมอเตอร์ขับโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

จากสมการการเคลื่อนที่และคุณสมบัติของสมการการเคลื่อนที่ที่จะได้ดังสมการที่ (3.44) และ (3.45) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.3) และ (6.4) ตามลำดับ

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P \cdot E_a \cdot I_a}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_b \cdot I_b}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_c \cdot I_c}{J\omega_r} - \frac{B_m \cdot \omega_r}{J} - \frac{P \cdot T_L}{J} \quad (6.3)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{P}{2} \omega_r \quad (6.4)$$

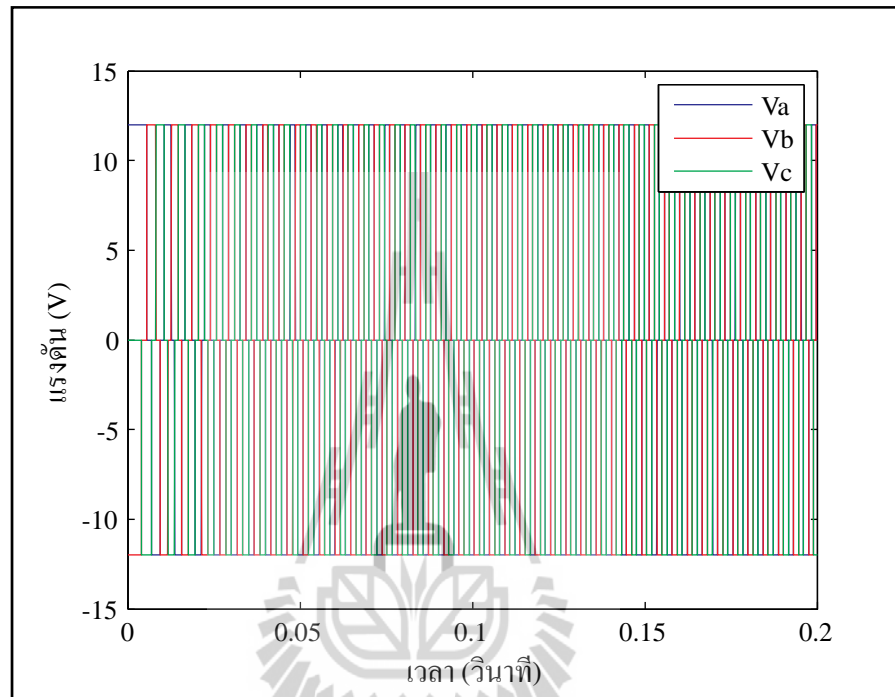
เมื่อนำสมการที่ (6.3) และ (6.4) ประกอบกับสมการที่ (6.2) จะได้ดังสมการที่ (3.46) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.5) (สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในบทที่ 3)

$$\begin{bmatrix} dI_a/dt \\ dI_b/dt \\ dI_c/dt \\ d\omega_r/dt \\ d\theta_e/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ -P \cdot E_a / \omega_r & -P \cdot E_b / \omega_r & -P \cdot E_c / \omega_r & B_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ P \cdot T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

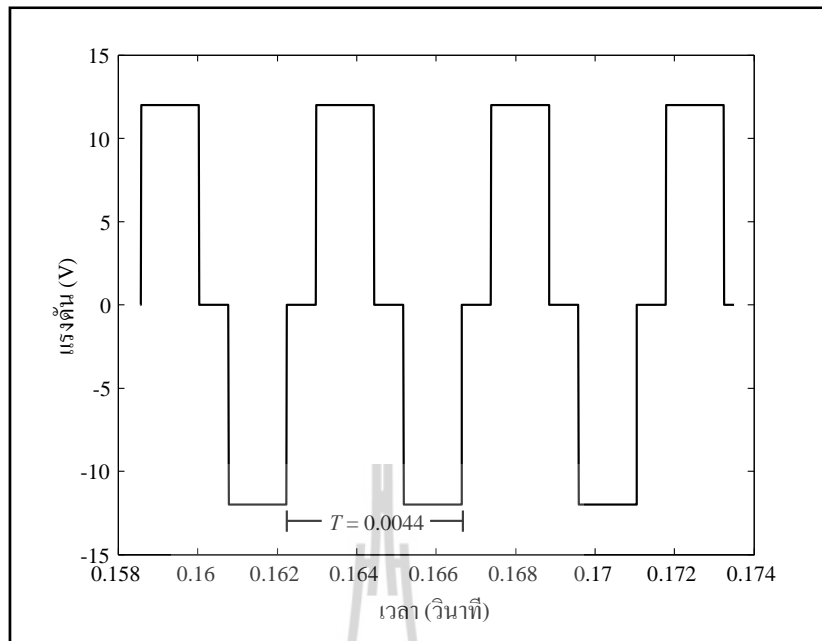
6.3.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองของมอเตอร์ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลดังสมการที่ (6.5) ข้างต้น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.5 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามเฟสเทียบกับเวลา และรูปที่ 6.6 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฟส α เทียบกับเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่และป้อนแรงดันด้านกลับดังแสดงด้วยรูปที่ 6.7 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันด้านกลับเทียบกับเวลา และรูปที่ 6.8 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันด้านเฟส α กลับเทียบกับเวลาเมื่อ

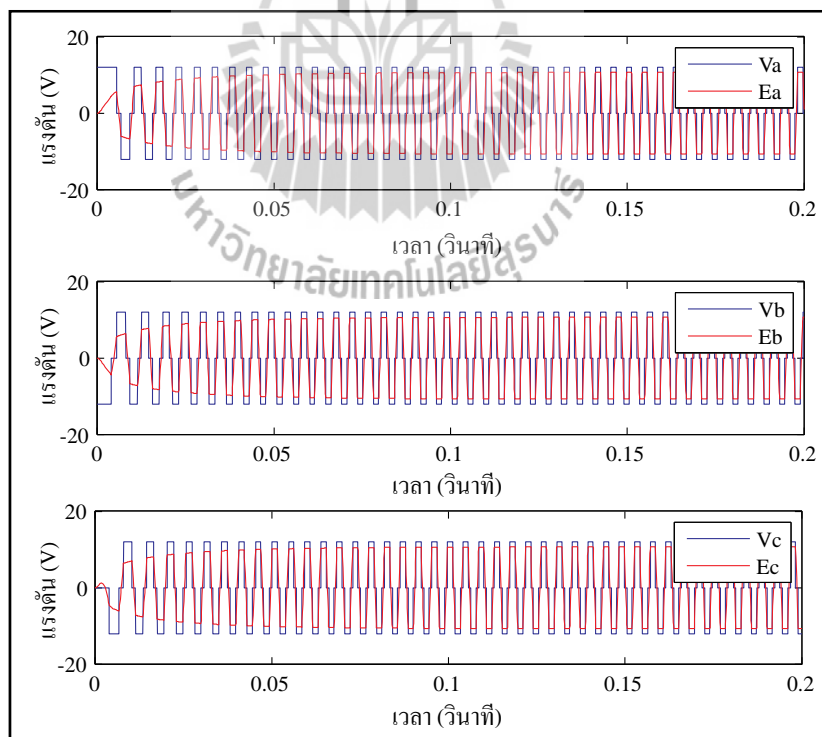
มอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 6.1 จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระแสที่ใช้ในการคำนวณหาค่า J_0 ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับรูปที่ 6.10 คือกราฟกระแสของเฟส a ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



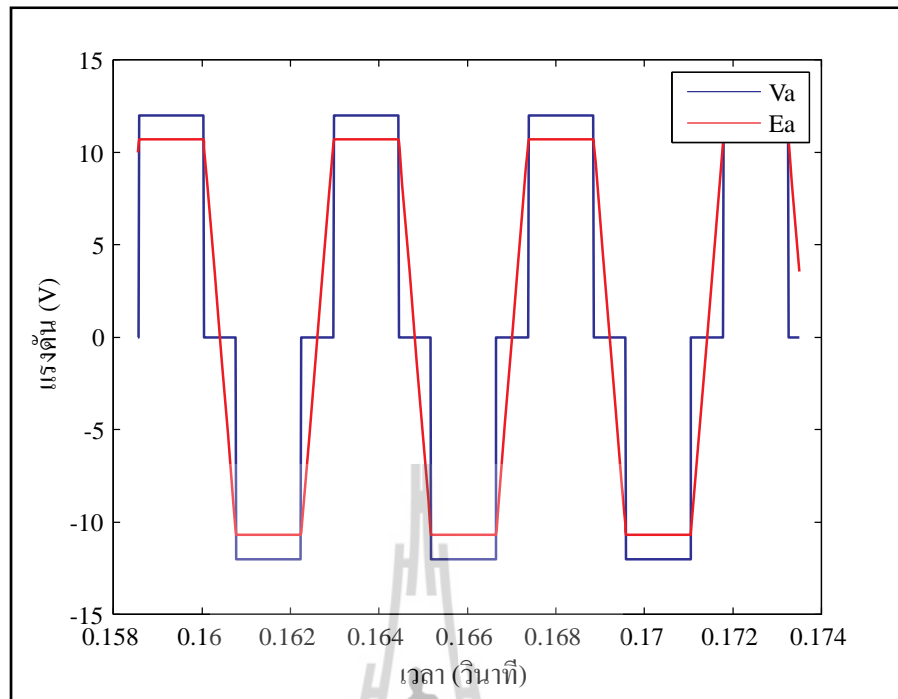
รูปที่ 6.5 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละเฟสเทียบกับเวลา



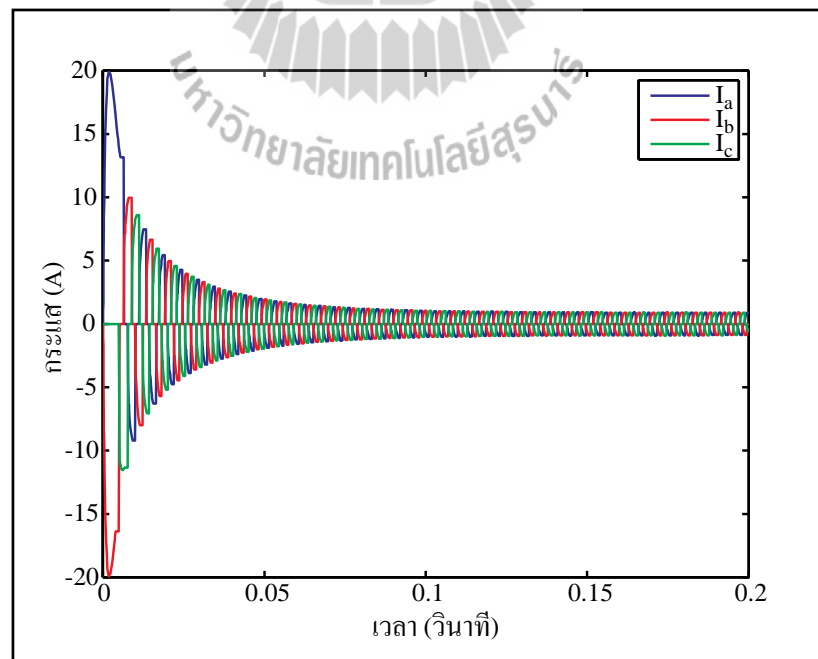
รูปที่ 6.6 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฟส a เทียบกับเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



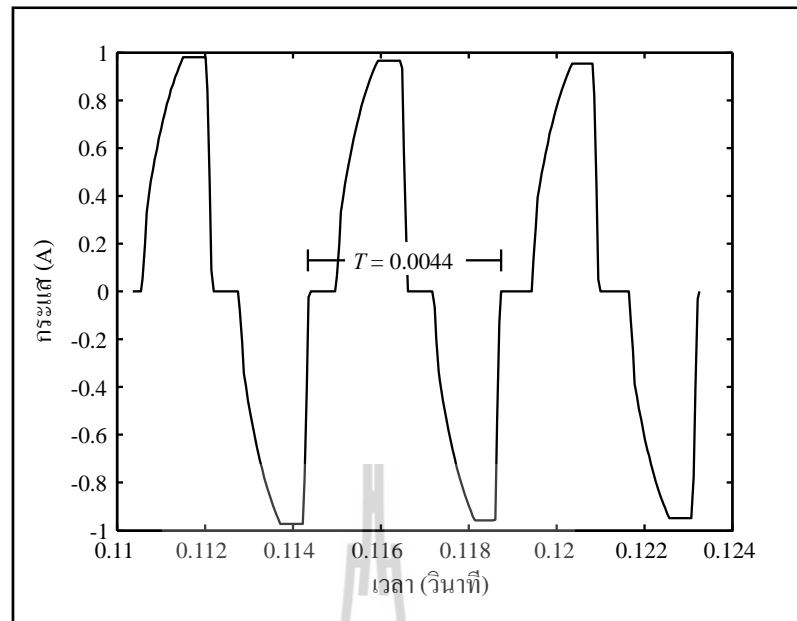
รูปที่ 6.7 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านกลับเทียบกับเวลา



รูปที่ 6.8 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านเฟส a กลับเทียบกับเวลา
เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



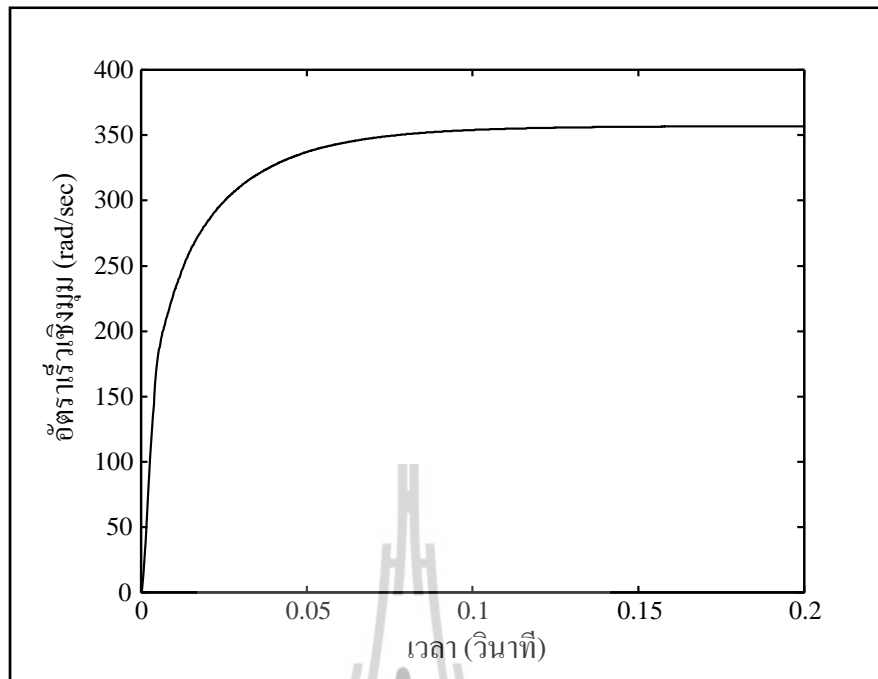
รูปที่ 6.9 กราฟกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ



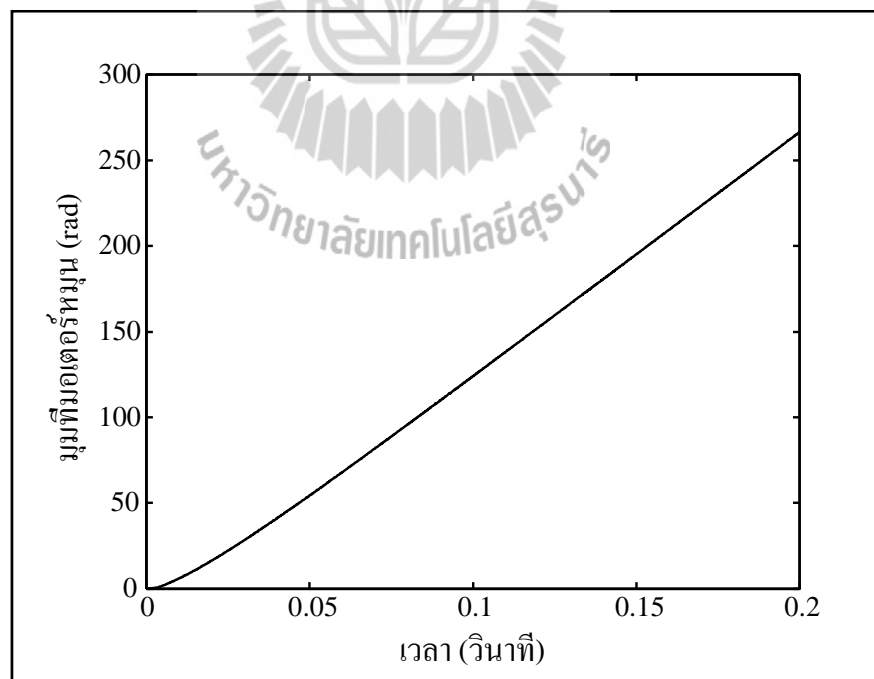
รูปที่ 6.10 กราฟกระแสเฟส a เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ
เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่

จากรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.10 คาบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสมีค่าเท่ากับ 0.0044 ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่ได้จาก $f = 1/T$ จากความสัมพันธ์นี้จะคำนวณความถี่ได้เท่ากับ $f = 227 \text{ Hz}$

จากสมการที่ (6.5) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนอกจากค่า I_a , I_b และ I_c ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้วยังมีอัตราเร็วเชิงมุม (ω_r) และมุมที่มอเตอร์หมุน (θ) เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 ตามลำดับ



รูปที่ 6.11 กราฟอัตราเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 6.12 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

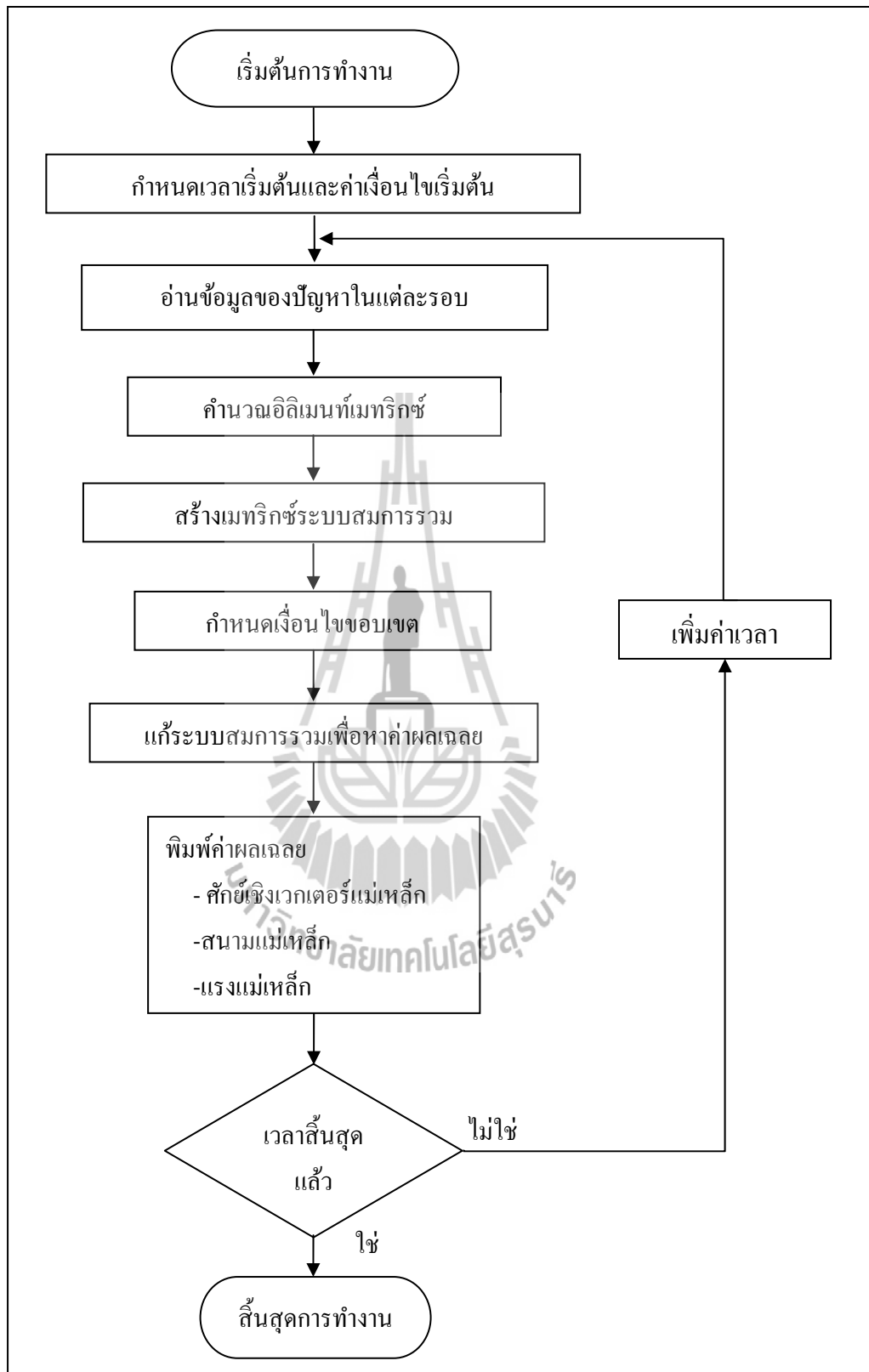
จากรูปที่ 6.11 ค่าอัตราเร็วเชิงมุมจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ที่เวลาประมาณ 0.175 วินาที ด้วยค่าอัตราเร็วเชิงมุมประมาณ 355 rad/sec หรือคำนวณเป็นความเร็วรอบได้จาก $N = 60\omega_r / (2\pi)$ ซึ่งจะมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 3390 rpm จะเห็นได้ว่ามีค่าความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งมีความเร็วพิกัดเท่ากับ 3400 rpm

6.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เกิดจากการประคิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ เกิดจากการสร้างกริดโดยโปรแกรมฟรีแวร์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

6.4.1 โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

การคำนวณสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์สำหรับโรเตอร์หมุน เมื่อกำเนินถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีราคาแพง ประมวลผลช้า และไม่มีความคล่องตัวเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โรเตอร์หมุนดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประคิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

จากแผนภูมิในรูปที่ 6.13 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบ โดยรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่างๆเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขเริ่มต้น : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่างๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไปลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย โดยโปรแกรมยังมีหน้าที่ในการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกคือการให้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ $A(t=0) = 0$

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ : จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อ จากเอาต์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมฟรีแวร์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลิเมนต์จำนวน และหมายเลขของอิเลิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะใช้การคำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุก ๆ อิเลิเมนต์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.39) จากบทที่ 4 ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6.6) โดยที่ $\{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} + [K]_{3 \times 3} \right) \{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}^t + \{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (6.6)$$

สมการที่ (6.6) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิเลิเมนต์เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.28) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.7) อิเลิเมนต์เมทริกซ์ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก $[K]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.31) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.8) และโหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง $\{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$ ซึ่งด้วย $t + \Delta t$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง เวลาเดียวกับที่ต้องการคำนวณหาคำตอบ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.35) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.9) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละอิเลิเมนต์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[M]_{3 \times 3} = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$[K]_{3 \times 3} = \frac{\nu}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\{F\}_{3 \times 1} = \frac{\nu \mu_0}{2} \left(M_x \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} \right) + \frac{j_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (4.41) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.10) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$[A]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} = \{B\}_{n \times 1} \quad (6.10)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต : โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ ดัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (6.8) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ($A = 0$)

ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (6.8) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

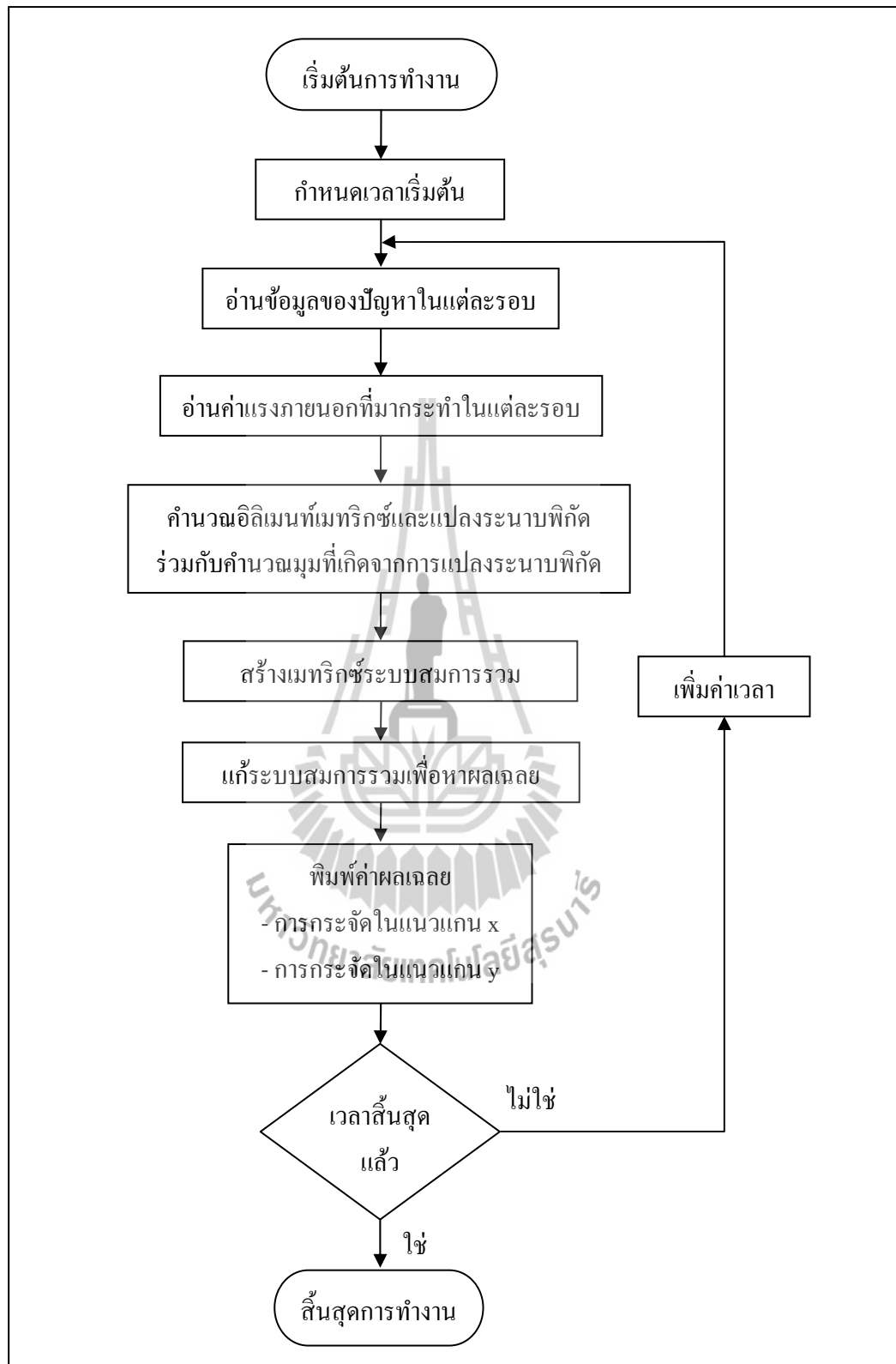
ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นกราฟแสดงขนาดซึ่งจะประกอบด้วยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และแรงแม่เหล็ก

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

6.4.2 โปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน

การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนสำหรับ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ ก่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณขนาดของการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 6.14





รูปที่ 6.14 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน

จากแผนภูมิดังรูปที่ 6.14 อาจเข้าใจได้ถึงลำดับการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะทำงานเป็นขั้นตอนและมีหน้าที่ต่างกันไป ซึ่งจะอธิบายการทำงานของโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้น : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไป ลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาและอ่านค่าแรงภายนอกที่มากระทำในแต่ละรอบ : ขั้นตอนนี้ โปรแกรมทำหน้าที่รับค่าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิเลิเมนต์ และค่าพารามิเตอร์ทางวัสดุต่างๆ รวมถึงโปรแกรมจะรับแรงที่ได้จากการคำนวณในเวลาเดียวกันกับที่จะคำนวณการสั่นในรอบนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์และแปลงระนาบพิกัดร่วมกับคำนวณมุมที่เกิดจากการแปลงระนาบพิกัด : จากนั้น โปรแกรมจะคำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุก ๆ อิเลิเมนต์ โดยมีสมการไฟไนท์อิเลิเมนต์ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่แสดงได้ด้วยสมการที่ (5.1) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6.11)

$$[M]_{6 \times 6} \frac{\partial^2 \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{6 \times 6} \frac{\partial \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t} + [K]_{6 \times 6} \{x\}_{6 \times 1} = \{F\}_{6 \times 1} \quad (6.11)$$

สมการที่ (6.11) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิเลิเมนต์เมทริกซ์มวล $[M]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.18) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.12) อิเลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริง $[K]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.11) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.13) โดยจะไม่พิจารณาถึงอิเลิเมนต์เมทริกซ์ความหน่วง $[D]_{6 \times 6}$

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (6.12)$$

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (6.13)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[R]$ คือค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้างดังแสดงด้วยสมการที่ (5.12) ของบทที่ 5 หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.14) ส่วน $[\tilde{M}]$ และ $[\tilde{K}]$ คือเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งของสปริงในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นดังแสดงด้วยสมการที่ (5.17) และ (5.8) ของบทที่ 5 ตามลำดับ หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.15) และสมการที่ (6.16) ตามลำดับ ซึ่งโดยโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการแปลงระนาบพิกัดวงกว้างไปเป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นและแปลงกลับไปเป็นระนาบพิกัดวงกว้างตามเดิม เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$[\tilde{M}] = \frac{\rho \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$[\tilde{K}] = [\tilde{K}_n] + [\tilde{K}_s] \quad (6.16)$$

สำหรับรายละเอียดต่างๆ ในสมการที่ (6.14) (6.15) และ (6.16) สามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 5.2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลิเมนต์ ในบทที่ 5

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : จากนั้น โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ ที่คำนวณได้จากโปรแกรมเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.17) โดยหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น $2n$ สมการ ทั้งนี้เนื่องจากพิจารณาการจัดทั้งแนวแกน x และ y

$$[M]_{2n \times 2n} \frac{\partial^2 \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{2n \times 2n} \frac{\partial \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t} + [K]_{2n \times 2n} \{x\}_{2n \times 1} = \{F\}_{2n \times 1} \quad (6.17)$$

ขั้นตอนที่ 5 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการสามัญอันดับสองเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม ดังสมการที่ (6.17) โดยเลือกใช้วิธีผลต่างกลาง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ในบทที่ 5 การแก้ระบบสมการเชิงเส้นตามสมการที่ (5.23) (5.24) และ (5.25) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.18) (6.19) และ (6.20) ตามลำดับ โดยโปรแกรมจะแจ้งสถานะการคำนวณผ่านทางหน้าจอในแต่ละรอบของการคำนวณ

$$[M_{eff}] \{x\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (6.18)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \quad (6.19)$$

$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{x\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \{x\}^{t-\Delta t} \quad (6.20)$$

ขั้นตอนที่ 6 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นจะพิมพ์ค่าผลเฉลยที่ต้องการออกมา ซึ่งประกอบด้วยค่าการกระจัดในแนวแกน x และ y ที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งดั้งเดิมของทุกๆ จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 7 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 7 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 5

การคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

5.1 บทนำ

การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ในขณะที่โรเตอร์หมุน โดยแสดงผลของการสันสะท้อนในรูปของการกระจัดที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปร่างดั้งเดิมของมอเตอร์ ก่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในทุก ๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ประยุกต์วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของการสันสะท้อนนี้

5.2 การคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์กระแสดตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

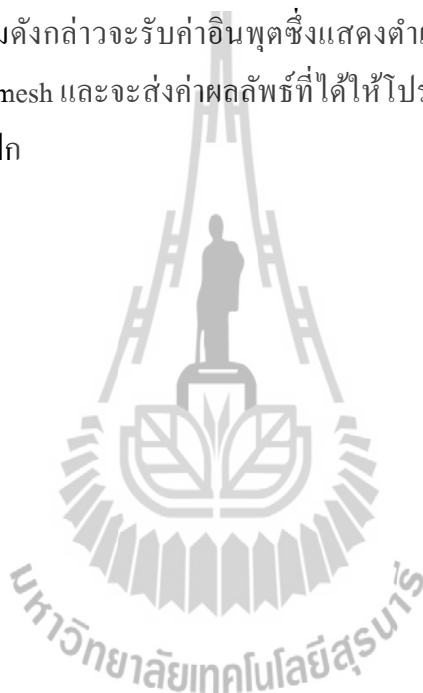
การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนในมอเตอร์ จะอาศัยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อสร้างสมการการเคลื่อนที่ โดยพิจารณาการสันในรูปของฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งการดำเนินงานจะมีขั้นตอนคล้ายคลึงกับการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จากบทที่ 4 ที่ผ่านมา โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

5.2.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

จากรูปที่ 5.1 การคำนวณการสันสะท้อนได้แบ่งพื้นที่การพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของสเตเตอร์ ส่วนของโรเตอร์และส่วนของโครงสเตเตอร์ เป็นที่ทราบกันแล้วว่าส่วนที่เป็นโครงสเตเตอร์นั้นเป็นส่วนที่ยึดติดกับแกนสเตเตอร์และโครงของฮาร์ดดิสก์ขณะมอเตอร์ทำงาน และเป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ดังได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 3 ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเมื่อจะทำการวัดทดสอบการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์จะวัดตรงบริเวณโครงสเตเตอร์ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในบทต่อไป โดยเริ่มจากการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อโดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ได้ใช้

6.5 สรุป

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราวก่อนข้างดำเนินการได้ยากและมีความซับซ้อน การทำความเข้าใจอย่างละเอียดและลึกซึ้งต่อค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะพานที่แปรเปลี่ยนไปในขณะที่มอเตอร์หมุน จึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ดังที่บทที่ 6 ได้นำเสนอไว้ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานในบทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยมีโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและโปรแกรมจำลองผลการสั้นสะพานดังที่อธิบายด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ โปรแกรมดังกล่าวจะรับค่าอินพุตซึ่งแสดงตำแหน่งของอิลิเมนต์และจุดต่อจากโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Gmesh และจะส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ให้โปรแกรม MATLAB เพื่อการคำนวณและแสดงผลในรูปแบบกราฟฟิก



บทที่ 6

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

6.1 บทนำ

การจำลองผลเพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) ขนาด 12 V ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Intel Pentium I5 2.4 GHz, 4 GB SD-RAM สำหรับประมวลผล โดยได้ประดิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและสมการการเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์จากการสร้างกริดอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมพีริแวลล์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh การจำลองผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อ โรเตอร์หมุนไป และวิเคราะห์ถึงขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ดังนั้นในบทที่ 6 นี้ จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

6.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

การจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในบทนี้ ได้พิจารณา BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของBLDCMในฮาร์ดดิสก์ขนาด 12 V

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันแหล่งจ่าย	12 V (ต่อแบบสตาร์)
จำนวนขั้ว	8 P
จำนวนร่องของสเตเตอร์	12 ร่อง
ความถี่แหล่งจ่าย	227 Hz
ความเร็วพิกัด	3400 rpm

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของBLDCMในฮาร์ดดิสก์ขนาด 12 V (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	$0.29 \Omega / \phi$
รัศมีของเส้นลวดตัวนำ	0.125 mm
ความเหนียวนำที่ใช้คำนวณ (L-M)	0.365 mH
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.0002265 kgm^2
วัสดุสารแม่เหล็กถาวร	S20
มอดูลัสของแกนสเตเตอร์	$2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
มอดูลัสของโครงสเตเตอร์ (อลูมิเนียม)	$7.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
มอดูลัสของแม่เหล็กถาวร	$1.7 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
ความหนาแน่นมวลของแกนสเตเตอร์	$2.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ความหนาแน่นมวลของโครงสเตเตอร์	$6.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
อัตราส่วนของปิวของ	0.25
จำนวนรอบการพัน/ขดลวด	30 รอบ
สภาพนำทางไฟฟ้าของแม่เหล็กถาวร	$1.1 \times 10^6 \Omega^{-1} / \text{m}$
ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของแม่เหล็กถาวร	1.154
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืด	$0.004 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{sec}$
ขนาดของฟลักซ์ลิงก์เกจ	0.041
แรงลบล้างแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	550000 A/m
ค่าคงที่ของแรงดันต้านกลับ	0.03

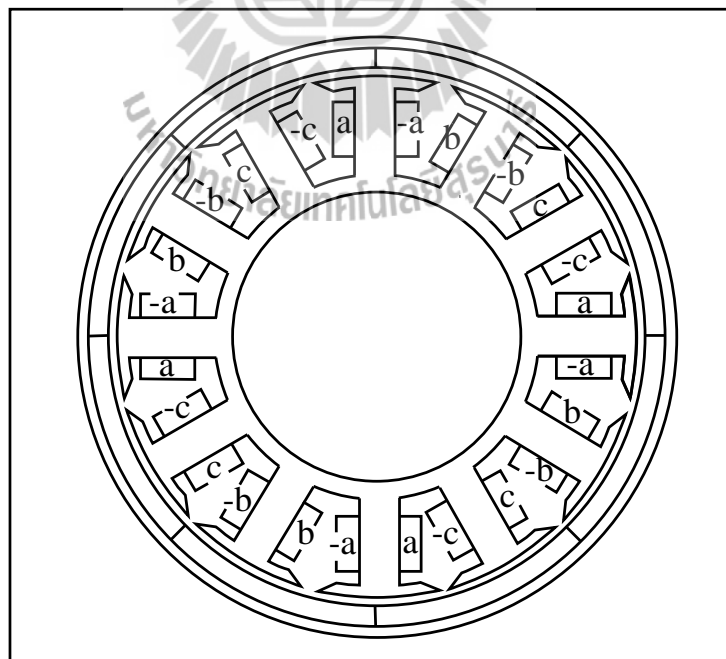
หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล

ลักษณะการพันของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส (a , b และ c) แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 กระแสในแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันอยู่ในแต่ละร่องของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลาโดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและค่าพารามิเตอร์ของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อทราบกระแส I ในแต่ละเฟสจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแส

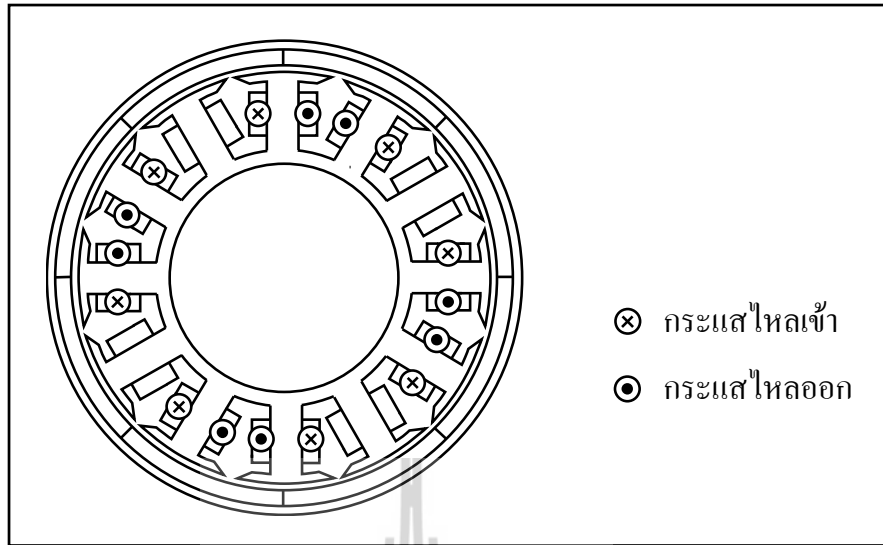
ภายนอก J_0 ที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ได้ตั้งสมการที่ (6.1) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$J_0 = \frac{m \cdot I}{a_l} \quad (6.1)$$

เมื่อ m คือจำนวนรอบการพันของขดลวด และ a_l คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2) โดยการป้อนค่า J_0 ให้แก่โปรแกรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของกระแสด้วยเพราะกระแสที่ใช้ในการคำนวณเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง กรณีที่พิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ (ระนาบ xy) J_0 จะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาษ ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้กระแสที่มีทิศทางวิ่งเข้ากระดาษมีเครื่องหมายบวก และกระแสที่มีทิศทางวิ่งออกกระดาษมีเครื่องหมายลบ สำหรับการคำนวณแล้วสามารถจัดได้โดยง่ายเพราะกระแสในแต่ละจังหวะเวลาหนึ่งๆ จะประกอบด้วยค่ากระแสที่มีค่าเป็นบวก ลบ และศูนย์ ดังนั้นในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุนจะมีทั้งกระแสไหลเข้า ไหลออก และ ไม่มีกระแสไหลตามลำดับดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 การพันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสในแต่ละเฟส



รูปที่ 6.2 ทิศทางการไหลของกระแสเวลาขณะหนึ่ง

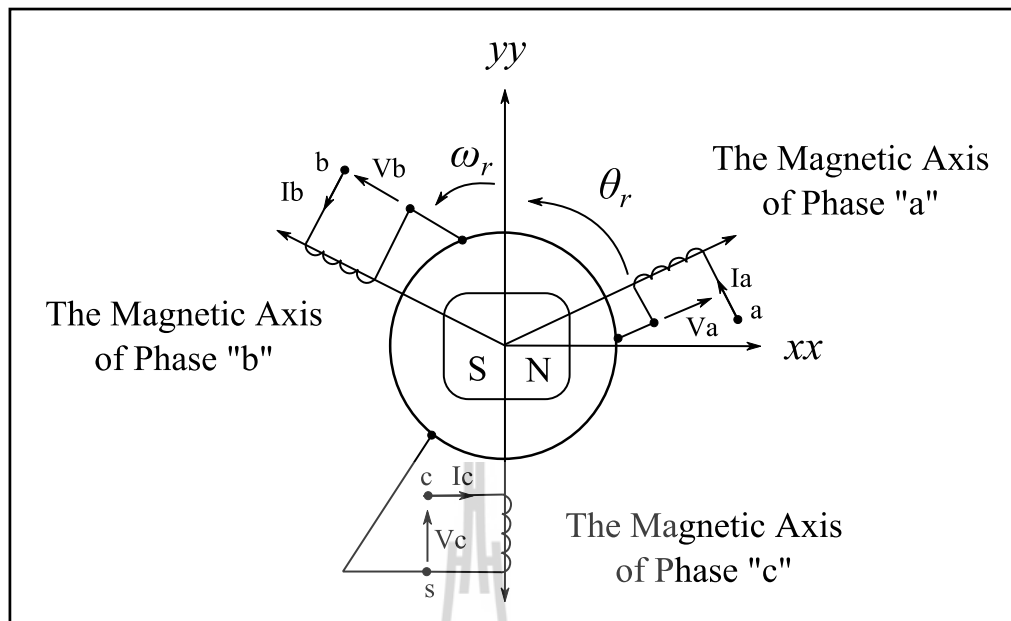
6.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

การคำนวณกระแสของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของ BLDCM ในบทที่ 3 ซึ่งจะขอก้าวสรุปถึงแนวทางในการคำนวณค่ากระแสดังต่อไปนี้

6.3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

ขดลวดสเตเตอร์ของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ มีรูปแบบเป็นอิมพีแดนซ์ (RL อนุกรม) ต่อแบบวาย อิมพีแดนซ์แต่ละกิ่งเป็นตัวแทนแกนขดลวดสเตเตอร์ และเป็นการต่ออิมพีแดนซ์แบบสามเฟสสมมูลที่ให้อยู่กับที่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.3 ซึ่งจะได้แบบจำลองทางไฟฟ้าดังสมการที่ (3.41) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.2) (สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของ BLDCM ในบทที่ 3)

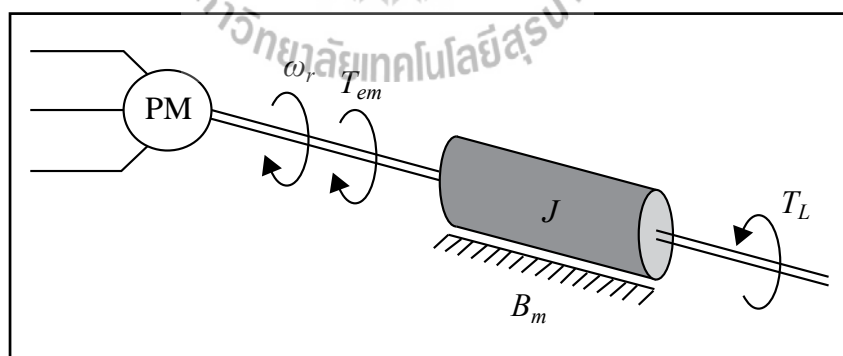
$$\begin{bmatrix} dI_a / dt \\ dI_b / dt \\ dI_c / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \right\} \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.3 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงในระนาบสามเฟส

6.3.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

แบบจำลองทางกลของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์เมื่อมอเตอร์ขับโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์

จากสมการการเคลื่อนที่และคุณสมบัติของสมการการเคลื่อนที่ที่จะได้ดังสมการที่ (3.44) และ (3.45) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.3) และ (6.4) ตามลำดับ

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P \cdot E_a \cdot I_a}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_b \cdot I_b}{J\omega_r} + \frac{P \cdot E_c \cdot I_c}{J\omega_r} - \frac{B_m \cdot \omega_r}{J} - \frac{P \cdot T_L}{J} \quad (6.3)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{P}{2} \omega_r \quad (6.4)$$

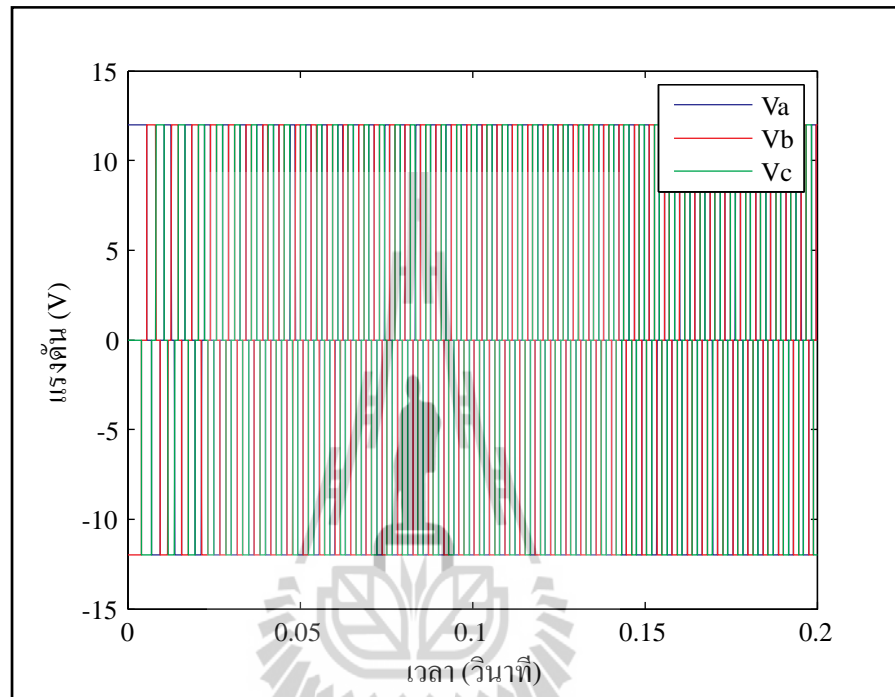
เมื่อนำสมการที่ (6.3) และ (6.4) ประกอบกับสมการที่ (6.2) จะได้ดังสมการที่ (3.46) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.5) (สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 3.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในบทที่ 3)

$$\begin{bmatrix} dI_a/dt \\ dI_b/dt \\ dI_c/dt \\ d\omega_r/dt \\ d\theta_e/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ -P \cdot E_a / \omega_r & -P \cdot E_b / \omega_r & -P \cdot E_c / \omega_r & B_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ P \cdot T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

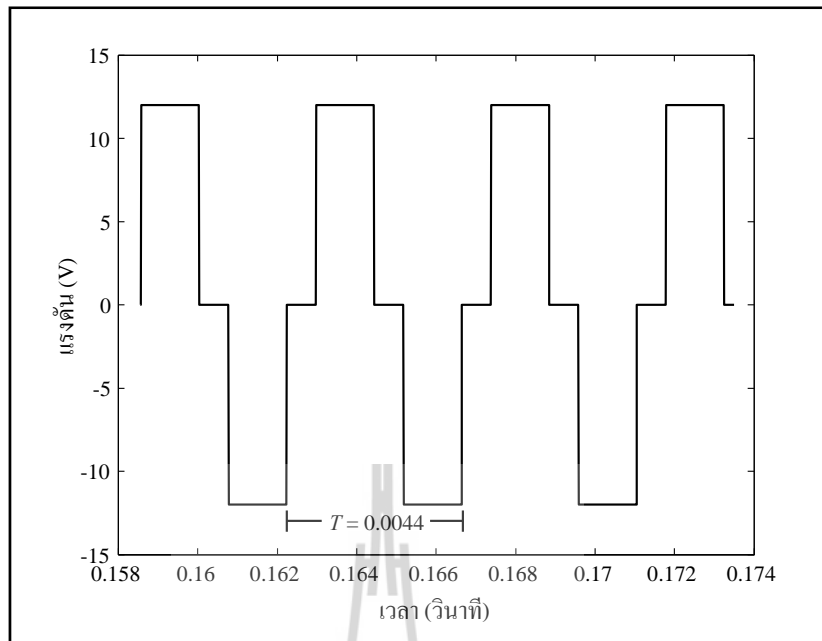
6.3.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองของมอเตอร์ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลดังสมการที่ (6.5) ข้างต้น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.5 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามเฟสเทียบกับเวลา และรูปที่ 6.6 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฟส α เทียบกับเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่และป้อนแรงดันด้านกลับดังแสดงด้วยรูปที่ 6.7 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันด้านกลับเทียบกับเวลา และรูปที่ 6.8 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันด้านเฟส α กลับเทียบกับเวลาเมื่อ

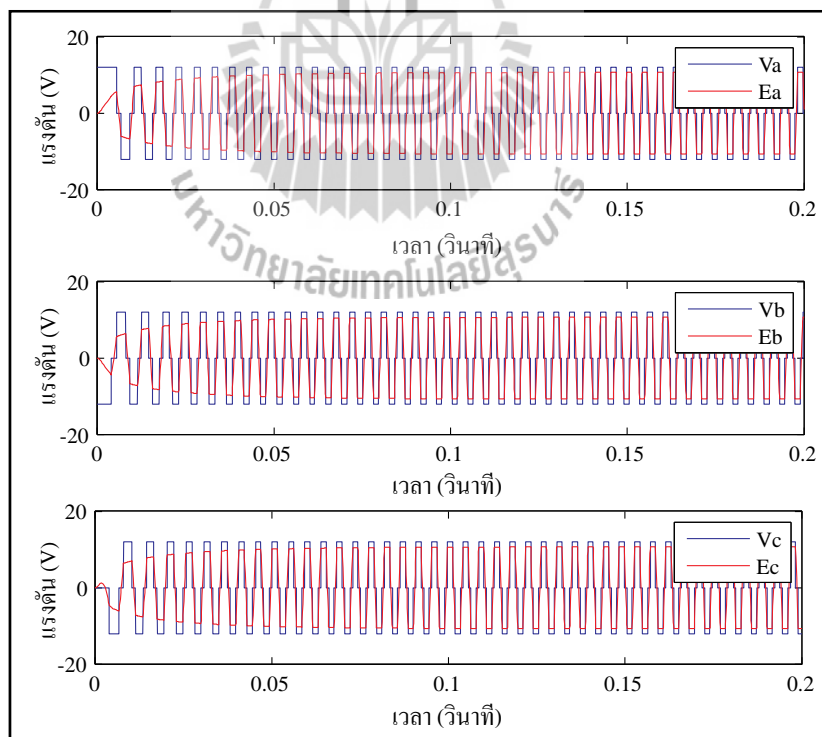
มอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 6.1 จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระแสที่ใช้ในการคำนวณหาค่า J_0 ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับรูปที่ 6.10 คือกราฟกระแสของเฟส a ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



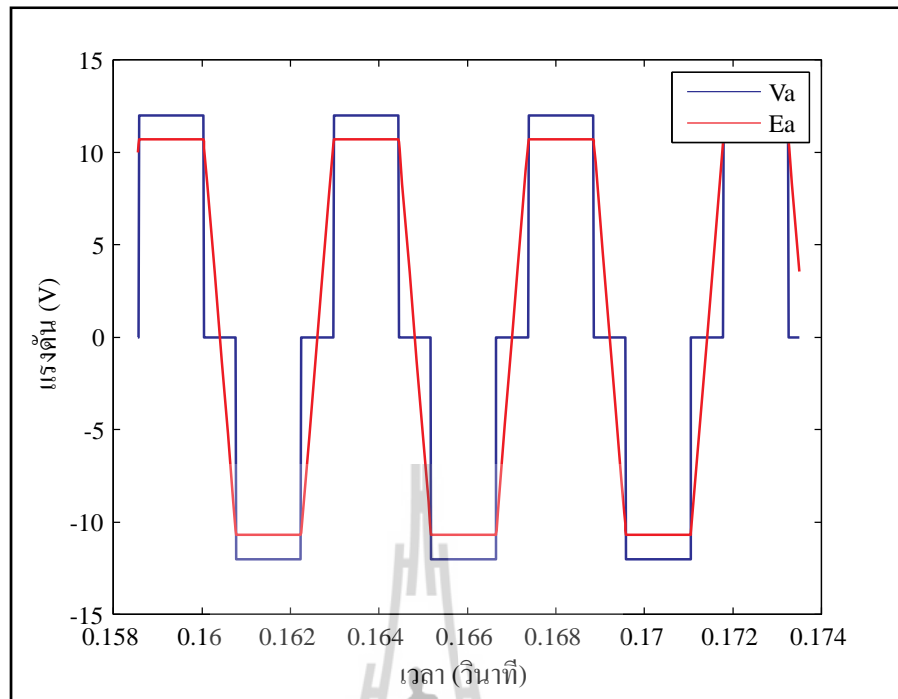
รูปที่ 6.5 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละเฟสเทียบกับเวลา



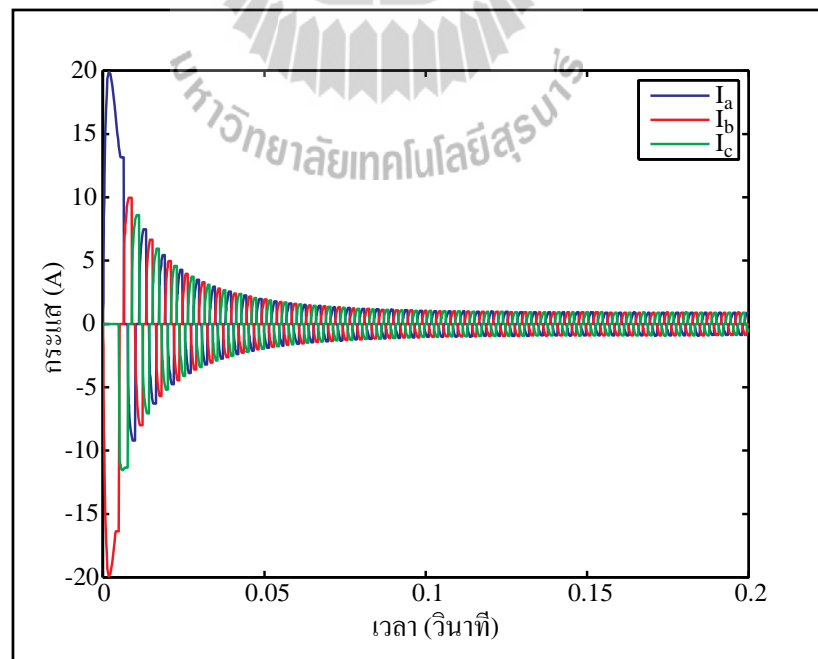
รูปที่ 6.6 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฟส a เทียบกับเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



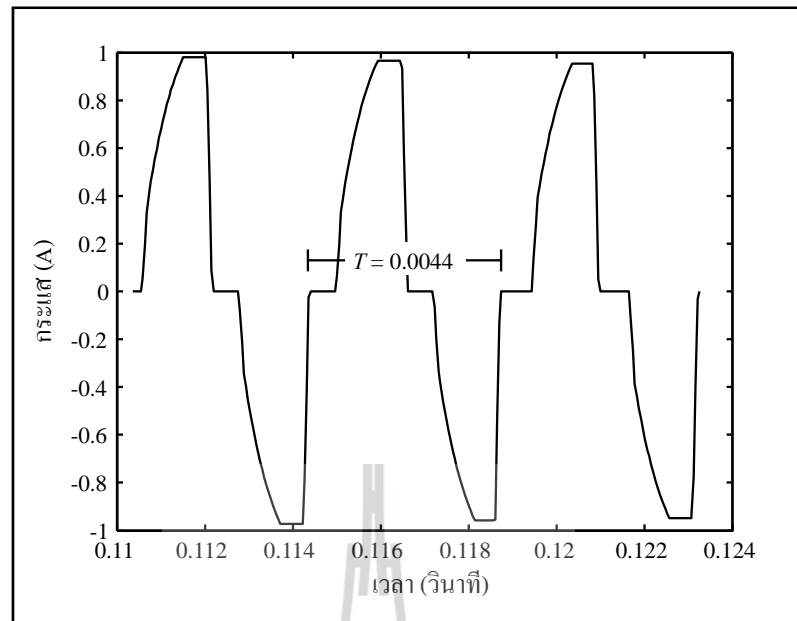
รูปที่ 6.7 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านกลับเทียบกับเวลา



รูปที่ 6.8 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันต้านเฟส a กลับเทียบกับเวลา
เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่



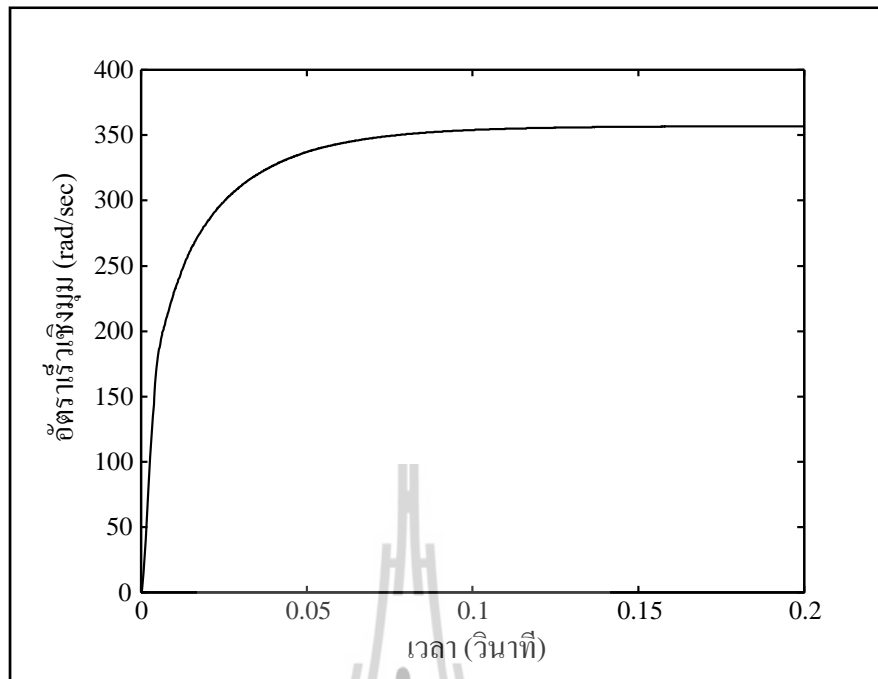
รูปที่ 6.9 กราฟกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ



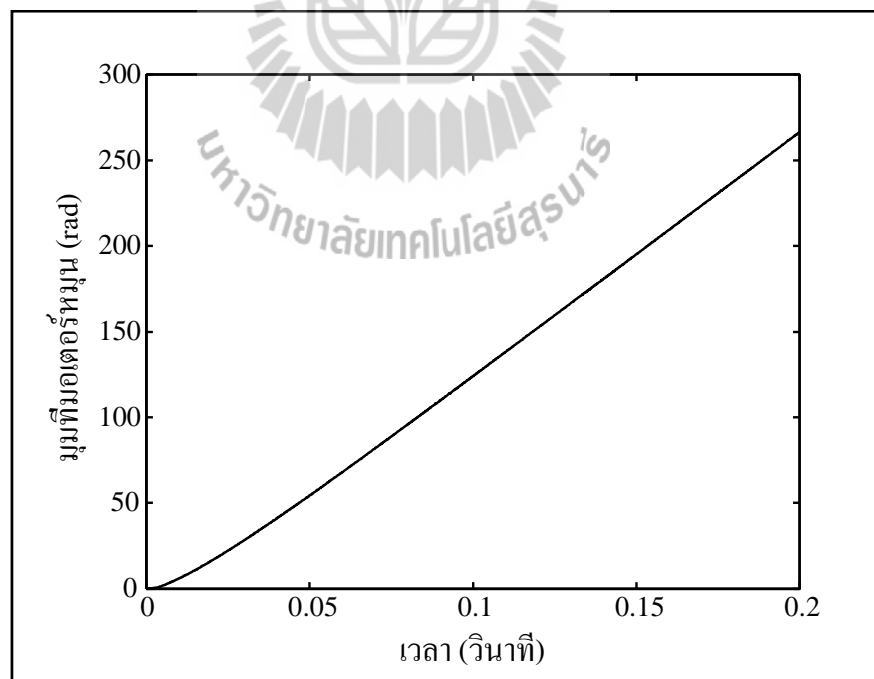
รูปที่ 6.10 กราฟกระแสเฟส a เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ
เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่

จากรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.10 คาบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสมีค่าเท่ากับ 0.0044 ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่ได้จาก $f = 1/T$ จากความสัมพันธ์นี้จะคำนวณความถี่ได้เท่ากับ $f = 227 \text{ Hz}$

จากสมการที่ (6.5) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนอกจากค่า I_a , I_b และ I_c ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้วยังมีอัตราเร็วเชิงมุม (ω_r) และมุมที่มอเตอร์หมุน (θ) เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 ตามลำดับ



รูปที่ 6.11 กราฟอัตราเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 6.12 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

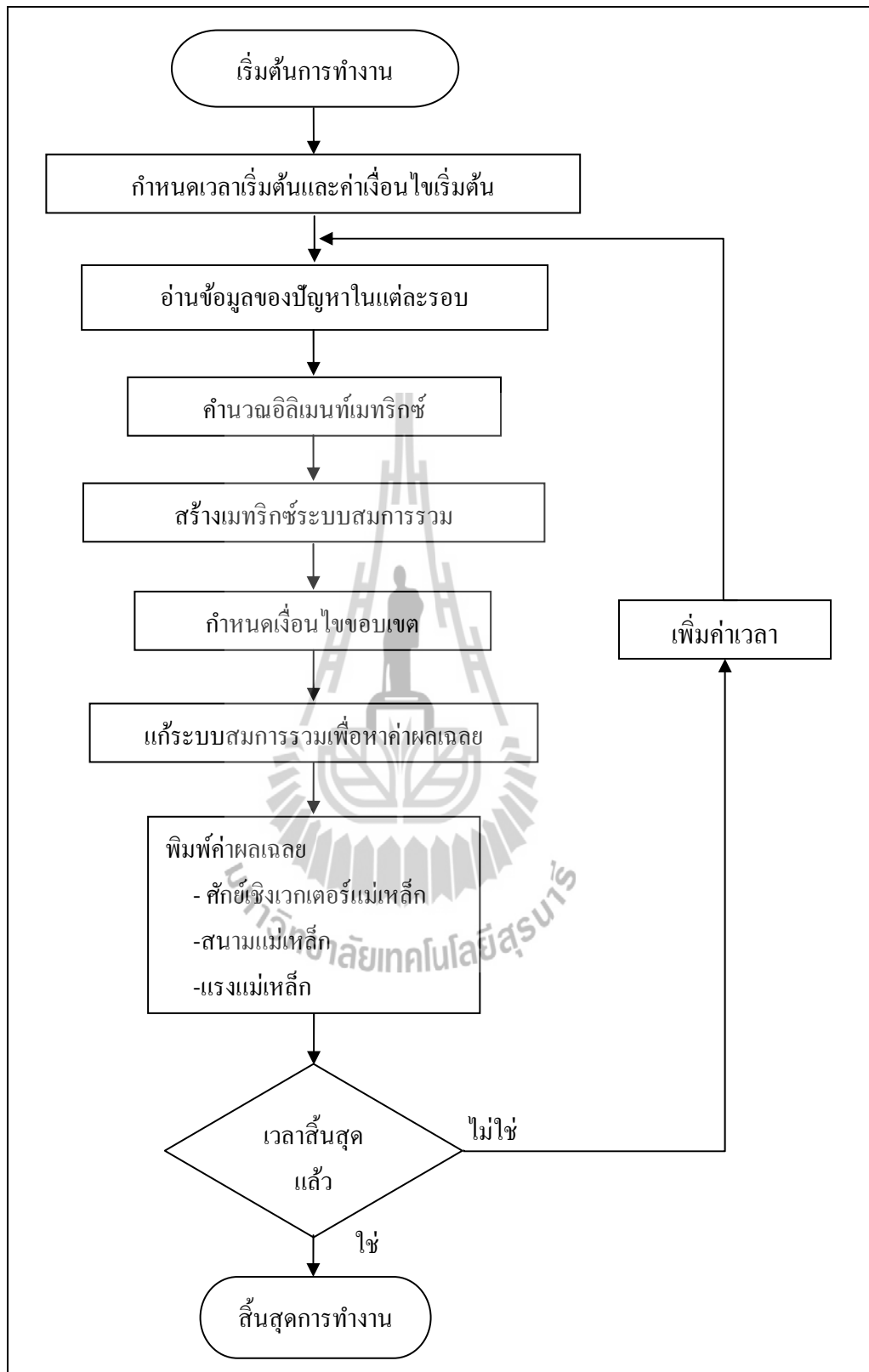
จากรูปที่ 6.11 ค่าอัตราเร็วเชิงมุมจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ที่เวลาประมาณ 0.175 วินาที ด้วยค่าอัตราเร็วเชิงมุมประมาณ 355 rad/sec หรือคำนวณเป็นความเร็วรอบได้จาก $N = 60\omega_r / (2\pi)$ ซึ่งจะมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 3390 rpm จะเห็นได้ว่ามีค่าความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งมีความเร็วพิกัดเท่ากับ 3400 rpm

6.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เกิดจากการประคิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ เกิดจากการสร้างกริดโดยโปรแกรมฟรีแวร์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

6.4.1 โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

การคำนวณสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์สำหรับโรเตอร์หมุน เมื่อกำเนินถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีราคาแพงประมวลผลช้า และไม่มีความคล่องตัวเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โรเตอร์หมุนดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประคิษฐ์ไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

จากแผนภูมิในรูปที่ 6.13 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบ โดยรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่างๆเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขเริ่มต้น : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่างๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไปลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย โดยโปรแกรมยังมีหน้าที่ในการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกคือการให้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ $A(t=0) = 0$

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ : จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อ จากเอาต์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมฟรีแวร์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลิเมนต์จำนวน และหมายเลขของอิเลิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะใช้การคำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุก ๆ อิเลิเมนต์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.39) จากบทที่ 4 ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6.6) โดยที่ $\{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} + [K]_{3 \times 3} \right) \{A\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{3 \times 3} \{A\}_{3 \times 1}^t + \{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (6.6)$$

สมการที่ (6.6) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิเลิเมนต์เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.28) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.7) อิเลิเมนต์เมทริกซ์ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก $[K]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.31) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.8) และโหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง $\{F\}_{3 \times 1}^{t+\Delta t}$ ซึ่งด้วย $t + \Delta t$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง เวลาเดียวกับที่ต้องการคำนวณหาคำตอบ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.35) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.9) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละอิเลิเมนต์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[M]_{3 \times 3} = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$[K]_{3 \times 3} = \frac{\nu}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\{F\}_{3 \times 1} = \frac{\nu \mu_0}{2} \left(M_x \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} \right) + \frac{j_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (4.41) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.10) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$[A]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} = \{B\}_{n \times 1} \quad (6.10)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต : โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ ดัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (6.8) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ($A = 0$)

ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (6.8) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

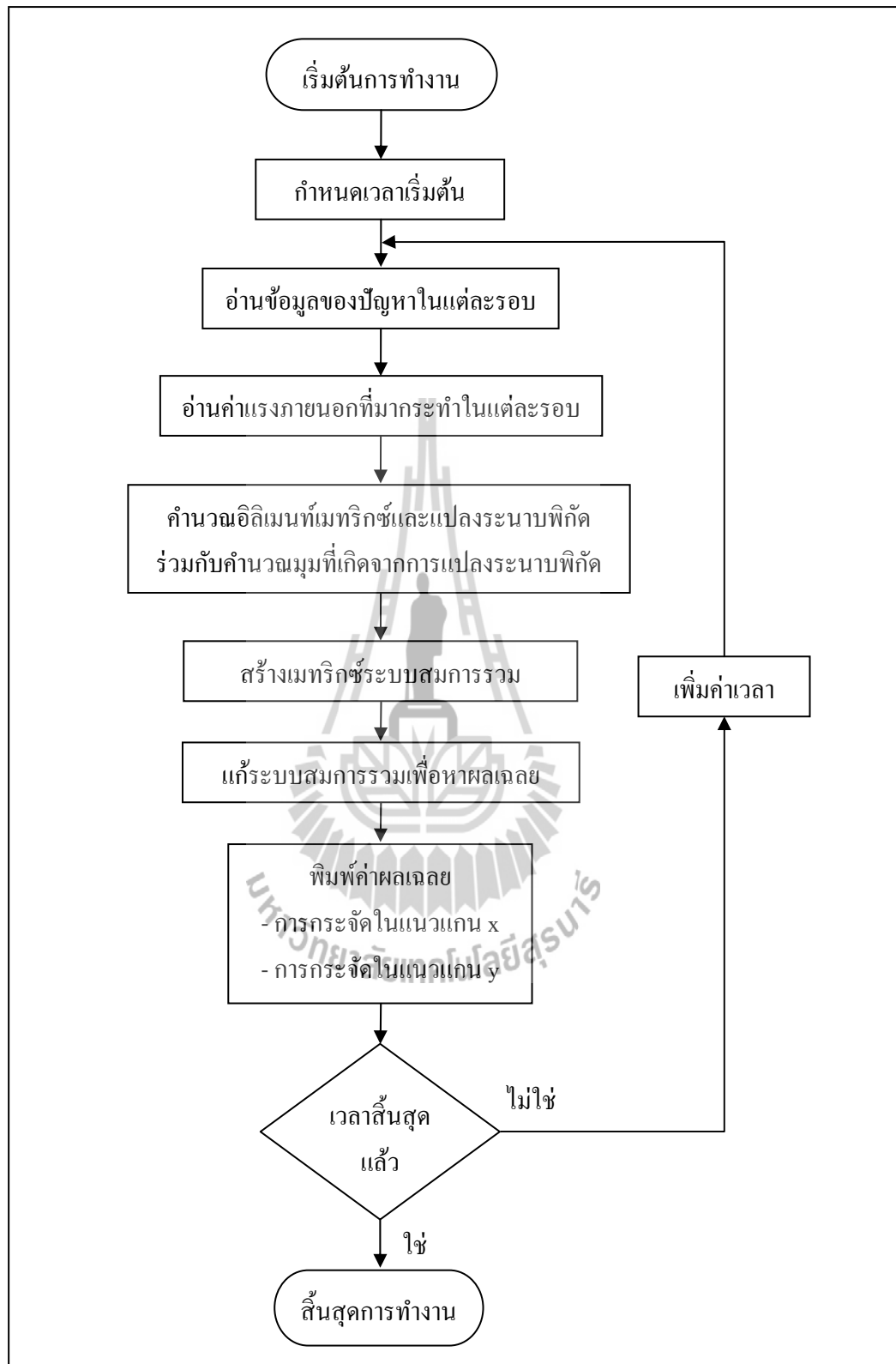
ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นกราฟแสดงขนาดซึ่งจะประกอบด้วยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และแรงแม่เหล็ก

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

6.4.2 โปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน

การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนสำหรับ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ ก่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณขนาดของการสันสะท้อนของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 6.14





รูปที่ 6.14 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน

จากแผนภูมิดังรูปที่ 6.14 อาจเข้าใจได้ถึงลำดับการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะทำงานเป็นขั้นตอนและมีหน้าที่ต่างกันไป ซึ่งจะอธิบายการทำงานของโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้น : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไป ลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาและอ่านค่าแรงภายนอกที่มากระทำในแต่ละรอบ : ขั้นตอนนี้ โปรแกรมทำหน้าที่รับค่าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิเลิเมนต์ และค่าพารามิเตอร์ทางวัสดุต่างๆ รวมถึงโปรแกรมจะรับแรงที่ได้จากการคำนวณในเวลาเดียวกันกับที่จะคำนวณการสั่นในรอบนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์และแปลงระนาบพิกัดร่วมกับคำนวณมุมที่เกิดจากการแปลงระนาบพิกัด : จากนั้น โปรแกรมจะคำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุก ๆ อิเลิเมนต์ โดยมีสมการไฟไนท์อิเลิเมนต์ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่แสดงได้ด้วยสมการที่ (5.1) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6.11)

$$[M]_{6 \times 6} \frac{\partial^2 \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{6 \times 6} \frac{\partial \{x\}_{6 \times 1}}{\partial t} + [K]_{6 \times 6} \{x\}_{6 \times 1} = \{F\}_{6 \times 1} \quad (6.11)$$

สมการที่ (6.11) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิเลิเมนต์เมทริกซ์มวล $[M]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.18) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.12) อิเลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริง $[K]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.11) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.13) โดยจะไม่พิจารณาถึงอิเลิเมนต์เมทริกซ์ความหน่วง $[D]_{6 \times 6}$

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (6.12)$$

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (6.13)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[R]$ คือค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้างดังแสดงด้วยสมการที่ (5.12) ของบทที่ 5 หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.14) ส่วน $[\tilde{M}]$ และ $[\tilde{K}]$ คือเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งของสปริงในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นดังแสดงด้วยสมการที่ (5.17) และ (5.8) ของบทที่ 5 ตามลำดับ หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.15) และสมการที่ (6.16) ตามลำดับ ซึ่งโดยโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการแปลงระนาบพิกัดวงกว้างไปเป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นและแปลงกลับไปเป็นระนาบพิกัดวงกว้างตามเดิม เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$[\tilde{M}] = \frac{\rho \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$[\tilde{K}] = [\tilde{K}_n] + [\tilde{K}_s] \quad (6.16)$$

สำหรับรายละเอียดต่างๆ ในสมการที่ (6.14) (6.15) และ (6.16) สามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 5.2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลิเมนต์ ในบทที่ 5

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : จากนั้น โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ ที่คำนวณได้จากโปรแกรมเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.17) โดยหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น $2n$ สมการ ทั้งนี้เนื่องจากพิจารณาการจัดทั้งแนวแกน x และ y

$$[M]_{2n \times 2n} \frac{\partial^2 \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t^2} + [D]_{2n \times 2n} \frac{\partial \{x\}_{2n \times 1}}{\partial t} + [K]_{2n \times 2n} \{x\}_{2n \times 1} = \{F\}_{2n \times 1} \quad (6.17)$$

ขั้นตอนที่ 5 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการสามัญอันดับสองเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม ดังสมการที่ (6.17) โดยเลือกใช้วิธีผลต่างกลาง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ในบทที่ 5 การแก้ระบบสมการเชิงเส้นตามสมการที่ (5.23) (5.24) และ (5.25) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6.18) (6.19) และ (6.20) ตามลำดับ โดยโปรแกรมจะแจ้งสถานะการคำนวณผ่านทางหน้าจอในแต่ละรอบของการคำนวณ

$$[M_{eff}] \{x\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (6.18)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \quad (6.19)$$

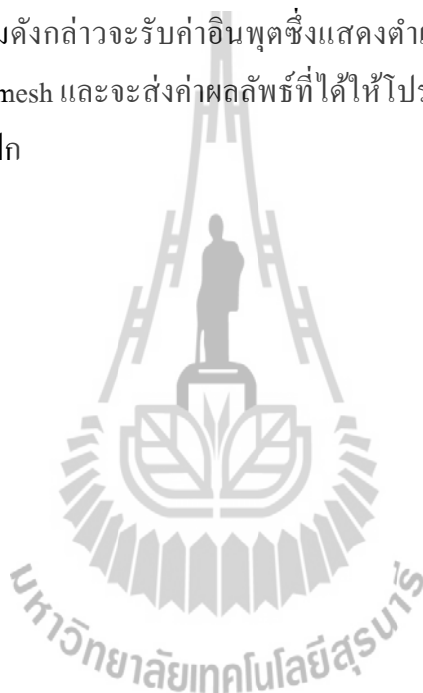
$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{x\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [D] \right] \{x\}^{t-\Delta t} \quad (6.20)$$

ขั้นตอนที่ 6 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นจะพิมพ์ค่าผลเฉลยที่ต้องการออกมา ซึ่งประกอบด้วยค่าการกระจัดในแนวแกน x และ y ที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งดั้งเดิมของทุกๆ จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 7 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 7 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ เป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

6.5 สรุป

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราวก่อนข้างดำเนินการได้ยากและมีความซับซ้อน การทำความเข้าใจอย่างละเอียดและลึกซึ้งต่อค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะพานที่แปรเปลี่ยนไปในขณะที่มอเตอร์หมุน จึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ดังที่บทที่ 6 ได้นำเสนอไว้ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานในบทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยมีโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและโปรแกรมจำลองผลการสั้นสะพานดังที่อธิบายด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ โปรแกรมดังกล่าวจะรับค่าอินพุตซึ่งแสดงตำแหน่งของอิลิเมนต์และจุดต่อจากโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Gmesh และจะส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ให้โปรแกรม MATLAB เพื่อการคำนวณและแสดงผลในรูปแบบกราฟฟิก



บทที่ 7

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ พร้อมเปรียบเทียบกับผลทดสอบ

7.1 บทนำ

ในบทที่ผ่านๆ มาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีต่างๆ ของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์หรือสปีนเดิลมอเตอร์ตลอดจนวิธีการคำนวณสนามแม่เหล็กและการคำนวณการสั้นสะพานของมอเตอร์ สำหรับในบทที่ 7 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองผลการคำนวณสนามแม่เหล็กและการคำนวณการสั้นสะพานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์จากบทที่ผ่านมารวมทั้งอภิปรายผลการจำลองในกรอบความรู้ที่ศึกษาจากงานวิจัยที่เคยมีผู้ได้ศึกษาก่อนหน้านี้ ตลอดจนเปรียบเทียบผลการคำนวณการสั้นสะพานในทางทฤษฎีกับผลการวัดทดสอบจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดถึงความถูกต้องของการคำนวณการสั้นสะพานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงหลักการในการวัดทดสอบการสั้นสะพานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์อย่างถูกต้องด้วย

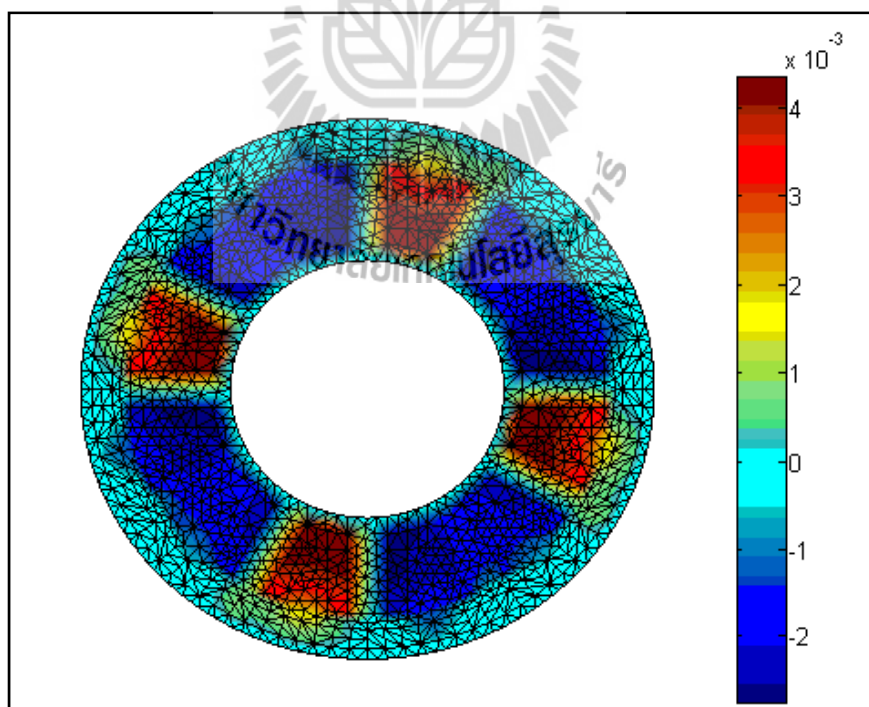
7.2 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

จากทฤษฎีในบทที่ 3 จะทราบได้ว่าการคำนวณการสั้นสะพานของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์นั้น จะต้องคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวบริเวณหน้าตัดของมอเตอร์ก่อน จากนั้นจึงคำนวณค่าสนามแม่เหล็กซึ่งถือว่าเป็นอิทธิพลหลักที่ก่อให้เกิดแรงสั้นสะพานของมอเตอร์ ซึ่งในหัวข้อต่อไปนี้จะได้นำเสนอผลการคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กพร้อมทั้งอภิปรายผลการจำลอง

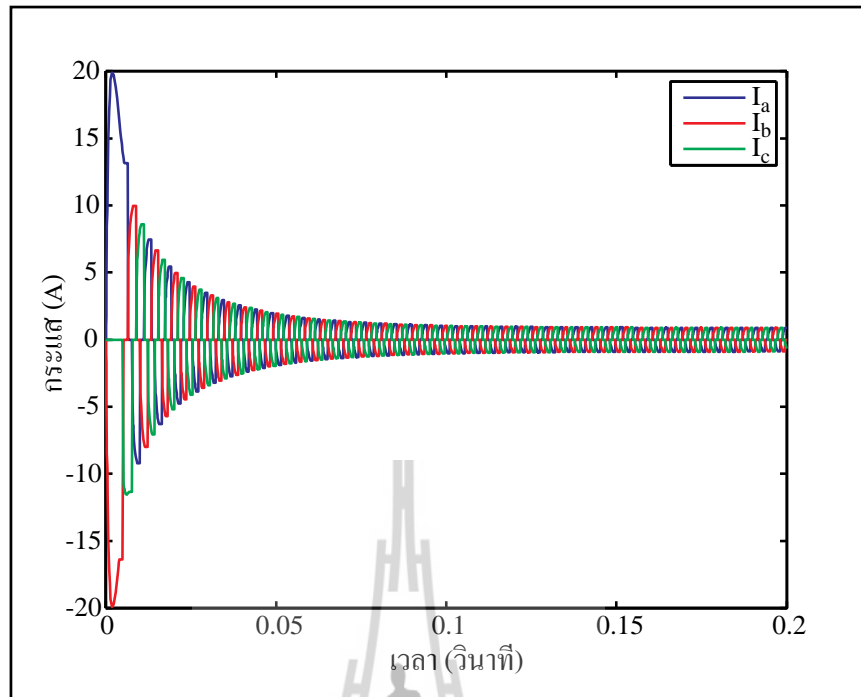
7.2.1 ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและอภิปรายผล

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแก้สมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองดังสมการที่ (4.6) เพื่อหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวบริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ จะแสดงด้วยรูปที่ 7.1 จากรูปจะแสดงถึงการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ ณ เวลาตัวอย่างเท่ากับ 0.25 sec ซึ่งมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงตัวแล้ว ที่เวลานี้กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะได้ $I_a = 5.11 A$ $I_b = -5.54 A$ และ $I_c = 0 A$ ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.2 ดังนั้นรูปที่ 7.1 จะเห็นการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส c

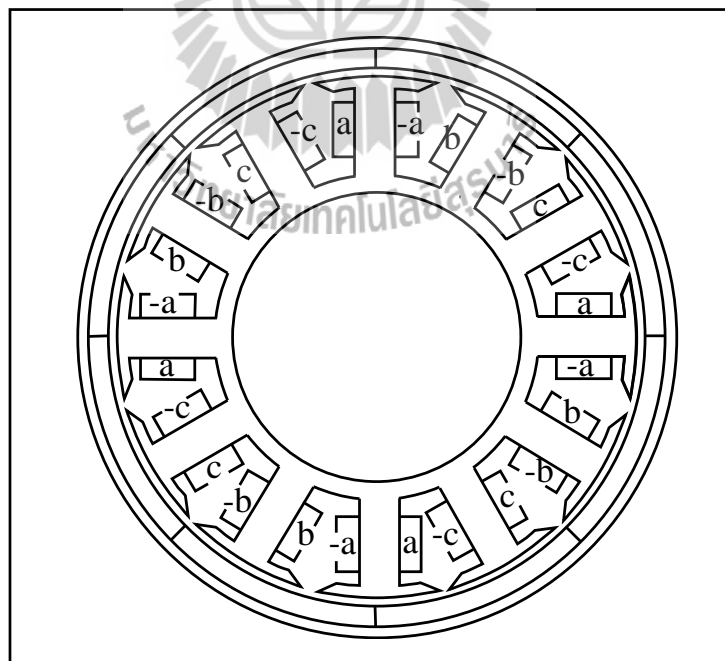
(พิจารณารูปที่ 7.3 ประกอบ ซึ่งเป็นการแสดงการพันขดลวด) จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมีเพราะ ณ จังหวะเวลานี้กระแสที่ป้อนไปที่เฟส c เป็นศูนย์นั่นเอง ($I_c = 0A$) แต่ถ้าพิจารณาที่เฟส a และ b (พิจารณารูปที่ 7.3 ประกอบ) จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส a และ b พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ (พิจารณาแถบสีแดงขนาดศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของรูปที่ 7.1 ประกอบ) เหตุที่แต่ละแกนสเตเตอร์มีสองสีดังกล่าวเป็นเพราะว่าในแต่ละแกนสเตเตอร์นั้นจะพันขดลวดสเตเตอร์ในทิศทางเข้าและออก เมื่อมองตามแนวแกน โรเตอร์ (พิจารณารูปที่ 7.3 ประกอบ) ทำให้เมื่อช่วงเวลาหนึ่ง กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีทิศทางตรงกันข้ามเสมอ เว้นแต่กรณีที่กระแสเป็นศูนย์จะไม่มีการไหลผ่านขดลวด ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.4 ซึ่งแสดงทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง สำหรับขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะอยู่ในระดับ 10^{-3} Wb/m ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูง ทั้งนี้เป็นเพราะค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสองส่วนคือ ส่วนสเตเตอร์เกิดจากการจ่ายกระแสที่ขดลวด และเกิดจากแม่เหล็กถาวรบริเวณ โรเตอร์



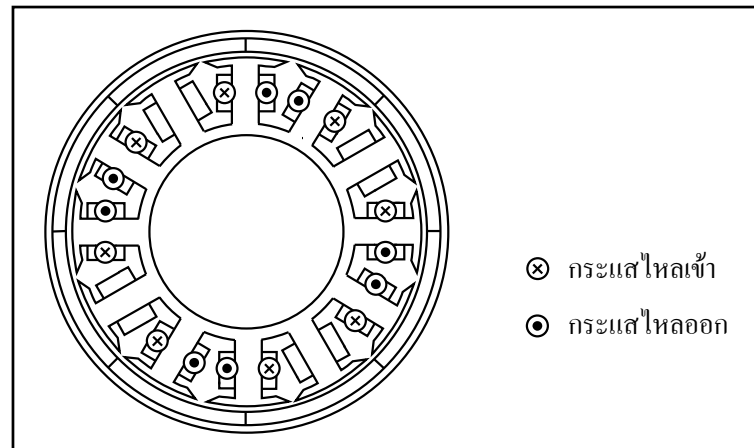
รูปที่ 7.1 ตัวอย่างการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ในสภาวะคงตัว



รูปที่ 7.2 กราฟกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

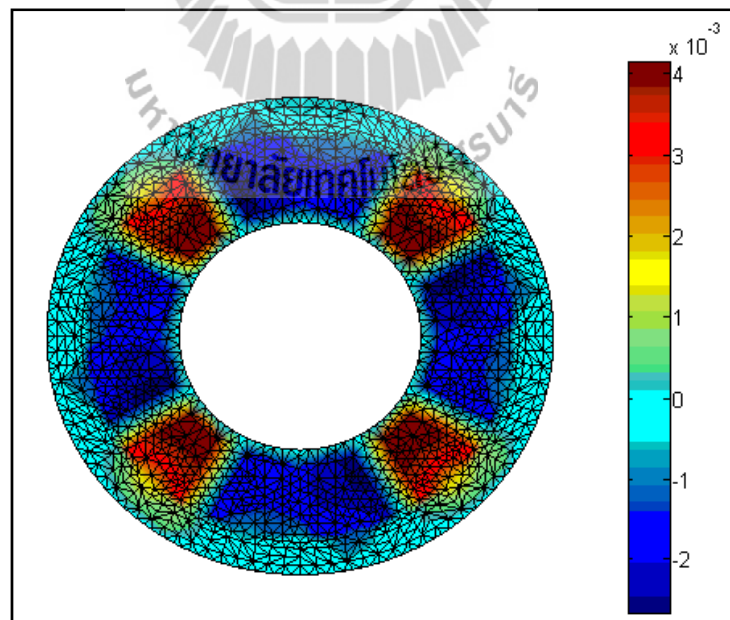


รูปที่ 7.3 การพันขดลวดสเตเตอร์ของกระแสในแต่ละเฟส

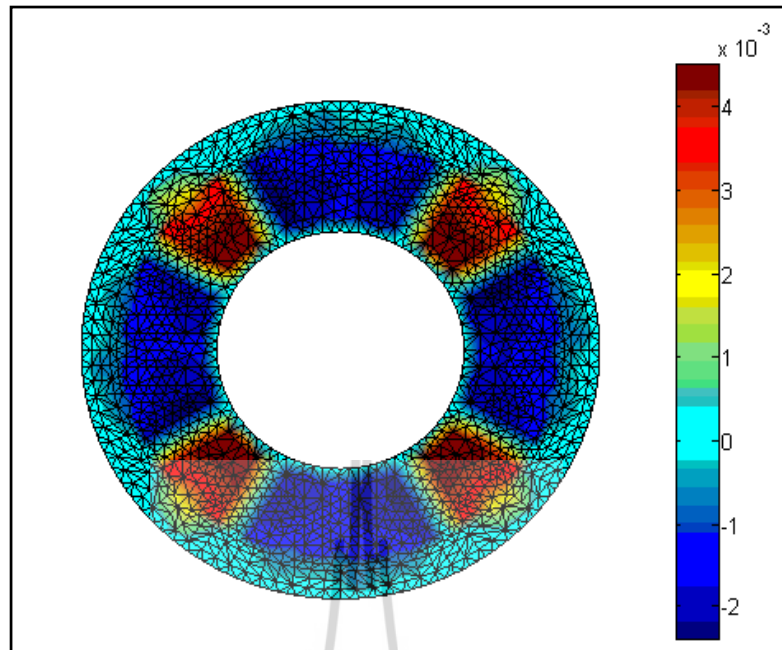


รูปที่ 7.4 ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง

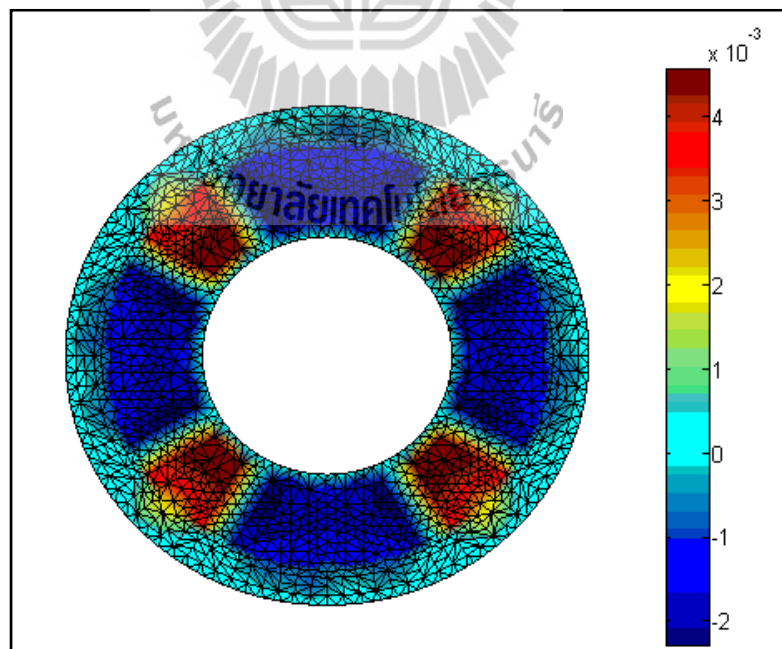
การจำลองผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กตลอดพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ ด้วยมุมต่างๆ ที่โรเตอร์หมุนใน 360 องศา ดังรูปที่ 7.5 ถึง รูปที่ 7.53 แสดงถึงการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 360 องศา โดยแต่ละรูปโรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาต่างกันด้วยมุมทีละ 7.5 องศา



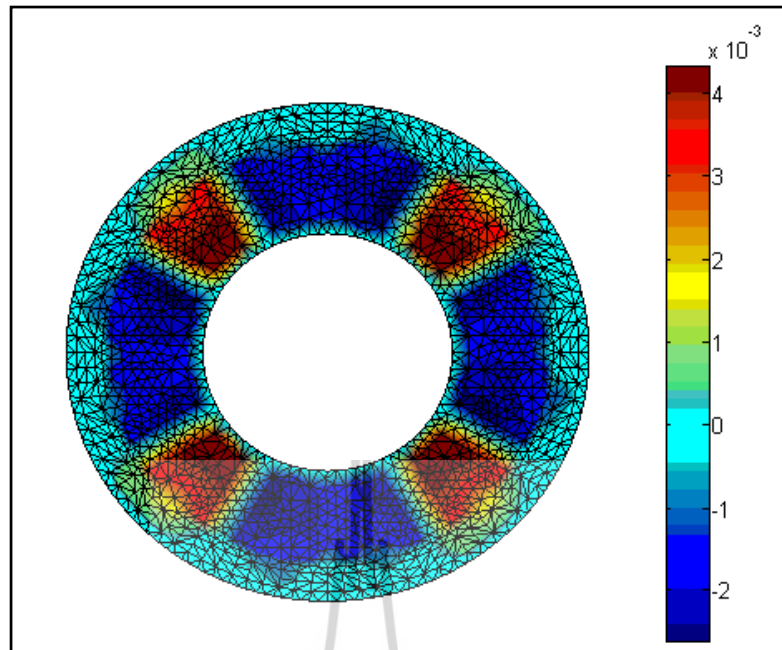
รูปที่ 7.5 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



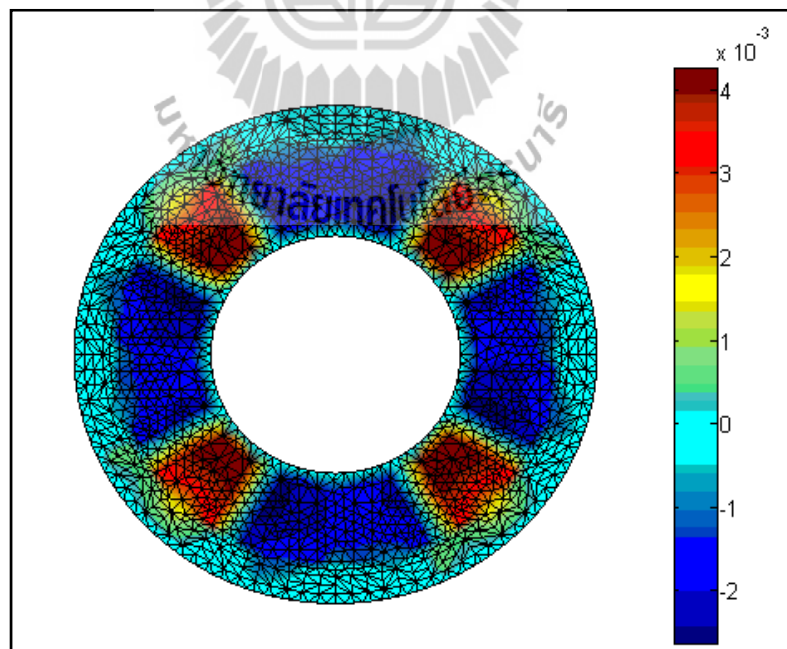
รูปที่ 7.6 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 7.5 องศา



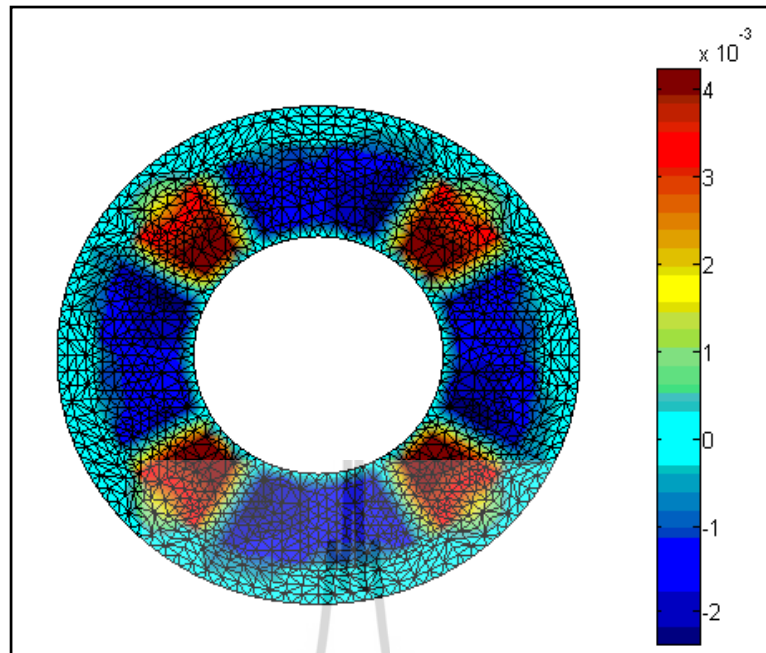
รูปที่ 7.7 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 15 องศา



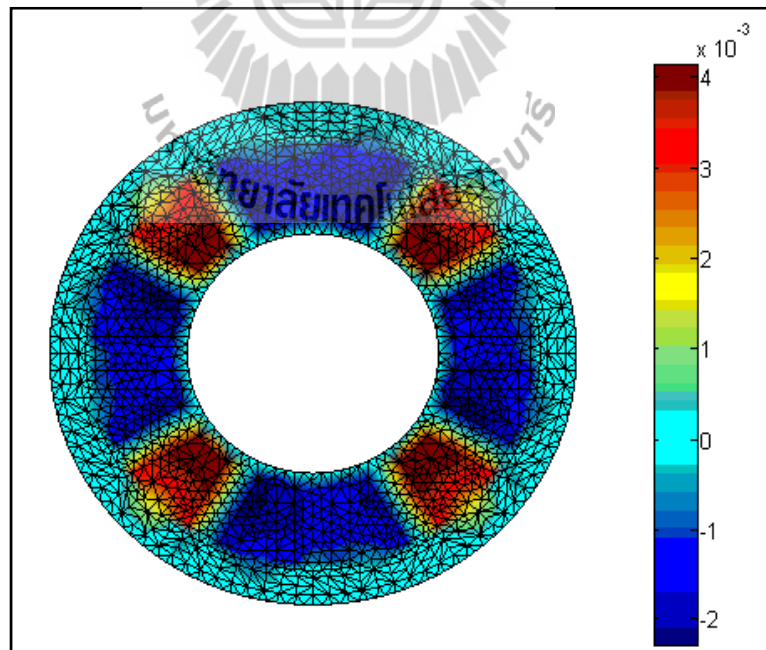
รูปที่ 7.8 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 22.5 องศา



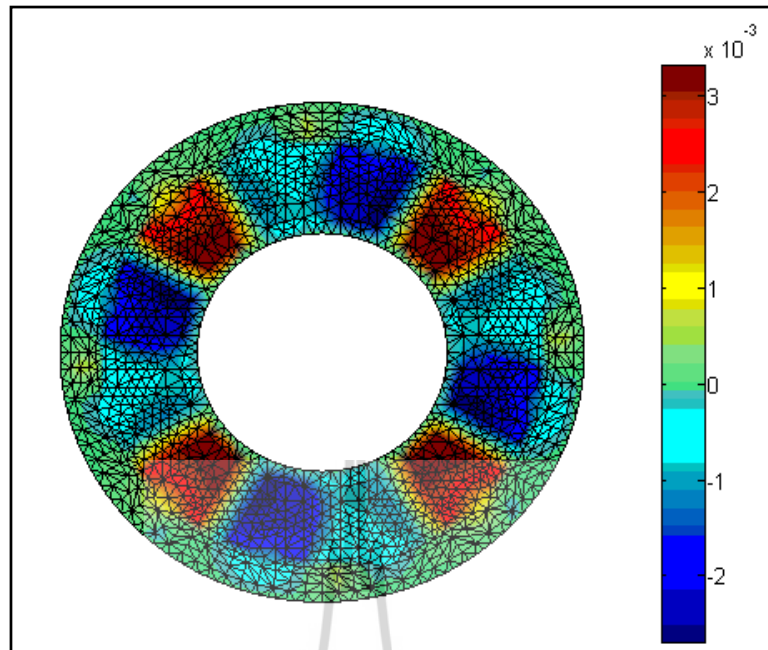
รูปที่ 7.9 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 30 องศา



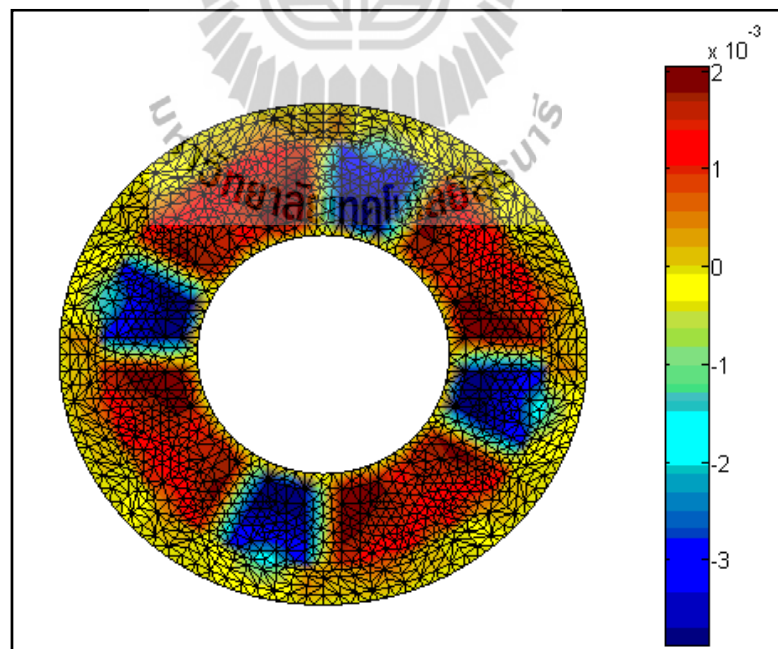
รูปที่ 7.10 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 37.5 องศา



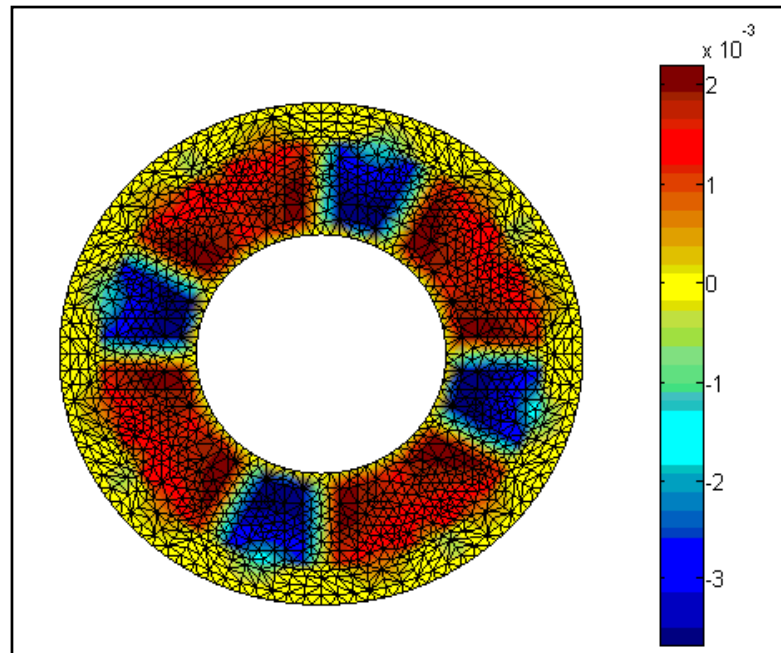
รูปที่ 7.11 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 45 องศา



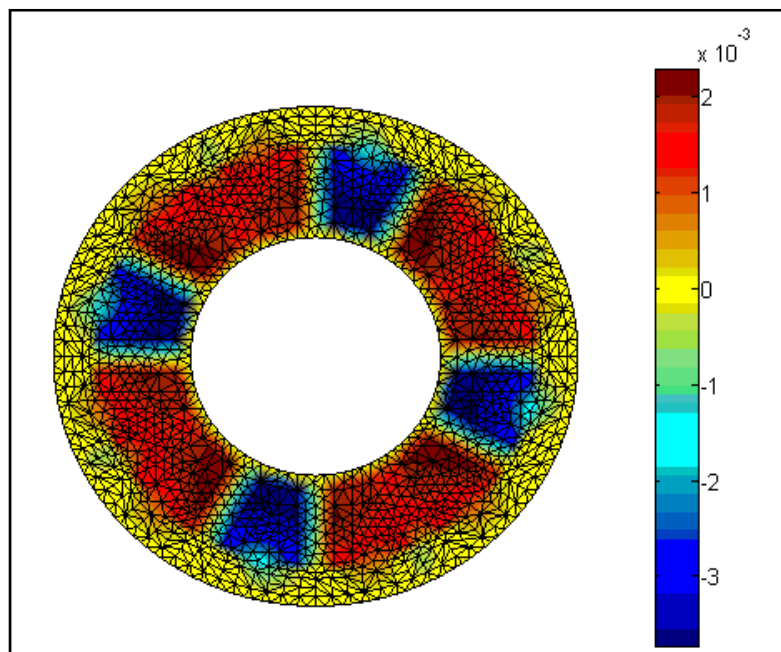
รูปที่ 7.12 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 52.5 องศา



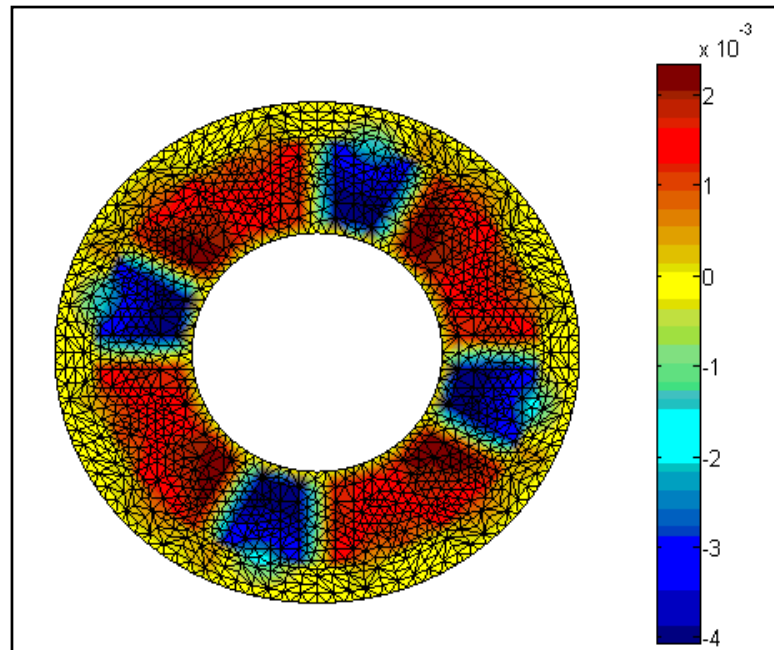
รูปที่ 7.13 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 60 องศา



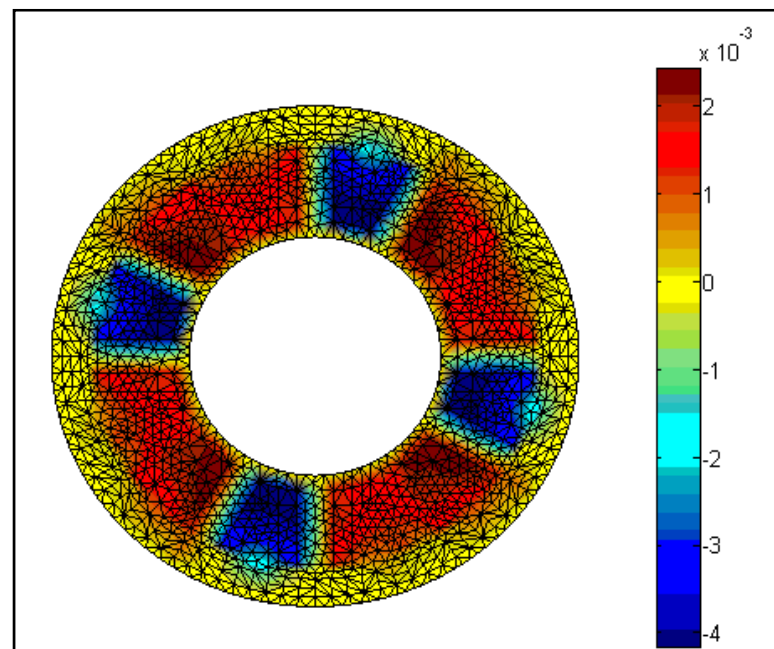
รูปที่ 7.14 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 67.5 องศา



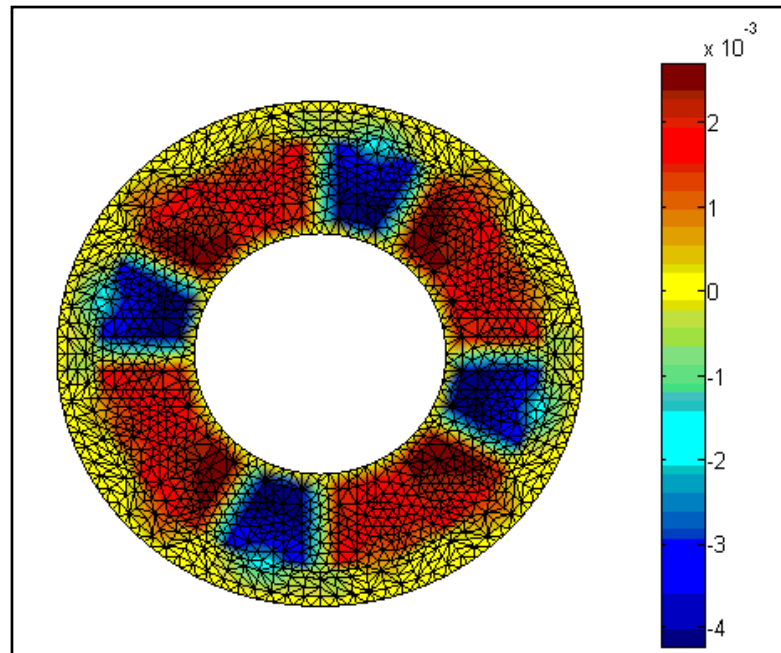
รูปที่ 7.15 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 75 องศา



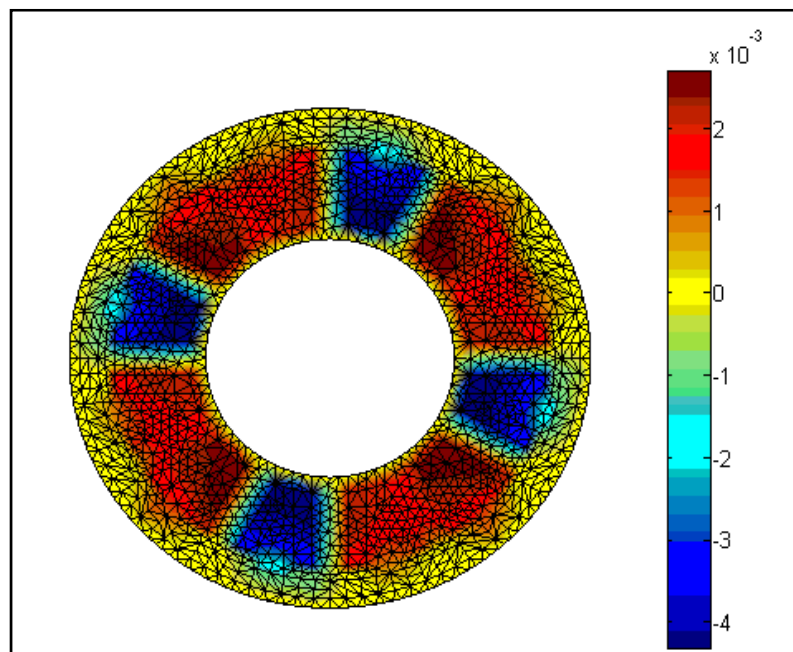
รูปที่ 7.16 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 82.5 องศา



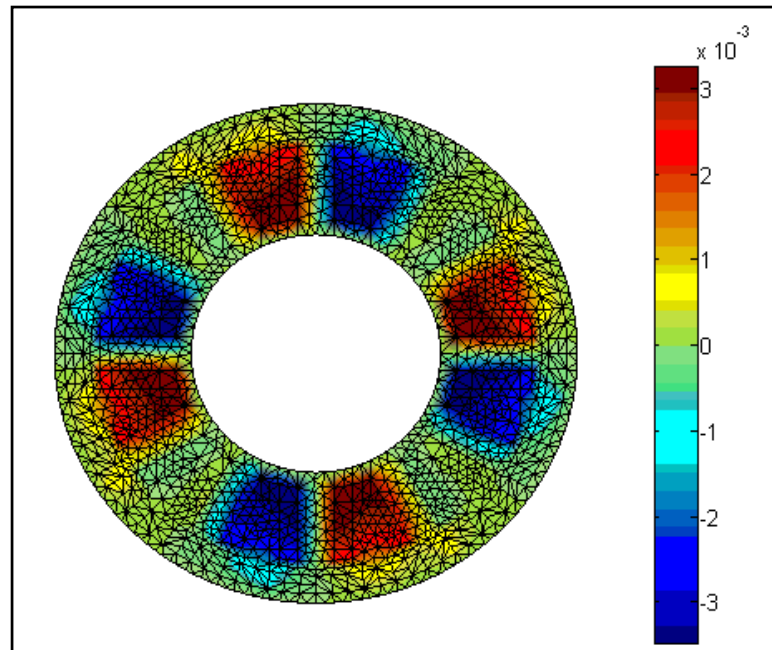
รูปที่ 7.17 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 90 องศา



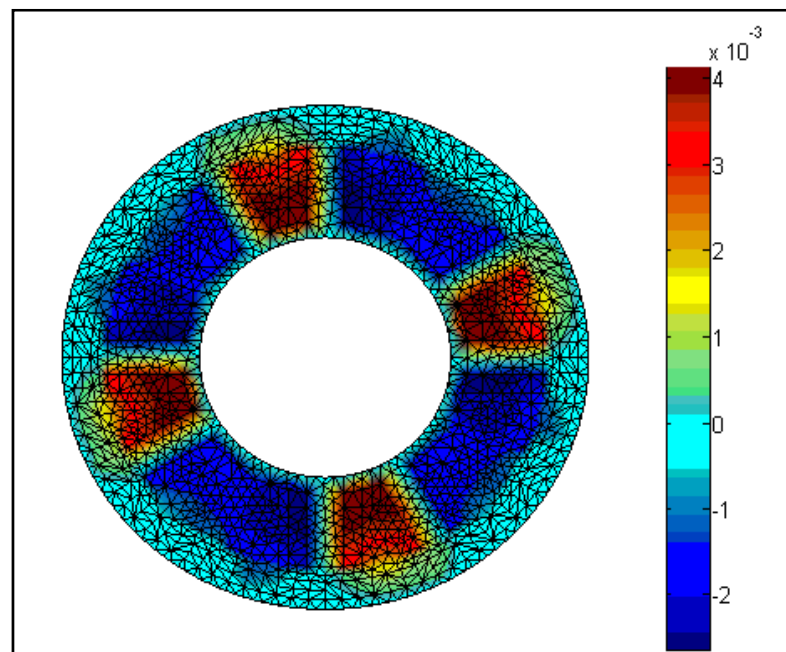
รูปที่ 7.18 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 97.5 องศา



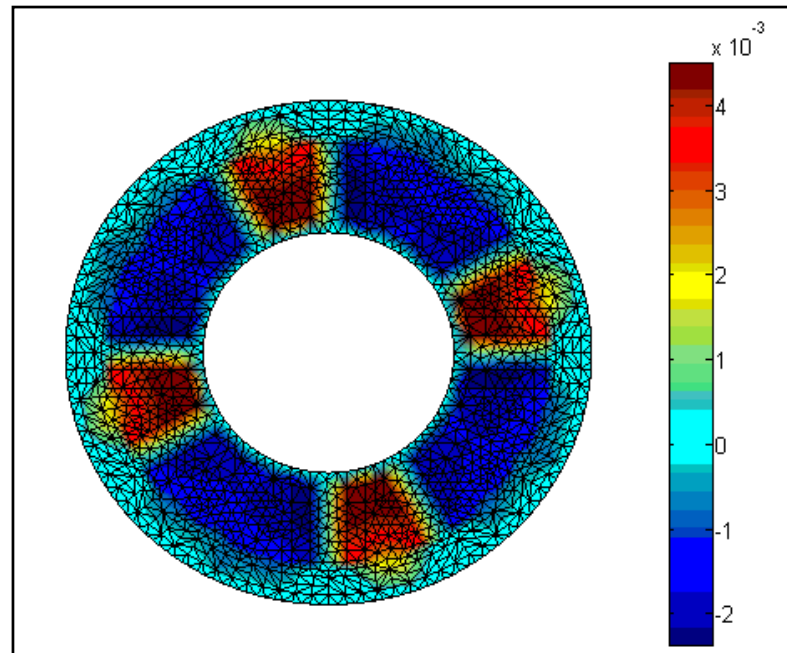
รูปที่ 7.19 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 105 องศา



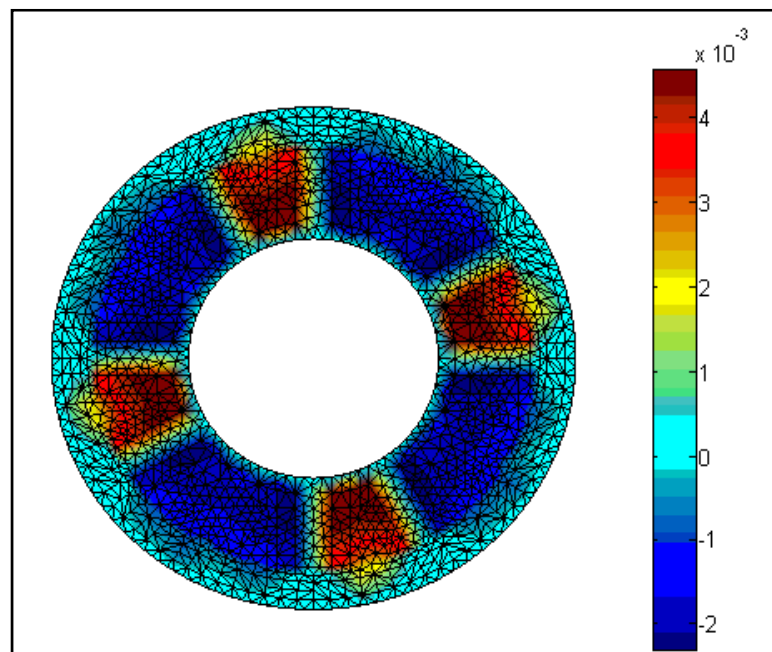
รูปที่ 7.20 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 112.5 องศา



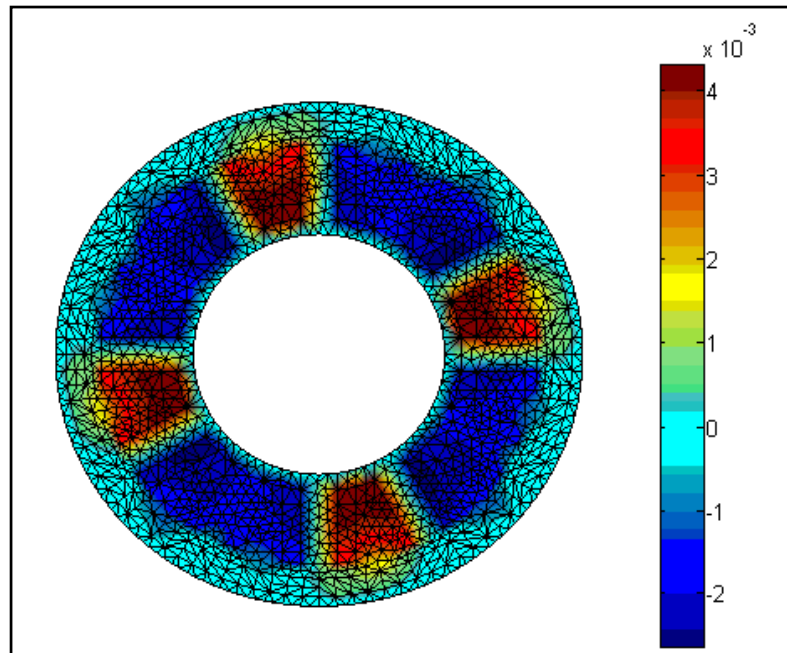
รูปที่ 7.21 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 120 องศา



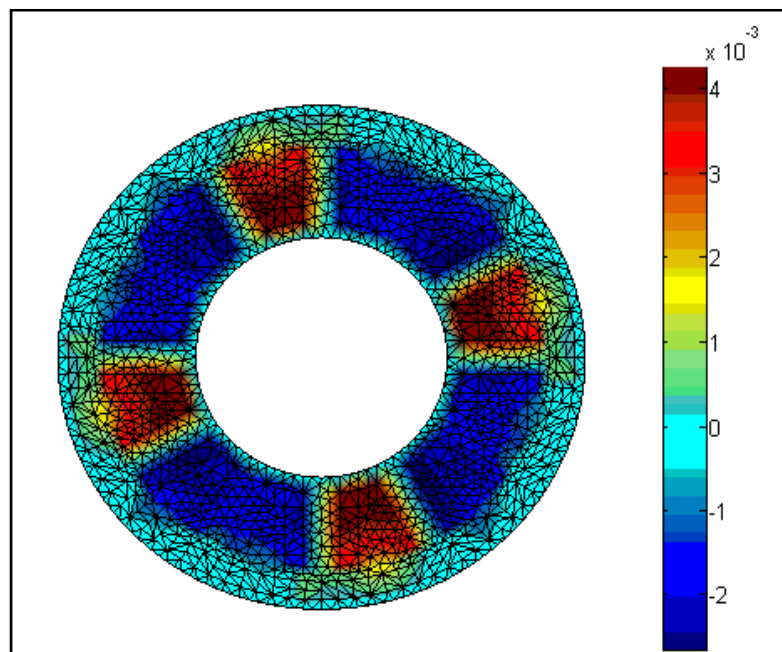
รูปที่ 7.22 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 127.5 องศา



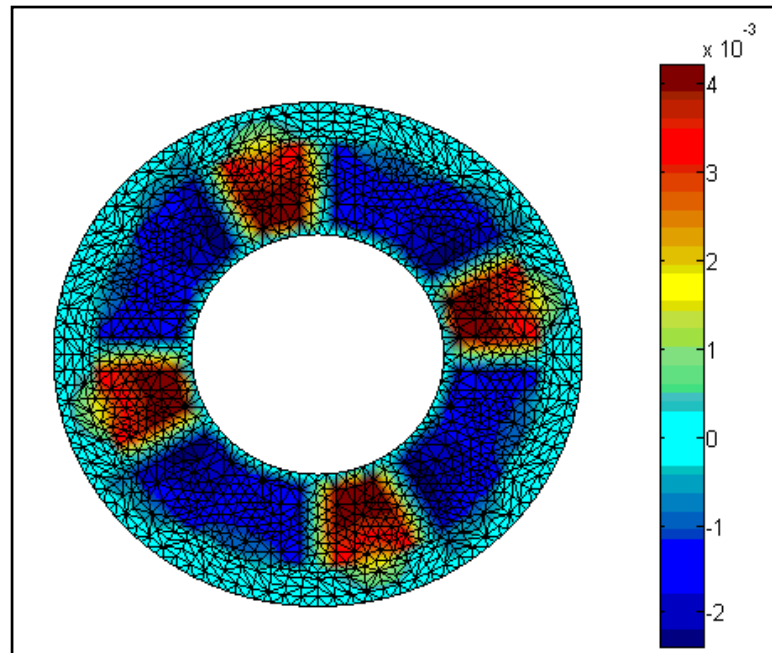
รูปที่ 7.23 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 135 องศา



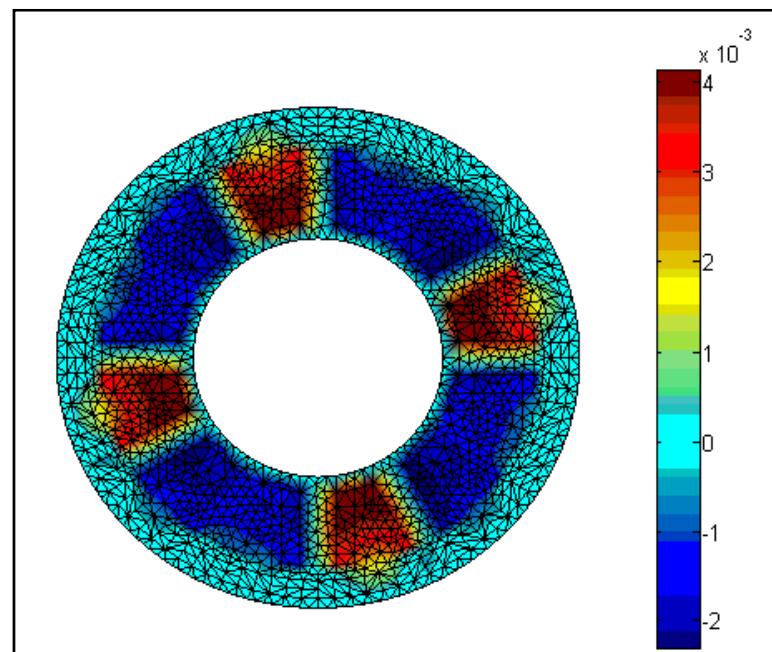
รูปที่ 7.24 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 142.5 องศา



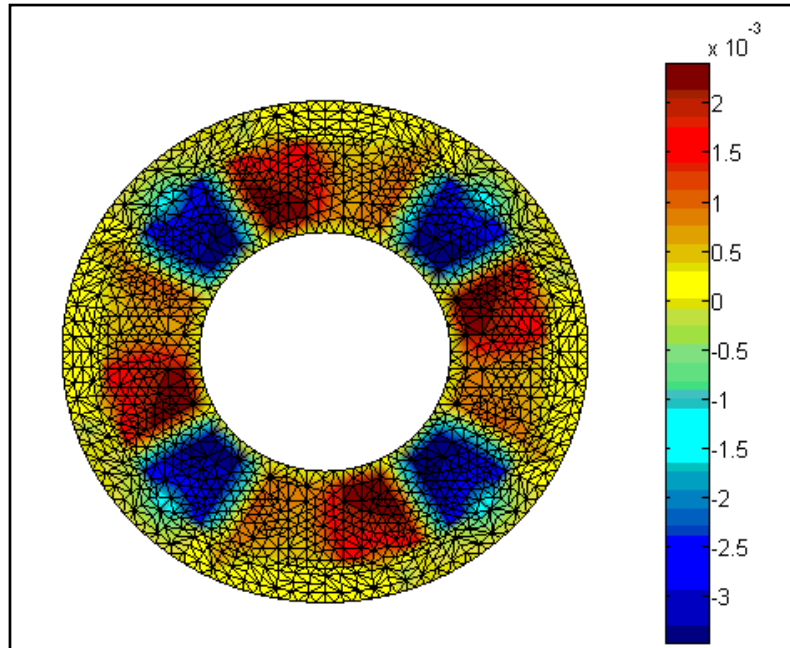
รูปที่ 7.25 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 150 องศา



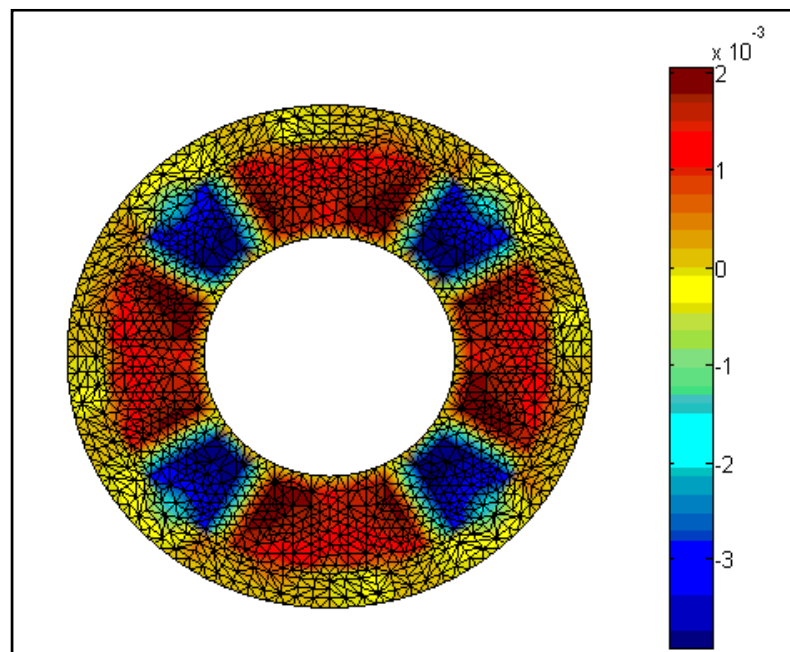
รูปที่ 7.26 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 157.5 องศา



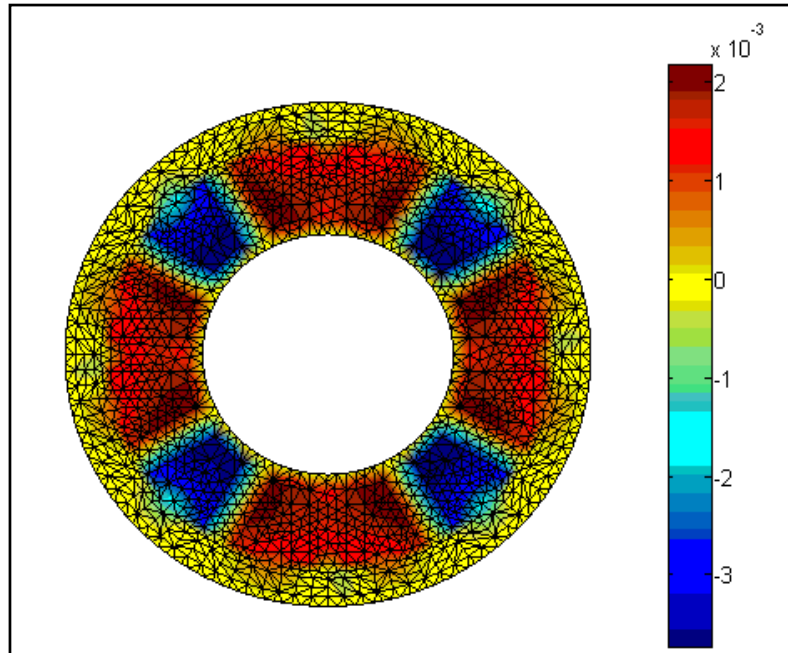
รูปที่ 7.27 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 165 องศา



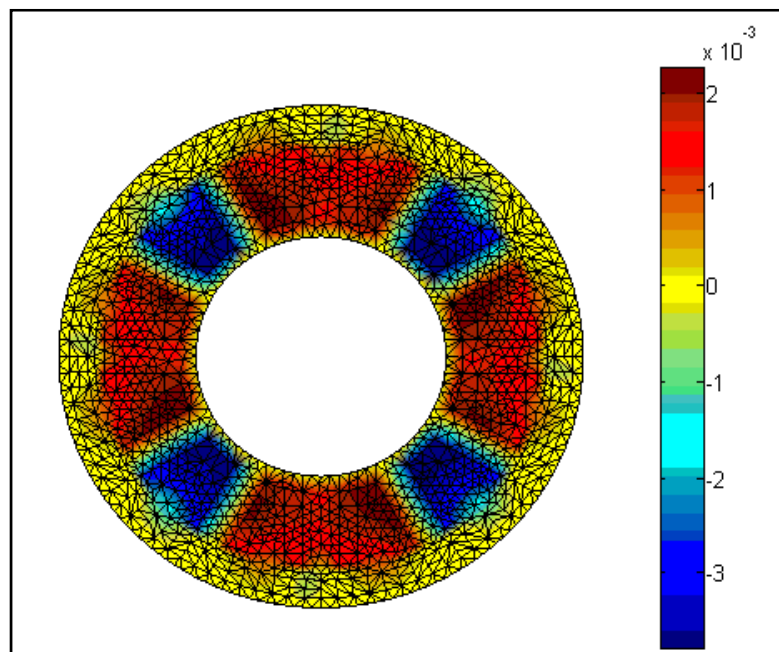
รูปที่ 7.28 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 172.5 องศา



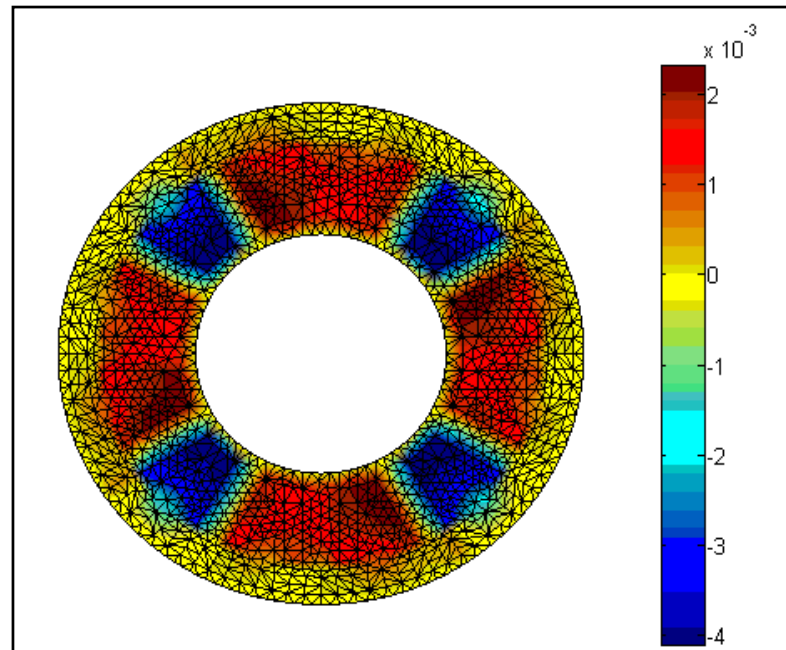
รูปที่ 7.29 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 180 องศา



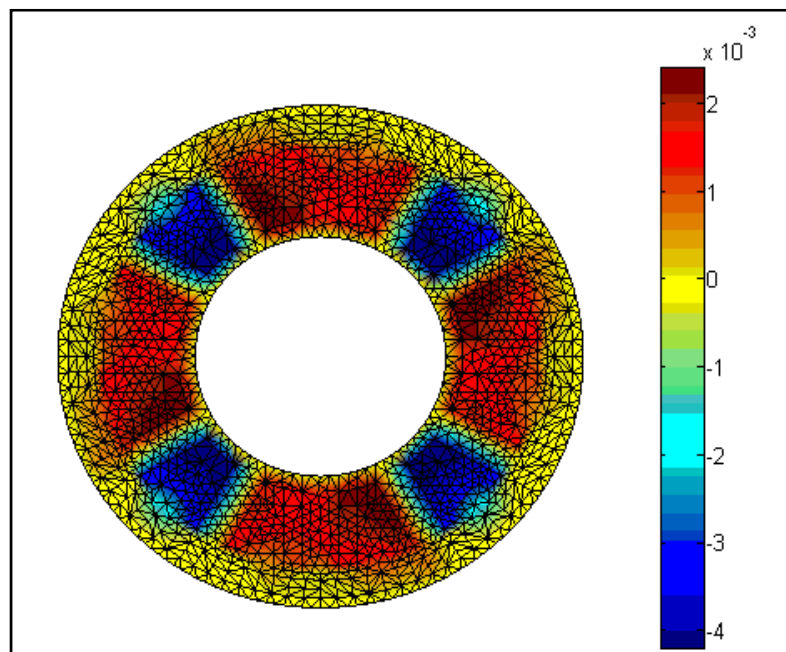
รูปที่ 7.30 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 187.5 องศา



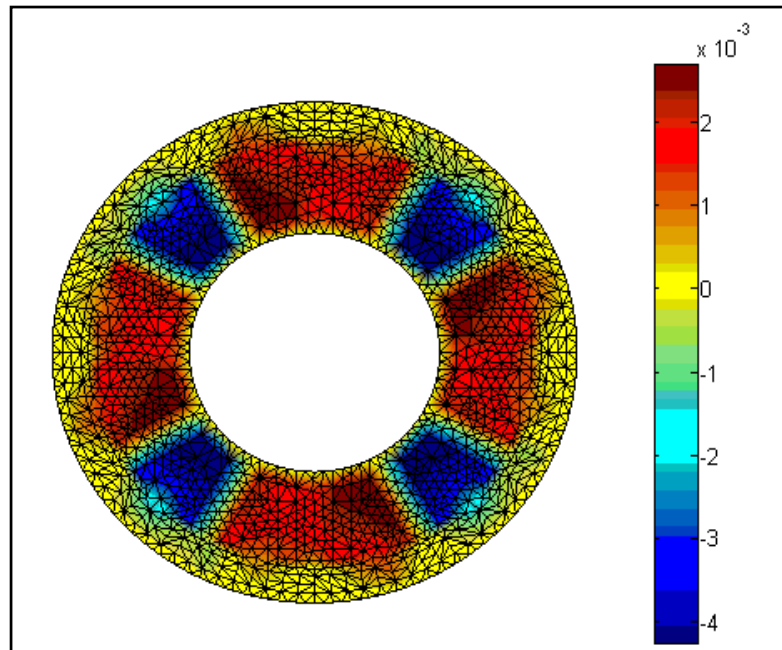
รูปที่ 7.31 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 195 องศา



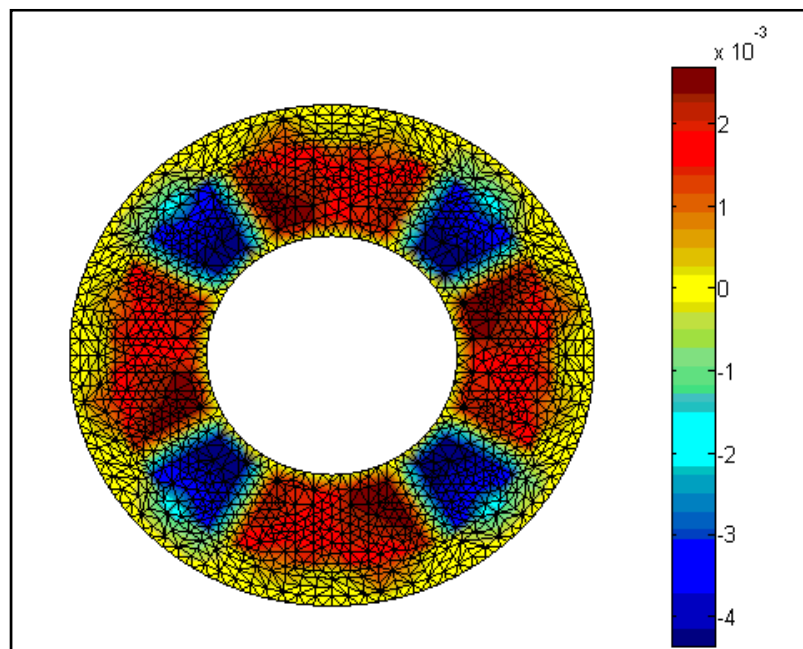
รูปที่ 7.32 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 202.5 องศา



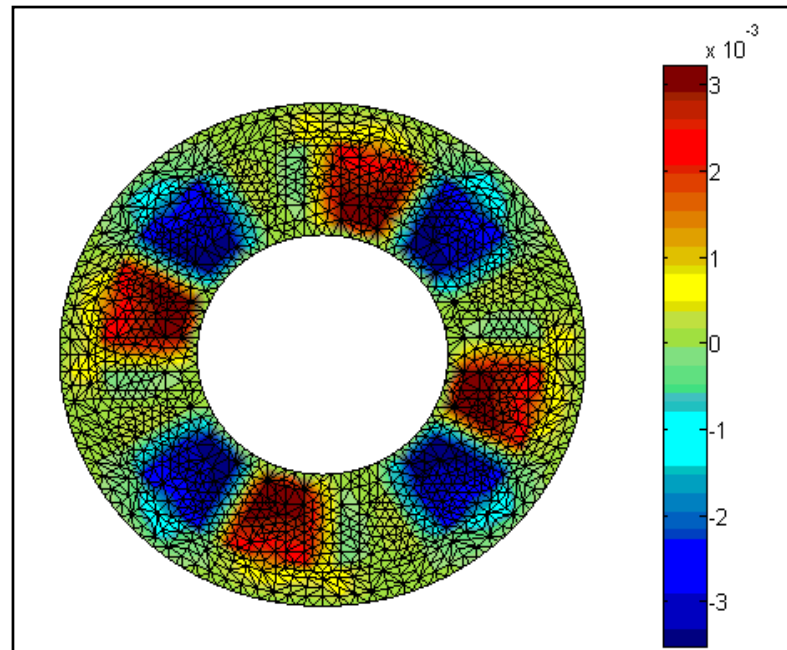
รูปที่ 7.33 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 210 องศา



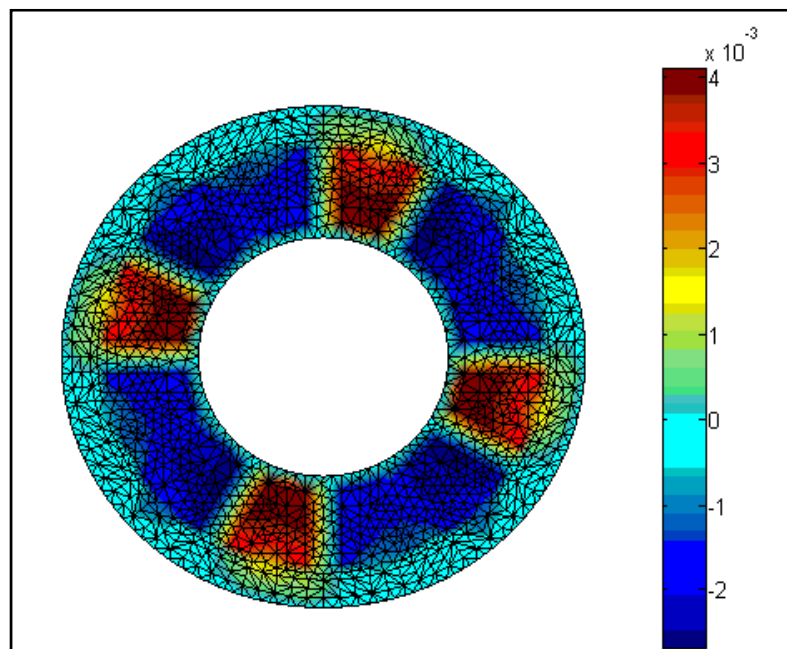
รูปที่ 7.34 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 217.5 องศา



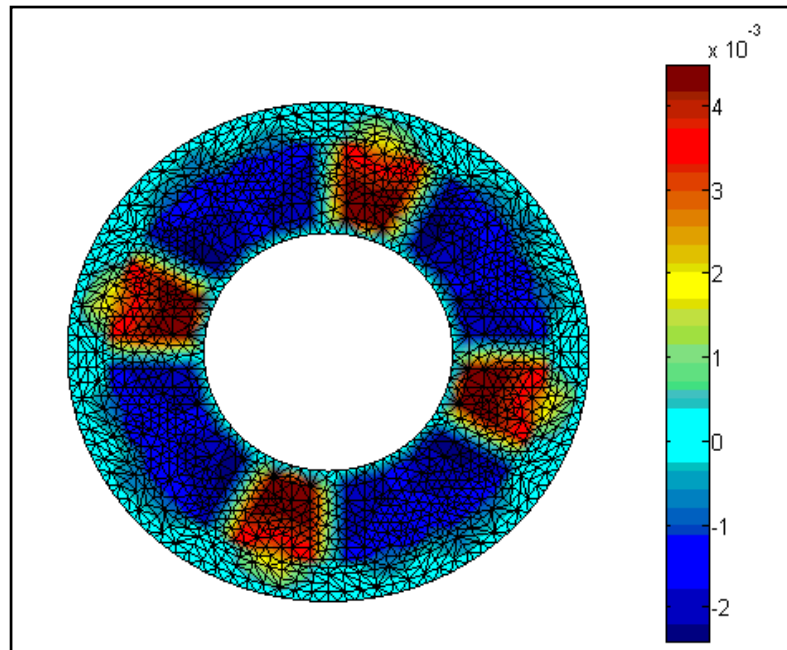
รูปที่ 7.35 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 225 องศา



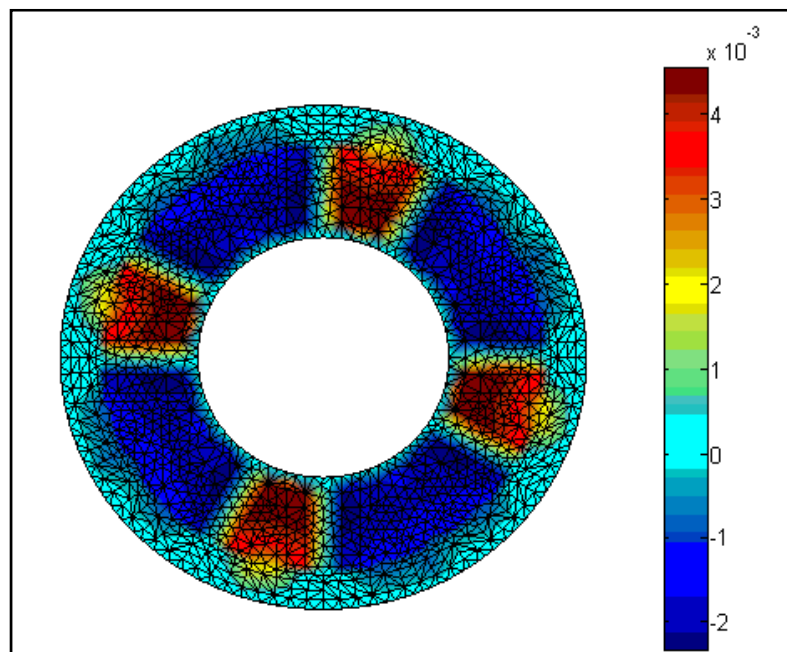
รูปที่ 7.36 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 232.5 องศา



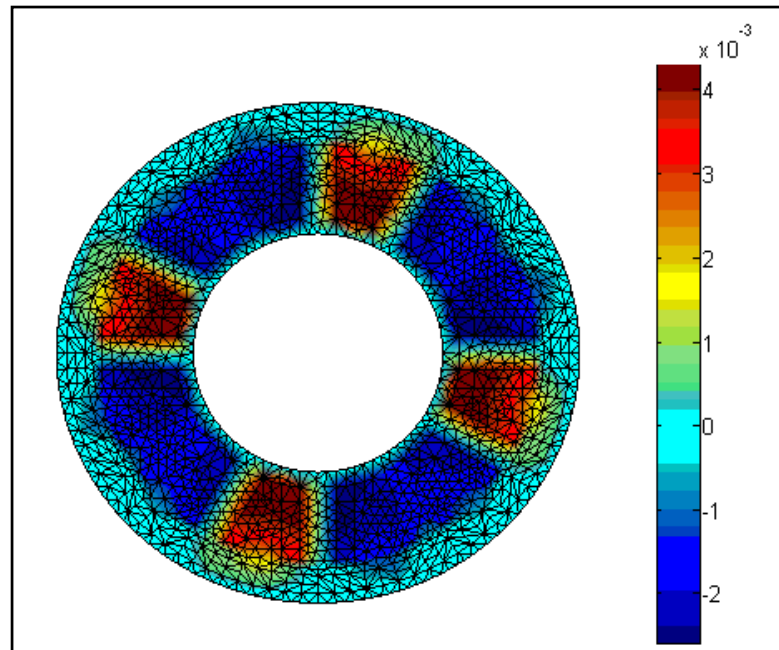
รูปที่ 7.37 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 240 องศา



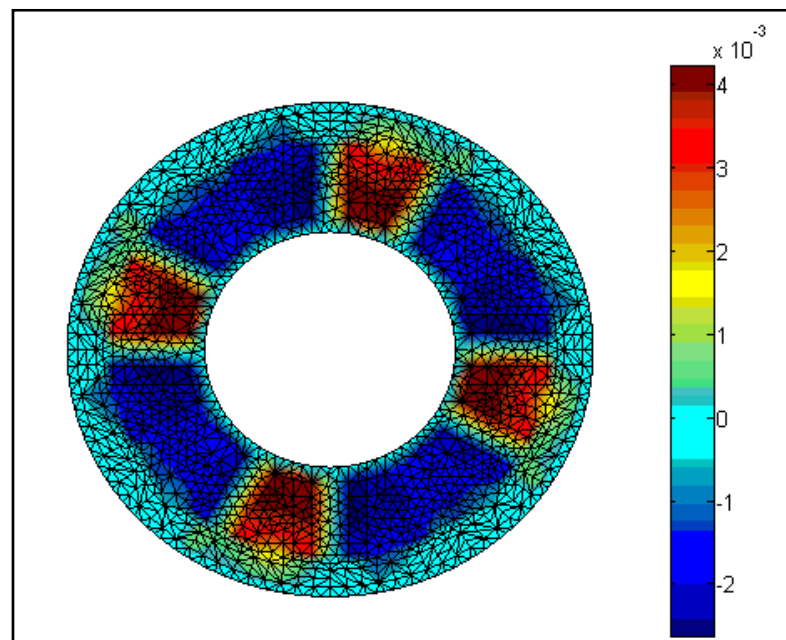
รูปที่ 7.38 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 247.5 องศา



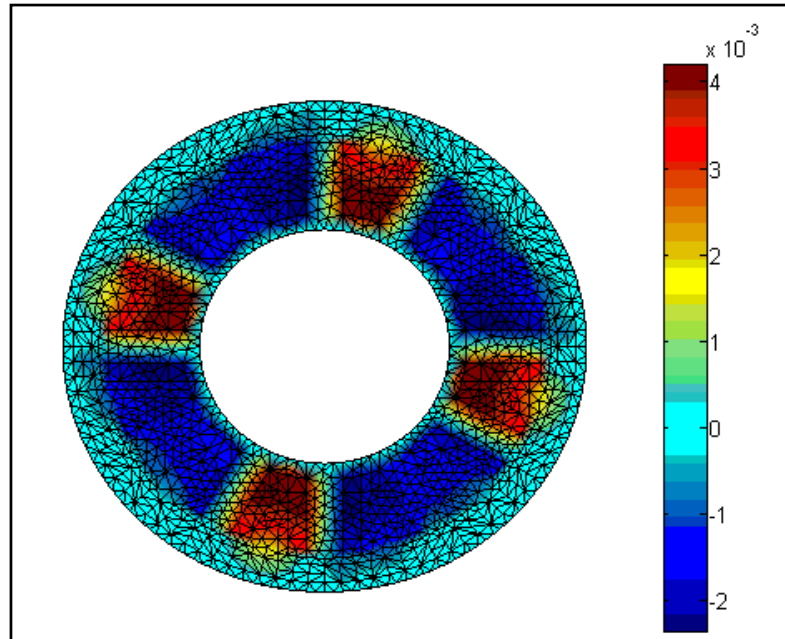
รูปที่ 7.39 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 255 องศา



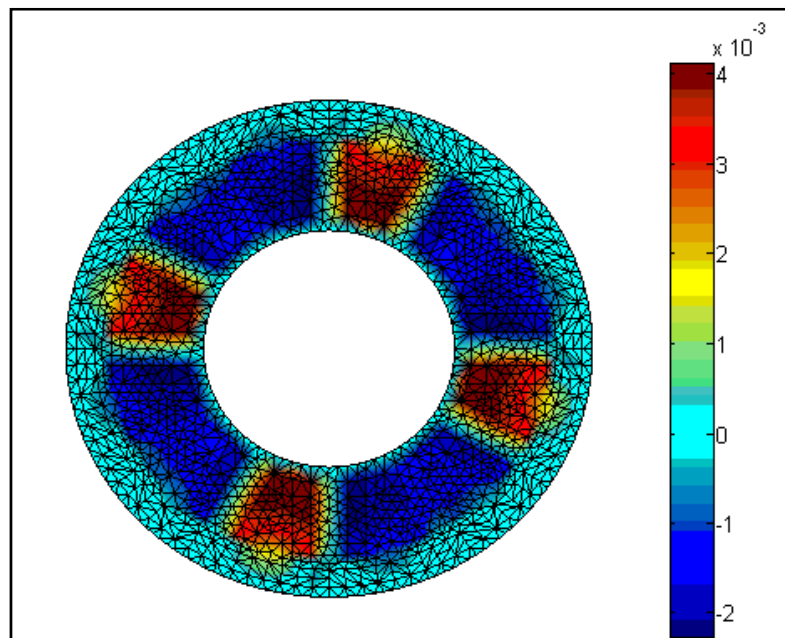
รูปที่ 7.40 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 262.5 องศา



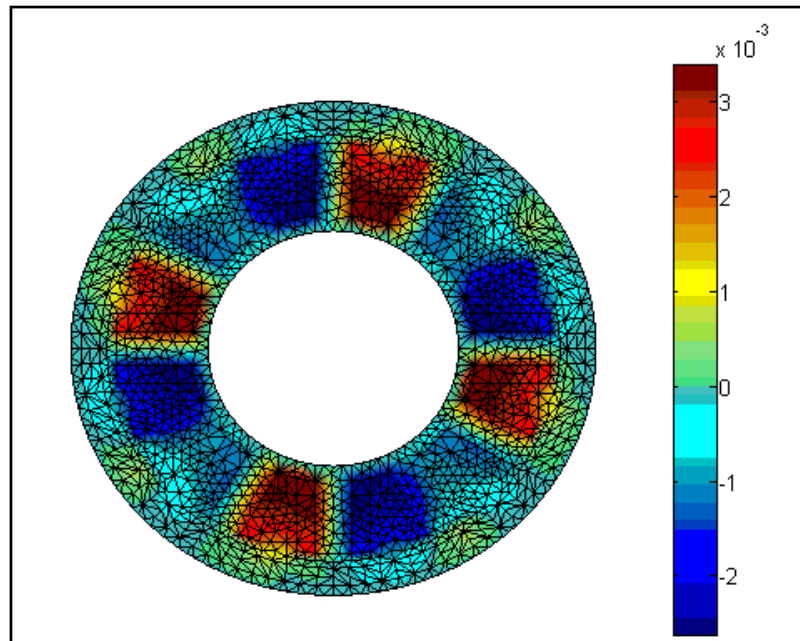
รูปที่ 7.41 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 270 องศา



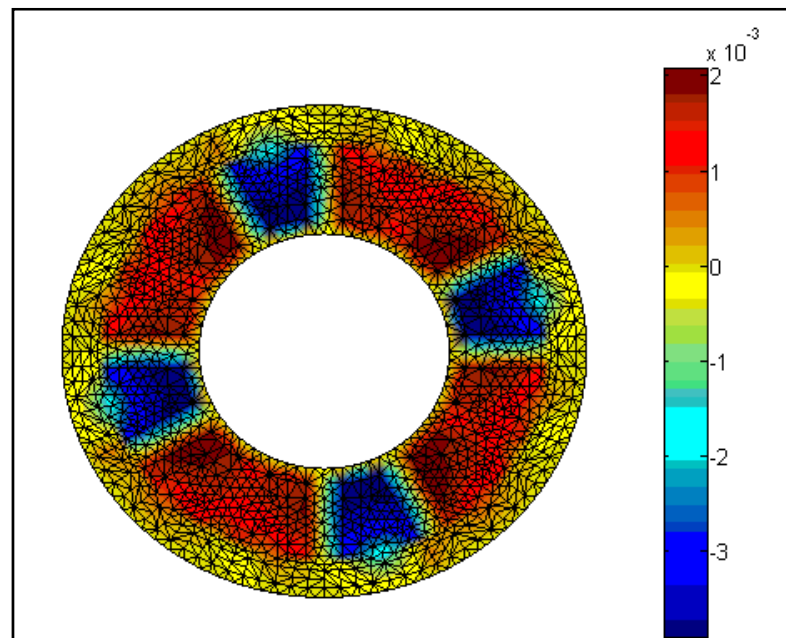
รูปที่ 7.42 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 277.5 องศา



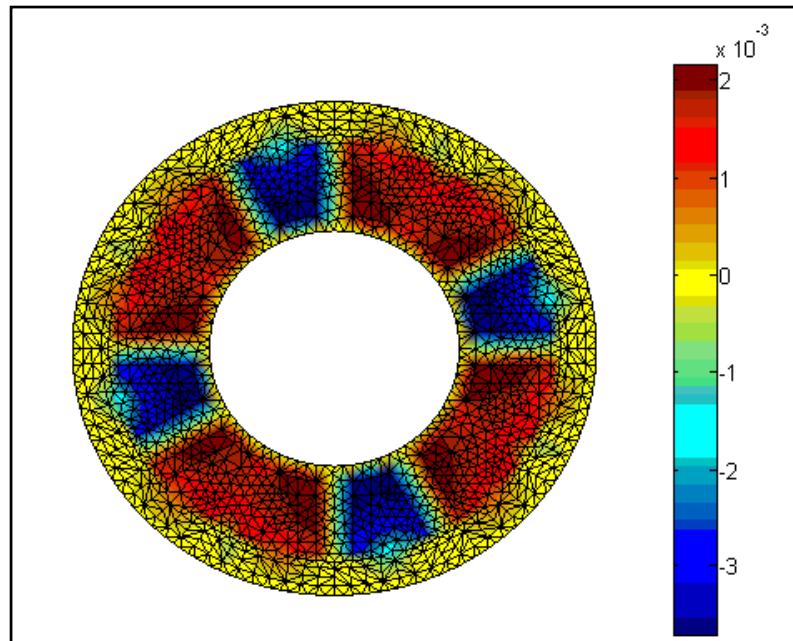
รูปที่ 7.43 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 285 องศา



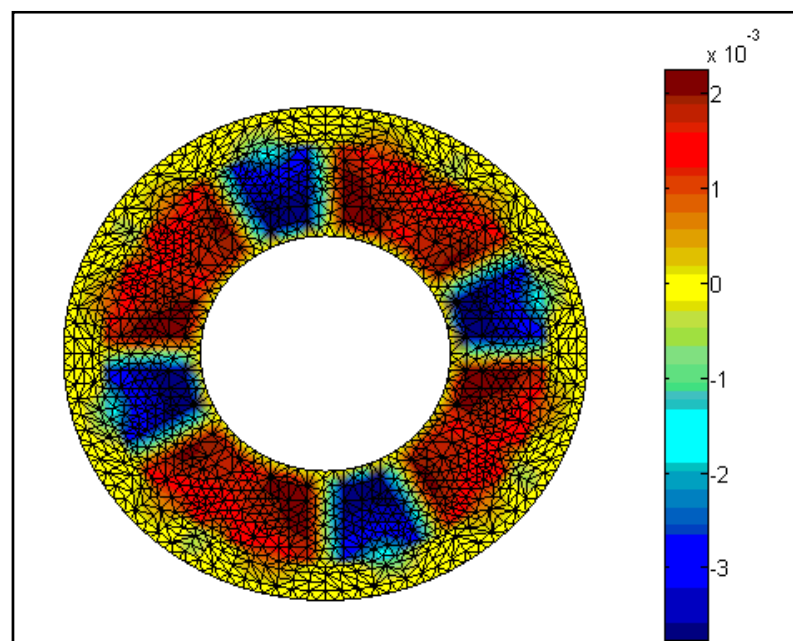
รูปที่ 7.44 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 292.5 องศา



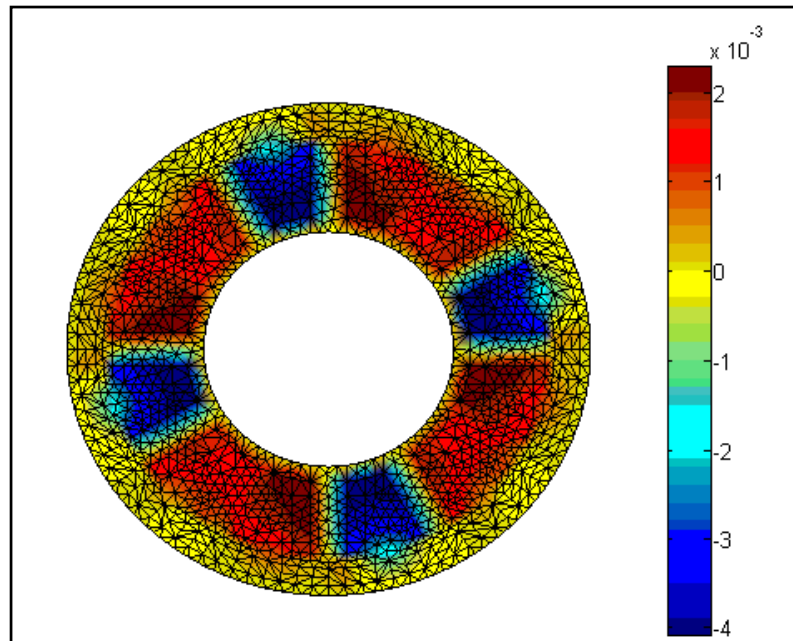
รูปที่ 7.45 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 300 องศา



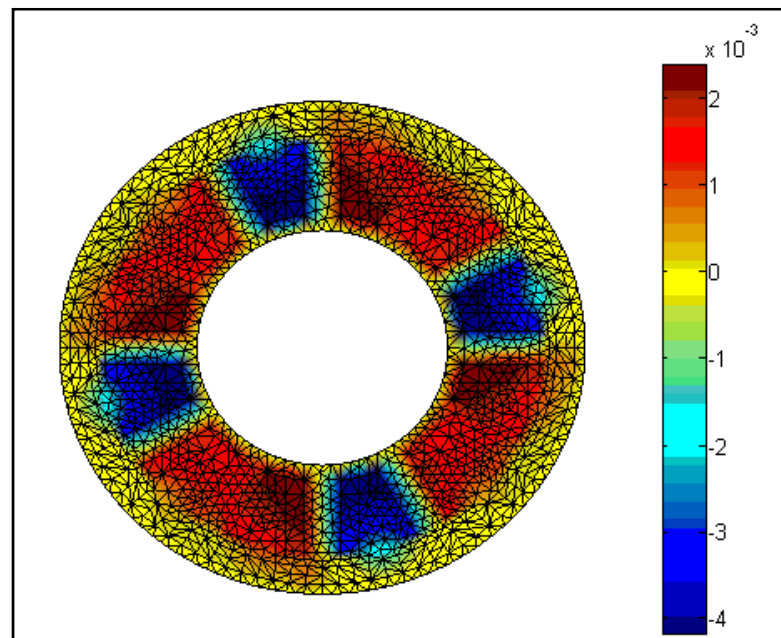
รูปที่ 7.46 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 307.5 องศา



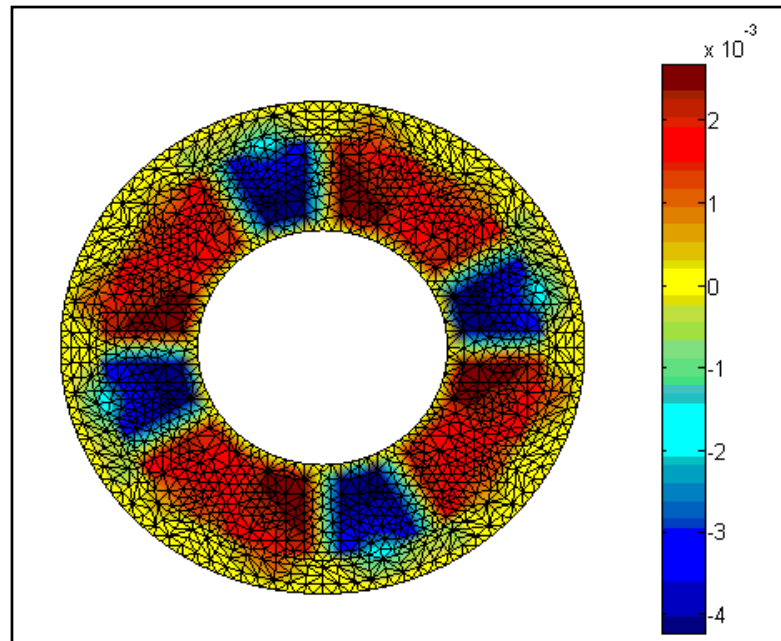
รูปที่ 7.47 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 315 องศา



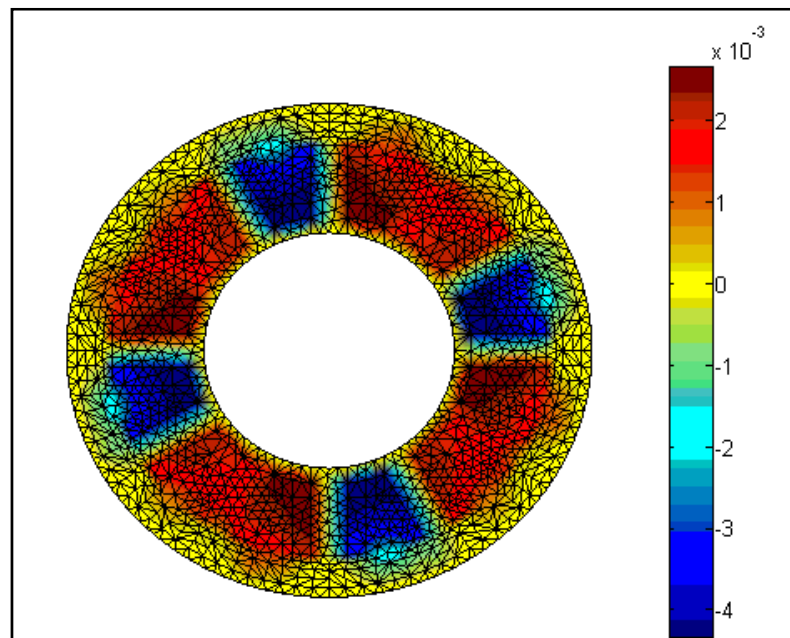
รูปที่ 7.48 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 322.5 องศา



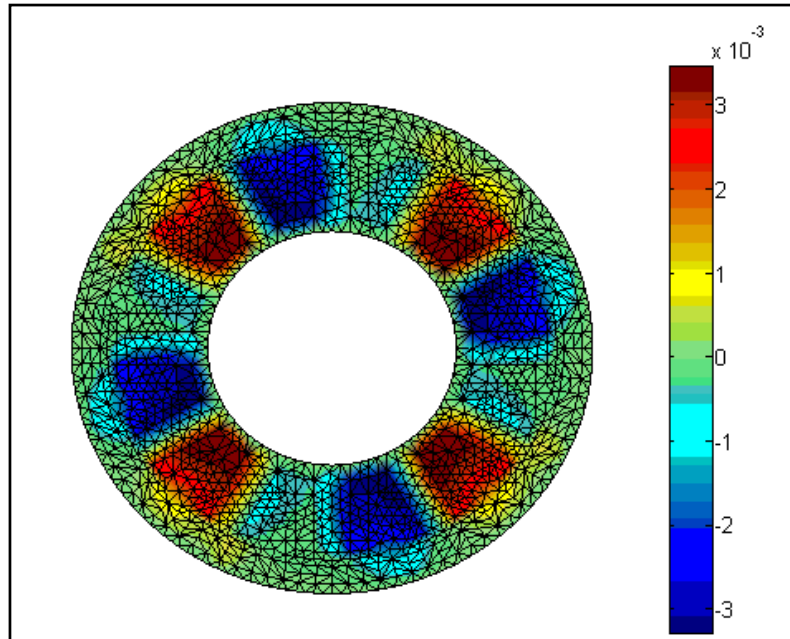
รูปที่ 7.49 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 330 องศา



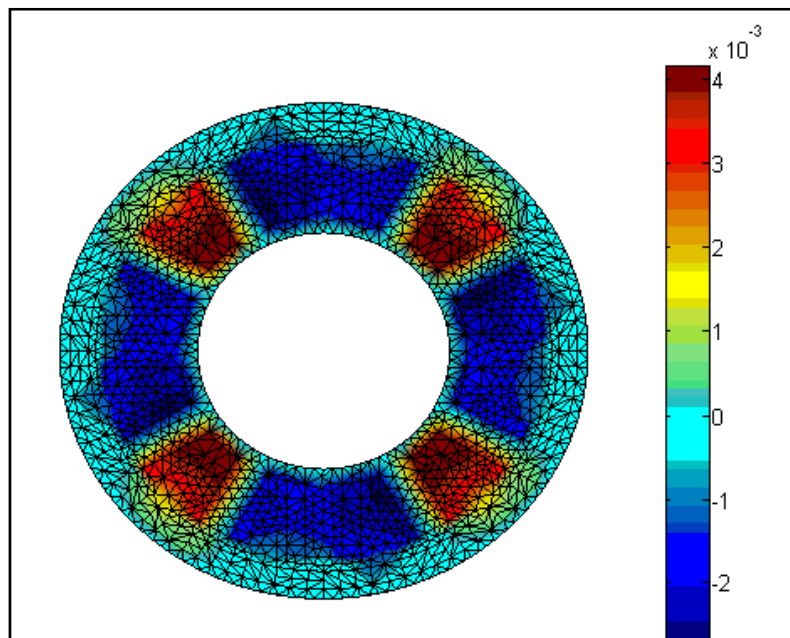
รูปที่ 7.50 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 337.5 องศา



รูปที่ 7.51 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 345 องศา



รูปที่ 7.52 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 352.5 องศา



รูปที่ 7.53 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Wb/m) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 360 องศา

จากรูปที่ 7.5 ถึง รูปที่ 7.53 จะเห็นการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะได้อธิบายการจำลองผลในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุนเพื่อความเข้าใจในการอธิบายผลการจำลองดังนี้

เริ่มจากรูปที่ 7.5 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.84 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.6 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 7.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.84 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.7 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 15 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.84 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.8 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 22.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.84 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.9 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 30 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.10 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 37.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.11 จังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 45 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0.85 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.5 ถึงรูปที่ 7.11 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส a จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมีเพราะ ณ จังหวะเวลานี้กระแสที่ป้อนไปที่เฟส a เป็นศูนย์นั่นเอง ($I_a = 0 A$) แต่ถ้าพิจารณาที่เฟส b และ c จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส b และ c พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.12 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 52.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.13 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0.83 A$ ดังนั้น จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a b และ c พันอยู่ แต่การไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส b และ c สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณ โรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.5 ถึงรูปที่ 7.12 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณ โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

รูปที่ 7.13 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 60 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.83 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.14 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 67.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.84 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.15 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 75 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.84 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.16 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์

หมุนด้วยมุม 82.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.84 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.17 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 90 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.18 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 97.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.19 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 105 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = -0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.13 ถึงรูปที่ 7.19 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส c จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ที่เฟส a และ b จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส a และ b พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.20 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 112.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = -0.52 A$ และ $I_c = -0.31 A$ ดังนั้น จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a , b และ c พันอยู่ ซึ่งการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส c พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส a และ b สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.13 ถึงรูปที่ 7.20 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

รูปที่ 7.21 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 120 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.51 A$ รูปที่ 7.22 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 127.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.84 A$ รูปที่ 7.23 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 135 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.84 A$ รูปที่ 7.24 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 142.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.84 A$ รูปที่ 7.25 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 150 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.26 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 157.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.27 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 165 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.84 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = -0.85 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.21 ถึงรูปที่ 7.27 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส b จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ที่เฟส a และ c จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส a และ c

พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.28 ในจังหวะนี้ โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 172.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0.31 A$ $I_b = 0.51 A$ และ $I_c = -0.61 A$ ดังนั้น มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a , b และ c พันอยู่ แต่การไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส b และ c สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.21 ถึงรูปที่ 7.28 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

รูปที่ 7.29 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 180 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.51 A$ และ $I_c = -0.63 A$ รูปที่ 7.30 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 187.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.51 A$ และ $I_c = -0.63 A$ รูปที่ 7.31 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 195 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.84 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.32 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 202.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.84 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.33 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 210 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.34 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 217.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = -0.85 A$ รูปที่ 7.35 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 225 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = -0.85 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.29 ถึงรูปที่ 7.35 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส a จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ที่เฟส b และ c จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส b และ c พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.36 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 232.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.21 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = -0.51 A$ มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a , b และ c พันอยู่ ซึ่งการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส b และ c สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.29 ถึงรูป

ที่ 7.36 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณ โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

รูปที่ 7.37 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 240 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.51 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.38 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 247.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.84 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.39 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 255 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.84 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.40 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 262.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.84 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.41 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 270 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.42 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 277.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ รูปที่ 7.43 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 285 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0.85 A$ และ $I_c = 0 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.37 ถึงรูปที่ 7.43 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส c จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ที่เฟส a และ b จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตอร์ที่มีขดลวดเฟส a และ b พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.44 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 292.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0.56 A$ และ $I_c = 0.12 A$ ดังนั้น จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a , b และ c พันอยู่ แต่การไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส c พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส a และ b สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณ โรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.37 ถึงรูปที่ 7.44 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณ โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

รูปที่ 7.45 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 300 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.53 A$ รูปที่ 7.46 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 307.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.84 A$ รูปที่ 7.47 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 315 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.84 A$ รูปที่ 7.48 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 322.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.84 A$ รูปที่ 7.49 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 330 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ

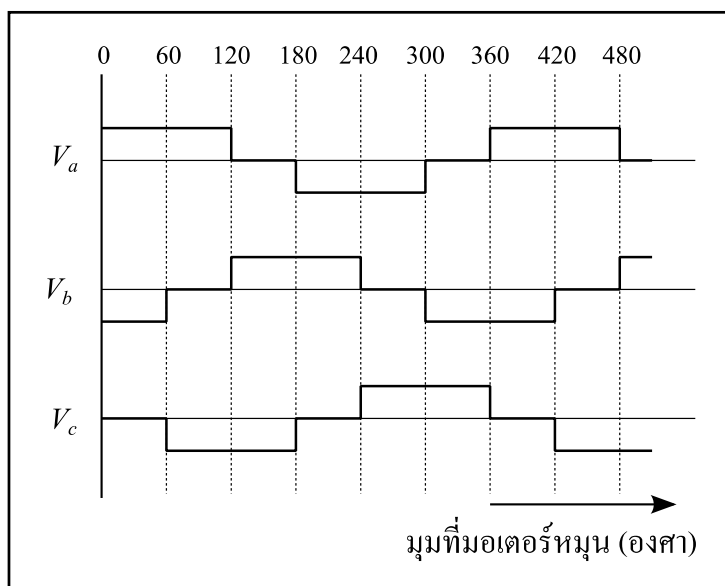
$I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.50 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 337.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.85 A$ รูปที่ 7.51 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 345 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.85 A$ $I_b = 0 A$ และ $I_c = 0.85 A$ ดังนั้นจากรูปที่ 7.45 ถึงรูปที่ 7.51 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส b จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ที่เฟส a และ c จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส a และ c พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ รูปที่ 7.52 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 352.5 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = -0.52 A$ $I_b = -0.10 A$ และ $I_c = 0.85 A$ ดังนั้น จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส a , b และ c พันอยู่ แต่การไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมีที่มีขดลวดเฟส b พันอยู่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฟส a และ c สำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์จะเห็นว่าจากรูปที่ 7.45 ถึงรูปที่ 7.52 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในแต่ละรูปต่างกันเป็นมุม 7.5 องศา

จากรูปที่ 7.53 ในจังหวะนี้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนด้วยมุม 360 องศา กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์คือ $I_a = 0 A$ $I_b = -0.84 A$ และ $I_c = 0.85 A$ ดังนั้นการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ของเฟส a จะไม่มีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแนวตามแกนรัศมี แต่ถ้าพิจารณาที่เฟส b และ c จะมีการไหลเวียนของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแกนสเตเตอร์ตามแนวแกนรัศมี ซึ่งแต่ละแกนสเตเตอร์ที่มีขดลวดเฟส b และ c พันอยู่จะประกอบด้วยสี่แดงซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นบวกและสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีแดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในทิศทางที่เป็นลบ ซึ่งจะเหมือนกับรูปที่ 7.5 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา เพราะเมื่อมอเตอร์หมุนเป็นมุม 360 องศา ก็จะครบรอบ และสำหรับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสำหรับการหมุนในจังหวะถัดไปก็จะซ้ำรูปแบบเดิมด้วยมุมที่โรเตอร์หมุนเท่ากัน

จากรูปที่ 7.5 ถึง รูปที่ 7.53 การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของมอเตอร์คือเมื่อ โรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเห็นการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กหมุนตามโรเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยเหมือนกัน แต่ลักษณะการหมุนตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กนั้นจะมีรูปแบบดังรูปที่แสดงข้างต้น ถ้าจะแบ่ง

การพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ การกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณสเตเตอร์และบริเวณโรเตอร์

1) การกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณสเตเตอร์ ตรงบริเวณนี้ค่าของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดขึ้นจากกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งถ้าพิจารณาตามแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ดังรูปที่ 3.3 หรือนำมาแสดงใหม่ในรูปที่ 7.54 จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟส จะเปลี่ยนแปลงเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยมุมทุกๆ 60 องศา หรือกล่าวได้ว่าโรเตอร์หมุนภายในมุม 60 องศา แรงดันทั้ง 3 เฟส จะไม่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้การกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณสเตเตอร์นี้ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่ถ้าหากโรเตอร์หมุนด้วยมุมต่างกันทุกๆ 60 องศาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ดังนั้นการกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณสเตเตอร์นี้ก็จะเปลี่ยนแปลงตามมุมที่โรเตอร์หมุนในทุกๆ 60 องศาด้วยเหมือนกัน

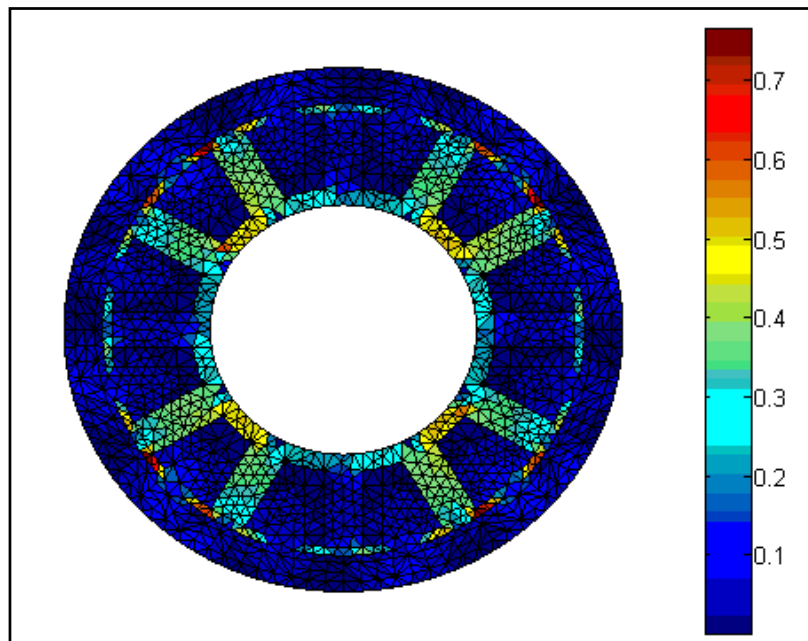


รูปที่ 7.54 กราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละเฟส

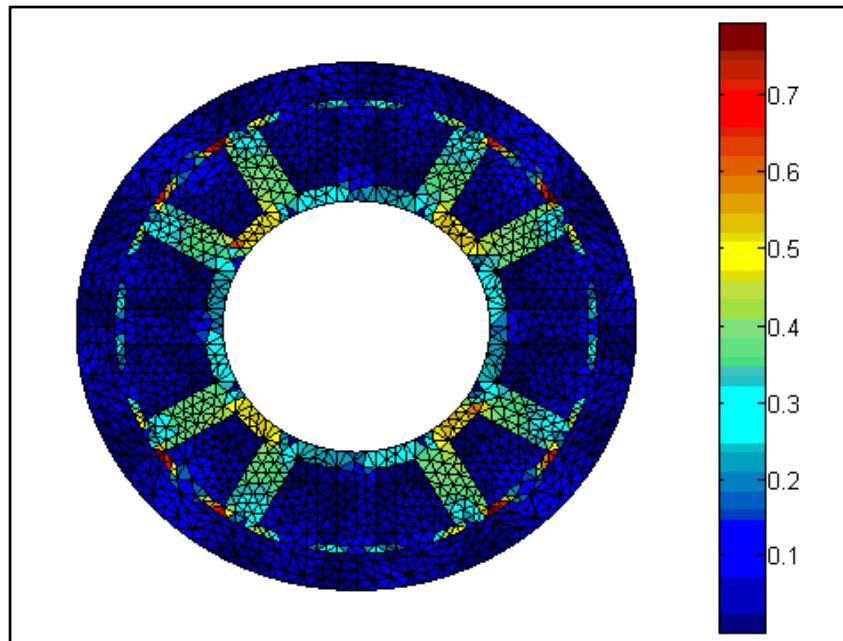
2) การกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์ สำหรับการกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกตำแหน่งที่โรเตอร์หมุน ทั้งนี้เพราะค่าสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์ เกิดจากแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่บริเวณโรเตอร์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการกระจายตัวของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณโรเตอร์ก็จะหมุนตัวตามการหมุนของโรเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งคือหมุนตามเข็มนาฬิกา

7.2.2 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและอภิปรายผล

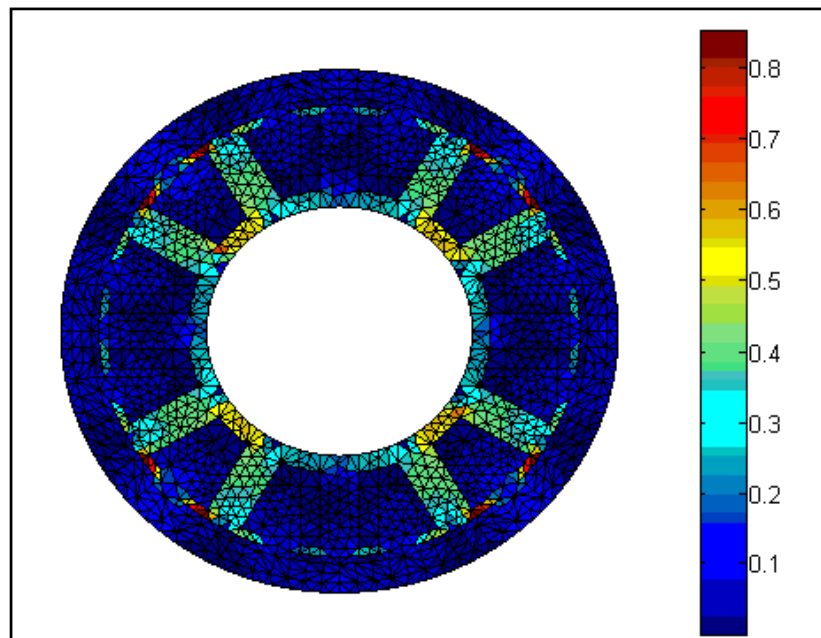
การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์นั้นสามารถกระทำได้ด้วยการใช้วิธีเชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 รูปที่ 7.55 ถึงรูปที่ 7.103 คือการกระจายตัวสนามแม่เหล็ก บริเวณพื้นที่หน้าตัดของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์เมื่อโรเตอร์หมุนไปจากเป็นมุม 0 องศา ถึงมุม 360 องศา โดยโรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยมุมต่างกัน 7.5 องศา ตามลำดับ



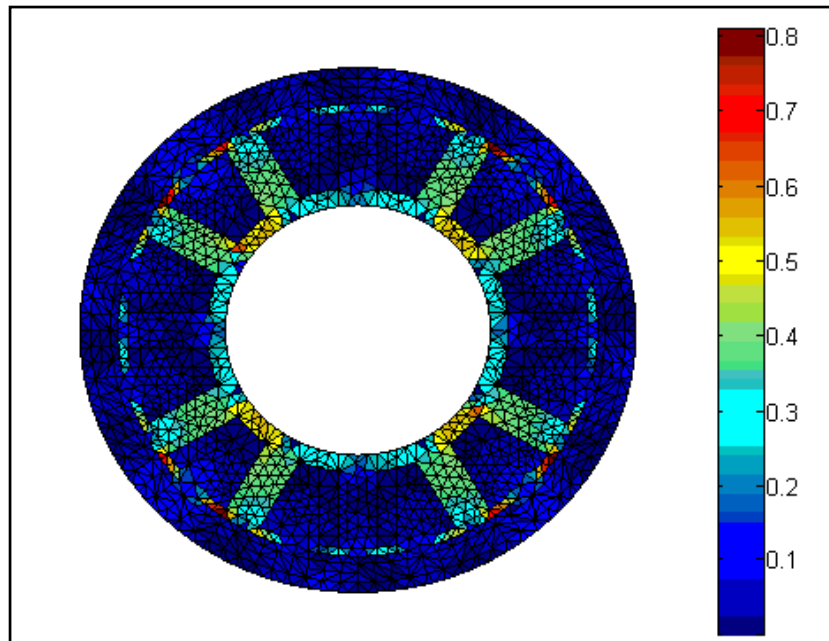
รูปที่ 7.55 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



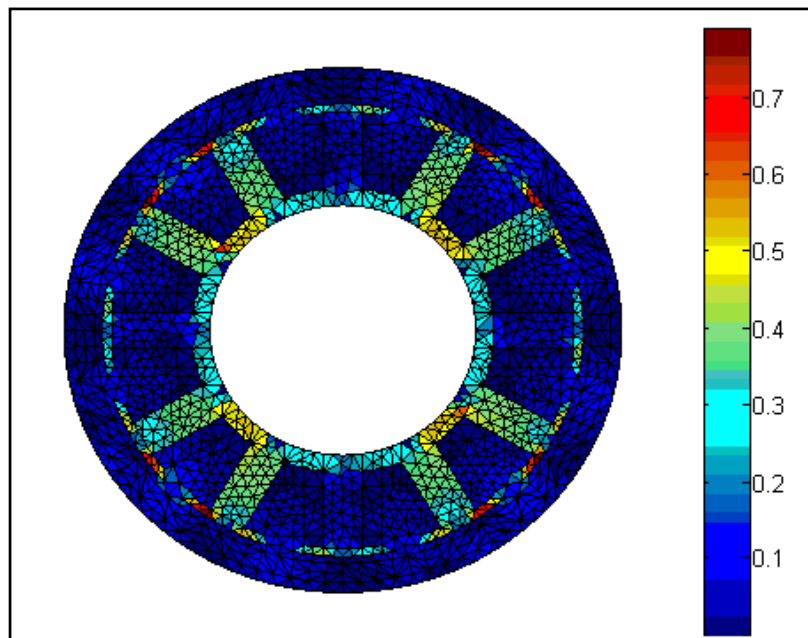
รูปที่ 7.56 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 7.5 องศา



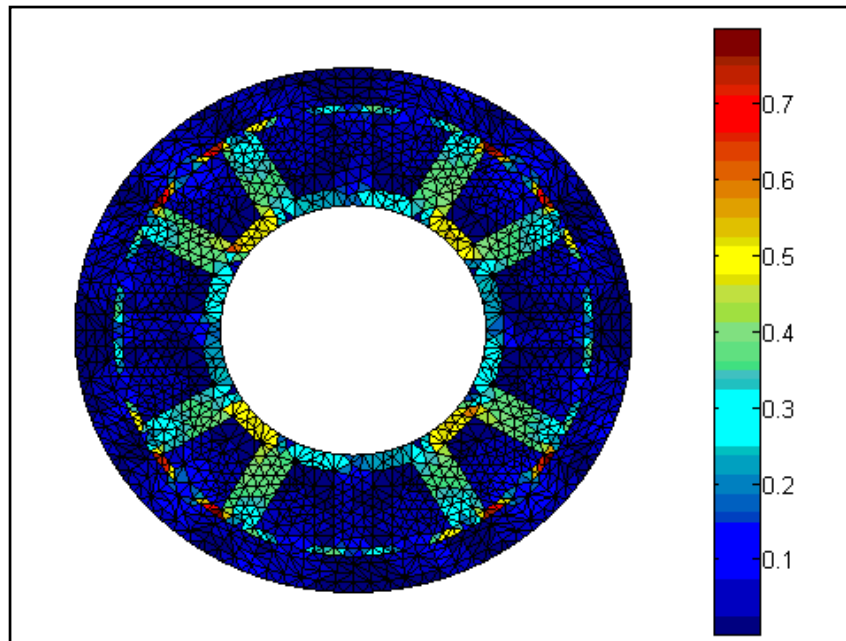
รูปที่ 7.57 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 15 องศา



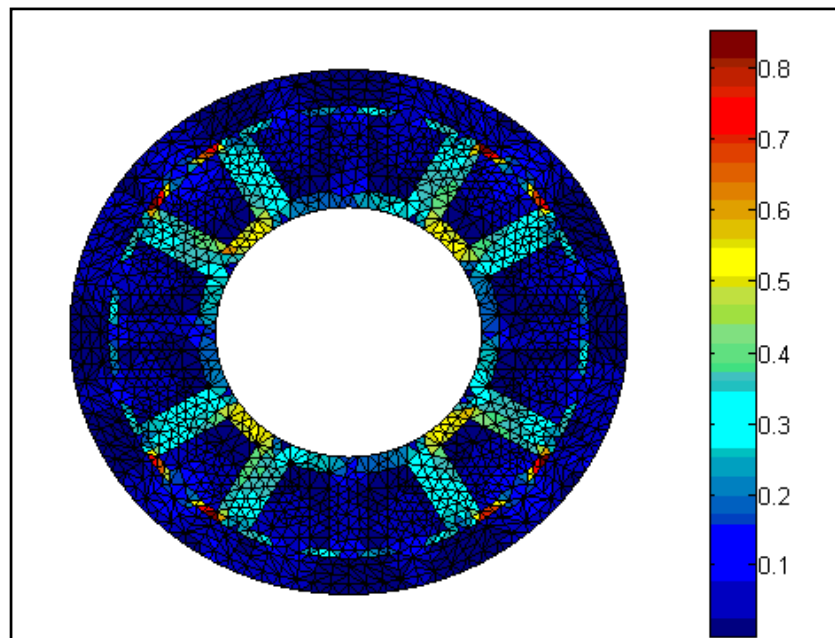
รูปที่ 7.58 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 22.5 องศา



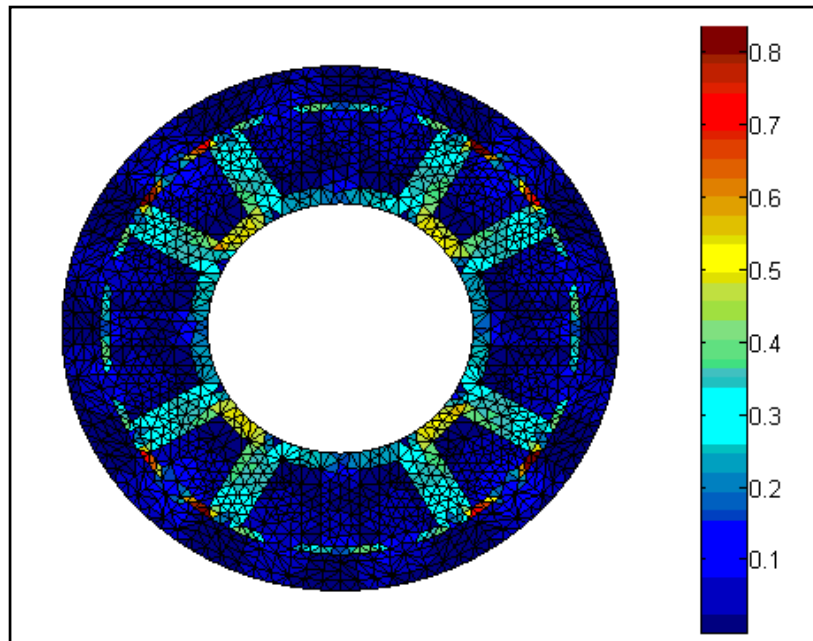
รูปที่ 7.59 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 30 องศา



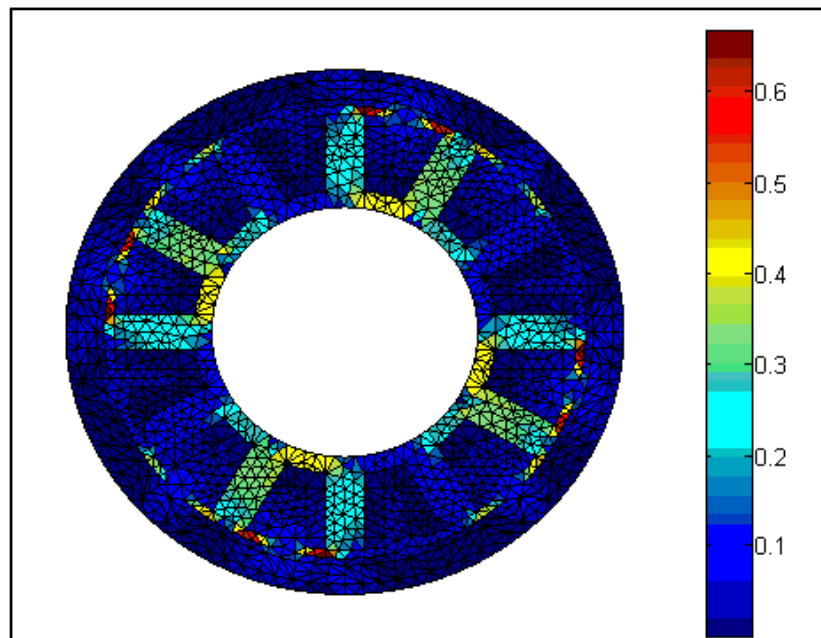
รูปที่ 7.60 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 37.5 องศา



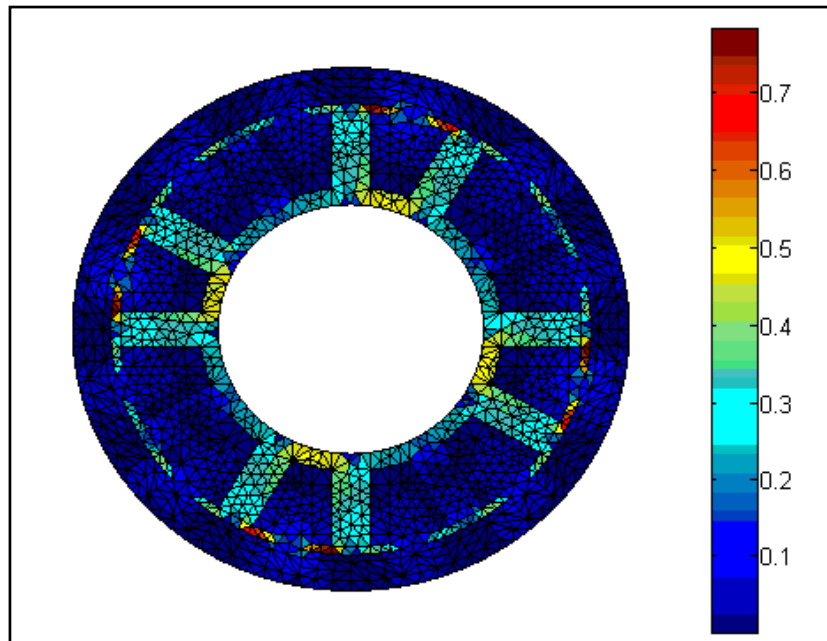
รูปที่ 7.61 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 45 องศา



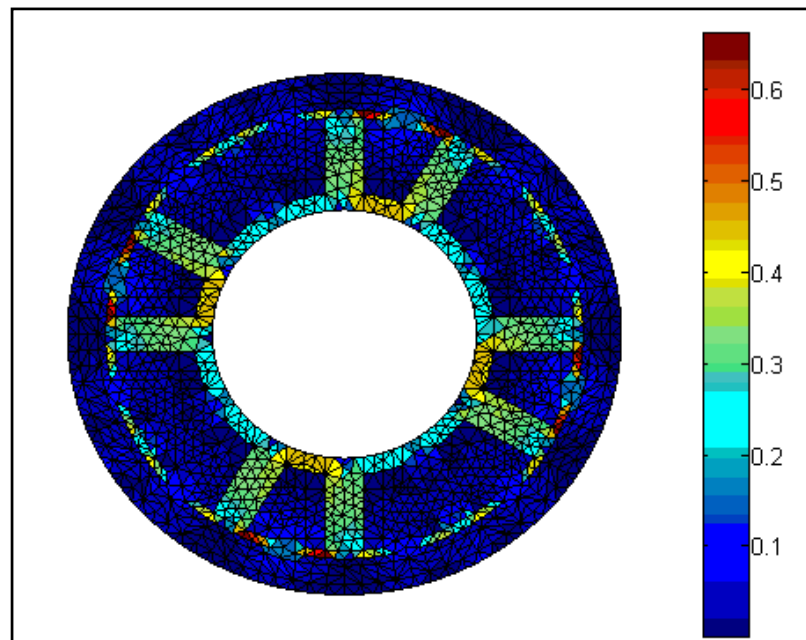
รูปที่ 7.62 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 52.5 องศา



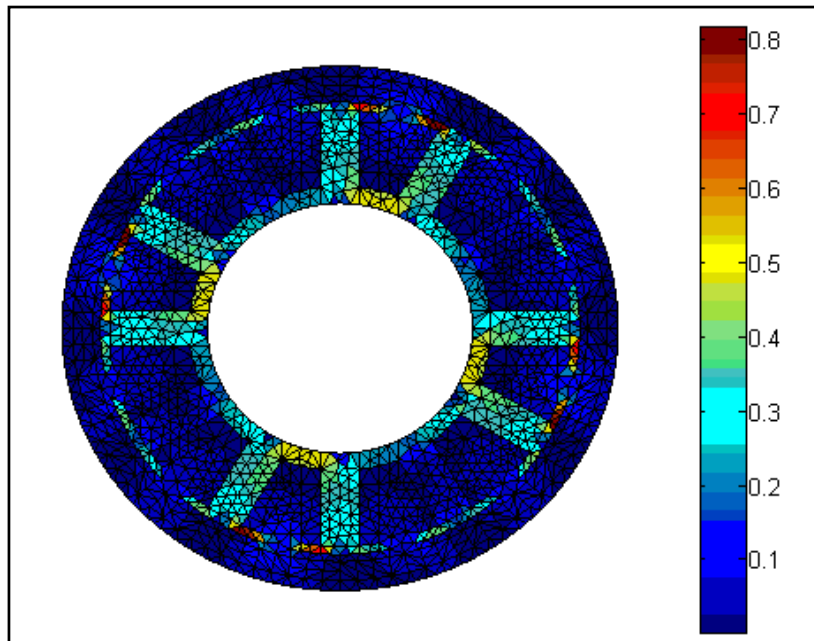
รูปที่ 7.63 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 60 องศา



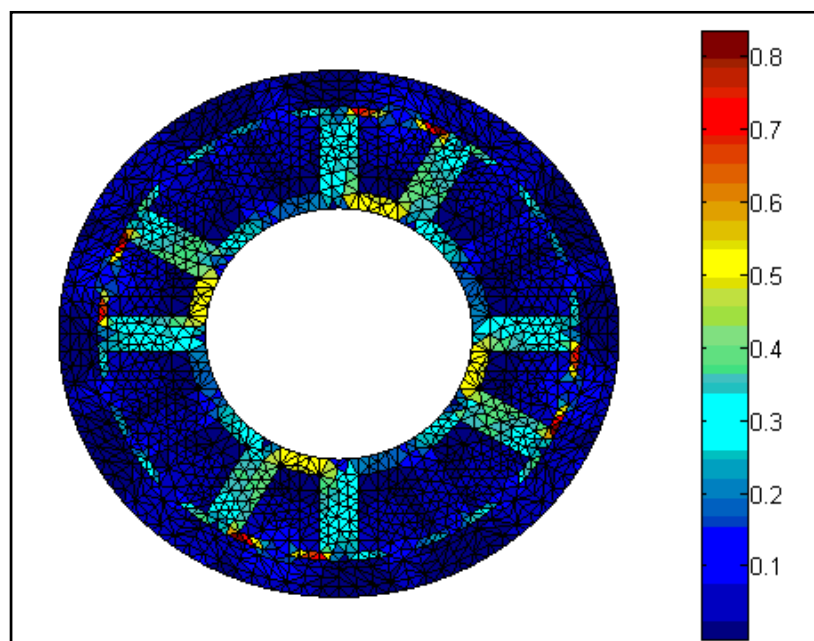
รูปที่ 7.64 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 67.5 องศา



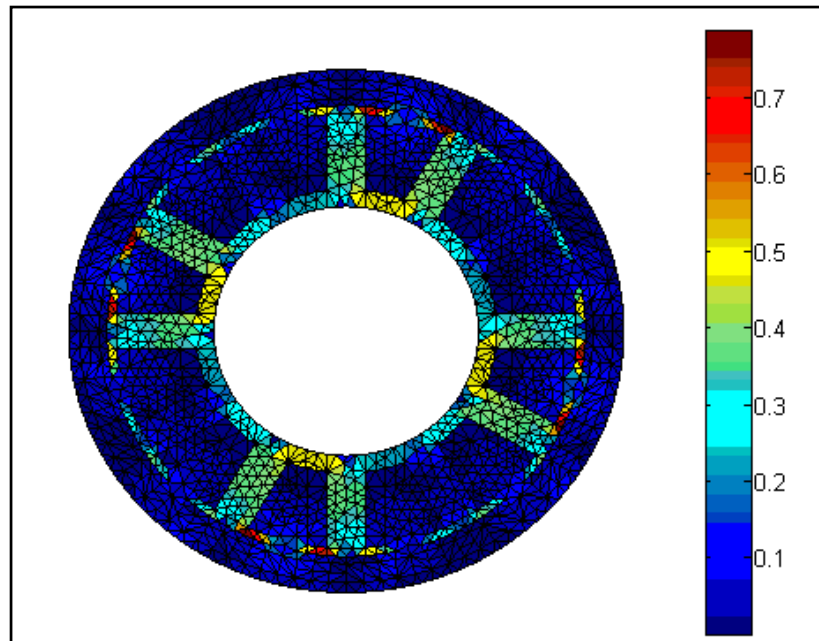
รูปที่ 7.65 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 75 องศา



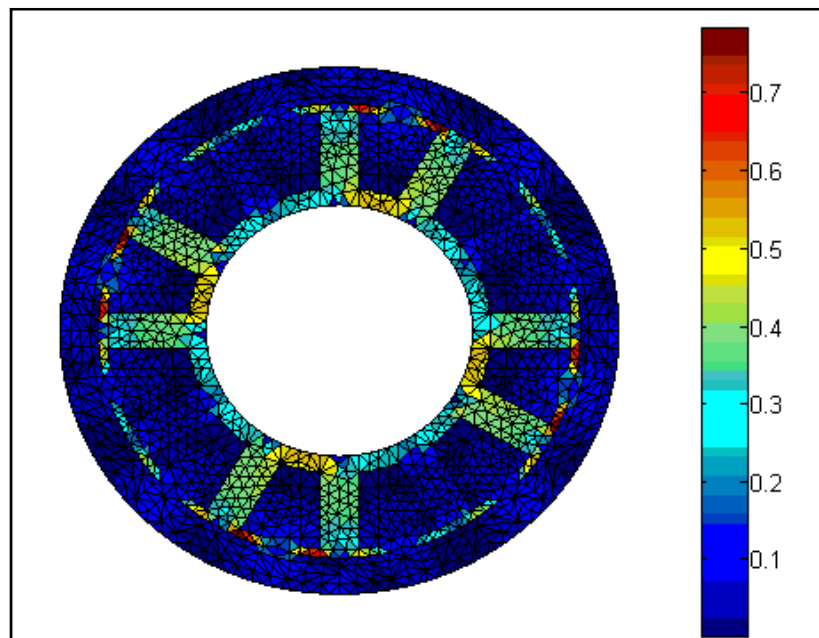
รูปที่ 7.66 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 82.5 องศา



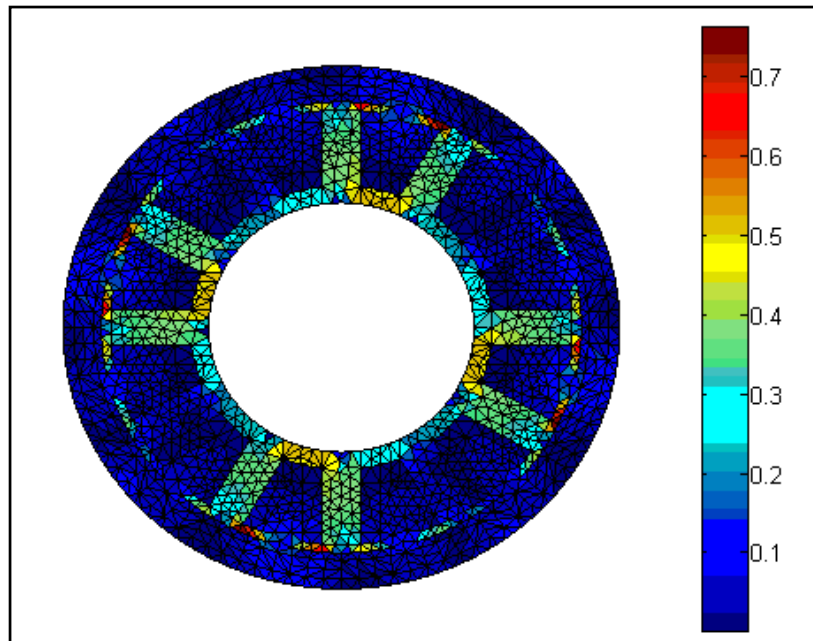
รูปที่ 7.67 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 90 องศา



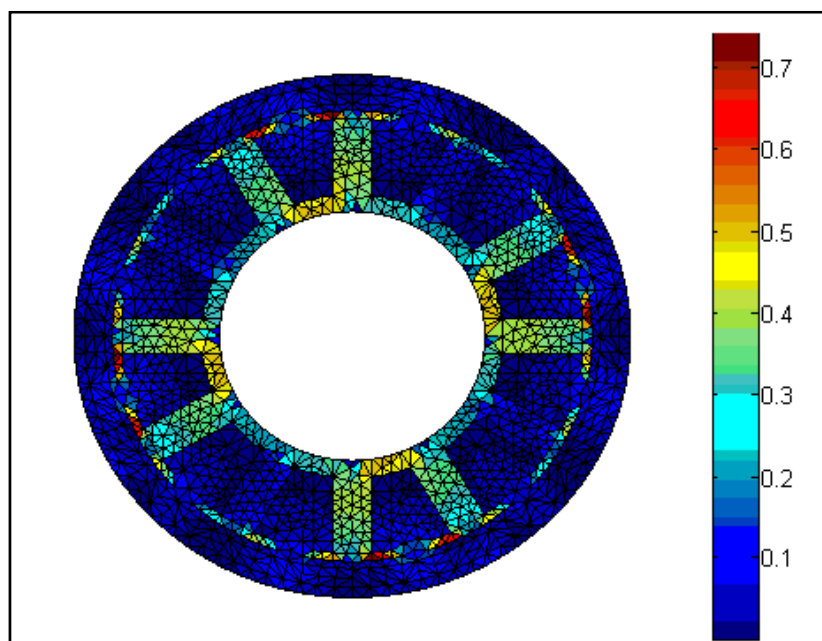
รูปที่ 7.68 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 97.5 องศา



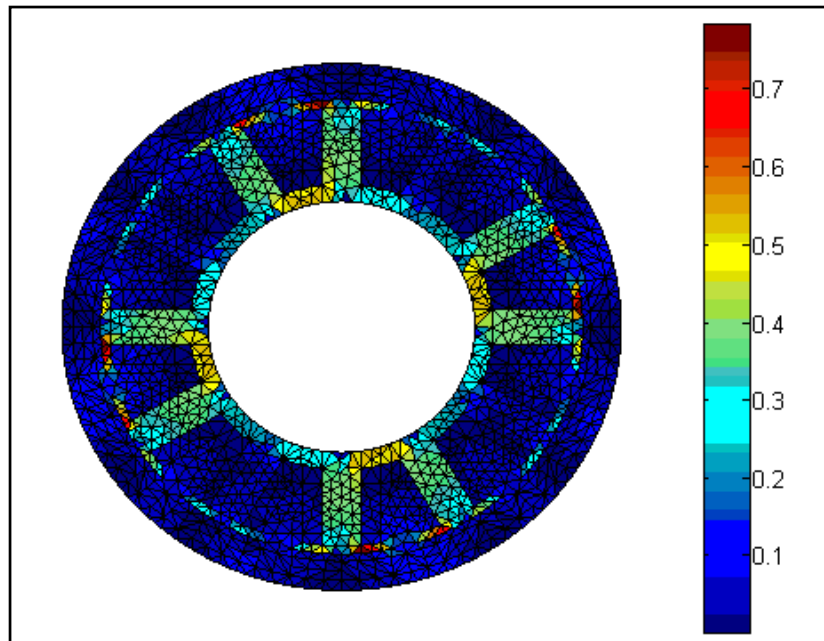
รูปที่ 7.69 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 105 องศา



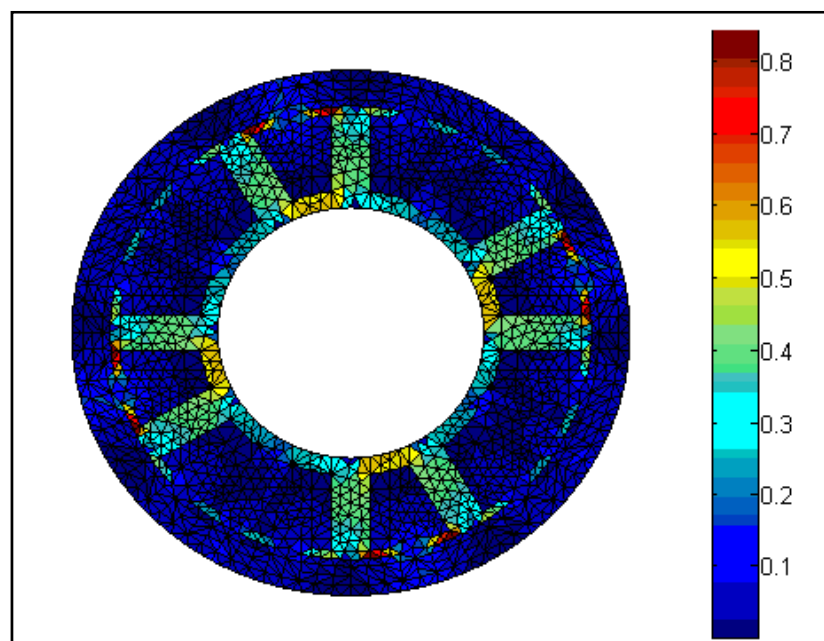
รูปที่ 7.70 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 112.5 องศา



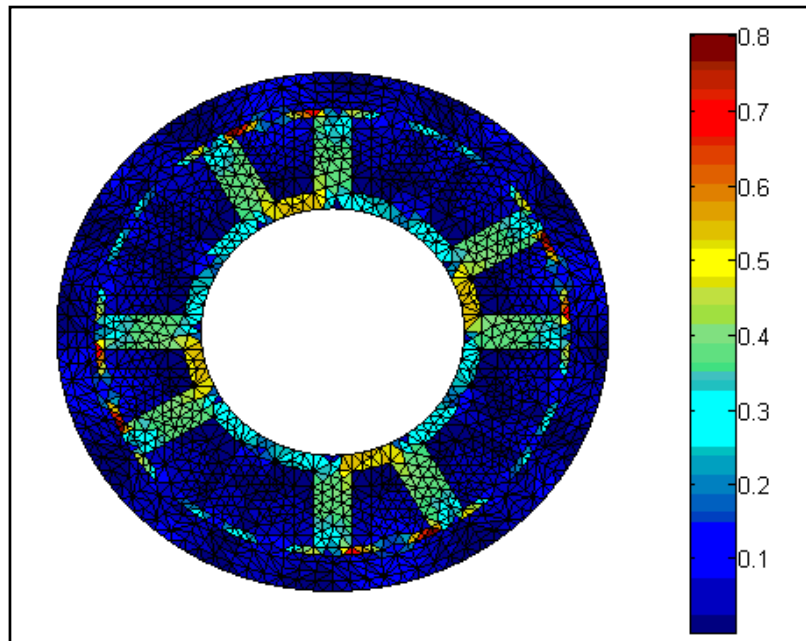
รูปที่ 7.71 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 120 องศา



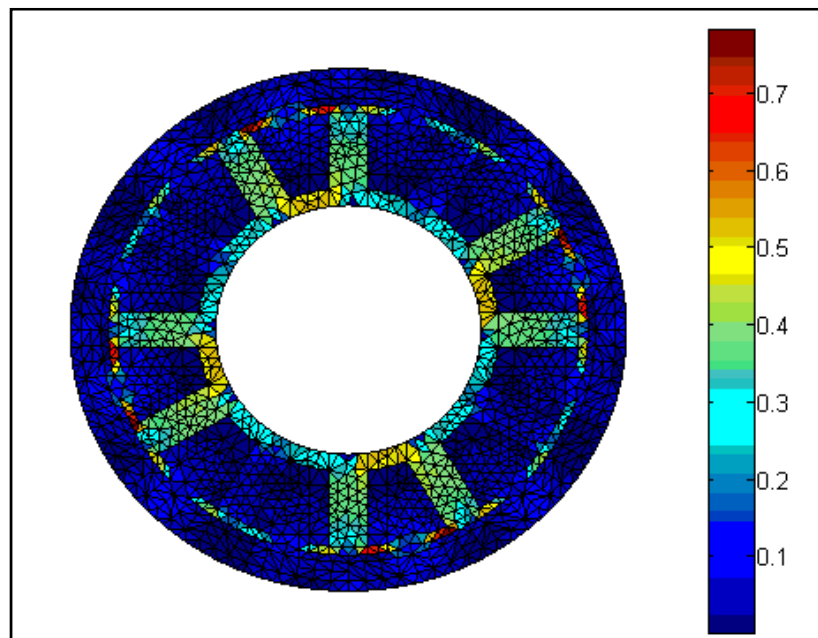
รูปที่ 7.72 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 127.5 องศา



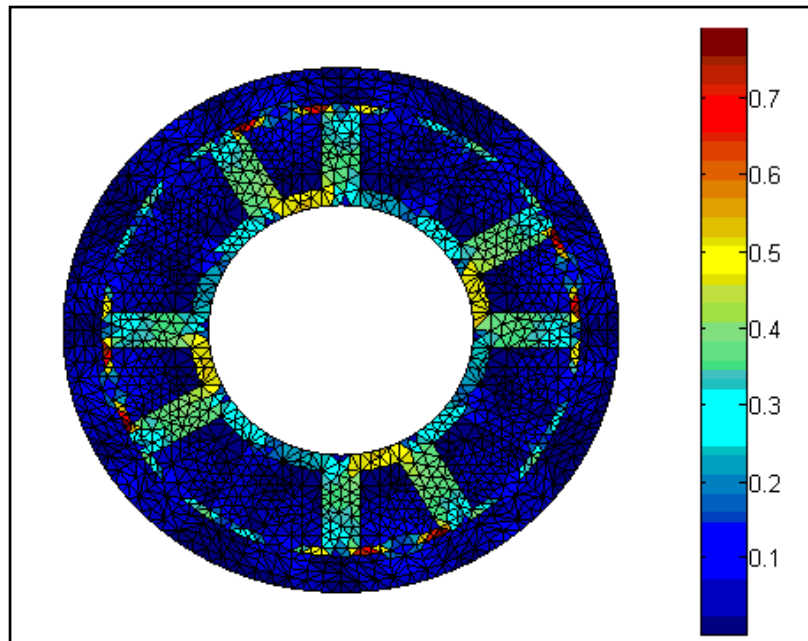
รูปที่ 7.73 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 135 องศา



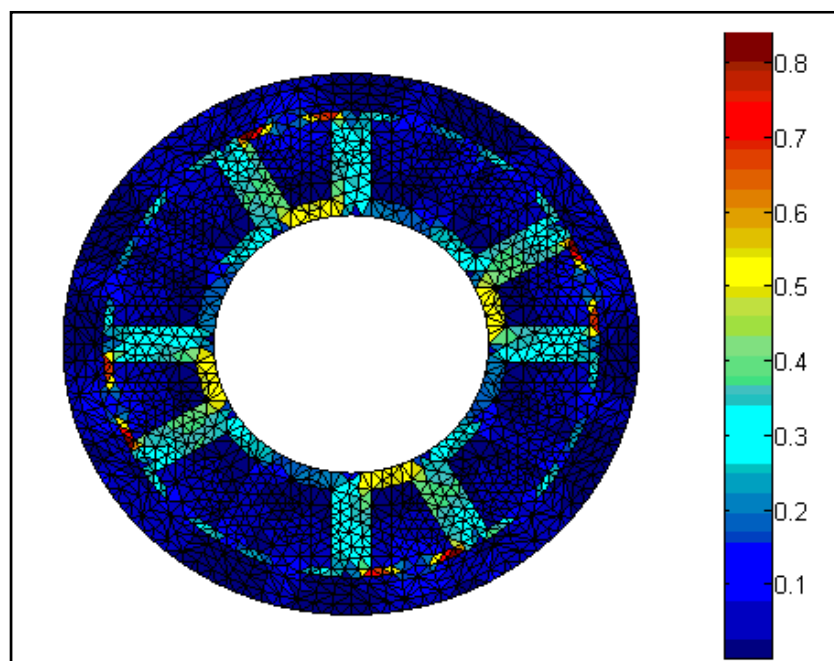
รูปที่ 7.74 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 142.5 องศา



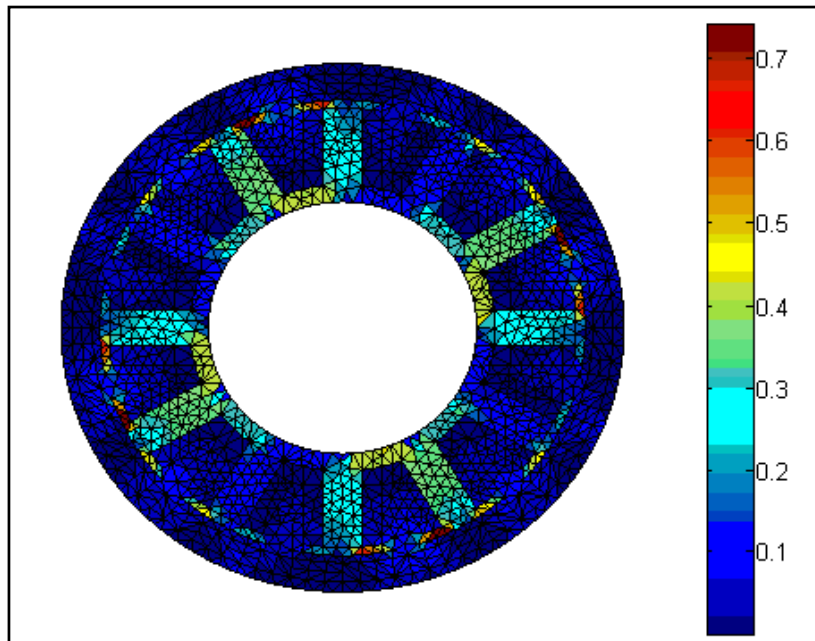
รูปที่ 7.75 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 150 องศา



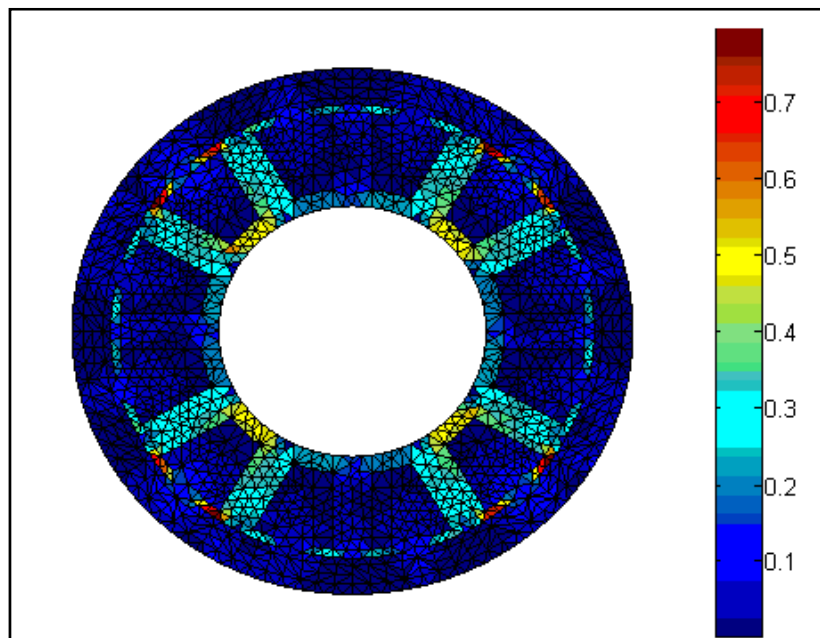
รูปที่ 7.76 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 157.5 องศา



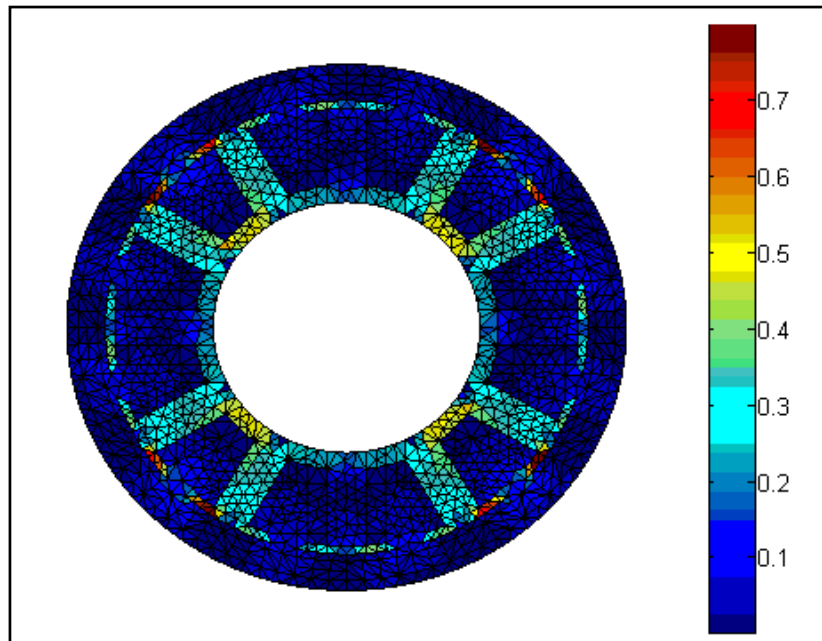
รูปที่ 7.77 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 165 องศา



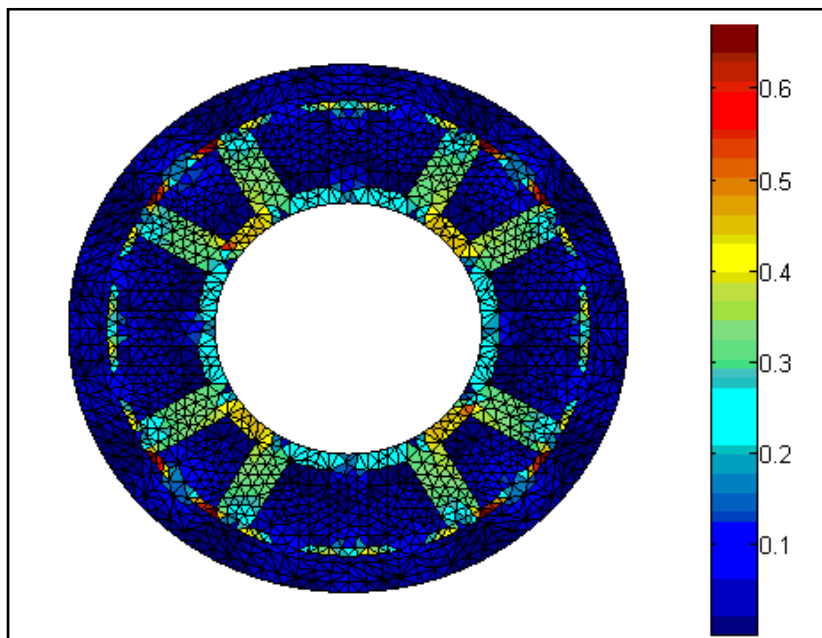
รูปที่ 7.78 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 172.5 องศา



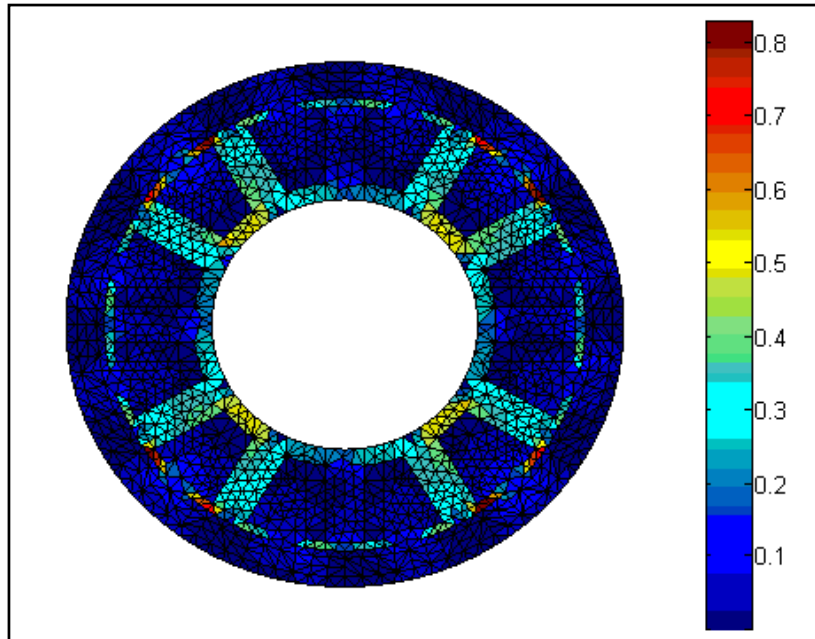
รูปที่ 7.79 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 180 องศา



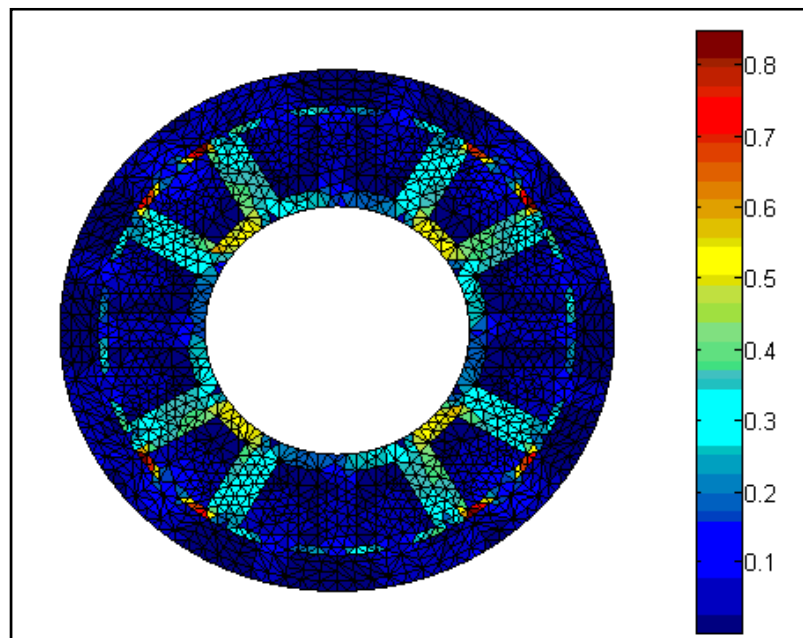
รูปที่ 7.80 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 187.5 องศา



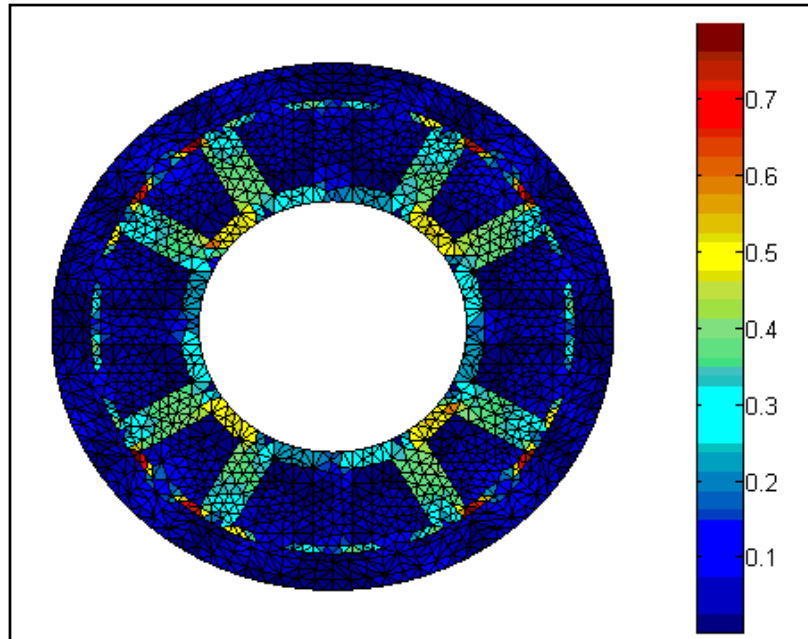
รูปที่ 7.81 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 195 องศา



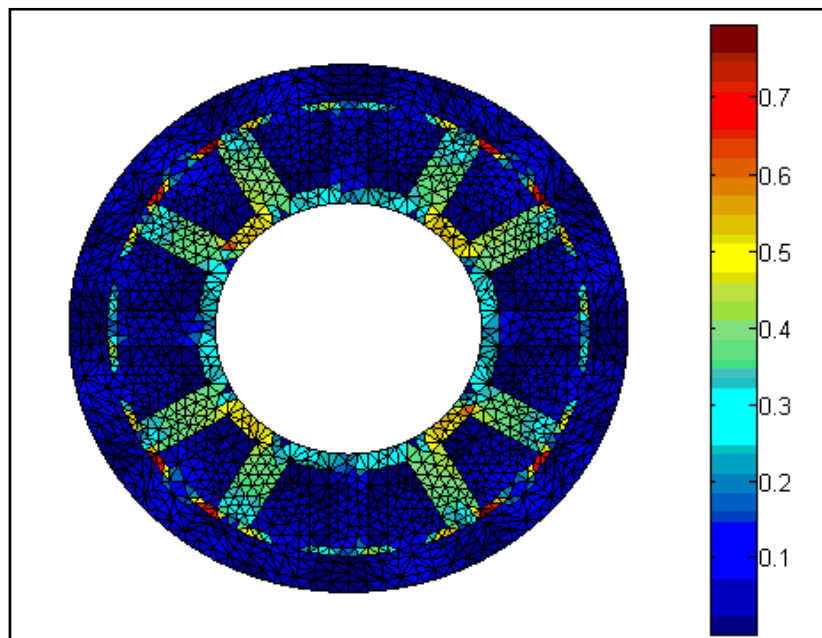
รูปที่ 7.82 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 202.5 องศา



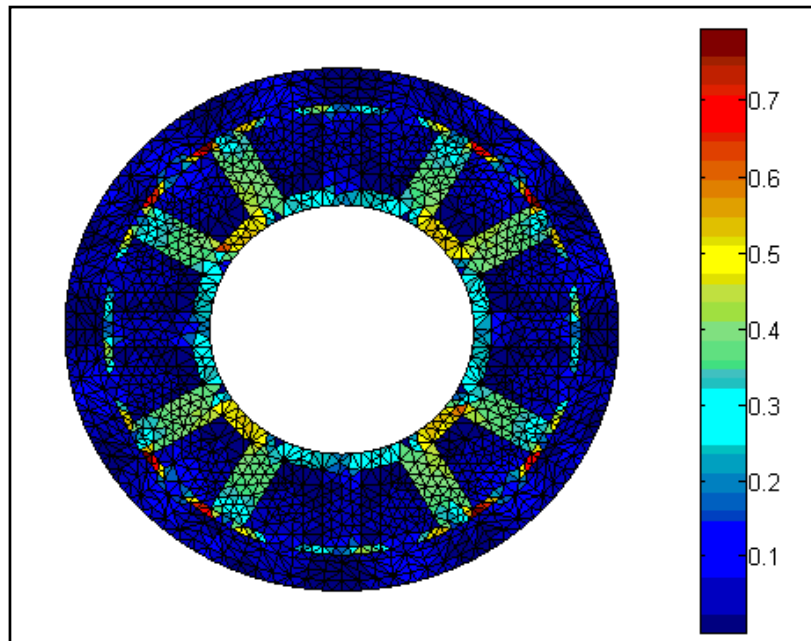
รูปที่ 7.83 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 210 องศา



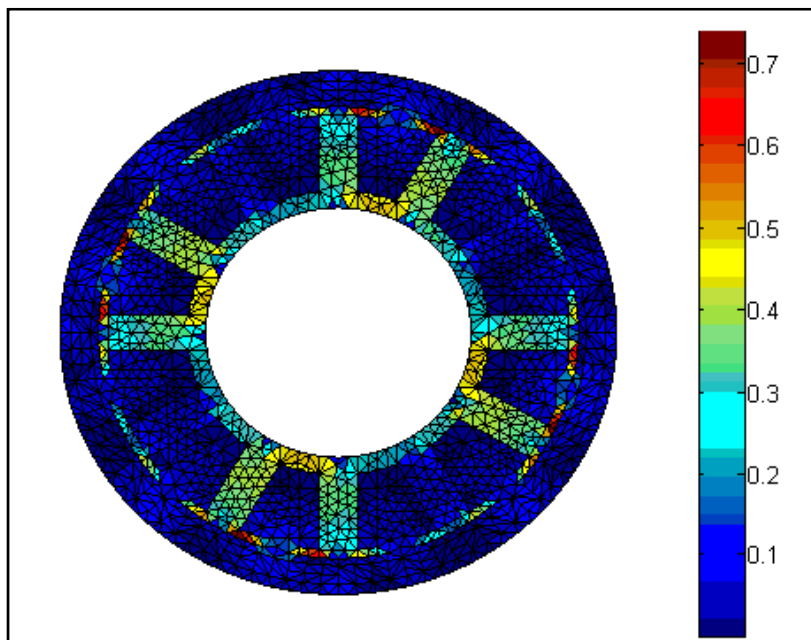
รูปที่ 7.84 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 217.5 องศา



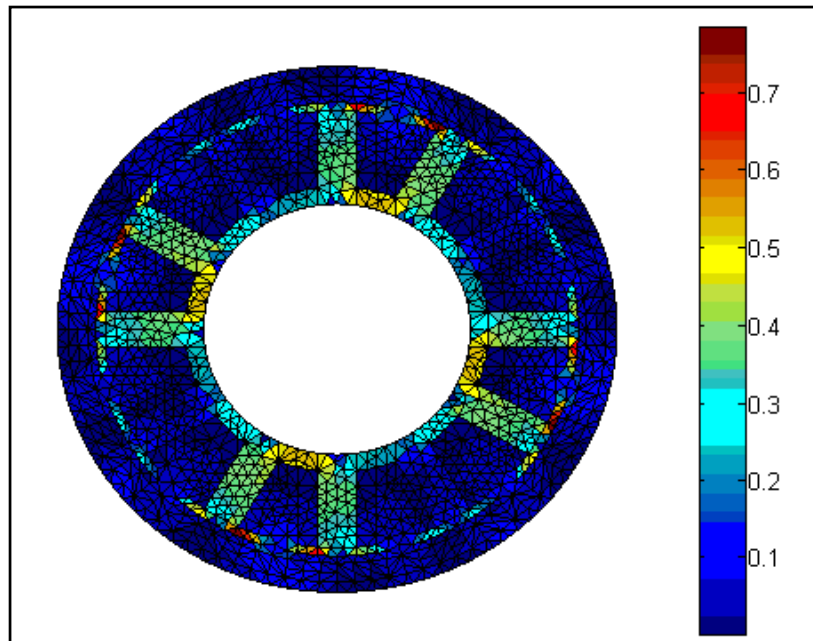
รูปที่ 7.85 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 225 องศา



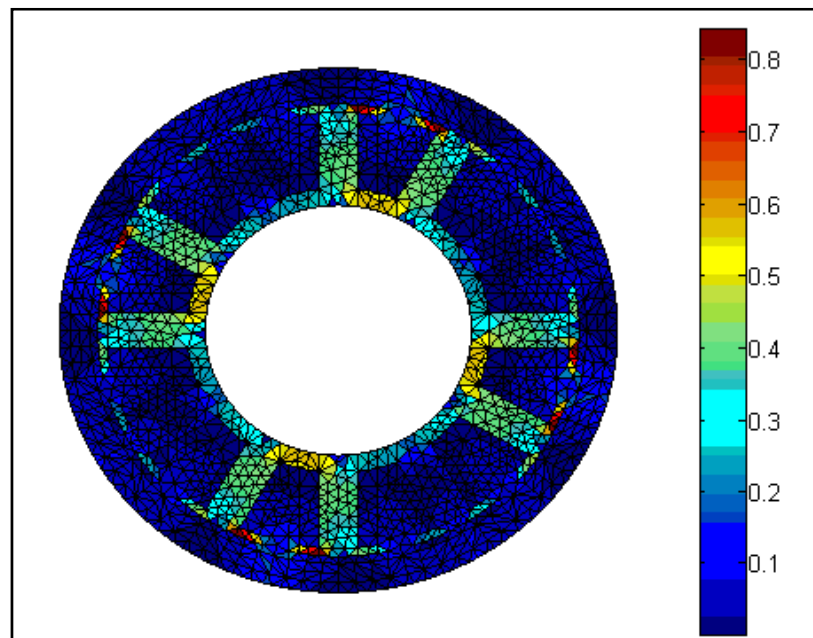
รูปที่ 7.86 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 232.5 องศา



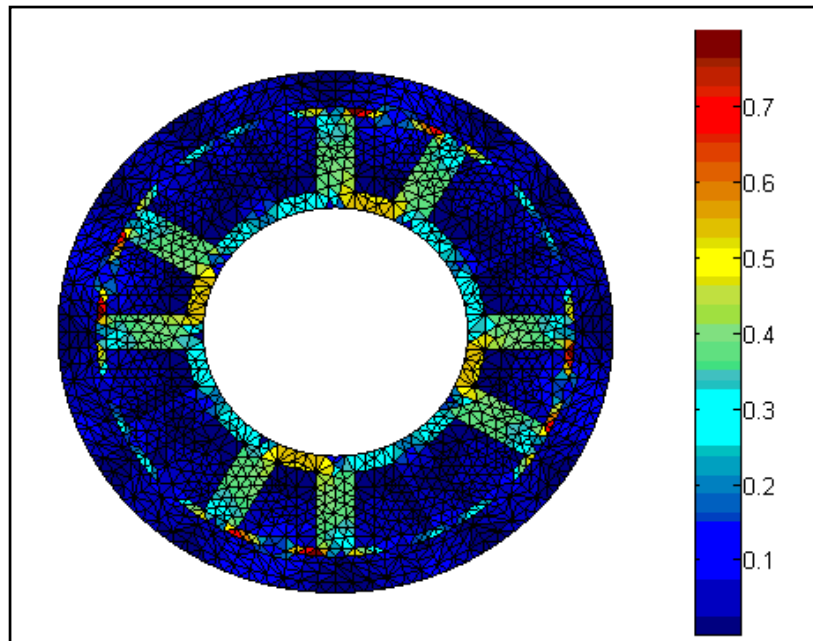
รูปที่ 7.87 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 240 องศา



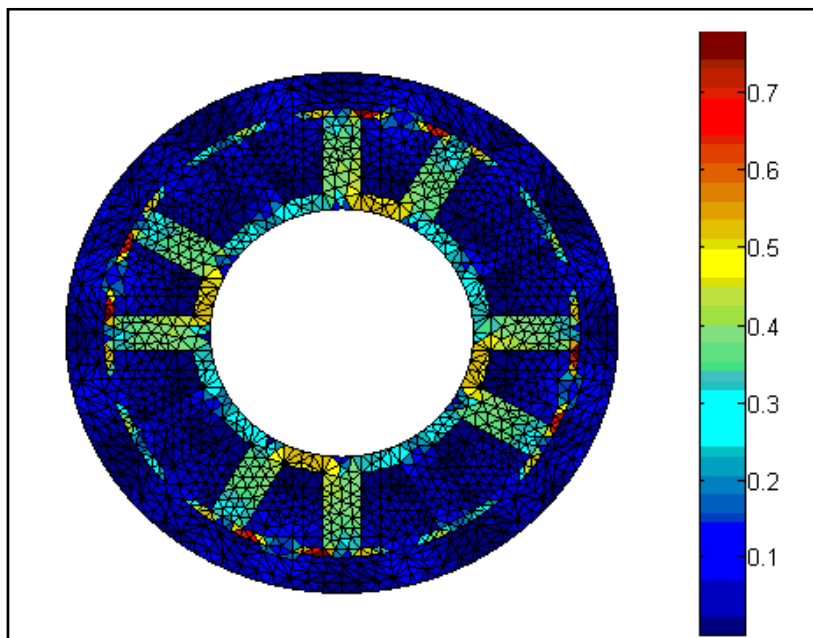
รูปที่ 7.88 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 247.5 องศา



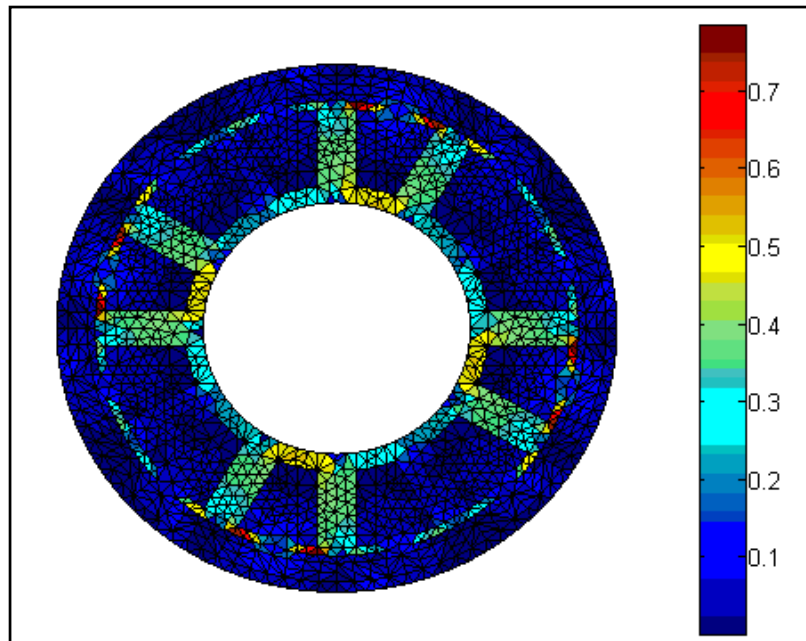
รูปที่ 7.89 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 255 องศา



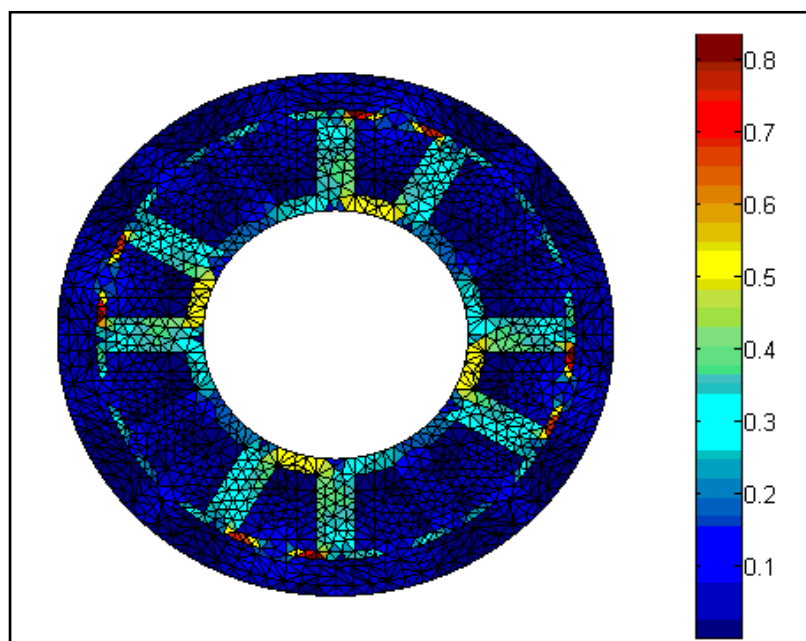
รูปที่ 7.90 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 262.5 องศา



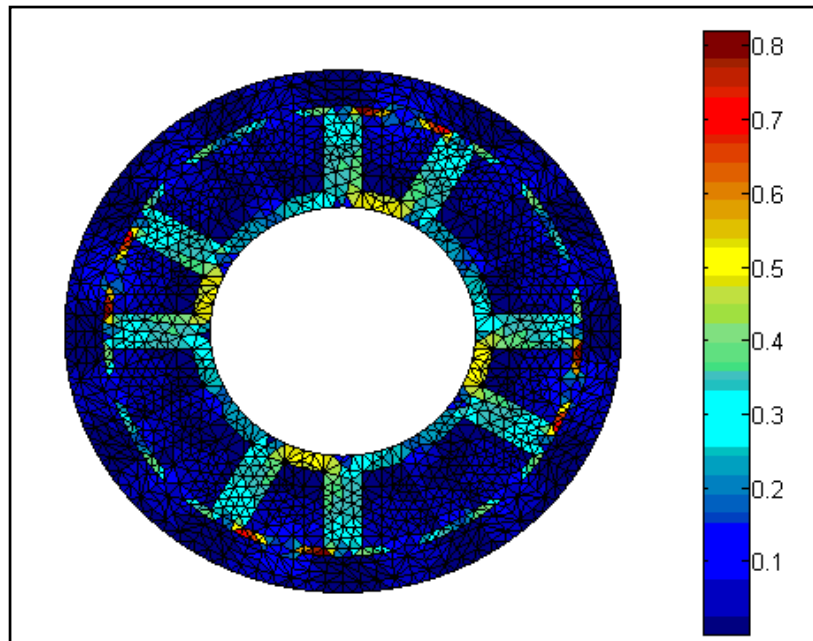
รูปที่ 7.91 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 270 องศา



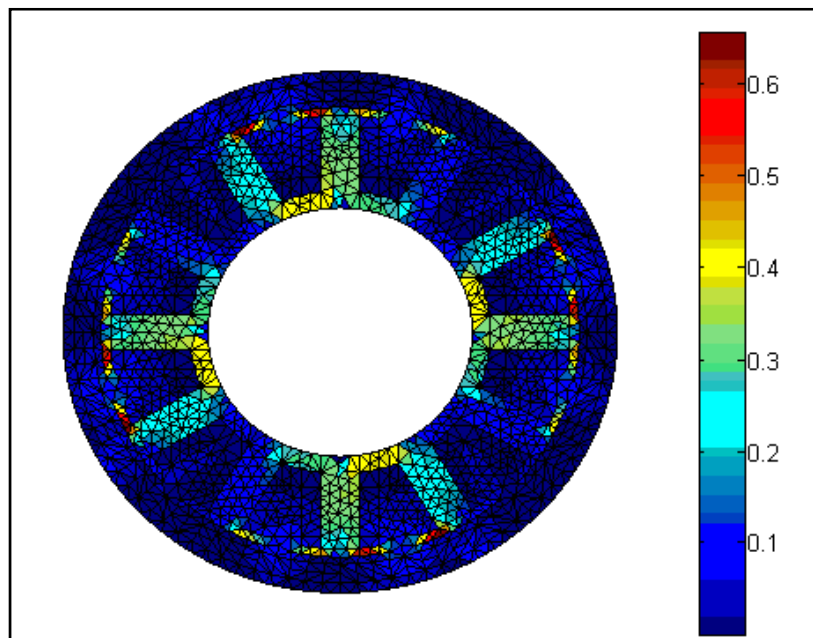
รูปที่ 7.92 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 277.5 องศา



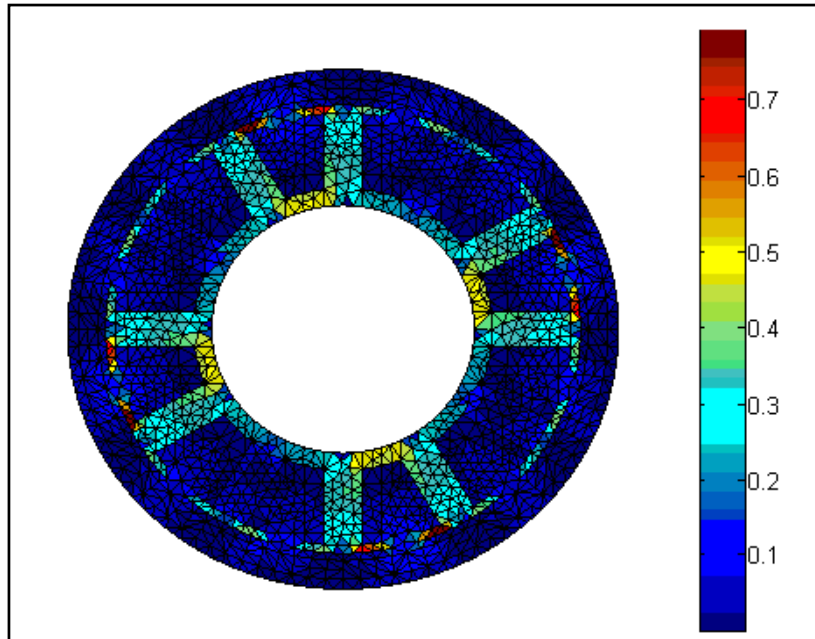
รูปที่ 7.93 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 285 องศา



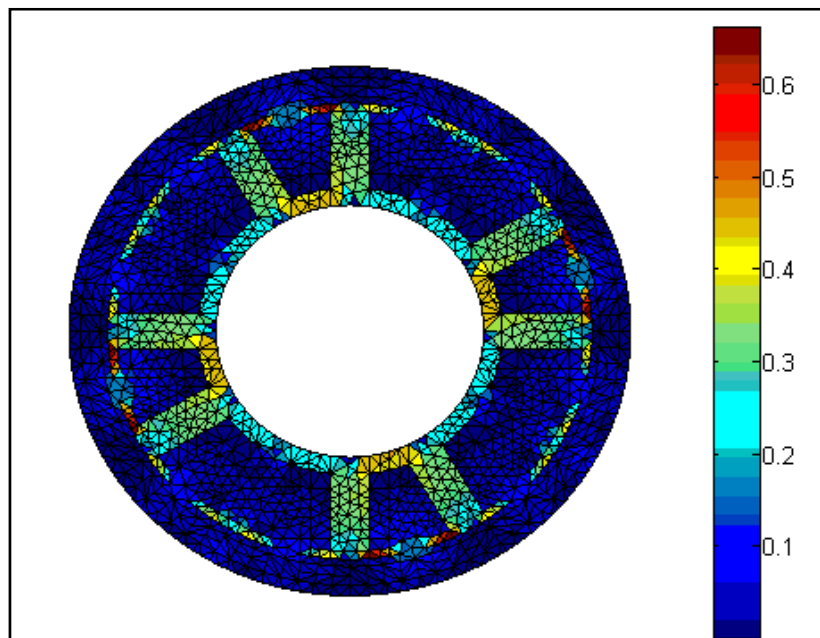
รูปที่ 7.94 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 292.5 องศา



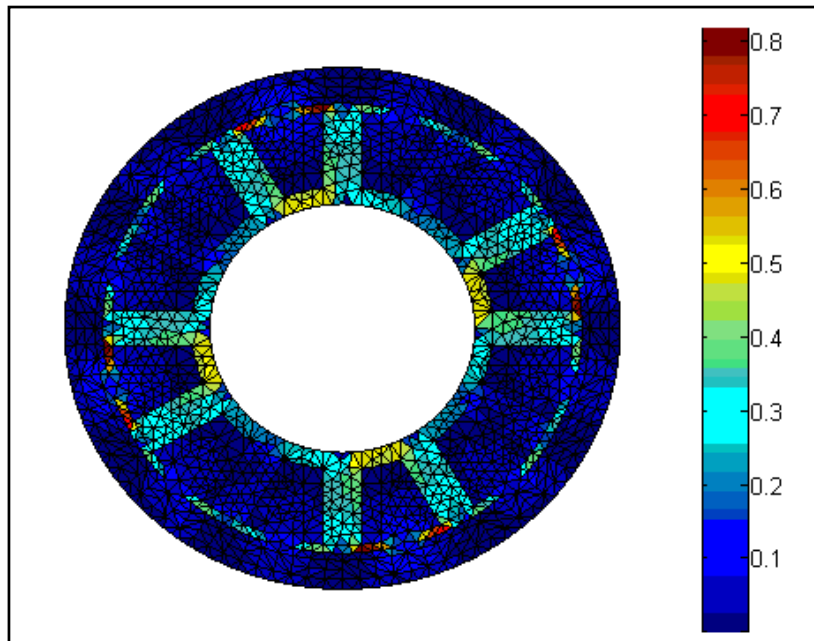
รูปที่ 7.95 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 300 องศา



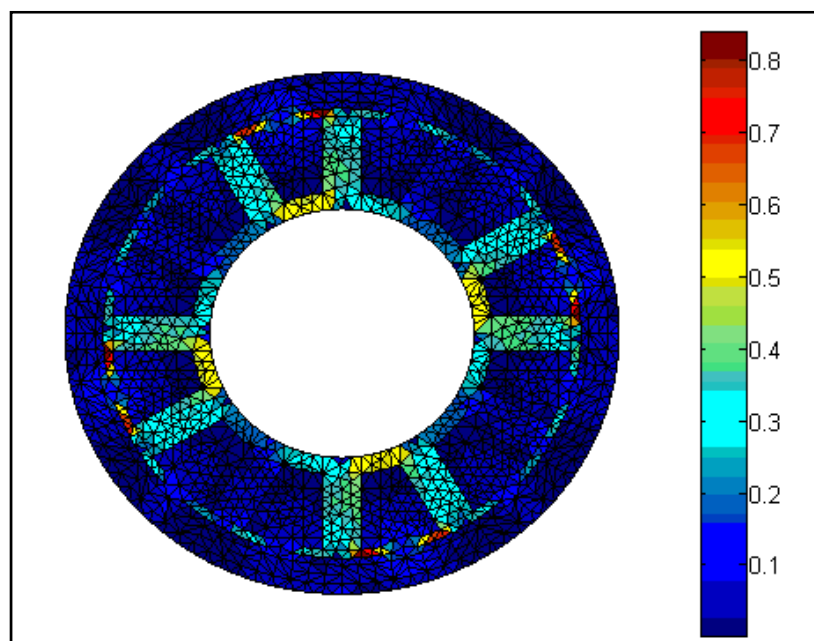
รูปที่ 7.96 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 307.5 องศา



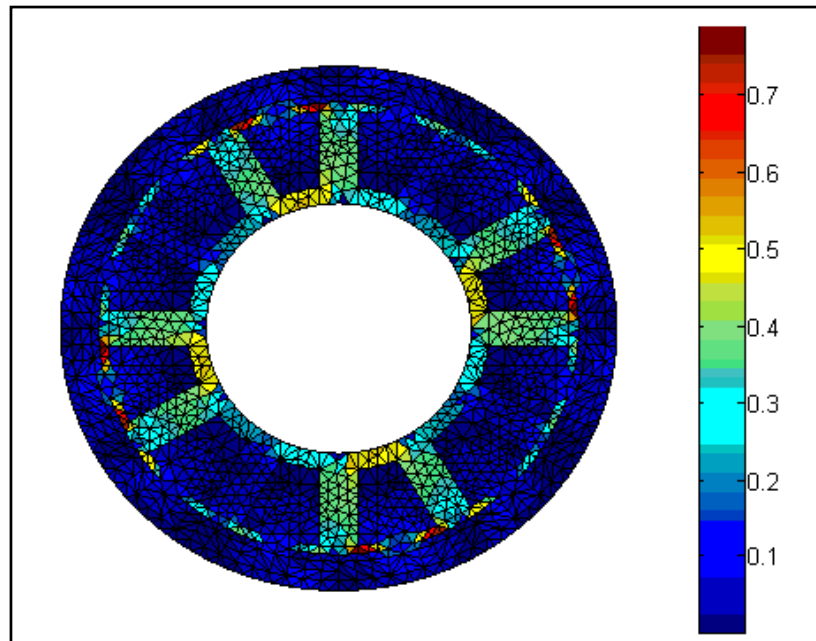
รูปที่ 7.97 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 315 องศา



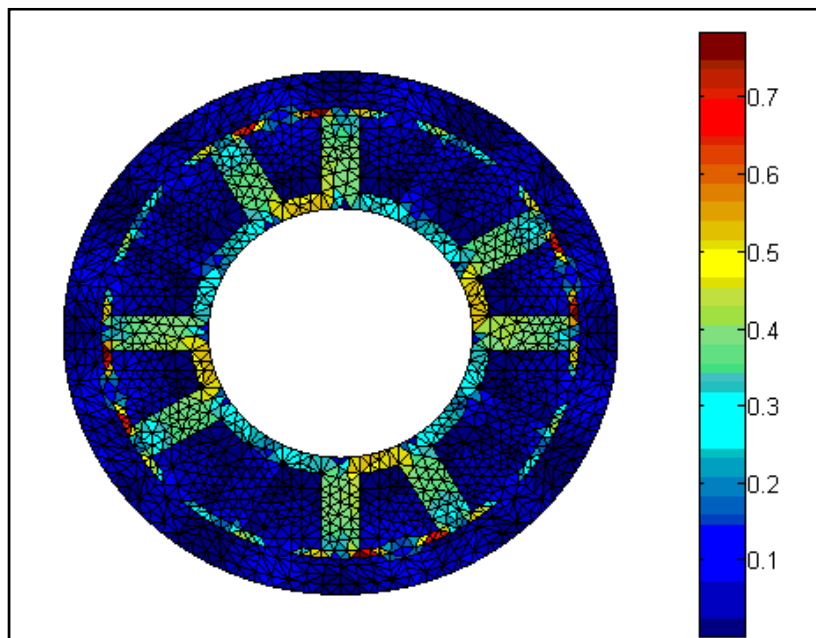
รูปที่ 7.98 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 322.5 องศา



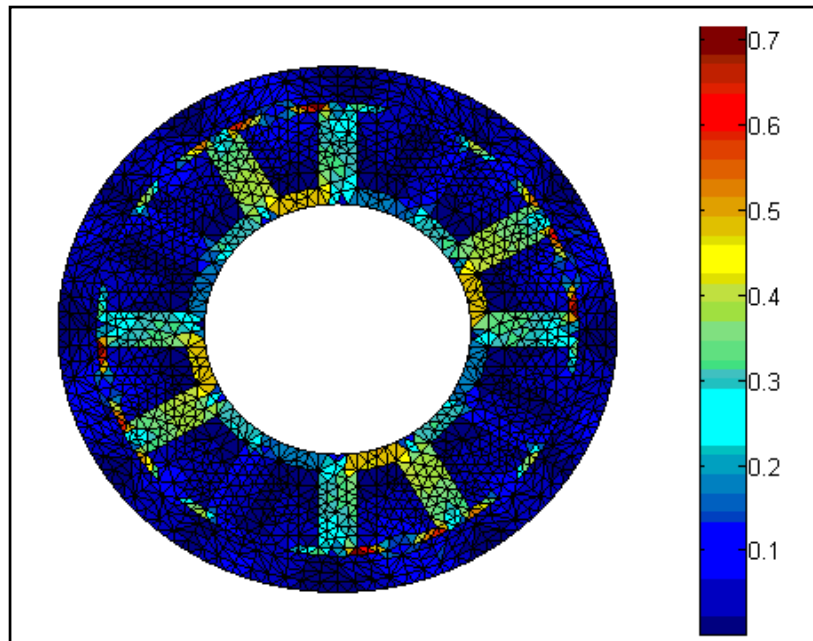
รูปที่ 7.99 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 330 องศา



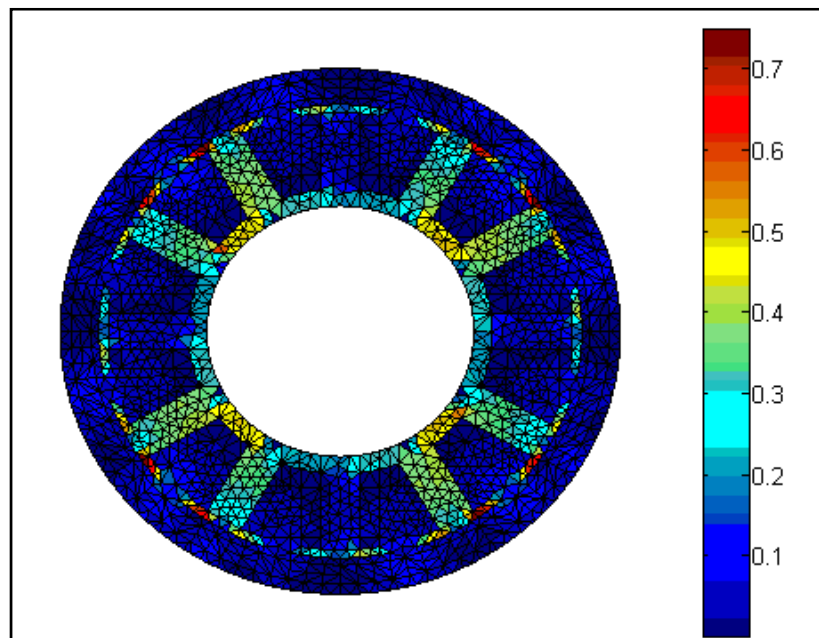
รูปที่ 7.100 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 337.5 องศา



รูปที่ 7.101 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 345 องศา



รูปที่ 7.102 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 352.5 องศา



รูปที่ 7.103 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (T) บริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 360 องศา

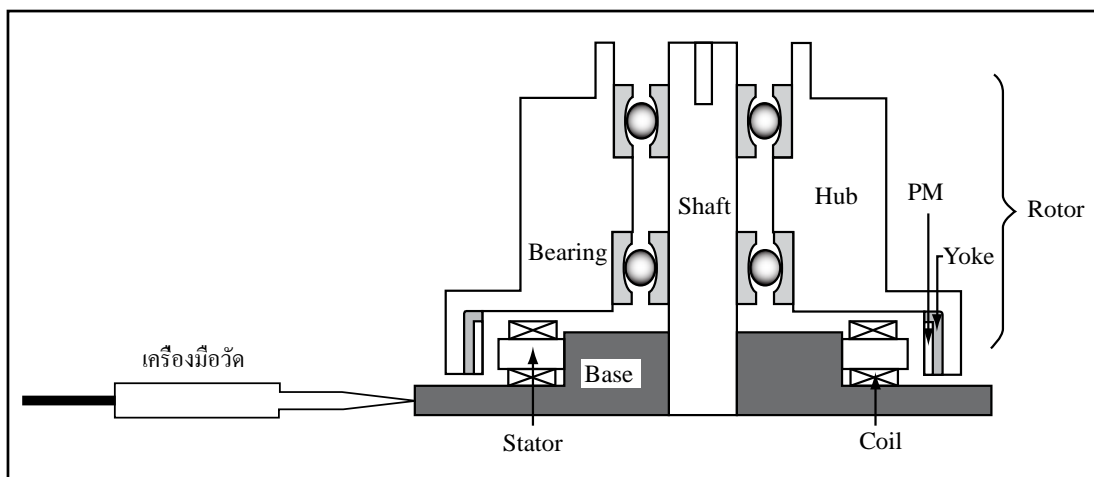
รูปที่ 7.95 ถึงรูปที่ 7.102 โรเตอร์เริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกาจากมุม 300 องศา ถึงมุม 352.5 องศา ซึ่งแต่ละรูปมีมุมต่างกัน 7.5 องศา การกระจายตัวค่าสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ที่คล้ายคลึงกันกล่าวคือ ค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงที่แกนสเตเตอร์ของเฟส a และ c สำหรับบริเวณอื่นๆ จะมีค่าสนามแม่เหล็กต่ำอยู่ในระดับไม่เกิน $0.2 T$ และถ้าหากนำรูปทั้ง 8 มาพิจารณาต่อเนื่องจากรูปที่ 7.95 ถึงรูปที่ 7.102 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กจะหมุนตามโรเตอร์ คือ หมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 7.103 โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยมุม 360 องศา การกระจายตัวค่าสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์จะมีค่าสูงที่แกนสเตเตอร์ของเฟส b และ c สำหรับบริเวณอื่นๆ จะมีค่าสนามแม่เหล็กต่ำอยู่ในระดับไม่เกิน $0.2 T$ ในจังหวะนี้จะเหมือนกับรูปที่ 7.55 ที่โรเตอร์หมุนด้วยมุม 0 องศา ซึ่งมอเตอร์หมุนครบรอบนั่นเอง

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวค่าสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์จากรูปที่ 7.55 ถึงรูปที่ 7.103 จะเห็นสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กล่าวผ่านมา คือ ส่วนที่เป็นสเตเตอร์การกระจายตัวค่าสนามแม่เหล็กจะเหมือนกันเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยมุมภายใน 60 องศา และจะมีสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยมุมที่ต่างกันทุกๆ 60 องศา สำหรับบริเวณโรเตอร์นั้น จะเห็นสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตามการหมุนของโรเตอร์

7.3 ลักษณะการจำลองผลการสั้นสะพานและการวัดทดสอบ

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ในฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการจำลองผลนี้ ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 6.2 ในข้างต้น ซึ่งการดำเนินงานได้อาศัยโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก ร่วมกับโปรแกรมจำลองผลการสั้นสะพาน โดยผลการจำลองที่จะนำไปเปรียบเทียบกับภาคปฏิบัติ จะเน้นผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปของการกระจัดซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั้นสะพานเป็นหลัก ซึ่งจะพิจารณาผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปของการกระจัดเฉพาะตรงตำแหน่งส่วนโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ อันเป็นตำแหน่งที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง ดังแสดงตำแหน่งของการวัดทดสอบบนมอเตอร์ที่ถูกต้อง ตรงตำแหน่งโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ไว้ดังรูปที่ 7.104



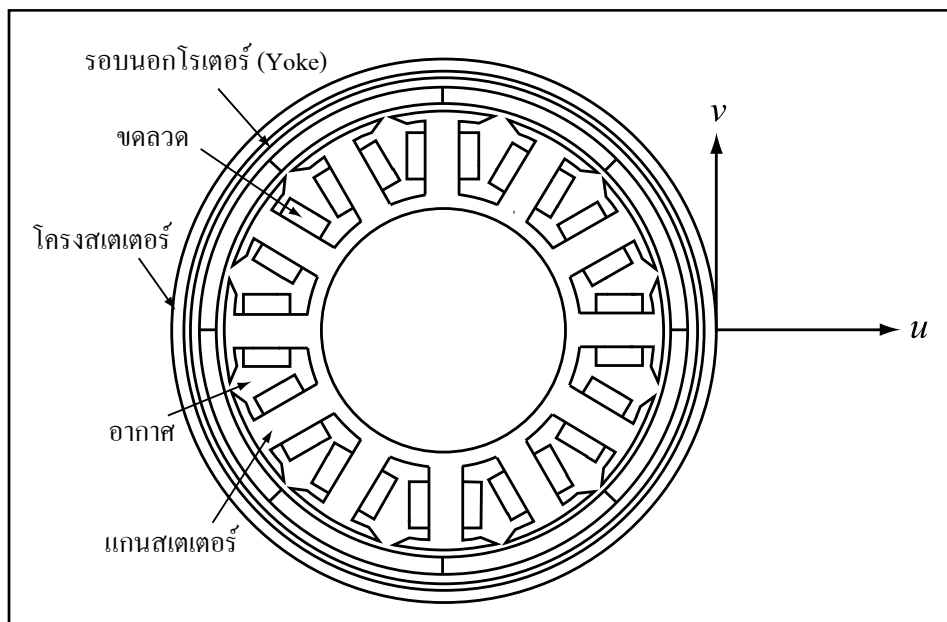
รูปที่ 7.104 ตำแหน่งการวัดทดสอบบนมอเตอร์ที่ถูกดัดแปลง

ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบเป็นเครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนแบบพกพาของ IMV รุ่น VM-2004Neo (มีช่วงตอบสนองความถี่ในย่าน 0-20,000 Hz) เพื่อใช้วัดขนาดของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในรูปของการกระจัด (m) อยู่ตรงตำแหน่งส่วน โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งสามารถถ่ายโอนข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ และมีซอฟต์แวร์เพื่อการเก็บข้อมูลและจัดทำรายงานได้ โดยแสดงเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในภาคปฏิบัติ และตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดบนมอเตอร์ ไว้ในภาคผนวก ก เครื่องมือวัดที่ใช้ในภาคปฏิบัตินี้จะทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์วัดการกระจัดออกมาในรูปข้อมูลเชิงตัวเลขที่สัมพันธ์กับเวลานอกจากนี้ยังแสดงผลออกมาในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาอีกด้วย

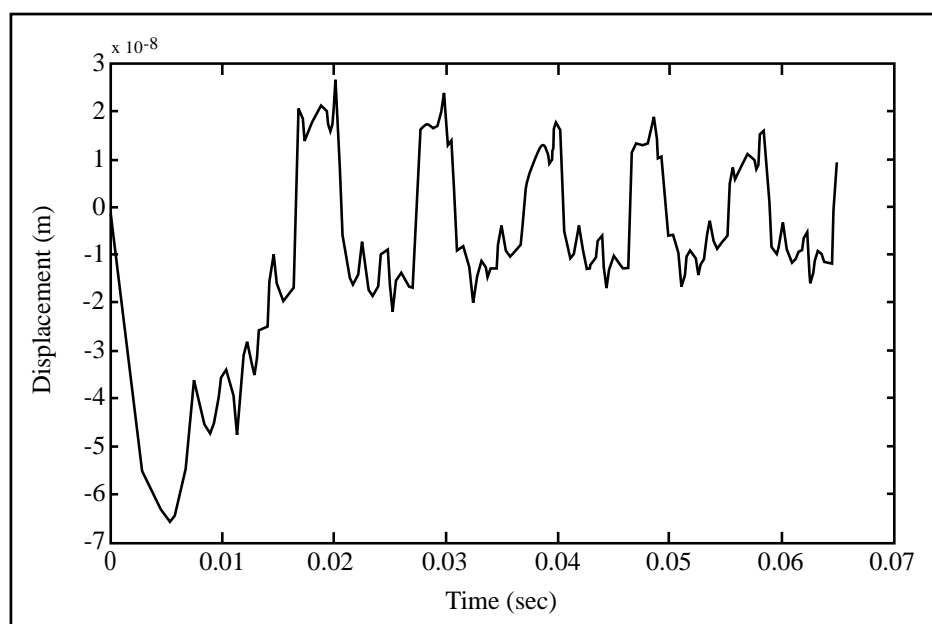
7.4 ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน

พิจารณาการจำลองผลในภาคทฤษฎีเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 12V สามเฟสแบบสมดุล โดยในหัวข้อนี้จะเน้นการแสดงผลการจำลองที่ปรากฏอยู่ในรูปของขนาดของการสั่นสะเทือนเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นผลลัพธ์หลักที่จะนำไปเปรียบเทียบกับภาคปฏิบัติ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่จะนำไปเปรียบเทียบ จะแสดงอยู่ในรูปของการกระจัด โดยพิจารณาผลการจำลองเฉพาะการกระจัดตรงตำแหน่งส่วน โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สอดคล้องกับการติดตั้งเครื่องมือวัดในภาคปฏิบัติ รูปที่ 7.105 เป็นการแสดงถึงตำแหน่งและลักษณะการจำลองของการกระจัดตรงตำแหน่งส่วน โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งผลการจำลองจะได้ค่าในแนวแกน x และ y ดังทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ซึ่ง u แทนระยะกระจัดในแนวแกน x และ v แทนระยะ

การจัดในแนวแกน y สำหรับผลการจำลองที่จะนำมาเปรียบเทียบกับภาคปฏิบัตินั้นคือการการจัดในแนวแกน x หรือการจัดตามแนวแกนรัศมี ซึ่งเพื่อความเข้าใจง่ายจะใช้คำนี้ต่อไป รูปที่ 7.106 เป็นการแสดงผลการจำลองของการจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาตรงตำแหน่งส่วนโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์



รูปที่ 7.105 ตำแหน่งการจำลองของการจัดตรงตำแหน่งส่วน โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์



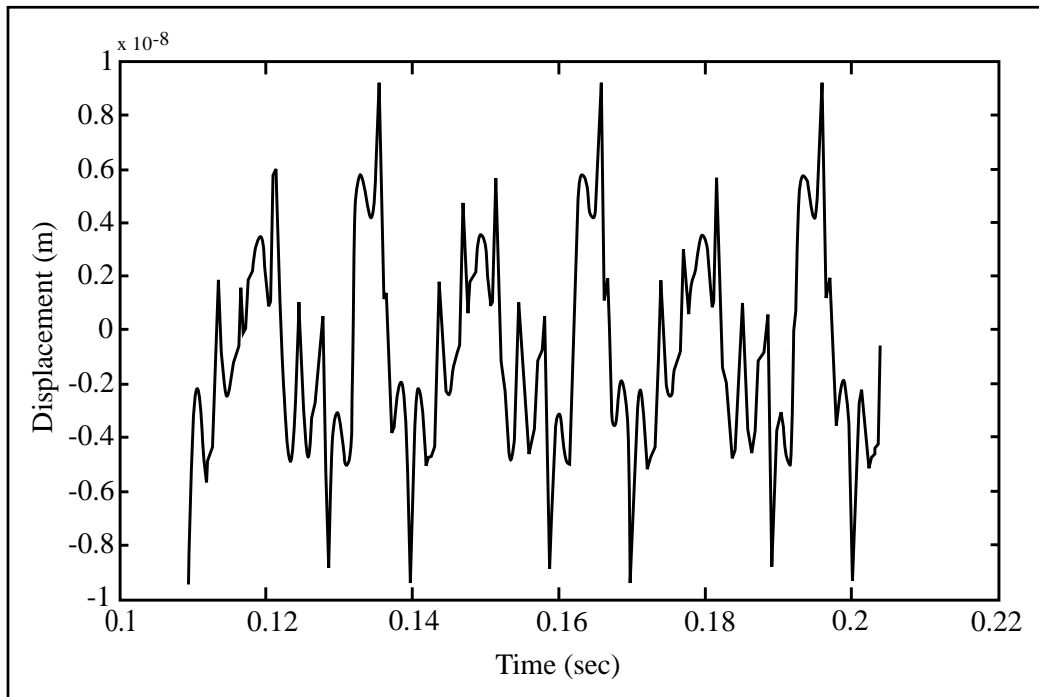
รูปที่ 7.106 ผลการจำลองการกระจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาของมอเตอร์

รูปที่ 7.106 เป็นผลการจำลองการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์เริ่มจากตอนสตาร์ท จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนตรงตำแหน่งส่วนโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแนวแกนตามแนวแกนรัศมี จะมีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบ (ระยะกระจัดที่ 0 m คือตำแหน่งที่อ้างอิง) โดยตอนเริ่มสตาร์ทจะมีแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุด และแอมพลิจูดจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ เพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ $1 \times 10^{-8} m$ และจากรูปจะสังเกตเห็นว่ามีคาบของการสั่นขึ้นลง $T = 0.009 \text{ sec}$ โดยหาความถี่การสั่นได้จาก $f = 1/T$ ซึ่งจะได้ความถี่ประมาณ 111 Hz ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดการสั่นสะเทือนจะมีค่าเท่ากับ ความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ ตามทฤษฎีแล้วแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำจะต้องมีความถี่เป็น 100 Hz (ความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) เพราะความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ คือ 50 Hz ซึ่งจากผลการจำลองถ้าพิจารณาจากความถี่ก็ถือได้ว่าใกล้เคียงกับทฤษฎี

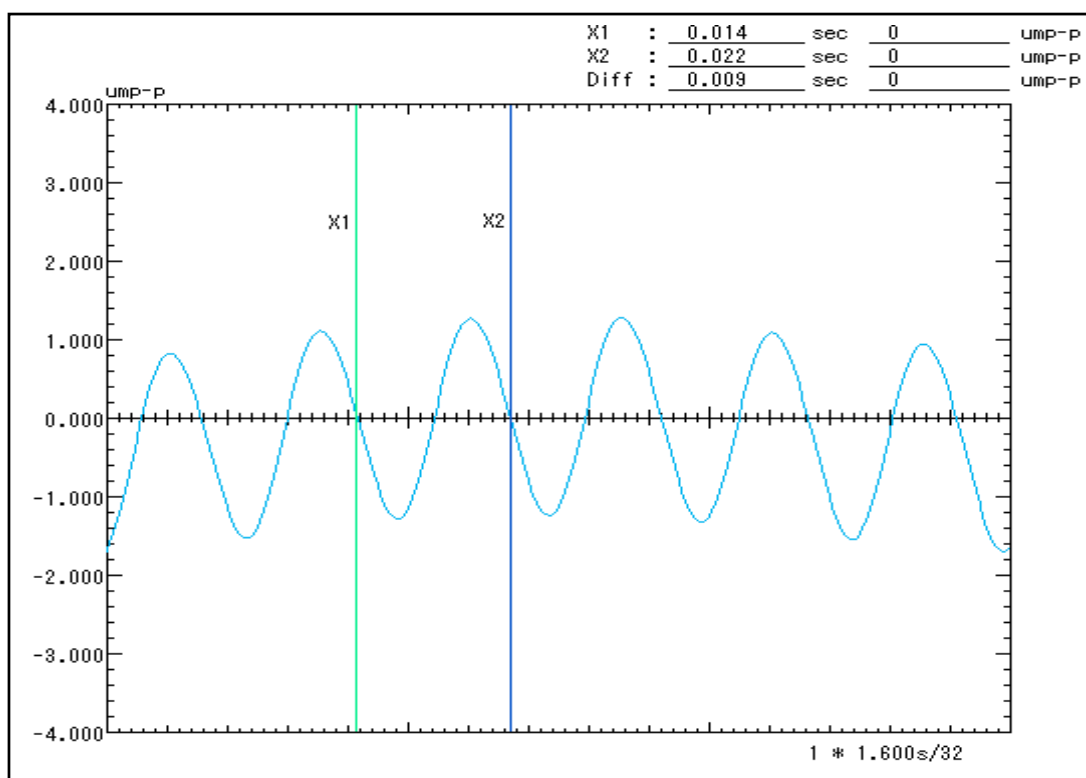
7.5 การเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบ

จากผลการจำลองการสั่นสะเทือนในหัวข้อที่ผ่านมา และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการจำลองผลและการวัดทดสอบซึ่งจะวัดตามแนวแกนรัศมีมาวิเคราะห์ และผลที่ได้จากการวัดทดสอบโดยเครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนแบบพกพาของ IMV รุ่น VM-2004Neo จะได้ผลลัพธ์ออกมาที่

สภาวะคงตัว ดังนั้นการเปรียบเทียบผลการจำลองดังกล่าวจะนำเสนอขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยสภาวะคงตัว ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.107 ผลการจำลองการกระจัดเทียบกับเวลาของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนสู่สภาวะคงตัว และรูปที่ 7.108 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลาของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 7.107 ผลการจำลองการกระจัดของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 7.108 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว

จากรูปที่ 7.107 ผลการจำลองการกระจัดที่สภาวะคงตัวจะสังเกตเห็นการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบและมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ การกระจัดจะมีค่าสูงที่สุดโดยมีค่าประมาณ $2 \times 10^{-8} m$ โดยมีคาบการสั่น $T = 0.009 \text{ sec}$ เมื่อคำนวณความถี่การสั่นจะมีค่าประมาณ 111 Hz จากรูปที่ 7.108 จะสังเกตเห็นว่าการสั่นสะท้อนที่ได้จากการวัด มีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบและมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์อย่างชัดเจนเช่นกัน โดยมีแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดไม่เกิน $2 \times 10^{-6} m$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่ได้จากการจำลองทางทฤษฎี จะเห็นว่าภาคทฤษฎีมีการกระจัดน้อยกว่าภาคปฏิบัติในกรณีศึกษาครั้งนี้ประมาณ 100 เท่า โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุจาก การจำลองผลยังไม่ได้พิจารณาค่าระยะหกลม (clearance) ของวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์ ค่าการหน่วง (damping) ของมอเตอร์ การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion) การเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) ของโรเตอร์ และอื่นๆ ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้อาจมีผลต่อการสั่นสะท้อนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่หลายเท่า และยังมีสาเหตุจากความเที่ยงตรง (precision) ในการคำนวณ สาเหตุต่างๆ เหล่านี้จึงส่งผลให้ภาคทฤษฎีมีขนาดของการสั่นสะท้อนน้อยกว่าภาคปฏิบัติ ในกรณีศึกษาครั้งนี้อยู่ 100 เท่า ส่วนเมื่อพิจารณาถึงความถี่ของการ

สั้นจากการวัดทดสอบจริงซึ่งมีคาบการสั่น $T = 0.009 \text{ sec}$ ดังนั้นความถี่ที่เกิดจากการวัดจริงคำนวณได้โดยมีค่าประมาณ 111 Hz ซึ่งจะมีค่าความถี่สอดคล้องกับภาคทฤษฎี

7.6 สรุป

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองทางทฤษฎีและทางภาคปฏิบัติจากการวัดทดสอบจริง การสั่นมีลักษณะขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบคล้ายรูปคลื่นไซน์ซึ่งสอดคล้องกัน และสั้นด้วยความถี่เดียวกัน สำหรับขนาดของการสั่น ผลภาคทฤษฎีมีขนาดของการสั่นสะท้อนน้อยกว่าภาคปฏิบัติ ในกรณีศึกษาครั้งนี้อยู่ 100 เท่า โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุจากอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการสั่นและยังไม่ได้นำมาพิจารณาในการจำลองผลในครั้งนี้ อาทิเช่น ค่าระยะหลวม ค่าการหน่วงของมอเตอร์ การขยายตัวทางความร้อน และการเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์ เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยต่อไปในอนาคตควรจะต้องคำนึงถึงอิทธิพลต่างๆเหล่านี้

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor: BLDCM) ในฮาร์ดดิสก์หรือที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) เพื่อศึกษาถึงการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ การจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาประกอบกับการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล เพื่อศึกษาถึงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นแรงภายนอกมากระทำกับมอเตอร์ให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณด้วยการเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับผลทางปฏิบัติที่ได้จากการวัดทดสอบ การประดิษฐ์ไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ภาษาการโปรแกรม MATLAB โดยรับค่าอินพุตจากโปรแกรมการสร้างกริดฟรีแวร์สำเร็จรูปชื่อ Gmesh พร้อมแสดงผลด้วยภาพกราฟฟิคต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ เพื่อช่วยต่อการวิเคราะห์ผล

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อาศัยรากฐานจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ ซึ่งบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอบทปริทัศน์วรรณกรรมเหล่านั้น พร้อมทั้งศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ซึ่งต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และประยุกต์วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการจำลองผล การดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าว ส่วนการคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ในรูปของการกระจัดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ทำให้ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลด้วยการประยุกต์ใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์เช่นกัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

และขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนท์ลิเมนต์เพื่อกำหนดค่าการสั่นสะเทือนดังกล่าว ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 เนื้อหาในบทที่ 6 นำเสนอการอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมเพื่อใช้จำลองผลสนามแม่เหล็กและจำลองผลการสั่นสะเทือน การดำเนินงานในบทที่ 7 เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าและทางกลที่ได้จากการจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้ได้เปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบของมอเตอร์ซึ่งได้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

8.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนาไฟไนท์ลิเมนต์เป็นแบบ 3 มิติ จากแบบ 2 มิติที่ปรากฏแล้วในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง ละเอียด และแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาไฟไนท์ลิเมนต์แบบ 3 มิติ จะได้เห็นการสั่นสะเทือนของ BLDCM ในฮาร์ดดิสก์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนโดยละเอียด

2. นำลักษณะการมีความสมมาตรของรูปทรงมอเตอร์มาร่วมพิจารณา ซึ่งอาจใช้การประมวลผลโดยวิธีไฟไนท์ลิเมนต์เพียง 1/4 ของรูปทรงกลมของมอเตอร์ จึงสามารถประหยัดเวลาและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลลงไปได้มาก

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). **ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก** (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2542). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bi, C., Liu, Z. J., and Low, T. S. (1997). Effects of unbalanced magnetic pull in spindle motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. 33 (5): 4080-4082.
- Bickford, W. B. (1994). **A first course in the finite element method** (2nd ed.). USA: IRWIN.
- Boesing, M., and Doncker, R. W. D. (2010). Exploring a Vibration Synthesis Process for the Acoustic Characterization of Electric Drives. **International Conference on Electrical Machines**. ROME: 1-6.
- Boglietti, A., Chiampi, M., Chiarabaglio, D., and Tartaglia, M. (1989). Finite element analysis of permanent magnet motors. **International Conference on Magnetics**. 25(5): 3584-3586.
- Brunelli, B., Casadei, D., Reggiani, U., and Serra, G. (1983). Transient and steady-state behavior of solid rotor induction machines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 19(6): 2650-2654.
- Chapman, S. J. (1998). **Electric machinery fundamentals** (3rd ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Chan, C. C. (1993). An overview of electric vehicle technology. **IEEE Transactions on Electric Vehicle Technology**. 81(9): 1202-1213.
- Chan, C. C., Chau, K. T., Jiang, J. Z., Xia, W., Zhu, M., and Zhang, R. (1996). Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 43(2): 331-339.
- Chan, C. C., Jiang, J. Z., Chen, G. H., Wang, X. Y., and Chau, K. T. (1994). A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 30 (5): 1258-1266.
- Chung, J. (2004). Vibration absorber for reduction of the in-plane vibration in an optical disk drive. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. 50(2): 552-557.

- Demerdash, N. A., and Neth, T. W., (1980). Dynamic Modeling of Brushless dc Motors for Aerospace Actuation. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**. 16(6): 811-821.
- Fu, W. N. (1999). **Electromagnetic field analysis of induction motors by finite element method and its application to phantom loading**. Ph.D. Dissertation, Hong Kong Polytechnic University, China.
- Funabiki, S. (1985). Estimation of torque pulsation due to the behaviour of a convertor and an inverter in a brushless DC-drive system. **IEE PROCEEDINGS**. 132(4): 215-222.
- Gan, J., Chau, K. T., Chan, C. C., and Jiang, J. Z. (2000). A New Surface-Inset, Permanent-Magnet, Brushless DC motor drive for electric vehicles. **IEEE Transactions on Magnetism**. 36(5): 3810-3818.
- Gan, J., Chau, K. T., Wang, Y., Chan, C. C., and Jiang, J. Z. (2000). Design and analysis of a new permanent magnet brushless DC machine. **IEEE Transactions on Magnetism**. 36(5): 3353-3356.
- Henneberger, G., Sattler, Ph. K., Hadrys, W., and Shen, D. (1992). Procedure for the numerical computation of mechanical vibrations in electrical machines. **IEEE Transactions on Magnetism**. 28(2): 1351-1354.
- Heo, J. W., and Chung, J. (2002). Vibration and noise reduction of an optical disk drive by using vibration absorber. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. 48(4): 874-878.
- Hilgert, T., Vandeveld, L., and Melkebeek, J. (2008). Comparison of magnetostriction models for use in calculations of vibrations in magnetic cores. **IEEE Transactions on Magnetism**. 44(6): 874-877.
- Huebner, K. H., Dewhurst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Ishibashi, F., Noda, S., and Mochizuki, M. (1998). Numerical simulation of electromagnetic vibration of small induction motors. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 145(6): 1998.
- Jabbar, M. A., Phyu, H. N., Liu, Z., and Bi, C. (1996). Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet DC motor in dynamic conditions by time-stepping technique. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 32(5): 763-770.

- Jabbar, M. A., Phyu, H. N., Liu, Z., and Bi, C. (2004). Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet DC motor in dynamic conditions by time-stepping technique. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 40(3): 763-770.
- Jahns, T. M. (1987). Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 23(4): 681-689.
- Jang, G. H., and Yoon, J. W. (1996). Torque and unbalanced magnetic force in a rotational unsymmetric brushless DC motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. 32(5): 5157-5159.
- Jang, G. H., Chang, J. H., Hong, D. P., and Kim, K. S. (2002). Finite-element analysis of an electromechanical field of a BLDC motor considering speed control and mechanical flexibility. **IEEE Transactions on Magnetics**. 38(2): 945-948.
- Jiao, G., and Rahn, C. D. (2004). Field weakening for radial force reduction in brushless permanent-magnet DC motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. 40(5): 3286-3292.
- Kim, B. T., Kwon, B. I., and Park, S. C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35(5): 3742-3744.
- Kim, K. T., Hwang, S. M., Hwang, G. Y., Kim, T. J., Jeong, W. B., and Kim, C. U. (1999). Effect of rotor eccentricity on spindle vibration in magnetically symmetric and asymmetric BLDC motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. KOREA: 967-972.
- Kim, K. T., Kim, K. S., Hwang, S. M., Kim, T. J., and Jung, Y. H. (2001). Comparison of magnetic forces for IPM and SPM motor with rotor eccentricity. **IEEE Transactions on Magnetics**. 37(5): 3448-3451.
- Kwon, Y. W., and Bang, H. (2000). **The finite element method using MATLAB** (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Lai, Y. S., Shyu, F. S., and Rao, W. H. (2004). Novel Back-EMF Detection Technique of Brushless DC Motor Drives for Whole Duty-Ratio Range Control. **IEEE Industrial Electronics Society**. Korea: Busan Press.
- Law, J. D., Chertok, A., and Lipo, T. A. (1994). Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 30(5): 1185-1192.

- Lim, S., Kim, K., Cho, U., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., and Soh, W.Y. (2009). Cantilever Dynamic Vibration Absorber for Reducing Optical Disk Drive Vibration. **IEEE Transactions on Magnetics**. 45(5): 2198-2201.
- Morimoto, S., Takeda, Y., Hirasa, T., and Taniguchi, K. (1990). Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 26(5): 866-871.
- Nehl, T. W., Demerdash, N. A., and Fouad, F. A. (1985). Impact of winding inductances and other parameters on the design and performance of brushless DC motors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. 104(8): 2206-2213.
- Neves, C. G. C., Crison, R., Sadowski, N., and Bastos, J. P. A. (1999). Forced vibrations calculation in a switched reluctance motor taking into account the viscous damping. **IEEE Transactions on Magnetics**. USA: 110-112.
- Ooshima, M. (2007). Winding Arrangement to Increase Suspension Force in Bearingless Motors with Brushless DC Structure. **Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Taiwan: 181-186.
- Park, S. C., Kwon, B. H., Yoon, H. S., Won, S. H., and Kang, Y. G. (1999). Analysis of exterior-rotor BLDC motor considering the eddy current effect in the rotor steel shell. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35(3): 1302-1305.
- Pillay, P., and Crishnan, R. (1989). Modeling, Simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, part 2: The brushless DC motor drive. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 25(2): 274-279.
- Pillay, P., and Crishnan, R. (1991). Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 27(5): 986-996.
- Preston, T. W., Reece, A. B. J., and Sangha, P. S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24(1): 471-474.
- Rahman, M. A., and Zhou, P. (1996). Analysis of brushless permanent magnet synchronous motors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 43(2): 256-267.
- Rao, J. S., (1999). **Dynamics of plates**. New Delhi: Narosa Publishing House.

- Sakamoto, S., Hirata, T., Kobayashi, T., and Kajiwara, K. (1999). Vibration analysis considering higher harmonics of electromagnetic forces for rotating electric machines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35(3): 1662-1665.
- Salon, S. J., and Angelo, J. D. (1988). Applications of the hybrid finite element boundary element method in electromagnetics. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24(1): 80-85.
- Teerhuis, A. P., Cools, S. J. M., and Callafon, R. A. D. (2003). Reduction of Flow-Induced Suspension Vibrations in a Hard Disk Drive by Dual-Stage Suspension Control. **IEEE Transactions on Magnetics**. 39(5): 2237-2239.
- William, H. H., Jr. (1989). **Engineering electromagnetics** (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Zhou, P., Rahman, M. A., and Jabbar, M. A. (1994). Field circuit analysis of permanent magnet synchronous motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. 30(4): 1350-1359.
- Zhu, Z. Q., Howe, D., and Chan, C. C. (2002). Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent-magnet machines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 38(1): 229-238.

ภาคผนวก ก

ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

การแสดงเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่าสปินเดิลมอเตอร์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึง ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ เมื่อทำการวัดทดสอบบนมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.1-ก.12



รูปที่ ก.1 ฮาร์ดดิสก์เมื่อมองจากด้านบน



รูปที่ ก.2 ฮาร์ดดิสก์เมื่อมองจากด้านล่าง



รูปที่ ก.3 ภายในของฮาร์ดดิสก์เมื่อมีจานดิสก์



รูปที่ ก.4 ภายในของฮาร์ดดิสก์เมื่อไม่มีจานดิสก์



รูปที่ ก.5 สปินเดิลมอเตอร์เมื่อมองจากด้าน โรเตอร์



รูปที่ ก.6 สปินเดิลมอเตอร์เมื่อมองจากด้านสเตเตอร์



รูปที่ ก.7 แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมเมื่อถ่ายจากด้านหน้า



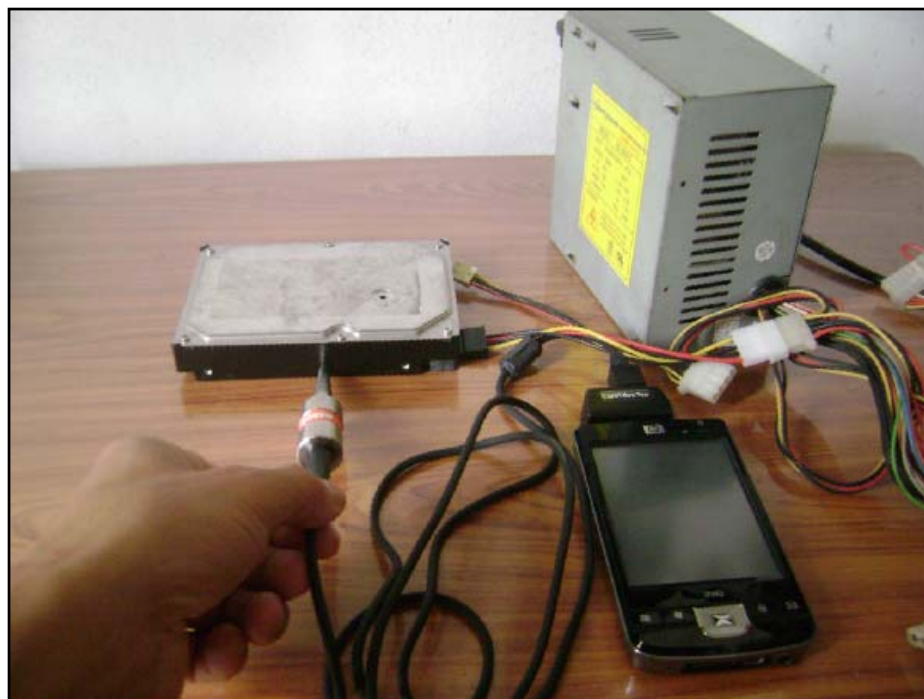
รูปที่ ก.8 แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมเมื่อถ่ายจากด้านหลัง



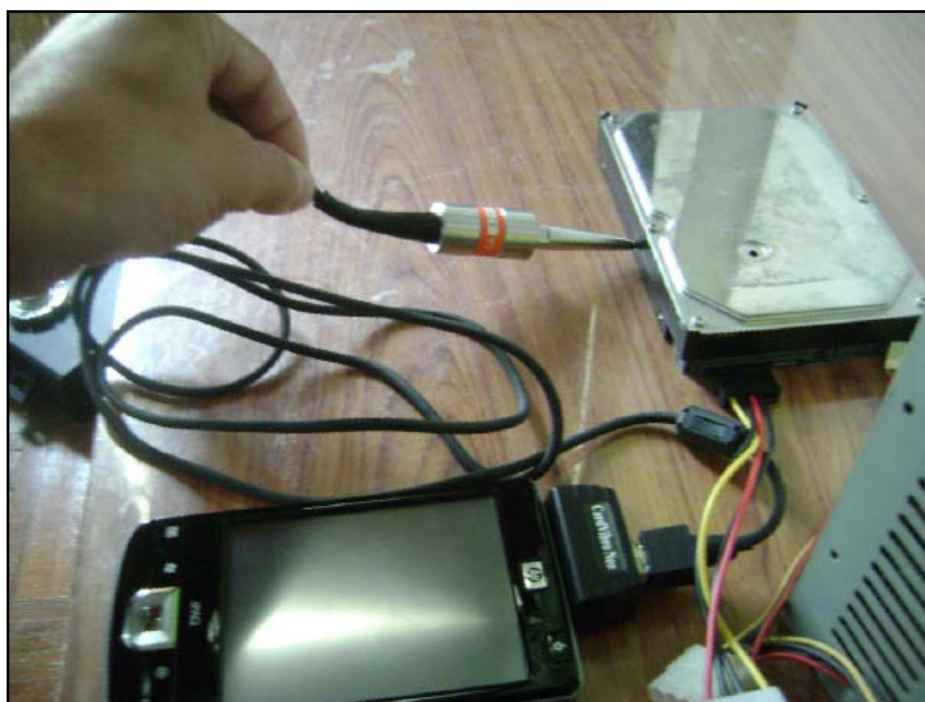
รูปที่ ก.9 กล่องพร้อมอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน (IMV รุ่น VM-2004Neo)



รูปที่ ก.10 หัววัดการสั่นสะเทือนและฟ็อกเก็ตพีซี



รูปที่ ก.11 การวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของสปีนเดิลเมื่อมองจากด้านหน้า



รูปที่ ก.12 การวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของสปีนเดิลเมื่อมองจากด้านข้าง

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Juntana, S., and Pao-la-or, P. (2012). Computation of Magnetic Field Distributions in Spindle Motor for HDD by Using Finite Element Method. **The World Academy of Science Engineering and Technology**, issue 63, March 2012. pp. 300-306

Computation of Magnetic Field Distributions in Spindle Motor for HDD by Using Finite Element Method

S. Juntana, and P. Pao-la-or

Abstract—This paper presents a set of mathematical model of magnetic fields in a spindle motor of computer hard disk drive (HDD) by using a set of second-order partial differential equations. Computer-based simulation utilizing the two-dimensional time-stepping finite element method is exploited as a tool for visualizing magnetic fields distribution through the cross-sectional area of a spindle motor operating with steady state rotor movement. Finite Element Method (FEM) is one among popular numerical methods that is able to handle problem complexity in various forms. At present, the FEM has been widely applied in most engineering fields. Even for problems of magnetic fields distribution, the FEM is able to estimate solutions of Maxwell's equations governing the machine systems. To solve this time-dependent system, a step-by-step numerical integration of the backward difference algorithm is applied. To evaluate its use, 12-V, 8-pole, 12-slot and Y-winding permanent magnet brushless dc motor was tested. As a result, the magnetic field distribution through the cross-sectional area of the spindle motor was well described. Moreover, the paper discusses about the distribution of electromagnetic forces resulting from the magnetic field acting on the stator teeth around the air-gap. The computer simulation based on the use of the FEM has been developed in MATLAB programming environment.

Keywords—Spindle Motor, Finite Element Method (FEM), Magnetic Field, Time Stepping Method

I. INTRODUCTION

TO design permanent magnet brushless dc motor which is spindle motor for computer hard disk drive (HDD) requires accurate prediction of the machine behaviors, e.g. magnetic field, electromagnetic force, etc. These are based on magnetic field distribution passing the motor cross-sectional area. To analyze magneto-dynamic of the motor, there are two main methods of magnetic field calculation: i) permeance wave theory and ii) numerical approximation methods (e.g. finite difference: FD or finite element methods: FEM) [1]. With lack of accuracy, the first approach is not often used for this purpose, especially when nonlinearity of magnetic cores is involved. The FEM is applicable to a broad range of solving electromagnetic problems due to its flexibility, and accuracy.

S. Juntana is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND (e-mail: sumritm5140978@hotmail.com).

P. Pao-la-or is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND (corresponding author to provide phone: 0-4422-4407; fax: 0-4422-4601; e-mail: padej@sut.ac.th).

Application of the FEM to analyze spindle motors is inclusive. In addition, this method is more efficient than the FD method due to flexibility and accuracy, and it can gain several advantages when it is applied to spindle motors. The most powerful method for investigating the steady state and dynamic performance is circuit-field-coupled time-stepping FEM which can couple the field equations with the motion and circuit equations and solve simultaneously at each time step. In this paper, a time-dependent system in a spindle motor is used for test. The time dependence of the field and the motion of the rotor are modeled by the backward difference scheme. This results in a set of partial differential equations (PDE).

In this paper, Section II presents the mathematical model of spindle motors for HDD, while Section III describes the 2-D FEM by using Galerkin approach applied to spindle motors for the purpose of obtaining magnetic field distribution and electromagnetic force wave. Modeling and numerical simulation of a spindle motor using time-stepping FEM is presented. The domain of study with the 2-D FEM can be discretized by using linear triangular elements. The simulation conducted herein is based on the FEM method given in Section III. All the programming instructions are coded in MATLAB program environment. Information of the test example and simulation results are shown in Section IV. Finally, the last section provides the conclusion.

II. MODELING OF A SPINDLE MOTOR

In magnetic field calculations, the magnetic vector potential \mathbf{A} carries a bundle of information consisting of magnetic field \mathbf{B} , and induced electromagnetic forces \mathbf{F} . For convenience, some assumptions are made as follows: the magnetic materials are isotropic, and the displacement currents are negligible due to low supply frequency (50 Hz) [1]. Hence, (1) describes the temporal and spatial variations of \mathbf{A} of permanent magnet brushless dc motor which is spindle motor for HDD when considering the problem of two dimensions in cartesian coordinate (x,y) based on a set of Maxwell's equations [2], [3].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = -\mathbf{J}_0 + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

, where μ is the permeability of the magnetic material, σ is the conductivity of the conducting media, H_c is the coercive force, and J_0 is the applied current density.

Analytically, there is no simple exact solution of the above equation. Therefore, in this paper the FEM is chosen to be a potential tool for finding approximate magnetic field solutions for the partial differential equation described as in (1) [4], [5].

The permanent magnet brushless dc motor consists of stationary 3-phase stator windings and permanent magnets on the rotor. Fig. 1 shows the detail of the spindle motor for HDD of this paper. It is a brushless dc motor with 12-V, 8-pole, 12-slot and Y-winding. A brushless dc motor cannot work without electronic controllers. The terminal voltages on the stator windings of each phase are controlled by the power electronic switches. The typical input voltage waveforms are shown in Fig. 2 [6].

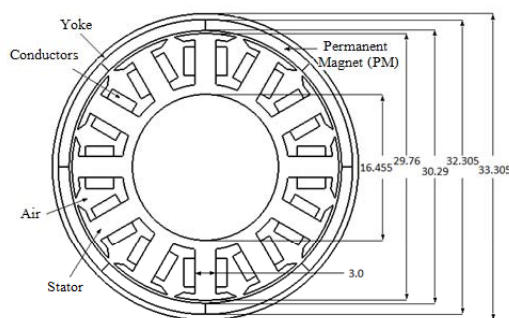


Fig. 1 Detail of the tested spindle motor with dimension (mm)

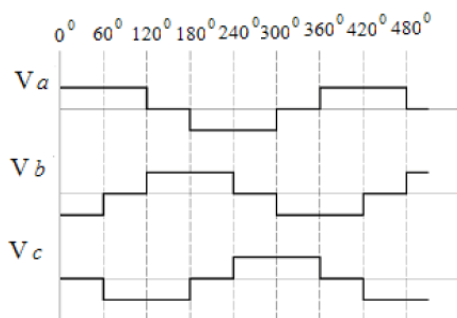


Fig. 2 Typical input voltage waveforms

The electrical dynamics can be written as [7]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

where V_a, V_b and V_c are the stator phase input voltages, i_a, i_b and i_c are the stator phase currents, e_a, e_b and e_c are the phase back emf voltages, and $R, L,$ and M are the phase resistance, phase inductance, and mutual inductance, respectively.

The electromagnetic torque is given by [8],

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (3)$$

where ω is the rotor speed. The mechanical dynamics can be written as

$$\frac{d\omega}{dt} = (T_e - T_L - B\omega) / J \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5)$$

where J is the moment of inertia, B is the viscous damping, T_L is the load torque, and θ is the rotor angle.

Thus, relation between (2) – (5), (6) can be obtained.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

The spindle motor parameters [7]:

$$\begin{aligned} J &= 0.0002265 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \\ B &= 0.004 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{s} \\ e_d \omega &= 0.185 \text{ V}/\text{rad}/\text{s} \\ L - M &= 0.000365 \text{ H} \\ R &= 0.29 \Omega \end{aligned}$$

Stator phases are driven by an inverter to supply the motor with a current waveform that produces constant torque during regions of constant back emf. The simulated phase current waveforms have quasi-square wave shapes as shown in Fig. 3 with magnitudes of current, the control signal, to get a constant torque. The stator coils are switched every 60 electrical degrees, with one phase turning on or turning off. The electrical position is defined such that movement of the rotor by 360 electrical degrees brings the machine to an identical magnetic orientation.

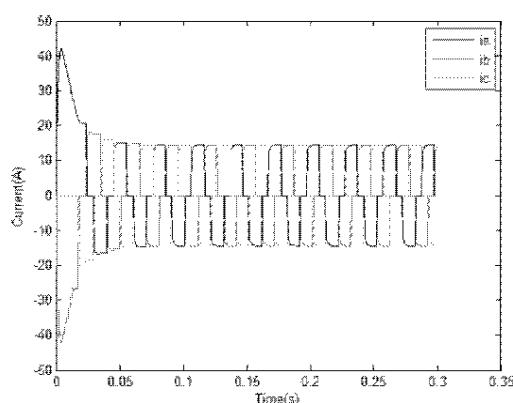


Fig. 3 Simulated three phase stator currents

III. TIME-STEPPING FEM FOR A SPINDLE MOTOR

A. Discretization

The domain of study with the 2-D FEM can be discretized by using linear triangular elements. This can be accomplished by using Gmesh for 2-D grid generation. Fig. 4 displays grid representation of the test system. The region domain consists of 1,657 nodes and 3,050 elements to represent the entire motor cross-section.

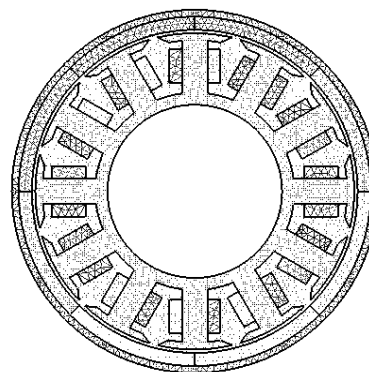


Fig. 4 Discretized cross-section of the spindle motor

B. Finite Element Formulation

An equation governing each element is derived from the Maxwell's equations directly by using Galerkin approach, which is the particular weighted residual method for which the weighting functions are the same as the shape functions. The shape function for 2-D FEM used in this research is the application of 3-node triangular element (two-dimensional linear element) [6]. According to the method, the magnetic vector potential is expressed as follows

$$A(x, y) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k \quad (7)$$

where N_n , $n = i, j, k$ is the element shape function and the A_n , $n = i, j, k$ is the approximation of the magnetic vector potential at each node (i, j, k) of the elements, which is

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e} \quad (8)$$

where Δ_e is the area of the triangular element, which is expressed as

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (9)$$

and

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j, & b_i &= y_j - y_k, & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k y_i - x_i y_k, & b_j &= y_k - y_i, & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i y_j - x_j y_i, & b_k &= y_i - y_j, & c_k &= x_j - x_i \end{aligned}$$

The method of the weighted residue with Galerkin approach is then applied to the differential equation, refer to (1), where the integrations are performed over the element domain Ω .

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} N_n J_o d\Omega - \int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) d\Omega = 0$$

, or in the compact matrix form

$$[M] \{A\} + [K] \{A\} = \{F\} \tag{10}$$

$$[M] = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \frac{1}{4\mu\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ & & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix}$$

Sym

$$\{F\} = \frac{\nu \mu_0}{2} \left(M_x \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{bmatrix} \right) + \frac{J_o \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

where M is the magnetization of permanent magnet ($M = -\mu_c H_c$), and ν is the reluctivity of material ($\nu = 1/\mu$) which $\mu = \mu_0 \mu_r$ when μ_r and μ_0 are the relative permeability, and the free space permeability, respectively. It notes that μ_0 is $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

To simulate the motor movement, we need to discretize (10). The method of discretization used herein is based on (11). Therefore, a time-dependent field is solved by discretizing the time at short time interval Δt . Although there are three basic methods of the time discretization: forward difference method ($\beta=0$), backward difference method ($\beta=1$), and Crank-Nicholson method ($\beta=1/2$), the backward difference is used due to its convergence [6].

$$\beta \{A\}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \{A\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \tag{11}$$

For this technique, (10) can be rewritten at time $t+\Delta t$. Thus, (10) becomes (12). Insert (11) into (12), (13) can be obtained.

$$[M] \{A\}^{t+\Delta t} + [K] \{A\}^{t+\Delta t} = \{F\}^{t+\Delta t} \tag{12}$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M] + [K] \right) \{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M] \{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \tag{13}$$

For one element containing 3 nodes, the expression of the FEM approximation is a 3x3 matrix. With the account of all elements in the system of n nodes, the system equation is sizable as the $n \times n$ matrix.

IV. FEM SIMULATION RESULT

The boundary conditions applied here are zero magnetic vector potentials at the outer perimeter of the spindle motor and the inner perimeter of the stator core. In the time-stepping FEM, the information from the last time update can be successfully used as the initial solution to reduce the computing time when solving the FEM equations. The size of each time step is the time needed for the rotor to turn fixed at $\Delta\theta = (360/(8 \times 12))^\circ$ (8 is number of pole and 12 is number of slot). The machine used in this paper is a 12-V, 8-pole, 12-slot and Y-winding. The eight magnets are made of Samarium-Cobalt with relative permeability of 1.154, conductivity of 2.5×10^6 S/m, and coercive force of 550,000 A/m, while the relative permeability of the stator core is 1,000.

The test system previously described is simulated by a FEM solver written in MATLAB programming. The curl of the magnetic vector potential A is magnetic field B ($B = \nabla \times A$). Its components along x and y axes are computed by

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k}{2\Delta_e} \tag{14}$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k}{2\Delta_e} \right) \tag{15}$$

Moreover, radial flux density B_r and tangential flux density B_t acting on the air-gap can be expressed in cylindrical coordinate as a function of B_x and B_y , i.e.

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi,$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi$$

where ϕ is the counter-clockwise angle of a stator-tooth center with respect to the positively horizontal axis.

Fig. 5-8 show the magnetic vector potential distribution of the spindle motor at steady state resulting from the change of rotor position of 0, 60, 120 and 180 degrees clockwise, respectively. To be consistent, Fig. 9-12 show the magnetic field distribution at steady state resulting from the change of rotor position of 0, 60, 120 and 180 degrees clockwise, respectively.

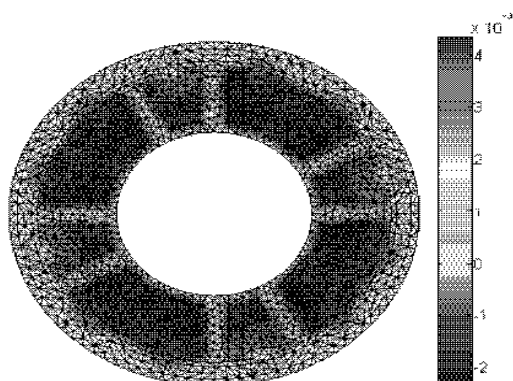


Fig. 5 Magnetic vector potential distribution (wb/m) at rotor position 0°

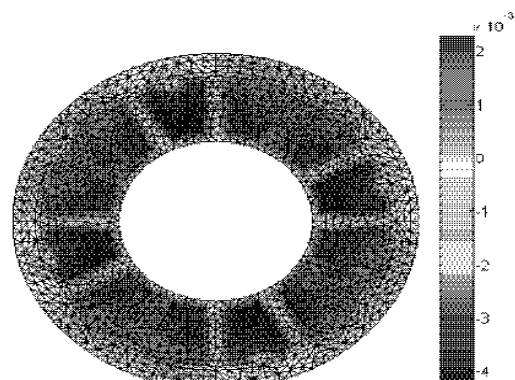


Fig. 8 Magnetic vector potential distribution (wb/m) at rotor position 180°

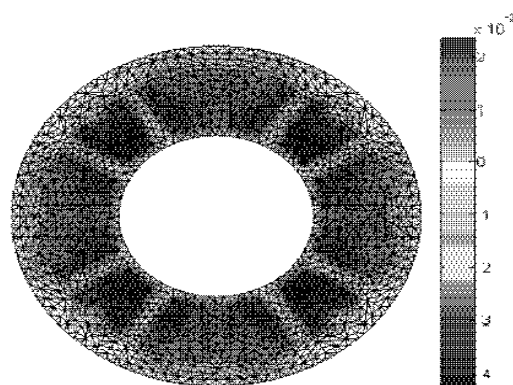


Fig. 6 Magnetic vector potential distribution (wb/m) at rotor position 60°

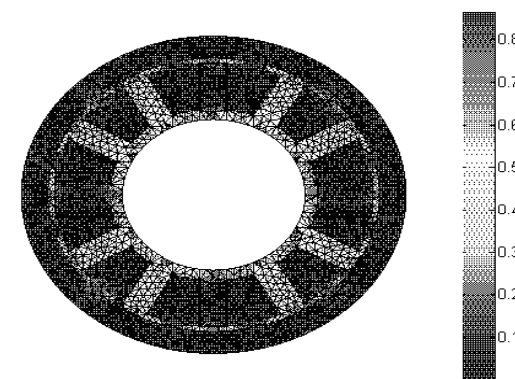


Fig. 9 Magnetic field distribution (T) at rotor position 0°

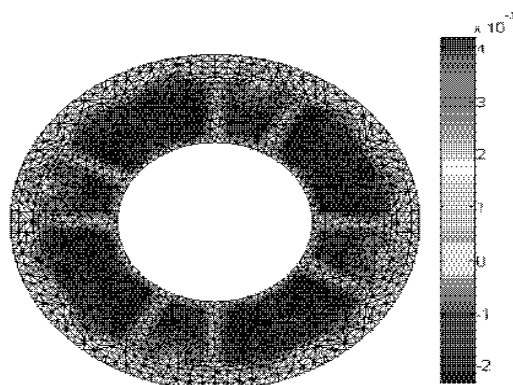


Fig. 7 Magnetic vector potential distribution (wb/m) at rotor position 120°

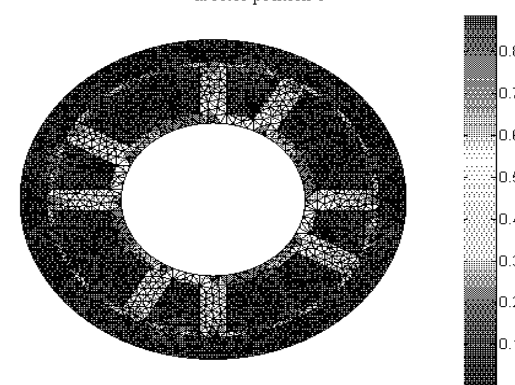


Fig. 10 Magnetic field distribution (T) at rotor position 60°

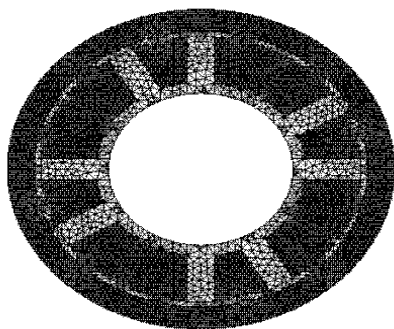


Fig. 11 Magnetic field distribution (T) at rotor position 120°

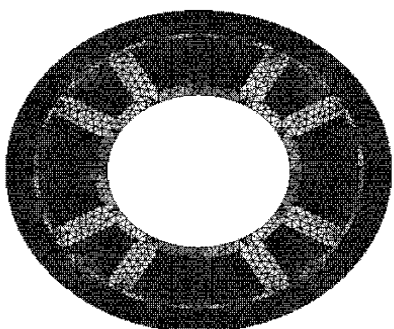


Fig. 12 Magnetic field distribution (T) at rotor position 180°

From which the results of magnetic vector potential that distribute throughout the cross-sectional area of the spindle motor at steady state for the change of rotor position of 0, 60, 120 and 180 degrees clockwise as shown in Fig. 5-8. As can be seen, the zero magnetic vector potential occur at the outer perimeter of the spindle motor and the inner perimeter of the stator core which are boundary conditions. There are eight regions of magnetic flux lines circulating the slot with the highest current density, so-called the magnetic pole. This explains that permeance of the magnetic path of the regions around the magnetic pole is low. Interestingly, the movement of the flux line plot in these four rotor positions also show the magnetic fields revolving in clockwise direction. In Fig. 9-12, the magnetic field distributed in the spindle motor at steady state when considering the change of rotor position of 0, 60, 120 and 180 degrees clockwise. As can be seen, the lowest magnetic field occur at all of the stator slot, the magnetic field is relative to the magnetic vector potential. In other word, the

magnetic field is the rate of change in the magnetic vector potential.

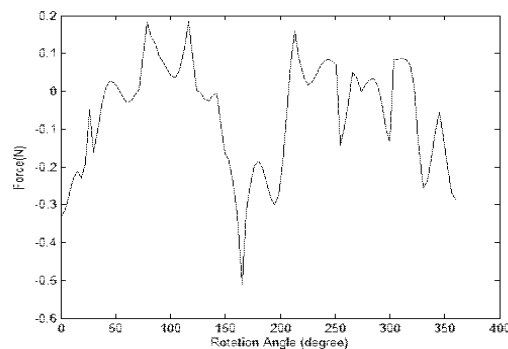


Fig. 13 Distributed electromagnetic force wave

Maxwell's stress equations were also used to determine the distribution of the electromagnetic forces across the air gap in the radial direction obtained from $F_r = (1/2\mu_0)(B_r^2 - B_t^2)$ [9] and is shown in Fig. 13.

V. CONCLUSION

This paper describes the modeling and simulation technique of the magnetic field distribution in permanent magnet brushless dc motor which is spindle motor for HDD by using the Finite Element Method (FEM) instructed in MATLAB programming codes. The results show that this method is simple and effective to illustrate how magnetic field throughout the cross-sectional area of the spindle motor. With this advantage, further work based on magnetic field calculation to analyze the spindle motor, e.g. magnetic vibration, noise, harmonic, heat losses, etc. can be developed and, with this simplification, difficulty of computing is considerably reduced or eliminated.

REFERENCES

- [1] N.A. Demerdash and D.H. Gillott, "A new approach for determination of eddy current and flux penetration in nonlinear ferromagnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.74, pp. 682-685, 1974.
- [2] G.H. Jang, S.J. Park, and S.H. Lee, "Electromechanical analysis of a HDD spindle motor considering electromagnetics, thermal analysis, hydrodynamic bearing, and rotor dynamics," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 5, pp. 1608-1611, 2005.
- [3] S-C. Park, B-I. Kwon, H-S. Yoon, S-H. Won, and Y.G. Kang, "Analysis of exterior-rotor BLDC motor considering the eddy current effect in the rotor steel shell," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp. 1302-1305, 1999.
- [4] P. Pao-la-or, T. Kulworawanichpong, S. Sujitjorn and S. Peaiyoung, "Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Induction Motors: A Finite Element Approach," *WSEAS Transactions on Systems*, Vol. 5, No. 3, pp.617-624, 2006.
- [5] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak and T. Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," *Engineering Letters*, Vol. 18, No. 1, pp.1-9, 2010.

- [6] M.A. Jabbar, H.N. Phyu, Z. Liu, and C. Bi, "Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet dc motor in dynamic conditions by time-stepping technique," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 3, pp. 763-770, 2004.
- [7] P. Pillay, and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. II. The brushless DC motor drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, No. 2, pp. 274-279, 1989.
- [8] Y. Sozer, H. Kaufman, and D.A. Torrey, "Direct model reference adaptive control of permanent magnet brushless dc motors," in *Proc. IEEE International Conf. Control Applications*, Hartford, 1997, pp. 633-638.
- [9] S. Sakamoto, T. Hirata, T. Kobayashi and K. Kajiwara, "Vibration analysis considering higher harmonics of electromagnetic forces for rotating electric machines," *IEEE Transaction on Magnetic*, Vol. 35, No. 3, pp. 1662-1665, 1999.



Samrit Jantana is a pursuing master degree of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. (2008) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, electrical drives, FEM simulation and artificial intelligent

techniques.



Padej Pao-la-or is an assistant professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. (1998), M.Eng. (2002) and D.Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, electrical drives, FEM simulation and artificial intelligent techniques. He has joined the school since December 2005 and is currently a member in Power System Research, Suranaree University of Technology.

ประวัติผู้เขียน

นายสัมฤทธิ์ จันทะนา เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ.2527 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ด้วยคะแนนเกียรตินิยม อันดับหนึ่งจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2550 และได้เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2551 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้รับทุนศึกษาจากทางมหาวิทยาลัย และระหว่างที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทได้มีผลงานตีพิมพ์บทความทางวิชาการเรื่อง “Computation of Magnetic Field Distributions in Spindle Motor for HDD by Using Finite Element Method” ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข