

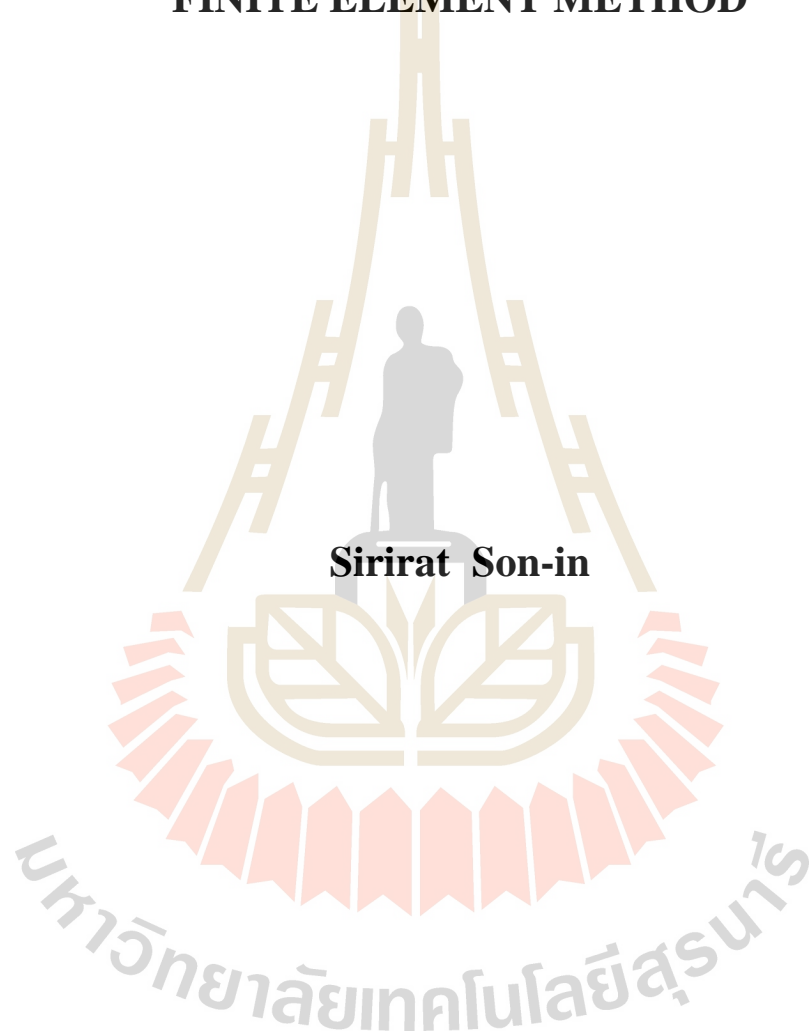
การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์
โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



นางสาวศิริรัตน์ ศรีอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**ANALYZING CHARACTERISTICS OF SWITCHED
RELUCTANCE MOTOR USING 3-D
FINITE ELEMENT METHOD**



Sirirat Son-in

**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 2019

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์
โดยใช้ไฟในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. ชนัดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. เพ็ญใจ เฟ่าละอ)

กรรมการ



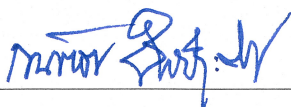
(รศ. ดร. อนันท์ อุ่นศิริไฉย)

กรรมการ



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลคีรี)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริรัตน์ ศรีอินทร์ : การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยใช้
ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (ANALYZING CHARACTERISTICS OF SWITCHED
RELUCTANCE MOTOR USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลราราวานิชพงษ์, 132 หน้า.

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมามอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรม
ทางการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำงานได้
ในย่านความเร็วกว้าง ให้แรงบิดสูง มีการสูญเสียน้อย และควบคุมได้ง่าย อีกทั้งมีราคาถูกลง เนื่องจาก
มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่ายไม่ซับซ้อน และแกนโรเตอร์เป็นแท่งเหล็กที่
ไม่มีการติดแม่เหล็กถาวรหรือมีขดลวดพันบนแกนโรเตอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียที่โรเตอร์ต่ำ และมี
ผลต่ออุณหภูมิที่น้อยจึงสามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้ดี แต่มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ มีการ
กระเพื่อมของแรงบิด และด้วยโครงสร้างพิเศษที่ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์เป็นแบบขั้วยื่นจึงทำให้เกิด
เสียงรบกวนขณะทำงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่อยู่ในรูป
สมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์
โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB สำหรับการ
จำลองผลการกระจายของค่าสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในมอเตอร์
สวิตซ์รีลักแตนซ์เมื่อพิจารณาจำนวนเฟสที่แตกต่างทั้ง 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส จากการจำลองนั้น
นำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เพื่อเปรียบเทียบแรงบิด
ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสที่มีจำนวนเฟส และขั้วสเตเตอร์โรเตอร์
แตกต่างกัน และผลลัพธ์ที่ได้พบว่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ
3 มิติมีค่าแนวโน้มเดียวกันกับแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK

SIRIRAT SON-IN : ANALYZING CHARACTERISTICS OF SWITCHED
RELUCTANCE MOTOR USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THANATCHAI

KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 132 PP.

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM)/3-D FINITE ELEMENT METHOD
(3-D FEM)/MAGNETIC FIELD/TORQUE RIPPLE

In the past several years, Switched Reluctance Motor (SRM) has interested in electric vehicle industrial due to the characteristic of SRM such as high efficiency, wide operation range, high torque, etc. The structure of SRM is simple that the main component of SRM consists of a rotor and stator like other types of motor. The rotor of SRM made of only iron core or conductor winding on the rotor core which effects low temperature and power loss of motor. The disadvantage of SRM is a torque ripple and the special structure of SRM generates the noise during normal operation.

This thesis presents the mathematical model of the magnetic vector potential in the second-order partial derivative form that relates to the magnetic field of SRM by using the three-dimensional Finite Element Method (3-D FEM). The 3-D FEM was developed by the MATLAB program for simulating the magnetic vector potential spreading and the value of the magnetic field when considering three-phases, four-phases, and five-phases of SRM to find torque of SRM. To compare torque with the other type of SRM such as the three-phases, four-phases, and five-phases of SRM that have a difference in several phases, stator pole and rotor pole. The result of 3-D FEM such as torque is the same trend with the torque from SIMULINK simulation.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature ศิริวิทย์ คุ้มกัน

Advisor's Signature Thanatchai Kulworawanichpong

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัฒชัย กุลรวรานิชพงษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด รวมถึงช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความรู้ และสนับสนุนทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนการศึกษาและสนับสนุนค่าใช้จ่ายรวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณไพฑูรย์ ศรีอินทร์ และคุณรุ่งเรือง ศรีอินทร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ทำให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา

ศิริรัตน์ ศรีอินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.3 สรุป	16
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	17
3.1 บทนำ	17
3.2 มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์	17
3.3 วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์	22
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	27
3.6 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก.....	36
3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	39
3.8 สรุป.....	47
4 การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	49
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	51
4.3.1 การออกแบบอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	51
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	57
4.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนต์.....	58
4.3.4 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมทั้งหาค่าผลเฉลย.....	65
4.3.5 จำนวนค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการทราบ.....	65
4.4 สรุป.....	67
5 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและการวิเคราะห์คุณลักษณะมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	68
5.1 บทนำ.....	68
5.2 โครงสร้างของแบบจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	68
5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด.....	68
5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก.....	76
5.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	78
5.4 การคำนวณกระแสและความเร็วของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	82
5.5 ผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	107
5.7 สรุป.....	113
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	114
6.1 สรุป.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3.1	ลักษณะข้อมูลของอิเลิเมนต์.....	41
3.2	ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	42
5.1	ข้อมูล โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	71
5.2	ข้อมูล โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	72
5.3	ข้อมูล โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	74
5.4	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์.....	79
5.5	ค่ากระแสจากโปรแกรม SIMULINK ของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ทั้ง 3 ชนิด.....	111
5.6	ค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ทั้ง 3 ชนิด.....	111
5.5	ค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ทั้ง 3 ชนิด.....	112
5.6	ค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์ทั้ง 3 ชนิด.....	113

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์.....	18
3.2	การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์.....	18
3.3	แสดงการวางตำแหน่ง (ก)แนววางไม่ตรงกัน (ข)แนววางตรงกัน.....	19
3.4	ภาพหน้าตัดของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์แต่ละเฟส.....	20
3.5	แสดงการกระจายตัวของขดลวดมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส.....	21
3.6	วงจรสมมูลของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 1 เฟส.....	22
3.7	วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์.....	24
3.8	แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเฟส ค่ากระแสเฟส และ ค่าแรงบิดในอุดมคติ.....	26
3.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์.....	27
3.10	โครงสร้างการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์.....	28
3.11	วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบบริดจ์ไม่สมมาตร.....	30
3.12	แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเฟส กระแสเฟส และแรงดันเฟส.....	30
3.13	แสดงความสัมพันธ์ค่ามูน่ากระแสที่สอดคล้องกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	31
3.14	แสดงตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส.....	35
3.15	แสดงตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 4 เฟส.....	35
3.16	แสดงตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 5 เฟส.....	36
3.17	การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิเลิเมนต์.....	40
3.18	อิเลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 6 อิเลิเมนต์ 8 จุดต่อ.....	41
3.19	การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิเลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยม.....	43
4.1	โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล.....	52
4.2	การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟสออกเป็นอิเลิเมนต์.....	53
4.3	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟสออกเป็น อิเลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล.....	54
4.5	การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสออกเป็นอิเลิเมนต์.....	54
4.6	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสออกเป็น อิเลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	55
4.7	โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล.....	55
4.8	การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสออกเป็นอิเลิเมนต์.....	56
4.9	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสออกเป็น อิเลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	56
5.1	โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟสที่ศึกษา.....	69
5.2	โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสที่ศึกษา.....	70
5.3	โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสที่ศึกษา.....	70
5.4	ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	71
5.5	ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	72
5.6	ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	73
5.7	ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส.....	75
5.8	ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส.....	75
5.9	ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส.....	76
5.10	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็ก.....	77
5.11	โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	79
5.12	โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	80
5.13	โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	80
5.14	ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ใน SIMULINK.....	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.15	ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ใน SIMULINK.....	83
5.16	ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ใน SIMULINK.....	83
5.17	ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 ที่ได้จาก SIMULINK.....	84
5.18	กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน.....	85
5.19	ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ที่ได้จาก SIMULINK.....	85
5.20	กระแสไฟฟ้าทั้ง 4 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน.....	86
5.21	ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ที่ได้จาก SIMULINK.....	86
5.22	กระแสไฟฟ้าทั้ง 5 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน.....	87
5.23	อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส เมื่อเปลี่ยนตาม ตำแหน่งการหมุน.....	87
5.24	อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส เมื่อเปลี่ยนตาม ตำแหน่งการหมุน.....	88
5.25	อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส เมื่อเปลี่ยนตาม ตำแหน่งการหมุน.....	88
5.26	ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	89
5.27	ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	90
5.28	ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.29	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4.....	91
5.30	ค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์ รีลักแตนซ์ 3 เฟสชนิด 6/4.....	91
5.31	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	92
5.32	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 15 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	92
5.33	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	93
5.34	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 45 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	93
5.35	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....	94
5.36	ค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์ รีลักแตนซ์ 4 เฟสชนิด 8/6.....	94
5.37	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	95
5.38	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	95
5.39	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	96
5.40	ภาคตัดขวางแสดงค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....	96
5.41	ค้ำยก์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์ รีลักแตนซ์ 5 เฟสชนิด 10/8.....	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.42	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 98
5.43	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 99
5.44	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 99
5.45	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 100
5.46	สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 100
5.47	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศาที่กระจายตัวใน มอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 101
5.48	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 15 องศาที่กระจายตัวใน มอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 101
5.49	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศาที่กระจายตัวใน มอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 102
5.50	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 45 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 102
5.51	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 103
5.52	สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์ รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 103
5.53	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 104
5.54	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศาที่กระจายตัวใน มอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.55	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศาที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8105
5.56	ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศาที่กระจายตัวใน มอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8105
5.57	สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....106
5.58	แรงบิดของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน107
5.59	แรงบิดของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน108
5.60	แรงบิดของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน108
5.61	เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4109
5.62	เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6.....110
5.63	เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8.....110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ในขณะที่พลังงานดังกล่าวขาดแคลนและมีอยู่อย่างจำกัด การใช้พลังงานในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์สันดาปภายในทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก จากปัญหาดังกล่าวทำให้หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำพลังงานทดแทนมาใช้ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ จึงมีการหาทางออกในการลดปริมาณไอเสียจากรถยนต์ โดยการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนรถยนต์แทนพลังงานเชื้อเพลิง เกิดเป็นยานยนต์ไฟฟ้า (Electrical Vehicle) ซึ่งถูกนำมาใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 ข้อดีของรถยนต์ไฟฟ้าคือมีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่ำ และไม่ต้องซ่อมบำรุงบ่อย ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้มีการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการเลือกซื้อรถยนต์ประหยัดพลังงาน

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ (Switched Reluctance Motor : SRM) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมทางการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำงานได้ในย่านความเร็วกว้าง ให้แรงบิดสูง มีการสูญเสียต่ำ และควบคุมได้ง่าย อีกทั้งเป็นมอเตอร์ที่มีราคาถูก เนื่องจากมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์มีโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่าย และแกนโรเตอร์เป็นเหล็กคั่นที่ไม่มีการติดแม่เหล็กถาวรหรือมีขดลวดพันบนแกนโรเตอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียที่โรเตอร์ต่ำ และมีผลต่ออุณหภูมิที่น้อยจึงสามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงได้ดี ที่สเตรเตอร์สามารถพันขดลวดตัวนำได้ง่ายและสะดวกต่อการระบายความร้อน แต่มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อด้อยคือมีการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque ripple) และด้วยโครงสร้างพิเศษที่ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์เป็นแบบขั้วยื่น (salient pole) จึงทำให้เกิดเสียงรบกวน

เมื่อพิจารณาเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) จะพบว่าในมอเตอร์กระแสตรงจะใช้แม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง หรือถ้าใช้แม่เหล็กไฟฟ้าก็จำเป็นต้องมีการพันขดลวดบนแกนโรเตอร์ และต้องใช้แปรงถ่านในการรับจ่ายไฟฟ้าที่มอเตอร์ ทำให้เกิดความซับซ้อนในการ

สร้างและต้องมีการบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และเมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ซึ่งจะมีแกนโรเตอร์อยู่ 2 ชั้น คือ โรเตอร์แบบวงแหวนลื่น (Wound rotor) เป็นโรเตอร์ที่มีการพันขดลวดพันบนแกนโรเตอร์และที่ปลายของขดลวดแต่ละเฟสจะต่ออยู่กับสลีปริง (Slip ring) โดยที่สลีปริงนี้จะสัมผัสอยู่กับแปรงถ่านเพื่อต่อใช้งานกับวงจรภายนอก โรเตอร์แบบนี้จะบำรุงรักษายากและมีราคาสูง และโรเตอร์ในแบบที่สองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นโรเตอร์ที่ไม่มี การพันขดลวดเหมือนกับแบบวงแหวนลื่น แต่จะเปลี่ยนเป็นแท่งตัวนำอาจจะเป็นทองแดงหรือ อะลูมิเนียมก็ได้ ซึ่งจะฝังอยู่รอบตัวโรเตอร์ และมีแหวนต่อลัดวงจรที่ปลายทั้งสองของแท่งตัวนำ เพื่อให้ครบวงจร ซึ่งจะเรียกโรเตอร์แบบนี้ว่าแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) โรเตอร์แบบนี้ ไม่สามารถควบคุมที่วงจรโรเตอร์ได้

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและทฤษฎีการขับเคลื่อน อีกทั้ง ความก้าวหน้าของไมโครโพรเซสเซอร์ได้มีความก้าวหน้าอย่างมาก ทำให้สามารถควบคุมมอเตอร์ สวิตช์รีลักแตนซ์ได้ดีขึ้น จึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ได้รับความสนใจและนำมาใช้ใน อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวัน แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ยังต้องการการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดที่ถูกพันบนขั้วสเตเตอร์ให้สัมพันธ์ กับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ และด้วยมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นสูง จึงทำให้เกิดการสั่นมีเสียงรบกวน จากการกระเพื่อมของแรงบิด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทราบถึงคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยปกติ สามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลย โดยประมาณ ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ที่ได้รับความนิยมอย่าง กว้างขวางคือ วิธีผลต่างสี่บเนื่อง (finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและทำ ความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต รวมไปถึงความยากในการประยุกต์เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน จากข้อเสียของ วิธีการดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปของอนุพันธ์ย่อยวิธี ใหม่ที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับ ปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะจริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรง กว่าด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและได้รับความ นิยมแพร่หลายในปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาช่วย ดำเนินการงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เมื่อพิจารณาจำนวนเฟสที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส
- เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก และคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ พร้อมจำลองผลทางกราฟิก โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ
- เพื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- เมื่อคำนวณแรงที่กระทำกึ่งกลางซีโรเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ แล้วนำมาคำนวณหาค่าแรงบิดจะได้ค่าที่มีแนวโน้มเดียวกันกับแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK
- เปรียบเทียบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสที่มีจำนวนเฟสและขั้วสเตเตอร์โรเตอร์แตกต่างกัน มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีจำนวนเฟสและขั้วสเตเตอร์โรเตอร์มากจะมีแรงบิดกระเพื่อมน้อย

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีการเชื่อมศูนย์กลางของโรเตอร์และสเตเตอร์
- ใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก SIMULINK ป้อนให้กับระบบ โดยพิจารณาในช่วงที่กระแสเข้าสู่สภาวะคงตัว
- กำหนดให้โมเดลของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสที่ใช้ในการจำลองผลมีขนาดโครงสร้างเท่ากัน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- ใช้ MATLAB เพื่อจำลองโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส เมื่อพิจารณาในสภาวะคงตัว
- วิเคราะห์คุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เมื่อพิจารณาจำนวนเฟสที่แตกต่างกัน ทั้ง 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส
- ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ได้
- ได้หลักการและแนวความคิดจากการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่มีผลต่อแรงบิด และคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัย วิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการศึกษาจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ ทฤษฎีของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยนำทฤษฎีต่าง ๆ มาใช้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง รวมทั้งอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติโดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์กิน

บทที่ 5 กล่าวถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ รวมทั้งนำค่าสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสที่ได้มาคำนวณแรงบิดเพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากโปรแกรม SIMULINK และเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อพิจารณาจำนวนเฟสที่แตกต่างกันทั้ง 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ในภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วนได้แก่

ภาคผนวก ก. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะ
ดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส และเปรียบเทียบค่าแรงบิดเพื่อตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติกับโปรแกรม SIMULINK ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานต่าง ๆ จากคณบดีนักวิจัยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูล จาก IEEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็ก ค่าแรง และแรงบิดกระแสเฟืองในมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1987	Graham E. Dawson, Anthony R. Easthan และ Jerzy Mizia	ประเมินการออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ประสิทธิภาพอย่างเหมาะสม และประสิทธิภาพควบคุมที่แตกต่างกัน และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้งาน ประสิทธิภาพของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ได้ และศึกษาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุแม่เหล็ก และผลกระทบของแรงบิดและฟลักซ์คัลลิ่งผ่าน โดยเลือกใช้วัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกส์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	Hao Chen, Dong Zhang และ Xianjun Meng	ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสที่มีโครงสร้างแบบ 12/8 และนำเสนอโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์, โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ และตัวควบคุม คำมมหยุดนำกระแสของตัวสวิตช์หลักในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เหมาะสม จะเป็นตัวบ่งชี้กำลังเอาต์พุตที่สูง, ประสิทธิภาพที่สูง และความสัมพัทธ์ของแรงบิดในช่วงเบรกต่ำ การพัฒนาต้นแบบตัวควบคุม PWM ที่ถูกนำมาทดสอบ ซึ่งวงจรหลักของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะเลือกใช้วงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร
2002	Jung-Pyo Hong, Kyung-Ho Ha และ Ju Lee	ศึกษาอิทธิพลของความแตกต่างรูปร่างขั้วสเตเตอร์และโครงสร้างภายนอกของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์จากพฤติกรรมทางกลที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์ทำให้เกิดการลดการสั่นสะเทือน ซึ่งการออกแบบรูปร่างของสเตเตอร์เป็นปัจจัยที่ทำให้การสั่นสะเทือนลดลง โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ห่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ชนิด 6/4 ซึ่งโครงสร้างสเตเตอร์ที่มีลักษณะขั้วแบบ trapezoidal บนโครง hexagon-round มีการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด
2003	Wei Cai, Pragasen Pillay, Zhangjun Tang และ Avoki M. Omekanda	ศึกษาการออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีเสียงรบกวนต่ำ โดยสนใจผลกระทบด้านการสั่นสะเทือนจากความแตกต่างรูปร่าง โครงสร้างสเตเตอร์หลายแบบด้วยกัน ทั้งมอเตอร์ที่มีแบบ โครงสร้างสเตเตอร์เป็นวงกลม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม และเลือกใช้ห่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ชนิด 12/8 โดยจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณความถี่เรโซแนนท์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Lili Li, Qingguang Yu และ Yugang Yang	ศึกษามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยออกแบบขั้วสเตเตอร์ใหม่ให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น โดยใช้วิธีไฟในต้อลิเมนต์คำนวณสมรรถนะแม่เหล็กไฟฟ้า ขั้วสเตเตอร์ที่ถูกออกแบบใหม่มีขนาดที่กว้างขึ้นมีแรงบิดดีขึ้น และลดการกระเพื่อมของแรงบิด เมื่อเทียบกับขนาดความกว้างเดิม อีกทั้งยังทำให้จำนวนการพันขดลวดลดลง
2005	Zhangjun Tang, Pragasen Pillary, Yicheng Chen และ Avoki M. Omekanda	ศึกษาการจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมชั่วขณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ถูกพัฒนา การทำนายแบบจำลองสร้างบนพื้นฐาน Detailed normal force เปรียบเทียบกระแสเฟสและตำแหน่งโรเตอร์ โดยใช้การคำนวณวิธีไฟในต้อลิเมนต์แบบจำลองได้พิสูจน์โดยทดสอบขณะมอเตอร์หมุน ซึ่งแสดงผลอย่างแม่นยำ ผลลัพธ์ของการจำลองผลเป็นอาร์มอนิกสมบรูณ์ของแรงชั่วขณะ และเรโซแนนซ์อาจจะถูกกระตุ้น แบบจำลองที่เป็นไปได้ของการออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ดีขึ้น ในงานวิจัยได้นำเสนอทางเลือกที่ดีสำหรับการออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เพื่อเลี่ยงโหมครโซแนนซ์
2005	Xiaoyuan and Qingyan	ศึกษาและเปรียบเทียบคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ชนิด 12/8 และ 6/4 ด้วยวิธีการทดลองจริงและจำลองผล โดยที่สิ่งที่เป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือน คือ แรงแม่เหล็กในแวนร์สมิ จะใช้การวิเคราะห์ไฟในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติในการคำนวณ และเปรียบเทียบทั้งคู่ในโดเมนเวลาและความถี่ การวิเคราะห์ไฟในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติถูกนำมาใช้ศึกษาคุณลักษณะทางกลจากการวิเคราะห์โครงสร้างสถิต

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2006	สุเมธ ลิปิโรจนพงศ์	วิเคราะห์สมการคณิตศาสตร์และแบบจำลองเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ซึ่งได้เลือกใช้โปรแกรมโมมูส (iMOOSE) และเป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับแก้ปัญหาด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดภายในมอเตอร์ สำหรับการสร้างแบบจำลองมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับชุดทดสอบมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ของศูนย์วิจัยเนคเทค (NECTEC)
2009	Haijun Zhang, Ruizhen Gao, Jingjun Zhang และ Junru Gao	ได้ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติคำนวณคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 อย่างเช่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ฟลักซ์คูลิ่งผ่าน และคุณลักษณะแรงบิด-มุม-กระแส แบบจำลองของระบบถูกสร้างในโปรแกรม SIMULINK เพื่อศึกษาการตอบสนองพลวัตของการสั้นสะพาน และการกระเพื่อมของแรงบิด ซึ่งถูกกระตุ้นโดยแรงแม่เหล็กทางไฟฟ้า เนื่องจากการสั้นสะพานและการกระเพื่อมของแรงบิดเป็นปัญหาหลักของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ อีกทั้งเป็นสาเหตุของเสียงรบกวน ดังนั้น จึงสำคัญมาก ๆ สำหรับการคำนวณการกระตุ้นความถี่ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกคำนวณนำมาประยุกต์กับระบบมอเตอร์ และ FFT ถูกใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์การตอบสนองพลวัตของการสั้นสะพานและการกระเพื่อมของแรงบิดของมอเตอร์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	Xiuke Yan และ Xiaowei He	ได้ศึกษาวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 12/8 โดยใช้โปรแกรม ANSYS ใช้ SIMULINK สำหรับจำลองผลระบบควบคุม มอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ การวิเคราะห์ด้วย ANSYS ของ ตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์ในช่วงเวลาแตกต่างกันของ ความสัมพันธ์กับฟลักซ์และกระแส เส้นโค้งนี้ขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งโรเตอร์และป้อนกลับไปยังแบบจำลอง SRM ใน งานวิจัยใช้วิธีเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ และป้อน อินพุตพารามิเตอร์ใน MATLAB ที่กำหนดโดย SIMULINK สัญญาณข้อมูลแรกเริ่มของ ANSYS ป้อนกลับไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณ ค่ากระแสแบบเวลาจริงภายใต้ค่ากระแสและตำแหน่ง โรเตอร์
2011	Bao-Huy Nguyen และ Cao-Minh Ta	ศึกษาการประยุกต์การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ เนื่องจากปกติมอเตอร์ชนิดนี้มีการกระเพื่อมของแรงบิดสูง มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นวิธี Torque Distribution Functions (TDFs) เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ ลดการกระเพื่อมของแรงบิด งานวิจัยนี้นำเสนอการ วิเคราะห์ข้อเสียเปรียบของ TDFs เมื่อใช้สำหรับมอเตอร์ สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นสูง และเสนอ เทคนิคการควบคุมการกระจายของแรงบิดให้ดีขึ้น โดยใช้ fuzzy ปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนมอเตอร์ การวิเคราะห์ไฟไนต์ อิลิเมนต์มีผลสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความ เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	Kanaga D. และ Annie Elisabeth Jebaseeli	ศึกษามอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องโดยโปรแกรม ANSYS วิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกทำให้สำเร็จโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ศึกษาการกระจายตัวของฟลักซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สมรรถนะของมอเตอร์ถูกวิเคราะห์โดยป้อนกระแสที่ขดลวดมอเตอร์ ผลลัพธ์การจำลองผลที่ได้รับกระแสที่ตำแหน่งโรเตอร์ที่แตกต่างกันสัมพันธ์กับการกระตุ้นกระแส โดยทั่วไปรูปคลื่นฟลักซ์จะไม่เป็นไซน์นูซอชอยดอล และมีรูปร่างแตกต่างกันสำหรับค่าความถี่ที่แตกต่างกัน วัสดุที่มีความซาบซึมของแม่เหล็กสูงจะมีค่าแรงบิดมาก สำหรับประสิทธิภาพของมอเตอร์จะดีขึ้นได้โดยลดการกระเพื่อมของแรงบิด
2017	Seema Kuari และ Ashok S.	วิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ด้วยวิธีการควบคุมแรงบิด โดยตรง (Direct torque control : DTC) และวิธีควบคุมกระแสแบบ chopped ผ่านการจำลองผลโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงสามารถควบคุมฟลักซ์คล่องแม่เหล็กที่สเตเตอร์ดีกว่าวิธีวิธีควบคุมกระแสแบบ chopped
2018	Mahmound Hamouda และ Laszlo Szamel	ศึกษาโครงสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์อย่างง่ายด้วยการควบคุมแรงบิดเฉลี่ย (ATC) โดยทำให้การกระเพื่อมของแรงบิดลดลงซึ่งต้องหามุมการกระตุ้นที่ดีที่สุด มุมการกระตุ้นที่ดีที่สุดถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน multi-objective optimization ในการแก้ปัญหา ฟังก์ชันนี้มี 2 เกณฑ์ คือ การกระเพื่อมของแรงบิดและการสูญเสียในขดลวดทองแดง แบบจำลองของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์สร้างจากโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2019	Krishna Reddy Pittam, Deepak Ronankit, Pathiban Perumal, Abdul Beigs และ Sheldon S. Williamsont	ศึกษาวิธีเทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรง (DTC) ที่ใช้ลดการกระเพื่อมของแรงบิดในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมกระแส ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรงที่ออกแบบใหม่สำหรับลำดับการสวิตช์จากแรงบิดต่ออัตรากระแส และทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิดน้อยที่สุด อีกทั้งเกิดการสูญเสียกำลังน้อย เลือกใช้กับมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสในการศึกษาและจำลองผล และจะนำเสนอผลลัพธ์ในช่วงสภาวะคงตัวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด
2020	Zelmira Ferkova และ Lubos Suchy	ศึกษาการกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ชนิด 12/8 และ 6/4 โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการจำลองผล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมอเตอร์ถูกควบคุมโดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control)

ในงานวิจัยช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับมอเตอร์มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ตั้งแต่มอเตอร์มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์หนึ่งเฟสไปจนหลายเฟส ซึ่งก็จะมีจำนวนเฟสของขดลวดสเตเตอร์แตกต่างกันออกไป รวมไปถึงจำนวนขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์ ในกรณีที่ศึกษาเกี่ยวกับมอเตอร์มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์หลายเฟสนิยมจำลองผลผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปเนื่องจากสะดวกในการแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนข้อมูลที่ป้อนเป็นอินพุตให้กับระบบ เช่น ค่าแรงดันอินพุต ค่ากระแส หรือความถี่ ทำให้สามารถทราบการจำลองผลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสมีความน่าสนใจเนื่องจากมีเสียงดังรบกวนน้อยกว่า และมีแรงบิดกระเพื่อมไม่สูงมากเมื่อเทียบกับมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส จึงต้องการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ในเรื่องของแรงบิด ที่จำลองผลโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ และในอนาคตสามารถนำไปศึกษาเพื่อพัฒนางานวิจัยต่อไปได้ ทั้งการออกแบบหรือปรับปรุงวัสดุมอเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพ

ที่ดีขึ้น และจะเห็นได้จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่จะดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ สามารถมองภาพออกอย่างกว้าง ได้ว่ามีคณณักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้จะทำการเรียบเรียงงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และจากหลาย ๆ งานที่เกี่ยวข้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่นำมาใช้ในการแก้การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ โดยจะได้กล่าวถึงโดยย่อดังนี้

งานวิจัยของ Graham E. Dawson, et al. (1987) ได้ดำเนินการศึกษาและประเมินการออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ที่มีโครงสร้างแบบ 8/6 ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ที่มีประสิทธิภาพอย่างเหมาะสม อีกทั้งประสิทธิภาพการควบคุมที่แตกต่างกัน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ได้ เนื่องจากสามารถอธิบายรูปร่างขั้วยื่นของสเตเตอร์และโรเตอร์ คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุแม่เหล็ก และผลกระทบของแรงบิดและฟลักซ์ค้ำผ่าน เมื่อกำหนดลักษณะเฉพาะของแรงบิดสถิตจากสภาพความซาบซึมได้ของวัสดุ โดยเลือกใช้วัสดุประเภทเฟอโรแมกเนติกส์ที่มีความซาบซึมได้ของแม่เหล็กสูง สำหรับสเตเตอร์และโรเตอร์ พลังงานร่วมถูกประเมินจากแบบจำลองของเครื่องจักรกลกับช่วงอัตราเร็วเชิงมุมจากมุม 0 ถึง 26 โดยใช้สภาพความซาบซึมได้ของวัสดุที่มีค่า 795, 2789 และ 5700 ซึ่งเป็นค่าของเหล็กหล่อ เหล็กกล้า และเหล็กซิลิกอน และพลังงานร่วมถูกคำนวณจากกระแสในขดลวดทั้งสี่ขดที่มีค่า 4, 6, 8 และ 10 แอมแปร์ ทำให้สามารถคำนวณค่าแรงบิดออกมาได้จากอนุพันธ์ของเส้นโค้งพลังงานร่วม จากการศึกษาพบว่าวัสดุประเภทเฟอโรแมกเนติกส์ที่มีความซาบซึมได้ของแม่เหล็กสูงจะมีค่าแรงบิดสูง งานวิจัยของ Hao Chen, et al. (2001) ได้ดำเนินการศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟสที่มีโครงสร้างแบบ 12/8 และนำเสนอโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์ โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ และตัวควบคุม รวมทั้งคำนวณหุคนำกระแสของตัวสวิตซ์หลักในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เหมาะสม ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้กำลังเอาต์พุตที่สูง, ประสิทธิภาพที่สูง และความสัมพันธ์ของแรงบิดในช่วงเบรกต่ำ ในงานวิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 ชนิด คือ วงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร วงจร bifilar winding วงจร resistance commutation และวงจรสวิตซ์ทั่วไป เพื่อพัฒนาดันแบบตัวควบคุม PWM ที่ถูกนำมาทดสอบ วงจรหลักของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะเลือกใช้หมุคนำกระแสที่เหมาะสม โดยผลลัพธ์แสดงถึงการขับเคลื่อนดีที่สุดเลือกใช่วงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร ซึ่งมีประโยชน์ในเรื่องของประสิทธิภาพแบบสมมาตรสูง และค่าสูงสุดของกระแสเฟสต่ำ และมีประโยชน์สำหรับกำลังงานไฟฟ้า รวมทั้งลดความต้องการอัตรากระแสของส่วนประกอบกำลัง เหมาะสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยของ Lili Li, et al. (2004) ได้ดำเนินการศึกษามอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์จากพื้นฐานเกี่ยวกับ

เครื่องจักรกลไฟฟ้า การลดขนาดขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าเดิม ลด leak-magnetism กำลังในการสตาร์ทสูง แรงบิดเอาท์พุทสูงกว่าเดิม และแรงบิดกระแสเฟืองของ แรงบิดน้อยลง ในงานวิจัยจึงทำการการออกแบบขั้วสเตเตอร์ใหม่ให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น และใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณสมรรถนะแม่เหล็กไฟฟ้า โดยออกแบบให้ขั้วสเตเตอร์ใหม่มีขนาดที่ขี้เล็ก ลง จากการจำลองพบว่าขนาดขั้วสเตเตอร์ใหม่ทำให้มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์มีแรงบิดสูงขึ้น และมีการกระเพื่อมของแรงบิดลดลง เมื่อเทียบกับขนาดขั้วสเตเตอร์ที่มีความกว้างเดิมอีกทั้งยังทำให้ จำนวนการพันขดลวดที่สเตเตอร์ลดลงอีกด้วย งานวิจัยของสุเมธ ลิปิโรจนพงศ์ (2006) ได้ ดำเนินการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์โดยทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมาแล้วนำไปคำนวณโดยใช้โปรแกรมไอมุสที่เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขหรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลของ มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการวัดจริงที่ชุดทดสอบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ของศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง โดยในการเปรียบเทียบจากทั้งสองวิธีนี้จะ กำหนดสภาพแวดล้อมให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด และจากการทดสอบปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียง กัน โดยค่าแรงบิดที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดสอบมีความแตกต่าง ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเราจึงสามารถใช้วิธีการสร้างแบบจำลองมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ตามขนาดที่ต้องการออกแบบได้ ก่อนที่จะนำไปสร้างจริงซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ ต้องเสียไปกับการทดลองสร้าง งานวิจัยของ Bao-Huy Nguyen และ Cao-Minh Ta (2011) ได้ ดำเนินการศึกษาระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เนื่องจากปกติมอเตอร์ ชนิดนี้มีการกระเพื่อมของแรงบิดสูง และมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น นำเสนอเทคนิคการ ควบคุมการกระจายของแรงบิดให้ดีขึ้น และใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ คุณสมบัติค่าความเหนี่ยวนำ ในงานวิจัยนี้ได้จำลองผลโดยเลือกใช้วิธี Torque Distribution Functions (TDFs) เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับลดการกระเพื่อมของแรงบิด และนำเสนอ การวิเคราะห์เปรียบเทียบการจำลองผลของวิธี TDFs อย่างเดียวกับเมื่อใช้ทั้งวิธี TDFs และ fuzzy มีการแสดงกราฟการตอบสนองต่อแรงบิดของมอเตอร์เปรียบเทียบทั้งสองวิธี และผลลัพธ์การควบคุม ความเร็วแบบวงปิด (closed-loop speed control) ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่ใช้ทั้งวิธี TDFs และ fuzzy มีการกระเพื่อมของแรงบิดลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธี TDFs อย่างเดียว งานวิจัยของ Mahmoud Hamouda และ Laszlo Szamel (2018) ได้ดำเนินการศึกษาโครงสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์อย่างง่ายด้วยวิธีการควบคุมแรงบิดเฉลี่ย (Average torque control : ATC) และวิธีควบคุม อัตราเร็วแรงบิด (Instantaneous torque control : ITC) ซึ่งเป็นสองวิธีในการควบคุมแรงบิดของ

มอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ โดยวิธี ITC จะใช้ torque sharing function (TSF) ซึ่งเป็นการกระจายแรงบิดรวมให้กับมอเตอร์ และต้องใช้พารามิเตอร์ควบคุม คือ กระแสอ้างอิง มุมสวิตช์เปิด และมุมสวิตช์ปิด การกระเพื่อมของแรงบิดลดลงจึงจำเป็นต้องหาการกระตุ้นที่ดีที่สุด การคำนวณหาการกระตุ้นที่ดีโดยใช้ฟังก์ชัน multi-objective optimization ในการแก้ปัญหา ฟังก์ชันนี้มี 2 เกณฑ์ คือ การกระเพื่อมของแรงบิดและการสูญเสียในขดลวดทองแดง โดยแบบจำลองของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ถูกสร้างจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การกระเพื่อมของแรงบิดลดลงได้โดยเลือกมุมการกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งทำให้การกระเพื่อมของแรงบิดและการสูญเสียในขดลวดทองแดงลดลงด้วย โดยวิธี ITC สามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิดได้มากกว่าวิธี ATC และเป็นวิธีที่เป็นประโยชน์สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยของ Seema Kumari, et al. (2017) ได้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ที่มีโครงสร้างแบบ 6/4 และมีกำลังเอาต์พุต 60 กิโลวัตต์ ด้วยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control : DTC) และวิธีควบคุมกระแสแบบ chopped ผ่านการจำลองผลโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อเปรียบเทียบการลดการกระเพื่อมของแรงบิดในมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ โดยผลลัพธ์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็กระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้าที่สเตเตอร์กับขั้วโรเตอร์ โดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงสามารถควบคุมฟลักซ์คล่องแม่เหล็กที่สเตเตอร์ดีกว่าวิธีวิธีควบคุมกระแสแบบ chopped งานวิจัยของ Krishna Reddy, et al. (2019) ได้ดำเนินการศึกษาศึกษาวิธีเทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control : DTC) ที่ใช้ลดการกระเพื่อมของแรงบิดในการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส โดยจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมกระแส และออกแบบวงจรใหม่สำหรับลำดับการสวิตช์ที่ทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิดน้อยที่สุด อีกทั้งเกิดการสูญเสียกำลังน้อย จากการจำลองผลการตอบสนองพลวัตของมอเตอร์ที่มีความเร็วตั้งแต่ 300-800 rpm การกระเพื่อมของแรงบิดที่ใช้การเทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรงมีค่าอยู่ระหว่าง 09.21-13.61 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมกระแสที่มีค่าอยู่ระหว่าง 14.66-22.66 นิวตัน-เมตร ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงการกระเพื่อมของแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรงเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมกระแส และการกระเพื่อมของแรงบิดที่น้อยลงของวงจรใหม่สำหรับลำดับการสวิตช์โดยใช้เทคนิค DTC และงานวิจัยของ Zelmira Ferkova และ Lubos Suchy (2020) ได้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์การกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่มีโครงสร้างแบบ 12/8 และ 6/4 โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการจำลองผล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมอเตอร์ถูกควบคุมโดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control : DTC) จากการจำลองผลลัพธ์มอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่มีโครงสร้างแบบ 12/8 มี

คุณลักษณะการกระเพื่อมของแรงบิดมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีโครงสร้างแบบ 6/4 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วเชิงมุม (ω) เท่ากับ 25, 50 และ 75 s^{-1} โดยลักษณะกราฟค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างแบบ 12/8 มีค่าน้อยกว่า

2.3 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการจากฐานข้อมูล IEEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ในการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส ด้วยการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

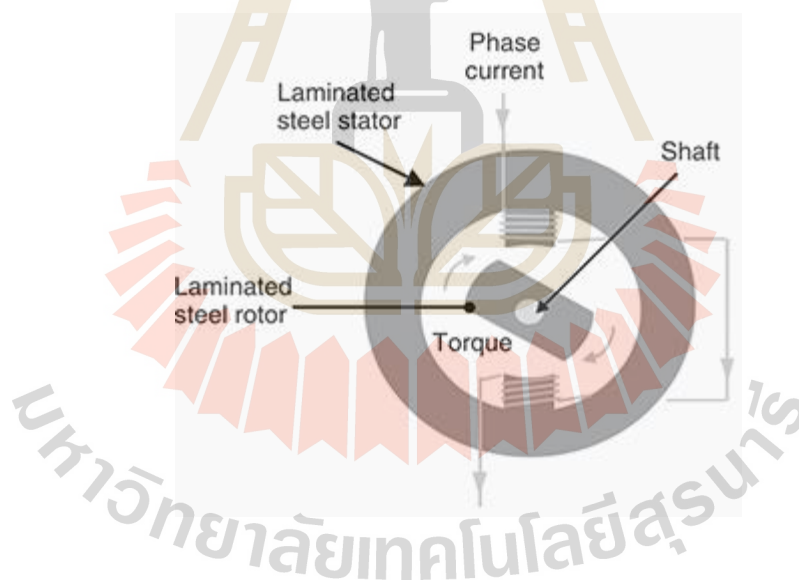
การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยถือว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์ในการดำเนินงาน อีกทั้งเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 6 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ (2) วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ (3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ (4) การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ (5) ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก และ (6) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวถึงในการดำเนินงานวิจัย

3.2 มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เป็นมอเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสเตเตอร์จะประกอบด้วยโครงของมอเตอร์ (Frame or yoke) แกนสเตเตอร์ (Stator core) และมีขดลวดพันที่สเตเตอร์ (Stator winding) และอีกส่วนหนึ่งคือโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่เคลื่อนที่และไม่มีลวดตัวนำ โรเตอร์มักทำมาจากวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกที่เป็นสารแม่เหล็กถาวร (Hard Ferromagnetic Materials) เนื่องจากเป็นวัสดุที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกจะรักษาความเป็นแม่เหล็กได้นาน โดยที่โรเตอร์จะถูกยึดให้มีจุดหมุนอยู่ตรงกลางด้วยเพลา (Shaft) ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์มีโครงสร้างเป็นแบบขั้วยื่น (Double salient pole) โดยมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์จะสร้างแรงบิดผ่านสนามแม่เหล็กแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับแท่งแม่เหล็กที่โรเตอร์ ยกตัวอย่างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 1 เฟส ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 หากมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์จะทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

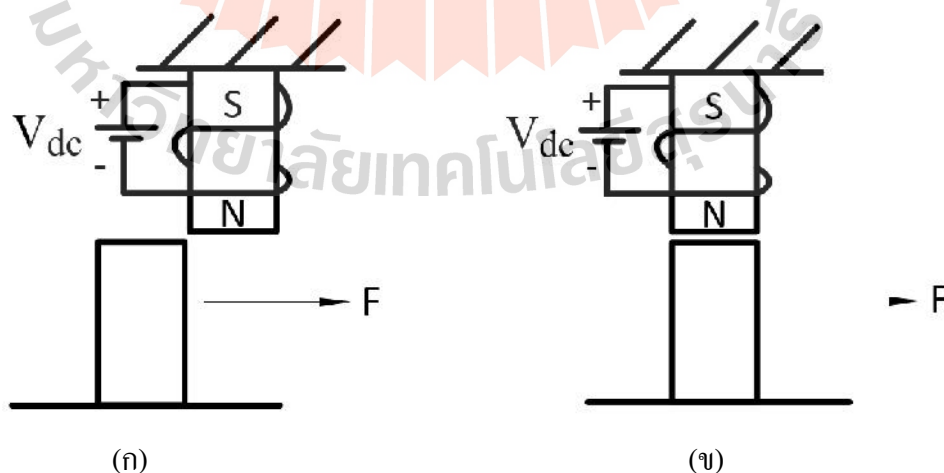


รูปที่ 3.2 การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์

มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ทำงาน โดยใช้หลักการสร้างแรงรีลักแตนซ์ ซึ่งเกิดจากความพยายามของวงจรแม่เหล็กที่จะพยายามลดความต้านทานทางแม่เหล็ก โดยรีลักแตนซ์ใช้เรียกความต้านทานทางแม่เหล็กในทางเดินแม่เหล็ก เมื่อนำแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้แท่งเหล็ก จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านช่องอากาศระหว่างแท่งแม่เหล็กกับแท่งเหล็กเพื่อให้ครบวงจร ถ้าระยะของช่องอากาศ

กว้างจะทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าสูง ดังนั้น วงจรแม่เหล็กจะเกิดแรงที่จะพยายามดึงแท่งเหล็กและแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้กัน เพื่อลดระยะของช่องอากาศให้แคบลงจนถึงจุดที่ความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งแท่งเหล็กและแท่งแม่เหล็กติดกัน หลักการแรงรีลัคแตนซ์นี้ถูกนำมาใช้เป็นหลักการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ โดยเปลี่ยนแท่งแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าคือสเตเตอร์ที่พันด้วยขดลวดทองแดง สำหรับป้อนกระแสกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และแท่งเหล็กคือโรเตอร์สำหรับเป็นทางเดินของเส้นแม่เหล็ก

จากการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ได้อาศัยหลักการพื้นฐานของแรงรีลัคแตนซ์ที่สามารถให้แรงดึงดูดกันระหว่างแท่งแม่เหล็กกับแท่งเหล็ก จากรูปที่ 3.3 เมื่อป้อนกระแสกระตุ้นที่ขดลวดที่ถูกพันอยู่บนแท่งแม่เหล็กที่ถูกยึดอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ จะทำให้แท่งแม่เหล็กนี้กลายเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะเกิดแรงแม่เหล็กในการดึงดูดแท่งเหล็กหรือโรเตอร์ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กับขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามทิศทางของแนวแรงดังรูปที่ 3.3(ก) เรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งแนววางไม่ตรงกัน (Unaligned position) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แนวแกนเหล็กทั้งสองอยู่ไม่ตรงกัน ซึ่งตำแหน่งนี้จะเกิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดและเป็นช่วงที่ค่าแรงบิดกำลังจะเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อแท่งเหล็กถูกดูดโดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าให้เคลื่อนที่มาตรงกึ่งกลางพอดีกับขั้วแม่เหล็กไฟฟ้างดรูปที่ 3.3(ข) เรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งแนววางตรงกัน (Aligned position) ซึ่งตำแหน่งนี้มีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นสูงสุดและค่าแรงบิดจะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากเป็นแนวที่แท่งเหล็กถูกยึดไว้จึงไม่ทำให้เกิดแรงดึงหรือแรงผลักของแท่งเหล็ก เมื่อต้องการให้แท่งเหล็กเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กมากขึ้น และต้องป้อนกระแสกระตุ้นเข้าที่ขดลวดแต่ละขั้วให้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของตำแหน่งแท่งเหล็ก



รูปที่ 3.3 แสดงการวางตำแหน่ง (ก) แนววางไม่ตรงกัน (ข) แนววางตรงกัน

การเรียกชื่อของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์จะเรียกตามโครงสร้าง $n - phase, x / y$

โดยมีเงื่อนไข คือ $x \geq y + 2$ และ $x = n \cdot m$

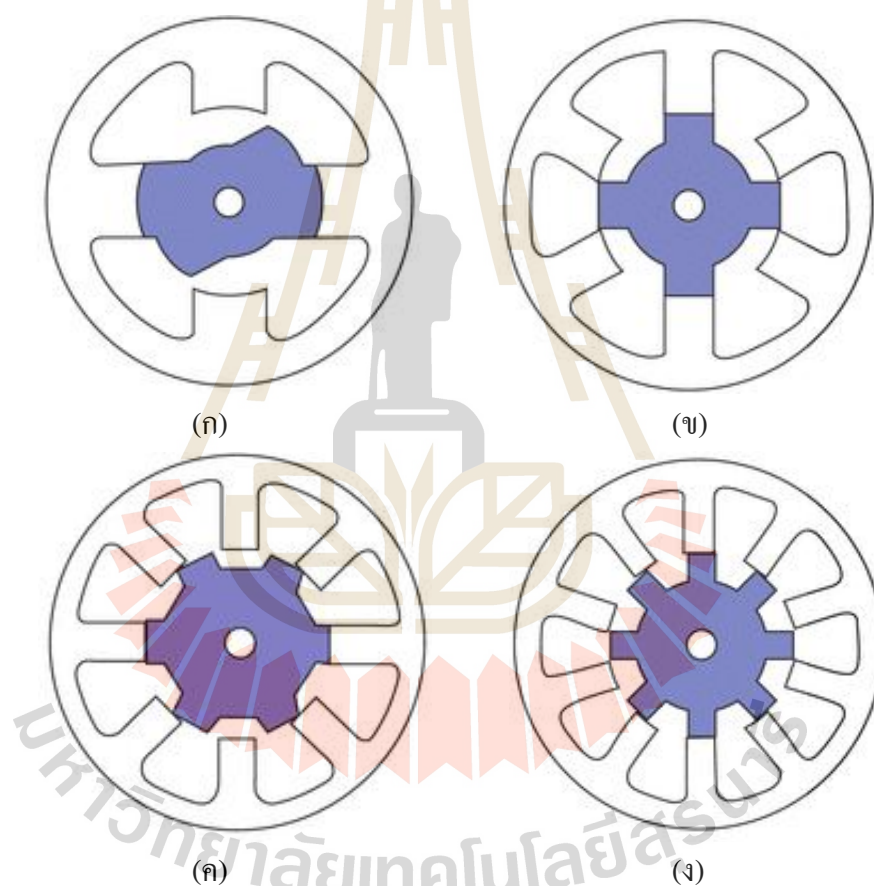
เมื่อกำหนดให้ $m = 2, 4, 6, \dots$

x คือ จำนวนขั้วของสเตเตอร์

y คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์

n คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์

ถ้าในกรณีที่ $x = y$ มักจะใช้งานมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

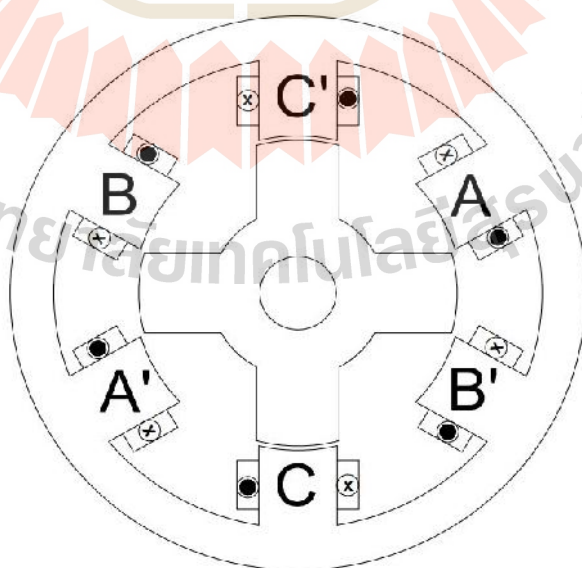


รูปที่ 3.4 ภาพหน้าตัดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ (ก) 2 เฟสที่มีสเตเตอร์ 4 ขั้ว และโรเตอร์ 2 ขั้ว
 (ข) 3 เฟสที่มีสเตเตอร์ 6 ขั้ว และโรเตอร์ 4 ขั้ว (ค) 4 เฟสที่มีสเตเตอร์ 8 ขั้ว และโรเตอร์ 6 ขั้ว
 (ง) 5 เฟสที่มีสเตเตอร์ 10 ขั้ว และโรเตอร์ 8 ขั้ว

การสร้างแรงบิดเพื่อให้โรเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส ประกอบด้วยขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้ว และขั้วโรเตอร์ 4 ขั้ว โดยที่ขั้วของ

สเตเตอร์จะมีการพันขดลวด 2 ชุดต่อ 1 เฟส เช่น ที่เฟสหนึ่งประกอบด้วยขดลวดชุด A และขดลวดชุด A' อยู่ตรงข้ามกันโดยสามารถต่อได้ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โรเตอร์จะเริ่มหมุนเมื่อป้อนกระแสกระตุ้นเข้าไปที่ขดลวดแต่ละเฟส เช่น ถ้าต้องการให้โรเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาจากภาพ จะต้องป้อนกระแส (Switch on) ที่เฟส A และ A' เพื่อสร้างแรงบิด ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วสเตเตอร์เฟส A และ A' และจะดูดขั้วโรเตอร์ที่อยู่ใกล้เคลื่อนที่มาจนกระทั่งขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกันกับขั้วสเตเตอร์ก็จะหยุดป้อนกระแส (Switch off) ที่เฟส A และ A' ในตำแหน่งนี้แรงบิดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วไปป้อนกระแสกระตุ้นที่เฟส B และ B' ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วสเตเตอร์เฟส B และ B' เพื่อสร้างแรงบิดอย่างต่อเนื่องต่อไป และจะดูดขั้วโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ที่สุดเคลื่อนที่มาจนกระทั่งขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกันกับขั้วสเตเตอร์ก็จะหยุดป้อนกระแสกระตุ้นที่เฟส B และ B' แล้วไปป้อนกระแสกระตุ้นที่เฟส C และ C' ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วสเตเตอร์เฟส C และ C' และจะดูดขั้วโรเตอร์ที่อยู่ใกล้เคลื่อนที่มาจนกระทั่งขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกันกับขั้วสเตเตอร์ก็จะหยุดจ่ายกระแสที่เฟส C และ C' และเราสามารถป้อนกระแสกระตุ้นให้โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้

จากข้างต้นหากต้องการให้มอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟสหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะต้องป้อนกระแสกระตุ้นให้ขั้วสเตเตอร์แต่ละเฟส คือ A-B-C-A-B-C... ตามลำดับ หรือหากต้องการให้มอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟสหมุนตามเข็มนาฬิกาจะต้องป้อนกระแสกระตุ้นให้ขั้วสเตเตอร์แต่ละเฟส คือ B-A-C-B-A... ตามลำดับ ลักษณะการป้อนกระแสกระตุ้นข้างต้นสามารถป้อนให้กับมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสและ 5 เฟสเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายตัวของขดลวดมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส

โดยมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสจะมีการป้อนกระแสกระตุ้น โดยจำนวนจังหวะกระตุ้นในแต่ละรอบ (Number of Strokes per Revolution : N_{stroke}) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$N_{stroke} = N_{ph} \times N_r \quad (3.1)$$

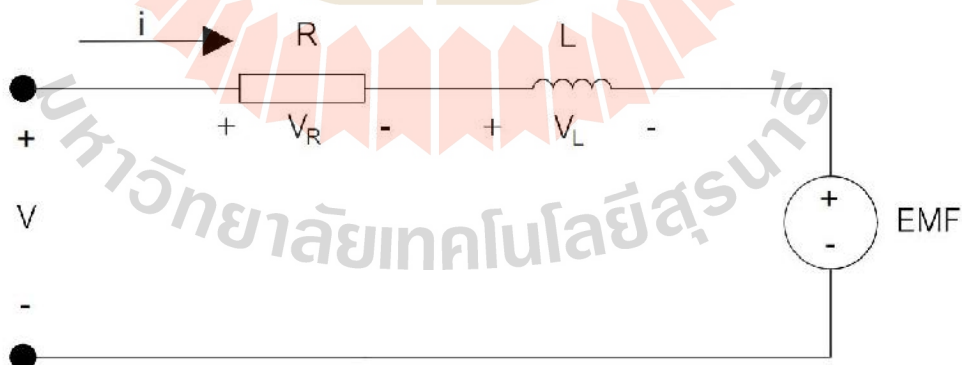
โดยที่ N_{ph} คือ จำนวนเฟส
 N_r คือ จำนวนขั้วโรเตอร์

และมุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle) ในแต่ละครั้ง จะหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$Stroke_Angle = \frac{2f}{N_{ph} \times N_r} \quad (3.2)$$

3.3 วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

ในการวิเคราะห์มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์สามารถเขียนเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำเกี่ยวข้อ (Flux Linkage) ที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส สามารถเขียนเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 1 เฟส

$$V = V_R + V_L + emf \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_R = R_s \cdot i$ (3.4)

$$V_L = L(i, \omega) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.5)$$

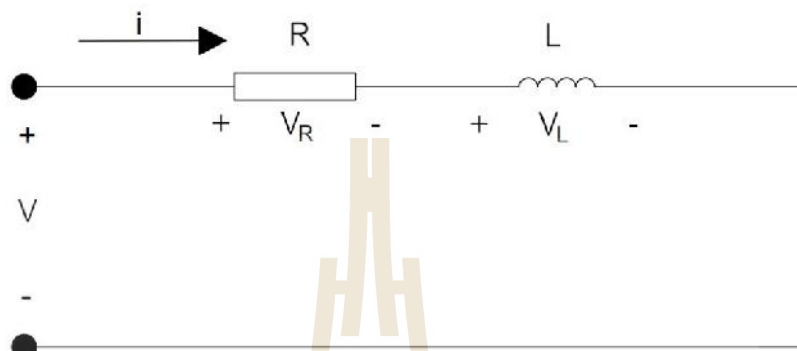
$$emf = i \dot{\Sigma}_m \frac{\partial L(i, \omega)}{\partial \omega} \quad (3.6)$$

และเมื่อนำสมการที่ (3.4) (3.5) และ (3.6) แทนลงในสมการที่ (3.3) จะได้

$$V = R_s i + L(i, \omega) \frac{\partial i}{\partial t} + i \dot{\Sigma}_m \frac{\partial L(i, \omega)}{\partial \omega} \quad (3.7)$$

- โดยที่ V คือ แรงดันเฟส
 V_R คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทานเฟส
 V_L คือ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเฟส
 emf คือ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นจากการหมุนของมอเตอร์
 R_s คือ ความต้านทานเฟส
 L คือ ความเหนี่ยวนำเฟส
 i คือ กระแสเฟส
 ω คือ มุมของโรเตอร์
 $\dot{\Sigma}_m$ คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

เมื่อพิจารณาขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่งจะมีค่าความเร็วเชิงมุมเป็นศูนย์ สามารถเขียนเป็นวงจรมูลได้ดังรูปที่ 3.7 และเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (3.8)



รูปที่ 3.7 วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตซ์รีล็กแตนซ์

$$V = R_s i + L(i, \omega) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.8)$$

การทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดจึงต้องจ่ายกระแสและแรงดันกระตุ้นขดลวดในช่วงที่ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้น หรือในขณะที่ความชันของความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก โดยเมื่อสวิตซ์เริ่มนำกระแส (Turn on) หรือการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสจะเริ่มที่ตำแหน่งไม่วางแนวของเฟสนั้น ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่ความชันของความเหนี่ยวนำเป็นบวกเพื่อให้ได้แรงบิดที่เป็นบวก และสวิตซ์ไม่นำกระแส (Turn off) ที่ตำแหน่งก่อนค่าความเหนี่ยวนำของเฟสนั้นมีค่าสูงสุด เพื่อให้กระแสลดลงเป็นศูนย์ได้ทัน ก่อนที่จะเข้าสู่ย่านที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำของเฟสนั้นจะมีค่าเป็นลบ เพื่อป้องกันการเกิดแรงบิดลบ

จากลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์สวิตซ์รีล็กแตนซ์กับความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำซึ่งแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งของโรเตอร์ การควบคุมเพื่อให้มอเตอร์สร้างแรงบิดจำเป็นต้องควบคุมการจ่ายกระแสและแรงดันกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสให้ถูกต้อง โดยการสร้างแรงบิดของมอเตอร์จะเป็นดังสมการที่ (3.9)

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \omega} \quad (3.9)$$

โดยที่ T	คือ แรงบิดของมอเตอร์
i	คือ กระแสเฟส
$\frac{\partial L}{\partial \theta}$	คือ ความชันการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำเฟส

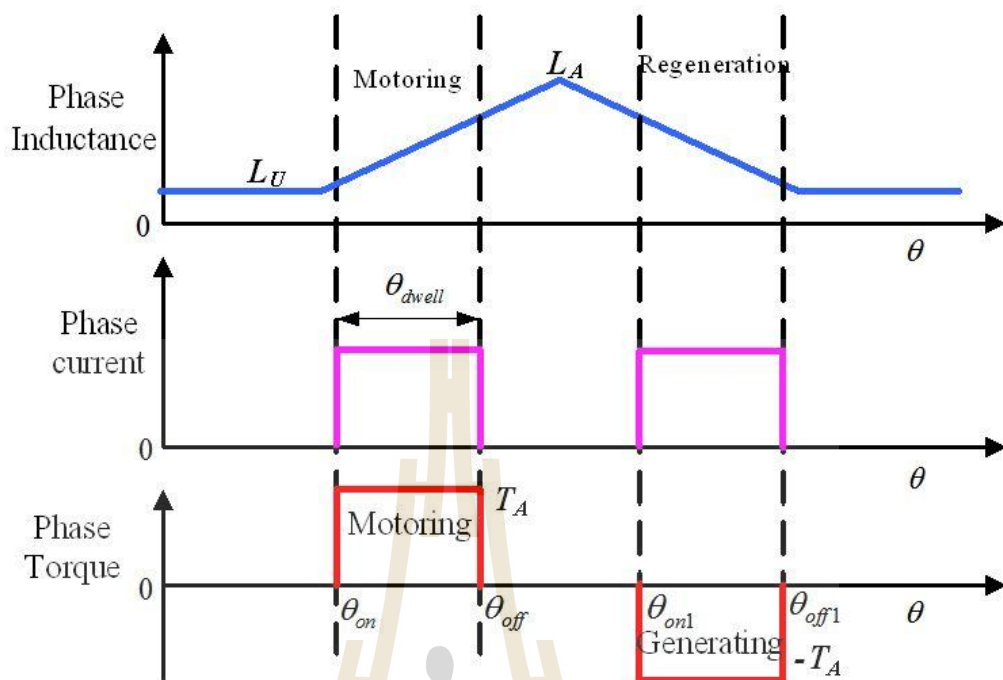
จากสมการแรงบิดจะเห็นว่าขนาดของแรงบิดแปรผันตามขนาดกระแสยกกำลังสอง และความชันการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำเฟส ซึ่งทิศทางของแรงบิดไม่ได้ถูกกำหนดด้วยทิศทางของกระแส แต่เป็นความชันของการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำเฟสซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นถ้าต้องการสร้างแรงบิดทางบวกจะต้องป้อนกระแสในย่านที่มีความชันของค่าความเหนี่ยวนำเป็นบวก หากป้อนกระแสในย่านที่มีความชันของค่าความเหนี่ยวนำเป็นลบจะทำให้แรงบิดที่ได้มีทิศทางลบ ซึ่งจะเห็นว่ามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์สามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์

ในตำแหน่งแนววางตรงกันของขั้วโรเตอร์เคลื่อนที่มาตรงกับขั้วสเตเตอร์ คือ ตำแหน่ง L_A เมื่อป้อนกระแสที่ขดลวดเฟสจะไม่มีแรงบิดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ โรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด เนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance) ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านจะมีค่าน้อยเป็นผลมาจากช่องอากาศที่แคบ มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กน้อย เส้นแรงแม่เหล็กจะผ่านไปที่โครงของสเตเตอร์ (Stator Yoke) ซึ่งจะดูดซับค่า MMF และลดค่าความเหนี่ยวนำลง ในตำแหน่งนี้เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านจะมีความอ่อนไหวต่อการอิ่มตัว (Saturation) โดยเฉพาะที่โครงของสเตเตอร์และโรเตอร์

ในตำแหน่งแนววางไม่ตรงกันของขั้วโรเตอร์เคลื่อนที่มาตรงกับขั้วสเตเตอร์ คือ ตำแหน่ง L_U ซึ่งในตำแหน่งนี้จะไม่เกิดแรงบิดเช่นเดียวกับตำแหน่งแนววางตรงกัน ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าน้อยเนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านมีค่าสูงมีผลจากช่องอากาศที่กว้างระหว่างขั้วสเตเตอร์และโรเตอร์ ตำแหน่งนี้จะไม่มีความอ่อนไหวต่อการอิ่มตัวเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าเส้นแรงแม่เหล็กของตำแหน่งแนววางตรงกันเพราะว่ามีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กค่อนข้างมาก

ในตำแหน่งที่โรเตอร์อยู่กึ่งกลางระหว่างแนววางตรงกันและตำแหน่งแนววางไม่ตรงกัน ตำแหน่งนี้จะเริ่มเกิดการอิ่มตัวขึ้น หากมีการป้อนกระแสที่ขดลวดเฟสเพิ่มขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งขั้วโรเตอร์เข้าสู่ตำแหน่งแนววางตรงกัน



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเฟส ค่ากระแสเฟส และค่าแรงบิดในอุดมคติ

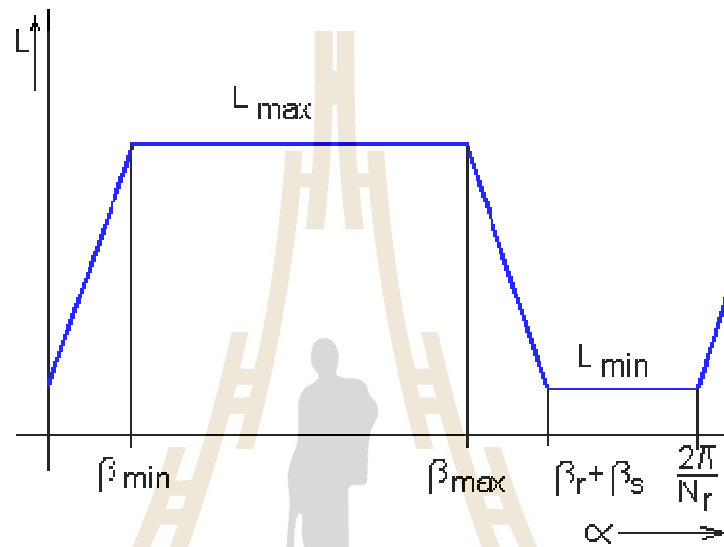
สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเฟสค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L &= L_U & \text{"} < 0 \\
 L &= L_U + K \text{"} & 0 \leq \text{"} \leq S_{\min} \\
 L &= L_A & S_{\min} \leq \text{"} \leq S_{\max} \\
 L &= L_U + K(\text{"} - S_{\max} - S_{\min}) & S_{\max} \leq \text{"} \leq S_{\min} + S_{\max}
 \end{aligned}$$

- โดยที่ S_{\min} คือ องศาส่วนโค้งของขั้วสเตเตอร์
 S_{\max} คือ องศาส่วนโค้งของขั้วโรเตอร์
 K คือ ค่าความชันของค่าความเหนี่ยวนำซึ่งหาได้จากสมการ

$$K = \frac{L_A - L_U}{S_{\min}} \tag{3.10}$$

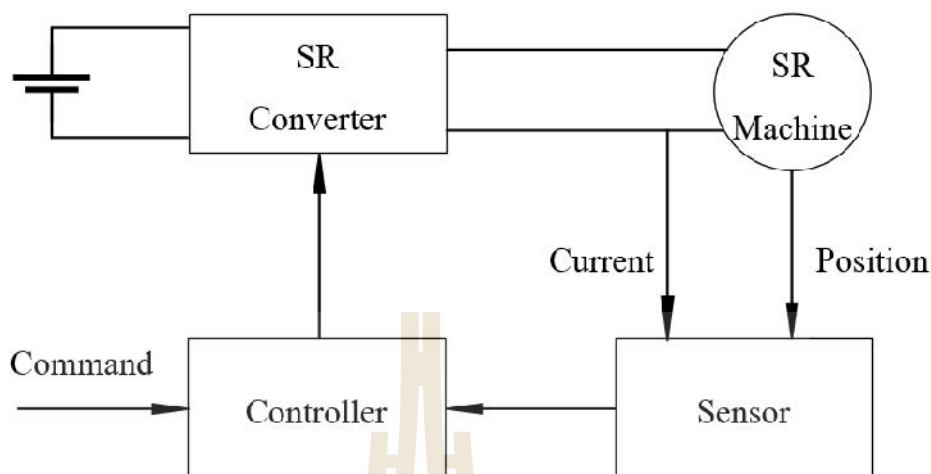
แรงบิดจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนกระแสกระตุ้นเข้าไปที่ขดลวดแต่ละเฟสเมื่อโรเตอร์มีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปตำแหน่งแนววางตรงกัน ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งแนววางตรงกัน นั้นหมายความว่าแรงบิดจะมีค่าไม่คงที่จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ และการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าไปโดยที่ทิศทางของกระแสจะไม่มีผลต่อแรงบิด



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์

3.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

การทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์จะขึ้นอยู่กับ การควบคุม จากรูปที่ 3.9 แสดงระบบควบคุมมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ซึ่งจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ คือ มอเตอร์ (SR motor) วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (SR converter) ตัวตรวจวัด (Sensor) และตัวควบคุม (Controller) ในระบบควบคุมจะถูกออกแบบสำหรับควบคุมการทำงาน โดยเฉพาะในมอเตอร์แต่ละตัว



รูปที่ 3.10 โครงสร้างการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์

วงจรควบคุมมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ใช้หลักการพื้นฐานที่จะทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิด วงจรใช้วิธีการควบคุมทางกระแส ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยวงจรส่วนแรกมีหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมจะสร้างสัญญาณสำหรับกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์ให้สัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำของเฟสนั้น ตำแหน่งต่าง ๆ ของมอเตอร์ วงจรนี้จึงจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณที่ถูกต้อง โดยวงจรจะรับข้อมูลตำแหน่งนี้จากตัวตรวจวัดตำแหน่งซึ่งติดตั้งที่เพลตเป็นตัวบอกตำแหน่ง และรับข้อมูลกระแสจากตัวตรวจวัดกระแส สร้างเป็นสัญญาณควบคุมให้มอเตอร์ทำงานตามคำสั่งการควบคุม ส่งสัญญาณไปยังส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อสร้างแรงดันส่งไปที่ขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์

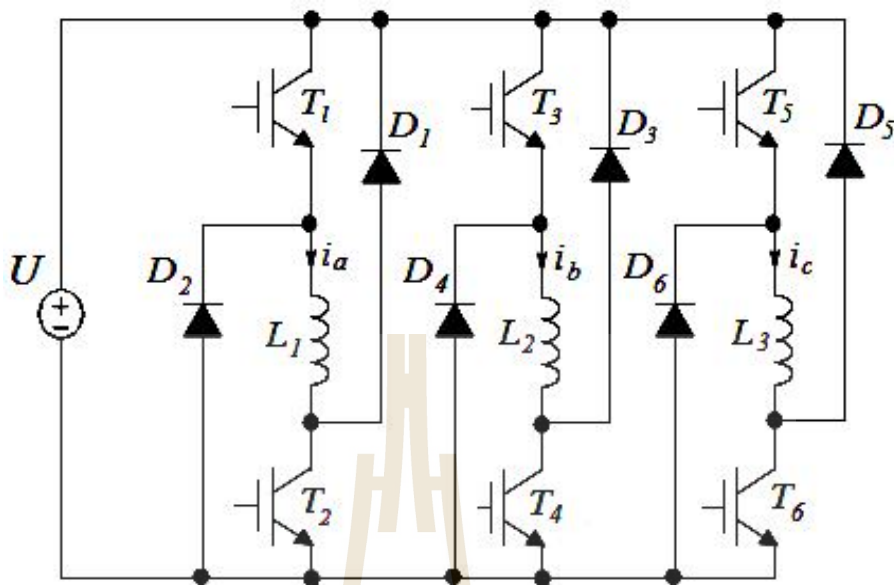
การทำงานของวงจรควบคุมในส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมมีตัวควบคุมรับค่าตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งมุมที่ต้องการในการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส จากรูปที่ 3.5 ขั้วโรเตอร์วางในแนวตรงกับขั้วสเตเตอร์เฟส C และ C' วงจรจะส่งสัญญาณเริ่มกระตุ้นเมื่อรับรู้ว่ามีมุมตำแหน่งของขั้วโรเตอร์ และในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน โรเตอร์มีการเคลื่อนที่กระแสกระตุ้นของขดลวดเฟส A และ A' จะเริ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันวงจรก็จะรับสัญญาณคำสั่งที่ป้อนเข้าวงจรซึ่งเป็นค่ากระแสที่ต้องการ นำมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสเฟสของมอเตอร์จากตัวตรวจวัดกระแส ในขณะที่กระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์ไม่สูงถึงค่าระดับค่ากระแสที่ตั้งไว้ ส่วนวงจรสร้างสัญญาณก็ยังคงส่งกระตุ้นขดลวดเฟส A และ A' อยู่ เมื่อค่ากระแสที่วัดกลับมาสูงกว่าระดับที่ตั้งไว้ วงจรสัญญาณจะสั่งหยุดกระตุ้นขดลวด

และจะตั้งกระดุนขดลวดอีกครั้งเมื่อค่ากระแสลดลง ปกติค่ากระแสที่ทำให้ระดับวงจรสร้างสัญญาณ กระดุนขดลวดและหยุดกระดุนขดลวดจะกำหนดเป็นช่วงเพื่อลดความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์ สวิตซ์ ซึ่งจะมีผลกับการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตซ์ จากลักษณะการทำงานของวงจรค่ากระแส ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่หรืออยู่ในช่วงของค่ากระแสที่ตั้งไว้ และเมื่อวงจรรู่มุมของขั้วโรเตอร์ เคลื่อนที่มาในตำแหน่งที่ต้องหยุดกระดุนขดลวด

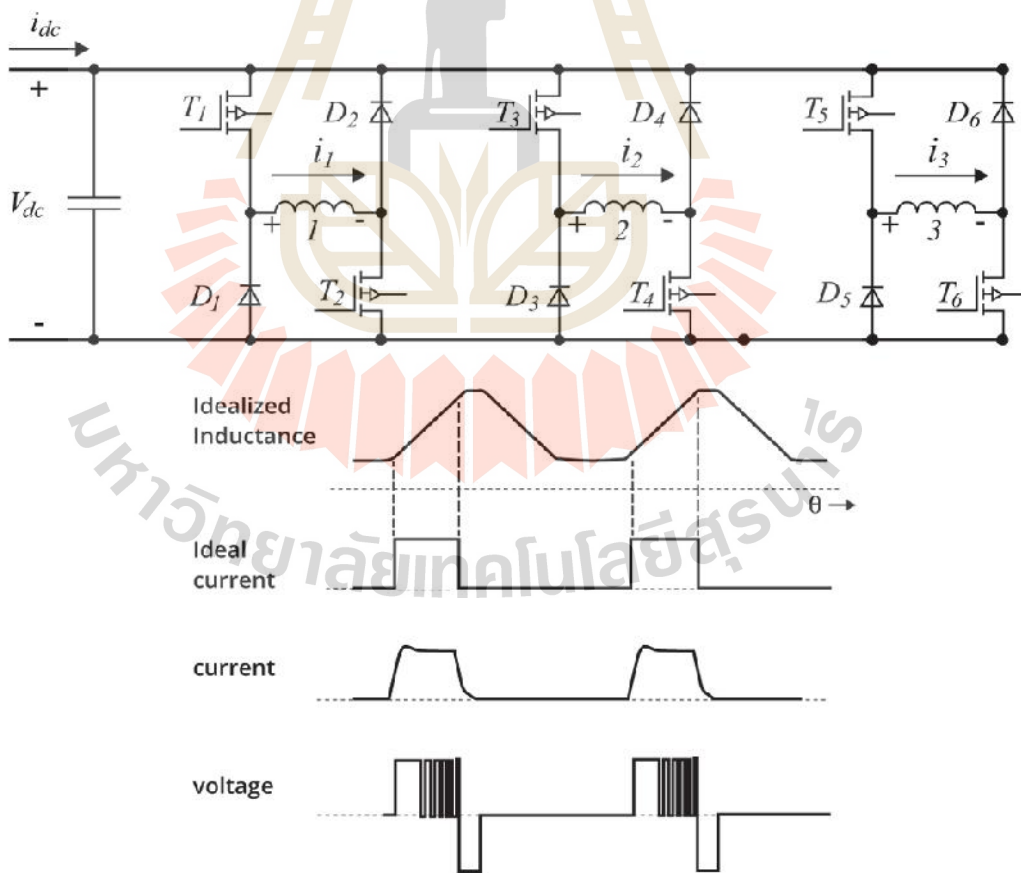
จากหลักการพื้นฐานมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ในแต่ละเฟสของสเตเตอร์จะถูกป้อนด้วย แรงดันไฟฟ้าจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics Converter) ซึ่งทำหน้าที่ในการสวิตซ์ ปิดและเปิดการจ่ายกระแสด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น มอสเฟต (MOSFET) หรือไอจีบีที (IGBT) จะถูกต่อกับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสของมอเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ถูกควบคุมการ สวิตซ์ด้วยตัวควบคุม และแรงบิดจะเกิดขึ้นในช่วงที่โรเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งขั้วสเตเตอร์ที่ถูก กระดุนนั้น ทิศทางของแรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันของตำแหน่ง โรเตอร์ และกระแสที่มีการ กระดุนเข้าไป แรงบิดสามารถที่จะสร้างให้ต่อเนื่องได้โดยการจ่ายกระแสกระดุนเข้าไปเฟสต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ทำงานโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์เป็นไปในทิศทาง เดียวกันตลอดทำให้ใช้อุปกรณ์ในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีจำนวนน้อยลง ซึ่งเป็นการลด ความซับซ้อนของชุดวงจรด้วย ในการควบคุมและการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะต้อง คำนึงถึงตัวควบคุม กระแสที่ป้อน แรงบิดที่เกิดขึ้น รวมไปถึงค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละเฟส ในช่วงการควบคุม ดังนั้นรูปแบบโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ จึง ต้องเลือกให้มีความเหมาะสมกับมอเตอร์ที่นำมาใช้ และรูปแบบการควบคุมเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กำลังแบบบริดจ์ไม่สมมาตร ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอย่างง่ายที่ใช้ในการควบคุมการจ่าย แรงดันให้กับมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ รูปแบบการจ่ายแรงดันให้แต่ละเฟสของมอเตอร์มี 2 แบบ คือ แบบฮาร์ดช้อปปิ้ง (Hard Chopping) และแบบซอฟท์ช้อปปิ้ง (Soft Chopping)

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้งานกับมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ คือ วงจรบริดจ์ไม่สมมาตร (Asymmetry Bridge Converter) ซึ่งเป็นวงจรหลักในการจ่ายแรงดันกระดุนขดลวดแต่ละเฟสตาม สัญญาณจากตัวควบคุม อุปกรณ์หลักของวงจรส่วนนี้ คือ อุปกรณ์ประเภทสวิตซ์กำลัง โดยค่าพิกัด กำลังของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์ ลักษณะของวงจรและการต่อใช้งานของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.11



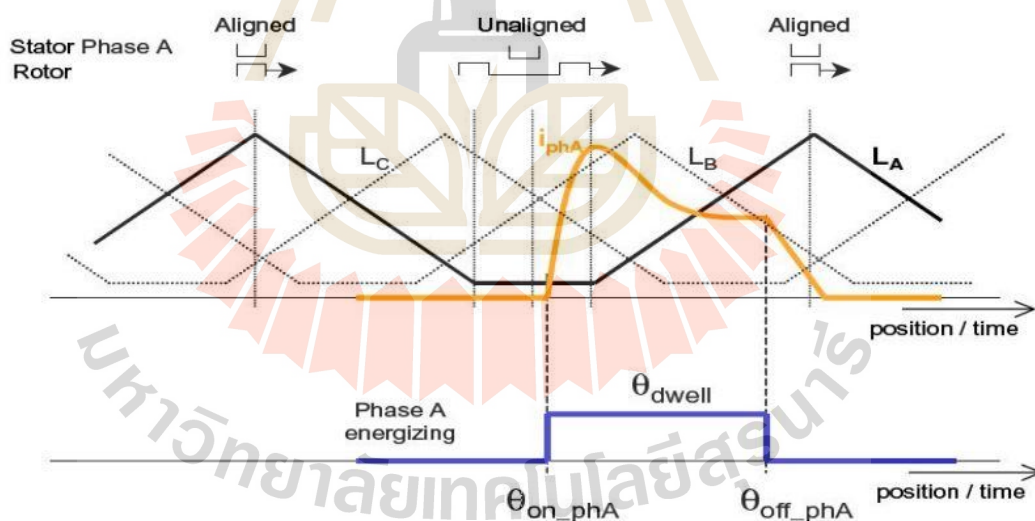
รูปที่ 3.11 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบบริดจ์ไม่สมมาตร



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเฟส กระแสเฟส และแรงดันเฟส

จะเห็นได้ว่าหลักการทำงานของวงจรควบคุมที่นำมาใช้งานจะควบคุมการทำงานในขณะที่มอเตอร์หมุนอยู่และรู้ข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์แล้วเท่านั้น ดังนั้นจำเป็นจะต้องหาวิธีในการควบคุมการทำงานในช่วงที่มอเตอร์เริ่มหมุน ก่อนที่วงจรควบคุมจะรับรู้ข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์ จากตัวตรวจวัดตำแหน่ง

การควบคุมมุมการสวิตช์ (Switching Angles) ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ก็เป็นส่วนที่สำคัญ ซึ่งต้องควบคุมการสวิตช์ให้ช่วงป้อนแรงดัน และกระแสสอดคล้องกับรูปร่างของค่าความเหนี่ยวนำในช่วงที่ทำงานของมอเตอร์ จึงต้องมีการควบคุมมีตัวแปรที่สำคัญ เช่น มุมนำกระแส (θ_{on_phA}) มุมหยุดนำกระแส (θ_{off_phA}) และช่วงของมุมนำกระแส (θ_{dwell}) รูปแบบของการสวิตช์จะเป็นดังรูปที่ 3.13 เป็นรูปคลื่นของแรงดันเฟส กระแสเฟส และค่าความเหนี่ยวนำเฟสในอุดมคติ ค่ามุมนำกระแสควรจะถูกเลือกในตำแหน่งที่ค่ากระแสกำลังเพิ่มขึ้นให้เหมาะสมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งแรงบิดที่ได้จะเป็นแรงบิดทางด้านบวก และเพื่อหลีกเลี่ยงแรงบิดในด้านลบ มุมหยุดนำกระแสก็ต้องเลือกให้หยุดนำกระแสก่อนที่ค่าความเหนี่ยวนำจะเข้าสู่ช่วงที่กำลังลดลง ซึ่งแรงบิดจะสอดคล้องกับรูปคลื่นค่าความเหนี่ยวนำและตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ค่ามุมนำกระแสที่สอดคล้องกับค่าความเหนี่ยวนำ

มอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ถ้าทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วพิกัดจะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back-emf) น้อยเมื่อเทียบกับแรงดันที่แหล่งจ่าย ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดค่ากระแสไฟฟ้าที่เฟสสูงมาก ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เฟสไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไป

โดยใช้วิธีการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ชื่อว่า วิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Current Control) เป็นวิธีที่ใช้ในการควบคุมโดยกำหนดค่ากระแสที่สร้างขึ้นไม่ให้มีค่ากระแสสูงเกินกว่าที่กำหนด โดยเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่าการควบคุมกระแส (Current Control Mode) และถ้ามอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ทำงานที่ความเร็วพิกัดของมอเตอร์จะทำให้กำลังและแรงบิดสูงสุดตามพิกัดของมอเตอร์ จะเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์ กล่าวคือค่ากระแสที่แหล่งจ่ายเกิดการหักล้างกับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับที่มีค่าสูง ซึ่งมอเตอร์จะทำงานในโหมดซิงเกิลพัลส์ (Single Pulse Mode) รูปคลื่นของกระแสจะขึ้นไปตามพัลส์ และค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสไม่เกินค่าพิกัดของกระแส ค่ามูมนำกระแสจะต้องเลือกในช่วงก่อนที่ค่าความเหนียวนาเพิ่มขึ้นหรือเลือกขยับเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น และมูมหยุดนำกระแสจะต้องหยุดนำกระแสก่อนในช่วงที่ค่าความเหนียวนาค้างถึงค่าสูงสุดเพื่อให้กระแสลดลงเป็นศูนย์หมดก่อนที่จะเข้าไปยังช่วงแรงบิดทางลบ

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์จากตำแหน่งหยุดนิ่ง มีหลายวิธีด้วยกันสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. วิธีการบังคับป้อนสัญญาณขับโดยตรงให้โรเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ทราบค่าวิธีนี้เป็นวิธีที่เริ่มใช้กันมานาน และยังคงมีการใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดไม่จำเป็นต้องมีวงจรอะไรเพิ่มเติม ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์วัดกระแส ใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีคุณลักษณะต่าง ๆ ไม่ว่าจะ เป็นมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ชนิด 6/4 หรือชนิด 8/6 โดยเริ่มต้นจากป้อนสัญญาณกระตุ้นสำหรับเฟส A และเฟส B พร้อม ๆ กันด้วยคาบเวลาที่ยาวเพียงพอต่อการตั้งขั้วโรเตอร์ที่ใกล้กับเฟส A เพื่อให้ขั้วของโรเตอร์ถูกดึงมาที่ตำแหน่งตรงกับเฟส B หลังจากขั้นตอนนี้ตำแหน่งของขั้วโรเตอร์จะมาหยุดนิ่งที่ตำแหน่งตรงขั้วสเตเตอร์ก่อน แล้วจึงเริ่มต้นหมุนมอเตอร์ตามทิศทางที่ต้องการ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเพลลาของมอเตอร์จะต้องมีการเคลื่อนที่ทุกครั้งในขณะที่เริ่มทำงาน และในบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการหมุนไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่ต้องการให้หมุนได้

2. วิธีการหาค่าตำแหน่งโรเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสของมอเตอร์ที่จะใช้งาน เริ่มจากการป้อนสัญญาณทดสอบที่ขดลวดสเตเตอร์ แล้วทำการอ่านค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดรวมทั้งคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแส ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์แต่ละตัว กล่าวคือที่ตำแหน่งของโรเตอร์แต่ละจุดมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสเพียงค่าเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้จำเป็นต้องทำการวัดความสัมพันธ์ดังกล่าวของมอเตอร์แต่ละตัวซึ่งแตกต่างกันเก็บไว้ที่หน่วยความจำก่อน และเพื่อให้เกิดความแม่นยำจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลที่มี

ประสิทธิภาพในการคำนวณสูง การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งถ้าสภาพแวดล้อมของการใช้งาน เช่น อุณหภูมิแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อาจคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์จริงของมอเตอร์ ทำให้การประมาณค่าตำแหน่งผิดพลาด นอกจากนี้คุณลักษณะของมอเตอร์ที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสบริเวณจุดวางแนว และไม่วางแนวที่แตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นความแม่นยำในการประมาณค่าตำแหน่งบริเวณนี้จึงมีปัญหาอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะใช้มากกับระบบที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยปราศจากตัววัดความเร็วรอบ

3. วิธีการประมาณตำแหน่งโดยการกระตุ้นด้วยสัญญาณคาบสั้น ๆ วิธีนี้ใช้การกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสด้วยสัญญาณคาบสั้น ๆ ซึ่งไม่ทำให้มอเตอร์เคลื่อนตัวก่อนจะเริ่มหมุนจริง โดยสัญญาณระดับมิลลิวินาทีที่ป้อนให้กับขดลวดทุกเฟสพร้อม ๆ กัน ทำให้กระแสที่แตกต่างกันในแต่ละเฟส ทำการวัดค่าของกระแสแต่ละเฟสและนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากความสัมพันธ์มากน้อยของค่ากระแสแต่ละเฟส ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความเหนี่ยวนำของเฟสนั้น ๆ โดยตรงสามารถบอกช่วงตำแหน่งของโรเตอร์หยุดนิ่งอยู่ได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ และใช้เพียงความสัมพันธ์มากน้อยของค่าของกระแสที่วัดได้เท่านั้น อย่างไรก็ตามกรณีที่น่าไปใช้กับมอเตอร์ที่มีความห่างขั้วมาก ๆ เช่น กรณีมอเตอร์ 6/4 หากใช้วิธีนี้จะสามารถคำนวณช่วงตำแหน่งได้ในระดับ 15 องศาเท่านั้น และหากมีการใช้ค่ากลางของช่วงตำแหน่งในการกำหนดเป็นค่าตำแหน่งเริ่มต้นของมุมโรเตอร์ก่อนที่จะทำการหมุน ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของมุมโรเตอร์ที่มากที่สุดประมาณ 7.5 องศา ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น สำหรับรถไฟฟ้า จะทำให้รถไม่สามารถออกตัวได้

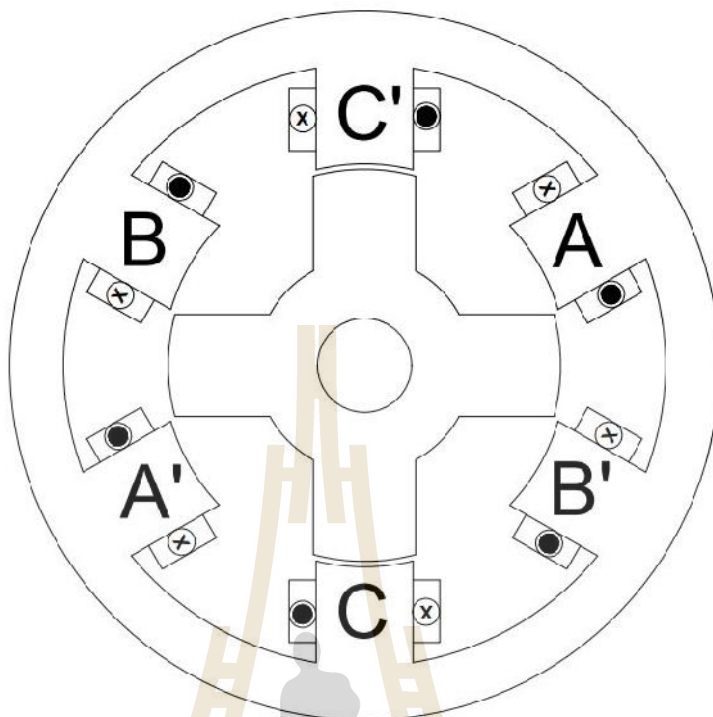
ข้อดีของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เนื่องจากการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้หลักการทำงานพื้นฐานของแม่เหล็กในการใช้แม่เหล็กดูดเหล็กจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างการทำงานที่ง่าย โดยที่เมื่อพิจารณาแกนโรเตอร์จะพบว่าเป็นแผ่นซิลิกอนที่นำมาซ้อนกันเท่านั้น ไม่มีแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดพันบนแกนโรเตอร์ ซึ่งทำให้การสร้างมอเตอร์ชนิดนี้ทำได้ง่ายและต้นทุนการผลิตต่ำ จากโครงสร้างของแกนโรเตอร์จึงสามารถปรับปรุงและพัฒนาให้เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วสูงได้ง่าย จากที่โครงสร้างไม่มีแปรงถ่านทำให้การบำรุงรักษาน้อย และคุณสมบัติของแรงบิดต่อความเร็ว (Torque/Speed characteristic) สามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้ง่ายตามความต้องการ เมื่อพิจารณาที่สเตเตอร์จะพบว่ามีขดลวดพันอยู่ที่ขั้วสเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้การระบายความร้อนทำได้ง่ายขึ้น

ข้อค้อยของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ คือ จำเป็นต้องมีการควบคุมการทำงานเพื่อควบคุมการสวิตซ์เฟสที่สเตเตอร์ให้สัมพันธ์กับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ และจำเป็นต้องมีตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์สำหรับการควบคุม และจากการทำงานของมอเตอร์มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์จะเกิดแรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple) และจะมีเสียงดังรบกวน (Acoustic noise) มีสาเหตุจากการสวิตซ์เฟสที่สเตเตอร์ อย่างไรก็ตามสามารถลดแรงบิดกระเพื่อมและเสียงดังรบกวนได้ 2 วิธี คือ การควบคุมสวิตซ์เฟสที่สเตเตอร์โดยจ่ายกระแสไปกระตุ้นในเฟสต่อไปก่อนที่เฟสกำลังถูกกระตุ้น (Overlap current) หรือการออกแบบรูปร่างค่าความเหนี่ยวนำให้มีความเหมาะสมกับมอเตอร์มากที่สุด อีกทั้งมอเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถใช้กับไฟกระแสตรงหรือไฟกระแสสลับได้โดยตรง จำเป็นต้องมีชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานร่วมด้วย

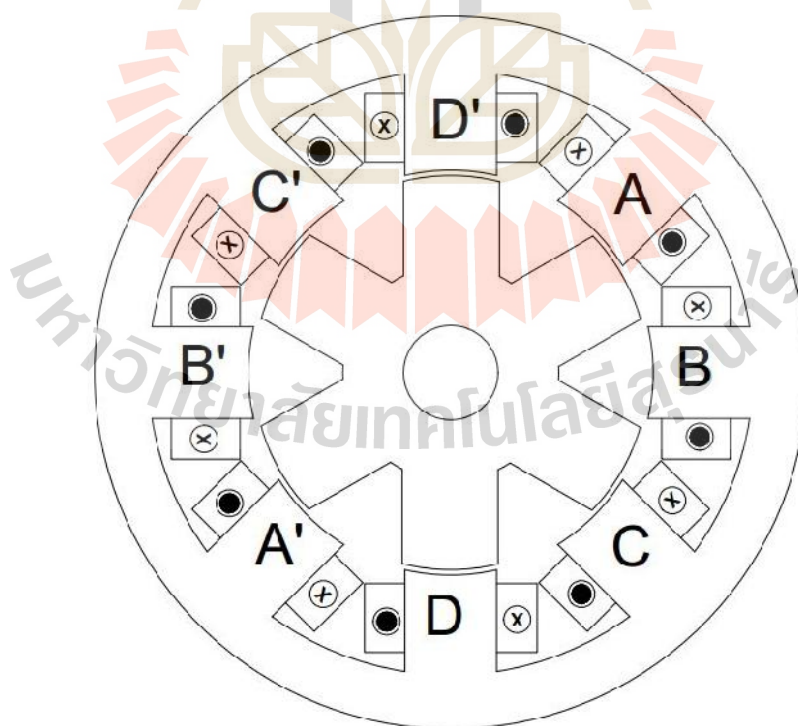
มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ไม่จำเป็นที่จะต้องป้อนสัญญาณแรงดันอินพุตที่เป็นไซน์ซอซอดอล (Sinusoidal) เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทำให้ทำงานที่แรงบิดและความเร็วสูง ๆ ได้ด้วยประสิทธิภาพที่สูง แต่จำเป็นที่จะต้องมีการตรวจวัดตำแหน่งหรือความเร็ว สำหรับการงานต้องมีชุดควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และในการออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ต้องออกแบบให้มีความกว้างของช่องอากาศ (Air gap) ระหว่างขั้วสเตเตอร์กับขั้วโรเตอร์มีขนาดที่แคบมากพอ ดังนั้นจึงต้องใช้ความแม่นยำในการสร้างสูง เพราะถ้าหากกว้างเกินไปจะเกิดปัญหาเรื่องการสั่น (Vibration) และเกิดเสียงดังรบกวนขึ้น (Acoustic noise)

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ในงานวิจัยนี้นั้นจะใช้มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ขนาด 60 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 6 ขั้ว และโรเตอร์ 4 ขั้ว มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ขนาด 75 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 8 ขั้ว และโรเตอร์ 6 ขั้ว และมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ขนาด 10 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 10 ขั้ว และโรเตอร์ 8 ขั้ว

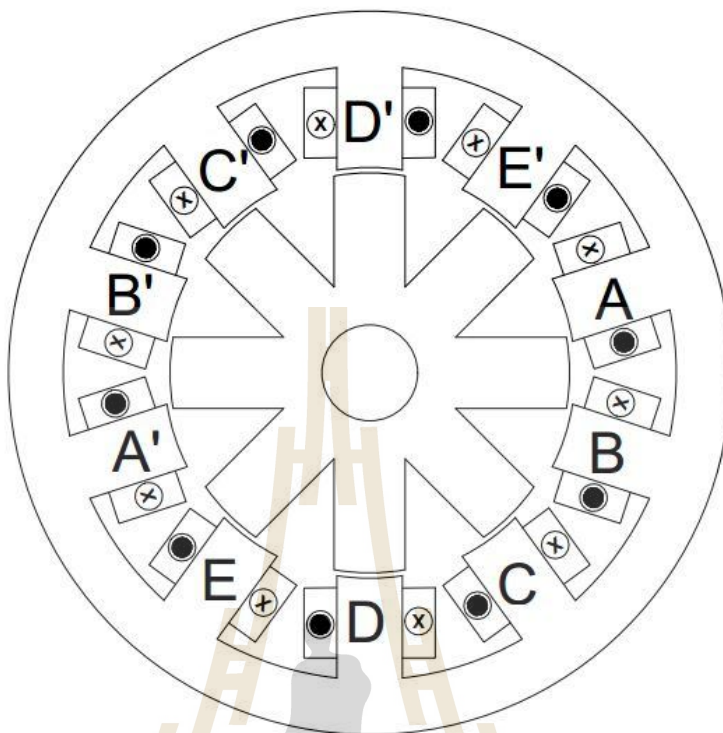
ขั้นตอนแรกจะกำหนดการวางตัวของขดลวดของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบสมมาตรโดยวางมุมเฟสห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และการพันขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละขั้วแสดงดังรูปที่ 3.14 โดยขดลวดทั้ง 6 ขดจะต่ออนุกรมกันระหว่างขดที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 ขดต่อ 1 เฟส ส่วนการพันขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส และ 5 เฟสจะแสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการวางขดลวดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส

3.6 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็ก (B) จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.11)

$$B = \mu \cdot H \quad (3.11)$$

- เมื่อ μ คือ ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) โดยที่ $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
 μ_0 คือ ความซาบซึมได้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
 μ_r คือ ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวนำ
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

จากกฎของเกาส์ (Gauss's law) คุณสมบัติของสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ในรูปของตัวดำเนินการ ∇ ซึ่งเป็นตัวดำเนินการเชิงเวกเตอร์ เรียกว่า ตัวดำเนินการเดล (Del operator) ได้ดังสมการที่ (3.12)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.12)$$

จากทฤษฎีบทของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz theorem) สนามแม่เหล็กสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Vector potential : \mathbf{A}) ได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.13)$$

เมื่อต้องการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก เราจะเริ่มจากการหาค่าสนามค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก่อน แล้วจึงมาคำนวณสนามแม่เหล็กโดยการเคิร์ล (Curl) ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อเวลา จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) แสดงดังสมการที่ (3.14)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.14)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.14) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.15)$$

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามไฟฟ้าที่แปรตามเวลา เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (3.16)$$

เมื่อ J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density)

J_e คือ ความหนาแน่นของกระแสวน (Eddy current density) โดยที่

$$J_e = \dagger \cdot E \quad (3.17)$$

โดยที่ \dagger คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.18)

$$J_e = -\dagger \cdot \frac{\partial}{\partial t} A \quad (3.18)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.11) (3.13) และ (3.18) มาแทนลงในสมการที่ (3.16) จะได้

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sim} \nabla \times A \right) + \dagger \frac{\partial}{\partial t} A = J_0 \quad (3.19)$$

จากสมบัติของ A พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ คือ $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.20)

$$\nabla^2 A - \sim \dagger \frac{\partial}{\partial t} A = -\sim J_0 \quad (3.20)$$

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ไม่ได้ขึ้นกับเวลา t โดยที่

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \cdot i + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \cdot j + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \cdot k \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.20) จึงสามารถแสดงด้วยสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็ก เมื่อพิจารณามอเตอร์ในระบบ 3 มิติตามระนาบพิกัด xyz ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation : PDE) อันดับสอง

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\dots \cdot J_0 \quad (3.22)$$

หรือสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(X \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(X \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(X \frac{\partial A}{\partial z} \right) + J_0 = 0 \quad (3.23)$$

โดยที่ A คือ ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

X คือ สภาพต้านทานของแม่เหล็ก โดยที่ $X = \frac{1}{\mu}$

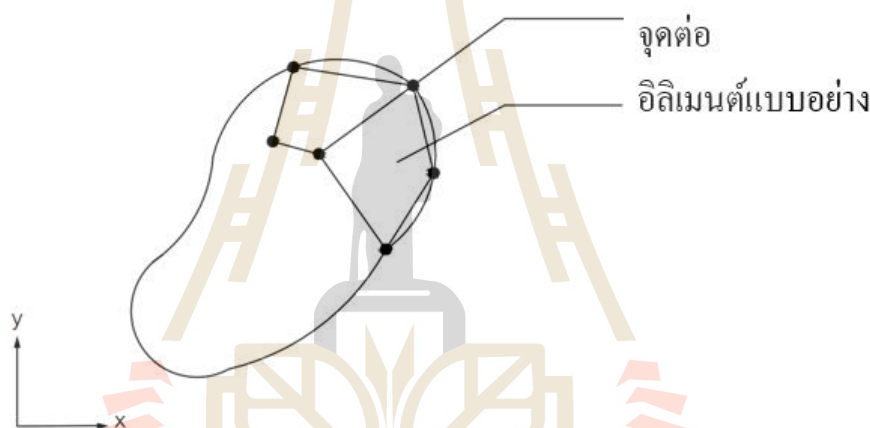
3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่มีความนิยมมาก ปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมหลายสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม่นยำและเที่ยงตรงแม้กระทั่งปัญหาที่เป็นสถานะชั่วคราว (Transient state) หรือสามารถพิจารณาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นได้ (Nonlinear) ซึ่งปัญหาวิศวกรรมส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ และมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีแบบประมาณเนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยแบบประมาณนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) โดยการแบ่งรูปร่างของปัญหาที่สนใจออกเป็นพื้นที่ตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้จะมีจุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาเราจะไม่ทราบค่าเนื่องจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อ ถ้าในกรณีที่ใช้ตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็กจะมีจำนวนจุดต่อมาก จะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากไปด้วย แต่ข้อเสียของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม คือ ต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และไม่เหมาะกับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน ด้วยสาเหตุข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการหาผลเฉลยแบบประมาณอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้หาผลเฉลยแบบประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์

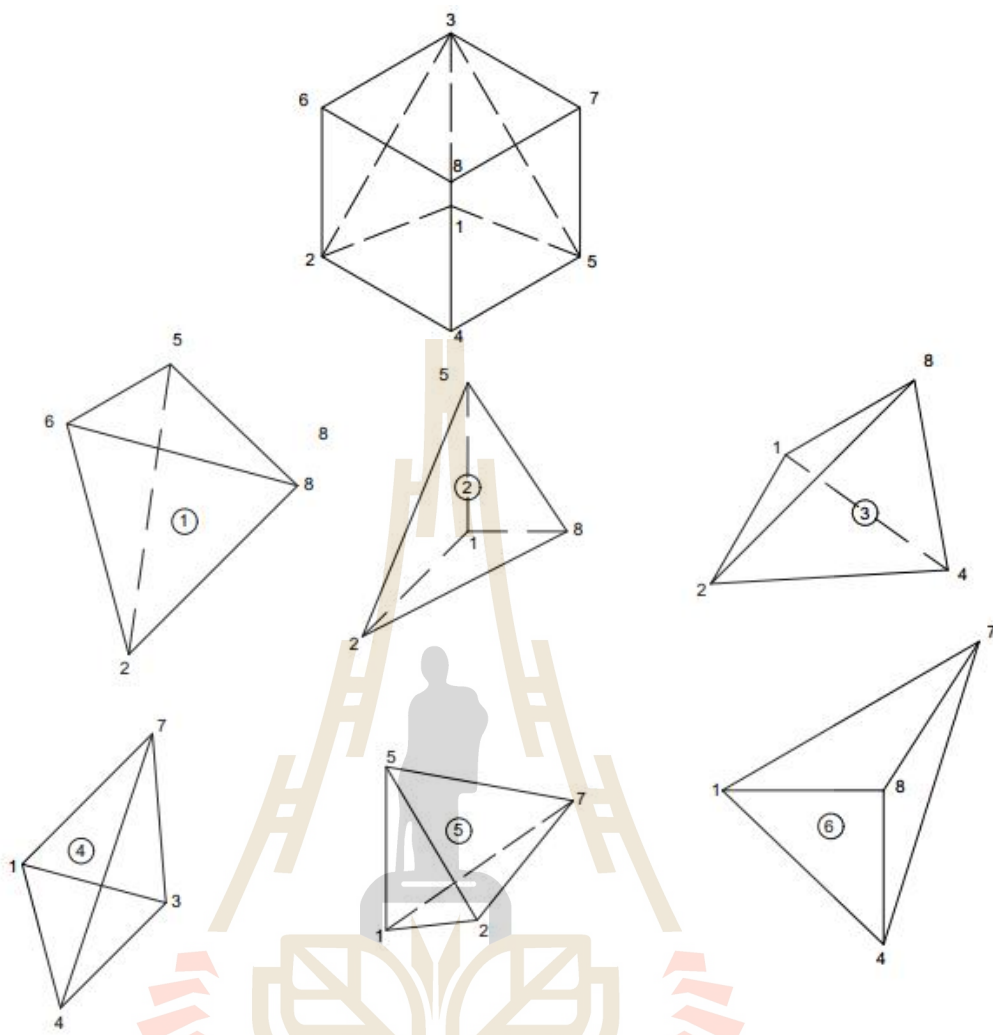
โดยที่อิเลเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่า อิเลเมนต์ โดยที่การกระจัดและแรงภายในของแต่ละอิเลเมนต์ ณ จุดต่ออิเลเมนต์จะต่อ โยกันจะต้องเข้ากันอย่างสมดุล ซึ่งอิเลเมนต์ต่าง ๆ นี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของปัญหาว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับงานจริงมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (Octahedron) หรือรูปทรงพีรามิด (Pyramids) ก็ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อิเลเมนต์รูปทรงสี่หน้า ซึ่งขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.17 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาที่ต้องการทราบผลลัพธ์ออกเป็นอิเลเมนต์ย่อยให้กับระบบ โดยที่แต่ละอิเลเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิเลเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ในระนาบ xyz) โดยเลือกใช้อิเลเมนต์รูปทรงสี่หน้า เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนจุดต่อน้อยที่สุด อีกทั้งสามารถประกอบกันเป็นรูปทรงอื่น ๆ ได้ โดยค่าผลเฉลยแบบประมาณที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอิเลเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา ตัวอย่างรูปทรงที่ประกอบด้วยอิเลเมนต์รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิเลเมนต์ 8 จุดต่อ สำหรับข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องการทราบ คือ หมายเลขของอิเลเมนต์ และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันของแต่ละจุดต่อ สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 อลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าที่ประกอบด้วย 6 อลิเมนต์ 8 จุดต่อ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนต์

หมายเลข อิลิเมนต์	หมายเลขจุดต่อ			
	จุดต่อ i	จุดต่อ j	จุดต่อ k	จุดต่อ l
1	2	8	5	6
2	1	2	8	5
3	1	2	4	8
4	1	3	4	7
5	1	7	8	5
6	1	8	4	7

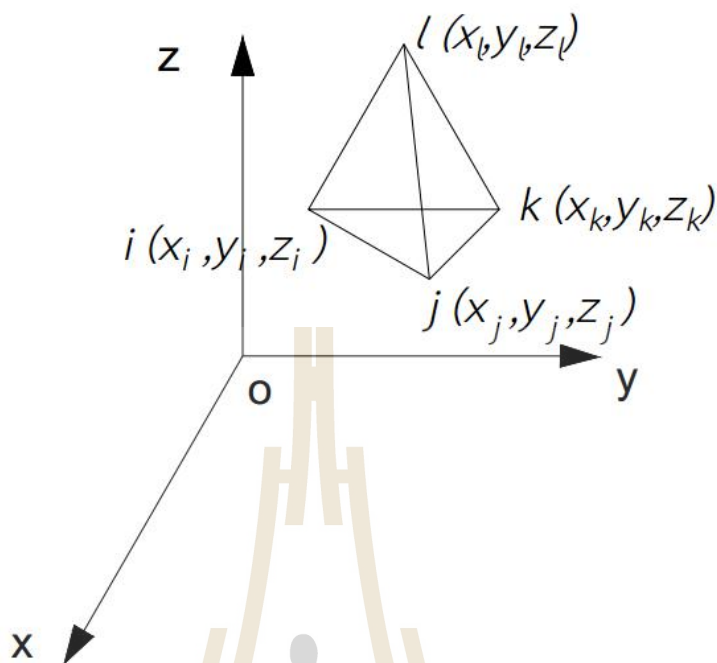
ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

หมายเลขจุดต่อ	พิกัดแกน x	พิกัดแกน y	พิกัดแกน z
1	0	0	0
2	0	0	1
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	1	1	1

ขั้นตอนที่ 2 เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างโดยวิธีของกาลेरคิน (Galerkin) ซึ่งได้ผลเฉลยของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (Element interpolation function) ของศักย์เชิงเวกเตอร์ของแม่เหล็ก ในกรณีอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 จุดต่อที่มีตัวห้อย i, j, k, l ซึ่งการประมาณค่าภายในอิลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.18 ตำแหน่งของจุดต่อ (x_n, y_n, z_n) เมื่อ $n = i, j, k, l$ เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า A โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์ $A(x, y, z)$ เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (3.24)

$$A = r + s \cdot x + x \cdot y + \} \cdot z \quad (3.24)$$

โดยที่ $r, s, x, \}$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.19 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$A(x_i, y_i, z_i) = \Gamma + S \cdot x_i + X \cdot y_i + \Psi \cdot z_i$$

$$A(x_j, y_j, z_j) = \Gamma + S \cdot x_j + X \cdot y_j + \Psi \cdot z_j$$

$$A(x_k, y_k, z_k) = \Gamma + S \cdot x_k + X \cdot y_k + \Psi \cdot z_k$$

$$A(x_l, y_l, z_l) = \Gamma + S \cdot x_l + X \cdot y_l + \Psi \cdot z_l$$

เมื่อนำค่า Γ, S, X, Ψ ที่ได้จากการแก้สมการข้างต้น แทนค่ากลับลงไปนสมการที่ (3.24) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของอิลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (3.25)

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (3.25)$$

โดยที่ N_i, N_j, N_k, N_l คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_i, A_j, A_k, A_l คือผลลัพธ์ของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กที่แต่ละจุดต่อ i, j, k, l ของอิลิเมนต์ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.26)

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y + d_n z}{6V} \quad (3.26)$$

และค่าสัมประสิทธิ์หาได้จาก

$$a_i = x_l (y_j z_k - y_k z_j) + x_k (y_l z_j - y_j z_l) + x_j (y_k z_l - y_l z_k)$$

$$a_j = x_l (y_k z_i - y_i z_k) + x_k (y_i z_l - y_l z_i) + x_i (y_l z_k - y_k z_l)$$

$$a_k = x_l (y_i z_j - y_j z_i) + x_j (y_l z_i - y_i z_l) + x_i (y_j z_l - y_l z_j)$$

$$a_l = x_k (y_j z_i - y_i z_j) + x_j (y_i z_k - y_k z_i) + x_i (y_k z_j - y_j z_k)$$

$$b_i = y_l (z_k - z_j) + y_k (z_j - z_l) + y_j (z_l - z_k)$$

$$b_j = y_l (z_i - z_k) + y_i (z_k - z_l) + y_k (z_l - z_i)$$

$$b_k = y_l (z_j - z_i) + y_j (z_i - z_l) + y_i (z_l - z_j)$$

$$b_l = y_k (z_i - z_j) + y_i (z_j - z_k) + y_j (z_k - z_i)$$

$$c_i = x_l (z_j - z_k) + x_j (z_k - z_l) + x_k (z_l - z_j)$$

$$c_j = x_l (z_k - z_i) + x_k (z_i - z_l) + x_i (z_l - z_k)$$

$$c_k = x_l (z_i - z_j) + x_i (z_j - z_l) + x_j (z_l - z_i)$$

$$c_l = x_k (z_j - z_i) + x_j (z_i - z_k) + x_i (z_k - z_j)$$

$$d_i = x_l (y_k - y_j) + x_k (y_j - y_l) + x_j (y_l - y_k)$$

$$d_j = x_l (y_i - y_k) + x_i (y_k - y_l) + x_k (y_l - y_i)$$

$$d_k = x_l (y_j - y_i) + x_j (y_i - y_l) + x_i (y_l - y_j)$$

$$d_l = x_k (y_i - y_j) + x_i (y_j - y_k) + x_j (y_k - y_i)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิเลเมนต์ ซึ่งหาได้จากการดีเทอร์มิแนนท์ของค่าสัมประสิทธิ์

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (3.27)$$

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของอิเลเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา และเมื่อดำเนินไปจนสุดขั้นตอนจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.28)

$$[K]\{A\} = \{F\} \quad (3.28)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

โดยที่ $[K]$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ในอิเลเมนต์

$[A]$ คือ เมทริกซ์ของตัวที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

จากสมการอิเลเมนต์ข้างต้นจำเป็นต้องสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิเลเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.29) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.30)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1 \times n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2 \times n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3 \times n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n \times 1} & K_{n \times 2} & K_{n \times 3} & \cdots & K_{n \times n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

จากสมการที่ (3.30) เมทริกซ์ $[K]_{n \times n}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ เมทริกซ์ $[K]_{n \times n}$ มีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ(Banded matrix)

ขั้นตอนที่ 5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการ เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่จุดต่อต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งได้แก่ วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็ก และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่จะนำมาประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก หรือสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพรวมถึงการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางปัญหาที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหารวมของระบบขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่ได้ และสามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระ อย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดรูปทรงสี่หน้าสำหรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำได้ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดปริมาณของกริดบริเวณที่ไม่จำเป็นเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการหาผลเฉลย แต่ยังสามารถรักษาความแม่นยำของผลเฉลยได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการนี้จะมีจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังสามารถจำลองผลระบบที่มีความแตกต่างกันทางด้านวัสดุได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในการแก้ปัญหาเมื่อพิจารณาในสภาวะคงตัว เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวภายในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบขดลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งค่าของสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$B = \mu \cdot H \quad (4.1)$$

เมื่อ μ คือ ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) โดยที่ $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
 μ_0 คือ ความซาบซึมได้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
 μ_r คือ ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุตัวนำ
 H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

จากทฤษฎีบทของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz theorem) สนามแม่เหล็กสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Vector potential : A) ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$B = \nabla \times A \quad (4.2)$$

เมื่อต้องการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก เราจะเริ่มจากการหาค่าสนามค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก่อน แล้วจึงมาคำนวณสนามแม่เหล็กโดยการเคิร์ล (Curl) ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) แสดงดังสมการที่ (4.3)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.3)$$

แทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.3) จะได้เป็นสมการที่ (4.4)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times A \quad (4.4)$$

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามไฟฟ้าที่แปรตามเวลา เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times E = J_0 + J_e \quad (4.5)$$

เมื่อ J_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density)

J_e คือความหนาแน่นของกระแสวน (Eddy current density) โดยที่

$$J_e = \dagger \cdot E \quad (4.6)$$

โดยที่ \dagger คือสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) และ (4.6) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสวนกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

$$J_e = -\dagger \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.7)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.7) มาแทนลงในสมการที่ (4.5) จะได้

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sim} \nabla \times A \right) + \dagger \frac{\partial A}{\partial t} = J_0 \quad (4.8)$$

จากสมบัติของ A พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ คือ $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (4.9)

$$\nabla^2 A - \sim \dagger \frac{\partial A}{\partial t} = -\sim J_0 \quad (4.9)$$

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ไม่ได้ขึ้นกับเวลา t โดยที่

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \cdot i + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \cdot j + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \cdot k \quad (4.10)$$

เมื่อพิจารณามอเตอร์ในระบบ 3 มิติตามระนาบพิกัด xyz ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu \cdot J_0 \quad (4.11)$$

หรือสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial A}{\partial z} \right) + J_0 = 0 \quad (4.12)$$

โดยที่ A คือ ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

X คือ สภาพต้านทานของแม่เหล็ก โดยที่ $X = \frac{1}{\mu}$

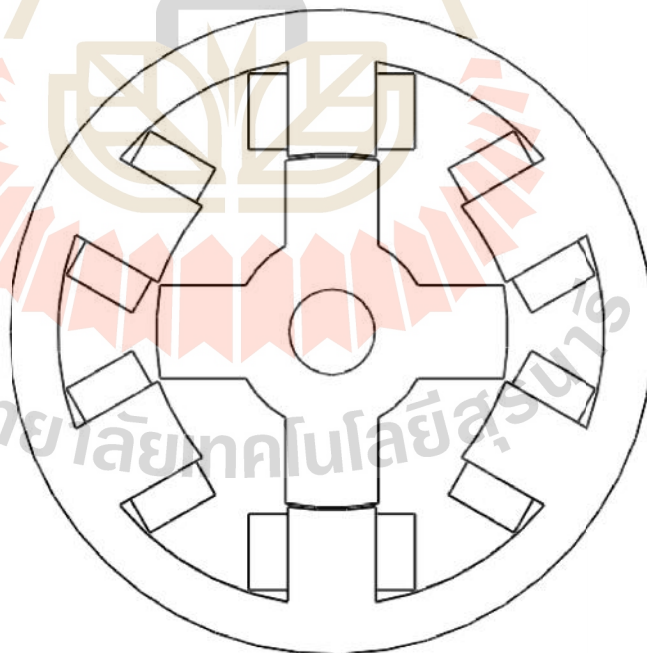
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ดังที่แสดงในสมการที่ (4.12) สำหรับปัญหาในรูปร่าง 3 มิติที่ซับซ้อนนั้นใช้วิธีการหาผลเฉลยวิธีผลต่างสืบเนื่องได้ยาก จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แทน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

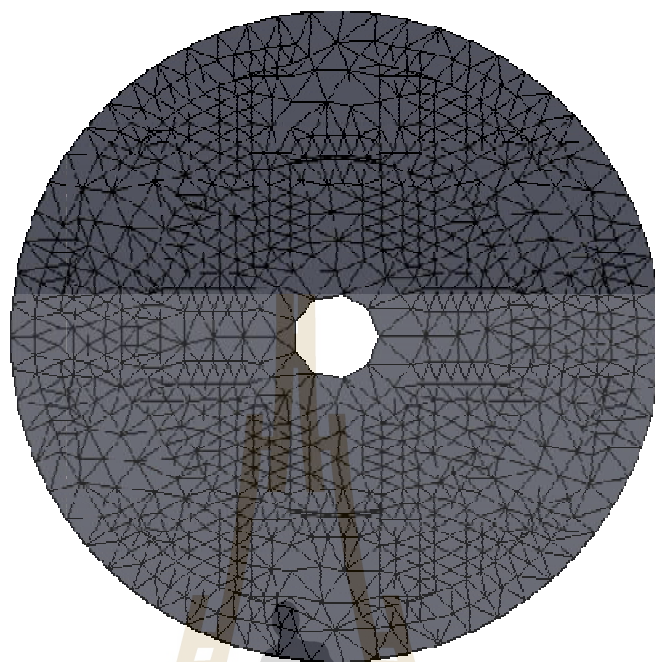
4.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

สำหรับปัญหาในแบบ 3 มิติ เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์นำออกเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพท์แบบประมาณ ตำแหน่งใด ๆ บนเอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ย่อยของมอเตอร์ที่ต้องการศึกษา

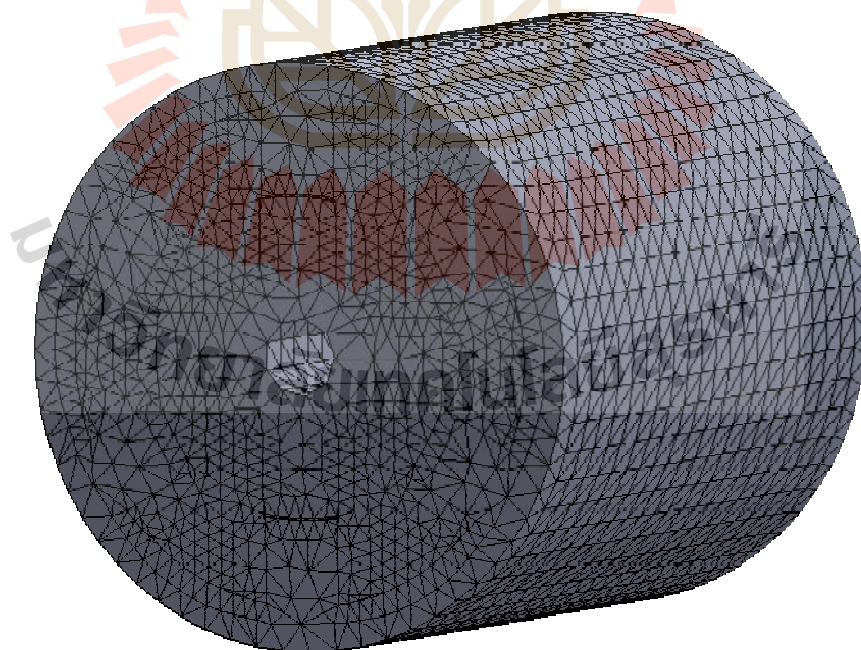
โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solidwork จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นอิเลเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะมีจำนวนจุดต่อและอิเลเมนต์ที่ใช้ภายในระบบดังนี้ มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสมีจำนวน 43,879 จุดต่อ และ 255,007 อิเลเมนต์ มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสมีจำนวน 42,722 จุดต่อ และ 248,572 อิเลเมนต์ และมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟสมีจำนวน 34,032 จุดต่อ และ 196,428 อิเลเมนต์ ในงานวิจัยนี้พิจารณามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ขนาด 60 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 6 ขั้ว และโรเตอร์ 4 ขั้ว มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ขนาด 75 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 8 ขั้ว และโรเตอร์ 6 ขั้ว และมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ขนาด 10 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ 10 ขั้ว และโรเตอร์ 8 ขั้ว โมเดลที่ใช้ในการจำลองผลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 4.4 และ 4.7 ตามลำดับ พื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์อิเลเมนต์จะครอบคลุมทั้งตัวมอเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.2 4.5 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงการแบ่งอิเลเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อแบบเชิงเส้น (Linear tetrahedral element) ตลอดพื้นที่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ศึกษาด้วยโปรแกรม Solidwork สำหรับตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.3 4.6 และ 4.9 ตามลำดับ



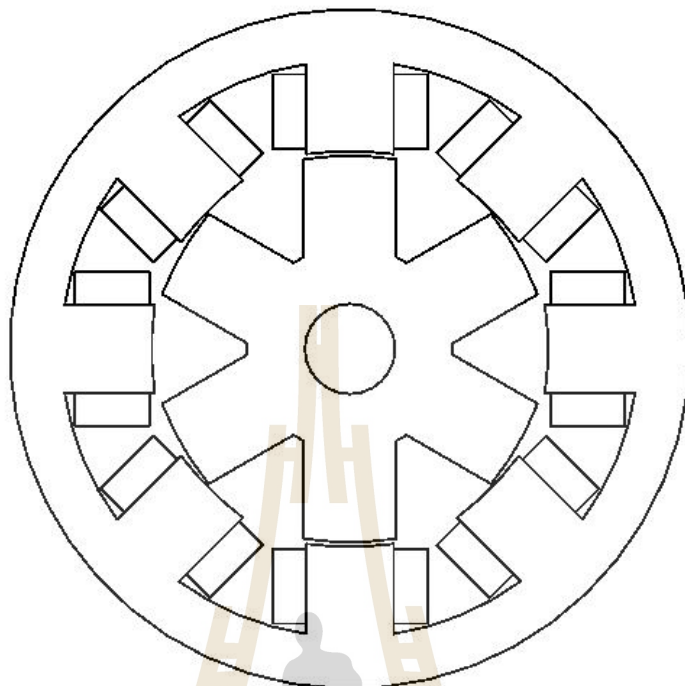
รูปที่ 4.1 โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล



รูปที่ 4.2 การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟสออกเป็นอีลิเมนต์



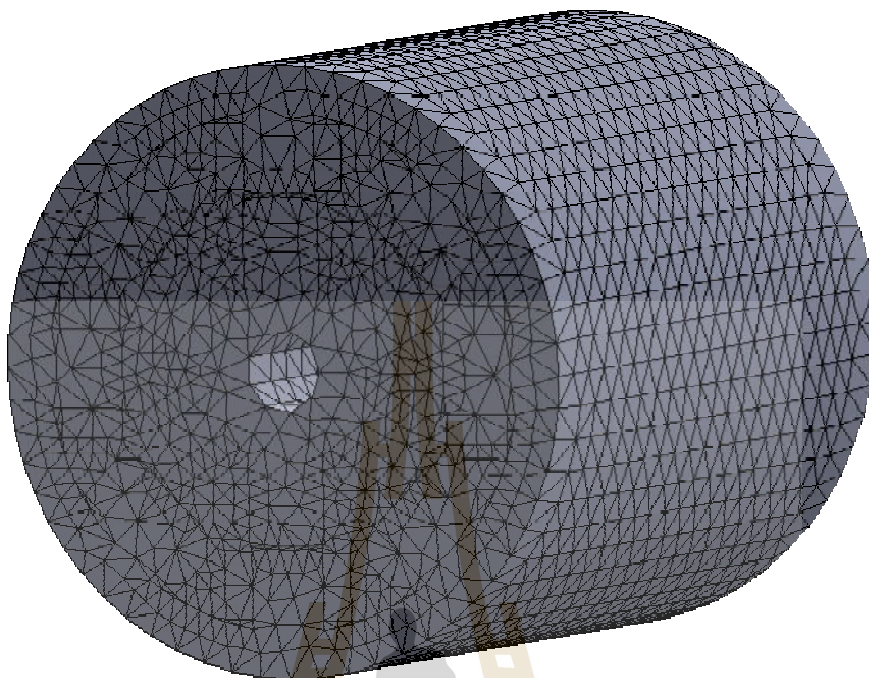
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟสออกเป็นอีลิเมนต์แบบ 3 มิติ



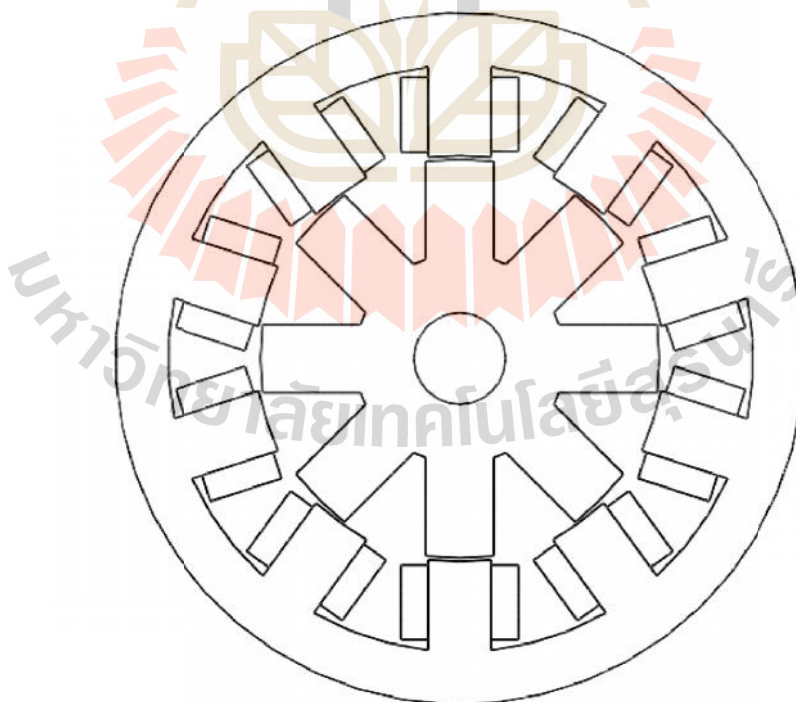
รูปที่ 4.4 โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล



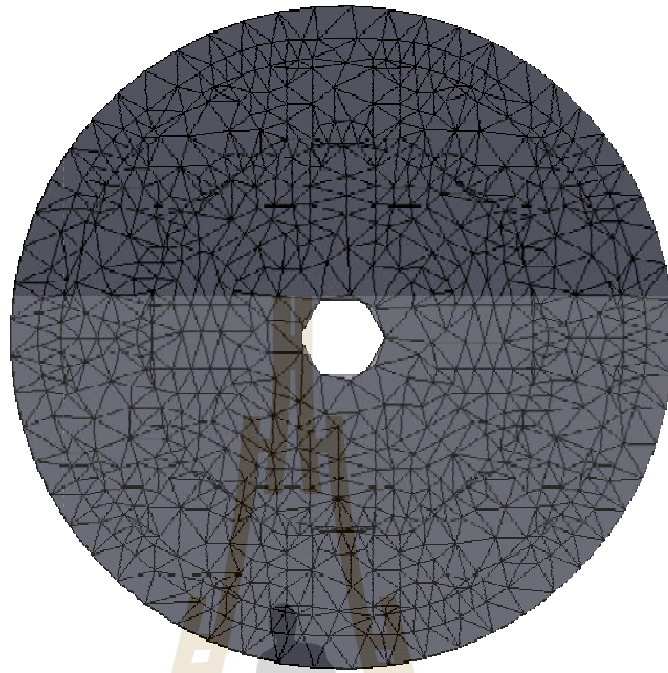
รูปที่ 4.5 การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟสออกเป็นอีลิเมนต์



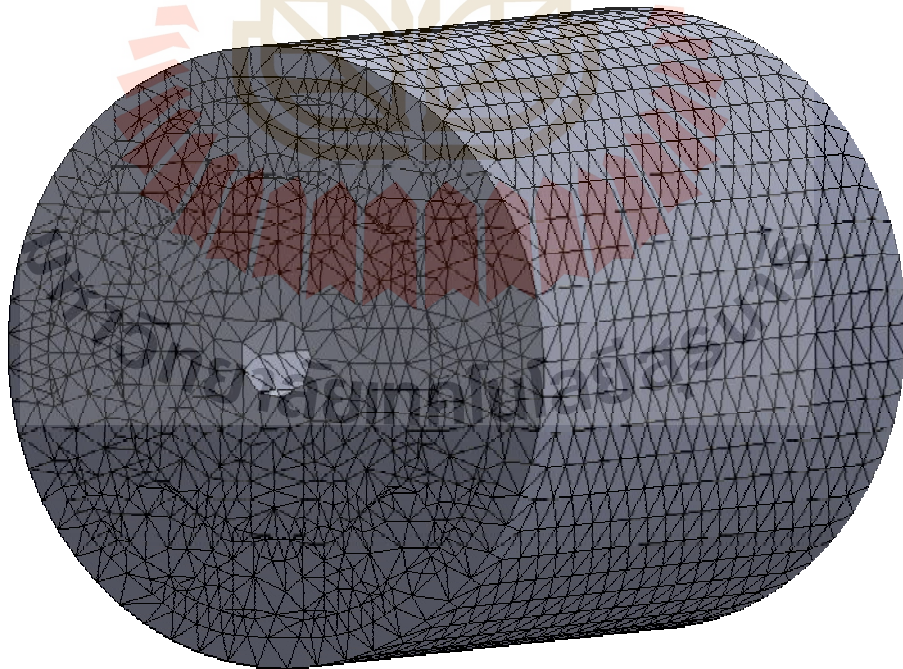
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสออกเป็นอีลิเมนต์แบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.7 โมเดลต้นแบบของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล



รูปที่ 4.8 การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสออกเป็นอิลิเมนต์



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟสออกเป็นอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

การเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างโดยวิธีของกาเลอร์กิน (Galerkin) จะได้ผลเฉลยของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ของศักย์เชิงเวกเตอร์ของแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.13)

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (4.13)$$

โดยที่ N_i, N_j, N_k, N_l คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

A_i, A_j, A_k, A_l คือ ผลลัพธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่แต่ละจุดต่อ i, j, k, l ของอิลิเมนต์ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.14)

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y + d_n z}{6V} \quad (4.14)$$

และค่าสัมประสิทธิ์หาได้จาก

$$a_i = x_l (y_j z_k - y_k z_j) + x_k (y_l z_j - y_j z_l) + x_j (y_k z_l - y_l z_k)$$

$$a_j = x_l (y_k z_i - y_i z_k) + x_k (y_i z_l - y_l z_i) + x_i (y_l z_k - y_k z_l)$$

$$a_k = x_l (y_i z_j - y_j z_i) + x_j (y_l z_i - y_i z_l) + x_i (y_j z_l - y_l z_j)$$

$$a_l = x_k (y_j z_i - y_i z_j) + x_j (y_i z_k - y_k z_i) + x_i (y_k z_j - y_j z_k)$$

$$b_i = y_l (z_k - z_j) + y_k (z_j - z_l) + y_j (z_l - z_k)$$

$$b_j = y_l (z_i - z_k) + y_i (z_k - z_l) + y_k (z_l - z_i)$$

$$b_k = y_l (z_j - z_i) + y_j (z_i - z_l) + y_i (z_l - z_j)$$

$$b_l = y_k (z_i - z_j) + y_i (z_j - z_k) + y_j (z_k - z_i)$$

$$c_i = x_l(z_j - z_k) + x_j(z_k - z_l) + x_k(z_l - z_j)$$

$$c_j = x_l(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_l) + x_i(z_l - z_k)$$

$$c_k = x_l(z_i - z_j) + x_i(z_j - z_l) + x_j(z_l - z_i)$$

$$c_l = x_k(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_k) + x_i(z_k - z_j)$$

$$d_i = x_l(y_k - y_j) + x_k(y_j - y_l) + x_j(y_l - y_k)$$

$$d_j = x_l(y_i - y_k) + x_i(y_k - y_l) + x_k(y_l - y_i)$$

$$d_k = x_l(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_l) + x_i(y_l - y_j)$$

$$d_l = x_k(y_i - y_j) + x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i)$$

และ V คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิเลเมนต์หาได้จากการดีเทอร์มิแนนท์ของสัมประสิทธิ์ ดังสมการที่ (4.15)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอิเลเมนต์

การสร้างสมการของอิเลเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด และทำการอินทิเกรตรอบปริมาตร V ดังแสดงในสมการที่ (4.16)

$$\int_V \left(N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right] \right) dV + \int_V (N_n J_o) dV = 0 \quad (4.16)$$

โดยเมื่อดำเนินการไปจนสุดขั้นตอนจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของสมการของอิเลเมนต์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$[K]\{A\} = \{F\} \quad (4.17)$$

โดยที่ $[K]$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ในอิลิเมนต์
 $\{A\}$ คือ เมทริกซ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

การสร้างสมการของอิลิเมนต์ด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการ คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่จะได้ค่าไม่เท่ากับศูนย์แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.18)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) + J_0 = R \quad (4.18)$$

โดยที่ R คือ เศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยแบบประมาณ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาเลอร์กินและซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function: W_n) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.19)$$

สำหรับอิลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีจุดที่ไม่ทราบค่า 4 จุดในการคำนวณ ได้แก่ จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดต่อที่ไม่ทราบค่า นั้นหมายถึงในสมการที่ (4.19) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) เมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.18) ลงในสมการที่ (4.19) จะได้

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) + J_0 \right) dV = 0 \quad (4.20)$$

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right) dV + \int_V (N_n \cdot J_0) dV = 0 \quad (4.21)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (4.21) สำหรับพจน์แรกเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองจะใช้วิธีการอินทิเกรตที่ละส่วน (Integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V (\ddot{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{V}) dV = \int_{\ddagger} u (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\ddagger - \int_V (\ddot{\mathbf{e}} u \cdot \mathbf{V}) dV \quad (4.22)$$

ซึ่ง \ddagger คือขอบเขตของอิลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.22) และพจน์แรกของสมการที่ (4.21) จะได้

$$u = N_n$$

$$\ddot{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right)$$

$$\ddot{\mathbf{e}} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} = x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \mathbf{i} + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \mathbf{j} + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \mathbf{k}$$

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอิลิเมนต์ \ddagger

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}$$

ดังนั้น $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z$

$$u (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) = N_n \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z \right)$$

$$\ddot{\mathbf{e}} \cdot u = \frac{\partial N_n}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\dot{e}u \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial N_n}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_n}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_n}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (4.21) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} & \int_{\ddagger} N_n \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z \right) d\ddagger \\ & - \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_n}{\partial y} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_n}{\partial z} \left(x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right) dV \\ & + \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dV = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4.23) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลิเมนต์ \ddagger โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าคงที่ตลอดบริเวณขอบของปริมาตรที่ศึกษา ซึ่งหมายถึงไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณขอบนอกของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ (ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านบริเวณขอบเท่ากับศูนย์) จึงพิจารณาให้บริเวณขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการที่ (4.24) ดังนั้น จากสมการที่ (4.23) จึงลดรูปตามสมการที่ (4.25) และสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ของสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ดังสมการที่ (4.26)

$$A(x, y, z) = 0 \quad \text{โดยที่ } (x, y, z) \in \ddagger \quad (4.24)$$

$$\int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dV = \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dV \quad (4.25)$$

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dV = \int_V [N]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0 dV \quad (4.26)$$

และจากสมการที่ (4.13) จะได้ลักษณะการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} แบบประมาณในแต่ละอิลิเมนต์เป็น

$$A(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงกลายมาเป็น

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [A]_{4 \times 1} = \int_V [N]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0 dV \quad (4.27)$$

หรือเขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$[K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (4.25)$$

โดย $[K]_{4 \times 4}$ คือ เมทริกซ์ความขยับซึ่งได้ของแม่เหล็ก

$\{F\}_{4 \times 1}$ คือ โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง

พิจารณาเมทริกซ์ความขยับซึ่งได้ของแม่เหล็ก $[K]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \times \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (4.26)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในในสมการที่ (4.14) จะได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V}$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V}$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ แทนความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นลงในสมการที่ (4.26) จะได้

$$[K]_{4 \times 4} = x \int \left(\frac{b_n b_m}{6V 6V} + \frac{c_n c_m}{6V 6V} + \frac{d_n d_m}{6V 6V} \right) dx dy dz \quad \text{เมื่อ } n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.27)$$

$$= \frac{x}{36V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz$$

$$= \frac{x}{36V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{x}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ \text{Sym} & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

โดยที่ $x = \frac{1}{\mu}$ คือ สภาพต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic reluctivity)

พิจารณาโหนดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง $\{F\}_{4 \times 1}$

$$\{F\}_{4 \times 1} = \int_V [N]_{4 \times 1} J_0 dV \quad (4.29)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4.19) จึงกลายเป็นสมการที่ (4.30)

$$\{F\}_{4 \times 1} = J_0 \int_V N_n dV \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.30)$$

สมการที่ (4.30) สามารถคำนวณได้โดยใช้การอินทิเกรตรอบปริมาตรขอบเขตทั้งหมดของอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า ได้ดังสมการที่ (4.31)

$$\int_V N_1^a N_2^b N_3^c N_4^d dV = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} dV \quad (4.31)$$

จากสมการที่ (4.30) เมื่อพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้าโดย $a = 1, b = c = d = 0$ จะได้ว่า

$$\int_V N_1^1 dV = \frac{1!0!0!0!}{(1+0+0+0+3)!} \cdot 6V = \frac{V}{4}$$

ซึ่งจุดต่อที่เหลือของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4.30) จะได้โพลเดกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเองแสดงได้ดังนี้

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

ขั้นตอนนี้จะนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากหัวข้อที่ 4.3.1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ ก็จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมที่ประกอบด้วยเมตริกซ์ขนาด $n \times n$ ดังนั้นจะได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของงานวิจัยนี้ คือ

$$[K]_{n \times n} \{A\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1 \times n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2 \times n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3 \times n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n \times 1} & K_{n \times 2} & K_{n \times 3} & \cdot & \cdot & K_{n \times n} \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{Bmatrix}_{n \times 1} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{Bmatrix}_{n \times 1} \quad (4.33)$$

เมื่อ $[K]$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ในอิลิเมนต์
 $[A]$ คือ เมทริกซ์ของตัวที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

4.3.4 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมทั้งหาค่าผลเฉลย

ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบพร้อมทั้งหาค่าผลเฉลย โดยงานวิจัยนี้มีการกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลา และขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน

4.3.5 คำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการทราบ

คำนวณหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปโดยผลเฉลยของมอเตอร์สวิตซ์รีล็คแดนซ์จากการดำเนินการด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในงานวิจัยนี้เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่จุดต่อต่าง ๆ แล้วจะสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กันได้ โดยสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($B = \nabla \times A$)

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่จุดต่อต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กันได้ เริ่มจากคำนวณค่าสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณามอเตอร์ในแบบ 3 มิติตามระนาบพิกัด x, y, z โดยป้อนความหนาแน่นของกระแสภายนอก (J_0) ในแนวแกน z จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) แสดงด้วยสมการที่ (4.35) และ (4.36) ตามลำดับ

$$B = \nabla \times A = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) k \quad (4.34)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (4.35)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V}\right) \quad (4.36)$$

แปลงระบบพิกัดจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (Radial flux density : B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (Tangential flux density : B_t) เมื่อพิจารณาที่มีมุม w เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.37) และ (4.38) ตามลำดับ

$$B_r = B_x \cos w + B_y \sin w \quad (4.37)$$

$$B_t = -B_x \sin w + B_y \cos w \quad (4.38)$$

เมื่อคำนวณหาค่า B_r และ B_t จะใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะมีผลต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์โดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (4.39)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (4.40)$$

สมการที่ (4.39) และ (4.40) ค่า F_r และ F_t คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี และแนวสัมผัสตามลำดับ หากพิจารณาการเกิดแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุนเรานำแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสมาพิจารณา

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เมื่อพิจารณามอเตอร์ในสภาวะคงตัวซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค้างของกาเลอร์คิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผล ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 5

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและการวิเคราะห์คุณลักษณะ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ คำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยที่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการจำลองผลตามบทที่ 5 เป็นมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นผลเฉลยโดยละเอียดของปัญหา โดยโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB ที่พัฒนาขึ้น

5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

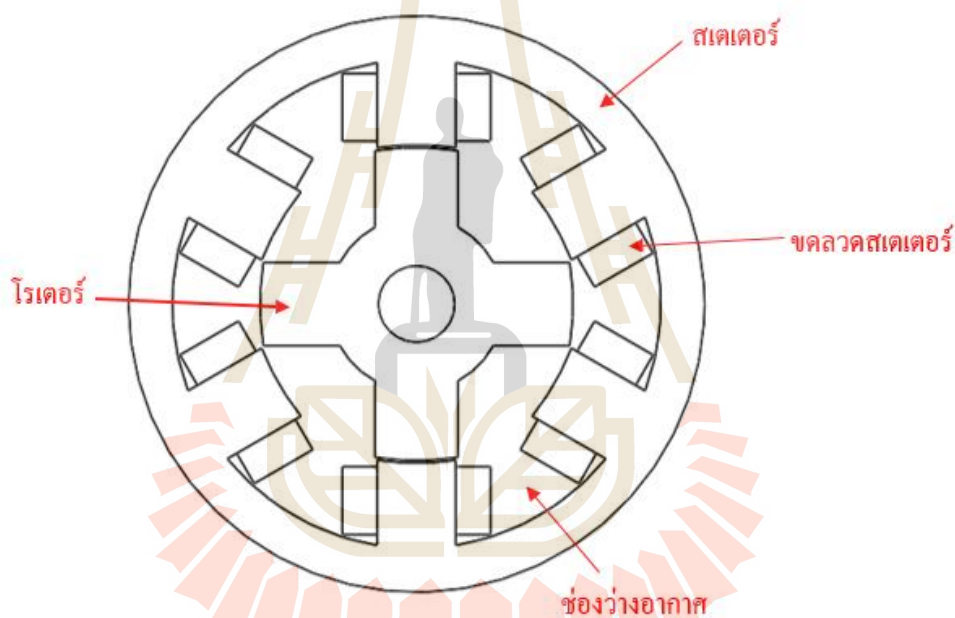
การคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนของโปรแกรมจำลองผลที่จะกล่าวถึงต่อไป งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดจากโปรแกรม Solidwork ที่ทำให้เราทราบตำแหน่งจุดต่อ และเอลิเมนต์ที่จะนำมาป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และคุณลักษณะต่าง ๆ ในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงขั้นตอนในแต่ละส่วนจะอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ เป็นขั้นตอนดังนี้

5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด

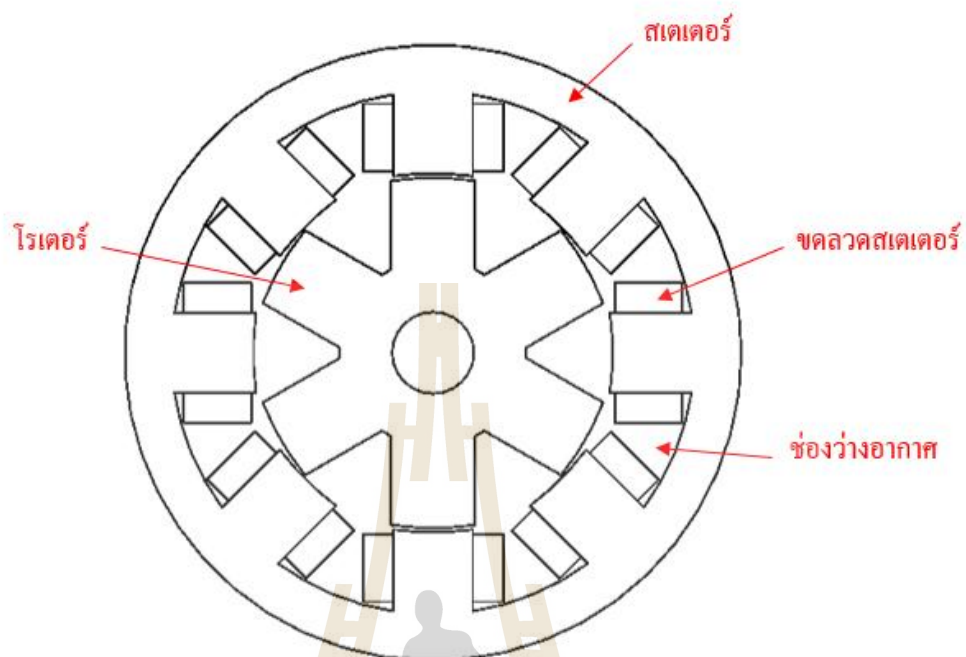
โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหาแบบ 3 มิติจะทำการสร้างกริดจากโปรแกรม Solidwork ซึ่งจะใช้เพียงเพื่อสร้างกริดเท่านั้น โดยเป็นการสร้างกริดในพิคัด 3 มิติเพื่อนำข้อมูลที่จำเป็นไปป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ได้แก่ ข้อมูลบอกพิคัดในแนวแกน x, y, z ข้อมูลบอกหมายเลขจุดต่อ ข้อมูลบอกหมายเลขเอลิเมนต์ และข้อมูลบอกหมายเลขชิ้นงานในระบบ ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ การสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์

การสร้างเมทริกซ์ของระบบ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และการแก้สมการเพื่อหาค่าผลเฉลย จะถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB

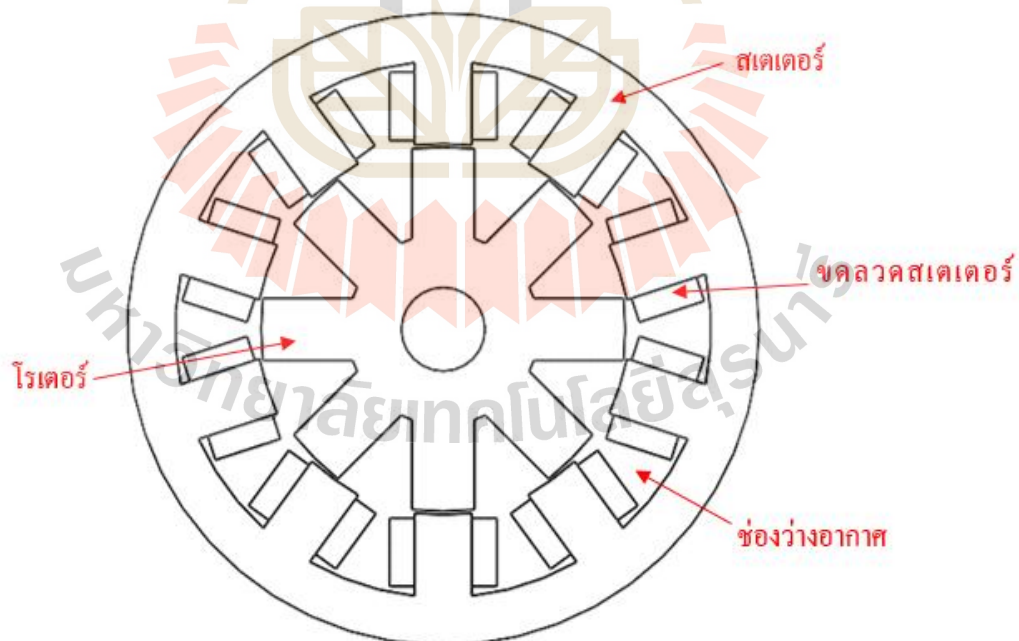
งานวิจัยนี้ได้วาดภาพและตีกริดของระบบปัญหาที่ต้องการศึกษาแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Solidwork ที่สามารถวาดภาพที่มีความซับซ้อนได้ง่ายและสะดวก ดังแสดงรูปที่ 5.1 เป็นโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสที่ศึกษา ประกอบด้วยสเตเตอร์ 6 ขั้ว และโรเตอร์ 4 ขั้ว รูปที่ 5.2 เป็นโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสที่ศึกษา ประกอบด้วยสเตเตอร์ 8 ขั้ว และโรเตอร์ 6 ขั้ว และรูปที่ 5.3 เป็นโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟสที่ศึกษา ประกอบด้วยสเตเตอร์ 10 ขั้ว และโรเตอร์ 8 ขั้ว ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสที่ศึกษา

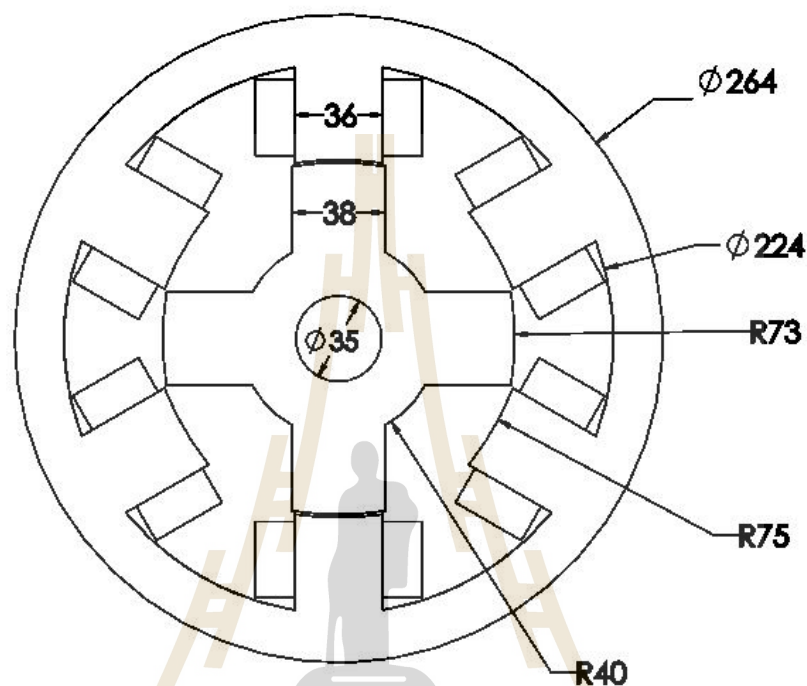


รูปที่ 5.2 โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแทนซ์ 4 เฟสที่ศึกษา



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแทนซ์ 5 เฟสที่ศึกษา

รายละเอียดขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.4-5.6 และเขียนแสดงในตารางที่ 5.1-5.3



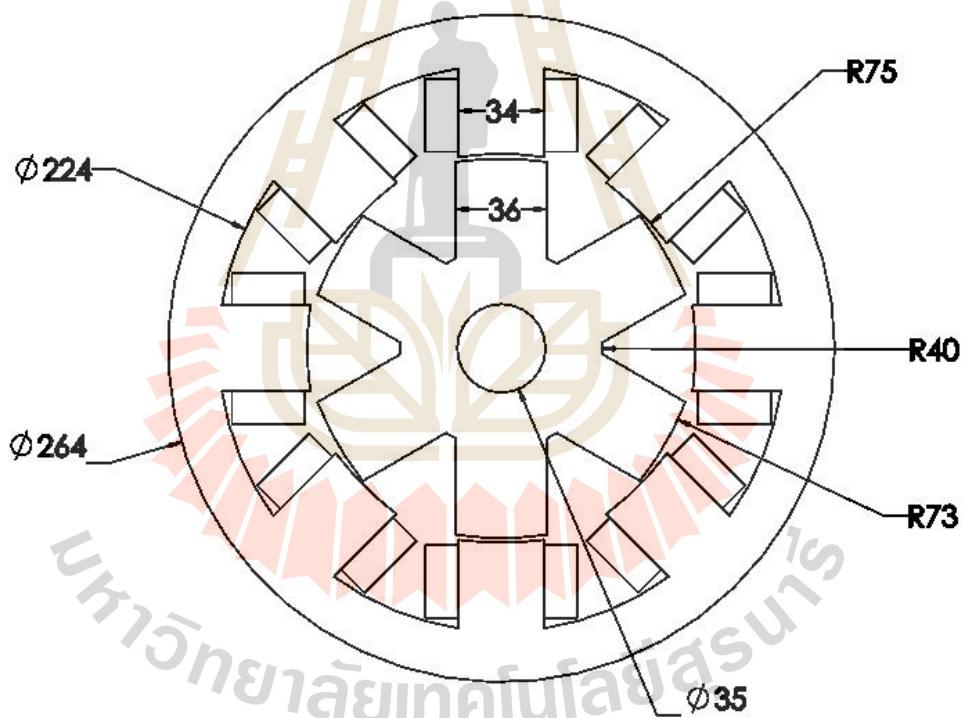
รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4

จำนวนเฟส	3
จำนวนขั้วสเตเตอร์	6
จำนวนขั้วโรเตอร์	4
มุมกว้างที่ขั้วสเตเตอร์ (องศา)	60
มุมกว้างที่ขั้วโรเตอร์ (องศา)	90
รัศมีแกนในโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	17.5
รัศมีร่องโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	40
รัศมีขั้วโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	73

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 (ต่อ)

รัศมีร่องสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	75
รัศมีวงในสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	112
รัศมีวงนอกสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	132
ความกว้างช่องอากาศ (องศา)	2
ความยาวมอเตอร์ (มิลลิเมตร)	300
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของขดลวด (มิลลิเมตร)	1.63
จำนวนรอบการพันขดลวด (รอบ)	52



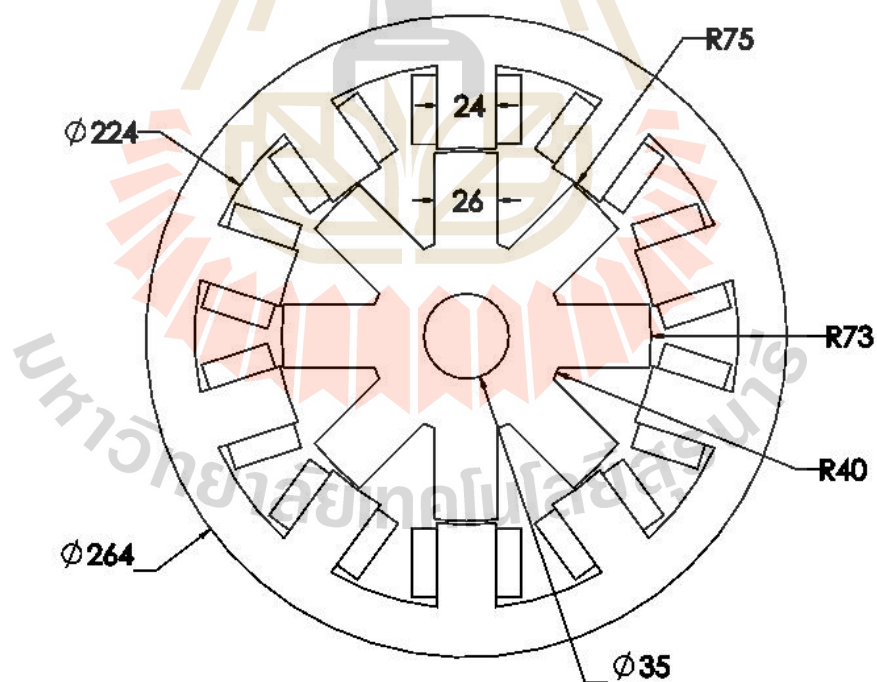
รูปที่ 5.5 ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6

จำนวนเฟส	4
จำนวนขั้วสเตเตอร์	8
จำนวนขั้วโรเตอร์	6

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 (ต่อ)

มุมกว้างที่ขั้วสเตเตอร์ (องศา)	45
มุมกว้างที่ขั้วโรเตอร์ (องศา)	60
รัศมีแกนในโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	17.5
รัศมีร่องโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	40
รัศมีขั้วโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	73
รัศมีร่องสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	75
รัศมีวงในสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	112
รัศมีวงนอกสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	132
ความกว้างช่องอากาศ (องศา)	2
ความยาวมอเตอร์ (มิลลิเมตร)	300
เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (มิลลิเมตร)	1.63
จำนวนรอบการพันขดลวด (รอบ)	52

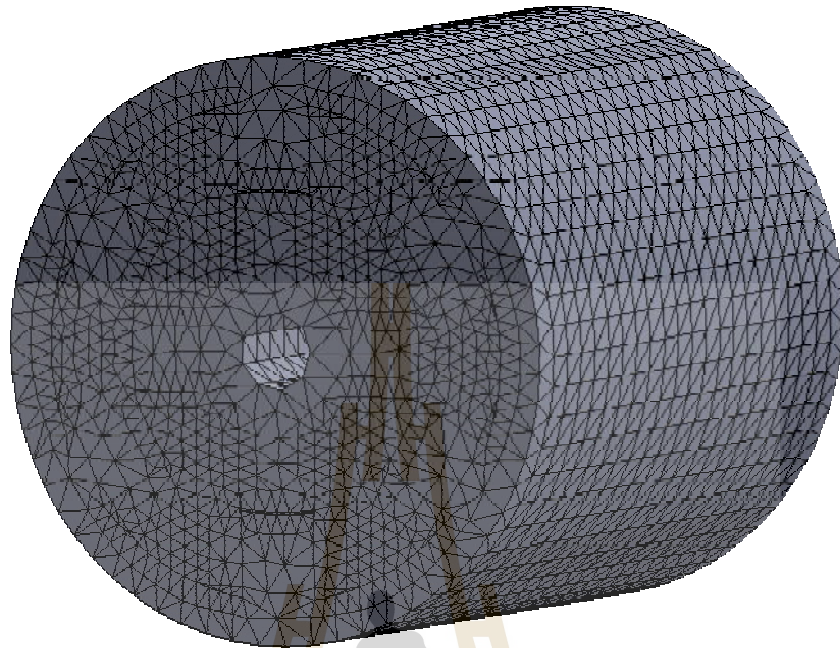


รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางและขนาดโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

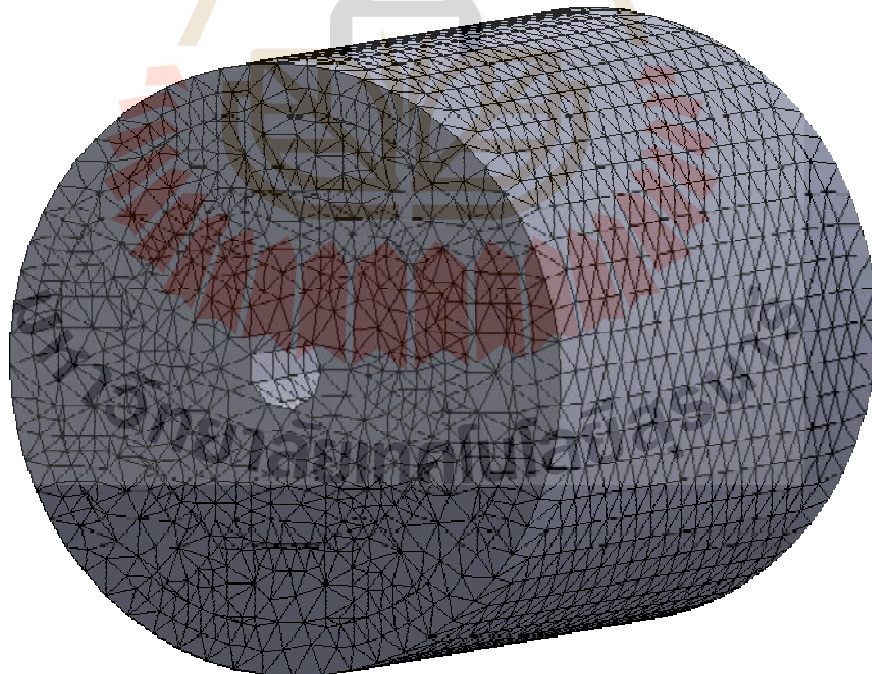
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

จำนวนเฟส	5
จำนวนขั้วสเตเตอร์	10
จำนวนขั้วโรเตอร์	8
มุมกว้างที่ขั้วสเตเตอร์ (องศา)	36
มุมกว้างที่ขั้วโรเตอร์ (องศา)	45
รัศมีแกนในโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	17.5
รัศมีร่องโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	40
รัศมีขั้วโรเตอร์ (มิลลิเมตร)	73
รัศมีร่องสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	75
รัศมีวงในสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	112
รัศมีวงนอกสเตเตอร์ (มิลลิเมตร)	132
ความกว้างช่องอากาศ (องศา)	2
ความยาวมอเตอร์ (มิลลิเมตร)	300
เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (มิลลิเมตร)	1.63
จำนวนรอบการพันขดลวด (รอบ)	52

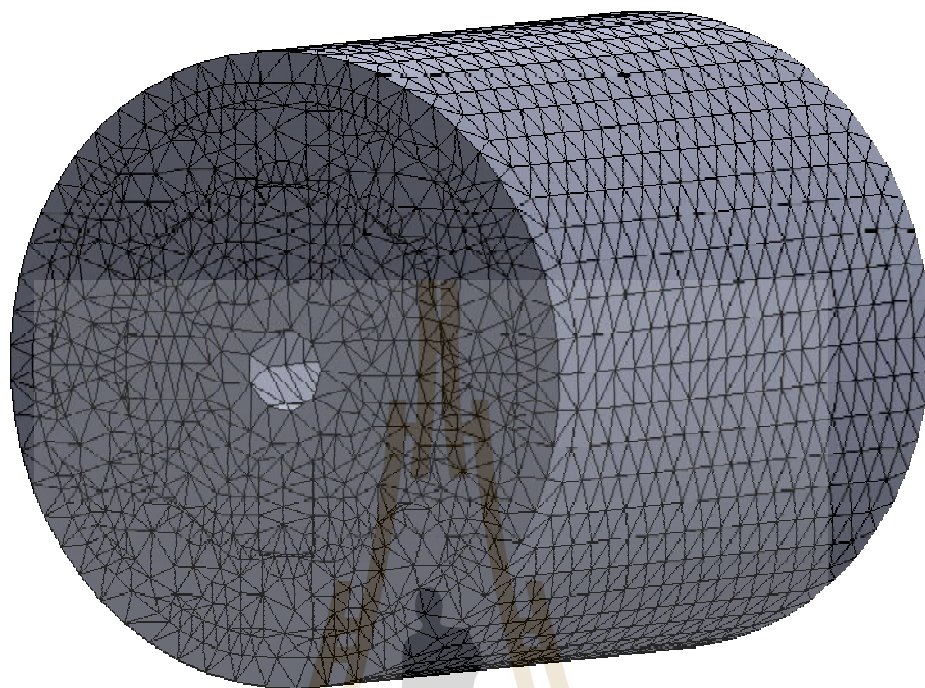
หลังจากแบ่งรูปร่างของปัญหาที่ต้องการศึกษาแล้วจะอาศัยโปรแกรม Solidwork สร้างกริดและอิลิเมนต์แบบอัตโนมัติ โดยเลือกกริดแบบทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7-5.9 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส



รูปที่ 5.8 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส

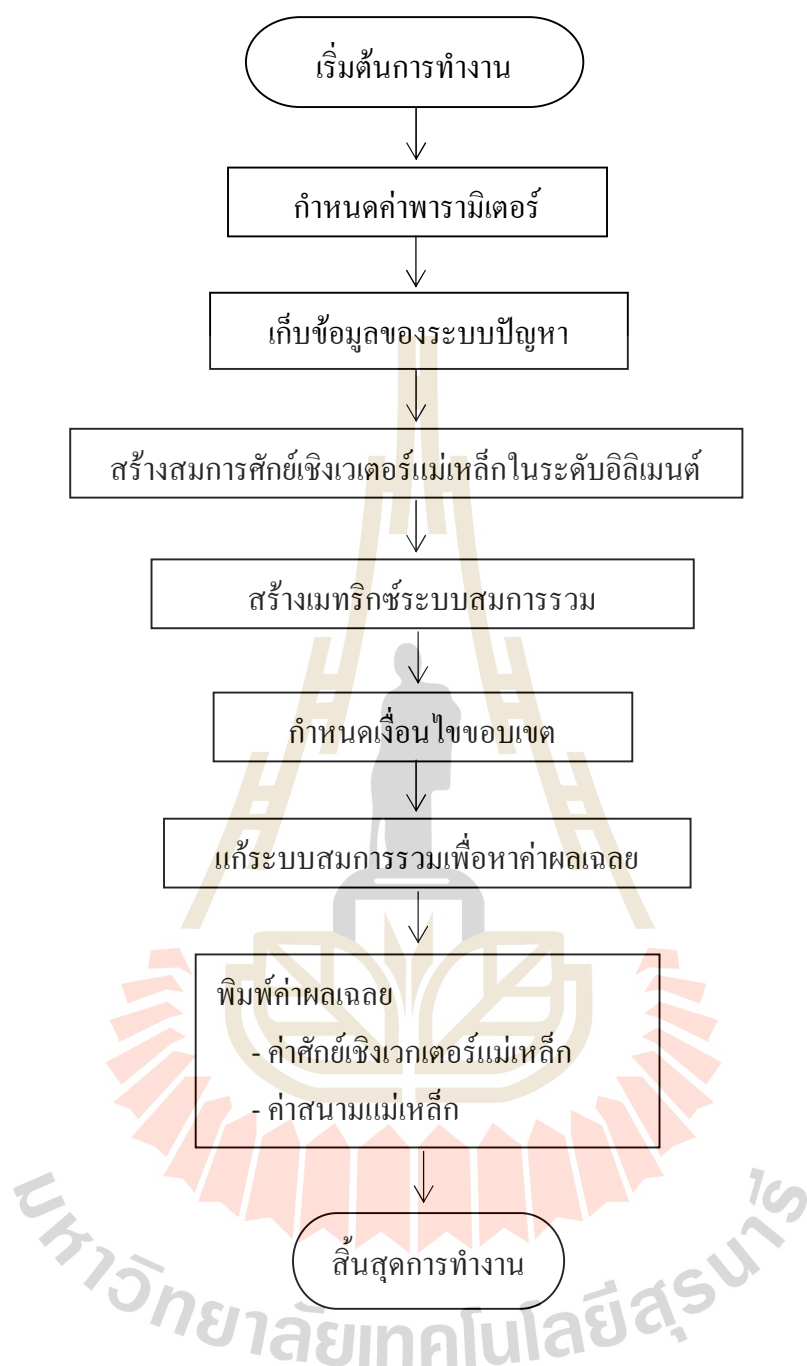


รูปที่ 5.9 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส

5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยใช้ข้อมูลที่จำเป็นจากการสร้างกริดและอิลิเมนต์จากหัวข้อที่ 5.2.1 โดยแสดงด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.10 แผนภูมิแสดงการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

จากแผนภูมिरูปที่ 5.10 แสดงถึงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวม เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ : กำหนดให้โปรแกรมเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลของระบบปัญหา : เนื่องจากโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติรับข้อมูลอินพุตที่เป็นชุดข้อมูลพิกัดของจุดต่อ และชุดข้อมูลหมายเลขของจุดต่อที่ประกอบเป็นอิลิเมนต์ ซึ่งเราจะได้ชุดข้อมูลนี้จากเอาท์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดและอิลิเมนต์ของโปรแกรม Solidwork

ขั้นตอนการสร้างสมการศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในระดับอิลิเมนต์ : เป็นการสร้างสมการระดับอิลิเมนต์เมทริกซ์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ เมื่อพิจารณาปัญหาแบบ 3 มิติของทุก ๆ อิลิเมนต์ โดยการสร้างสมการอิลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องด้วย

ขั้นตอนการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะรวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมแสดงด้วยสมการที่ (4.33) โดยมีหลักการ คือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่พิจารณา แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์นั้น ลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.6 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จะทำให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต : ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนการแก้ระบบสมการรวมให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์

ขั้นตอนการแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ประจำจุดต่อ โดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน

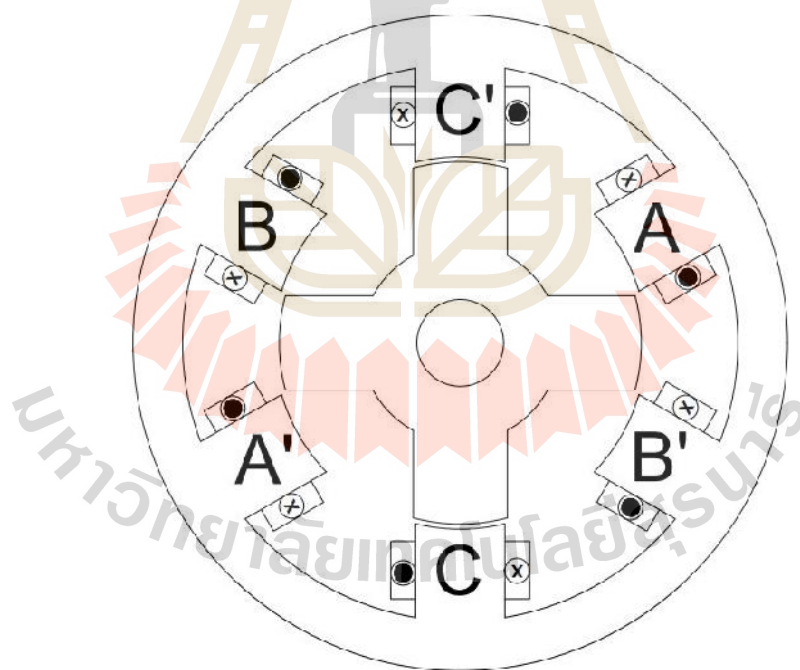
ขั้นตอนการพิมพ์ค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ และค่าสนามแม่เหล็กในแต่ละอิลิเมนต์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

5.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการจำลองผล

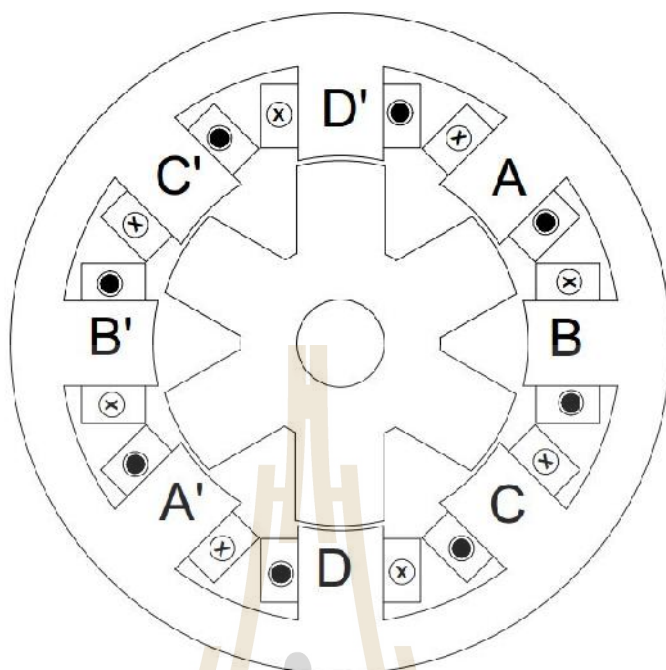
การจำลองผลของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กในขั้นตอนนี้ โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้จำลองผลจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

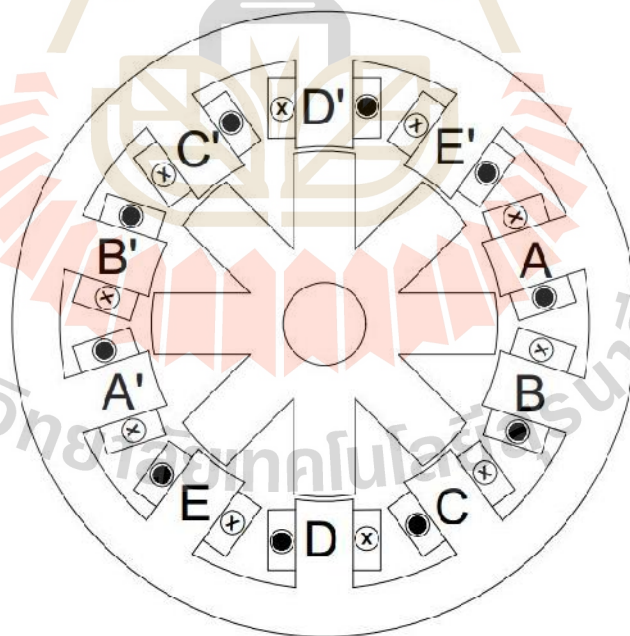
ค่าพารามิเตอร์	มอเตอร์สวิตซ์รีลัก แตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4	มอเตอร์สวิตซ์รีลัก แตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6	มอเตอร์สวิตซ์รีลัก แตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8
กำลังขาออก	60 kW	75 kW	10 kW
แรงดันแหล่งจ่าย	240 V	240 V	240 V
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz	50 Hz	50 Hz
ความต้านทานของ ขดลวดสเตเตอร์	$0.05 \Omega/\phi$	$0.05 \Omega/\phi$	$0.05 \Omega/\phi$
โมเมนต์ความเฉื่อยของ มอเตอร์	0.05 Kg.m^2	0.01 Kg.m^2	0.01 Kg.m^2
ความเสียดทานของมอเตอร์	0.02 N.m.s	0.005 N.m.s	0.005 N.m.s



รูปที่ 5.11 โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



รูปที่ 5.12 โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



รูปที่ 5.13 โมเดลรายละเอียดขดลวดเฟสของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

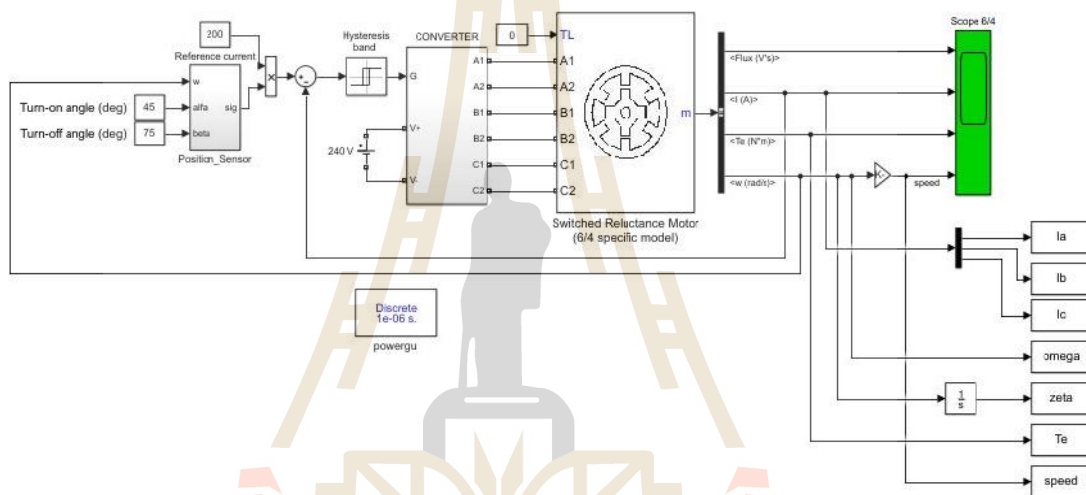
ลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 (A, B และ C) แสดงไว้ในรูปที่ 5.11 การพันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 (A, B, C และ D) แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 และการพันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 (A, B, C, D และ E) แสดงไว้ในรูปที่ 5.13 กระแสแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันที่สเตเตอร์สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอกที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ดังสมการที่ (5.1) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$J_0 = \frac{n \cdot I}{A} \quad (5.1)$$

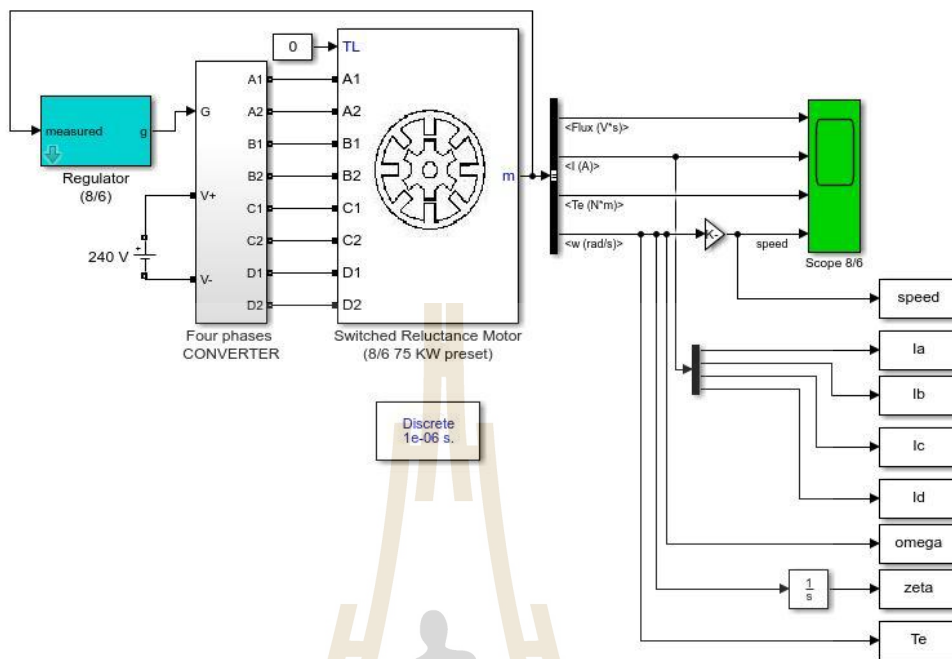
โดยที่ A คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2) ส่วน n คือจำนวนรอบการพันของขดลวด จากนั้นจะป้อนค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอกในแกน z ของมอเตอร์เป็นข้อมูลอินพุตให้แก่โปรแกรมจึงต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของกระแสด้วย ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.11-5.13 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง ในกรณีที่พิจารณามอเตอร์ภาคตัด (ระนาบ xy) ความหนาแน่นของกระแสภายนอกจะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาษ ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้กระแสที่มีเครื่องหมายบวกมีทิศทางวิ่งเข้ากระดาษ และกระแสที่มีเครื่องหมายลบมีทิศทางวิ่งออกกระดาษ โดยในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุนจะมีทั้งกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออก

5.4 การคำนวณกระแสและความเร็วของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

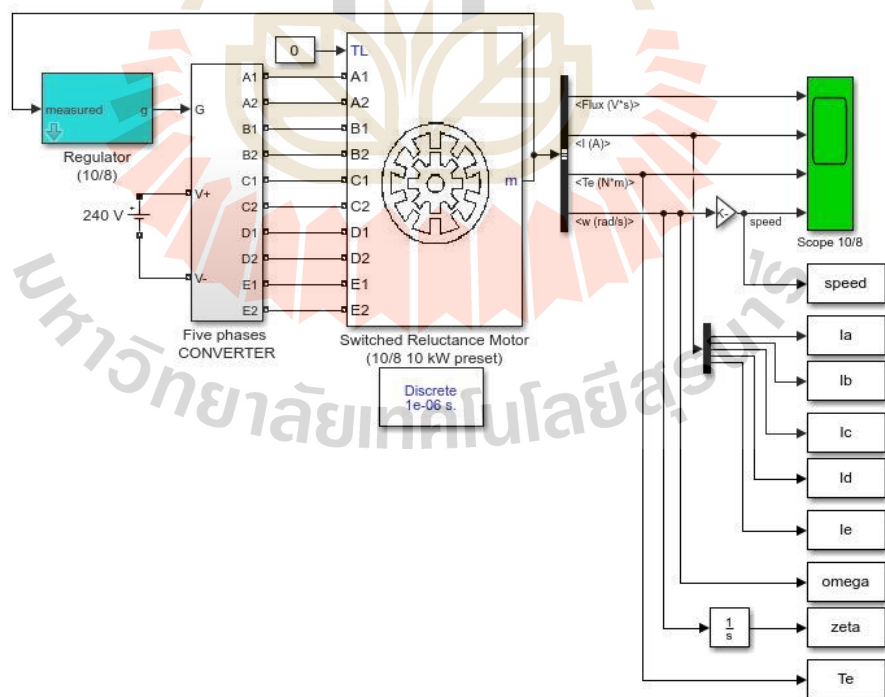
กระแสที่จะป้อนเป็นข้อมูลอินพุตในแต่ละช่วงจังหวะการหมุนของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์สำหรับในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้ชุดแบบจำลองของ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB โดยในการคำนวณต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เพื่อคำนวณหาค่ากระแสเฟส ความเร็วรอบของมอเตอร์ และมุมที่มอเตอร์หมุนไปในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสถานะคงตัว สามารถแสดงระบบที่ใช้ในการคำนวณของ SIMULINK แสดงได้ดังรูปที่ 5.14-5.16



รูปที่ 5.14 ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟสใน SIMULINK



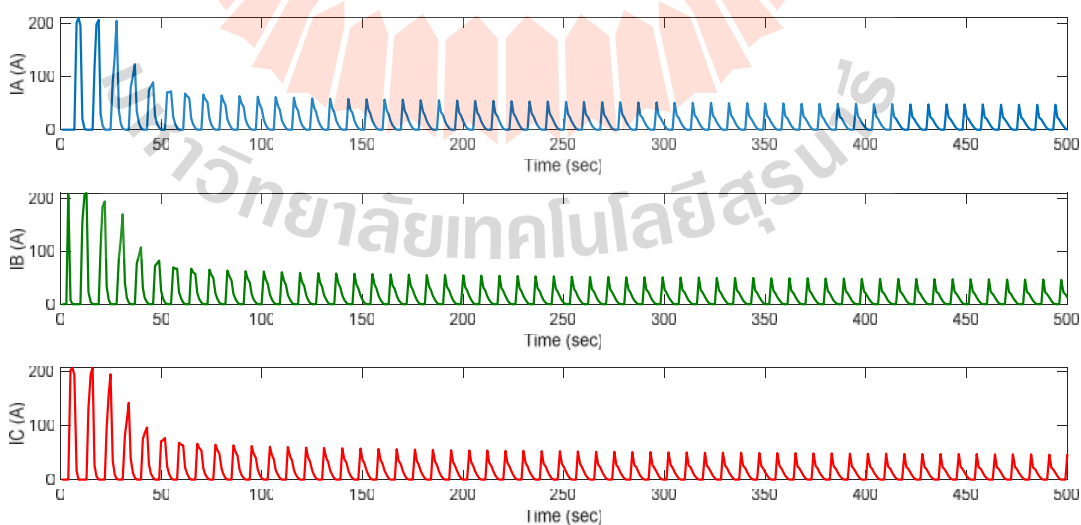
รูปที่ 5.15 ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟสใน SIMULINK



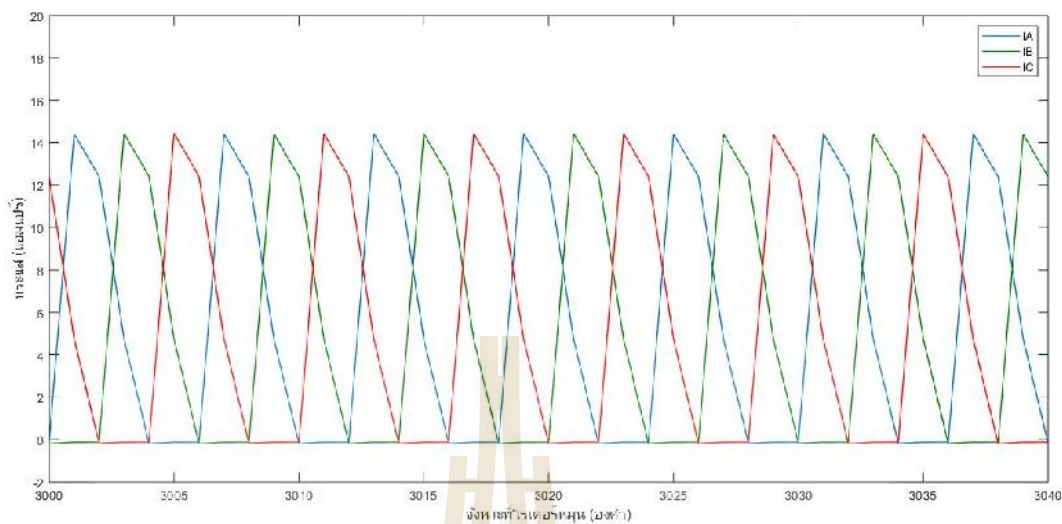
รูปที่ 5.16 ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟสใน SIMULINK

จากระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสใน SIMULINK นั้นได้ป้อนค่าพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ทางกลของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้ออกมา นั้นจะได้ค่ากระแสแต่ละเฟส ความเร็วรอบของมอเตอร์ มุมที่มอเตอร์หมุนไป และแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสถานะคงตัว โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำไปสู่การคำนวณต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลอินพุตป้อนให้ระบบไฟไนต์อิลิเมนต์

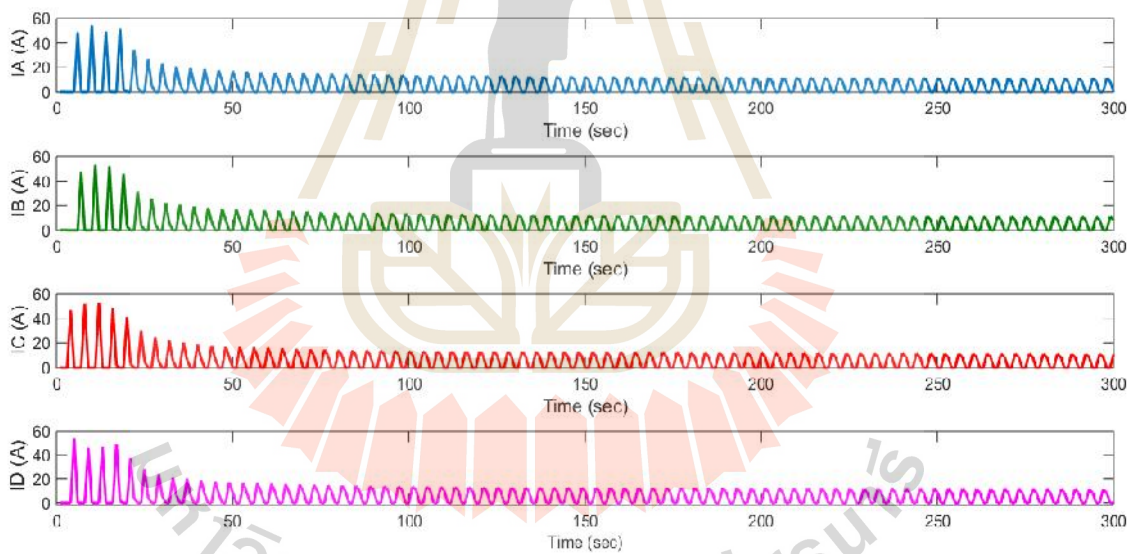
ในงานวิจัยนี้ ได้คำนวณกระแสด้วยชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SIMULINK เมื่อจำลองที่สภาวะไร้โหลด ($T_L=0$) โดยป้อนกระแสเฟสที่มีลักษณะการจذبวงขดลวดที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 เมื่อป้อนรูปคลื่นกระแสเฟสดังกล่าวประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังปรากฏในตารางที่ 5.4 จะได้กราฟของค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส ที่ได้จาก SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 5.17 5.19 และ 5.21 ตามลำดับ จากระบบที่เริ่มคำนวณกระแสตั้งแต่เวลาเริ่มต้น โดยตั้งแต่เวลาเริ่มต้นพบว่าค่ากระแสในช่วงเริ่มต้นที่รอบที่ 0 จนถึงช่วงก่อนที่จะเข้าสู่สถานะคงตัวจะมีค่ากระแสที่สูงซึ่งเป็นค่ากระแสในการสตาร์ทมอเตอร์จะมีค่าไม่คงที่ จนถึงเมื่อช่วงสถานะคงตัวค่ากระแสจะลดลงและคงที่ค่าหนึ่ง และกราฟของค่ากระแสที่ได้ในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน จะใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอกเพื่อป้อนให้กับโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.18 5.20 และ 5.22 ตามลำดับ และกราฟของค่าอัตราเร็วเชิงมุมเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 5.23-5.25 ตามลำดับ



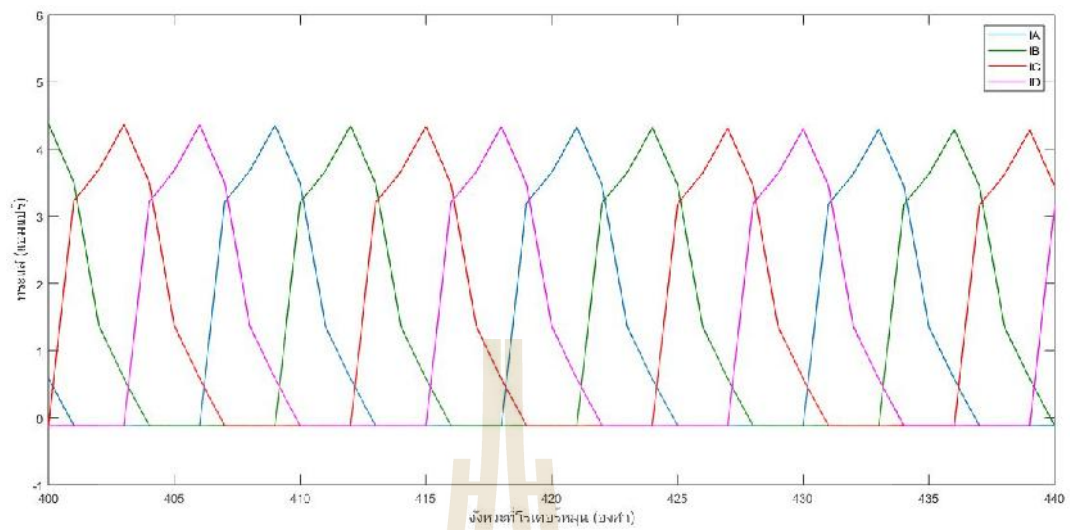
รูปที่ 5.17 ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 ที่ได้จาก SIMULINK



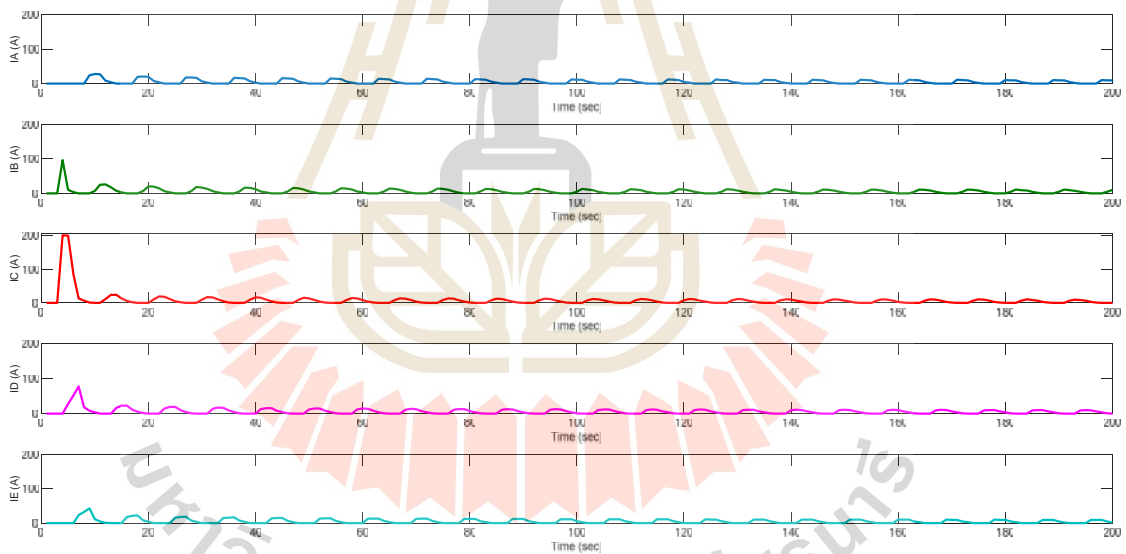
รูปที่ 5.18 กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



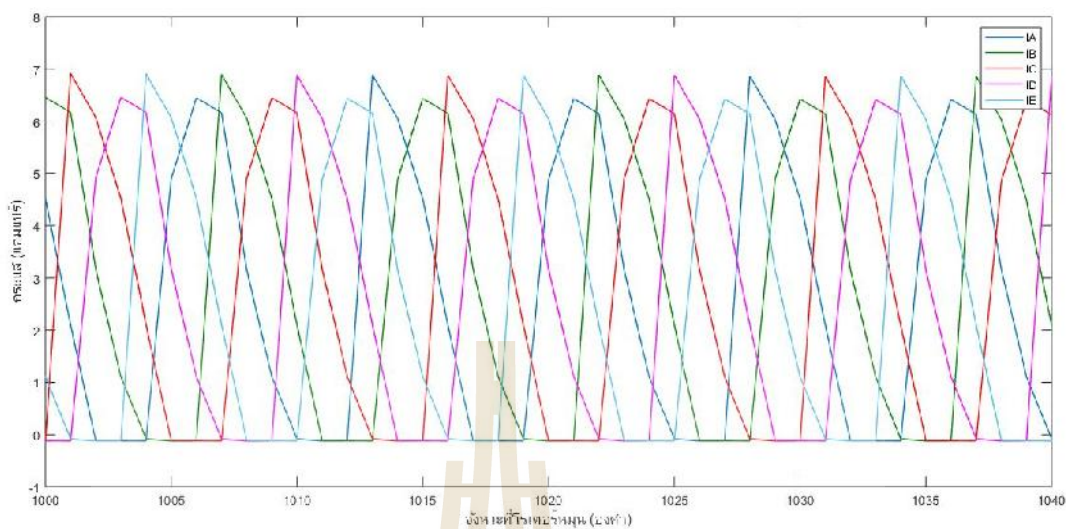
รูปที่ 5.19 ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ที่ได้จาก SIMULINK



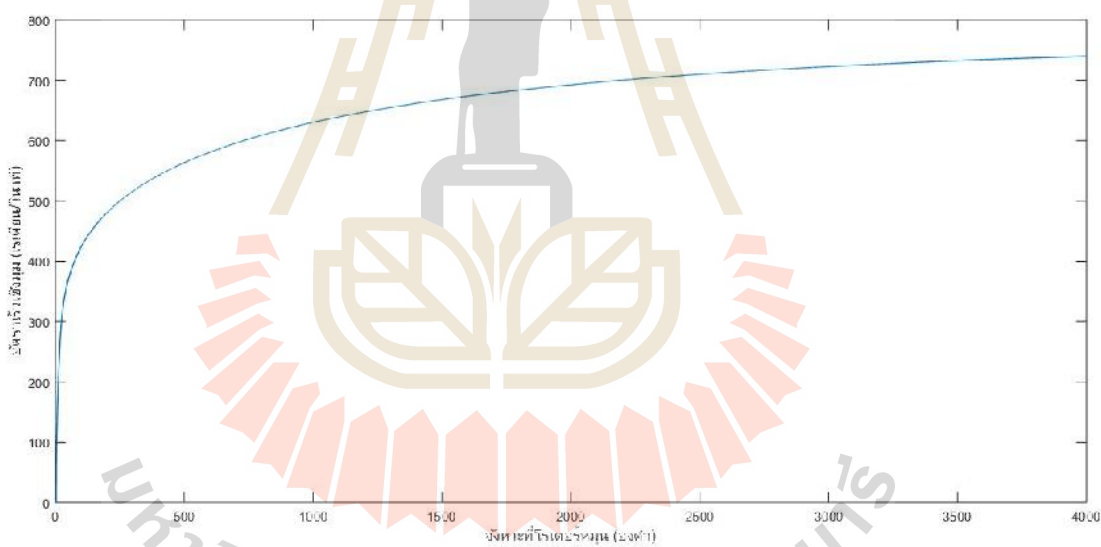
รูปที่ 5.20 กระแสไฟฟ้าทั้ง 4 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



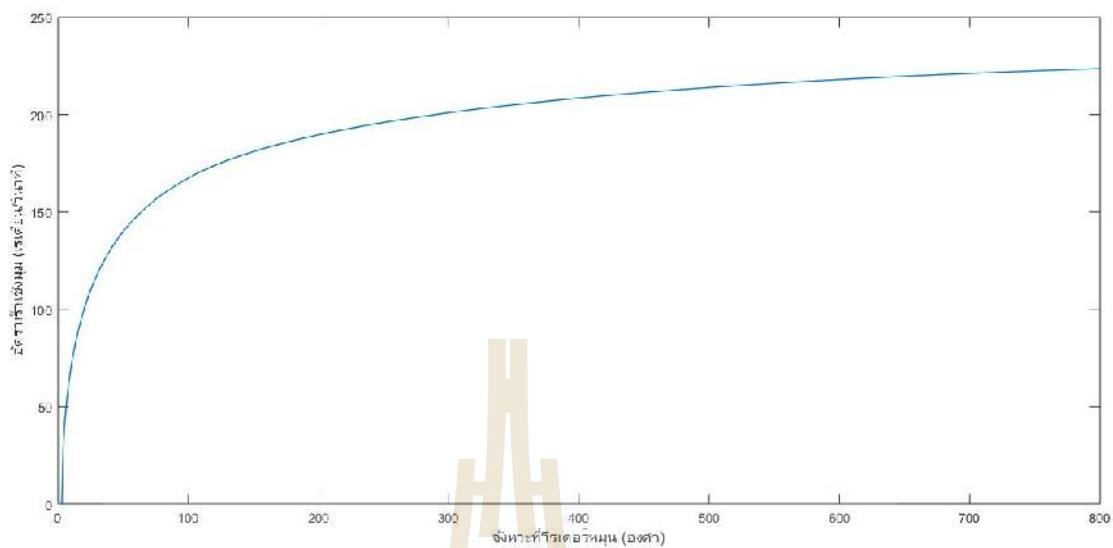
รูปที่ 5.21 ค่ากระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ที่ได้จาก SIMULINK



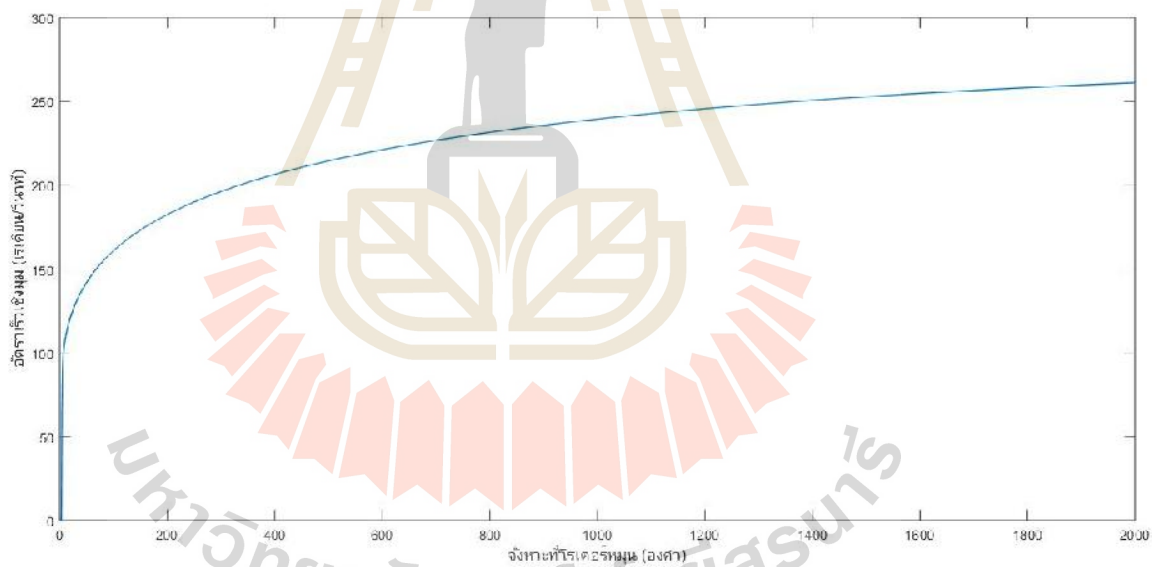
รูปที่ 5.22 กระแสไฟฟ้าทั้ง 5 เฟสในช่วงสถานะคงตัวเมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



รูปที่ 5.23 อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ 3 เฟส เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



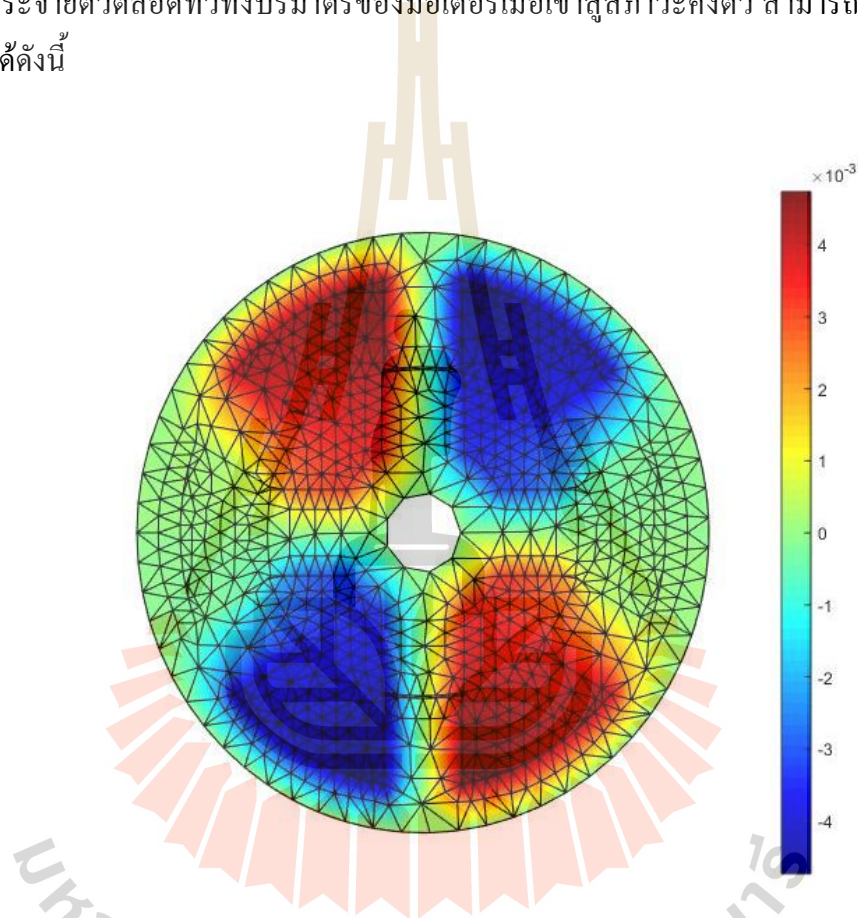
รูปที่ 5.24 อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



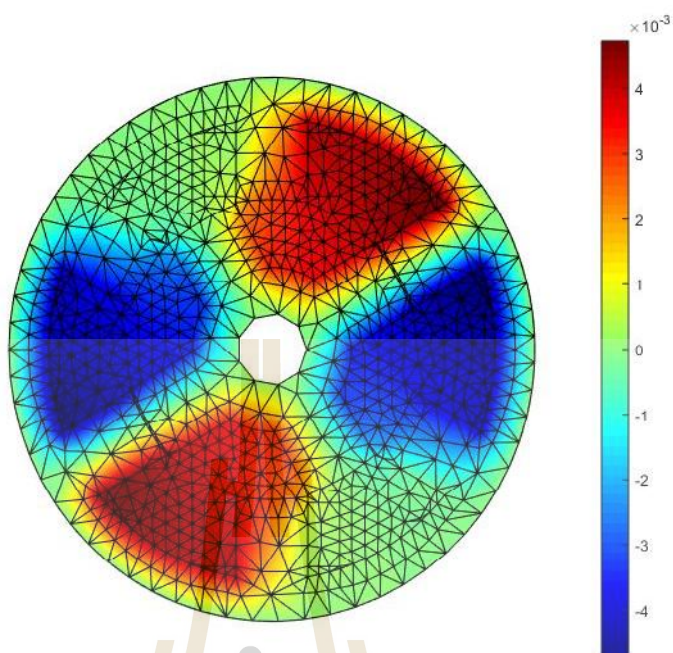
รูปที่ 5.25 อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน

5.5 ผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล

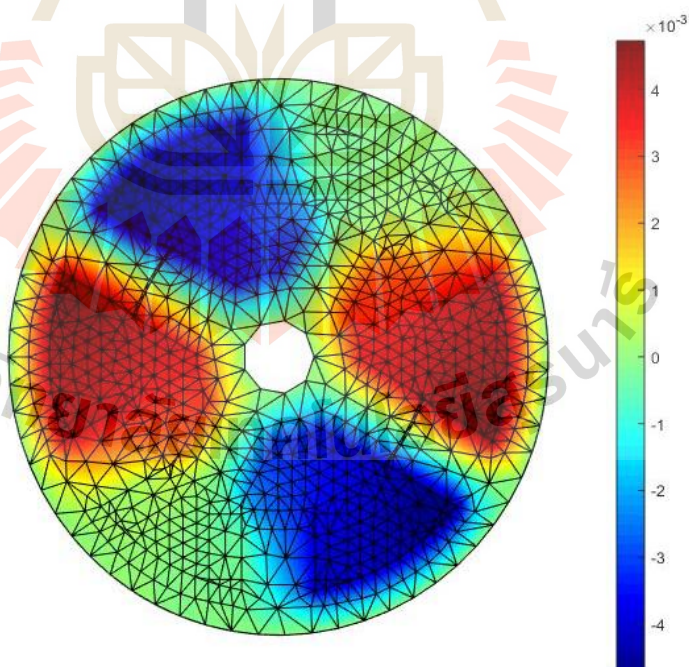
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่แปรตามตำแหน่งการหมุนที่กระจายตัวตลอดทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว สามารถแสดงผลทางกราฟิกได้ดังนี้



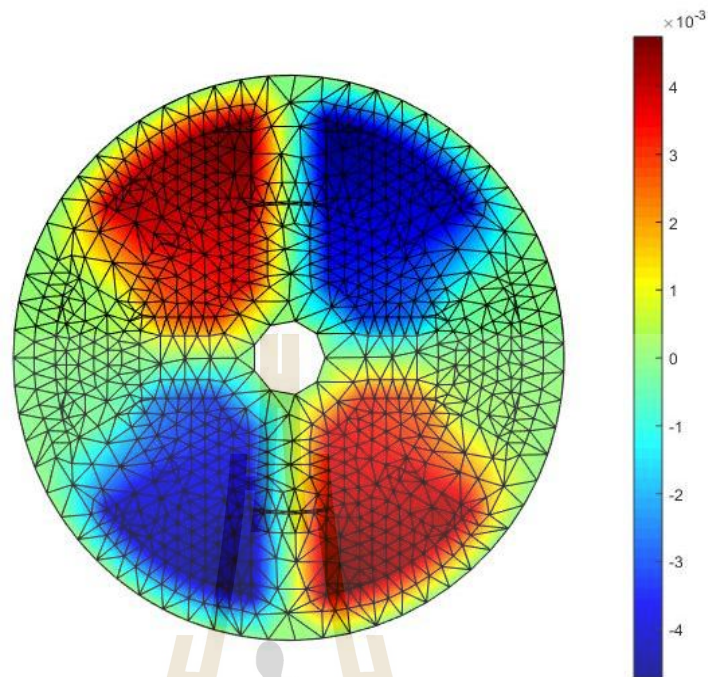
รูปที่ 5.26 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



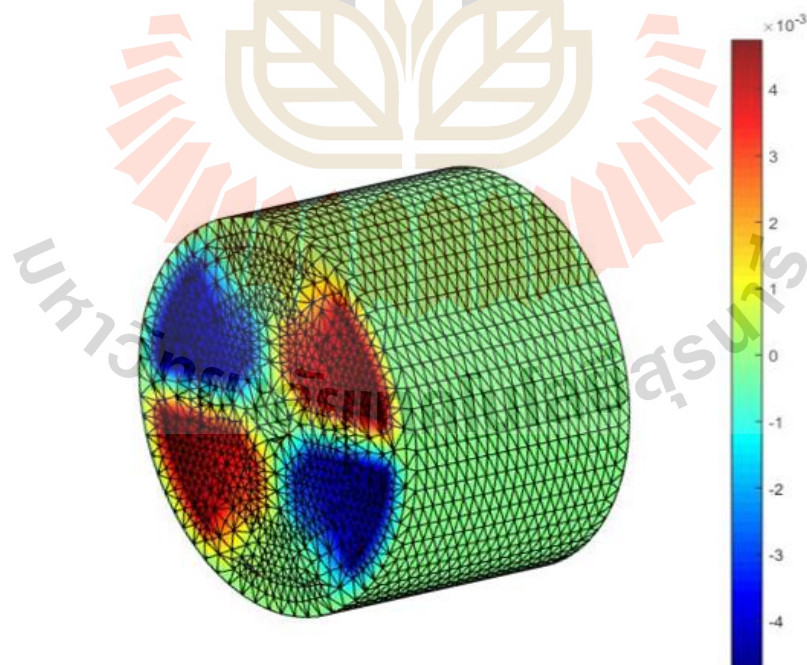
รูปที่ 5.27 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแทนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



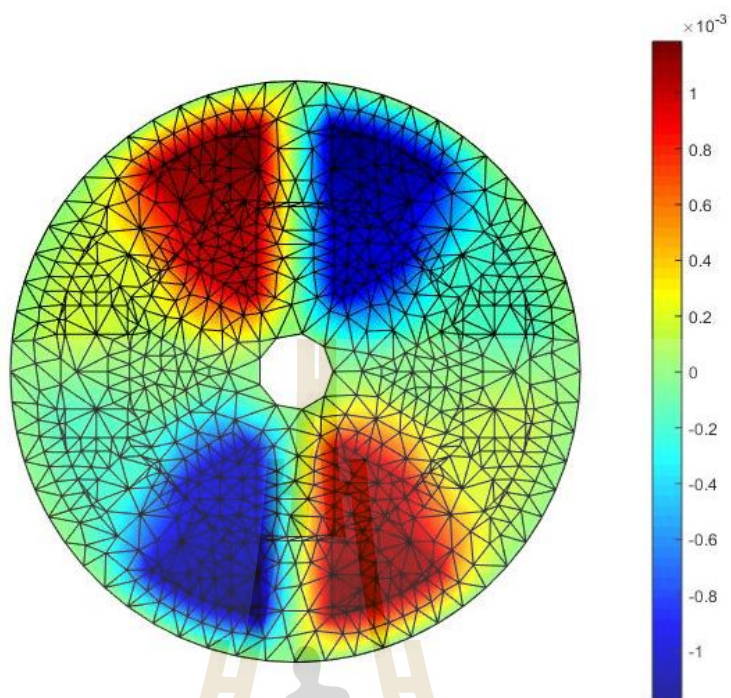
รูปที่ 5.28 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแทนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



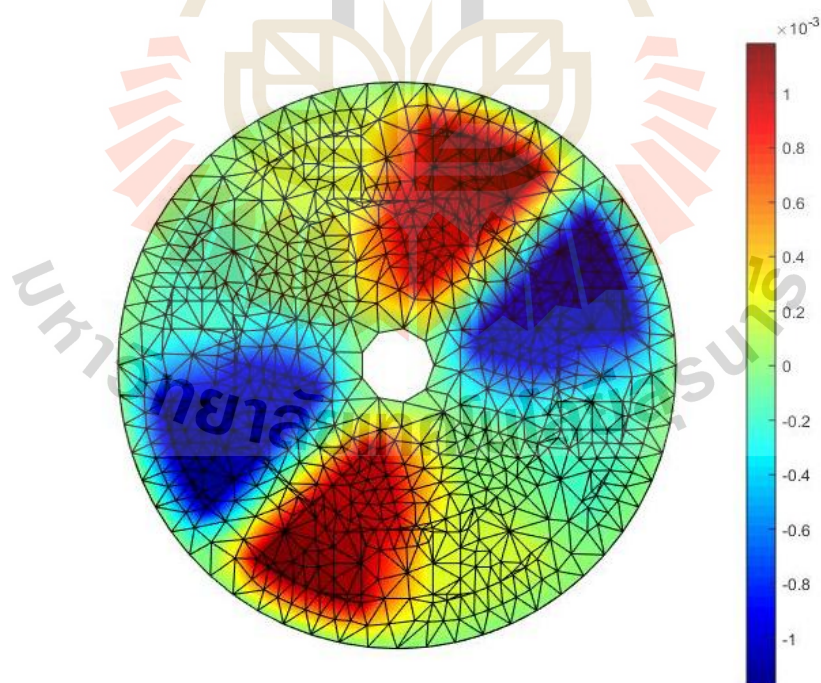
รูปที่ 5.29 ภาดตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



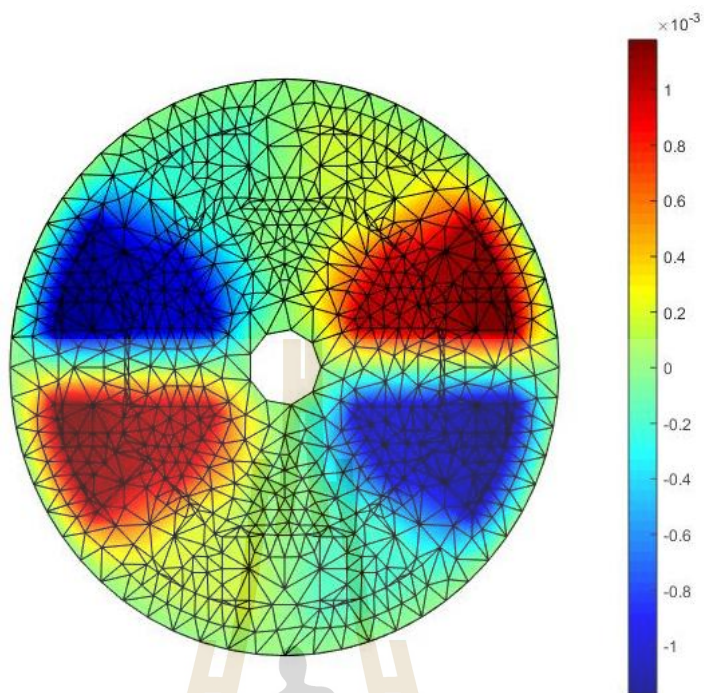
รูปที่ 5.30 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



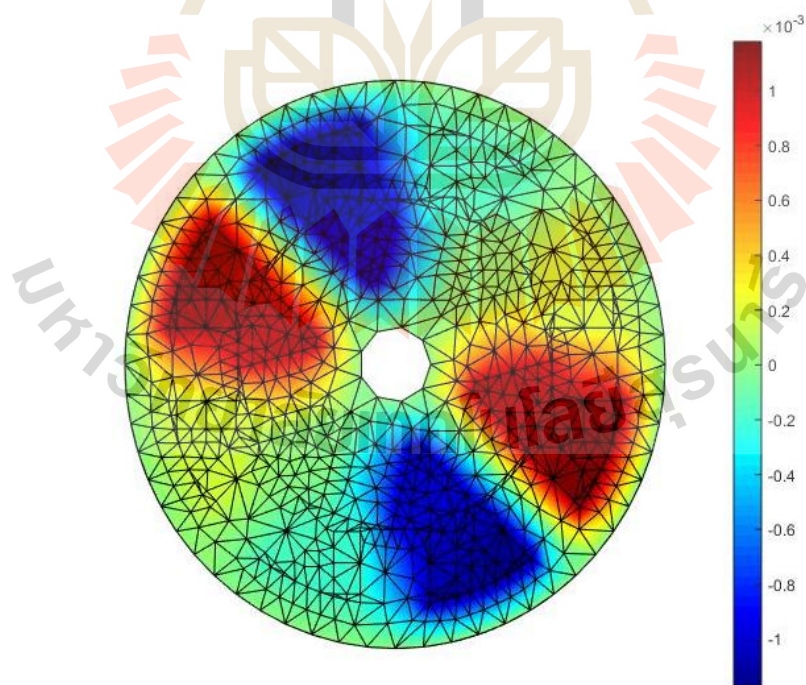
รูปที่ 5.31 ภาคนตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



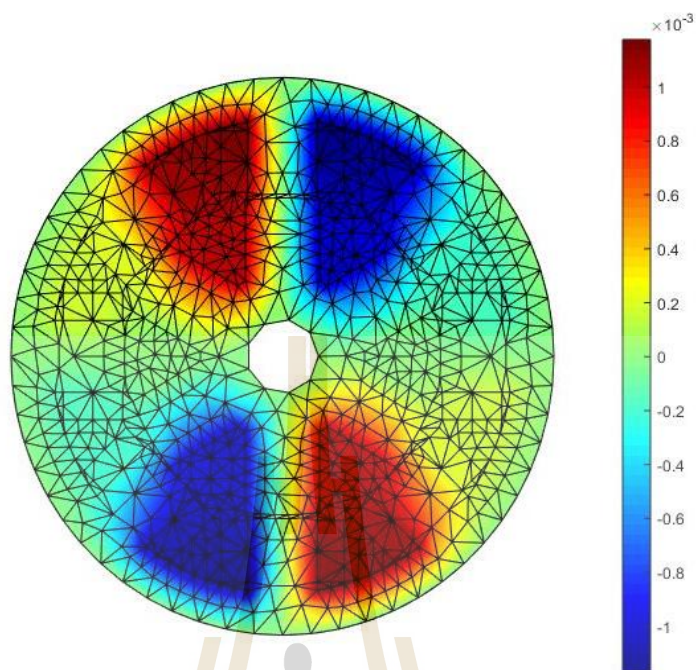
รูปที่ 5.32 ภาคนตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 15 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



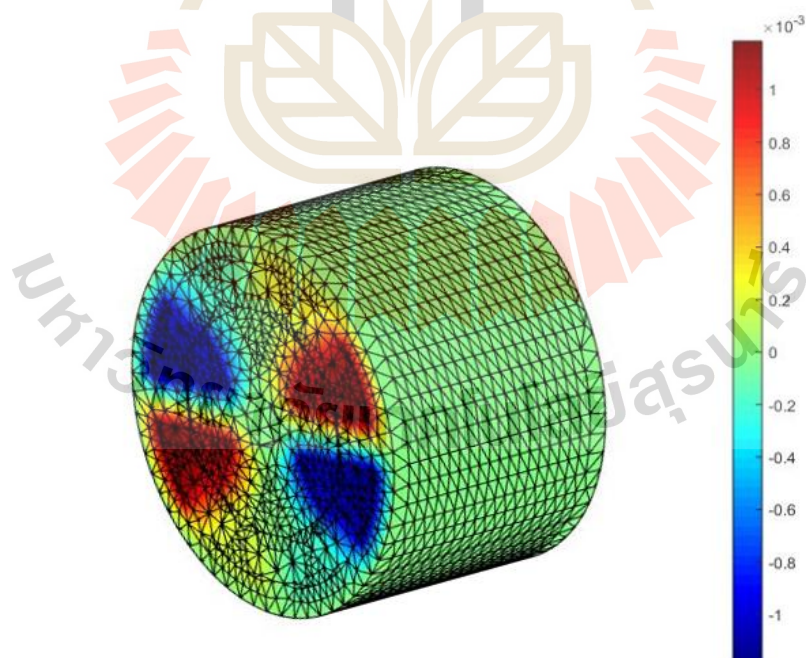
รูปที่ 5.33 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



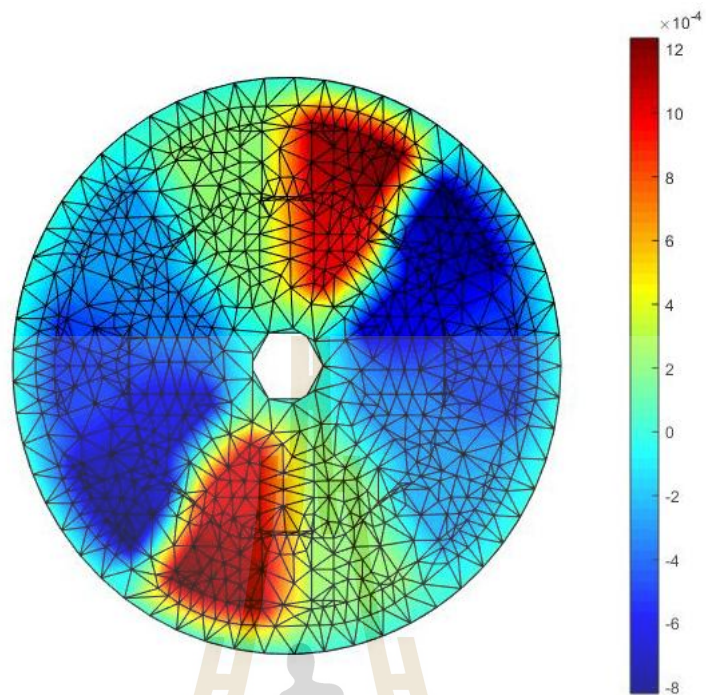
รูปที่ 5.34 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 45 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



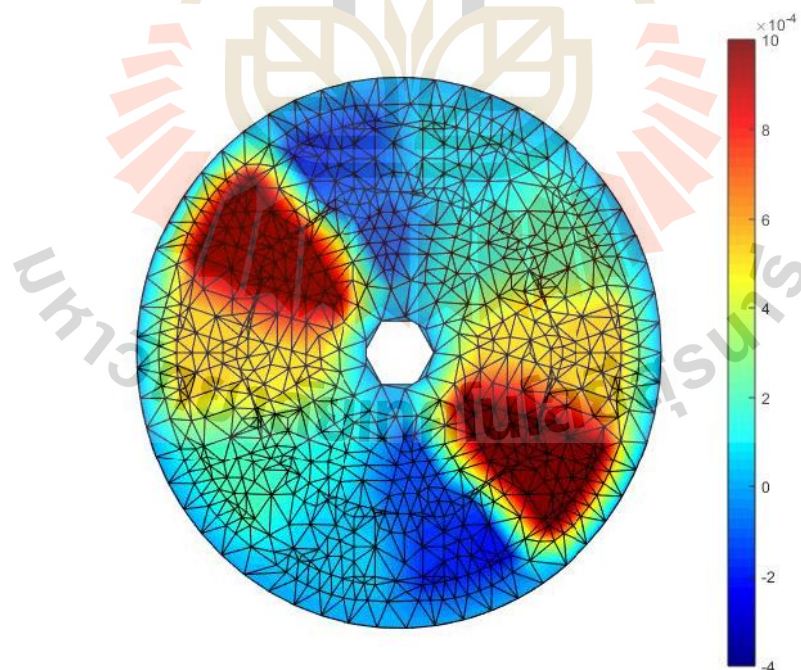
รูปที่ 5.35 ภาคนัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



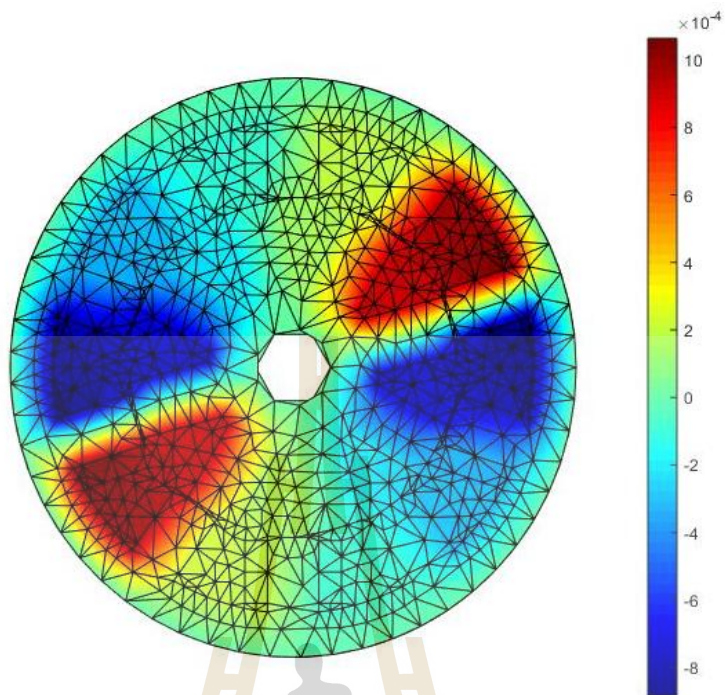
รูปที่ 5.36 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



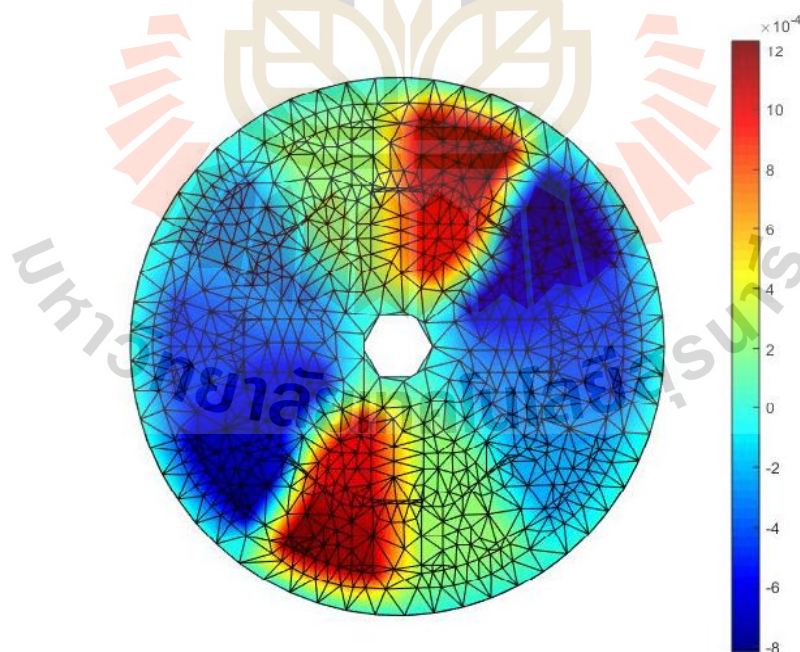
รูปที่ 5.37 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแทนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



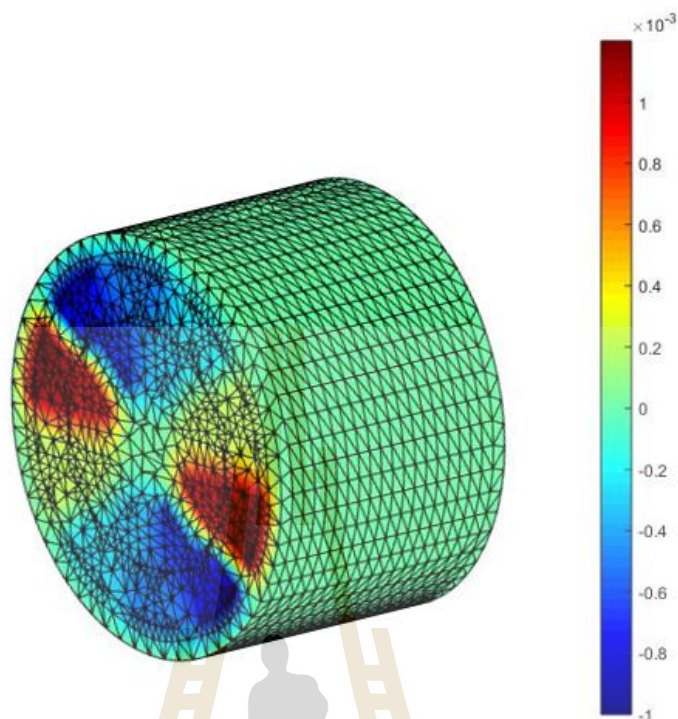
รูปที่ 5.38 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแทนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



รูปที่ 5.39 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



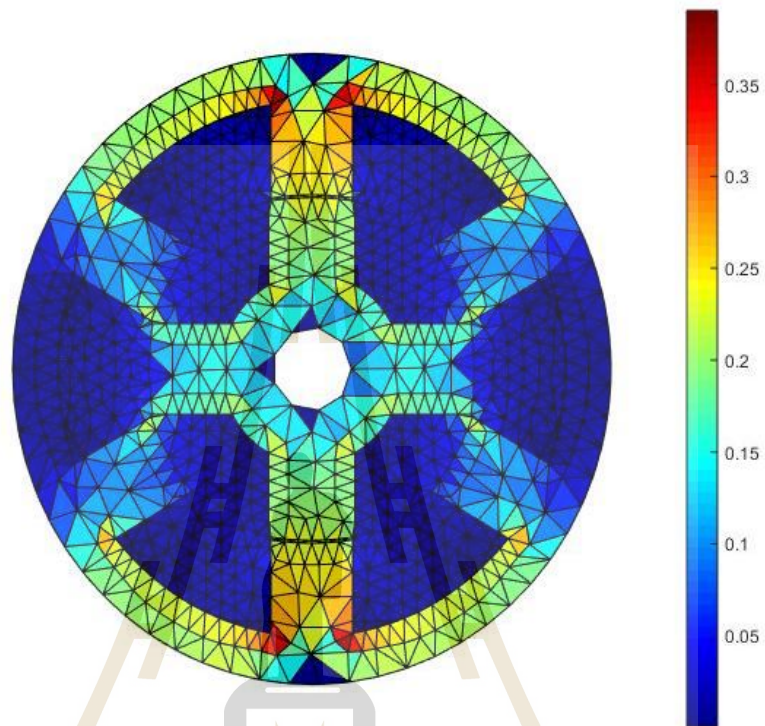
รูปที่ 5.40 ภาคตัดขวางแสดงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



รูปที่ 5.41 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัว ในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

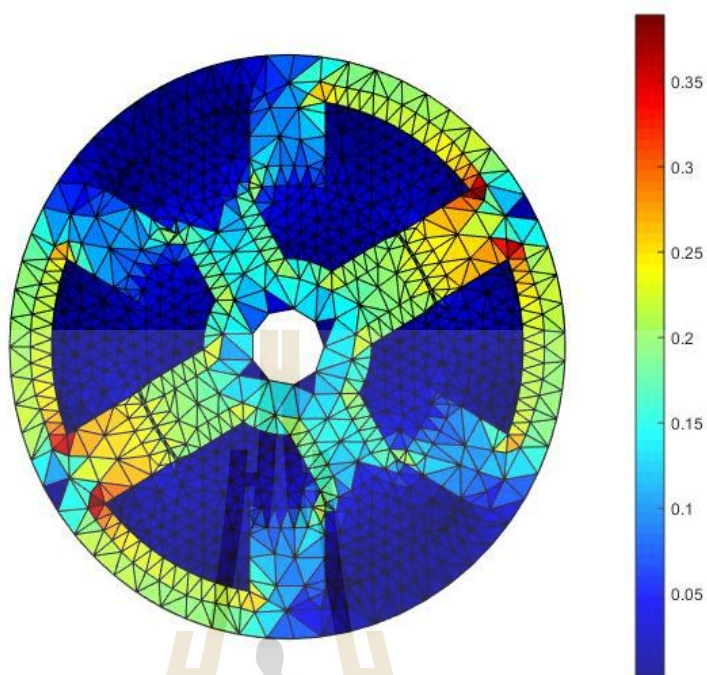
จากรูปที่ 5.26-5.29 แสดงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 ในช่วงสถานะคงตัว จากรูปที่ 5.31-5.35 แสดงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ในช่วงสถานะคงตัว และจากรูปที่ 5.37-5.40 แสดงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ในช่วงสถานะคงตัว โดยที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบโรเตอร์ก็จะหมุนเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ ในลักษณะที่ทวนเข็มนาฬิกา จากการจำลองผลพบว่าลักษณะการกระจายของขั้วแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงที่เป็นสีแดงโดยเป็นค่าบวก ช่วงที่เป็นสีน้ำเงินเป็นค่าลบ และช่วงที่เป็นสีเขียวคือค่าที่อยู่ระหว่างค่าบวกและลบที่หักล้างกันจนมีค่าเกือบจะเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการกระจายของแถบสีต่าง ๆ นั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดขั้วของกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส สามารถดูภาพจำลองผลลักษณะแบบ 3 มิติของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 ได้ดังรูปที่ 5.30 ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ได้ดังรูปที่ 5.36 และของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ได้ดังรูปที่ 5.41 ตามลำดับ ซึ่งจากการ

กำหนดเงื่อนไขให้ขอบในที่ติดกับเพลและขอบนอกของมอเตอร์ไม่มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ทำให้มีค่าเป็นศูนย์

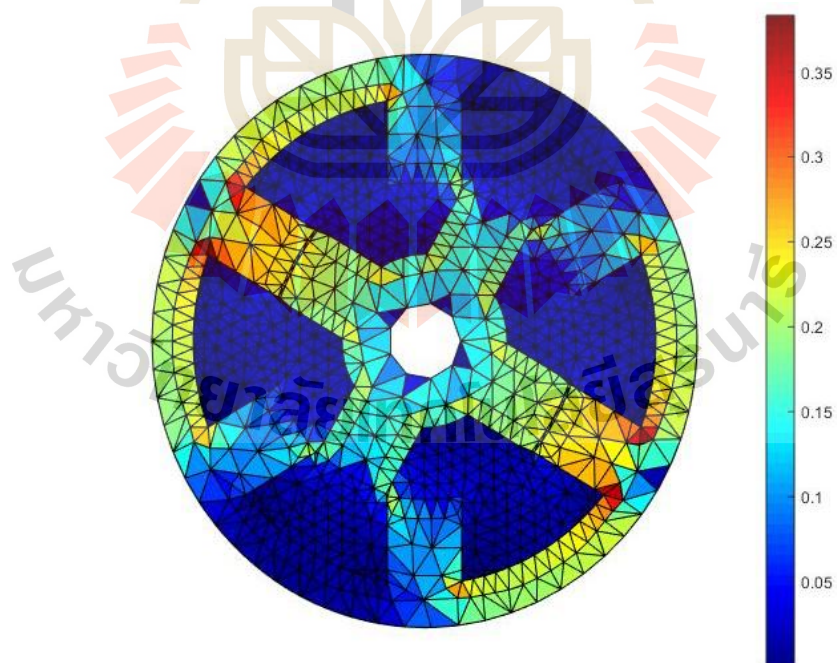


รูปที่ 5.42 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4

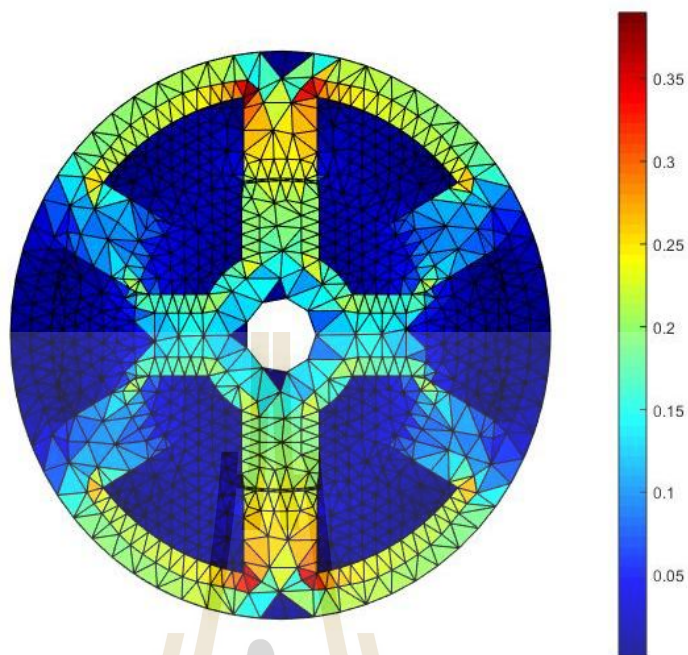
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



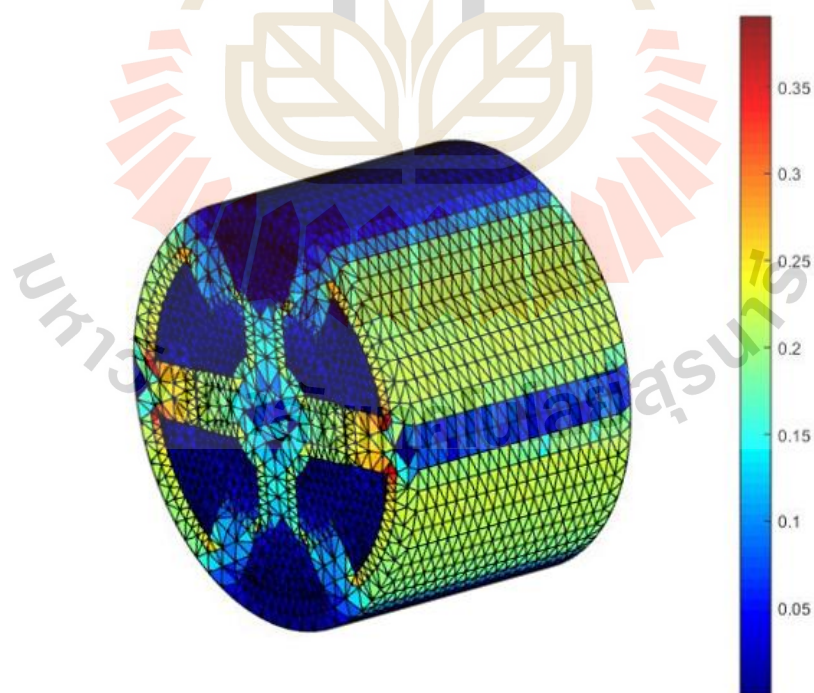
รูปที่ 5.43 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์วีรลิคเตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



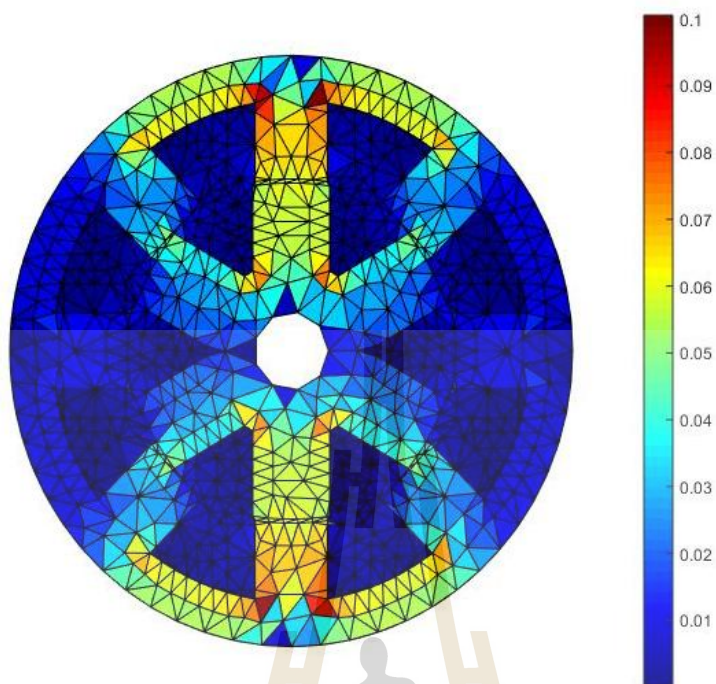
รูปที่ 5.44 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์วีรลิคเตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



รูปที่ 5.45 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



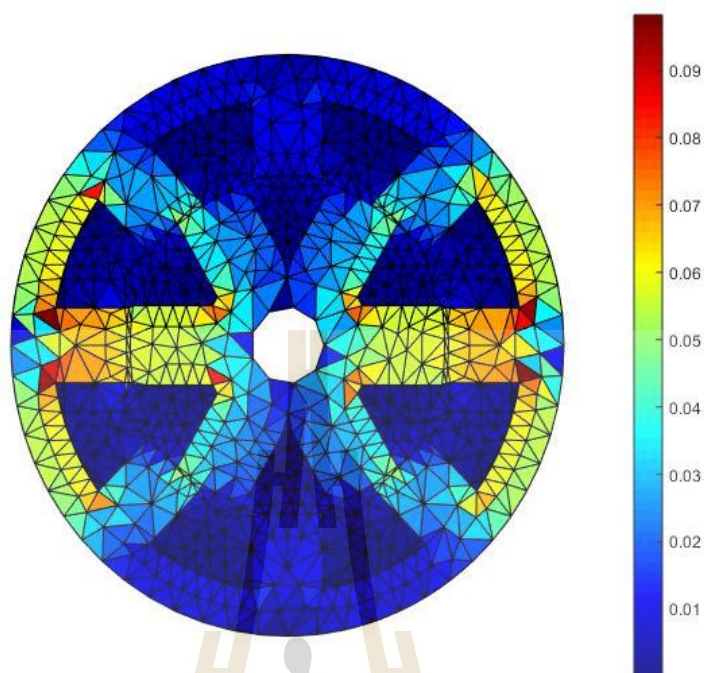
รูปที่ 5.46 สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



รูปที่ 5.47 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแดนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



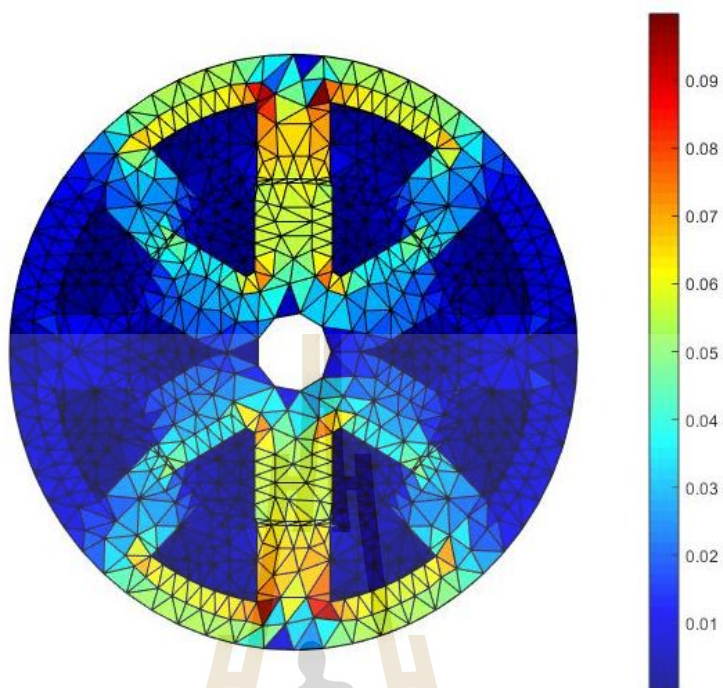
รูปที่ 5.48 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 15 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีล็กแดนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



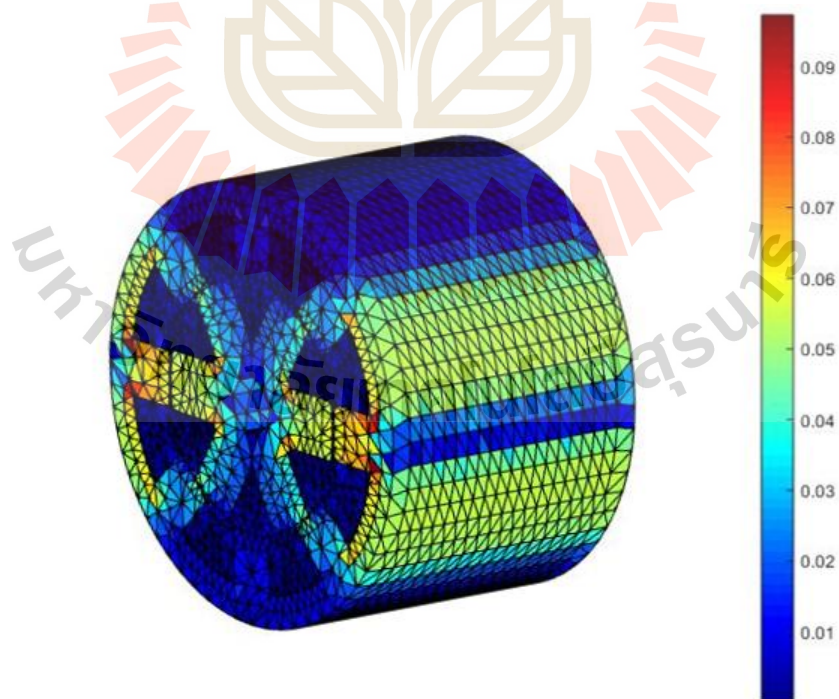
รูปที่ 5.49 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



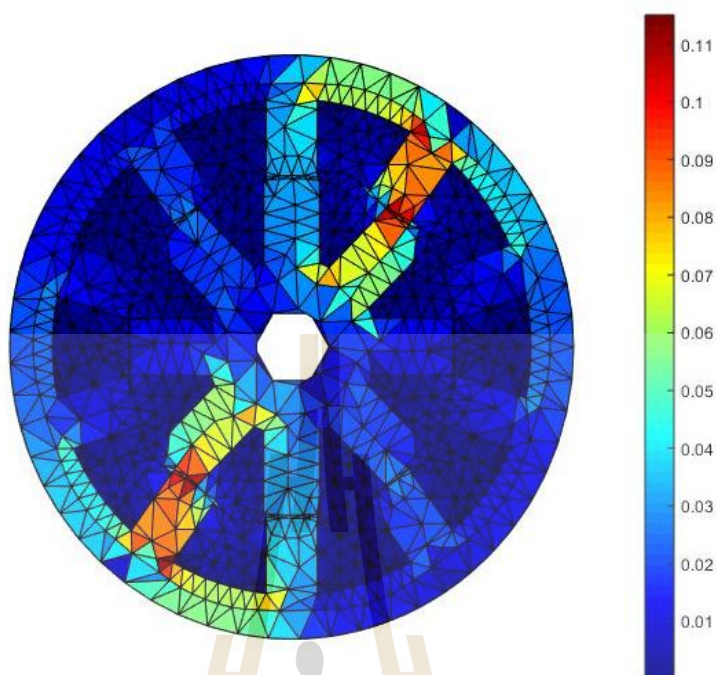
รูปที่ 5.50 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 45 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



รูปที่ 5.51 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



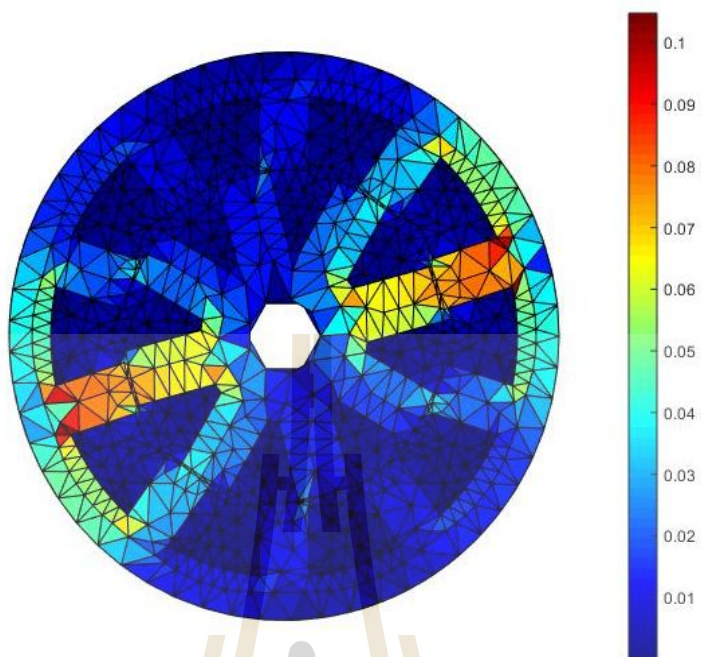
รูปที่ 5.52 สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



รูปที่ 5.53 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



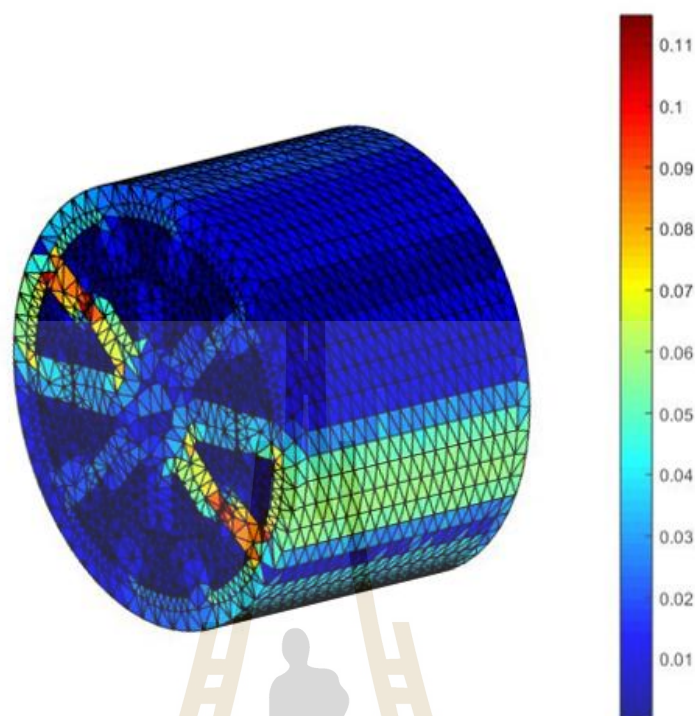
รูปที่ 5.54 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 30 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



รูปที่ 5.55 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 60 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8



รูปที่ 5.56 ภาคตัดขวางแสดงสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

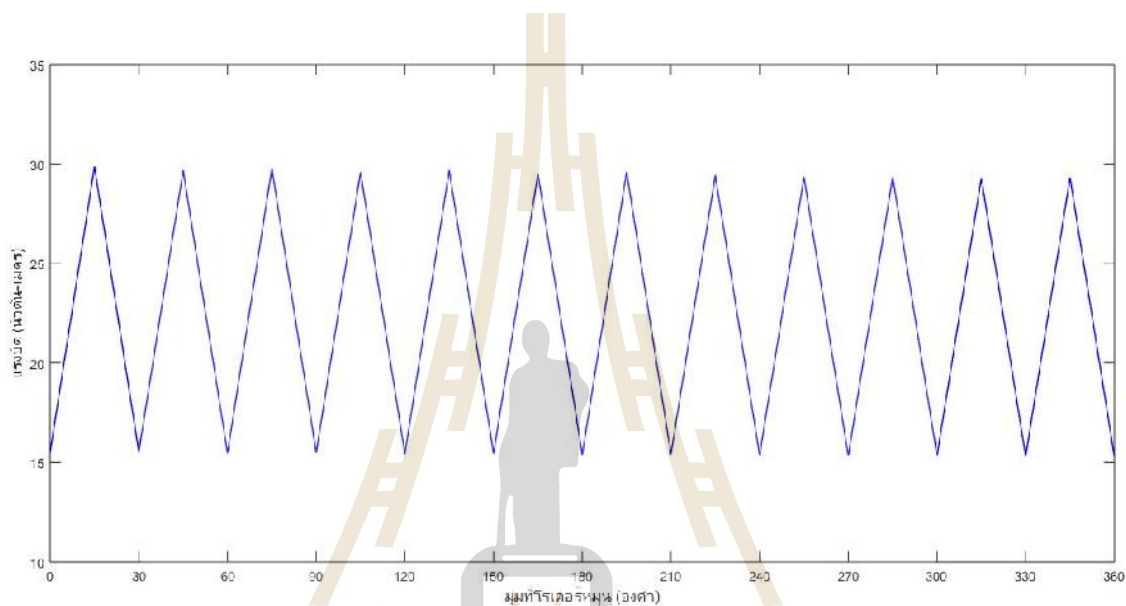


รูปที่ 5.57 สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติที่กระจายตัวในมอเตอร์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

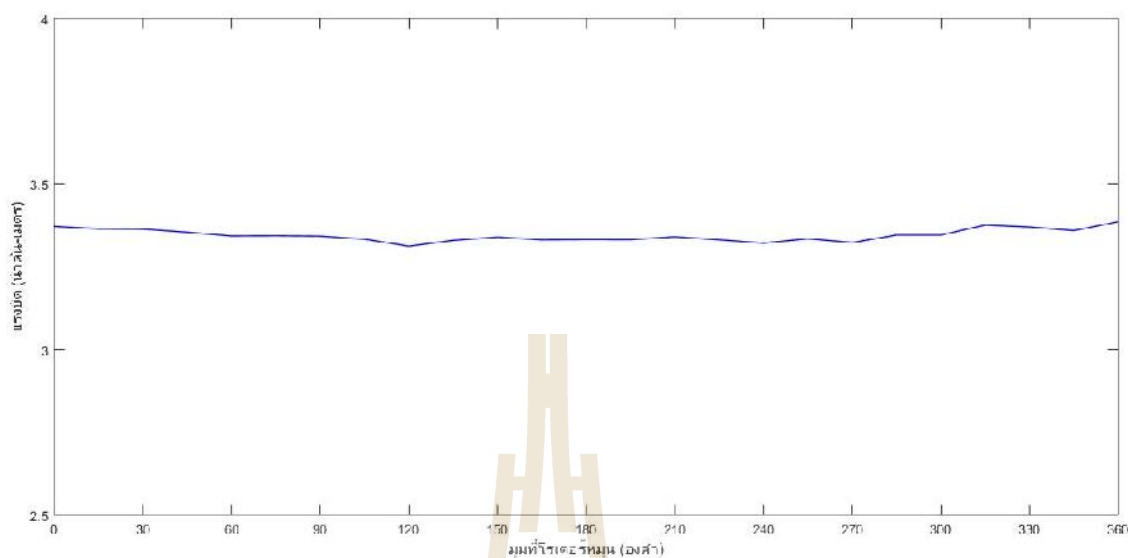
จากรูปที่ 5.42-5.45 เป็นการแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 จากรูปที่ 5.47-5.51 เป็นการแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 และจากรูปที่ 5.53-5.56 เป็นการแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กทั่วปริมาตรของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 พบว่าลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าการกระจายของสนามแม่เหล็กบริเวณสเตเตอร์และโรเตอร์ และบริเวณช่องว่างอากาศมีค่าของสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ พบว่าลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กจะสอดคล้องกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในบริเวณต่าง ๆ ทั้งในช่วงการหมุนของแต่ละรอบของโรเตอร์ และสามารถดูภาพจำลองผลลักษณะแบบ 3 มิติของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 ได้ดังรูปที่ 5.46 ของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 ได้ดังรูปที่ 5.52 และของมอเตอร์สวิตซ์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ได้ดังรูปที่ 5.57 ซึ่งทั้ง 3 รูปจะเห็นลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าการกระจายตลอดความยาวของมอเตอร์

5.6 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์

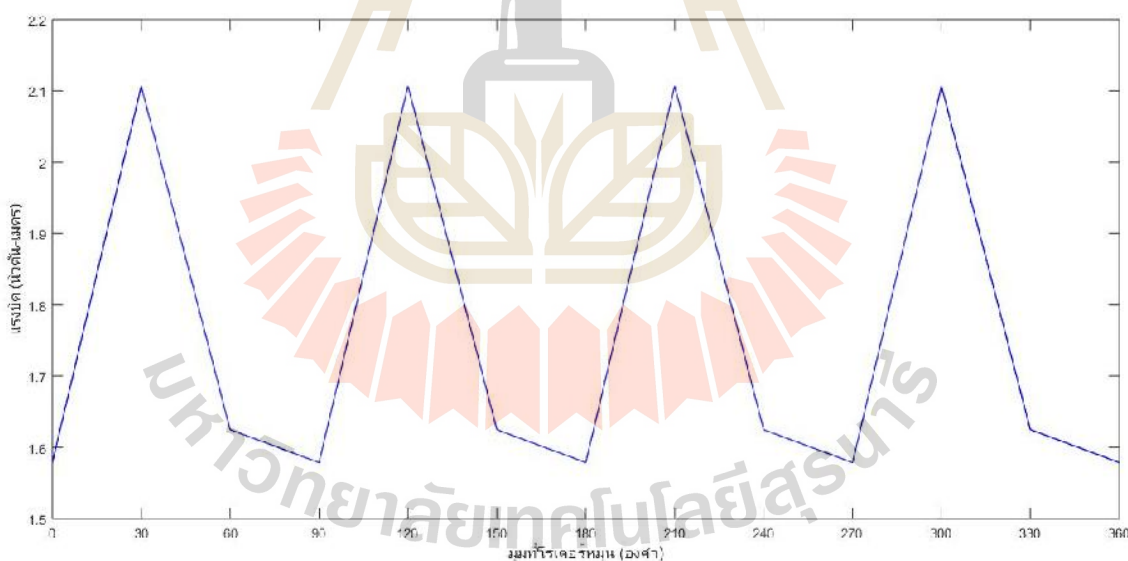
ผลการจำลองของกราฟแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ได้จาก SIMULINK เมื่อพิจารณาในกรณีที่มอเตอร์ไม่มีการจ่ายโหลด โดยการแสดงผลกราฟค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส เทียบกับจังหวะมุมการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.58-5.60 ตามลำดับ



รูปที่ 5.58 แรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



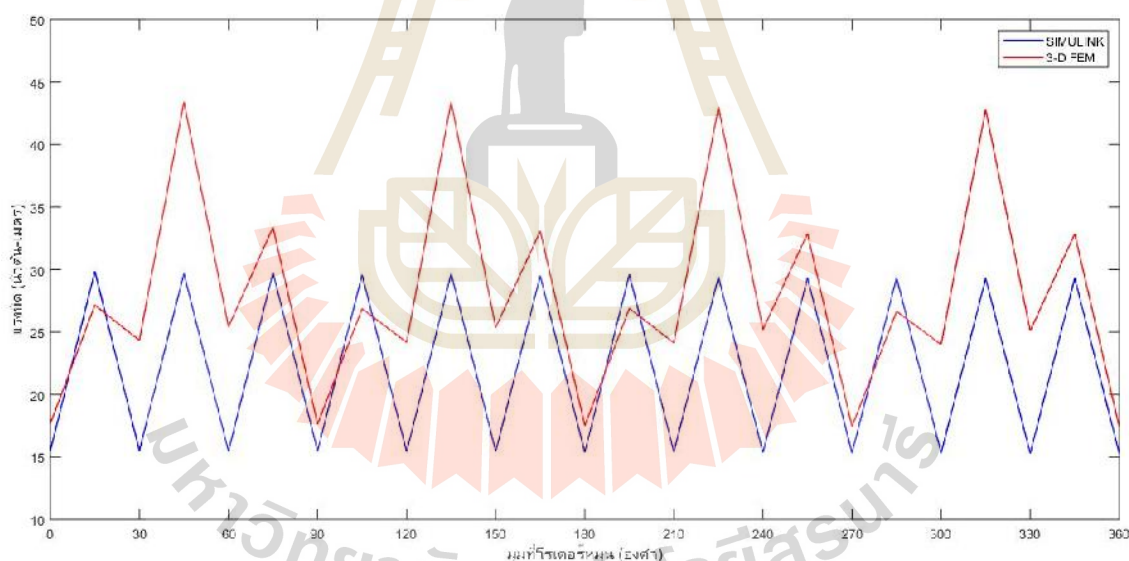
รูปที่ 5.59 ค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน



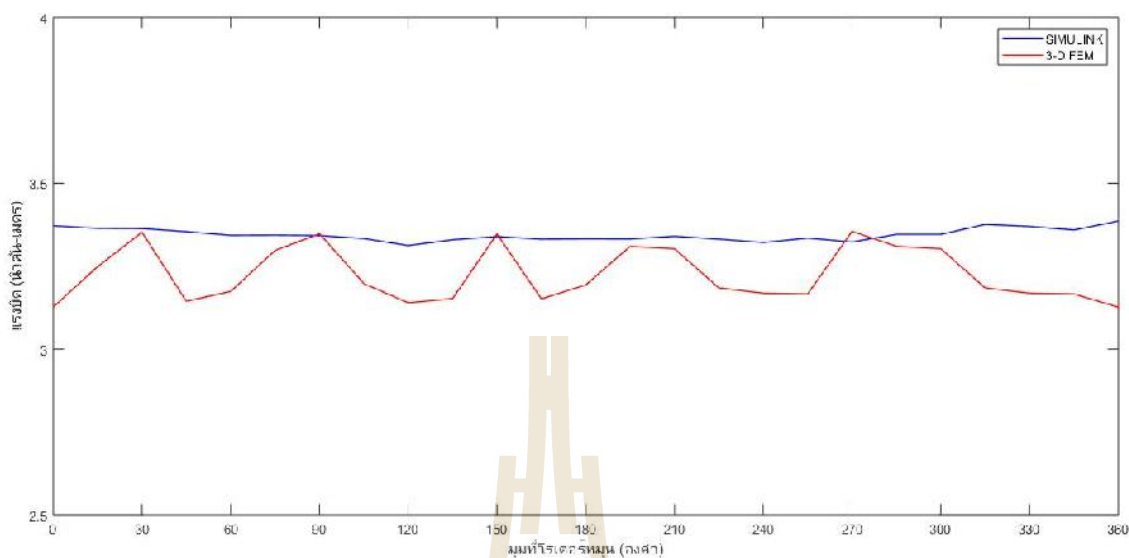
รูปที่ 5.60 ค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 5 เฟส จาก SIMULINK เมื่อเปลี่ยนตามตำแหน่งการหมุน

จากการจำลองค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟสที่
 กลางในข้างต้น สามารถแปลงระบบพิกัดจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกเพื่อคำนวณหาค่า

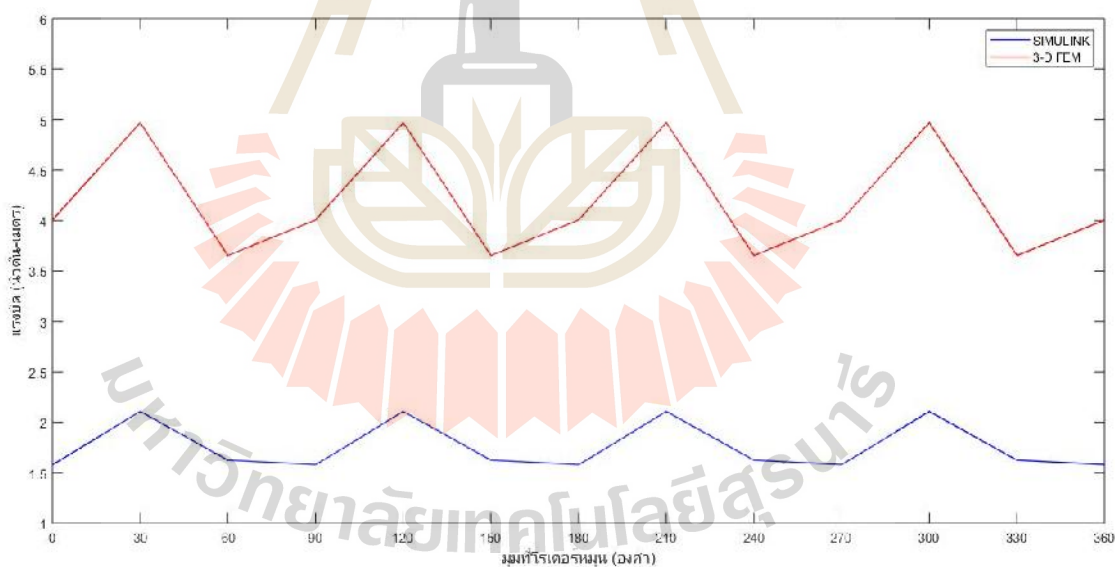
สนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (Radial flux density : B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (Tangential flux density : B_t) เมื่อพิจารณาที่มีมุม θ ที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.37) และ (4.38) ในบทที่ 4 และคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสแล้วจะใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (4.40) ในบทที่ 4 ซึ่งจะได้ค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส เมื่อพิจารณาแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุนสามารถคำนวณได้จากการนำค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส (F) ซึ่งเป็นแรงหลักที่นำมาพิจารณาคูณด้วยระยะรัศมี (r) จากจุดศูนย์กลางมอเตอร์มายังตำแหน่งกึ่งกลางซี่ของโรเตอร์ที่พิจารณา จากนั้นนำค่าแรงบิดของซี่โรเตอร์ทั้งหมดมารวมกันจะได้เป็นค่าแรงบิดของจังหวะรอบนั้น ๆ ซึ่งสามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK กับค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.61-5.63 ตามลำดับ จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK



รูปที่ 5.61 เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4



รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของมอเตอร์
สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6



รูปที่ 5.63 เปรียบเทียบค่าแรงบิดจาก SIMULINK กับวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของมอเตอร์
สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8

จากรูปที่ 5.17-5.22 แสดงค่ากระแสที่ได้จากโปรแกรม SIMULINK เพื่อใช้ในการป้อนเป็น
อินพุตให้กับโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด เพื่อ

นำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอกที่ป้อนเป็นอินพุตดังสมการที่ (5.1) สามารถแสดงค่ากระแสสูงสุดค่ากระแสต่ำสุด และค่ากระแสเฉลี่ย ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่ากระแสจากโปรแกรม SIMULINK ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด

เปรียบเทียบ	มอเตอร์สวิตช์ รีลักแตนซ์ 3 เฟส	มอเตอร์สวิตช์ รีลักแตนซ์ 4 เฟส	มอเตอร์สวิตช์ รีลักแตนซ์ 5 เฟส
กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	19.30	4.03	6.46
กระแสต่ำสุด (แอมแปร์)	-0.24	-0.12	-0.12
กระแสเฉลี่ย (แอมแปร์)	6.83	1.86	2.39

จากตารางที่ 5.5 เมื่อทราบค่ากระแสสูงสุด กระแสต่ำสุด และกระแสเฉลี่ย สามารถนำมาหาค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสได้จากสมการที่ (5.2) สามารถแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.6

$$I_{ripple} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{av}} = \frac{\Delta I}{I_{av}} \quad (5.2)$$

ตารางที่ 5.6 ค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด

เปรียบเทียบ	มอเตอร์สวิตช์รีลัก แตนซ์ 3 เฟส	มอเตอร์สวิตช์รีลัก แตนซ์ 4 เฟส	มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส
อัตราการ กระเพื่อมกระแส (แอมแปร์)	2.86	2.23	2.39

จากรูปที่ 5.61-5.63 แสดงกราฟแรงบิดในระบบทั้งหมดสามารถนำไปคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยการเฉลี่ยค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สภาวะคงตัว โดยแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง

3 ชนิด ณ จังหวะการหมุนของโรเตอร์ที่พิจารณา สามารถแสดงค่าแรงบิดสูงสุด ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดเฉลี่ย ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด

เปรียบเทียบ	มอเตอร์สวิตช์ รีลัคแตนซ์ 3 เฟส		มอเตอร์สวิตช์ รีลัคแตนซ์ 4 เฟส		มอเตอร์สวิตช์ รีลัคแตนซ์ 5 เฟส	
	SIMULINK	3-D FEM	SIMULINK	3-D FEM	SIMULINK	3-D FEM
แรงบิดสูงสุด (นิวตัน- เมตร)	29.87	43.42	3.37	3.35	2.11	4.97
แรงบิดต่ำสุด (นิวตัน- เมตร)	15.30	17.40	3.31	3.12	1.58	3.65
แรงบิดเฉลี่ย (นิวตัน- เมตร)	22.19	27.91	3.35	3.22	1.76	4.19

จากตารางที่ 5.7 เมื่อทราบค่าแรงบิดสูงสุด แรงบิดต่ำสุด และแรงบิดเฉลี่ยสามารถนำมาหาค่าอัตราการกระเพื่อมของแรงบิดได้จากสมการที่ (5.3)

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} = \frac{\Delta T}{T_{av}} \quad (5.3)$$

และเมื่อคำนวณค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด

เปรียบเทียบ	มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส		มอเตอร์สวิตช์รีลัก แตนซ์ 4 เฟส		มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส	
	SIMULINK	3-D FEM	SIMULINK	3-D FEM	SIMULINK	3-D FEM
อัตราการ กระเพื่อม แรงบิด (นิวตัน- เมตร)	0.66	0.93	0.02	0.07	0.30	0.32

จากการคำนวณค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิด ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด ดังตารางที่ 5.8 พบว่ามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เมื่อมีจำนวนเฟสเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่ค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดน้อยลง โดยมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสมีอัตราการกระเพื่อมแรงบิดน้อยที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสที่ได้จากโปรแกรม SIMULINK ดังตารางที่ 5.6 โดยค่ากระแสดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของกระแสภายนอกที่ใช้ป้อนเป็นอินพุตให้กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ จึงมีผลสำหรับการคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิดด้วย เมื่อพิจารณาค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิดพบว่าเมื่อมีจำนวนเฟสเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่ค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสน้อยลง และมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสมีค่าอัตราการกระเพื่อมกระแสน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน

5.7 สรุป

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส 4 เฟส และ 5 เฟส พร้อมทั้งจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติภายใต้สภาวะคงตัวที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการคำนวณที่ได้พบว่ามอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ที่มีจำนวนเฟสมาก มีแนวโน้มที่ค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดน้อยลง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง พร้อมทั้งการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส ชนิด 6/4 มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส ชนิด 8/6 และมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 5 เฟส ชนิด 10/8 ซึ่งการจำลองผลจะพิจารณาในขณะที่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เข้าสู่สภาวะคงตัว โดยการจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง อีกทั้งนำค่าสนามแม่เหล็กมาคำนวณหาค่าแรงบิดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นส่วนที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาต่อยอดความรู้ในงานวิจัย ศึกษาทฤษฎี และหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในบทที่ 3 ศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งเรื่องทฤษฎีของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ วงจรพื้นฐานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ทฤษฎีของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัยนี้ด้วย ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลอ์เคิน ในบทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ภายใต้สภาวะคงตัวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งผลการจำลองที่ได้พบว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดนั้นเห็นความเป็นขั้วที่ชัดเจน และค่าสนามแม่เหล็กที่ได้พบว่ามีค่ามากในบริเวณแกนเหล็กของสเตเตอร์ โดย

กระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อว่า Solidwork ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็ก รวมทั้งนำค่าสนามแม่เหล็กมาคำนวณแรงบิดเพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากโปรแกรม SIMULINK เมื่อนำค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงบิดที่ได้จาก SIMULINK และคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์โดยการเฉลี่ยค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัว ณ จังหวะการหมุนของโรเตอร์ที่พิจารณา เมื่อทราบค่าแรงบิดสูงสุด ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดเฉลี่ย สุดท้ายก็จะสามารถคำนวณอัตราการกระเพื่อมแรงบิดของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งผลสรุปค่าแรงบิดของระบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.6 ในบทที่ 5 ซึ่งผลการคำนวณที่ได้พบว่ามอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่มีจำนวนเฟสมาก มีแนวโน้มที่ค่าอัตราการกระเพื่อมแรงบิดน้อยลง

6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. การออกแบบจำนวนขั้วโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่เน้นเรื่องการลดการกระเพื่อมของแรงบิด
2. การออกแบบมอเตอร์สวิตช์รีลัคแตนซ์ที่เน้นเรื่องการลดการสั่นสะเทือนและเสียงดังรบกวน

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ. ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟในต้อลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟในต้อลลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุเมธ ลิปิโรจนพงศ์ (2549). การวิเคราะห์สวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์ด้วยวิธีไฟในต้อลลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมไอมูล. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Afjei, E., Seyadatan, A., & Torkaman, H. (2009). A New Two Phase Bidirectional Hybrid Switched Reluctance Motor/Field-Assisted Generator. *Journal of Applied Sciences*, 9(4), 765-770. doi:10.3923/jas.2009.765.770
- Bedrosian, G. (1993). A new method for coupling finite element field solutions with external circuits and kinematics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(2), 1664-1668. doi:10.1109/20.250726
- Chen, H., Yan, W., Gu, J. J., and Sun, M. (2018). Multiobjective Optimization Design of a Switched Reluctance Motor for Low-Speed Electric Vehicles With a Taguchi-CSO Algorithm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(4), 1762-1774. doi:10.1109/tmech.2018.2839619
- Ferkova, Z., and Suchy, L. (2018). Simulation of 6/4 and 12/8 switched reluctance motor using direct torque control. *2018 Elektro*. doi:10.1109/elektro.2018.8398292
- Guo, Y., Ma, Q., and Ye, W. (2016). Comparative study on torque ripple suppression method of three-phase 6/4 switched reluctance motor. *2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. doi:10.1109/aus.2016.7748074

- Ishikawa, T., and Dohmeki, H. (2012). The fundamental design technique of switched reluctance motors, and comparison with PMSM. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines. doi:10.1109/icelmach.2012.6349916
- Kumari, S., and Ashok, S. (2017). Design of controller for speed regulation and reduction of torque ripple in 6/4 switched reluctance motor. 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). doi:10.1109/itcosp.2017.8303100
- Kuss, H., Wichert, T., and Szymanski, B. (2007). Design of a high speed Switched Reluctance Motor for spindle drive. 2007 Compatibility in Power Electronics. doi:10.1109/cpe.2007.4296521
- Li, J., Song, X., and Cho, Y. (2008). Comparison of 12/8 and 6/4 Switched Reluctance Motor: Noise and Vibration Aspects. IEEE Transactions on Magnetics, 44(11), 4131-4134. doi:10.1109/tmag.2008.2002533
- Lin, C., and Fahimi, B. (2011). Reduction of torque ripple in Switched Reluctance Motor drives using Field Reconstruction Method. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. doi:10.1109/vppc.2011.6043029
- Mir, S., Husain, I., and Elbuluk, M. (1998). Switched reluctance motor modeling with on-line parameter identification. IEEE Transactions on Industry Applications, 34(4), 776-783. doi:10.1109/28.703972
- Nezamabadi, M. M., Afjei, E., Naemi, M. R., and Afjei, A. A. (2016). Design and 3D-FEM analysis of a rotary - linear Switched Reluctance Motor. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). doi:10.1109/speedam.2016.7525810
- Parreira, B., Rafael, S., Pires, S., and Branco, P. C. (n.d.). Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6-switched reluctance machine: FEM analysis and experimental tests. 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.03TH8692). doi:10.1109/sie.2003.1267924
- Pindoriya, R. M., Rajpurohit, B. S., Kumar, R. and Srivastava K. N. (2018). Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). doi:10.1109/etechnxt.2018.8385282

- Ro, H., Jeong, H., and Lee, K. (2013). Torque ripple minimization of switched reluctance motor using direct torque control based on sliding mode control. 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. doi:10.1109/isie.2013.6563641
- Siadatan, A., Najmi, V., Asgar, M., and Afjei, E. (2011). A new 6/4 two layers switched reluctance motor: Concept, simulation and analysis. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference. doi:10.1109/acemp.2011.6490604
- Singh, G., and Singh, B. (2018). Control of a 12/8 switched reluctance motor with saturation characteristics for light electric vehicle. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). doi:10.1109/etechnxt.2018.8385373
- Sholahuddin, U., Purwadi, A., Heryana, N., Rizqiawan, A., and Haroen, Y. (2014). Magnetic simulation comparison of 30 kW switched reluctance motor with 6/4 and 6/10 design configurations for electric vehicle. 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS). doi:10.1109/iceecs.2014.7045234
- Torkaman, H., and Afjei, E. (2009). Magneto Static Field Analysis Regarding The Effects Of Dynamic Eccentricity In Switched Reluctance Motor. Progress In Electromagnetics Research M, 8, 163-180. doi:10.2528/pierm09060205
- Zhang, J., Wang, L., Zhang, H., and Gao, R. (2009). Non-linear radial force simulation of switched reluctance motors based on finite element model. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. doi:10.1109/robio.2009.4913253



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

S. Son-in, T. Kulworawanichpong and P. Pao-la-or. Magnetic field comparison of 6/4 and 8/6 switched reluctance motor by using 3-D finite element method. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. Vol. 9, no. 1, January 2020



Magnetic field comparison of 6/4 and 8/6 switched reluctance motor by using the 3-D finite element method

S. Son-in, T. Kulworawanichpong, P. Pao-la-or *

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand

Abstract

Magnetic field is a crucial point for studying the behavior of switched reluctance motor (SRM) of electric vehicle (EV). Nowadays the pollution of the environment is increasing, which one of the problems is air pollution from vehicles. Hence, to reduce air pollution, EVs are another option. This paper presents a mathematical model of SRM, and it is confirmed the validity by using the three-dimensional finite element method (3-D FEM), which has developed in MATLAB. 3-D FEM is being used to determine magnetic field distribution in and around the SRMs. Moreover, this paper discusses the distribution of the magnetic field acting on the stator teeth around the air-gap. The simulation results compare for two types of three-phase 6/4 poles SRM and four-phase 8/6 poles SRM.

Keywords: Switched reluctance motor (SRM), 3-D finite element method (3-D FEM), electrical vehicle (EV), magnetic field, radial force

1. Introduction

In the 21st century, conventional vehicles produce air pollution has caused damage in term of the environment. The most significant air pollutants are from traditional vehicles [1]. Recently, EVs saw a resurgence due to EVs have few direct emission, technological developments, and an increased focus on renewable energy, thus rise attention to the EVs. The SRMs are becoming attractive for EVs propulsion in several decades, which definite advantages of simple, robust, heat tolerance and low-cost structure [2-4], especially the absence of copper windings or permanent magnets (PMs) and doubly salient structure in the rotor [5, 6]. There are much possible topological structures for SRM, mainly depending on the number of phases as well as the number of stator and rotor poles. Two basic SRMs are the three-phase 6/4 poles SRM, which has six stator poles and four rotor poles and the four-phase 8/6 poles SRM, which has eight stator poles and six rotor poles. The three-phase 6/4 poles SRM has the advantages of lower cost and high-speed operation. On the other hand, the four-phase 8/6 poles SRM has better starting torque and lower torque ripple.

The determination of numerical based on finite element method (FEM) analysis. The FEM is probably the most widely used mathematical approximation technique for solving electromagnetic problems, temperature rise, and heat transfer problem. The FEM is similar to the finite difference (FD) method, which the FEM is more efficient than the FD method due to flexibility, accuracy and it can gain a definite advantage when it applied in the SRM. This paper has considered the problem in three dimensions. Therefore 3-D FEM has been built to predict their performance.

2. Modeling of Magnetic Field for Switched Reluctance Motor

2.1. Numerical analysis

Regarding calculation, which electromagnetic problems mostly differential equation starting from the

*Manuscript received November 27, 2018; revised October 25, 2019.
Corresponding author: Tel.: 66-44-22-4400; email: padej@sut.ac.th
doi: 10.12720/sge.9.1.33-43

magnetic vector potential equations in x , y and z direction for SRM from as follow (1), [7].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial z} \right) + J_0 = 0 \quad (1)$$

where, A is the magnetic vector potential (Wb/m), γ is the magnetic reluctivity, which $\gamma = \frac{1}{\mu}$ by μ is magnetic permeability (H/m), and J_0 is the electrical current density (A/m^2).

2.2. Discretization

This paper compared with the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM. The three-phase 6/4 poles SRM structure consists of a magnetically dependent stator and rotor set, where each stator set includes six poles having 30 degrees arc length with coils wrapped around them while the rotor comprises of four poles with different arc lengths. The four-phase 8/6 poles SRM structure consists of a magnetically dependent stator and rotor set, where each stator set includes eight poles having 30 degrees arc length with coils wrapped around them while the rotor comprises of six poles with different arc lengths.

The motor configurations used in this study shown Table 1. [8], which refers to the SRM scaling of dimension as follows Fig. 1.-Fig. 3. Both tested specimens of SRMs have 72 mm of stator core outer diameter, 62 mm of stator core inner diameter and 35 mm of each module thickness. Applying the 3-D FEM for solving the PDE can be discretized by using linear tetrahedron elements and accomplished by using 3-D grid generation. The three-phase 6/4 poles SRM consists of 51,460 nodes and 298,580 elements. The four-phase 8/6 poles SRM consists of 41,134 nodes and 236,228 elements.

Due to the precise comparison between the three-phase 6/4 poles SRM and the four-phase 8/6 poles SRM, the mesh densities are considered to be precisely the same for both cases [9]. The model with mesh densities used in the simulation is as shown in Fig. 3. If the conduction currents flow in one of the phases, as shown in Fig. 2. [10], then electromagnetic forces will be produced between the rotor and stator poles.

Table 1. The motor specifications

Parameter	Value	Parameter	Value
Stator core outer diameter	72 mm	Stator core inner diameter	62 mm
Stator pole arc	30 degree	Air gap	0.25 mm
Rotor pole arc	45 degree	Rotor shaft diameter	10 mm
Each module thickness	35 mm	Rotor core outer diameter	41.5 mm

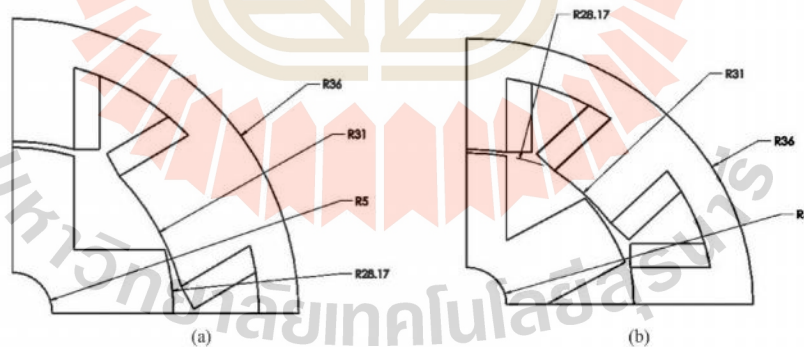


Fig. 1. The geometry of the tested SRM with dimension (mm) (a) the 6/4 poles SRM (b) the 8/6 poles SRM

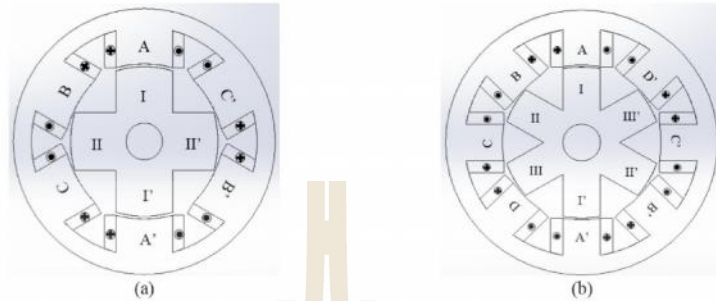


Fig. 2. Detail of the winding distribution (a) three-phase in 6 slots (b) four-phase in 8 slots

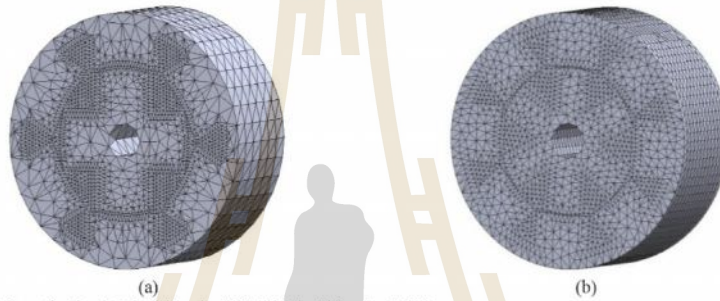


Fig. 3. Discretization (a) the 6/4 poles SRM (b) the 8/6 poles SRM

2.3. 3-D FEM formulation

Interpolate function of each element was derived by using the Galerkin approach, which is the exact weight residual technique for which the weighting functions are similar to the shape functions. The shape function for 3-D FEM used in this research is the application of three dimensions (4 nodes tetrahedron element). According to this method, the magnetic vector potential expressed as follow (2), [11]

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \tag{2}$$

where, N_i, N_j, N_k, N_l are the element shape functions of node i, j, k, l respectively and A_i, A_j, A_k, A_l are the approximation of the magnetic vector potential at each node i, j, k, l respectively. The weighting functions are similar to the shape function, which is

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y + d_n z}{6V} \tag{3}$$

where, $n = i, j, k, l$ and V is the volume of the tetrahedron element, which expressed as

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \tag{4}$$

And the positional coefficient defined by

$$\begin{aligned}
a_i &= x_i(y_j z_k - y_k z_j) + x_k(y_i z_j - y_j z_i) + x_j(y_k z_i - y_i z_k) & b_i &= y_i(z_k - z_j) + y_k(z_j - z_i) + y_j(z_i - z_k) \\
a_j &= x_i(y_k z_i - y_i z_k) + x_k(y_i z_i - y_i z_i) + x_i(y_i z_k - y_k z_i) & b_j &= y_i(z_i - z_k) + y_i(z_k - z_i) + y_k(z_i - z_i) \\
a_k &= x_i(y_i z_j - y_j z_i) + x_j(y_i z_i - y_i z_i) + x_i(y_j z_i - y_i z_j) & b_k &= y_i(z_j - z_i) + y_j(z_i - z_i) + y_i(z_i - z_j) \\
a_l &= x_k(y_j z_i - y_i z_j) + x_j(y_i z_k - y_k z_i) + x_i(y_k z_j - y_j z_k) & b_l &= y_k(z_i - z_j) + y_i(z_j - z_k) + y_j(z_k - z_i) \\
c_i &= x_i(z_j - z_k) + x_j(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_j) & d_i &= x_i(y_k - y_j) + x_k(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_k) \\
c_j &= x_i(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_i) + x_i(z_i - z_k) & d_j &= x_i(y_i - y_k) + x_i(y_k - y_i) + x_k(y_i - y_i) \\
c_k &= x_i(z_i - z_j) + x_j(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_i) & d_k &= x_i(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_i) + x_i(y_i - y_j) \\
c_l &= x_k(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_k) + x_i(z_k - z_j) & d_l &= x_k(y_i - y_j) + x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i)
\end{aligned}$$

Formulating each element equations of (1) and substituting the approximate results in (1), which is equal residual function as follow (5).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial z} \right) + J_0 = R \quad (5)$$

where, R is the residual function. The method of the weighted residual with Galerkin approach applied to the PDE, where the integrations performed over the element domain V expresses as

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial A}{\partial z} \right) + J_0 \right] dV = 0$$

Which the equation can be written in term of the matrix as form (6).

$$[K][A] = \{F\} \quad (6)$$

where, $[K]$ is the permeability matrix of the problem and for one element consists of 4 nodes, expression of the FEM approximation is 4×4 a matrix, which shown in term of positional coefficient as follow (7).

$$[K]_{\text{elem}} = \frac{\gamma}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 + d_2 d_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 + d_3 d_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 + d_3 d_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_1 + c_4 c_1 + d_4 d_1 & b_4 b_2 + c_4 c_2 + d_4 d_2 & b_4 b_3 + c_4 c_3 + d_4 d_3 & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

where $\{F\}$ is the load vector of a problem as follow (8).

$$\{F\}_{\text{elem}} = \frac{-J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

The electrical current density (J_0) determines from the current through the area of conductors can define by (9), where N is turn number of the conductor (turn), I is current quantities (A), and A is an area of conductors (m^2).

$$J_0 = \frac{N \times I}{A} \quad (9)$$

3. Calculating Current and Speed of SRM

SIMULINK is a block diagram for simulation and model-based design. It supports the system-level design, simulation, automatic code generation, and continuous test. SIMULINK provides a graphical editor, customizable block libraries and solving for modeling and simulating dynamics system [12].

Both current (i) of the 6/4 poles SRM, three-phase, 60 kW, and the 8/6 poles SRM, four-phase, 75 kW from SIMULINK fed to SRMs model as follow Fig.4.(a) and Fig.4.(b), respectively are shown each phase of SRMs currently, and both angular velocity (rad/s) of the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM as follow Fig.5.(a) and Fig.5.(b), respectively are shown speed each SRMs. In this study the simulation in no-load condition ($T_L = 0$).

From SIMULINK result, starter current and steady-state current of the 6/4 poles SRM are higher than starter current and steady-state current of the 8/6 poles SRM, which both can also observe the value of starter current and steady-state flow has a positive value and few negative values of current. The speed operation of 6/4 poles SRM is higher than 8/6 poles SRM, which relate to the number of stators.

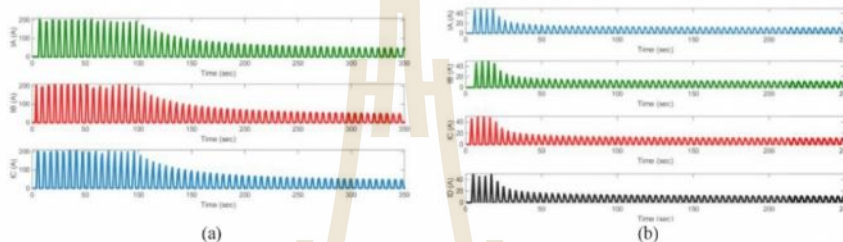


Fig. 4. Starter current and steady-state current for (a) the 6/4 poles SRM (b) the 8/6 poles SRM

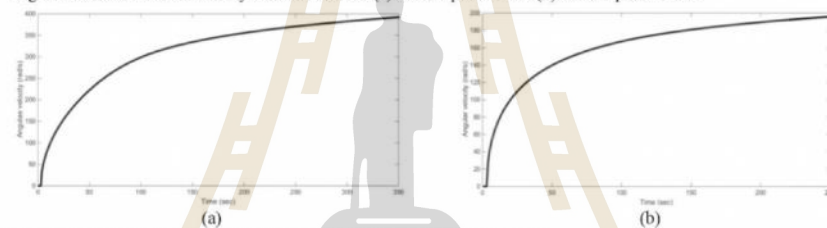


Fig. 5. The angular velocity of (a) the 6/4 poles SRM (b) the 8/6 poles SRM

4. 3-D FEM Simulation Result

The simulation of 3-D FEM written by MATLAB programming. The Dirichlet boundary condition ($A = 0$) is specified both along the outer surface of the stator core and along the inner surface rotor core of the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM. In the SIMULINK result, both current and speed used to solving the FEM equation. The size of each time step is the time needed for the rotor turn fixed at $\Delta\theta = (360/4)^\circ$ of the 6/4 poles SRM, which 4 is a number of rotor slot and $\Delta\theta = (360/6)^\circ$ of the 8/6 poles SRM, which 6 is a number of rotor slot. The ratio of The specific medium permeability (μ) is related the relative permeability of the stator and rotor core (μ_r) and the free space permeability (μ_0) by $\mu = \mu_0 \times \mu_r$, where $\mu_r = 5000$, and $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ [13-15].

For 3-D FEM simulation result can be presented by graphically in the filled polygon of magnetic vector potential and the magnetic field dispersed of SRM. Fig.6.(a) and Fig.7.(a) shown the magnetic vector potential distribution in 3-D of the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM, respectively. Fig.6.(b)-Fig.6.(d) shown the cross-sectional magnetic vector potential distribution of the 6/4 poles SRM at 0, 30 and 60 degrees in the aligned position, respectively (repeat every 90 degrees). Fig.7.(b)-Fig.7.(e) shown the cross-sectional magnetic vector potential distribution of the 8/6 poles SRM at 0, 15, 30 and 45 degrees, respectively (repeat every 60 degrees). To be consistent, Fig.8.(a) and Fig.9.(a) shown the magnetic field distribution of the SRMs in 3-D of the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM, respectively. Fig.8.(b)-

Fig.8.(d) shown the cross-sectional magnetic field distribution of the 6/4 poles SRM at 0, 30 and 60 degrees of the rotor position, respectively. Fig.9.(b)-Fig.9.(c) shown the cross-sectional magnetic field distribution of the 8/6 poles SRM at 0, 15, 30 and 45 degrees in the aligned position, respectively.

From 3-D FEM simulation result can also observe that the magnetic vector potential and the magnetic field distribution between the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM are different. The value of the magnetic vector potential of the 6/4 poles SRM is higher than the 8/6 poles SRM. The amount of a magnetic field of the 6/4 poles SRM is higher than the 8/6 poles SRM, which the magnetic field related with the magnetic vector potential to $B = \nabla \times A$. Meanwhile, the lowest magnetic field occurs at all stator slot, and the area of the coil is fed each phase of SRMs currently because the magnetic field is a vector field that describes the magnetic influence of electrical currents and magnetized materials. The value of the magnetic field has an area of the stator and rotor cores because it has the high relative permeability. The relative permeability is the measure of the ability of a material of a magnetic field. The highest magnetic field occurs at stator and rotor teeth.

The value of magnetic field (B) inside each element is obtained from $B = \nabla \times A$, which magnetic field (B) has a component in x and y direction [16] computed by (10)-(11)

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k + c_l A_l}{6V} \quad (10)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k + b_l A_l}{6V} \right) \quad (11)$$

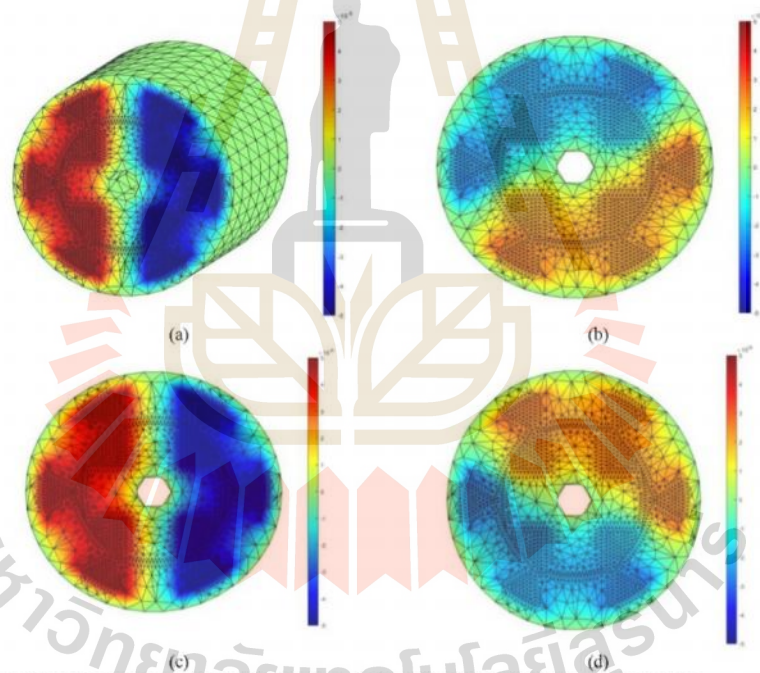


Fig.6. Magnetic vector potential distribution (Wb/m) of the 6/4 poles SRM (a) example at the rotor position 30° in 3-D (b) at the rotor position 0° (c) at the rotor position 30° (d) at the rotor position 60°

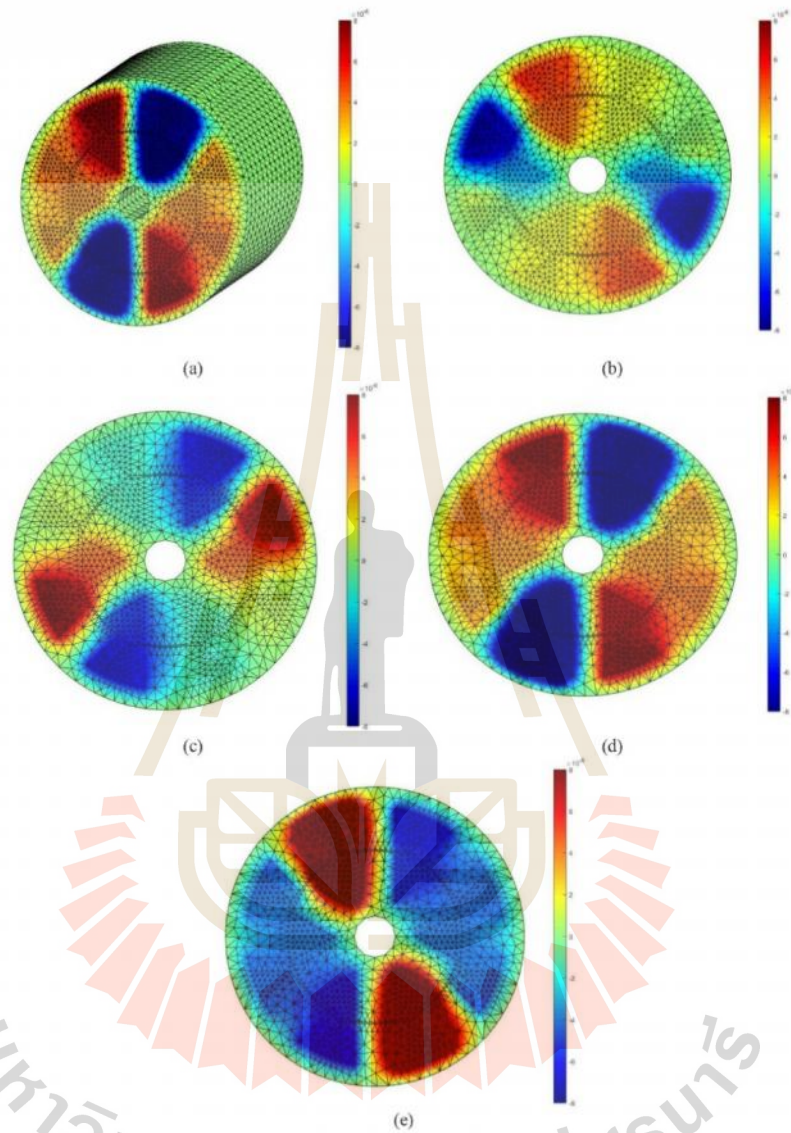


Fig.7. Magnetic vector potential distribution (Wb/m) of the 8/6 poles SRM (a) example at the rotor position 30° in 3-D (b) at the rotor position 0° (c) at the rotor position 15° (d) at the rotor position 30° (e) at the rotor position 45°

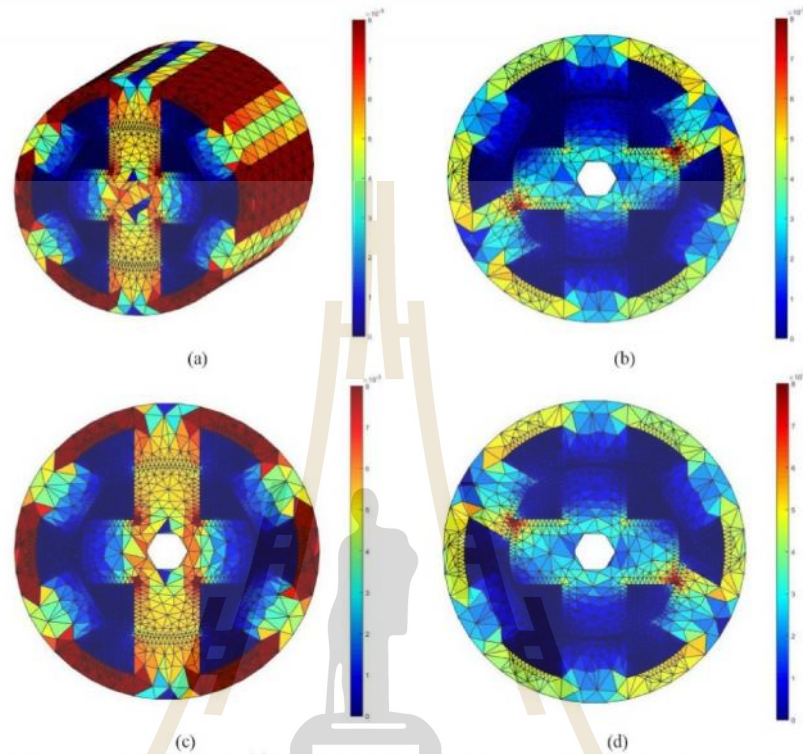
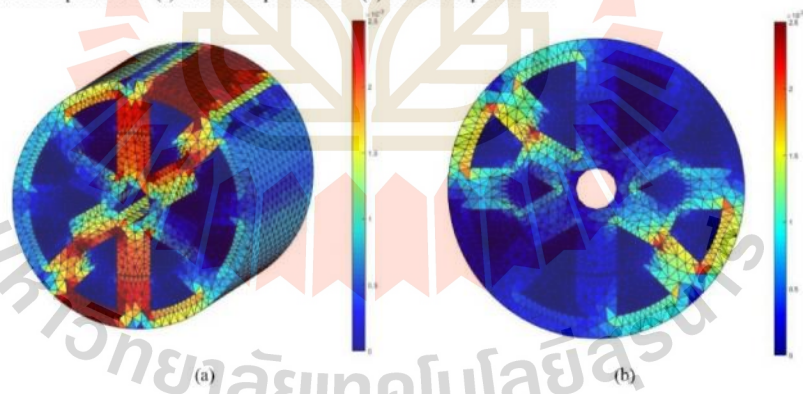


Fig.8. Magnetic field distribution (T) of the 6/4 poles SRM (a) example at the rotor position 30° in 3-D (b) at the rotor position 0° (c) at the rotor position 30° (d) at the rotor position 60°



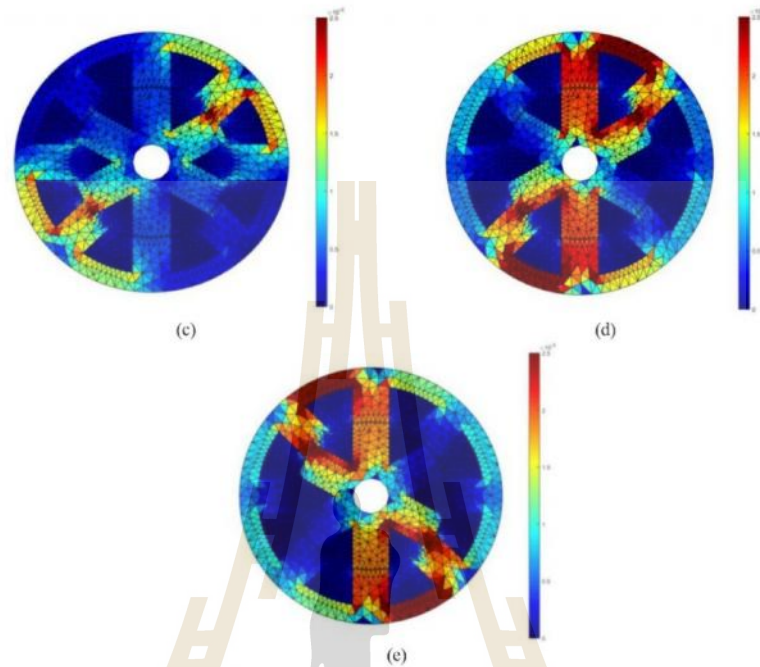


Fig.9. Magnetic field distribution (T) of the 8/6 poles SRM (a) example at the rotor position 30° in 3-D (b) at the rotor position 0° (c) at the rotor position 15° (d) at the rotor position 30° (e) at the rotor position 45°

Moreover, the 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 , which is

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (12)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (13)$$

where, ϕ is the angle of stator teeth center concerning the positively horizontal axis.

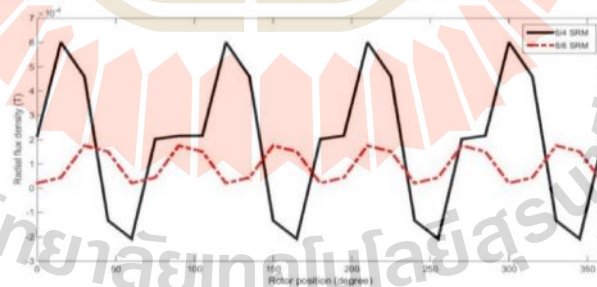


Fig.10. Compare of the radial flux density between the 6/4 poles SRM and the 8/6 poles SRM

From Fig.10. is shown the radial flux density acting on the one stator tooth in the radial direction between the three-phase 6/4 poles SRM and the four-phase 8/6 poles SRM. It can also observed that the curve in Fig.10. resembles a sinusoid. Maxwell's stress equation used to determine the distribution of the radial force across the air-gap as from [17],

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (14)$$

The 3-D FEM approach is also utilized to calculate the SRM's vibration. For our computational vibration is considered the stator teeth, by assuming that the force acting on the center of stator teeth could be transmitted through to the SRM frame.

The radial force (F_r) generally means a force exerted in a radial direction towards the center and affected the stator radial vibration and acoustic noise in SRMs [18]. The curvature of the radial flux density of the 8/6 pole SRM is smoother than the 6/4 poles SRM. The amplitude of 6/4 poles SRM is higher than 8/6 poles SRM. If there is nothing to disturb, less the radial force into the slot, in this case, to cause less vibration, compare the 6/4 poles SRM is vibrated than the 8/6 poles SRM.

5. Conclusion

This paper describes the modeling and simulation technique via the three-dimensional finite element method (3-D FEM) for solving the partial differential equation of magnetic vector potential, which written in MATLAB programming. Also, the simulated result present in this paper shows that 3-D FEM can be used to study of the magnetic vector potential and the magnetic field distribution in and around the switched reluctance motor (SRM) by comparison between the three-phase 6/4 poles SRM and the four-phase 8/6 poles SRM. Due to the results show this method is simple to illustrate how the magnetic vector potential and the magnetic field throughout the volume of SRMs. This advantage can be developed to calculate based on the magnetic field, e.g., magnetic vibration and acoustic noise.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

Pao-la-or conducted the research; Son-in and Kulworawanichpong analyzed the data; Son-in and Pao-la-or wrote the paper; all authors had approved the final version.

Acknowledgements

The School of Electrical Engineering supported this work, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

References

- [1] Pindoriya RM, Rajpurohit S, Kumar R, Srivastava K. Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles, in *IEEMA Engineer Infinite Conference*, 2018.
- [2] Mir S, Husain I, Elbuluk M. Switched reluctance motor modeling with on-line parameter identification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998.
- [3] Chen H, Yan W, Gu JJ, Sun M. Multiobjective optimization design of a switched reluctance motor for low-speed electric vehicles with a Taguchi- CSO algorithm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018.
- [4] Rajkumar S, Sedharaman K, Purinnetla S, Joycy FLA. Design and analysis of high speed switched reluctance motor for two different materials. presented at the National Level Technical Conference, March 1, 2015.
- [5] Singh G, Singh B. Control of a 12/8 switched reluctance motor with saturation characteristics for light electric vehicle. *IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxt)*, 2018.

- [6] Sholahuddin U, Purwadi A, Heryana N, Rizqiawan A, Haroen Y. Magnetic simulation comparison of 30 kW switched reluctance motor with 6/4 and 6/10 design configurations for electric vehicle. *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)*, Indonesia, 2014.
- [7] Siadatan A, Najmi V, Asgar M, Afjei E. A new 6/4 two layers switched reluctance motor: Concept, simulation and analysis," in *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*, Turkey, 2011.
- [8] Siadatan A, Asgar M, Naimi V, Afjei E. A novel method for torque ripple reduction in 6/4 two rotor stack switched reluctance motor.
- [9] Torkaman H, Afjei E. Magnetio static field analysis regarding the effects of dynamic eccentricity in switched reluctance motor. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2009.
- [10] Nezamabadi MM, Afjei E, Naemi MR, Afjai AA. Design and 3D-FEM analysis of a rotary – linear switched reluctance motor, presented at the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016.
- [11] Pao-la-or P, Isaramongkolrak A, and Kulworawanichpong T. Finite element analysis of magnetic field distribution for 500- kV power transmission system. *Engineering Letters, No.1*, 2010;18: 1-9.
- [12] Zhang J, Wang L, Zhang H, & Gao R. Non-linear radial force simulation of switched reluctance motors based on finite element model. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009.
- [13] Pao-la-or P, Peaiyoung S, Kulworawanichpong T, and Sujitjom S. Effect of the geometry of the rotor slot on the mechanical vibration of three-phase induction motors, present at the 7th WSEAS International conference on simulation, modeling, and optimization, Beijing, China, September 15-17, 2007.
- [14] Parreira B, Rafael S, Pires S, Branco PC. (n.d.). Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6-switched reluctance machine: FEM analysis and experimental tests. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005.
- [15] Afjai E, Seyadatan A, Torkaman H. A new two-phase bidirectional hybrid switched reluctance motor field-assisted generator. *Journal of Applied Sciences*, 9(4): 765-770. Available: <https://www.researchgate.net/publication/46029750>
- [16] Bedrosian G. (n.d.). A new method for coupling finite element field an efficient technique for solving the coupled finite solutions with external circuits and kinematics element and circuit equations. in *Digest of the Fifth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, 1993.
- [17] Li J, Song X, Cho Y. Comparison of 12/8 and 6/4 switched reluctance motor: Noise and vibration aspects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008.
- [18] Jun ZH, Gao C., Wang H. Analysis of radial force for switched reluctance motor. in *International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Device, Beijing, China*, 2013.

Copyright © 2020 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0), which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริรัตน์ ศรีอินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2538 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อพ.ศ.2560 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2561 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดใน ภาคผนวก ก

