

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้วยวิธี
ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อพิจารณาในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น



นายสมศักดิ์ วัชรคุปต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**DESIGN OF 6-PHASE INDUCTION MOTOR TO
INCREASE PERFORMANCE BY 3-D
FINITE ELEMENT METHOD WITH CONSIDERATION
IN NONLINEAR CONDITIONS**

Somsak Watcharakhup



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

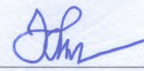
Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
แบบ 3 มิติ เมื่อพิจารณาในสถานะความไม่เป็นเชิงเส้น


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



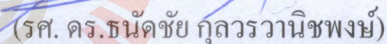
(ศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. เพ็ชร์ เผ่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



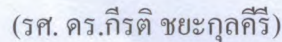
(รศ. ดร. ชนิตชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ



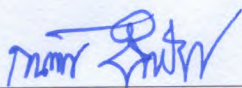
(รศ. ดร. อนันต์ อุ่นศิริไทย์)

กรรมการ



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์จร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สมศักดิ์ วัชรกะคุปต์ : การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้วยวิธี
ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อพิจารณาในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น (DESIGN OF 6-
PHASE INDUCTION MOTOR TO INCREASE PERFORMANCE BY 3-D FINITE
ELEMENT METHOD WITH CONSIDERATION IN NONLINEAR CONDITIONS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 186 หน้า.

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อน ทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลังของยานยนต์ไฟฟ้า และมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง การออกแบบและวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าต้องดำเนินการทั้งด้านสนามแม่เหล็ก การสั้นสะเทือน แรงและแรงบิด เพื่อคัดสรรและออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและสมรรถนะสูงให้กับยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสซึ่งการเพิ่มมาของจำนวนเฟสจะช่วยให้อัตราการหมุนและมีค่าแรงบิดที่ดีขึ้นเมื่อได้รับการออกแบบที่เหมาะสม โดยจะทำการคำนวณหาค่าคุณลักษณะต่างๆเช่น กระแส ความเร็วพร้อมกับการจำลองผลการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส พร้อมทั้งออกแบบเพื่อให้อัตราการหมุนมีสมรรถนะให้สูงขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะอยู่ในรูปของสมการศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแล้วจึงดำเนินการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กซึ่งสมการสำหรับการคำนวณศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติในการหาผลเฉลยโดยพิจารณาคูสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ เพื่อที่จะสามารถจำลองผลการกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการออกแบบเพื่อเพิ่มคุณลักษณะของมอเตอร์ให้สูงขึ้นโดยการออกแบบด้วยการปรับระยะพิตซ์ของมอเตอร์ การออกแบบด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์เฉียงและการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ ซึ่งวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามารถนำผลของค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองนั้นนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าแรงและแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยโปรแกรมสำหรับจำลองผลการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่าการออกแบบด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์เฉียงจะช่วยลดค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและเกิดค่าแรงบิดได้ดีที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา สมศักดิ์ วัชรกะคุปต์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เผด็จ เผ่าละออ

SOMSAK WATCHARAKHUP: DESIGN OF 6-PHASE
INDUCTION MOTOR TO INCREASE PERFORMANCE BY 3-D
FINITE ELEMENT METHOD WITH CONSIDERATION IN
NONLINEAR CONDITIONS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.
PADEJ PAO-LA-OR, Ph.D., 186 PP.

6-PHASE INDUCTION MOTOR/SIMULATION/3-D FINITE ELEMENT
METHOD/MAGNETIC FIELD/HARMONIC

Motors are an important part of driving, the motor acts as the power source of electric vehicles and has a direct effect on the characteristics of electric vehicles. The design and analysis of motors must be conducted in both magnetic fields. Vibration, heat, ventilation, to select and design motors with high efficiency and high performance for electric vehicles can be able to adjust speed can be controlled in a wide operating range with high starting torque and high reliability. Therefore, this research has calculated the various characteristics of the 6-phase induction motor such as current, velocity, along with the simulation of the magnetic vector potential and magnetic field distribution results of the 6-phase induction motor, as well as designing for the motor to have higher performance. The mathematical model is in the form of a magnetic vector potential equation and after that the magnetic field calculation is performed. The equation for calculating magnetic vector potential is in the form of second order partial differential equations and using the Finite element in 3-D for finding solutions to considering the nonlinear properties of the material for simulate the potential vector magnets and the magnetic field of the 6-phase induction electric motor. In this research propose a design method to increase motor characteristics by designing and adjusting

the pitch of the motor and design with skewed rotor bar characteristics and motor design by adjusting the position of the windings in the stator teeth. In the finite element method, the effects of the magnetic field obtained from the simulation can be applied to find the torque value of the 6-phase induction motor including calculating the magnetic field distribution in the air gap of 6-phase induction electric motor. The program for simulating the distribution of magnetic vector potential and magnetic fields using MATLABTM developed by themselves. The results show that the design by adjusting the skewed rotor bar will reduce the harmonic distortion and the best torque.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature อนันต์ วิเศษ

Advisor's Signature ค.ค.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความรู้และสนับสนุน ทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุน ค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสุรเชษ วัชรคุปต์ และ คุณณสรกฤษณ์ วัชรคุปต์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมา โดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา

สมศักดิ์ วัชรคุปต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 สรุป.....	22
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	23
3.3 ประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า.....	30
3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	33
3.5 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก..... 40
3.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์..... 42
3.8	สรุป..... 51
4	การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อพิจารณาในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น..... 52
4.1	บทนำ..... 52
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 53
4.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์..... 55
4.3.1	การออกแบบอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา..... 55
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ..... 58
4.3.3	การสร้างสมการของอิลลิเมนต์..... 59
4.3.4	การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว..... 67
4.3.5	การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น..... 68
4.3.6	การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ..... 72
4.4	สรุป..... 73
5	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ..... 74
5.1	บทนำ..... 74
5.2	แนวทางการจำลองผลสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส..... 74
5.3	โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์..... 75
5.4	โปรแกรมการสร้างกริด..... 78
5.5	การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 82
5.6	การคำนวณกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส..... 83
5.7	ผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล..... 85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.8 สรุป.....	95
6 การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมรรถนะ.....	96
6.1 บทนำ.....	96
6.2 การออกแบบการพันขดลวดเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน.....	97
6.3 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อพันขดลวดเป็นแบบ ระยะพิตช์เศษส่วน.....	101
6.4 การออกแบบลักษณะร่อง โรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง.....	113
6.5 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อออกแบบลักษณะร่อง โรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง.....	116
6.6 การออกแบบการจัดวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์.....	128
6.7 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อการวางตัวของขดลวด ในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม.....	130
6.8 การวิเคราะห์ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อ ดำเนินการออกแบบเพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์.....	133
6.9 การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยคุณสมบัติทั้งหมด.....	144
6.10 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อการออกแบบด้วย คุณสมบัติทั้งหมด.....	144
6.11 สรุป.....	148
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	149
7.1 สรุป.....	149
7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	151
รายการอ้างอิง.....	152
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	156
ภาคผนวก ข. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อไม่ได้พิจารณาความ ไม่เป็นเชิงเส้น.....	167
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	170

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน.....186



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์.....	44
3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	44
5.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสขนาด 3 แรงม้า.....	80
6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกในระบบทั้งหมด.....	139
6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดในระบบทั้งหมด.....	142
7.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า THD และแรงบิดของระบบทั้งหมด.....	151



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 24
3.2	การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน..... 25
3.3	การเกิดกระแสในโรเตอร์..... 25
3.4	การเกิดแรงบิดทำให้โรเตอร์หมุน..... 26
3.5	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 28
3.6	กระบวนการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... 29
3.7	คุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... 29
3.8	ลักษณะการจัดวางขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในแบบสมมาตรและ ไม่สมมาตร..... 34
3.9	การวางตัวของขั้วแม่เหล็กบวกโดยอิงจากเฟส A..... 35
3.10	การวางตัวของขั้วแม่เหล็กลบโดยอิงจากเฟส A..... 36
3.11	การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตช์เป็นแบบพิตช์เต็ม..... 36
3.12	การเชื่อมต่อขดลวดสเตเตอร์และการกระตุ้นขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก..... 37
3.13	รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โนด เมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้า..... 43
3.14	การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า..... 45
4.1	รายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดสเตเตอร์ 2 ชั้น..... 56
4.2	โมเดลต้นแบบของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล..... 56
4.3	การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์ออกเป็นอิลลิเมนต์..... 57
4.4	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์ออกเป็นอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ..... 57
4.5	เส้นโค้งคุณลักษณะของ $v - B^2$ 69
4.6	เส้นโค้งคุณลักษณะของ $B - H$ 70
5.1	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก..... 76
5.2	ขนาดระยะของชิ้นงานมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล (mm)..... 78
5.3	รายละเอียดของร่องสเตเตอร์ (mm)..... 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 รายละเอียดของร่องโรเตอร์ (mm).....	79
5.5 โมเดลรายละเอียดเฟสและกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองผล.....	81
5.6 ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสใน Simulink.....	82
5.7 กระแสไฟฟ้า 6 เฟส (แสดงเพียงเฟสเดียว).....	83
5.8 กระแสไฟฟ้าทั้ง 6 เฟสในช่วงเวลาสถานะคงตัว.....	83
5.9 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	84
5.10 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา.....	84
5.11 แรงบิดของมอเตอร์จากการคำนวณผ่าน Simulink.....	85
5.12 ภาดัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	86
5.13 ภาดัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	86
5.14 ภาดัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	87
5.15 ภาดัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	87
5.16 ภาดัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	88
5.17 การกระจายสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	88
5.18 ภาดัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	89
5.19 ภาดัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	90
5.20 ภาดัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	90
5.21 ภาดัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	91
5.22 ภาดัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	91
5.23 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เต็ม.....	93
5.25 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เต็ม.....	93
5.26 ภาพแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	95
6.1 การออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18 ร่อง.....	98
6.2 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18.....	98
6.3 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 14/18.....	99
6.4 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 12/18.....	100
6.5 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 10/18.....	100
6.6 ภาดัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 16/18.....	101
6.7 ภาดัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 14/18.....	102
6.8 ภาดัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 12/18.....	102
6.9 ภาดัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 10/18.....	103
6.10 ภาดัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18.....	104
6.11 ภาดัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 14/18.....	105
6.12 ภาดัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 12/18.....	105
6.13 ภาดัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 10/18.....	106
6.14 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 16/18.....	107
6.15 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 14/18.....	107
6.16 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 12/18.....	108
6.17 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 10/18.....	108
6.18 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 16/18.....	109
6.19 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 14/18.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 12/18.....	110
6.21 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 10/18.....	110
6.22 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18.....	111
6.23 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 14/18.....	112
6.24 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 12/18.....	112
6.25 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 10/18.....	113
6.26 ภาพชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	114
6.27 การตัดกริดของชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	115
6.28 ภาพชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	115
6.29 การตัดกริดของชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	116
6.30 ภาคตัดขวางของสัทธิเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์.....	117
6.31 ภาคตัดขวางของสัทธิเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	117
6.32 ภาคตัดขวางของสัทธิเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์.....	118
6.33 ภาคตัดขวางของสัทธิเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	118
6.34 ภาคตัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์.....	119
6.35 ภาคตัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.36 ภาคตัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์.....	120
6.37 ภาคตัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	121
6.38 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์.....	122
6.39 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	122
6.40 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์.....	123
6.41 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	123
6.42 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์.....	124
6.43 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	124
6.44 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์.....	125
6.45 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	125
6.46 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์.....	126
6.47 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์.....	127
6.48 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์.....	127
6.49 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์.....	128
6.50 การวางตัวของขดลวดในร่องสเตอร์แบบรวม.....	129
6.51 ภาคตัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม.....	130
6.52 ภาคตัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม.....	131
6.53 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม.....	132
6.54 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม.....	132
6.55 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม.....	133

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.56 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติของระบบที่ออกแบบที่ดี.....	135
6.57 การกระจายสนามเหล็ก (T) แบบ 3 มิติของระบบที่ออกแบบที่ดี.....	135
6.58 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิคซ์ทั้งหมด.....	136
6.59 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของการวางมุมเฉียงทั้งหมด.....	136
6.60 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของการวางขดลวดทั้งสองแบบ.....	137
6.61 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิคซ์ทั้งหมด.....	137
6.62 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของการวางมุมเฉียงทั้งหมด.....	138
6.63 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของการวางขดลวดทั้งสองแบบ.....	138
6.64 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของระยะพิคซ์ทั้งหมด.....	139
6.65 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของการวางมุมเฉียงทั้งหมด.....	140
6.66 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของระยะพิคซ์ทั้งหมด.....	141
6.67 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวางมุมเฉียงทั้งหมด.....	141
6.68 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวางขดลวดทั้งสองแบบ.....	142
6.69 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของระยะพิคซ์ทั้งหมด.....	143
6.70 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของการวางมุมเฉียงทั้งหมด.....	143
6.71 ภาดัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m).....	145
6.72 ภาดัดขวางของการกระจายสนามแม่เหล็ก (T).....	145
6.73 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศ.....	146
6.74 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ.....	147
6.75 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	147
ก.1 การพันขดลวดสเตเตอร์ 36 ร่อง.....	157
ก.2 ทิศทางการไหลของกระแส ณ ระยะเวลาหนึ่ง.....	157
ก.3 กระแสไฟฟ้า 3 เฟส (แสดงเพียงเฟสเดียว).....	158

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.4	กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ในช่วงเวลาสถานะคงตัว..... 158
ก.5	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 159
ก.6	กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา..... 159
ก.7	แรงบิดของมอเตอร์จากการคำนวณผ่าน Simulink..... 160
ก.8	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 161
ก.9	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 161
ก.10	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 162
ก.11	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 162
ก.12	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 163
ก.13	สัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 163
ก.14	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 164
ก.15	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 164
ก.16	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 165
ก.17	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 165
ก.18	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 166
ก.19	สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 166
ข.1	ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 168
ข.2	สัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 168
ข.3	ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 169
ข.4	สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์..... 169

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาด้านโทรคมนาคมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความก้าวหน้าอย่างมาก สิ่งประดิษฐ์ที่หลากหลายและราคาถูกได้ออกสู่ท้องตลาดทำให้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ อย่างมากมายอย่างเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีแนวคิดในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากมีความกังวลในปัญหาเรื่องโลกร้อนเนื่องจากแก๊สเรือนกระจกในช่วงปี ค.ศ. 1970 ยานยนต์ไฟฟ้าเริ่มเป็นกระแสในการพัฒนามาตั้งแต่นั้น จนกระทั่ง ในช่วงปี ค.ศ. 1990 บริษัทชั้นนำในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น FORD GM NISSION TOYOTA HONDA เป็นต้น ได้เพิ่มการลงทุนในยานยนต์ไฟฟ้า และพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาทดลองใช้งาน ระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์จ่ายพลังงานและล้อทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (กรณีของยานยนต์ไฟฟ้า) ไปเป็นพลังงานกลเพื่อเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ต่าง ๆ เพื่อเร่งให้ยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามที่กำหนด ความแตกต่างระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่กับยานยนต์แบบดั้งเดิมที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันคือระบบขับเคลื่อนถูกลดทอนองค์ประกอบการส่งกำลังทางกลที่มีความซับซ้อนและต้องการการบำรุงรักษาออกไป มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อน ทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลังของยานยนต์ไฟฟ้าและมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง การออกแบบและวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าต้องดำเนินการทั้งด้านสนามแม่เหล็ก การลดการสันสะเทือน การเพิ่มแรงบิด ความร้อน การระบายอากาศ เพื่อคัดสรรและออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและสมรรถนะสูงให้กับยานยนต์ไฟฟ้า สามารถปรับเปลี่ยน ควบคุมความเร็วได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง มีแรงบิดเริ่มเดินเครื่องสูง มีความหนาแน่นกำลังงานสูง และมีความเชื่อถือที่สูง

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันของยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้เทคโนโลยีปัจจุบันอาจจะแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นยานยนต์ไฟฟ้าใช้งานเบา (Light-duty electric vehicle) มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำ เป็นการใช้งานส่วนบุคคลเป็นหลัก ประกอบด้วยรถจักรยานไฟฟ้า หรือรถกอล์ฟไฟฟ้า พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วงไม่เกิน 10 – 15 kW ส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมอเตอร์ BLDC กลุ่มที่ 2 เป็นยานยนต์ไฟฟ้าใช้งานปานกลาง (Medium-duty electric vehicle) มีพิกัดกำลังไฟฟ้า สูงกว่าประเภทแรก แต่ไม่สูงมากนัก ไม่เกิน 30 – 40 kW โดยประมาณ ส่วนใหญ่

เป็นมอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์ BLDC และมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร กลุ่มที่ 3 เป็นยานยนต์ไฟฟ้าใช้งานหนัก (Heavy-duty electric vehicle) เป็นยานยนต์ประเภทรถโดยสาร รถบรรทุก หรือหัวรถจักรไฟฟ้าที่ใช้งานลากจูงขนาดใหญ่ เน้นใช้งานกับการขนส่งมวลชน และระบบขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ ส่วนใหญ่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีน้ำหนักและขนาดที่โตกว่ามอเตอร์ชนิดอื่น ๆ เมื่อเทียบพิกัดกำลังงานเท่ากัน และต้องการการบำรุงรักษา มีราคาแพง อย่างไรก็ตาม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดีคือ ควบคุมได้ง่าย วงจรควบคุมไม่ซับซ้อน ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีราคาถูกกว่าไม่ต้องการการบำรุงรักษาที่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมและยานยนต์ไฟฟ้าขนาดใหญ่จะพบว่ามอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ไม่ว่าจะต่อบ้านเรือนที่อยู่อาศัย อาคาร สถานประกอบการและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงเกิดแนวคิดเพื่อพัฒนาศักยภาพของมอเตอร์ให้มีความแข็งแรงและสมรรถนะการทำงานที่สูงขึ้นอยู่เสมอ หนึ่งในแนวคิดสำหรับการพัฒนามอเตอร์ที่น่าสนใจก็คือการทำให้มอเตอร์เป็นระบบที่มี 6 เฟส เพราะว่าเป็นแนวคิดที่สามารถทำให้มอเตอร์มีค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกที่น้อยลงส่งผลให้แรงบิดสูงขึ้นและยังคงสามารถอ้างอิงโครงสร้างเดิมของมอเตอร์ 3 เฟสอยู่ โดยเพิ่มขดลวดชุดที่ 2 พร้อมกับการจัดวิธีการพันและการจัดวางขดลวดชุดที่ 2 อย่างเหมาะสมก็ทำให้แรงบิดและสมรรถนะของมอเตอร์นั้นสูงขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี ที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจรวมไปถึงความสะดวก ในการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิด วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย วิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (Finite element method: FEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่า ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นจึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่มีความนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม้กระทั่งปัญหาที่เป็นสถานะชั่วคราว (Transient state) หรือเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุก็สามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ (Nonlinear) ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากจุดต่อ โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิตินิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Linear tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการดำเนินการ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อพิจารณาในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น

1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและค่าคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส พร้อมจำลองผลทางกราฟิก

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยให้มีสมรรถนะการทำงานเกี่ยวกับค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและค่าแรงบิดที่ดีขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส มีค่าสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส และสามารถออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยใช้โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบเดิมได้โดยตรง แต่สมรรถนะอาจจะยังไม่ดีมากนัก หากนำมาปรับปรุงใหม่ให้เหมาะสมในทุกๆด้านภายใต้โครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์เดิม จะทำให้การใช้งานมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 มอเตอร์อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีการเยื้องศูนย์กลางของโรเตอร์และแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์

1.4.2 กำหนดให้การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์เต็มร่องตลอดทั้งชั้นบนและชั้นล่างของร่องสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการพันขดลวดเป็นแบบสองชั้น (Double layer winding)

1.4.3 ไม่พิจารณาบริเวณตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ที่ยึดอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำ

1.4.4 วัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

1.4.5 พิจารณาเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแม่เหล็ก (B-H curve) แบบไม่เป็นเชิงเส้นมีการอ้อมตัว แต่ไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ใช้ MATLAB™ เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อพิจารณาในสถานะความไม่เป็นเชิงเส้น

1.5.2 ออกแบบพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสจากโครงสร้างเดิมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.5.3 ออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อให้มีสมรรถนะการทำงานที่สูงขึ้นด้วยการออกแบบร่องเฉียงของโรเตอร์ การปรับระยะพิตซ์ การจัดวางขดลวดที่เหมาะสม เป็นต้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ส่งผลต่อแรงบิดและคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์

1.6.2 ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรม FEM ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อพิจารณาในสถานะความไม่เป็นเชิงเส้นตลอดจนสามารถนำไปใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนด้านสนามแม่เหล็ก และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

1.6.3 ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้สามารถเพิ่มสมรรถนะในการทำงานที่สูงขึ้นได้

1.6.4 ได้แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นใหม่ที่สามารถเพิ่มสมรรถนะในการทำงานที่มากกว่า 3 เฟสได้

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า หลักการแนวคิดเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ทฤษฎีของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยนำทฤษฎีต่างๆมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างของกาลอ์คิน

บทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ พร้อมแสดงกราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและค่าแรงบิดของมอเตอร์ โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริดพร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

บทที่ 6 ได้อธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบปรับส่วนต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยยังอิงโครงสร้างหลักเดิมของมอเตอร์เพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงาน พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการจำลองค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบทั้ง 3 วิธีประกอบไปด้วยการออกแบบด้วยการปรับระยะพิตซ์ของมอเตอร์ การออกแบบด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์

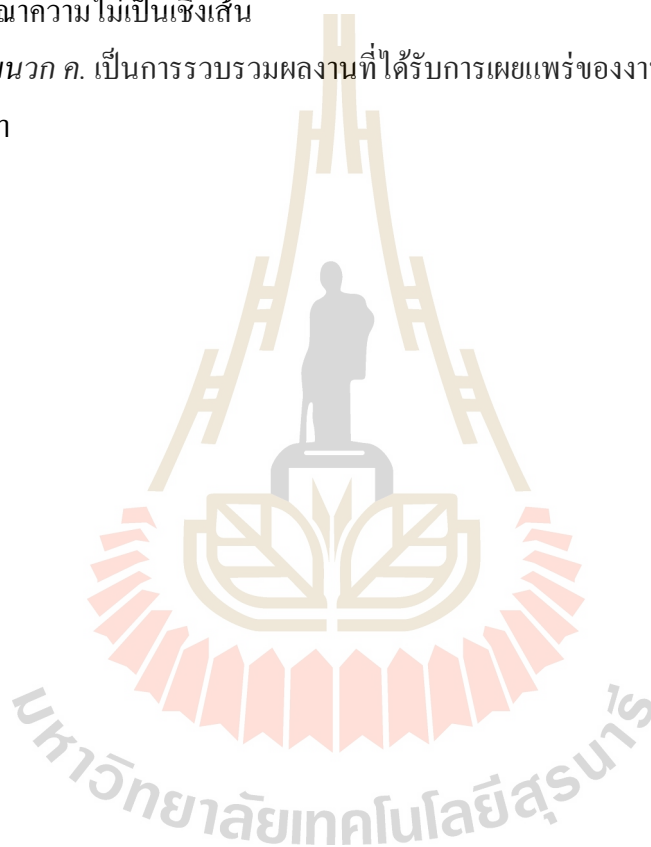
เสียงและการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และแสดงกราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและค่าแรงบิดของมอเตอร์

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ
ภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วนได้แก่

ภาคผนวก ก. เป็นการแสดงผลการจำลองของระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

ภาคผนวก ข. เป็นการแสดงผลการจำลองสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ
เมื่อไม่ได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้น

ภาคผนวก ค. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะ
ดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากเรื่องการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส เรื่องการวิเคราะห์และพิจารณาผลการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส และการพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสให้มีคุณลักษณะการทำงานต่างๆให้ดีขึ้น ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 งานวิจัยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสในต่างประเทศ ซึ่งจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1996	Toliyat and Zhao	ได้ศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส เพื่อศึกษาการทำงานภายใต้โครงสร้างแบบไม่สมดุล ศึกษาถึงผลจากกำลังงานสูญเสีย การแกว่งของแรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบลำดับลบ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	Hedjar and Toumi	ในงานวิจัยได้ดำเนินการศึกษาการทำนายค่าที่เหมาะสมของค่าความไม่เป็นเชิงเส้นในโครงสร้างการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะแสดงผลลัพธ์ของค่าความเร็ว ค่าสนามแม่เหล็กและแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดแรงบิดที่ดี
2002	Renato and Thomas	ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงความหนาแน่นแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ของกระแสที่ป้อนในค่าต่างๆ เพื่อลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น
2002	Katsumi Yamazaki	บทความนี้ได้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากวงจรสมมูลของระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้นที่ส่งผลต่อค่าฮาร์มอนิก ค่าสนามแม่เหล็กและการหมุนของมอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ
2003	Stumherger and Hamber	ศึกษาเกี่ยวกับค่าความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าขาออกในช่วงสนามแม่เหล็กที่ลดลงของมอเตอร์ 6 เฟส เมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิก โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และปรับปรุงสนามแม่เหล็กที่ลดลงในมอเตอร์ 6 เฟส โดยผลการจำลองได้แสดงค่าสนามแม่เหล็ก แรงบิดขาออก กระแสไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ที่สามารถผลิตได้ ผลที่ได้จะตรวจสอบกับการวัดจริง
2003	Wang and Mecrow	ได้ทำการศึกษาการควบคุมความทนต่อการเกิด ความผิดพลาดเมื่อสายจ่ายไฟฟ้าให้มอเตอร์เปิดวงจรหนึ่งเฟส กระแสที่จ่ายให้เฟสที่เหลือ จะยังคงสร้าง mmf ที่หมุนในทิศทางเดิม แต่จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป กระบวนการควบคุมในสถานการณ์ นี้เป็นการสร้างกระแสที่เหมาะสมเพื่อให้รักษาค่า mmf ให้กลับมามีค่าเท่าเดิมดังเช่นก่อนเกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Kianinezhad and Nahid-Mobarakeh	ทำการปรับปรุงแรงบิดระลอกคลื่นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสภายใต้เงื่อนไขสถานะผิดพ่วงแบบเฟสเปิด โดยงานวิจัยได้นำเสนอการทำงานแบบใหม่ที่ลดการรบกวนสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ซึ่งเงื่อนไขการพิจารณาในสถานะผิดพ่วงจะมีมากกว่า 1 เฟส โดยผลการจำลองจะเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
2005	Toliyat and Bojoi	ได้ทำการศึกษาในส่วนของการควบคุมเชิงเวกเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการองค์ประกอบของกระแส 2 ส่วน ประกอบด้วยส่วนที่ใช้สร้างแรงบิดและส่วนที่ใช้สร้าง สนามแม่เหล็ก เพื่อจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส การขับเคลื่อนเชิงเวกเตอร์อาศัยหลักการแยกองค์ประกอบของกระแสทั้ง 2 และถูกส่งไปที่ตัวมอดูเลเตอร์เพื่อสร้างเวกเตอร์ ที่ทำหน้าที่รักษาระดับขององค์ประกอบทั้งสองเพื่อให้เอาต์พุตของมอเตอร์เป็นไปตามต้องการ
2005	Xiaoyuan and Qingyan	ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ 6 เฟส และศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นแม่เหล็กที่ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ โดยแสดงถึงจุดเด่นที่เป็นประโยชน์ของระบบหลายเฟส ซึ่งจะใช้โรเตอร์หนึ่งตัวและสเตเตอร์ 2 และการกำหนดค่าต่างของหลักการรวมถึงโครงสร้างจะถูกแสดงไว้ พร้อมใช้วิธีไฟไนต์ลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในสถานะไร้อโหลด โดยจะแสดงผลการจำลองออกมาเป็นรูปคลื่นไซน์ในเงื่อนไขที่ต่างกันไป

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2005	Martin and Slobodan	<p>ทำการศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ 6 เฟส โดยเชื่อมต่อมอเตอร์ 2 ตัวแบบต่ออนุกรมด้วยการแยกตัวจากการควบคุมไดนามิก ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์การขับเคลื่อนมอเตอร์ 6 เฟสแบบใช้มอเตอร์ 2 ตัว จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสและวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ ในการใช้มอเตอร์ 6 เฟสจะใช้มอเตอร์ 3 เฟส 2 ตัวต่ออนุกรมกันในลักษณะที่เหมาะสม ช่วยให้สามารถแยกส่วนการทำงานกันได้อย่างเต็มที่ของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวในการควบคุมเวกเตอร์ ในการทดลองการสร้างและการใช้งานของการแยกตัวจากการควบคุมไดนามิก โดยมีแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ 2 ตัวและวงจรถูกอินเวอร์เตอร์นั้นทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และมีผลการทดสอบอีกมากมาย</p>
2005	Ai and Kamper	<p>ได้ศึกษาการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยการพิจารณาจากรูปคลื่นของกระแสเฟส โดยประเมินจากสัญญาณของกระแส และจากความสมดุลในการหมุนของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่เกิดขึ้น โดยนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีของการควบคุมเวกเตอร์ สำหรับการคำนวณได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อหาคำตอบ พร้อมแสดงผลเฉลยในช่วงสถานะคงตัว</p>
2006	Zheng-yang and Yu-wen	<p>ทำการศึกษาการวิเคราะห์และการทำงานของการกำหนดการวิเคราะห์ระบบความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความแม่นยำสูงของมอเตอร์ 6 เฟส 10 ขั้ว โดยจะวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะต่างๆ เช่น ความสามารถในการเหนี่ยวนำความเป็นแม่เหล็ก ค่าการเหนี่ยวนำการเกิดฮาร์มอนิกรั่วไหล การรั่วไหลจากการเหนี่ยวนำภายในสล็อตภายในและภายนอก เป็นเงื่อนไขในการวิเคราะห์ และจะแสดงผลการจำลองการกระจายของสนามแม่เหล็กและค่าการรั่วไหลของฮาร์มอนิก โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2006	Edward and Maarteen	ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแรงบิด โดยการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของรีลักแตนซ์มอเตอร์ 6 เฟส โดยใช้หลักการวิเคราะห์จากรูปคลื่นของกระแส ซึ่งจะประเมินผลถึงแรงบิดระลอกคลื่นที่น้อยที่สุด โดยการหาค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแรงบิดสูงสุดต่อค่าสูญเสียในขดลวดของมอเตอร์
2008	Zhuoran and Yangguang	ได้ดำเนินการศึกษาแนวคิดของระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบไฟ 12 เฟส โดยระบบวงจร Rectifier โดยศึกษาโครงสร้างของการพันขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นหลัก สำหรับการพันจะมีผลต่างมุมเฟสเป็น 30 องศา ในคุณลักษณะของแรงดันขาออกจะถูกวิเคราะห์แล้วนำไปพล็อตเป็นกราฟ หลังจากนั้นจะออกแบบโดยใช้หลักการของระบบ 12 เฟส สำหรับผลการวิเคราะห์ได้ใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์ตรวจสอบผลของการออกแบบของการพันขดลวด จำนวนของไดโอดที่ใช้ในระบบ 12 เฟส จะมีจำนวนเท่ากับระบบ 6 เฟสที่ต่อแบบ Y-Y ส่งผลให้กระแสลดลงครึ่งหนึ่ง
2009	Libing and Langru	ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับค่าความไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับเวลาด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยงานวิจัยไม่ได้พิจารณาถึงการหมุนของมอเตอร์ แต่พิจารณาถึงโมเดลพารามิเตอร์ในเงื่อนไขของโหลด โดยความไม่เป็นเชิงเส้นพิจารณาจากเส้นโค้งสนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้โปรแกรม ANSYS โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจะถูกนำมาเทียบกับผลการทดลองจริง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	Matyas and Aroquiadassou	ได้ทำการศึกษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส สำหรับการอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยได้เสนอแนวทางการออกแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 6 เฟส ในแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดกรงกระรอกและในแบบเครื่องจักรกลซิงโครนัสทั้งสองชนิดเพื่อใช้งานสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พร้อมเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของเครื่องจักรกลทั้ง 2 ชนิด
2012	Moghadasian and Sivert	ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ในโหมดการฟื้นฟูและการเกิดสภาวะผิดปกติ โดยนำเสนอเทคนิคใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์ 6 เฟส ซึ่งใช้วิธีการค้นหาและควบคุมแบบ fuzzy online เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูง สำหรับผลลัพธ์จะทำการเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียของมอเตอร์
2012	Miranada and Gomes	ได้ดำเนินการศึกษาวิเคราะห์ ค้นหาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสภายใต้เงื่อนไขสภาวะผิดปกติในวงจรเปิด ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองในสภาวะผิดปกติทั้งหมด 3 รูปแบบ สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับสภาวะผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ 1 เฟสหรือมากกว่านั้น โดยแบบจำลองเหล่านี้แสดงให้ถึงการเกิดแรงบิดระลอกคลื่นในรูปแบบต่างๆ สำหรับการจำลองผลและผลการทดลองจริงจะใช้ในการยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ภายใต้เงื่อนไขสภาวะผิดปกติต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2012	Nanoty and Chudasama	การควบคุมของการออกแบบและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกใช้อย่างแพร่หลายด้วยหลายปัจจัย เช่น ความคงทน ราคาถูกและการบำรุงรักษาที่ง่ายเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงหรือมอเตอร์ชนิดอื่นๆ สำหรับในการออกแบบได้ดำเนินการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆจากพิกัดที่ได้มา เช่น ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าแรงบิด เป็นต้น รวมถึงการทดลองจริงเพื่อทดสอบหาค่าต่างๆพร้อมอธิบายผล
2012	Widmer and Martin	ได้ทำการศึกษาการกำหนดลักษณะการพันสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟส โดยลักษณะมอเตอร์ที่ใช้จะเป็นแบบชั้นเดียวและมีชุดขั้วเคลื่อนด้วยวงจรถัดจุ่ม พร้อมกับใช้ไดโอด 6 ตัว ซึ่งแนวทางการกำหนดลักษณะการพันแบบใหม่มีจุดมุ่งหมายเพื่อต้องการเพิ่มแรงบิด ลดค่าแรงบิดระลอกคลื่น วิธีไฟไนท์อลลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กพร้อมกับการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับรูปแบบการพันมอเตอร์ในแบบต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้พบว่าค่าแรงบิดสูง ค่าแรงบิดระลอกคลื่นลดลงกว่าการพันแบบทั่วไป
2013	Zheng and Wu	ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์แนวคิดใหม่ของมอเตอร์ไฟฟ้า 24 สล็อต 14 ขั้ว สำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เป็นการประยุกต์ออกแบบให้เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานสูงขึ้น ซึ่งได้รวมหลายๆแนวคิดเพื่อความเป็นไปได้ในการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟส ที่มี ระยะพิทช์เศษส่วน การพันแบบรวม 24 สล็อต 14 ขั้ว ได้ถูกออกแบบมาและวิเคราะห์เพื่อเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมจากค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้การจำลองผลหาค่าแรงเคลื่อนที่สนามเหล็ก ค่าการสูญเสียจากแกนเหล็กและในขดลวดให้เป็นค่าที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Hao and Yongxiang	ได้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการเกิดสถานะผิดปกติสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 6 เฟส โดยใช้วิธีการปรับปรุงเวกเตอร์ ซึ่งพิจารณาในสถานะผิดปกติ 1 เฟส โดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์จากแมทแลป พร้อมจำลองผลลักษณะการของค่าสนามเหล็ก รวมถึงแสดงกราฟเส้นของคุณลักษณะต่างๆ เช่น กราฟกระแส กราฟความเร็ว กราฟแรงบิดและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นของระบบ พร้อมเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองจริง โดยเมื่อสังเกตผลที่ได้จะพบว่าค่าจากการจำลองและค่าจากการทดลองจริงนั้นมีค่าที่เท่าๆกัน ไม่ต่างกันมาก
2013	Fatemi and Abjadi	ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วและแรงดันไฟฟ้าแบบไม่ได้ใช้เซนเซอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยใช้การควบคุมแบบ Back stepping สำหรับเอาต์พุตที่ต้องการเป็นการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์แม่เหล็ก โดยให้สัญญาณผ่านชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ ผลที่ได้จากการจำลองจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
2013	Appiah and Jimoh	ศึกษาผลกระทบจากการออกแบบร่องของมอเตอร์ที่ส่งผลของการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ชนิดกรงกระรอก โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2014	Yu and Dongmei	ได้ทำการศึกษาการคำนวณจากแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟสสำหรับการขับเคลื่อนรถบรรทุก โดยได้ทำการศึกษามอเตอร์ชนิด Y-Y ซึ่งยกตัวอย่างเป็นมอเตอร์ของรถบรรทุก ในการคำนวณได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณในเงื่อนไขที่มีโหลดและไร้โหลด ในบทความแสดงให้เห็นถึงสมการอนุพันธ์อันดับสองที่เลือกใช้ในการคำนวณ พร้อมจำลองผลการกระจายของสนามแม่เหล็กและค่าแรงเคลื่อนที่สนามเหล็ก โดยผลที่ได้จะดำเนินการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งมีความถูกต้องและเหมาะสมแก่การใช้งาน
2014	Kundrotas and Petrovas	บทความนี้ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับการผันขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยการศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์และอธิบายถึงรายละเอียดลักษณะการผันขดลวดในแบบต่างๆ การคำนวณและวิเคราะห์ถึงค่า mmf ซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชนิด
2015	Ursu and Gradinaru	ได้ดำเนินการศึกษามอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟส โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าคุณลักษณะต่างๆ พร้อมจำลองผลทั่วทั้งพื้นที่ โดยบทความแสดงให้เห็นถึงอีกหนึ่งแนวคิดเพื่อพยายามพัฒนามอเตอร์ 6 เฟสให้ดีขึ้น ซึ่งมีเป้าหมายคือความหนาแน่นแรงบิดที่สูงขึ้น การสูญเสียที่น้อยลง การจำลองผลจะแสดงผลของแรงบิดและแรงบิดระลอกคลื่นของมอเตอร์ 6 เฟส 6 ขั้ว แรงบิด 35 N·m

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2015	Zhang and Fan	ได้ทำการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยนำเสนอถึงตัวแปรค่าความผิดพลาดที่มองถึงว่าเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร การปิดวงจร การลดลงของสนามแม่เหล็ก โดยได้ทำการออกแบบมอเตอร์ใหม่ เพื่อลดแรงบิดระลอกคลื่น ซึ่งใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้อง
2015	Chaturvedi	ได้ดำเนินการศึกษาทฤษฎีและการจัดการของการออกแบบต้นแบบและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยในงานวิจัยได้กล่าวถึงที่มาของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสำหรับเรือ เป็นระบบขับเคลื่อนโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลและกังหันแก๊สที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และการขับเคลื่อนทางเรือได้พัฒนากันอย่างต่อเนื่อง โดยผลที่ได้คือสามารถเชื่อถือเพลิงในการใช้งานและบำรุงรักษาได้ง่าย โดยสรุปแล้วในงานวิจัยจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของแนวคิด 6 เฟส รวมถึงรูปแบบโมเดลต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส และแสดงกราฟคุณลักษณะต่างๆ
2015	Rajeev	ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและการจัดการออกแบบ การพัฒนาต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ซึ่งได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการพันในแบบสมมาตรและไม่สมมาตร อธิบายรูปแบบไดอะแกรมของระบบไฟฟ้า โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส
2015	Nikola and Goran	ได้ทำการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาความสมมาตรของวัสดุชิ้นส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส จากแผ่นของวงจรไฟฟ้า โดยสังเกตวัสดุของสารเซรามิกที่ใช้ในการสร้าง พร้อมทำการทดสอบการลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	Chih and Chang	ดำเนินการศึกษาการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ติดตั้งกับคอมเพรสเซอร์ เพื่อลดค่าใช้จ่าย ลดกระแสเริ่มเดินเครื่อง เพิ่มประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลัง โดยใช้วิธี Practical Swarm และ Taguchi ในการหาค่าที่เหมาะสม รวมถึงการใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการช่วยวิเคราะห์พร้อมยืนยันความถูกต้อง
2016	Lahne and Gerling	ได้ดำเนินการออกแบบมอเตอร์ 6 เฟสแบบกำลังงานสูง ความเร็วรอบสูงที่ 50,000 rpm สำหรับการประยุกต์ใช้ในอากาศยานกับการทำงานอย่างต่อเนื่องที่พิกัด 700 kW โดยการประยุกต์ใช้มีความต้องการความหนาแน่นกำลังงานสูงกว่า 5 kW/kg ในงานวิจัยได้กล่าวถึงค่าคงที่วัสดุอย่างละเอียดและกล่าวถึงแบบจำลองสำหรับที่ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการคำนวณ พร้อมแสดงโมเดลต้นแบบที่ใช้ในการจำลอง สำหรับการจำลองผลหาค่าความดันที่พิกัด ค่าความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้น คำนวณค่าการสูญเสียจากแกนเหล็ก
2016	Martin and Widmer	ได้ดำเนินการพิจารณาเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟสชนิด Switched Reluctance โดยขับเคลื่อนด้วยชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีข้อดีกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นตรงที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดเบาและใช้งานง่าย แต่ความหนาแน่นแรงบิดน้อยและอาจจะมีแรงบิดระลอกคลื่นมาก ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ก็จะแตกต่างจากทั่วไป สำหรับการจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการจำลอง โดยผลลัพธ์ที่แสดงจะเป็นค่ารูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้า กราฟแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบ กราฟกระแสและแรงบิดเทียบกับมุมรอบมอเตอร์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	Shouyi and Chuang	ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าต่างๆของสวิทช์รีลักแตนต์มอเตอร์ 6 เฟส ที่ส่งผลต่อกระแสและการสิ้นสละเทือนของแรงบิด โดยพิจารณาจากการนำไปใช้เชื่อมต่อกับระบบต่างๆ พร้อมศึกษาในเรื่องการออกแบบขั้วแม่เหล็กในรูปแบบต่างๆ
2017	Bao and Yong-le	ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยสัญญาณกระแสเฟสรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบใหม่ ซึ่งขดลวดสเตเตอร์จะถูกแบ่งออกเป็นขดลวดสนามและขดลวดแรงบิดซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดทางอ้อมและแยกโหมดการวิเคราะห์ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงซับซ้อน สำหรับการคำนวณได้ใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งเมตริก K จะคำนวณค่าคงที่สมดุลของ MMF สำหรับผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นมีความเชื่อถือที่ดี
2017	Asghar and Rahmati	ได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการค้นหาฟลักซ์แม่เหล็กของการควบคุมที่มุ่งเน้นไปส่วนสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เป็นแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างมีประสิทธิภาพของการควบคุมสนามแม่เหล็กให้ไปที่ประสิทธิภาพสูงสุดในเงื่อนไขที่โหลดน้อยหรือความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีและใช้งานง่าย แต่ยังคงปรับปรุงในเรื่องของค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับโปรแกรมควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก จะสามารถลดฮาร์มอนิกและค่าการสูญเสียในแกนเหล็กและในขดลวด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2019	Juan, et al.	ได้ศึกษาเกี่ยวกับควบคุมแบบจำลองของมอเตอร์ขับเคลื่อนเหนี่ยวนำ 6 เฟสโดยใช้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเสมือน โดยใช้วิธี Finite-control set model Predict control (FCS-MPC) เป็นวิธีที่รวดเร็วและมีความเสถียรสูง เป็นวิธีที่สามารถควบคุมระบบที่หลายเฟสได้
2019	Bogdan, et al.	ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายหาค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำหกเฟสเป็นชนิดแบบไม่สมมาตรในสถานะไร้โหลด โดยค่าจากการวัดแบบปกติจะถูกนำไปเทียบกับมาตรฐาน งานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาถึงค่าการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กที่ส่งผลต่อการสูญเสียในแกนเหล็ก
2019	Garbiec and Jagiela	ประยุกต์ใช้คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในช่วงการทำงานในการหมุนของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาและสนามแม่เหล็ก โดยผลลัพธ์ของค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าแรงบิดและค่ากำลังสูญเสียต่อไป

งานวิจัยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ได้เริ่มมีการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเฟส ซึ่งมีจำนวนเฟสของขดลวดสเตเตอร์มากกว่า 3 เฟส การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีขดลวดเฟสละ 2 ชุด โดยการจ่ายแหล่งจ่ายแยกเป็น 6 เฟส ซึ่งช่วยให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการกำลังงานสูงหรือ งานที่ใช้กระแสสูงในการขับเคลื่อน เช่น ระบบขับเคลื่อนเครื่องกลเรือ การขับเคลื่อนอากาศยาน และระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า แรงบิดเอาต์พุตของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส มีค่าสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสมีความน่าสนใจ ที่จะหาคำนำมาปรับปรุงให้เหมาะสม จะทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพดีขึ้น และจะเห็นได้จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้สรุปผ่านมาสามารถช่วยให้ผู้ที่ดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้างได้ว่า มีคณะนักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาลึกลงไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่

สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากหลาย ๆ ผลงานที่เกี่ยวข้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เกี่ยวข้องกับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้สูงขึ้น ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้อธิบายถึงโดยย่อ ดังนี้

งานวิจัยของ Zhuoran, et al. (2008) ได้ดำเนินการศึกษาแนวคิดของระบบการผลิตไฟฟ้า ด้วยระบบไฟ 12 เฟส โดยระบบวงจร Rectifier โดยศึกษาโครงสร้างของการพันขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็นหลัก สำหรับการพันจะมีผลต่างมุมเฟสเป็น 30 องศา ในคุณลักษณะของแรงดันขาออกจะถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดแล้วนำไปพล็อตเป็นกราฟ หลังจากนั้นจะออกแบบโดยใช้หลักการของระบบ 12 เฟส สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ตรวจสอบผลของการออกแบบของการพันขดลวด จำนวนของไดโอดที่ใช้ในระบบ 12 เฟส จะมีจำนวนเท่ากับระบบ 6 เฟสที่ต่อแบบ Y-Y ส่งผลให้กระแสตกครั้งหนึ่ง งานวิจัยของ Libing and Langru (2009) ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับค่าความไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับเวลาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยงานวิจัยไม่ได้พิจารณาถึงการหมุนของมอเตอร์ แต่พิจารณาถึงโมเมนต์ปฏิกิริยาในเงื่อนไขของโหลด โดยความไม่เป็นเชิงเส้นพิจารณาจากเส้นโค้งสนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ใช้ผ่านโปรแกรม ANSYS โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจะถูกนำมาเทียบกับการทดลองจริง งานวิจัยของ Matyas, et al. (2010) ได้ทำการศึกษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส สำหรับการอุปกรณขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยได้เสนอแนวทางการออกแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 6 เฟส ในแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดกรงกระรอกและในแบบเครื่องจักรกลซิงโครนัสทั้งสองชนิดเพื่อใช้งานสำหรับอุปกรณขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ พร้อมเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ของเครื่องจักรกลทั้ง 2 ชนิด งานวิจัยของ Hao, et al. (2013) ได้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการเกิดสถานะผิดปร่องสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 6 เฟส โดยใช้วิธีการปรับปรุงเวกเตอร์ ซึ่งพิจารณาในสถานะผิดปร่อง 1 เฟส โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จากแมทแลป พร้อมจำลองผลลักษณะการของค่าสนามแม่เหล็ก รวมถึงแสดงกราฟเส้นของคุณลักษณะต่างๆ เช่น กราฟกระแส กราฟความเร็ว กราฟแรงบิดและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นของระบบ พร้อมเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองจริง โดยเมื่อสังเกตผลที่ได้จะพบว่าค่าจากการจำลองและค่าจากการทดลองจริงนั้นมีค่าที่เท่าๆกัน ไม่ต่างกันมาก งานวิจัยของ Appiah, et al. (2013) ศึกษาผลกระทบจากการออกแบบร่องของมอเตอร์ที่ส่งผลของการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ชนิดกรงกระรอก โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ งานวิจัยของ Yu, et al. (2014) ได้ทำการศึกษาคำนวณจากแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟสสำหรับการขับเคลื่อนรถบรรทุก โดยได้ทำการศึกษามอเตอร์ชนิด Y-Y ซึ่งยกตัวอย่างเป็นมอเตอร์ของรถบรรทุก ในการคำนวณได้ใช้วิธีไฟ-

ไนท์อัลลิเมนต์จำนวนในเงื่อนไขที่มีโหลดและไร้โหลด ในบทความแสดงให้เห็นถึงสมการอนุพันธ์อันดับสองที่เลือกใช้ในการคำนวณ พร้อมจำลองผลการกระจายของสนามแม่เหล็กและค่าแรงเคลื่อนที่สนามเหล็ก โดยผลที่ได้จะดำเนินการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งมีความถูกต้องและเหมาะสมแก่การใช้งาน งานวิจัยของ Ursu, et al. (2015) ได้ดำเนินการศึกษามอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟส โดยใช้วิธีไฟไนท์อัลลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าคุณลักษณะต่างๆ พร้อมจำลองผลทั่วทั้งพื้นที่ โดยบทความแสดงให้เห็นถึงอีกหนึ่งแนวคิดเพื่อพยายามพัฒนามอเตอร์ 6 เฟสให้ดีขึ้น ซึ่งมีเป้าหมายคือความหนาแน่นแรงบิดที่สูงขึ้น การสูญเสียที่น้อยลง การจำลองผลจะแสดงผลของแรงบิดและแรงบิดระลอกคลื่น ของมอเตอร์ 6 เฟส 6 ขั้ว แรงบิด 35 N·m งานวิจัยของ Zhang, et al. (2015) ได้ทำการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์หม้อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยนำเสนอถึงตัวแปรค่าความผิดพลาดที่มองถึงว่าเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร การปิดวงจร การลดลงของสามแม่เหล็ก โดยได้ทำการออกแบบมอเตอร์ใหม่ เพื่อลดแรงบิดระลอกคลื่น ซึ่งใช้วิธีไฟไนท์อัลลิเมนต์ในการคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้อง งานวิจัยของ Chil, et al. (2016) ดำเนินการศึกษารูปแบบหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ติดตั้งกับคอมเพรสเซอร์ เพื่อลดค่าใช้จ่าย ลดกระแสเริ่มเดินเครื่อง เพิ่มประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลัง โดยใช้วิธี Practical Swarm และ Taguchi ในการหาค่าที่เหมาะสม รวมถึงการใช้วิธีไฟไนท์อัลลิเมนต์ในการช่วยวิเคราะห์พร้อมยืนยันความถูกต้อง งานวิจัยของ Lahne et al. (2016) ได้ดำเนินการออกแบบมอเตอร์ 6 เฟสแบบกำลังงานสูง ความเร็วรอบสูงที่ 50,000 rpm สำหรับการประยุกต์ใช้ในอากาศยานกับการทำงานอย่างต่อเนื่องที่พิกัด 700 kW โดยการประยุกต์ใช้นี้มีความต้องการความหนาแน่นกำลังงานสูงกว่า 5 kW/kg ในงานวิจัยได้กล่าวถึงค่าคงที่วัสดุอย่างละเอียดและกล่าวถึงแบบจำลองสำหรับที่ใช้วิธีไฟไนท์อัลลิเมนต์ในการคำนวณ พร้อมแสดงโมเดลต้นแบบที่ใช้ในการจำลอง สำหรับการจำลองผลหาค่าความดันที่พิกัด ค่าความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้น จำนวนค่าการสูญเสียจากแกนเหล็ก งานวิจัยของ Martin, et al. (2016) ได้ดำเนินการพิจารณาเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า 6 เฟส ชนิด Switched Reluctance โดยขับเคลื่อนด้วยชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีข้อดีกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นตรงที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดเบาและใช้งานง่าย แต่ความหนาแน่นแรงบิดน้อยและอาจจะมีแรงบิดระลอกคลื่นมาก ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ก็จะแตกต่างจากทั่วไป สำหรับการจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนท์อัลลิเมนต์ในการจำลอง โดยผลลัพธ์ที่แสดงจะเป็นค่ารูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้า กราฟแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบ กราฟกระแสและแรงบิดเทียบกับมุมรอบมอเตอร์ไฟฟ้า งานวิจัยของ Bao, et al. (2017) ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยสัญญาณกระแสเฟสรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

โดยได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบใหม่ ซึ่งขดลวดสเตเตอร์จะถูกแบ่งออกเป็นขดลวดสนามและขดลวดแรงบิดซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดทางอ้อมและแยกโหมดการวิเคราะห์ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงซับซ้อน สำหรับการคำนวณได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งเมตริก K จะคำนวณค่าคงที่สมมูลของ MMF สำหรับผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นมีความเชื่อถือที่ดี งานวิจัยของ Garbiec and Jagiela (2019) ได้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในช่วงการทำงานในการหมุนของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาและสนามแม่เหล็ก โดยผลลัพธ์ของค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าแรงบิดและค่ากำลังสูญเสียต่อไป

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณบดีนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเน้นไปในส่วนของการทดลองโดยยังไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก 3 เฟสเป็น 6 เฟส โดยอิงโครงสร้างเดิมและใช้คุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์เพื่อให้เกิดสมรรถนะที่สูงขึ้นด้วยการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยวิธีต่างๆที่ยังอิงโครงสร้างเดิมของมอเตอร์ เช่น ออกแบบระยะพิตซ์ ใช้คุณสมบัติร่องโรเตอร์เฉียงและการปรับเปลี่ยนการพันขดลวดใหม่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

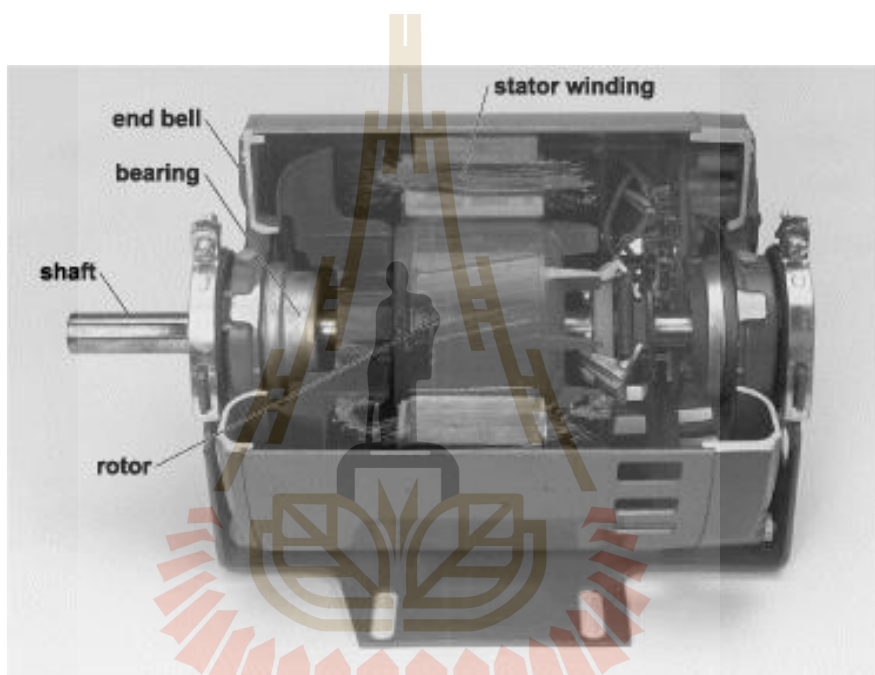
3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 6 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (2) ประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า (3) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส (4) สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (5) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและ (6) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นภาระทางไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ โดยโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ซึ่งสเตเตอร์จะประกอบด้วยโครงมอเตอร์ (Frame or yoke) แกนสเตเตอร์ (Stator core) และขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) โครงมอเตอร์ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลวง ฐานส่วนล่างมีลักษณะเป็นขาตั้ง มีกลองสำหรับต่อสายไฟออกสู่วงจรภายนอกอยู่ด้านข้าง โดยโครงจะมีหน้าที่จับยึดแกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ ผิวด้านนอกโดยรอบของโครงมอเตอร์บางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีป เพื่อช่วยในการระบายความร้อน ส่วนแกนสเตเตอร์ทำจากแผ่นลามิเนตให้ความหนาแน่นได้ของแม่เหล็กมีค่าสูง ซึ่งจะมีความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และกระแสไหลวน (Eddy current) ค่า แกนสเตเตอร์ถูกเจาะตรงกลางให้มีลักษณะเป็นรูปวงแหวน โดยผิวด้านในถูกเจาะเป็นร่องกันด้วยฟันของสเตเตอร์โดยรอบ เพื่อใช้เป็นที่วางสำหรับการพันขดลวดสเตเตอร์ แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนสเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กและส่วนที่ 2 คือ โรเตอร์หรือส่วนที่เคลื่อนที่ (rotor) ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นประกอบด้วยแกนเหล็กและขดลวด ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และขดลวดที่อยู่ในแต่ละส่วนนั้นมีชื่อตามส่วนประกอบที่ขดลวดฝังอยู่นั้นคือ ขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) และขดลวด

โรเตอร์ (Rotor winding) หรือมักนิยมเรียกว่าแท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor bar) ในส่วนขดลวดสเตเตอร์ จะเป็นลวดทองแดงเส้นเล็กๆ ที่ใช้พันเป็นขดลวด เคลือบด้วยน้ำมันวานีนิชที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยแบ่งจำนวนขดลวดออกเป็นสามชุด ซึ่งแต่ละชุดจะเรียกว่าเฟส ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส จะนำมาต่อกันแบบสตาร์ (Y) หรือเดลตา (Δ) แล้วต่อออกสู่วงจรรภายนอก การสร้างขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟส เกิดจากการพันต่อกันของขดลวดเฟสนั้นๆ ในลักษณะพันตรงและพันย้อนกลับสลับกันไป เพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไปเรื่อยๆ เป็นคู่ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ



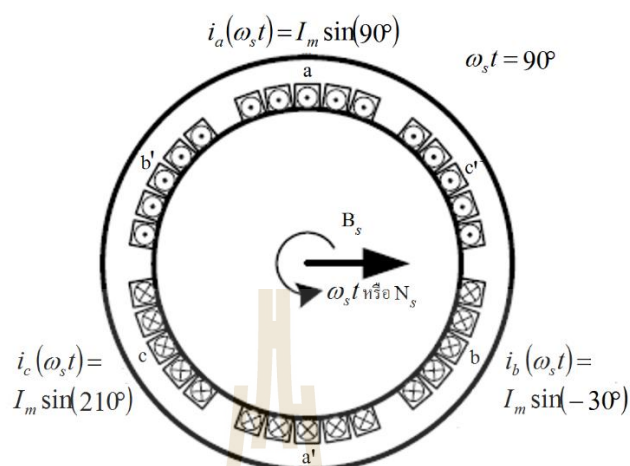
รูปที่ 3.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ซึ่งขดลวดสเตเตอร์นั้นแบ่งออกเป็น 3 ชุดเพื่อรองรับกับไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยขดลวดทั้งสามนั้นวางห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดแต่ละขดนั้นแสดงได้ดังสมการที่ 3.1 – 3.2

$$i_a(\omega_s t) = I_m \sin(\omega_s t) \quad (3.1)$$

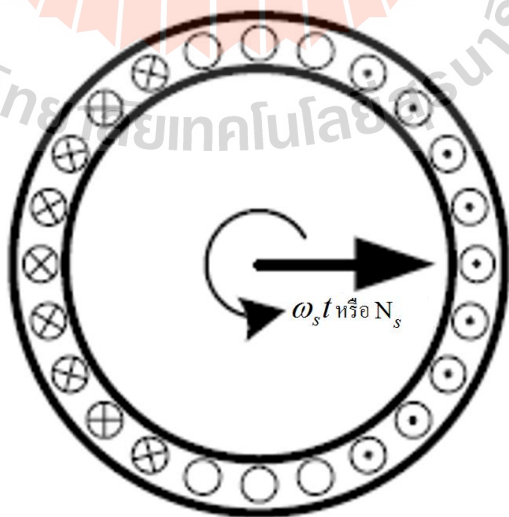
$$i_b(\omega_s t) = I_m \sin(\omega_s t - 120^\circ) \quad (3.2)$$

$$i_c(\omega_s t) = I_m \sin(\omega_s t + 120^\circ) \quad (3.3)$$



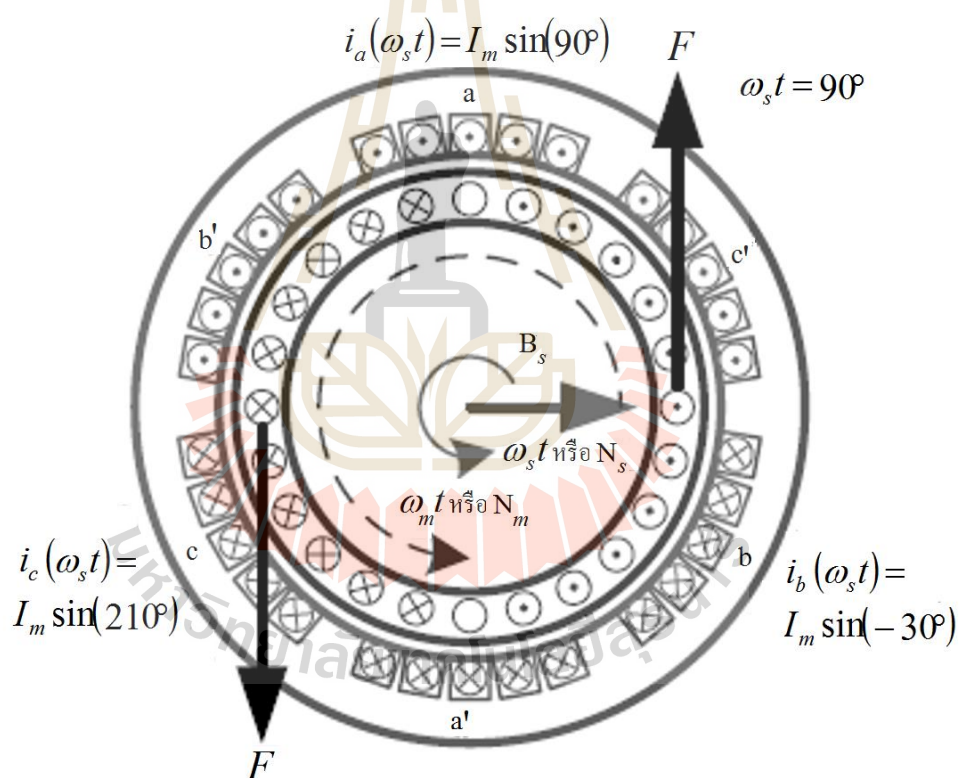
รูปที่ 3.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

ส่วนขดลวดโรเตอร์นั้นมีแท่งตัวนำหลาย ๆ แท่งพาดผ่านตามแนวยาวของโรเตอร์และที่ปลายทั้งสองด้านของโรเตอร์นั้นปลายแท่งตัวนำเหล่านั้นถูกทำให้เชื่อมติดกัน ซึ่งเป็นการลัดวงจรของขดลวดโรเตอร์ ซึ่งในรูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางของโรเตอร์กระแสที่เกิดไหลในขดลวดโรเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวดโรเตอร์



รูปที่ 3.3 การเกิดกระแสในโรเตอร์

จากรูปที่ 3.3 เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามและทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนรอบภายในสเตเตอร์หรือที่เรียกว่าสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ (Bs) ซึ่งสนามแม่เหล็กสเตเตอร์นี้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed, N_s) หรือที่เรียกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนนี้ โดยความเร็วนี้มีสัมพันธภาพกับความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Frequency, f) และขั้วสนามแม่เหล็ก (Pole, P) ที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการที่ 3.4 และสนามแม่เหล็กหมุนนี้พุ่งผ่านช่องว่างอากาศไปยังโรเตอร์และตัดผ่านขดลวดโรเตอร์ที่มีปลายทั้งสองด้านเชื่อมต่อกันหรือลัดวงจร ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและสร้างกระแสไหลในขดลวดโรเตอร์ดังรูปที่ 3.3 และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสร้างแรงบิดเกิดขึ้นที่โรเตอร์ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเกิดแรงบิดทำให้โรเตอร์หมุน

ซึ่งแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้โรเตอร์เกิดการหมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ด้วยความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed, N_m) ในสภาวะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสไร้ภาระทางกล (No load) ความเร็วโรเตอร์นี้ใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ($N_m \approx N_s$) เท่านั้น เพราะถ้าขดลวด

โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสแล้วจะทำให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดโรเตอร์ ซึ่งส่งผลทำให้ไม่เกิดแรงบิด ดังนั้นการอาศัยสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวดโรเตอร์เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำสร้างแรงบิดขึ้น จึงทำให้ความเร็วโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ แต่เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเกิดภาระทางกลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งทำให้ความเร็วซิงโครนัสตัดผ่านขดลวดโรเตอร์มากขึ้นทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสร้างแรงบิดมากขึ้นตามและทำให้โรเตอร์ได้รับกำลังในช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยกำลังนี้มีความสัมพันธ์กับผลต่างของความเร็วโรเตอร์และความเร็วซิงโครนัส ซึ่งผลต่างของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่าความเร็วสลลิปหรือความเร็วลื่นไถล (slip speed, N_{slip}) ซึ่งแสดงได้ตามสมการที่ 3.4 - 3.5 และเกิดค่าสลลิป (Slip, s) ดังสมการที่ 3.6 ซึ่งค่าสลลิปนี้สามารถมีค่าอยู่ในช่วง $0 < s = 1$

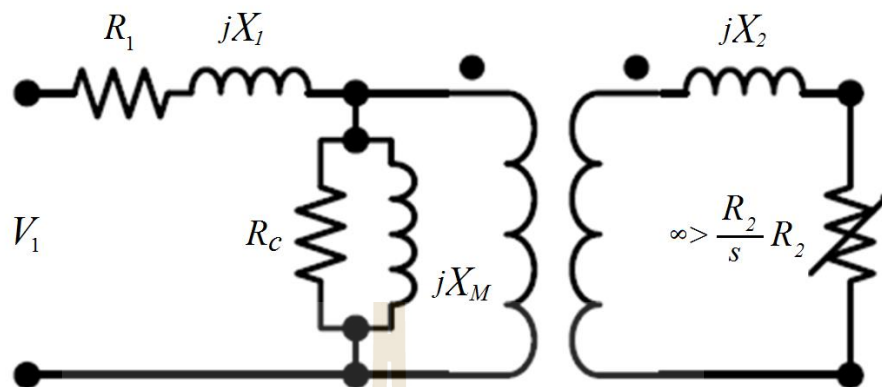
$$N_s = 120 \frac{f}{P} \quad (3.4)$$

$$N_{slip} = N_s - N_m \quad (3.5)$$

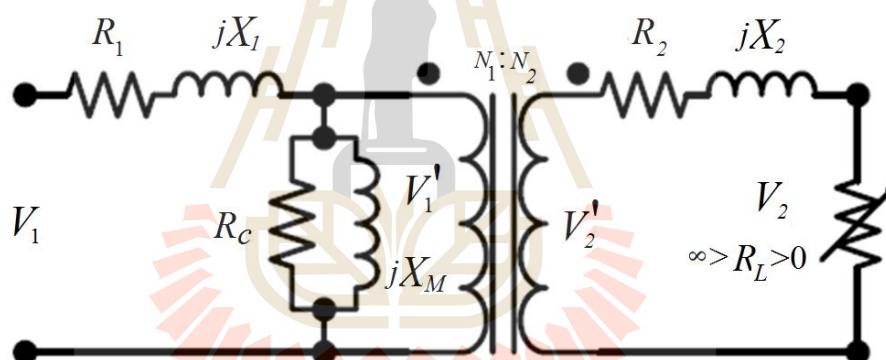
$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (3.6)$$

ดังนั้นจากโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีขดลวดโรเตอร์ลัดวงจรด้านหัว-ท้ายของโรเตอร์และการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่กล่าวในข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างและการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นอยู่นิ่งและได้รับการเหนี่ยวนำจากความถี่สนามแม่เหล็ก โดยตรงทำให้เกิดกระแสทุติยภูมิที่มีความถี่เดียวกับความถี่สนามแม่เหล็ก แต่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีการเคลื่อนที่ทำให้ขดลวดโรเตอร์ได้รับการเหนี่ยวนำจากความถี่ซิงโครนัสในบางส่วนทำให้เกิดกระแสโรเตอร์ไหลในขดลวดโรเตอร์และกระแสโรเตอร์นี้มีความถี่หรือความถี่กระแสโรเตอร์ (f_r) ที่น้อยกว่าความถี่ซิงโครนัส และความถี่กระแสโรเตอร์นี้เท่ากับความถี่ซิงโครนัสก็ต่อเมื่อโรเตอร์ถูกล๊อคให้อยู่นิ่ง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.7 จากโครงสร้างและการทำงานที่กล่าวในข้างต้นทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.5 ก) และวงจรสมมูลต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้างดรูปที่ 3.5 ข) และมีกระบวนการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ดังรูปที่ 3.6

$$f_r = sf \quad (3.7)$$

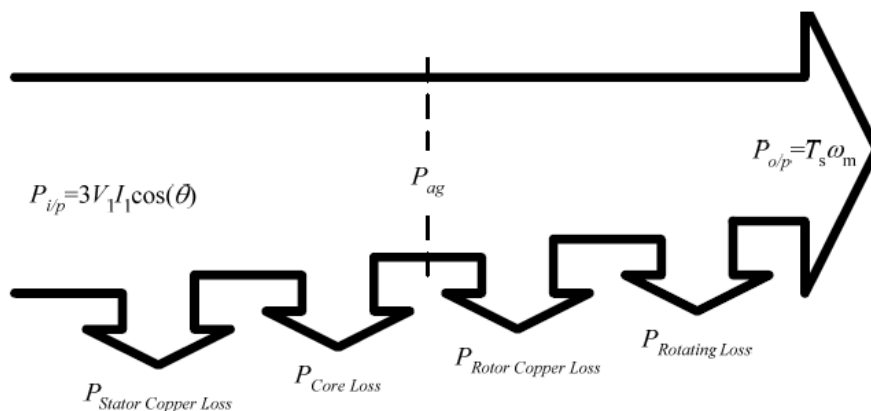


ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส



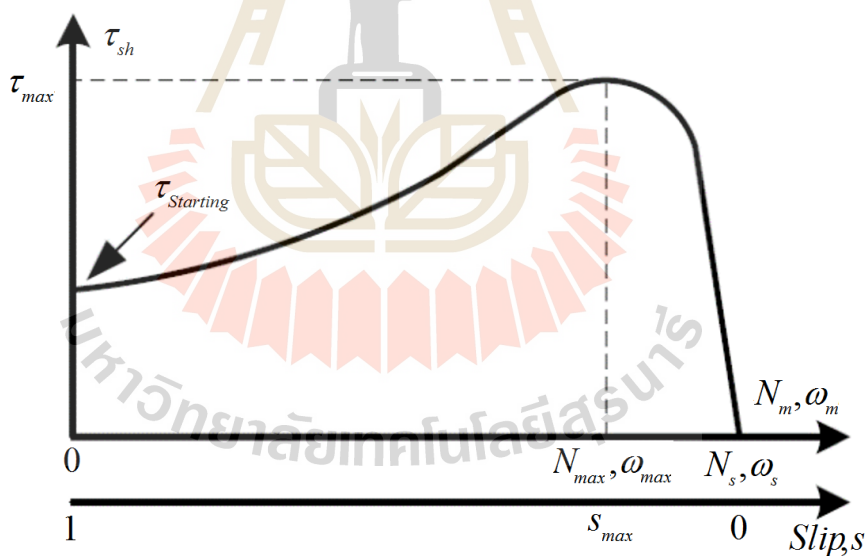
ข) วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อเฟสที่มีภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.6 กระบวนการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในข้างต้น แรงบิดที่ถูกสร้างขึ้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วสลลิป ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 คุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยการปรับลดขนาดแรงดันไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ในช่วงที่แคบ ๆ เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นแปรตามความถี่ที่ป้อนหรือความถี่ซิงโครนัสและความเร็วสลลิปที่ขึ้นกับภาระทางกล ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อมีการปรับแรงดันไฟฟ้าที่

ขนาดต่างๆ โดยเทียบการใช้งานที่ต้องการความเร็วรอบในช่วงที่กว้างๆ ซึ่งในอดีตมักใช้เกียร์หรือเฟืองทดรอบเป็นตัวกลางระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำและเครื่องจักรในการปรับความเร็วรอบปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับพัฒนาขึ้นมาจนสามารถทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยการเปลี่ยนขนาดแรงดันและความถี่ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบได้ตามที่ต้องการ

3.3 ประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของมอเตอร์คืออัตราส่วนของกำลังทางกลขาออก (output) ต่อกำลังไฟฟ้าขาเข้า (input) ซึ่งประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียในมอเตอร์จะมาจากการสูญเสียที่มีค่าคงที่และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามโหลดของมอเตอร์ เช่น ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) การสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงลม (Wind force and friction losses) ความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator losses) ความสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor losses) ความสูญเสียจากการใช้งาน (Stray load losses) หากมอเตอร์นั้นมีการออกแบบที่ดีพอก็จะช่วยให้สมรรถนะของมอเตอร์นั้นดีขึ้นทำให้มอเตอร์นั้นประหยัดพลังงาน ลดการสูญเสียพลังงาน ความร้อนลดลง อายุการใช้งานที่นานขึ้น ลดค่าฮาร์มอนิก การสั่นสะเทือนน้อยลง เป็นต้น ซึ่งวิธีการออกแบบมอเตอร์เพื่อเพิ่มสมรรถนะมีดังนี้

การจัดการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พันและระยะพิตช์ของขดลวด (Coil pitch) ที่ใช้พัน การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องมีอยู่สองลักษณะคือ การวางตัวแบบรวม (Concentrate) หมายถึงกลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกันและการวางตัวแบบกระจาย (Distribution) หมายถึงกลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวในแต่ละร่องแยกกัน ซึ่งการวางตัวของขดลวดในมอเตอร์สามเฟสส่วนใหญ่จะเป็นแบบกระจาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบของฮาร์มอนิกจากการวางตัวของขดลวดแบบรวม แต่เนื่องจากการวางตัวของขดลวดแบบรวม กลุ่มของขดลวดจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อมกัน แต่การวางตัวของขดลวดแบบกระจายซึ่งมีขดลวดอยู่ในร่องที่แยกกัน แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดจึงเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการวางตัวของขดลวดแบบกระจายจึงมีค่าน้อยกว่าการวางตัวของขดลวดแบบรวม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่น้อยลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบการกระจาย (Distribution factor or breadth factor: k_d)

การพันขดลวดยังต้องคำนึงถึงระยะพิตช์ของขดลวดที่ใช้พัน ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกัน จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ ระยะพิตช์เต็ม (Full pitch) และระยะพิตช์เศษส่วน (Fractional pitch) ซึ่งระยะพิตช์เต็มหมายถึง เมื่อด้านข้างของขดลวดด้าน

หนึ่งอยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก N แล้ว จะมีอีกด้านข้างหนึ่งของขดลวดนี้ อยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก S ที่อยู่ถัดไป ซึ่งมีระยะเทียบได้กับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก หรือ 180° ไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางไฟฟ้า (θ_e) และมุมทางกล (θ_m) จะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (3.7)$$

ส่วนระยะพิตช์เศษส่วนคือ ด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกันจะอยู่ห่างกันไม่ถึง 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งระยะพิตช์ของขดลวดในมอเตอร์สามเฟสส่วนใหญ่จะเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่ข้อเสียของการพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนคือ ค่าแรงดันเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อนำไปเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่ลดลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบพิตช์ (pitch factor: k_p) และผลคูณระหว่าง k_d และ k_p จะสามารถเรียกว่าตัวประกอบขดขดลวด (winding factor: k_w)

การพันขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็นสองแบบคือ การพันขดลวดชั้นเดียว (Single layer winding) ซึ่งจำนวนขดลวดที่ใช้ในการพันจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนร่อง เพราะในแต่ละร่องจะมีด้านข้างของขดลวดเพียงด้านเดียวและการพันขดลวดสองชั้น (Double layer winding) ซึ่งเป็นที่นิยมในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้โดยการเลือกช่วงของการพันขดลวดที่เหมาะสม ส่วนข้อเสียคือการพันขดลวดลงร่องและการซ่อมแซมทำได้ยากกว่าการพันขดลวดชั้นเดียว โดยในหนึ่งร่องจะมีด้านข้างของขดลวดบรรจุอยู่สองด้าน ถ้าด้านหนึ่งของขดลวดวางตัวอยู่บนบนของร่องแล้ว อีกด้านหนึ่งของขดลวดจะวางตัวอยู่บนล่างของร่องอันอื่น โดยจะมีฉนวนกั้นระหว่างขดลวดในส่วนบนและขดลวดในส่วนล่าง การพันแบบขดลวดสองชั้นนี้

การลดช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ เป็นการลดช่องว่างอากาศที่เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ จะทำให้สนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศมาถึงโรเตอร์มีความเข้มสูงขึ้น ลดปริมาณสนามแม่เหล็กรั่ว ทำให้มอเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงสำหรับการผลิตแรงบิดที่เท่าเดิมและยังลดความสูญเสียจากภาระการใช้งานด้วย

การออกแบบร่องสลีตใหม่และทำให้แกนเหล็กที่สเตเตอร์ยาวขึ้น เพื่อที่จะรองรับขดลวดทองแดงที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องออกแบบร่องสลีตใหม่โดยแกนเหล็กที่ยาวขึ้นจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความยาวของแกนเหล็กยังเป็นการเพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็กที่จะผ่านทางช่องอากาศมาถึงโรเตอร์อีกด้วย

การออกแบบคุณสมบัติร่องโรเตอร์เฉียงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำการสันสะเทือนอาจเกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่ ความไม่สัมพันธ์ระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ การเชื่อมศูนย์กลางของโรเตอร์ทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต มุมเฉียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์และการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบแล้วส่งผลให้แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ที่บิดเบี้ยวสาเหตุต่างๆเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้ จากการออกแบบและการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน ความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานหรือเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่นๆที่มากระทำ ซึ่งสาเหตุต่างๆเหล่านี้ย่อมส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวที่ไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ แล้วส่งผลให้เกิดเสียงและการสันสะเทือนขึ้นทำให้มีการสูญเสียทางกล สมรรถนะในการทำงานและอายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง อีกทั้งประสิทธิภาพในการทำงานของบุคลากรที่ควบคุมเครื่องจักรก็จะลดลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การวางตัวของแท่งโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีผลต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งผลการปรับร่องโรเตอร์แสดงด้วยสมการที่ (3.8)

$$\xi_s = \frac{\sin(\mu p b / D)}{\mu p b / D} \quad (3.8)$$

โดยที่ ξ_s คือ มุมในการวางตัวของแท่งโรเตอร์

b คือ ระยะการเฉียงรอบเส้นรอบวงของโรเตอร์

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของโรเตอร์

p คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

μ คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ฮาร์มอนิก

ในการปรับร่องโรเตอร์เฉียงเพื่อให้ได้การกระจัดในแนวรัศมีโดยจะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ ξ_s ในมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกลางและขนาดใหญ่แรงบิดและการสันสะเทือนจะมีผลอย่างมากเนื่องจากมีแรงบิดที่สูงและมีขนาดการสันสะเทือนที่มาก ซึ่งผลของการสันสะเทือนจะอยู่ในรูปการกระจัดในแนวรัศมีแสดงได้ดังสมการที่ (3.9)

$$Y_{r,res} = \sqrt{Y_{r,s}^2 + \frac{\phi_{r,r}^2 L_i^2}{12}} \quad (3.9)$$

โดยที่ $Y_{r,s} = \xi_s Y_r$

Y_r คือ ระยะเวลาเลียงรอบเส้นรอบวงของโรเตอร์

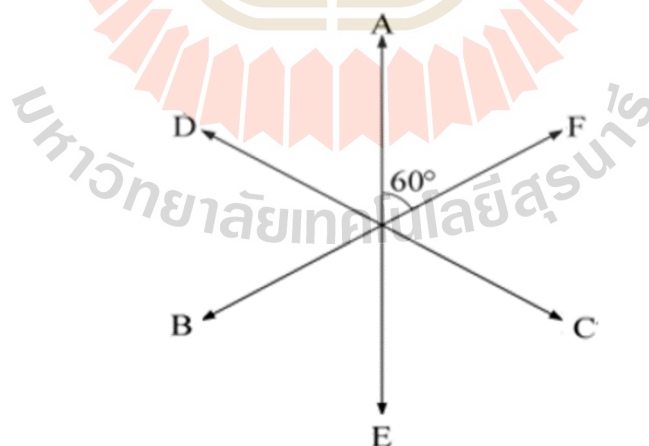
$\phi_{r,r}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของโรเตอร์

L_i คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

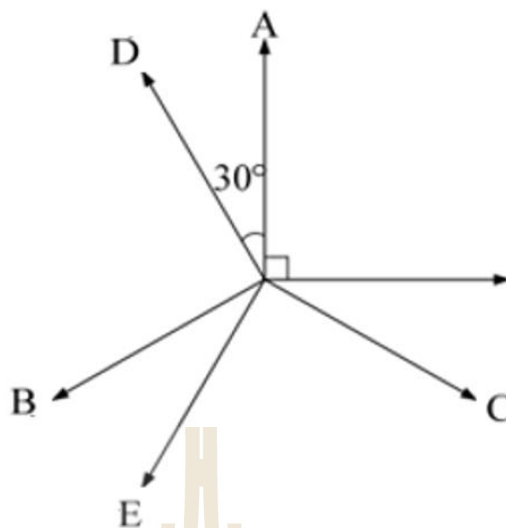
3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเฟส (Multi-phase induction motor drive) ซึ่งมีจำนวนเฟสของขดลวดสเตเตอร์มากกว่า 3 เฟสนั้นสามารถใช้โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดิมได้โดยตรง การจัดรูปแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังกล่าวให้ทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีขดลวดเฟสเพิ่มเป็น 2 ชุด โดยขดลวดชุดที่ 2 นั้นจะมีลักษณะการพันที่ใช้มุมเฟสที่ต่างกัน ซึ่งแบ่งลักษณะการจัดวางขดลวดออกเป็น 2 แบบด้วยกันดังนี้

1. แบบสมมาตรจะวางขดลวดชุดที่ 2 ห่างจากขดลวดชุดที่ 1 ทำมุม 60° ทางไฟฟ้า
2. แบบไม่สมมาตร จะวางขดลวดชุดที่ 2 ห่างจากขดลวดชุดที่ 1 ทำมุม 30° ทางไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



ก) แบบสมมาตร

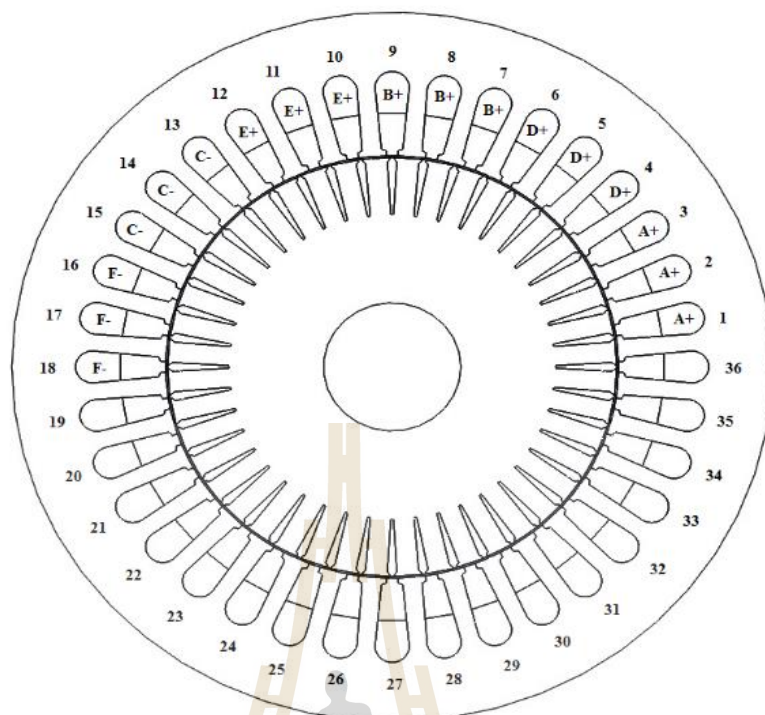


ข) ไม่สมมาตร

รูปที่ 3.8 ลักษณะการจัดวางขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในแบบสมมาตรและไม่สมมาตร

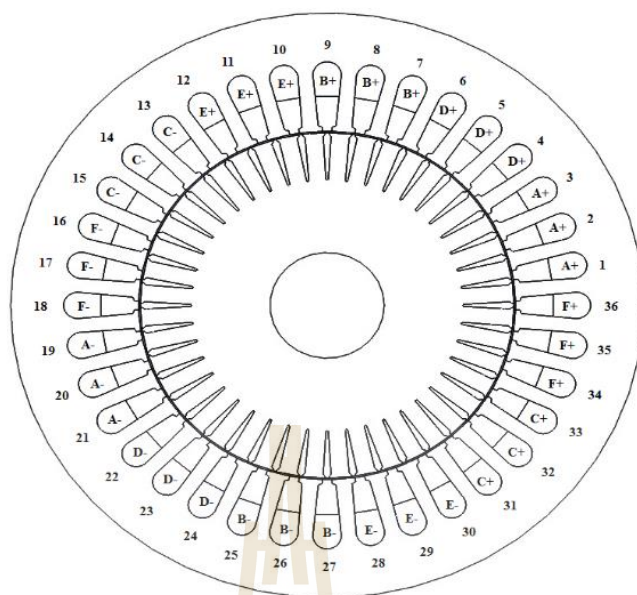
สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้นั้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว 3 แรงม้า ชนิดกรงกระรอกและขดลวดพันแบบ 2 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยร่องสเตเตอร์ทั้งหมด 36 ร่องและระยะพิตช์ของขดลวดเท่ากับ $7/9$ ส่วนโครงสร้างที่ออกแบบใหม่นี้จะดำเนินการจัดวางขดลวดในแบบสมมาตร โดยโครงสร้างใหม่จะออกแบบให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มี 2 ขั้วและเริ่มตั้งต้นระยะใหม่ที่ระยะพิตช์เต็มที่เป็น $18/18$ และขั้นตอนในการออกแบบจะนำแนวคิด 6 เฟสมาประยุกต์ใช้กับระบบ 3 เฟส แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.9-3.11 ดังนี้

สำหรับขั้นตอนที่ 1 ในการนำแนวคิด 6 เฟสมาประยุกต์ใช้กับระบบ 3 เฟส สามารถทำได้โดยกำหนดการวางตัวของขดลวดชุดแรกที่ร่องสเตเตอร์ที่ 1 โดยให้เริ่มจากเฟส A, D, B, E พร้อมกำหนดขั้วเริ่มต้นเป็นขั้วบวก ต่อมากำหนดเฟส C, F เป็นขั้วลบ ซึ่งการกำหนดขั้วบวกและขั้วลบนี้นำมาจากช่วงเวลาหนึ่งของกราฟการทำงานรูปคลื่นไซน์ของระบบ 6 เฟส โดยช่วงเวลาที่นำมาใช้นั้นกราฟเฟส A, D, B, E อยู่ในช่วงค่าบวกและกราฟเฟส C, F อยู่ในช่วงค่าลบ สำหรับการวางตัวเฟส A, D, B, E, C, F เกิดจากแนวคิดการวางขดลวดแบบสมมาตรที่มีการวางมุมเฟสที่ห่างจากขดลวดชุดที่ 1 ซึ่งเริ่มจากเฟส D, E, F ที่มีมุมเฟสเพิ่มจากเฟส A, B, C 60° ตามลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



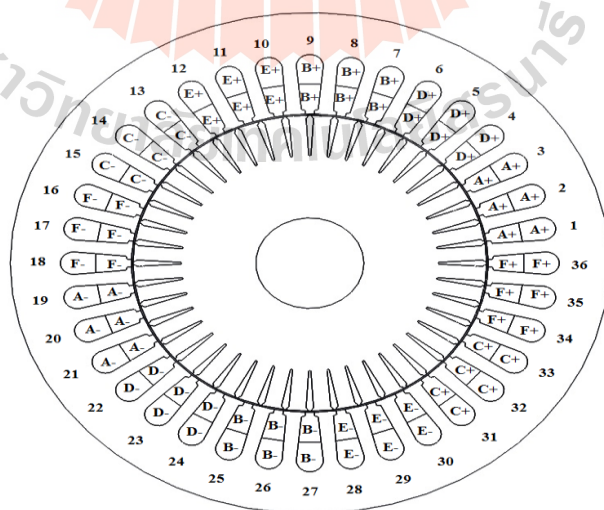
รูปที่ 3.9 การวางตัวของขี้แมลงเหล็กบวกลบโดยอิงจากเฟส A

สำหรับขั้นตอนที่ 2 จะดำเนินการกำหนดการวางตัวของขวดหลอดแรกในครั้งนี้จะกำหนดให้เป็นขี้ลบ โดยเริ่มจากการกำหนดขี้ลบบเฟส A ให้มีมุมเฟสห่างมุมเฟส A ที่เป็นขี้บวก 180° ที่ร่องสเตเตอร์ที่ 19 เพราะว่าเป็นมอเตอร์ชนิดแบบ 2 ขั้ว หลังจากนั้นกำหนดขวดหลอดที่ 2 เริ่มจากเฟส D, E, F ที่มีมุมเฟสเพิ่มจากเฟส A, B, C 30° ตามลำดับอีกเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



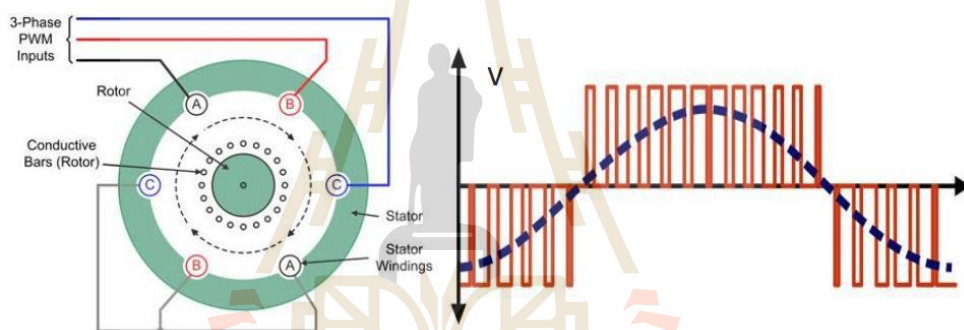
รูปที่ 3.10 การวางตัวของขั้วแม่เหล็กกลบโดยอิงจากเฟส A

ในขั้นตอนสุดท้ายจะดำเนินการวางขดลวดในชั้นที่ 2 โดยจะกำหนดระยะพิตซ์เป็นแบบพิตซ์เต็มอิงจากต้นแบบที่ออกแบบไว้ให้เป็นระยะเต็ม หลังจากนั้นกำหนดการวางขดลวดที่มีขั้วและมุมเฟสให้เหมือนกับชั้นที่ 1 ซึ่งจะเริ่มจากเฟส A ที่เป็นขั้วลบตั้งแต่องศาเตอร์ที่ 19 ในชั้นที่ 2 หลังจากนั้นก็จะเรียงเหมือนชั้นที่ 1 ตามลำดับได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็นแบบพิตซ์เต็ม

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยใช้โครงสร้างเดิมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่มีขดลวด 2 ชุดต่อเฟส ดังนั้นรายละเอียดต่าง ๆ จะเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยทั่วไป มีโครงสร้างหลักที่สำคัญประกอบด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์ ที่ถูกแยกจากกันด้วยช่องว่างอากาศขนาดเล็ก ๆ มีระยะห่างประมาณ 0.4 – 4.0 mm ขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังงานของมอเตอร์ การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสอาศัยหลักการการทำงานตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ที่ประกอบด้วยเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มี 6 ขั้ว มีขดลวด 6 ชุด เฟสละ 2 ชุด แต่ละเฟสวางขดลวดห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ขดลวดทั้ง 2 ชุดในแต่ละเฟสจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force: mmf) ที่มีทิศทางเดียวกันเพื่อเสริมกัน เมื่อทำการเชื่อมต่อขดลวดแบบ Y จะเกิดจุดต่อร่วมนิวทรัล N เมื่อจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในกรณีนี้ซึ่งใช้แหล่งจ่ายแบบ PWM



รูปที่ 3.12 การเชื่อมต่อขดลวดสเตเตอร์และการกระตุ้นขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยการควบคุมขนาดแรงดันและความถี่ ทำให้ได้ย่านการทำงานแบ่งเป็น 2 ย่าน ประกอบด้วย ย่านแรงบิดคงที่ (Constant torque region) และย่านกำลังงานคงที่ (Constant power region) จากหลักการที่ใช้ขดลวดเดิมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้ค่าแรงดันจ่ายให้ขดลวดสูงสุดมีค่าเท่าเดิม เมื่อเพิ่มจำนวนเฟสจะทำให้ข้อจำกัดด้านฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวลดลง เนื่องจากฟลักซ์ที่ถูกสร้างขึ้นจะแบ่งกันไปตามจำนวนเฟส เมื่อเปลี่ยนจาก 3 เฟส เป็น 6 เฟส ปริมาณฟลักซ์ที่สร้างขึ้นต่อเฟสจะลดลงทำให้ขยายค่าแรงบิดทำงานของมอเตอร์ได้มากขึ้นที่ความเร็วเดิม การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสถูกนำมาใช้ในงานขับเคลื่อนที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง ความหนาแน่นกำลังงานสูง และประสิทธิภาพสูง การประยุกต์ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสส่วนใหญ่ เป็นการขับเคลื่อนยานพาหนะรูปแบบต่าง ๆ เช่น เรือไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้า อากาศยาน ยานอวกาศ หรือรถไฟ เป็นต้น การขับเคลื่อน

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสได้รับการพัฒนามากกว่า 40 ปี ในช่วงเริ่มต้นพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแบบ 2 เฟส แต่หลังจากนั้นไม่นานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้เข้ามาแทนที่ ซึ่งช่วยกำจัดผลของฮาร์มอนิกที่ 3 ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์แบบ 2 เฟส โดยข้อดีของการเพิ่มจำนวนเฟสของมอเตอร์ให้มากกว่า 3 สามารถนำไปเลือกใช้งานได้ดังนี้

- เพิ่มความเชื่อถือได้ในการขับเคลื่อน เช่น การเกิดความผิดปกติของเฟสใดเฟสหนึ่ง มอเตอร์จะยังสามารถทำงานต่อไปได้
- ลดแรงบิดพัลเซชัน (Pulsation torque) ที่จะทำให้อัตราการสั่นและลดการสูญเสียที่โรเตอร์
- ลดขนาดของกระแสต่อเฟสส่งผลต่อการลดปริมาณฟลักซ์ต่อเฟสของมอเตอร์เหมาะกับการใช้งานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
- ลดขนาดฟลักซ์กระแสไฟฟ้าต่อสวิตช์

3.5 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

การบอกถึงปริมาณอย่างหนึ่งอย่างใดของสรรพสิ่งในธรรมชาติ อาจกระทำได้โดยการบอกขนาดแต่เพียงอย่างเดียวซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงสเกลาร์ (Scalar quantities) หรืออาจบอกทั้งขนาดและทิศทางควบคู่กันซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงเวกเตอร์ (Vector quantities) พื้นฐานสำคัญในการศึกษาสนามแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากทฤษฎีของเวกเตอร์ โดยจะเริ่มต้นด้วยพีชคณิตของเวกเตอร์ดังนี้

ถ้ากำหนดให้ A เป็นเวกเตอร์ใดๆ ในระนาบ xyz จะเขียนเวกเตอร์ A ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) เมื่อทราบทฤษฎีและคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่จำเป็นแล้วต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (เฉลิมพล น้ำค้าง, 2538) ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบเวกเตอร์จากข้างต้น

ประจุไฟฟ้า (Electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้นๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (Electric force) และถ้าหากประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วยจะเกิดแรงที่เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่า แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ทุกๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) หรืออาจเรียกว่า สนามไฟฟ้า (Electric field: E) อยู่ปริมาณหนึ่งที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่าสนามแม่เหล็ก

(Magnetic field: \mathbf{B}) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

1. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนี้
2. เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)
3. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)
4. เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3.10)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.10)$$

เมื่อ μ คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$ โดยที่ μ_0 คือความซาบซึมได้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ μ_r คือความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ส่วน \mathbf{H} คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) และจากการศึกษาคุณสมบัติของ \mathbf{B} พบว่า โอเปอเรเตอร์เดลของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.11)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) นั่นคือ กฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยถ้านำไปประกบกับการใช้เอกลักษณ์ดังแสดงในสมการที่ (3.12) จะได้ว่า ไดเวอร์เจนซ์ของ \mathbf{B} เท่ากับศูนย์แล้วย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งทีเมื่อกระทำเคิร์ลแล้ว ได้ผลเป็นเวกเตอร์ \mathbf{B} เวกเตอร์ใดที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ \mathbf{B} จะเรียกว่า ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic vector potential: \mathbf{A})

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.12)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก **B** จึงเลี่ยงโดยการไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก **A** ก่อน ซึ่งเป็นการคำนวณที่กระทำได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็ก **B** สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก **A** เท่านั้น

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ โดยปริมาณของสนามแม่เหล็ก (**B**) จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ซึ่งได้อธิบายไว้ดังสมการที่ (3.10)

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่าสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (**E**) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.13)$$

แทนสมการที่ (3.12) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้ดังสมการที่ (3.14)

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

และจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามที่แปรตามเวลา เมื่อสมมติให้ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำแสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (3.15)$$

เมื่อ \mathbf{J}_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density) และ \mathbf{J}_e คือความหนาแน่นของกระแสวน (Eddy current density) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสวนและค่าสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3.16)

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (3.16)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.16) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสและค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.17)

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} \quad (3.17)$$

นำสมการที่ (3.10) , (3.12) และสมการที่ (3.17) แทนค่าลงในสมการที่ (3.15) จะได้สมการอนุพันธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.18)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (3.18)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (\mathbf{A}) พบว่า $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์คือ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.19)

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (3.19)$$

และจากคุณสมบัติของ \mathbf{A} จะได้ว่า $\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \mathbf{k}$ จึงสามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.20)

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} - \mu\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (3.20)$$

3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์

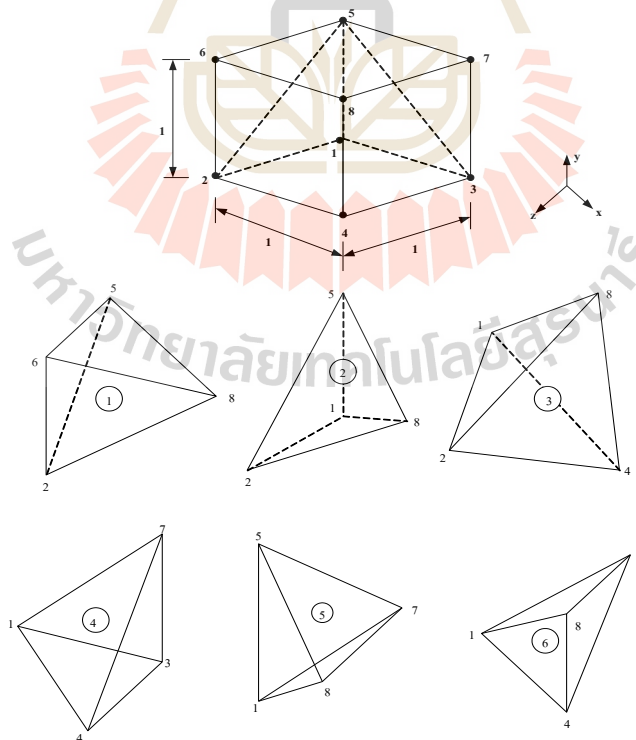
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องหาหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น ความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และอิลลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนต์ต่างๆนี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) รูปทรงแปด

หน้า (Octahedron) หรือ รูปทรงพีรามิด (Pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวน โหนดหรือจุดเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้านี้สามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่นๆที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

1. แบ่งอิลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้า ทั้งหมด 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละ โหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด เมื่อพิจารณาอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอิทธิเมนต์

หมายเลข อิทธิเมนต์	หมายเลขโนด			
	โนด i	โนด j	โนด k	โนด 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

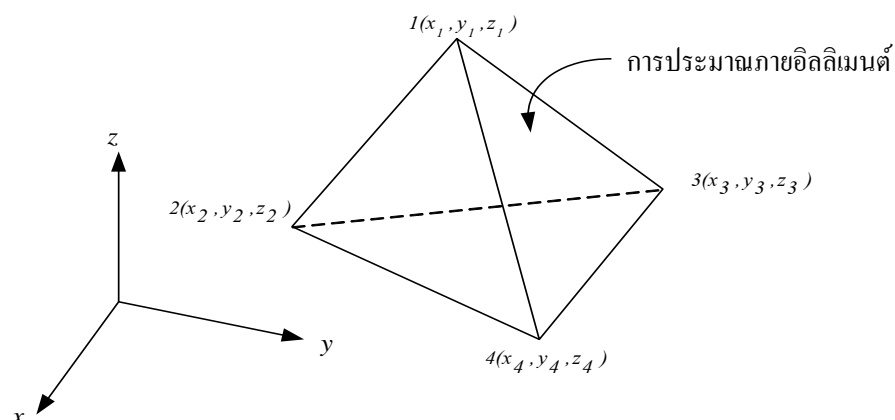
ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

หมายเลขโนด	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

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิทธิเมนต์ อย่างในกรณีอิทธิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 จุดต่อที่มีตัวห้อย 1 2 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายใน อิทธิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.14 ตำแหน่งของจุดต่อ (x_n, y_n, z_n) เมื่อ $n = 1, 2, 3$ และ 4 เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า u_n โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิทธิเมนต์ $u_e(x, y, z)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังสมการที่ (3.21)

$$\mu_e = \alpha + \beta x + \gamma y + \lambda z \quad (3.21)$$

โดยที่ α β γ และ λ เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากโนดทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.14 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$\mu_e(x_1, y_1, z_1) = \alpha + \beta x_1 + \gamma y_1 + \lambda z_1$$

$$\mu_e(x_2, y_2, z_2) = \alpha + \beta x_2 + \gamma y_2 + \lambda z_2$$

$$\mu_e(x_3, y_3, z_3) = \alpha + \beta x_3 + \gamma y_3 + \lambda z_3$$

$$\mu_e(x_4, y_4, z_4) = \alpha + \beta x_4 + \gamma y_4 + \lambda z_4$$

นำค่า α β γ และ λ ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับลงไปในสมการที่ (3.21) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (3.22)

$$\mu_e(x, y, z) = u_1 N_1 + u_2 N_2 + u_3 N_3 + u_4 N_4 \quad (3.22)$$

ซึ่ง N_i , $i = 1, 2, 3, 4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.23)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3.23)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละออลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.24)

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานี้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3. สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้อาจถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ได้ออกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะอยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (3.25)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \\ A_l \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \quad (3.25)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e[A]_e = [F]_e$ โดย $[A]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่โนด และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่าเป็นเมทริกซ์ระดับอิลลิเมนต์ ซึ่งสมการของอิลลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.25) สามารถทำได้โดย

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

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องทางด้าน โครงสร้าง และยังมิจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่วไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n

โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.26)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nm} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3.26)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{\text{sys}}[A]_{\text{sys}} = [f]_{\text{sys}}$ จากสมการที่ (3.26) เมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ(Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวน โหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิลลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.13 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิลลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแฉวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละอิลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.13 $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 2 8 5 และ 6 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 3 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 4 และ 8 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 4 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 3 4 และ 7 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 5 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 7 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 6 ซึ่งเป็นอิลลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 8 4 และ 7 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{bmatrix} (2) & (8) & (5) & (6) \\ (2) & a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ (8) & a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ (5) & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ (6) & a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e2} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (8) & (5) \\ (1) & e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ (2) & e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ (8) & e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ (5) & e_4 & f_4 & g_4 & h_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e3} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (4) & (8) \\ (1) & i_1 & j_1 & k_1 & l_1 \\ (2) & i_2 & j_2 & k_2 & l_2 \\ (4) & i_3 & j_3 & k_3 & l_3 \\ (8) & i_4 & j_4 & k_4 & l_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e4} = \begin{bmatrix} (1) & (3) & (4) & (7) \\ (1) & m_1 & n_1 & o_1 & p_1 \\ (3) & m_2 & n_2 & o_2 & p_2 \\ (4) & m_3 & n_3 & o_3 & p_3 \\ (7) & m_4 & n_4 & o_4 & p_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e5} = \begin{bmatrix} (1) & (7) & (8) & (5) \\ (1) & q_1 & r_1 & s_1 & t_1 \\ (7) & q_2 & r_2 & s_2 & t_2 \\ (8) & q_3 & r_3 & s_3 & t_3 \\ (5) & q_4 & r_4 & s_4 & t_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e6} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (8) & (4) & (7) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (8) \\ (4) \\ (7) \end{matrix} & \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & x_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & x_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 & x_3 \\ u_4 & v_4 & w_4 & x_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแฉวนอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{sys}$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{sys} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \\ (8) \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ m_4+q_2+u_4 & 0 & n_4 & a_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_2+x_4 & s_2+v_4 \\ c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_3+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_3+v_2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

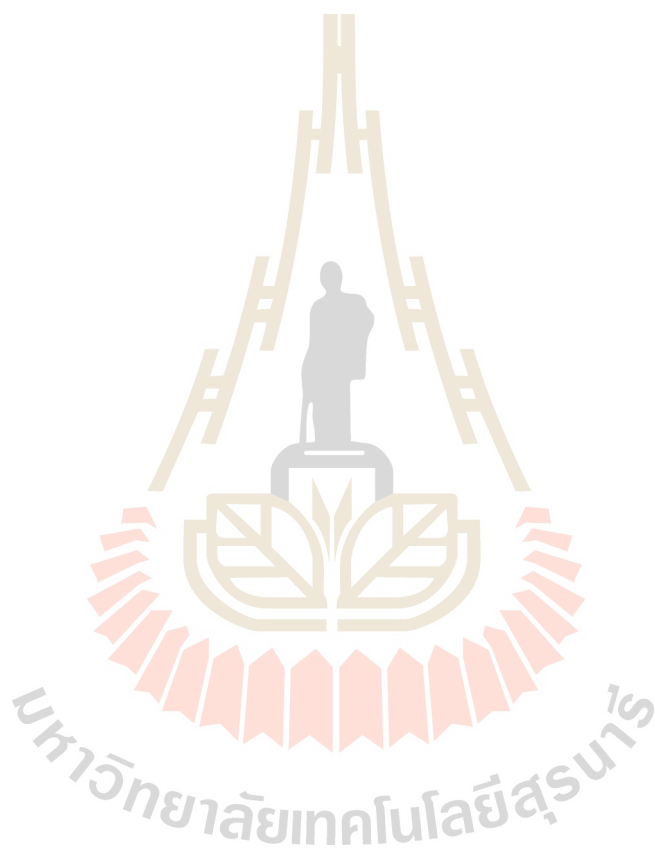
5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาทางในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โหนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.8 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส สักย่เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อพิจารณาในสถานะความไม่เป็นเชิงเส้น

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัลดังเช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหาของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระอย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่สามารถตีกริดรูปทรงสี่หน้าสำหรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำได้และระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดปริมาณของกริดบริเวณที่ไม่จำเป็นเพื่อช่วยย่นระยะเวลาในการหาผลเฉลยแต่ยังสามารถรักษาความแม่นยำของผลเฉลยได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถจำลองผลระบบที่มีความแตกต่างกันทางด้านวัสดุได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติในการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวและเมื่อพิจารณาในสถานะความไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็ก (\mathbf{B}) จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลางสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.1)$$

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

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถดำเนินการได้โดยเล็งไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ก่อน เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่า โดยที่สนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} เท่านั้น ดังสมการที่ (4.2)

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.2)$$

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่า สนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า \mathbf{E} ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4.3)

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

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

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

และจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามที่แปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อสมมติให้ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำ แสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (4.5)$$

เมื่อ \mathbf{J}_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density) และ \mathbf{J}_e คือความหนาแน่นของกระแสแวน (Eddy current density) โดยที่

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (4.6)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) จึงได้

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} \quad (4.7)$$

นำสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.7) แทนลงในสมการที่ (4.5) จะได้

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (4.8)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ \mathbf{A} พบว่า $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์คือ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กดังสมการที่ (4.9)

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (4.9)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งกระแสเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับสลิป s ของมอเตอร์ด้วย เมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบ 3 มิติตามระนาบ xy และ z ซึ่งแปรผันตามเวลา และจากคุณสมบัติของ A จะได้ว่า $\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} i + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} j + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} k$ จึงสามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (4.10) โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) อันดับสอง

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} - s\mu\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) = -\mu J_0 \quad (4.10)$$

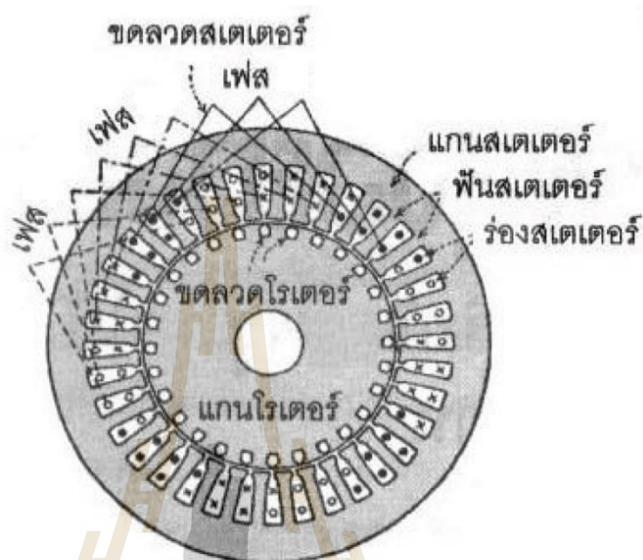
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การคำนวณสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นมีความซับซ้อน สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิติค้นหาผลเฉลยแม่นยำได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำมาใช้ในการแก้ปัญหา และจะประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการต่างๆดังต่อไปนี้

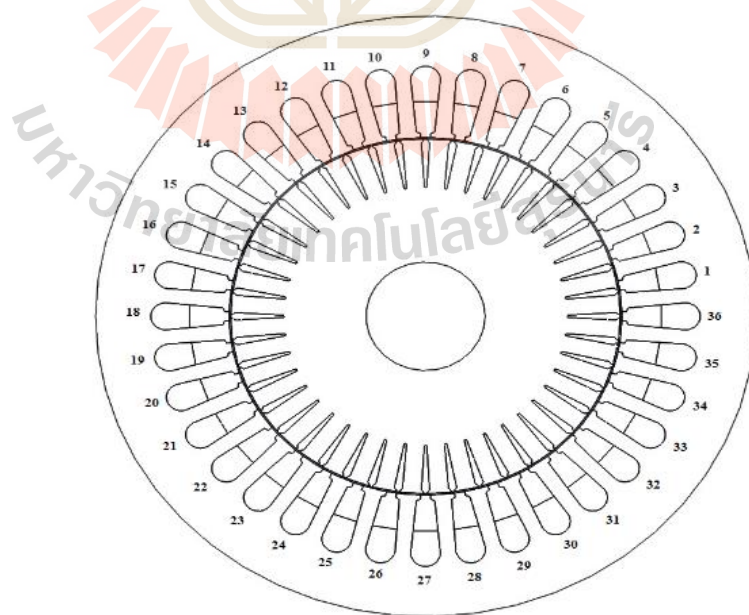
4.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

ขั้นตอนที่ 1 สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิติเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกเป็นเอลิเมนต์ อย่างเช่นรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพท์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใดๆ บนเอลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งงานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ย่อยของมอเตอร์ที่ศึกษาโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Work ซึ่งได้ผลลัพท์ออกมาเป็นเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะมีจำนวน โหนดและเอลิเมนต์ที่ใช้ภายในระบบ เป็นจำนวน 42,686 โหนด และ 135,467 เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้ได้พิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส 2 ขั้ว 3 แรงม้า ชนิดกรงกระรอกและขดลวดพันแบบ 2 ชั้น ซึ่งเป็นโมเดลที่ใช้ในการจำลองผลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1-4.2 พื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยการใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะครอบคลุมทั่วทั้งตัวมอเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการแสดงการแบ่งเอลิเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อแบบเชิง

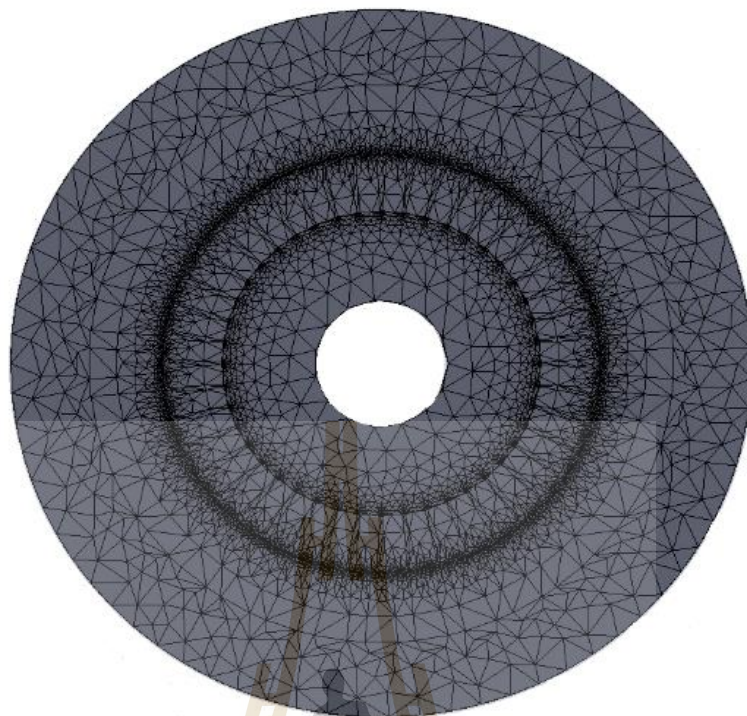
เส้น (Linear tetrahedral element) ตลอดพื้นที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ศึกษาด้วยโปรแกรม Solid Work สำหรับตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.4



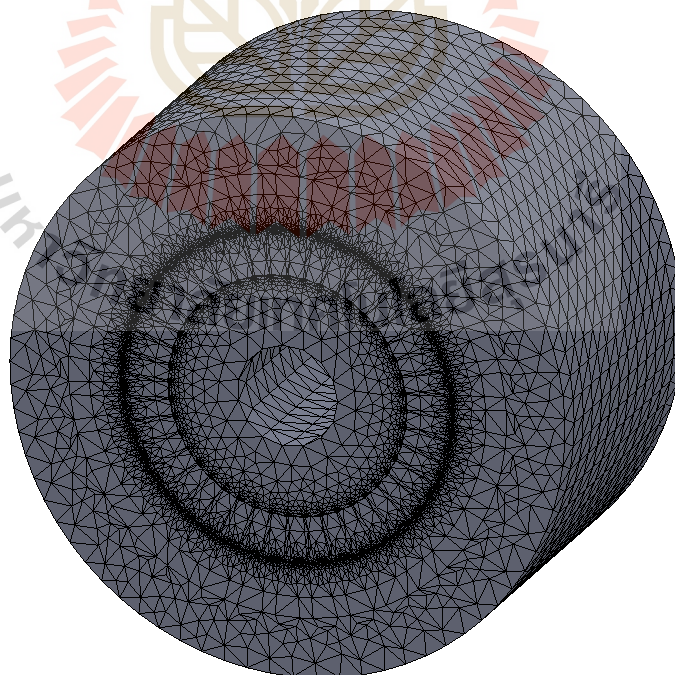
รูปที่ 4.1 รายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดสเตเตอร์ 2 ชั้น



รูปที่ 4.2 โมเดลต้นแบบของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล



รูปที่ 4.3 การแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์ออกเป็นอิลลิเมนต์



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของมอเตอร์ออกเป็นอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ขั้นตอนที่ 2 คือการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ (Element interpolation function) เมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่พิกัดใดๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.11)

$$A(x, y, z) = A_1N_1 + A_2N_2 + A_3N_3 + A_4N_4 \quad (4.11)$$

โดยที่ $N_n, n = 1, 2, 3, 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์และ $A_n, n = 1, 2, 3, 4$ คือผลลัพธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละโนด 1, 2, 3, 4 ของอิลลิเมนต์ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.12)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังสมการที่ (4.13)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (4.13)$$

และ

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3) \end{aligned}$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (4.10) ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ รูปแบบทั่วไปของสมการของอิลลิเมนต์สำหรับปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถแสดงได้ดังนี้

$$[M]\{\dot{A}\} + [K]\{A\} = \{F\} \quad (4.14)$$

โดย $\{A\}$ คือเวกเตอร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ และ $\{\dot{A}\}$ คือเวกเตอร์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สมการที่ (4.14) นี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตักซึ่งถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบันและวิธีนี้ยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกไปได้อีกเช่น วิธีของกาลอร์กิน (Galerkin) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่อย่างเช่นปัญหาในงานวิจัยนี้

การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตักมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4.10) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.15)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) - s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_0 = R \quad (4.15)$$

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหาเศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าเที่ยงตรงมากที่สุดและในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาลอร์กินและซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function: W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dv = 0 \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.16)$$

สำหรับอิลลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีจุดที่ไม่รู้จัก 4 จุดในการคำนวณ ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้จัก นั่นหมายถึงในสมการที่ (4.18) จะต้องมามีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.15) ลงในสมการที่ (4.16) จึงได้

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) - s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_0 \right) dv = 0 \quad (4.17)$$

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right) dv - \int_V N_n s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) dv + \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dv = 0 \quad (4.18)$$

พิจารณาการอินทิเกรตทีละพจน์ของสมการที่ (4.18) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V u (\nabla \cdot \mathbf{V}) dv = \int_{\Gamma} u (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma - \int_V (\nabla u \cdot \mathbf{V}) dv \quad (4.19)$$

ซึ่ง Γ คือขอบเขตของอิลลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.19) และพจน์แรกของสมการที่ (4.18) จะได้

$$u = N_n$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right)$$

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

$$\mathbf{v} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \mathbf{k}$$

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ Γ

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

ดังนั้น

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z$$

$$u(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) = N_n \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z \right)$$

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

$$\nabla u \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.18) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z \right) d\Gamma - \int_v \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dv - \int_v N_n s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) dv + \int_v N_n \mathbf{J}_0 dv = 0 \quad (4.20)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4.20) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ Γ ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพคือปริมาณกระแสตลอดขอบนอกของอิลลิเมนต์นั้นๆ หนึ่ง อิลลิเมนต์นั้นๆ อาจวางตัวอยู่ในหรืออยู่ติดขอบนอกของพื้นที่ศึกษา หากอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ตรงตำแหน่งขอบนอกของพื้นที่ศึกษา เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อเป็นเงื่อนไขตรงขอบนอกของพื้นที่ศึกษา เงื่อนไขนี้เป็นการกำหนดค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของตัวแปรตามที่ขอบเขตนั้น ซึ่งในปัญหาของงานวิจัยนี้ มีเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังสมการที่ (4.21) นั่นคือศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} มีค่าคงที่ตลอดตามขอบของปริมาตรศึกษา หรือหมายถึงไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณขอบนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขอบเท่ากับศูนย์) และหากอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่วางตัวอยู่ในปริมาตรศึกษาโดยมีอิลลิเมนต์อื่นๆ ล้อมรอบ ค่าปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจุดต่อภายในจุดต่อหนึ่งของอิลลิเมนต์นี้ต้องอยู่ในสภาวะสมดุลกับปริมาณกระแสจากอิลลิเมนต์ที่อยู่ล้อมรอบ ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลเข้าและออกจุดต่อจึงต้องหักล้างกันหมดเท่ากับศูนย์เพื่อก่อให้เกิดสภาวะการไหลของกระแสที่สมดุล ดังนั้นจึงได้สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.22) และเนื่องจากสมการที่ (4.22) มีทั้งหมด 3 สมการ เราสามารถเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์นี้ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.23)

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = 0 \quad (4.21)$$

$$\int_v \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dv + \int_v N_n s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) dv = \int_v N_n \mathbf{J}_0 dv \quad (4.22)$$

$$\int_v \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dv + \int_v [N]_{4 \times 1} s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) dv = \int_v [N]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0 dv \quad (4.23)$$

และจากสมการที่ (4.11) จึงได้ลักษณะการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} โดยประมาณในแต่้อลติเมนต์เป็น

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

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\partial A}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial A}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial A}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์ออลติเมนต์จึงกลายมาเป็น

$$\int_v \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dv [A]_{4 \times 1} + \int_v [N]_{4 \times 1} s \sigma [N]_{1 \times 4} dv [A]_{4 \times 1} = \int_v [N]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0 dv \quad (4.24)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์ออลติเมนต์สำหรับแต่ละออลติเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการได้ดังนี้

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

โดย $[M]_{4 \times 4}$ = เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า
 $[K]_{4 \times 4}$ = เมทริกซ์ความขบขึมได้ของแม่เหล็ก
 $\{F\}_{4 \times 1}$ = โหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง

เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า: $[M]_{4 \times 4}$

$$\text{จาก} \quad [M]_{4 \times 4} = \int_v [N]_{4 \times 1} s \sigma [N]_{1 \times 4} dv \quad (4.26)$$

จากสมการที่ (4.12) ฟังก์ชันการประมาณภายในแสดงได้ดังนี้

$$N_n = \frac{1}{6V}(a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.27)$$

จากสมการที่ (4.27) และหากค่าสภาพนำทางไฟฟ้า σ มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (4.26) จึงกลายเป็น

$$[M]_{4 \times 4} = \sigma \int_v [N]_{4 \times 1} [N]_{1 \times 4} dv \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.28)$$

สมการที่ (4.28) นี้สามารถคำนวณได้ง่ายโดยใช้สูตรการอินทิเกรตรอบปริมาตรขอบเขตทั้งหมดของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.29)

$$\int_v N_1^a N_2^b N_3^c N_4^d dv = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (4.29)$$

สมการที่ (4.28) สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ $N_n = N_m$ และ $N_n \neq N_m$ ในกรณีที่ $N_n = N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้า จึงได้ $a=2, b=c=d=0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.29) จะได้

$$\int_v N_1^2 dv = \frac{2!0!0!0!}{(2+0+0+0+3)!} 6V = \frac{2V}{20}$$

ในกรณีที่ $N_n \neq N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 และ 2 จึงได้ $a=b=1, c=d=0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.29) จะได้

$$\int_v N_1^1 N_2^1 dv = \frac{1!1!0!0!}{(1+1+0+0+3)!} 6V = \frac{V}{20}$$

ที่จุดต่ออื่นๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาในลักษณะนี้เช่นกัน ดังนั้นจากสมการที่ (4.29) จึงได้เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.30) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ จะมีค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิลลิเมนต์

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{s\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

เมทริกซ์ความขบขี้มได้ของแม่เหล็ก: $[K]_{4 \times 4}$

$$[K]_{4 \times 4} = \int_v \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dv \quad (4.31)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายใน ในสมการที่ (4.27) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.32)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.32) ลงในสมการที่ (4.31) จะได้

$$\begin{aligned} [K]_{4 \times 4} &= \frac{1}{\mu} \int \left(\frac{b_n}{6V} \frac{b_m}{6V} + \frac{c_n}{6V} \frac{c_m}{6V} + \frac{d_n}{6V} \frac{d_m}{6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \\ &= \frac{1}{36\mu V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz \\ &= \frac{1}{36\mu V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Sym

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

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{\nu}{36V} \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{ik} & S_{il} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jk} & S_{jl} \\ S_{ki} & S_{kj} & S_{kk} & S_{kl} \\ S_{li} & S_{lj} & S_{lk} & S_{ll} \end{bmatrix}$$

โพลเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง: $\{F\}_{4 \times 1}$

$$\text{จาก } \{F\}_{3 \times 1} = \int_v [N]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0 dv \quad (4.35)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4.27) ดังนั้นสมการที่ (4.36) จึงกลายเป็น

$$\{F\}_{4 \times 1} = \mathbf{J}_0 \int_v N_n dv \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.36)$$

สมการที่ (4.36) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังสมการที่ (4.27) โดยยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้า จึงได้ $a = 1, b = c = d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.29) จะได้

$$\int_v N_1^1 dv = \frac{1!0!0!0!}{(1+0+0+0+3)!} 6V = \frac{V}{4}$$

ซึ่งจุดต่อที่เหลือของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4.36) จึงได้โพลเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเองแสดงได้ดังนี้

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

ซึ่งการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก \mathbf{J}_0 ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในแต่ละเฟสจะแสดงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว

ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาแบบสถานะชั่วคราว (Transient problem) โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากเวกเตอร์ $\{F\}_{4 \times 1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นกระแสสลับ ซึ่งการแก้สมการที่ (4.25) จะต้องอาศัยวิธีการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวที่เรียกว่าความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence relations)

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวจะใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (4.38) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (Time step) โดยถ้าเลือกใช้ $\beta=0$ จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า $\beta=1/2$ เป็นวิธีของแครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า $\beta=2/3$ เป็นวิธีของกาลเลอร์คิน (Galerkin) และถ้า $\beta=1$ จะเรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (Backward difference) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังดังสมการที่ (4.39) เนื่องจากวิธีนี้ประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$\beta \{\dot{A}\}^{t+\Delta t} + (1-\beta)\{\dot{A}\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4.38)$$

$$\{\dot{A}\}^{t+\Delta t} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4.39)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง สมการที่ (4.25) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (4.40) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (4.39) ลงในสมการที่ (4.40) จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนต์อีลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (4.41)

$$[M]\{\dot{A}\}^{t+\Delta t} + [K]\{A\}^{t+\Delta t} = \{F\}^{t+\Delta t} \quad (4.40)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[M] + [K]\right)\{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}[M]\{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (4.41)$$

4.3.5 การแก้ปัญหามatrixไม่เป็นเชิงเส้น

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของแม่เหล็ก ดังนั้นการแก้ปัญหามatrixไม่เป็นเชิงเส้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งวิธีการทำซ้ำที่นิยมใช้กันมากคือวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) และเนื่องจากเป็นวิธีที่เริ่มจากค่าเริ่มต้นเพียงค่าเดียวและนำไปสู่ผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแทนค่าอิเลเมนต์เมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$, $[K]_{4 \times 4}$ และเวกเตอร์ $\{F\}_{4 \times 1}$ ลงในสมการที่ (4.41) จึงได้

$$\begin{bmatrix} \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ii}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ij}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ik}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{il}}{36V} \\ \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ji}}{36V} & \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{jj}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{jk}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{jl}}{36V} \\ \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ki}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{kj}}{36V} & \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{kk}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{kl}}{36V} \\ \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{li}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{lj}}{36V} & \frac{s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{lk}}{36V} & \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{vS_{ll}}{36V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^{t+\Delta t} \\ A_j^{t+\Delta t} \\ A_k^{t+\Delta t} \\ A_l^{t+\Delta t} \end{bmatrix} - \frac{s\sigma V}{20\Delta t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^t \\ A_j^t \\ A_k^t \\ A_l^t \end{bmatrix} - \frac{J_0^{t+\Delta t}}{4} \begin{bmatrix} J_0^{t+\Delta t} \\ J_0^{t+\Delta t} \\ J_0^{t+\Delta t} \\ J_0^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.42)$$

ให้ G แทนแถวแรกของพจน์ต่างๆ ที่ปรากฏทางฝั่งซ้ายของสมการที่ (4.42) ซึ่งเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (4.43) จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยการหาอนุพันธ์ของ G เทียบกับแต่ละจุดต่อของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A_i, A_j, A_k และ A_l ดังสมการที่ (4.44), (4.45), (4.46) และ (4.47)

ตามลำดับ โดยอาศัยกฎลูกโซ่ (Chain rule) $\frac{\partial v}{\partial A} = \frac{\partial v}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial A}$

$$G = \frac{s\sigma V}{20\Delta t} (2A_i^{t+\Delta t} + A_j^{t+\Delta t} + A_k^{t+\Delta t} + A_l^{t+\Delta t}) + \frac{v^{t+\Delta t}}{36V} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{jj}A_j^{t+\Delta t} + S_{kk}A_k^{t+\Delta t} + S_{ll}A_l^{t+\Delta t}) - \frac{s\sigma V}{20\Delta t} (2A_i^t + A_j^t + A_k^t + A_l^t) - \frac{J_0^{t+\Delta t}V}{4} \quad (4.43)$$

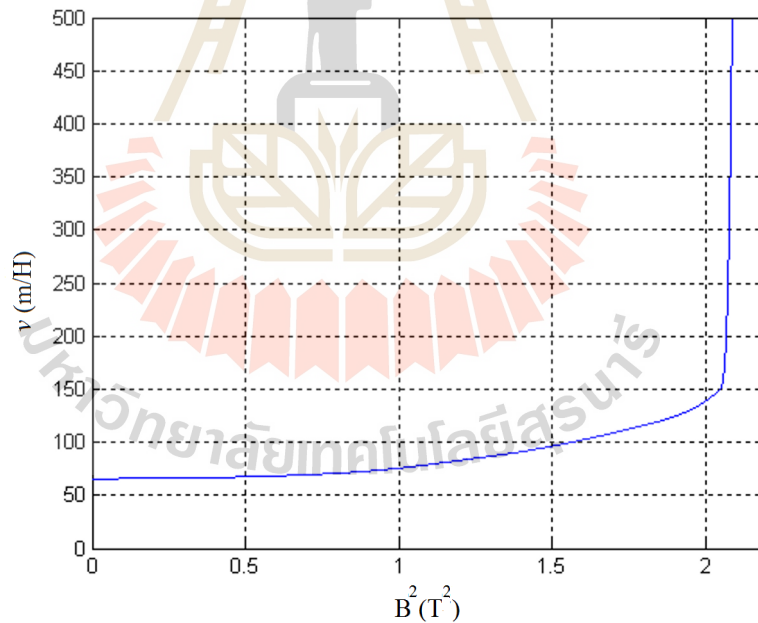
$$\frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} = \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{36V} S_{ii} + \frac{1}{36V} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{jj}A_j^{t+\Delta t} + S_{kk}A_k^{t+\Delta t} + S_{ll}A_l^{t+\Delta t}) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_i} \right)^{t+\Delta t} \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} = \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{36V} S_{ij} + \frac{1}{36V} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{ij}A_j^{t+\Delta t} + S_{ik}A_k^{t+\Delta t} + S_{il}A_l^{t+\Delta t}) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_j} \right)^{t+\Delta t} \quad (4.45)$$

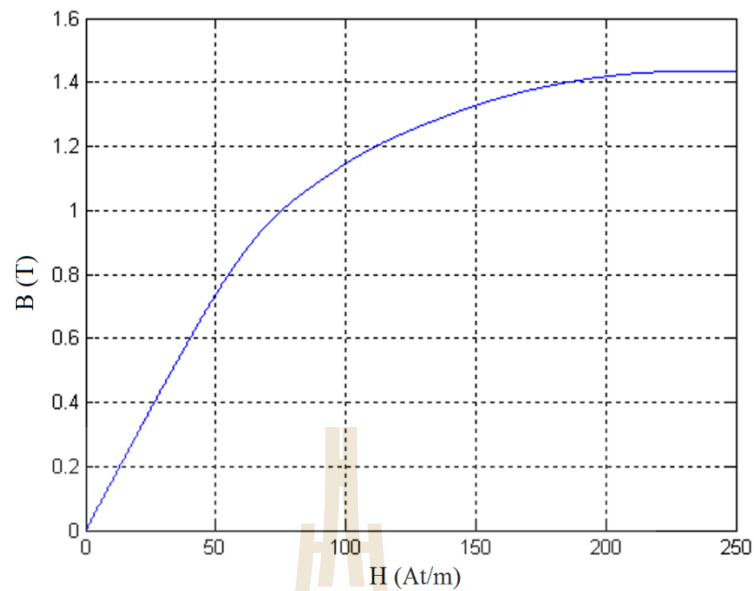
$$\frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} = \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{36V} S_{ik} + \frac{1}{36V} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{ij}A_j^{t+\Delta t} + S_{ik}A_k^{t+\Delta t} + S_{il}A_l^{t+\Delta t}) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_k} \right)^{t+\Delta t} \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A_l^{t+\Delta t}} = \frac{2s\sigma V}{20\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{36V} S_{il} + \frac{1}{36V} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{ij}A_j^{t+\Delta t} + S_{ik}A_k^{t+\Delta t} + S_{il}A_l^{t+\Delta t}) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_l} \right)^{t+\Delta t} \quad (4.47)$$

ค่าของ $\frac{\partial v}{\partial B^2}$ หาได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $v - B^2$ ซึ่งแปลงมาจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $B - H$ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งการประมาณค่าของข้อมูลในช่วงนี้ จะใช้วิธีการประมาณค่าของเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic spline interpolation)



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งลักษณะของ $v - B^2$



รูปที่ 4.6 เส้นโค้งคุณลักษณะของ $B-H$

พจน์ $\frac{\partial B^2}{\partial A}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$B^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2$$

$$= \frac{(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k + A_l b_l)^2 + (A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k + A_l c_l)^2 + (A_i d_i + A_j d_j + A_k d_k + A_l d_l)^2}{36V^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_i} = \frac{2b_i(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k + A_l b_l) + 2c_i(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k + A_l c_l) + 2d_i(A_i d_i + A_j d_j + A_k d_k + A_l d_l)}{36V^2}$$

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_j} = \frac{2b_j(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k + A_l b_l) + 2c_j(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k + A_l c_l) + 2d_j(A_i d_i + A_j d_j + A_k d_k + A_l d_l)}{36V^2}$$

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_k} = \frac{2b_k(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k + A_l b_l) + 2c_k(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k + A_l c_l) + 2d_k(A_i d_i + A_j d_j + A_k d_k + A_l d_l)}{36V^2}$$

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_i} = \frac{2b_i(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k + A_l b_l) + 2c_i(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k + A_l c_l) + 2d_i(A_i d_i + A_j d_j + A_k d_k + A_l d_l)}{36W^2}$$

จากการประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ของวิธีนิวตัน-ราฟสัน จึงได้แถวแรก
ของสมการอิลลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (4.48)

$$G = -\frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} \Delta A_i^{t+\Delta t} - \frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} \Delta A_j^{t+\Delta t} - \frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \Delta A_k^{t+\Delta t} - \frac{\partial G}{\partial A_l^{t+\Delta t}} \Delta A_l^{t+\Delta t} \quad (4.48)$$

โดยที่ $\Delta A^{t+\Delta t} = A_{m+1}^{t+\Delta t} - A_m^{t+\Delta t}$ ซึ่ง m คือจำนวนรอบการทำซ้ำของวิธีนิวตัน-ราฟสัน จึงได้
ผลลัพธ์ของสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาแบบไม่เชิงเส้นใน
สถานะชั่วคราว แสดงได้ดังสมการที่ (4.49)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_l^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial H}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_k^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_l^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial I}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_k^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_l^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial J}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial J}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial J}{\partial A_k^{t+\Delta t}} & \frac{\partial J}{\partial A_l^{t+\Delta t}} \end{bmatrix}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} \Delta A_i^{t+\Delta t} \\ \Delta A_j^{t+\Delta t} \\ \Delta A_k^{t+\Delta t} \\ \Delta A_l^{t+\Delta t} \end{bmatrix}_{4 \times 1} = - \begin{bmatrix} G \\ H \\ I \\ J \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (4.49)$$

หรือเขียนสมการที่ (4.49) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (4.50) โดยที่ $[J]$ คือจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian
matrix)

$$[J]_{4 \times 4} [\Delta A]_{4 \times 1} = [f]_{4 \times 1} \quad (4.50)$$

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็น
สมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนที่ 1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์
ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ ก็จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมที่ประกอบด้วยเมตริกซ์ขนาด $n \times n$

ขั้นตอนที่ 5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาในสมการรวมของระบบ (Constraints) พร้อมทั้งหาค่าผลเฉลย ในการหาค่าผลเฉลยเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้แก่มอเตอร์ในแต่ละรอบที่มอเตอร์หมุนไปและเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่างๆ โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาการหมุนของมอเตอร์คือ A เมื่อเวลาเริ่มต้นให้มีค่าเป็นศูนย์และจะกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า A เป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าปริมาณอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปโดยผลเฉลยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการดำเนินการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับงานวิจัยนี้เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($B = \nabla \times A$)

4.3.6 คำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($B = \nabla \times A$) ดังนั้นเมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 3 มิติ ตามระนาบพิกัด xyz โดยป้อนความหนาแน่นของกระแสภายนอก J_0 ในแนวแกน Z จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.51) และ (4.52) ตามลำดับ

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (4.51)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V} \right) \quad (4.52)$$

การแปลงระบบพิกัดจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกเพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (Radial flux density, B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (Tangential flux density, B_t) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ในแต่ละจุดที่พิจารณาที่มีมุม ϕ เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.53) และ (4.54) ตามลำดับ

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (4.53)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (4.54)$$

เมื่อคำนวณหาค่า B_r และ B_t แล้วจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อคุณลักษณะต่างๆของในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (4.55)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (4.56)$$

ซึ่งในสมการที่ (4.55) และ (4.56) F_r และ F_t คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวสัมผัสตามลำดับ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแนวรัศมี ดังนั้นการพิจารณาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ จึงพิจารณาเฉพาะในแนวรัศมีเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาการเกิดแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุนแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะเป็นแรงหลักที่ต้องนำมาพิจารณา

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อพิจารณามอเตอร์ในสถานะชั่วคราวและมีความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองการประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์คิน รายละเอียดต่างๆในบทนี้จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลที่จะนำไปสู่การออกแบบมอเตอร์ที่ให้คุณลักษณะที่ดีต่อไป

บทที่ 5

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองผลในบทที่ 5 นี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากเดิมที่เป็น 3 เฟสและออกแบบใหม่ให้สามารถทำงานได้เป็นแบบ 6 เฟสเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะต่างๆที่ดีขึ้น เช่น ลดค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในบทที่ 5 นี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นผลเฉลยโดยละเอียดของปัญหา โดยโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB ที่พัฒนาขึ้น

5.2 แนวทางการจำลองผลสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ดังนั้นสำหรับบทที่ 5 จึงเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กในบทนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นเองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาในสถานะชั่วคราวและความไม่เป็นเชิงเส้น โปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานของ MATLAB โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ จะใช้กริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจากการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work

5.3 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและความไม่เป็นเชิงเส้นก่อนข้างคำนวณได้ยากและเนื่องด้วยจากกริดที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม Solid Work เพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิทธิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีจำนวนมาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมการคำนวณสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.1

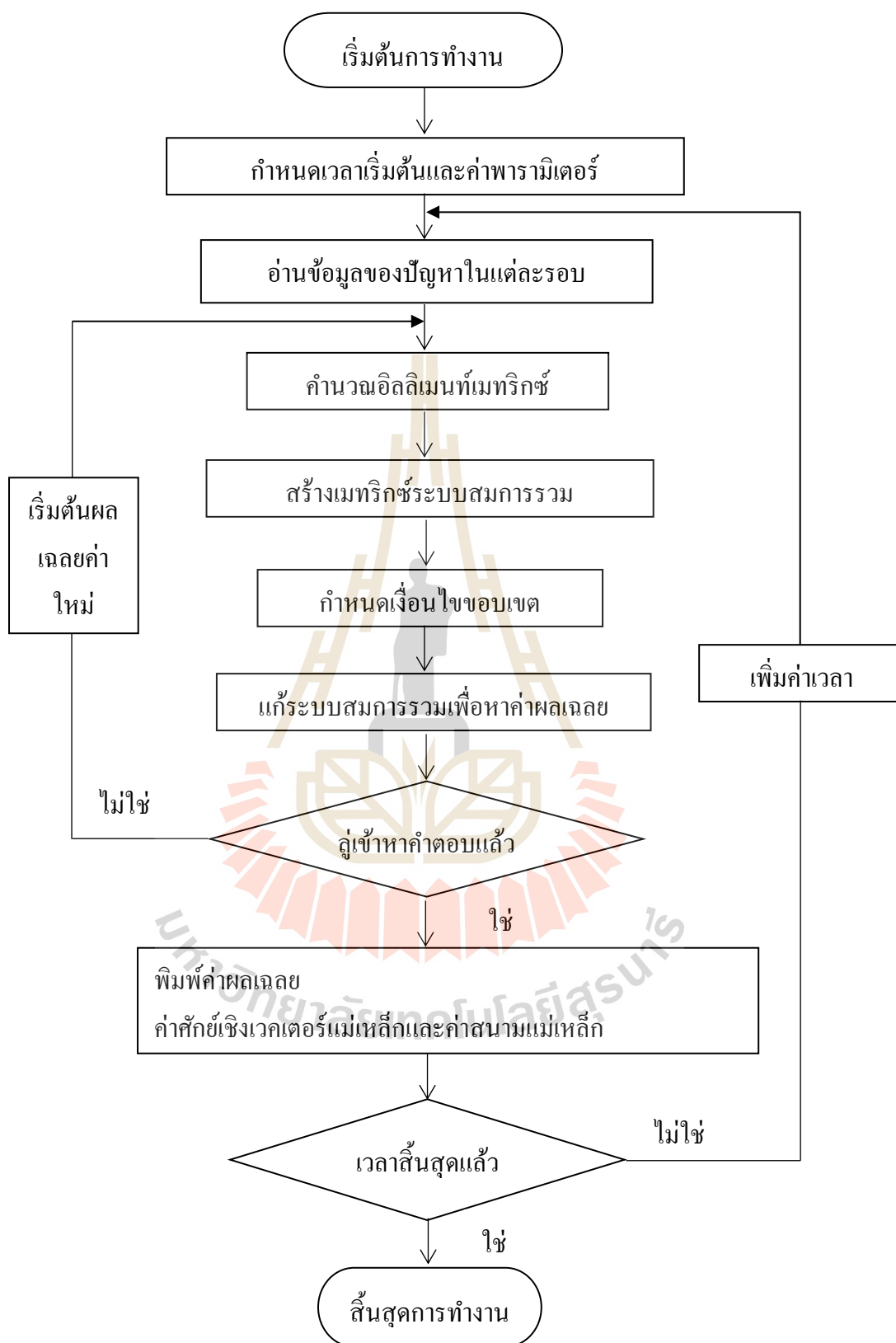
จากแผนภูมิในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่างๆเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์: โปรแกรมเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่างๆในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ: จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิทธิเมนต์และจุดต่อจากเอาต์พุตไฟลท์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solid Work ที่ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อหมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิทธิเมนต์จำนวนและหมายเลขของอิทธิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิทธิเมนต์เมทริกซ์: ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณอิทธิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของทุกๆอิทธิเมนต์ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.41) จากบทที่ 4 หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (5.1) โดยที่ $\{A\}_{4 \times 1}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{4 \times 4} + [K]_{4 \times 4} \right) \{A\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1}^t + \{F\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม: โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (5.2) โดยมีหลักการคือหาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้องดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.6 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย n จุดต่อจึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M]_{n \times n} + [K]_{n \times n} \right) \{A\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]_{n \times n} \{A\}_{n \times 1}^t + \{F\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (5.2)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต: โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือตัดแปลงระบบสมการรวม ตามสมการที่ (5.2) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า $A = 0$

ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการดังสมการที่ (5.2) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม ถ้าหากยังไม่รู้เข้าคำตอบ โปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 3 เพื่อวนรอบคำนวณใหม่และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 6 ดังเดิม จนรู้เข้าคำตอบก็จะเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย: จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว: ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุด โปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณ

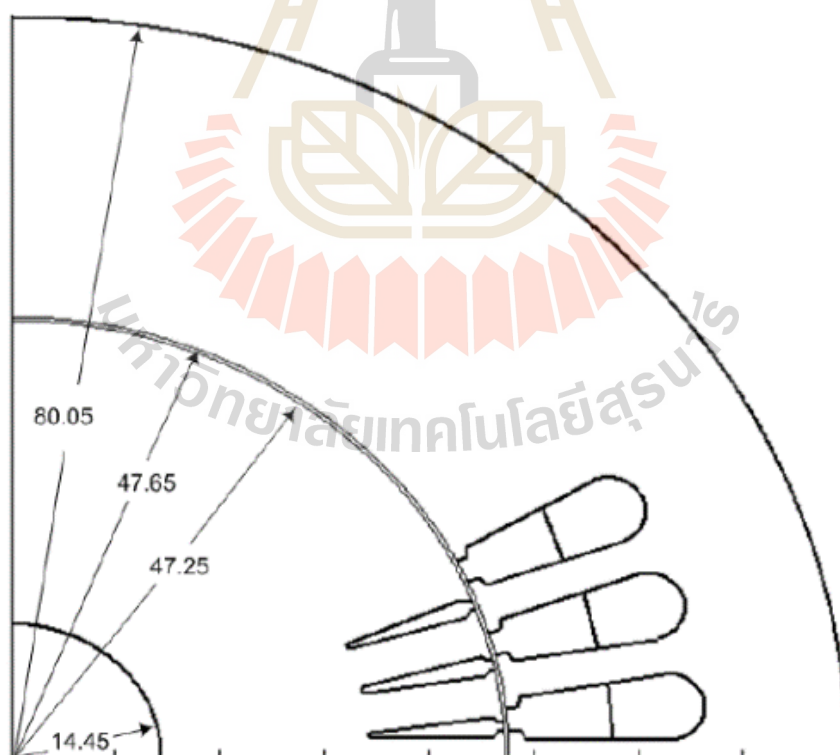
ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาค่าปริมาณอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปเป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไป งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของโนดและอิลลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังนี้

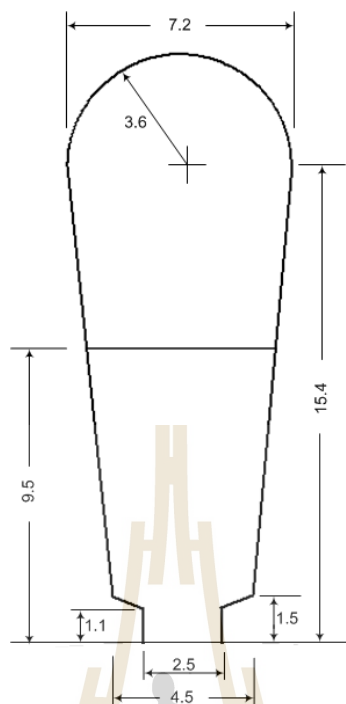
5.4 โปรแกรมการสร้างกริด

โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหา 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ประโยชน์ของโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้สำหรับเพียงเพื่อสร้างกริดเท่านั้น โดยโปรแกรม Solid Work นี้สามารถสร้างกริดในพิกัด 3 มิติ สำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Solid Work ที่จำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติได้แก่ ข้อมูลบอกระยะพิกัดในแนวแกน x y และ z ข้อมูลบอกหมายเลข โหนด ข้อมูลบอกหมายเลขเอลิเมนต์ ข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ และข้อมูลบอกหมายเลขของขอบเขตชิ้นงานเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ อันได้แก่ การสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตและการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

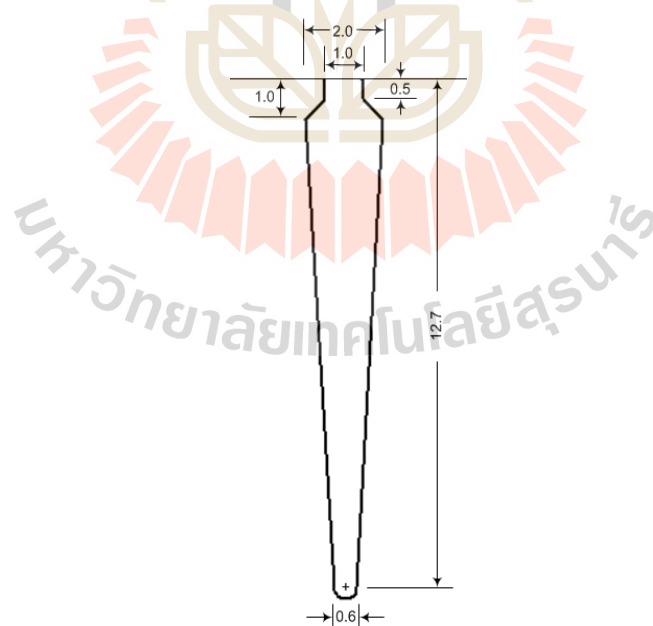
รายละเอียดและพิกัดต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ใช้ในการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 5.2-5.4 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ขนาดระยะของชิ้นงานมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล (mm)



รูปที่ 5.3 รายละเอียดของร่องสแตเตอร์ (mm)



รูปที่ 5.4 รายละเอียดของร่องโรเตอร์ (mm)

ลักษณะการพันของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 6 เฟส (A, B, C, D, E และ F) แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการพันขดลวดแบบสองชั้น มีระยะพิชช์เต็ม (Full pitch) 18/18 ร่อง กระแสในแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันอยู่ในแต่ละร่องของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งจ่าย และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทราบกระแส I ในแต่ละเฟสจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก J_0 ที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ได้ตั้งสมการที่ (5.3) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$J_0 = \frac{I}{a} \quad (5.3)$$

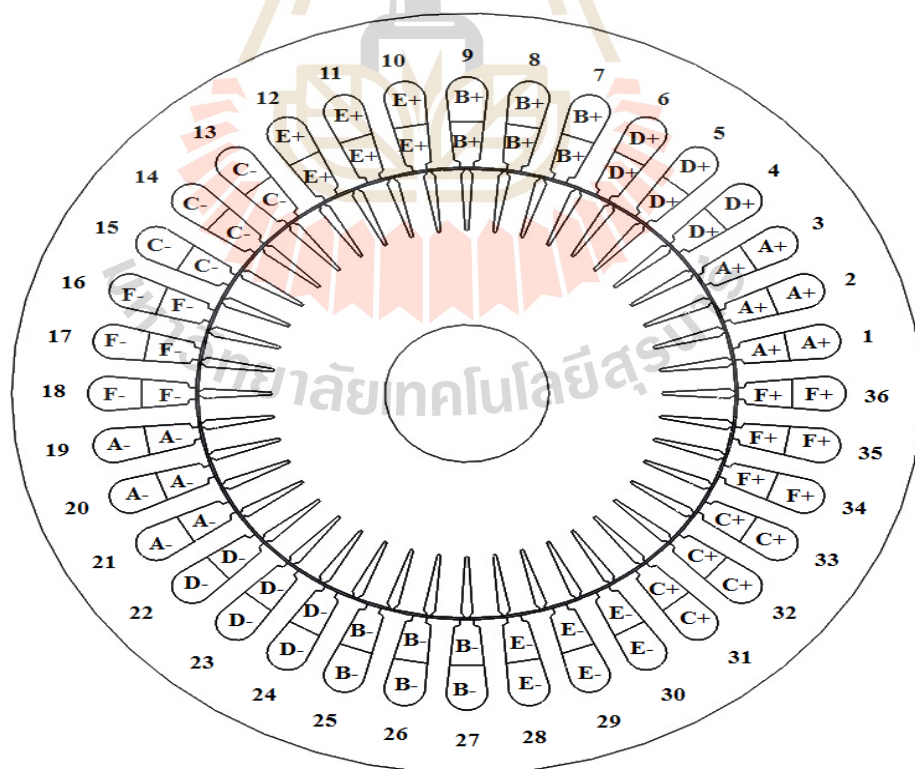
โดยที่ a คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm^2) ปกติแล้วการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก J_0 จะมีตัวแปร n ที่เป็นจำนวนรอบการพันของขดลวดมาเกี่ยวข้อง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Solid Work ในการวาดรูปชิ้นงานซึ่งใช้ความหนาของรูปเป็นตัวแทนขดลวดที่พัน เพราะฉะนั้นค่าตัวแปร a ในสมการที่ 5.1 จะเป็นพื้นที่หน้าตัดของร่องสเตเตอร์ที่มีขดลวดพันอยู่โดยระยะขนาดของพื้นที่หน้าตัดของร่องสเตเตอร์สามารถสังเกตได้ดังรูปที่ 5.3 ที่กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับการป้อนค่า J_0 ในแกน z ของมอเตอร์ให้แก่โปรแกรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของกระแสด้วย ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง กรณีที่พิจารณามอเตอร์ภาคตัด (ระนาบ xy) J_0 จะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาด ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้กระแสที่มีเครื่องหมายบวกมีทิศทางวิ่งเข้ากระดาด และกระแสที่มีเครื่องหมายลบมีทิศทางวิ่งออกกระดาด โดยในแต่ละจังหวะที่มอเตอร์หมุนจะมีทั้งกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออก

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสขนาด 3 แรงม้า

Parameter	Value
กำลังขาออก	3 HP
แรงดันแหล่งจ่าย	380 V (Star)
จำนวนขั้ว	2 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz
ความเร็วพิกัด	2890 rpm

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสขนาด 3 แรงม้า (ต่อ)

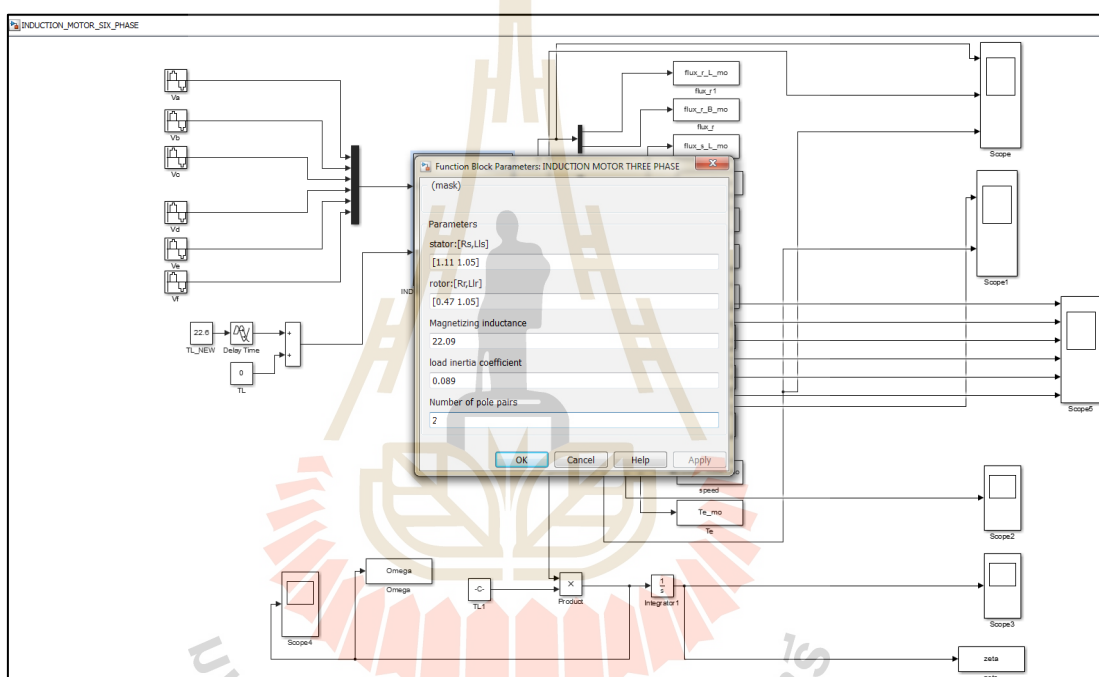
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	1.11 Ω/ϕ
ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์	0.47 Ω/ϕ
รีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์	1.05 Ω/ϕ
รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์	1.05 Ω/ϕ
รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	22.09 Ω/ϕ
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.089 Kg.m^2
ชนิดการพันของขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนความร่อนของสเตเตอร์	36 ร่อน
จำนวนร่อนของโรเตอร์	44 ร่อน
ความกว้างช่องอากาศ	0.4 mm
ระยะพิตช์	18/18 ร่อน
สภาพการนำไฟฟ้าของแท่งตัวนำโรเตอร์	$4.9 \times 10^7 \Omega^{-1}/\text{m}$



รูปที่ 5.5 โมเดลรายละเอียดเฟสและกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ใช้ในการจำลองผล

5.5 การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การคำนวณกระแสที่จะต้องป้อนลงในแต่ละช่วงจังหวะการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสสำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีคำนวณจากชุดแบบจำลองของ Simulink ในโปรแกรม MATLAB โดยในการคำนวณต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส เพื่อคำนวณหาค่ากระแสเฟส ความเร็วรอบของมอเตอร์และมุมที่มอเตอร์หมุนไปในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสถานะคงตัว สามารถแสดงระบบที่ใช้ในการคำนวณของ Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

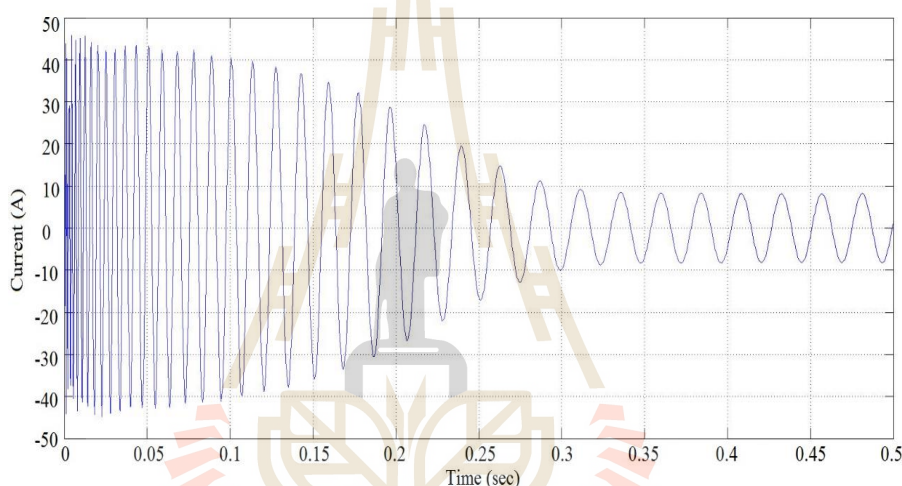


รูปที่ 5.6 ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสใน Simulink

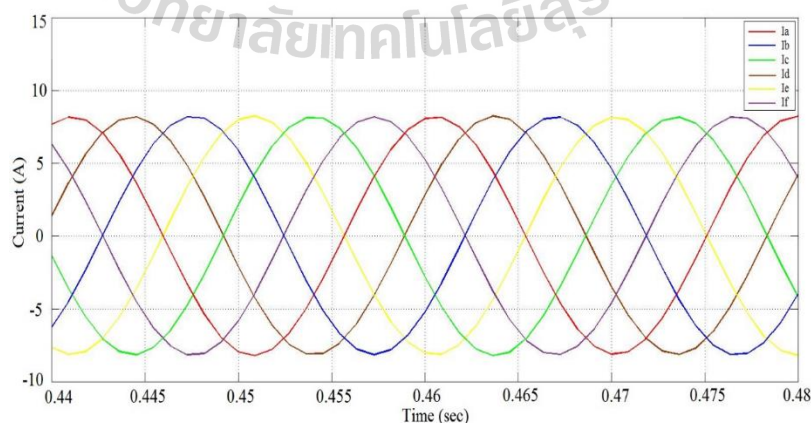
จากภาพระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสใน Simulink นั้นได้ป้อนค่าพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าทั้ง 6 เฟสและค่าพารามิเตอร์ค่าทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยผลลัพธ์ที่ได้ออกมา นั้น จะได้ค่ากระแสทั้ง 6 เฟส ความเร็วรอบของมอเตอร์ มุมที่มอเตอร์หมุนไปและแรงบิดของมอเตอร์ ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสถานะคงตัว โดยค่าผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำไปสู่การคำนวณต่างๆ เพื่อที่จะให้ระบบไฟในทอิลลิเมนต์ที่ได้เข้าใจถึงการหมุนของมอเตอร์ หลังจากนั้นจะสามารถกำหนดค่ากระแสที่จะป้อนลงในแต่ละช่วงจังหวะมุมในแต่ละการหมุนของโรเตอร์ได้อย่างถูกต้องได้

5.6 การคำนวณกระแสและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้คำนวณด้วยชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Simulink ดังกล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น เมื่อป้อนรูปคลื่นแรงดัน 6 เฟสที่มีลักษณะการจัดวางขดลวดแบบสมมาตรที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ซึ่งการจัดวางขดลวดแบบสมมาตรจะวางขดลวดชุดที่สองห่างจากขดลวดชุดที่หนึ่ง 60° ทางไฟฟ้า เมื่อป้อนรูปคลื่นแรงดัน 6 เฟสดังกล่าวประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 5.1 จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระแสที่ใช้ในการคำนวณหาค่า J_0 ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น



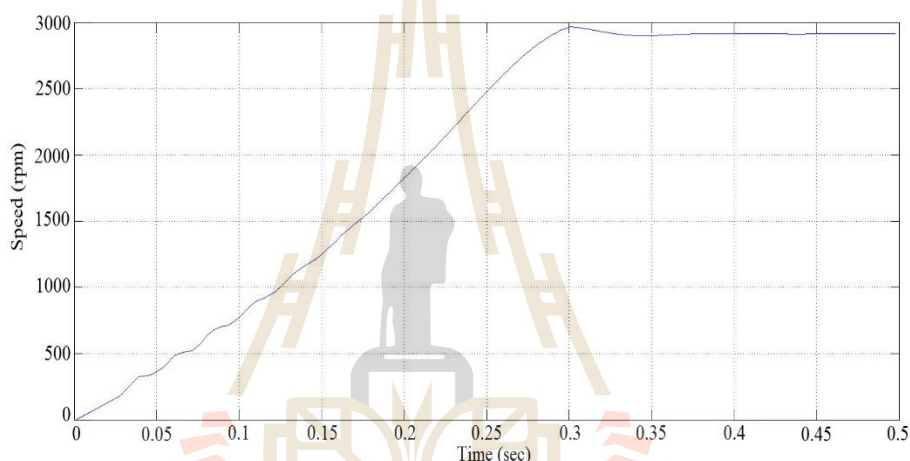
รูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้า 6 เฟส (แสดงเพียงเฟสเดียว)



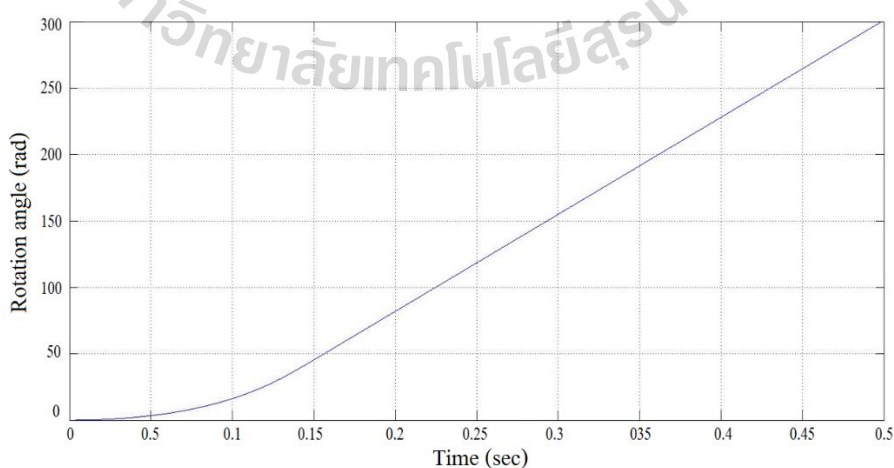
รูปที่ 5.8 กระแสไฟฟ้าทั้ง 6 เฟสในช่วงเวลาสถานะคงตัว

จากภาพที่ 5.7-5.8 เป็นภาพแสดงถึงค่ากระแสของระบบไฟฟ้า 6 เฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ซึ่งในระบบที่ได้ออกแบบจะเริ่มคำนวณกระแสตั้งแต่เวลาเริ่มต้น โดยตั้งแต่เวลาเริ่มต้นพบว่าค่ากระแสในช่วงเริ่มต้นที่วินาทีที่ 0 จนถึงช่วงก่อนที่จะเข้าสู่สถานะคงตัวในวินาทีที่ 0.3 จะมีค่ากระแสที่สูงซึ่งเป็นค่ากระแสในการสตาร์ทมอเตอร์และค่าจะไม่คงที่ จนถึงเมื่อช่วงสถานะคงตัวค่ากระแสจะลดลงและจะคงที่ในค่าๆหนึ่ง

ชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Simulink ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนอกจากค่ากระแสไฟฟ้าทั้ง 6 เฟสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้วยังมีความเร็วรอบของมอเตอร์ (N_r) และมุมที่มอเตอร์หมุน (θ) เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ

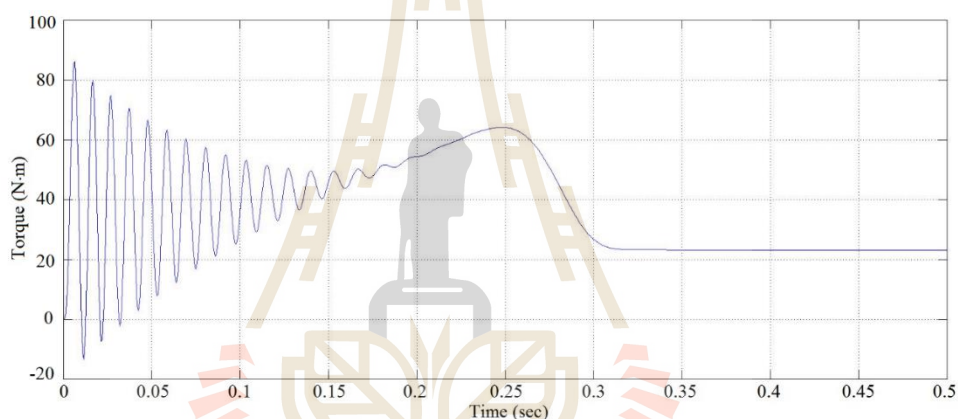


รูปที่ 5.9 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส



รูปที่ 5.10 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

รูปที่ 5.9 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของระบบ 6 เฟส เนื่องจากระบบ 6 เฟสนี้เป็นระบบที่ออกแบบมาจากระบบ 3 เฟส และได้พบว่าค่ากระแสเฟสของระบบ 6 เฟสจะมีค่าน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งถ้าเทียบกับระบบ 3 เฟสดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก แล้วพบว่าความเร็วรอบในการทำงานจะสูงกว่าระบบ 3 เฟสดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก เช่นกัน โดยเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาเท่ากันและจากรูปที่ 5.10 ค่าความเร็วรอบจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ในช่วงเวลาประมาณ 0.3 วินาที ด้วยค่าความเร็วรอบประมาณ 2,890 rpm หรือคำนวณเป็นอัตราเร็วเชิงมุมได้จาก $\omega_r = N(2\pi)/60$ ซึ่งจะมีค่าอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับ 302.64 rad/sec จะเห็นได้ว่ามีค่าความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ซึ่งมีความเร็วพิกัดเท่ากับ 2,890 rpm



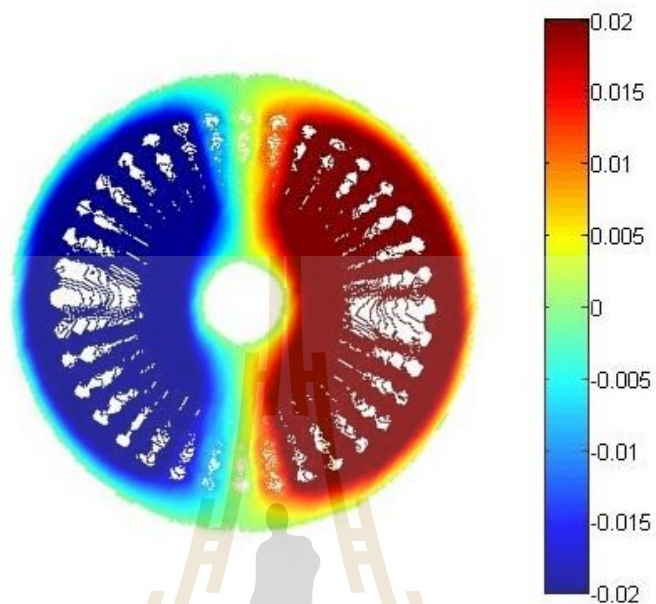
รูปที่ 5.11 แรงบิดของมอเตอร์จากการคำนวณผ่าน Simulink

ส่วนรูปที่ 5.11 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์ (T_e) ตั้งแต่ช่วงเวลาที่เริ่มต้นจนถึงช่วงเวลาสถานะคงตัวในการทำงานของมอเตอร์ โดยในช่วงเวลาเริ่มต้นแรงบิดจะไม่คงที่แล้วแรงบิดจะมีค่าที่สูงสุดในช่วงเวลาที่ 0.25 วินาทีและเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาสถานะคงตัวที่ 0.3 วินาทีเป็นต้นไปจะมีค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์อยู่ที่ 22.5 N.m

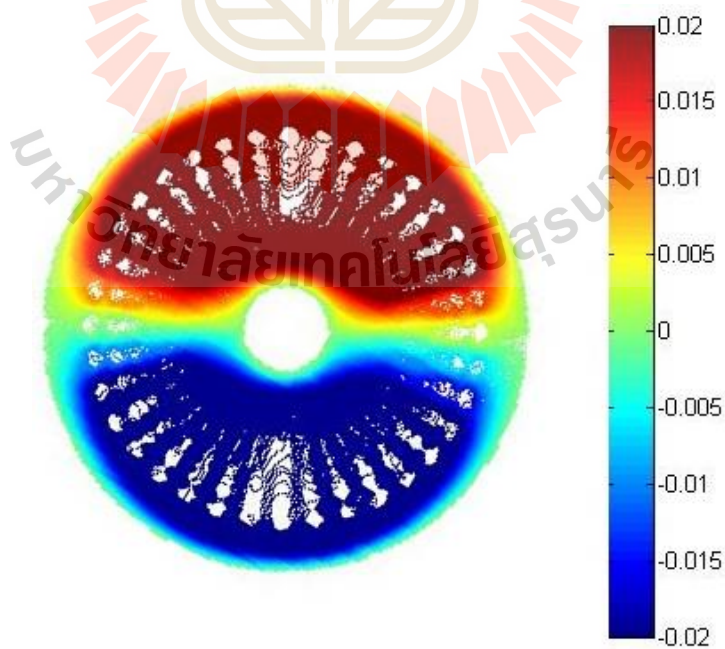
5.7 ผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลาที่กระจายตัวตลอดทั่วทั้ง

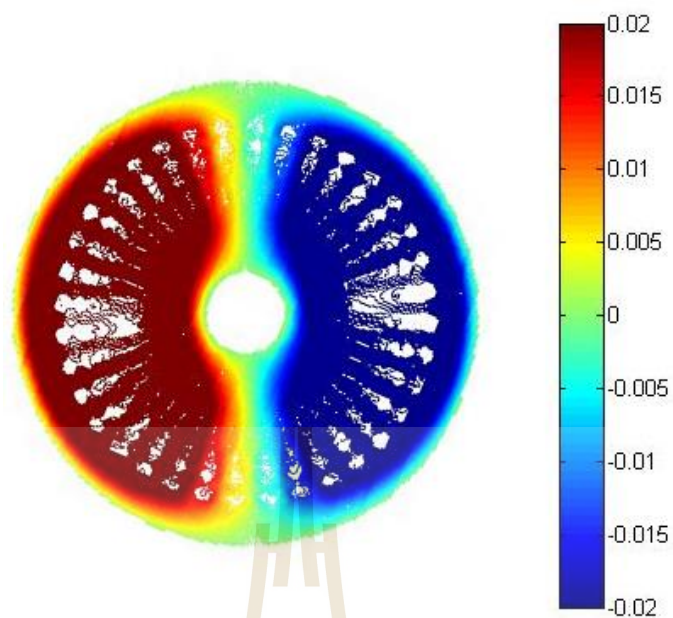
ปริมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวสามารถแสดงผลทางกราฟิกได้ดังรูปที่ 5.12-5.23



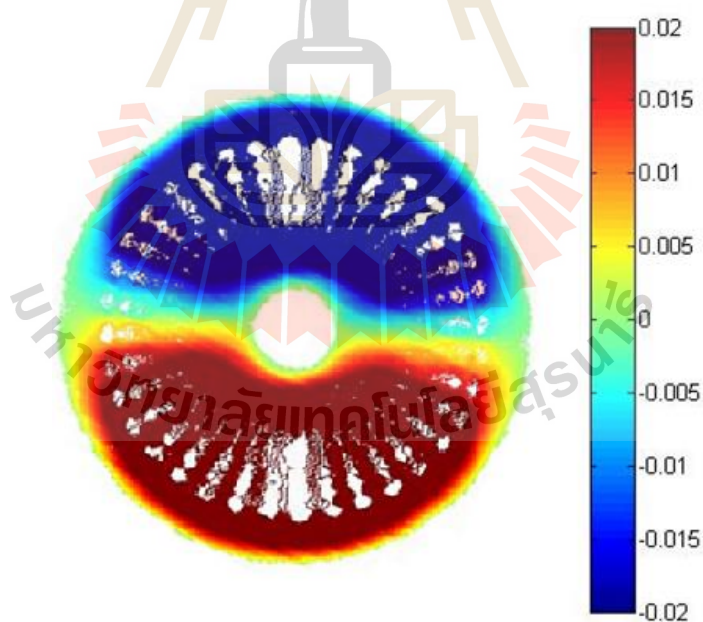
รูปที่ 5.12 ภาคนตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



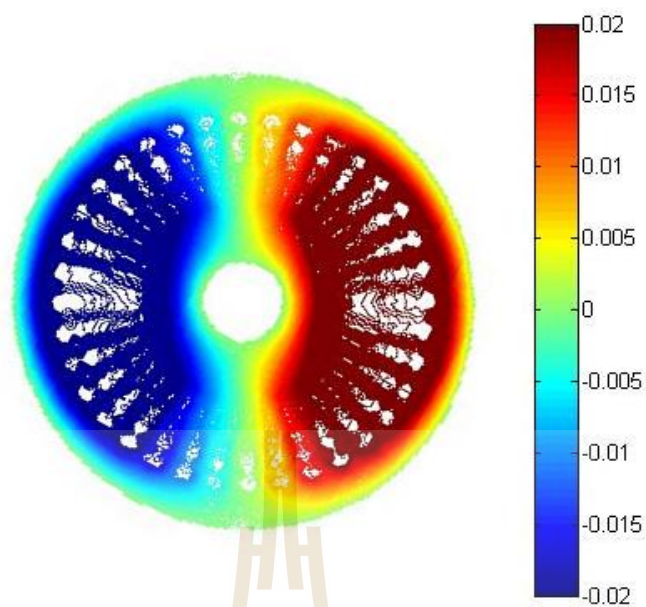
รูปที่ 5.13 ภาคนตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



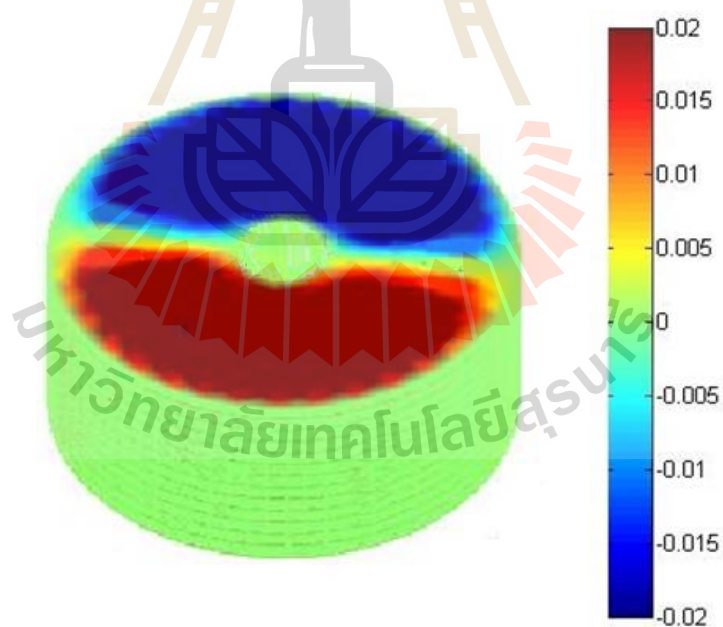
รูปที่ 5.14 ภาดตัดขวางของคักย์เซ็งเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ 5.15 ภาดตัดขวางของคักย์เซ็งเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์

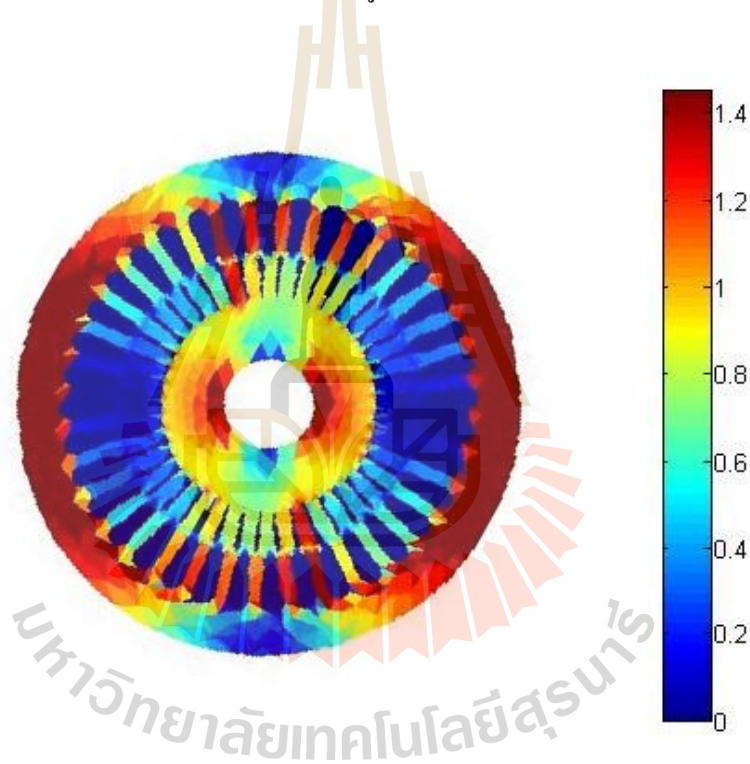


รูปที่ 5.16 ภาดตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์

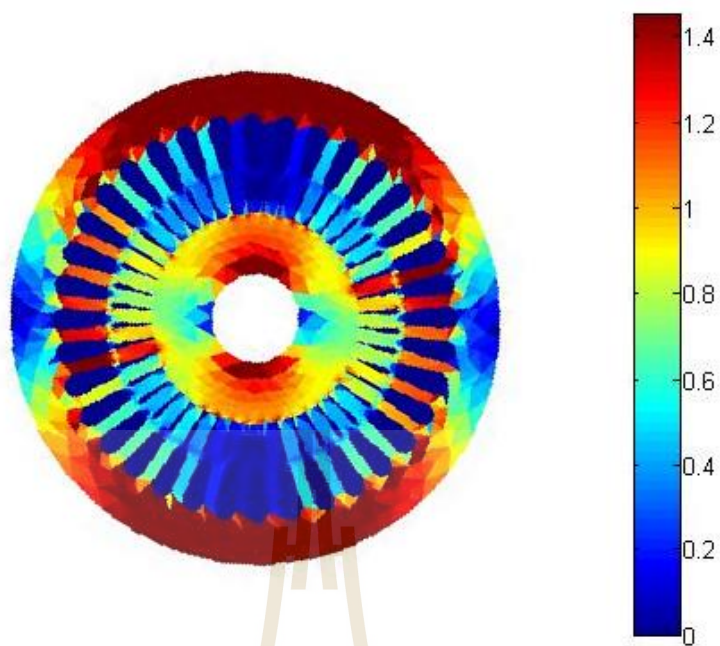


รูปที่ 5.17 ค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์

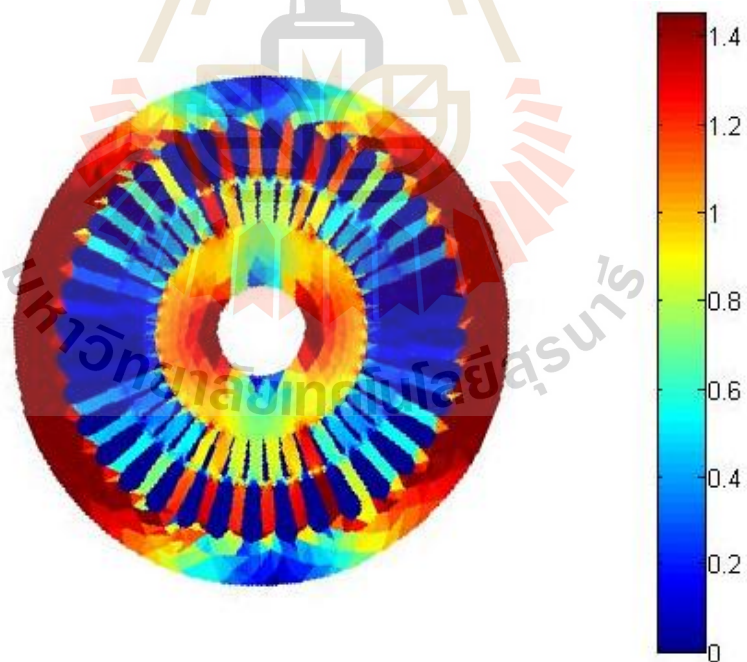
จากรูปที่ 5.12-5.17 เป็นการแสดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวตลอดบริเวณทั่วปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของระบบ 6 เฟส 2 ขั้วในช่วงเวลาสถานะคงตัว โดยเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปมอเตอร์ก็จะหมุนไปเรื่อยๆ ในลักษณะที่ทวนเข็มนาฬิกา จากการจำลองผลพบว่า ลักษณะการกระจายของขั้วแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงที่เป็นสีแดงโดยเป็นค่าบวก ช่วงที่เป็นสีน้ำเงินเป็นค่าลบและช่วงที่เป็นสีเขียวคือค่าที่อยู่ระหว่างค่าบวกและลบที่หักล้างกันจนมีค่าเกือบจะเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการกระจายของแถบสีต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขั้วของกระแสที่ป้อนให้กับร่องของสเตเตอร์ตามร่องต่างๆ สำหรับลักษณะการกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแต่ละช่วงการหมุนในแต่ละมุมของมอเตอร์นั้นจะมีลักษณะแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย และสามารถดูภาพจำลองผลลักษณะแบบ 3 มิติได้ดังรูปที่ 5.17



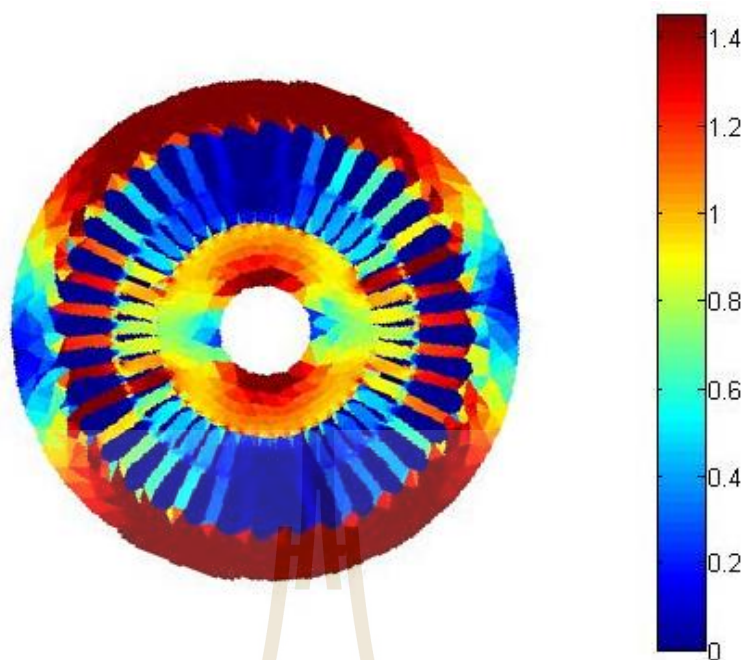
รูปที่ 5.18 ภาควัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



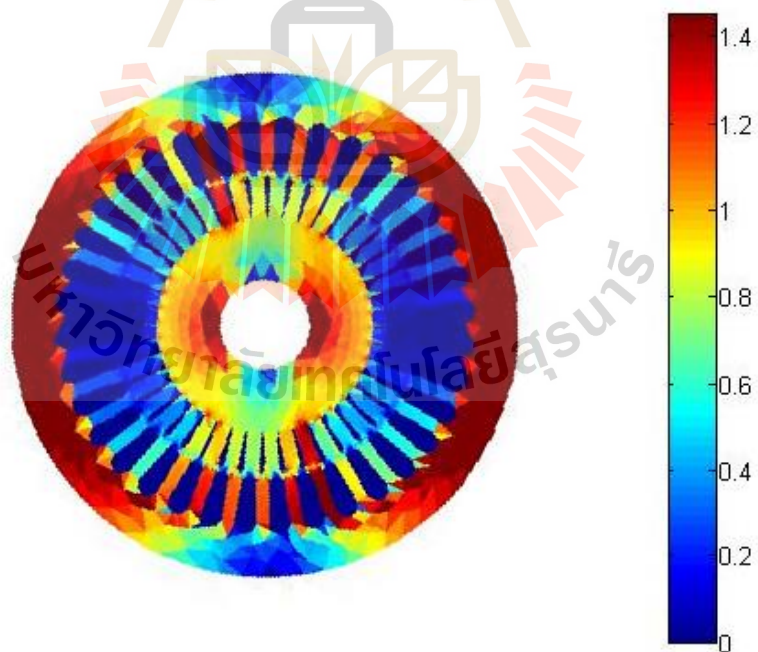
รูปที่ 5.19 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



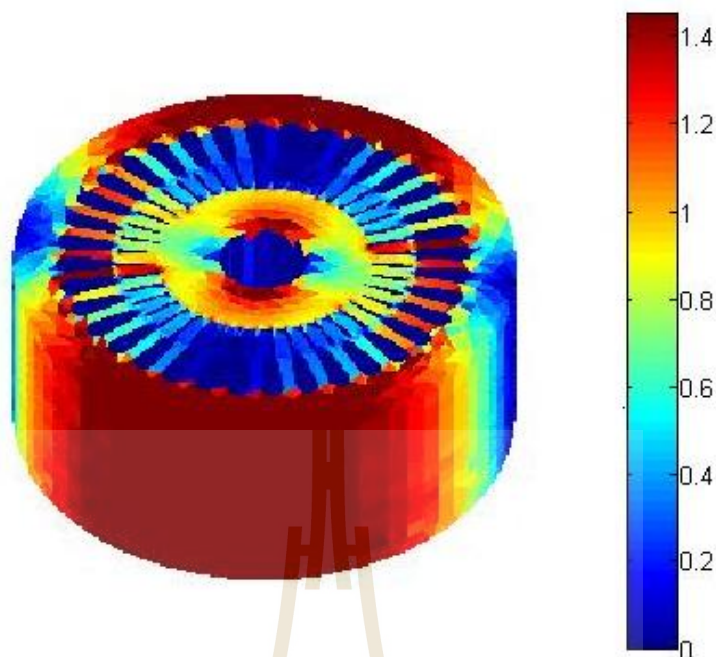
รูปที่ 5.20 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ 5.21 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



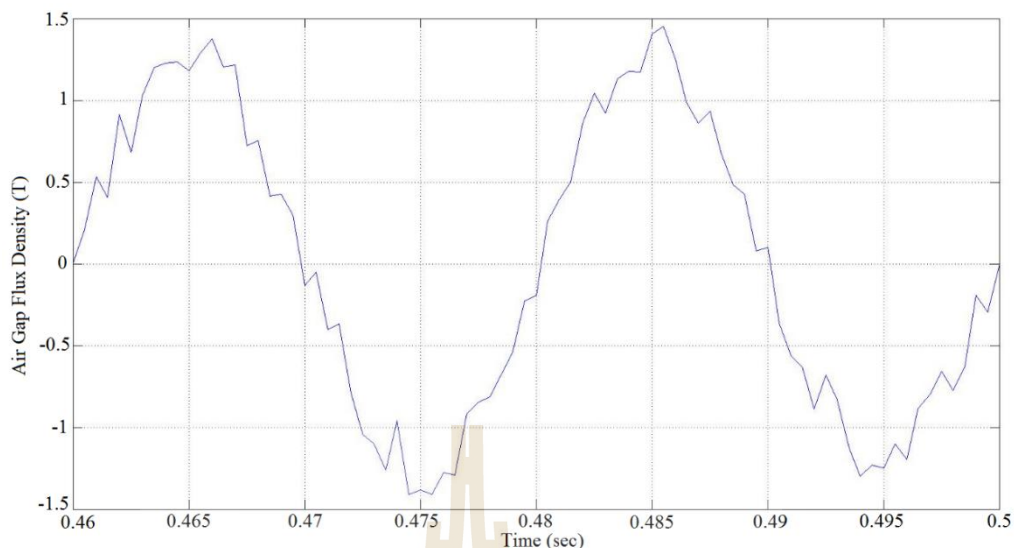
รูปที่ 5.22 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ 5.23 สนามเหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์

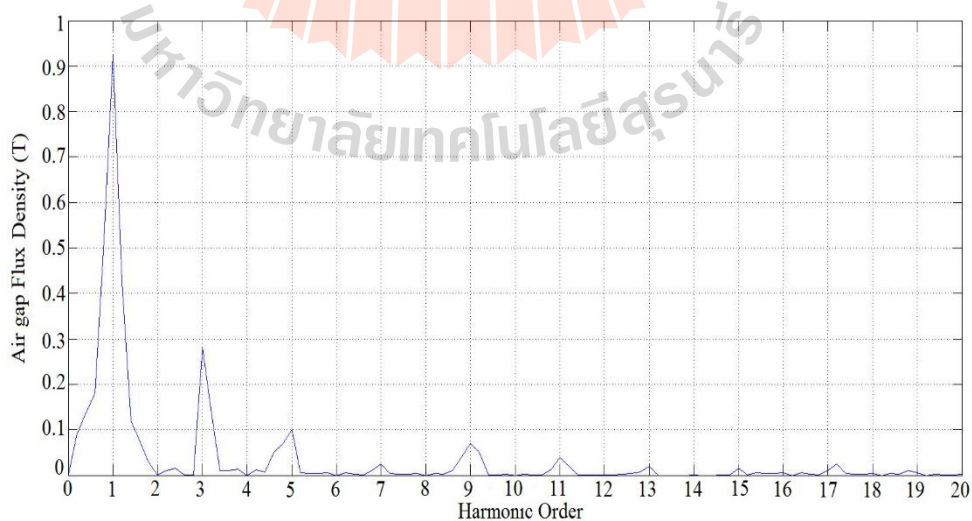
จากรูปที่ 5.18-5.23 เป็นการแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กของระบบ 6 เฟส เมื่อพิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะพบว่าลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ในร่องของสเตเตอร์แต่จะเกิดบริเวณรอบๆ ของสเตเตอร์และกระจายออกจากแกนเหล็กไปยังช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และ โรเตอร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.18-5.22 จะพบว่าลักษณะการกระจายจะสอดคล้องกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในบริเวณต่างๆ ทั้งในช่วงการหมุนแต่ละมุมของมอเตอร์ โดยที่ลักษณะการกระจายในแต่ละช่วงการหมุนก็เปลี่ยนไปจากเดิมเล็กน้อย และสามารถดูภาพจำลองผลลักษณะแบบ 3 มิติได้ดังรูปที่ 5.23 ด้วยเช่นกัน ซึ่งหากไม่พิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้นจะส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงเกินกว่าจุดอิ่มตัวของวัสดุคงแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข

เมื่อได้ค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวตลอดทั้งมอเตอร์แล้ว ผลการจำลองต่อไปจะเป็นการนำเสนอกราฟค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศแนวสัมผัส (B) ซึ่งเป็นทิศทางของแนวแรงที่ใช้คำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ต่อไปและค่าการกระจายลำดับฮาร์โมนิกของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.24-5.25



รูปที่ 5.24 ค่าการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เต็ม

จากรูปที่ 5.24 เป็นรูปแสดงค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศในระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มีจำนวนพิตช์เต็มในช่วงสถานะคงตัว โดยเป็นการนำค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่จัดรูปผลการจำลองอันก่อนแล้วนำค่าสนามแม่เหล็กในส่วนช่องว่างอากาศแนวสัมผัส (B) มาพล็อตโดยยึดที่ตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งพบว่าในการพันขดลวดแบบพิตช์เต็มจะมีรูปคลื่นไซน์ที่ค่อนข้างมีความผิดเพี้ยนสูง



รูปที่ 5.25 กราฟการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เต็ม

จากรูปที่ 5.25 เป็นรูปแสดงฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ โดยการนำข้อมูลตัวเลขของกราฟค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศที่มีลักษณะเหมือนรูปคลื่นไซน์มาแปลงฟูเรียร์ให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่จะพบว่าค่าฮาร์มอนิกนั้นจะเกิดขึ้นในลำดับที่เป็นเลขจำนวนคี่เท่านั้นและค่าฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะลดลงเรื่อยๆตามลำดับฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้น

จากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

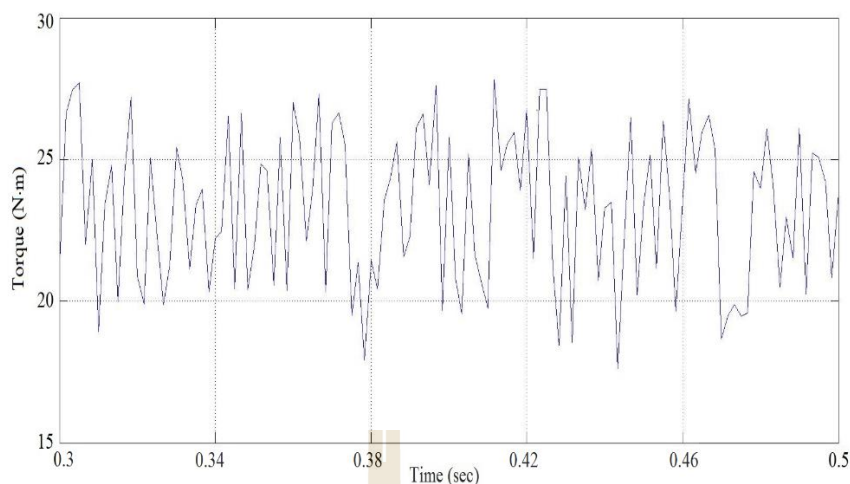
$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} h^2}}{h_1} \times 100\% \quad \text{เมื่อกำหนดตัวแปร } h_1$$

แทนค่าเป็นฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 และในตัวแปร h ในเศษส่วนด้านบนแทนค่าเป็นฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขจำนวนคี่ที่มากกว่าลำดับหนึ่งเช่น 3 5 7 9...19 เป็นต้นไป เมื่อแทนค่าในกราฟด้านบนด้วยตัวแปรดังกล่าวจะได้เป็นตัวเลขดังนี้

$$\%THD = \frac{\sqrt{0.28^2 + 0.1^2 + 0.024^2 + 0.07^2 + 0.04^2 + 0.02^2 + 0.015^2 + 0.01^2}}{0.92} \times 100\%$$

ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรดังกล่าวจะได้ค่า THD ของระบบเป็น 33.56 % ซึ่งมีค่าสูงพอสมควรเมื่อพิจารณาการพันขดลวดแบบพิชต์เต็ม

การจำลองสุดท้ายเป็นการนำเสนอผลของกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว ซึ่งการเกิดแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุนจะนำค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส (F) เป็นแรงหลักที่ต้องนำมาพิจารณาโดยคูณด้วยระยะรัศมี (r) จากจุดกึ่งกลางไปยังตำแหน่งขอบด้านนอกของโรเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าแรงบิดรอบขอบด้านนอกของโรเตอร์ทั้งหมดมารวมกันจะได้เป็นค่าแรงบิดของช่วงเวลานั้นแล้วดำเนินการเช่นนี้ไปจนถึงช่วงเวลาสุดท้าย โดยการแสดงผลกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในช่วงเวลาสถานะคงตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 ภาพแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

จากรูปที่ 5.26 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อพิจารณาการผันขดลวดแบบเต็มพบว่ากราฟแรงบิดไม่ค่อยสมดุลทำให้มีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้มากและจากกราฟแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์นี้จะพบว่าช่วงค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นจะใกล้เคียงกับแรงบิดที่ได้จากวิธีคำนวณโมเดลทางคณิตศาสตร์ด้วย Simulink ที่ผ่านมาก่อนหน้านี้

5.8 สรุป

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสโดยมีระยะพิชต์เป็นแบบพิชต์เต็ม มีลักษณะร่องโรเตอร์ที่ตรงและใช้การผันขดลวดแบบกระจาย พร้อมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติภายใต้สถานะชั่วคราวและในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองที่ได้พบว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่เกิดทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์นั้นเห็นความเป็นขั้วที่ชัดเจนและสำหรับค่าสนามแม่เหล็กที่ได้ พบว่ามีค่ามากในบริเวณแกนเหล็กของสเตเตอร์ โดยค่าฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเกิดค่าความผิดเพี้ยนของความเป็นรูปคลื่นไซน์ค่อนข้างสูง โดยพบว่ามีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกถึง 33.56% ส่วนแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่มีช่วงค่าแรงบิดใกล้เคียงกับโปรแกรม Simulink จากกระบวนการคำนวณและการจำลองผลทั้งหมดที่ได้นี้ จะเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสให้มีคุณลักษณะที่ดีขึ้นในบทต่อไป

บทที่ 6

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมรรถนะ

6.1 บทนำ

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะในบทที่ 6 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ให้สูงขึ้น และลดฮาร์มอนิกของค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศให้น้อยลงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบเดิมที่ได้ออกแบบมาจากในบทที่ 5 ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยมีระยะพิชต์เป็นแบบพิชต์เต็ม มีลักษณะร่องโรเตอร์ที่ตรงและใช้การพันขดลวดแบบกระจายโดยแนวคิดในการออกแบบนั้นยังคงโครงสร้างเดิมไว้ทุกประการ ซึ่งการออกแบบจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบคือ แบบที่ 1 เป็นการออกแบบการพันขดลวดเป็นแบบระยะพิชต์เศษส่วนซึ่งการพันแบบนี้ จะสามารถควบคุมการกระจายของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในพื้นที่ต่างๆของมอเตอร์และทำให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็กมีความสม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อเป็นการขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่ค่าแรงดันเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย สำหรับแบบที่ 2 เป็นการออกแบบคุณสมบัติร่องโรเตอร์เฉียงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวที่ไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดเสียง การสั่นสะเทือนและฮาร์มอนิกขึ้น ในแบบที่ 3 เป็นการออกแบบการจัดการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องมีอยู่สองลักษณะ โดยแบบเดิมคือการวางตัวแบบกระจาย (Distribution winding) หมายถึงกลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกันหากจำนวนสลิตของแต่ละขั้วและแต่ละเฟสจำนวนตั้งแต่ 2 ช่องขึ้นไปและที่ออกแบบใหม่คือการวางตัวแบบรวม (Concentrate winding) ซึ่งจะมีจำนวนสลิตของแต่ละขั้วและแต่ละเฟสเท่ากับ 1 ช่อง ในการวางตัวแบบรวม กลุ่มของขดลวดจะติดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อมกันทำให้แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดเกิดขึ้นพร้อมกันส่งผลให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่าแบบการวางตัวแบบกระจาย สำหรับในการนำเสนอการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะ จะนำเสนอผ่านผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส แสดงค่ากระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ ค่าฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละลำดับ ค่าแรงบิดทางกลที่เกิดจากตัวมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและคำนวณหา ค่า THD ของระบบทั้งหมดที่ออกแบบเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้หลังจากการออกแบบของ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในบทที่ 5 และวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ให้เพิ่มสูงขึ้น

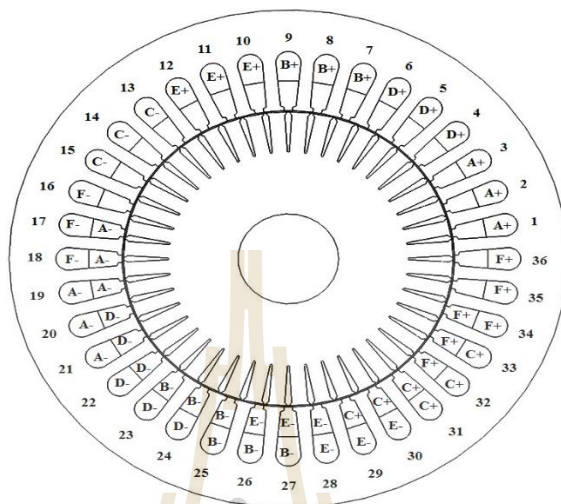
6.2 การออกแบบการพันขดลวดเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน

เนื่องจากโดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีลักษณะการพันขดลวดอยู่หลายแบบ โดยในการพันแต่ละแบบนี้จะส่งผลต่อการทำงานที่ต่างกันไป ดังนั้นการออกแบบการพันขดลวดจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่าง อาทิเช่น ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็ก ลักษณะของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ โดยที่ค่าเหล่านี้จะต้องไม่สูงและต่ำจนเกินไป ดังนั้นการพันขดลวดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสม การพันแบบระยะพิตช์เต็มและการพันแบบระยะพิตช์เศษส่วนนั้น หากความกว้างของขดลวดเท่ากับระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะเรียกว่าการพันแบบระยะพิตช์เต็ม หากสั้นกว่าระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะเรียกว่าการพันแบบระยะพิตช์เศษส่วน การพันแบบระยะพิตช์เศษส่วนทำขึ้นเพื่อลดค่าฮาร์มอนิกเนื่องจากโดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่รับสัญญาณแรงดันกระแสสลับ แต่ข้อเสียของการพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนคือ ค่าแรงดันเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อนำไปเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม

ในการออกแบบตัวประกอบพิตช์ของขดลวดที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าต่างๆ แสดงได้ดังสมการ $k_{pv} = \sin(vp/2)$ เมื่อ v คือหมายเลขของฮาร์มอนิก โดยฮาร์มอนิกที่ v หมายถึงจำนวน v เท่าของความถี่หลักมูลฐาน จากสมการสามารถกำจัดฮาร์มอนิกบางตัวสมบูรณ์ได้โดยจากการทำให้เท่ากับ 180° หรือ $360^\circ, 540^\circ, 720^\circ$ ดังนั้นถ้าต้องการกำจัดฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ก็จะทำให้ $v = 3$ ในสมการจะได้ $3p/2 = 180^\circ$ จะได้ $p = 120^\circ$ ทางไฟฟ้า ก็คือการพันขดลวดให้มีความถ่างเป็น $2/3$ โดยในงานวิจัยนี้มีจำนวนร่องของสเตเตอร์จำนวน 36 ร่องซึ่งเท่ากับมุม 360° ทางไฟฟ้า หากต้องการออกแบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จะต้องมีระยะพิตช์ที่เป็น $2/3$ ร่องหรือ $120^\circ/180^\circ$ ทางไฟฟ้า จึงออกแบบระยะพิตช์เศษส่วนเป็น $12/18$ ร่อง

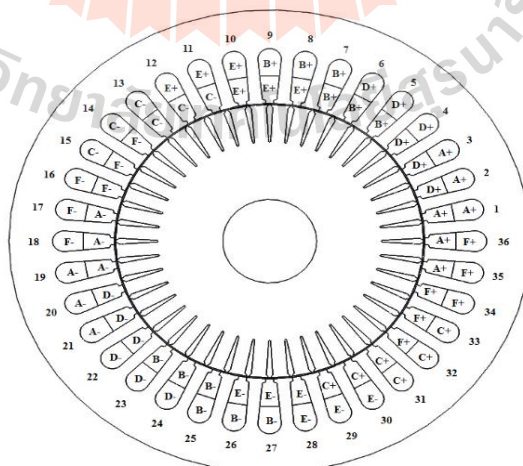
สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบการพันขดลวดที่กำหนดตั้งแต่แบบระยะพิตช์เต็มและจนถึงการพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนตามทีออกแบบไว้ โดยระบบที่จะใช้ในการจำลองผลจะดำเนินการปรับตั้งแต่แบบระยะพิตช์เต็มที่ $18/18$ ร่องที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 และจะปรับลดระยะพิตช์ลงทีละเล็กลงเป็น $16/18$ ร่อง, $14/18$ ร่อง, $12/18$ ร่องและ $10/18$ ร่องตามลำดับเพื่อสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเพื่อหาค่าคุณลักษณะต่างๆที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยสามารถออกแบบได้ดังนี้ สำหรับขั้นตอนแรกจะเป็นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีระยะพิตช์เป็น $16/18$ ร่อง ในการออกแบบสามารถทำได้โดยกำหนดการวางตัวของขดลวดในชั้นแรกเหมือนกับต้นแบบที่ได้ใช้การ

จำลองและได้ดำเนินการวางขดลวดในชั้นที่ 2 ซึ่งกำหนดการวางขดลวดที่มีขั้วและมุมเฟสให้เหมือนกับชั้นที่ 1 ซึ่งจะเริ่มจากเฟส A ที่เป็นขั้วลบตั้งแต่ร่องสเตเตอร์ที่ 17 ในชั้นที่ 2 ดังรูปที่ 6.1



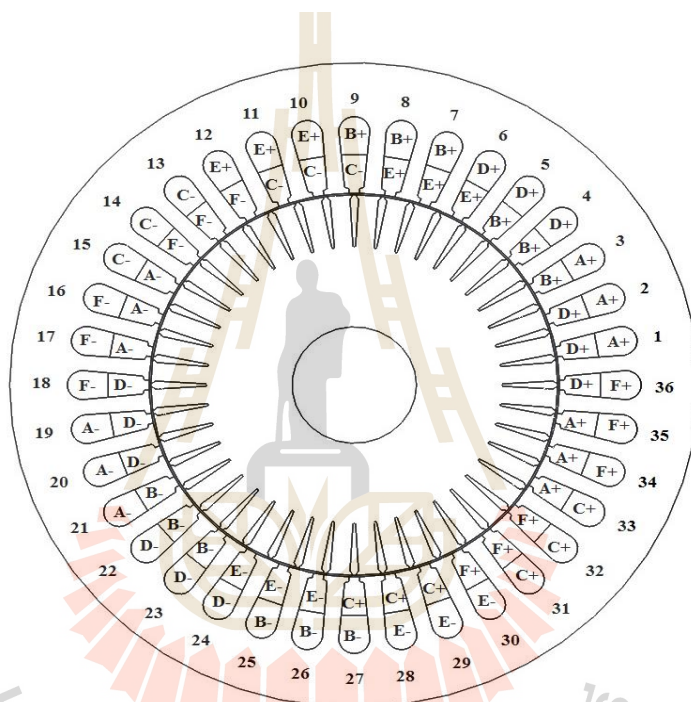
รูปที่ 6.1 การออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 16/18 ร่อง

ขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการกำหนดการวางตัวของขดลวดในส่วนที่เหลือ ในครั้งนี้จะเป็นส่วนของขั้วบวกโดยเริ่มจากการกำหนดขั้วบวกเฟส A ให้มีมุมเฟสห่างมุมเฟส A ที่เป็นขั้วลบ 180° จากที่ได้ออกแบบไว้ ที่ร่องสเตเตอร์ที่ 35 เพราะว่าเป็นมอเตอร์ชนิดแบบ 2 ขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 6.2



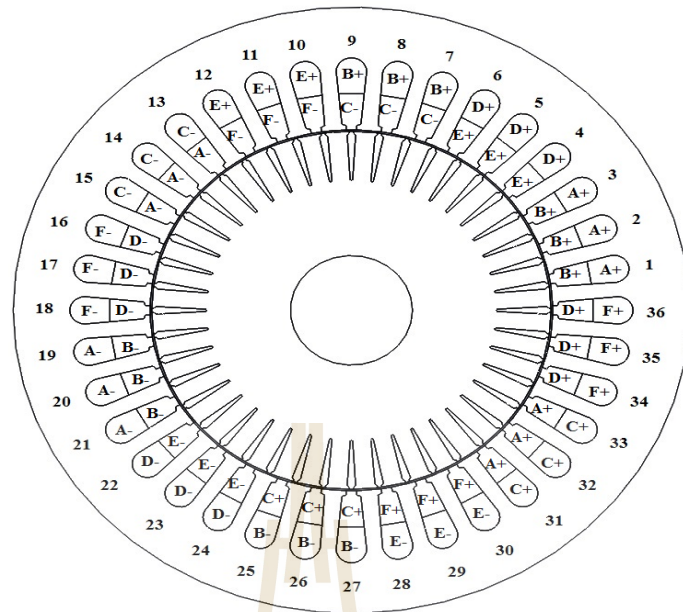
รูปที่ 6.2 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 16/18

สำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 14/18 ร่อง ในการออกแบบสามารถทำได้ด้วยการใช้แนวคิดเดียวกันกับการออกแบบครั้งก่อน โดยกำหนดการวางตัวของขดลวดในชั้นแรกเหมือนกับต้นแบบที่ได้ใช้จำลองเช่นเดิมแล้วดำเนินการวางขดลวดในชั้นที่ 2 ซึ่งกำหนดการวางขดลวดที่มีขั้วและมุมเฟสให้เหมือนกับชั้นที่ 1 ซึ่งจะเริ่มจากเฟส A ที่เป็นขั้วลบตั้งแต่ร่องสเตเตอร์ที่ 15 ในชั้นที่ 2 หลังจากนั้นจะดำเนินการกำหนดการวางตัวของขดลวดในส่วนที่เหลือ ในครั้งนี้จะเป็นส่วนของขั้วบวกโดยเริ่มจากการกำหนดขั้วบวกเฟส A ให้มีมุมเฟสห่างมุมเฟส A ที่เป็นขั้วลบ 180° จากที่ได้ออกแบบไว้เช่นกัน ที่ร่องสเตเตอร์ที่ 33 แสดงได้ดังรูปที่ 6.3



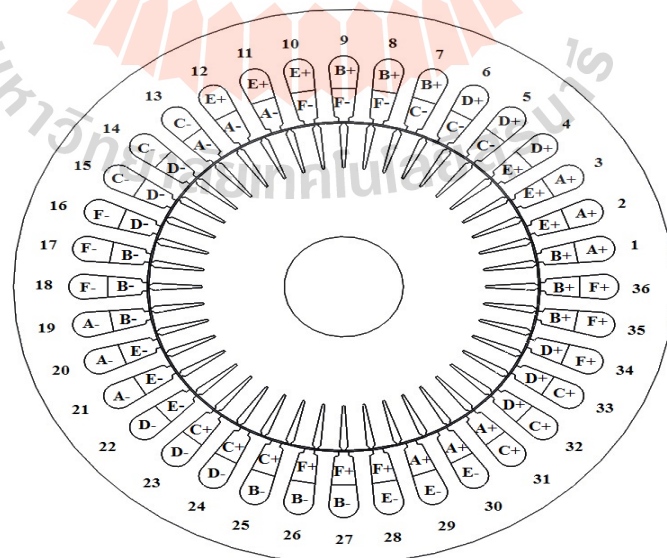
รูปที่ 6.3 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สอง โดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 14/18

สำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 12/18 ร่อง ในการออกแบบสามารถทำได้ด้วยกระบวนการเดิม โดยกำหนดการวางตัวของขดลวดในชั้นแรกเหมือนกับต้นแบบที่ได้ใช้จำลองและได้ดำเนินการวางขดลวดในชั้นที่ 2 ซึ่งกำหนดการวางขดลวดที่มีขั้วและมุมเฟสให้เหมือนกับชั้นที่ 1 ซึ่งจะเริ่มจากเฟส A ที่เป็นขั้วลบตั้งแต่ร่องสเตเตอร์ที่ 13 ในชั้นที่ 2 และดำเนินการกำหนดการวางตัวของขดลวดในส่วนขั้วบวกโดยเริ่มจากการกำหนดขั้วบวกเฟส A ให้มีมุมเฟสห่างมุมเฟส A ที่เป็นขั้วลบ 180° จากที่ได้ออกแบบไว้ ที่ร่องสเตเตอร์ที่ 31 เพราะว่าเป็นมอเตอร์ชนิดแบบ 2 ขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 12/18

ในขั้นตอนนี้สุดท้ายจะเป็นการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 10/18 ร่อง สามารถออกแบบได้โดยการวางขดลวดในชั้นที่ 2 ซึ่งจะเริ่มจากเฟส A ที่เป็นขั้วลบตั้งแต่ร่องสเตเตอร์ที่ 11 ในชั้นที่ 2 และกำหนดขั้วบวกเฟส A ที่ร่องสเตเตอร์ที่ 29 แสดงได้ดังรูปที่ 6.5

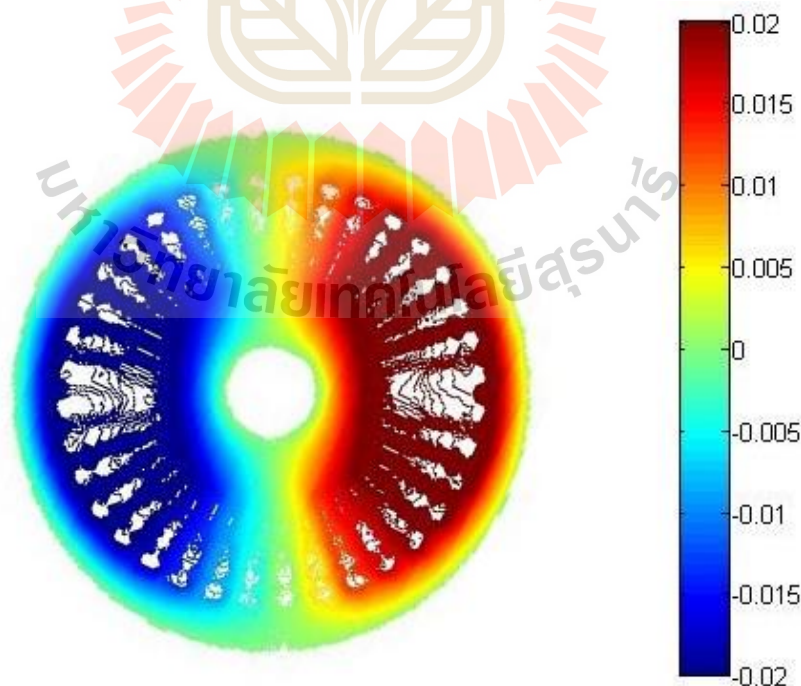


รูปที่ 6.5 การวางตัวของขดลวดในชั้นที่สองโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 10/18

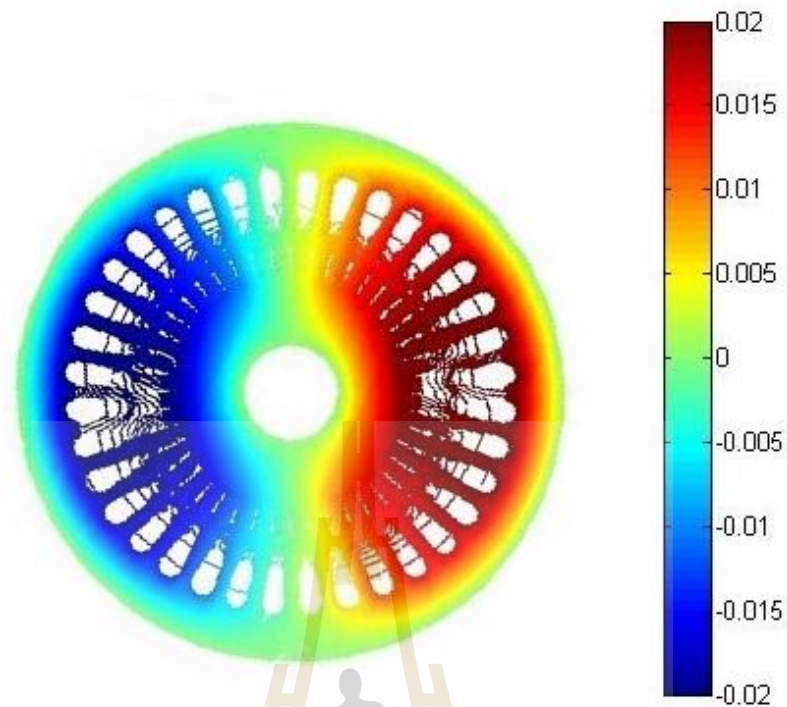
เมื่อได้ดำเนินการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสทั้ง 3 แบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำโมเดลของทั้ง 3 แบบนี้เข้าสู่กระบวนการไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาผลเฉลยอื่นๆต่อไป อาทิ เช่น หาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น

6.3 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อพันขดลวดเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน

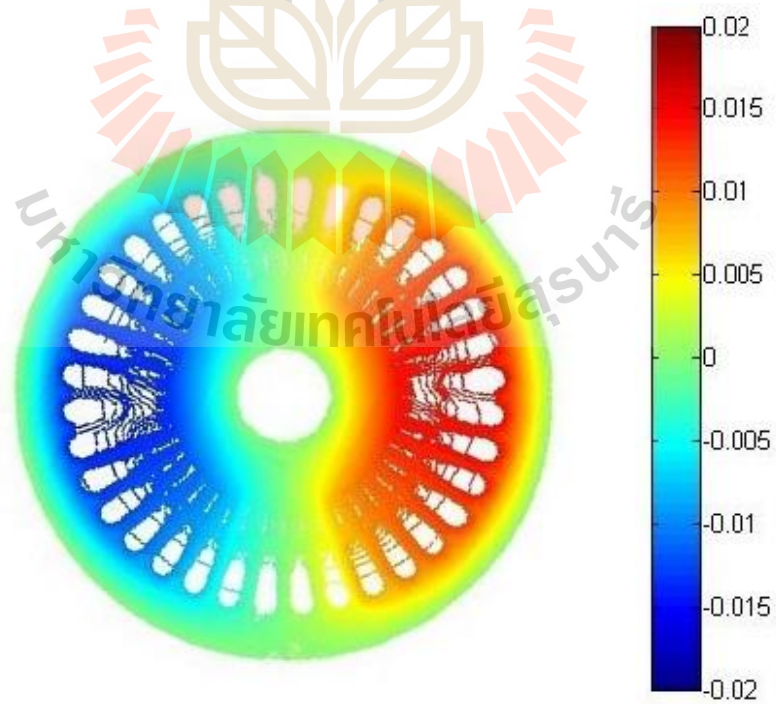
สำหรับการจำลองผลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยการจำลองผลของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก กราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิด โดยในหัวข้อแรกนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวด โดยกำหนดระยะพิตช์เป็นแบบพิตช์เศษส่วน ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่องและ 10/18 ตามลำดับ โดยการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.6-6.9



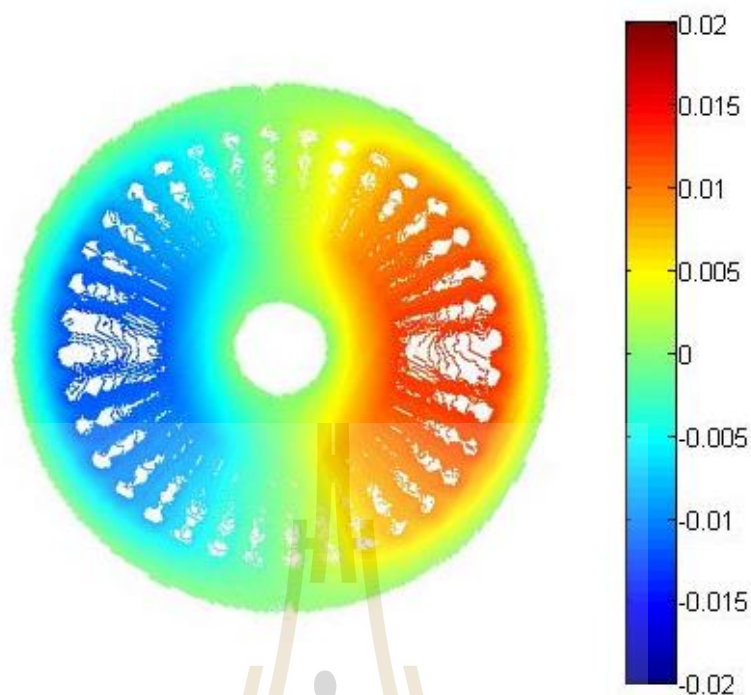
รูปที่ 6.6 ภาคตัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 16/18



รูปที่ 6.7 ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตซ์เป็น 14/18



รูปที่ 6.8 ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตซ์เป็น 12/18

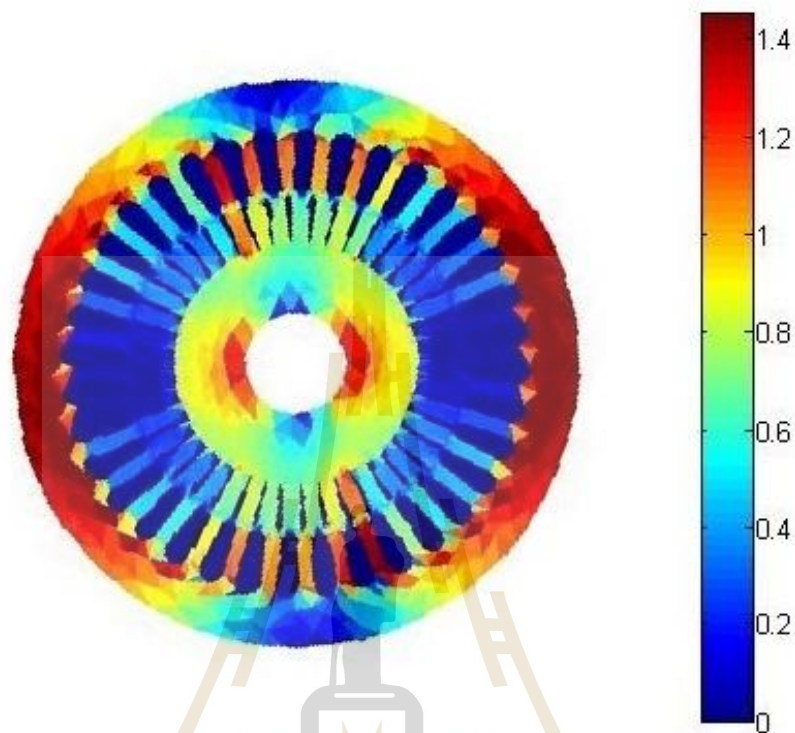


รูปที่ 6.9 ภาคตัดขวางของค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อระยะพิตช์เป็น 10/18

จากรูปที่ 6.6-6.9 เป็นรูปแสดงถึงค่าค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายบริเวณทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่องและ 10/18 ร่อง โดยค่าค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นการแสดงถึงลักษณะของขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสเข้าสู่มอเตอร์ สำหรับการจำลองผลค่าค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและสามารถแสดงลักษณะกราฟค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์เพื่อวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกของระบบที่ออกแบบ ดังนั้นระบบที่ออกแบบมาที่ดีจะมีลักษณะการกระจายของค่าค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่แสดงให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็กที่ชัดเจนและสมดุล ซึ่งจากการจำลองผลนั้นพบว่าในช่วงการทำงานที่เป็นสถานะคงตัวของมอเตอร์ระบบที่ออกแบบมาทั้ง 3 แบบสามารถทำให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็กที่สมมาตรทั้งในขั้วบวกและลบได้ แล้วพบว่าลักษณะค่าแอมพลิจูดของค่าค้ำย้เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะลดลงเมื่อระยะพิตช์ที่ลดลงสามารถสังเกตได้จากความเข้มของสีที่เกิดขึ้น

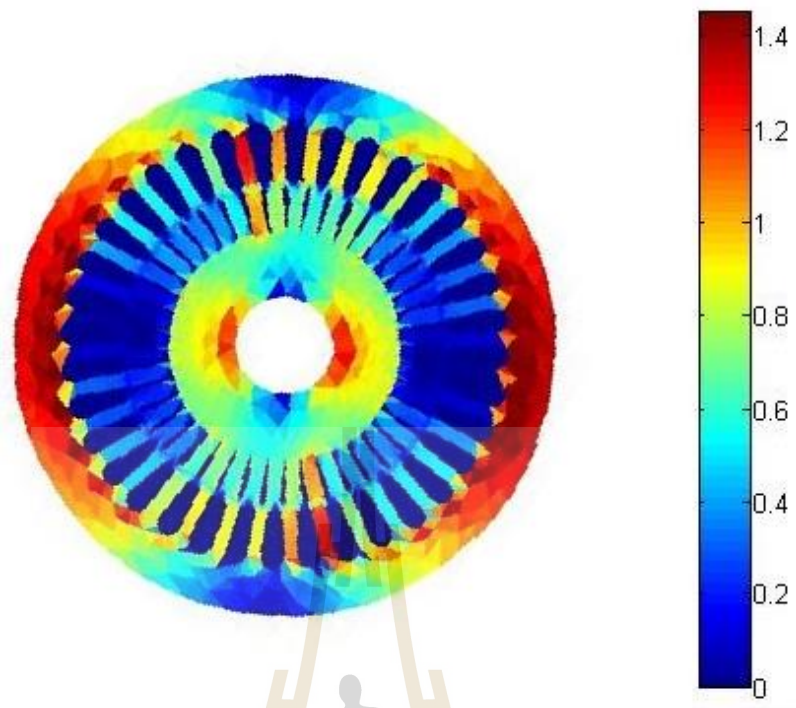
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตช์เป็นแบบพิตช์เศษส่วน ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6

เฟส ที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่องและ 10/18 ร่อง ตามลำดับ โดยการจำลองค่าสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.10-6.13

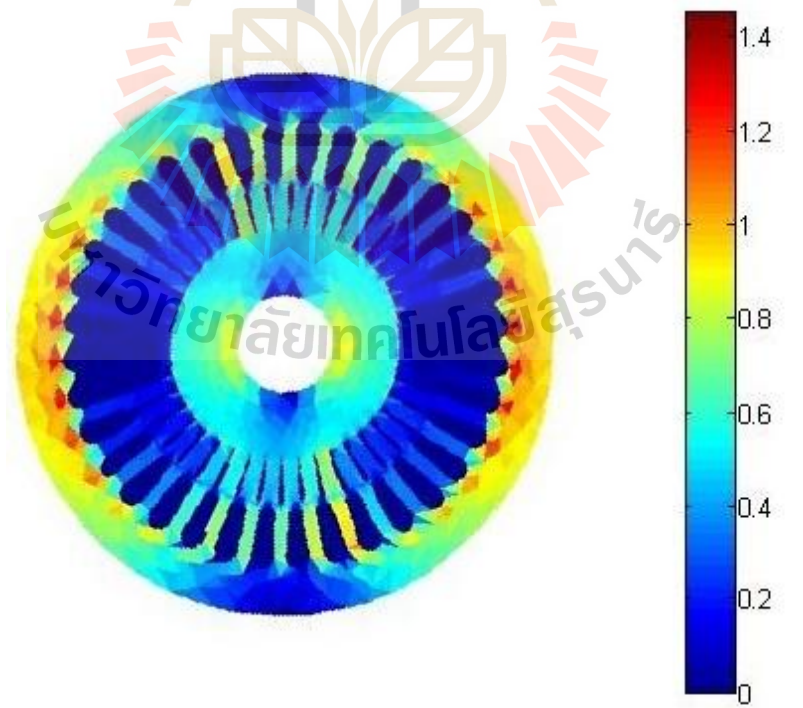


รูปที่ 6.10 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18

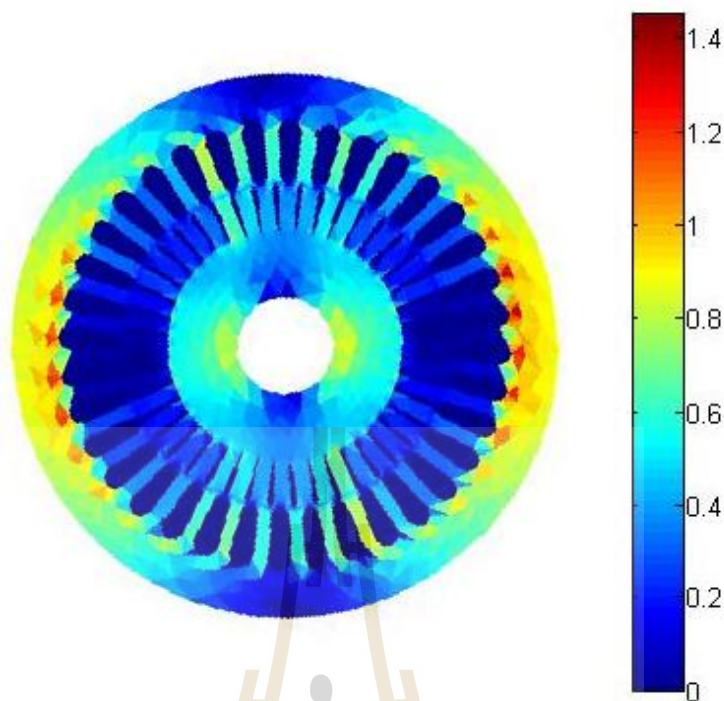
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.11 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิทช์เป็น 14/18



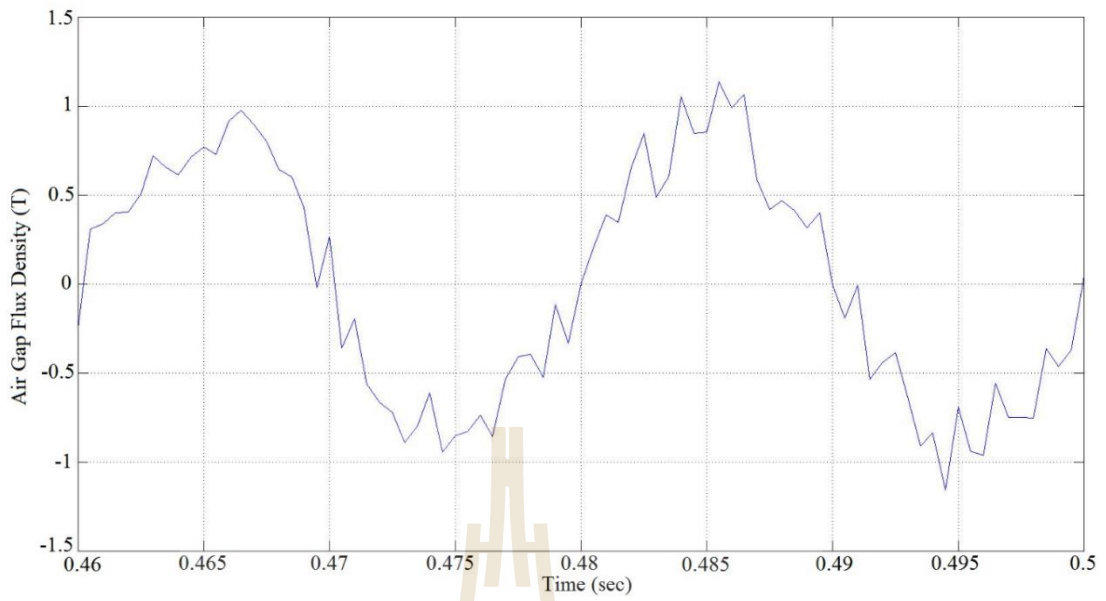
รูปที่ 6.12 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิทช์เป็น 12/18



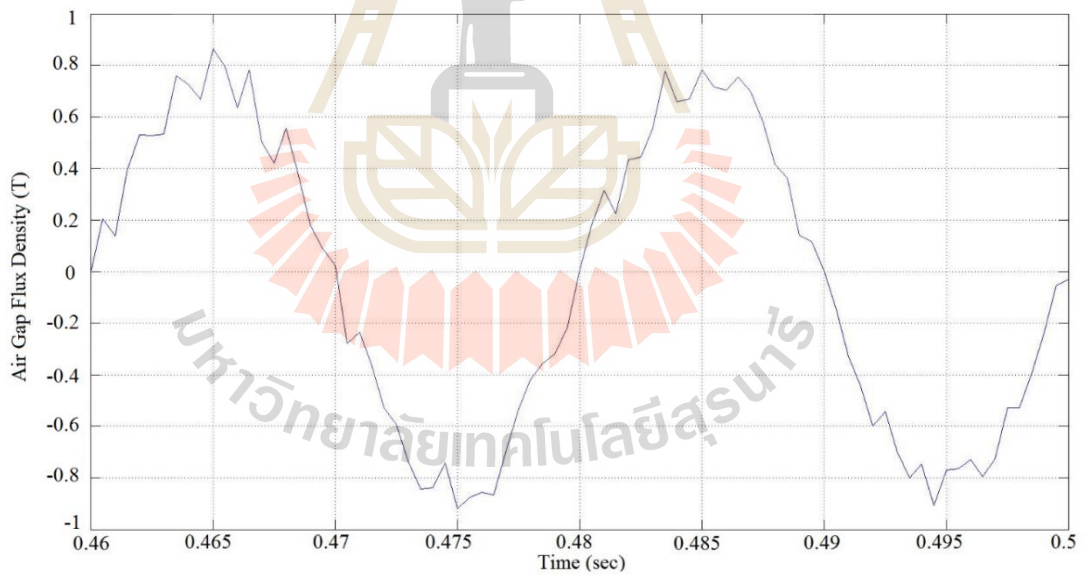
รูปที่ 6.13 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) โดยกำหนดระยะพิตซ์เป็น 10/18

จากรูปที่ 6.10-6.13 เป็นรูปแสดงถึงค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มีระยะพิตซ์เป็นแบบที่ต่าง ๆ กัน โดยผลลัพธ์ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้แค่ในแกนเหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์เท่านั้น ซึ่งลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลจะมีลักษณะการกระจายเช่นเดียวกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก โดยระบบที่ออกแบบมาจะมีลักษณะการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กที่คล้ายๆกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กตรงที่มีบริเวณที่มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่มีค่าแอมพลิจูดสูง ในบริเวณปริมาตรนั้นก็จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่าบวกที่สูงและจากการจำลองผลพบว่าเมื่อระยะพิตซ์ที่ลดลง ค่าสนามแม่เหล็กก็จะลดลงเช่นกันสังเกตได้จากความเข้มของสีที่จางลง

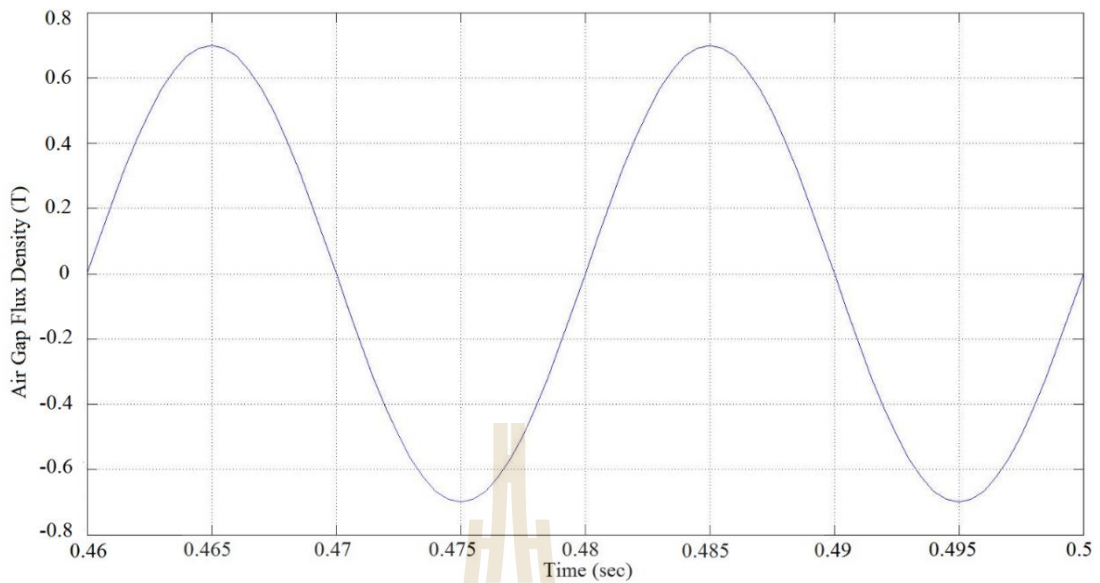
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระยะเบี่ยงวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตซ์เป็นแบบพิตซ์เศษส่วน ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีระยะพิตซ์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่องและ 10/18 ร่องตามลำดับ โดยการแสดงผลกราฟค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.14-6.17



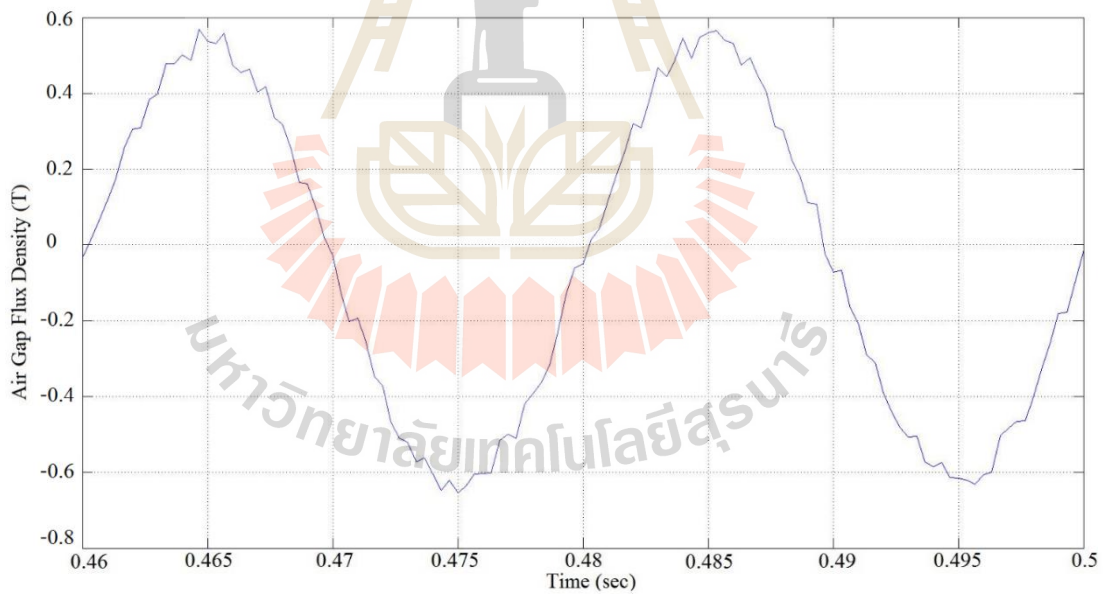
รูปที่ 6.14 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เศษส่วนที่ 16/18



รูปที่ 6.15 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระบบพิตช์เศษส่วนที่ 14/18



รูปที่ 6.16 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 12/18

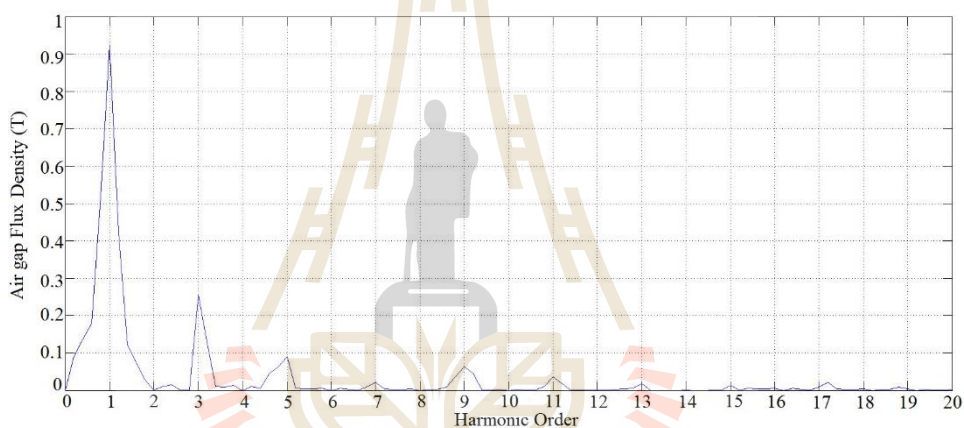


รูปที่ 6.17 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์เศษส่วนที่ 10/18

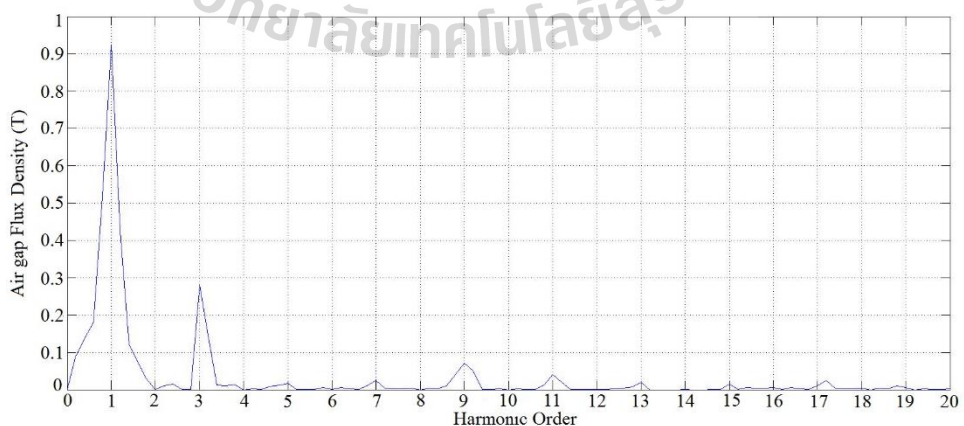
จากรูปที่ 6.14-6.17 เป็นรูปแสดงค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศในระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในช่วงสถานะคงตัว พบว่าในแบบการพันขดลวดแบบที่มีระยะพิตช์เป็น 16/18 จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าและมีรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนมากกว่า การพันขดลวดแบบที่มีระยะ

พิตช์ 14/18, 12/18 และ 10/18 ตามลำดับ โดยที่การพันขดลวดแบบที่มีระยะพิตช์ 10/18 จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดและที่ระยะพิตช์ 12/18 มีความเป็นรูปคลื่นไซน์มากที่สุด

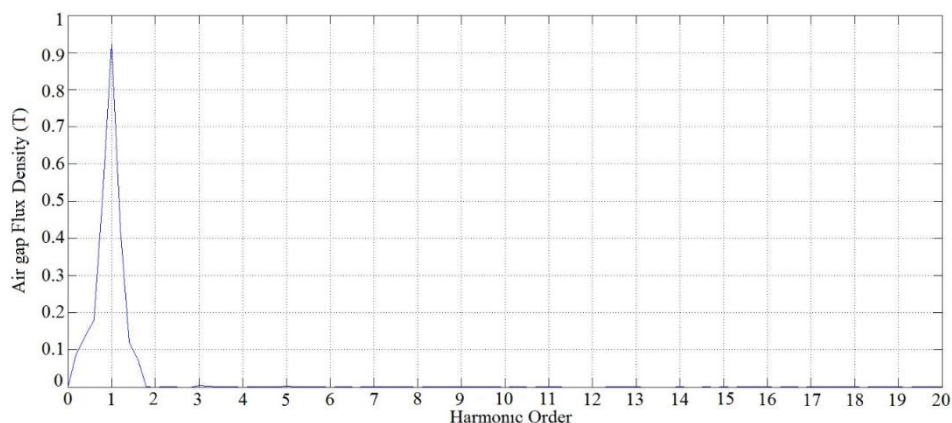
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตช์เป็นแบบพิตช์เศษส่วน ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่อง และ 10/18 ร่อง ตามลำดับ โดยการแสดงผลกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 - 6.21



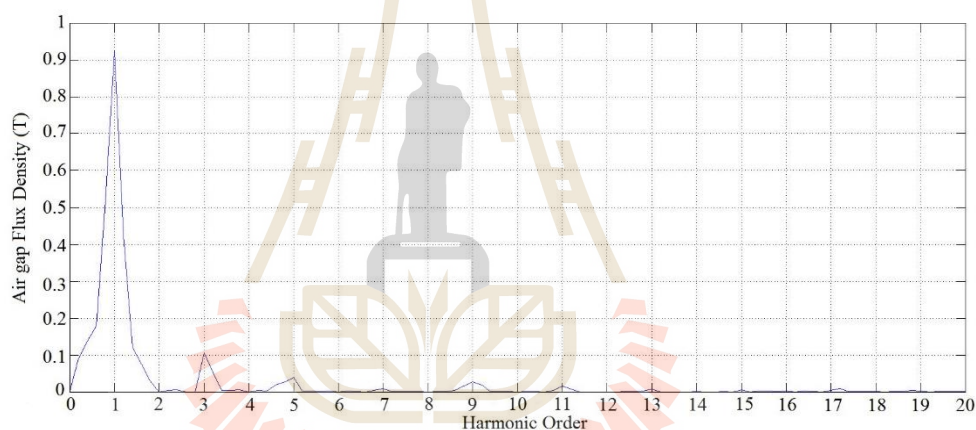
รูปที่ 6.18 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 16/18



รูปที่ 6.19 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 14/18



รูปที่ 6.20 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 12/18



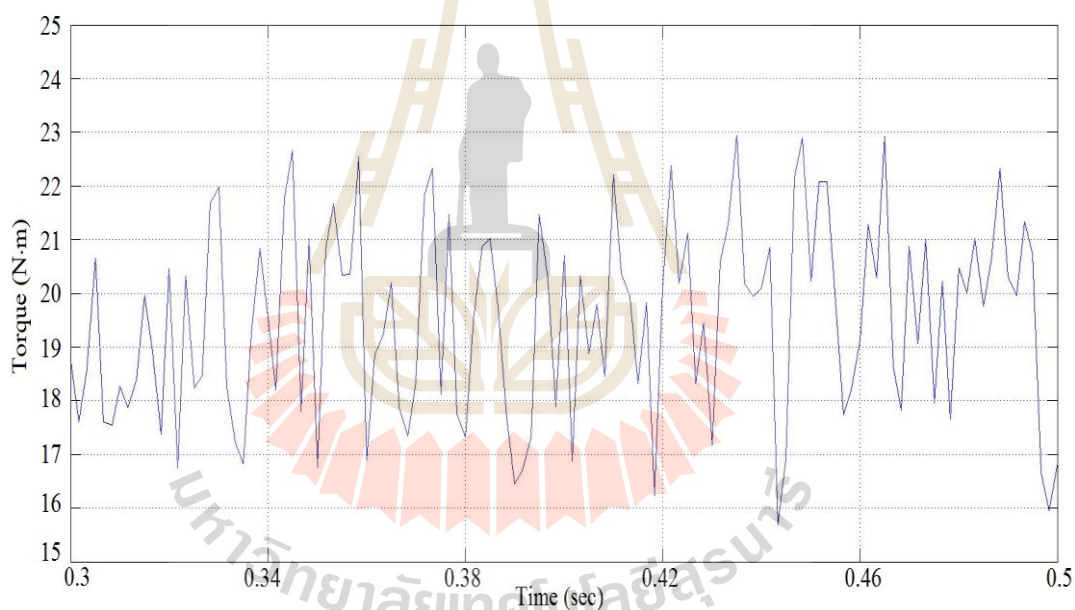
รูปที่ 6.21 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อระยะพิตช์เป็น 10/18

จากรูปที่ 6.18-6.21 เป็นรูปแสดงกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้น จะเกิดขึ้นลำดับที่เป็นเลขจำนวนคี่เท่านั้น และค่ากราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะลดลงเรื่อยๆเมื่อระยะพิตช์ลดลง เมื่อเทียบกับผลของกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศในบทที่ 5 ที่เป็นระบบระยะพิตช์เต็มแล้วพบว่าของระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 16/18 และ 10/18 จะมีค่าฮาร์มอนิกลดลงเล็กน้อย สำหรับในระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 14/18 จะมีบางลำดับฮาร์มอนิกลดลงและสุดท้ายในระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 12/18 ค่าฮาร์มอนิกในทุกลำดับได้หมดไป

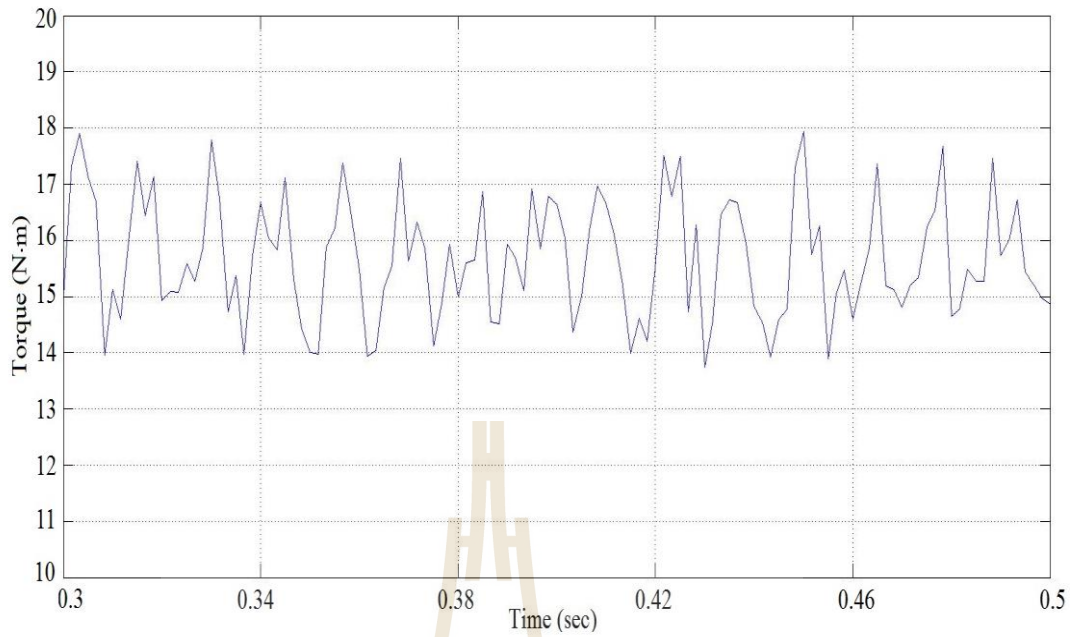
จากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

ดังกล่าวไว้ในบทที่ 5 ซึ่งเมื่อกำหนดค่าจากสูตรคำนวณดังกล่าวจะได้ค่า THD ของระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 16/18 ร่องจะได้ THD ของระบบเป็น 28.68 % ของระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 14/18 ร่องเป็น 27.33% ของระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 12/18 ร่องเป็น 1.50% และของระบบที่มีระยะพิตช์แบบ 10/18 ร่องเป็น 11.65% ตามลำดับ

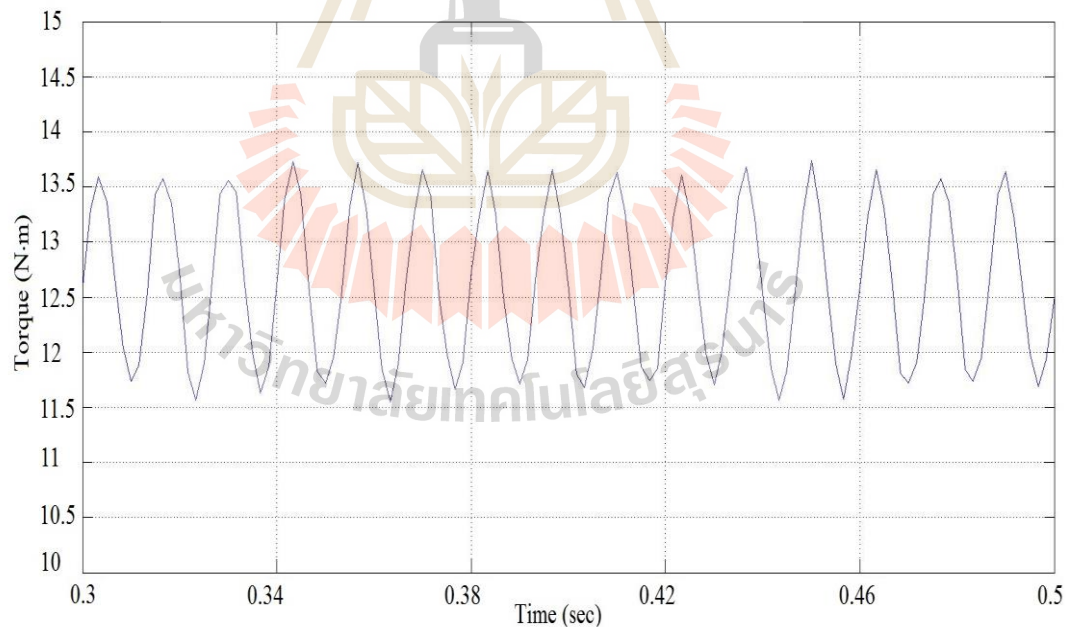
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวดโดยกำหนดระยะพิตช์เป็นแบบพิตช์เศษส่วน ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 16/18 ร่อง, 14/18 ร่อง, 12/18 ร่องและ 10/18 ร่อง ตามลำดับ โดยการแสดงผลกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 6.22-6.25



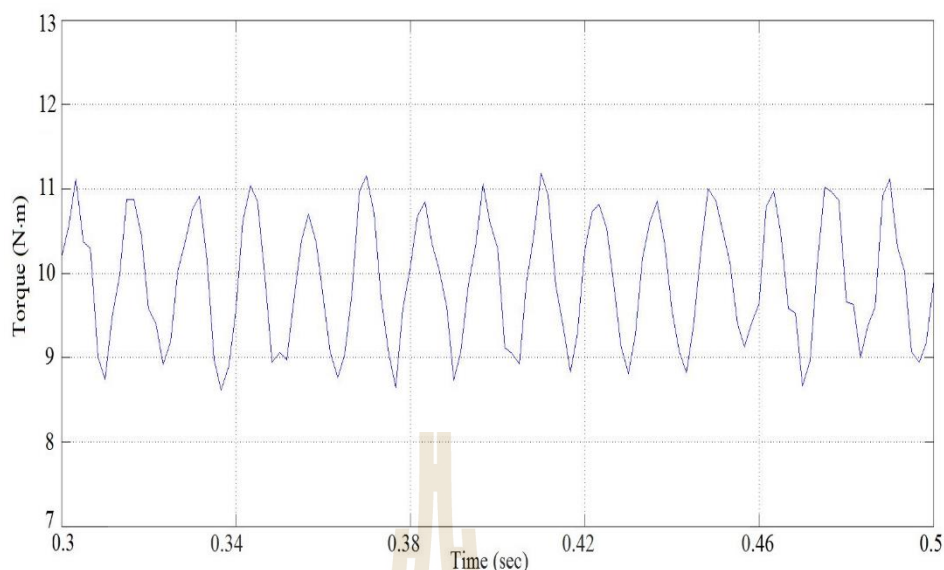
รูปที่ 6.22 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 16/18



รูปที่ 6.23 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิคซ์เป็น 14/18



รูปที่ 6.24 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิคซ์เป็น 12/18



รูปที่ 6.25 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำหนดระยะพิตช์เป็น 10/18

จากรูปที่ 6.22-6.25 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ซึ่งจากการคำนวณค่าแรงบิดนั้นพบว่าเมื่อได้ปรับระยะพิตช์ลดลงเรื่อยๆ จนเมื่อระยะพิตช์เป็น 16/18 กราฟแรงบิดนั้นไม่ค่อยสมดุลทำให้มีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้มากแต่จะมีค่าแรงบิดที่สูง และเมื่อปรับระยะพิตช์ลดลงจนถึงที่ระยะพิตช์เป็น 12/18 พบว่ากราฟแรงบิดจะค่อนข้างมีความสมดุลซึ่งในการทำงานทำให้มีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้น้อยแต่แรงบิดที่เกิดขึ้นจะลดลง

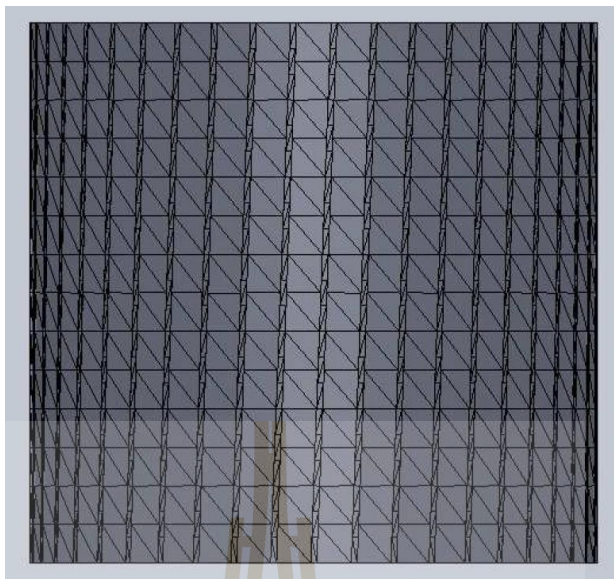
6.4 การออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง

การสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุและผลจากการสั่นสะเทือนก็จะส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เสียสมดุลในการทำงานด้วยเช่นกัน ทำให้ค่าแรงบิดในการทำงานของมอเตอร์เกิดการแกว่งทำงานไม่คงที่ได้และทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง หนึ่งในวิธีที่สามารถแก้ปัญหาการการสั่นของมอเตอร์ได้ก็คือการออกแบบลักษณะมุมเอียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์ให้ร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง หากมีการออกแบบมุมเอียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์ที่ดีจะช่วยเพิ่มการทำงานของมอเตอร์ได้ โดยสังเกตจากค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะมีความเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มากขึ้น ด้วยความเป็นรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศก็จะส่งผลให้การทำงานของมอเตอร์นั้นจะสั่นสะเทือนน้อยลงและการทำงานแรงบิดก็จะคงที่รวมถึงประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มมากขึ้น

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบผลของลักษณะมุมเอียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์ให้ร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มีผลต่อการทำงานที่เป็นความเป็นรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็ก ที่ส่งผลฮาร์มอนิกและแรงบิดที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการออกแบบยังคงส่วนอื่นๆไว้คงเดิมที่มีระยะพิชต์เป็นแบบระยะพิชต์เต็มและมีลักษณะการพันขดลวดแบบรวม แล้วปรับเฉพาะลักษณะมุมเอียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์ ซึ่งในการออกแบบนั้นจะเริ่มจากการวางตัวของแท่งโรเตอร์ที่เป็นลักษณะตรงแล้วจะเริ่มเฉียงออกไปทีละ $1/4$ ของร่องโรเตอร์ โดยในรูปแบบแรกที่จะใช้ในการจำลองผลจะเลือกวางมุมเอียงไปจนถึงที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่เป็น $1/4$ ของร่องโรเตอร์แล้วรูปแบบที่สองที่จะใช้ในการจำลองผลจะเพิ่มการวางมุมเอียงไปอีกจนถึงมีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่เป็น $2/4$ หรือครึ่งของร่องโรเตอร์ สำหรับรูปแบบที่สามก็จะมีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่เป็น $3/4$ ของร่องโรเตอร์ และสำหรับรูปแบบสุดท้ายก็จะมีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่เป็น $4/4$ หรือเต็มของร่องโรเตอร์ โดยในลำดับต่อไปจะแสดงภาพชิ้นงานของการวางมุมเอียงของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มีร่องโรเตอร์เฉียงและแสดงภาพตัดกริดของชิ้นงาน ซึ่งได้ใช้โปรแกรม Solidworks ในการวาดชิ้นงานและตัดกริด โดยในที่นี้ขอยกตัวอย่างลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่เป็นครึ่งร่องและเต็มร่องของร่องโรเตอร์ตามลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 6.26-6.29



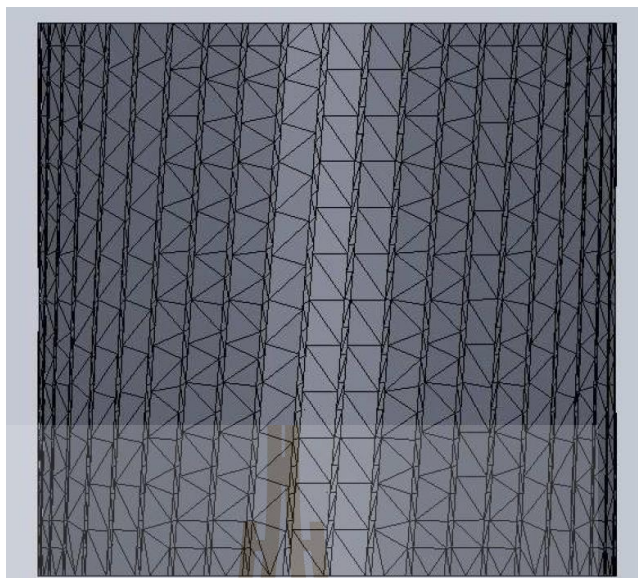
รูปที่ 6.26 ภาพชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.27 การตีกริดของชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



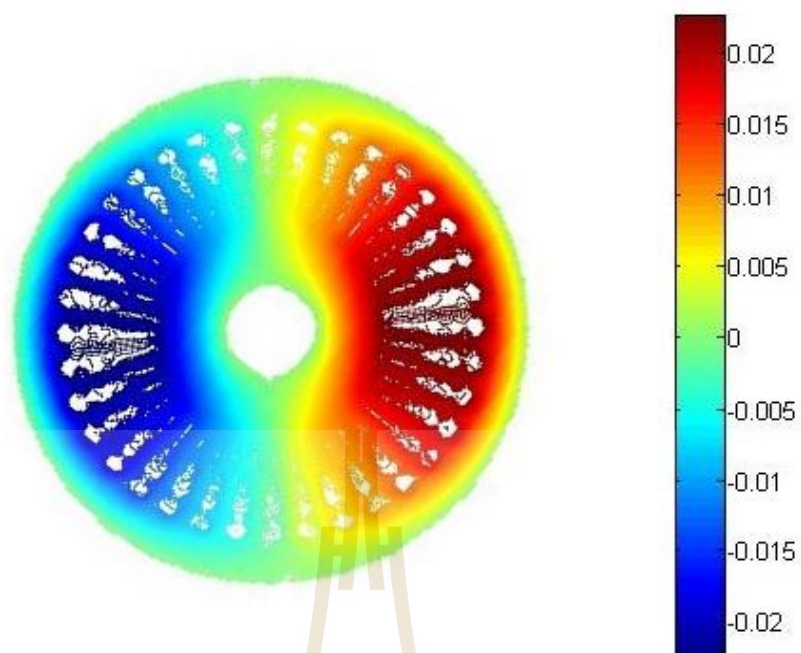
รูปที่ 6.28 ภาพชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์



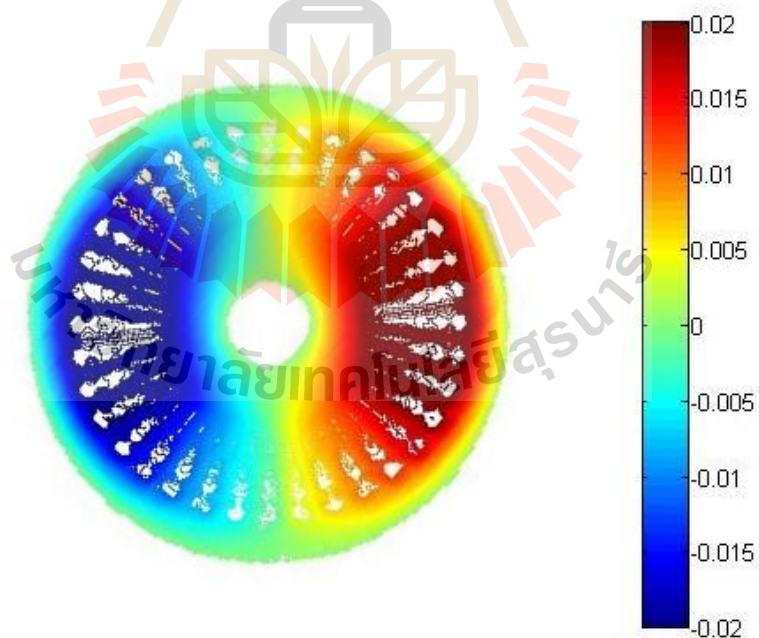
รูปที่ 6.29 การตีกริดของชิ้นงานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีร่องโรเตอร์เฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์

6.5 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง

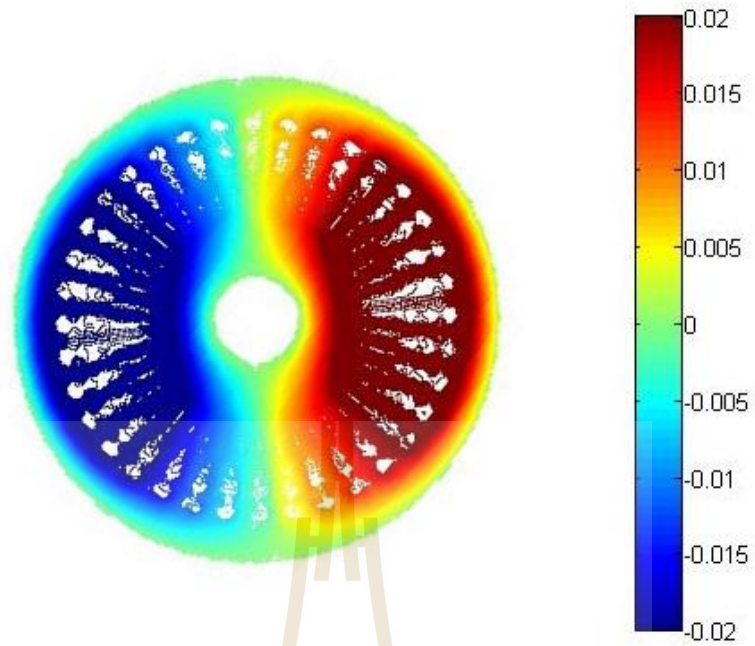
สำหรับการจำลองผลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยการจำลองผลของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก กราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิด โดยสำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบลักษณะมุมเอียงในการวางตัวของแท่งโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ $1/4$ ของร่องโรเตอร์, $2/4$ หรือครึ่งของร่องโรเตอร์, $3/4$ ของร่องโรเตอร์ และสุดท้ายที่ $4/4$ หรือเต็มของร่องโรเตอร์ ตามลำดับ โดยการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.30-6.33



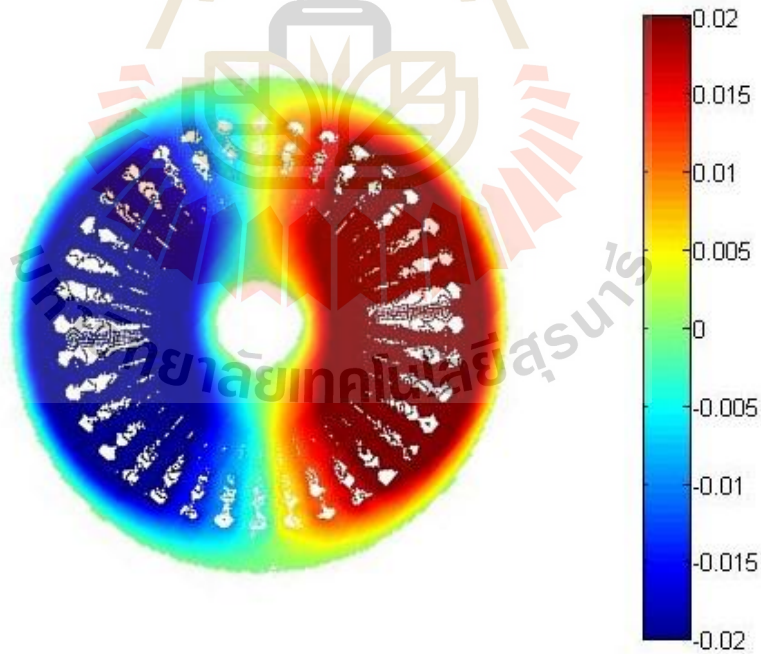
รูปที่ 6.30 ภาคนตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.31 ภาคนตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



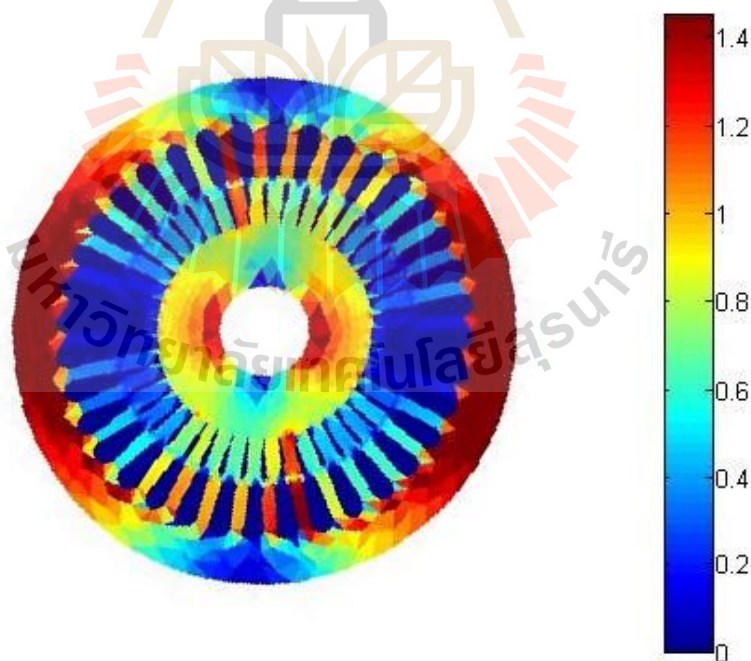
รูปที่ 6.32 ภาดตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์



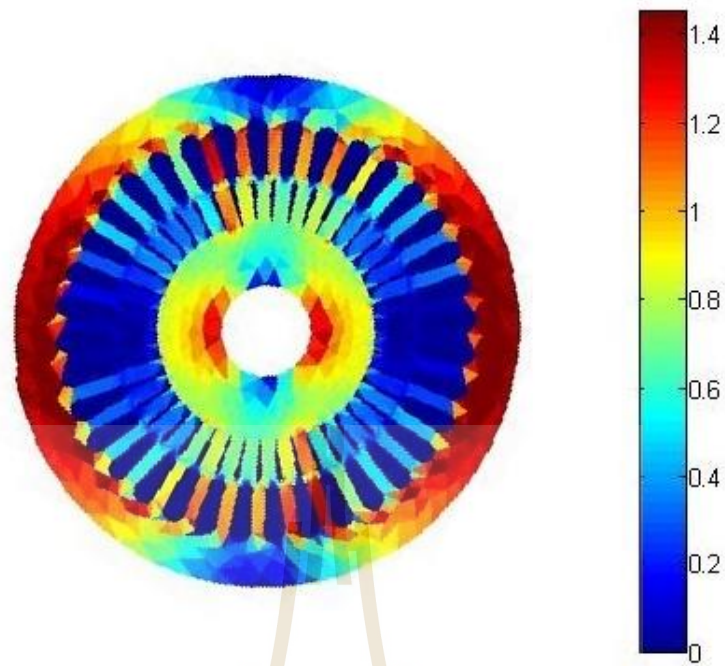
รูปที่ 6.33 ภาดตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์

จากรูปที่ 6.30-6.33 เป็นรูปแสดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายบริเวณทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ต่างๆกัน โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นการแสดงถึงลักษณะของขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสเข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งจากการจำลองผลนั้นพบว่าในช่วงการทำงานที่เป็นสถานะคงตัวของมอเตอร์ระบบที่ออกแบบ โรเตอร์ร่องเฉียงมาทั้ง 4 แบบนั้น พบว่าลักษณะค่าแอมพลิจูดของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีความใกล้เคียงกันในแต่ละลักษณะการเรียงของร่องโรเตอร์ สามารถสังเกตได้จากความเข้มของสีที่ไม่ต่างกันมากและพบว่าลักษณะการกระจายของขั้วบวกและขั้วลบนั้นกว้างขึ้นเมื่อร่องมีความเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆ สังเกตได้จากลักษณะการกระจายของสีอีกเช่นกัน

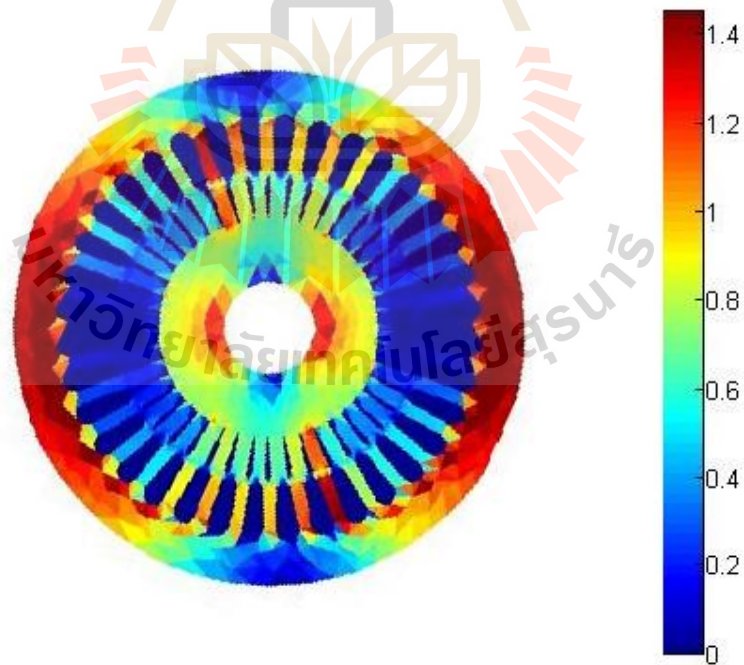
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์, 2/4 หรือครึ่งของร่องโรเตอร์, 3/4 ของร่องโรเตอร์และสุดท้ายที่ 4/4 หรือเต็มของร่องโรเตอร์ตามลำดับ โดยการจำลองค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.34-6.37



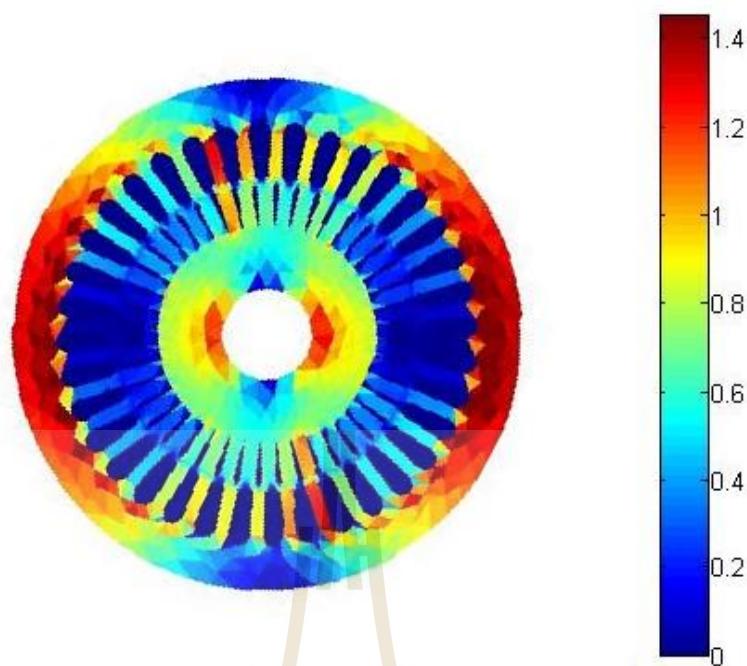
รูปที่ 6.34 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.35 ภาพตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.36 ภาพตัดขวางสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์

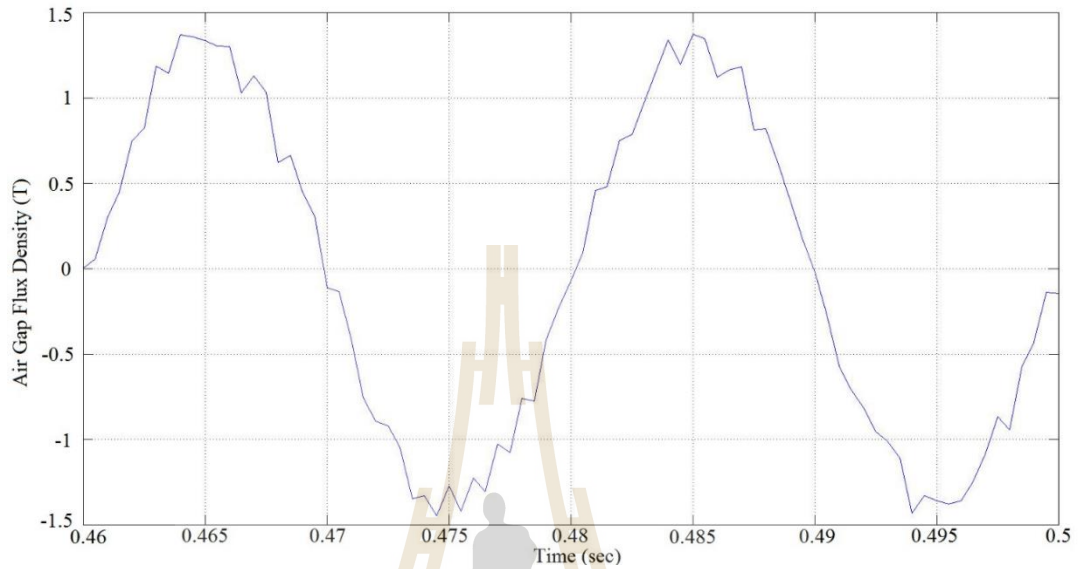


รูปที่ 6.37 ภาพตัดขวางสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่อง โรเตอร์

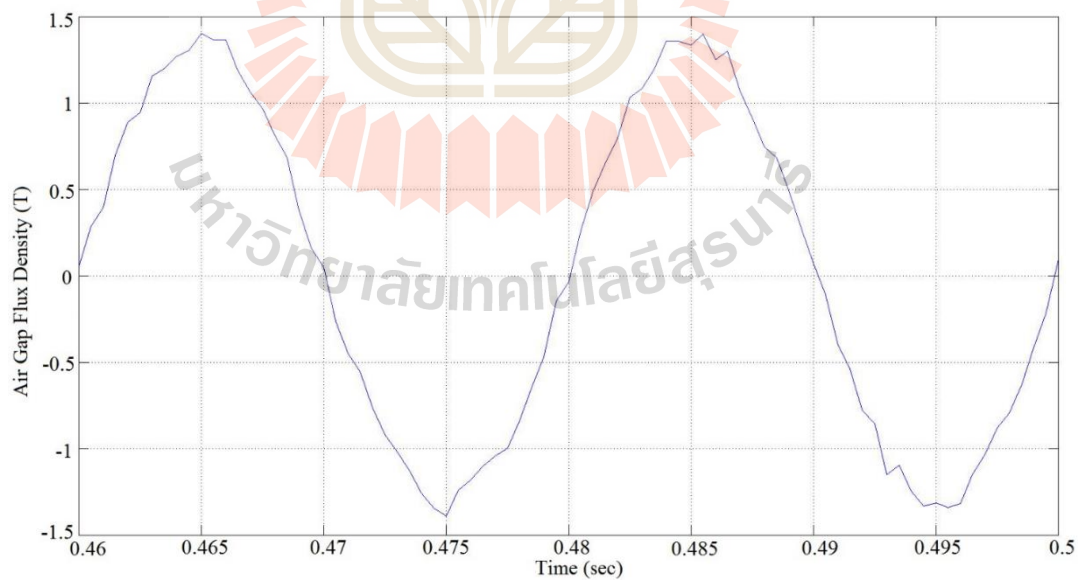
จากรูปที่ 6.34-6.37 เป็นรูปแสดงถึงค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ต่าง ๆ กัน ในการจำลองผลของสนามแม่เหล็กครั้งนี้ยังมีลักษณะการกระจายที่มีแนวโน้มเช่นเดิม โดยผลลัพธ์ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลจะเกิดขึ้นได้แค่ในแกนเหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์อีกเช่นกัน และยังคงมีลักษณะการกระจายเช่นเดียวกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ซึ่งก็คือบริเวณที่มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่มีค่าแอมพลิจูดสูง ในบริเวณปริมาตรนั้นก็ยังมีค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่าบวกที่สูงและจากการจำลองผลพบว่าเมื่อร่องโรเตอร์นั้นเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กนั้นจะไม่ต่างกันมาก แต่เมื่อร่องโรเตอร์เฉียงจนเต็มร่องลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กค่อนข้างสมดุล จะไม่เข้าไปที่สีใดสีหนึ่งไม่เหมือนแบบที่ร่องโรเตอร์เฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์ที่มีลักษณะสีแดงที่เข้มมากเกินไป

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์, 2/4 หรือครึ่งของร่องโรเตอร์, 3/4 ของร่องโรเตอร์และสุดท้ายที่ 4/4 หรือเต็มของร่องโรเตอร์ ตามลำดับ โดยการแสดงผลกราฟค่าสนาม

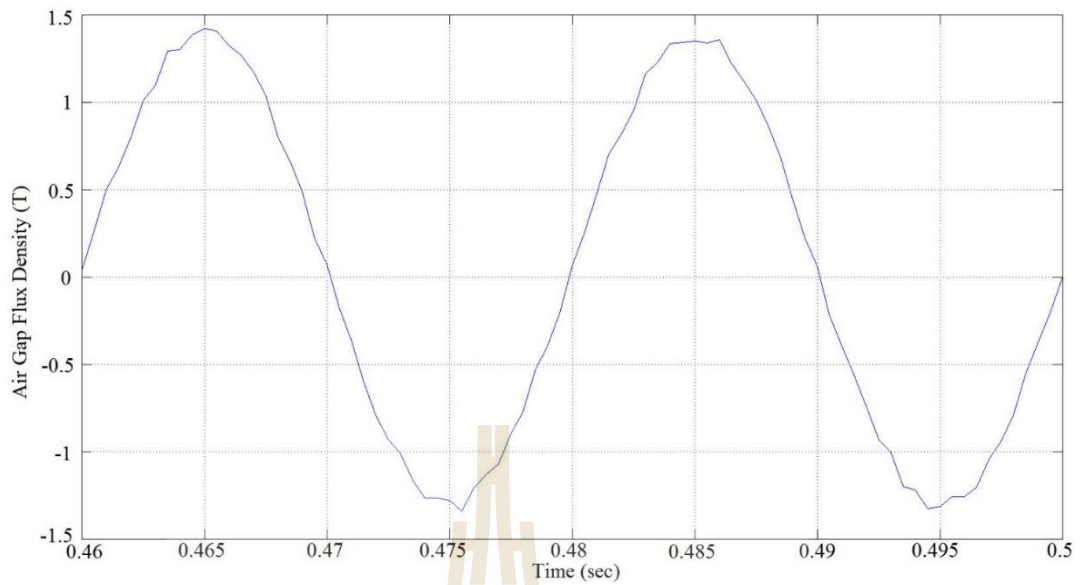
แม่เหล็กในช่องว่างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.38-6.41



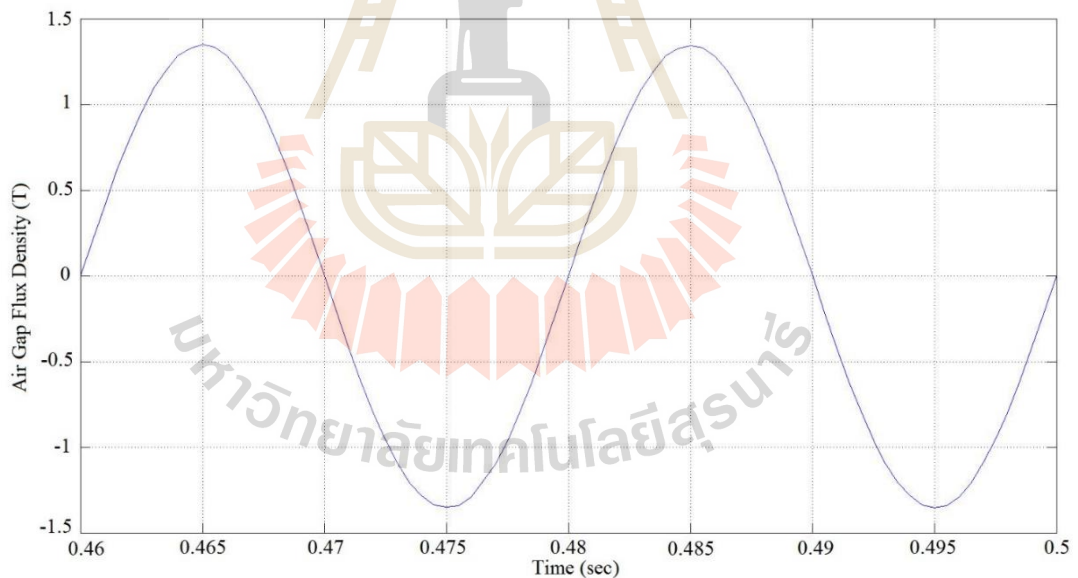
รูปที่ 6.38 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.39 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.40 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์

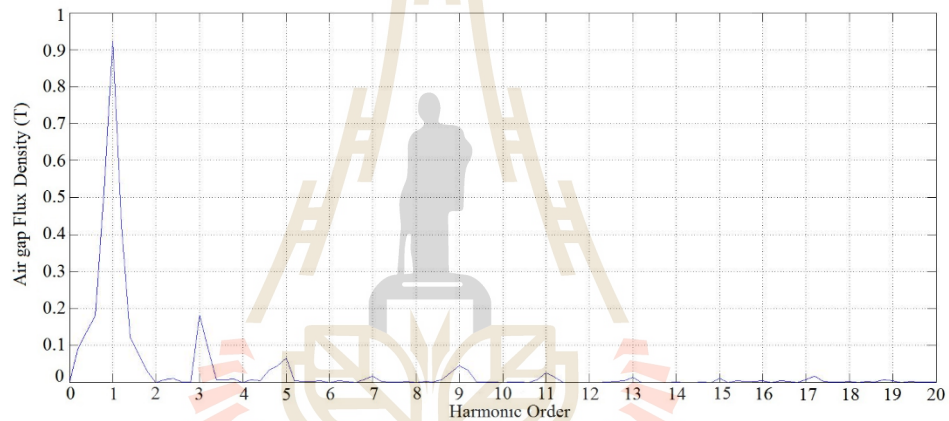


รูปที่ 6.41 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์

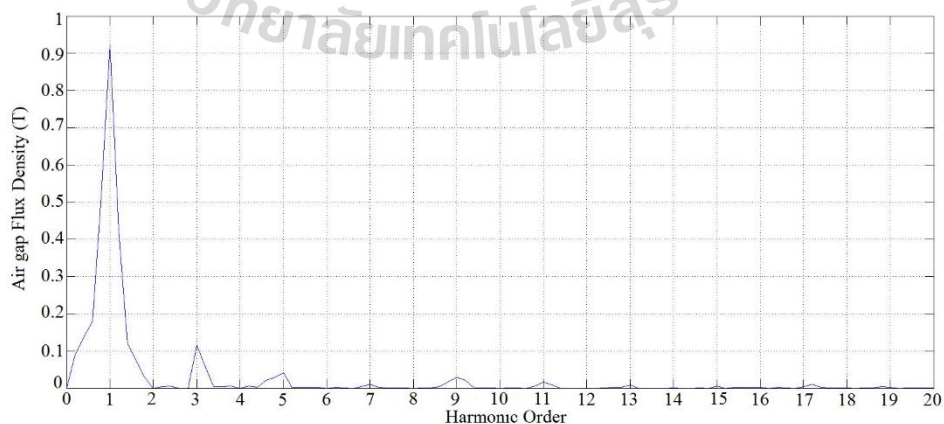
จากรูปที่ 6.38-6.41 เป็นรูปแสดงการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศในระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในช่วงสถานะคงตัว พบว่าในแบบลักษณะร่องโรเตอร์ที่เป็นแบบร่องเฉียง 1/4 ของร่องโรเตอร์จะมีรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนมากกว่าร่องเฉียงในแบบอื่นๆ โดยที่ลักษณะ

ร่องโรเตอร์ที่เป็นร่องเฉียงในแบบอื่นจะค่อนข้างมีความเป็นรูปคลื่นไซน์และแบบที่เป็นร่องเฉียงแบบเต็มร่องจะเหมือนรูปคลื่นไซน์มากที่สุด

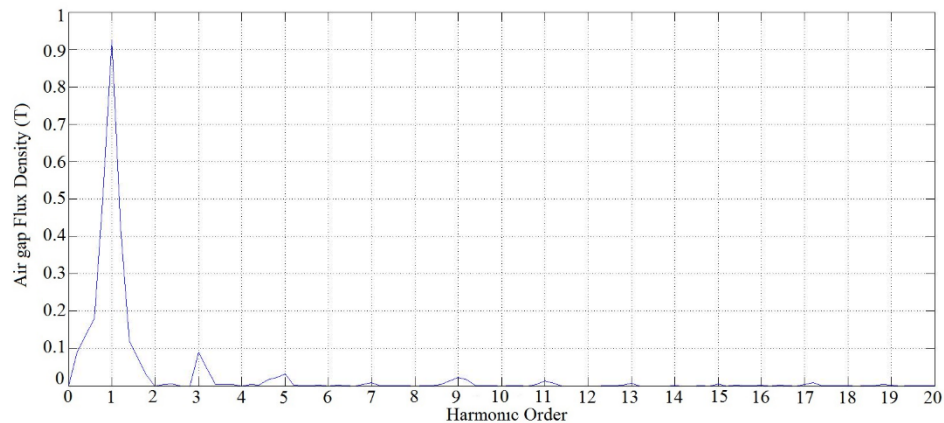
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์, 2/4 หรือครึ่งของร่องโรเตอร์, 3/4 ของร่องโรเตอร์และสุดท้ายที่ 4/4 หรือเต็มของร่องโรเตอร์ ตามลำดับโดยการแสดงผลกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.42-6.45



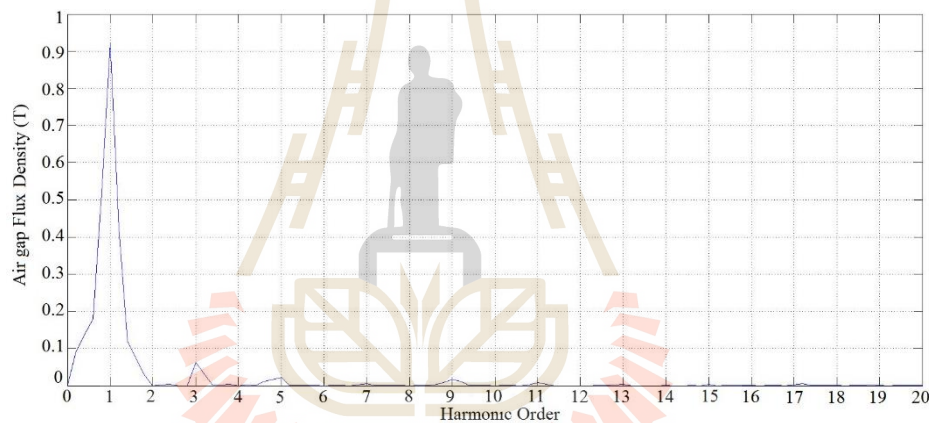
รูปที่ 6.42 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.43 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.44 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเทียบกับ 3/4 ของร่อง โรเตอร์



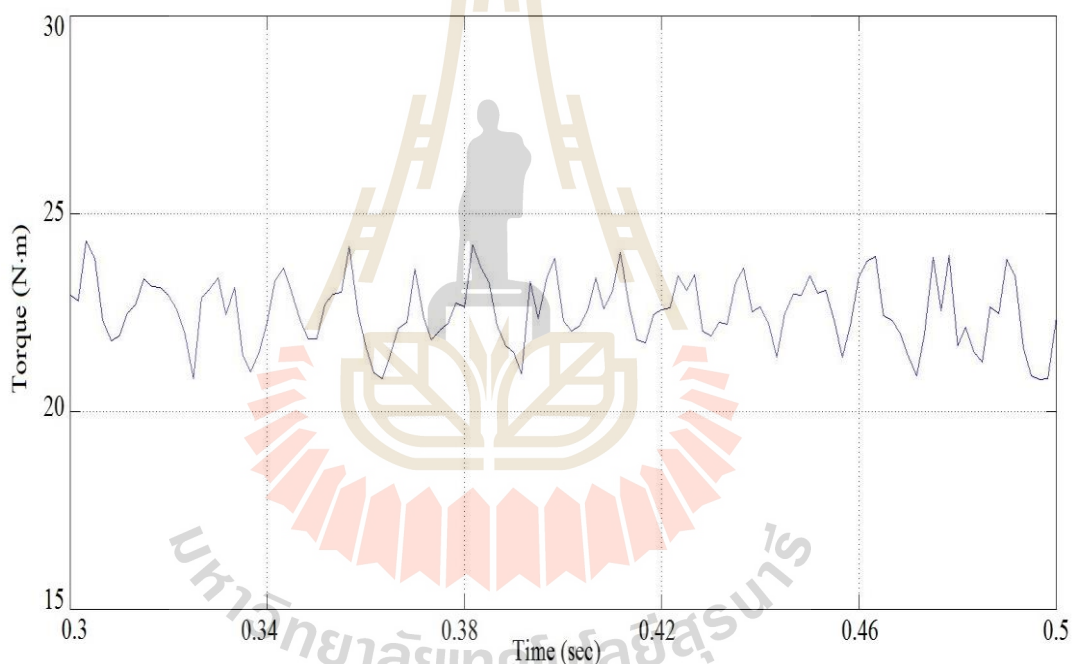
รูปที่ 6.45 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อเทียบกับเต็มของร่อง โรเตอร์

จากรูปที่ 6.42-6.45 เป็นรูปแสดงฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะเกิดขึ้นลำดับที่เป็นเลขจำนวนคี่เท่านั้น และค่าการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะลดลงเรื่อยๆเมื่อลักษณะร่องโรเตอร์นั้นยิ่งมากขึ้น แล้วพบว่าตั้งแต่ร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงครึ่งร่องขึ้นไปจะมีลักษณะการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นจะเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย

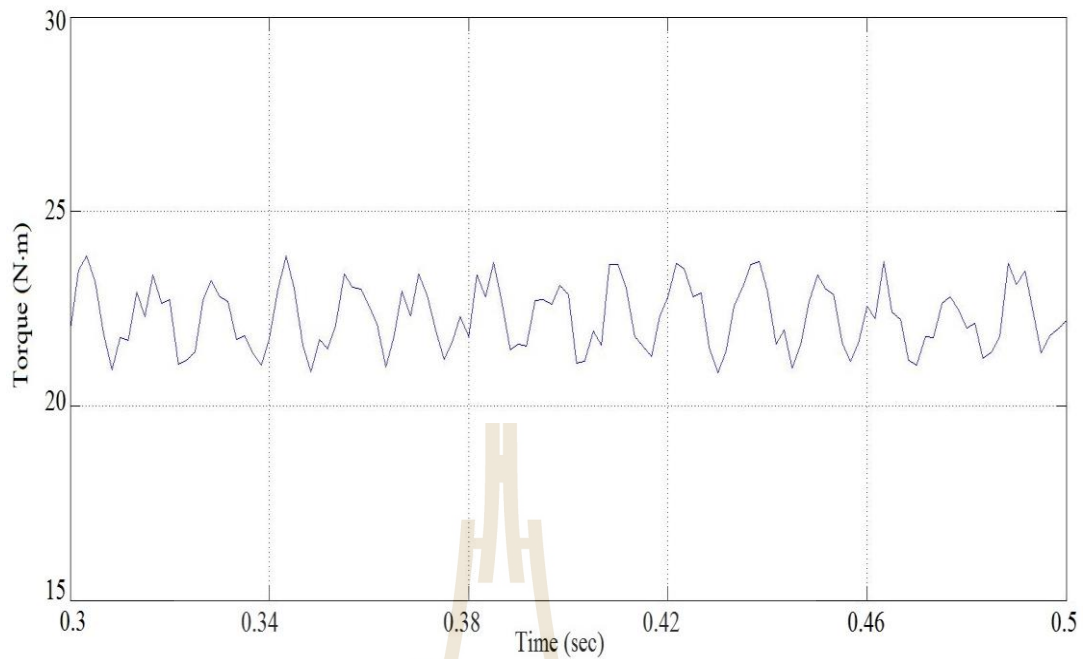
จากกราฟการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นสามารถนำไปคำนวณหาความเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังกล่าวไว้ข้างต้นซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรคำนวณดังกล่าวจะได้ค่า THD ของระบบที่มีลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงที่ 1/4 ร่องเป็น 21.25 % ของระบบที่มีลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงที่

2/4 หรือครึ่งของร่องโรเตอร์เป็น 12.98% ของระบบที่มีลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงที่ 3/4 ร่องเป็น 11.25% และของระบบที่มีของระบบที่มีลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มของร่องโรเตอร์เป็น 8.77%

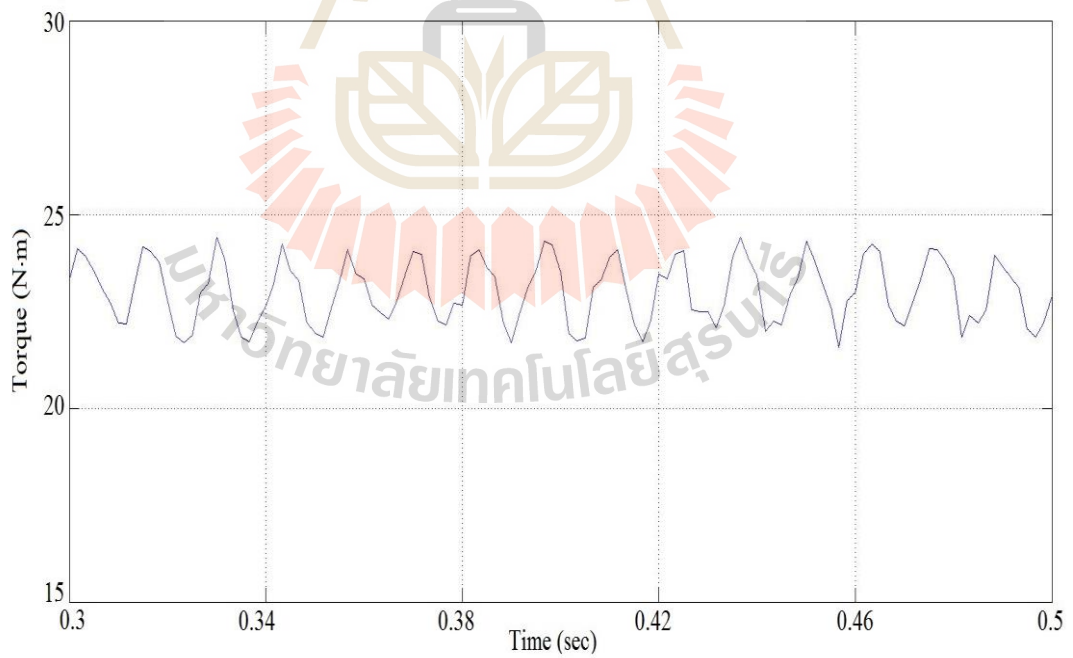
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ที่มีลักษณะร่องโรเตอร์เป็นแบบร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์, 2/4 หรือครึ่งของร่องโรเตอร์, 3/4 ของร่องโรเตอร์และสุดท้ายที่ 4/4 หรือเต็มของร่องโรเตอร์ ตามลำดับโดยการแสดงผลกราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.46-6.49



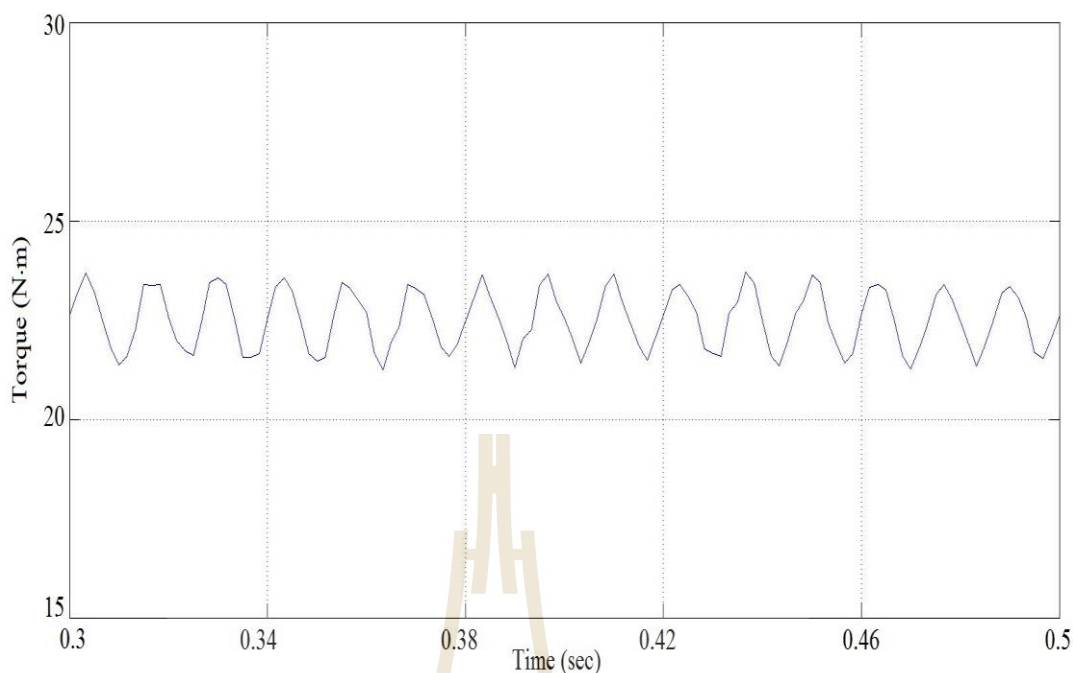
รูปที่ 6.46 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ 1/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.47 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ครึ่งของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.48 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่ 3/4 ของร่องโรเตอร์



รูปที่ 6.49 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อร่องเฉียงที่เต็มของร่องโรเตอร์

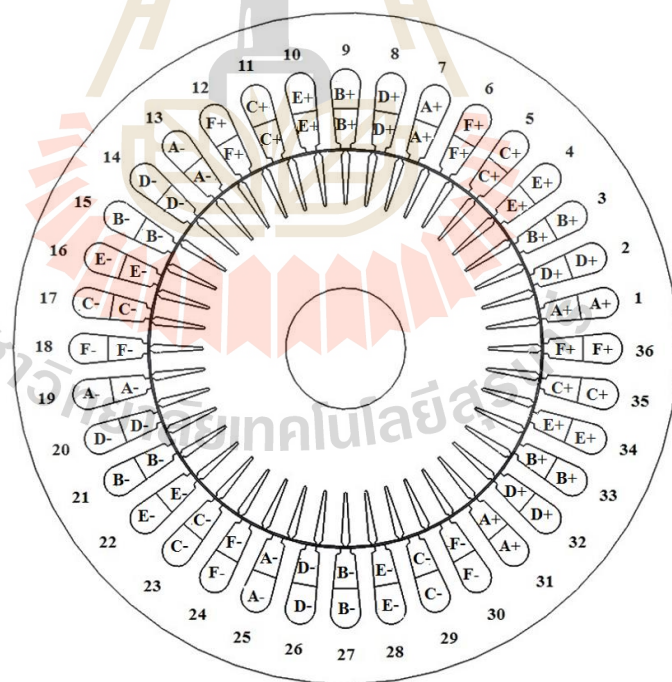
จากรูปที่ 6.46-6.49 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการคำนวณแรงบิดเมื่อลักษณะร่อง โรเตอร์นั้นเฉียงจากจุดเริ่มต้นจนถึงเฉียงเต็มร่องจะพบว่าค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับเดียวกันไม่ต่างกันมากและพบว่าเมื่อร่องเฉียงที่ $1/4$ จนถึงที่ครึ่งของร่อง โรเตอร์ กราฟแรงบิดจะไม่ค่อยสมดุลและเมื่อร่องเฉียงที่ $3/4$ จนถึงที่เต็มของร่อง โรเตอร์พบว่ากราฟแรงบิดจะค่อนข้างมีความสมดุลแล้วไม่ต่างกันมาก

6.6 การออกแบบการจัดวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์

อีกหนึ่งในวิธีการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้คุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ให้ดีขึ้น โดยยังคงโครงสร้างเดิมของมอเตอร์ไว้นั้นก็คือการออกแบบในส่วนของการจัดวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้การออกแบบการจัดวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ 2 แบบด้วยกันโดยแบบแรกเป็นแบบที่ใช้ในบทที่ 5 คือการวางตัวแบบกระจาย ซึ่งการจัดวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในแบบนี้จะใช้ขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกันหากจำนวนสลีตของแต่ละขั้วและแต่ละเฟสมีจำนวนตั้งแต่ 2 ช่องขึ้นไป โดยในการวางตัวแบบกระจายจะช่วยลดผลกระทบของฮาร์มอนิก แต่การวางตัวของขดลวดแบบกระจายซึ่งมีขดลวดอยู่ในร่องที่แยกกัน แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดจึงเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการวางตัว

ของขดลวดแบบกระจายจึงมีค่าน้อยกว่าการวางตัวของขดลวดแบบรวม ในหัวข้อนี้จะเลือก ออกแบบและจำลองการจัดวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในแบบที่ 2 คือการวางตัวแบบรวมในการ วางตัวแบบนี้จะใช้ขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกันหากจำนวนสล็อตของแต่ละขั้วและแต่ ละเฟสเท่ากับ 1 ช่อง ในการวางตัวแบบรวมกลุ่มของขดลวดจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อม กันจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่สูงกว่าการวางตัวแบบกระจาย

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพร้อมจำลองผลของการออกแบบการวางตัวของขดลวด ในร่องสเตเตอร์แบบรวมที่มีผลต่อค่าคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ ซึ่งในการออกแบบจะให้ ขดลวดที่ใช้ในการพันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกัน โดยกำหนดให้มีจำนวนสล็อตของแต่ละขั้วของแต่ละ เฟสเท่ากับ 1 ช่อง สำหรับการออกแบบวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบรวม สามารถทำ ได้โดยกำหนดการวางตัวของขดลวดในชั้นแรกยังคงอิงโครงสร้างเดิมที่ร่องที่สเตเตอร์ 1 ให้เริ่ม เป็นเฟส A และตั้งแต่องสเตเตอร์ในลำดับต่อไป ก็กำหนดให้เป็น D,B,E,C,F ตามลำดับ จน ครบ 36 ร่อง แล้วในชั้นที่สองก็ดำเนินการเช่นเดียวกันกับชั้นแรก ซึ่งในการออกแบบการวางตัว ของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบรวม สามารถแสดงได้ดังรูป 6.50

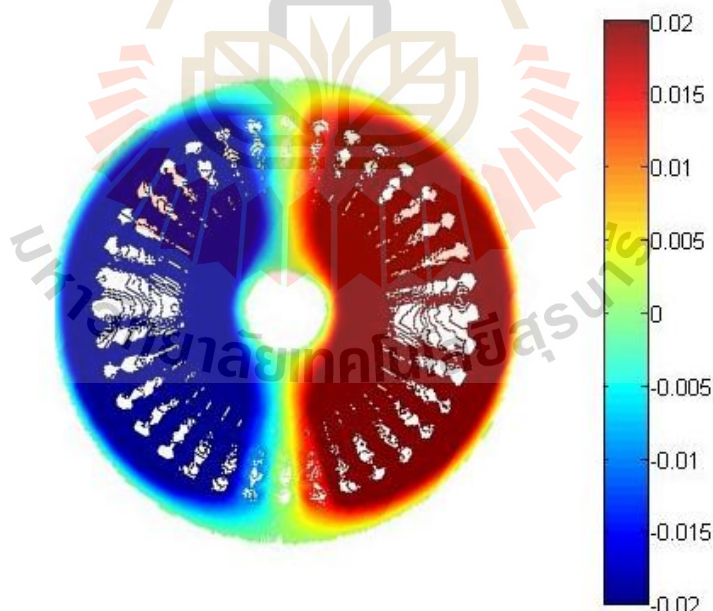


รูปที่ 6.50 การวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบรวม

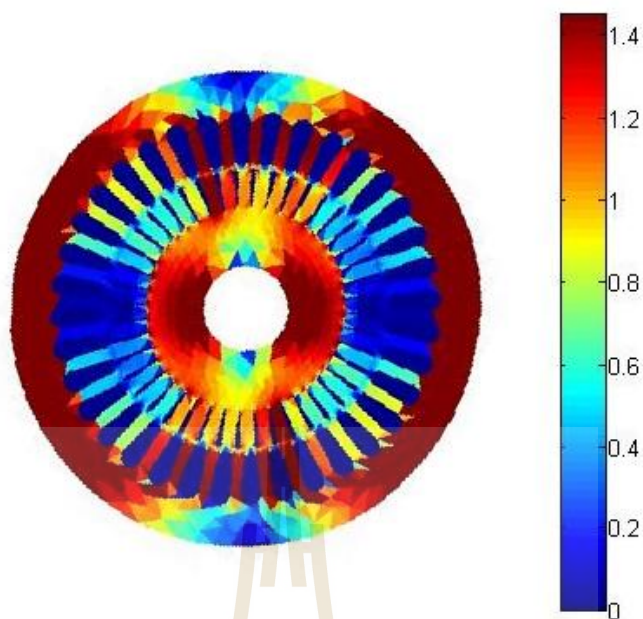
เมื่อได้ดำเนินการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ให้เป็นแบบการออกแบบการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบรวมแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะนำโมเดลนี้เข้าสู่กระบวนการไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อคำนวณหาผลเฉลยอื่นๆต่อไป อาทิ เช่น หาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เป็นต้น

6.7 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม

สำหรับการจำลองผลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยการจำลองผลของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก กราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิด โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.51-6.55



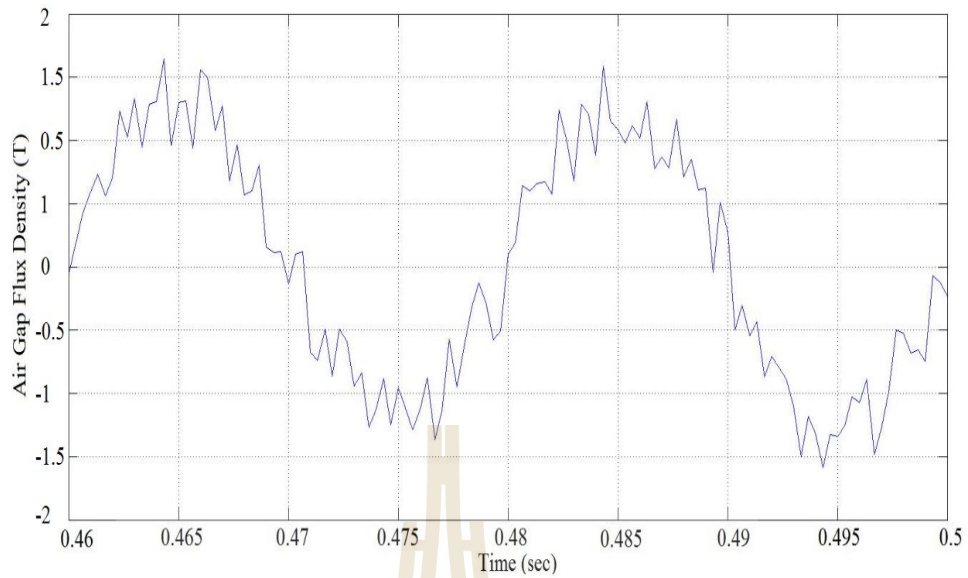
รูปที่ 6.51 ภาคตัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) เมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม



รูปที่ 6.52 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) เมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม

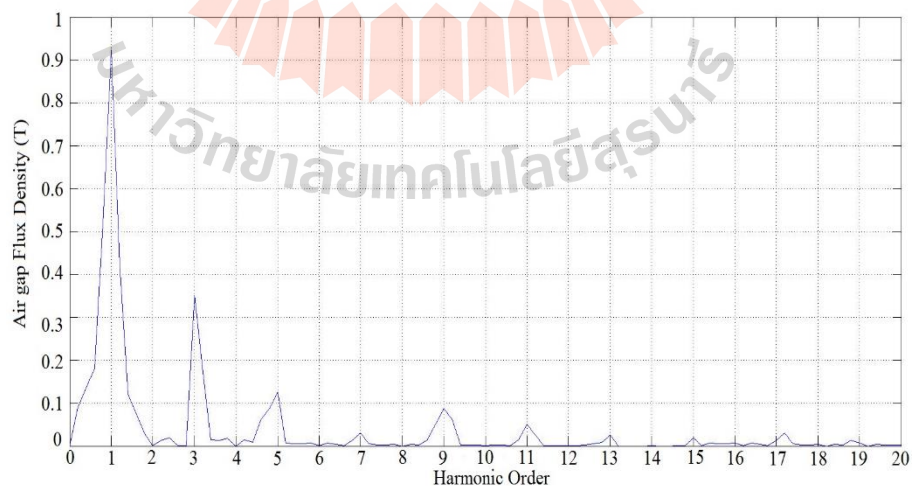
จากรูปที่ 6.51 เป็นรูปแสดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายบริเวณทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม ซึ่งจากการจำลองผลในช่วงการทำงานที่เป็นสถานะคงตัวของมอเตอร์นั้น พบว่าลักษณะค่าแอมพลิจูดของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีลักษณะการกระจายที่ค่อนข้างหนาแน่นสามารถสังเกตได้จากความเข้มของสีที่เกิดขึ้นและจากผลการจำลองยังพบว่าลักษณะขั้วที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนทั้งในส่วนของขั้วบวกและขั้วลบ

จากรูปที่ 6.52 เป็นรูปแสดงถึงค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม โดยผลลัพธ์ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองยังคงมีลักษณะการกระจายเช่นเดียวกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และจากการจำลองผลพบว่าเมื่อออกแบบการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กค่อนข้างมีค่าสูงมากๆ

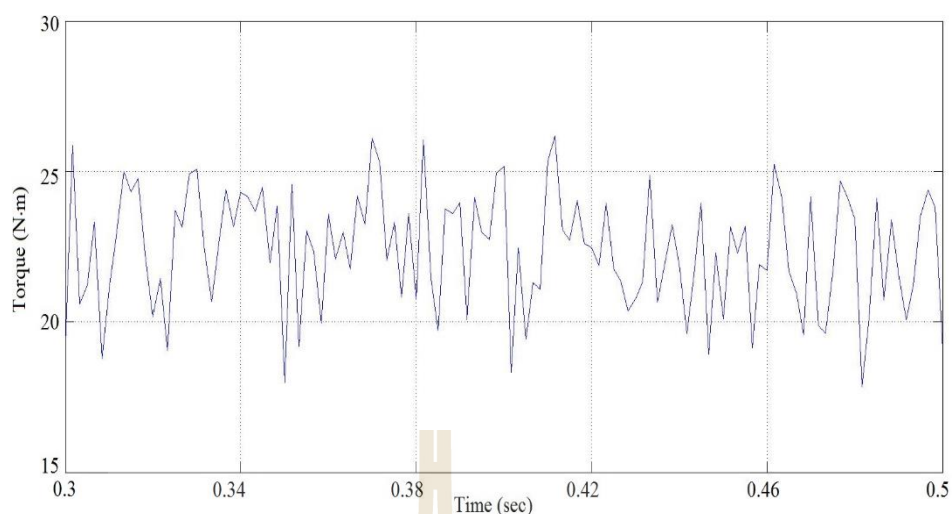


รูปที่ 6.53 ค่าการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม

จากรูปที่ 6.53 เป็นรูปแสดงการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศในระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในช่วงสถานะคงตัว พบว่าเมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวมจะมีค่าสนามแม่เหล็กที่สูงและมีรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผลการจำลองที่ได้ออกแบบมาในแบบก่อนๆ



รูปที่ 6.54 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม



รูปที่ 6.55 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวม

จากรูปที่ 6.54 เป็นรูปแสดงกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ เมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม โดยค่าการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูงมากกว่าการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบอื่น ๆ

จากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังกล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรคำนวณดังกล่าวจะได้ค่า THD ของระบบเมื่อวางตัวขดลวดแบบรวมเป็น 42.38%

จากรูปที่ 6.55 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส จากการคำนวณแรงบิดเมื่อการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวมพบว่ากราฟแรงบิดของระบบนั้นมีค่าสูง แต่ก็มีลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยสมดุลทำให้มีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้

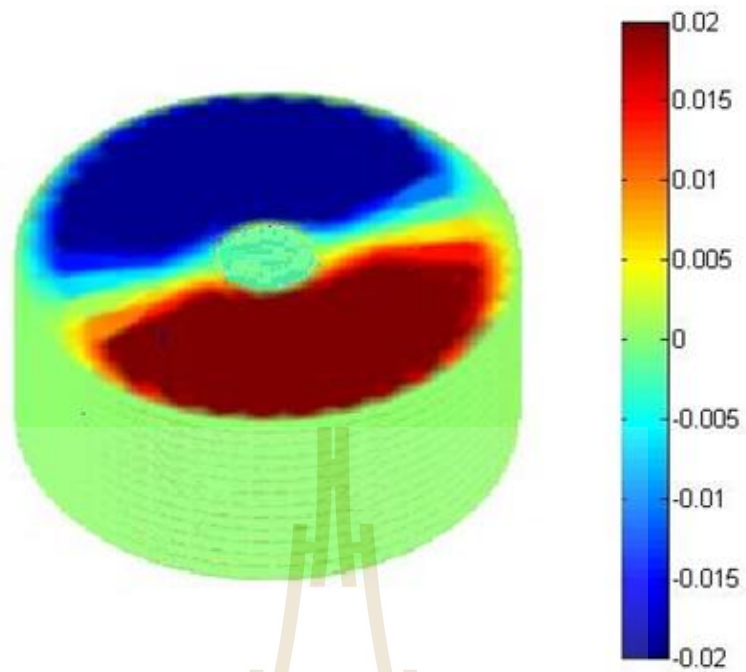
6.8 การวิเคราะห์ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อดำเนินการออกแบบเพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์

สำหรับการจำลองผลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสทั้งหมดนั้น สามารถนำไปสู่การวิเคราะห์ผลการจำลองเพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงานให้กับมอเตอร์ในด้านของการทำงานให้มีความสมดุล ไม่เกิดการสั่นสะเทือน มีการเกิดฮาร์มอนิกที่มีค่าน้อยและมีค่าแรงบิดที่สูง โดยในหัว

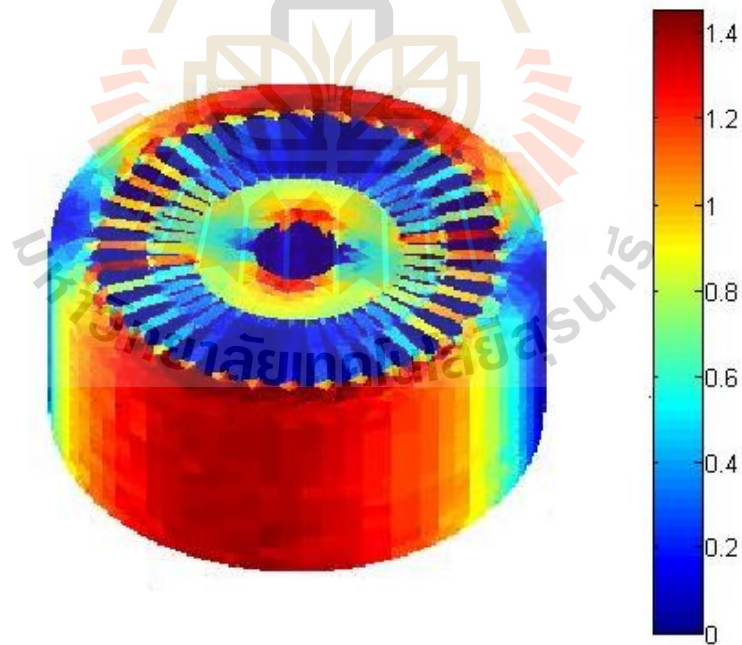
ข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงภาพโดยรวมของกระบวนการจำลองทั้งหมดตั้งแต่ ลักษณะของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ลักษณะของค่าสนามแม่เหล็ก ลักษณะกราฟของค่าสนามเหล็กในช่องว่างอากาศ ลักษณะกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ ค่า THD จากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและลักษณะกราฟแรงบิดรวมถึงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด

จากผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของระบบทั้งหมดพบว่า ระบบที่ออกแบบมาที่ดีจะมีลักษณะการกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่แสดงให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็กที่ชัดเจน สมดุลและมีค่าที่สูง โดยจากผลการจำลองของระบบการออกแบบระยะพิตช์จะสังเกตเห็นได้ว่าแบบที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 12/18 ร่องและจากการออกแบบลักษณะร่อง โรเตอร์พบว่าแบบที่ดีที่สุดคือแบบเฉียงเต็มร่องเพราะเป็นแบบที่จะเห็นขั้วแม่เหล็กที่ชัดเจนและมีค่าสูง ส่วนการออกแบบวางตัวขดลวดแบบรวมให้ค่าที่สูงแต่การกระจายไม่ค่อยสมดุลยังเป็นการออกแบบที่ไม่ค่อยดีไม่สามารถทำให้คุณลักษณะต่างๆดีขึ้น สามารถแสดงผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ดีในแบบ 3 มิติได้ดังรูปที่ 6.56 โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะสามารถนำไปคำนวณหาผลเฉลยอื่นๆ เพื่อวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกและแรงบิดของระบบที่ดีได้ เพราะฉะนั้นผลการจำลองของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจึงสามารถบ่งบอกถึงมอเตอร์ที่มีระบบการทำงานที่ดีได้

จากผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบทั้งหมดจะพบว่า ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กจะมีแนวคิดคล้ายๆกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก็จะต้องแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายที่ชัดเจน สมดุลและมีค่าที่สูงซึ่งจากผลการจำลองของระบบการออกแบบระยะพิตช์ก็ยังเป็นแบบที่มีระยะพิตช์เป็นแบบ 12/18 ร่องที่มีค่าลักษณะต่างที่ดีที่สุดและจากการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์พบว่าเมื่อร่องโรเตอร์นั้นเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กนั้นจะไม่ต่างกันมาก จึงสรุปได้ว่าทุกแบบของร่องโรเตอร์ที่เฉียงส่งผลที่ดีต่อสนามแม่เหล็ก ส่วนการออกแบบวางตัวขดลวดแบบรวมก็ยังคงลักษณะแนวโน้มเป็นแบบที่ไม่ดีเช่นเดิมและสามารถแสดงผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กที่ดีในแบบ 3 มิติได้ดังรูปที่ 6.57

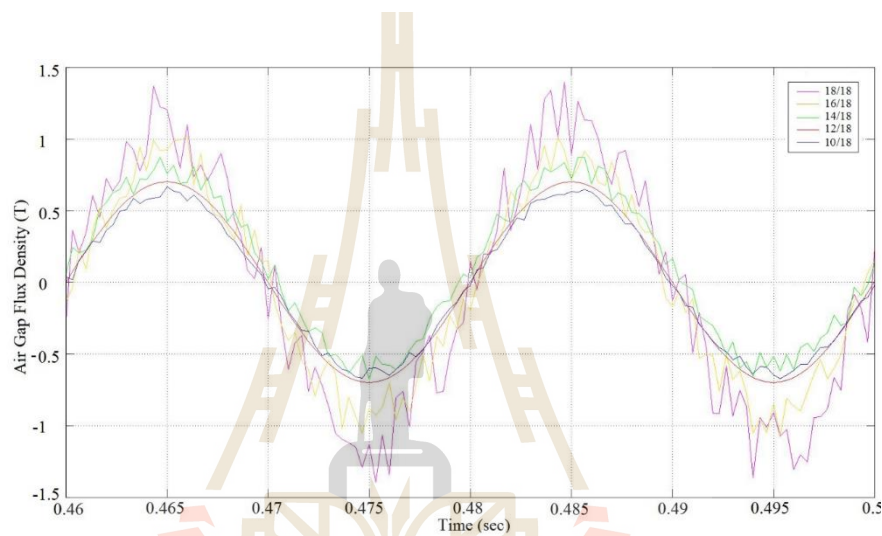


รูปที่ 6.56 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติของระบบที่ออกแบบที่ดี

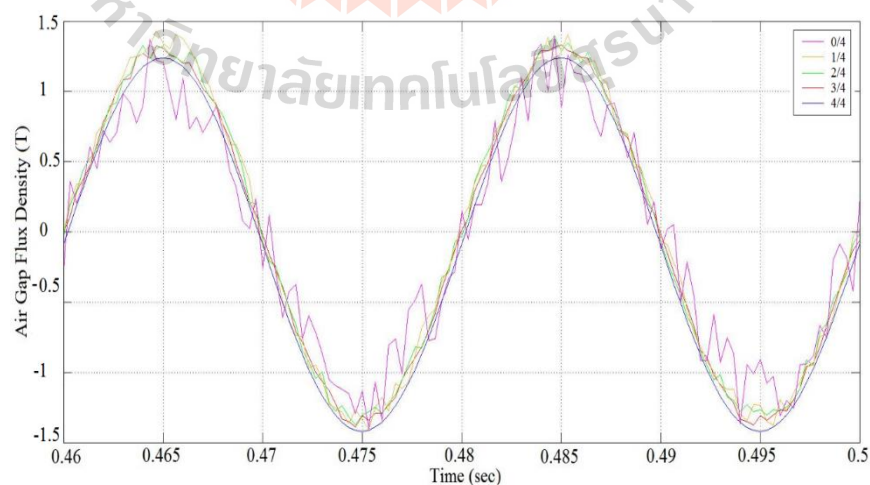


รูปที่ 6.57 การกระจายสนามเหล็ก (T) แบบ 3 มิติของระบบที่ออกแบบที่ดี

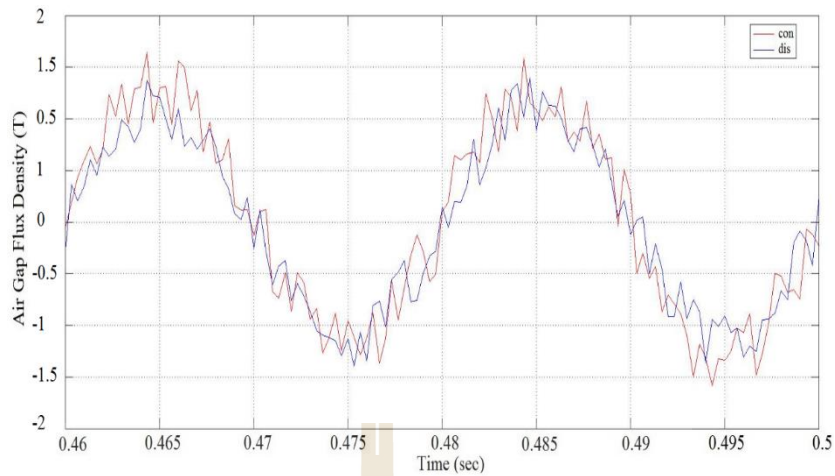
จากการพล็อตกราฟค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระบบทั้งหมดจะพบว่ ลักษณะกราฟของค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศที่ดีจะมีความเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยจากผลการจำลองของระบบการออกแบบระยะพิตช์จะสังเกตเห็นได้ว่าการพันขดลวดแบบที่มีระยะพิตช์ 12/18 เป็นแบบที่ดีที่สุดและจากการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์พบว่าแบบที่ดีที่สุดคือแบบเนียงเต็มร่องและสามารถแสดงกราฟการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 ได้ดังรูปที่ 6.58-6.60



รูปที่ 6.58 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตช์ทั้งหมด

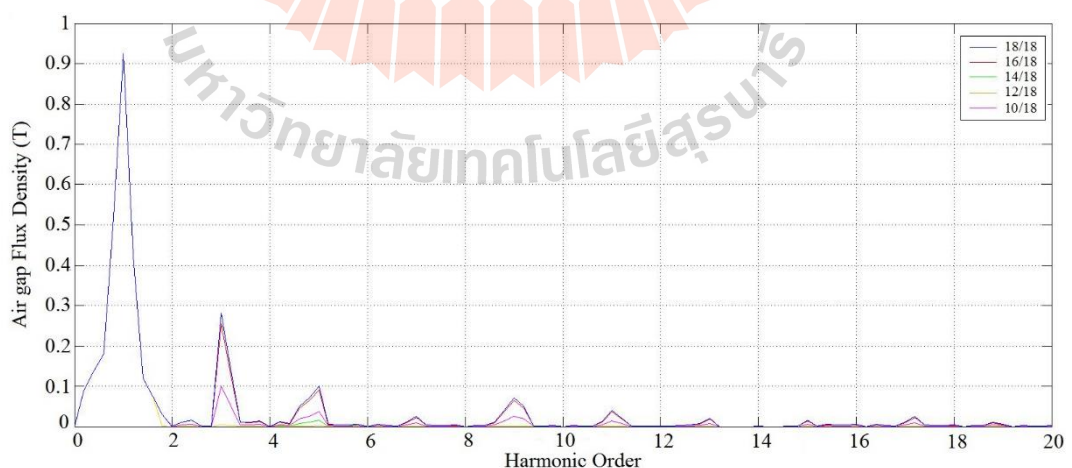


รูปที่ 6.59 ค่าการกระจายสนามเหล็กในช่องว่างอากาศของการวางมุมเนียงทั้งหมด

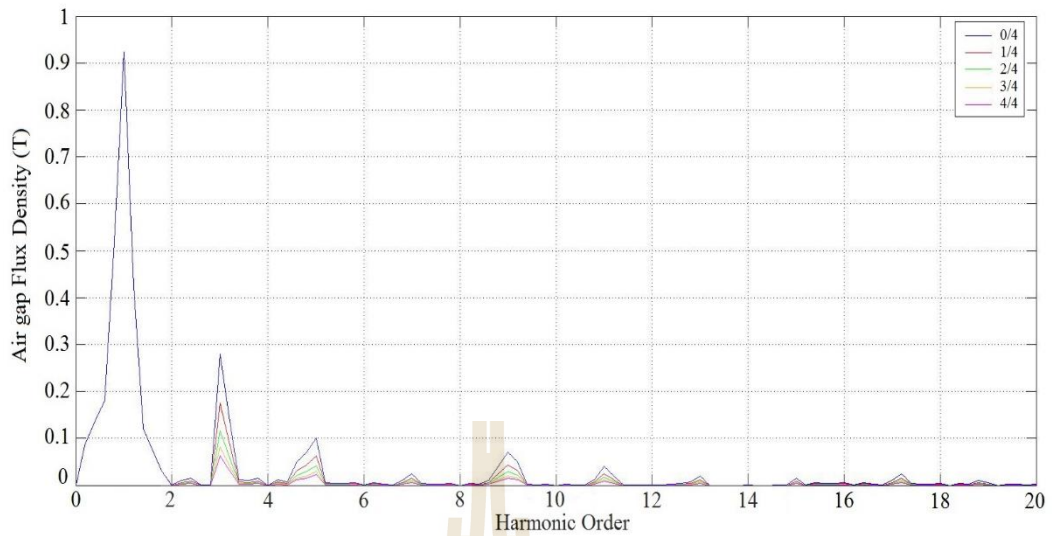


รูปที่ 6.60 ค่าการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของการวางขดลวดทั้งสองแบบ

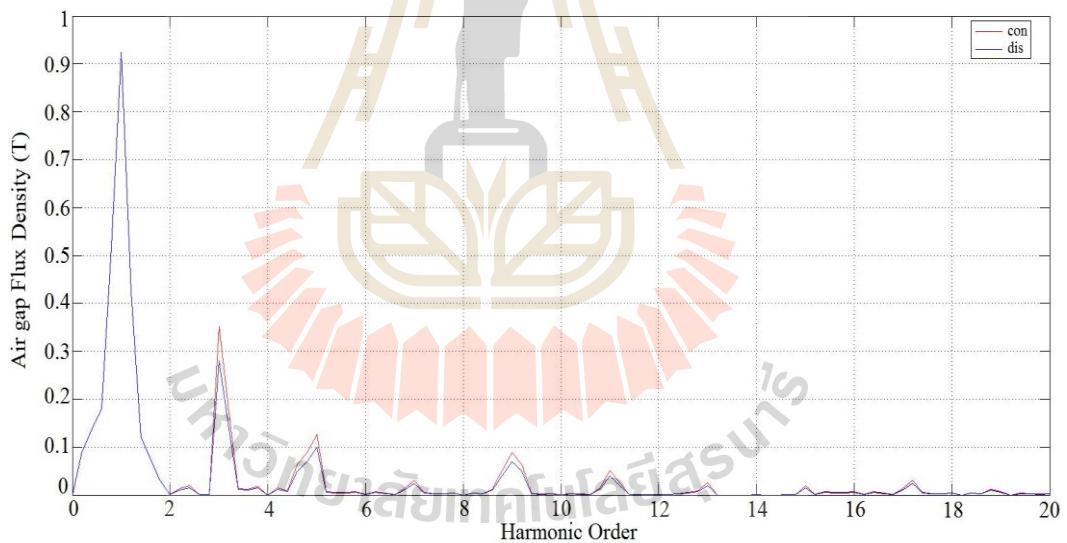
จากการพล็อตกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบทั้งหมดจะพบว่า ลักษณะฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศที่ดีจะมีค่าฮาร์มอนิกในลำดับอื่นๆที่น้อย โดยจากผลการจำลองของระบบการออกแบบระยะพิตซ์จะสังเกตเห็นได้ว่าการพันขดลวดแบบที่มีระยะพิตซ์ 12/18 เป็นแบบที่ดีที่สุดและจากการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์พบว่าแบบที่ดีที่สุดคือแบบเฉียงเต็มร่องและสามารถแสดงกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 ได้ดังรูปที่ 6.61-6.63



รูปที่ 6.61 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระยะพิตซ์ทั้งหมด



รูปที่ 6.62 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของการวางม้วนเฉียงทั้งหมด



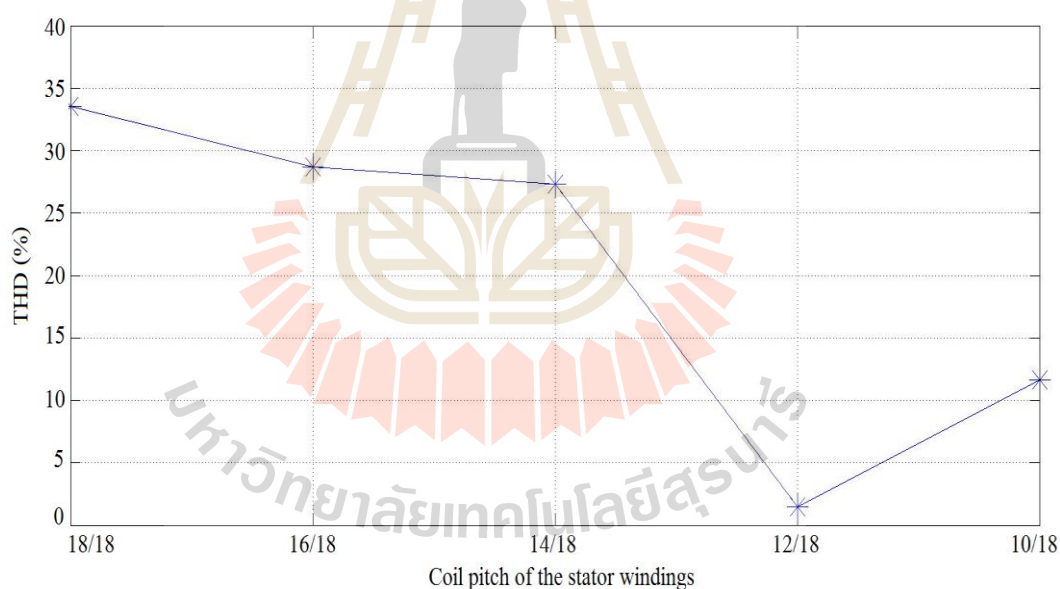
รูปที่ 6.63 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของการวางขดลวดทั้งสองแบบ

จากการพล็อตกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของระบบทั้งหมดนั้น สามารถนำไปคำนวณหาค่า THD ของระบบทั้งหมดและแสดงค่าโดยเปรียบเทียบกับต้นแบบที่ได้ ออกแบบไว้ในบทที่ 5 ได้ดังตารางที่ 6.1 แล้วสามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบค่า THD ของ ระยะพิตซ์และการวางม้วนเฉียงที่เปลี่ยนไปได้ดังรูปที่ 6.64-6.65

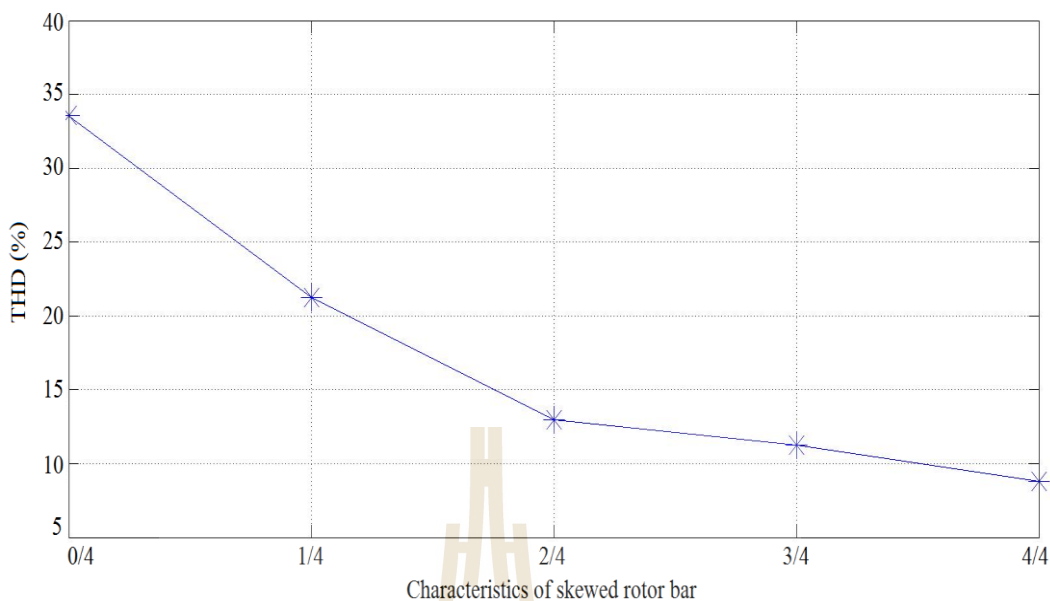
ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกในระบบทั้งหมด

	ระยะพิตช์					ลักษณะการพัน
	18/18	16/18	14/18	12/18	10/18	แบบรวม
THD (%)	33.56%	28.68%	27.33%	1.50%	11.65%	42.38%
	การวางมุมเอียงของร่องโรเตอร์					
	ร่องตรง	1/4	2/4	3/4	4/4	
THD (%)	33.56%	21.25%	12.98%	11.25%	8.77%	

ซึ่งจากตารางที่ 6.1 พบว่าการออกแบบระยะพิตช์จะเป็นแบบการพันขดลวดที่มีระยะพิตช์เป็น 12/18 ที่มีค่า THD ที่น้อยที่สุดและจากการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์พบว่าแบบเฉียงเต็มร่องจะมีค่า THD ที่น้อยที่สุดอีกเช่นกัน



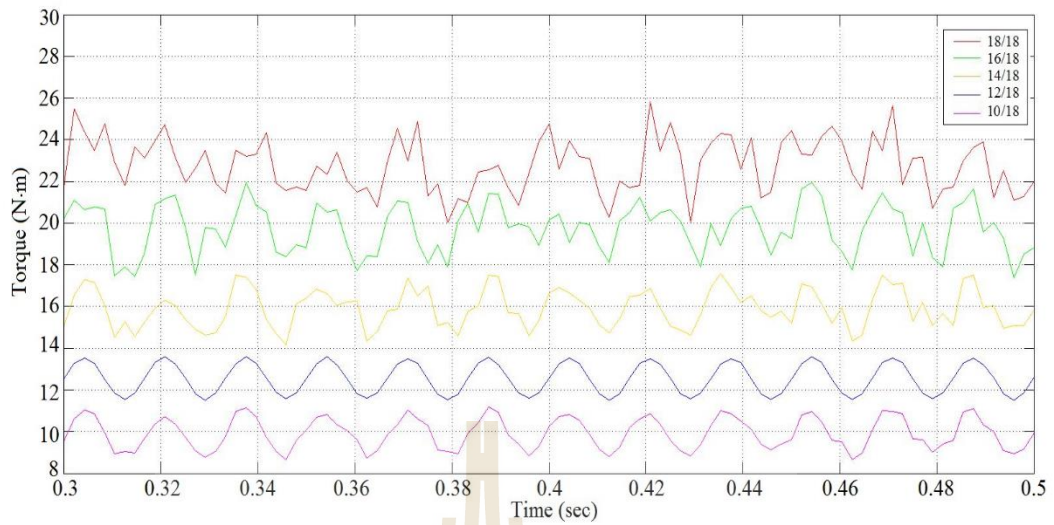
รูปที่ 6.64 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของระยะพิตช์ทั้งหมด



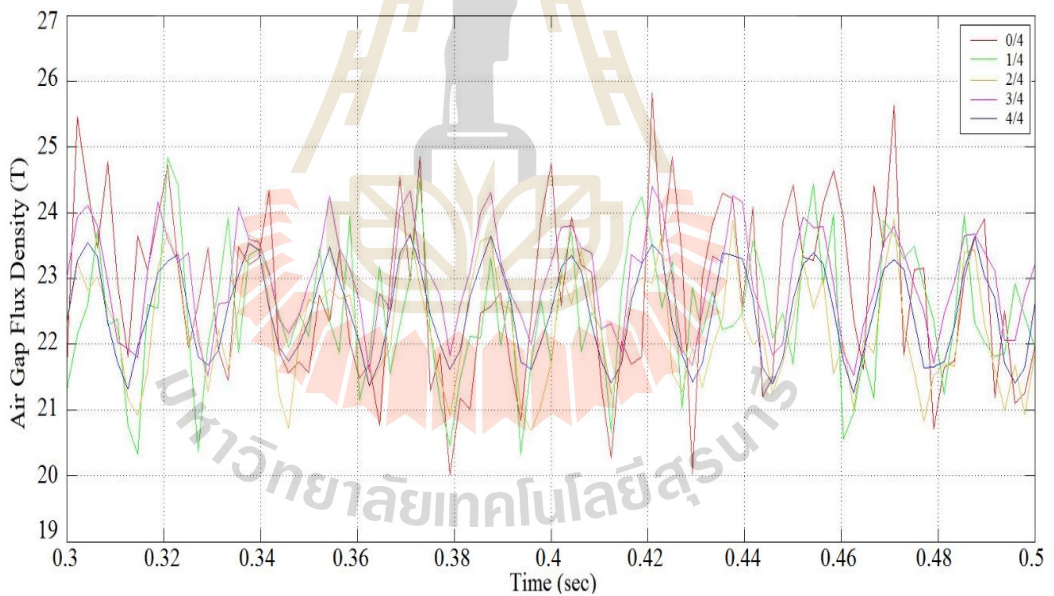
รูปที่ 6.65 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของการวางมุมเฉียงทั้งหมด

จากรูปที่ 6.64-6.65 เป็นรูปแสดงถึงกราฟเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกเมื่อระยะพิตช์และการวางมุมเฉียงที่เปลี่ยนไปจะพบว่าในรูปที่ 6.64 ค่า THD จะลดลงเรื่อยๆจนถึงระยะพิตช์ที่ 12/18 และจะเพิ่มขึ้นมาใหม่ที่ระยะพิตช์ 10/18 สำหรับในรูปที่ 6.65 พบว่าค่า THD จะลดลงเรื่อยๆเมื่อลักษณะร่องเฉียงได้เปลี่ยนไปแต่ค่า THD จะเริ่มลดลงทีละเล็กละน้อยเมื่อร่องเฉียงมากกว่าครึ่งร่อง

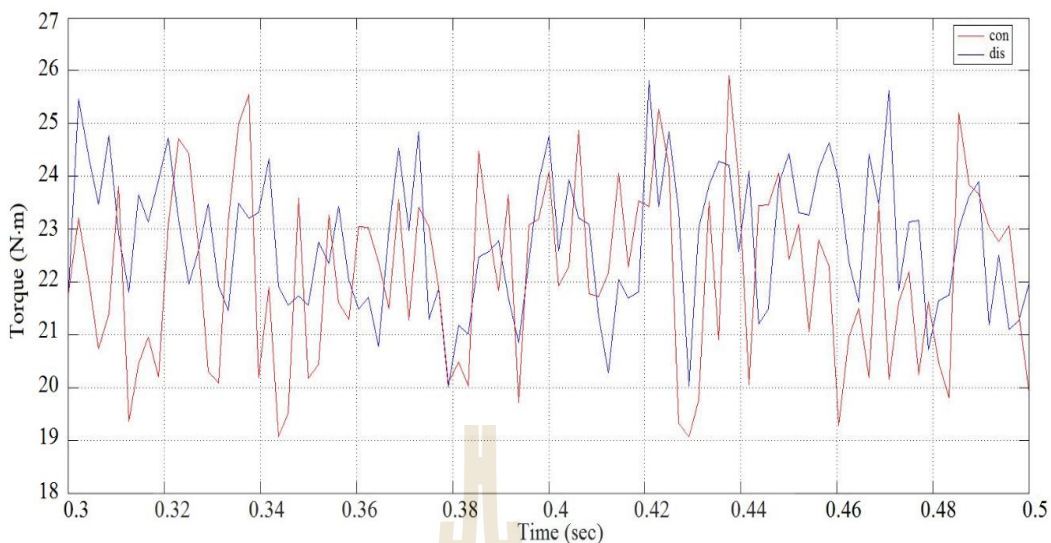
จากการพล็อตกราฟแรงบิดของระบบทั้งหมดในข้างต้นนั้น สามารถแสดงผลกราฟแรงบิดของระบบที่ออกแบบทั้งหมดได้ดังรูปที่ 6.66-6.68



รูปที่ 6.66 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสของระยะพิตซ์ทั้งหมด



รูปที่ 6.67 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสของการวางมุมเฉียงทั้งหมด



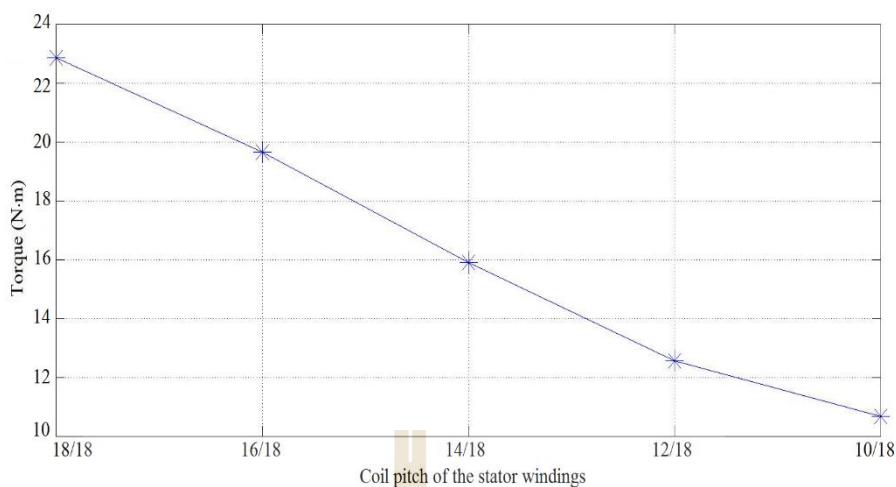
รูปที่ 6.68 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสของการวางขดลวดทั้งสองแบบ

ซึ่งจากกราฟแรงบิดในระบบทั้งหมดสามารถนำไปคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยการเฉลี่ยค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2 แล้วสามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดของระยะพิตช์และการวางมุมเฉียงที่เปลี่ยนไปได้ดังรูปที่ 6.69-6.70

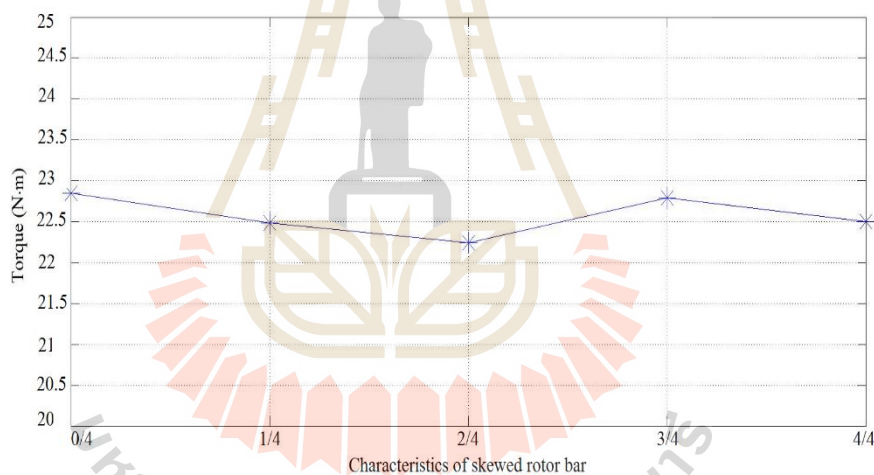
ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดในระบบทั้งหมด

	ระยะพิตช์					ลักษณะการพัน
	18/18	16/18	14/18	12/18	10/18	แบบรวม
แรงบิด (N.m)	22.85	19.64	15.90	12.55	10.68	22.15
	การวางมุมเอียงของร่องโรเตอร์					
	ร่องตรง	1/4	2/4	3/4	4/4	
แรงบิด (N.m)	22.85	22.48	22.24	22.79	22.50	

ซึ่งจากตารางที่ 6.2 พบว่าจากระบบการออกแบบระยะพิตช์จะเป็นแบบการพันขดลวดที่มีระยะพิตช์เป็น 18/18 จะมีค่าแรงบิดมากที่สุดและจากการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ค่าแรงบิดในแต่ละแบบจะไม่ต่างกันมากแล้วพบว่าแบบร่องโรเตอร์ที่มีลักษณะตรงจะมีค่าแรงบิดมากที่สุดอีกเช่นกันแต่ทั้งสองแบบก็มีค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกที่สูง



รูปที่ 6.69 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของระยะพิตซ์ทั้งหมด



รูปที่ 6.70 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของการวางมุมเฉียงทั้งหมด

จากรูปที่ 6.69-6.70 เป็นรูปแสดงถึงกราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดเมื่อระยะพิตซ์และการวางมุมเฉียงที่เปลี่ยนไปจะพบว่าในรูปที่ 6.69 ค่าแรงบิดจะลดลงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องและในรูปที่ 6.70 พบว่าค่าแรงบิดจะค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก

จากผลการจำลองคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสทั้งหมด สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ถึงภาพโดยรวมทั้งหมดได้ว่า ระบบการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับระยะพิตซ์ให้ลดลงเรื่อยๆนั้นจะส่งผลให้เกิดค่าฮาร์มอนิกที่น้อยที่สุดแต่ก็เกิดแรงบิดที่น้อยเช่นกันและในระบบการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆจะพบว่าค่าแรงบิดจะมี

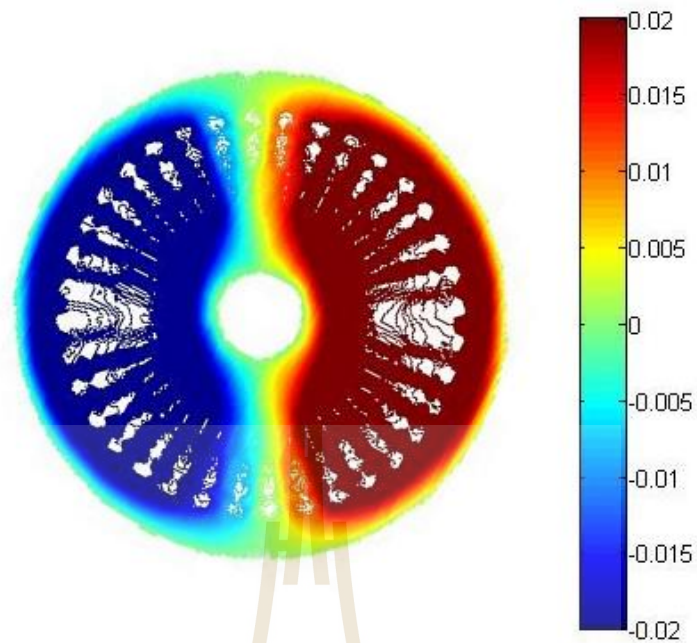
ค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากและยังคงที่ค่าแรงบิดที่สูง ส่วนค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะลดลงเรื่อยๆ ส่วนการออกแบบวางตัวขดลวดแบบรวมให้ค่าแรงบิดที่สูงแต่ค่าฮาร์มอนิกที่สูงด้วยเช่นกัน

6.9 การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยคุณสมบัติทั้งหมด

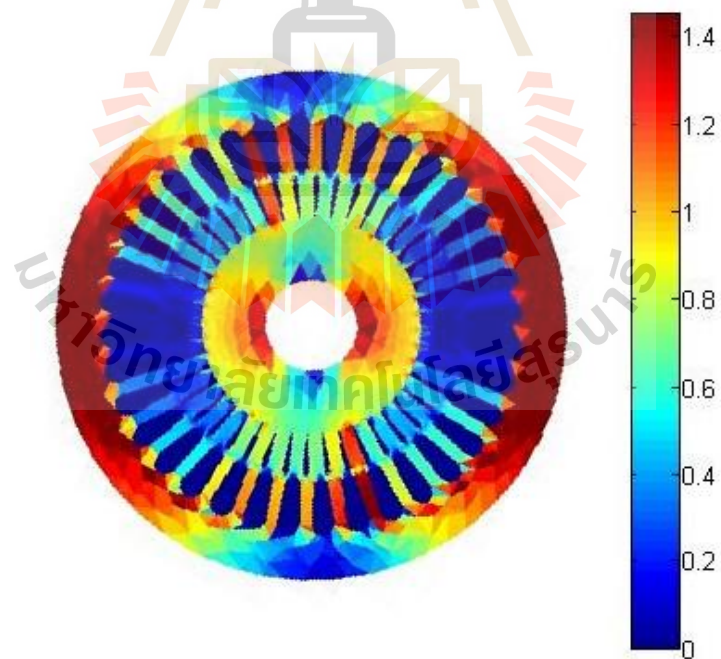
จากการออกแบบด้วยการปรับโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากคุณสมบัติต่างๆ จะพบว่าในแต่ละคุณสมบัติการออกแบบจะให้ผลของคุณลักษณะฮาร์มอนิกและแรงบิดที่มีแนวโน้มแตกต่างกันไป เช่น ในการออกแบบคุณสมบัติการวางขดลวดแบบกระจายก็จะเกิดค่าฮาร์มอนิกที่น้อยกว่าการวางขดลวดแบบรวมหรือในการออกแบบมอเตอร์ด้วยคุณสมบัติการปรับระยะพิตซ์จะส่งผลให้เกิดค่าฮาร์มอนิกที่ดีแต่เกิดค่าแรงบิดที่ไม่ดี และส่วนในการออกแบบมอเตอร์ด้วยคุณสมบัติร่องโรเตอร์เฉียงก็ส่งผลให้เกิดค่าฮาร์มอนิกที่ยังไม่ดีเท่ากับการปรับระยะพิตซ์เนื่องจากระบบเริ่มต้นนั้นมีค่าฮาร์มอนิกที่สูง แต่เกิดค่าแรงบิดที่ดี ดังนั้นหากนำคุณสมบัติการออกแบบทั้งหมดมาออกแบบรวมกันจะสามารถเลือกระบบเริ่มต้นที่มีค่าฮาร์มอนิกที่ลดลงและยังคงแรงบิดที่สูงได้ เมื่อดำเนินการออกแบบแล้วก็ควรส่งผลให้เกิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าฮาร์มอนิกน้อยกว่าเดิมและยังคงแรงบิดที่ดีได้ ในกรณีศึกษาจึงเลือกแบบระยะพิตซ์ที่เป็น 16/18 แล้วมีร่องโรเตอร์ร่องเฉียงที่เป็น 4/4 หรือเต็มร่องและมีการวางขดลวดแบบกระจาย ในขั้นตอนต่อไปจะนำโมเดลนี้เข้าสู่กระบวนการไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อคำนวณหาผลเฉลยอื่นๆต่อไป อาทิ เช่น หาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เป็นต้น

6.10 ผลการจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสเมื่อการออกแบบด้วยคุณสมบัติทั้งหมด

สำหรับการจำลองผลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะยังคงประกอบไปด้วยการจำลองผลของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก กราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิด โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4หรือเต็มร่องและวางขดลวดแบบกระจายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.71-6.75



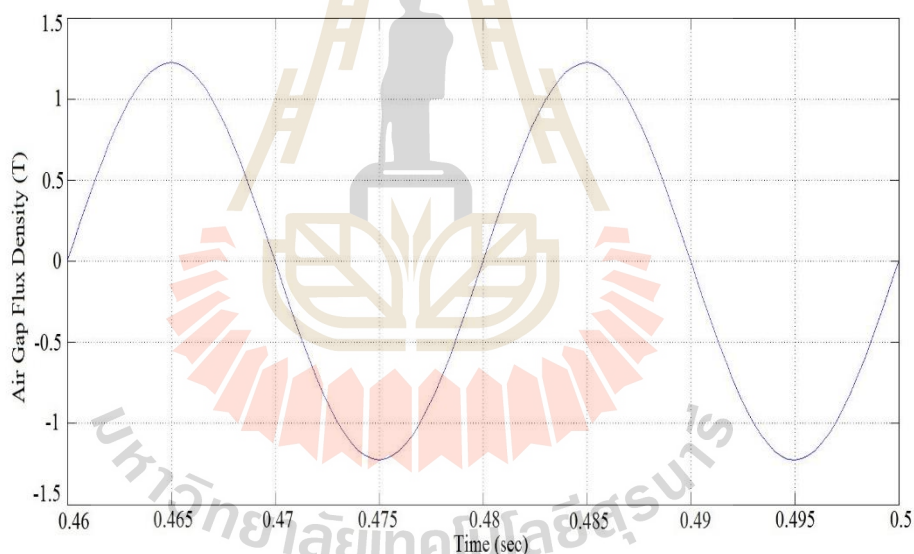
รูปที่ 6.71 ภาคตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m)



รูปที่ 6.72 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T)

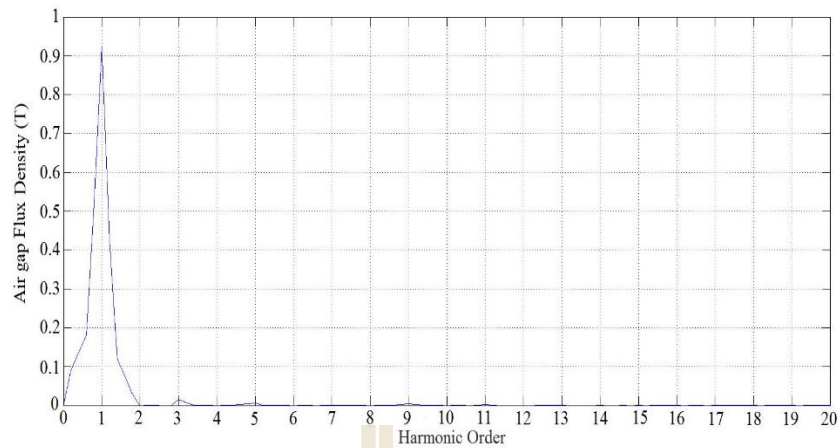
จากรูปที่ 6.71 เป็นรูปแสดงถึงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายบริเวณทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่องและวางขดลวดแบบกระจาย ซึ่งจากการจำลองผลในช่วงการทำงานที่เป็นสถานะคงตัวของมอเตอร์นั้นพบว่าลักษณะค่าแอมพลิจูดของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีลักษณะการกระจายที่ค่อนข้างหนาแน่นและสมดุลสามารถสังเกตได้จากความเข้มของสีที่เกิดขึ้นและจากผลการจำลองยังพบว่าลักษณะข้อที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนทั้งในส่วนของขั้วบวกและขั้วลบ

จากรูปที่ 6.72 เป็นรูปแสดงถึงค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่องและวางขดลวดแบบกระจายโดยผลลัพธ์ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองยังคงมีลักษณะการกระจายเช่นเดียวกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และจากการจำลองผลพบว่าเมื่อออกแบบการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์เป็นแบบรวม ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กค่อนข้างมีค่าสูง



รูปที่ 6.73 ค่าการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

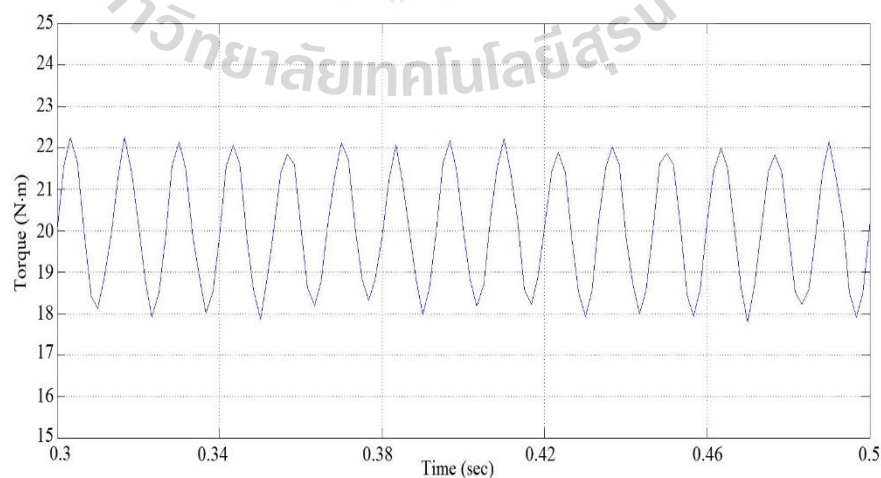
จากรูปที่ 6.73 เป็นรูปแสดงการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศในระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสในช่วงสถานะคงตัว เมื่อเทียบกับผลการจำลองระยะพิตซ์ที่ 18/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง จะพบว่าเมื่อดำเนินการออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่องและวางขดลวดแบบกระจายนั้น จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่ยังคงสูงแต่น้อยกว่าแบบก่อนและมีความเป็นรูปคลื่นไซน์ที่ค่อนข้างมาก



รูปที่ 6.74 กราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

จากรูปที่ 6.74 เป็นรูปแสดงกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ เมื่อเทียบกับผลการจำลองระยะพิตซ์ที่ 18/18 แล้วมีร่องเสียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง จะพบว่าเมื่อดำเนินการออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเสียงที่ 4/4 หรือเต็มร่องและวางขดลวดแบบกระจายนั้น ค่าการกระจายลำดับฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศจะมีค่าที่น้อยกว่า

และจากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศนั้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังกล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรคำนวณดังกล่าวจะได้ค่า THD ของระบบเป็น 3.27% ซึ่งน้อยกว่าแบบระยะพิตซ์ที่ 18/18



รูปที่ 6.75 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 6.75 เป็นรูปแสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงานที่สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส เมื่อเทียบกับผลการจำลองระยะพิตซ์ที่ 18/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง จะพบว่าเมื่อดำเนินการออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง และวางขดลวดแบบกระจายนั้น พบว่ากราฟแรงบิดของระบบนั้นมีค่าสูงและก็มีลักษณะกราฟที่สมดุลโดยค่าแรงบิดจะอยู่ที่ 20.17 N.m ซึ่งน้อยกว่าแบบระยะพิตซ์ที่ 18/18 เพียงเล็กน้อย

จากการจำลองผลในแบบแรกที่เป็นระยะพิตซ์ที่ 18/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง และแบบที่สองในแบบเมื่อดำเนินการออกแบบระยะพิตซ์ที่ 16/18 แล้วมีร่องเฉียงที่ 4/4 หรือเต็มร่อง และวางขดลวดแบบกระจายนั้น พบว่าค่าฮาร์มอนิกในแบบแรกจะมีค่าเป็น 8.77% และแบบที่สองเป็น 3.27% ตามลำดับ สำหรับค่าแรงบิดในแบบแรกจะมีค่าเป็น 22.5 N.m และแบบที่สองเป็น 20.17 N.m ตามลำดับ สรุปได้ว่าระบบที่ออกแบบมาใหม่นั้นช่วยลดฮาร์มอนิกได้ดีขึ้นและค่าแรงบิดลดลงเล็กน้อย

6.10 สรุป

ในบทที่ 6 นี้ ได้ดำเนินการออกแบบปรับส่วนต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสโดยยังอิงโครงสร้างหลักเดิมของมอเตอร์เพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติภายใต้สถานะชั่วคราวและในสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งประกอบไปด้วย 3 วิธีคือ วิธีที่ 1 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับระยะพิตซ์ของมอเตอร์ตั้งแต่ในแบบระยะพิตซ์เต็มแล้วลดลงเรื่อยๆจนถึงระยะพิตซ์เศษส่วนที่ 10/18 สำหรับวิธีที่ 2 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์ของมอเตอร์ให้มีความเฉียงมากขึ้นโดยเริ่มลักษณะร่องโรเตอร์ที่มีลักษณะตรงแล้วปรับลักษณะร่องโรเตอร์ให้มีความเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงเต็มร่องของโรเตอร์และวิธีที่ 3 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ โดยจากเดิมเป็นการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบกระจายแล้วปรับเปลี่ยนใหม่ให้เป็นการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ให้เป็นแบบรวม ซึ่งจากผลการจำลองและผลการคำนวณค่าลักษณะต่างๆที่ได้จะเห็นได้ว่าระบบการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับระยะพิตซ์ให้ลดลงเรื่อยๆนั้นจะส่งผลให้เกิดค่าฮาร์มอนิกที่น้อยที่สุดแต่ก็เกิดค่าแรงบิดที่น้อยอีกเช่นกันและในระบบการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆจะพบว่าค่าแรงบิดจะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากและยังคงที่ค่าแรงบิดที่สูง ส่วนค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะลดลงเรื่อยๆ ส่วนการออกแบบวางตัวขดลวดแบบรวมให้ค่าแรงบิดที่สูงแต่ค่าฮาร์มอนิกก็สูงอีกเช่นกันและเมื่อพิจารณาวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธีจะเห็นได้ว่าการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงเป็นวิธีที่จะทำให้แรงบิดยังคงมีค่าที่ดีและลดค่าฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย พร้อมการจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ แล้วได้ดำเนินการการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของฮาร์มอนิกและค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ซึ่งได้ดำเนินการนำเสนอวิธีการออกแบบเพื่อเพิ่มคุณลักษณะในการทำงานของมอเตอร์ให้สูงขึ้นด้วยวิธีการออกแบบในวิธีต่างๆประกอบไปด้วย การออกแบบด้วยการปรับระยะพิตซ์ของมอเตอร์จากระยะพิตซ์เต็มไปยังระยะพิตซ์เศษส่วน การออกแบบด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์ของมอเตอร์จากลักษณะที่เป็นร่องตรงไปยังร่องเฉียงแบบเฉียงเต็มร่องและการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์จากการวางตัวขดลวดแบบกระจายไปยังการวางตัวขดลวดแบบรวม เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะที่ดีขึ้นในการออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งการคำนวณค่าคุณลักษณะของมอเตอร์จะเริ่มตั้งแต่มอเตอร์เริ่มทำงานจนถึงช่วงการทำงานในสถานะคงตัว การจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย การศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 3 ศึกษาทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งเรื่องมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้า หลักการแนวคิดทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ทฤษฎีของสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติภายใต้สถานะชั่วคราวและในสภาวะความไม่เชิงเส้น โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษ

ตกค้างของกาแลอรีคิน ในบทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก แสดงกราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ แสดงกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ แสดงค่า THD จากกราฟฮาร์มอนิกของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิดของมอเตอร์ โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริดพร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก ในบทที่ 6 ได้อธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบปรับส่วนต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสโดยยังอิงโครงสร้างหลักเดิมของมอเตอร์เพื่อเพิ่มคุณลักษณะการทำงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 วิธีคือวิธีที่ 1 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับระยะพิตซ์ของมอเตอร์ตั้งแต่ในแบบระยะพิตซ์เต็มแล้วลดลงเรื่อยๆจนถึงระยะพิตซ์เศษส่วนที่ 12/18 สำหรับวิธีที่ 2 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับลักษณะร่องโรเตอร์ของมอเตอร์ให้มีความเฉียงมากขึ้นโดยเริ่มลักษณะร่องโรเตอร์ที่มีลักษณะตรงแล้วปรับลักษณะร่องโรเตอร์ให้มีความเฉียงมากขึ้นจนถึงเต็มร่องของโรเตอร์และวิธีที่ 3 วิธีการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ โดยจากเดิมเป็นการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์แบบกระจายแล้วปรับเปลี่ยนใหม่ให้เป็นการวางตัวของขดลวดในร่องสเตเตอร์ให้เป็นแบบรวม พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก แสดงกราฟของค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ แสดงกราฟฮาร์มอนิกและ THD ของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและกราฟแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งจากผลการจำลองและผลการคำนวณค่าลักษณะต่างๆที่ได้จะเห็นได้ว่าระบบการออกแบบมอเตอร์ด้วยการปรับระยะพิตซ์ให้ลดลงเรื่อยๆนั้นจะส่งผลให้เกิดค่าฮาร์มอนิกที่น้อยที่สุดแต่ก็เกิดค่าแรงบิดที่น้อยด้วยเช่นกันและในการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงมากขึ้นเรื่อยๆจะพบค่าแรงบิดจะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากและยังคงที่ค่าแรงบิดที่สูง ส่วนค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะลดลงเรื่อยๆ ส่วนการออกแบบวางตัวของขดลวดแบบรวมให้ค่าแรงบิดที่สูงแต่ค่าฮาร์มอนิกก็สูงด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธีจะเห็นได้ว่าการออกแบบลักษณะร่องโรเตอร์ร่องเฉียงเป็นวิธีที่จะทำให้แรงบิดยังคงมีค่าที่ดีและลดค่าฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ซึ่งผลสรุปค่า THD และแรงบิดของระบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า THD และแรงบิดของระบบทั้งหมด

	ระยะพิตช์					ลักษณะการพัน
	18/18	16/18	14/18	12/18	10/18	แบบรวม
THD (%)	33.56%	28.68%	27.33%	1.50%	11.65%	42.38%
แรงบิด (N.m)	22.85	19.64	15.90	12.55	10.68	22.15
	ระยะพิตช์					
	ร่องตรง	1/4	2/4	3/4	4/4	
THD (%)	33.56%	21.25%	12.98%	11.25%	8.77%	
แรงบิด (N.m)	22.85	22.48	22.24	22.79	22.50	

7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. ศึกษาถึงการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยศึกษาถึงแบบจำลองทางด้านความร้อนเพราะระบบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังมีจำนวนเฟสยิ่งมาก กระแสจะยิ่งน้อยลงอาจจะส่งผลทำให้ความร้อนลดลงอันเป็นหัวข้ออีกแง่มุมหนึ่งของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส

2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบหลายเฟสเพราะนอกจากงานวิจัยทางด้านมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟส ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 9 เฟส และ 12 เฟส ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละระบบ

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ. ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เคะชะอำไพ. (2547). ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เคะชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์. วิทยานิพนธ์คุยฎิบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ai, Y.M., Kamper, J. and Abraham, D. (2005). Novel Direct Field and Direct Torque Control of Six-Phase Induction Machine with Special Phase Current Waveform. IEEE. pp: 808-812.
- Atkinson, G.J., Mecrow, B.C., Jack, A.G., Atkinson, D.J. and Benarous, M. (2005). The design of fault tolerant machines for aerospace applications. Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. IEMDC. San Antonio. TX. pp: 1863-1869.
- Bao, A., Yong-le, A., and Niu, L. (2017). Study on the Air gap Flux Density of the Six-phase Induction Machine Based on Trapezoidal Phase Current Waveform with CAD. International Forum on Information Technology and Applications. pp: 343-346.
- Bojoi, R., Farina, F., Griva, G., Profumo, F. and Tenconi, A. (2005). Direct torque control for dual three-phase induction motor drives. IEEE Trans. on Industry Applications. vol. 41. no. 6. pp: 1627-1636.
- Chih, Lin. and Chang, Hwang. (2016). Multiobjective Optimization Design for a Six-Phase Copper Rotor Induction Motor Mounted With a Scroll Compressor. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 52. No. 7.
- Edward, T., Maarten, J. and Abraham, D.L. (2006). Torque Performance of Optimally Designed Six- Phase Reluctance DC Machine. IEEE. pp: 1186-1192.

- Fatemi, S.M., Abjadi, N.R., Soltani, J. and Abazari, S. (2013). Speed sensorless control of a six-phase induction motor drive using backstepping control. *IET Power Electronics*. Vol. 7. Iss. 1. pp: 114–123.
- Fu, J.R. and Lipo, T.A. (1994). Disturbance free operation of a multiphase current regulated motor drive with an open phase. *IEEE Trans on Ind Applications*. Vol. 30. Issue.5. Sep. – Oct. pp:1267 - 1274.
- Hao, Y., Yongxiang, Xu., Shanlin, Jiang., Jibin Zou. and Weiyan, Liang. (2013). A Fault Tolerant Control Strategy for Six-phase Transverse Flux Tubular PMLM Based on Synthetic Vector Method. *Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE Journal of. vol. pp: 1-1.
- Kianinezhad, R., Nahid-Mobarakeh, B.L., Betin, F. and Capolino, G.A., (2004). Torque Ripples Suppression for Six-Phase Induction Motors Under Open Phase Faults. *IEEE*. pp: 1363-1368.
- Klingshirn, E.A. (1983). High phase order induction motors - Part I –Description and theoretical consideration. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-102. No 1. pp: 47 -53.
- Lahne, Hans. and Gerling, Dieter. (2016). Design of a 50000 rpm High-Speed High-Power Six-Phase PMSM for Use in Aircraft Applications. *Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*.
- Levi, E., Vukosavic, S.N. and Jones, M. (2005). Vector control schemes for series-connected six-phase two-motor drive systems. *IEE Proc. – Electric Power Applications*. vol. 152. no. 2. pp: 226-238.
- Martin, J., Slobodan, N., Emil, Levi. and Atif, Iqba. (2005). A Six-Phase Series-Connected Two-Motor Drive with Decoupled Dynamic Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 41, No. 4.
- Martin, R., Widmer, D., Mecrow, B.C. and Kimiabeigi, M (2016). Electromagnetic Considerations for a Six-Phase Switched Reluctance Motor Driven by a Three-Phase Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 52. NO. 5.

- Matyas, A., Aroquiadassou, G., Martis, C., Mpanda-Mabwe, A. and Biro, K. (2010). Design of six-phase synchronous and induction machines for EPS. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM. Rome.
- Mecrow, B.C., Jack, A.G., Atkinson, D.J., Green, S.R. and King, G.J.A. (2004). Design and IEEE Trans. on Energy Conversion vol.19. no. 3. pp: 671-678.
- Mitcham, A.J, Antonopoulos, G. and Cullen, J.J.A. (2004). Favourable slot and pole number combinations for fault-tolerant PM machines. IEE Proc. - Electrical Power Applications. vol. 151. no. 5. pp: 520-525.
- Moghadasian, M., Sivert, A., Yazidi, A., Betin, F. and Capolino, G.A. (2012). Efficiency Optimization on Vector Controlled Six-Phase Induction Motor in Healthy and Faulted Mode. IEEE. pp: 469-476.
- Nikola, L., Goran, S., S, Djuric. and Eric, L. (2015). Design and Analysis of Planar Symmetric Six-Phase Coupled Inductors. IEEE transactions on Magnetics. Vol. 51. No. 6.
- Rajeev K.C. (2015). Theory and Manage of Designed Developed Prototype Six Phase Induction Motor. International Journal of Engineering Research and Management Technology. Volume 2. Issue-6.
- Renato, O.C. and Thomas, A. (2002). Torque Density Improvement in a Six-Phase Induction Motor with Third Harmonic Current Injection. IEEE transactions on industry applications. vol. 38. No. 5.
- Shouyi, Han., Chuang, Liu., Lei, Zhang., Guanming, Jun. and Shangjian, D. (2016). Mutual Coupling and Its effect on Current and Torque of Six phases Switched Reluctance Motor. Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies.
- Singh, G.K. (2002). Multi-phase induction machine drive research – a survey. Electric Power Systems Research. vol. 61. No. 2. pp: 139-147.
- Stumherger, B. and Hamber, A. (2003). Increasing of output power capability in a six phase flux weakened permanent magnet synchronous motor with a third harmonic current. IEEE. vol. 28. No. 3. pp: 659-667.
- Toliyat, H. A. (1996). Analysis and simulation of multi-phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections. APEC 96. Volume 2. pp: 586 -592.

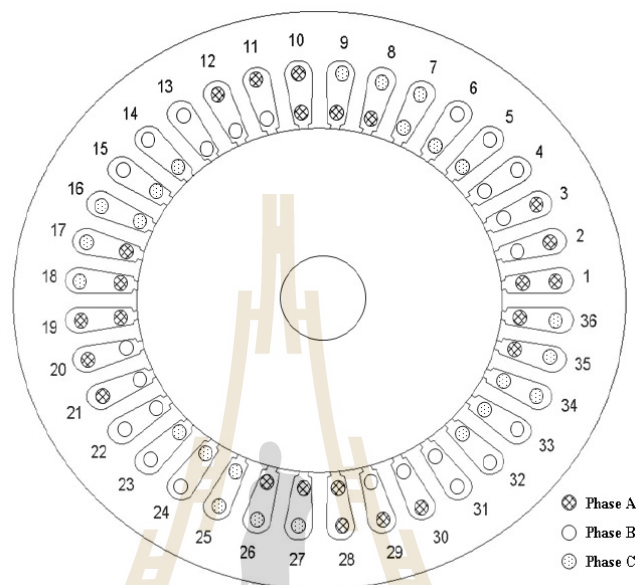
- Toliyat, H.A. and Xu, H. (2000). DSP-based direct torque control (DTC). for five-phase induction machines. Proc. Int. PowerElectronics Conf. IPEC. Tokyo. Japan. pp: 1195-1200.
- Wang, J.B., Atallah, K. and Howe, D. (2003). Optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines. IEEE Trans. on Magnetics. vol. 39. No. 5. pp: 2962-2964.
- Xiaoyuan, W., Qingyan, W. and Yongfei, W. (2005). Analysis of the Magnetic Field of the Six-phase Disc PMSM and Effect of Permanent Magnet Thickness on the Air Gap Magnetic Field. Beijing. China Machine Press. pp: 308-330.
- Zhang, L., Fan, Y., Li, C. and Liu, C. (2015). Design and Analysis of a New Six-Phase Fault-Tolerant Hybrid-Excitation Motor for Electric Vehicles. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51. No. 11.
- Zhao, Y., and Lipo, T.A. (1996). Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance. IEEE Transactions on Energy Conversion. vol.11. No.3. pp: 578-584.
- Zheng, Y., Wen, H., Huang, X., Huang, W., and Li, Y. (2006). The Analyses and Prediction of An High Accurate No Linear Inductance Analysis Formulation of Six-phase Ten-pole Fault-tolerant Permanent Magnet Machine. IEEE. pp: 3094-3098.
- Zhuoran, Z., Yangguang, Y., Jingjie, Z. and Zhou, B. (2008). Study on Novel Twelve-phase Synchronous Generator Rectifier System. DRPT Nanjing China. pp: 2270-2274.



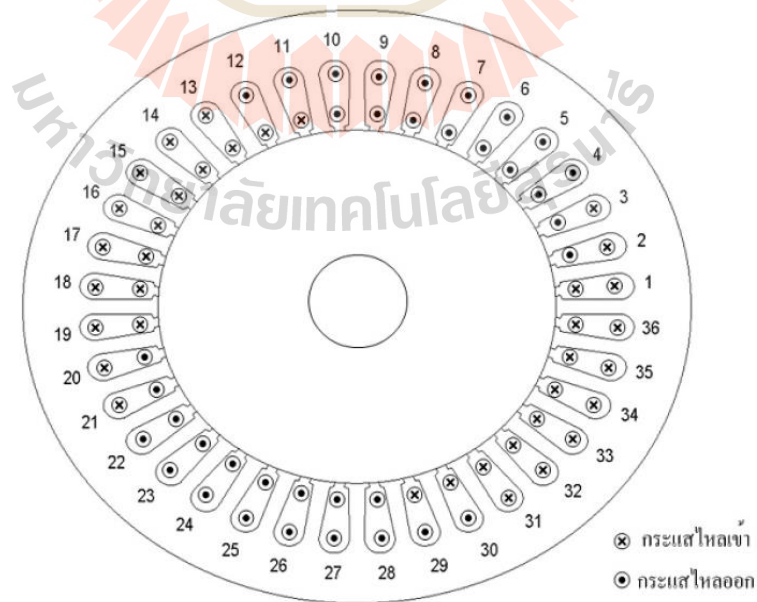
ภาคผนวก ก

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบเดิมนั้นจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว 3 แรงม้า ชนิดกรงกระรอกและขดลวดพันแบบ 2 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยร่องสเตเตอร์ทั้งหมด 36 ร่องและระยะพิตช์ของขดลวดเท่ากับ 7/9 แสดงได้ดังภาพที่ ก.1-ก.2 ดังนี้



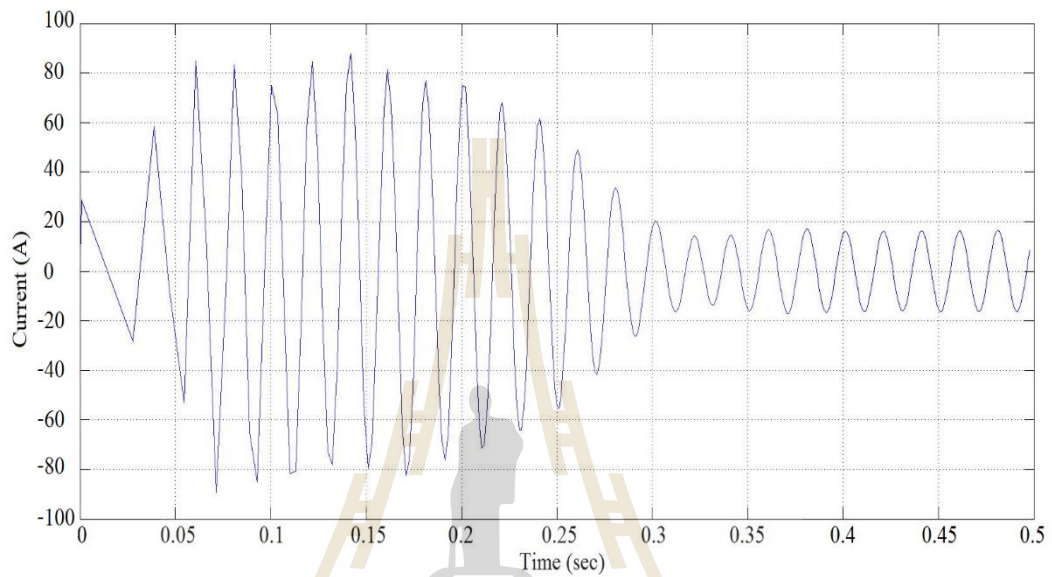
รูปที่ ก.1 การพันขดลวดสเตเตอร์ 36 ร่อง



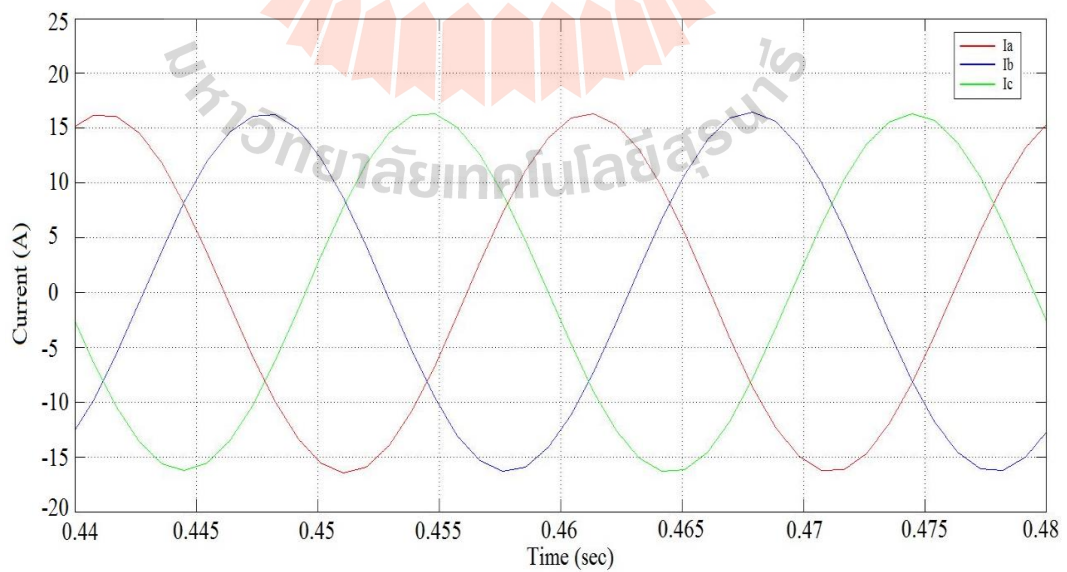
รูปที่ ก.2 ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาหนึ่ง

การคำนวณกระแสและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ ได้คำนวณด้วยชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Simulink เมื่อป้อนรูปคลื่นแรงดัน 3 เฟสประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในภาพที่ ก.3-ก.4

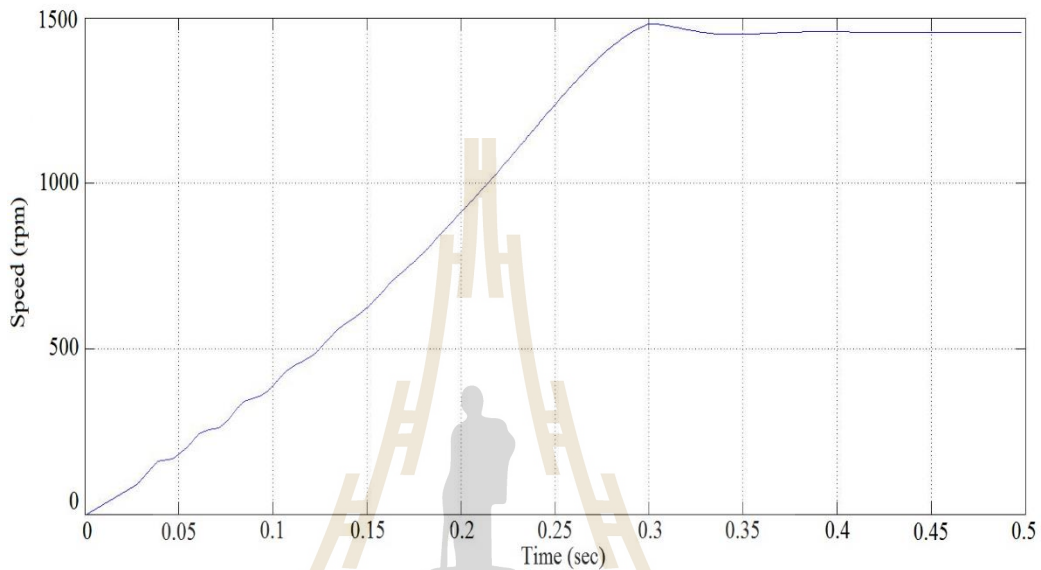


รูปที่ ก.3 กระแสไฟฟ้า 3 เฟส (แสดงเพียงเฟสเดียว)

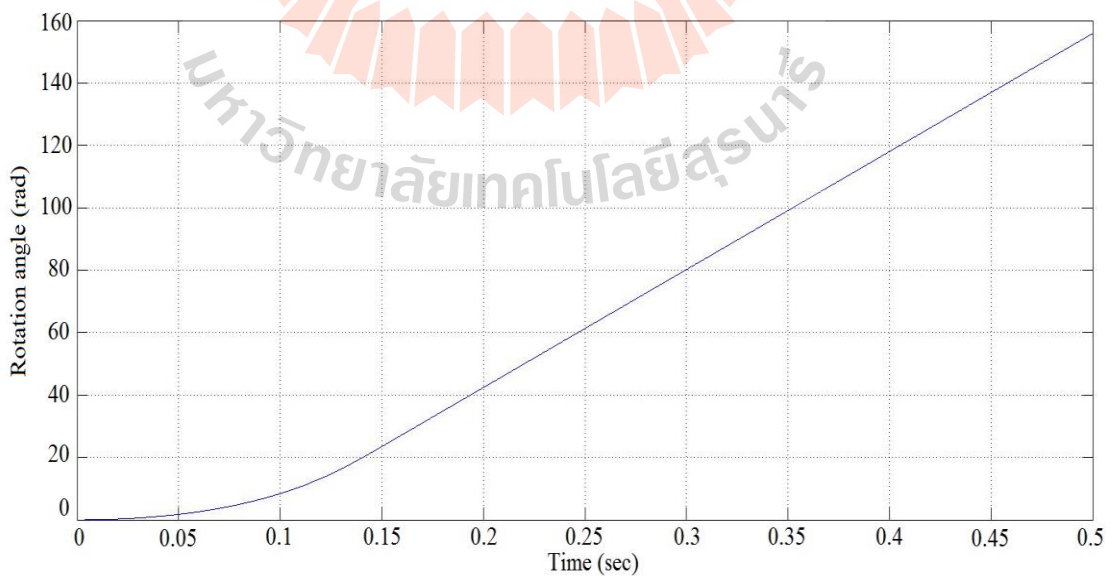


รูปที่ ก.4 กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ในช่วงเวลาสถานะคงตัว

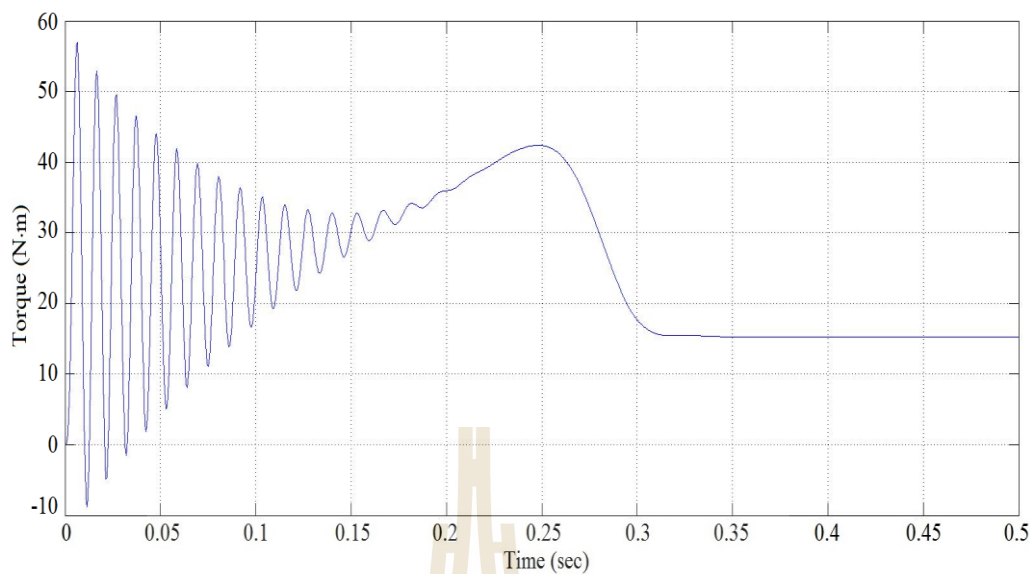
ชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Simulink ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนอกจากค่ากระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้วยังมีความเร็วรอบของมอเตอร์ (N_r) มุมที่มอเตอร์หมุน (θ) และแรงบิดทางกลของมอเตอร์ (T_o) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในภาพที่ ก.5-ก.7 ตามลำดับ



รูปที่ ก.5 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส



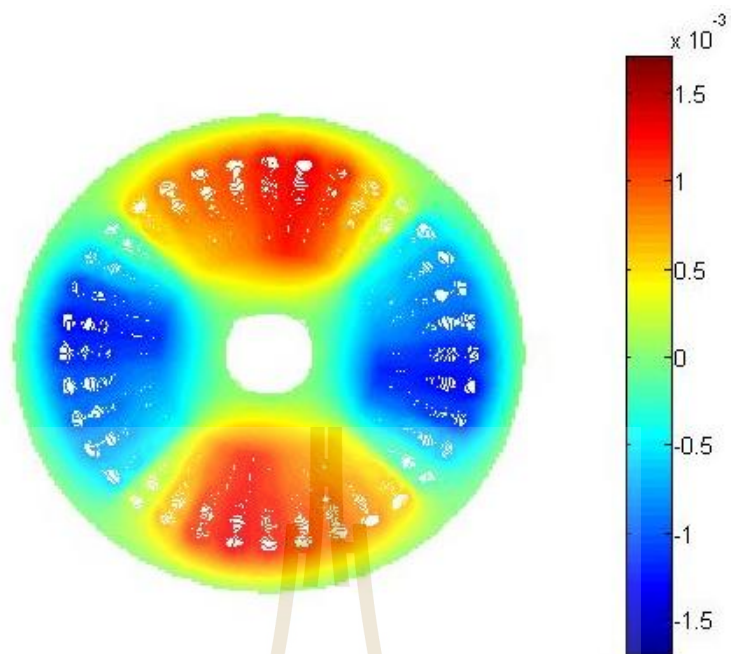
รูปที่ ก.6 กราฟมุมที่มอเตอร์หมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา



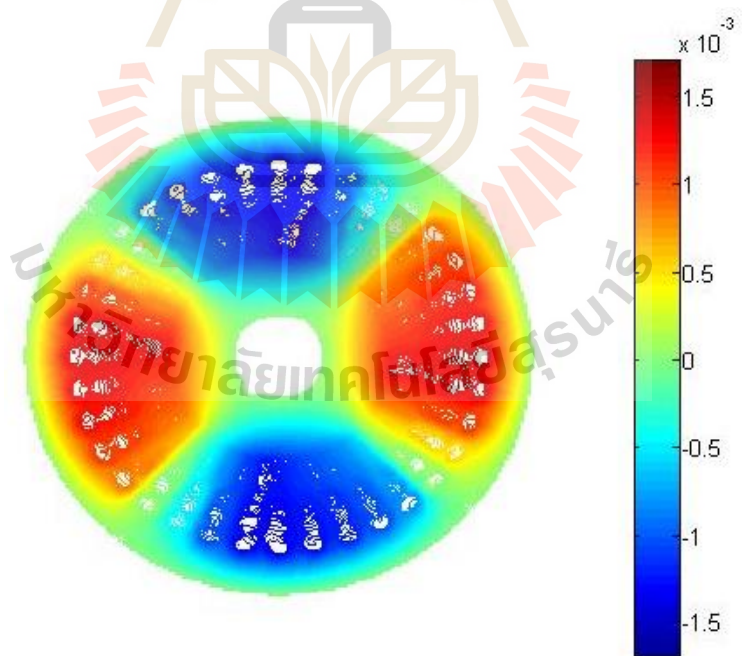
รูปที่ ก.7 แรงบิดของมอเตอร์จากการคำนวณผ่าน Simulink

ผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

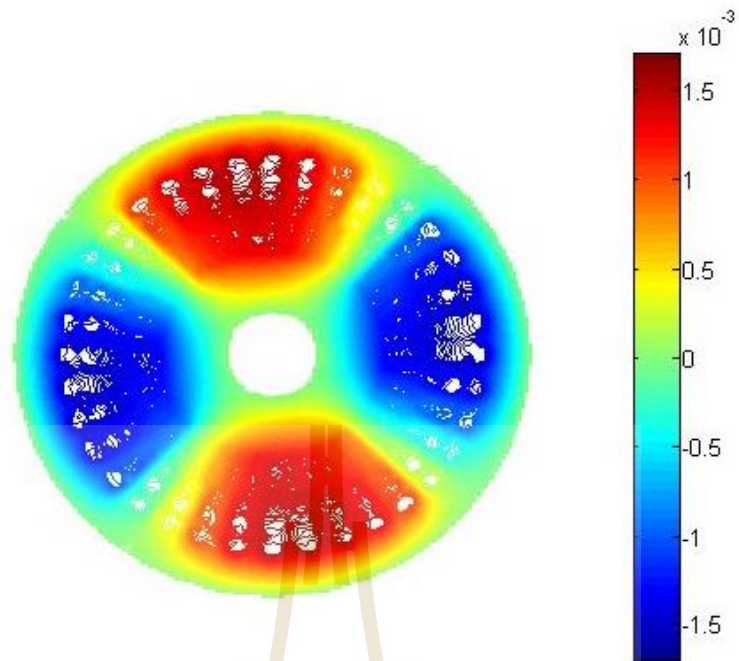
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลาที่กระจายตัวตลอดทั่วทั้งปริมาตรของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวสามารถแสดงผลทางกราฟิกได้ดังภาพที่ ก.8-ก.19



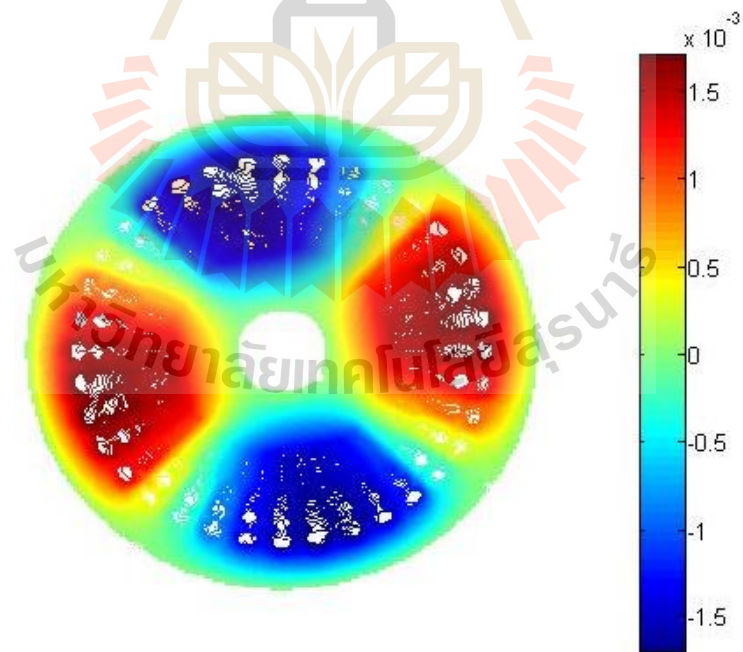
รูปที่ ก.8 ภาคตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



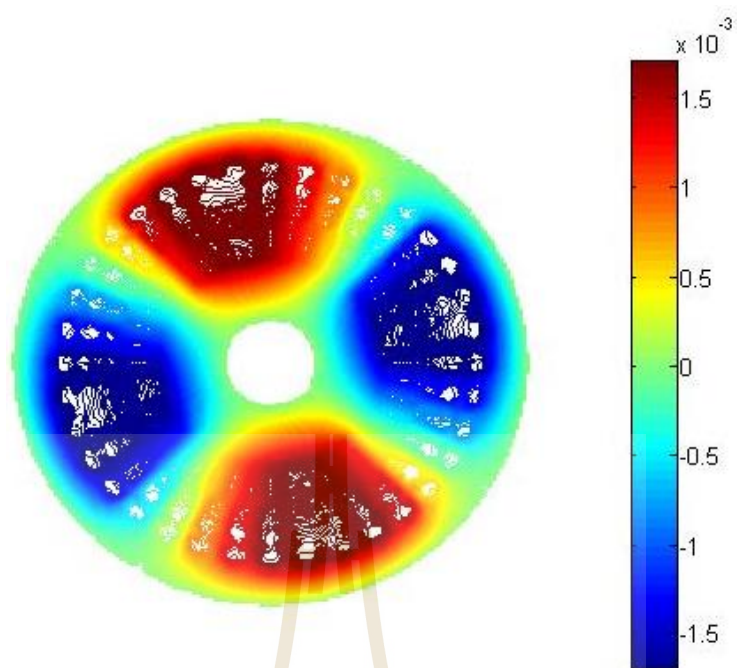
รูปที่ ก.9 ภาคตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



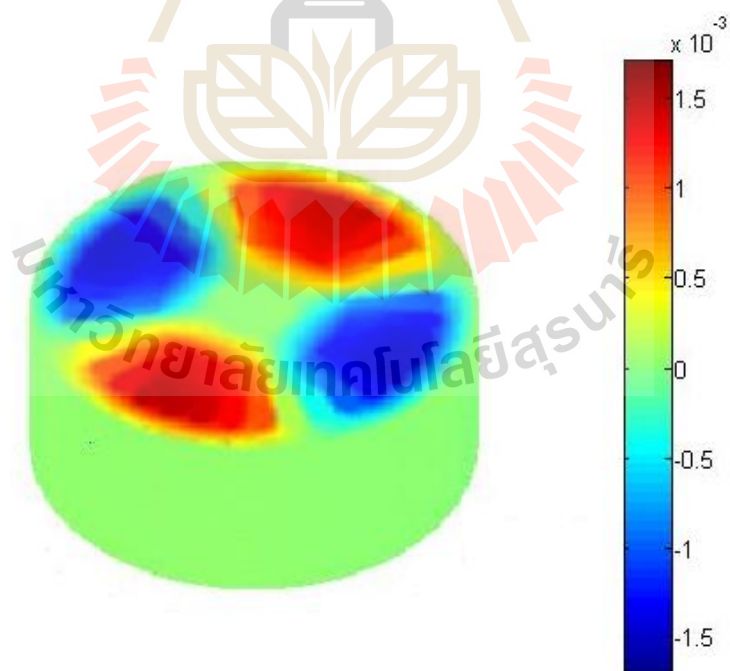
รูปที่ ก.10 ภาคตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



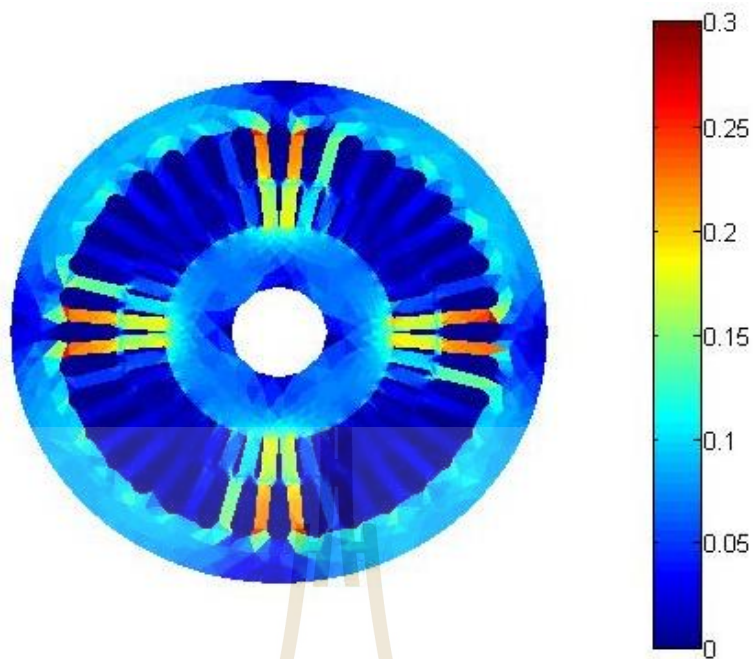
รูป ก.11 ภาคตัดขวางของค้ำยเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



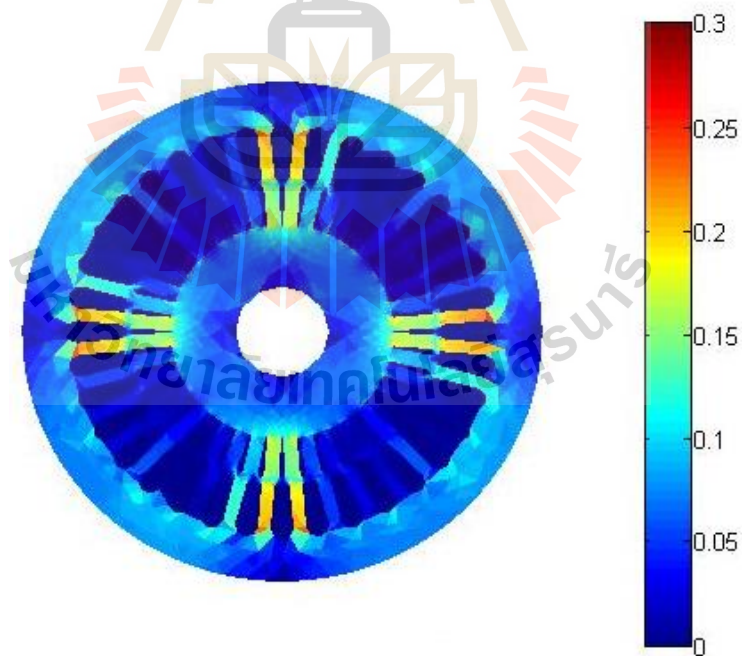
รูปที่ ก.12 ภาคตัดขวางของสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



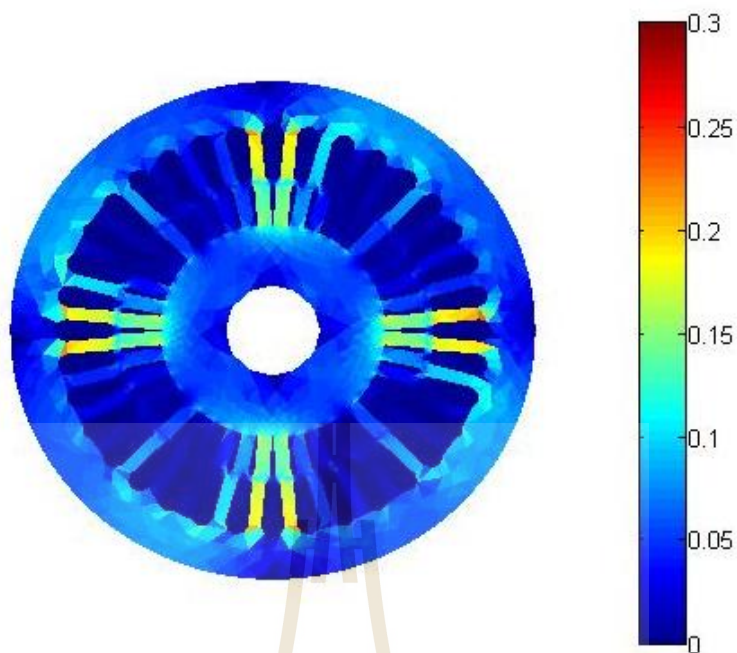
รูปที่ ก.13 สัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์



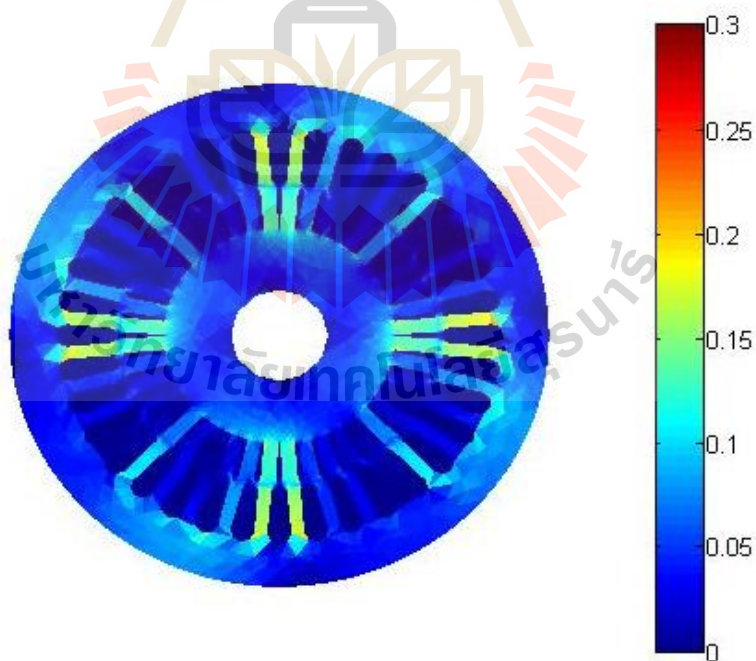
รูปที่ ก.14 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 0 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



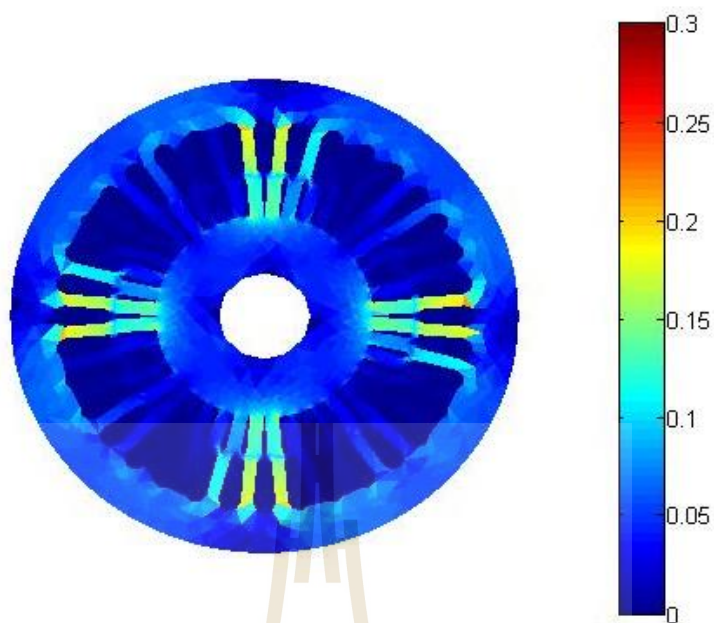
รูปที่ ก.15 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 90 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



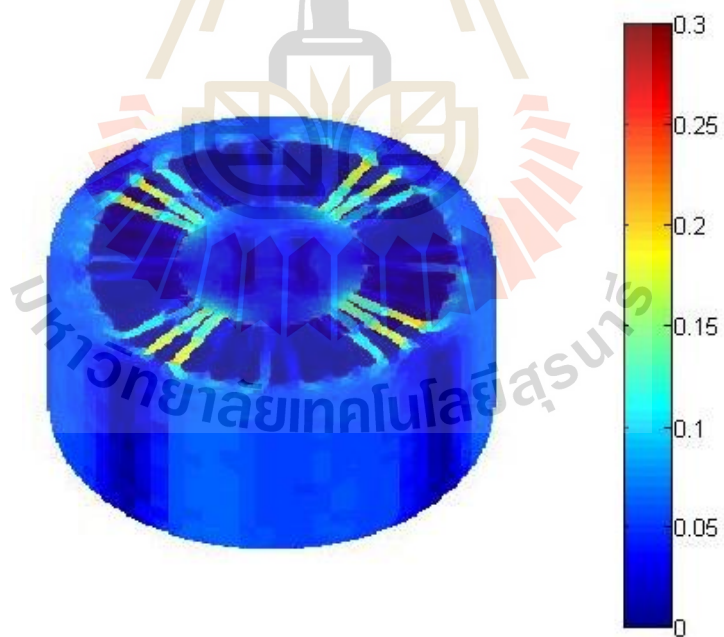
รูปที่ ก.16 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 180 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูป ก.17 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 270 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ ก.18 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ณ มุม 360 องศา ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ ก.19 สนามแม่เหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์

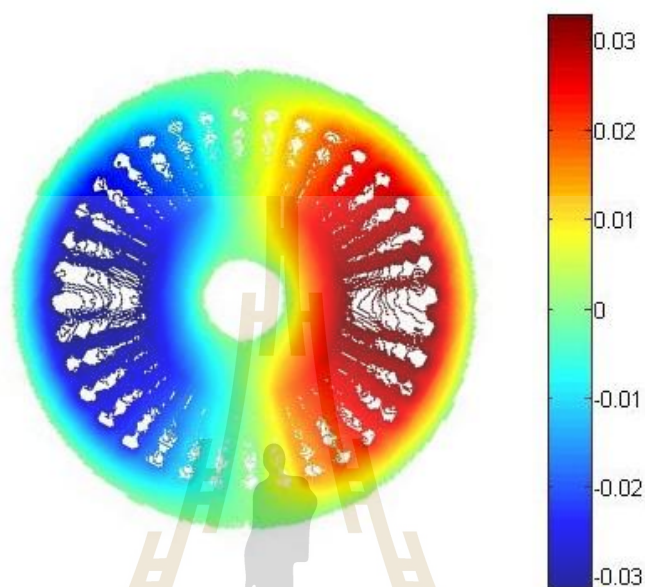
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular base with a scalloped edge. Above the figure are several vertical lines of varying heights, resembling a stylized 'H' or a traditional architectural element. The entire logo is rendered in a light beige or gold color.

ภาคผนวก ข

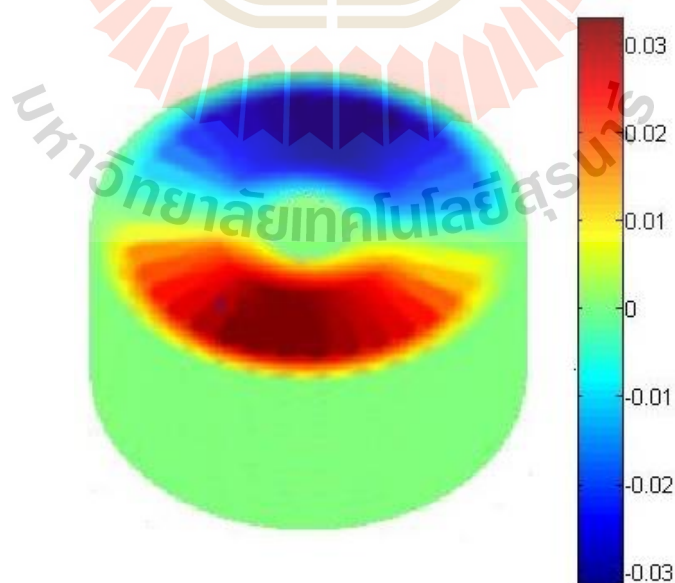
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อไม่ได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในกระบวนการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เมื่อไม่ได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นอาจส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงเกินกว่าที่ควรจะเป็น โดยสามารถแสดงภาพศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามเหล็กได้ดังที่ ข.1 - ข.4

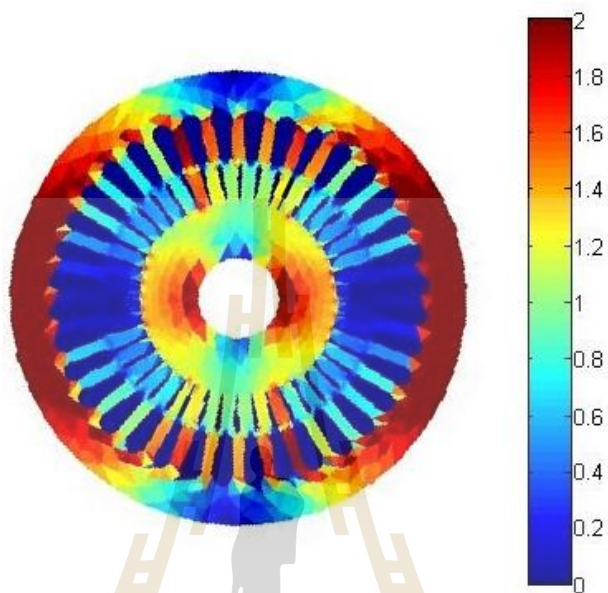


รูปที่ ข.1 ภาคตัดขวางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่กระจายตัวในมอเตอร์

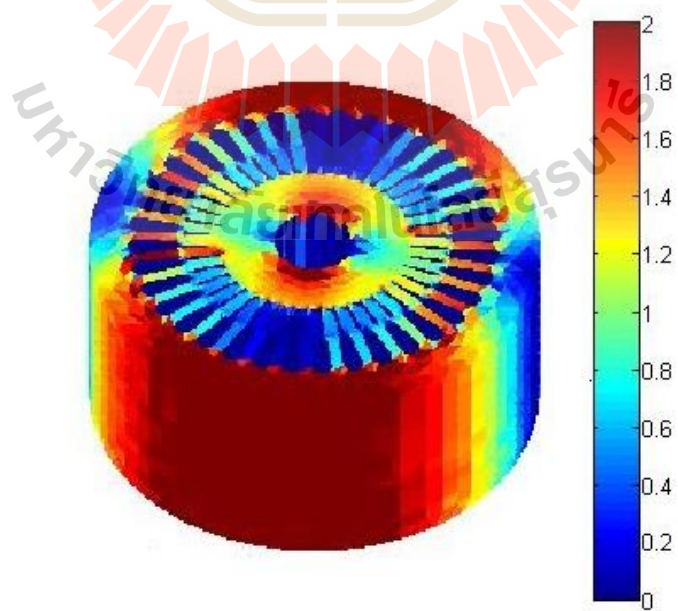


รูปที่ ข.2 ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์

สำหรับค่าสนามเหล็กจะพบได้ว่าการไม่ได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นสูงเกินกว่าค่าความอิ่มตัวของวัสดุ ซึ่งอาจผลลัพธ์ที่ทำให้คำตอบคลาดเคลื่อนจากความถูกต้องไปได้



รูปที่ ข.3 ภาคตัดขวางของสนามแม่เหล็ก (T) ที่กระจายตัวในมอเตอร์



รูปที่ ข.4 สนามเหล็ก (T) แบบ 3 มิติ ที่กระจายตัวในมอเตอร์



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Vacharakup, S. and Pao-la-or, P. (2018) Characteristics developments of induction motor applying 6-phase theory by using the 3-D finite element method. Transportation and Electric Railway. IEE Japan (IEEJ). Vol.1 pp: 23-28.

Pao-la-or, P. and Vacharakup, S. (2019) Simulation of the 6-phase Fractional Pitch Induction Motors to Reduce Harmonic by using the 3-D Finite Element Method. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 8, No. 4, pp: 580-587.



Characteristics developments of induction motor applying 6-phase theory by using the 3-D finite element method

Somsak Vacharakup¹, and Padej Pao-la-or^{2,*}
 Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District,
 Nakhon Ratchasima, Thailand

¹somsak_v.kup@hotmail.co.th, ²padej@sut.ac.th

*Corresponding Author

This paper presents the 6-phase theory of 6-phase induction motor to develop the 3-phase induction motor for improving the efficiency of the work. In the improvement, it is still referenced in the original structure. Simulation results and characteristics of 3-phase and 6-phase induction motor is compared. In comparison, it will present and explain the better characteristics. For computer simulations, the 3-D finite element method was used. The equation is shown in the form of the second order partial differential equation and is an equation when considering time-dependent problems. Simulation results show that when the motor is in steady state and full load of 6-phase induction motor, 2-pole, 3-HP, squirrel-cage and double-layer motor are used. MATLAB is developed by researchers and considering 3-D problems with graphical representation of the simulated induction motor.

Keywords: Induction motor, Simulation, 6-phase theory, 3-D finite element method, Magnetic field

1. INTRODUCTION

Over the past 10 years, multi-phase induction motor drive has been developed with phase number of the stator winding more than 3-phases. The use of 3-phase induction motors which have two sets of stator windings will provide higher torque. By 6-phase power supply, it can be applied to high power drive systems such as ship, plane and electric vehicles. Output torque of multi-phase induction motors is higher than 3-phase induction motors, so multi-phase induction motors are attractive to use with an electric vehicle. Multi-phase induction motor can use the structure of the 3-phase induction motor directly, but the performance may not be good if it is modified by the new stator winding under the structure of the original motor will make better performance. In designing induction motor considered various characteristics such as torque, output power, vibration and heat generated. These characteristics depend on the distribution of the magnetic field in the motor. Based on the previous research, it was found that the 3-phase induction motors switching to 6-phase power supply to act as 6-phase induction motors. It can increase the torque and output power increased by 1.5 - 2.0 times, which makes it very interesting because the weight of the motor has not changed. It can increase the torque and power with increasing the number of phases, which also lower phase current and the electronic switch equipment has a lower current rating.

Finite element method is one numerical method used to solve the equation problem in the partial differential equation (PDE). It is very popular to apply to engineering work such as finding solutions of electric field, magnetic field, heat, stress, etc. This method will divide the area of the problem into sub-assemblies composed of node and connected by grids. For 3-D problems, linear tetrahedral element is used to approximate the domain of the problem. Therefore, this research has introduced the 3-D finite element

method (3-D FEM) using MATLAB developed for simulation to determine the characteristics of induction motor. [1]

2. THE 6-PHASE INDUCTION MOTOR

Multi-phase induction motor drive, which has phase number of the stator winding more than 3-phases, can be used directly in the structure on 3-phases induction motor. The 3-phase induction motors which has two sets of stator windings are operated at 6-phase induction motor symmetric type of second set of stator windings will have a different phase angle shifting from the first stator windings 60° as shown in Fig. 1. [2]

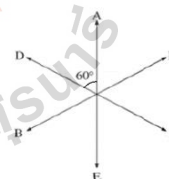


Fig. 1 Stator winding symmetric type

In the induction motor structure, 3-phase induction motor, 4-pole, 3-HP, squirrel cages and double-layer motor is used. Details of the parameters can be described in Table 1, which consists of the number of stator slots are 36 slots and coil pitch of the stator windings is 7/9. The use 6-phase theory to improve the 3-phase system is implemented in a symmetric type, which is analysed by the placement balanced of the pole. The new structure is a 6-phase induction motor with 2 poles, coil pitch is 16/18. The 6-phase concept applied to 3-phase system is divided into 3 steps as shown in Fig. 2-4.

Table 1. Parameters of 3-phase induction motor

Parameter	Value
Output power	3 HP
Voltage	380 V (Star)
Number of poles	4 P
Frequency	50 Hz
Rated speed	1455 rpm
Stator type of winding	Double layer
Stator slot	36
Rotor slot	44
Air gap width	0.4 mm
Coil pitch	7/9
Number of turns	15 turns

For step 1, applying the 6-phase concept for a 3-phase system occur at one time can be done by setting the first stator windings position at the stator slots number 1 in the first layer, starting with phase A, D, B, E are positive pole and phase C, F are negative pole. Then set the phase angle using the symmetric type concept with a phase angle of phase D, E, F shifting from phase A, B, C 60°, as shown in Fig. 2.

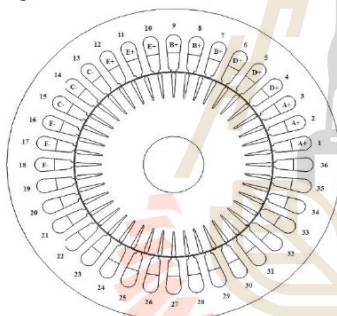


Fig. 2 Positive pole position based on phase A at step 1

Step 2 Set the position of the stator windings to be negative pole, starting negative pole phase A with phase angle shifting positive pole phase A 180° at the stator slots number 19 because this motor is 2-pole system. Then set the phase D, E, F with phase angle increase from phase A, B, C 60°, as shown in Fig. 3

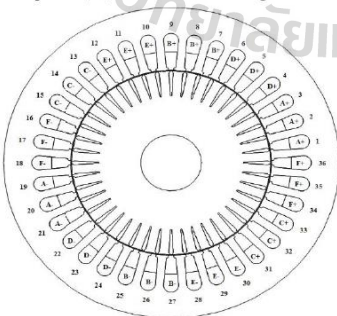


Fig. 3 Negative pole position based on phase A at step 2

In the final step, the stator windings will be placed in the second layer by coil pitch of the stator windings is 16/18 because referenced in the original structure. Then set the stator windings as same as the first layer, but the pole is opposite, which starts from the negative pole phase A at the stator slot number 17 in the second layer, as shown in Fig. 4.

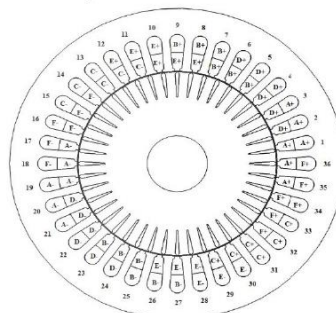


Fig. 4 The position of the coil in the second layer, with a coil pitch of 16/18 at final step

3. MODELING OF MAGNETIC FIELD FOR INDUCTION MOTOR

Magnetic field (**B**) can only be computed by the magnetic vector potential (**A**) represented by Equation (1).

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{1}$$

Mathematical model of the magnetic field of the induction motor, which induces current in the circuit of the rotor is based on the slip (*s*) of the motor. Considering a 3-D motor in a xyz plane coordinate, which varies over time can be calculated by second order partial differential equation represented by Equation (2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - s\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) + J_0 = 0 \tag{2}$$

And $J_0 = \frac{n \cdot I}{a}$

Where μ is the magnetic permeability of the magnetic material, σ is the electrical conductivity of the conducting media in the rotor, *s* is the slip at a specific operating condition of the rotor, J_0 is the applied external current density, *n* is number of turn, *I* is phase current and *a* is cross sectional area of the coil.

Finding the correct solution of the second order partial differential equation shown in Equation (2), is extremely difficult and complex to solve. Therefore, this research uses a 3-D Finite element method for estimating the solution, which is the most efficient numerical method for solving the second order partial differential equation.

4. 3-D FEM FOR INDUCTION MOTOR

4.1 THE ELEMENT OF THE SYSTEM TO STUDY

This research considers 6-phase induction motor, 2-pole, 3-HP,

squirrel cages and double-layer using finite element method to simulate the distribution of magnetic vector potential and magnetic field. It shows the division of the element by linear tetrahedral throughout the induction motor area with Solid Works program. Dimension of induction motor is as shown in Fig. 5 and 3-D mesh of induction motor as shown in Fig. 6, consisting of 42,635 nodes and 220,353 elements.

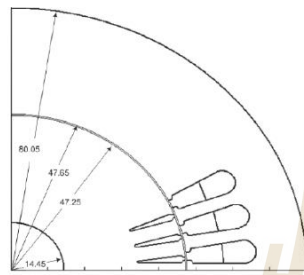


Fig. 5 Dimension of induction motor (mm)

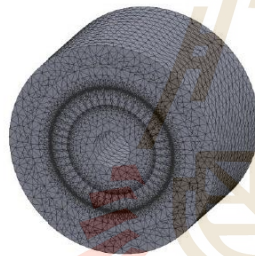


Fig. 6 The 3-D mesh of induction motor

4.2 THE 3-D FINITE ELEMENT FORMULATION

The equation of each element uses the weighted residual method of Galerkin. In this way, the weighting function is equal to the shape function by the magnetic vector potential at any coordinates can be expressed as Equation (3). [3]

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \tag{3}$$

In Equation (4) N_i , $i = i, j, k, l$ is the shape function within the element and A_i , $i = i, j, k, l$ is the result of the magnetic vector potential at each node i, j, k, l of the element, V is the volume of the linear tetrahedral of each element.

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \tag{4}$$

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

And

$$\begin{aligned} a_i &= x_j z_k - y_j z_k + x_k (y_j z_l - y_l z_j) + x_l (y_k z_l - y_l z_k) \\ a_j &= x_l (y_k z_i - y_i z_k) + x_k (y_l z_l - y_l z_i) + x_i (y_l z_k - y_k z_l) \\ a_k &= x_l (y_i z_j - y_j z_i) + x_j (y_l z_l - y_l z_i) + x_i (y_j z_l - y_l z_j) \\ a_l &= x_j (y_j z_i - y_i z_j) + x_j (y_l z_k - y_k z_l) + x_i (y_k z_j - y_j z_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_i &= y_l (z_k - z_j) + y_k (z_j - z_l) + y_j (z_l - z_k) \\ b_j &= y_l (z_i - z_k) + y_i (z_k - z_l) + y_k (z_l - z_i) \\ b_k &= y_l (z_j - z_i) + y_j (z_i - z_l) + y_i (z_l - z_j) \\ b_l &= y_k (z_i - z_j) + y_i (z_j - z_k) + y_j (z_k - z_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_i &= x_l (z_j - z_k) + x_j (z_k - z_l) + x_k (z_l - z_j) \\ c_j &= x_l (z_k - z_i) + x_k (z_i - z_l) + x_i (z_l - z_k) \\ c_k &= x_l (z_i - z_j) + x_i (z_j - z_l) + x_j (z_l - z_i) \\ c_l &= x_k (z_j - z_i) + x_j (z_i - z_k) + x_i (z_k - z_j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_i &= x_j (y_k - y_l) + x_k (y_j - y_l) + x_l (y_l - y_k) \\ d_j &= x_l (y_i - y_k) + x_i (y_k - y_l) + x_k (y_l - y_i) \\ d_k &= x_l (y_j - y_i) + x_j (y_i - y_l) + x_i (y_l - y_j) \\ d_l &= x_k (y_i - y_j) + x_i (y_j - y_k) + x_j (y_k - y_i) \end{aligned}$$

The method of the weighted residue with the Galerkin approach is then applied to the PDE, where the integrations are performed over the element domain (Ω) in Equation (5).

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n s \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} N_n J_0 d\Omega = 0 \tag{5}$$

Or in the compact matrix form

$$[M + K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1}$$

By

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{s \sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36 \mu V} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i + d_i d_i & b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j \\ b_j b_i + c_j c_i + d_j d_i & b_j b_j + c_j c_j + d_j d_j \\ b_k b_i + c_k c_i + d_k d_i & b_k b_j + c_k c_j + d_k d_j \\ b_l b_i + c_l c_i + d_l d_i & b_l b_j + c_l c_j + d_l d_j \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_i b_k + c_i c_k + d_i d_k & b_i b_l + c_i c_l + d_i d_l \\ b_j b_k + c_j c_k + d_j d_k & b_j b_l + c_j c_l + d_j d_l \\ b_k b_k + c_k c_k + d_k d_k & b_k b_l + c_k c_l + d_k d_l \\ b_l b_k + c_l c_k + d_l d_k & b_l b_l + c_l c_l + d_l d_l \end{bmatrix}$$

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

Then, the equations of each of the elements are assembled into the system equation. If the shape of the problem is divided into sub-elements that consist of n node. It will result in a total system of equations, which consists of n equation.

Solving problems under time at short time intervals will use the recurrence relation. It is shown in Equation (6) where Δt is the time step. In this research, use the backward difference method because of this method guarantees the convergence of the results and the results are constantly changing. [4]

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[M] + [K]\right)\{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}[M]\{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (6)$$

5. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

In order to find the result, the solution starts from the initial condition of the motor at each rotation of the motor and the boundary condition of the area. This research has the initial condition in the first round that determines the rotation of the motor is the magnetic vector potential (A) at start time is zero. For boundary conditions, it is set in the inner surface area of the rotor and the outer surface area of the stator is A = 0. The conductivity is $\sigma = 4.90 \times 10^7$ S/m in the rotor bars, and the relative permeability of the stator and rotor cores $\mu_r = 5000$. It notes that the free space permeability (μ_0) is $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Find the solution of the motor characteristics are to consist the phase current as show in Fig. 7 [5], magnetic vector potential and magnetic field, it shows during steady state in 3-D shown in Fig. 8 and Fig. 11, respectively, and cross sections of magnetic vector potential and magnetic field show with rotating at angles of 0° and 90° in Fig. 9-10 and Fig. 12-13, respectively.

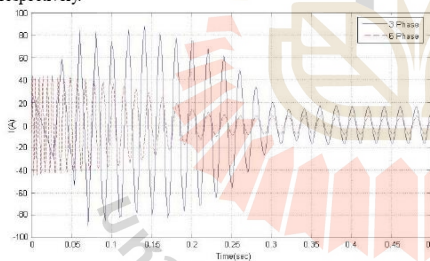


Fig. 7 Phase current between 3-phase and 6-phase systems

Fig. 7 Show the phase current between 3-phase and 6-phase systems only single phase. From the graph, the phase current at the steady state is used to calculate the magnetic vector potential.

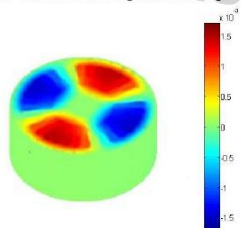


Fig. 8 3-D magnetic vector potential (wb/m) of 3-phase induction motor

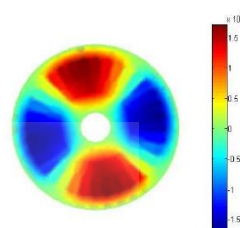


Fig. 9 Cross section of magnetic vector potential (wb/m) at 0° of 3-phase induction motor

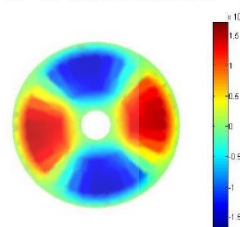


Fig. 10 Cross section of magnetic vector potential (wb/m) at 90° of 3-phase induction motor

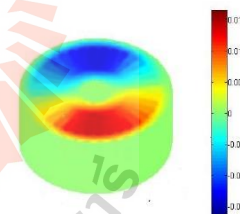


Fig. 11 3-D magnetic vector potential (wb/m) of 6-phase induction motor

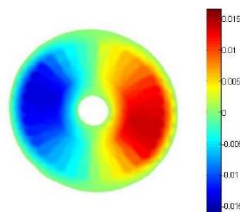


Fig. 12 Cross section of magnetic vector potential (wb/m) at 0° of 6-phase induction motor

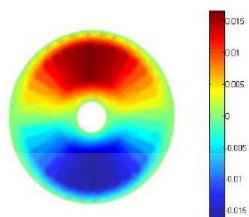


Fig. 13 Cross section of magnetic vector potential (wb/m) at 90° of 3-phase induction motor

Fig. 8-13 show the magnetic vector potential distributed in the area of the induction motor for a 3-phase system, it is 4-poles, and in the 6-phase system, the 2-poles. The distribution of the magnetic poles is divided into three ranges, the red range is a positive magnetic vector potential and the green range is the value between the positive and negative values that are offset until the value is almost zero. The distribution of the colour bar depends on the polarity of the input current in the stator slot. From the distribution of magnetic vector potential, the rotation of each angle of the motor will be slightly different. The 6-phase system will have a higher magnetic vector potential than the 3-phase system at every each angle of the motor

Then the magnetic vector potential is calculated for the magnetic field as the Equation (1) by considering the motor in 3-D, the coordinates xyz can calculate the magnetic field in the x-axis (B_x) and the magnetic field in the y-axis (B_y) because the current occur in the z-axis shown in Equation (7) and (8) will be able to calculate the magnetic field. [6]

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (7)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (8)$$

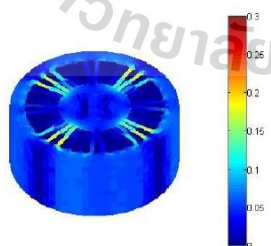


Fig. 14 3-D magnetic field (T) of 3-phase induction motor

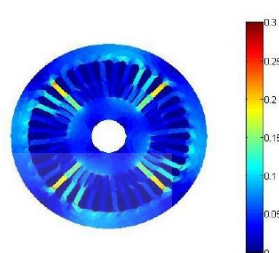


Fig. 15 Cross section of magnetic field (T) at 0° of 3-phase induction motor

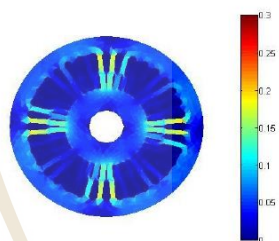


Fig. 16 Cross section of magnetic field (T) at 90° of 3-phase induction motor

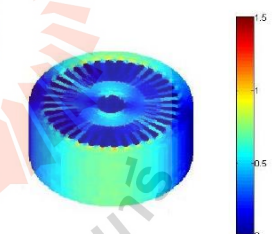


Fig. 17 3-D magnetic field (T) of 6-phase induction motor

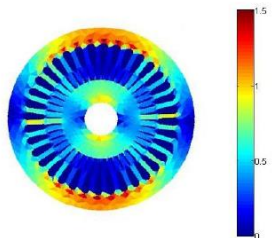


Fig. 18 Cross section of magnetic field (T) at 0° of 6-phase induction motor

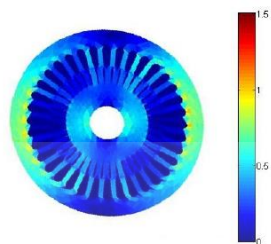


Fig. 19 Cross section of magnetic field (T) at 90° of 6-phase induction motor

Fig. 14-19 shows the distribution of magnetic field. It will be found that the distribution of the magnetic field will not occur in the stator slot, but distribution goes out stator slot to the iron core. It can be seen magnetic vector potential from Fig. 8-13 that the distribution pattern corresponds to the magnetic vector potential. The magnetic field distribution in each angle is slightly different. Based on the simulation, it was found that in the 6-phase system, the magnetic field was higher than the 3-phase.

After calculating the magnetic field on the Cartesian coordinate, the coordinate system was converted to cylindrical coordinate. For the calculation of radial flux density (B_r), tangential flux density (B_t), tangential force (F_t), radial force (F_r) and torque can be expressed as Equation (9) - (12), respectively. [6]

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (9)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (10)$$

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (11)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (12)$$

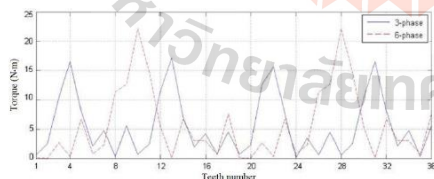


Fig. 20 Torque (N·m) occurring in the center of each stator tooth

Fig. 20 show the torque that occurs at the center of each stator tooth by comparison between 3-phase and 6-phase systems. In the 3-phase system, the characteristic of the torque curve increases and decreases as the 4-wave is caused by the polarity of the 4-poles. The 6-phase system will increase and decrease as 2-waves as well. It is found that in 6-phase system, the maximum torque is greater than 3-phase system.

6. CONCLUSION

This paper presents a study on the characteristics of induction motor include magnetic vector potential, magnetic field and torque. The system of 6-phase induction motor designed, it was found that the magnetic vector potential, magnetic field and torque that is higher than the 3-phase system. Therefore, the 6-phase induction motors are attractive to use with an electric vehicle. It can be seen that the finite element method is a highly efficient way to calculate the magnetic vector potential and magnetic field in an induction motor, which are useful for calculating the characteristics of the induction motor.

References

- (1) Vacharakup, S., Peerasaksothol, M., Kulworawanichpong, T., and Pao-la-or, P. : "Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116, pp 61-66 (2012).
- (2) Ping, Z., Fan, W., Yu, L., Yi, S., and Bin, Y. : "Investigation of a Novel 24-Slot/14-Pole Six-Phase Fault-Tolerant Modular Permanent-Magnet In-Wheel Motor For Electric Vehicles", *Energies* (2013).
- (3) Lewis, R.W., Nithiarasu, P., and Seetharamu, K.N. : *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*, John Wiley & Sons, USA, (2004).
- (4) Jabbar, M.A., Phyu, H.N., Liu, Z.J., and Bi, C. : "Modeling and numerical simulation of brushless permanent-magnet dc motor in dynamic condition by time-stepping technique", *IEEE Transaction on Industrial Application*, Vol. 40, No. 3, pp. 763-769, (2004).
- (5) Bunmat, A., and Pao-la-or, P. : "Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method", *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, October 2015, Pattaya, Thailand, pp. 1187-1191, (2015).
- (6) Pao-la-or, P., Isaramongkolrak, A., and Kulworawanichpong, T. : "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems", *Engineering Letters*, Vol. 18, No.1, pp. 1-9, (2010).

Simulation of the 6-phase Fractional Pitch Induction Motors to Reduce Harmonic by using the 3-D Finite Element Method

Padej Pao-la-or and Somsak Vacharakup
School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
Email: padej@sut.ac.th, Email: somsak_v.kup@hotmail.co.th

Abstract— This paper presents harmonic reductions of 6-phase induction motors related to increased torque and filtered a sine waveform of magnetic flux density by adjusting coil pitch with the original structure. Full pitch and fractional pitch systems were considered in terms of simulation results and characteristics for optimized applications. There were 2 tools in MATLAB used for these solutions, a 3-D finite element method to do simulations of this system and a Fast Fourier Transform to calculate the harmonic distortion, respectively. The equation used in the simulations is a second order partial differential equation with time-dependent conditions. The results of both full pitch and fractional pitch systems based on steady state and full load of a 6-phase induction motor, 2-pole, 3-HP, squirrel-cage and double-layer motor were obtained. MATLAB was used for 3-D graphics of the simulated 6-phase induction motor.

Index Terms—6-phase induction motor, simulation, 3-D finite element method, fractional pitch, harmonic

I. INTRODUCTION

Over the past 10 years, multi-phase induction motor drives have been developed with more than 3-phases. Three-phase induction motors provide higher torque. A 6-phase power supply can be used for high power drive systems such as ships, airplanes and electric vehicles. Output torque of these multi-phase induction motors is higher than that of 3-phase induction motors. A multi-phase induction motor can be directly used in the form of a 3-phase induction motor, but the performance may not be good if the new stator winding is not designed properly. The important parameters in designing induction motors include torque, output power, vibration, heat generated and harmonic distortion [1-4]. These characteristics depend on the distribution of the magnetic field in the motor [5]. Based on previous research, it was found that 3-phase induction motors can be modified to operate with a 6-phase power supply to act as 6-phase induction motors. Their torque and output power increase can be as much as 1.5-2.0 times, which makes them very attractive since the weight of the motor has not changed. Torque and power can be increased with increasing

numbers of phases, which also lowers the phase current and the electronic switch equipment at a lower current rating. However, the development of a 6-phase induction motors for higher torque applications, leads to higher harmonic distortion. This distortion causes decreased torque and performance [6]. Therefore, the concept of fractional pitch induction motors to reduce harmonic distortion was investigated using Fast Fourier Transforms (FFT) [7-8].

The finite element method is a numerical method commonly used to solve partial differential equations (PDE). It is very widely used in engineering to find solutions of problems concerning electric fields, magnetic fields, heat, and stress distributions, among many others [9-10]. This method will divide regions of the problem into sub-regions composed of nodes and connected by grids. For 3-D problems, the linear tetrahedral element is used to approximate the domain of the problem. Therefore, the current study used a 3-D finite element method (3-D FEM) in the MATLAB environment for simulation to determine the characteristics of this type of induction motor.

II. THE 6-PHASE INDUCTION MOTOR

Multi-phase induction motor drives can be used directly in the structure of a 3-phase induction motor. Three-phase induction motors, which have two sets of stator windings, are operated as a 6-phase induction motor with a second set of symmetric stator windings. This results in a different phase angle, shifting from the first stator windings by 60° as shown in Fig. 1 [11-12].

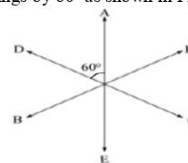


Figure 1. Symmetric type of stator winding

The induction motor structure featuring a 6-phase induction motor, 2-pole, 3-HP, squirrel cages and double-layer motor was used. Details of this motor are given in

Manuscript received July 21, 2018; revised May 1, 2019.

Table I. It consists of 36 stator slots with a coil pitch of the stator windings of either full pitch or 16/18 fractional pitch as shown in Figs. 2-3.

TABLE I. PARAMETER OF 6-PHASE INDUCTION MOTOR

Parameter	Value
Output power	3 HP
Voltage	380 V (Star)
Number of poles	2 P
Frequency	50 Hz
Rated speed	2910 rpm
Stator type of winding	Double layer
Stator slot	36
Rotor slot	44
Air gap width	0.4 mm
Number of turns	15 turns

Table I., shows the parameters of a 6-phase induction motor redesigned from the original structure of a 3-phase induction motor, which allowed the voltage and power to remain unchanged. It was found that when applied to a 6-phase system, the poles are less and the speed increases.

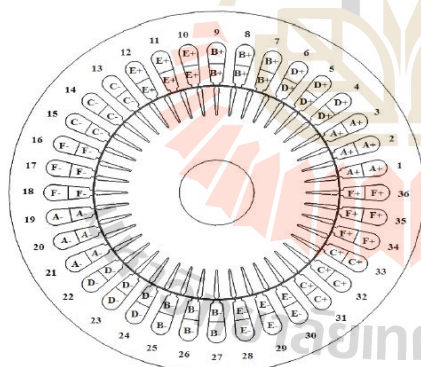


Figure 2. Full pitch stator windings

Fig 2 shows a 6-phase induction motor designed from an original 3-phase structure. The 6-phase concept applied to 3-phase system is divided into 3 steps. In step 1, the 6-phase concept for a 3-phase system can be done by setting the first stator winding position at the number 1 stator slot in the first layer, starting with phases A, D, B, E which are positive poles and phases C, F are negative poles. Then set the phase angle using the symmetry concept with the phase angle of phase D, E, F shifting from phase A, B, C by 60°. Step 2 set the position of the stator windings to the negative pole, starting with

the negative pole phase A with 180° phase angle shift to the positive pole phase A at stator slot number 19 because this motor is a 2-pole system. Then set phases D, E, F with a 60° phase angle increase from phase A, B, C. In the final step, the stator windings will be placed in the second layer by the coil pitch of the stator windings of full pitch. Then set the stator windings to be the same as the first layer, which starts from the negative pole phase A at stator slot number 19 in the second layer.

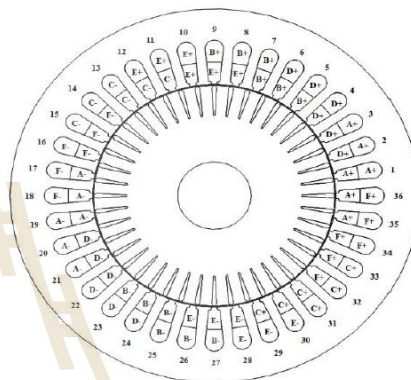


Figure 3. 16/18 Fractional pitch stator windings

Fig 3 shows a 6-phase induction motor designed from an original 3-phase structure of stator windings that is 16/18 fractional pitch. The stator windings will be placed in the second layer by coil pitch of the stator windings at a 16/18 fractional pitch. Then set the stator windings to be the same as the first layer, which starts from the negative pole phase A at stator slot number 17 in the second layer.

III. MODELING OF MAGNETIC FIELD FOR INDUCTION MOTOR

A magnetic field (**B**) can only be computed by the magnetic vector potential (**A**) represented by (1).

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{1}$$

Mathematical modeling of the magnetic field of the induction motor was done, which induces current in the circuit of the rotor based on the slip (*s*) of the motor. Considering a 3-D motor in an *xyz*-plane coordinate, which varies over time and can be calculated using the second order partial differential equation represented by (2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - s\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) + J_0 = 0 \tag{2}$$

and
$$J_0 = \frac{n \cdot I}{a}$$

where μ is the magnetic permeability of the magnetic material, σ is the electrical conductivity of the conducting

media in the rotor, s is the slip of the rotor at a specific operating condition, J_0 is the applied external current density, n is number of turns, I is phase of the current and a is the cross-sectional area of the coil.

Finding the correct solution of the second order partial differential equation shown in (2), is extremely difficult. Therefore, this research used a 3-D finite element method to estimate the solution, which is the most efficient numerical method for solving these types of equations.

IV. 3-D FEM FOR INDUCTION MOTOR

A. The Element of the System to Study

This research considers a 6-phase induction motor, 2-pole, 3-HP, squirrel cages and double-layer using a finite element method to simulate the distribution of magnetic vector potential and magnetic field. It divides the region of study using linear tetrahedral elements throughout the simulated induction motor in a SolidWorks environment. The dimensions of the induction motor are shown in Fig. 4. A 3-D mesh of the induction motor is shown in Fig. 5. It consists of 42,635 nodes and 220,353 elements.

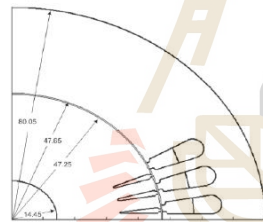


Figure 4. Dimension of induction motor (mm)

Fig. 4 shows a cross section of a 6-phase induction motor showing one quarter of the motor. The figure shows the distance from the center of the stator, rotor, shaft, and air gap between the stator and the rotor. The model of a 6-phase induction motor used in simulation has a double layer stator with 36 slots while the rotor has 44 slots.



Figure 5. The 3-D mesh of induction motor

Fig. 5 A model of a 6-phase induction motor used for simulation with the finite element method. The model

was created in SolidWorks with a tetrahedral mesh. The tetrahedral have nodes in each element and are pyramid shaped.

B. The 3-D Finite Element Formulation

The equation of each element uses the Galerkin weighted residual method. In this way, the weighting function is equal to the shape function and the magnetic vector potential at any coordinate can be expressed as (3) [13].

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (3)$$

In (4) N_i , $i = i, j, k, l$ is the shape function within an element and A_i , $i = i, j, k, l$ is the resulting magnetic vector potential at each node i, j, k, l of the element. V is the volume of a linear tetrahedral.

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (4)$$

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

And

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

This approach is then applied to the PDE, where the integrations are performed over the element domain (Ω) in (5).

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n s \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} N_n J_0 d\Omega = 0 \quad (5)$$

Or in compact matrix form

$$[M]_{4 \times 4} \{A\} + [K]_{4 \times 4} \{A\} = \{F\}_{4 \times 1}$$

by

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{s\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i + d_i d_i & b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j & b_i b_k + c_i c_k + d_i d_k & b_i b_l + c_i c_l + d_i d_l \\ b_j b_i + c_j c_i + d_j d_i & b_j b_j + c_j c_j + d_j d_j & b_j b_k + c_j c_k + d_j d_k & b_j b_l + c_j c_l + d_j d_l \\ b_k b_i + c_k c_i + d_k d_i & b_k b_j + c_k c_j + d_k d_j & b_k b_k + c_k c_k + d_k d_k & b_k b_l + c_k c_l + d_k d_l \\ b_l b_i + c_l c_i + d_l d_i & b_l b_j + c_l c_j + d_l d_j & b_l b_k + c_l c_k + d_l d_k & b_l b_l + c_l c_l + d_l d_l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_i b_k + c_i c_k + d_i d_k & b_i b_l + c_i c_l + d_i d_l \\ b_j b_k + c_j c_k + d_j d_k & b_j b_l + c_j c_l + d_j d_l \\ b_k b_k + c_k c_k + d_k d_k & b_k b_l + c_k c_l + d_k d_l \\ b_l b_k + c_l c_k + d_l d_k & b_l b_l + c_l c_l + d_l d_l \end{bmatrix}$$

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

Then, the equations of each of the elements in the region under study are assembled into a system equations. The problem is divided into sub-elements that consist of n nodes. The solution requires the solution of a system of n equations.

The solution to such problems is iterative over a series of short time-steps, Δt , in (6). In this research, the backward difference method was used because this method guarantees convergence even when the results are constantly changing [14].

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M] + [K] \right) \{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M] \{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (6)$$

V. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The solution starts from the initial condition of the motor and continues for each rotation of the motor considering the boundary conditions of the problem. This research used an initial condition that the magnetic vector potential (A) at start time is zero. The boundary conditions were applied at the inner surface area of the rotor and the outer surface area of the stator, $A = 0$. The conductivity is $\sigma = 4.90 \times 10^7$ S/m in the rotor bars, and the relative permeability of the stator and rotor cores was $\mu_r = 5000$. The free space permeability (μ_0) was $4\pi \times 10^{-7}$ H/m [15]. In the solution, the motor characteristics consisted of the rotor speed, as shown in Fig. 6. The magnetic vector potential of full pitch and fractional pitch systems during steady state is shown in Figs. 7-12 and magnetic field of full pitch and fractional pitch systems during steady state are shown in Figs. 13-18.

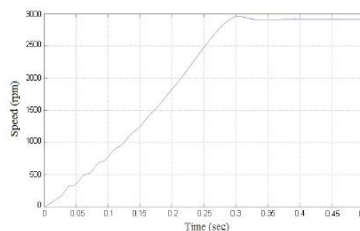


Figure 6. Speed of a 6-phase induction motor

Fig. 6 shows the rotation speed of a 6-phase induction motor from its starting time until reaching steady state. The start time was 0 sec and the motor reached steady state at 0.3 sec as can be seen in the figure. During this time, the speed increased continuously and then the speed was constant.

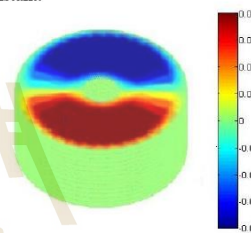


Figure 7. Cross-sectional magnetic vector potential (wb/m) of a full pitch induction motor

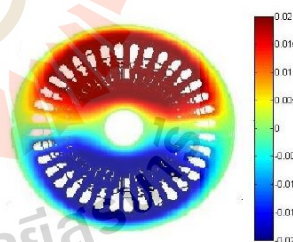


Figure 8. Cross-section of magnetic vector potential (wb/m) at 0° of full pitch of an induction motor

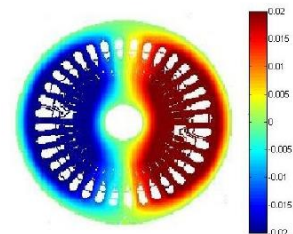


Figure 9. Cross-section of magnetic vector potential (wb/m) at 90° of full pitch in an induction motor

Fig. 7 shows the 3-D model of a 6-phase full pitch induction motor. The vertical axis and graph are fill plotted. In Fig. 8-9 displays the cross-section of a 6-phase induction motor giving the top view with contour plots.

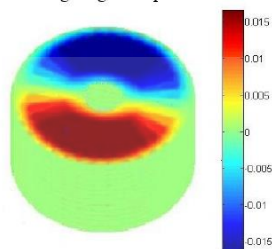


Figure 10. 3-D magnetic vector potential (wb/m) of a fractional pitch induction motor

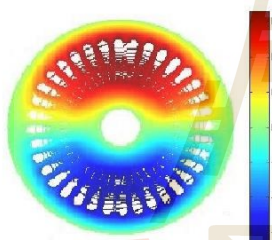


Figure 11. Cross-section of magnetic vector potential (wb/m) at 0° of fractional pitch in an induction motor

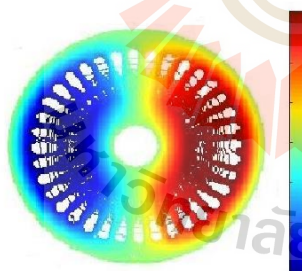


Figure 12. Cross-section of magnetic vector potential (wb/m) at 90° of fractional pitch in an induction motor

Figs. 7-12 show the magnetic vector potential distributed throughout the induction motor for full pitch and fractional pitch systems. The distribution of the magnetic poles shows three ranges. The red range is a positive magnetic vector potential. The blue range is a negative magnetic vector potential and the green range gives positive and negative values that near zero. The

distribution of the colour bars depends on the polarity of the input current in the stator slot. From the distribution of magnetic vector potential, the rotation of each angle of the motor will be slightly different. The full pitch system will have a higher magnetic vector potential than the fractional pitch system at every angle of the motor.

Then the magnetic vector potential is calculated for the magnetic field (1) by considering the motor in 3-D, the xyz coordinates can be used to calculate the magnetic field along the x-axis (B_x) and the magnetic field along the y-axis (B_y). This is because the current is represented by the z-axis as is shown in (7) and (8) enabling calculation of the magnetic field [16].

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k + c_l A_l}{6V} \quad (7)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k + c_l A_l}{6V} \quad (8)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (9)$$

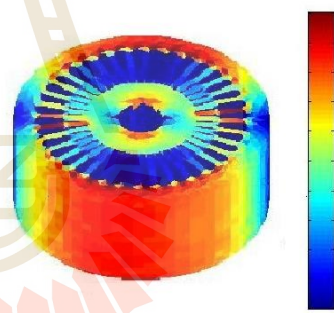


Figure 13. 3-D magnetic field (T) of a full pitch induction motor



Figure 14. Cross-section of the magnetic field (T) at 0° of a full pitch induction motor

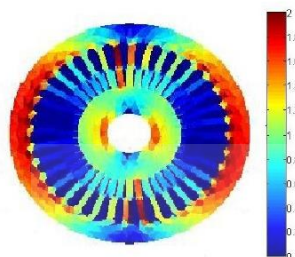


Figure 15. Cross-section of the magnetic field (T) at 90° of a full pitch induction motor

Figs. 13-15 show the 3-D model and cross-section of a 6-phase full pitch induction motor. It shows the vertical axis and top view. The figure was made by fill plotting.

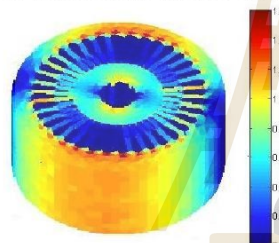


Figure 16. 3-D magnetic field (T) of a fractional pitch induction motor

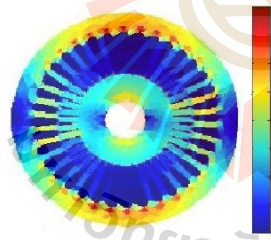


Figure 17. Cross-section of the magnetic field (T) at 0° of a fractional pitch induction motor

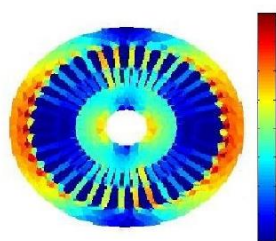


Figure 18. Cross section of the magnetic field (T) at 90° of a fractional pitch induction motor

Figs. 13-18 show the distribution of the magnetic fields. It was found that the distribution of the magnetic field did not occur in the stator slot, but occurred in the iron core. The magnetic vector potential can be seen in Figs. 7-12. The distribution pattern corresponds to the magnetic vector potential. The magnetic field distribution at each angle is slightly different. Based on the simulation, it was found that the magnetic field for the full pitch system was higher than the fractional system. The air gap flux density showed harmonics in the full pitch and fractional pitch systems as is shown in Figs. 19-20.

After calculating the magnetic field in Cartesian coordinates, the coordinate system was converted to cylindrical coordinates. Radial flux density (B_r) and tangential flux density (B_t) can be expressed as (10)-(11), respectively.

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (10)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (11)$$

$$B_{ag} = \sqrt{B_r^2 + B_t^2} \quad (12)$$

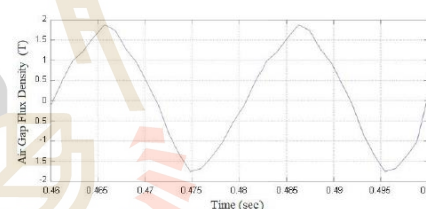


Figure 19. Air gap flux density (T) of a full pitch induction motor

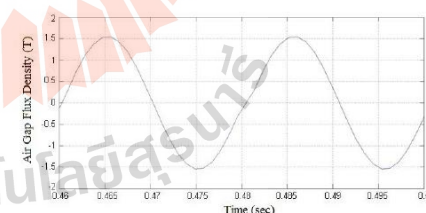


Figure 20. Air gap flux density (T) of a fractional pitch induction motor

Figs. 19-20 show the air gap flux density of a 6-phase induction motor. During steady state, it was found that in the full pitch system, the magnetic flux was higher than the fractional system. Its harmonic distortion was higher as well. It can be observed that the magnetic flux graph does not exhibit a sinusoidal waveform. FFT was applied to the magnetic field data of the induction motor in MATLAB to analyze its harmonic distortion with program. This is shown in Figs. 21-22.

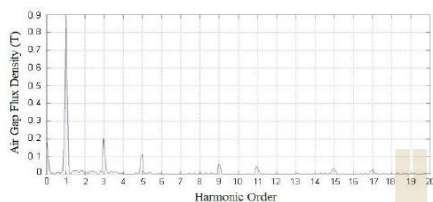


Figure 21. Air gap flux density (T) harmonic distribution of a full pitch induction motor

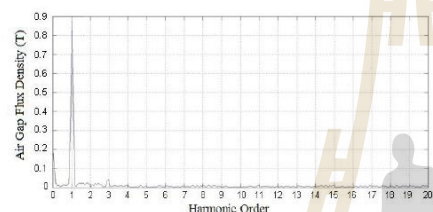


Figure 22. Air gap flux density (T) harmonic distribution of a fractional pitch induction motor

As can be seen from Figs. 21-22 for the full pitch system, harmonic distribution occurred at odd order numbers. In the fractional pitch system, the harmonic distribution decreased. The spectrum of the air gap flux density was calculated to determine %THD. The full pitch system had a THD = 27.35% and the fractional pitch system had THD = 5.42%.

VI. CONCLUSION

This work studied the characteristics of induction motors, including their magnetic vector potential and magnetic field using a 3-D FEM method and harmonic considerations with a FFT method in MATLAB. A full pitch 6-phase system induction motor was designed to achieve higher magnetic vector potential, magnetic field and harmonic distortion than the fractional pitch system. Therefore, fractional systems will reduce the harmonics. It can be seen that the FEM is a highly accurate method to calculate the characteristics of induction motors and the FFT method can solve the harmonic problem. These are useful designing induction motors for higher efficiency.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] Q. Mingzhong, J. Chao, Z. Yongxin, and L. Geng, "Research on design method and electromagnetic vibration of six-phase fractional-slot concentrated-winding pm motor suitable for ship propulsion," *IEEE Access*, 2017.
- [2] C. Kim, M. Li, "Torque and ripple analyses of a small BLDC motor for a surgical device," *International Journal of Electrical*

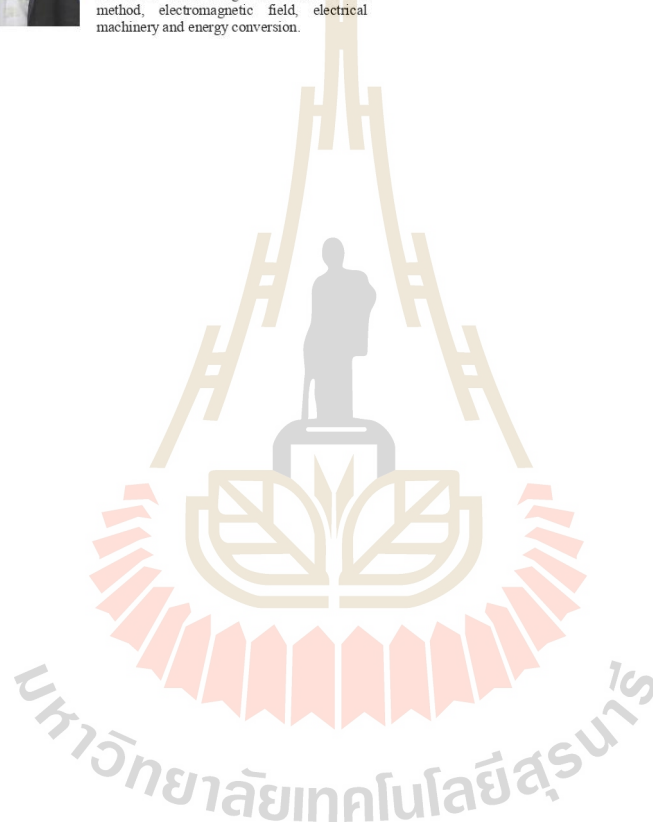
- and Electronic Engineering and Telecommunications (IJEETC)*, vol. 7, no. 1, pp. 16-20, January 2018.
- [3] S. Shashidhara, P. Raju, "Bearing fault detection of induction motor by ann method," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications (IJEETC)*, vol. 3, no. 1, pp. 34-42, January 2014.
- [4] A. Uma, "Torque control implementation scheme and back emf ripple reduction using bldc motor," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications (IJEETC)*, vol. 4, pp. 76-84, No. 3, July 2015.
- [5] T. Dharamirajan, K. Gowri, K. Surya, G. Renukadevi "Open loop response of inverter-fed three-phase induction motor drive," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications (IJEETC)*, vol. 1, no. 1, pp. 148-153, March 2015.
- [6] R. Martin, D. Widmer, "Electromagnetic considerations for a six-phase switched reluctance motor driven by a three-phase inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, 2016.
- [7] H. Shouly, L. Chuang, Z. Lei, J. Guanming, D. Shangjian, "Mutual coupling and its effect on current and torque of six phases switched reluctance motor," *Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, 2016.
- [8] A. Bao, A. Yong-le, L. Niu, "Study on the air gap flux density of the six-phase induction machine based on trapezoidal phase current waveform with CAD," *International Forum on Information Technology and Applications*, pp. 343-346, 2017.
- [9] N. Ananthan, N. Vimalraj, G. Kumar, "Design and analysis of brushless dc motor for reduce cogging torque using finite element analysis," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications (IJEETC)*, vol. 1, pp. 35-41, No. 1, March 2015.
- [10] S. Vacharakup, M. Peerasaksophol, T. Kulworawanichpong, P. Pao-la-or, "Study of natural frequencies and characteristics of piezoelectric transformers by using 3-d finite element method," *Applied Mechanics and Materials*, vols 110-116, pp. 61-66, 2012.
- [11] Z. Ping, W. Fan, L. Yu, S. Yi, Y. Bin, "Investigation of a novel 24-slot/14-pole six-phase fault-tolerant modular permanent-magnet in-wheel motor for electric vehicles," *Energies*, 2013.
- [12] L. Chih, H. Chang, "Multiobjective optimization design for a six-phase copper rotor induction motor mounted with a scroll compressor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, 2016.
- [13] W. Lewis, P. Nithiarasu, N. Seetharamu, "Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow," John Wiley & Sons, USA, 2004.
- [14] A. Jabbar, N. Phyu, J. Liu, C. Bi, "Modeling and numerical simulation of brushless permanent-magnet dc motor in dynamic condition by time-stepping technique," *IEEE Transaction on Industrial Application*, vol. 40, No. 3, pp. 763-769, 2004.
- [15] A. Bunmat, P. Pao-la-or, "Analysis of magnetic field effects operators working a power transmission line using 3-d finite element method," *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, Pattaya, Thailand, pp. 1187-1191, October 2015.
- [16] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," *Engineering Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 1-9, 2010.



Padej Pao-la-or is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B. Eng. (1998), M. Eng. (2002) and D. Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, finite element analysis, optimization and artificial intelligence, electromagnetic field, electrical machinery and energy conversion. He has joined the school since December 2005 and is currently a member in Power System Research, Suranaree University of Technology.



Somsak Vatcharakup is a student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B. Eng. (2008), M. Eng. (2011) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of finite element method, electromagnetic field, electrical machinery and energy conversion.



ประวัติผู้เขียน

นายสมศักดิ์ วัชรคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ.2530 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) และ ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2551 และ พ.ศ.2553 ตามลำดับ และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา เอกวิศวกรรมศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2559 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกได้เป็นผู้สอนในวิชาปฏิบัติการต่างๆของสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดใน ภาคผนวก ก

