

การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือน
โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

นายเผด็จ เผ่าละออ

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-534-7

**NEW DESIGNS OF INDUCTION MOTORS TO REDUCE
VIBRATION BY FINITE ELEMENT METHOD**

Mr. Padej Pao-la-or

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2005

ISBN 974-533-534-7

การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือน
โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำหรับการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาตรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. น.อ. ดร.วรพงษ์ จำปิต)

ประธานกรรมการ



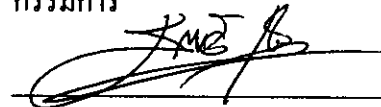
(รศ. น.ท. ดร.สรารุทธิ สุจิตกร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

นอ. 

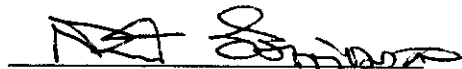
(รศ. น.อ. ดร.สมโภชน์ ศิวเหลือง)

กรรมการ



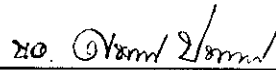
(อ. ดร.ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล)

กรรมการ

นอ. 

(น.อ. ดร.เสวตนันท์ ประยูรรัตน์ ร.น.)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสวตนันท์ ประยูรรัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพงษ์ จำปิต)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เผด็จ เผ่าละอ : การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธี
ไฟไนท์อีลิเมนต์ (NEW DESIGNS OF INDUCTION MOTORS TO REDUCE
VIBRATION BY FINITE ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 253 หน้า. ISBN 974-533-534-7

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลสนามแม่เหล็กและ
การสั่นสะเทือนทางกลในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกรงกระรอก เพื่อใช้ออกแบบรูปร่างร่อง
โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาดเล็กพิคัด 3 แรงม้าให้ลดการสั่นสะเทือนทางกล การจำลองผลได้ใช้วิธี
ไฟไนท์อีลิเมนต์ร่วมกับกระบวนการนิวตัน-ราฟสันเป็นเครื่องมือแก้สมการไม่เชิงเส้นที่มีการ
เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อศึกษาถึงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์อัน
เป็นตัวการที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลตรวจสอบความถูกต้อง
กับผลการวัด ซึ่งผลที่ปรากฏมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน การออกแบบรูปร่างร่อง
โรเตอร์ได้พิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ทำให้มอเตอร์มีลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วตามชั้น
คุณสมบัติ B เป็นรูปแบบอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบการสั่นสะเทือน ร่องโรเตอร์แบบใหม่สองรูปแบบ
ได้แก่ ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ช่วยให้มอเตอร์เกิดการ
สั่นสะเทือนน้อยลงกว่าเดิม การสั่นสะเทือนมีขนาดต่ำที่สุดเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก
งานวิจัยยังได้ศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ เมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่น
ไซน์ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ พร้อมทั้งจำลองผลของมอเตอร์
ขนาดใหญ่พิคัด 500 แรงม้า ซึ่งผลลัพธ์ของมอเตอร์ทั้งสองพิคัดต่างมีความสอดคล้องไปด้วยกัน โดย
มอเตอร์พิคัดใหญ่จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่า และมอเตอร์ทั้งสองพิคัดจะเกิดการ
สั่นสะเทือนน้อยที่สุดเมื่อมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แต่การสั่นสะเทือนจะเกิดสูงสุดเมื่อ
มอเตอร์ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายชนิดอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของ
ฮาร์มอนิกที่ปรากฏอยู่ในรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกทางไฟฟ้าเป็นปัจจัย
สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา เผด็จ เผ่าละอ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สราวุฒิ สุจิตจร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สราวุฒิ สุจิตจร

PADEJ PAO-LA-OR : NEW DESIGNS OF INDUCTION MOTORS TO
REDUCE VIBRATION BY FINITE ELEMENT METHOD. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 253 PP.
ISBN 974-533-534-7

INDUCTION MOTOR/ROTOR SLOT/INVERTER/FINITE ELEMENT METHOD/
COMPUTER SIMULATION/ ELECTROMAGNETIC FORCE/VIBRATION

This thesis proposes the mathematical modelling and simulation of magnetic field and mechanical vibration of a three-phase squirrel cage induction motor. The purpose of the works is to design some new rotor-slot shapes of a 3-hp motor to reduce the mechanical vibration. The simulation works employ the finite element method incorporated with the Newton-Raphson method to solve the nonlinear time-varying equations such that the solutions of electromagnetic forces across the motor cross sectional area causing vibration could be studied. The simulation results show good agreement with the measurement results. The design work has referred to the speed-torque characteristics of Class-B as the reference for result comparisons. The two new rotor-slot shapes are the deep rectangle, and the sawtooth. Both new slots effectively reduce the vibration, whilst the deep rectangle type provides the minimum vibration. Furthermore, this research has studied the effects of harmonic on the motor vibration. Three types of motor excitation have been considered : i) purely sinusoidal, ii) PWM inverter and iii) six-step inverter supplies, respectively. The simulation studies have been conducted for a 3-hp and a 500-hp motors, respectively. The results of both cases show similar trends. The motors with purely sinusoidal excitation are subjected to the

minimum vibration, whilst the maximum vibration occurs with the six-step inverter supply, of which voltage and current waveforms contain a great deal of harmonic. It can be concluded that electrical harmonic is an important factor contributing to the motor vibration.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2005

Student's Signature محمد ابراهيم

Advisor's Signature S. Sayitjan

Co-advisor's Signature و. س

Co-advisor's Signature ف. س

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรารุฒิ สุจิตจร ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้าน

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.สมโภชน์ ผิวเหลือง รองผู้อำนวยการกองวิชา วิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายเรืออากาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และอาจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรวานิช พงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัยได้ทุกๆ เวลา พร้อมดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจ และช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา รวมถึง นาวาเอก ดร.เสวตนันท์ ประยูรรัตน์ ผู้อำนวยการกองวิชาการ สำนักงานวิจัยและพัฒนากองทหาร กองทัพเรือ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว และ อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้กำลังใจ และปรึกษาได้ในทุกๆ เรื่อง ขอขอบคุณ คุณพรพิไล กิติรัตนตระกูล ที่ให้ความรู้และสนับสนุนทางด้านเครื่องมือการตรวจวัดการสันสะเทือนของมอเตอร์ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายทุกอย่างในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณบุษราภรณ์ บุญสาย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจ อย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแล ส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เผด็จ เผ่าละออ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 สรุป.....	15
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 สนามแม่เหล็ก.....	16
3.2.1 พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็ก.....	16
3.2.2 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	24
3.3.1	โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
3.3.2	หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	28
3.3.3	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	31
3.3.4	คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	32
3.4	วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	36
3.5	สรุป	43
4	การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	44
4.1	บทนำ	44
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก	44
4.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	46
4.3.1	การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา	46
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์	48
4.3.3	การสร้างสมการของอิลิเมนต์	49
4.3.4	การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว	57
4.3.5	การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น	58
4.3.6	การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ	61
4.3.7	ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย	62
4.3.8	คำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ	62
4.4	สรุป	63
5	การคำนวณการสั้นสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	64
5.1	บทนำ	64
5.2	การคำนวณการสั้นสะท้อน โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	64
5.2.1	การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา	64
5.2.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลิเมนต์	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การหาผลเฉลยสำหรับการสั้นสะเทือน.....	71
5.4 สรุป.....	74
6 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	75
6.1 บทนำ.....	75
6.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	75
6.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	80
6.3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	80
6.3.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	84
6.3.3 การคำนวณกระแสเมื่อแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นไซน์.....	86
6.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล.....	87
6.4.1 โปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติ.....	87
6.4.2 โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก.....	90
6.4.3 โปรแกรมคำนวณการสั้นสะเทือน.....	95
6.5 การเปรียบเทียบผลการสั้นสะเทือนที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบ.....	98
6.5.1 ลักษณะการจำลองผลและการวัดทดสอบ.....	98
6.5.2 ผลการเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์สมดุล.....	100
6.5.3 ผลการเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล.....	104
6.6 สรุป.....	108
7 การลดการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ด้วยวิธีออกแบบรูปร่าง ร่องโรเตอร์.....	109
7.1 บทนำ.....	109
7.2 การใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม.....	109
7.2.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก.....	110
7.2.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน.....	121
7.3 การใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....	124

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.3.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก.....	124
7.3.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน.....	131
7.4 การใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย.....	133
7.4.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก.....	134
7.4.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน.....	140
7.5 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์.....	142
7.6 อภิปรายและสรุป.....	144
8 การสั้นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	146
8.1 บทนำ.....	146
8.2 การคำนวณกระแสเมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์.....	146
8.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	147
8.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	148
8.3 การใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม.....	149
8.3.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	150
8.3.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	159
8.4 การใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....	168
8.4.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	169
8.4.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	174
8.5 การใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย.....	179
8.5.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	180
8.5.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	185
8.6 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์.....	190
8.7 อภิปรายและสรุป.....	193

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9	การจำลองผลของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม	197
9.1	บทนำ	197
9.2	พารามิเตอร์ของมอเตอร์	197
9.3	มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์	202
9.3.1	ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก	202
9.3.2	ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน	208
9.4	มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM	208
9.4.1	ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก	210
9.4.2	ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน	214
9.5	มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ	216
9.5.1	ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก	216
9.5.2	ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน	220
9.6	สรุป	220
10	สรุปและข้อเสนอแนะ	222
10.1	สรุป	222
10.2	ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต	225
	รายการอ้างอิง	227
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การพิจารณาแบนด์วิดท์ของเมทริกซ์	232
	ภาคผนวก ข. วิธีการแก้สมการเชิงเส้นของระบบ	235
	ภาคผนวก ค. ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์	239
	ภาคผนวก ง. การกรองแบบดิจิตอลเพื่อกำจัดปรากฏการณ์กิบบส์	245
	ภาคผนวก จ. การเผยแพร่ผลงานในขณะศึกษา	250
	ประวัติผู้เขียน	253

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 ลักษณะข้อมูลของอิทธิพล.....	38
3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	38
6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า.....	76
8.1 ค่า THD ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์และแหล่งจ่ายไฟ แต่ละแบบ.....	194
8.2 ขนาดของการสั่นสะเทือนกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิทธิพล.....	194
8.3 ขนาดของการสั่นสะเทือนกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อน.....	194
9.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 500 แรงม้า.....	197

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมศูนย์กลางแบบสถิต	12
2.2 การเชื่อมศูนย์กลางแบบพลวัต	12
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกระบอก	20
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกลม	21
3.3 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	25
3.4 การพันขดลวดสเตเตอร์แบบสองชั้น	27
3.5 ลักษณะตัวนำของโรเตอร์กรงกระรอก	28
3.6 รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าสามเฟส	29
3.7 สนามแม่เหล็กหมุนที่ตำแหน่งต่างๆ	29
3.8 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	32
3.9 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	33
3.10 เส้นแรงแม่เหล็กรั้วของโรเตอร์กรงกระรอกร่องลึก	34
3.11 โรเตอร์กรงกระรอกที่มีลวดตัวนำสองชุด	34
3.12 ลักษณะร่องต่างๆ ของโรเตอร์กรงกระรอก	35
3.13 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ตามชั้นคุณสมบัติต่างๆ	35
3.14 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์	37
3.15 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อิลิเมนต์ 4 จุดต่อ	38
3.16 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม	39
4.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์	47
4.2 ภาพขยายการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนบริเวณที่สำคัญ	48
4.3 เส้นโค้งคุณลักษณะของ $v-B^2$	60
5.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์เพื่อคำนวณการสันสะท้อน	65
5.2 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดวงกว้าง	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 อิทธิพลสามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น	67
5.4 แผนภูมิการคำนวณการสันสะท้อนในมอเตอร์	73
6.1 ภาคตัดส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำและมิติ (mm)	77
6.2 ภาคตัดของร่องสเตเตอร์และมิติ (mm)	77
6.3 ภาคตัดของร่องโรเตอร์และมิติ (mm)	78
6.4 การพันขดลวดสเตเตอร์ใน 36 ร่อง	79
6.5 ทิศทางการไหลของกระแส ณ เวลาขณะหนึ่ง	79
6.6 ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	80
6.7 ขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	80
6.8 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	84
6.9 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์	86
6.10 รูปคลื่นกระแสแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์	87
6.11 การสร้างกริดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบวงกลมและมุมด้วยมุม 0°	89
6.12 การสร้างกริดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมและมุมด้วยมุม 45°	90
6.13 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก	91
6.14 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน	95
6.15 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรฐานความเร่งบนมอเตอร์ที่ถูกต้อง	99
6.16 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล	101
6.17 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล	101
6.18 แรงดันที่ได้จากมาตรฐานความเร่งเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล	101
6.19 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล	103
6.20 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล	103
6.21 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่าย ไม่สมดุล.....	105
6.23 แรงดันที่ได้จากมาตรการความเร่งเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล.....	106
6.24 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล.....	107
6.25 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่าย ไม่สมดุล.....	107
7.1 ภาคนัดของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและมิติ (mm) พร้อมการสร้างกริดใน ร่องโรเตอร์.....	110
7.2 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	114
7.3 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	116
7.4 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	119
7.5 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม.....	121
7.6 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อ โรเตอร์หมุนไป.....	122
7.7 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม.....	123
7.8 ภาคนัดของร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและมิติ (mm) พร้อมการสร้างกริดใน ร่องโรเตอร์.....	124
7.9 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์ หมุนไป.....	127
7.10 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยม ร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	130
7.11 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยม ร่องลึก.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.12 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยม ร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุน.....	132
7.13 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....	133
7.14 ภาควัดของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยและมิติ (mm) พร้อมการสร้างกริด ในร่องโรเตอร์.....	134
7.15 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	136
7.16 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	139
7.17 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย.....	140
7.18 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย เมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	141
7.19 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย.....	142
7.20 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ.....	144
8.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	147
8.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ.....	148
8.3 ภาควัดของร่องโรเตอร์แบบคั้งเคิมและมิติ (mm).....	149
8.4 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์ แบบคั้งเคิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	152
8.5 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบคั้งเคิมที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	155
8.6 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี พิจารณาร่องโรเตอร์แบบคั้งเคิม.....	156
8.8 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบคั้งเคิม.....	159

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.9	เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....162
8.10	แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....165
8.12	การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....167
8.13	การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม.....168
8.14	ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและมิติ (mm).....169
8.15	เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....170
8.16	แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....171
8.17	การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....172
8.18	การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....173
8.19	การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....174
8.20	เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป.....175
8.21	แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....176
8.22	การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก.....177

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.23 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสแตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับ กรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป	178
8.24 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก	179
8.25 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยและมิติ (mm)	180
8.26 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์ แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป	181
8.27 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับ กรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยที่กระทำกับฟันสแตเตอร์	182
8.28 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี พิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย	183
8.29 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสแตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี พิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป	184
8.30 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย	185
8.31 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์ แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป	186
8.32 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับ กรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยที่กระทำกับฟันสแตเตอร์	187
8.33 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณี พิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย	188
8.34 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสแตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณี พิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป	189
8.35 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย	190

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.36 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เมื่อพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบต่างๆ.....	191
8.37 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับเมื่อพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบต่างๆ.....	192
9.1 ภาคตัดส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่และมิติ (mm).....	199
9.2 ภาคตัดของร่องสเตเตอร์และมิติ (mm).....	199
9.3 ภาคตัดของร่องโรเตอร์และมิติ (mm).....	200
9.4 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อคำนวณสนามแม่เหล็ก.....	201
9.5 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อคำนวณการสั้นสะเทือน.....	201
9.6 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์เมื่อ โรเตอร์หมุนไป.....	205
9.7 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟ รูปคลื่นไซน์.....	205
9.8 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่าย รูปคลื่นไซน์ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	207
9.9 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟ รูปคลื่นไซน์เมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	209
9.10 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เมื่อโรเตอร์ หมุนไป.....	211
9.11 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM.....	211
9.12 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์.....	213
9.13 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM เมื่อโรเตอร์หมุนไป.....	215

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.14 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เมื่อโรเตอร์หมุนไป	217
9.15 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ แบบหกระดับ	217
9.16 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้ อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับที่กระทำกับฟันสเตเตอร์	219
9.17 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ แบบหกระดับเมื่อโรเตอร์หมุนไป	221
ก.1 การกระจายข้อมูลของเมตริกซ์ระบบรวม	233
ก.2 แบนด์วิดท์ของเมตริกซ์	234
ข.1 แผนภูมิกระบวนการวิธี BCG	238
ค.1 มาตรการแรงของ SENSOTEC รุ่น SM5	240
ค.2 ด้านแม่เหล็ก (magnet) ของมาตรการแรงที่ใช้สัมผัสกับชิ้นงาน	241
ค.3 มาตรการแรงพร้อมฐานไม้บางเพื่อยึดเข้ากับมอเตอร์	241
ค.4 ติดตั้งมาตรการแรงตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ	242
ค.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของมาตรการแรง	242
ค.6 ตัวลงบันทึกข้อมูล (data logger) โดยจะบันทึกค่าไปเก็บในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 1 ms	243
ค.7 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด	243
ค.8 แรงดันทั้งสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์สมดุล	244
ค.9 แรงดันทั้งสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ไม่สมดุล	244
ง.1 ผลตอบสนองแอมพลิจูดของการกรองความถี่เมื่อไม่พิจารณาฟังก์ชันหน้าต่าง แฮมมิง	247
ง.2 ผลตอบสนองแอมพลิจูดของการกรองความถี่เมื่อพิจารณาฟังก์ชันหน้าต่าง แฮมมิง	247
ง.3 แรงดันที่ได้จากมาตรการแรงเมื่อไม่ผ่านการกรองความถี่	248

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ง.4	แรงดันที่ได้จากมาตรการความเร่งเมื่อผ่านการกรองความถี่ร่วมกับการพิจารณา ฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง.....	248
-----	---	-----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสั่นสะเทือน คือปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงกระทำจากภายในที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) โดยสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ซึ่งอาจมีความถี่เดียวหรือหลายความถี่ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบ หรือเป็นแรงกระทำจากภายนอกที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) โดยสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ และถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance) นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายขึ้นจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนมักเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แต่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างดีที่สุดคือพยายามจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือนให้อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำการสั่นสะเทือนอาจเกิดจากหลายสาเหตุได้แก่ ความไม่สัมพันธ์กันระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ การเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์ทั้งแบบสถิต (static eccentricity) และแบบพลวัต (dynamic eccentricity) และการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบแล้วส่งผลให้กระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอรมีสาร์โมนิกปะปนอยู่มาก สาเหตุต่างๆ เหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้จากการออกแบบและการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน ความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ธรรมชาติของเทคโนโลยีการขับเคลื่อน หรือเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ ซึ่งสาเหตุต่างๆ เหล่านี้ย่อมส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวที่ไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ แล้วส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ทำให้มีการสูญเสียทางกล สมรรถนะในการทำงานและอายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันสำหรับประเทศไทย ปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คงยังถูกมองข้ามและขาดการเอาใจใส่อย่างจริงจัง

ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่ สามารถใช้การอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) สมการอนุพันธ์บางรูปแบบ อาจหาผลเฉลยแน่นอนตรงได้ยากหรือทำไม่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีต

ที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนอย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่า

วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม้กระทั่งปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและปัญหาที่มีการผันแปรตามเวลา ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ซึ่งอาจจะประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลายชนิดที่มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน หรือมีค่าเงื่อนไขขอบเขตหลายอย่างผสมกันอยู่ในระบบ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ดำเนินการ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ สนใจมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ชนิดกรงกระรอก (squirrel cage) ขนาดพิกัด 3 แรงม้า โดยพยายามแสวงหาหนทางการออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ (rotor slot) ของมอเตอร์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพการหมุนให้สั่นสะเทือนน้อยลง เนื่องจากงานวิจัยในอดีตเน้นการออกแบบร่องโรเตอร์ โดยพิจารณาถึงแต่คุณลักษณะของแรงบิดเอาต์พุตที่จะนำไปใช้งานตามประเภทต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยอาจมิได้คำนึงถึงการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละลักษณะรูปร่างของร่องนั้นๆ ซึ่งได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับผลทางปฏิบัติที่ได้จากการวัดทดสอบ การดำเนินงานวิจัยนี้ อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งใช้การจำลองผลโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้งการคำนวณหาสนามแม่เหล็กและการคำนวณหาขนาดของการสั่นสะเทือน เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไป เพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ พร้อมทั้งศึกษาผลของฮาร์มอนิกที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ประกอบกับได้ดำเนินการจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่มีพิกัด 500 แรงม้า เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กและผลของการสั่นสะเทือนกับกรณีของมอเตอร์

ขนาดเล็ก โดยพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำใน 2 มิติ (ระนาบ xy) ทั้งในสถานะอยู่ตัว (steady state) และสถานะชั่วครู่ (transient state) โดยพิจารณาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์ การประดิษฐ์ไฟในทอไลเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสันสะท้อน ถูกพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++TM โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์จากการสร้างกริดอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม MATLABTM และส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ให้โปรแกรม MATLABTM เพื่อแสดงรูปของผลลัพธ์ด้วยภาพนิ่งสองมิติ สามมิติ และภาพเคลื่อนไหว

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- พัฒนาโปรแกรมไฟในทอไลเมนต์สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสันสะท้อนทางข้างในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- แสวงหาแนวทางการออกแบบรูปร่างของโรเตอร์เพื่อลดการสันสะท้อน โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกปรับเปลี่ยนยังสามารถทำงานด้วยสมรรถนะที่เทียบเท่ากับการทำงานเดิมหรือดีกว่า
- ศึกษาผลของฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณารูปร่างของโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการสันสะท้อนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- มอเตอร์อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ โดยไม่มีการเชื่อมศูนย์กลางของโรเตอร์ และตามปกติไม่ปรากฏการสันสะท้อนทางกลใดๆ ทั้งสิ้น
- การพัฒนารูปแบบรูปร่างโรเตอร์ จะเน้นเฉพาะ โรเตอร์แบบกึ่งปิด (semiclosed) โดยยึดถือสมรรถนะและลักษณะสมบัติของแรงบิดเอาต์พุตให้เทียบเท่ากับกรณีที่ใช้รูปร่างโรเตอร์แบบดั้งเดิมในชั้นคุณสมบัติ (class) B ซึ่งมักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรต่างๆ ไป เช่น พัดลม เครื่องเป่าลม ปั๊มลม และปั๊มน้ำ
- กำหนดให้การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์เต็มร่องสเตเตอร์ตลอดทั้งชั้นบนและชั้นล่างของร่องสเตเตอร์ เมื่อพิจารณาการพันของขดลวดเป็นแบบสองชั้น (double layer winding)
- ไม่คำนึงถึงบริเวณตัวนำรูปวงแหวน (end ring) ที่ยึดอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำ (rotor bar) และไม่คำนึงถึงร่องเฉียง (skewed slot) ของโรเตอร์

- วัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์มีคุณสมบัติความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ประกอบกับมอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิห้องคงที่ จึงยังไม่พิจารณาผลจากการขยายตัวของวัสดุ

- พิจารณาเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแม่เหล็ก (B-H curve) แบบไม่เป็นเชิงเส้นมีการอิ่มตัวแต่ไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- ใช้ C complier และ MATLAB เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ พร้อมเปรียบเทียบกับผลจากเครื่องมือวัดจริง

- พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า เป็นตัวหลักในการออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือน โดยมีมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่พิกัด 500 แรงม้า สำหรับเปรียบเทียบและพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ทั้งสอง ซึ่งมอเตอร์ทั้งสองขนาดเป็นแบบ 3φ, 4P ชนิดกรงกระรอก พันขดลวดแบบสองชั้น ร่องโรเตอร์แบบกึ่งปิดอยู่ในชั้นคุณสมบัติ B

- ดำเนินการแสวงหาแนวทางการออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก โดยกำหนดให้จำนวนร่องสเตเตอร์และโรเตอร์ขนาดเล็กมีค่าคงที่เท่ากับ 36 ร่อง และ 44 ร่อง ตามลำดับ ซึ่งเป็นจำนวนที่ผ่านการออกแบบอย่างเหมาะสมมาแล้วจากงานวิจัยในอดีต โดยนำเสนอแนวทางการออกแบบสองรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบผล

- วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเป็นแบบ 2 มิติ

- พิจารณาการสั่นสะเทือนทางข้าง (lateral vibration) ของมอเตอร์เท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการออกแบบและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในมอเตอร์

- เกิดองค์ความรู้ด้านรูปลักษณะของร่องโรเตอร์ที่ให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- เกิดองค์ความรู้ด้านผลของฮาร์มอนิกทางไฟฟ้าที่มีต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 10 บท และ 5 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงาน ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลักๆ ได้แก่ สนามแม่เหล็ก มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อกำหนดค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าว

บทที่ 5 มีเนื้อหาว่าด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ และขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อกำหนดค่าการสั้นสะเทือนดังกล่าว

บทที่ 6 อธิบายถึงโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติประกอบด้วย โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล ประกอบด้วยเปรียบเทียบผลการสั้นสะเทือนของมอเตอร์ขนาดเล็กที่ได้จากการจำลองผลกับผลที่ได้จากการวัดทดสอบ

บทที่ 7 กล่าวถึงผลลัพธ์ของการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ขนาดเล็กจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เมื่อพิจารณารูปร่างของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเทียบกับรูปร่างของร่องโรเตอร์แนวใหม่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดผลของการสั้นสะเทือน พร้อมทั้งอธิบายเหตุผลทางกายภาพของร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ว่าส่งผลต่อการสั้นสะเทือนในมอเตอร์อย่างไร

บทที่ 8 นำเสนอการวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกที่ส่งผลต่อการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ขนาดเล็กเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ โดยพิจารณารูปร่างร่องของโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นใหม่

บทที่ 9 กล่าวถึงผลลัพธ์ของการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ขนาดใหญ่ โดยพิจารณาเฉพาะร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมอเตอร์ขนาดเล็กเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์

บทที่ 10 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ พร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหา 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. กล่าวถึงการพิจารณาแบนด์วิดท์ของเมทริกซ์ เพื่อปรับปรุงและจัดสรรหน่วยความจำให้มีประสิทธิภาพ ภาคผนวก ข. แสดงถึงวิธีการ

แก้สมการเชิงเส้นของระบบเมื่อระบบที่พิจารณามีขนาดใหญ่ ภาคผนวก ค. แสดงภาพของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับวัดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ภาคผนวก ง. กล่าวถึงรายละเอียดและคุณลักษณะต่างๆ ของการกรองความถี่แบบดิจิตอล และภาคผนวก จ. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การแสวงหาหนทาง การออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ เพื่อลดการสั่นสะเทือนทางกล (ซึ่งต่อจากนี้อาจเรียกโดยย่อว่าการ สั่นสะเทือน) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยเลือกใช้วิธีไฟในทออลิเมนต์มาเป็นเครื่องมือในการ แก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่างๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงาน วิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE, IEE และ ScienceDirect เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการ ประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการสั่นสะเทือนของ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อ เป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 โดยจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่า ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณະผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1983	Kako, Tsuruta, Nagaishi, and Kohmo	ศึกษาถึงการเกิดเสียงในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากการกระทำ ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยได้แสดงสมการเพื่อคำนวณหาหมายเลข โหมดและความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีต่างๆ เพื่อ ออกแบบมอเตอร์ให้หลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1987	Belmans, D'Hondt, Vandenput, and Geysen	ดำเนินการวิเคราะห์เสียงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ อันมีสาเหตุจากการใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้แก่มอเตอร์ และได้อธิบายผลทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติ
1991	Finley	อธิบายถึงสาเหตุต่างๆ และการป้องกัน เมื่อเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
1991	Belmans, Verdyck, Geysen, and Findlay	อธิบายถึงเสียงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ อันมีสาเหตุมาจากการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของมอเตอร์ และนำวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์มาคำนวณหาความถี่ธรรมชาติ เพื่อป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์
1993	Davis, and Bryant	อธิบายถึงมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องไฟฟ้านานาชาติ (NEMA) ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์
1993	Berman	ดำเนินการศึกษาการเชื่อมต่อศูนย์กลางของโรเตอร์ทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต ที่ส่งผลต่อการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งการแก้ไขการเชื่อมต่อศูนย์กลาง ดำเนินการโดยติดตั้งตัวปรับท่าเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์
1994	Verma, and Balan	ศึกษาถึงการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถดำเนินการได้โดยการใช้ทฤษฎีคลื่นความนำแม่เหล็ก
1994	Munoz, and Araya	พิจารณาถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ที่บิดเบี้ยว
1995	Dorrell, Thomson, and Roach	ศึกษาการเชื่อมต่อศูนย์กลางของโรเตอร์ทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต ที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1995	Yacamini, and Chang	อธิบายถึงการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อันมีสาเหตุมาจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อย่างบริสุทธิ์ ซึ่งการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคลื่นความนำแม่เหล็ก
1996	Dorrell	ศึกษาการดูดของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากความไม่สมดุล เมื่อออกแบบให้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีร่องเฉียง ประกอบกับมีการเชื่อมศูนย์กลางแบบพลวัตของโรเตอร์เกิดขึ้น โดยการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กดำเนินการ โดยใช้ทฤษฎีคลื่นความนำแม่เหล็ก
1997	Nau	ศึกษาร่องเฉียงของโรเตอร์ในสภาวะไร้โหลดที่มีผลต่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วก่อให้เกิดเสียงขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
1997	Im, et al	พิจารณาผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ อันเป็นผลเนื่องมาจากการออกแบบร่องเฉียงของโรเตอร์ โดยนำวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และการวิเคราะห์ฟูริเยร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์
1997	Kobayashi, Tajima, Ito, and Shibukawa	พิจารณาผลลัพธ์ของการเกิดเสียงดังในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์ไม่มีโหลด อันเป็นผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์และจำนวนร่องของโรเตอร์ โดยนำวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และการวิเคราะห์ฟูริเยร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์
1997	Hirotsuka, Tsuboi, and Ishibashi	พิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์ขับ โหลด อันเป็นผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์และจำนวนร่องของโรเตอร์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1998	Neves, Carlson, Sadowski, and Bastos	อธิบายถึงการสันสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งได้นำวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับพื้นของสเตเตอร์ทั้งในแนวรัศมีและในแนวหน้าสัมผัส
1998	Ishibashi, Noda, and Mochizuki	นำไฟไนต์อิลิเมนต์มาคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์การสันสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบสองมิติ ไม่เป็นเชิงเส้น ในสถานะอยู่ตัว และนำไฟไนต์อิลิเมนต์มาคำนวณหาความถี่ธรรมชาติ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์
1999	Mikami, Ide, Takahashi, and Kajiwara	อธิบายถึงเสียงที่เกิดจากการกระทำของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีสาเหตุมาจากแหล่งจ่ายไฟไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์และการวิเคราะห์ฟูริเยร์
1999	Kim, Kwon, and Park	ลดฮาร์มอนิกของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นต้นเหตุของการเกิดเสียงและการสันสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทำการออกแบบจำนวนร่องของโรเตอร์ที่เหมาะสม การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกดำเนินการโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์และการวิเคราะห์ฟูริเยร์
1999	Sakamoto, Hirata, Kobayashi, and Kajiwara	นำไฟไนต์อิลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหาทั้งทางด้านฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งพิจารณาปัญหาเป็นแบบสองมิติ ในสถานะชั่วคราว และปัญหาด้านกลศาสตร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
1999	Finley, Hodowanec, and Holter	จำแนกสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสันสะเทือนขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีแหล่งกำเนิดของการสันสะเทือนหลักๆ มาจากทางไฟฟ้าและทางกล
1999	Wang, and Lai	วิเคราะห์เสียงและการสันสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากฮาร์มอนิกที่ผลิตได้จากอินเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

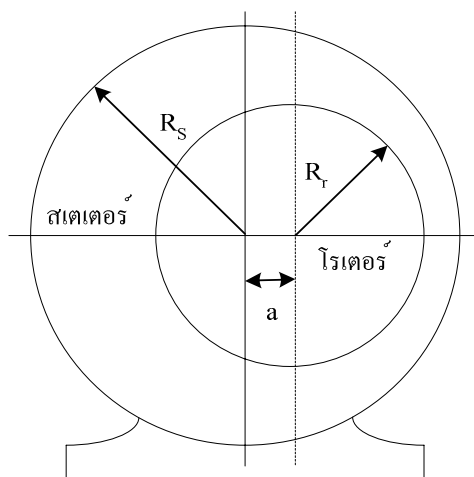
ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2003	Guldemir	ตรวจหาค่าแห่งการเอียงศูนย์กลางของช่องอากาศ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสในสายสำหรับตรวจหา

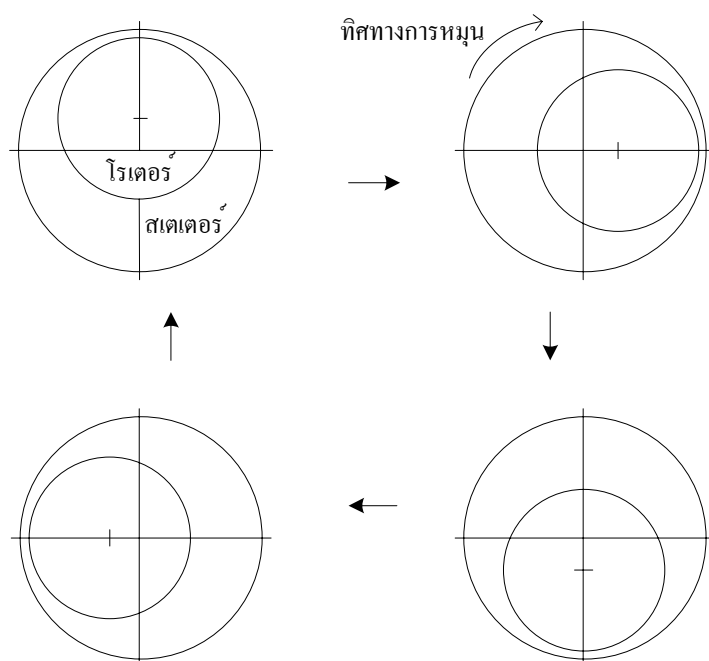
จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่จะดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้างๆ ว่ามีคณะนักวิจัยใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลักๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากหลายๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึง การนำทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์และลดปัญหาของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ และยังมี การเสริมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนั้นๆ โดยย่อ

เริ่มต้นจาก Berman (1993) ได้ดำเนินการศึกษาการเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์ (rotor eccentricity) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งอาจมีสาเหตุเกิดจากความผิดพลาดในระหว่างขั้นตอนการผลิต การเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์จะส่งผลกระทบต่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกคร่อมช่องอากาศ (air gap) โดยจะเกิดการดูดของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากความไม่สมดุล (unbalanced magnetic pull) จึงส่งผลให้เกิดเสียงและการสั่นสะเทือนขึ้นในมอเตอร์ การเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์จะถูกแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่การเอียงศูนย์กลางแบบสถิต (static eccentricity) คือแกนของโรเตอร์เคลื่อนที่เอียงออกจากแกนกลางของสเตเตอร์แต่ยังคงหมุนรอบแกนของตัวเองอยู่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.1 และการเอียงศูนย์กลางแบบพลวัต (dynamic eccentricity) คือแกนของโรเตอร์ยังอยู่ตรงแกนกลางของสเตเตอร์แต่ไม่ได้หมุนรอบแกนของตัวเอง ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.2 งานวิจัยของ Dorrell (1996) ได้ดำเนินการศึกษาการเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์ที่เกิดการดูดของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากความไม่สมดุลเช่นกัน แต่จะเน้นพิจารณาที่การเอียงศูนย์กลางแบบพลวัตเท่านั้น สมการการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกคร่อมช่องอากาศมีปรากฏอยู่ในงานวิจัยของ Berman โดยจะมีสมการที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของการเอียงศูนย์กลาง ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละชนิดจะมีระยะห่างของช่องอากาศ (air gap length) ที่แตกต่างกัน การแก้ไขการเอียงศูนย์กลางของโรเตอร์ทำได้โดยการติดตั้งตัวปรับเท่า (equalizing connections) เข้าไปในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อผลิตแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force: mmf) ไปปรับแก้การ

กระจายตัวที่ไม่สมดุลของฟลักซ์แม่เหล็ก และได้แสดงผลเปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังมีการติดตั้งตัวปรับเท่า



รูปที่ 2.1 การเยื้องศูนย์กลางแบบสถิต



รูปที่ 2.2 การเยื้องศูนย์กลางแบบพลวัต

Yacamini and Chang (1995) ได้อธิบายถึงการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่มีสาเหตุมาจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (nonsinusoidal waveform) ซึ่งงานวิจัยของ Belmans, Verdyck, Geysen, and Findlay (1991) และ Munoz and Araya (1994) พิจารณาสาเหตุนี้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ อาจมีความต้องการในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ ดังนั้นจึงนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ในการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณที่ผลิตได้จากอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ อันเป็นสาเหตุทำให้การกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กมีผลผลิตแยกออกไปจากแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ การกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกคร่อมช่องอากาศ สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคลื่นความนำแม่เหล็ก (permeance wave theory) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เสียเป็นส่วนใหญ่ งานวิจัยของ Verma and Balan (1994) และ Dorrell (1996) ได้นำทฤษฎีคลื่นความนำแม่เหล็ก มาพิจารณาการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์ด้วยเช่นกัน หลักการกว้างๆ ในการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กของทฤษฎีความนำแม่เหล็ก คือ การนำผลการคำนวณที่ได้ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กและความนำแม่เหล็กในช่องอากาศมาคูณกัน เมื่อหาฟลักซ์แม่เหล็กได้แล้ว จึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's stress equation) หาค่าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไป ในงานวิจัยของ Yacamini et al. นี้ได้พิจารณาผลลัพธ์ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีโหลด โดยเปรียบเทียบทั้งในกรณีเมื่อแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์อย่างแท้จริง และแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมอเตอร์ทำงานในสถานะที่มีโหลดหรือแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์บิดเบี้ยว ขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และจะส่งผลให้ขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

Im, et al (1997) ได้กล่าวถึงการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ชนิดกรงกระรอก อันเป็นผลเนื่องมาจากการออกแบร็องเจียงของโรเตอร์ โดยอธิบายแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันของสเตเตอร์ทุกๆ ซึ่งในแนวรัศมี (radial direction) วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาฟลักซ์แม่เหล็ก โดยสมการสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ที่พิจารณาแบบสองมิติในสถานะชั่วคราวได้รับการเปิดเผยไว้ในงานวิจัย วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (backward difference) ได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีการแปรเปลี่ยนตามเวลาอย่างงานวิจัยนี้ และการพิจารณาการตอบสนองทางความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้จากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ จากผลลัพธ์ที่ได้จึงสรุปได้ว่า การจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยการออกแบร็องเจียงของโรเตอร์ให้มีมุมที่เหมาะสม โดยพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการเริ่มผลิตมอเตอร์

ในปีเดียวกัน Kobayashi, Tajima, Ito, and Shibukawa (1997) ได้ศึกษาถึงการเกิดเสียงดังขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ชนิดกรงกระรอกในสภาวะไร้โหลด อันเป็นผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันระหว่างจำนวนร่องของสเตเตอร์ (stator slot) และจำนวนร่องของโรเตอร์ (rotor slot) ซึ่งงานวิจัยของ Hirotzuka, Tsuboi, and Ishibashi (1997) ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนร่องนี้เช่นกัน แต่ Hirotzuka et al. จะพิจารณาในสภาวะมีโหลด Kobayashi et al. ได้วิเคราะห์เสียงดังที่เกิดขึ้นจากผลของความถี่ฮาร์มอนิกของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ ซึ่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการความเค้นของแมกซ์เวลล์ ซึ่งต้องทราบการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาปัญหานี้เป็นแบบสองมิติ ในสถานะชั่วคราว การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึมฟูริเยร์ โดยได้ยกตัวอย่างการพิจารณามอเตอร์ที่มีความแตกต่างกันเฉพาะจำนวนร่องของโรเตอร์ ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลที่ได้จากการทดลองต่างก็มีความสอดคล้องกัน ซึ่งสรุปได้ว่าการออกแบบจำนวนร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่เหมาะสมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตนั้น จะส่งผลให้เสียงดังที่เกิดขึ้นในมอเตอร์มีค่าลดลง

Neves, Carlson, Sadowski, and Bastos (1998) ได้กล่าวถึงการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ชนิดกรงกระรอก ซึ่งได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อที่จะนำไปสู่การทราบค่าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตั้งต้นเริ่มจากสมการสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบสองมิติ การพิจารณาการตอบสนองทางความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จะใช้การวิเคราะห์ฟูริเยร์ และในการแสดงผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันของสเตเตอร์นั้น ได้แสดงผลทั้งในแนวรัศมีและในแนวสัมผัสกับฟันของสเตเตอร์ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลด้วยการทดลองจริง ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับในแนวรัศมี ดังนั้นการพิจารณาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันของสเตเตอร์ในงานวิจัยส่วนใหญ่ จึงพิจารณาเฉพาะในแนวรัศมี

Sakamoto, Hirata, Kobayashi, and Kajiwara (1999) ได้พิจารณาการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งประกอบด้วยความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิก แรงแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์ ซึ่งต้องทราบการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์ โดยความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพิจารณาปัญหานี้เป็นแบบสองมิติ ในสถานะชั่วคราว ซึ่งงานวิจัยของ Ishibashi, Noda, and Mochizuki (1998) ได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านฟลักซ์แม่เหล็กแบบสองมิติด้วยเช่นกัน แต่จะพิจารณาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบไม่

เชิงเส้นในสถานะอยู่ตัว โดยงานวิจัยของ Sakamoto et al. จะตั้งต้นจากสมการสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ที่มีปรากฏในงานวิจัย การพิจารณาการตอบสนองทางความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้จากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ งานวิจัยนี้จะพิจารณาความถี่ฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงกว่าความถี่มูลฐานของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จากงานวิจัยทั้งสองยังถูกนำมาใช้ทางด้านกลศาสตร์ ทั้งนี้เพื่อคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ ซึ่งได้แสดงสมการการเคลื่อนที่หรืออาจเรียกว่าสมการการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ซึ่งเกิดจากความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์มีค่าเท่ากับความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยของ Finley, Hodowanec, and Holter (1999) ได้แสดงการคำนวณหาความถี่และหมายเลขโหมด (mode number) ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการแสดงรูปร่างที่ผิดแผกกันไปของแต่ละหมายเลขโหมดในเชิงทฤษฎี ที่เกิดขึ้นจากการกระทำของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าให้ดูด้วย

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE, IEE, ScienceDirect และอื่นๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่นๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่างๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยพิจารณารูปร่างของร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือนทางกลโดยเฉพาะมาก่อน โดยทั่วไปการออกแบบร่องโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบดั้งเดิมมุ่งเน้นที่ลักษณะสมบัติทางแรงบิดเอาต์พุตที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นแรงบิดที่จะนำไปใช้งานเป็นหลัก การออกแบบด้วยหลักการนี้อาจจะไม่ได้คำนึงถึงผลของการสั่นสะเทือนที่อาจจะเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อมอเตอร์ ทำให้อายุการใช้งาน สมรรถนะ และประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ลดลง ตลอดจนมลภาวะทางไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงถือกำเนิดขึ้นเพื่อแสวงหาแนวทางการออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแนวใหม่ภายใต้วัตถุประสงค์ของการลดการสั่นสะเทือนทางกลดังกล่าว

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในงาน และนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัยนั้น ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ สนามแม่เหล็ก มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจน

3.2 สนามแม่เหล็ก

3.2.1 พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็ก

การบอกถึงปริมาณอย่างหนึ่งอย่างใดของสรรพสิ่งในธรรมชาติ อาจกระทำได้โดยการบอกถึงขนาดแต่เพียงอย่างเดียวซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงสเกลาร์ หรืออาจบอกทั้งขนาดและทิศทางควบคู่กันซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงเวกเตอร์ พื้นฐานสำคัญในการศึกษาสนามแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากทฤษฎีของเวกเตอร์ โดยจะเริ่มต้นด้วยพีชคณิตของเวกเตอร์ ดังนี้

ถ้าให้ \mathbf{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ ในระนาบ xyz จะเขียนเวกเตอร์ \mathbf{A} ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) ได้ในลักษณะ

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k} \quad (3-1)$$

เมื่อ \mathbf{i} , \mathbf{j} และ \mathbf{k} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ที่ชี้ไปในทิศทางบวกของแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ โดยมี A_x , A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉากของ \mathbf{A} ในปริภูมิ

ถ้าให้ \mathbf{A} และ \mathbf{B} คือเวกเตอร์ แล้ว $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ คือการคูณกันแบบดอท (dot product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงสเกลาร์ (scalar product) นิยามโดย

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}||\mathbf{B}|\cos\theta = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \quad (3-2)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ \mathbf{A} กับ \mathbf{B} และ $0 \leq \theta \leq \pi$

ส่วน $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ คือการคูณกันแบบครอส (cross product) เรียกการคูณแบบนี้ว่า การคูณเชิงเวกเตอร์ (vector product) นิยามโดย

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = |\mathbf{A}||\mathbf{B}|\sin\theta(\pm\mathbf{n}) \quad (3-3)$$

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

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (A_y B_z - A_z B_y)\mathbf{i} + (A_z B_x - A_x B_z)\mathbf{j} + (A_x B_y - A_y B_x)\mathbf{k} \quad (3-4)$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (3-5)$$

เมื่อทราบวิธีคำนวณผลคูณเชิงสเกลาร์และผลคูณเชิงเวกเตอร์ซึ่งเป็นพื้นฐานเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจึงดำเนินการศึกษาถึงการหาค่าเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชันสเกลาร์และฟังก์ชันเวกเตอร์ (ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย, 2545) ซึ่งจะกล่าวต่อไปดังนี้

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

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz \quad (3-6)$$

และจากการกำหนดตัวดำเนินการอนุพันธ์ที่เรียกว่าเดล ($\text{del}:\nabla$) ดังนี้

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3-7)$$

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

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \quad (3-8)$$

และถ้ากำหนดให้ \mathbf{A} คือเวกเตอร์แล้ว $\nabla \cdot \mathbf{A}$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบดอท จะเรียกว่าไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ของ \mathbf{A} นิยามโดย

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (3-9)$$

ส่วน $\nabla \times \mathbf{A}$ ซึ่งเป็นการคูณกันแบบครอส จะเรียกว่าเคิร์ล (curl) ของ \mathbf{A} นิยามโดย

$$\nabla \times \mathbf{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (3-10)$$

หรือเขียนในรูปของดีเทอร์มิแนนต์ได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \quad (3-11)$$

ไดเวอร์เจนซ์และเคิร์ลเป็นเพียงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เราสามารถใช้เดลดำเนินการสองครั้งเพื่อให้ได้อนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งเรียกว่าลาปลาเซียน (laplacian: ∇^2) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3-12)$$

ให้ \mathbf{A} คือเวกเตอร์ จะได้ลาปลาเซียนของ \mathbf{A} คือ

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \mathbf{k} \quad (3-13)$$

เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ที่สำคัญต่อการดำเนินการอนุพันธ์อันดับสองมีอยู่ 2 เอกลักษณ์ดังแสดงด้วยสมการที่ (3-14) และ (3-15) ดังนี้คือ

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (3-14)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (3-15)$$

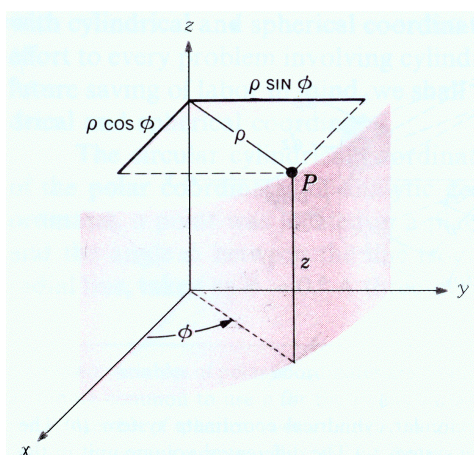
การแปลงระบบพิกัดที่มีพิกัดตั้งฉากซึ่งกันและกัน (William, 1989) จากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.1 สามารถแสดงได้โดยถ้าให้ \mathbf{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉาก คือ

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z \quad (3-16)$$

เมื่อ \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y และ \mathbf{a}_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_x , A_y และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดฉากซึ่งจะต้องถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก โดยถ้าให้ \mathbf{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกระบอก คือ

$$\mathbf{A} = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_\phi \mathbf{a}_\phi + A_z \mathbf{a}_z \quad (3-17)$$

เมื่อ \mathbf{a}_ρ , \mathbf{a}_ϕ และ \mathbf{a}_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยมี A_ρ , A_ϕ และ A_z เป็นส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอก



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกระบอก

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า ณ จุด $P(x,y,z)$ หรือ $P(\rho, \phi, z)$ จะได้ว่า

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

จะเห็นว่าตัวแปร x, y, z อยู่ในเทอมของตัวแปร ρ, ϕ, z และในทำนองเดียวกันจะได้
ว่า

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

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

ในการเปลี่ยนจากระบบพิกัดหนึ่งไปเป็นอีกพิกัดหนึ่ง จะใช้หลักการคูณกันของ
เวกเตอร์แบบดอท การเปลี่ยนพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอกจะต้องหาค่า A_ρ, A_ϕ ที่อยู่ในเทอม
ของ A_x, A_y โดยที่ $A_z = A_z$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

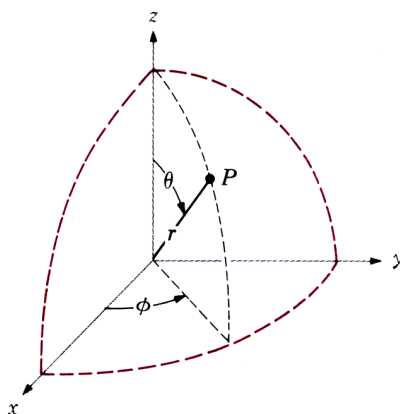
$$\begin{aligned} A_\rho &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\rho = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\rho = A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\rho + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\rho \\ A_\rho &= A_x \cos \phi + A_y \sin \phi \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} A_\phi &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\phi = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\phi = A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\phi + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\phi \\ A_\phi &= -A_x \sin \phi + A_y \cos \phi \end{aligned} \quad (3-19)$$

ส่วนการแปลงจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.2 สามารถแสดงได้โดย ถ้าให้ \mathbf{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดทรงกลม คือ

$$\mathbf{A} = A_r \mathbf{a}_r + A_\theta \mathbf{a}_\theta + A_\phi \mathbf{a}_\phi \quad (3-20)$$

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



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดทรงกลม

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

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

จะเห็นว่าตัวแปร x, y, z อยู่ในเทอมของตัวแปร r, θ, ϕ และในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

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

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

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

$$\begin{aligned} A_r &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_r = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_r \\ &= A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_r + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_r + A_z \mathbf{a}_z \cdot \mathbf{a}_r \\ A_r &= A_x \sin \theta \cos \phi + A_y \sin \theta \sin \phi + A_z \cos \theta \end{aligned} \quad (3-21)$$

$$\begin{aligned} A_\theta &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\theta = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\theta \\ &= A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\theta + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\theta + A_z \mathbf{a}_z \cdot \mathbf{a}_\theta \\ A_\theta &= A_x \cos \theta \cos \phi + A_y \cos \theta \sin \phi + A_z \sin \theta \end{aligned} \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned} A_\phi &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\phi = (A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z) \cdot \mathbf{a}_\phi \\ &= A_x \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_\phi + A_y \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_\phi + A_z \mathbf{a}_z \cdot \mathbf{a}_\phi \\ A_\phi &= -A_x \sin \phi + A_y \cos \phi \end{aligned} \quad (3-23)$$

3.2.2 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

เมื่อทราบทฤษฎีและคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่จำเป็นแล้ว ต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (เจลิมพล น้ำค้าง, 2538) ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบเวกเตอร์จากข้างต้น

ประจุไฟฟ้า (electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้นๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (electric force) และถ้าหากประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วย จะเกิดแรงที่เรียกว่าแรงแม่เหล็ก (magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force) ทุกๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรืออาจเรียกว่าสนามไฟฟ้า (electric field: \mathbf{E}) อยู่ปริมาณหนึ่ง ที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่าสนามแม่เหล็ก (magnetic field: \mathbf{B}) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่

เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อื่นๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลง ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

- 1) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น
- 2) เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)
- 3) เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)
- 4) เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถแสดงได้โดย

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3-24)$$

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3-25)$$

ซึ่งสมการที่ (3-25) นี้คือกฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยถ้านำไปประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ในสมการที่ (3-14) จะสรุปได้ว่าหากไดเวอร์เจนซ์ของ \mathbf{B} เท่ากับศูนย์แล้ว ย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งซึ่งเมื่อกระทำเคิร์ลแล้วได้ผลเป็นเวกเตอร์ \mathbf{B} เวกเตอร์ใดที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ \mathbf{B} จะเรียกว่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential: \mathbf{A}) ดังนี้

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3-26)$$

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

3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

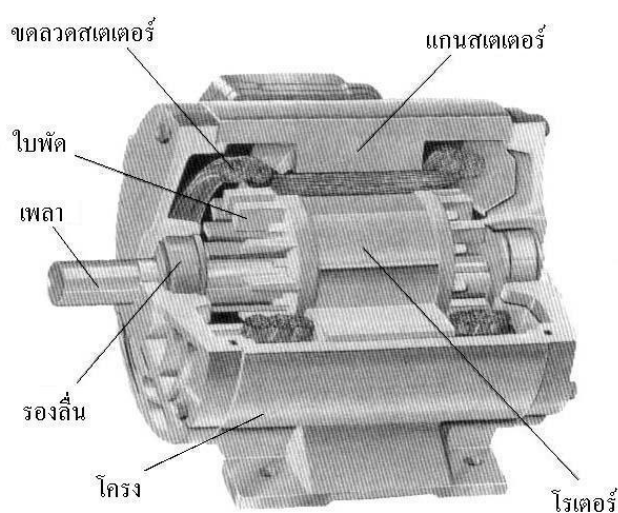
ในบรรดาเครื่องต้นกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน มอเตอร์จะเป็นเครื่องต้นกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมต่างๆ ไป ทั้งนี้เป็นเพราะมอเตอร์สามารถผันแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้โดยง่าย และมีราคาของพลังงานถูกเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้จากแหล่งอื่นๆ โดยสามารถแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าตามความสำคัญและสัดส่วนของการใช้งานต่างๆ ไป ออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และมอเตอร์ชนิดอื่นที่เหลือ มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก ราคาถูก ทนทาน และไม่ต้องดูแลรักษาบ่อยนัก ในทางปฏิบัติถือได้ว่าเป็นมอเตอร์ที่ให้ความเร็วเกือบคงที่ตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งเหมาะกับการใช้งานทางอุตสาหกรรมและอื่นๆ แทบทุกประเภท จนอาจกล่าวได้ว่า ในปัจจุบันกว่าร้อยละ 90 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรูปเครื่องต้นกำลังจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเกือบทั้งหมด ในหัวข้อนี้ได้ทบทวนพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง หลักการทำงาน วงจรสมมูล และคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ถึงการสันเสีทางกลที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่จะได้พิจารณาถึงในขั้นตอนต่อไป

นิโกลา เทสลา (Nikola Tesla) ได้เสนอแนวความคิดในการทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เพื่อให้โรเตอร์หมุนได้โดยไม่ต้องอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขดลวดกระตุ้น โดยกระแสในขดลวดโรเตอร์เกิดขึ้นได้เนื่องจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจากขดลวดสเตเตอร์ เทสลาได้จดสิทธิบัตรสิ่งประดิษฐ์อันเลื่องชื่อนี้เมื่อปี ค.ศ.1888 และสิ่งประดิษฐ์ของเทสลาได้รับการปรับปรุงทั้งทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆ ให้พัฒนาขึ้นเรื่อยๆ หรือที่เราเรียกกันโดยทั่วไปว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ผลิตออกมาหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กแบบใช้กับไฟกระแสสลับเฟสเดียวขนาดไม่ถึง 1 แรมม้า จนถึงขนาดใหญ่ใช้กับไฟกระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งให้แรงม้าถึง 10,000 แรมม้า โดยในส่วนนี้จะกล่าวเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กับไฟกระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่เท่านั้น

3.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีโครงสร้างแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ สเตเตอร์และโรเตอร์ ดังต่อไปนี้

1) สเตเตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยโครงมอเตอร์ (frame or yoke) แกนสเตเตอร์ (stator core) และขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) โครงมอเตอร์ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลวง ฐานส่วนล่างมีลักษณะเป็นขาตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟออกสู่วงจรรภายนอกอยู่ด้านข้าง โดยโครงจะมีหน้าที่จับยึดแกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ ผิวด้านนอกโดยรอบของโครงมอเตอร์บางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีบก เพื่อช่วยในการระบายความร้อน ส่วนแกนสเตเตอร์ทำจากแผ่นลามิเนตให้ความซาบซึมได้ของแม่เหล็กมีค่าสูง ซึ่งจะมีความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และกระแสไหลวน (eddy current) ต่ำ แกนสเตเตอร์ถูกเจาะตรงกลางให้มีลักษณะเป็นรูปร่างแหวน โดยผิวด้านในถูกเจาะเป็นร่องคั่นด้วยฟันของสเตเตอร์โดยรอบ เพื่อใช้เป็นที่วางสำหรับการพันขดลวดสเตเตอร์ แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนสเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.3 (Kenjo, 1991)



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ส่วนขดลวดสเตเตอร์ จะเป็นลวดทองแดงเส้นเล็กๆ ที่ใช้พันเป็นขดลวด เคลือบด้วยน้ำมันวานีนิชที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยแบ่งจำนวนขดลวดออกเป็นสามชุด ซึ่งแต่ละชุดจะเรียกว่าเฟส ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส จะนำมาต่อกันแบบสตาร์ (Y) หรือเดลตา (Δ) แล้วต่อออกสู่วงจรรภายนอก การสร้างขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟส เกิดจากการพันต่อกันของขดลวดเฟสนั้นๆ ในลักษณะพันตรงและพันย้อนกลับสลับกันไป เพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไปเรื่อยๆ เป็นคู่ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะแบ่งออก

ได้เป็น 2 ประเภท คือ การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พัน และระยะพิตช์ของขดลวด (coil pitch) ที่ใช้พัน

การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องมีอยู่สองลักษณะคือ การวางตัวแบบรวม (concentrate) หมายถึง กลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกัน และการวางตัวแบบกระจาย (distribution) หมายถึง กลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวในแต่ละร่องแยกกัน ซึ่งการวางตัวของขดลวดในมอเตอร์สามเฟส ส่วนใหญ่จะเป็นแบบกระจาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบของฮาร์มอนิกจากการวางตัวของขดลวดแบบรวม แต่เนื่องจากในการวางตัวของขดลวดแบบรวม กลุ่มของขดลวดจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อมกัน แต่การวางตัวของขดลวดแบบกระจายซึ่งมีขดลวดอยู่ในร่องที่แยกกัน แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดจึงเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการวางตัวของขดลวดแบบกระจายจึงมีค่าน้อยกว่าการวางตัวของขดลวดแบบรวม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่น้อยลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบการกระจาย (distribution factor or breadth factor: k_d)

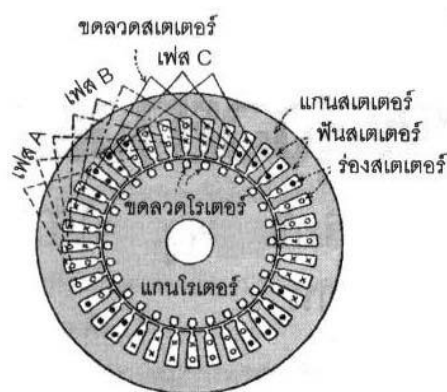
การพันขดลวดยังต้องคำนึงถึงระยะพิตช์ของขดลวดที่ใช้พัน ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกัน จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ ระยะพิตช์เต็ม (full pitch) และระยะพิตช์เศษส่วน (fractional pitch) ซึ่งระยะพิตช์เต็มหมายถึง เมื่อด้านข้างของขดลวดด้านหนึ่งอยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก N แล้ว จะมีอีกด้านข้างหนึ่งของขดลวดนี้ อยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก S ที่อยู่ถัดไป ซึ่งมีระยะเทียบได้กับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก หรือ 180° ไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางไฟฟ้า (θ_e) และมุมทางกล (θ_m) จะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (3-27)$$

ส่วนระยะพิตช์เศษส่วนคือ ด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกันจะอยู่ห่างกันไม่ถึง 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งระยะพิตช์ของขดลวดในมอเตอร์สามเฟสส่วนใหญ่ จะเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่ข้อเสียของการพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนคือ ค่าแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่ลดลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบพิตช์ (pitch factor: k_p) และผลคูณระหว่าง k_d และ k_p จะเรียกว่าตัวประกอบขดลวด (winding factor: k_w)

การพันขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การพันขดลวดชั้นเดียว (single layer winding) ซึ่งจำนวนขดลวดที่ใช้ในการพันจะเท่ากับ

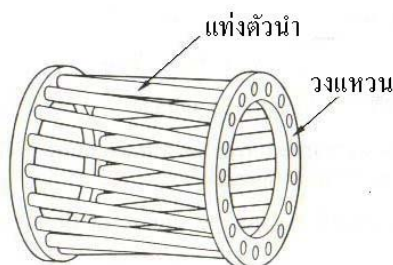
ครึ่งหนึ่งของจำนวนร่อง เพราะในแต่ละร่องจะมีด้านข้างของขดลวดเพียงด้านเดียว และการพันขดลวดสองชั้น (double layer winding) ซึ่งเป็นที่นิยมในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้โดยการเลือกช่วงของการพันขดลวดที่เหมาะสม ส่วนข้อเสียคือการพันขดลวดลงร่องและการซ่อมแซมทำได้ยากกว่าการพันขดลวดชั้นเดียว โดยในหนึ่งร่องจะมีด้านข้างของขดลวดบรรจุอยู่สองด้าน ถ้าด้านหนึ่งของขดลวดวางตัวอยู่ชั้นบนของร่องแล้ว อีกด้านหนึ่งของขดลวดจะวางตัวอยู่ชั้นล่างของร่องอันอื่น โดยจะมีขนาดกันระหว่างขดลวดส่วนบนและขดลวดส่วนล่าง การพันแบบขดลวดสองชั้นนี้ สามารถแสดงด้วยรูปที่ 3.4 (ถาวร อมตคิตต์, 2545) ซึ่งประกอบด้วยร่องสเตเตอร์ทั้งหมด 36 ร่อง และระยะพิทช์ของขดลวดเท่ากับ 9



รูปที่ 3.4 การพันขดลวดสเตเตอร์แบบสองชั้น

2) โรเตอร์ โดยโครงสร้างของโรเตอร์จะเป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage) หรือเป็นแบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) อย่างใดอย่างหนึ่ง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะแบบกรงกระรอกเท่านั้น เนื่องจากเป็นที่ใช้งานกันแพร่หลายที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกจะประกอบไปด้วย แกนโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์ ใบบัฟเฟอร์ระบายความร้อน และเพลลา แกนโรเตอร์จะทำด้วยแผ่นลามิเนต มีลักษณะกลม เซาะผิวภายนอกให้เป็นร่องโดยรอบ ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา บริเวณระหว่างร่องรอบๆ ขอบกับรูตรงกลางแผ่น จะถูกเจาะเป็นรูไว้เพื่อช่วยในการระบายความร้อนและให้โรเตอร์มีน้ำหนักเบา แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนโรเตอร์ ส่วนขดลวดโรเตอร์ที่จะถูกฝังในร่องของแกนโรเตอร์ จะไม่เป็นเส้นลวดเล็กๆ เหมือนกับลักษณะของขดลวดสเตเตอร์ แต่จะมีลักษณะเป็นแท่งตัวนำ (rotor bar) ที่ฝังเข้าไปในร่องให้แน่น

ซึ่งอาจจะเป็นทองแดง โลหะผสม หรืออะลูมิเนียม ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำจะถูกยึดด้วยตัวนำรูปวงแหวน (end ring) เพื่อลัดวงจรไฟฟ้า และมีใบพัดระบายความร้อนลักษณะเป็นครีบก้นยื่นออกมา ดังนั้นจึงทำให้ได้ตัวนำที่มีโครงสร้างเหมือนกับกรงกระรอก ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.5 (Kenjo, 1991)

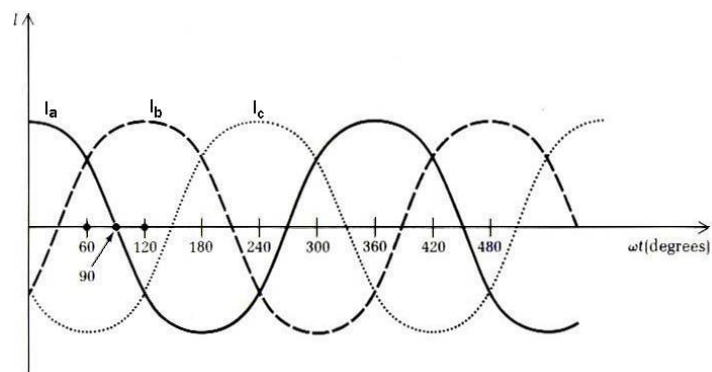


รูปที่ 3.5 ลักษณะตัวนำของโรเตอร์กรงกระรอก

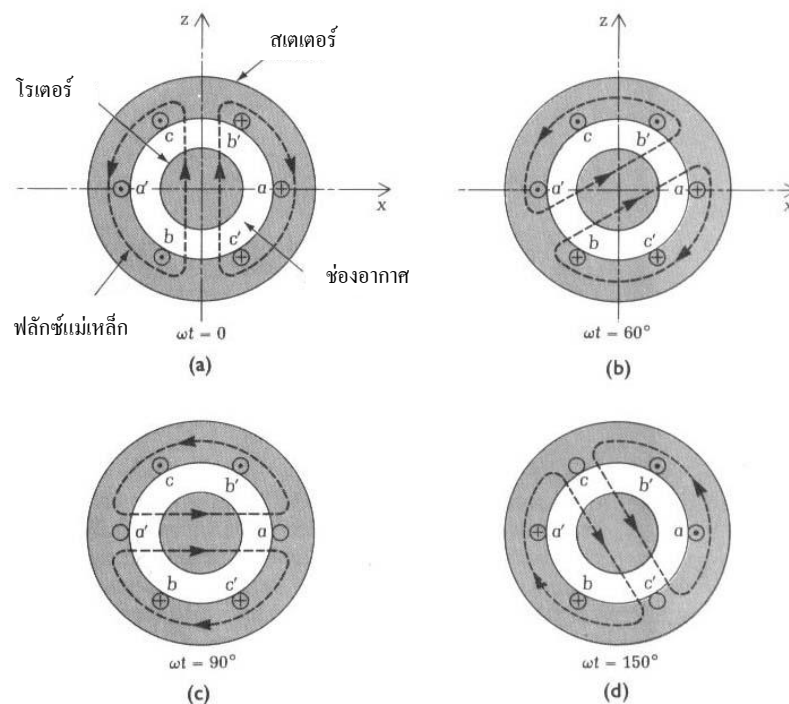
ร่องของโรเตอร์ที่ใช้ฝังแท่งตัวนำ มักออกแบบให้มีลักษณะเป็นแนวเฉียงไม่ขนานกับเพลลา และจำนวนร่องของโรเตอร์จะออกแบบให้มีจำนวนแตกต่างจากร่องของสเตเตอร์ ทั้งนี้เพื่อลดแรงอันเกิดการดูดติดกันระหว่างฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อนำโรเตอร์เข้าประกอบกับสเตเตอร์แล้ว จะมีช่องอากาศ (air gap) ระหว่างส่วนทั้งสองเกิดขึ้น ในส่วนของฝาครอบจะทำด้วยเหล็กหล่อ เจาะรูตรงกลางเพื่ออัดรองลื่น (bearing) รองรับเพลลาของโรเตอร์ ซึ่งที่ฝาครอบนี้บางที่จะเจาะรูไว้ด้วยเพื่อช่วยในการถ่ายเทอากาศ

3.3.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อป้อนไฟกระแสสลับสามเฟส ที่มีขนาดเท่ากันแต่มีมุมต่างเฟสกัน 120° ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.6 ให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสามชุด ซึ่งประกอบด้วยขดลวด $a-a'$, $b-b'$ และ $c-c'$ ที่วางตัวไปตามร่องโดยรอบแกนของสเตเตอร์ โดยแกนของขดลวดทั้ง 3 จะมีมุมห่างกัน 120° ไฟฟ้า กระแสที่ไหลเข้าขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งคือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่หมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสามเฟส ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7 (Shen and Kong, 1995) ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าสามเฟส



รูปที่ 3.7 สนามแม่เหล็กหมุนที่ตำแหน่งต่างๆ

สมมติให้ ณ เวลาใดๆ กระแส I_a มีค่าเป็นบวก กระแส I_a จะไหลเข้าขดลวด $a-a'$ ที่ a และไหลออกที่ a' แต่ถ้ากระแส I_a มีค่าเป็นลบ กระแส I_a จะไหลในทิศทางที่ตรงกันข้าม คือจะไหลเข้าขดลวด $a-a'$ ที่ a' และไหลออกที่ a ซึ่งทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด $b-b'$ และ $c-c'$ ก็พิจารณาในลักษณะนี้เช่นกัน จากรูปที่ 3.6 ที่ $\omega t = 0$ กระแส I_a จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นกระแส I_a จะมีทิศทางวิ่งเข้าสู่หน้ากระดาษที่ a และมีทิศทางวิ่งออกจากหน้ากระดาษที่ a' ดังแสดงด้วยรูปที่

3.7(a) ซึ่งสัญลักษณ์ “+” หมายถึงกระแสมีทิศทางวิ่งเข้าสู่หน้ากระดาษ และสัญลักษณ์ “-” หมายถึงกระแสมีทิศทางวิ่งออกจากหน้ากระดาษ โดยที่ตำแหน่งเดียวกันนี้ กระแส I_b และ I_c จะมีค่าเป็นลบ ทั้งคู่ ดังนั้นกระแสในขดลวด $b-b'$ และ $c-c'$ จะไหลจาก b' ไป b และ c' ไป c ตามลำดับ การหาทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็กจะใช้กฎมือขวา โดยนิ้วหัวแม่มือจะแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อนิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำในทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด (Chapman, 1998) ดังนั้นเมื่อใช้หลักการนี้พิจารณากับขดลวดทั้งสามขด จึงได้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีทิศทางดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7(a)

จากรูปที่ 3.6 ที่ตำแหน่ง $\omega t = 60^\circ$ กระแส I_a และ I_b จะมีค่าเป็นบวก ส่วนกระแส I_c จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวด $a-a'$, $b-b'$ และ $c-c'$ จะไหลจาก a ไป a' , b ไป b' และ c' ไป c ตามลำดับ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7(b) และเมื่อใช้กฎมือขวามาพิจารณา จะได้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีทิศทางทำมุม 60° เทียบกับแกน z ดังรูป ส่วนที่ตำแหน่ง $\omega t = 90^\circ$ และ $\omega t = 150^\circ$ จะใช้หลักการเดียวกันนี้พิจารณา ซึ่งจะได้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีทิศทางทำมุม 90° และ 150° เทียบกับแกน z ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7(c) และ 3.7(d) ตามลำดับ จากผลดังกล่าวนี้จะสังเกตเห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ถ้านำหลักการดังกล่าวมาพิจารณาต่อไปอีก จะได้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปรอบๆ ทำมุมตามแนวแกน z การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กโดยรอบแบบนี้ จะเรียกว่า สนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (synchronous speed: N_s) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบที่จ่ายให้มอเตอร์ (f) และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (P) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (3-28)$$

ขณะที่โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ สนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ มีผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรของโรเตอร์ และเนื่องจากวงจรของโรเตอร์ถูกทำให้ลัดวงจรโดยวงแหวนทั้งสองส่วนหัวและท้าย จึงทำให้เกิดกระแสไหลและเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเชิงโคโรนัสไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุน ถ้าความเร็วของโรเตอร์ (N_r) เท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ แรงบิดที่โรเตอร์จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสได้ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็ว

ซึ่งโครน์สและความเร็วของโรเตอร์จะเรียกว่า ความเร็วสลลิป และค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วสลลิปต่อความเร็วซึ่งโครน์สจะเรียกว่า สลลิป (slip: s) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3-29)$$

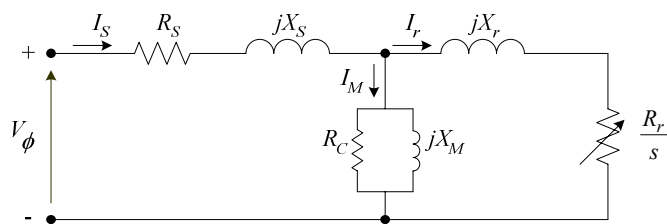
ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากค่าสลลิปเป็น 0 จะหมายถึง ความเร็วของโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความเร็วซึ่งโครน์ส ส่วนกรณีที่สลลิปมีค่าเป็น 1 จะหมายถึงมอเตอร์ไม่ได้หมุนนั่นเอง และ

$$f_r = s \cdot f \quad (3-30)$$

เมื่อ f_r คือความถี่ของกระแสที่โรเตอร์ ดังนั้นในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง ค่าสลลิปเป็น 1 ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่จ่าย

3.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากการพิจารณาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังที่กล่าวมา จะเห็นว่า มีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า คือแรงดันในวงจรของโรเตอร์ เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของวงจรสเตเตอร์ นั่นคือถ้าเปรียบขดลวดของโรเตอร์เป็นขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ขดลวดของสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) ของหม้อแปลงนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นทางวงจรของโรเตอร์ จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านวงจรสเตเตอร์ด้วย การคิดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะพิจารณาค่าทุกค่าเทียบมาทางด้านของสเตเตอร์ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของสเตเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าพารามิเตอร์ทางวงจรของโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับการหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสและคิดเทียบมาทางด้านสเตเตอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 (Chapman, 1998)



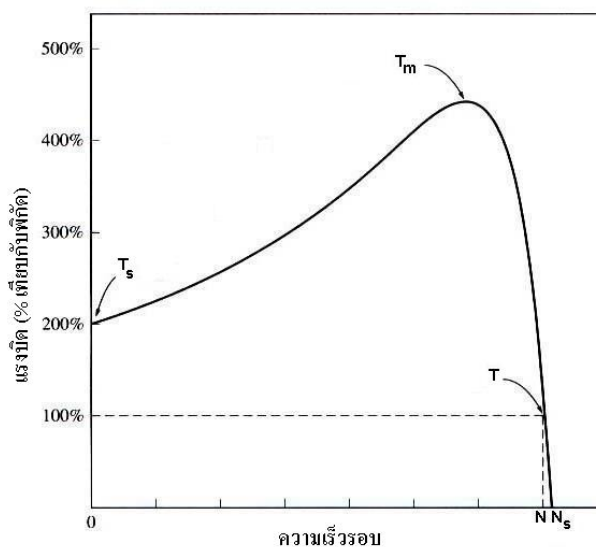
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- โดยที่ V_ϕ คือ แรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์
 I_s, I_r คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 I_M คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก
 s คือ ค่าสลิปของมอเตอร์
 R_s, R_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 R_C คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
 X_s, X_r คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
 X_M คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

โดยส่วนใหญ่เพื่อง่ายต่อการคำนวณ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก R_C ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8 มักจะถูกละทิ้ง เนื่องจากมีค่ามากกว่าค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก X_M อยู่มาก วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะช่วยในการอธิบายการทำงานและพิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ให้เข้าใจและชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยในการอธิบายค่ากำลังงานและกำลังสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ได้โดยง่าย

3.3.4 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

คุณลักษณะระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นการอธิบายลักษณะของแรงบิดที่ความเร็วรอบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ฟิรส์คี้ วรสุนทโรสด และ มานูชิ มาการิชาวา, 2538) โดยเริ่มต้นจากความเร็วขณะที่ยุคหนึ่งไปจนถึงความเร็วซิงโครนัส (N_s)

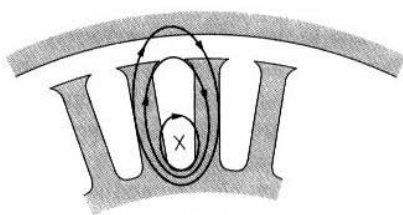


รูปที่ 3.9 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

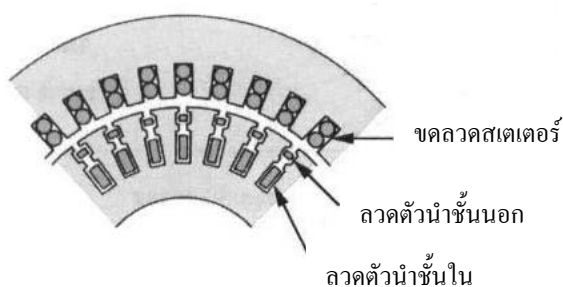
แรงบิดพิกัด (full-load torque: T) คือแรงบิดขณะที่มอเตอร์ใช้งานเต็มพิกัดกำลัง และความเร็วที่แรงบิดนี้จะเรียกว่า ความเร็วพิกัด (N) โดยแรงบิดที่โหลดจะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงบิดนี้ ส่วนแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่อง (starting torque: T_s) คือแรงบิดขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจากลักษณะหยุดนิ่ง ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงบิดพิกัด ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดหรือต่อกับโหลดขณะเริ่มเดินเครื่องได้ทันที และแรงบิดสูงสุด (maximum torque or pullout torque: T_m) คือแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์รับได้ โดยจะมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของแรงบิดพิกัด ซึ่งถ้าโหลดเพิ่มขึ้นเกินกว่าแรงบิดค่านี้อาจจะหยุดหมุน โดยค่าแรงบิดต่างๆ ที่กล่าวถึงนี้ สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความต้านทานของโรเตอร์กรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวนำในกรงกระรอกให้ใหญ่หรือเล็กลง หรืออาจทำได้โดยการเลือกช่องให้ลึกหรือตื้นขึ้น การออกแบบใบหีของโรเตอร์ลึกเพื่อใช้วางตัวนำ หรือที่เรียกว่า แท่งโรเตอร์ฝังลึก (deep-bar rotor) (Chapman, 1998) ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.10 จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วสูง เพื่อจะได้รีแอกแตนซ์สูง และจากผลเส้นแรงแม่เหล็กรั่วสูงนี้ ในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง จะทำให้กระแสไหลหนาแน่นที่บริเวณผิวตัวนำ (skin effect) แต่หลังจากที่มอเตอร์เริ่มหมุนแล้ว ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะลดลงดังแสดงด้วยสมการที่ (3-30) จึงทำให้กระแสไหลหนาแน่นบริเวณผิวตัวนำลดลงด้วย จากผลที่เกิดขึ้นนี้ จึงทำให้ความต้านทานของขดโรเตอร์มีค่ามากในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง และจะลดลงเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนผ่านไป อีกทั้งยังมีการพัฒนาการทำงานให้ดีขึ้น โดยการใช้ลวดตัวนำในโรเตอร์เป็นสองชุด (double-cage rotor) ดัง

แสดงด้วยรูปที่ 3.11 (ถาวร อมตกิตต์, 2545) ซึ่งลวดตัวนำชั้นในจะมีขนาดใหญ่กว่าลวดตัวนำชั้นนอก ดังนั้นลวดตัวนำชั้นในจึงมีความต้านทานต่ำและมีความเหนี่ยวนำสูงกว่าลวดตัวนำชั้นนอก เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในสเตเตอร์ข้ามไปยังลวดตัวนำทั้งสอง ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force: mmf) ในลวดตัวนำทั้งสองเท่ากัน ซึ่งในภาวะเริ่มเดินเครื่องนั้น ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่จ่าย ทำให้รีแอกแตนซ์ของลวดตัวนำชั้นในมีค่ามากกว่าลวดตัวนำชั้นนอก ดังนั้นจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำชั้นนอกมากขึ้น ส่งผลให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง จากนั้นเมื่อความเร็วใกล้กับความเร็วซิงโครนัส ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต้านทานของลวดตัวนำทั้งสองเอง ดังนั้นจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลมากในลวดตัวนำชั้นใน การสูญเสียจากความต้านทานจึงลดลง และมอเตอร์จะทำงานได้เหมือนกับมอเตอร์ที่มีโรเตอร์กรงกระรอกทั่วๆ ไป



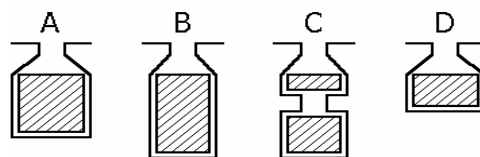
รูปที่ 3.10 เส้นแรงแม่เหล็กรั้วของโรเตอร์กรงกระรอกร่องลึก



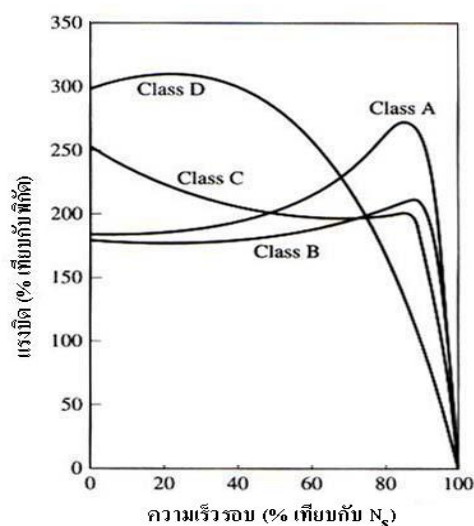
รูปที่ 3.11 โรเตอร์กรงกระรอกที่มีลวดตัวนำสองชุด

NEMA (national electrical manufacturers association) ได้แบ่งประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ออกเป็น 4 ประเภท (Chapman, 1998) คือ ชั้นคุณสมบัติ (class) A, B, C และ D โดยจะมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะร่องของโรเตอร์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.12 และมี

คุณลักษณะระหว่างแรงบิดและความเร็วดังแสดงด้วยรูปที่ 3.13 โดยแต่ละชั้นคุณสมบัติจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 3.12 ลักษณะร่องต่างๆ ของโรเตอร์กรงกระรอก



รูปที่ 3.13 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ตามชั้นคุณสมบัติต่างๆ

1) ชั้นคุณสมบัติ A มอเตอร์ประเภทนี้มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำขนาดใหญ่เพื่อลดความต้านทาน แต่ร่องตัวนำจะไม่ลึกลงไปในแกนเหล็กมาก เพื่อลดความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงค่อนข้างสูง อาจสูงถึงประมาณ 5-6 เท่า ของกระแสพิกัด ส่วนแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องอยู่ในระดับปกติ ซึ่งมีค่าประมาณ 200% ของแรงบิดพิกัด มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ A มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรทั่วไป เช่น พัดลม เครื่องเป่าลม ปั๊มลม และปั๊มน้ำ

2) ชั้นคุณสมบัติ B มอเตอร์ประเภทนี้ตัวนำถูกวางในร่องลึก เพื่อเพิ่มความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าลดลงเหลือประมาณ 3-4 เท่า ของกระแสพิกัด ส่วนแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณเท่ากับชั้นคุณสมบัติ A ทั้งนี้เป็นผลจากลักษณะร่องที่ลึกขึ้น และค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชั้นคุณสมบัติ A มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ B จะนำไปใช้งานเช่นเดียวกับชั้นคุณสมบัติ A

3) ชั้นคุณสมบัติ C มอเตอร์ประเภทนี้มีตัวนำสองชั้น เพื่อให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง ซึ่งจะมีค่าประมาณ 250% ของแรงบิดปกติ ส่วนกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณ 3-4 เท่า ของกระแสปกติ มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ C มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านกำลังและมีความฝืด เช่น สายพาน เครื่องกด และเครื่องบรรจุทุก

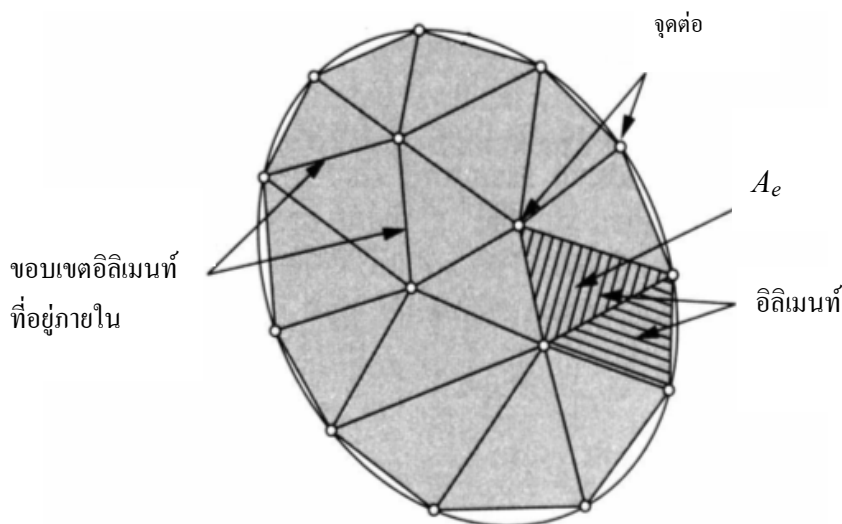
4) ชั้นคุณสมบัติ D มอเตอร์ประเภทนี้ใช้ตัวนำที่มีความต้านทานสูง กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าประมาณ 3-4 เท่า ของกระแสปกติ และติดตั้งตัวนำในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวนอกของโรเตอร์ เพื่อลดความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กไว้และให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง ซึ่งจะมีค่าประมาณ 300% ของแรงบิดปกติ มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ D มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดเพิ่มและลดยุ่ตลอดเวลา เช่น เคน และเครื่องปั๊มโลหะ เป็นต้น

3.4 วิถีไฟในท้อลิเมนต์

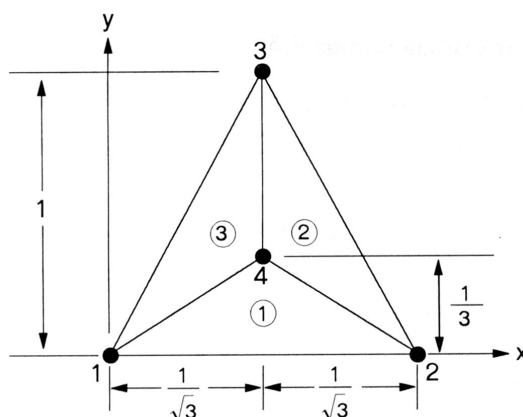
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ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

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้นคล้ายกับวิธีการผลต่างสืบเนื่อง กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยที่การกระจัดและแรงภายในของแต่ละเอลิเมนต์ ณ จุดที่เอลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งเอลิเมนต์ต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งอาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ที่จะคำนวณออกมา จึงมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งความแม่นยำนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เคชะอำไพ, 2542) ดังต่อไปนี้คือ

1) แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ (discretization) โดยแต่ละเอลิเมนต์ที่มีพื้นที่ A_e ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy) โดยใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ ซึ่งประกอบไปด้วยจุดต่อ (nodes) เอลิเมนต์ (elements) และขอบเขตของเอลิเมนต์ที่อยู่ภายใน (interelement boundaries) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุกๆ เอลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมทั้งหมด 3 เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์



รูปที่ 3.15 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อีลิเมนต์ 4 จุดต่อ

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ต้องการคือ หมายเลขของอีลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละจุดต่อ ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.15 พร้อมทั้งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอีลิเมนต์

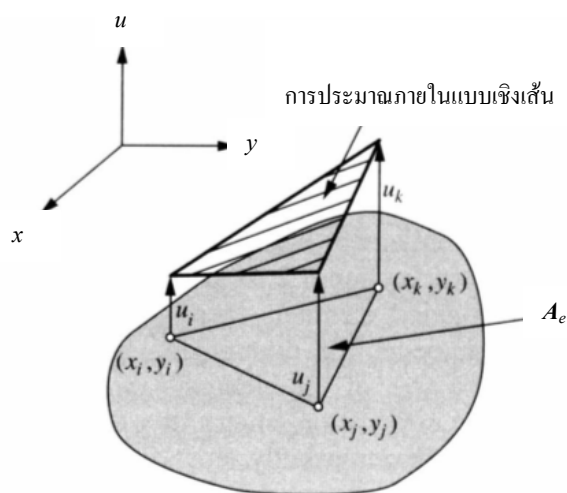
หมายเลข อีลิเมนต์	หมายเลขจุดต่อ		
	จุดต่อ i	จุดต่อ j	จุดต่อ k
1	1	2	4
2	4	2	3
3	1	4	3

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

ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

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

2) เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (element interpolation function) อย่างในกรณีอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีตัวห้อย i, j และ k ซึ่งวนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (Bickford, 1994) ซึ่งเป็นการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบเชิงเส้น (linear representation)



รูปที่ 3.16 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

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

$$u_e(x, y) = \alpha + \beta x + \gamma y \quad (3-31)$$

โดยที่ α, β, γ เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสาม ดังนี้

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

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

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

นำค่า α, β, γ ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสามข้างต้น แทนค่ากลับลงไปในสมการที่ (3-31) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใดๆ บนอิลิเมนต์เป็น

$$u_e(x,y) = u_i N_i + u_j N_j + u_k N_k \quad (3-32)$$

ซึ่ง N_n , $n = i, j, k$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2A_e} \quad (3-33)$$

$$\text{โดยที่ } a_i = x_j y_k - x_k y_j \quad b_i = y_j - y_k \quad c_i = x_k - x_j$$

$$a_j = x_k y_i - x_i y_k \quad b_j = y_k - y_i \quad c_j = x_i - x_k$$

$$a_k = x_i y_j - x_j y_i \quad b_k = y_i - y_j \quad c_k = x_j - x_i$$

และ A_e คือพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่ง $2A_e$ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$2A_e = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = x_j(y_k - y_i) + x_i(y_j - y_k) + x_k(y_i - y_j) \quad (3-34)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมาี้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3) สร้างสมการของอิลิเมนต์ (element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix}_e \quad (3-35)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e [u]_e = [f]_e$ โดย $[u]_e$ คือเมทริกซ์ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่า เป็นเมทริกซ์ระดับอิลิเมนต์ ซึ่งสมการของอิลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้

สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ การสร้างสมการของอิลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3-35) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่ายๆ อย่างเช่น ปัญหาต่างๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติ โดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้นๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ ซึ่งปัญหาหลายๆ ชนิดในทางปฏิบัติ สามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่วไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน

4) นำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (assembly) เป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนที่ 1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (3-36)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{sys} [u]_{sys} = [f]_{sys}$ จากสมการที่ (3-36) เมทริกซ์ $[K]_{sys}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{sys} = [K]_{sys}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของ

ค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนจุดต่อเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถประดิษฐ์ให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิเลเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการ ซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้ เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิเลเมนต์ย่อยจำนวนมากๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.15 กล่าวคือเราจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 3 อิเลเมนต์ 4 จุดต่อ โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{sys}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดย เขียนสมการของอิเลเมนต์ต่างๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของจุดต่อทางแฉวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละอิเลเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.15 $[K]_e$ ของอิเลเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1, 2 และ 4 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 2, 3 และ 4 และ $[K]_e$ ของอิเลเมนต์ที่ 3 ซึ่งเป็นอิเลเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1, 3 และ 4 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

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

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

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

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแถวอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิเลเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่างๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{\text{sys}}$ เช่นค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแถวอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของอิเลเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแถวอนที่ 4 แถวตั้งที่ 2 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

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

5) ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (initial and boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

6) คำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่จุดต่อต่างๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่า วิธีไฟไนต์อิเลเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิเลเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ ทฤษฎีของสนามแม่เหล็ก ที่ได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าของสนามแม่เหล็ก ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่ว่าด้วยหลักการงานและคุณลักษณะของมอเตอร์ และวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ ที่อธิบายถึงขั้นตอนต่างๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 บทนำ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การคำนวณสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหา ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำ และประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กนี้

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก **B** สามารถดำเนินการได้โดยเลี้ยงไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก **A** ก่อน เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็ก **B** สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก **A** เท่านั้น ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4-1)$$

การคำนวณสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก ซึ่งตั้งต้นจากการศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา (William, 1989) โดยศึกษาได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่า สนามแม่เหล็กที่แปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า **E** ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4-2)$$

แทนสมการที่ (4-1) ลงในสมการที่ (4-2) จะได้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{A} \quad (4-3)$$

และจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามที่แปรตามเวลา เมื่อสมมติให้ ความหนาแน่นกระแสกระจัด (displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์ (Demerdash and Gillott, 1974) และ (Fu, 1999) เนื่องจากแหล่งจ่ายมีค่าความถี่ต่ำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (4-4)$$

เมื่อ \mathbf{H} คือความเข้มสนามแม่เหล็ก, \mathbf{J}_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (external current density) และ \mathbf{J}_e คือความหนาแน่นของกระแสวน (eddy current density) ซึ่งได้จากกฎของโอห์ม โดยที่

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (4-5)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4-3) จึงได้

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} \quad (4-6)$$

นำสมการที่ (3-24), (4-1) และ (4-6) แทนค่าลงไปในสมการที่ (4-4) จะได้

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (4-7)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ \mathbf{A} พบว่า $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ในสมการที่ (3-15) จึงได้สมการของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดังสมการที่ (4-8)

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (4-8)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งกระแสเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป s ของมอเตอร์ด้วย เมื่อพิจารณามอเตอร์ในสองมิติตามระนาบพิกัด xy ซึ่งแปรผันตามเวลา จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-9) โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) อันดับสอง (Vassent, Meunier, and Foggia, 1991), (Nagwa, Anthony, and Graham, 1992) และ (Fu, 1999) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) - s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_0 = 0 \quad (4-9)$$

จากสมการที่ (4-9) ซึ่งเป็นการสมมติให้สนามแม่เหล็กวางตัวตามพื้นที่หน้าตัดในระนาบพิกัด xy ของมอเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาเทอมของ \mathbf{A} และ \mathbf{J}_0 จะปรากฏเฉพาะส่วนประกอบของแกน z เท่านั้น

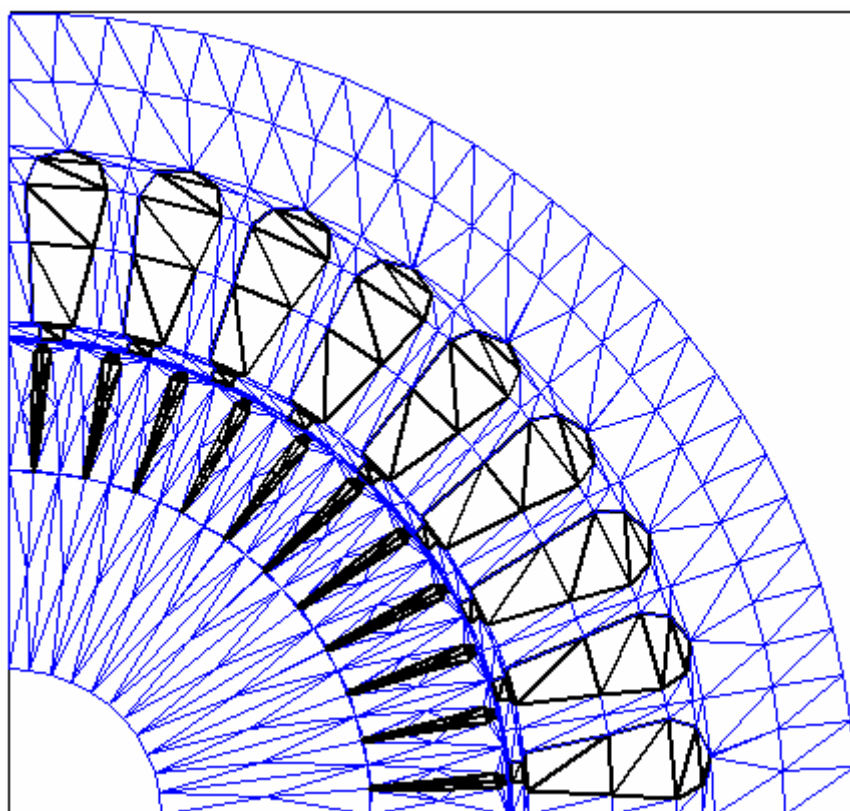
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงในสมการที่ (4-9) หาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ ดังนี้

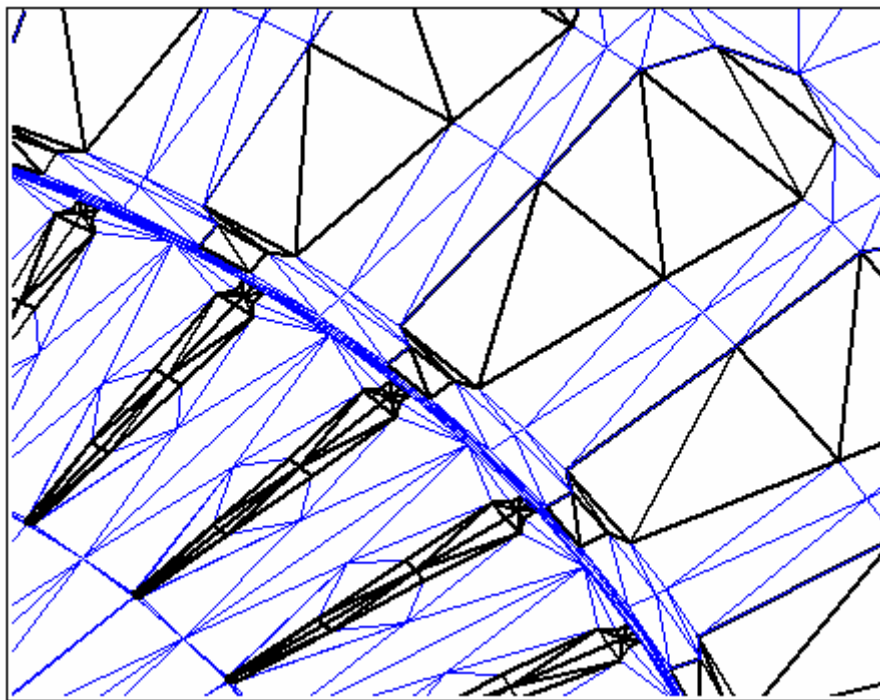
4.3.1 การแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใดๆ บนเอลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น การแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้น โดยมีจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์เท่ากับ 2,688 จุด และ 5,224 เอลิเมนต์ ตามลำดับ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดเพียง 1/4 ของมอเตอร์ โดยมอเตอร์มีจำนวนร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ทั้งหมดเท่ากับ 36 และ 44 ร่อง ตามลำดับ และการพันขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบสองชั้น ส่วนรูปที่ 4.2 เป็นการขยายให้เห็นถึงความละเอียดในการแบ่งเอลิเมนต์และจุดต่อบนบริเวณพื้นที่ที่สำคัญ

ในงานวิจัยนี้การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นอิลิเมนต์ จะพิจารณาแยกพื้นที่กันออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของพื้นที่สเตเตอร์ ส่วนของพื้นที่โรเตอร์ และส่วนของพื้นที่ช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยส่วนของพื้นที่สเตเตอร์การแบ่งอิลิเมนต์จะกระทำเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้เพราะส่วนของสเตเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่ ในส่วนของพื้นที่โรเตอร์การแบ่งอิลิเมนต์ดำเนินการเพียงครั้งเดียวเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งพิคคของจุดต่อบนพื้นที่แล้ว จะต้องคำนึงถึงมุมของโรเตอร์ที่หมุนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในส่วนของพื้นที่ช่องอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นๆ โดยปริมาณชั้นจะขึ้นอยู่กับความละเอียดในการพิจารณา โดยชั้นที่ติดกับโรเตอร์ การแบ่งอิลิเมนต์ในชั้นนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปให้สอดคล้องตามการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นการพิจารณตำแหน่งพิคคของจุดต่อบริเวณพื้นที่นี้ จะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังและรอบคอบเป็นพิเศษ



รูปที่ 4.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์



รูปที่ 4.2 ภาพขยายการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนบริเวณที่สำคัญ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นทางเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น จะได้

$$A(x, y) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k \quad (4-10)$$

โดยที่ N_n , $n = i, j, k$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_n , $n = i, j, k$ คือผลลัพธ์ของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (i, j, k) ของอิลิเมนต์ ซึ่ง

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e} \quad (4-11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
a_i &= x_j y_k - x_k y_j, & b_i &= y_j - y_k, & c_i &= x_k - x_j \\
a_j &= x_k y_i - x_i y_k, & b_j &= y_k - y_i, & c_j &= x_i - x_k \\
a_k &= x_i y_j - x_j y_i, & b_k &= y_i - y_j, & c_k &= x_j - x_i
\end{aligned} \tag{4-12}$$

และ Δ_e คือพื้นที่ของแต่ละอิเลเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \tag{4-13}$$

4.3.3 การสร้างสมการของอิเลเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างสมการของอิเลเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (4-9) ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ อย่างไรก็ตาม อิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม รูปแบบทั่วไปของสมการของอิเลเมนต์สำหรับปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถแสดงได้ดังนี้ (Huebner, Dewhirst, Smith, and Byrom, 2001)

$$[M]\{\dot{A}\} + [K]\{A\} = \{F\} \tag{4-14}$$

โดย $\{A\}$ คือเวกเตอร์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ และ $\{\dot{A}\}$ คือเวกเตอร์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สมการที่ (4-14) นี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง ซึ่งถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกไปได้อีกเช่น วิธีของกาลเลอร์กิน (Galerkin) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหามหาศาลใหญ่อย่างเช่นปัญหาในงานวิจัยนี้

การสร้างสมการของอิเลเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4-9) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-15)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) - s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_0 = R \tag{4-15}$$

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาเลอร์คิน (Preston, Reece, and Sangha, 1988) และ (Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function: W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (Ω) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_{\Omega} W_n R d\Omega = 0, \quad n = 1, 2, 3 \quad (4-16)$$

สำหรับอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม จุดที่ไม่รู้ค่ามี 3 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสาม ดังนั้นจึงต้องการ 3 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (4-16) จะต้องมามีค่า $n = 1, 2, 3$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4-15) ลงในสมการที่ (4-16) จึงได้

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) - s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_0 \right) d\Omega = 0 \quad (4-17)$$

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} (N_n \mathbf{J}_0) d\Omega = 0 \quad (4-18)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (4-18) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตที่ละส่วน (integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_{\Omega} u(\nabla \cdot \mathbf{V}) d\Omega = \int_{\Gamma} u(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma - \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \mathbf{V}) d\Omega \quad (4-19)$$

ซึ่ง Γ คือขอบเขตของอิลิเมนต์ Ω เมื่อเปรียบเทียบกับพจน์แรกของสมการที่ (4-18) จะได้

$$u = N_n$$

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

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

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

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอิติเมนท์ Γ

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} \quad \text{ดังนั้น}$$

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

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

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

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

ดังนั้นจากสมการที่ (4-18) เมื่อ $n = 1, 2, 3$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y \right) d\Gamma - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n s \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} N_n \mathbf{J}_0 d\Omega = 0 \quad (4-20)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4-20) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิติเมนท์ Γ ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพคือปริมาณกระแสตลอดขอบนอกของอิติเมนท์

นั้นๆ หนึ่ง อิลิเมนต์นั้นๆ อาจวางตัวอยู่ภายในหรืออยู่ติดขอบนอกของพื้นที่ศึกษา หากอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ตรงตำแหน่งขอบนอกของพื้นที่ศึกษา เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อเป็นเงื่อนไขตรงขอบนอกของพื้นที่ศึกษา เงื่อนไขนี้เป็นการกำหนดค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของตัวแปรตามที่ขอบเขตนั้น ซึ่งในปัญหาของงานวิจัยนี้ มีเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังสมการที่ (4-21) (Nagwa, Anthony, and Graham, 1992) นั่นคือศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} มีค่าคงที่ตลอดตามขอบของพื้นที่ศึกษา หรือหมายถึงไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณขอบนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขอบเท่ากับศูนย์) และหากอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่วางตัวอยู่ภายในพื้นที่ศึกษาโดยมีอิลิเมนต์อื่นๆ ล้อมรอบ ค่าปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจุดต่อภายในจุดต่อหนึ่งของอิลิเมนต์นี้ต้องอยู่ในสถานะสมดุลกับปริมาณกระแสจากอิลิเมนต์ที่อยู่ล้อมรอบ ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลเข้าและออกจุดต่อจึงต้องหักล้างกันหมดเท่ากับศูนย์เพื่อก่อให้เกิดสถานะการไหลของกระแสที่สมดุล ดังนั้นจึงได้สมการไฟไนท์อิลิเมนต์ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-22) และเนื่องจากสมการที่ (4-22) มีทั้งหมด 3 สมการ เราสามารถเขียนสมการไฟไนท์อิลิเมนต์นี้ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4-23)

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (4-21)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} N_n s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) d\Omega = \int_{\Omega} N_n \mathbf{J}_0 d\Omega \quad (4-22)$$

$$\int_{\Omega} \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} s\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) d\Omega = \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} \mathbf{J}_0 d\Omega \quad (4-23)$$

และจากสมการที่ (4-10) จึงได้ลักษณะการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} โดยประมาณในแต่้อิลิเมนต์เป็น

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

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

และสมการไฟไนท์อิลิเมนต์จึงกลายมาเป็น

$$\int_{\Omega} \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 3} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 3} \right) d\Omega [A]_{3 \times 1} + \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} s\sigma [N]_{1 \times 3} d\Omega [A]_{3 \times 1} = \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} \mathbf{J}_0 d\Omega \quad (4-24)$$

หรือเขียนสมการไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 3 สมการได้ดังนี้

$$[M]_{3 \times 3} \{ \dot{A} \}_{3 \times 1} + [K]_{3 \times 3} \{ A \}_{3 \times 1} = \{ F \}_{3 \times 1} \quad (4-25)$$

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

เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า: $[M]_{3 \times 3}$

$$\text{จาก } [M]_{3 \times 3} = \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} s\sigma [N]_{1 \times 3} d\Omega \quad (4-26)$$

จากสมการที่ (4-11) ฟังก์ชันการประมาณภายในแสดงได้ดังนี้

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e} \quad n = i, j, k \quad (4-27)$$

จากสมการที่ (4-27) และหากค่าสภาพนำทางไฟฟ้า σ มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (4-26) จึงกลายเป็น

$$[M]_{3 \times 3} = s\sigma \int N_n N_m dx dy \quad n, m = i, j, k \quad (4-28)$$

สมการที่ (4-28) นี้สามารถคำนวณได้ง่ายโดยใช้สูตรการอินทิเกรตรอบพื้นที่ขอบเขตทั้งหมดของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Rao, 1999) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-29)

$$\int N_i^\alpha N_j^\beta N_k^\gamma dx dy = \frac{\alpha! \beta! \gamma!}{(\alpha + \beta + \gamma + 2)!} \cdot 2\Delta_e \quad (4-29)$$

สมการที่ (4-28) สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ $N_n = N_m$ และ $N_n \neq N_m$ ในกรณีที่ $N_n = N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ i ของรูปสามเหลี่ยม จึงได้ $\alpha = 2, \beta = \gamma = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4-29) จะได้

$$\begin{aligned}\int N_i^2 dx dy &= \frac{2!0!0!}{(2+0+0+2)!} \cdot 2\Delta_e \\ &= \frac{4\Delta_e}{4!} = \frac{2\Delta_e}{12}\end{aligned}$$

ในกรณีที่ $N_n \neq N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ i และ j จึงได้ $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4-29) จะได้

$$\begin{aligned}\int N_i^1 N_j^1 dx dy &= \frac{1!1!0!}{(1+1+0+2)!} \cdot 2\Delta_e \\ &= \frac{2\Delta_e}{4!} = \frac{\Delta_e}{12}\end{aligned}$$

ที่จุดต่ออื่นๆ ของรูปสามเหลี่ยมก็ได้รับการพิจารณาในลักษณะนี้เช่นกัน ดังนั้นจากสมการที่ (4-28) จึงได้เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-30) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]_{3 \times 3}$ จะมีค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเลิเมนต์

$$[M]_{3 \times 3} = \frac{s\sigma\Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

เมทริกซ์ความขบข้มได้ของแม่เหล็ก: $[K]_{3 \times 3}$

$$\text{จาก } [K]_{3 \times 3} = \int_{\Omega} \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}_{1 \times 3} + \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix}_{3 \times 1} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix}_{1 \times 3} \right) d\Omega \quad (4-31)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายใน ในสมการที่ (4-27) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{2\Delta_e} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{2\Delta_e} \quad n = i, j, k \quad (4-32)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4-32) ลงในสมการที่ (4-31) จะได้

$$\begin{aligned} [K]_{3 \times 3} &= \frac{1}{\mu} \int \left(\frac{b_n}{2\Delta_e} \frac{b_m}{2\Delta_e} + \frac{c_n}{2\Delta_e} \frac{c_m}{2\Delta_e} \right) dx dy \quad n, m = i, j, k \quad (4-33) \\ &= \frac{1}{4\mu\Delta_e^2} (b_n b_m + c_n c_m) \int dx dy \\ &= \frac{1}{4\mu\Delta_e} (b_n b_m + c_n c_m) \quad n, m = i, j, k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [K]_{3 \times 3} &= \frac{v}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \\ &= \frac{v}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ Sym & & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \\ &= \frac{v}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{ik} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jk} \\ S_{ki} & S_{kj} & S_{kk} \end{bmatrix} \quad (4-34) \end{aligned}$$

โดยที่ $v = \frac{1}{\mu}$ คือ สภาพต้านทานแม่เหล็ก (magnetic reluctivity) เพื่อง่ายต่อการโปรแกรม คอมพิวเตอร์ เมทริกซ์ความขบซึ่มได้ของแม่เหล็ก $[K]_{3 \times 3}$ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$[K]_{3 \times 3} = v\Delta_e [B]_{3 \times 2}^T [B]_{2 \times 3} \quad (4-35)$$

$$\text{โดยที่ } [B] = \frac{1}{2\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}$$

โหนดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง: $\{F\}_{3 \times 1}$

$$\text{จาก } \{F\}_{3 \times 1} = \int_{\Omega} [N]_{3 \times 1} \mathbf{J}_0 d\Omega \quad (4-36)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4-27) ดังนั้นสมการที่ (4-36) จึงกลายเป็น

$$\{F\}_{3 \times 1} = \mathbf{J}_0 \int N_n dx dy \quad n = i, j, k \quad (4-37)$$

สมการที่ (4-37) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังสมการที่ (4-29) โดยยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ i ของรูปสามเหลี่ยม จึงได้ $\alpha = 1, \beta = \gamma = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4-29) จะได้

$$\begin{aligned} \int N_i^1 dx dy &= \frac{1!0!0!}{(1+0+0+2)!} \cdot 2\Delta_e \\ &= \frac{2\Delta_e}{3!} = \frac{\Delta_e}{3} \end{aligned}$$

ซึ่งที่จุดต่อ j และ k ของรูปสามเหลี่ยมก็ได้รับการพิจารณาเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4-37) จึงได้โหนดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเองแสดงได้ดังนี้

$$\{F\}_{3 \times 1} = \frac{\mathbf{J}_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-38)$$

ซึ่งการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก \mathbf{J}_0 ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในแต่ละเฟส จะแสดงรายละเอียดต่างๆ ให้ปรากฏในบทต่อไป

4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว

ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นในสถานะชั่วคราว โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอิทธิพันธ์เมตริกซ์ $[K]_{3 \times 3}$ จะไม่คงตัวโดยแปรผันไปตาม \mathbf{A} ทั้งนี้เนื่องจากค่าสภาพต้านทานแม่เหล็ก ν มีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแม่เหล็ก (magnetization curve) ส่วนเวกเตอร์ $\{F\}_{3 \times 1}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงไป

ตามเวลาด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นกระแสสลับ ซึ่งการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ในสถานะชั่วคราวเช่นนี้ทำได้ค่อนข้างยากและซับซ้อน โดยการแก้สมการที่ (4-25) จากข้างต้น จะต้องอาศัยการผสมผสานกันระหว่างวิธีการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวที่ใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (recurrence relations) และวิธีการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้วิธีการทำซ้ำ (iterative technique) เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวจะใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (4-39) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (time step) โดยถ้าเลือกใช้ $\beta = 0$ จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า $\beta = 1/2$ เป็นวิธีของแครงค์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า $\beta = 2/3$ เป็นวิธีของกาลเลอร์กิน (Galerkin) และถ้า $\beta = 1$ จะเรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (backward difference) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง ดังสมการที่ (4-40) เนื่องจากวิธีนี้ประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$\beta \{\dot{A}\}^{t+\Delta t} + (1-\beta)\{\dot{A}\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4-39)$$

$$\{\dot{A}\}^{t+\Delta t} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (4-40)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง สมการที่ (4-25) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (4-41) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (4-40) ลงในสมการที่ (4-41) จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนต์อิเลเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (4-42)

$$[M]\{\dot{A}\}^{t+\Delta t} + [K]\{A\}^{t+\Delta t} = \{F\}^{t+\Delta t} \quad (4-41)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M] + [K] \right) \{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M]\{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (4-42)$$

4.3.5 การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งวิธีการทำซ้ำที่นิยมใช้กันมากคือวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) (ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2544) และ (Preston, Reece, and Sangha, 1988) เนื่องจากเป็นวิธีที่เริ่มจากค่าเริ่มต้นเพียงค่าเดียวและนำไปสู่ผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแทนค่าอิเลเมนต์เมทริกซ์ $[M]_{3 \times 3}$, $[K]_{3 \times 3}$ และเวกเตอร์ $\{F\}_{3 \times 1}$ ลงในสมการที่ (4-42) จึงได้

$$\begin{bmatrix} \frac{2\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{ii}}{4\Delta_e} & \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{ij}}{4\Delta_e} & \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{ik}}{4\Delta_e} \\ \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{ji}}{4\Delta_e} & \frac{2\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{jj}}{4\Delta_e} & \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{jk}}{4\Delta_e} \\ \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{ki}}{4\Delta_e} & \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{kj}}{4\Delta_e} & \frac{2\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{vS_{kk}}{4\Delta_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^{t+\Delta t} \\ A_j^{t+\Delta t} \\ A_k^{t+\Delta t} \end{bmatrix} - \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^t \\ A_j^t \\ A_k^t \end{bmatrix} - \frac{\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} J_0^{t+\Delta t} \\ J_0^{t+\Delta t} \\ J_0^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = 0 \quad (4-43)$$

ให้ G แทนแถวแรกของพจน์ต่างๆ ที่ปรากฏทางฝั่งซ้ายของสมการที่ (4-43) ซึ่งเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (4-44) จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยการหาอนุพันธ์ของ G เทียบกับแต่ละจุดต่อของคีย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A_i , A_j และ A_k ดังสมการที่ (4-45), (4-46) และ (4-47) ตามลำดับ โดยอาศัยกฎลูกโซ่ (chain rule) $\frac{\partial v}{\partial A} = \frac{\partial v}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial A}$

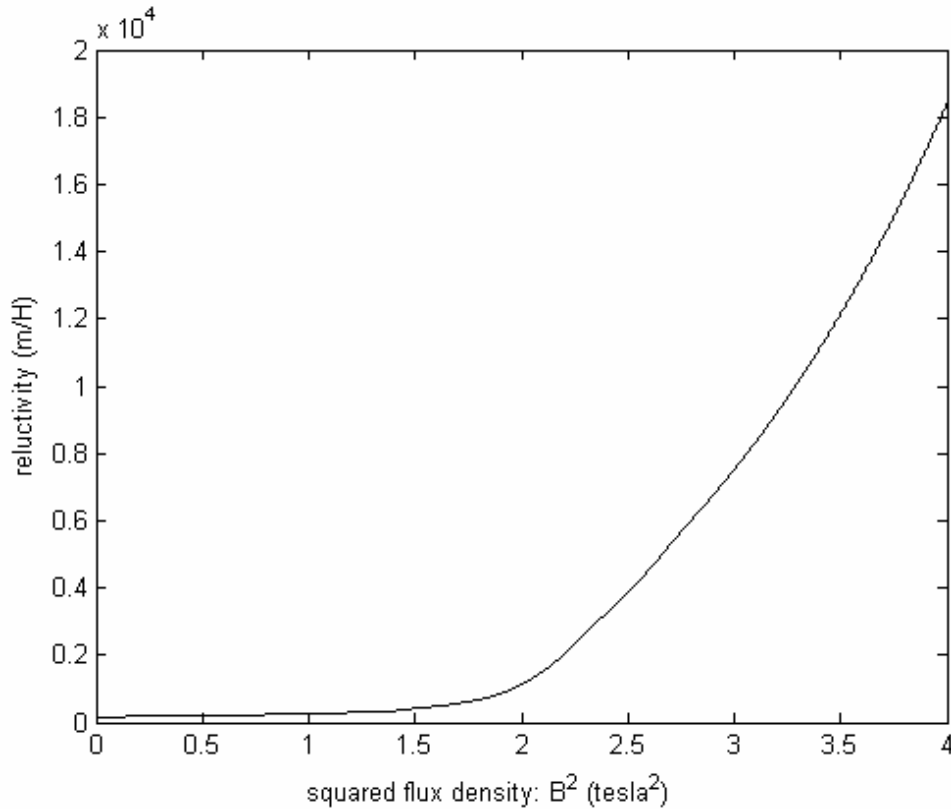
$$G = \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} (2A_i^{t+\Delta t} + A_j^{t+\Delta t} + A_k^{t+\Delta t}) + \frac{v^{t+\Delta t}}{4\Delta_e} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{ij}A_j^{t+\Delta t} + S_{ik}A_k^{t+\Delta t}) - \frac{\sigma\Delta_e}{12\Delta t} (2A_i^t + A_j^t + A_k^t) - \frac{J_0^{t+\Delta t}\Delta_e}{3} \quad (4-44)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} = \frac{2\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{4\Delta_e} S_{ii} + \frac{1}{4\Delta_e} (S_{ii}A_i^{t+\Delta t} + S_{ij}A_j^{t+\Delta t} + S_{ik}A_k^{t+\Delta t}) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_i} \right)^{t+\Delta t} \quad (4-45)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} = \frac{s\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{4\Delta_e} S_{ij} + \frac{1}{4\Delta_e} \left(S_{ii} A_i^{t+\Delta t} + S_{ij} A_j^{t+\Delta t} + S_{ik} A_k^{t+\Delta t} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_j} \right)^{t+\Delta t} \quad (4-46)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} = \frac{s\sigma\Delta_e}{12\Delta t} + \frac{v^{t+\Delta t}}{4\Delta_e} S_{ik} + \frac{1}{4\Delta_e} \left(S_{ii} A_i^{t+\Delta t} + S_{ij} A_j^{t+\Delta t} + S_{ik} A_k^{t+\Delta t} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right)^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial B^2}{\partial A_k} \right)^{t+\Delta t} \quad (4-47)$$

ค่าของ $\frac{\partial v}{\partial B^2}$ หาได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ของแม่เหล็กระหว่าง $v - B^2$ (แปลงมาจาก B-H curve) (Kim, Kwon and Park, 1999) ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.3 ซึ่งการประมาณค่าของข้อมูลในช่วงนี้ จะใช้วิธีการประมาณค่าของเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline interpolation)



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งคุณลักษณะของ $v - B^2$

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

$$B^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 = \frac{(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k)^2 + (A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k)^2}{4\Delta_e^2} \quad (4-48)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_i} = \frac{2b_i(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k) + 2c_i(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k)}{4\Delta_e^2} \quad (4-49)$$

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_j} = \frac{2b_j(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k) + 2c_j(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k)}{4\Delta_e^2} \quad (4-50)$$

$$\frac{\partial B^2}{\partial A_k} = \frac{2b_k(A_i b_i + A_j b_j + A_k b_k) + 2c_k(A_i c_i + A_j c_j + A_k c_k)}{4\Delta_e^2} \quad (4-51)$$

จากการประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ของวิธีนิวตัน-ราฟสัน จึงได้แถวแรก
ของสมการอิลิเมนต์เป็น

$$G = -\frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} \Delta A_i^{t+\Delta t} - \frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} \Delta A_j^{t+\Delta t} - \frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \Delta A_k^{t+\Delta t} \quad (4-52)$$

โดยที่ $\Delta A^{t+\Delta t} = A_{m+1}^{t+\Delta t} - A_m^{t+\Delta t}$ ซึ่ง m คือจำนวนรอบการทำซ้ำของวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดำเนินการ
ในทำนองเดียวกันโดยให้ H และ I แทนพจน์ทางฝั่งซ้ายซึ่งปรากฏในแถวที่ 2 และ 3 ของสมการที่
(4-43) ตามลำดับ จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหา
แบบไม่เชิงเส้นในสถานะชั่วคราว แสดงได้ดังสมการที่ (4-53)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial H}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial I}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta A_i^{t+\Delta t} \\ \Delta A_j^{t+\Delta t} \\ \Delta A_k^{t+\Delta t} \end{bmatrix}_{3 \times 1} = - \begin{bmatrix} G \\ H \\ I \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (4-53)$$

หรือเขียนสมการที่ (4-53) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (4-54) โดยที่ $[J]$ คือยาโคเบียนเมตริกซ์ (jacobian matrix)

$$[J]_{3 \times 3} [\Delta A]_{3 \times 1} = [f]_{3 \times 1} \quad (4-54)$$

4.3.6 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาปัญหาแบบไม่เชิงเส้นในสถานะชั่วคราว คือ

$$[J]_{n \times n} [\Delta A]_{n \times 1} = [f]_{n \times 1} \quad (4-55)$$

การแก้สมการเมตริกซ์รวมของระบบ ได้นำความกว้างแถบหรือแบนด์วิดท์ (bandwidth: BW) ของเมตริกซ์มาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยหลักในการลดระยะเวลาการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก.

4.3.7 ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้แก่มอเตอร์ในแต่ละรอบที่มอเตอร์หมุนไป และเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่างๆ โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาการหมุนของมอเตอร์คือ $\mathbf{A}(t=0) = 0$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้คำตอบจากรอบที่แล้วเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อประหยัดเวลาในการหาคำตอบที่ถูกต้อง ส่วนค่าเงื่อนไขขอบเขต จะกำหนดให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า $\mathbf{A} = 0$ (Brunelli, Casadei, Reggiani and Serra, 1983) และ (Fu, 1999)

4.3.8 จำนวนค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$) ดังนั้นเมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ ตามระนาบพิกัด xy จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-56) และ (4-57) ตามลำดับ

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k}{2\Delta_e} \quad (4-56)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k}{2\Delta_e} \right) \quad (4-57)$$

การแปลงระบบพิกัดจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (radial flux density, B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (tangential flux density, B_t) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ที่มีมุม ϕ เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงได้ดังนี้

$$B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi \quad (4-58)$$

$$B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi \quad (4-59)$$

เมื่อคำนวณหาค่า B_r และ B_t แล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการสันสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998) และ (Sakamoto, Hirata, Kobayashi, and Kajiwara, 1999) โดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (4-60)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (4-61)$$

ซึ่ง F_r และ F_t คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวสัมผัสตามลำดับ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแนวรัศมี ดังนั้นการพิจารณาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงพิจารณาเฉพาะในแนวรัศมีเท่านั้น (Tarnhuvud, and Reichert, 1988) และ (Neves, Carlson, Sadowski, and Bastos, 1998) แต่เมื่อพิจารณาแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุน แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะเป็นแรงหลักที่ต้องนำมาพิจารณาถึง

4.4 สรุป

ในบทนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณามอเตอร์ในสถานะชั่วคราว ประกอบกับวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตักข้างของกาเลอร์คิน รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 5

การคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

5.1 บทนำ

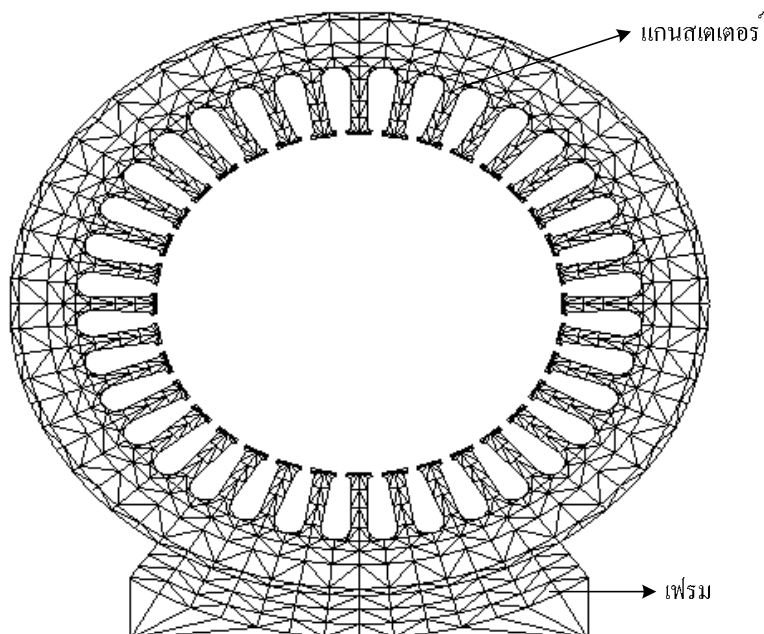
การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะที่โรเตอร์หมุน โดยแสดงผลของการสันสะท้อนในรูปของการกระจัดที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปร่างดั้งเดิมของมอเตอร์ ก่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสันสะท้อนของมอเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ประยุกต์วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของการสันสะท้อนนี้

5.2 การคำนวณการสันสะท้อนโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนในมอเตอร์ จะอาศัยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อสร้างสมการการเคลื่อนที่ โดยพิจารณาการสันในรูปของฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งการดำเนินงานจะมีขั้นตอนคล้ายคลึงกับการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จากบทที่ 4 ที่ผ่านมา โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ ดังนี้

5.2.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

เริ่มจากการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ออกเป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใดๆ บนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้น โดยมีจำนวนจุดต่อและอิลิเมนต์เท่ากับ 1,343 จุด และ 1,822 อิลิเมนต์ ตามลำดับ ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูป การคำนวณการสันสะท้อนได้แบ่งพื้นที่การพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของแกนสเตเตอร์และส่วนของเฟรม โดยการสันสะท้อนบนแกนสเตเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังเฟรม (Henneberger, Sattler, Hadrys, and Shen, 1992), (Durantay, Laurent, Messin, and Kromer, 1999) และ (Ishibashi, Kamimoto, Noda, and Itomi, 2003)



รูปที่ 5.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์เพื่อคำนวณการสั่นสะเทือน

5.2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในและสมการของอิลิเมนต์

การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของอิลิเมนต์ เมื่อพิจารณาการสั่นของมอเตอร์ในฟังก์ชันของการกระจัด โดยสมมติให้พื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ไม่มีความหนาหรืออาจพิจารณาในรูปของแผ่นบาง (thin plate) (Rao,1999) สมการการเคลื่อนที่ของอิลิเมนต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-1) ซึ่งเป็นสมการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่มี 6 สมการประกอบรวมกัน

$$[M]_{6 \times 6} \{\ddot{d}\}_{6 \times 1} + [C]_{6 \times 6} \{\dot{d}\}_{6 \times 1} + [K]_{6 \times 6} \{d\}_{6 \times 1} = \{F\}_{6 \times 1} \quad (5-1)$$

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

$[C]_{6 \times 6}$ = เมทริกซ์ความหน่วง (damping matrix)

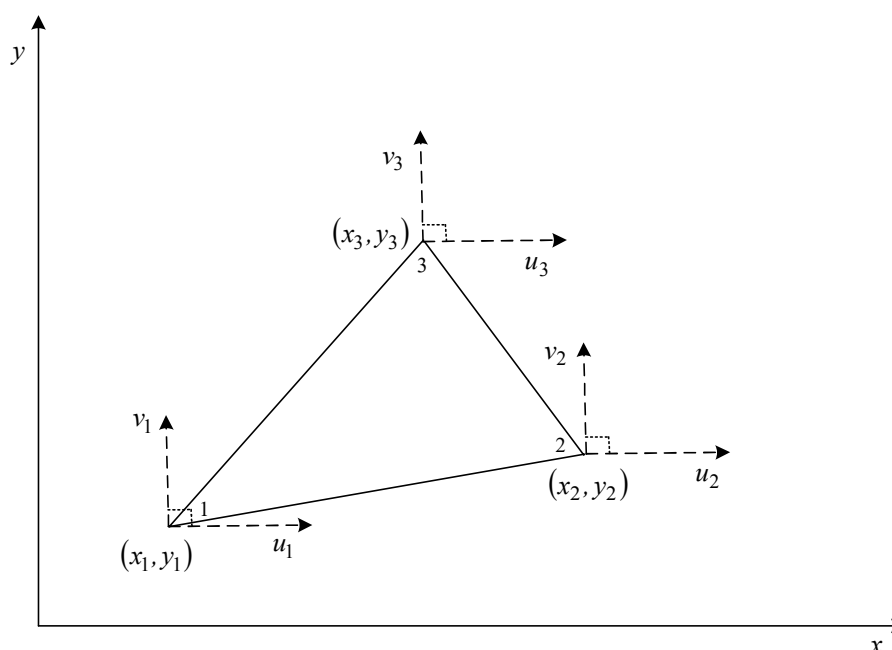
$[K]_{6 \times 6}$ = เมทริกซ์ความแข็งของสปริง (stiffness matrix)

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

$\{d\}_{6 \times 1}$ = เวกเตอร์การกระจัดเพื่อใช้หาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง $\{\dot{d}\}_{6 \times 1}$ และสอง $\{\ddot{d}\}_{6 \times 1}$ เทียบกับเวลา หรืออีกนัยหนึ่งคือเวกเตอร์ความสัมพัทธ์ของความเร็วกและความเร่งตามลำดับ

ซึ่งแรงที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ เกิดจากการนำแรงแม่เหล็กไฟฟ้าตรงกลางซี่ในแต่ละซี่ของสเตเตอร์ที่ติดกับช่องอากาศ คูณด้วยพื้นที่ในบริเวณที่มีแรงกระทำ ซึ่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และในที่นี้ได้กำหนดให้แรงกระทำกับแผ่นบางซึ่งมีความหนาน้อยมาก ส่วนเวกเตอร์การกระจัดที่แสดงในสมการที่ (5-2) เป็นการแสดงระยะกระจัดบนจุดต่อหมายเลข 1, 2 และ 3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาต่อหนึ่งอิลิเมนต์ โดย u และ v แทนระยะกระจัดในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งการแสดงระนาบพิกัดในลักษณะเช่นนี้ จะเรียกว่าระนาบพิกัดวงกว้าง (global coordinate)

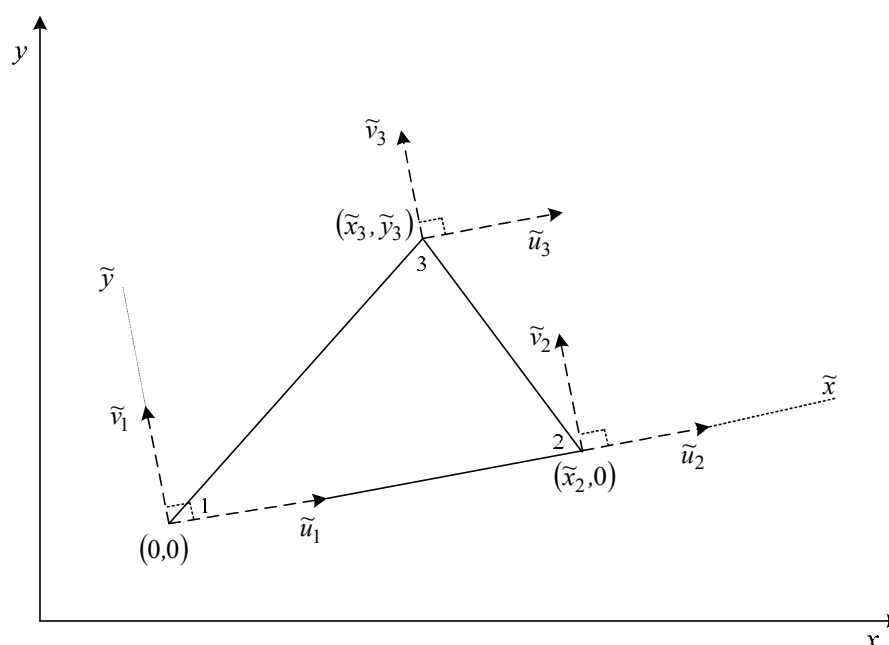
$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (5-2)$$



รูปที่ 5.2 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดวงกว้าง

การพิจารณาการกระจัดของแต่ละอิลิเมนต์ที่มีลักษณะการวางตัวในแต่ละอิลิเมนต์ที่แตกต่างกัน จะต้องพิจารณาการวางตัวของทุกๆ อิลิเมนต์ให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันเสียก่อน ซึ่ง

ดำเนินการได้โดยแปลงระนาบพิกัดวงกว้างให้เป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น (local coordinate) (Rao, 1999) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.3 ซึ่งดำเนินการได้โดย กำหนดให้ที่จุดต่อหมายเลข 1 ของทุกๆ อิลิเมนต์ที่มีพิกัดเฉพาะถิ่น $(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)$ อยู่ที่จุดกำเนิด $(0,0)$ โดยที่แกน \tilde{x} ของทุกๆ อิลิเมนต์บนระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นจะวางตัวตามฐานของสามเหลี่ยมระหว่างจุดต่อหมายเลข 1 และ 2 และแกน \tilde{y} จะตั้งฉากกับแกน \tilde{x} ดังนั้นจุดต่อหมายเลข 2 ของทุกๆ อิลิเมนต์จึงมีพิกัดเฉพาะถิ่น $(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2)$ เป็น $(\tilde{x}_2, 0)$ และ $(\tilde{x}_3, \tilde{y}_3)$ คือจุดต่อหมายเลข 3 ของพิกัดเฉพาะถิ่น โดยมี \tilde{u} และ \tilde{v} ที่จุดต่อหมายเลขต่างๆ แทนระยะกระจัดในแนวแกน \tilde{x} และ \tilde{y} ตามลำดับ เมื่อสร้างสมการอิลิเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นเพื่อพิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แล้ว จากนั้นจึงแปลงกลับไปเป็นสมการอิลิเมนต์ในระนาบพิกัดวงกว้าง (x,y) ดังเดิม



รูปที่ 5.3 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น

การพิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ ยังคงพิจารณาลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เมื่อพิจารณาระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-3) และ (5-4)

$$u(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{u}_1 N_1 + \tilde{u}_2 N_2 + \tilde{u}_3 N_3 \quad (5-3)$$

$$v(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{v}_1 N_1 + \tilde{v}_2 N_2 + \tilde{v}_3 N_3 \quad (5-4)$$

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

$$N_n = \frac{a_n + \beta_n \tilde{x} + \gamma_n \tilde{y}}{2\Delta_e} \quad (5-5)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= \tilde{x}_2 \tilde{y}_3 - \tilde{x}_3 \tilde{y}_2, & \beta_1 &= \tilde{y}_2 - \tilde{y}_3, & \gamma_1 &= \tilde{x}_3 - \tilde{x}_2 \\ a_2 &= \tilde{x}_3 \tilde{y}_1 - \tilde{x}_1 \tilde{y}_3, & \beta_2 &= \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1, & \gamma_2 &= \tilde{x}_1 - \tilde{x}_3 \\ a_3 &= \tilde{x}_1 \tilde{y}_2 - \tilde{x}_2 \tilde{y}_1, & \beta_3 &= \tilde{y}_1 - \tilde{y}_2, & \gamma_3 &= \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 \end{aligned} \quad (5-6)$$

และ Δ_e คือพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & \tilde{x}_1 & \tilde{y}_1 \\ 1 & \tilde{x}_2 & \tilde{y}_2 \\ 1 & \tilde{x}_3 & \tilde{y}_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} [\tilde{x}_2(\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) + \tilde{x}_1(\tilde{y}_2 - \tilde{y}_3) + \tilde{x}_3(\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2)] \quad (5-7)$$

จากสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ในสมการที่ (5-1) สามารถคำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริงและอิลิเมนต์เมทริกซ์มวลได้ดังที่จะอธิบายต่อจากนี้ไป ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาถึงอิลิเมนต์เมทริกซ์ความหน่วงเนื่องจากมีผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ค่อนข้างน้อย ประกอบกับการคำนวณมีความยุ่งยาก (Henneberger, Sattler, Hadrys, and Shen, 1992)

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

ดำเนินการโดยพิจารณาการวางตัวของอิลิเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นเพื่อให้ทุกๆ อิลิเมนต์มีการวางตัวอยู่ในรูปแบบเดียวกันก่อน ซึ่งเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเฉพาะถิ่น (local stiffness matrix, $[\tilde{K}]$) เกิดจากผลรวมของเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเนื่องจากความเค้นในแนวฉาก (normal stress, $[\tilde{K}_n]$) และเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเนื่องจากความเค้นเฉือน (shear stress, $[\tilde{K}_s]$) ดังแสดงได้ในสมการที่ (5-8), (5-9) และ (5-10) ตามลำดับ

$$[\tilde{K}] = [\tilde{K}_n] + [\tilde{K}_s] \quad (5-8)$$

$$[\tilde{K}_n] = \frac{hE}{4\Delta_e(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} \beta_1^2 & \nu\beta_1\gamma_1 & \beta_1\beta_2 & \nu\beta_1\gamma_2 & \beta_1\beta_3 & \nu\beta_1\gamma_3 \\ & \gamma_1^2 & \nu\beta_2\gamma_1 & \gamma_1\gamma_2 & \nu\beta_3\gamma_1 & \gamma_1\gamma_3 \\ & & \beta_2^2 & \nu\beta_2\gamma_2 & \beta_2\beta_3 & \nu\beta_2\gamma_3 \\ & & & \gamma_2^2 & \nu\beta_3\gamma_2 & \gamma_2\gamma_3 \\ \text{sym} & & & & \beta_3^2 & \nu\beta_3\gamma_3 \\ & & & & & \gamma_3^2 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

$$[\tilde{K}_s] = \frac{hE}{8\Delta_e(1+\nu)} \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & \beta_1\gamma_1 & \gamma_1\gamma_2 & \beta_2\gamma_1 & \gamma_1\gamma_3 & \beta_3\gamma_1 \\ & \beta_1^2 & \beta_1\gamma_2 & \beta_1\beta_2 & \beta_1\gamma_3 & \beta_1\beta_3 \\ & & \gamma_2^2 & \beta_2\gamma_2 & \gamma_2\gamma_3 & \beta_3\gamma_2 \\ & & & \beta_2^2 & \beta_2\gamma_3 & \beta_2\beta_3 \\ \text{sym} & & & & \gamma_3^2 & \beta_3\gamma_3 \\ & & & & & \beta_3^2 \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

ซึ่ง E , ν และ h คือค่ามอดุลัส (modulus) อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) และความหนาในแต่ละอิเลเมนต์ตามลำดับ เมื่อคำนวณเมทริกซ์ความแข็งของสปริงเฉพาะถิ่นได้แล้ว จากนั้นแปลงกลับเป็นเมทริกซ์ความแข็งของสปริงที่แท้จริงได้ในสมการที่ (5-11)

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (5-11)$$

โดยที่

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{x}, x) & \cos(\tilde{x}, y) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\tilde{y}, x) & \cos(\tilde{y}, y) \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

จากสมการที่ (5-12) สมาชิกในเมทริกซ์ $[R]$ จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันโคไซน์ระนาบทิศทาง (directional cosine) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้าง ดังแสดงด้วยความสัมพันธ์ (5-13) - (5-16)

$$\cos(\tilde{x}, x) = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5-13)$$

$$\cos(\tilde{x}, y) = \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5-14)$$

$$\cos(\tilde{y}, x) = - \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5-15)$$

$$\cos(\tilde{y}, y) = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (5-16)$$

เมทริกซ์มวล: $[M]_{6 \times 6}$

ดำเนินการโดยพิจารณาการวางตัวของอิลิเมนต์ในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นก่อนเช่นกัน ดังแสดงได้ในสมการที่ (5-17)

$$[\tilde{M}] = \frac{\rho h \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

ซึ่ง ρ คือค่าความหนาแน่นมวล (mass density) ในแต่ละอิลิเมนต์ จากนั้นแปลงกลับเป็นเมทริกซ์มวลที่แท้จริงได้ในสมการที่ (5-18)

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (5-18)$$

การนำสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ โดยหากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น $2n$ สมการ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5-19) ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาการกระจัดจะพิจารณาทั้งแนวแกน x และแกน y ร่วมกัน

$$[M]_{2n \times 2n} \{\ddot{d}\}_{2n \times 1} + [C]_{2n \times 2n} \{\dot{d}\}_{2n \times 1} + [K]_{2n \times 2n} \{d\}_{2n \times 1} = \{F\}_{2n \times 1} \quad (5-19)$$

5.3 การหาผลเฉลยสำหรับการสั่นสะเทือน

ในการวิเคราะห์สถานะชั่วคราวในขณะที่มีมอเตอร์หมุนไป ดังสมการการเคลื่อนที่ที่เวลา t ใดๆ ที่แสดงด้วยสมการที่ (5-20)

$$[M]\{\ddot{d}\}^t + [C]\{\dot{d}\}^t + [K]\{d\}^t = \{F\}^t \quad (5-20)$$

ซึ่งด้วย t หมายถึงค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]$, $[C]$ และ $[K]$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อมอเตอร์หมุนไป การแก้สมการสถานะชั่วคราวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีผลต่างกลาง (central difference) เพราะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายสำหรับการแก้สมการการเคลื่อนที่ในสถานะชั่วคราว (Kwon and Bang, 2000) โดยเมื่อพิจารณาวิธีผลต่างกลาง จะได้

$$\{\ddot{d}\}^t = \frac{1}{\Delta t^2} \left[\{d\}^{t+\Delta t} - 2\{d\}^t + \{d\}^{t-\Delta t} \right] \quad (5-21)$$

$$\{\dot{d}\}^t = \frac{1}{2\Delta t} \left[\{d\}^{t+\Delta t} - \{d\}^{t-\Delta t} \right] \quad (5-22)$$

แทนค่าสมการที่ (5-21) และ (5-22) ลงในสมการที่ (5-20) จะได้

$$[M_{eff}] \{d\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (5-23)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right] \quad (5-24)$$

$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{d\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right] \{d\}^{t-\Delta t} \quad (5-25)$$

ซึ่ง $[M_{eff}]$ และ $\{F_{eff}\}$ คือเมทริกซ์มวลประสิทธิผล (effective mass matrix) และเวกเตอร์แรงประสิทธิผล (effective force matrix) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปเป็นขั้นตอนในการคำนวณหาการสั่นสะเทือนเป็นระยะกระจัดเมื่อมอเตอร์หมุนไปได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาเมทริกซ์ระบบสมการรวม $[M]$, $[C]$ และ $[K]$

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ $t = 0$ ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์การกระจัด $\{d\}^0$ และเวกเตอร์ความเร็ว $\{\dot{d}\}^0$ พร้อมทั้งรับค่าเวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับมอเตอร์ $\{F\}^0$

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณค่าเวกเตอร์ความเร่ง $\{\ddot{d}\}^0$ โดยใช้วิธีการแยกแบบแอลยูในการแก้สมการที่ (5-20) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{d}\}^0 = \{F\}^0 - [C]\{\dot{d}\}^0 - [K]\{d\}^0 \quad (5-26)$$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณค่าเวกเตอร์การกระจัดที่เวลา $-\Delta t$ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (5-21) และ (5-22) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

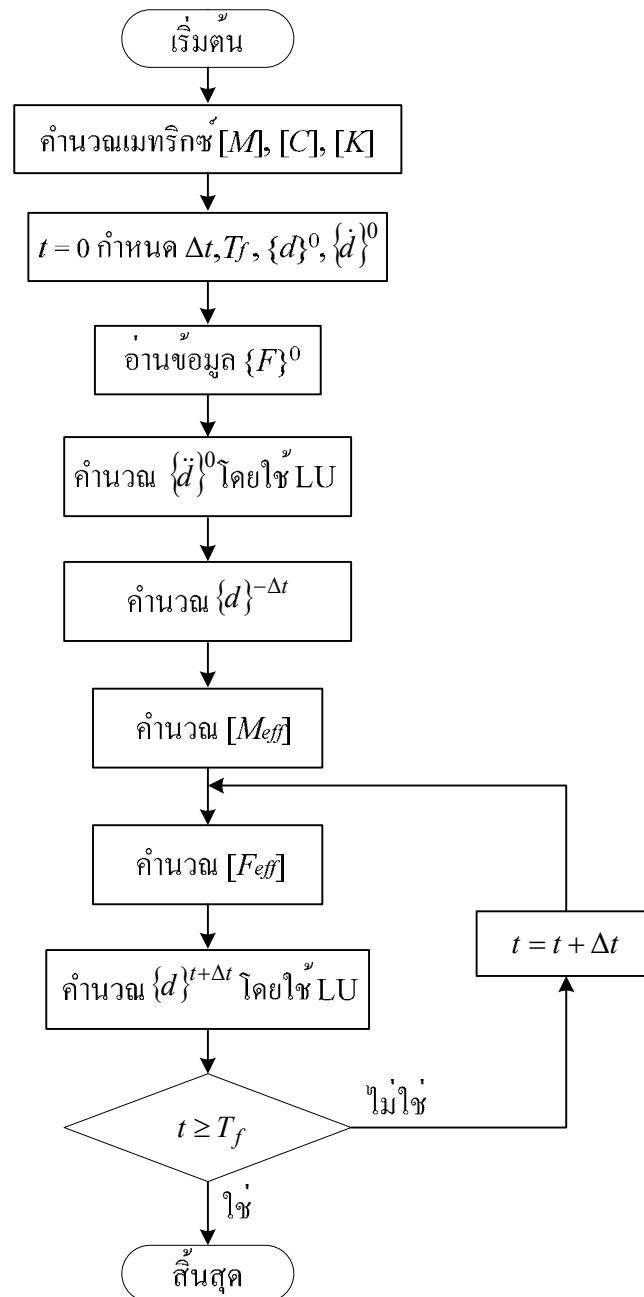
$$\{d\}^{-\Delta t} = \{d\}^0 - \Delta t \{\dot{d}\}^0 + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{d}\}^0 \quad (5-27)$$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณเมทริกซ์มวลประสิทธิผล $[M_{eff}]$ โดยใช้สมการที่ (5-24)

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณเวกเตอร์แรงประสิทธิผล $\{F_{eff}\}$ โดยใช้สมการที่ (5-25)

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณค่าเวกเตอร์การกระจัดที่เวลาถัดไป $\{d\}^{t+\Delta t}$ โดยใช้วิธีการแยกแบบแอลยู สำหรับแก้สมการที่ (5-23) จากนั้นที่เวลาถัดไป $t + \Delta t$ ดำเนินการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6-7 จนถึงเวลาสิ้นสุด T_f

ขั้นตอนต่างๆ ที่ได้อธิบายผ่านมา อาจสรุปรวมในรูปของแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภูมิการคำนวณการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

การแก้ระบบสมการเชิงเส้นในขั้นตอนที่ 7 ได้เลือกใช้วิธีการแยกแบบแอลยู (LU decomposition) เนื่องจากเมื่อมอเตอร์หมุนไปที่มุมต่างๆ จะมีเพียงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ซึ่งเป็นเทอมทางด้านขวาของสมการเชิงเส้นที่ (5-23) เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนเมทริกซ์ $[M_{eff}]$ จะมีค่าคงที่ตลอดการหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นในทุกๆ รอบของการแก้ระบบสมการเชิงเส้น จะดำเนินการแยกเมทริกซ์ $[M_{eff}]$ เพียงเฉพาะรอบแรกรอบเดียวเท่านั้น

ซึ่งจะประหยัดเวลาในการแยกเมทริกซ์ $[M_{eff}]$ ออกเป็นเมทริกซ์ L และ U ลงไปได้มาก โดยเฉพาะปัญหาที่มีขนาดใหญ่อย่างงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

5.4 สรุป

บทที่ 5 นี้ ได้อธิบายการประยุกต์วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เพื่อคำนวณหาขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อโรเตอร์หมุน โดยพิจารณาในรูปแบบของฟังก์ชันการกระจัดซึ่งอาศัยสมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการอนุพันธ์สามัญอันดับสอง โดยพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ในรูปของแผ่นบางซึ่งมีความหนาน้อยมาก รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือนที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6.1 บทนำ

การจำลองผลเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะท้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้าในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Intel Pentium IV 1.60 GHz, 512 MB SD-RAM สำหรับประมวลผล โดยได้ประดิษฐ์ไฟในทอไลเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++ บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กและสมการการเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง โดยรับค่าอินพุตซึ่งเป็นคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์จากการสร้างกริดอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม MATLAB การจำลองผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไป และวิเคราะห์ถึงขนาดและรูปร่างของการสั้นสะท้อนในมอเตอร์ ดังนั้นในบทที่ 6 นี้ จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมคำนวณการสั้นสะท้อนในมอเตอร์ ประกอบกับดำเนินการเปรียบเทียบผลการสั้นสะท้อนจากผลทางภาคทฤษฎีที่ได้จากการจำลองผลและผลทางภาคปฏิบัติที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดทดสอบ เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ทั้งสมดุลและไม่สมดุล

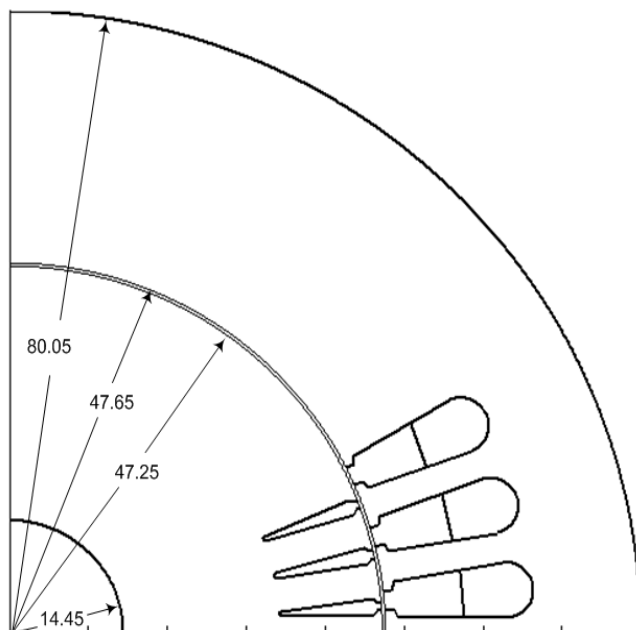
6.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

การจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ในบทนี้ ได้พิจารณามอเตอร์ขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 6.1 ส่วนรายละเอียดภาคตัดและมิติต่างๆของมอเตอร์ ร่องสเตเตอร์และโรเตอร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ

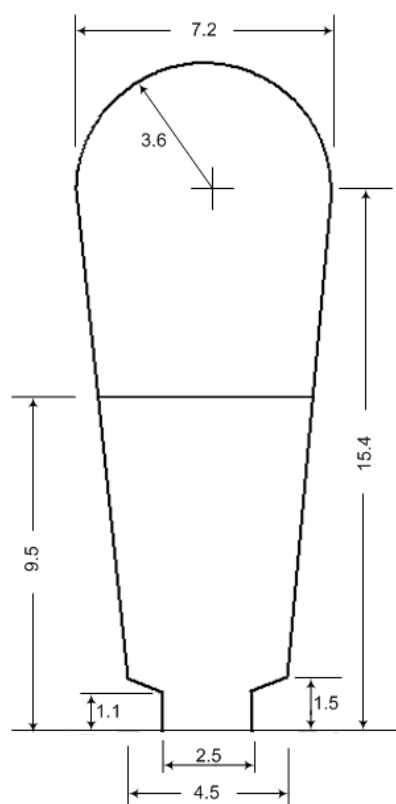
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังงานขาออก	3 HP
แรงดันแหล่งจ่าย	380 V (ต่อแบบสตาร์)
จำนวนขั้ว	4 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz
ความเร็วพิกัด	1455 rpm
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
มอดูลัสของแกนสเตเตอร์	$1.2 \cdot 10^{11}$ N/m ²
มอดูลัสของเฟรม (อลูมิเนียม)	$7.1 \cdot 10^{10}$ N/m ²
ความหนาแน่นมวลของแกนสเตเตอร์	$7.8 \cdot 10^3$ Kg/m ³
ความหนาแน่นมวลของเฟรม	$0.9 \cdot 10^3$ Kg/m ³
อัตราส่วนของปิวซอง	0.25
ชนิดการพันขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนร่องของสเตเตอร์	36 ร่อง
จำนวนร่องของโรเตอร์	44 ร่อง
ความกว้างช่องอากาศ	0.4 mm
ระยะพิตช์	7/9 ร่อง
จำนวนรอบการพัน/ขดลวด	15 รอบ
เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดสเตเตอร์	1.8 mm
สภาพนำทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำโรเตอร์	$4.90 \cdot 10^7 \Omega^{-1}/m$

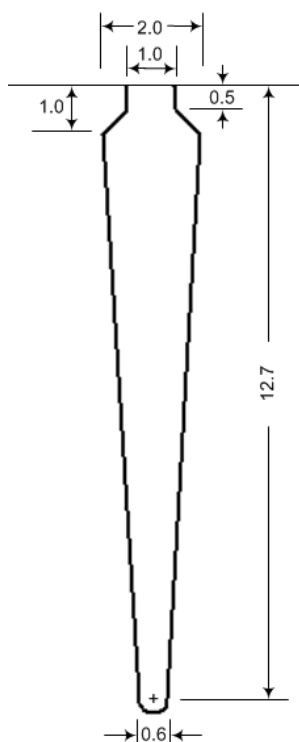
หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล



รูปที่ 6.1 ภาคตัดส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำและมิติ (mm)



รูปที่ 6.2 ภาคตัดของร่องสเตเตอร์และมิติ (mm)

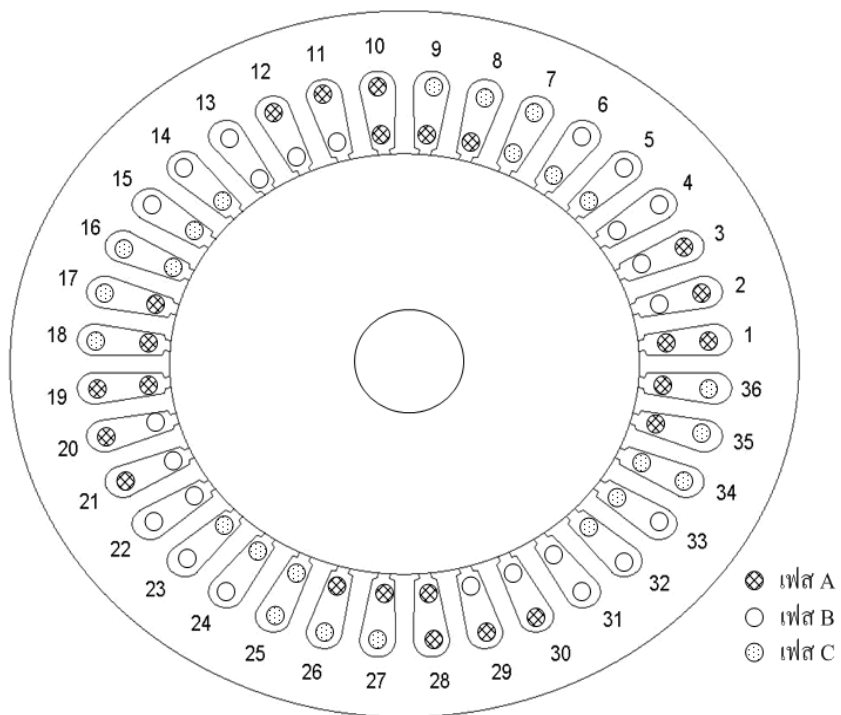


รูปที่ 6.3 ภาคตัดของร่องโรเตอร์และมิติ (mm)

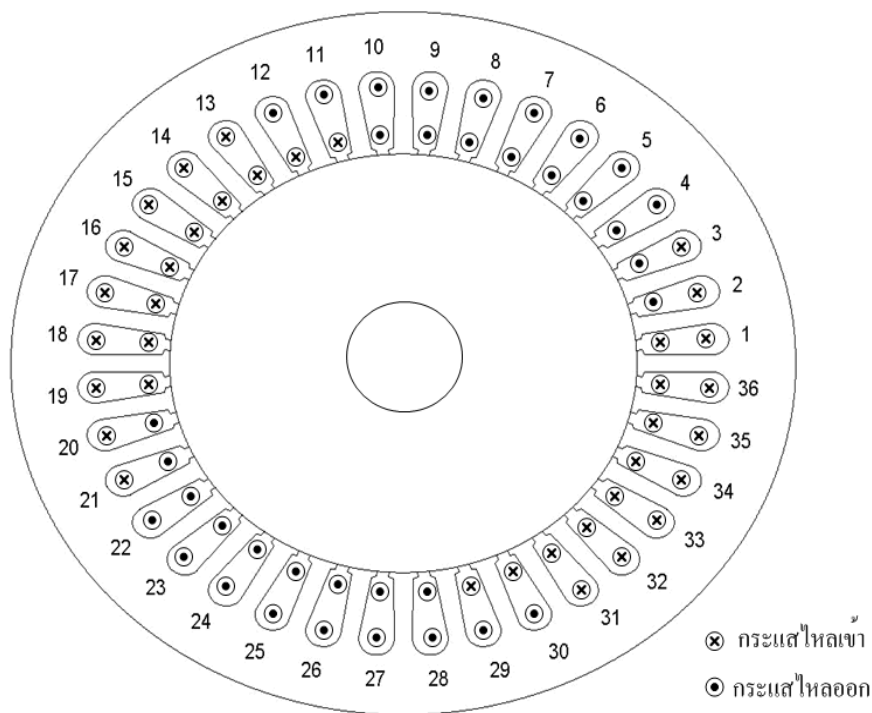
ลักษณะการพันของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส (A, B และ C) แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นการพันขดลวดแบบสองชั้น มีระยะพิทช์ 7/9 ร่อง กระแสในแต่ละเฟสที่ไหลอยู่ในขดลวดที่พันอยู่ในแต่ละร่องของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลาโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งจ่าย และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทราบกระแส I ในแต่ละเฟสจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสภายนอก J_0 ที่ป้อนเป็นอินพุตให้แก่โปรแกรมไฟไนท์อิเลเมนต์ที่ตั้งสมการที่ (6-1) โดยรายละเอียดการคำนวณค่าของกระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$J_0 = \frac{n \cdot I}{a} \quad (6-1)$$

เมื่อ n คือจำนวนรอบการพันของขดลวด และ a คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm^2) โดยการป้อนค่า J_0 ให้แก่โปรแกรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของกระแสด้วย ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละเฟส ณ เวลาขณะหนึ่ง กรณีที่พิจารณามอเตอร์ใน 2 มิติ (ระนาบ xy) J_0 จะมีทิศทางวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากหน้ากระดาษ



รูปที่ 6.4 การฟันขดลวดสเตเตอร์ใน 36 ร่อง



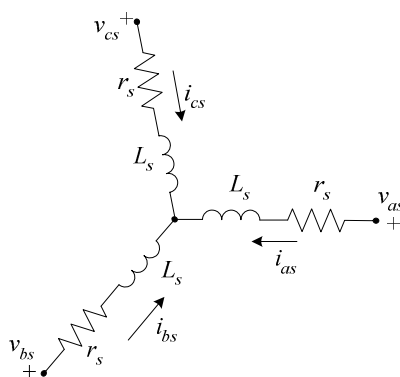
รูปที่ 6.5 ทิศทางการไหลของกระแส ณ ระยะเวลาหนึ่ง

6.3 การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

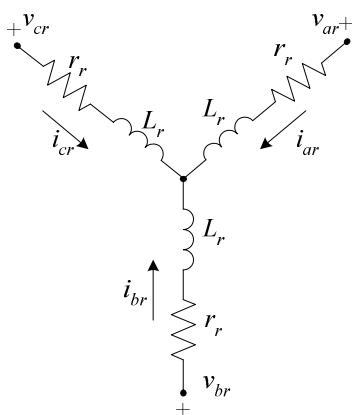
การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกลของมอเตอร์ ดังรายละเอียดที่อธิบายต่อไปนี้ (Novotny and Lipo, 1996)

6.3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มีรูปแบบเป็นอิมพีแดนซ์ (RL อนุกรม) ต่อแบบวาย อิมพีแดนซ์แต่ละกิ่งเป็นสิ่งแทนแกนขดลวดสเตเตอร์ และเป็นการต่ออิมพีแดนซ์แบบสามเฟสสมดุลที่ให้อยู่กับที่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.6 ส่วนขดลวดโรเตอร์ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.7 มีลักษณะคล้ายกับขดลวดสเตเตอร์ทุกประการ ยกเว้นแต่ไม่ได้ถูกยึดอยู่กับที่ จึงพิจารณาได้ว่าขดลวดโรเตอร์สามารถหมุนเคลื่อนที่ไปที่มุมต่างๆ



รูปที่ 6.6 ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 6.7 ขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่ v_{as}, v_{ar} คือ แรงดันของเฟส a ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)
 v_{bs}, v_{br} คือ แรงดันของเฟส b ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)
 v_{cs}, v_{cr} คือ แรงดันของเฟส c ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (V)
 i_{as}, i_{ar} คือ กระแสของเฟส a ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)
 i_{bs}, i_{br} คือ กระแสของเฟส b ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)
 i_{cs}, i_{cr} คือ กระแสของเฟส c ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (A)
 r_s, r_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (Ω)
 L_s, L_r คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ (H)

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยคิดเทียบมาทางด้านสเตเตอร์ เราอาจเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = r_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

โดยที่ λ_{as} , λ_{bs} และ λ_{cs} คือ ฟลักซ์เชื่อมโยง (flux linkage) ที่ขดลวดสเตเตอร์ในเฟส a , b และ c ตามลำดับ และเขียนแสดงฟลักซ์เชื่อมโยงดังกล่าวในรูปความสัมพันธ์กับกระแสต่างๆ ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_R & \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_R & \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix}$$

โดย $L_{ms} = \frac{2}{3}L_m$ เมื่อ L_m คือค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก, θ_R คือมุมของโรเตอร์คิดเทียบกับแกนของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส a และ ' เป็นสัญลักษณ์เพื่อสื่อให้ทราบว่าคิดเทียบมา

ทางด้านสเตเตอร์แล้ว ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ อาจเขียนแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v'_{ar} \\ v'_{br} \\ v'_{cr} \end{bmatrix} = r'_r \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda'_{ar} \\ \lambda'_{br} \\ \lambda'_{cr} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{ar} \\ \lambda'_{br} \\ \lambda'_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \\ + L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_R & \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_R & \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

จากปริภูมิสถานะในสมการที่ (6-2) และ (6-3) จะเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}[i] = [G]^{-1}[H][i] + [G]^{-1}[v] \quad (6-4)$$

เมื่อ

$$[i] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad i'_{ar} \quad i'_{br} \quad i'_{cr}]^T$$

$$[v] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad v'_{ar} \quad v'_{br} \quad v'_{cr}]^T$$

โดยที่

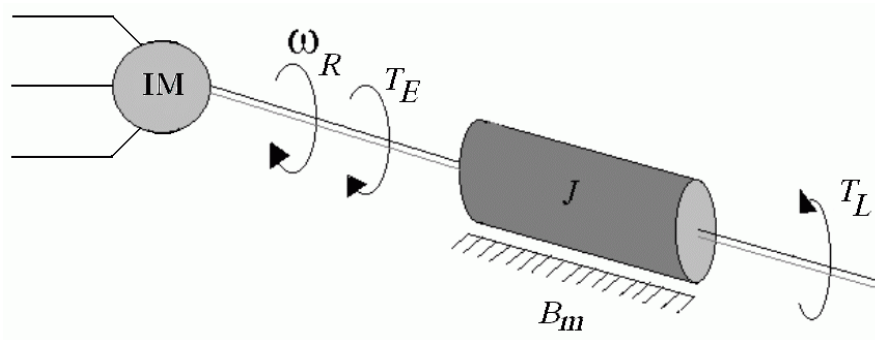
$$[G] = \begin{bmatrix}
 L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\
 -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\
 -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} \\
 L_{ms} \cos \theta_R & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_R & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_R \\
 L_{ms} \cos \theta_R & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_R & L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{ms} \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos \theta_R \\
 L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\
 -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\
 -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_r + L_{ms}
 \end{bmatrix}$$

$$[H] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \\ \omega_R L_{ms} \sin \theta_R & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin \theta_R & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin \theta_R \\ \omega_R L_{ms} \sin \theta_R & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin \theta_R & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \omega_R L_{ms} \sin \theta_R \\ -r_r' & 0 & 0 \\ 0 & -r_r' & 0 \\ 0 & 0 & -r_r' \end{bmatrix}$$

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก ซึ่งปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำจะถูกตัดวงจรไว้ ดังนั้นทอม v'_{ar} , v'_{br} , และ v'_{cr} จะมีค่าเป็นศูนย์

6.3.2 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อมอเตอร์ขับโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แบบจำลองทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยที่ ω_R คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/sec)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)

B_m คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืดของมอเตอร์ (N.m/rad/sec)

T_E คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (N.m)

T_L คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

สมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์อาจเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \frac{P}{2J} T_E - \frac{B_m}{J} \omega_R - \frac{P}{2J} T_L \quad (6-5)$$

เมื่อ

$$T_E = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \cdot \text{Im} \left\{ i'_{abcr} i_{abcs} e^{-j\theta_R} \right\}$$

โดยที่

$$i_{abcs} = i_{as} + a i_{bs} + a^2 i_{cs}$$

$$i'_{abcr} = i'_{ar} + a i'_{br} + a^2 i'_{cr}$$

$$a = e^{-j\theta_R}$$

ซึ่ง P คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ และ Im คือพจน์ของจำนวนจินตภาพ และ

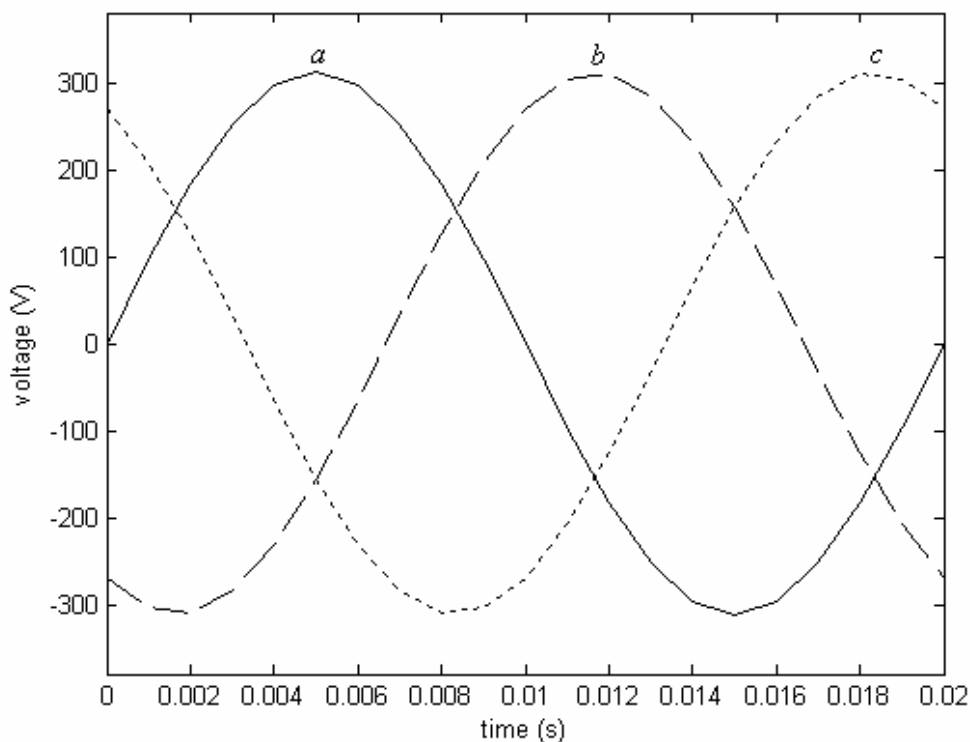
$$\frac{d\theta_R}{dt} = \omega_R \quad (6-6)$$

จากสมการที่ (6-5) และ (6-6) จะเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

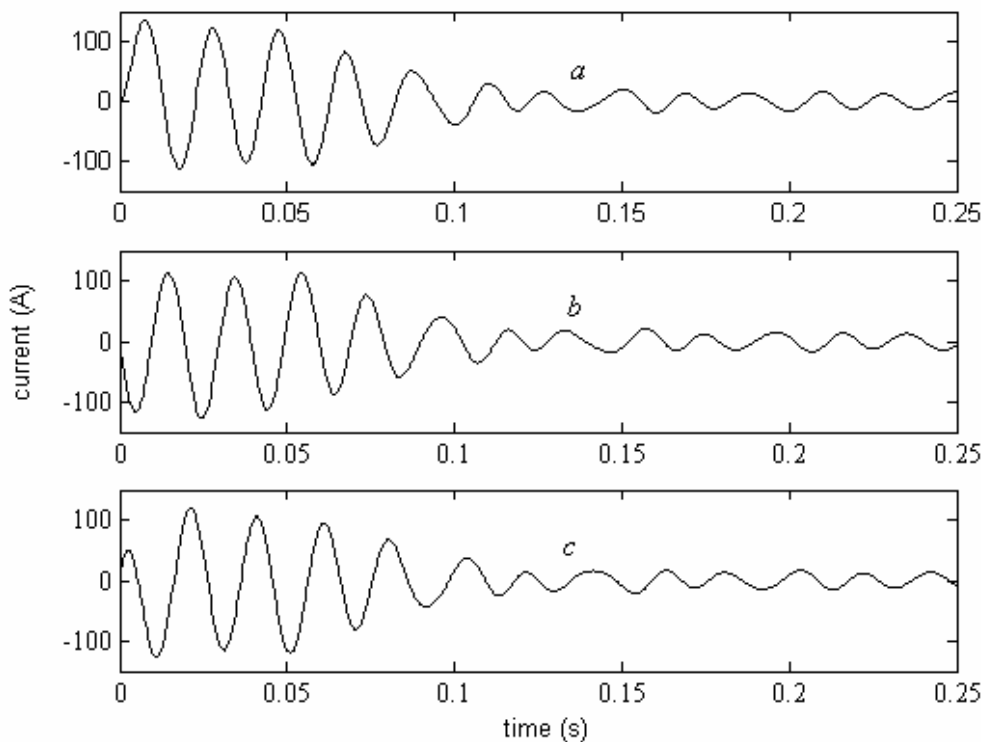
$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_R}{dt} \\ \frac{d\theta_R}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \theta_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J} \\ 0 \end{bmatrix} [T_E - T_L] \quad (6-7)$$

6.3.3 การคำนวณกระแสเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นไซน์

การคำนวณกระแสในแต่ละเฟสเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองของมอเตอร์ทั้งทางไฟฟ้าและทางกล ดังสมการที่ (6-4) และ (6-7) ข้างต้น เมื่อป้อนรูปคลื่นแรงดันสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.9 ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 6.1 จะได้ผลลัพธ์ของกระแสในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.9 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์



รูปที่ 6.10 รูปคลื่นกระแสแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์

6.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการสั้นสะท้อนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++ โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติด้วย MATLAB ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมหาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

6.4.1 โปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติ

โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับสร้างกริดที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ในวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ มีราคาแพง และขาดความยืดหยุ่นที่จะใช้กับงานที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและรูปร่างของวัตถุอยู่ตลอดเวลา อย่างกรณีการสร้างกริดเมื่อโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการหมุนและมีรูปร่างของร่องโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงได้พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใหม่พร้อมประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการสร้างกริดอัตโนมัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งได้พัฒนาโปรแกรมขึ้น

ด้วย MATLAB แล้วคอมไพล์เป็นไฟล์ .exe ซึ่งผลลัพธ์ในรูปแบบเอาต์พุตไฟล์ จะได้รับการนำไปเป็นข้อมูลอินพุตให้แก่โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กคังที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ลักษณะโครงสร้างของโปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติสามารถอธิบายได้ดังนี้

โครงสร้างของโปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติประกอบด้วยโปรแกรมหลักและหลายโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่ต่างๆ กัน ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมประกอบด้วย

โปรแกรมเริ่มต้นทำงานโดยรับค่าอินพุตที่ประกอบด้วยรูปร่างของร่อง โรเตอร์ และมุมที่โรเตอร์หมุนไปในทุกๆ รอบการคำนวณ ซึ่งจะเป็นการอ่านข้อมูลในช่วงแรกของโปรแกรมหลัก

ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิคคของแต่ละจุดต่อในส่วน of พื้นที่โรเตอร์ ทั้งแกนของโรเตอร์และร่องของโรเตอร์ รวมถึงการจัดกลุ่มพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์และจุดต่อให้เป็นหมวดหมู่ เพื่อง่ายต่อการบ่งชี้ถึงแต่ละกลุ่มพื้นที่ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกัน และง่ายต่อการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้จะปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิคคของแต่ละจุดต่อในส่วน of พื้นที่ช่องอากาศ ที่เป็นชั้นแรกติดกับขอบของโรเตอร์จากจำนวนทั้งสิ้น 4 ชั้น รวมถึงการจัดกลุ่มพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์และจุดต่อให้เป็นหมวดหมู่ โดยปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิคคของแต่ละจุดต่อในส่วน of พื้นที่ช่องอากาศชั้นที่ 2, 3 และ 4 รวมถึงการจัดกลุ่มพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์และจุดต่อให้เป็นหมวดหมู่ ซึ่งในขั้นตอนนี้ของช่องอากาศชั้นที่ 2 ต้องคำนึงถึงการเชื่อมโยงกริดให้เหมาะสมและสอดคล้องกับมุมต่างๆ ที่โรเตอร์หมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวนี้จะปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

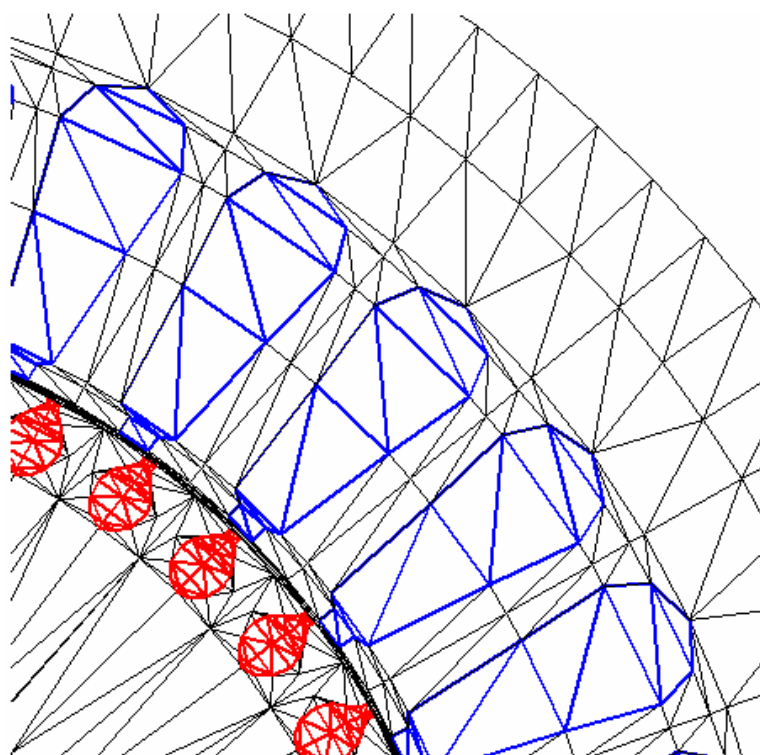
ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของจุดต่อ พร้อมทั้งค่าพิคคของแต่ละจุดต่อในส่วน of พื้นที่สเตเตอร์ ทั้งแกนของสเตเตอร์และร่องของสเตเตอร์ รวมถึงการจัดกลุ่มพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์และจุดต่อให้เป็นหมวดหมู่ ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องคำนึงถึงการเชื่อมโยงกริดระหว่างส่วนของช่องอากาศและส่วนของสเตเตอร์ควบคู่ไปด้วย เพื่อสร้างอิลิเมนต์ของช่องอากาศในชั้นที่ 4 ที่ติดกับส่วนของสเตเตอร์อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของช่องอากาศและส่วนของสเตเตอร์มีจำนวนจุดต่อที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวนี้จะปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

ขั้นตอนวาดภาพแสดงการวางตัวของแต่ละอิลิเมนต์ตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ โดยปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

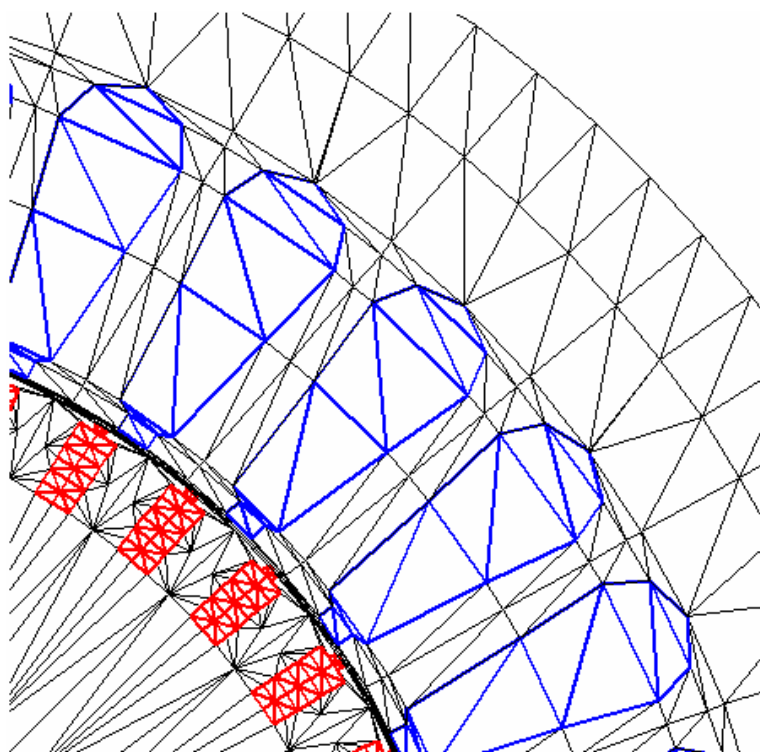
ขั้นตอนการวาดภาพแสดงตำแหน่งของแต่ละจุดต่อตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ โดยปรากฏอยู่ในโปรแกรมย่อย

พิมพ์ผลเฉลยซึ่งให้รายละเอียดข้อมูลของจุดต่อและอิติเมนท์ของแต่ละรอบลงในไฟล์ที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับป้อนให้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ซึ่งจะอยู่ในส่วนของโปรแกรมหลัก

ลักษณะข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์จากโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติ หากนำไปวาดเป็นภาพแสดงตำแหน่งและรูปร่างของร่องโรเตอร์ อาจแสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.11 และ 6.12 เป็นต้น



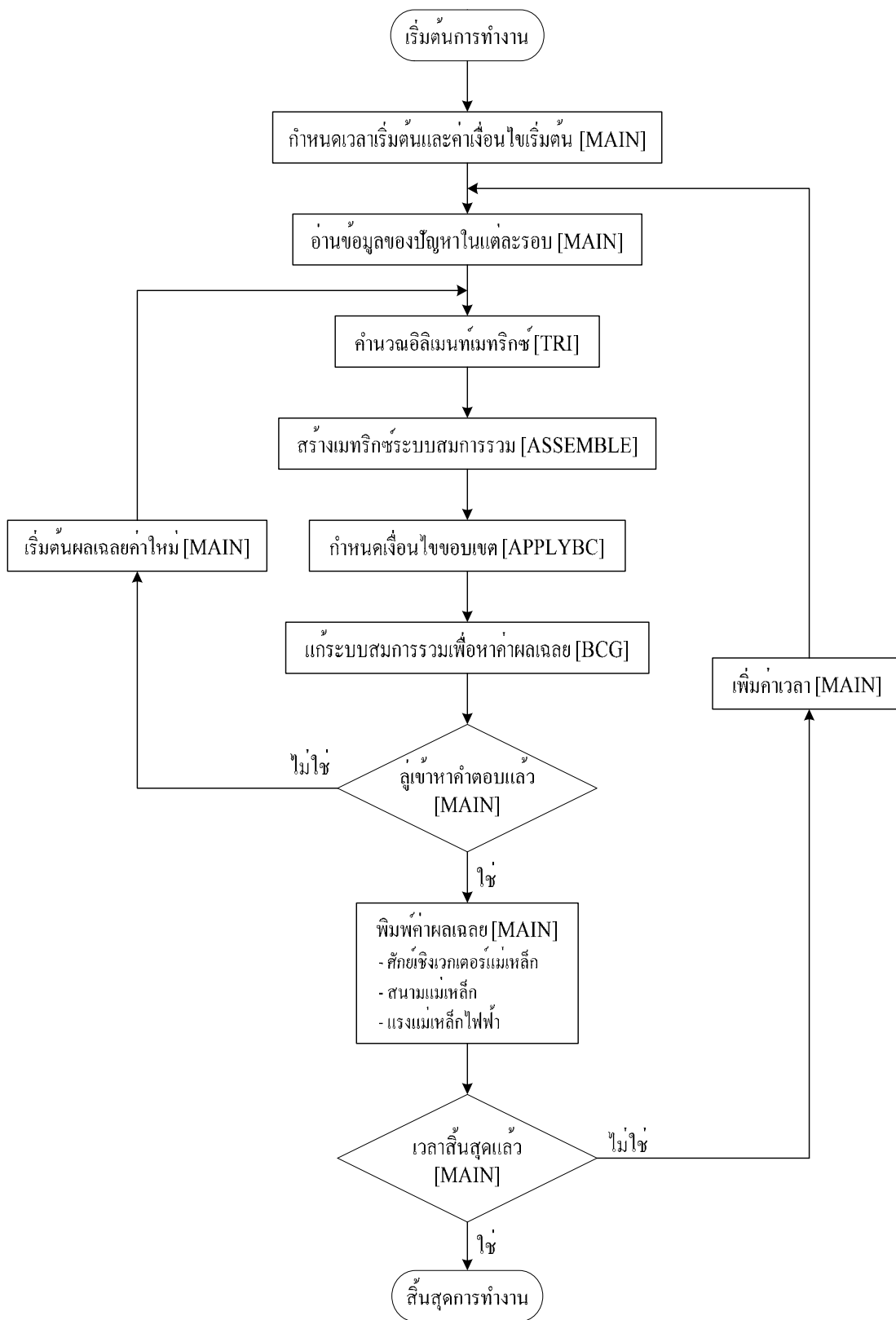
รูปที่ 6.11 การสร้างกริดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบวงกลมและหมุนด้วยมุม 0°



รูปที่ 6.12 การสร้างกริดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมและหมุนด้วยมุม 45°

6.4.2 โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

การคำนวณสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับโรเตอร์หมุน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้สร้างมอเตอร์ พร้อมทั้งคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่อนข้างคำนวณได้ยากเนื่องจากมีความซับซ้อนสูง แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีราคาแพง ประมวลผลช้า และไม่มีความคล่องตัวเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โรเตอร์หมุน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++ เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โครงสร้างของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็ก

จากแผนภูมิในรูปที่ 6.13 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวม เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก MAIN : โปรแกรมหลักจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรก ซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่างๆ ของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไปถึงลักษณะของอิเลเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตามมุมที่หมุนไปด้วย โปรแกรมหลักยังมีหน้าที่ในการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกคือการให้ผลเฉลยของค่าความแตกต่างในแต่ละรอบของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ $\Delta A(t=0) = 0$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้คำตอบจากรอบที่ผ่านมาเป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ทั้งนี้เพื่อให้การหาคำตอบที่ถูกต้องดำเนินการได้รวดเร็ว การที่ต้องพิจารณาถึงค่าความแตกต่างของผลเฉลยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยแปรผันตามเวลา ซึ่งจะปรากฏเทอมของค่าความแตกต่างของผลเฉลยนั้น

จากนั้นโปรแกรมหลักจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิเลเมนต์และจุดต่อ จากเอาต์พุตไฟล์ของโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติที่คอมไพล์เป็นไฟล์ .exe ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิเลเมนต์ เป็นต้น โดยเมื่อโปรแกรมเริ่มคำนวณ โปรแกรมหลักจะมีหน้าที่แจ้งสถานะการคำนวณให้ผู้ใช้ทราบผ่านทางหน้าจอในทุกๆ รอบของการคำนวณ และหลังจากผลเฉลยของแต่ละรอบผู้ใช้หาคำตอบโดยการประยุกต์วิธีนิวตัน-ราฟสันที่ปรากฏอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 4.3.5 ของบทที่ 4 จะพิมพ์ค่าผลเฉลยที่ต้องการออกมา ซึ่งประกอบด้วยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และค่าผลเฉลยอื่นๆ ที่ต้องการลงในไฟล์ พร้อมทั้งส่งไฟล์นี้ให้แก่โปรแกรม MATLAB ไปดำเนินการทางด้านกราฟฟิคต่อ

โปรแกรมน้อย TRI : โปรแกรมย่อยนี้จะใช้คำนวณอิเลเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุกๆ อิเลเมนต์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-53) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6-8) โดยที่ $\Delta A^{t+\Delta t} = A_{m+1}^{t+\Delta t} - A_m^{t+\Delta t}$ ซึ่ง m คือจำนวนรอบการทำซ้ำของวิธีนิวตัน-ราฟสัน และจะสังเกตได้ว่า ในการคำนวณอิเลเมนต์เมทริกซ์ของแต่ละอิเลเมนต์ จะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์ในแต่ละอิเลเมนต์นั้นๆ ด้วย

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial G}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial H}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial H}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \\ \frac{\partial I}{\partial A_i^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_j^{t+\Delta t}} & \frac{\partial I}{\partial A_k^{t+\Delta t}} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta A_i^{t+\Delta t} \\ \Delta A_j^{t+\Delta t} \\ \Delta A_k^{t+\Delta t} \end{bmatrix}_{3 \times 1} = - \begin{bmatrix} G \\ H \\ I \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (6-8)$$

หรือเขียนสมการที่ (6-8) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (6-9) โดยที่ $[J]$ คือยาโคเบียนเมทริกซ์

$$[J]_{3 \times 3} [\Delta A]_{3 \times 1} = [f]_{3 \times 1} \quad (6-9)$$

สมการที่ (6-9) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-30) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-10) อิลิเมนต์เมทริกซ์ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก $[K]_{3 \times 3}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-34) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-11) และโหลดเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง $\{F\}_{3 \times 1}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-38) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-12) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละอิลิเมนต์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[M]_{3 \times 3} = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

$$[K]_{3 \times 3} = \frac{v}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

$$\{F\}_{3 \times 1} = \frac{\mathbf{J}_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6-12)$$

โปรแกรมย่อย ASSEMBLE: โปรแกรมย่อยนี้ทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ ที่คำนวณจากโปรแกรมย่อย TRI เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่

(4-55) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-13) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิเลเมนต์ที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิเลเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$[J]_{n \times n} [\Delta A]_{n \times 1} = [f]_{n \times 1} \quad (6-13)$$

การแก้เมทริกซ์สมการรวมของระบบ ได้นำแบนด์วิดท์ของเมทริกซ์มาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาการคำนวณของโปรแกรมลง ดังการอธิบายในภาคผนวก ก.

โปรแกรมย่อย APPLYBC: โปรแกรมย่อยนี้ทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ คัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (6-13) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ขอบในที่ติดกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ($A = 0$)

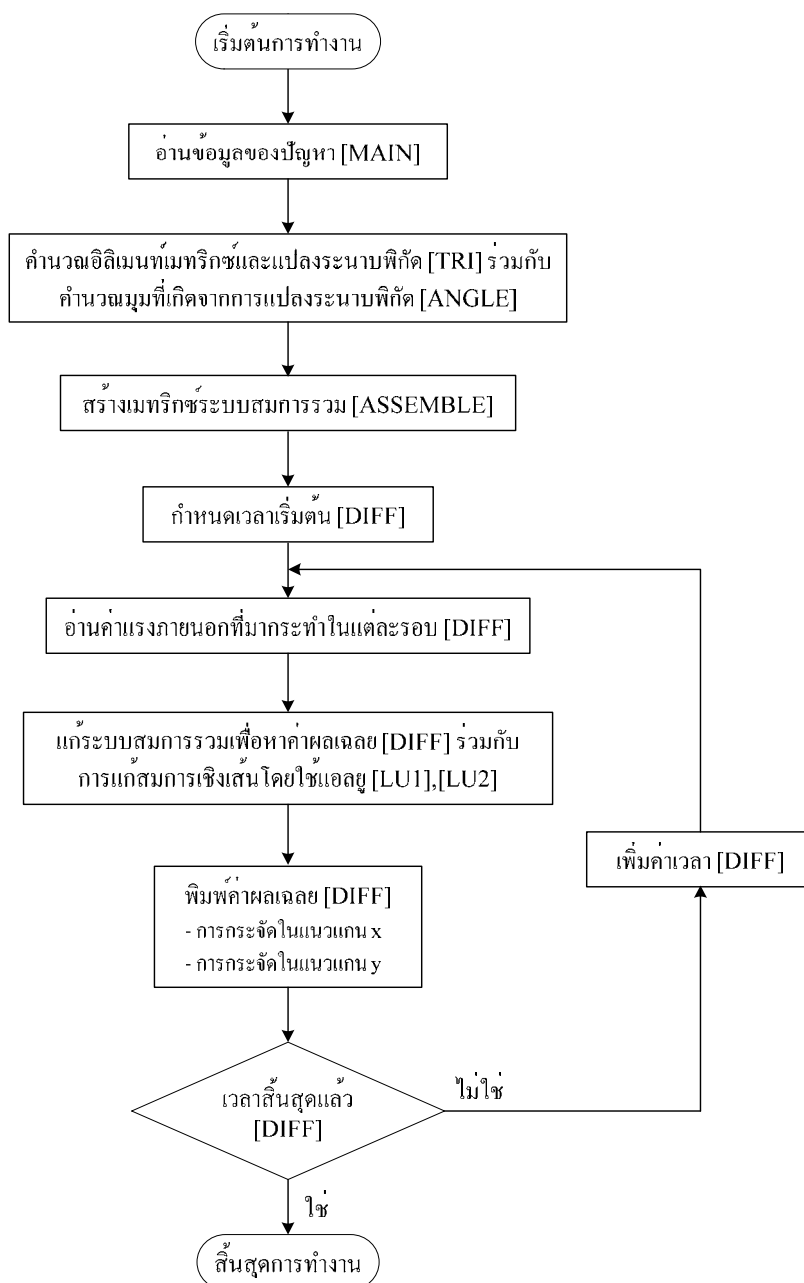
โปรแกรมย่อย BCG: โปรแกรมย่อยนี้จะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวมโดยการเลือกใช้วิธีไบ-คอนจูเกตเกรเดียนต์ (bi-conjugate gradient: BCG) ซึ่งวิธีนี้จะอาศัยกระบวนการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ การใช้วิธีนี้จะเหมาะสมกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยควรมีขนาดของเมทริกซ์มากกว่า 1000×1000 ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการแก้สมการเชิงเส้นของระบบลงไปได้มาก และวิธีนี้ยังใช้ได้กับงานที่เมทริกซ์ของระบบไม่สมมาตร อย่างเช่นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากปัญหาที่นำมาพิจารณามีความไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่ รายละเอียดของวิธี BCG นี้ สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ข.

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องสูง จึงเลือกใช้เกณฑ์การลู่เข้าที่ยอมรับได้ของวิธีนิวตัน-ราฟสัน ให้มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1×10^{-9} และเกณฑ์การลู่เข้าที่ยอมรับได้ของวิธี BCG ให้มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1×10^{-15}

6.4.3 โปรแกรมคำนวณการสันสะท้อน

การคำนวณขนาดของการสันสะท้อนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับโรเตอร์หมุน ที่แสดงอยู่ในรูปของการกระจัดที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปร่างดั้งเดิมของมอเตอร์ก่อนที่จะยังไม่มีแรงภายนอกมากระทำค่อนข้างดำเนินการได้ยาก เนื่องจากผลลัพธ์ของการกระจัดอย่างละเอียดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณการสันสะท้อนของ

มอเตอร์ในทุกๆ ตำแหน่งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++ เพื่อคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือน

จากแผนภูมิดังรูปที่ 6.1 อาจเข้าใจได้ถึงลำดับการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยต่างๆ มีหน้าที่ต่างกันไป ดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก MAIN : โปรแกรมหลักทำหน้าที่รับค่าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์ และค่าพารามิเตอร์ทางวัสดุที่ใช้ทำแกนสเตเตอร์และเฟรมของมอเตอร์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.1 ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นข้อมูลอินพุตที่เรียกใช้ตอนเริ่มต้นของโปรแกรมเพียงครั้งเดียว เนื่องจากเมื่อพิจารณาการสันสะเทือนจะพิจารณาในส่วนของแกนสเตเตอร์และเฟรมเท่านั้น ซึ่งจะไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงพิกัดใดๆ เลยเมื่อโรเตอร์หมุนไป

โปรแกรมย่อย TRI: โปรแกรมย่อยนี้ใช้คำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อของทุกๆ อิลิเมนต์ โดยมีสมการไฟไนท์อิลิเมนต์ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่แสดงได้ด้วยสมการที่ (5-1) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (6-14)

$$[M]_{6 \times 6} \{\ddot{d}\}_{6 \times 1} + [C]_{6 \times 6} \{\dot{d}\}_{6 \times 1} + [K]_{6 \times 6} \{d\}_{6 \times 1} = \{F\}_{6 \times 1} \quad (6-14)$$

สมการที่ (6-14) นี้ จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์มวล $[M]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5-18) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-15) อิลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งของสปริง $[K]_{6 \times 6}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5-11) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-16) โดยจะไม่พิจารณาถึงอิลิเมนต์เมทริกซ์ความหน่วง $[C]_{6 \times 6}$

$$[M] = [R]^T [\tilde{M}] [R] \quad (6-15)$$

$$[K] = [R]^T [\tilde{K}] [R] \quad (6-16)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[R]$ คือค่าที่ใช้สำหรับถ่ายโอนจากระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นสู่ระนาบพิกัดวงกว้างดังแสดงด้วยสมการที่ (5-12) ของบทที่ 5 ส่วน $[\tilde{M}]$ และ $[\tilde{K}]$ คือเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งของสปริงในระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นดังแสดงด้วยสมการที่ (5-17) และ (5-8) ของบทที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งโปรแกรมย่อยนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงระนาบพิกัดวงกว้างไปเป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่นโดยทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย ANGLE และแปลงกลับไปเป็นระนาบพิกัดวงกว้างตามเดิม เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

โปรแกรมย่อย ANGLE: โปรแกรมย่อยนี้ทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย TRI ในการคำนวณค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการแปลงระนาบพิกัดวงกว้างไปเป็นระนาบพิกัดเฉพาะถิ่น

โปรแกรมย่อย ASSEMBLE: โปรแกรมย่อยนี้ทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ ที่คำนวณจากโปรแกรมย่อย TRI เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (5-19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-17) โดยหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น $2n$ สมการ ทั้งนี้เนื่องจากพิจารณาการกระจัดทั้งแนวแกน x และ y

$$[M]_{2n \times 2n} \{\ddot{d}\}_{2n \times 1} + [C]_{2n \times 2n} \{\dot{d}\}_{2n \times 1} + [K]_{2n \times 2n} \{d\}_{2n \times 1} = \{F\}_{2n \times 1} \quad (6-17)$$

โปรแกรมย่อย DIFF: โปรแกรมย่อยนี้จะทำหน้าที่แก้สมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการสามัญอันดับสองเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวมดังสมการที่ (6-17) โดยเลือกใช้วิธีผลต่างกลาง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ในบทที่ 5 และเมื่อเข้าสู่กระบวนการแก้ระบบสมการเชิงเส้น ได้เลือกใช้วิธีการแยกแบบแอลยูมาพิจารณา โดยจะทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย LU1 และ LU2 โปรแกรมย่อย DIFF เริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้นที่ $t = 0$ และเวลาสิ้นสุด T_f ของการคำนวณ โดยรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งเป็นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กในหัวข้อที่ผ่านมา โดยโปรแกรมจะแจ้งสถานะการคำนวณผ่านทางหน้าจอทุกๆ รอบของการคำนวณ และหลังจากถึงเวลาสิ้นสุดแล้ว จะพิมพ์ค่าผลเฉลยที่ต้องการออกมา ซึ่งประกอบด้วยค่าการกระจัดในแนวแกน x และ y ที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งดั้งเดิมของทุกๆ จุดต่อ พร้อมทั้งส่งค่าเหล่านี้ในรูปแบบเอาต์พุตไฟล์ให้แก่โปรแกรม MATLAB ไปดำเนินการทางด้านกราฟฟิคต่อ

โปรแกรมย่อย LUI: โปรแกรมย่อยนี้ทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย DIFF เพื่อการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการแยกแบบแอลยู เฉพาะที่เวลาเริ่มต้นที่ $t = 0$ เท่านั้น ซึ่งระบบสมการเชิงเส้นนี้แสดงได้ด้วยสมการที่ (5-26) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-18)

$$[M]\{\ddot{d}\}^0 = \{F\}^0 - [C]\{\dot{d}\}^0 - [K]\{d\}^0 \quad (6-18)$$

โปรแกรมย่อย LU2: โปรแกรมย่อยนี้ทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย DIFF เพื่อการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการแยกแบบแอลยู เมื่อ $t > 0$ จนถึงเวลาสิ้นสุด T_f ซึ่งระบบสมการเชิงเส้นนี้แสดงได้ด้วยสมการที่ (5-23) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (6-19)

$$[M_{eff}] \{d\}^{t+\Delta t} = \{F_{eff}\} \quad (6-19)$$

โดยที่

$$[M_{eff}] = \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right] \quad (6-20)$$

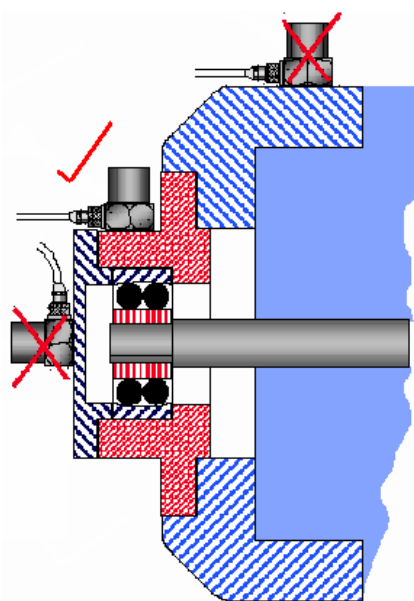
$$\{F_{eff}\} = \{F\}^t - \left[[K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right] \{d\}^t - \left[\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right] \{d\}^{t-\Delta t} \quad (6-21)$$

6.5 การเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบ

การเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนทางภาคทฤษฎีที่ได้จากการจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กพิคต 3 แรงม้า และผลทางภาคปฏิบัติที่ได้จากการติดตั้งมาตรความเร่ง (accelerometer) เพื่อบันทึกค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในพิคตที่ใกล้เคียงกับภาคทฤษฎีที่ปรากฏในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ดำเนินการเปรียบเทียบโดยการพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นทั้งรูปคลื่นไซน์สมมูลและรูปคลื่นไซน์ไม่สมมูล

6.5.1 ลักษณะการจำลองผลและการวัดทดสอบ

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่ใช้ในการจำลองผลนี้ ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 6.2 ในข้างต้น ซึ่งการดำเนินงานได้อาศัยโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กร่วมกับโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือน โดยผลการจำลองที่จะนำไปเปรียบเทียบกับภาคปฏิบัติ จะเน้นผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปของการกระจัดซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั่นสะเทือนเป็นหลัก ซึ่งจะพิจารณาผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปของการกระจัดเฉพาะตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ อันเป็นตำแหน่งที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง ดังแสดงตำแหน่งของการติดตั้งมาตรความเร่งบนมอเตอร์ที่ถูกต้อง ตรงตำแหน่งเหนือเพลลาของมอเตอร์ไว้ดังรูปที่ 6.15 (Bruel and Kjaer, 2004)

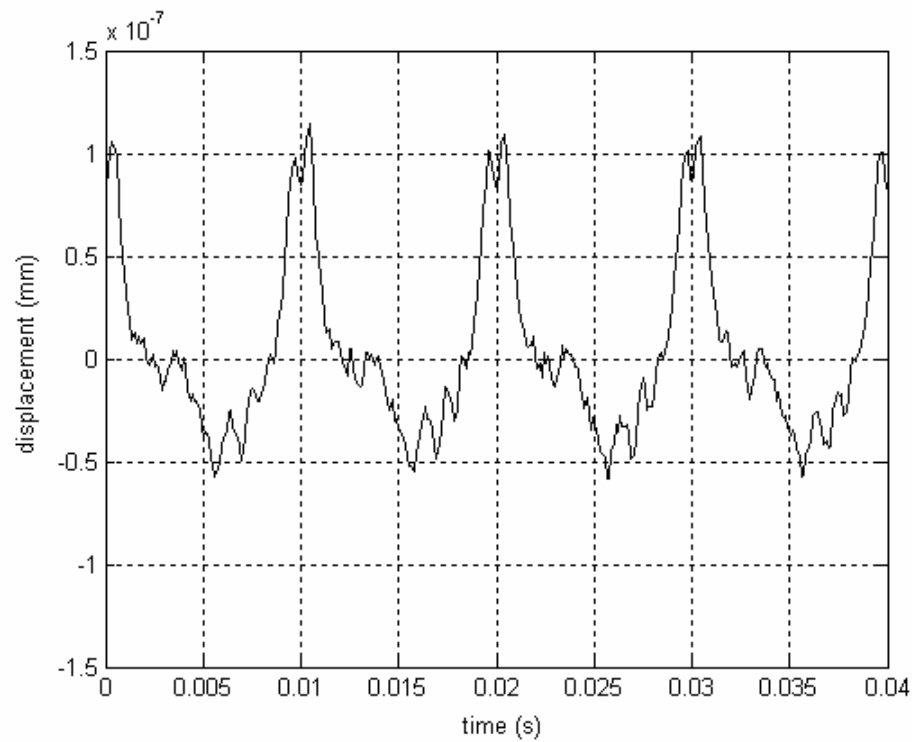


รูปที่ 6.15 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรฐานความเร่งบนมอเตอร์ที่ถูกต้อง

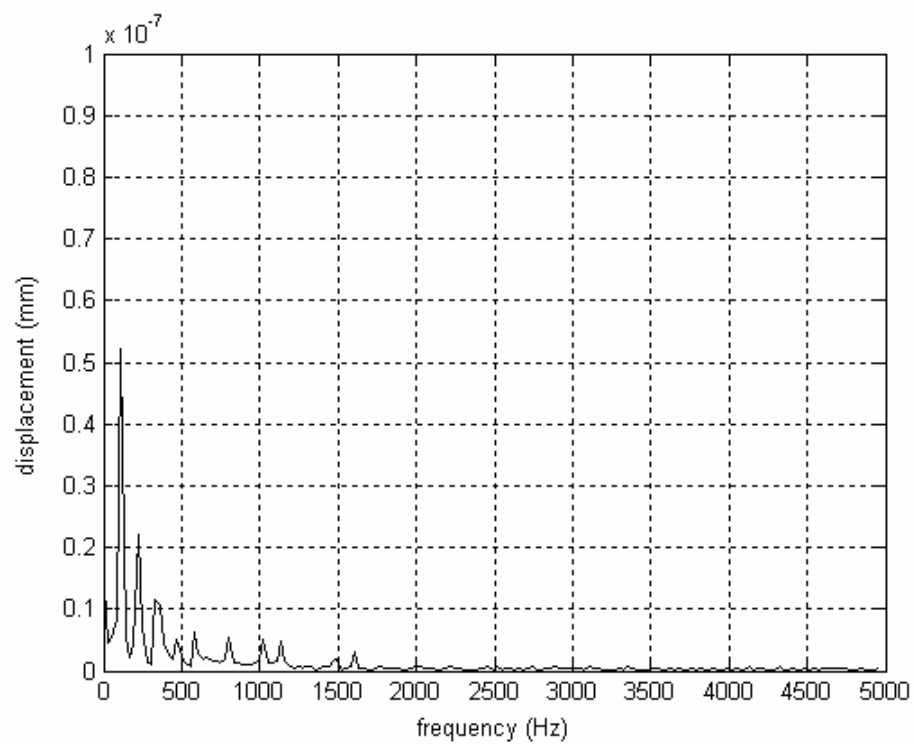
ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในภาคปฏิบัติมีขนาด 1 kW โดยติดตั้งมาตรฐานความเร่งของ SENSOTEC รุ่น SM5 (ตอบสนองความถี่ในย่าน 0- 600 Hz) เพื่อใช้วัดขนาดของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในรูปของความเร่ง (m/s^2) อยู่ตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ โดยแสดงเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในภาคปฏิบัติ และตำแหน่งการติดตั้งมาตรฐานความเร่งบนมอเตอร์ ไว้ในภาคผนวก ค. มาตรฐานความเร่งที่ใช้วัดในภาคปฏิบัตินี้จะทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ที่เปลี่ยนความเร่งเป็นแรงดันไฟตรง ($1 m/s^2 = 0.245 Vdc$) โดยจะต้องดำเนินการหาค่าแรงดันออฟเซต (offset voltage) เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่แท้จริงจากมาตรฐานความเร่ง การดำเนินการหาค่าแรงดันออฟเซตได้ใช้การกรองความถี่แบบผ่านต่ำ (low pass filter) โดยเป็นการกรองแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (finite impulse response: FIR) ที่มีอันดับ (order) ของการกรองมีค่าจำกัด ร่วมกับฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง (Hamming window) เพื่อช่วยลดปรากฏการณ์กิบส์ (Gibbs phenomenon) รายละเอียดและคุณลักษณะต่างๆ ของการกรองความถี่แบบดิจิทัลแสดงไว้ในภาคผนวก ง. ในการเปรียบเทียบผลการสั่นสะเทือนกับภาคทฤษฎีนั้นจะเปรียบเทียบในรูปของการกระจัดเป็นระยะทาง (m) ผลการวัดจะถูกบันทึกด้วยตัวลงบันทึกข้อมูล (data logger) ทุกๆ 1 ms เข้าสู่คอมพิวเตอร์เป็นจำนวนเพียงพอที่จะนำไปเปรียบเทียบแล้ว จึงดำเนินการอินทิเกรตค่าความเร่ง (m/s^2) ให้มาอยู่ในรูปของความเร็ว (m/s) แล้วดำเนินการอินทิเกรตอีกครั้งเพื่อให้อยู่ในรูปของระยะทาง (m) โดยวิธีการอินทิเกรตเหล่านี้ได้เลือกใช้หลักเกณฑ์เชิงสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้กันทั่วไปอย่างกว้างขวาง

6.5.2 ผลการเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์สมมูล

พิจารณาการจำลองผลในภาคทฤษฎีเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์สามเฟสแบบสมมูลที่มีแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 380 V โดยในหัวข้อนี้จะเน้นการแสดงผลการจำลองที่ปรากฏอยู่ในรูปของขนาดของการสั่นสะเทือนเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นผลลัพธ์หลักที่จะนำไปเปรียบเทียบกับภาคปฏิบัติ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่จะนำไปเปรียบเทียบ จะแสดงอยู่ในรูปของการกระจัด โดยพิจารณาผลการจำลองเฉพาะการกระจัดตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สอดคล้องกับการติดตั้งเครื่องมือวัดในภาคปฏิบัติ รูปที่ 6.16 เป็นการแสดงผลการจำลองของการกระจัดเทียบกับเวลาตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ ส่วนรูปที่ 6.17 เป็นการแสดงสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 6.16 เพื่อบ่งบอกถึงปริมาณของการกระจัดที่ความถี่ต่างๆ โดยจากรูปที่ 6.16 จะสังเกตเห็นว่า การสั่นสะเทือนตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์มีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบ (ระยะทางที่ 0 mm คือตำแหน่งที่กำลังพิจารณาการสั่น) โดยมีแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดประมาณ 1×10^{-7} mm และเมื่อพิจารณารูปที่ 6.17 ซึ่งเป็นการแสดงสเปกตรัมของการกระจัดที่ตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าที่ความถี่ประมาณ 100 Hz การกระจัดจะมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 0.5×10^{-7} mm ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดการสั่นสะเทือนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำมีความถี่เป็น 100 Hz (ความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) ส่วนการกระจัดที่ความถี่อื่นๆ ก็มีค่าลดหลั่นกันไป โดยการกระจัดจะมีค่าค่อยๆ น้อยลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความถี่ประมาณ 1,600 Hz เป็นต้นไป

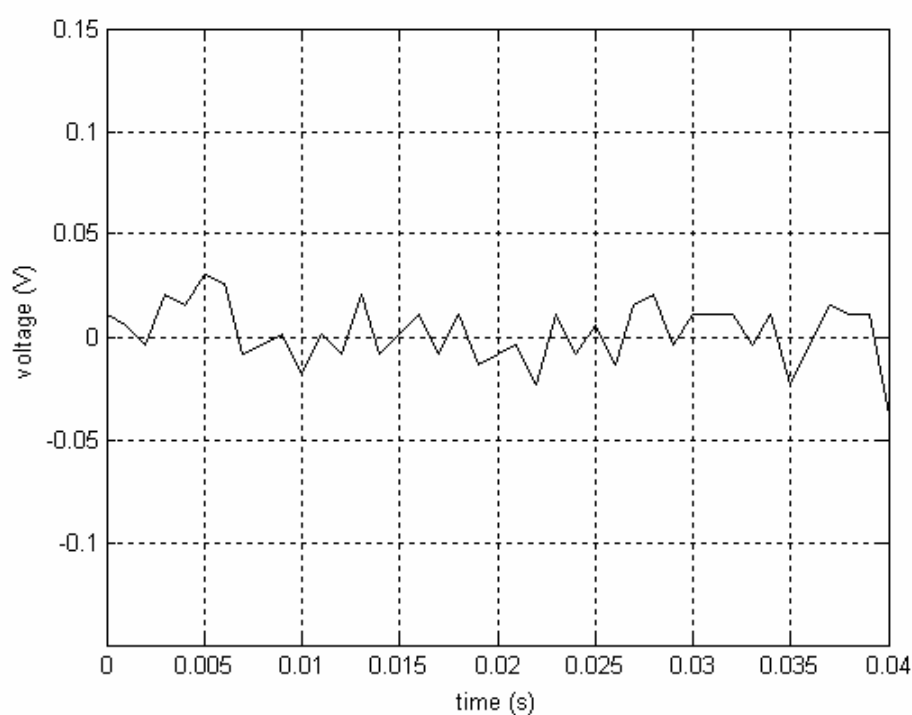


รูปที่ 6.16 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล

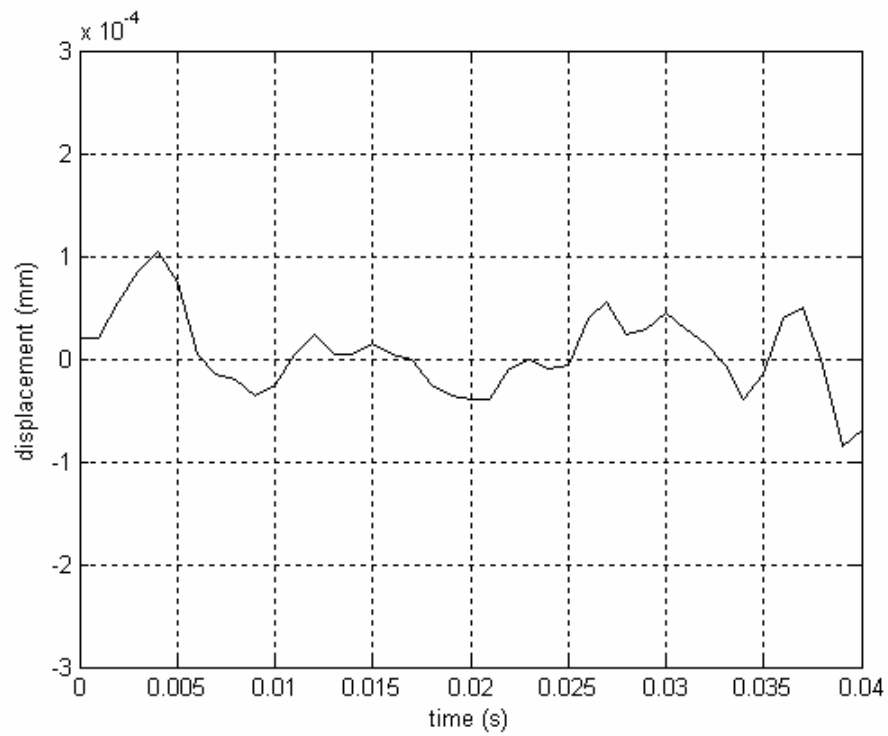


รูปที่ 6.17 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล

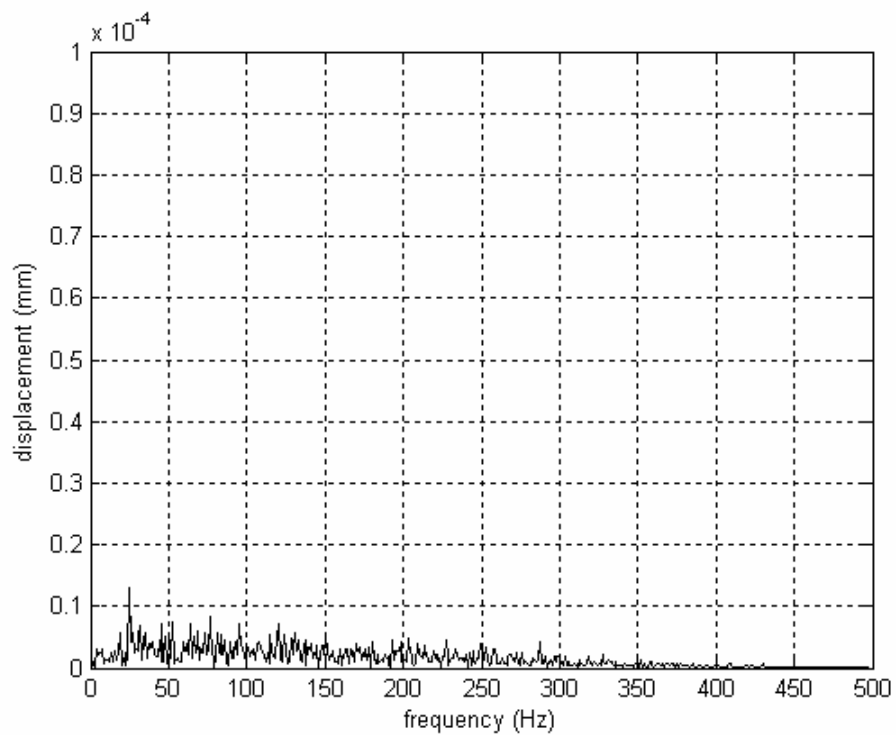
พิจารณาการวัดจริงในภาคปฏิบัติเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์สามเฟสแบบสมดุลที่มีแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 380 V เช่นเดียวกับภาคทฤษฎี โดยได้ติดตั้งมาตรฐานความเร่งตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งรูปที่ 6.18 เป็นการแสดงค่าแรงดันไฟตรงที่บันทึกได้จริงจากมาตรฐานความเร่งเมื่อหักลบค่าแรงดันออฟเซตที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ง. แล้ว จากนั้นทำการแปลงค่าแรงดันในรูปที่ 6.18 ให้อยู่ในรูปของความเร่ง แล้วดำเนินการอินทิเกรตสองครั้งให้อยู่ในรูปของการกระจัดหรือระยะทางดังแสดงได้ในรูปที่ 6.19 ส่วนรูปที่ 6.20 เป็นการแสดงสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.18 แรงดันที่ได้จากมาตรฐานความเร่งเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล



รูปที่ 6.19 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล

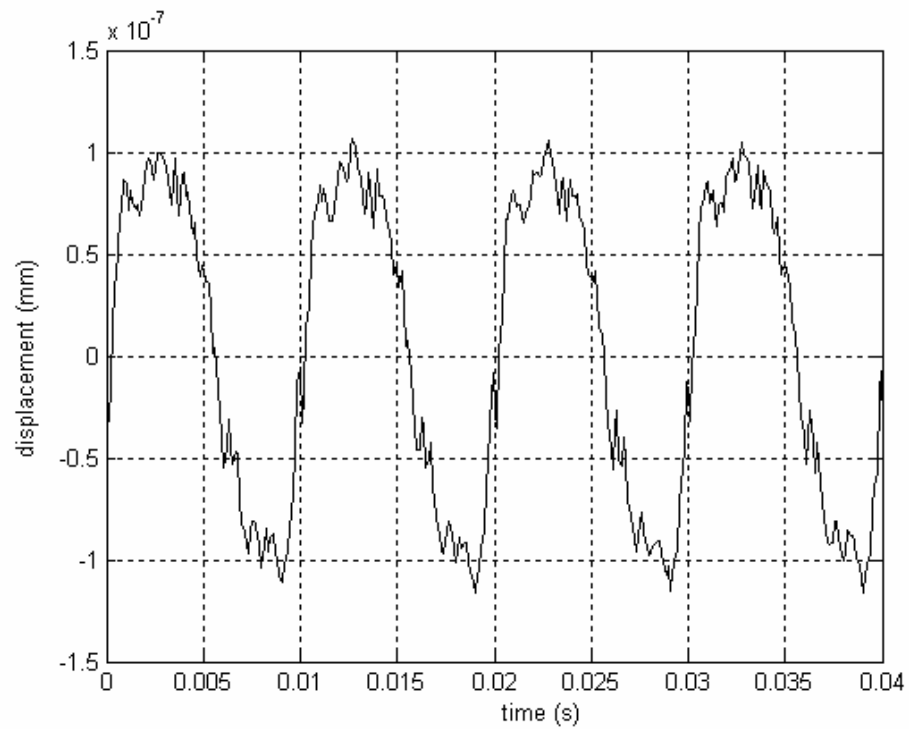


รูปที่ 6.20 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล

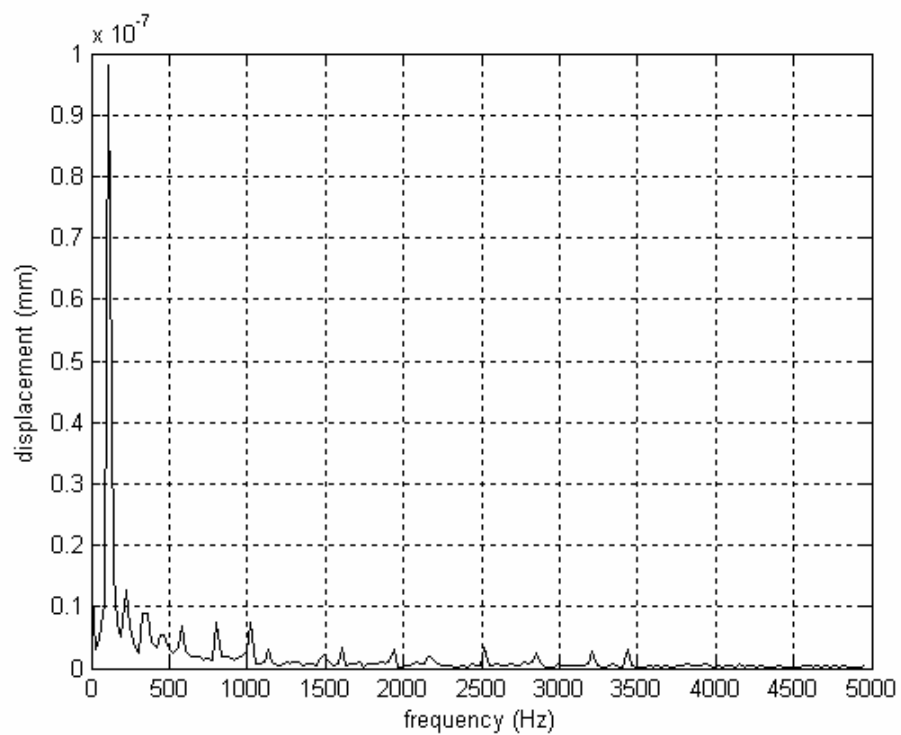
จากรูปที่ 6.19 จะสังเกตเห็นว่า การสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล มีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่ไม่เป็นรายคาบ โดยมีแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดประมาณ 1×10^{-4} mm ซึ่งเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่ได้จากผลภาคทฤษฎี ผลภาคทฤษฎีจะมีค่าการกระจัดน้อยกว่าผลภาคปฏิบัติในกรณีศึกษาครั้งนี้ประมาณ 1,000 เท่า โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุจากการจำลองผลยังไม่ได้พิจารณาค่าระยะหลวม (clearance) ของวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์ ค่าการหน่วง (damping) ของมอเตอร์ การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion) การเอียงศูนย์กลาง (eccentricity) ของโรเตอร์ และอื่นๆ ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้อาจมีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่หลายเท่า หรืออาจเกิดขึ้นได้จากการพิจารณาค่าทางกล (mass-spring-damper) โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ซึ่งไม่มีความถูกต้องเพียงพอ และยังมีสาเหตุจากความเที่ยงตรง (precision) ในการคำนวณ สาเหตุต่างๆ เหล่านี้จึงส่งผลให้ภาคทฤษฎีมีขนาดของการสั่นสะเทือนน้อยกว่าภาคปฏิบัติ ในกรณีศึกษาครั้งนี้อยู่ 1,000 เท่า ซึ่งงานวิจัยต่อไปในอนาคตควรจะต้องทำการทดลองกับมอเตอร์หลากหลายขนาดมากยิ่งขึ้น ประกอบกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองต้องเพียงพอให้มีนัยสำคัญทางสถิติ เพื่อตรวจสอบและยืนยันผลในความแตกต่างระหว่างทฤษฎีกับปฏิบัติ เมื่อพิจารณารูปที่ 6.20 ซึ่งเป็นการแสดงสเปกตรัมของการกระจัดในรูปที่ 6.19 จะสังเกตเห็นว่า ความถี่ในช่วงต้นๆ จะมีค่าของการกระจัดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แม้แต่ที่ความถี่ 100 Hz ค่าการกระจัดจากภาคปฏิบัตินี้ ก็ไม่มีค่าสูงเด่นกว่าความถี่อื่นๆ เหมือนอย่างภาคทฤษฎี ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล ประกอบกับมอเตอร์ที่พิจารณามีขนาดเล็ก ค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นอาจมีค่าน้อยกว่าผลของอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัด ดังนั้นจึงไม่อาจแยกชัดถึงค่าของการกระจัดที่แท้จริงได้ และจากรูปที่ 6.20 ค่าของการกระจัดจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับภาคทฤษฎีในช่วงต้น แต่จะมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ที่ความถี่ประมาณ 350 Hz เป็นต้นไป

6.5.3 ผลการเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล

พิจารณาการจำลองผลในภาคทฤษฎีเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์สามเฟสแบบไม่สมดุล โดยมีแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเฟสหนึ่งมีค่าลดลงเหลือ 300 V (ลดลงประมาณ 20%) รูปที่ 6.21 และ 6.22 เป็นการแสดงผลการจำลองของการกระจัดเทียบกับเวลาเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล ควบคู่กับการแสดงสเปกตรัม ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 6.21 จะสังเกตเห็นว่า มอเตอร์มีการสั่นสะเทือนขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบและมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 6.22 จะสังเกตเห็นว่า ที่ความถี่ประมาณ 100 Hz การกระจัดจะมีค่าสูงที่สุดอย่างชัดเจน โดยมีค่าประมาณ 1×10^{-7} mm ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟสมดุลแล้ว ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟไม่สมดุลจะมีค่าการสั่นสะเทือนในปริมาณที่สูงกว่า

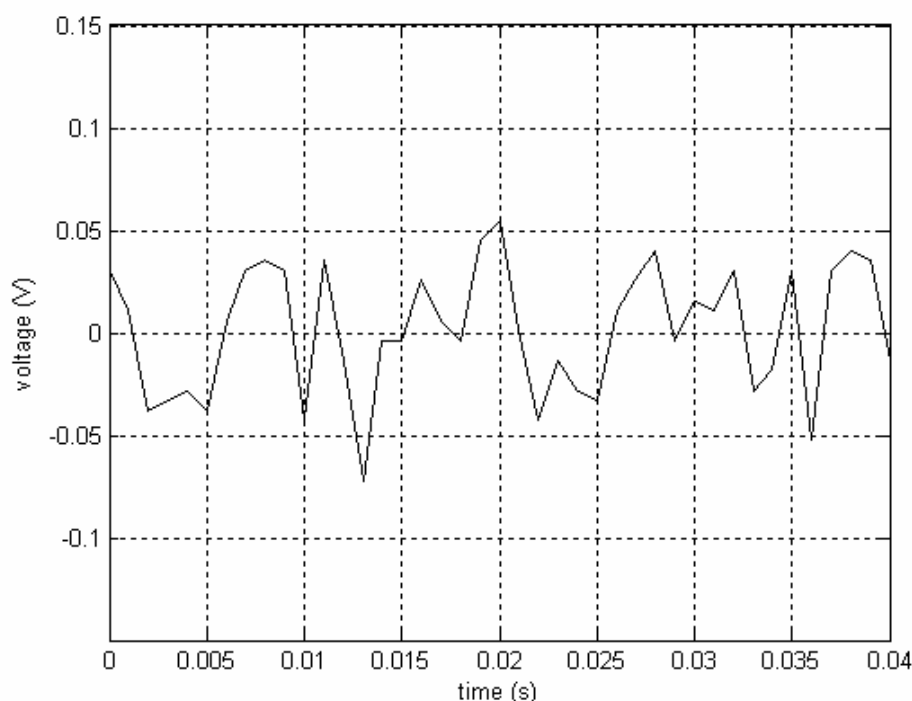


รูปที่ 6.21 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล

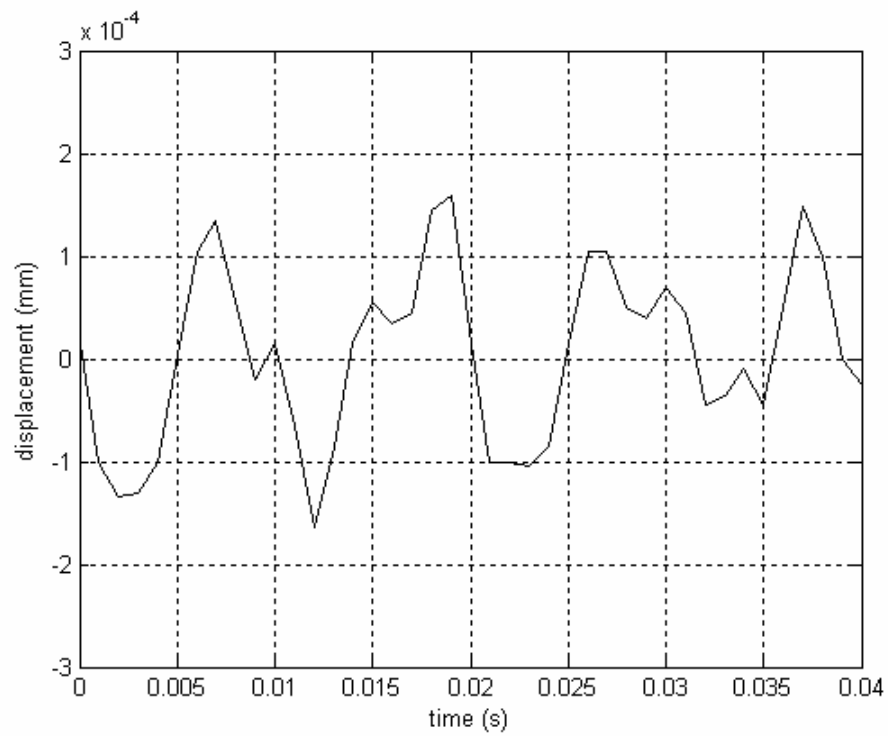


รูปที่ 6.22 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล

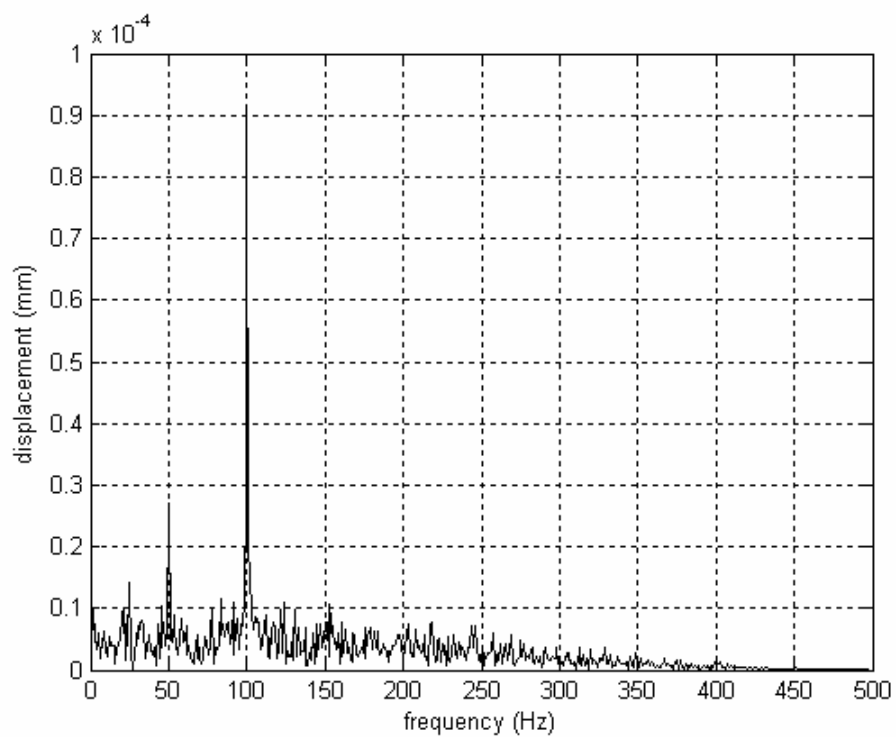
พิจารณาการวัดจริงในภาคปฏิบัติเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ รูปคลื่นไซน์สามเฟสแบบไม่สมดุลในลักษณะเช่นเดียวกับภาคทฤษฎี ซึ่งรูปที่ 6.23 เป็นค่าแรงดันไฟตรงที่บันทึกได้จากมาตรความเร่งเมื่อพิจารณาแรงดันออฟเซตแล้ว ส่วนรูปที่ 6.24 และ 6.25 เป็นการแสดงผลการวัดจริงของการกระจัดเทียบกับเวลาเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล ควบคู่กับการแสดงสเปกตรัม ตามลำดับ จากรูปที่ 6.24 จะสังเกตเห็นว่า การสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล มีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่ไม่เป็นรายคาบ โดยมีแอมพลิจูดของการกระจัดสูงสุดประมาณ 1.5×10^{-4} mm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายสมดุลในลักษณะที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่ได้จากภาคทฤษฎีเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายที่ไม่สมดุลเช่นกัน ภาคทฤษฎียังคงมีการกระจัดน้อยกว่าภาคปฏิบัติในกรณีศึกษาครั้งนี้ประมาณ 1,000 เท่า อยู่เช่นเดิม ส่วนเมื่อพิจารณารูปที่ 6.25 ซึ่งเป็นการแสดงสเปกตรัมของการกระจัดในรูปที่ 6.24 จะสังเกตเห็นว่า ที่ความถี่ 100 Hz ค่าการกระจัดจากภาคปฏิบัติเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุลจะมีค่าสูงเด่นกว่าค่าความถี่อื่นๆ ในลักษณะที่สอดคล้องกับภาคทฤษฎี ซึ่งผลที่ปรากฏจะแตกต่างกับกรณีที่พิจารณาแหล่งจ่ายสมดุล ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการสั่นในสภาวะไม่สมดุลเช่นนี้ ค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นอาจมีค่ามากกว่าผลของอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัด



รูปที่ 6.23 แรงดันที่ได้จากมาตรความเร่งเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล



รูปที่ 6.24 การกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล



รูปที่ 6.25 สเปกตรัมการกระจัดของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไม่สมดุล

6.6 สรุป

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและการสั้นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณา ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นในสถานะชั่วคราวก่อนข้างดำเนินการได้ยากและมีความซับซ้อน การทำความเข้าใจอย่างละเอียดและลึกซึ้งต่อค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั้นสะเทือนที่แปรเปลี่ยนไปในขณะที่โรเตอร์หมุน จึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ดังที่บทที่ 6 ได้นำเสนอไว้ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะเทือนในบทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++ โดยมีโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและโปรแกรมจำลองผลการสั้นสะเทือนดังที่อธิบายด้วยแผนภูมิในรูปที่ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ โปรแกรมดังกล่าวจะรับค่าอินพุตซึ่งแสดงตำแหน่งของอิเลเมนต์และจุดต่อจากโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB และโปรแกรมจำลองผลดังกล่าวจะส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ให้โปรแกรม MATLAB อีกครั้ง เพื่อการแสดงผลในรูปกราฟฟิก และการเปรียบเทียบผลของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลและการวัดจริง สามารถยอมรับได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

บทที่ 7

การลดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ด้วยวิธีออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์

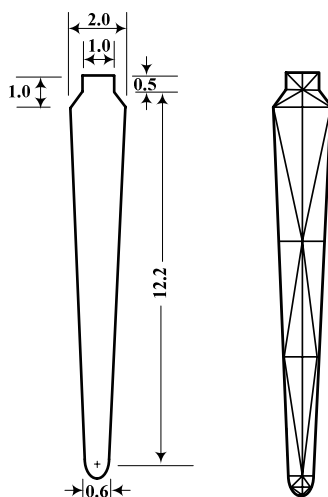
7.1 บทนำ

การพัฒนาร่องโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในบทที่ 7 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ให้น้อยลงกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B ดังได้แสดงรูปร่างร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมไว้ในบทที่ 6 โดยพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อันเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐานที่ใช้ออกแบบมอเตอร์ และแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์ที่ออกแบบใหม่ ยังมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B ที่มีความยาวของร่องค่อนข้างลึก ประกอบกับพื้นที่หน้าตัดของร่องแบบใหม่จะต้องมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมทุกประการ การออกแบบจะอาศัยการจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการสั่นสะเทือน เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ โดยเทียบผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์ทั้งแบบเป็นอิลิเมนต์ซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั่นในรูปของการบิดเบี้ยวของสเตเตอร์ และพิจารณาแบบเป็นก้อนซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั่นทั้งระบบโดยรวม พร้อมกับอภิปรายผลที่ได้ในเชิงเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของรูปร่างร่องในแต่ละแบบ

7.2 การใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

การออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์แบบใหม่เพื่อลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการสั่นสะเทือน จะพิจารณาโดยใช้เกณฑ์ขนาดพื้นที่หน้าตัดของร่องโรเตอร์ต้องเท่ากันกับร่องแบบดั้งเดิมเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ ประกอบกับแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์ที่ปรากฏยังคงคงลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เหมือนกับกรณีของร่องแบบดั้งเดิม ดังได้แสดงรูปร่างร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้เป็นร่องอ้างอิงไว้ในรูปที่ 6.3 และนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังรูปที่ 7.1 ควบคู่กับรูปการสร้างกริดในร่องโรเตอร์อันเป็น

กระบวนการหนึ่งของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ในการศึกษาวิจัยได้คำนึงว่ามอเตอร์ได้รับการจ่ายไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ อันเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐานขั้นต้นที่ใช้สำหรับออกแบบมอเตอร์

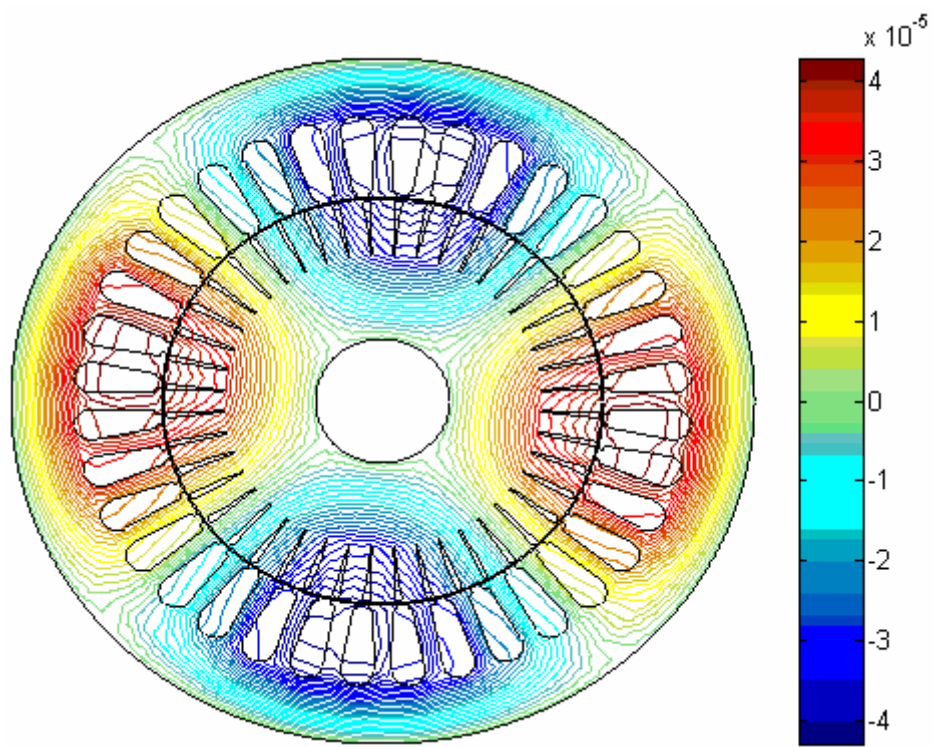


รูปที่ 7.1 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและมีติ (mm) พร้อมการสร้างกริดในร่องโรเตอร์

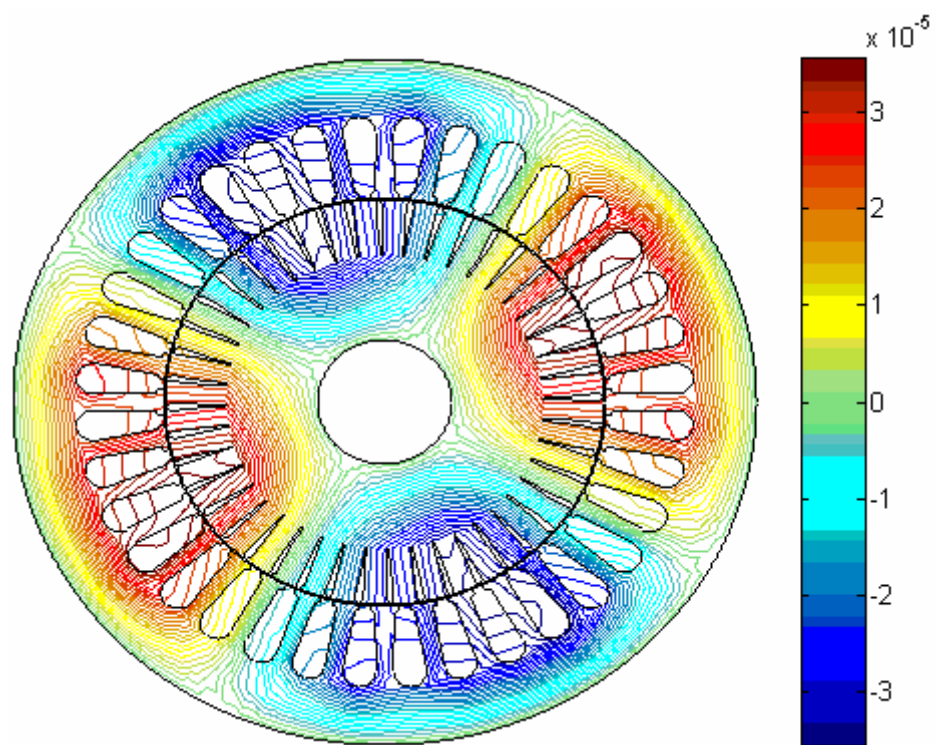
การดำเนินการศึกษาเมื่อพิจารณาร่อง โรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้เป็นร่องอ้างอิงเพื่อการออกแบบร่องโรเตอร์ใหม่ จะอาศัยการจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลโดยอาศัยโปรแกรมที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 6 เพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ โดยทางไฟฟ้าจะแสดงถึงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งได้รับการเสนอในรูปคอนทัวร์ให้เห็นถึงวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ พร้อมทั้งค่าสนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศอันเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ส่วนทางกลจะแสดงถึงผลลัพธ์ของการกระจัดที่เกิดขึ้นอันเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์ทั้งแบบเป็นอิลิเมนต์และแบบเป็นก้อน ดังได้แสดงรายละเอียดไว้เป็นหัวข้อดังนี้

7.2.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

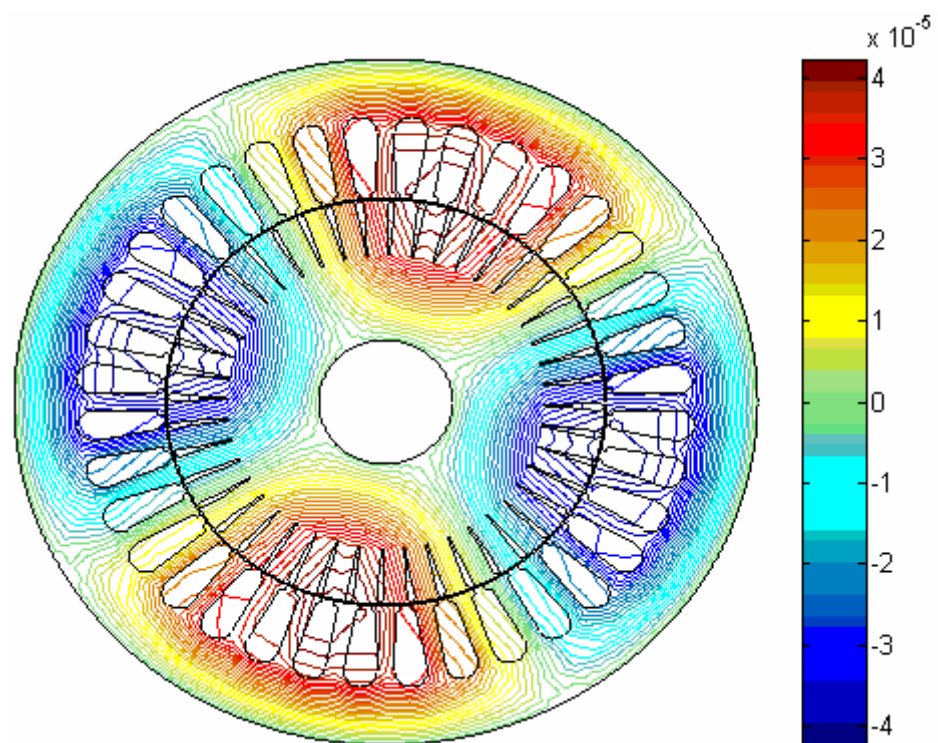
ด้วยการคำนวณโดยโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น ผลลัพธ์ที่ปรากฏในขั้นต้นของการจำลองผลเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ คือค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ที่จุดต่อต่างๆ ซึ่งได้รับการแสดงผลในรูปคอนทัวร์ ให้เห็นถึงวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่งมุมต่างๆ กัน ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.2 ซึ่งเป็นการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาทำมุม 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° และ 180° เทียบกับแกน $x+$



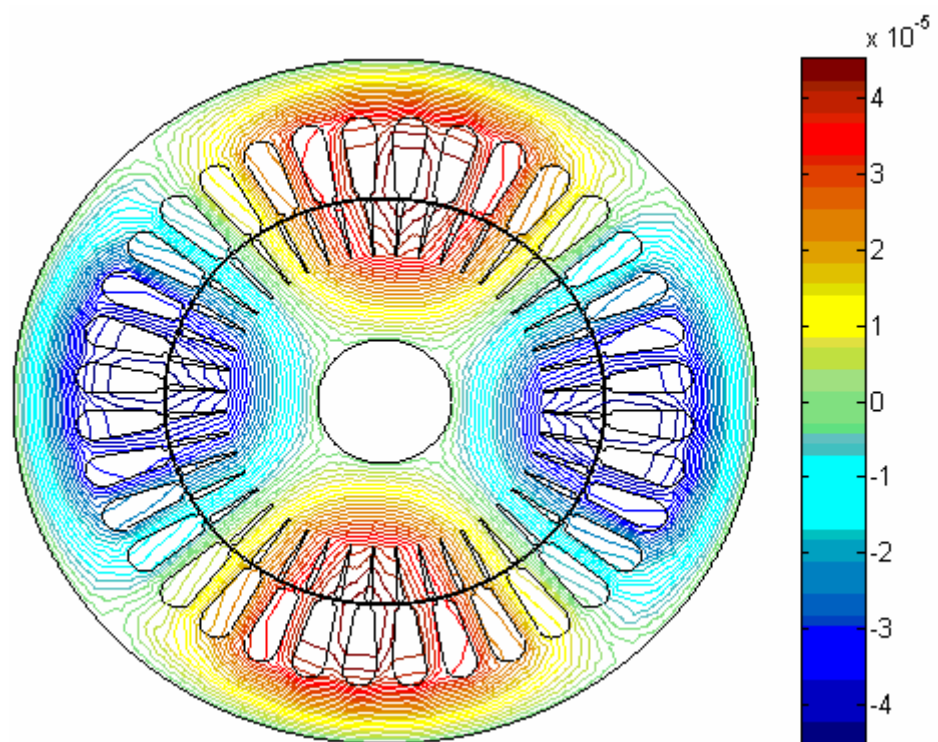
(n)



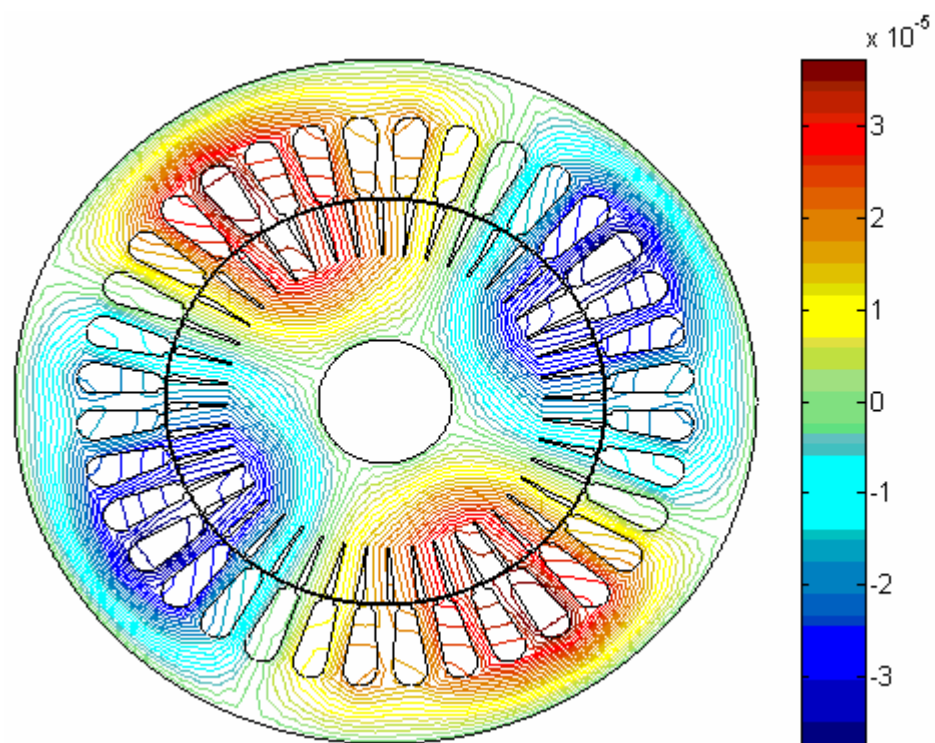
(o)



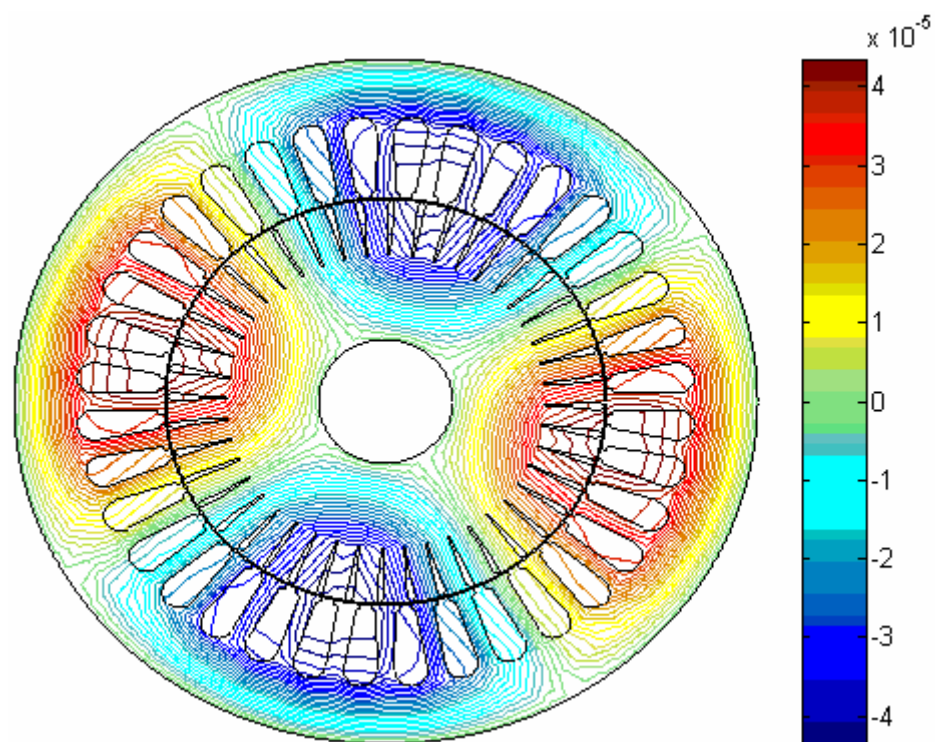
(a)



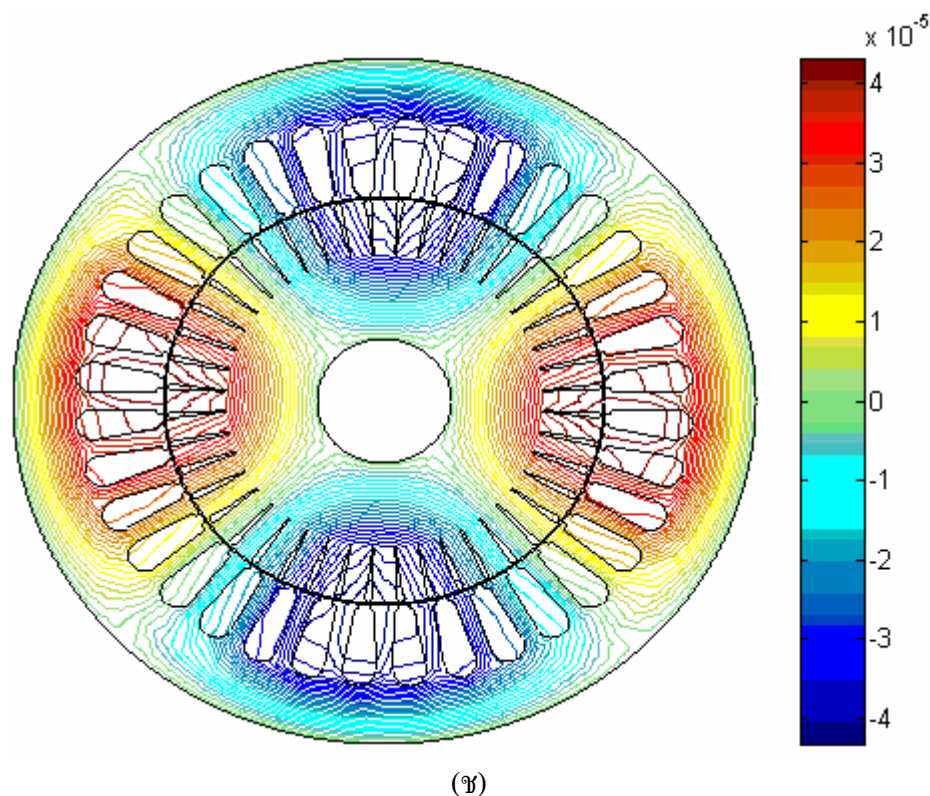
(b)



(a)



(b)

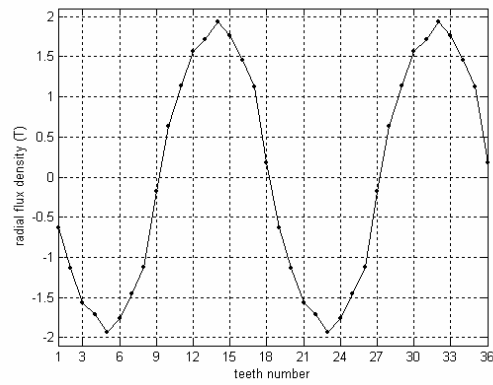


รูปที่ 7.2 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบคั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 0° , (ข) 30° , (ค) 60° , (ง) 90° , (จ) 120° , (ฉ) 150° และ (ช) 180°

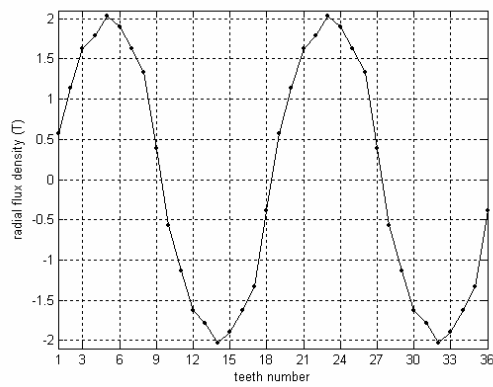
จากรูปที่ 7.2 จะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อพิจารณามอเตอร์หมุนในสถานะอยู่ตัวและมีโหลดเต็มพิกัด ปรากฏให้เห็นถึงจำนวนขั้วแม่เหล็ก N (สีแดง) และ S (สีน้ำเงิน) สลับกันไปจำนวน 4 ขั้ว เท่ากับจำนวนขั้วของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลอย่างเด่นชัด ซึ่งพิจารณาควบคู่กับค่าแถบสีทางด้านขวามือที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยค่าบวกที่มีขนาดสูงสุดจะแทนได้ด้วยสีแดงเข้ม และค่าลบที่มีขนาดสูงสุดจะแทนด้วยสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 7.2 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นเส้นแรงแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มสีหลักๆ คือ แดงและน้ำเงินสลับกันไป 4 กลุ่ม ซึ่งจำนวนกลุ่มนี้เปรียบเสมือนจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยกลุ่มสีแดงหมายถึงขั้ว N ซึ่งมีทิศทางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A มีทิศพุ่งเข้าหาหน้ากระดาด ส่วนกลุ่มสีน้ำเงินหมายถึงขั้ว S ซึ่งมีทิศทางของ A พุ่งออกจากหน้ากระดาด โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเริ่มเข้าทางเดินเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ 180° (ในกรณีที่พิจารณาในสถานะไร้โหลดจะมีค่าเท่ากับ 180° พอดิ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) และเส้นแรงแม่เหล็กจะแสดงพฤติกรรมที่เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุน โดยมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลในแต่ละจุดต่อที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดตามแนวแกน z ของมอเตอร์ (A_z) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (B_r) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 7.3 เป็นการแสดงค่า B_r ที่กระทำตรงฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาของโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อพิจารณาโรเตอร์หมุนไป 0° , 90° และ 180° (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง 0° เทียบกับแกน $x+$ พอดี และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) จากรูปที่ 7.3 จะสังเกตเห็นว่า รูปกราฟของ B_r จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 2 tesla ที่มีคาบเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนซี่ทั้งหมด โดยกราฟ B_r จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ 180° และเมื่อพิจารณารูปกราฟของ B_r เมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม 0° ดังรูปที่ 7.3(ก) เทียบกับรูปของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม 0° เช่นกัน ดังรูปที่ 7.2(ก) จะสังเกตเห็นว่า ค่า B_r ในรูปที่ 7.3(ก) จะมีขนาดสูงสุด ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 9, 18, 27 และ 36 โดยระยะห่างในแต่ละซี่ที่ปรากฏจะมีค่าเป็น 9 ซึ่งเท่ากับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็กพอดี (1 pole pitch) ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 7.2(ก) โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A จะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีขนาดสูงสุด ณ ซี่ที่ 9, 18, 27 และ 36 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก ค่าสนามแม่เหล็ก B ได้จากการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ซึ่งรูปที่ 7.3(ข) และ 7.3(ค) สามารถพิจารณาเทียบได้ในทำนองเดียวกัน

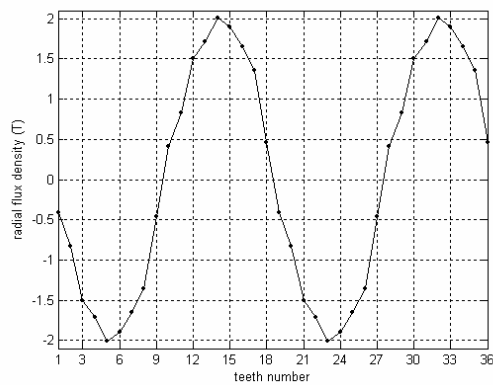
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี (F_r) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่ง $F_r \propto B_r^2$ โดยรูปที่ 7.4 เป็นการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาควบคู่กับการแสดงสเปกตรัมเพื่อบ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ โดยพิจารณา F_r กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ เฉพาะในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 จากทั้งหมด 36 ซี่ เนื่องจากผลของ F_r จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 9 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น



(ก)

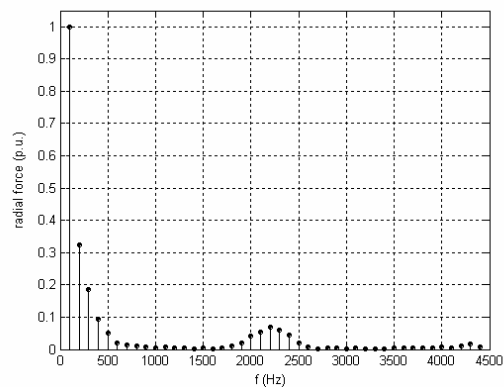
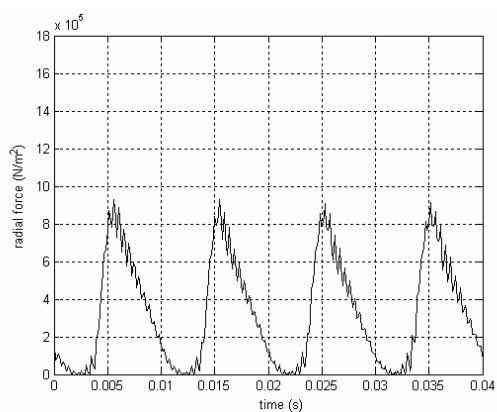


(ข)

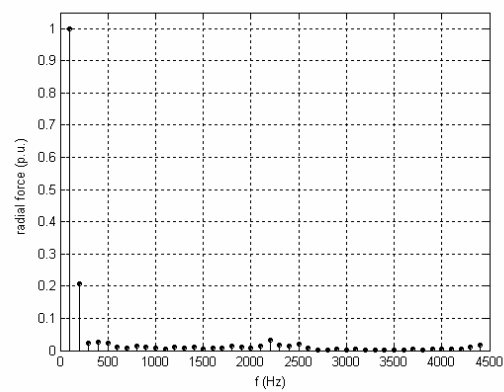
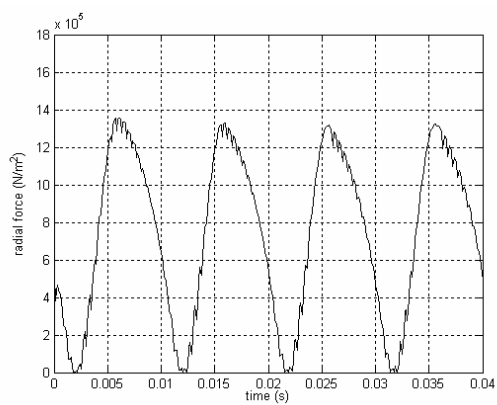


(ค)

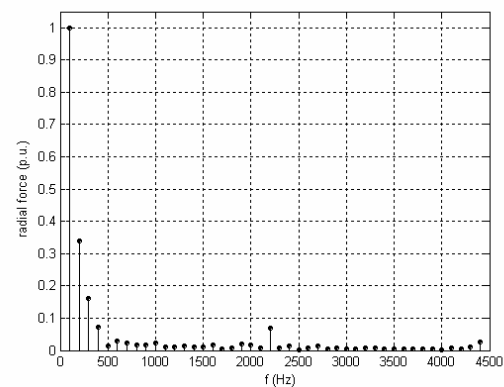
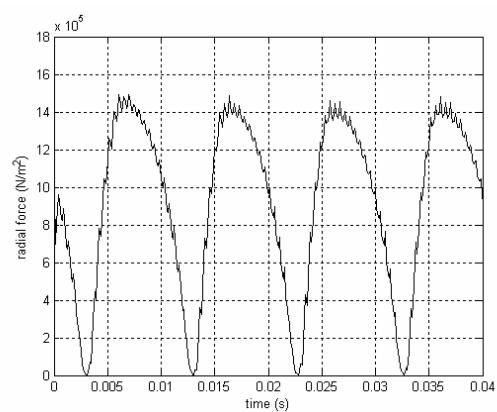
รูปที่ 7.3 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณา
ร่องโรเตอร์แบบตั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 90° และ (ค) 180°



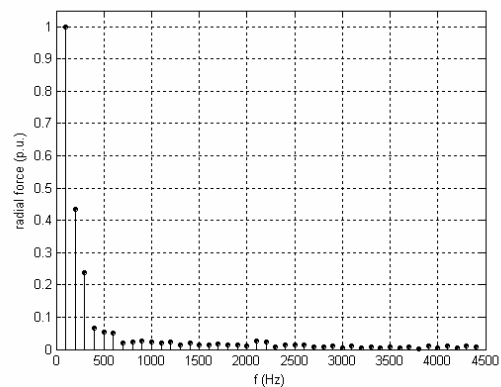
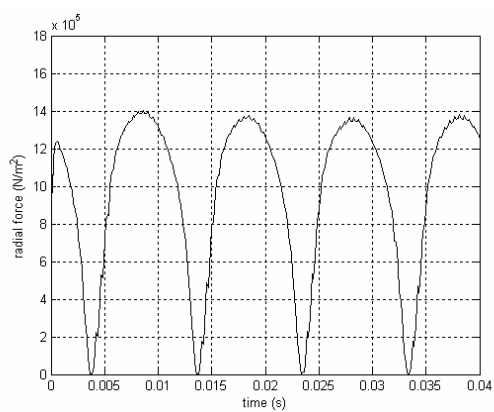
(f)



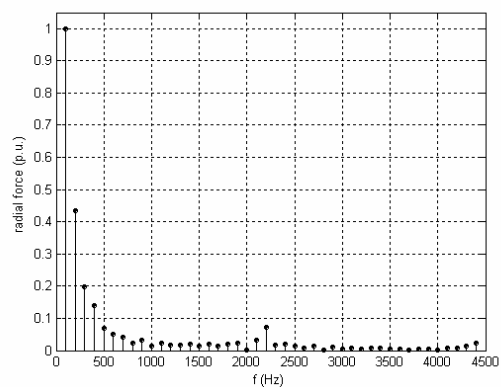
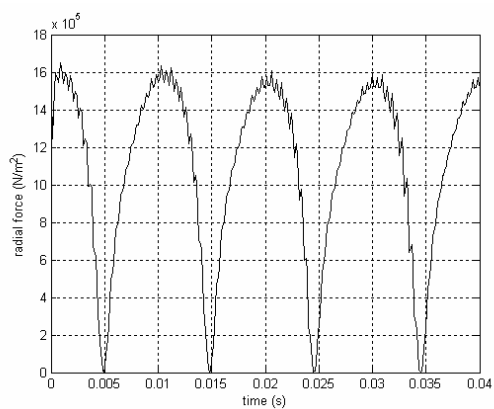
(g)



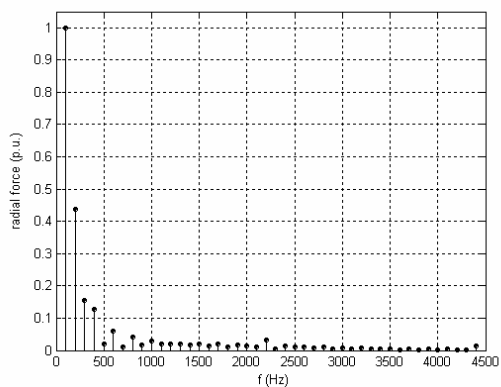
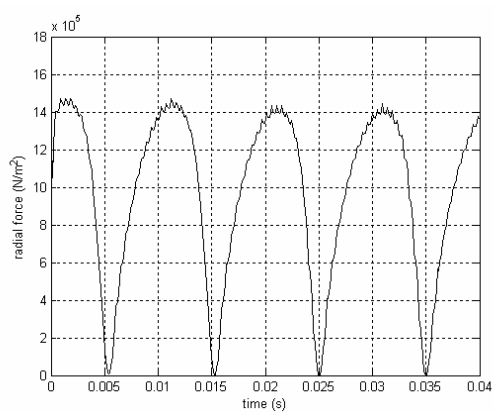
(h)



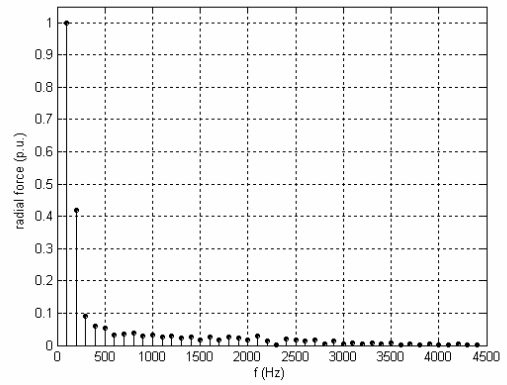
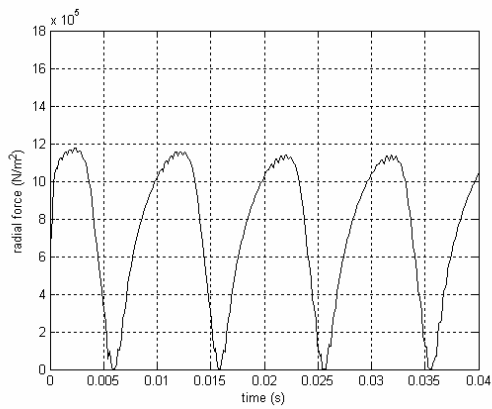
(j)



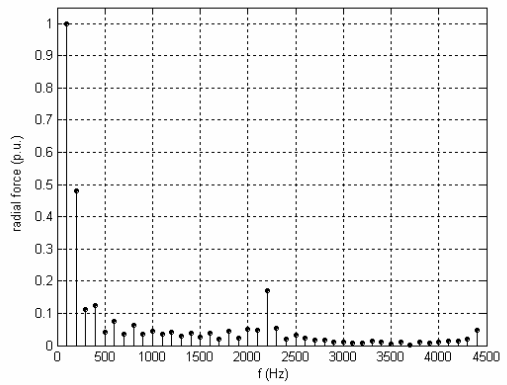
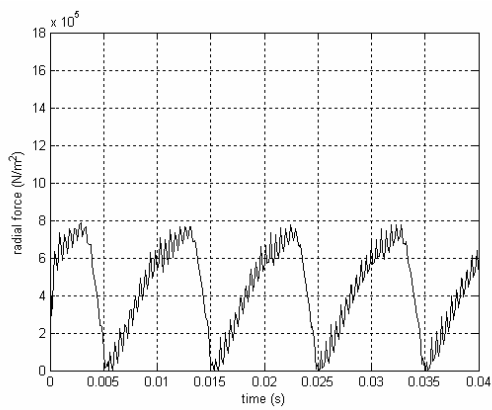
(i)



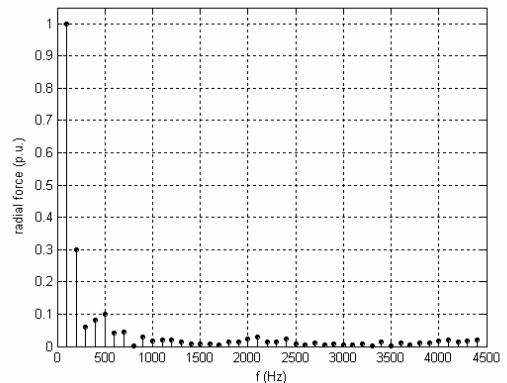
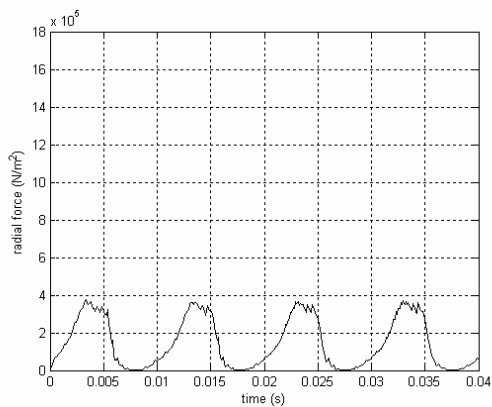
(l)



(ข)



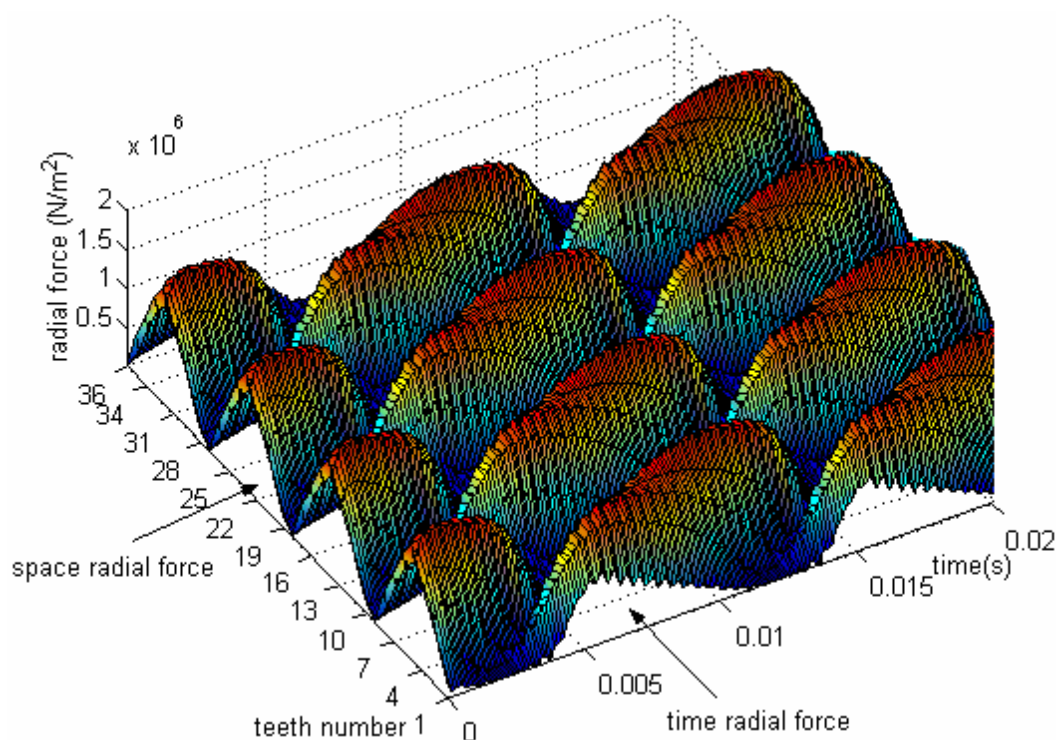
(ง)



(ฉ)

รูปที่ 7.4 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาห้องโรเตอร์แบบดั้งเดิม
 ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5,
 (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8 และ (ฉ) ซี่ที่ 9

จากรูปที่ 7.4 จะสังเกตเห็นว่า รูปกราฟของ F_r เทียบกับเวลาจะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกและคล้ายฟันเลื่อยในบางกรณี ที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามแรงที่มากระทำกับฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ และมีคาบประมาณ 0.01 วินาที หรือ 100 Hz (ในกรณีที่พิจารณาในสภาวะไร้อะไหล่จะมีค่าเท่ากับ 0.01 วินาทีพอดี ซึ่ง F_r จะมีความถี่เป็น 2 เท่า ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ในซี่ที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7.4(ก) จะมีค่าทั้งขนาดและเฟสเท่ากับแรงที่กระทำในซี่ที่ 10, 19 และ 28 ทุกประการ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตซ์ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ในซี่อื่นๆ ก็มีลักษณะเป็นอย่างนี้เช่นกัน ส่วนการแสดงผลแปรตามขนาดของ F_r ที่สอดคล้องกับรูปคลื่นของ F_r เทียบกับเวลาที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ จะใช้เป็นตัวแทนเพื่อตรวจสอบถึงความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r โดยได้นำเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณตามแนวทางการวิเคราะห์ห้องประกอบของฮาร์มอนิกในสัญญาณทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบถึงความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r (Kim, Kwon, and Park, 1999) โดยได้นำศัพท์เฉพาะทางวิศวกรรม THD (total harmonic distortion) ซึ่งใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมด มาเป็นตัวแทนสำหรับแสดงผลในเชิงปริมาณของความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r โดยสเปกตรัมของค่า F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 มีค่า THD เท่ากับ 40.95%, 22.12%, 36.67%, 51.32%, 51.88%, 49.36%, 45.24%, 57.22% และ 34.63% ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าค่า THD ที่พิจารณาในแต่ละซี่จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงหาค่า THD เฉลี่ย ซึ่งได้จากการพิจารณาสเปกตรัมของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ในทุกๆ ซี่ ทั้งหมด 36 ซี่ โดยจะมีค่า THD เฉลี่ย เท่ากับ 43.27% หรือเพื่อให้เกิดความชัดเจนยิ่งขึ้น จึงแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาประกอบการกระทำที่ฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ได้ดังรูปที่ 7.5 ซึ่งค่าของ F_r สามารถสังเกตได้จากสีที่ปรากฏบนรูปกราฟ โดยสีแดงเข้มจะสื่อถึง F_r ที่มีค่าสูงสุด ส่วนสีน้ำเงินเข้มจะสื่อถึง F_r ที่มีค่าน้อยสุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ หรืออาจพิจารณาค่าของ F_r ได้จากตัวเลขที่ระบุขนาดในแกนของ F_r ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของ F_r ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณาประกอบกับสี โดยการกระจายตัวของ F_r ที่ปรากฏนี้ จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของการสั่นสะเทือน ดังที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

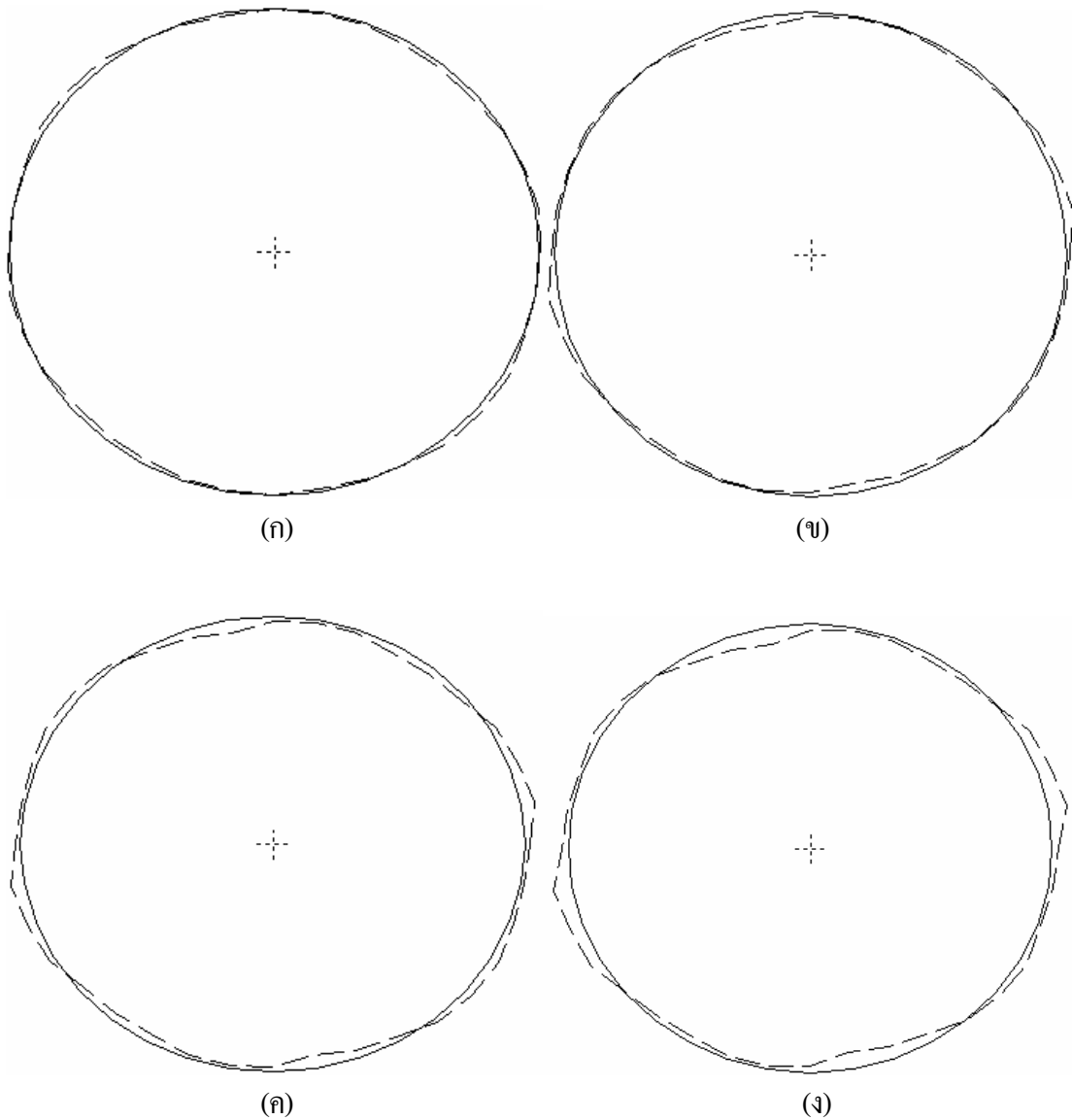


รูปที่ 7.5 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

7.2.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน

การสั้นสะเทือนในมอเตอร์ มีสาเหตุมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.2.1 ซึ่งเป็นแรงภายนอกมากระทำกับมอเตอร์ให้เกิดการสั้นสะเทือน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้คำนวณการสั้นสะเทือนทั้งในกรณีที่พิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั้นในรูปของการบิดเบี้ยวของสเตเตอร์และพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อน (lumped) ซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั้นทั้งระบบเป็นก้อนโดยรวม

การพิจารณามอเตอร์แบบเป็นอิลิเมนต์ จะใช้โปรแกรมจำลองผลการสั้นสะเทือนดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 6.4.3 ของบทที่ 6 ซึ่งใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา วิธีการนี้สามารถนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการกระจัดที่ละเอียดและครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ จากโปรแกรมจำลองผลการสั้นสะเทือน ผลลัพธ์ที่ปรากฏคือผลของการสั้นสะเทือนที่เป็นการกระจัดแสดงอยู่ในรูปของการบิดเบี้ยวไปจากเดิมตลอดวงรอบด้านในของสเตเตอร์ อันเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั้นสะเทือนที่สังเกตและเข้าใจได้ง่าย ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.6 เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

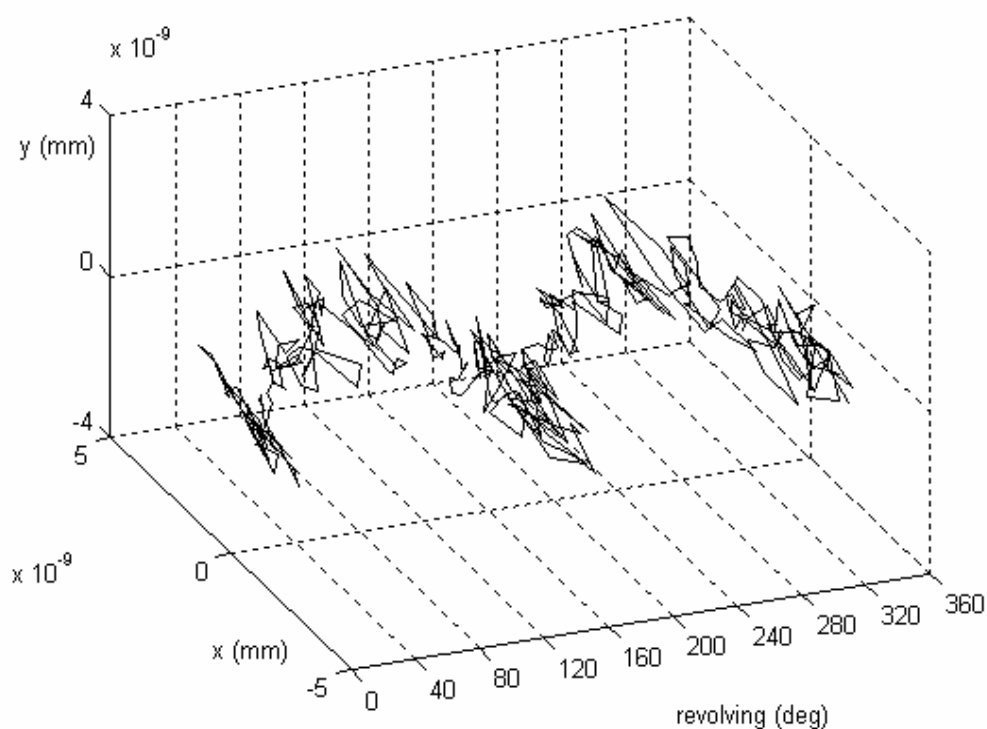


รูปที่ 7.6 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม
เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

จากรูปที่ 7.6 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของการกระจัดที่ครอบคลุมตลอดทั้งวงรอบด้านในของสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนจนครบ 1 รอบ เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยเส้นประแสดงถึงการกระจัดที่ผิดรูปไปด้วยอัตราขยาย 10° เท่า จากตำแหน่งปกติซึ่งแทนด้วยเส้นทึบ การพิจารณานาขนาดของการสั่นสะเทือนจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลรวมขนาดของการกระจัดในแนวรัศมีตลอดทั้งวงรอบด้านในของสเตเตอร์ที่บิดเบี้ยวไปจากเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ควบคู่กับค่าความแปรปรวน (variance) ซึ่งเป็นตัววัดการกระจายของการกระจัดในแต่ละรอบ ซึ่งเมื่อพิจารณา

ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมนี้ จะได้ขนาดของการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 6.2325×10^{-8} mm และ 1.1734×10^{-15} mm² ตามลำดับ

การพิจารณามอเตอร์แบบเป็นก้อน เป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว ไม่ต้องใช้ไฟไนท์ อิลิเมนต์ในการประมวลผล โดยเหมาะสำหรับเมื่อพิจารณาการสั่นทั้งระบบเป็นก้อนโดยรวม การคำนวณตั้งต้นจากสมการการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณามอเตอร์แบบเป็นอิลิเมนต์ แต่แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากระทำทำให้พิจารณาในรูปของผลรวมสุทธิตามแนวแกน x และ y ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงผลในรูปการกระจัดของศูนย์กลางเพลามอเตอร์หมุนไป ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.7 เมื่อพิจารณา ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

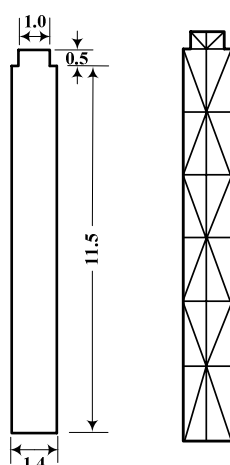


รูปที่ 7.7 การกระจัดของศูนย์กลางเพลามอเตอร์พิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.7 จะสังเกตเห็นผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจนว่า มอเตอร์มีการสั่นรอบจุดศูนย์กลาง ซึ่งแสดงได้ด้วยการกระจัดของศูนย์กลางเพลาสูทธิตามแนวแกน x และ y ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของมอเตอร์ การพิจารณาขนาดของการสั่นสะท้อนเมื่อพิจารณามอเตอร์แบบเป็นก้อน จะพิจารณาจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (root-mean-square: RMS) ของการกระจัดเมื่อมอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ซึ่งเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมนี้ จะได้ค่า RMS ของการกระจัดเท่ากับ 1.5609×10^{-9} mm

7.3 การใช้ร็องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร็องลิก

การพัฒนารูปร่างร็องโรเตอร์แบบใหม่เพื่อลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงกว่าเมื่อใช้ร็องโรเตอร์แบบดั้งเดิม จะพิจารณาเฉพาะร็องโรเตอร์แบบกึ่งปิดอันเป็นชนิดเดียวกันกับร็องดั้งเดิม ซึ่งเป็นร็องค่อนข้างลิกตามชั้นคุณสมบัติ B มีลวดตัวนำในโรเตอร์ชุดเดียว (single-cage rotor) โดยใช้เกณฑ์ขนาดพื้นที่หน้าตัดของร็องโรเตอร์ที่เท่ากับร็องแบบดั้งเดิมเป็นข้อกำหนด ดังแสดงร็องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร็องลิกที่ได้จากการออกแบบตามแบบร็องมาตรฐาน (Boldea and Naser, 2002) ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความลิกค่อนข้างมาก แสดงไว้ในรูปที่ 7.8 ควบคู่กับรูปการสร้งกริดในร็องโรเตอร์

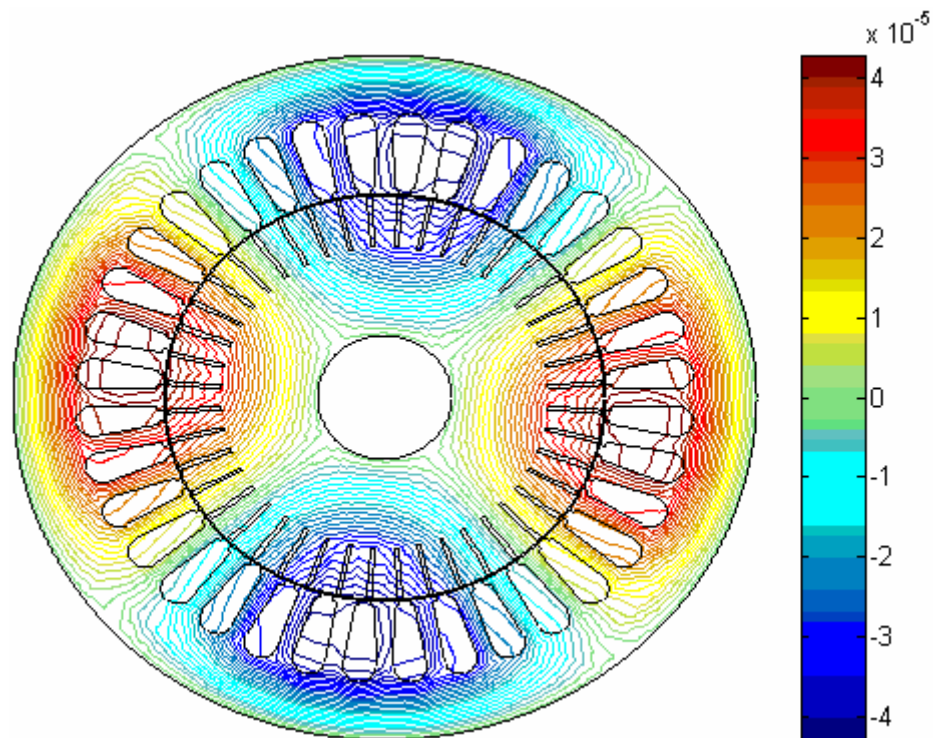


รูปที่ 7.8 ภาคตัดของร็องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร็องลิกและมิติ (mm) พร้อมการสร้งกริดในร็องโรเตอร์

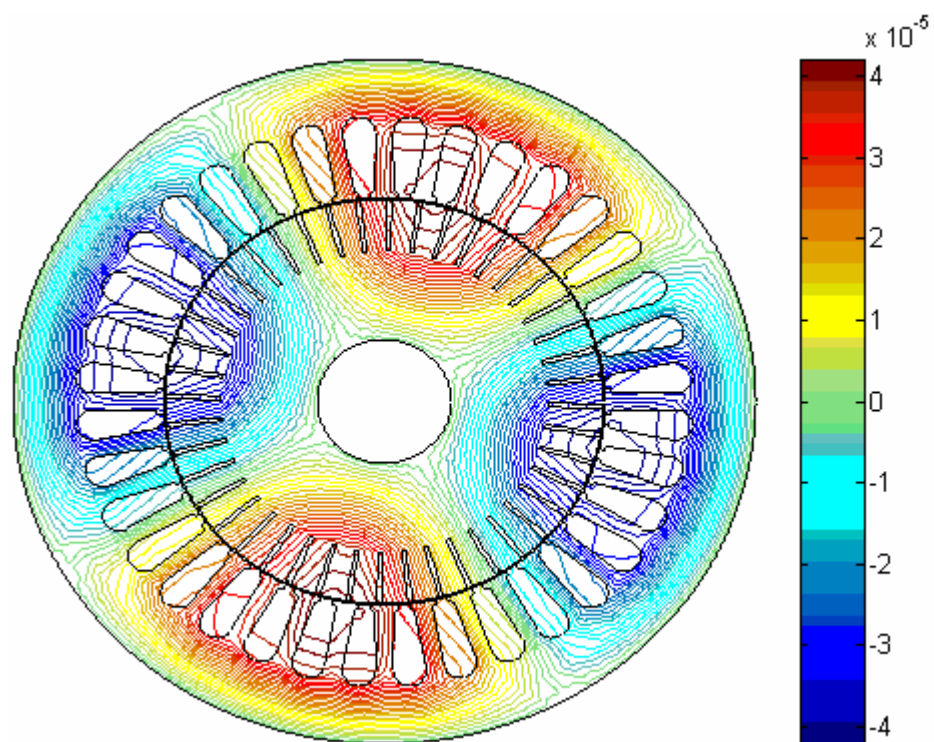
7.3.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร็องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร็องลิก ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณีร็องโรเตอร์แบบดั้งเดิมทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 7.9 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร็องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร็องลิก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อพิจารณาร็องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งปรากฏให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไป ประกอบกับเส้นแรงแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุน โดยร็องโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร็องลิกต่างมีวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กและขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์

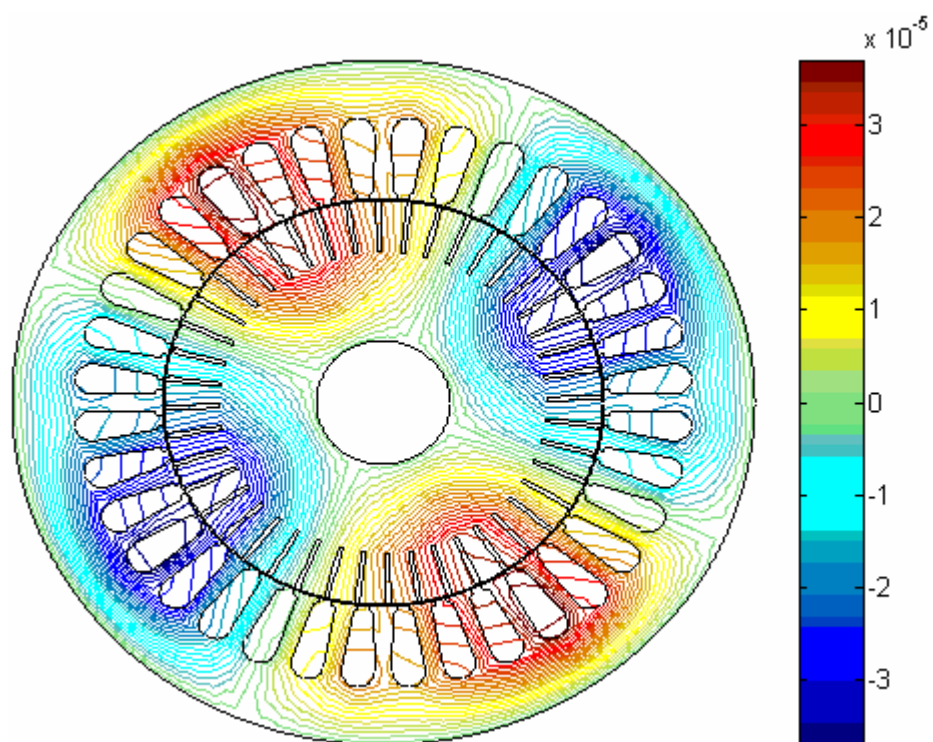
แม่เหล็ก A ที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาของร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 7.10 ที่ปรากฏผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลามีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกและคล้ายฟันเลื่อยในบางกรณี ที่มีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีที่พิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเพียงเล็กน้อย เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างร่องโรเตอร์ทั้งสอง จึงนำ THD ที่ใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกมาเป็นตัวแทนสำหรับเปรียบเทียบความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r โดยสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 ของร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกมีค่า THD เท่ากับ 40.49%, 22.21%, 38.79%, 49.63%, 49.77%, 47.70%, 44.33%, 57.10% และ 34.40% ตามลำดับ ซึ่งได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 42.71% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่าน้อยกว่าแบบดั้งเดิมที่มีค่า 43.27% อยู่เล็กน้อย หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกได้ดังรูปที่ 7.11 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ค่า THD ที่ใช้ตรวจสอบถึงความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r ที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของการสันสะเทือนดังที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อย่อยถัดไป



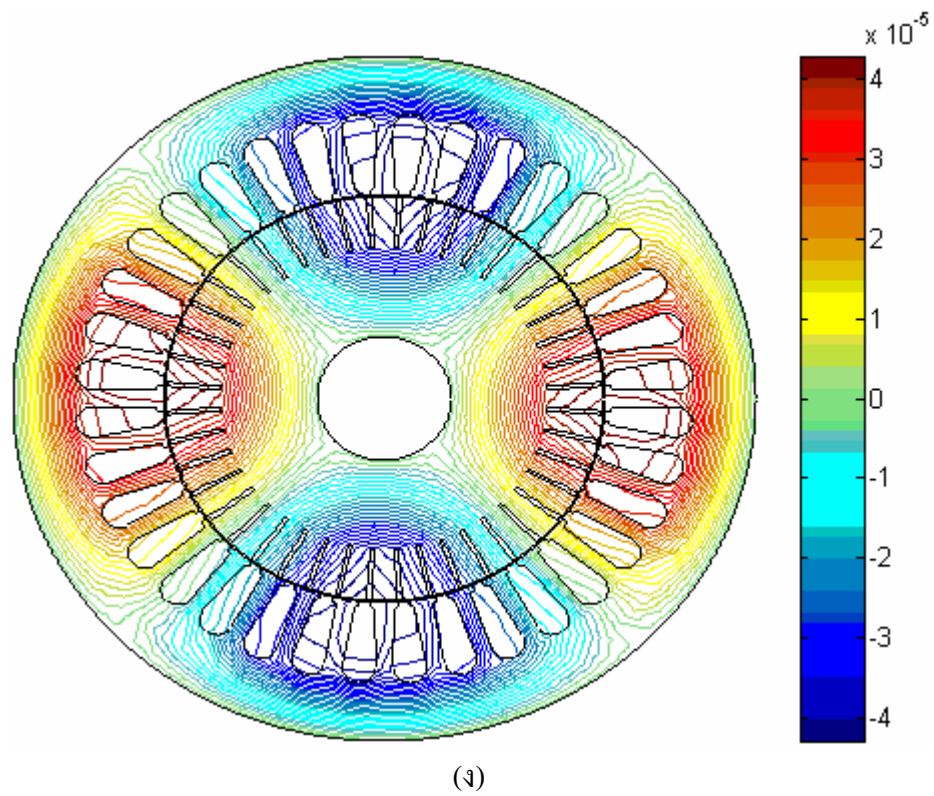
(ก)



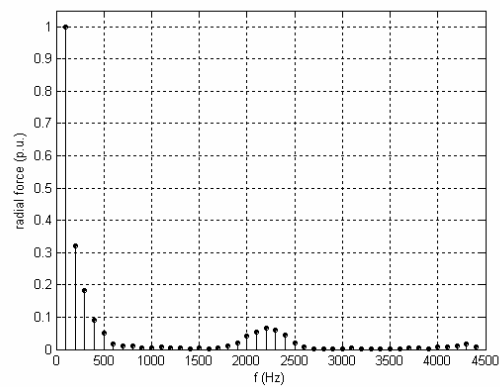
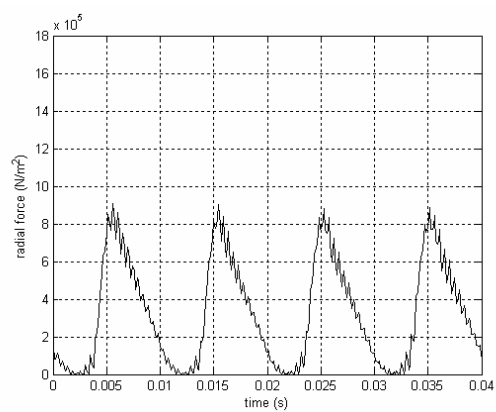
(a)



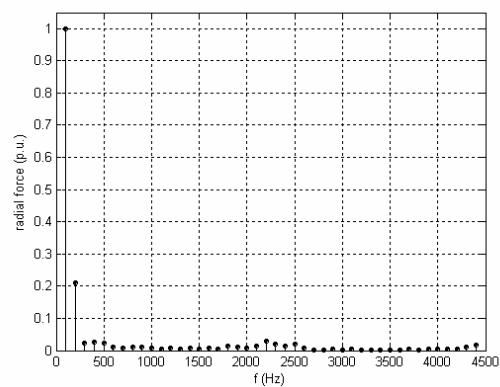
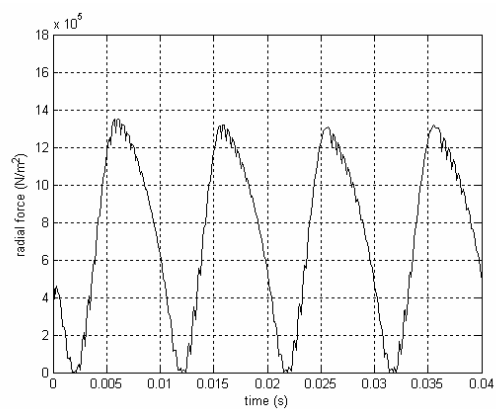
(b)



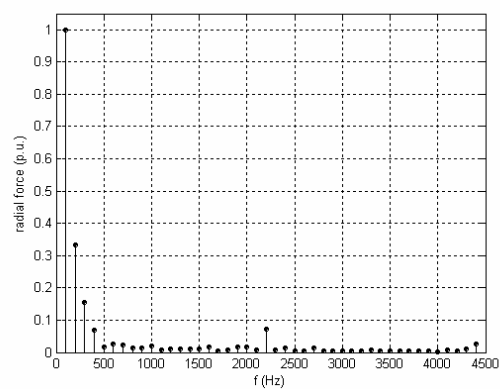
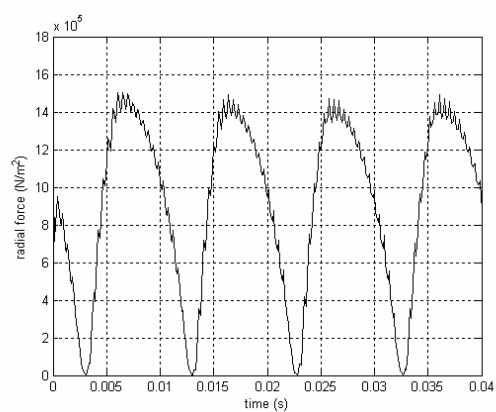
รูปที่ 7.9 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อ โรเตอร์หมุนไป
(ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



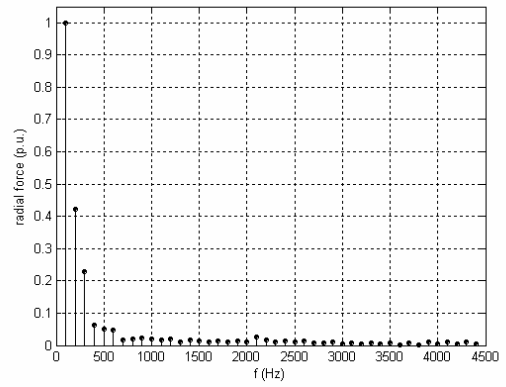
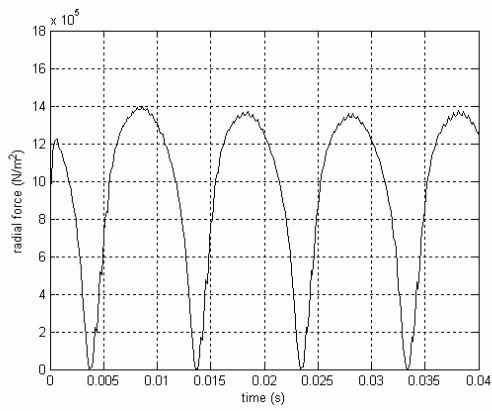
(f)



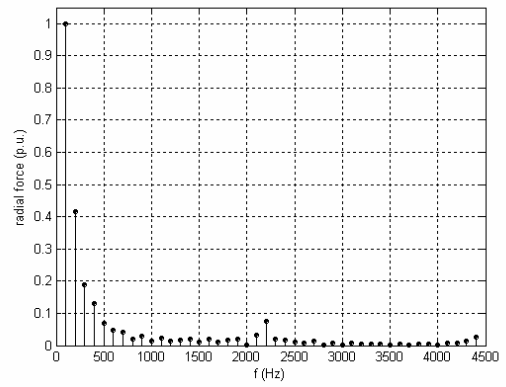
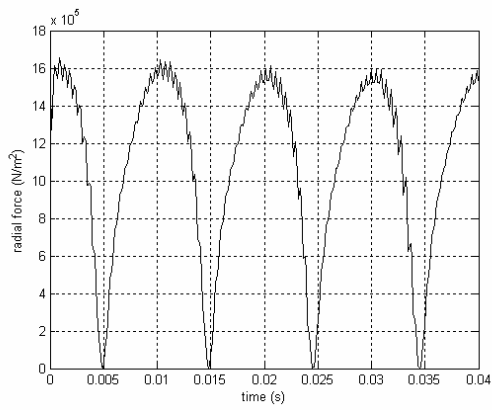
(g)



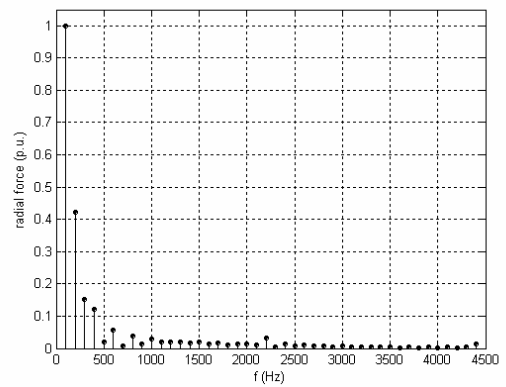
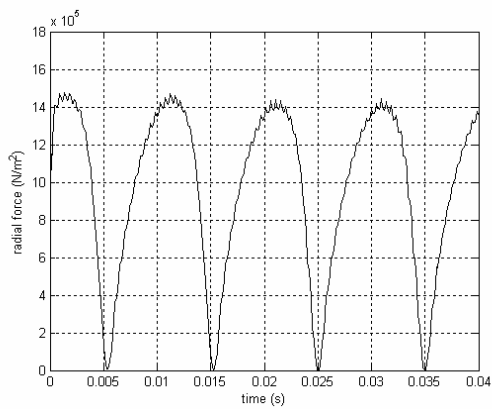
(h)



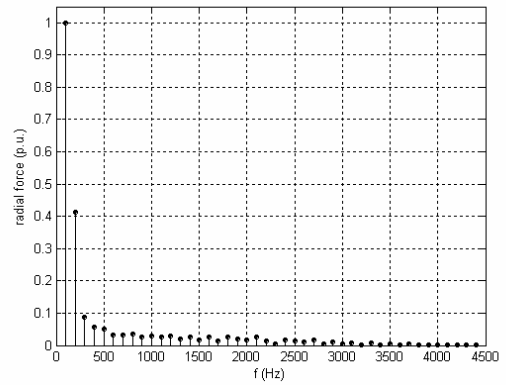
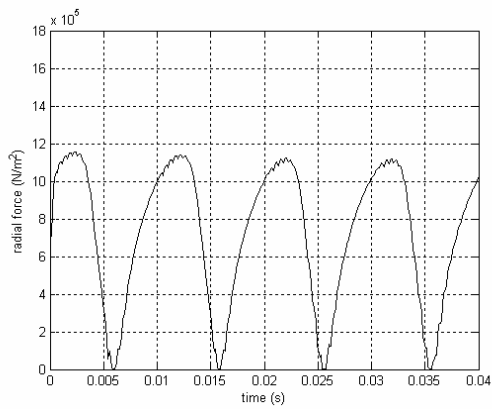
(j)



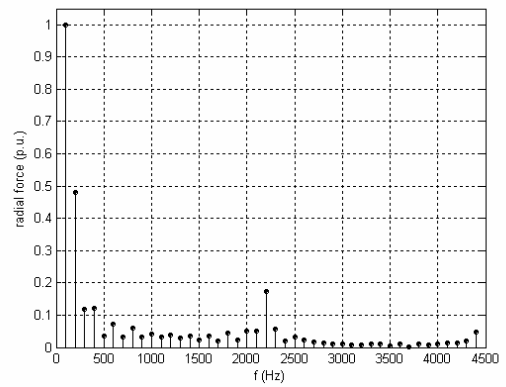
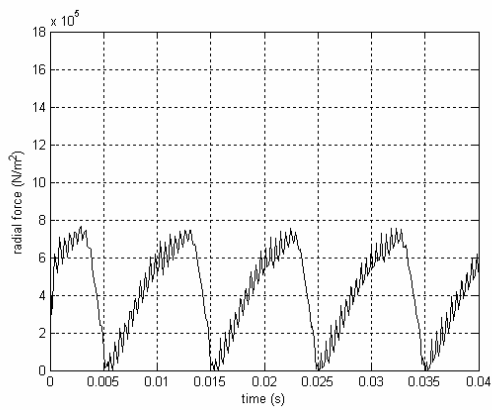
(i)



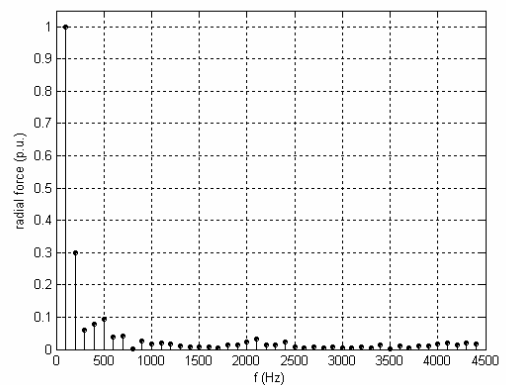
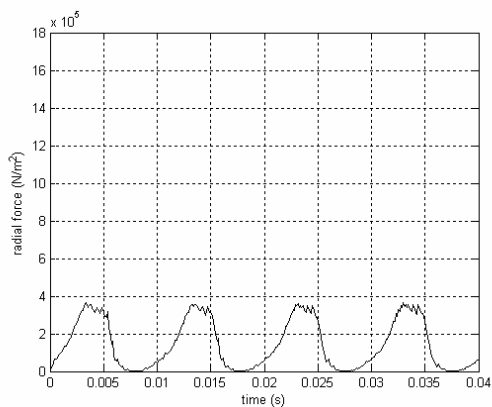
(l)



(ข)

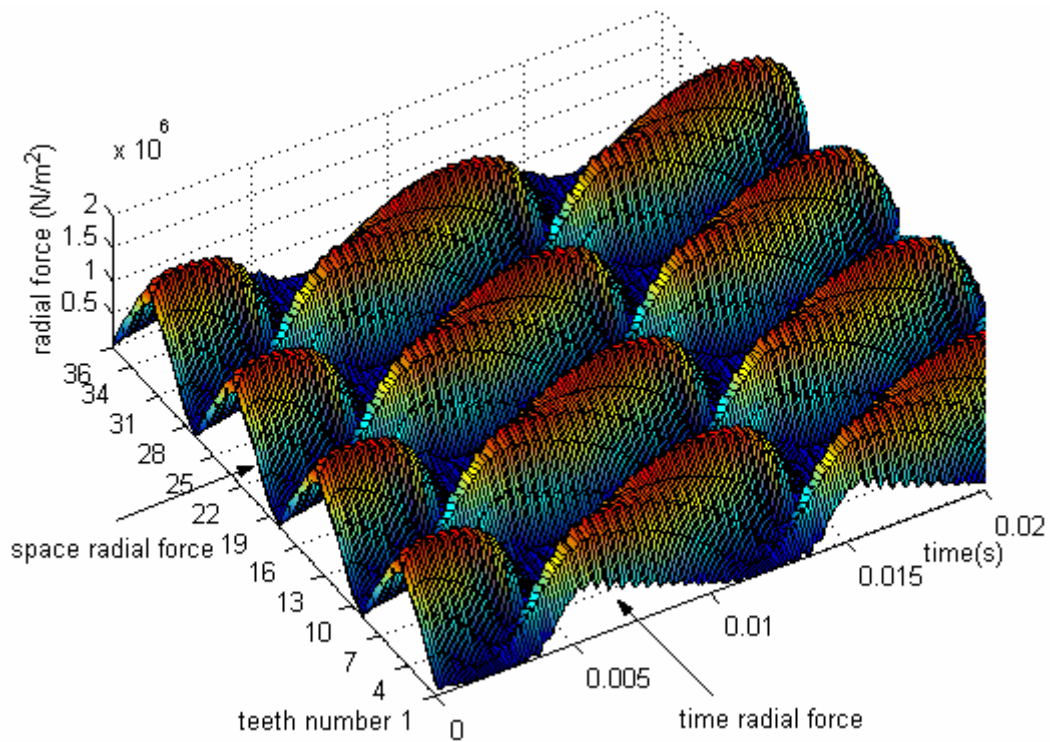


(ค)



(ณ)

รูปที่ 7.10 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที 1, (ข) ซีที 2, (ค) ซีที 3, (ง) ซีที 4, (จ) ซีที 5, (ฉ) ซีที 6, (ช) ซีที 7, (ซ) ซีที 8 และ (ณ) ซีที 9

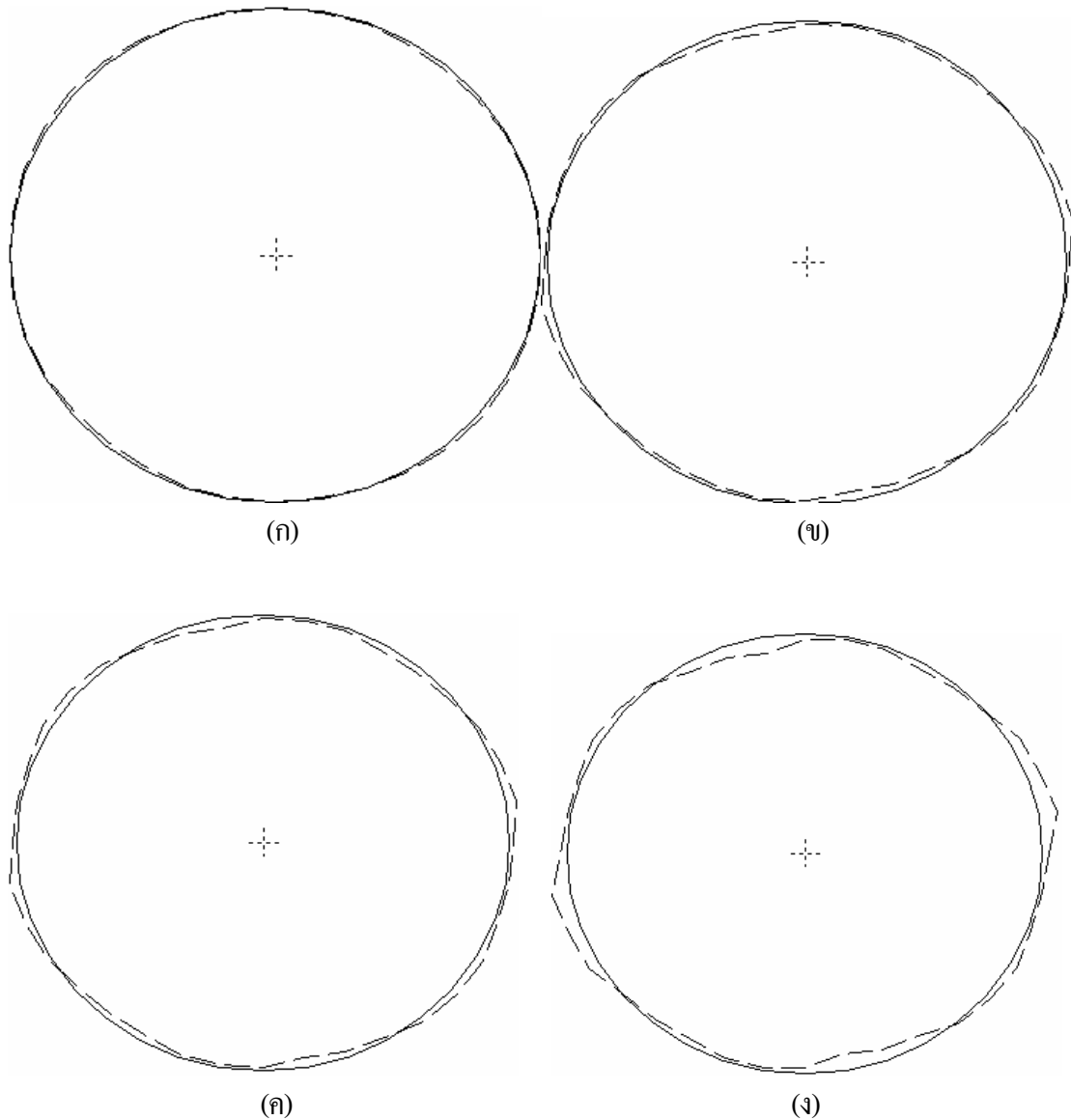


รูปที่ 7.11 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

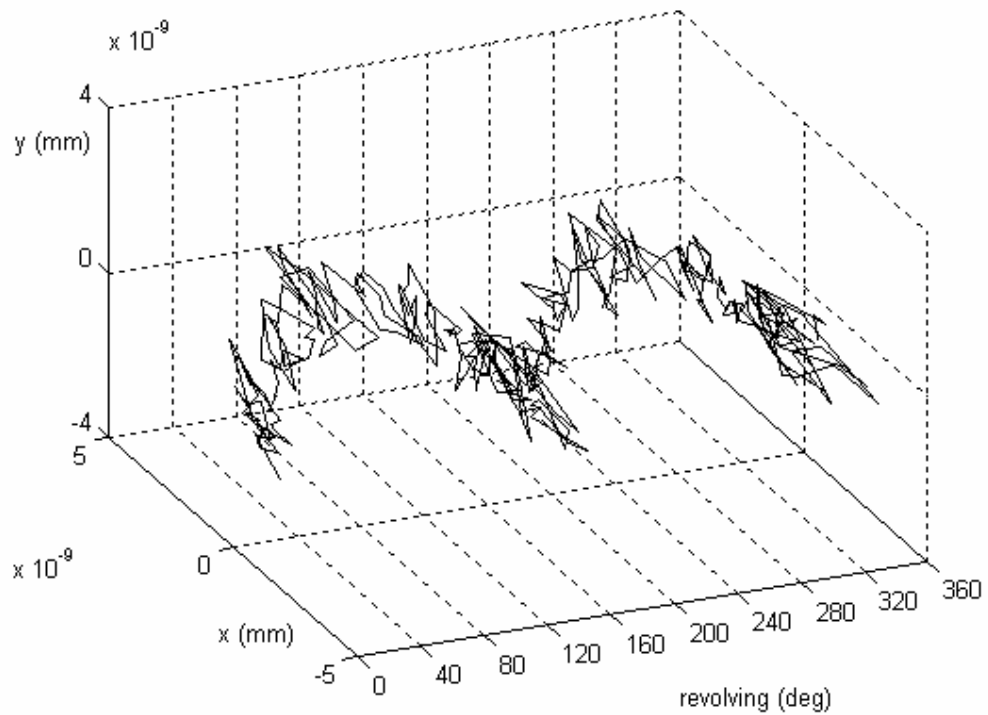
7.3.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน

การคำนวณขนาดของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก จะคำนวณทั้งในกรณีที่พิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์และเป็นแบบก้อน เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยกรณีที่ใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก ผลของการสั้นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ที่ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 7.12 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่สอดคล้องกับค่าของการกระจัดที่น้อยกว่ากรณีการใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกมีค่าเท่ากับ 6.1963×10^{-8} mm และ 1.1622×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.58 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั้นสะเทือนจากผลในหัวข้อย่อยข้างต้น ส่วนผลของการสั้นสะเทือนเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนดังแสดงในรูปที่ 7.13 จะมีขนาดของการสั้นที่

สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนเท่ากับ 1.4862×10^{-9} mm ซึ่งน้อยกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.5609×10^{-9} mm



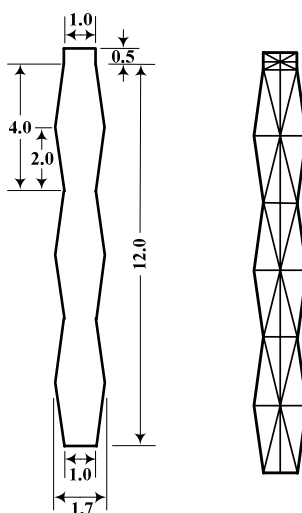
รูปที่ 7.12 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ



รูปที่ 7.13 การกระจัดของศูนย์กลางเพลามือพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

7.4 การใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

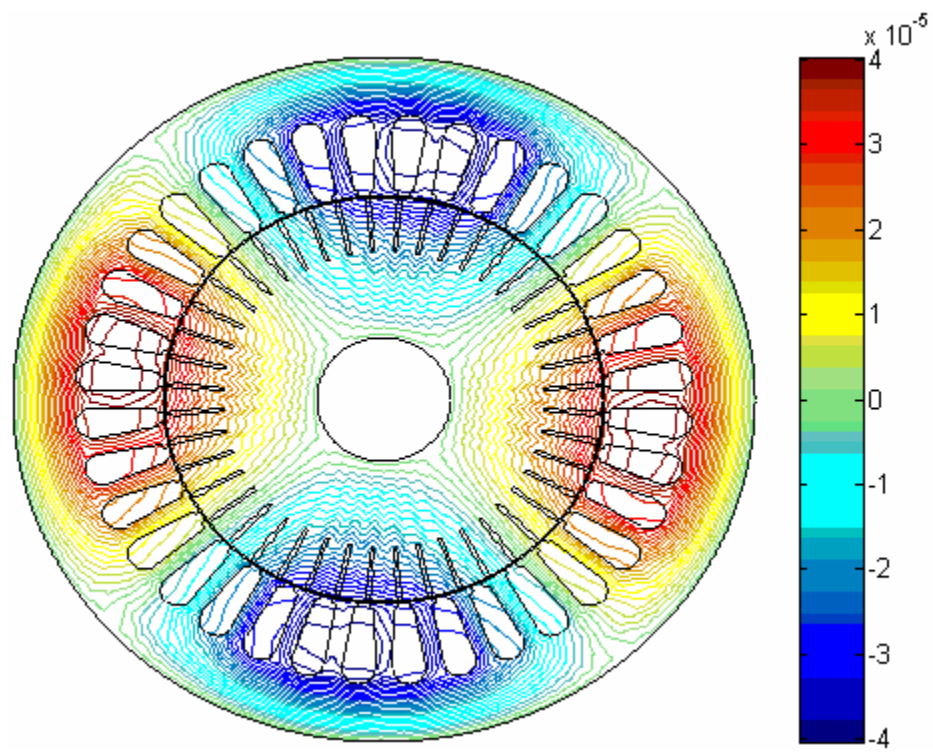
ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย เป็นร่องโรเตอร์แบบใหม่ที่เกิดจากการออกแบบเพื่อลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นร่องค่อนข้างลึกตามชั้นคุณสมบัติ B โดยใช้เกณฑ์ขนาดพื้นที่หน้าตัดของร่องโรเตอร์ที่เท่ากับร่องแบบดั้งเดิมเป็นข้อกำหนด ดังแสดงร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ที่มีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย มีความลึกค่อนข้างมาก แสดงไว้ในรูปที่ 7.14 ควบคู่กับรูปการสร้างกริดในร่องโรเตอร์



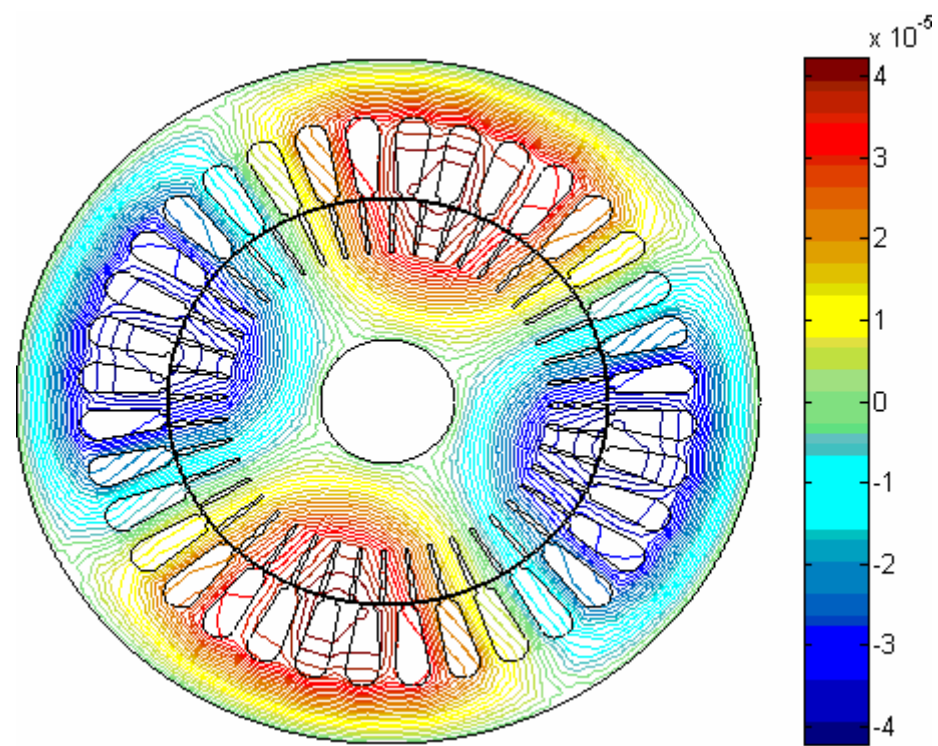
รูปที่ 7.14 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยและมิติ (mm) พร้อมการสร้างกริดในร่องโรเตอร์

7.4.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

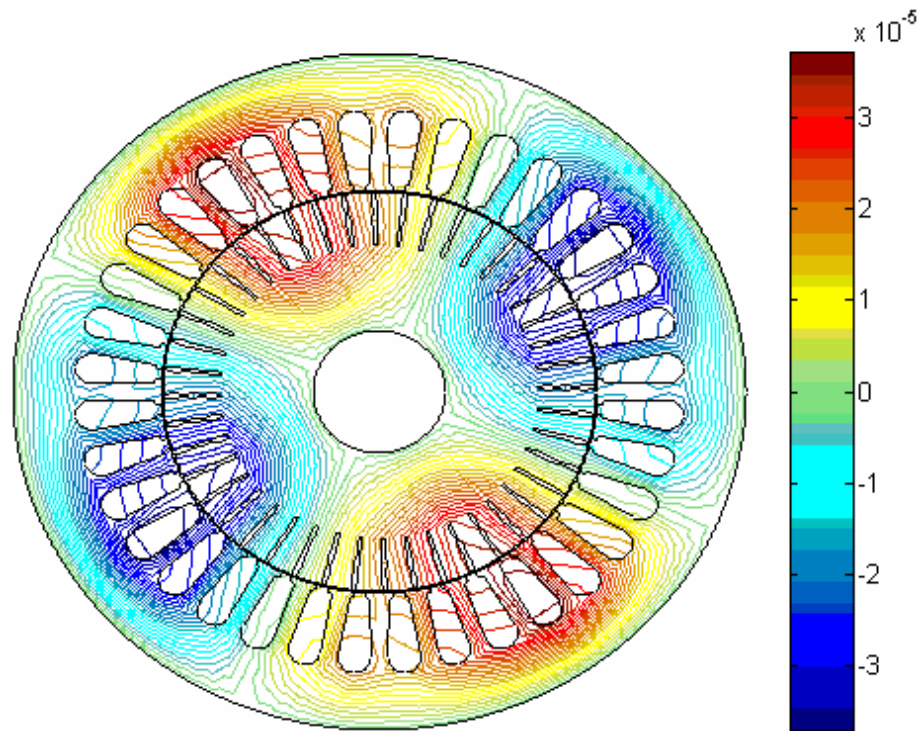
ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 7.15 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกดังที่กล่าวไว้แล้วจากข้างต้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 7.16 ที่ปรากฏผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลามีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์เหมือนที่ผ่านมามีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีที่พิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเพียงเล็กน้อย โดยสเปกตรัมของ F_r ในซีที่ 1 ถึงซีที่ 9 ของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยมีค่า THD เท่ากับ 40.40%, 24.67%, 40.20%, 50.13%, 51.22%, 47.45%, 43.68%, 55.78% และ 34.46% ตามลำดับ ซึ่งได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 43.11% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าน้อยกว่าแบบดั้งเดิมที่มีค่า 43.27% แต่มากกว่าแบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่มีค่า 42.71% หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยได้ดังรูปที่ 7.17 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



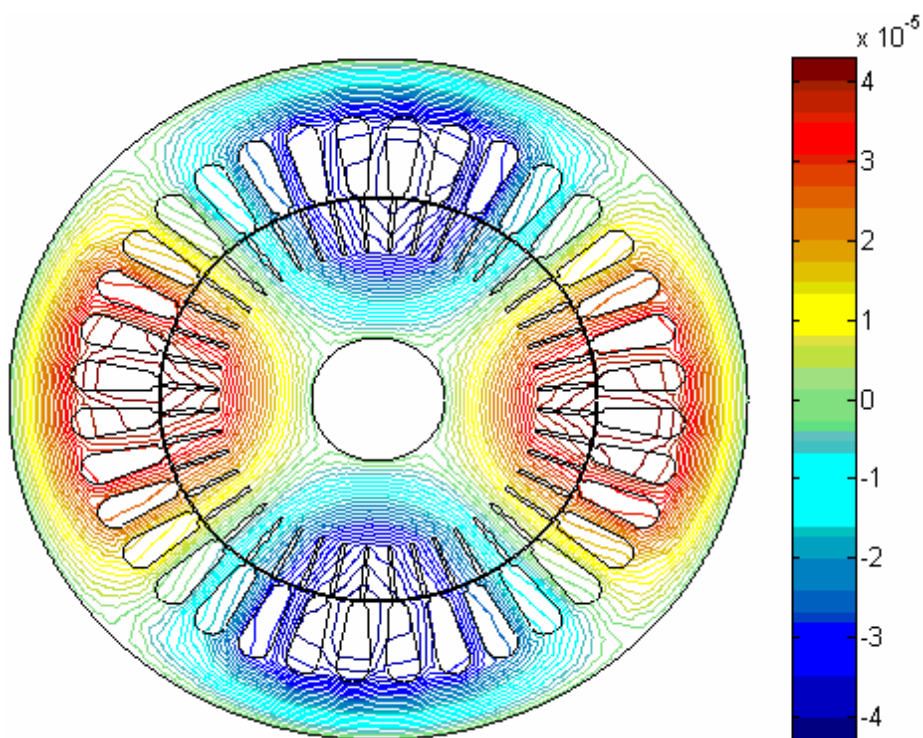
(n)



(o)



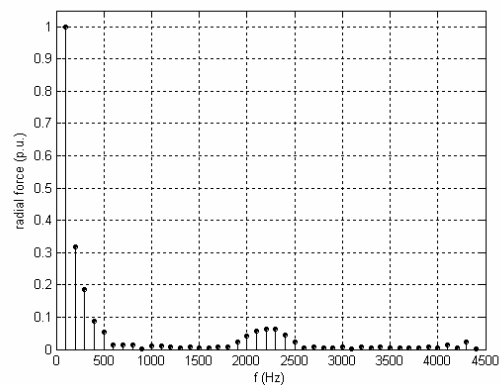
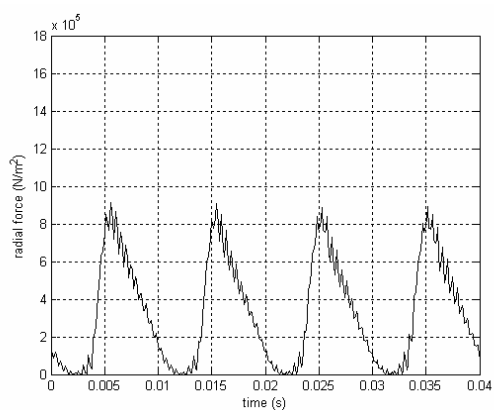
(ค)



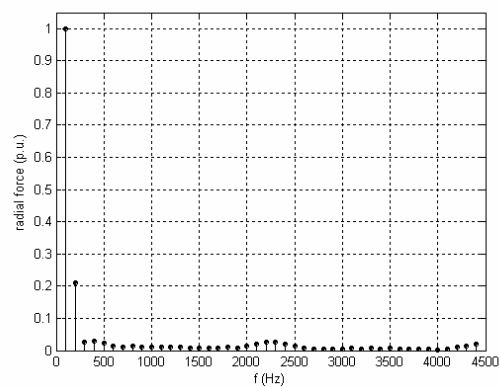
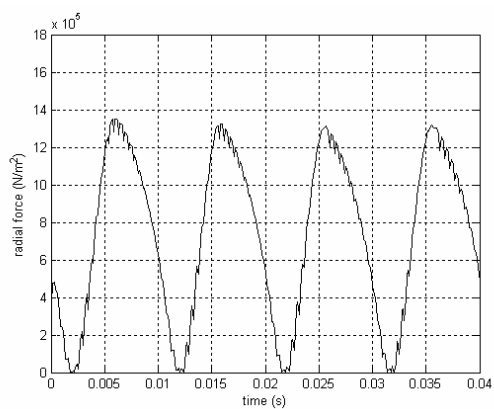
(ง)

รูปที่ 7.15 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณาห้องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป

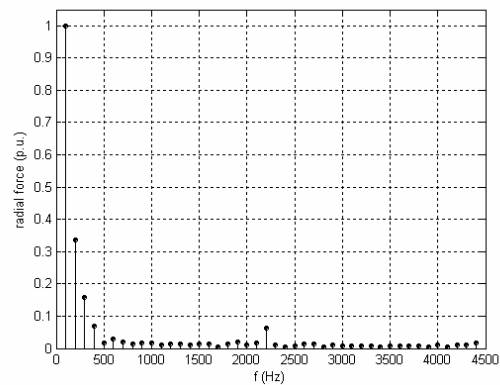
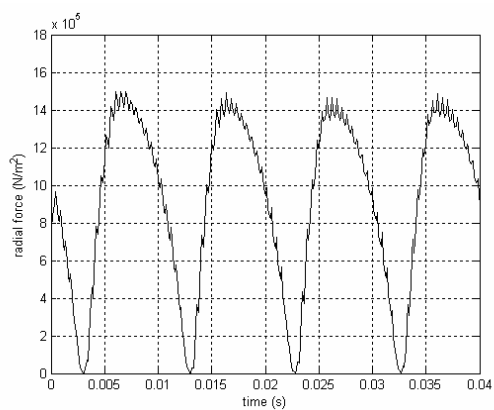
(ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



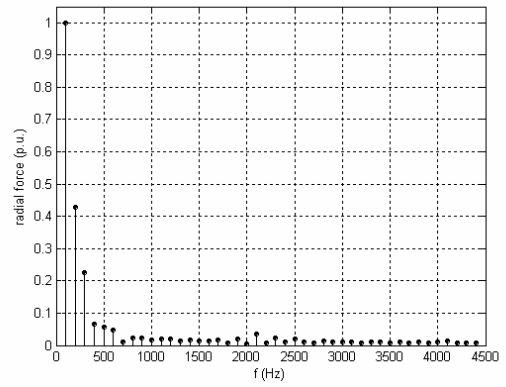
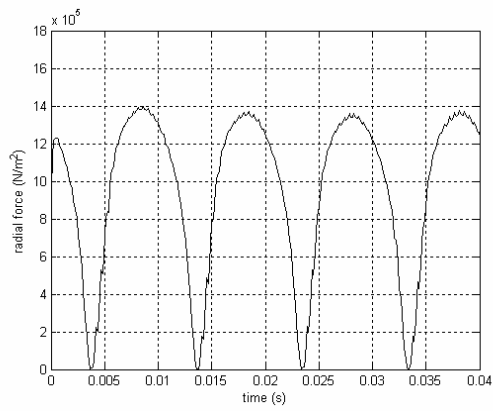
(f)



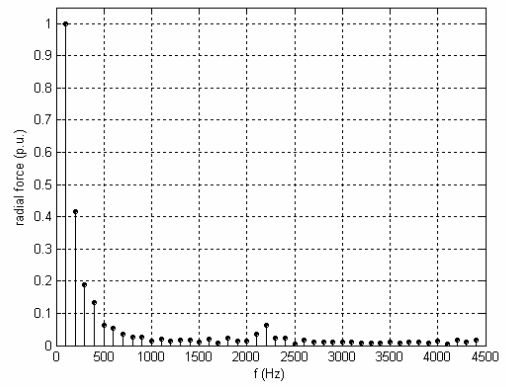
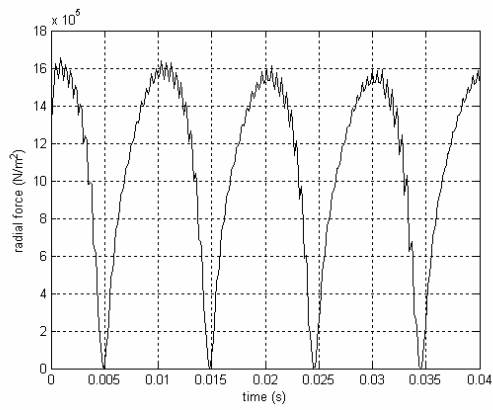
(g)



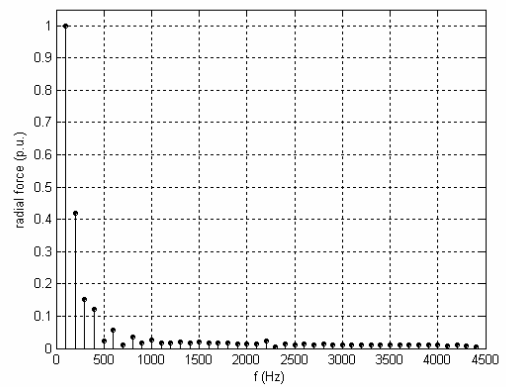
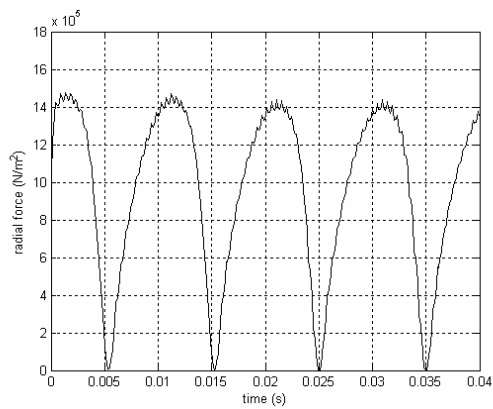
(h)



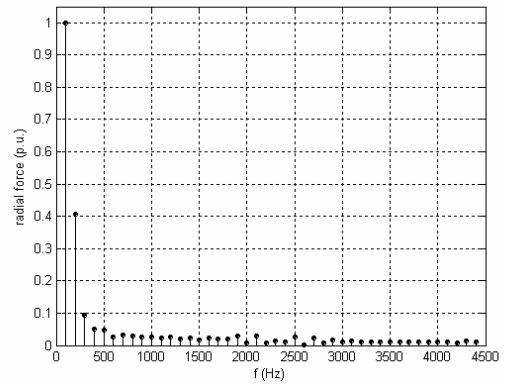
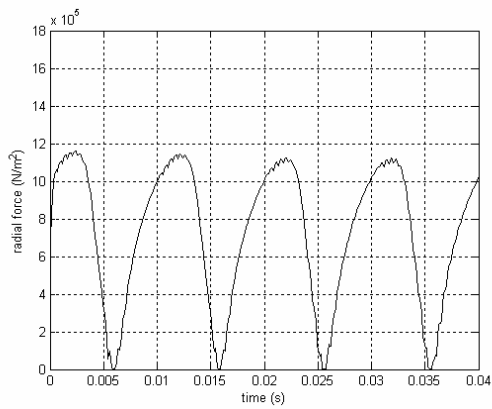
(j)



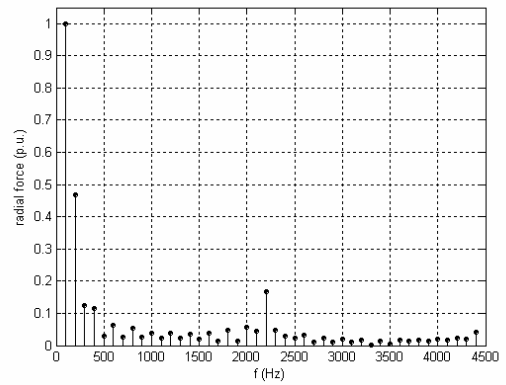
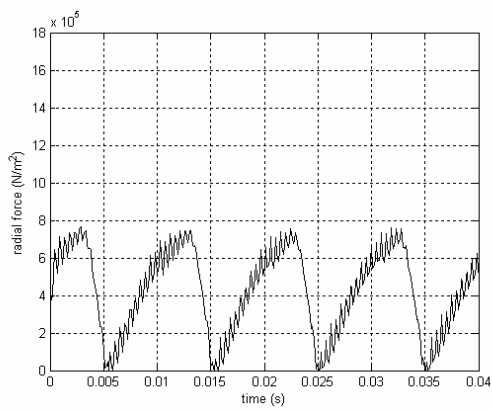
(i)



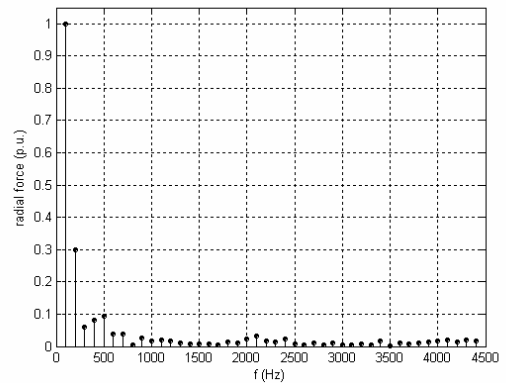
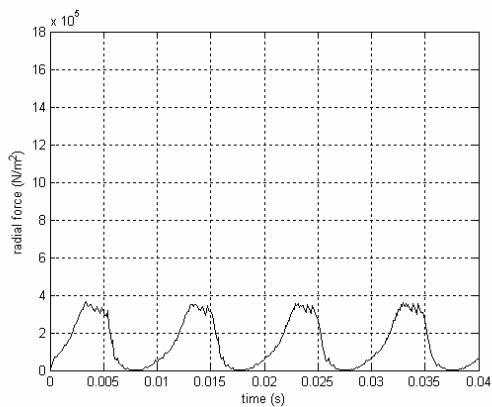
(l)



(ข)

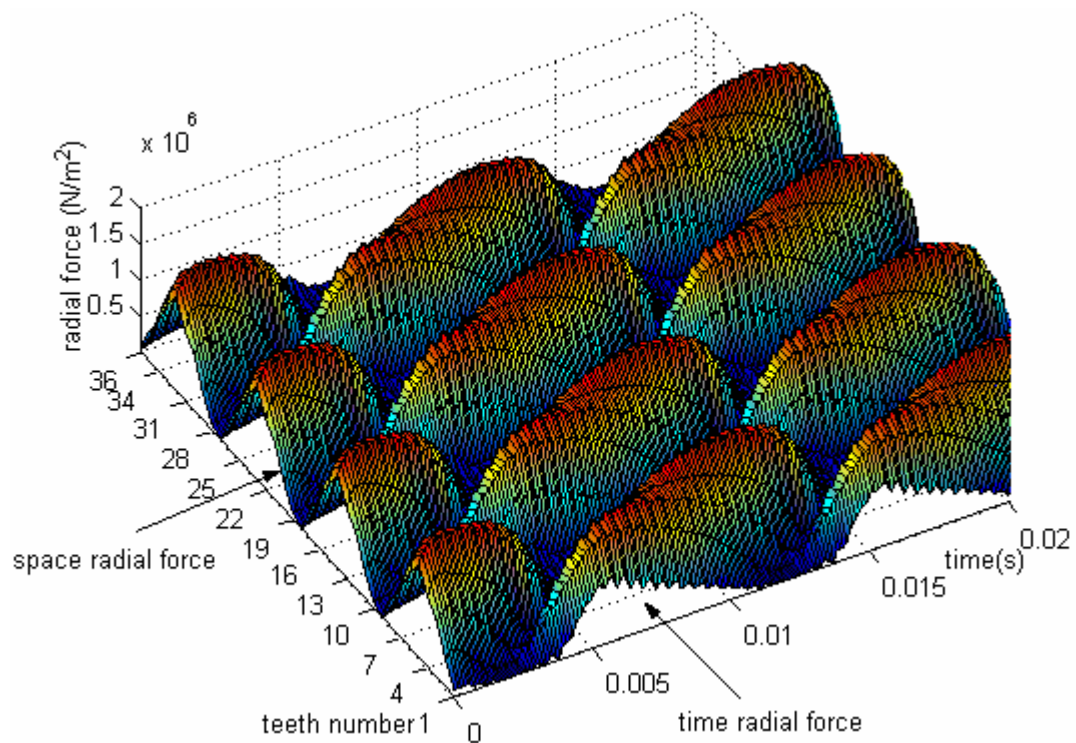


(ง)



(ฉ)

รูปที่ 7.16 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย
 ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 2, (ค) ซีที่ 3, (ง) ซีที่ 4, (จ) ซีที่ 5,
 (ฉ) ซีที่ 6, (ช) ซีที่ 7, (ซ) ซีที่ 8 และ (ฉ) ซีที่ 9

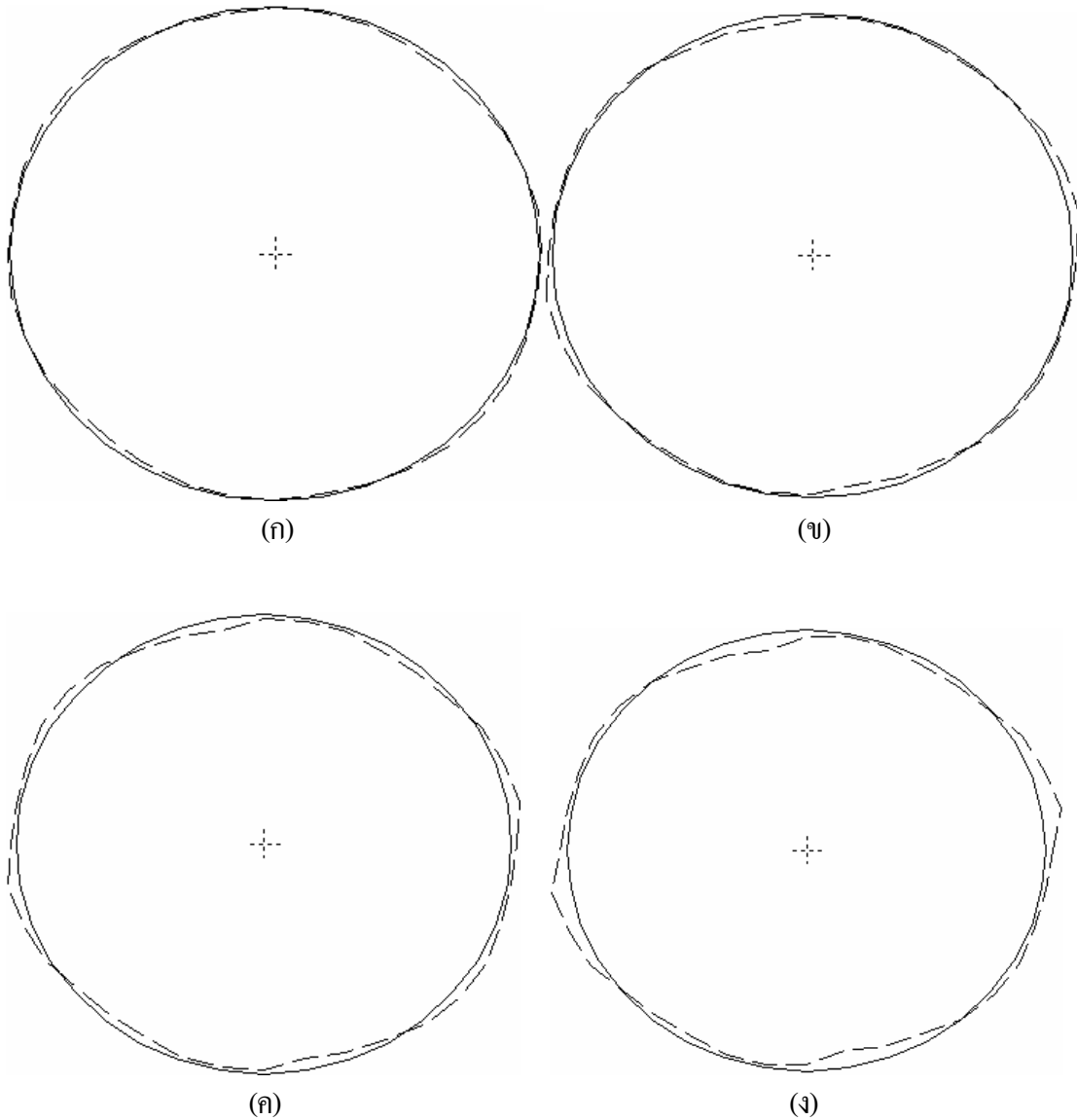


รูปที่ 7.17 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

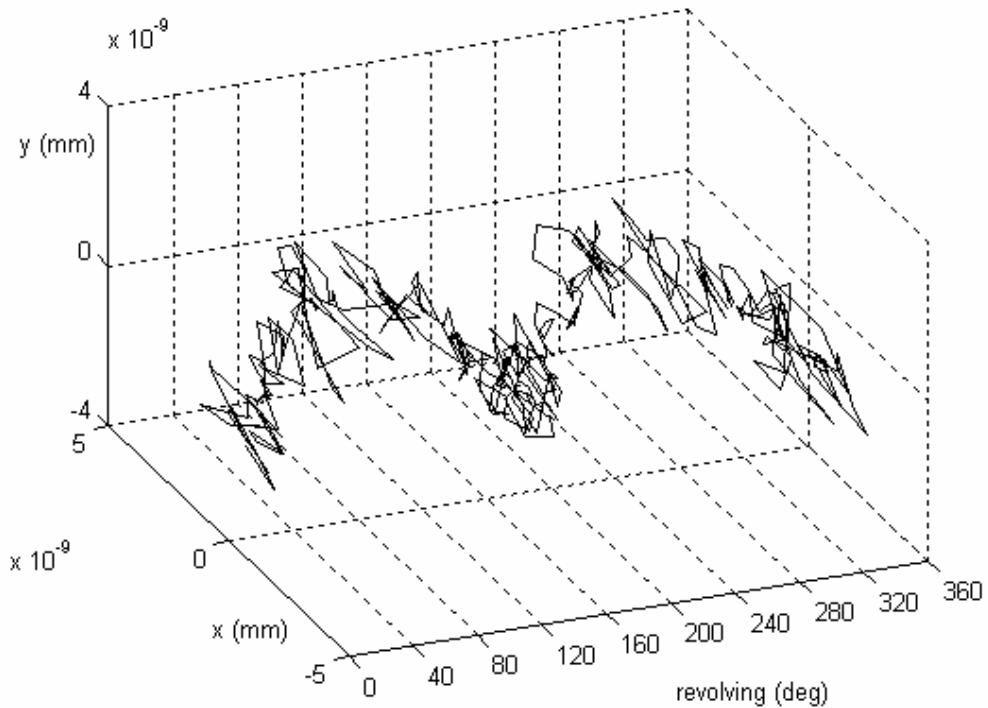
7.4.2 ผลและอภิปรายผลการสั้นสะเทือน

การคำนวณขนาดของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ปรากฏผลของการสั้นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.18 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนน้อยกว่ากรณีการใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม แต่จะมีค่าดังกล่าวมากกว่ากรณีการใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยมีค่าเท่ากับ 6.2251×10^{-8} mm และ 1.1721×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.12 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั้นสะเทือนจากผลในหัวข้อย่อยข้างต้น ส่วนผลของการสั้นสะเทือนเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยโดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนดังแสดงในรูปที่ 7.19 จะมีขนาดของการสั้นที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อ

พิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนเท่ากับ 1.5379×10^{-9} mm ซึ่งน้อยกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.5609×10^{-9} mm แต่จะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก



รูปที่ 7.18 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ



รูปที่ 7.19 การกระจัดของศูนย์กลางเพลลาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

7.5 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและอัตราเร็ว (torque-speed curve: เส้นโค้ง T-S) เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ในการนำมาใช้งานตามชั้นคุณสมบัติ (class) ต่างๆ ที่มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะร่องของโรเตอร์ สามารถศึกษาได้โดยอาศัยสมการทางกลซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (7-1) (Kim and Kwon, 1999) และ (Ho, Li, Fu, and Wong, 2000)

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = T_E - T_L \quad (7-1)$$

โดยที่ ω_R คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/sec) = $\frac{d\theta_R}{dt}$, θ_R คือมุมของโรเตอร์

J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)

T_E คือแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (N.m)

T_L คือแรงบิดของโหลด (N.m)

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวดังสมการที่ (7-1) ได้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องไปหน้า (forward difference) (Kurihara and Rahman, 2004) จึงได้

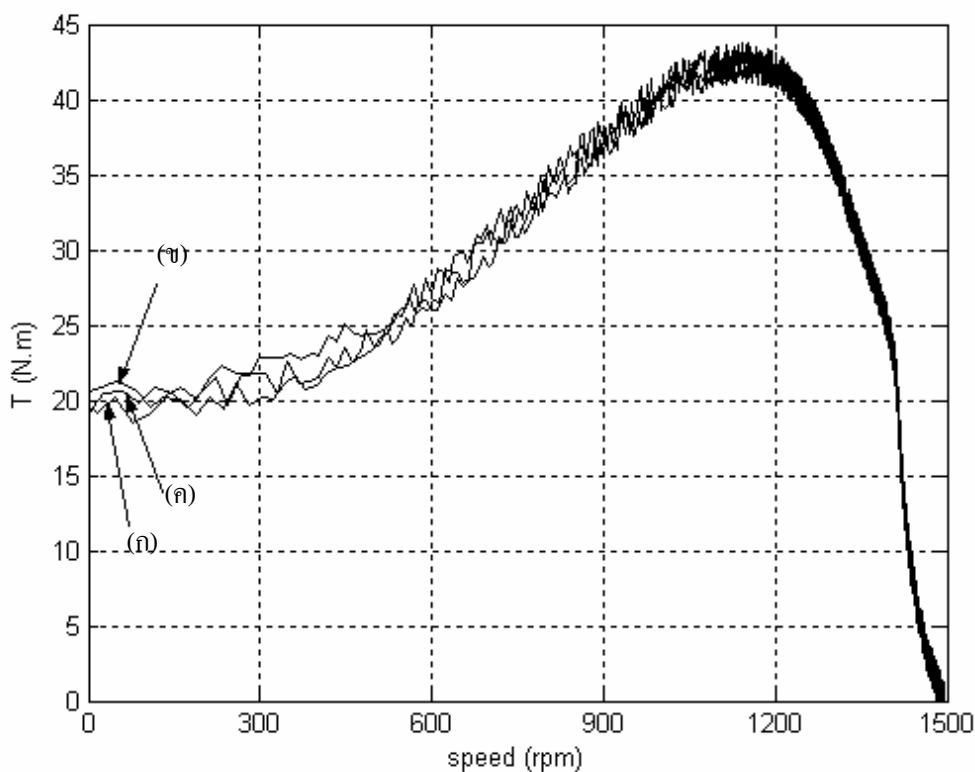
$$J \left(\frac{\omega_R^{t+\Delta t} - \omega_R^t}{\Delta t} \right) = T_E - T_L \quad (7-2)$$

จากสมการที่ (7-2) T_E หรือแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น เป็นผลที่ได้มาจากผลรวมของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส (F_t) จากโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก ที่กระทำในแต่ละอิลิเมนต์ของแท่งตัวนำในร่องโรเตอร์ทุกๆ ร่อง จำนวนทั้งหมด 44 ร่อง คูณด้วยรัศมี (r) ของแต่ละอิลิเมนต์ (e) นั่นๆ ดังแสดงด้วยสมการที่ (7-3)

$$\sum (F_t \times r)_e \quad (7-3)$$

เมื่อทราบค่า T_E จึงคำนวณความเร็ว ω_R ได้จากสมการที่ (7-2) เพื่อได้ซึ่งความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง T-S โดยเส้นโค้ง T-S ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่เหมาะสมเมื่อมอเตอร์เข้าสู่สถานะอยู่ตัวในสภาวะไร้โหลดแล้ว โดยเส้นโค้ง T-S เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมร่วมกับร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบ สามารถแสดงได้ด้วยกราฟดังรูปที่ 7.20 จะสังเกตเห็นได้จากเส้นโค้ง T-S ว่า มอเตอร์ไม่ว่าจะใช้ร่องโรเตอร์แบบใดที่กล่าวถึงข้างต้น ล้วนมีลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วที่ไม่แตกต่างกันมาก และยืนยันได้ว่าในกรณีของร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มอเตอร์มีลักษณะสมบัติตามขั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกับกรณีของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากร่องโรเตอร์แบบต่างๆ เหล่านี้ ถูกกำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน วัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์เป็นชนิดเดียวกัน ประกอบกับความลึกของร่องโรเตอร์ก็ไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นเส้นโค้ง T-S ของมอเตอร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำ จึงมีลักษณะสมบัติที่ใกล้เคียงกัน โดยจะขึ้นอยู่กับความลึกของร่องโรเตอร์ที่ใช้วางแท่งตัวนำเป็นส่วนหลัก ซึ่งจากรูปที่ 7.20 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์ที่มีความลึกลดลง ค่าแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่อง (starting torque: T_s) และแรงบิดสูงสุด (maximum torque or pullout torque: T_m) จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมจะมีค่า T_s และ T_m ต่ำที่สุด ในขณะที่ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่า T_s และ T_m สูงที่สุด โดยจะสอดคล้องกับคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งค่า T_s จะขึ้นอยู่กับความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของแท่งตัวนำโรเตอร์ โดยเปลี่ยนแปลงได้จากการเปลี่ยนขนาดของแท่งตัวนำให้ใหญ่หรือเล็กลง หรือ

อาจเลือกร่องโรเตอร์ให้ลึกหรือตื้นขึ้น ส่วนค่า T_m จะขึ้นอยู่กับรีแอคแตนซ์ของแท่งตัวนำอย่างเดียวกันเท่านั้น



รูปที่ 7.20 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ
(ก) แบบดั้งเดิม, (ข) แบบที่เหลี่ยมร่องลึก และ (ค) แบบฟันเลื่อย

7.6 อภิปรายและสรุป

การวิเคราะห์การสั้นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้น จะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพในแต่ละแบบประกอบกับผลลัพธ์ของการสั้นสะเทือนที่ปรากฏ ซึ่งในขั้นต้นสามารถสรุปได้ว่า การสั้นสะเทือนจะมีค่าลดลงเมื่อเลือกใช้ร่องโรเตอร์ที่ตื้นขึ้น ทั้งนี้เพราะร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบมีความลึกน้อยกว่าแบบดั้งเดิม โดยโรเตอร์ที่มีร่องลึกจะมีโอกาสเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (flux linkage) หรือรีแอคแตนซ์ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดการสั้นสะเทือนในปริมาณที่สูงกว่าร่องโรเตอร์แบบตื้น ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กรั่วนี้จะส่งผลให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์มีขนาดและฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น จึงทำให้ขนาดของการสั้นสะเทือนมีค่าสูงขึ้นตาม แต่การสั้นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ ไม่ได้มีแค่ปัจจัยหลักเพียงความลึกของร่องอย่างเดียวเท่านั้น ยังมีปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของ

รื่องประกอบด้วย ซึ่งปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตอาจมีผลต่อการสั้นน้อยกว่าปัจจัยทางด้านความลึกมาก ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากันในแต่ละร่อง และเส้นโค้ง T-S ของมอเตอร์ที่ต้องมีคุณลักษณะตามชั้นคุณสมบัติ B ดังนั้นในการออกแบบร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั้นสะท้อนจึงต้องคำนึงถึงความลึกของร่องซึ่งเป็นปัจจัยหลัก ควบคู่ไปกับปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของร่องด้วย แม้ว่าปัจจัยทางด้านความลึกของร่องโรเตอร์จะมีผลต่อขนาดของการสั้นสะท้อนในมอเตอร์ค่อนข้างมาก แต่ข้อจำกัดเส้นโค้ง T-S ของมอเตอร์ที่ต้องมีคุณลักษณะตามชั้นคุณสมบัติ B ควรต้องคำนึงถึงควบคู่กันไปด้วย โดยต้องอยู่ในข้อกำหนดของการออกแบบทั้งลดการสั้นสะท้อนและเส้นโค้ง T-S มีคุณลักษณะตรงตามชั้นคุณสมบัติ ดังนั้นในการออกแบบร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั้นสะท้อนจึงต้องคำนึงถึงเส้นโค้ง T-S ของมอเตอร์ที่เหมาะสมกับลักษณะของงานนั้นๆ ประกอบไปพร้อมกัน

ในบทที่ 7 นี้ ได้ดำเนินการออกแบบ พร้อมแสดงผลและอภิปรายผลของร่องโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและที่พัฒนาขึ้นสองรูปแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 7.8 และ 7.14 ตามลำดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดของการสั้นสะท้อนในมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลงกว่าเมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยที่แรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์ยังมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B ที่มีความยาวของร่องค่อนข้างลึก ซึ่งการกระจัดเฉื่อยที่เป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั้นสะท้อนในมอเตอร์จะมีค่าน้อยลงและยังคงรักษาลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบ ซึ่งร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมคิดเป็นร้อยละ 0.58 และ 0.12 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเลือกใช้ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่ปรากฏในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะได้ขนาดของการสั้นสะท้อนมีค่าต่ำที่สุด

บทที่ 8

การสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์

แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

8.1 บทนำ

การจำลองผลเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 7 ที่ผ่านมา ได้พิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อย่างเดียวนั่น ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบมอเตอร์ ในบทที่ 8 นี้ จึงเป็นการจำลองผลเพื่อคำนวณหาขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบ ดังที่ปรากฏในบทที่ 7 ได้แก่ แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก และแบบฟันเลื่อย โดยพิจารณาว่ามีการใช้อินเวอร์เตอร์มอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM inverter) และอินเวอร์เตอร์หกขั้ว (six-step inverter) เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่มอเตอร์ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แต่ละแบบ

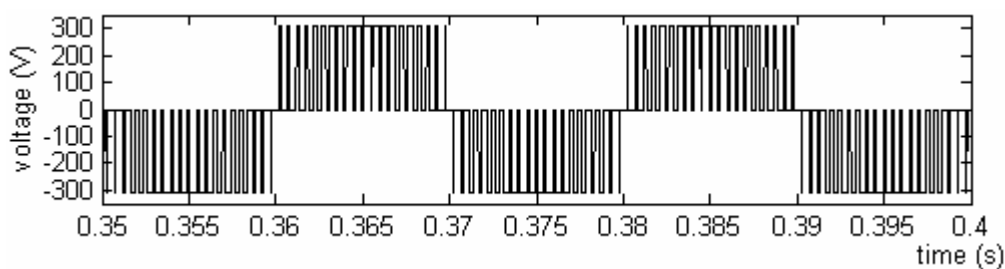
8.2 การคำนวณกระแสเมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ได้วัตถุประสงค์ตามต้องการ ทั้งทางด้านความเร็ว แรงบิด และประสิทธิภาพในการหมุน สามารถใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสในการควบคุม โดยอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อควบคุมขนาดและความถี่ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้กับมอเตอร์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source inverter: VSI) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับขับโหลดมอเตอร์ โดยแบ่งออกเป็นอินเวอร์เตอร์มอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse-width-modulation inverter: อินเวอร์เตอร์แบบ PWM) และอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว (six-step inverter) การคำนวณกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทาง

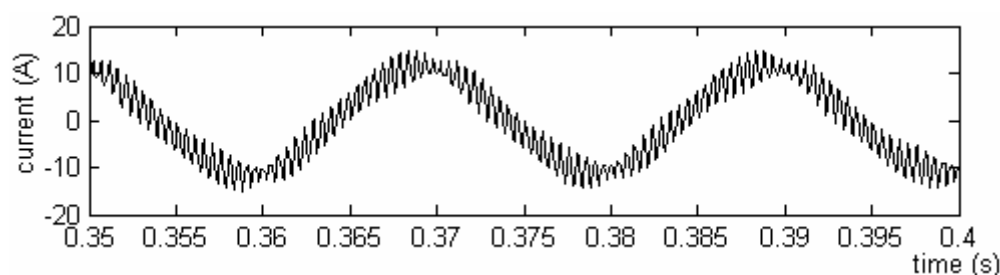
กล ดังแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ของบทที่ 6 โดยผลการคำนวณของกระแสเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ ได้แสดงรายละเอียดไว้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

8.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จังหวะการสวิตช์ทำได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันควบคุมรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่เอาต์พุตที่ต้องการ อ้างอิงกับสัญญาณพาหะ (carrier signal) รูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่สวิตซิงที่ต้องการ ซึ่งรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ปรากฏ จะขึ้นอยู่กับ การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรสำหรับการมอดูเลต (modulation) ของสัญญาณคลื่นไซน์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีค่าแรงดันต่อเฟสในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 220 Vrms ดังแสดงด้วยรูปที่ 8.1(ก) ซึ่งเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในกรณีที่พิจารณาแหล่งจ่ายไฟมีรูปคลื่นไซน์ดังที่ผ่านมาแล้วในบทที่ 7 เพื่อเป็นข้อกำหนดเดียวกันสำหรับเปรียบเทียบการสันสะเทือนในมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายไฟคนละชนิดกัน ซึ่งจากการคำนวณจึงได้ผลลัพธ์ของกระแสต่อเฟสในสถานะอยู่ตัวเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM แสดงได้ดังรูปที่ 8.1(ข)



(ก)



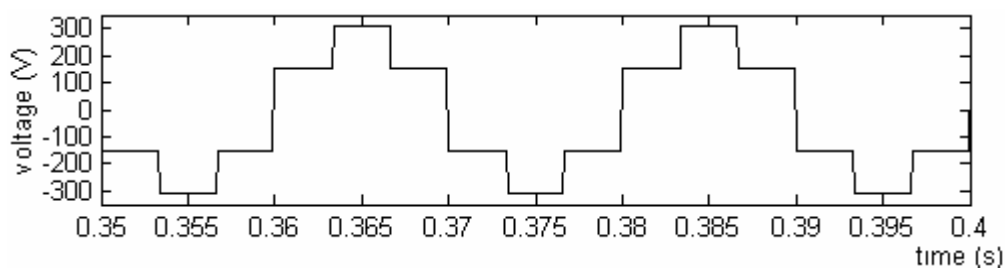
(ข)

รูปที่ 8.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

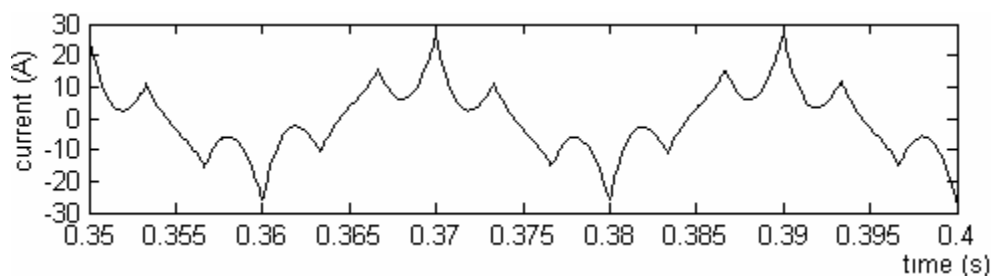
(ก) แรงดันเอาต์พุต และ (ข) กระแสเอาต์พุต

8.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานอยู่ในโหมดการสวิตช์แบบรูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม (square-wave mode) ซึ่งเหมาะกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายได้ เพื่อใช้ในการปรับระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีหกขั้วภายในหนึ่งคาบ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วมีค่าแรงดันต่อเฟสในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 220 Vrms เช่นเดียวกับกรณีที่พิจารณาแหล่งจ่ายอื่นๆ ในข้างต้น รูปคลื่นแรงดันจากอินเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 8.2(ก) และมีผลลัพท์การคำนวณกระแสต่อเฟสในสถานะอยู่ตัวแสดงไว้ในรูปที่ 8.2(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

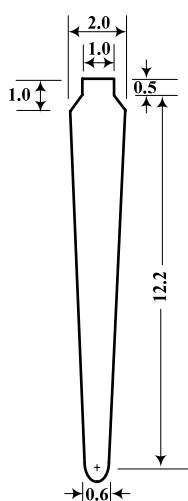
(ก) แรงดันเอาต์พุต และ (ข) กระแสเอาต์พุต

ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้มอเตอร์ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ จะส่งผลให้การสั่นสะเทือนในมอเตอร์มีค่ามากขึ้น (Alfredo and Carlos, 1994) และ (Yacamini and Chang, 1995) โดยพิจารณาได้จากการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการสั่นสะเทือน เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดการสั่นสะเทือน ซึ่งได้แก่แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและแบบฟันเลื่อย ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 7

รายละเอียดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

8.3 การใช้ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

การดำเนินการศึกษาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการสั่นสะเทือน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.1 และนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังรูปที่ 8.3 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะอาศัยการจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ โดยทางไฟฟ้าจะแสดงถึงศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กซึ่งได้รับการเสนอในรูปแบบคอนทัวร์ให้เห็นถึงวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ พร้อมทั้งค่าสนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศอันเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แต่ละแบบ ส่วนทางกลจะแสดงถึงผลลัพธ์ของการกระจัดที่เกิดขึ้นอันเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์ทั้งแบบเป็นอิลิเมนต์ซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั่นในรูปแบบของการบิดเบี้ยวของสเตเตอร์ และแบบเป็นก้อนซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั่นทั้งระบบโดยรวม เพื่อเปรียบเทียบผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ทั้งแบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ รวมถึงแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่แสดงรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 7

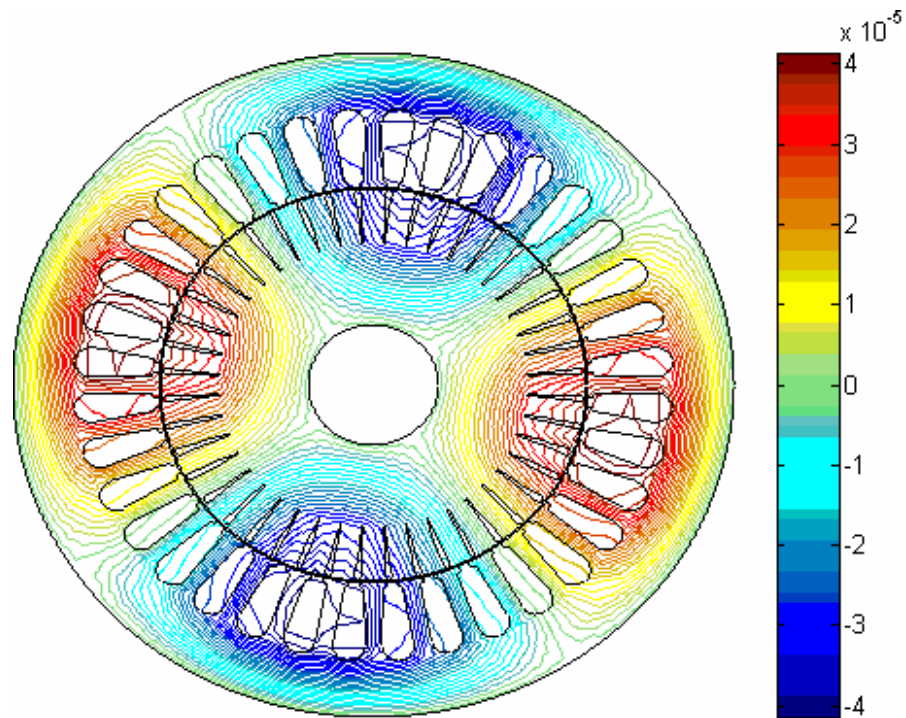


รูปที่ 8.3 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและมีติ (mm)

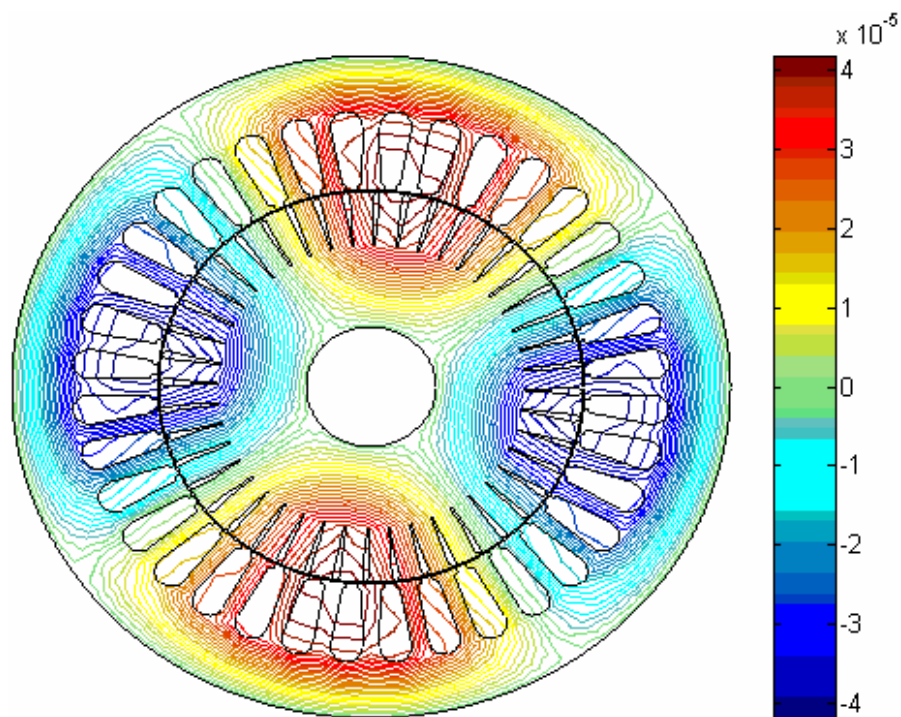
8.3.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ดังแสดงไว้ในบทที่ 7 ทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 8.4 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ซึ่งปรากฏให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไป ประกอบกับเส้นแรงแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุน โดยเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟทั้งแบบรูปคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายไฟอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ต่างก็มีวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กและขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อคำนวณหาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี (F_r) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ กลับให้ผลลัพธ์ปรากฏออกมาค่อนข้างแตกต่างกันมาก โดยค่า F_r เทียบกับเวลาที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เฉพาะในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 จากทั้งหมด 36 ซี่ (รูปคลื่น F_r จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 9 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก) ของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดแสดงได้ในรูปที่ 8.5 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า กราฟของ F_r เทียบกับเวลา จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครั้งคลื่นบวกและมีขนาดของ F_r ไม่ต่างกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์มากนัก แต่จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในด้านความราบเรียบของการกระจายตัวของ F_r โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM รูปคลื่นของ F_r เทียบกับเวลาจะมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบคล้ายฟันเลื่อยสูงกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ โดยค่า THD ที่ใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกที่เป็นตัวแทนสำหรับวัดค่าความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีค่าเท่ากับ 105.30%, 39.10%, 47.42%, 51.91%, 52.79%, 53.41%, 60.90%, 115.19% และ 135.58% ตามลำดับ ซึ่งทุกซี่จะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงประมาณ 2,000 Hz ปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นจำนวนเท่าตามอัตราส่วนมอดูเลต (modulation ratio) ของสัญญาณ PWM ในแหล่งจ่ายไฟ (อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ใช้สำหรับจำลองผลในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าอัตราส่วนมอดูเลตเท่ากับ 20) โดยได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 73.51% ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่มีค่า 43.27% อยู่ค่อนข้างมาก หรือเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างยิ่งขึ้น จึงแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาประกอบการกระทำที่ฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM แสดงไว้ในรูปที่ 8.6 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีความแตกต่างค่อนข้างมาก

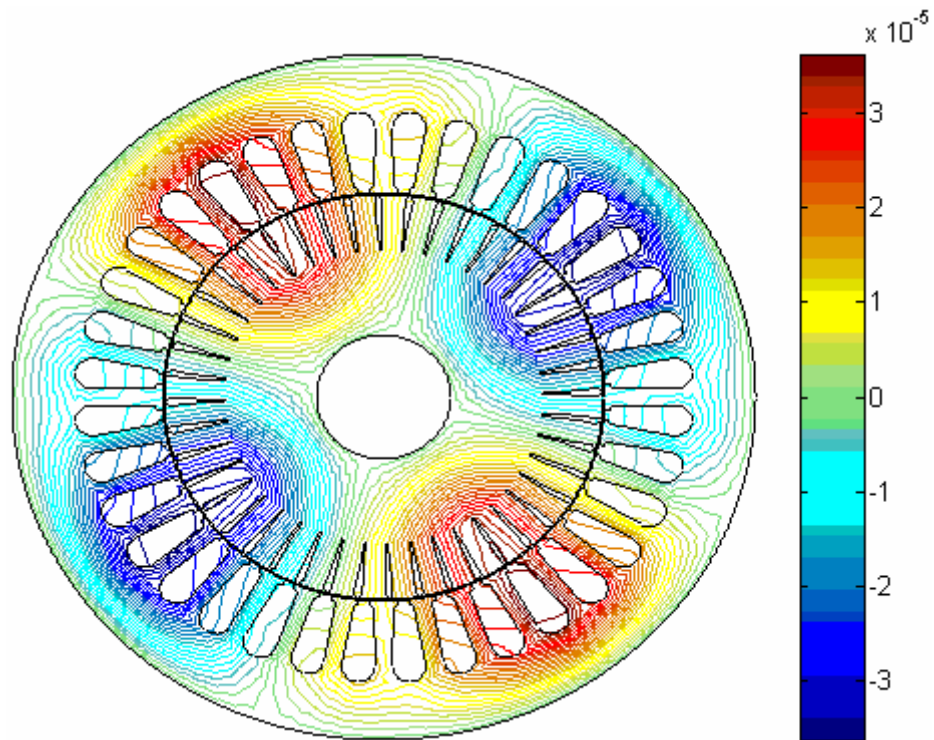
เมื่อเทียบกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ดังที่แสดงไว้ด้วยรูปที่ 7.5 ของบทที่ 7 ซึ่งความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r ที่แตกต่างกันนี้ จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของการสันสะเทือนดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไป



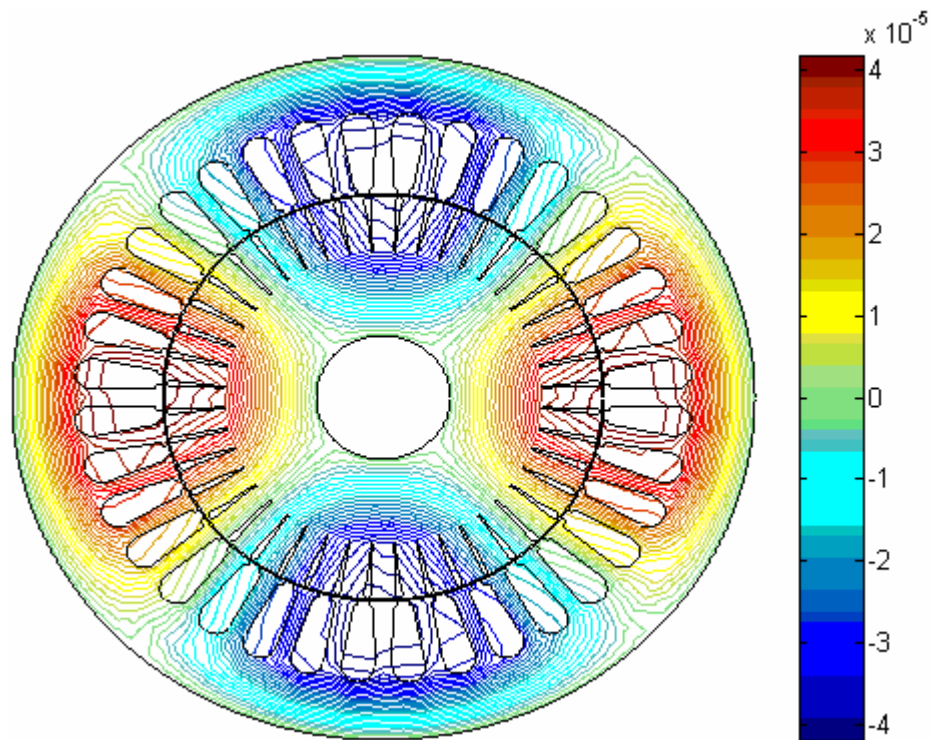
(ก)



(ข)

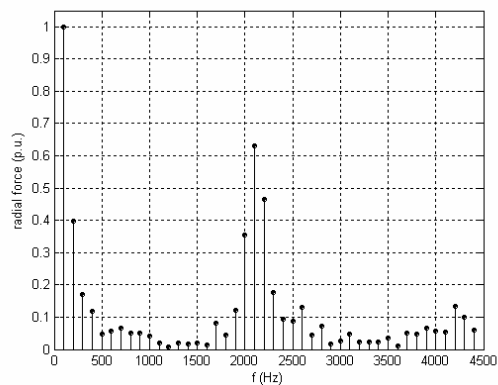
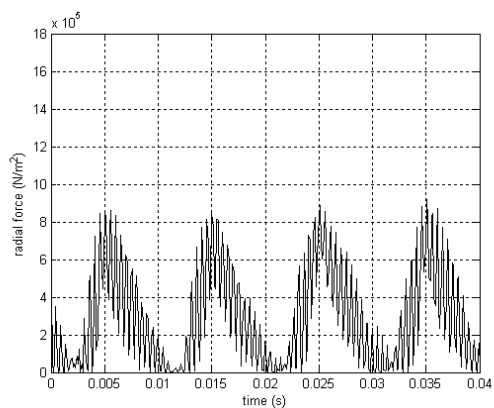


(ค)

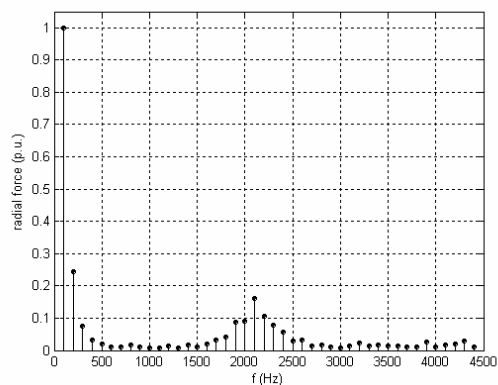
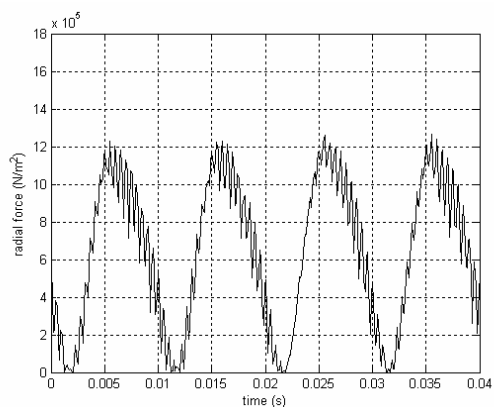


(ง)

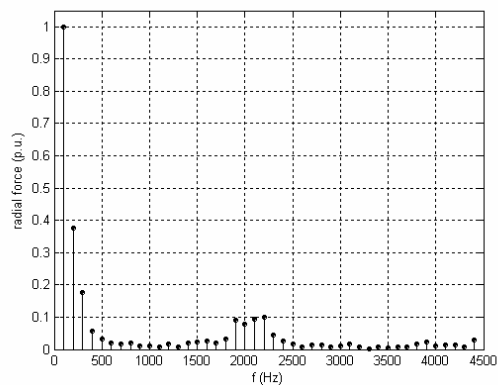
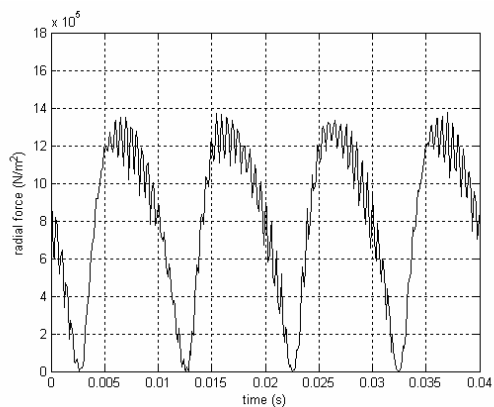
รูปที่ 8.4 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0°, (ข) 60°, (ค) 120° และ (ง) 180°



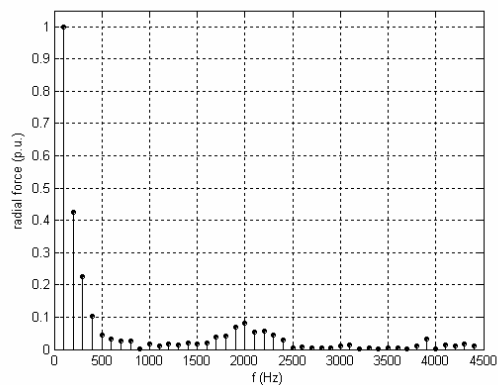
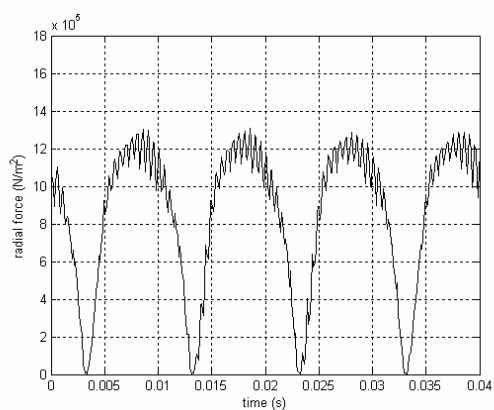
(f)



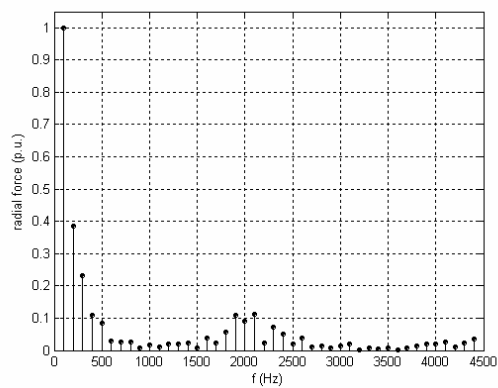
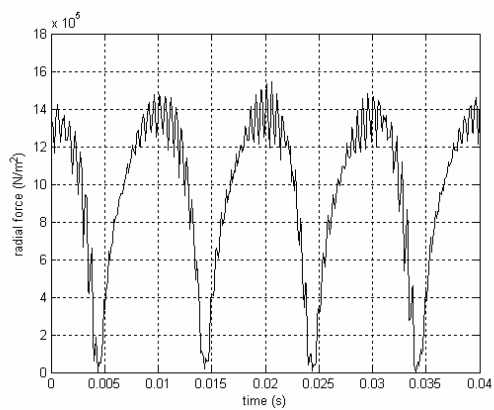
(g)



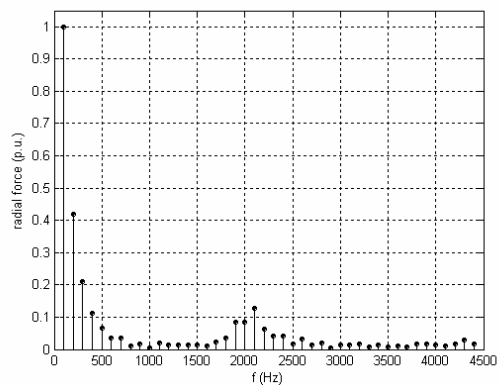
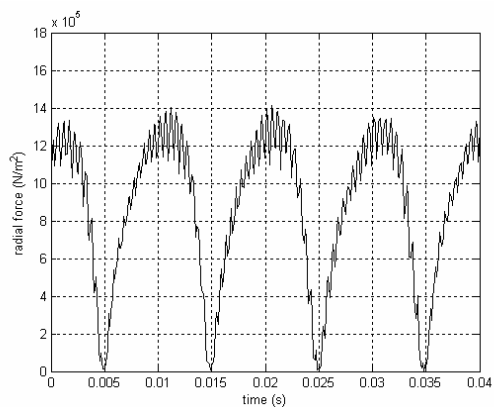
(h)



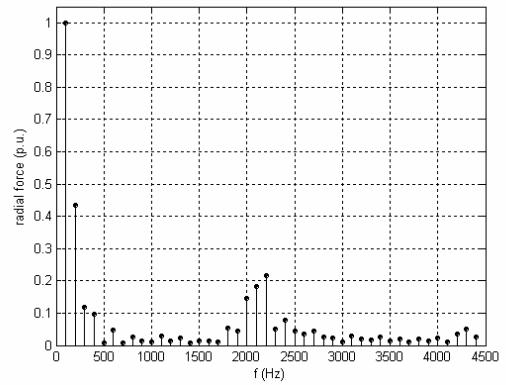
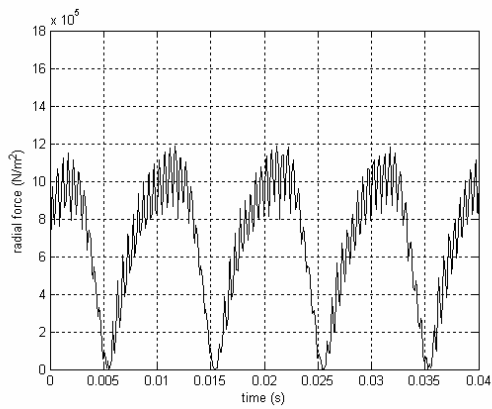
(j)



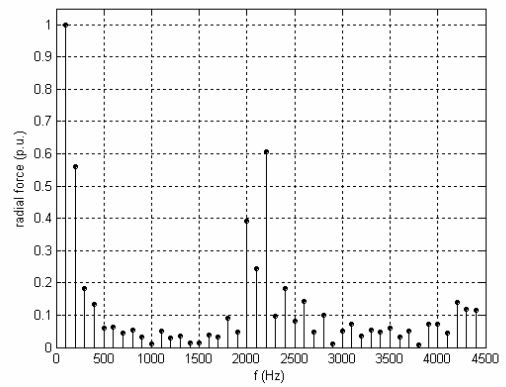
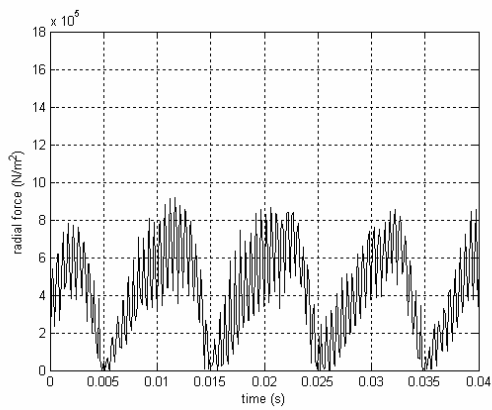
(i)



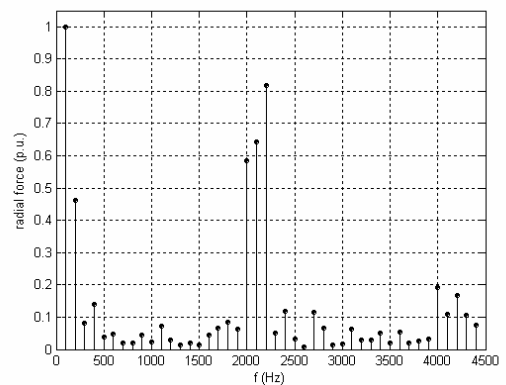
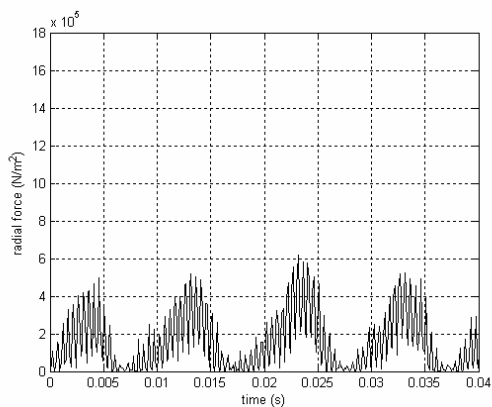
(h)



(ข)

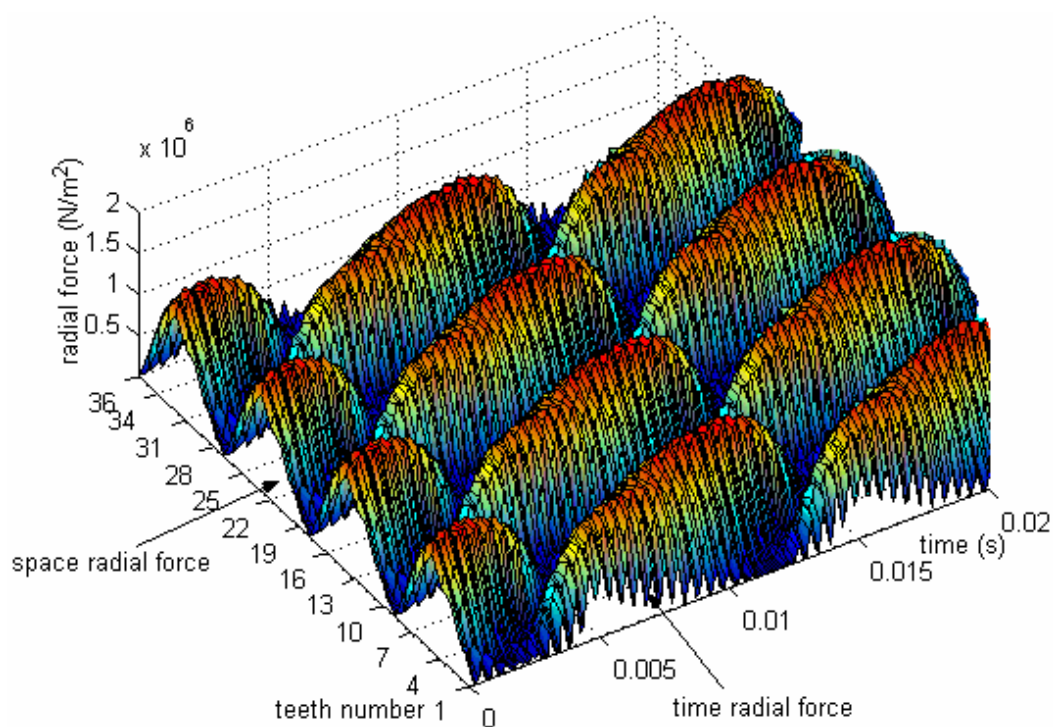


(ง)



(ฉ)

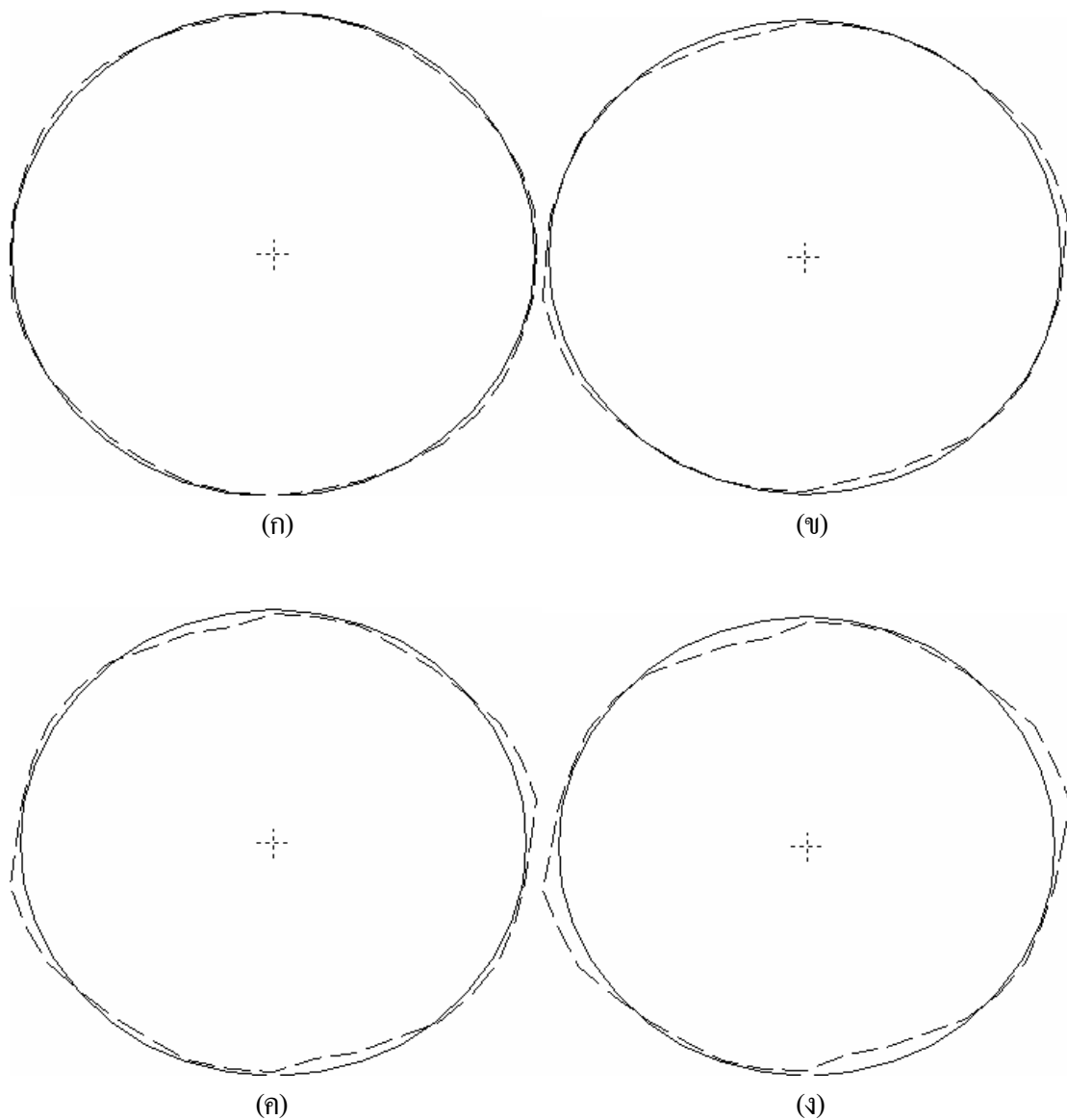
รูปที่ 8.5 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี
 พิจารณาร่อง โรเตอร์แบบคั้งเดิมที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2,
 (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5, (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8 และ (ฉ) ซี่ที่ 9



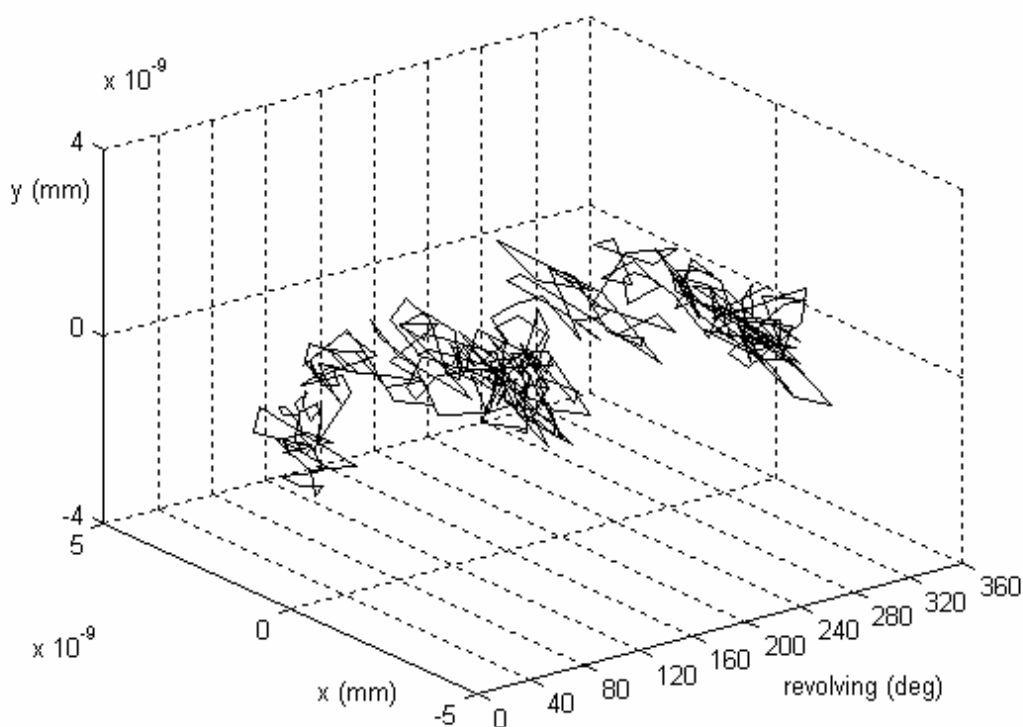
รูปที่ 8.6 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะคำนวณทั้งในกรณีที่พิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์และเป็นแบบก้อนเช่นเดียวกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ดังแสดงไว้ในบทที่ 7 โดยกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ที่ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 8.7 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของการกระจัดที่ครอบคลุมตลอดทั้งวงรอบด้านในของสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนจนครบ 1 รอบ โดยเส้นประแสดงถึงการกระจัดที่ผิดรูปไปด้วยอัตราขยาย 10^4 เท่า จากตำแหน่งปกติซึ่งแทนด้วยเส้นทึบ การพิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลรวมขนาดของการกระจัดในแวนซ์มี ตลอดทั้งวงรอบด้านในของสเตเตอร์ที่บิดเบี้ยวไปจากเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ควบคู่กับค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นตัววัดการกระจายของการกระจัดในแต่ละรอบ ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 7 โดยจากรูปที่ 8.7 จะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในของสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ดังที่แสดงไว้ด้วยรูปที่ 7.6 ของบทที่ 7 โดยจะมีความแตกต่างกันตรงขนาดของวงรอบอยู่พอสมควร ซึ่งร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่มากกว่าเมื่อใช้

แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีค่าเท่ากับ 6.9341×10^{-8} mm และ 1.6696×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 11.26 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากที่แสดงไว้ในข้างต้น ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 8.8 ซึ่งแสดงได้ด้วยการกระจัดของศูนย์กลางเพลลาสูทิตตามแนวแกน x และ y ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของมอเตอร์ การพิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์แบบเป็นก้อน จะพิจารณาจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของการกระจัดเมื่อมอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 7 ซึ่งเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีขนาดของการสั่นที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนเท่ากับ 1.6825×10^{-9} mm ซึ่งมากกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่มีค่า 1.5609×10^{-9} mm อยู่คิดเป็นร้อยละ 7.8



รูปที่ 8.7 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
 กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบคั้งเคิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป
 (ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

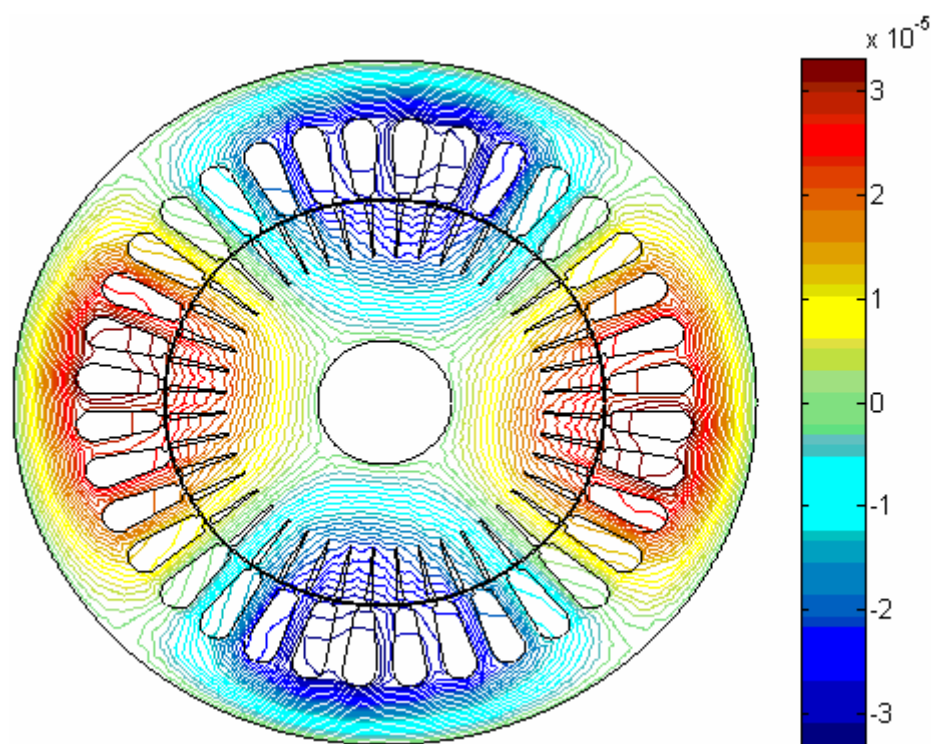


รูปที่ 8.8 การกระจายของศูนย์กลางเพลามือใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

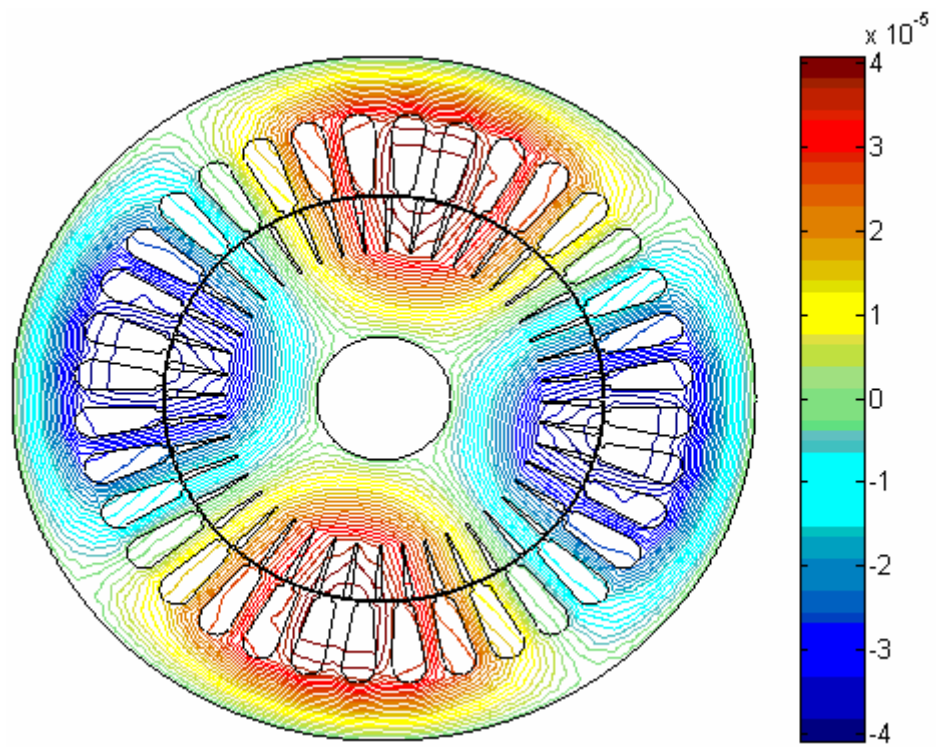
8.3.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่แสดงรายละเอียดไว้ในข้างต้น โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 8.9 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ได้แสดงไว้ในข้างต้น แต่เมื่อคำนวณหาค่า F_r กลับให้ผลลัพธ์ปรากฏออกมาค่อนข้างแตกต่างกันมาก โดยค่า F_r เทียบกับเวลาของร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดแสดงได้ในรูปที่ 8.10 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า กราฟของ F_r เทียบกับเวลา จะมีลักษณะเป็นคาบที่รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่ได้จากการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบอื่นดังที่แสดงไว้ในข้างต้นค่อนข้างมาก และมี

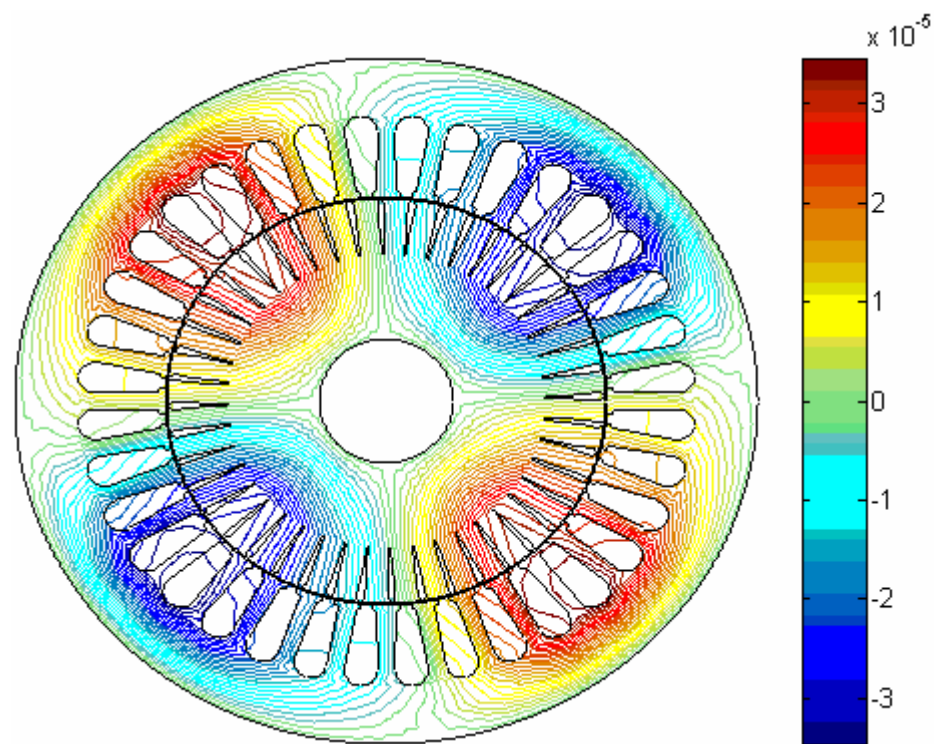
แอมพลิจูดของ F_r ก่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟแบบอื่น โดยค่า THD เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับมีค่าเท่ากับ 65.46%, 69.77%, 98.08%, 117.90%, 82.20%, 79.17%, 73.22%, 67.49% และ 49.40% ตามลำดับ ซึ่งได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 78.08% ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่มีค่า 43.27% อยู่ค่อนข้างมาก และสูงกว่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีค่า 73.51% อยู่บ้างไม่มากนัก หรือเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างยิ่งขึ้น จึงแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาประกอบกับการกระทำที่ฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับแสดงไว้ในรูปที่ 8.11 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับที่มีความแตกต่างค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟแบบอื่นที่ได้แสดงไว้แล้วในข้างต้น



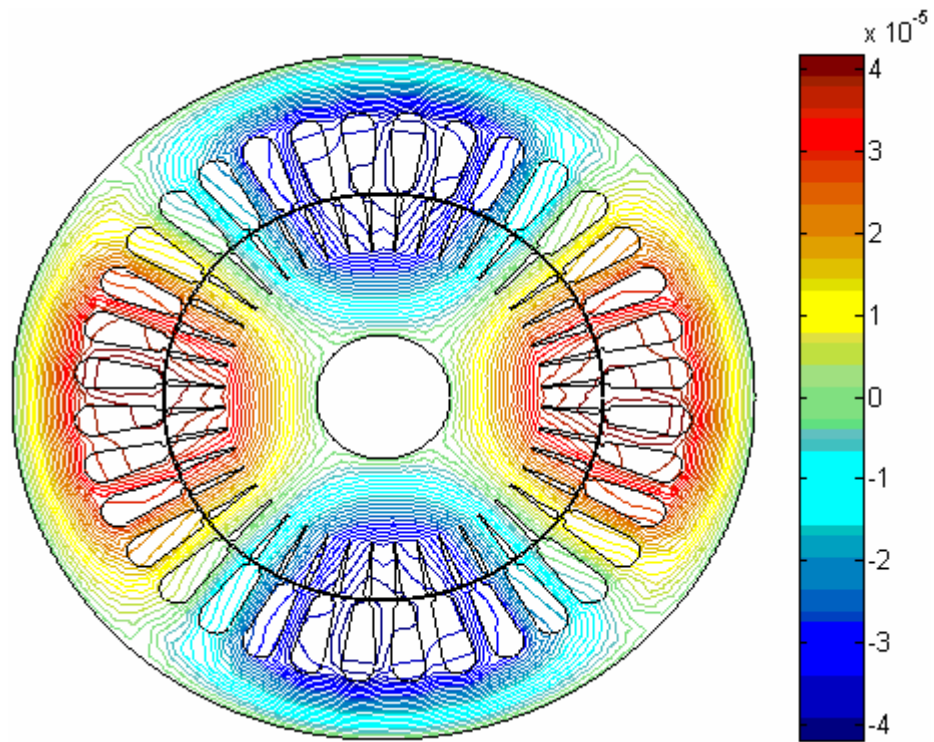
(ก)



(a)

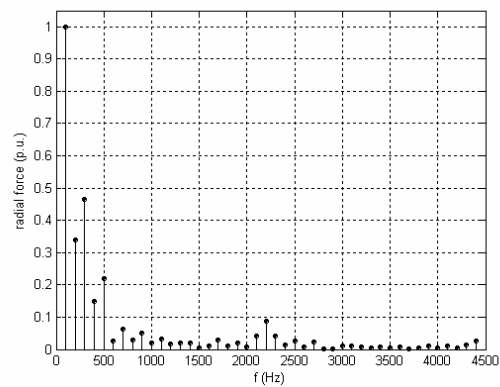
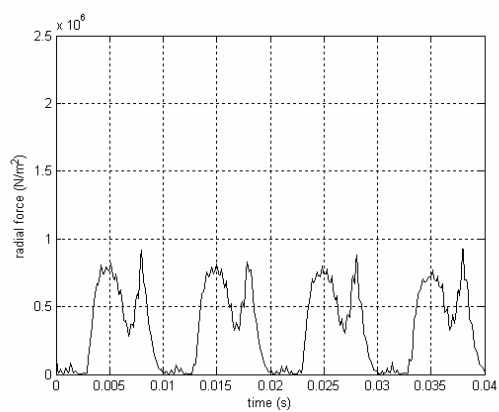


(b)

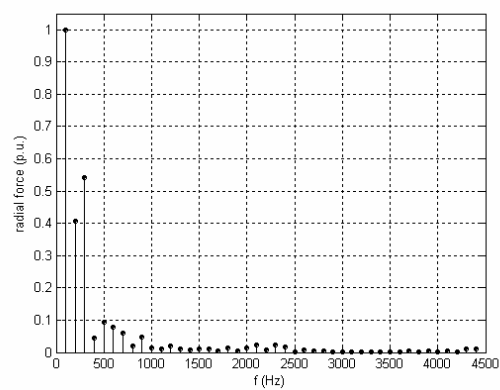
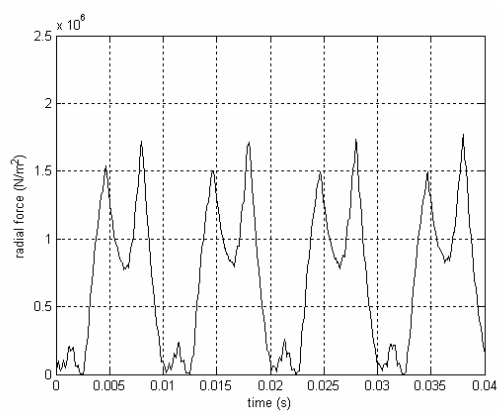


(ง)

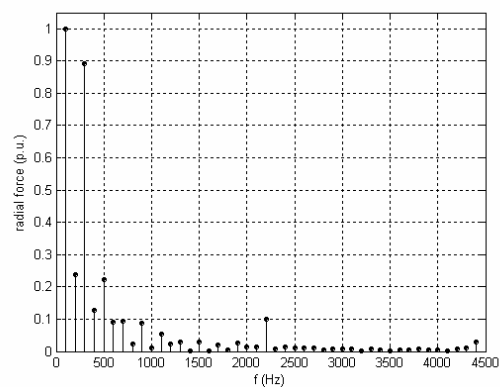
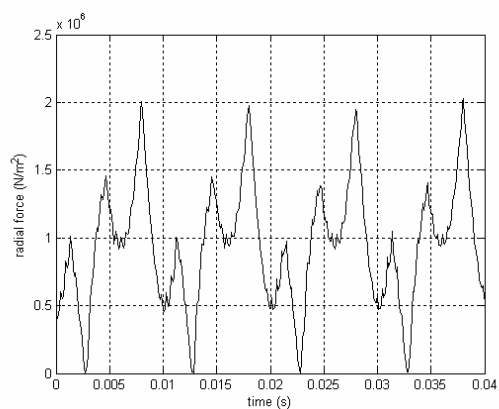
รูปที่ 8.9 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม
เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



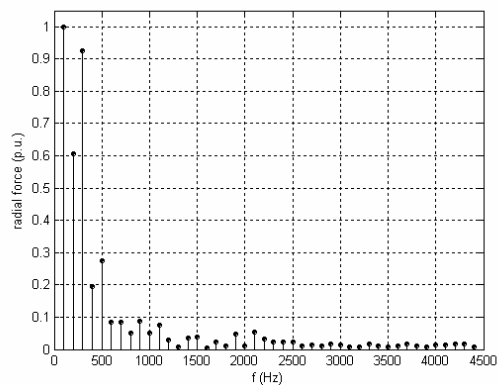
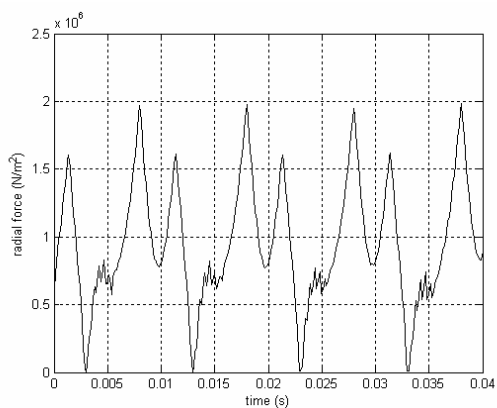
(f)



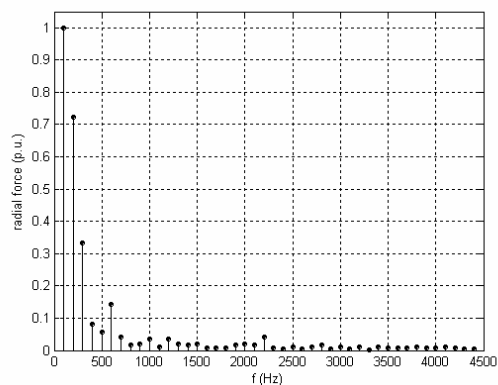
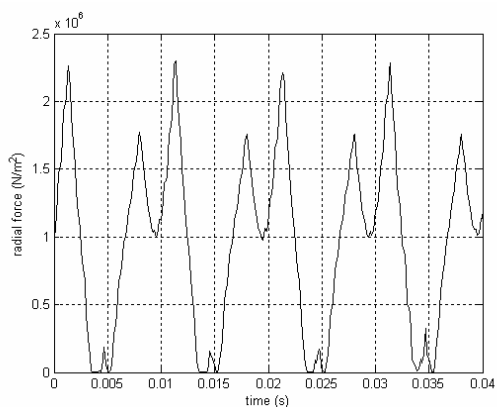
(g)



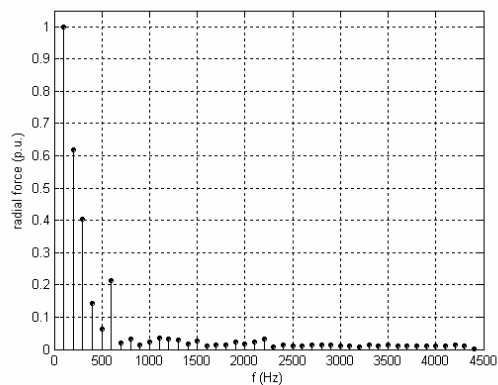
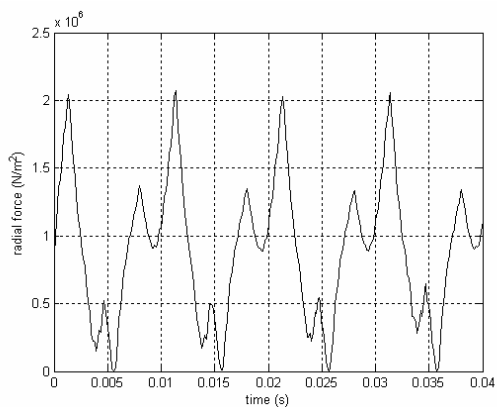
(h)



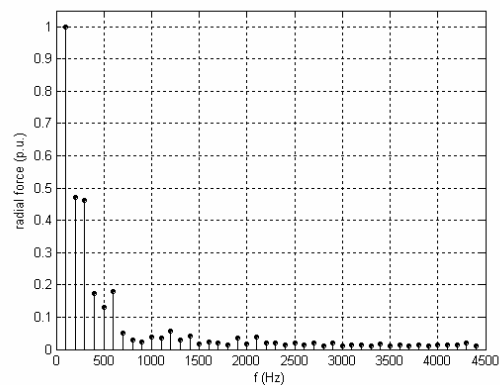
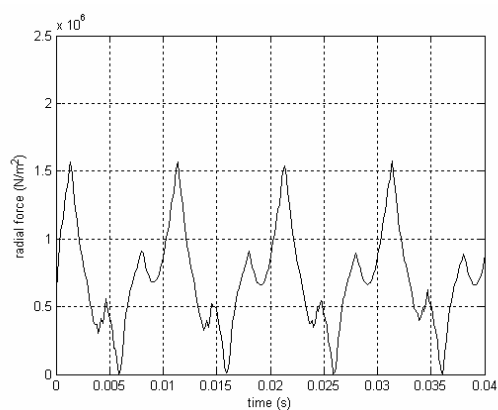
(j)



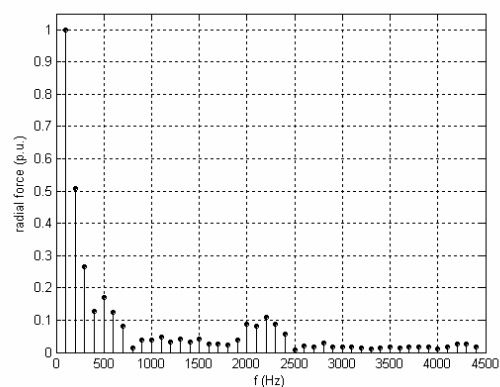
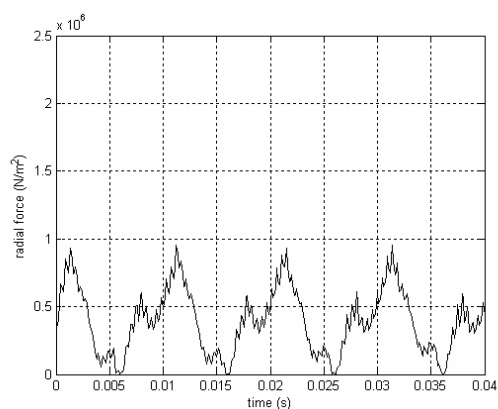
(i)



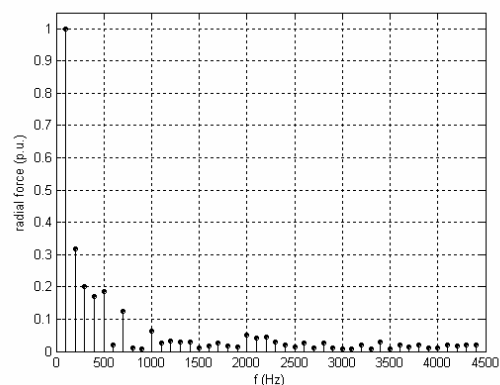
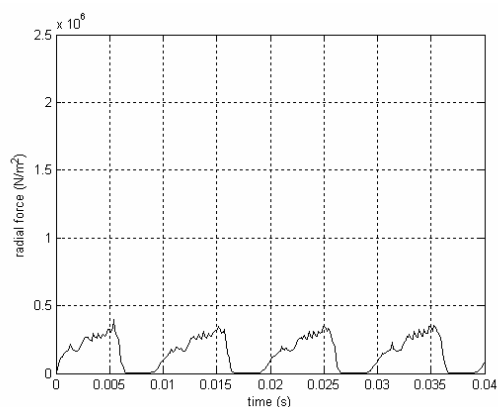
(h)



(ข)

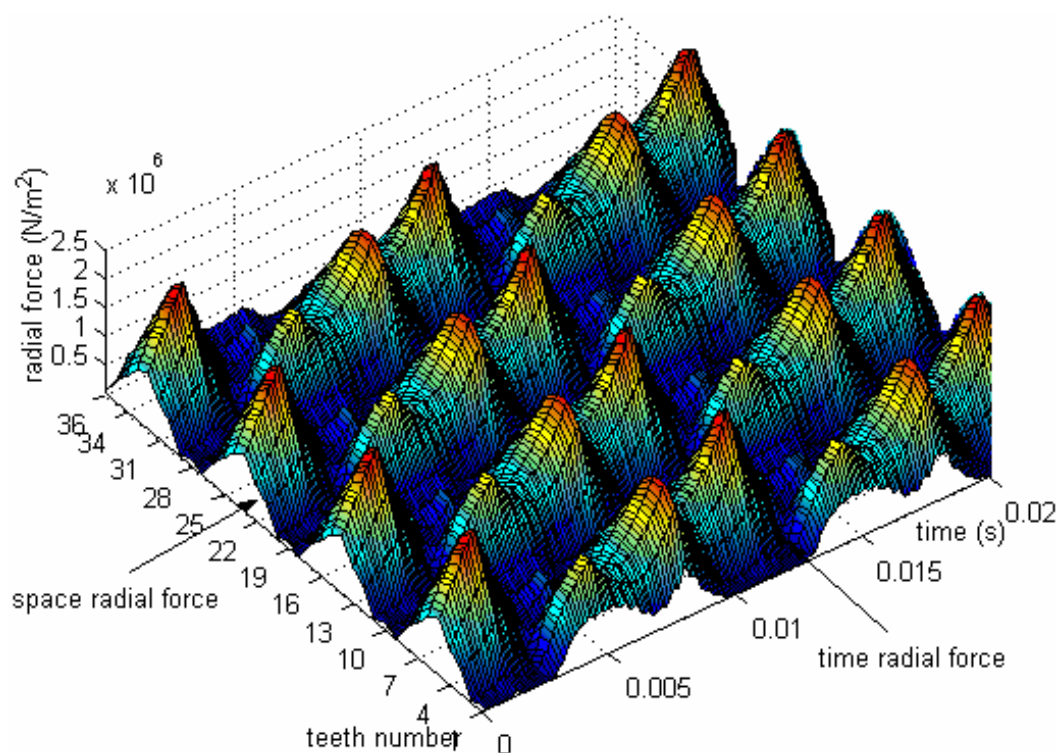


(ง)



(ฉ)

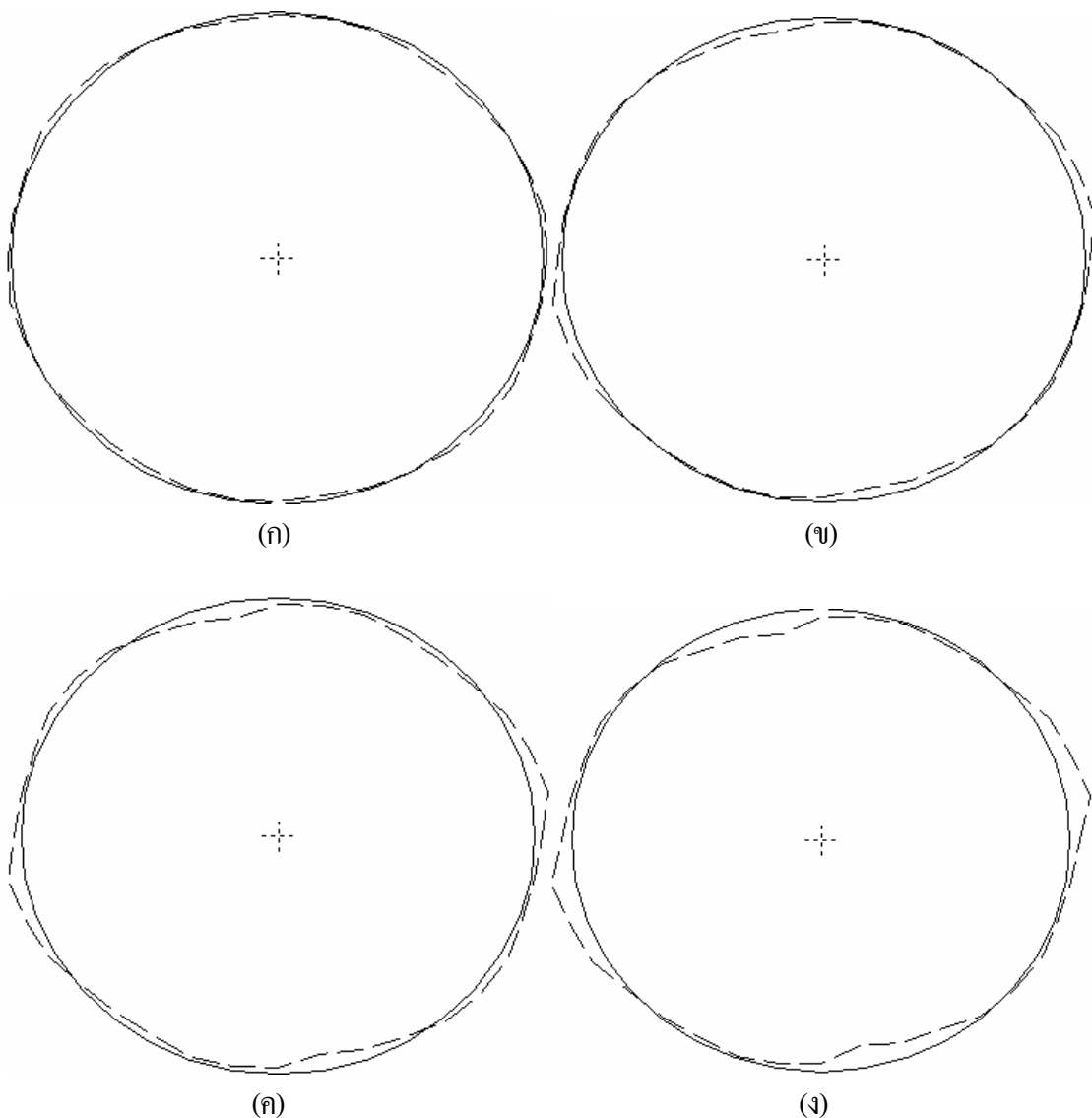
รูปที่ 8.10 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณี
 พิจารณารองโรเตอร์แบบคั้งเดิมที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 2,
 (ค) ซีที่ 3, (ง) ซีที่ 4, (จ) ซีที่ 5, (ฉ) ซีที่ 6, (ช) ซีที่ 7, (ซ) ซีที่ 8 และ (ฉ) ซีที่ 9



รูปที่ 8.11 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

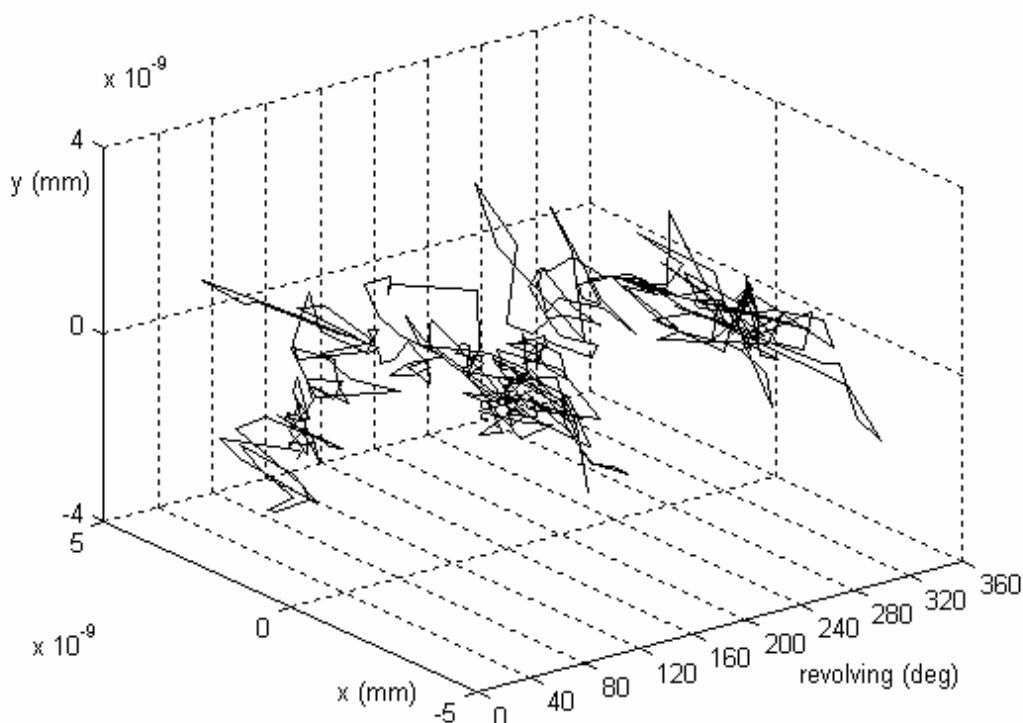
การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะคำนวณทั้งในกรณีที่พิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์และเป็นแบบก้อนเช่นเดียวกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่แสดงรายละเอียดไว้ในข้างต้น โดยกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ที่ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 8.12 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดังที่แสดงไว้ในข้างต้น โดยจะมีความแตกต่างกันตรงขนาดของวงรอบอยู่พอสมควร ซึ่งร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่มากกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ มีค่าเท่ากับ 7.1249×10^{-8} mm และ 1.8327×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 14.32 และ 2.75 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ตามลำดับ ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน

จากที่แสดงไว้ในข้างต้น ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนดังแสดงในรูปที่ 8.13 จะมีขนาดของการสั่นที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอสิเมนต์ โดยเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนเท่ากับ 1.7621×10^{-9} mm ซึ่งมากกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีค่า 1.5609×10^{-9} mm และ 1.6825×10^{-9} mm ตามลำดับ



รูปที่ 8.12 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนไป

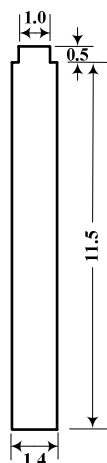
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ



รูปที่ 8.13 การกระจัดของศูนย์กลางเพลามาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาโรเตอร์แบบดั้งเดิม

8.4 การใช้โรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

การดำเนินการศึกษาเมื่อพิจารณาโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก ที่ออกแบบรูปร่างร่องขึ้นใหม่เพื่อลดผลของการสั่นสะเทือน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.8 และนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังรูปที่ 8.14 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะอาศัยการจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เช่นเดียวกับการพิจารณาโรเตอร์แบบดั้งเดิม ดังที่ได้เคยอธิบายแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ทั้งแบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ รวมถึงแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์เมื่อพิจารณาโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละกรณีที่มีแหล่งจ่ายไฟต่างกันและรูปร่างร่องแต่ละแบบ

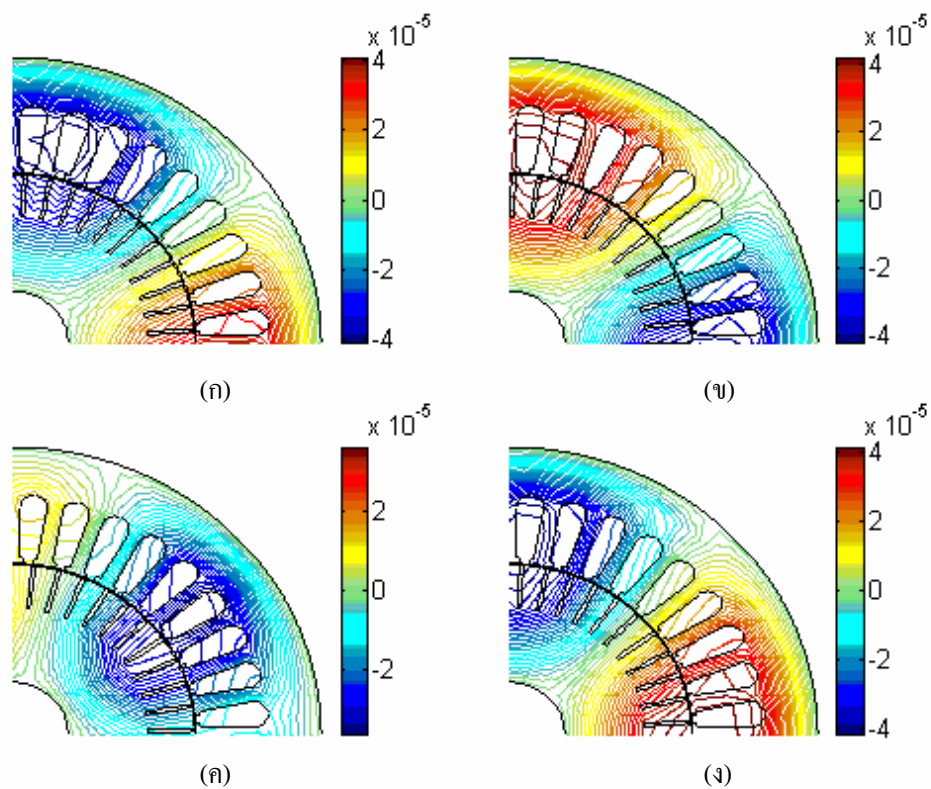


รูปที่ 8.14 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและมีติ (mm)

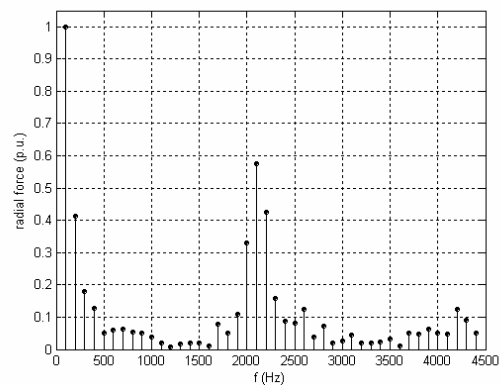
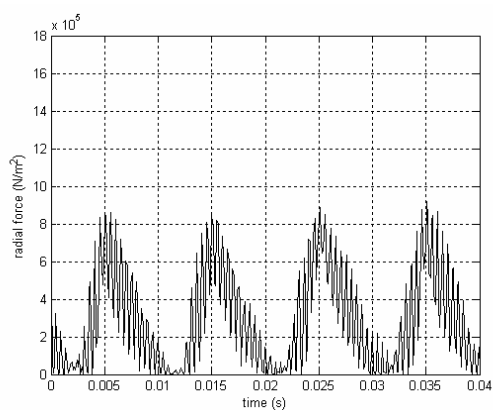
8.4.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 8.15 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์บนพื้นที่หน้าตัดเพียง $1/4$ ของมอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมดังที่ได้เคยนำเสนอผ่านมา ซึ่งจะสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 8.16 ซึ่งแสดง F_r กระทบกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในซี่ที่ 1, 5 และ 9 กรณีที่ซี่อื่นๆ ก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบคล้ายฟันเลื่อยเหมือนที่ผ่านมามีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเพียงเล็กน้อย โดยสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มีค่า THD เท่ากับ 96.62%, 36.61%, 46.18%, 52.66%, 54.40%, 54.69%, 60.12%, 106.09% และ 125.29% ตามลำดับ ซึ่งทุกซี่จะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงปรากฏอยู่ เป็นผลกระทบจากการใช้สัญญาณ PWM ดังที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้โดยได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 70.29% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่า

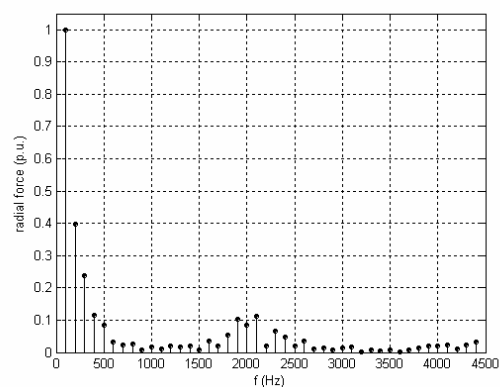
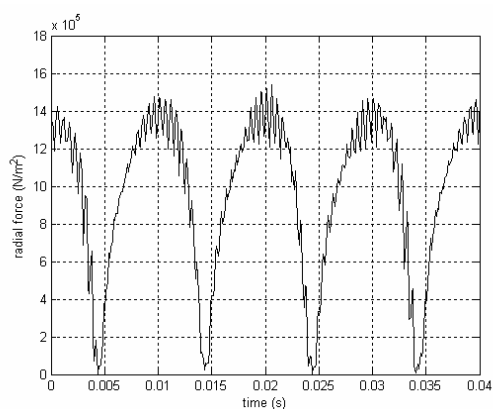
น้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 73.51% อยู่เล็กน้อย หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกได้ดังรูปที่ 8.17 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



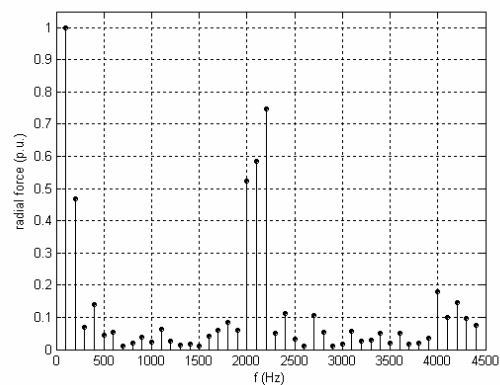
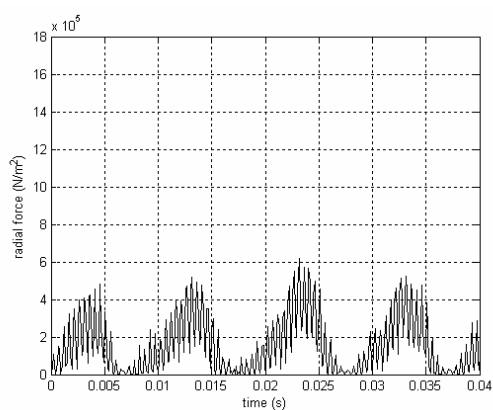
รูปที่ 8.15 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



(ก)

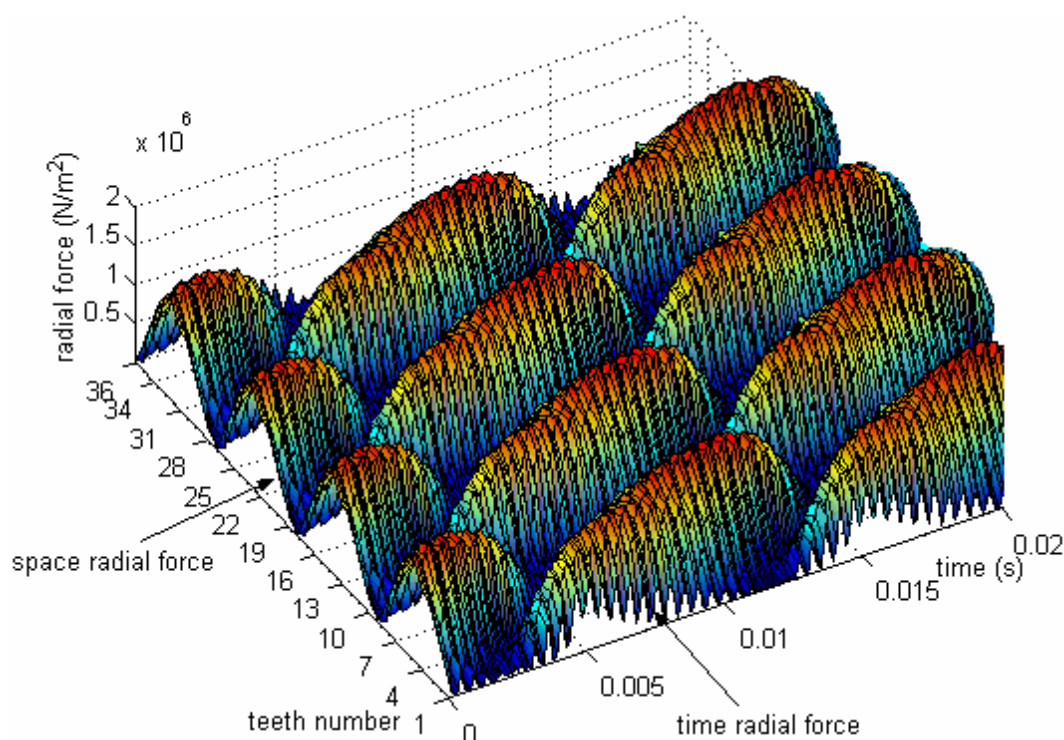


(ข)



(ค)

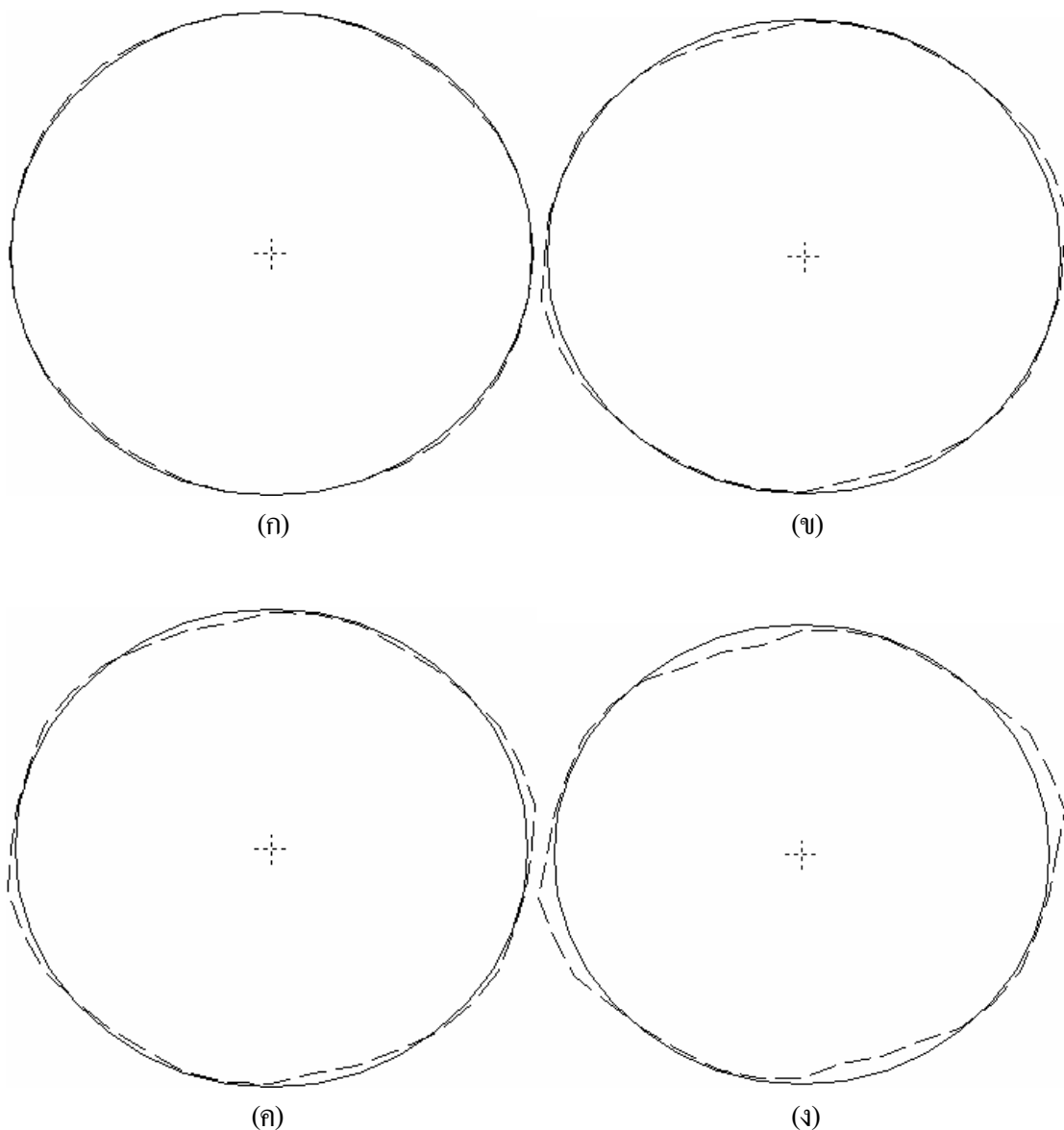
รูปที่ 8.16 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี
พิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 5
และ (ค) ซีที่ 9



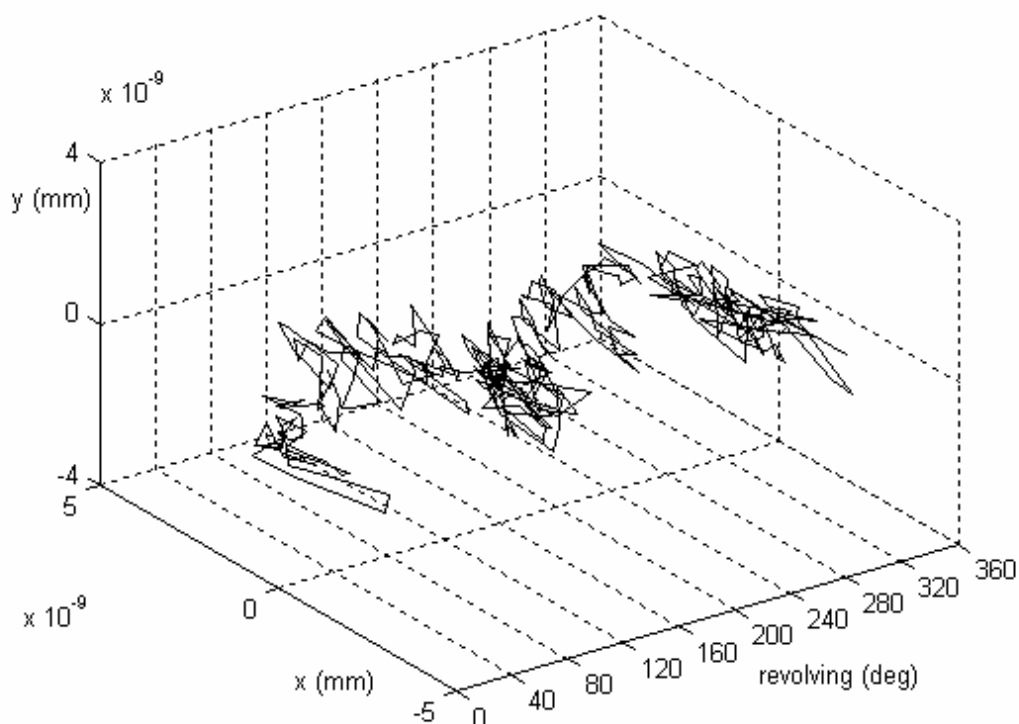
รูปที่ 8.17 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ปรากฏผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ดังแสดงด้วยรูปที่ 8.18 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่สอดคล้องกับค่าของการกระจัดที่น้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกมีค่าเท่ากับ 6.8724×10^{-8} mm และ 1.6486×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.89 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากที่แสดงไว้ก่อนหน้านี ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่อง

ล็ก โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบกึ่งอนดังแสดงในรูปที่ 8.19 จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องล็กจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบกึ่งอนเท่ากับ 1.6248×10^{-9} mm ซึ่งน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.6825×10^{-9} mm อยู่คิดเป็นร้อยละ 3.43



รูปที่ 8.18 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องล็กเมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

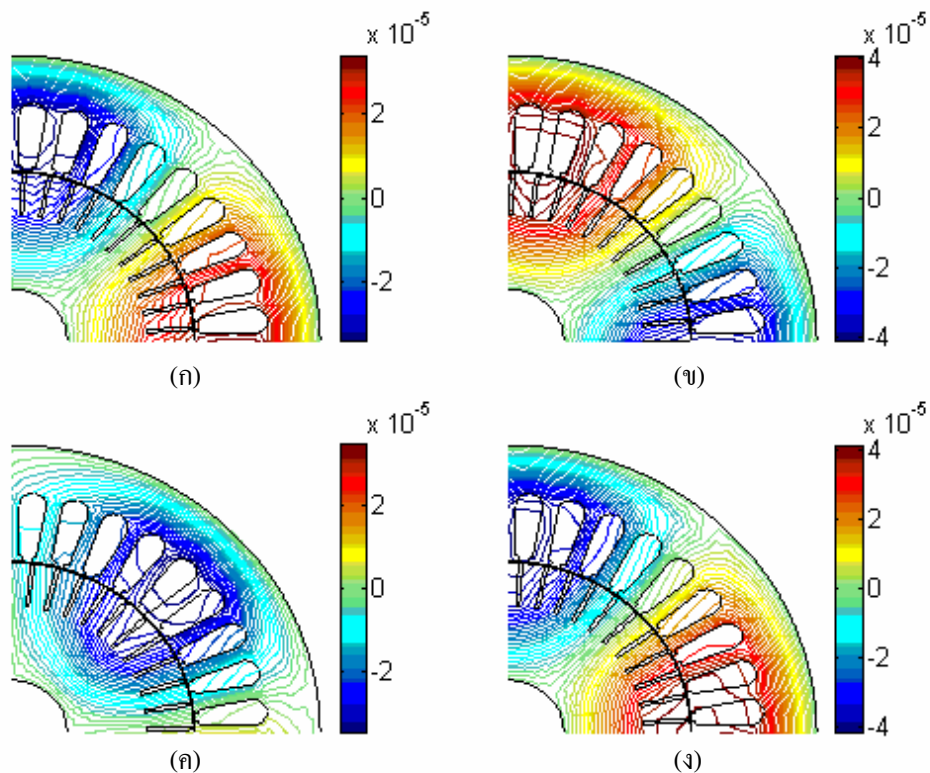


รูปที่ 8.19 การกระจายของศูนย์กลางเฟลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

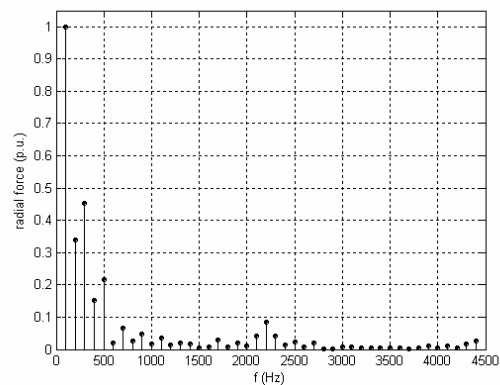
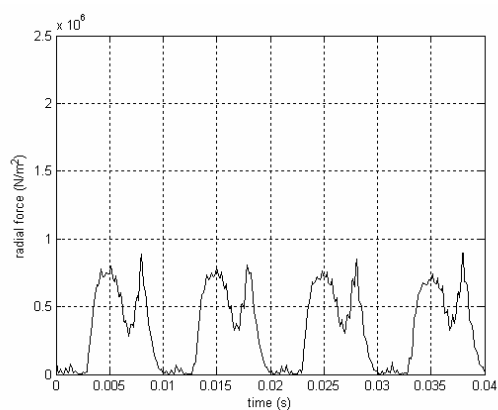
8.4.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 8.20 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์บนพื้นที่หน้าตัดเพียง 1/4 ของมอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมดังที่ได้เคยนำเสนอผ่านมา ซึ่งจะสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 8.21 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแสดงผลเมื่อ F_r กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในซี่ที่ 1, 5 และ 9 โดยผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มี

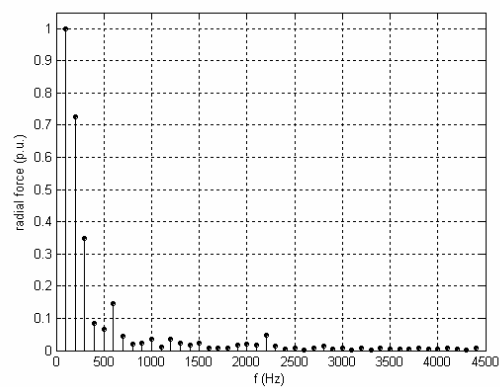
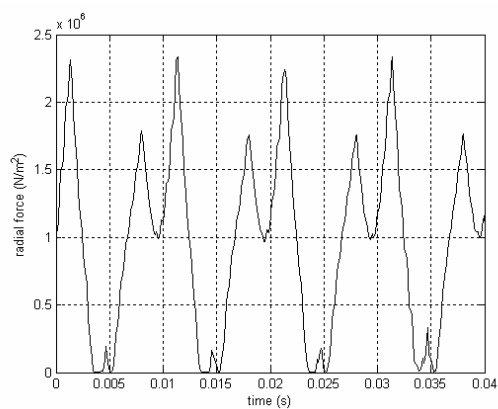
ลักษณะการกระจายตัวเป็นคาบที่รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่ได้จากการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบอื่นที่มีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเพียงเล็กน้อย โดยสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก มีค่า THD เท่ากับ 64.38%, 70.61%, 97.49%, 117.09%, 83.25%, 79.63%, 72.71%, 66.04% และ 49.40% ตามลำดับ ซึ่งได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 77.85% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่าน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 78.08% อยู่เล็กน้อย หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกได้ดังรูปที่ 8.22 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



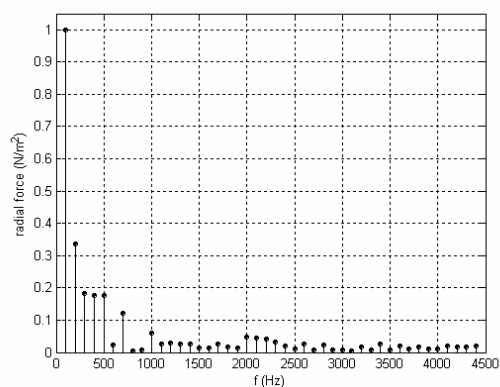
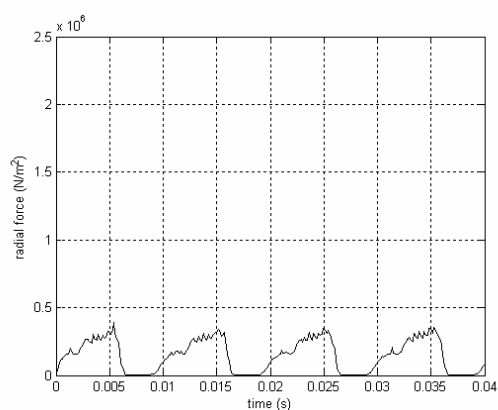
รูปที่ 8.20 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



(ก)

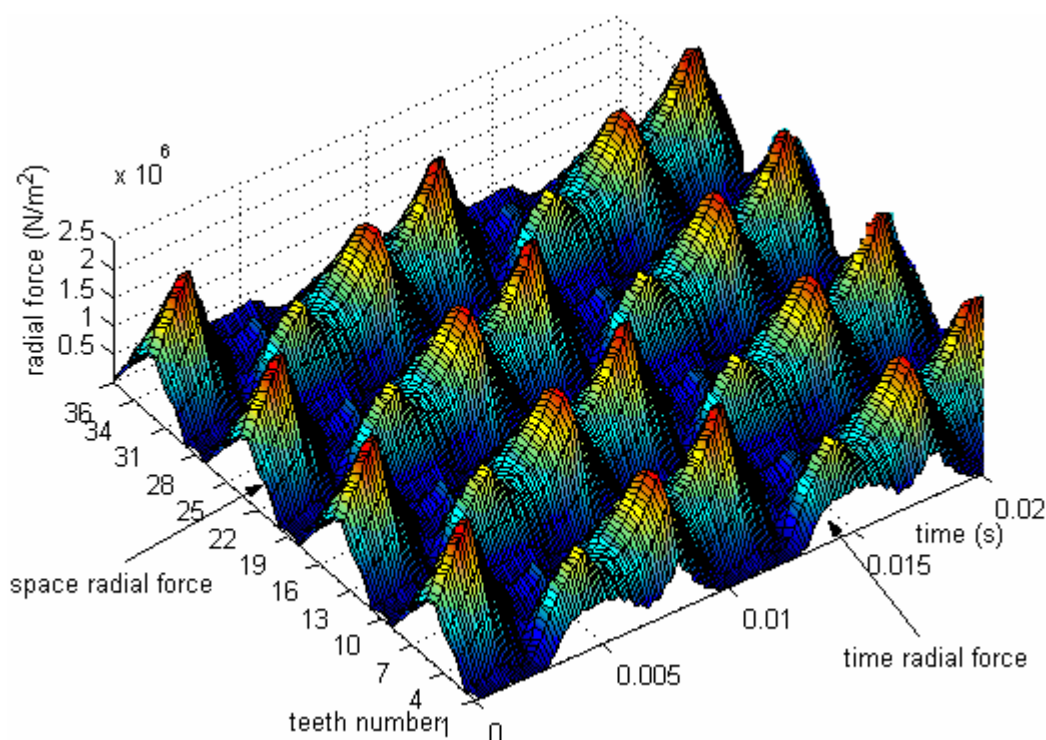


(ข)



(ค)

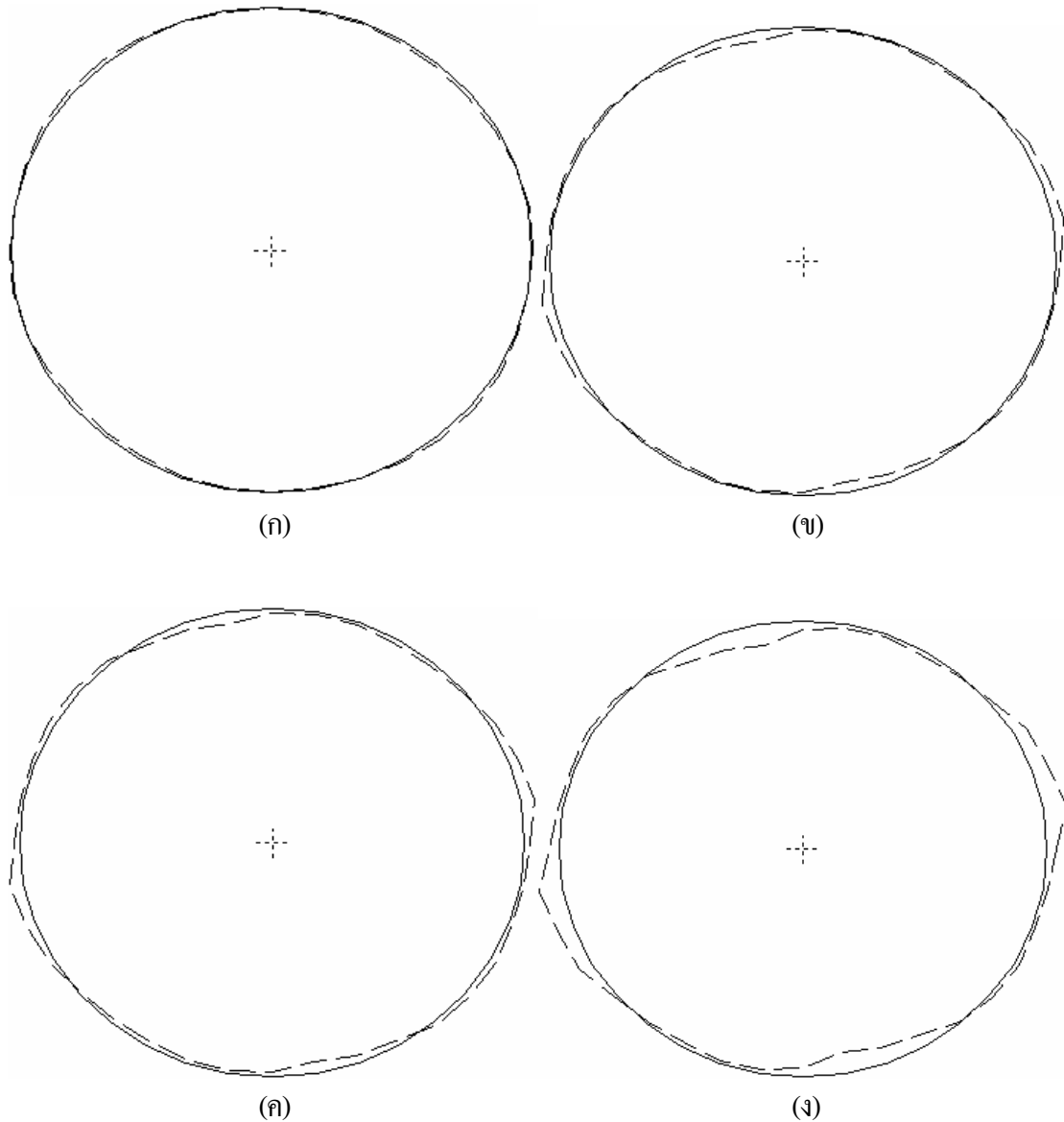
รูปที่ 8.21 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณี
พิจารณาห้องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 5
และ (ค) ซีที่ 9



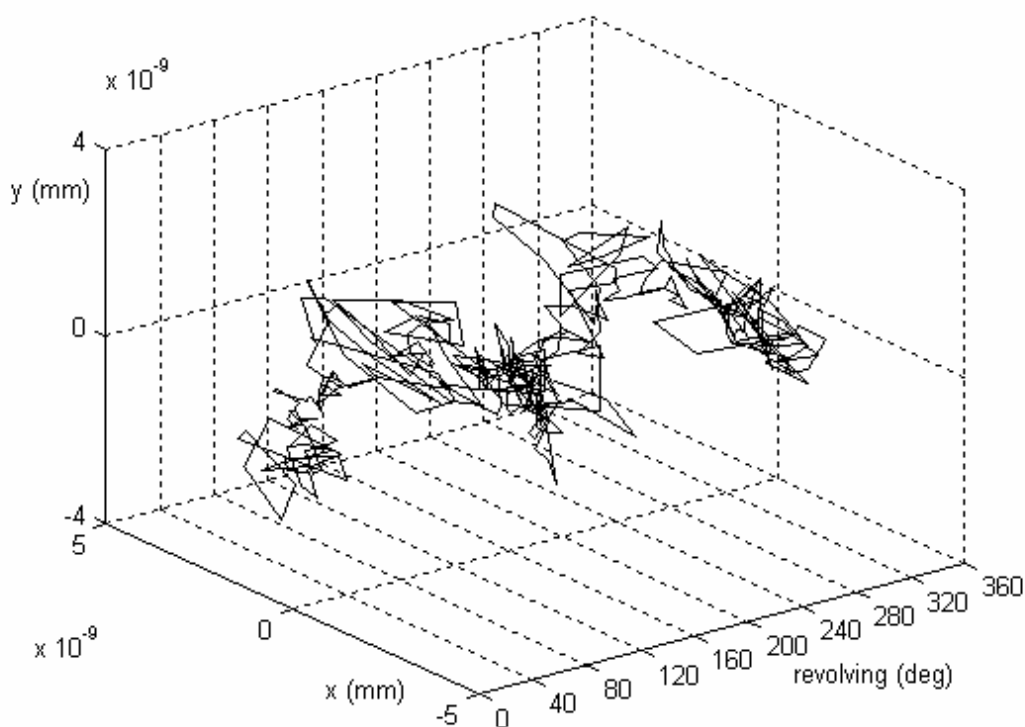
รูปที่ 8.22 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ปรากฏผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ดังแสดงด้วยรูปที่ 8.23 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกมีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่น้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกมีค่าเท่ากับ 7.0932×10^{-8} mm และ 1.8213×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.44 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนดังแสดงในรูปที่ 8.24 จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณา

มอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนเท่ากับ 1.7139×10^{-9} mm ซึ่งน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.7621×10^{-9} mm อยู่คิดเป็นร้อยละ 2.74



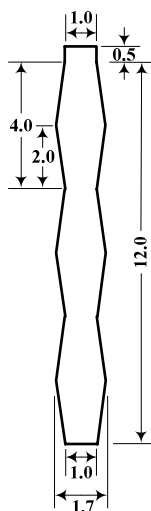
รูปที่ 8.23 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ



รูปที่ 8.24 การกระจัดของศูนย์กลางเฟลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก

8.5 การใช้ร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

การดำเนินการศึกษาเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย ที่ออกแบบรูปร่างร่องขึ้นใหม่เพื่อลดผลของการสั่นสะเทือน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.14 และนำมาแสดงใหม่ในบทยี่ดั่งรูปที่ 8.25 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะอาศัยการจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กและขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เช่นเดียวกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก เพื่อเปรียบเทียบผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ทั้งแบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ รวมถึงแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ของแหล่งจ่ายไฟแต่ละชนิดเมื่อพิจารณารูปร่างร่องในแต่ละแบบ

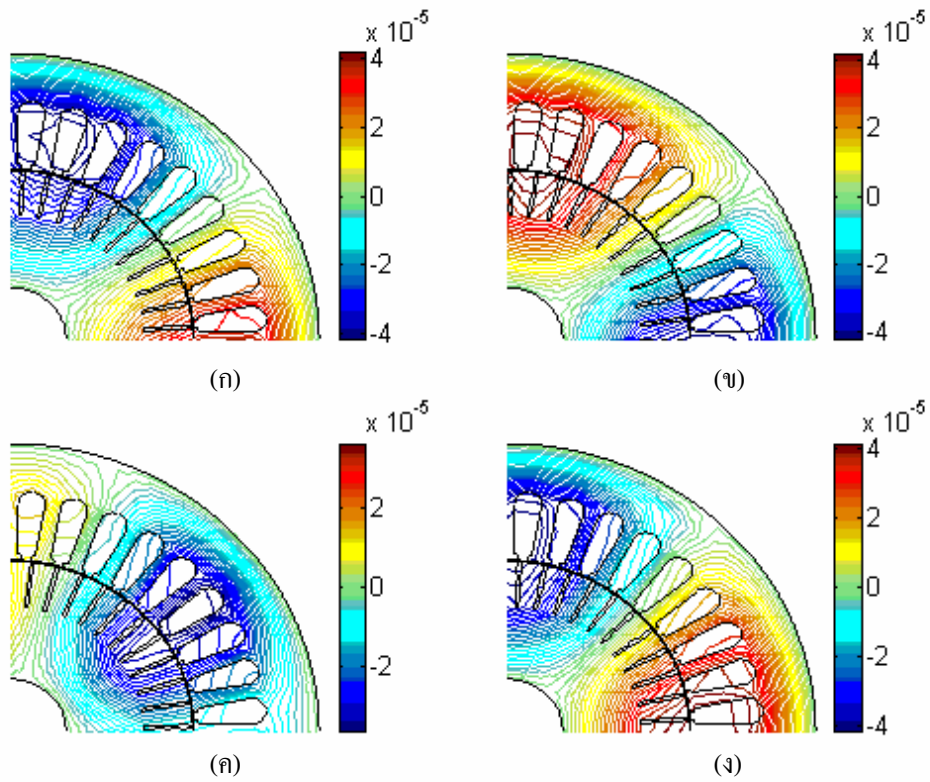


รูปที่ 8.25 ภาคตัดของร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยและมิติ (mm)

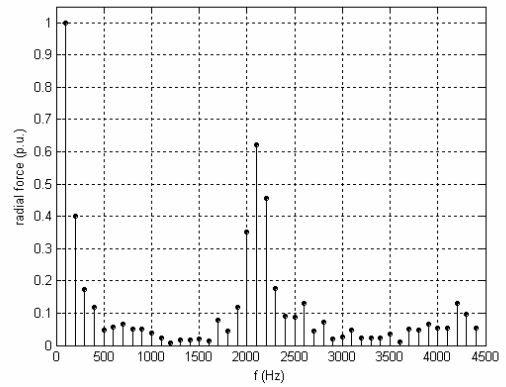
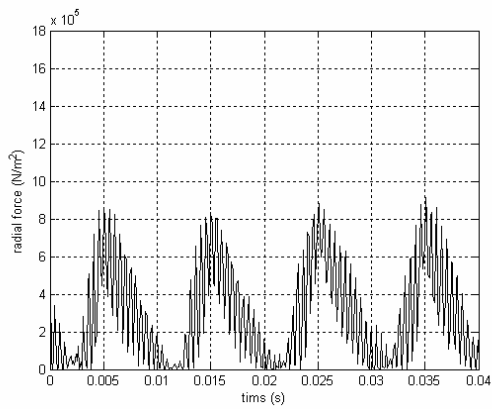
8.5.1 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยม ร่องลึก ทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์เมื่อโรเตอร์หมุนไป แสดงได้ดังรูปที่ 8.26 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร่องลึก ซึ่งจะสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 8.27 โดยผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบคล้ายฟันเลื่อยเหมือนที่ผ่านมามีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเพียงเล็กน้อย โดยสเปกตรัมของ F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีค่า THD เท่ากับ 104.01%, 38.85%, 47.03%, 51.64%, 52.51%, 53.32%, 60.77%, 114.54% และ 132.75% ตามลำดับ ซึ่งทุกซี่จะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงปรากฏอยู่ โดยได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 72.82% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 73.51% แต่มากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่มีค่า 70.29% หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยได้ดังรูปที่ 8.28

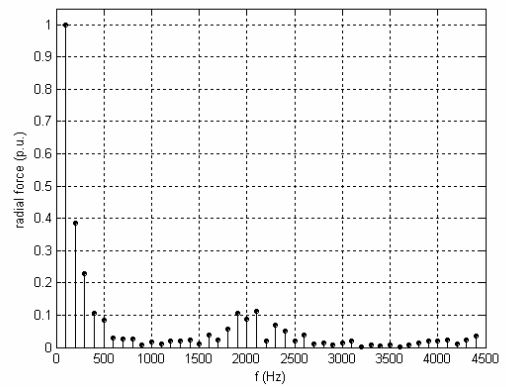
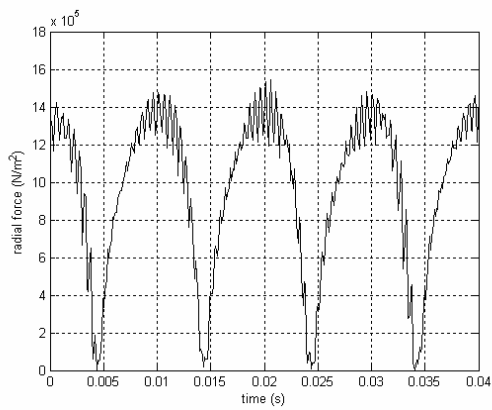
ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบตั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสลับร่องเล็ก โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



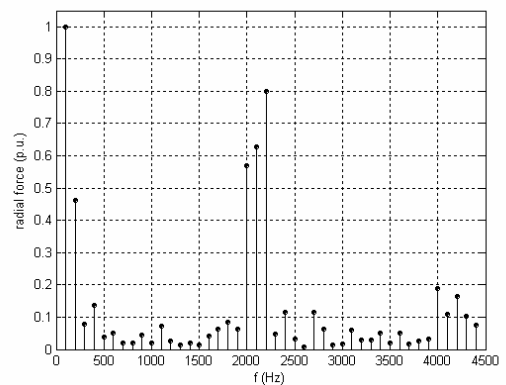
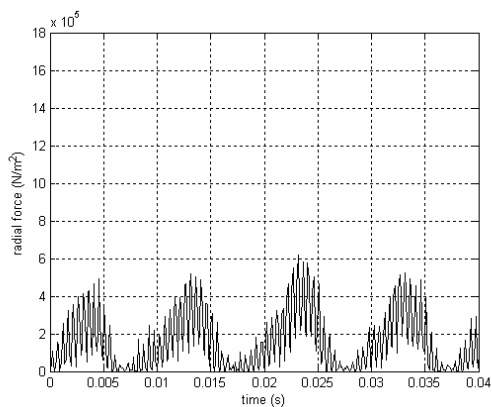
รูปที่ 8.26 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



(ก)

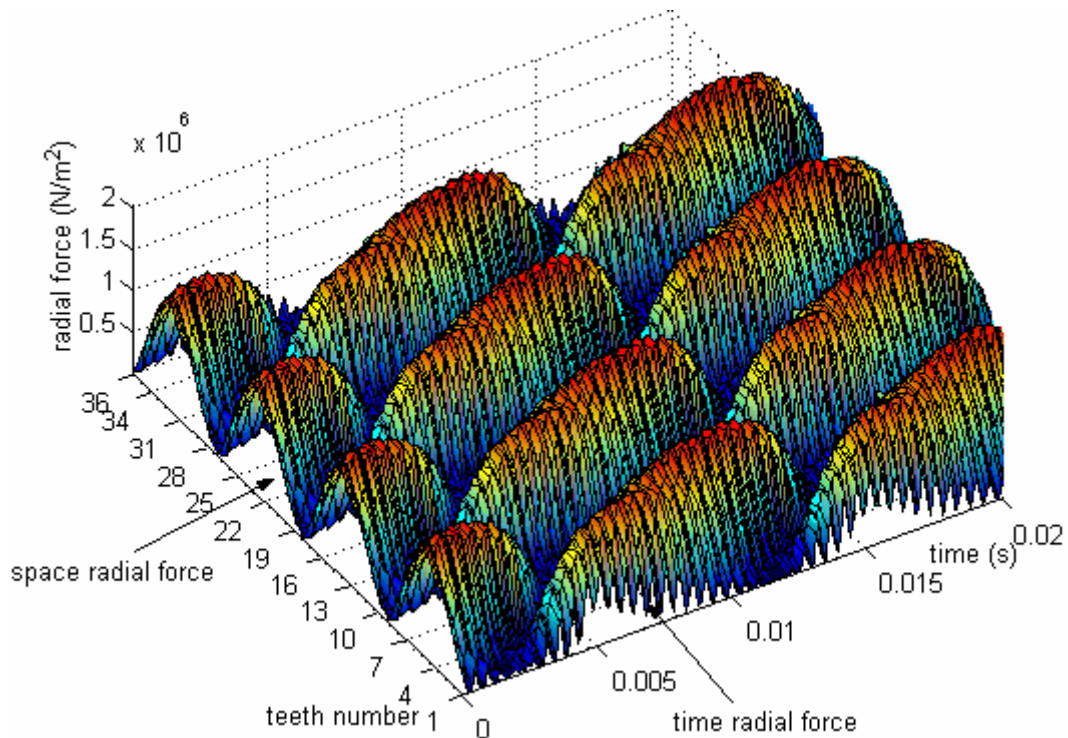


(ข)



(ค)

รูปที่ 8.27 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณี
พิจารณาห้อง โรเตอร์แบบฟันเลื่อยที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 5
และ (ค) ซีที่ 9

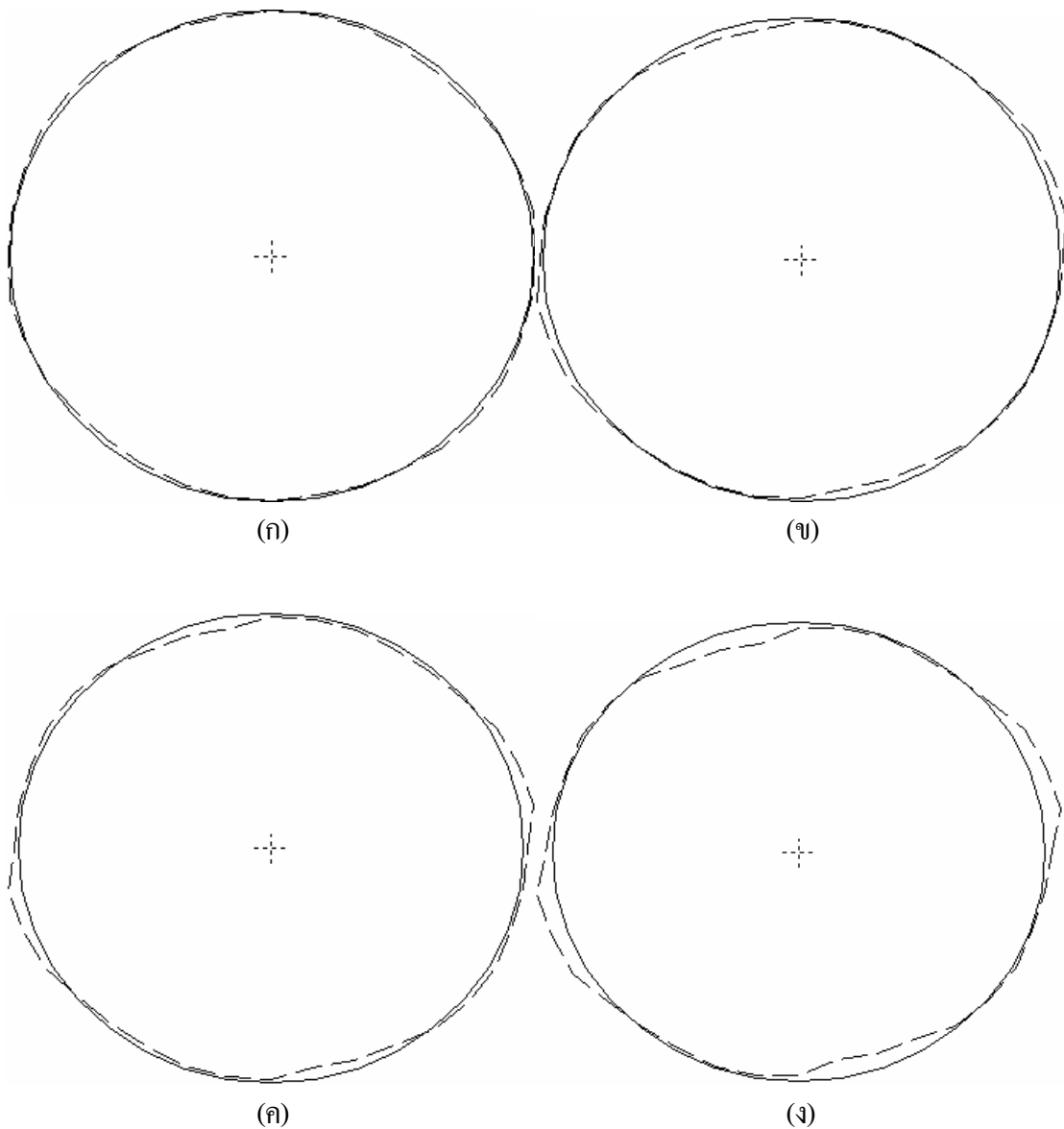


รูปที่ 8.28 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

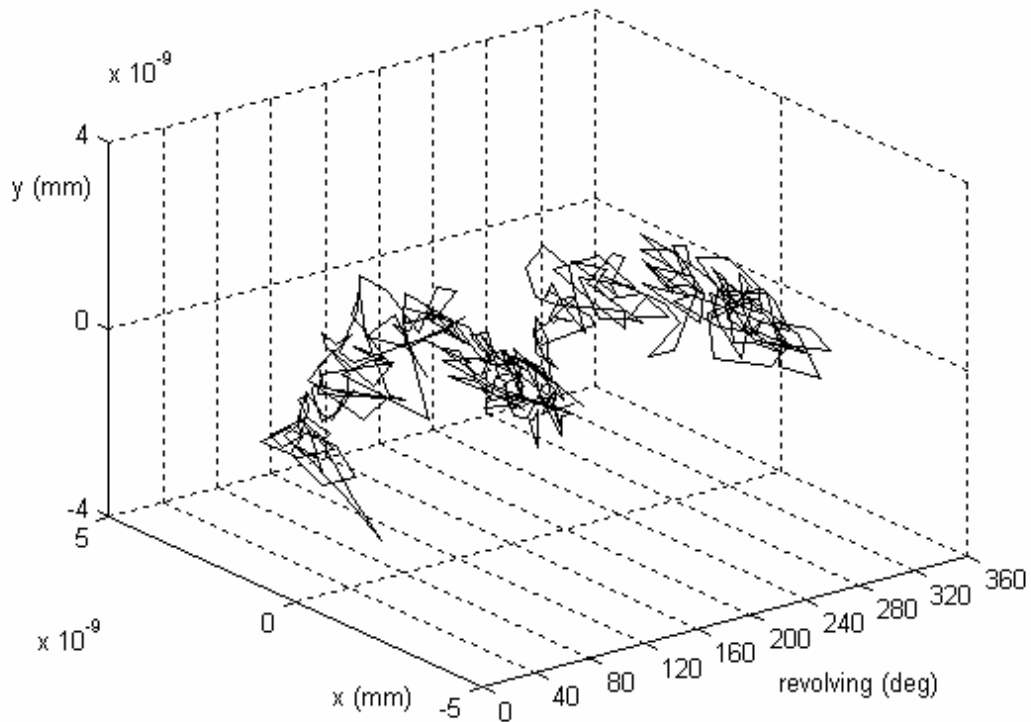
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ปรากฏผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ดังแสดงด้วยรูปที่ 8.29 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม แต่จะมีค่าดังกล่าวมากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยมีค่าเท่ากับ 6.9123×10^{-8} mm และ 1.6584×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.31 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนดังแสดง

ในรูปที่ 8.30 จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณา มอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟัน เลื่อยจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนเท่ากับ 1.6613×10^{-9} mm ซึ่ง น้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.6825×10^{-9} mm อยู่คิดเป็นร้อยละ 1.26 แต่จะมี ค่ามากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก



รูปที่ 8.29 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

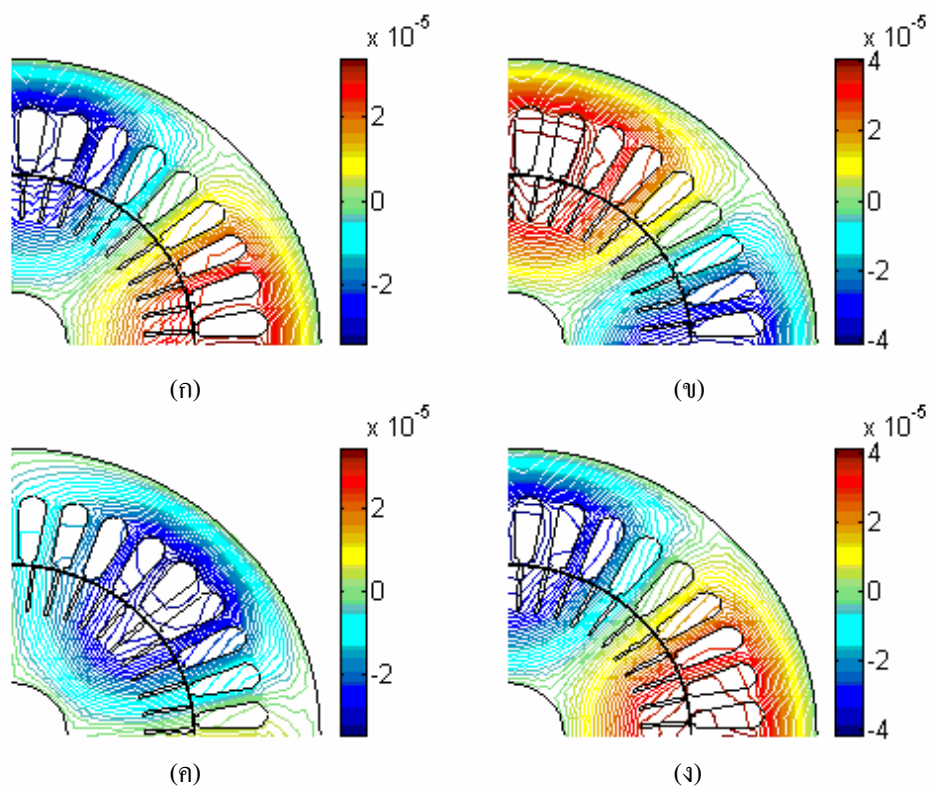


รูปที่ 8.30 การกระจัดของศูนย์กลางเฟลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

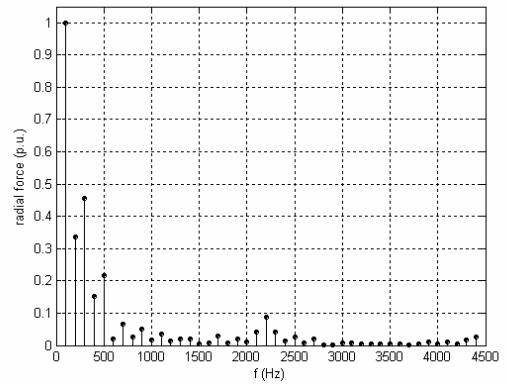
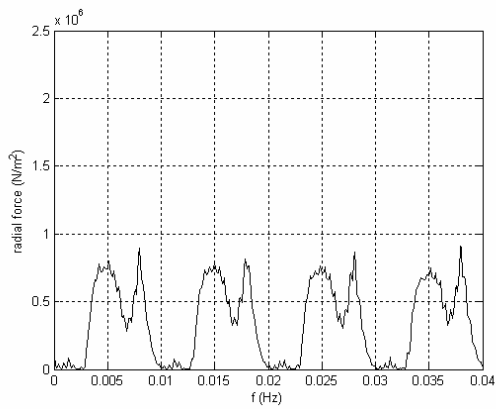
8.5.2 ผลและอภิปรายผลเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก ทุกประการ โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปแสดงได้ดังรูปที่ 8.31 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร่องลึก ซึ่งจะสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการแสดงค่า F_r เทียบกับเวลาที่แสดงควบคู่กับสเปกตรัมทางขนาดในรูปที่ 8.32 โดยผลของกราฟ F_r เทียบกับเวลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีลักษณะการกระจายตัวเป็นคาบที่รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่ได้จากการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบอื่นที่มีขนาดของ F_r ต่างกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและแบบสี่เหลี่ยมร่องลึกเพียงเล็กน้อย โดยสเปกตรัมของ F_r ในซีที 1 ถึงซีที 9 เมื่อใช้

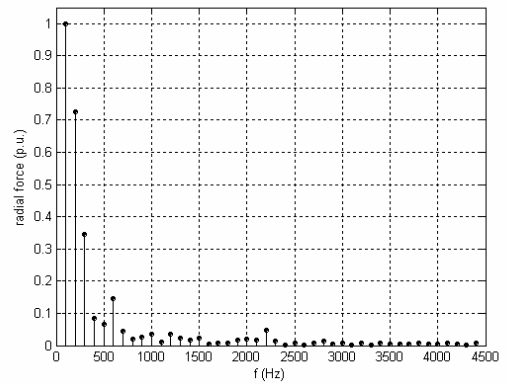
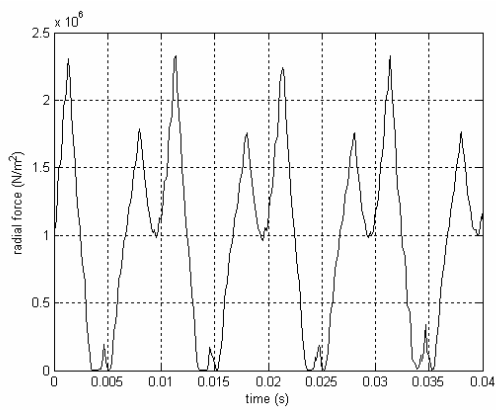
อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีค่า THD เท่ากับ 64.58%, 70.67%, 97.89%, 117.83%, 83.14%, 79.78%, 72.97%, 66.20% และ 49.60% ตามลำดับ ซึ่งทุกซึ่งจะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงปรากฏอยู่ โดยได้ THD เฉลี่ยเท่ากับ 78.04% ดังนั้น THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 78.08% แต่มากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกที่มีค่า 77.85% หรือพิจารณาการกระจายตัวของ F_r เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยได้ดังรูปที่ 8.33 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมและร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยจะต่างกันที่ขนาดของ F_r เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



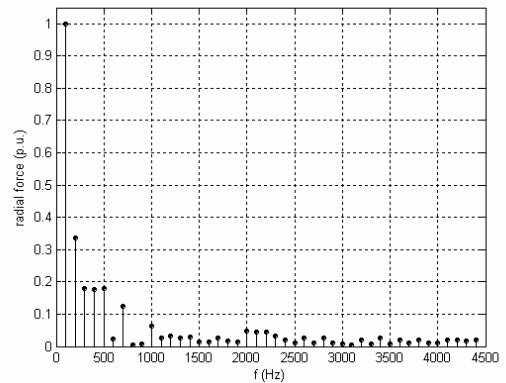
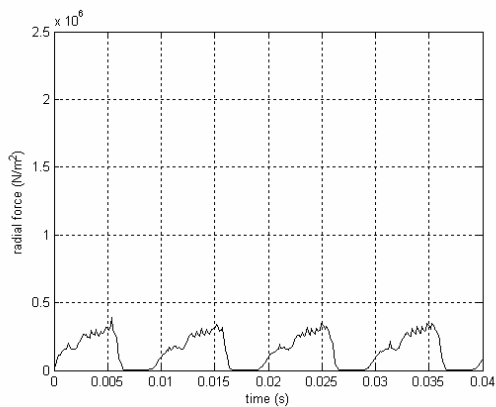
รูปที่ 8.31 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกขั้วกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0°, (ข) 60°, (ค) 120° และ (ง) 180°



(ก)

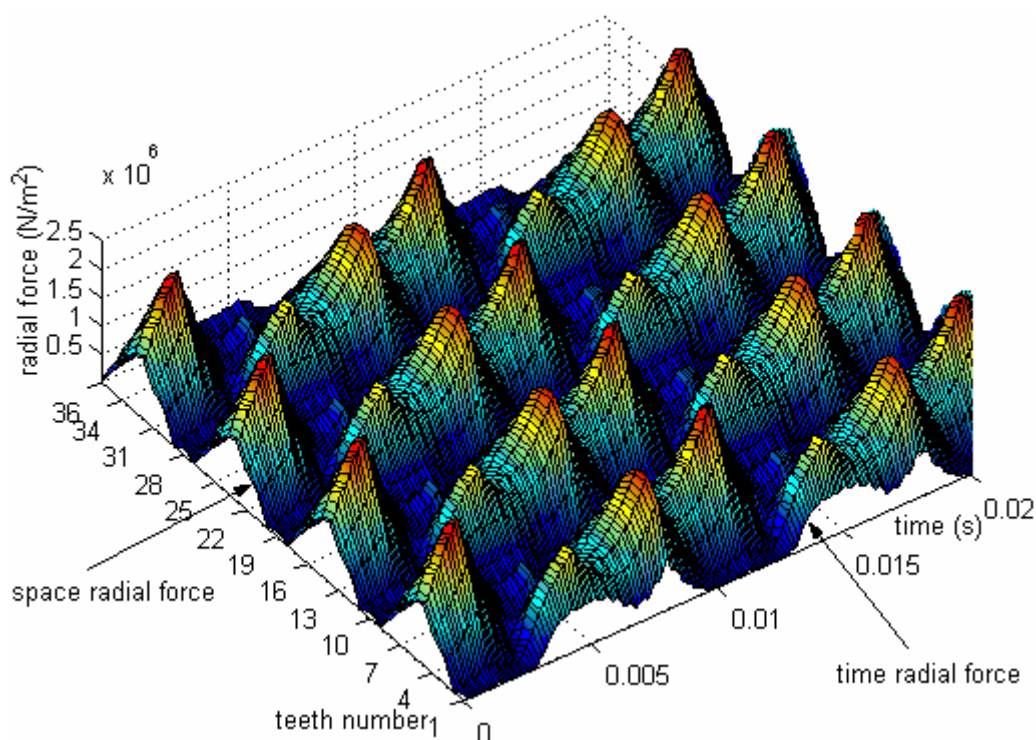


(ข)



(ค)

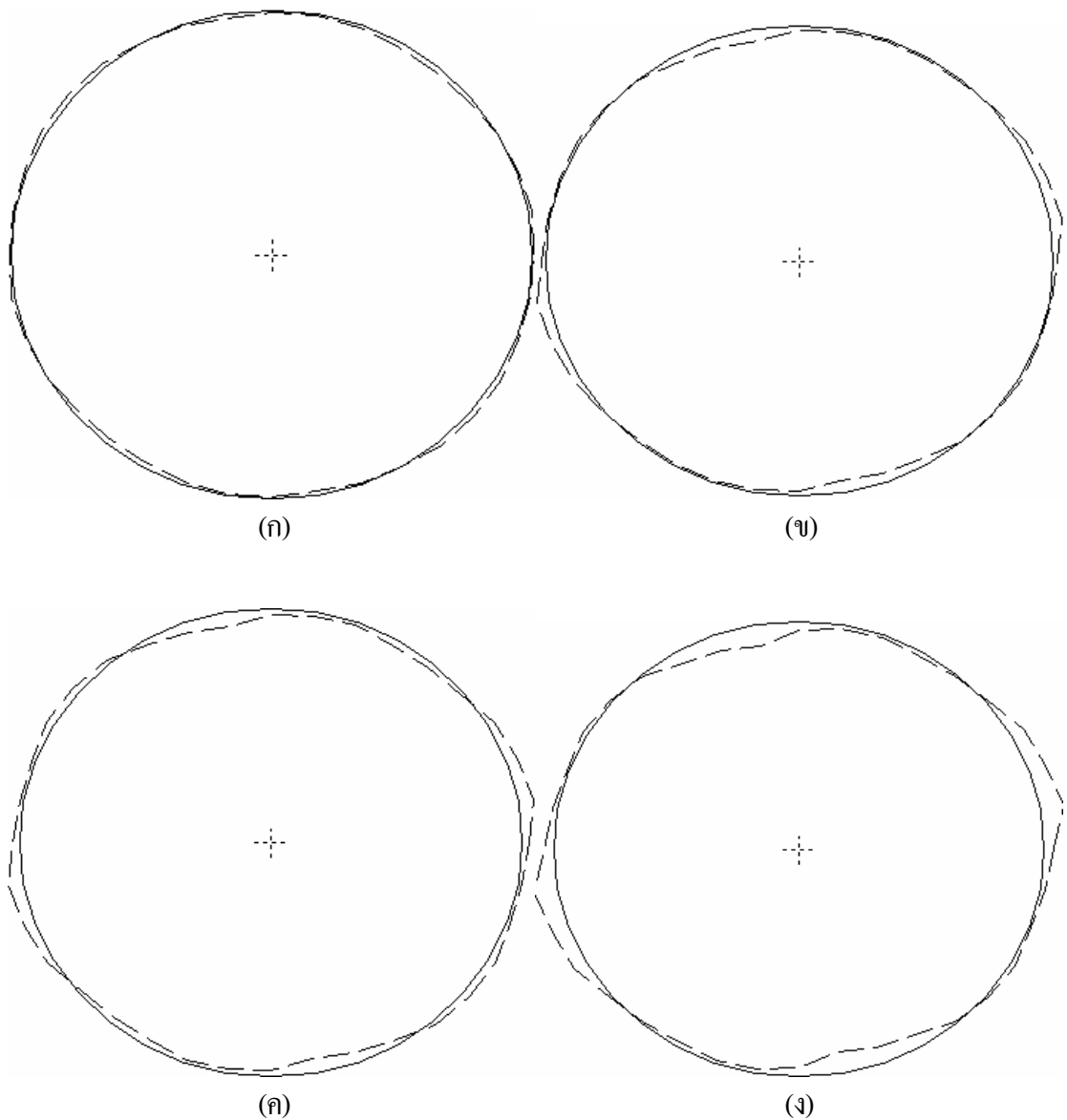
รูปที่ 8.32 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมทางขนาดเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณี
 พิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 5
 และ (ค) ซีที่ 9



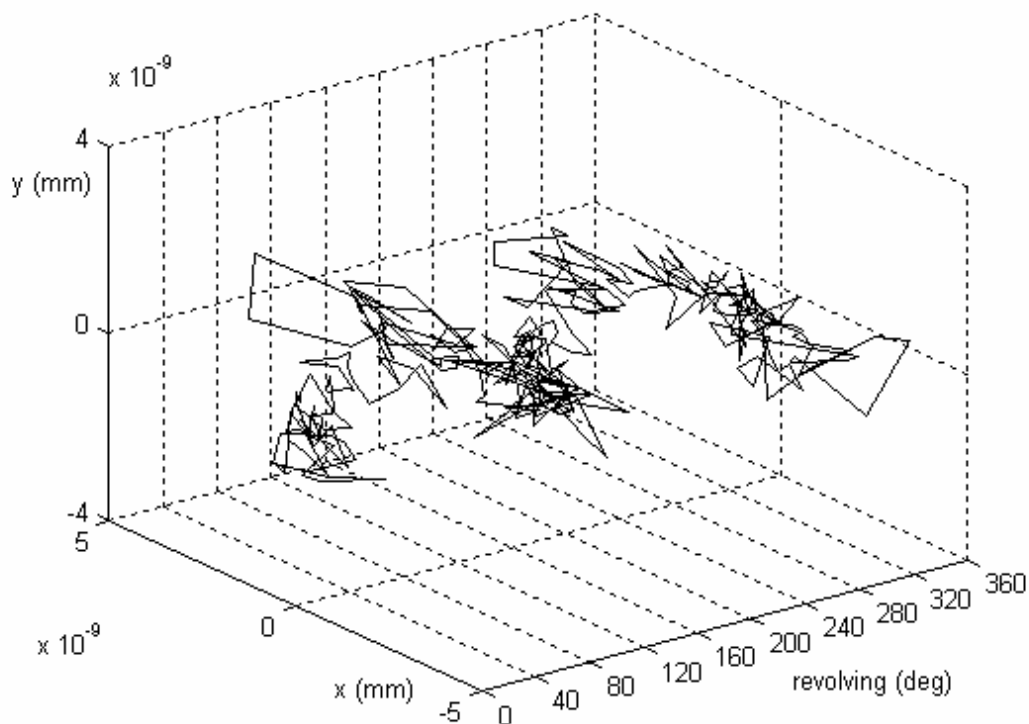
รูปที่ 8.33 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

การคำนวณขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ปรากฏผลของการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ดังแสดงด้วยรูปที่ 8.34 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีรูปร่างของการบิดเบี้ยวใกล้เคียงกับเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม และกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม แต่จะมีค่าดังกล่าวมากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก โดยค่าการกระจัดเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยมีค่าเท่ากับ 7.1127×10^{-8} mm และ 1.8295×10^{-15} mm² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.17 ของการกระจัดเฉลี่ยที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ส่วนผลของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย โดยพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก่อนดังแสดง

ในรูปที่ 8.35 จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยจะมีค่า RMS ของการกระจัดเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนเท่ากับ 1.7447×10^{-9} mm ซึ่งน้อยกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่มีค่า 1.7621×10^{-9} mm อยู่คิดเป็นร้อยละ 0.99 แต่จะมีค่ามากกว่ากรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก



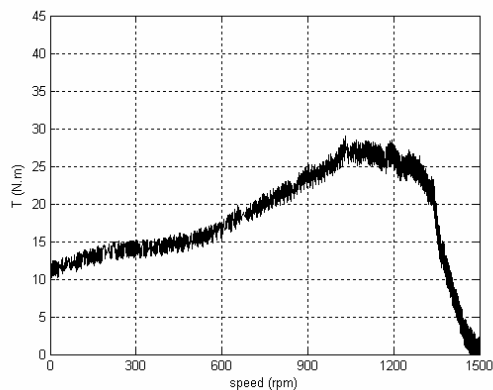
รูปที่ 8.34 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อยเมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ



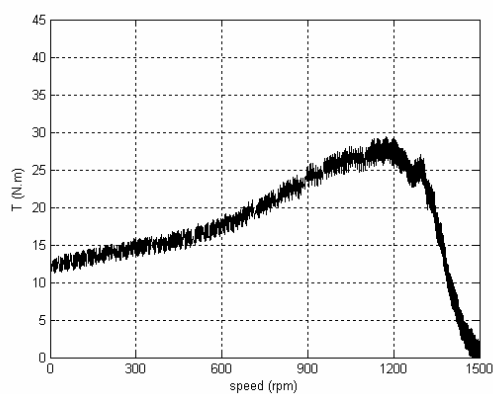
รูปที่ 8.35 การกระจัดของศูนย์กลางเฟลาเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
กับกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย

8.6 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์

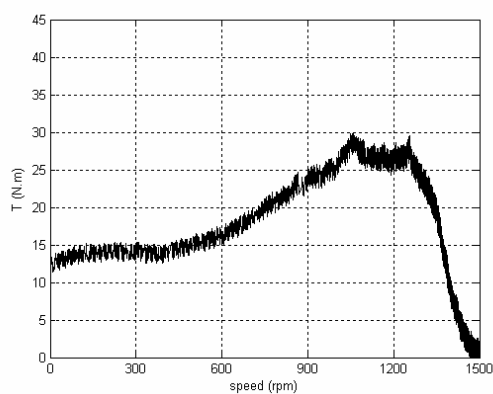
การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและอัตราเร็ว (torque-speed curve: เส้นโค้ง T-S) เมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ในการนำมาใช้งานตามชั้นคุณสมบัติต่างๆ ที่มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะร่องของโรเตอร์ มีลักษณะการดำเนินงานเหมือนกรณีที่มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 7.5 ของบทที่ 7 ทุกประการ โดยเส้นโค้ง T-S เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก และร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ สามารถแสดงได้ด้วยกราฟดังรูปที่ 8.36 และ 8.37 ตามลำดับ



(ก)

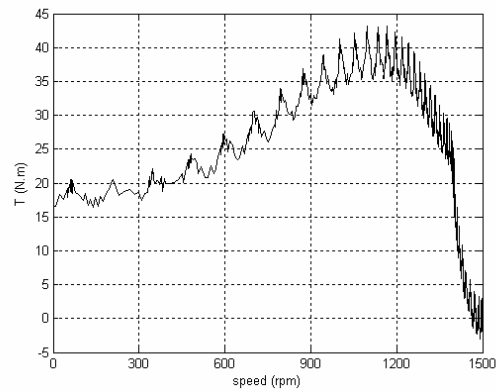


(ข)

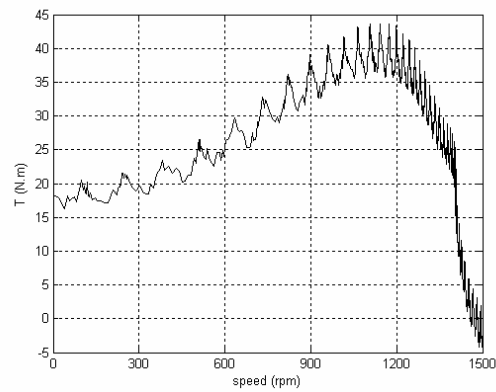


(ค)

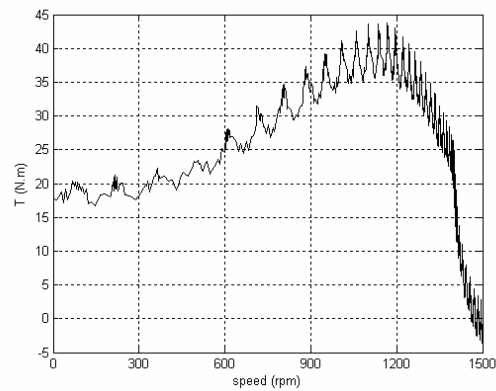
รูปที่ 8.36 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
เมื่อพิจารณารองโรเตอร์แบบต่างๆ (ก) แบบดั้งเดิม,
(ข) แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก และ (ค) แบบฟันเลื่อย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8.37 ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็ว เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ (ก) แบบดั้งเดิม,
(ข) แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก และ (ค) แบบฟันเลื่อย

จากรูปที่ 8.36 ซึ่งเป็นการแสดงเส้นโค้ง T-S เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะสังเกตเห็นว่า มอเตอร์ไม่ว่าจะใช้ร่องโรเตอร์แบบใดที่กล่าวถึงข้างต้น ล้วนมีลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยต่างมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกับกรณีเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ดังที่แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากร่องโรเตอร์แบบต่างๆ เหล่านี้ มีความลึกของร่องโรเตอร์ที่ใช้วางแท่งตัวนำที่ใกล้เคียงกัน จะต่างกันเพียง เส้นโค้ง T-S เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีแอมพลิจูดของแรงบิดมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ดังแสดงเส้นโค้ง T-S เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ไว้ในรูปที่ 7.20 ของบทที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงในตำแหน่งที่เป็นจำนวนเท่าตามอัตราส่วนมอดูเลต จึงทำให้องค์ประกอบของแรงบิดที่เกิดจากฮาร์มอนิกอันดับสูงนี้ มีขนาดลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับอันดับของฮาร์มอนิก (Alger, 1970) ดังนั้นแรงบิดมูลฐานซึ่งเป็นแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์จึงมีค่าลดลง ส่วนรูปที่ 8.37 ซึ่งเป็นการแสดงเส้นโค้ง T-S เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เส้นโค้ง T-S เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ จะมีลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วที่ไม่แตกต่างกัน โดยต่างมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกับกรณีเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ รวมถึงแอมพลิจูดของแรงบิดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จะต่างกันเพียงเส้นโค้ง T-S เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะมีความราบเรียบของเส้นโค้งน้อยกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ตามลักษณะรูปคลื่นของกระแสของแต่ละแหล่งจ่ายที่จ่ายให้มอเตอร์

8.7 อภิปรายและสรุป

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณารูปร่างร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก และแบบฟันเลื่อย เมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ที่มีลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ต่างกันไปในแต่ละแหล่งจ่าย เพื่อศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ที่มีต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แต่ละแบบ และเปรียบเทียบผลกับกรณีใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ที่แสดงรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 7 สามารถสรุปได้ว่า ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าและผลลัพธ์ทางกลที่ใช้ศึกษาถึงการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ ประกอบกับแหล่งจ่ายไฟแบบต่างๆ มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน รวมถึงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ปรากฏในกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อน โดยสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 8.1 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของค่า THD ที่ใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกที่เป็นตัวแทนสำหรับวัดค่าความราบเรียบในการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าอันเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ เมื่อพิจารณาร่อง โรเตอร์

และแหล่งจ่ายไฟในแต่ละแบบ ประกอบกับตารางที่ 8.2 และ 8.3 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลลัพธ์ทางกลของขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ในรูปแบบของการกระจัดเมื่อใช้ร่องโรเตอร์และแหล่งจ่ายไฟแต่ละแบบ เมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์และพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อนตามลำดับ

ตารางที่ 8.1 ค่า THD ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์และแหล่งจ่ายไฟแต่ละแบบ

รูปร่าง โรเตอร์	ค่า THD (%)		
	แหล่งจ่าย รูปคลื่นไซน์	อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM	อินเวอร์เตอร์ แบบหกระดับ
แบบดั้งเดิม	43.27	73.51	78.08
แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก	42.71	70.29	77.85
แบบฟันเลื่อย	43.11	72.82	78.04

ตารางที่ 8.2 ขนาดของการสั่นสะเทือนกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์

รูปร่าง โรเตอร์	การกระจัดเฉลี่ยของวงรอบด้านในสเตเตอร์ ($\times 10^{-8}$ mm)		
	แหล่งจ่าย รูปคลื่นไซน์	อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM	อินเวอร์เตอร์ แบบหกระดับ
แบบดั้งเดิม	6.2325	6.9341	7.1249
แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก	6.1963	6.8724	7.0932
แบบฟันเลื่อย	6.2251	6.9123	7.1127

ตารางที่ 8.3 ขนาดของการสั่นสะเทือนกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อน

รูปร่าง โรเตอร์	การกระจัดเฉลี่ยของศูนย์กลางเพลลา ($\times 10^{-9}$ mm)		
	แหล่งจ่าย รูปคลื่นไซน์	อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM	อินเวอร์เตอร์ แบบหกระดับ
แบบดั้งเดิม	1.5609	1.6825	1.7621
แบบสี่เหลี่ยมร่องลึก	1.4862	1.6248	1.7139
แบบฟันเลื่อย	1.5379	1.6613	1.7447

ผลที่ปรากฏในตารางที่ 8.1-8.3 เป็นข้อยืนยันได้ว่าค่า THD ที่ใช้ระบุปริมาณฮาร์มอนิกของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของการสั่นสะเทือนทั้งในกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์และกรณีพิจารณามอเตอร์เป็นแบบก้อน โดยเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้มอเตอร์ทั้งสามแบบ แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์จะมีค่า THD ต่ำที่สุด โดยอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีการกระจายตัวในลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่มีความราบเรียบค่อนข้างสูง ในขณะที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะมีค่า THD สูงที่สุด โดยสังเกตได้จากมีการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกสูงมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการสั่นสะเทือนที่ปรากฏ โดยแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ในขณะที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะมีขนาดของการสั่นสะเทือนมากที่สุด และในกรณีที่พิจารณารูปร่างร่องโรเตอร์ทั้งสามแบบที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า ร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีค่า THD ต่ำที่สุด ในขณะที่ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมจะมีค่า THD สูงที่สุด ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการสั่นสะเทือน โดยร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะมีขนาดของการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ในขณะที่ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมจะมีขนาดของการสั่นสะเทือนมากที่สุด ดังนั้นขนาดของการสั่นสะเทือนในกรณีที่พิจารณาผลของรูปร่างร่องโรเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับที่ปรากฏในบทที่ 8 นี้ จะมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ที่ผ่านมาในบทที่ 7 ซึ่งจากผลที่ปรากฏในบทที่ 7 ระบุได้ว่าร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีขนาดน้อยที่สุด ในขณะที่ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมมีขนาดของการสั่นสะเทือนมากที่สุดเช่นกัน

ในบทที่ 8 นี้ ได้ดำเนินการศึกษาผลของฮาร์มอนิกที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาการใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เปรียบเทียบกับการใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบมอเตอร์ที่แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 7 โดยพิจารณาร่องโรเตอร์ทั้งแบบดั้งเดิมและที่พัฒนาขึ้นสองรูปแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย โดยชนิดของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้มอเตอร์จะมีผลต่อการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบต่างๆ ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งในกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะได้ค่าการกระจัดเฉลี่ยของวงรอบด้านในสเตเตอร์อันเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์คิดเป็นร้อยละ 11.26 และ 14.32 ตามลำดับ อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์

แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับกับร็องโรเตอร์แบบต่างๆ ต่างมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกันกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ จะต่างกันเพียงความราบเรียบของเส้นโค้ง T-S ในแต่ละชนิดของแหล่งจ่ายไฟ เมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์จะให้เส้นโค้ง T-S มีความราบเรียบมากที่สุด ในขณะที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะให้เส้นโค้ง T-S มีความราบเรียบน้อยที่สุด ตามลักษณะรูปคลื่นของกระแสของแต่ละแหล่งจ่ายที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับความราบเรียบของการสั่นสะเทือนในขณะที่มอเตอร์หมุน เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟแต่ละชนิด

บทที่ 9

การจำลองผลของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม

9.1 บทนำ

การจำลองผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดใหญ่ซึ่งมีพิกัด 500 แรงม้าในบทที่ 9 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานกับกรณีของมอเตอร์พิกัดขนาดเล็กที่ได้ดำเนินการผ่านมาแล้วในบทที่ 7 และบทที่ 8 โดยพิจารณาเฉพาะรูปร่างร่องโรเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบดั้งเดิมซึ่งมีความยาวของร่องค่อนข้างลึก ในบทนี้จะได้อธิบายถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในการจำลองผล และดำเนินการจำลองผลเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั้นสะพานในมอเตอร์ เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แหล่งจ่ายไฟอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ

9.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

การจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานของมอเตอร์ในบทนี้ ได้พิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่พิกัด 500 แรงม้า โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 9.1 ซึ่งพารามิเตอร์บางตัวยังมีค่าเดียวกันกับของมอเตอร์ขนาดเล็ก ส่วนรายละเอียดภาคตัดและมิติต่างๆของมอเตอร์ ร่องสเตเตอร์และ โรเตอร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.1 9.2 และ 9.3 ตามลำดับ

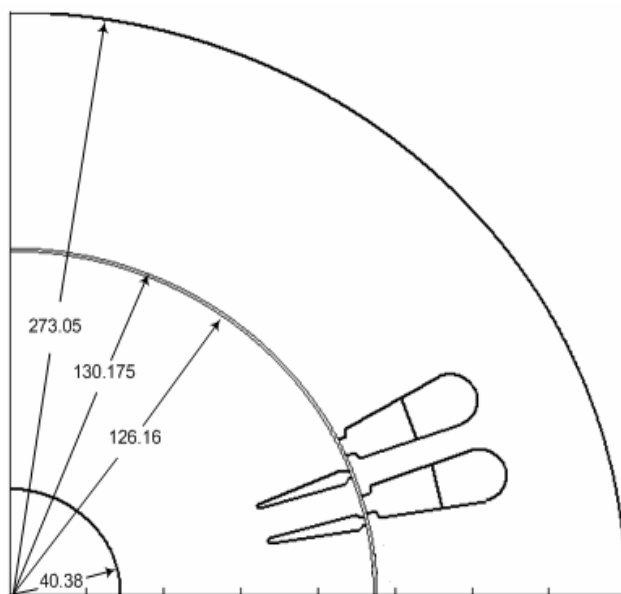
ตารางที่ 9.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 500 แรงม้า

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังงานขาออก	500 HP
แรงดันแหล่งจ่าย	2300 V (ต่อแบบสตาร์)
จำนวนขั้ว	4 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz

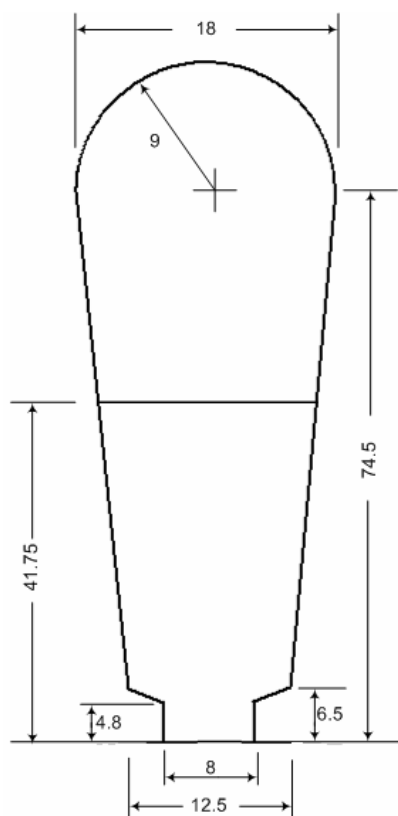
ตารางที่ 9.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 500 แรงม้า (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความเร็วพิกัด	1478 rpm
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	0.262 Ω/ϕ
รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์	1.206 Ω/ϕ
รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	54.04 Ω/ϕ
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	11.06 $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
มอดูลัสของแกนสเตเตอร์	$1.2\cdot 10^{11}$ N/m^2
มอดูลัสของเฟรม (อลูมิเนียม)	$7.1\cdot 10^{10}$ N/m^2
ความหนาแน่นมวลของแกนสเตเตอร์	$7.8\cdot 10^3$ Kg/m^3
ความหนาแน่นมวลของเฟรม	$0.9\cdot 10^3$ Kg/m^3
อัตราส่วนของปิวซอง	0.25
ชนิดการพันขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนร่องของสเตเตอร์	48 ร่อง
จำนวนร่องของโรเตอร์	36 ร่อง
ความกว้างช่องอากาศ	4.015 mm
ระยะพิคซ์	10/12 ร่อง
จำนวนรอบการพัน/ขดลวด	16 รอบ
เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดสเตเตอร์	1.8 mm
สภาพนำทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำโรเตอร์	$4.90\cdot 10^7$ Ω^{-1}/m

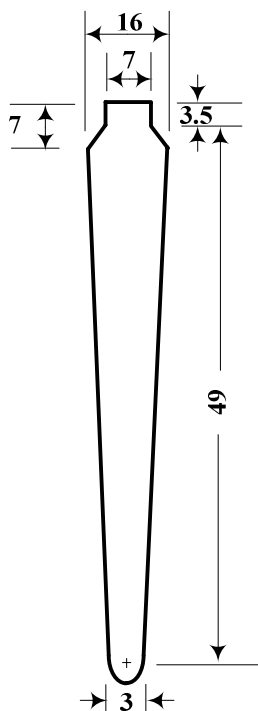
หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความทางวิชาการจำนวนมาก ที่มีการดำเนินงานกับมอเตอร์ขนาดพิกัดใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สมบูรณ์และเพียงพอต่อการจำลองผล



รูปที่ 9.1 ภาคตัดส่วนหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่และมิติ (mm)

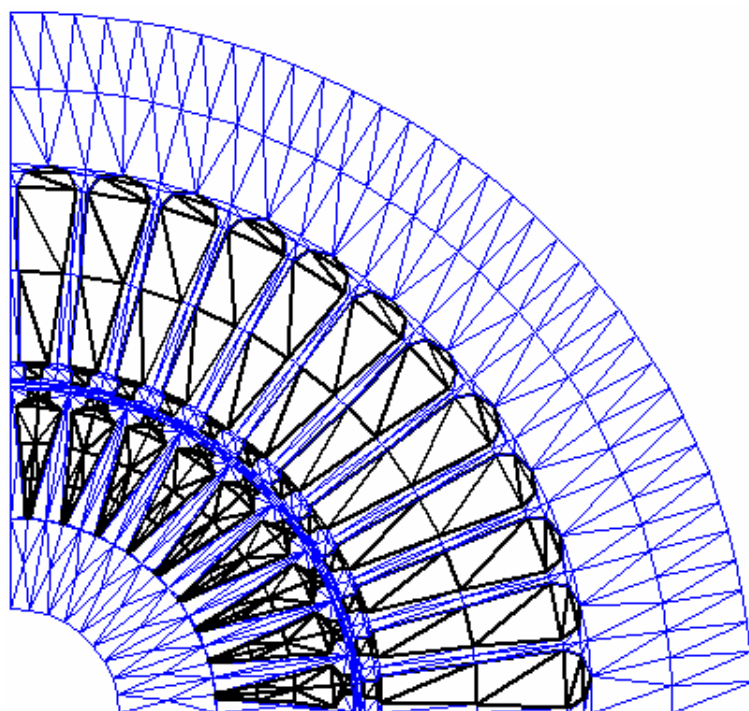


รูปที่ 9.2 ภาคตัดของร่องสเตเตอร์และมิติ (mm)

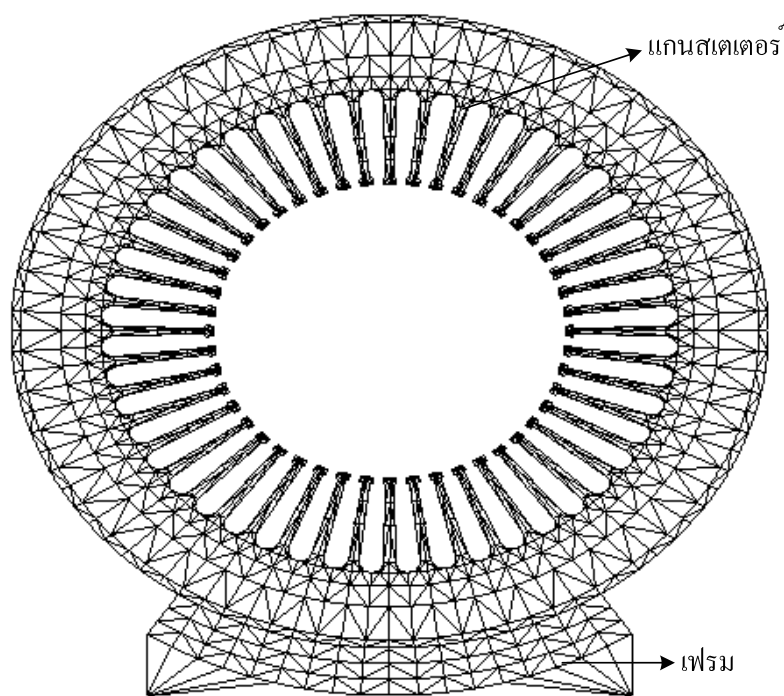


รูปที่ 9.3 ภาคตัดของร็องโรเตอร์และมิติ (mm)

การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดใหญ่พิกัด 500 แรงม้า เพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็ก ทำให้ได้จำนวนจุดต่อและอิลิเมนต์ทั้งสิ้น 2,700 จุด และ 5,220 อิลิเมนต์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 9.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนพื้นที่หน้าตัดเพียง 1/4 ของมอเตอร์ ส่วนการแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อเพื่อใช้คำนวณหาขนาดของการสั้นสะเทือนในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อและอิลิเมนต์ทั้งสิ้น 1,787 จุด และ 2,424 อิลิเมนต์ ตามลำดับ ดังแสดงด้วยรูปที่ 9.5 ซึ่งจากรูป การคำนวณการสั้นสะเทือนได้แบ่งพื้นที่การพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของแกนสเตเตอร์และส่วนของเฟรม โดยการสั้นสะเทือนบนแกนสเตเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังเฟรม



รูปที่ 9.4 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อคำนวณสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 9.5 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของมอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อคำนวณการสั่นสะเทือน

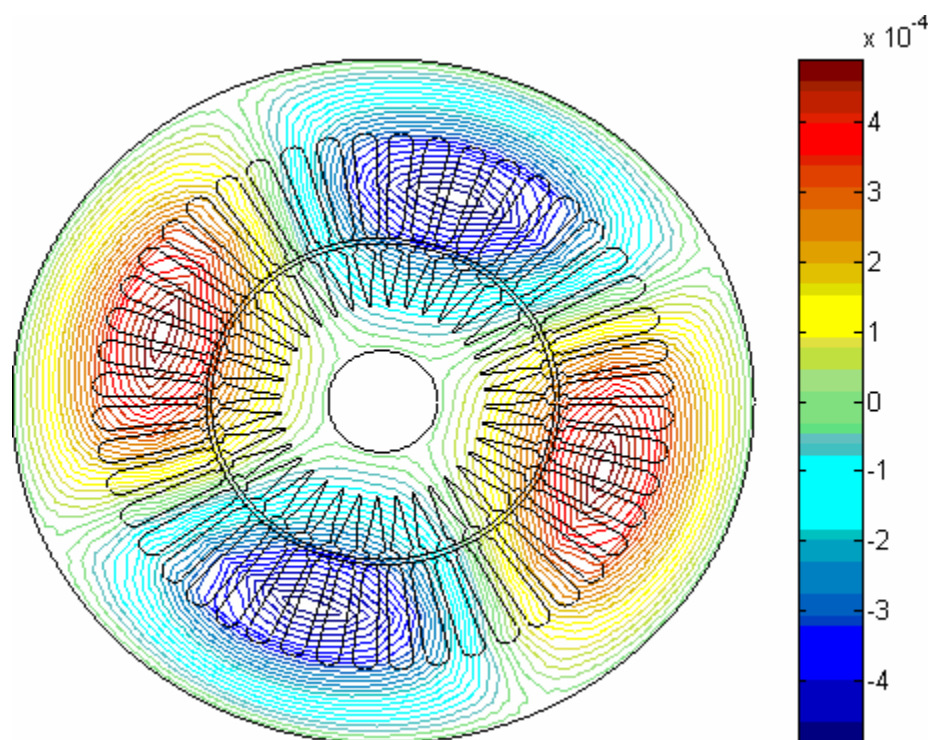
9.3 มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์

การจำลองผลทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ขนาดใหญ่ เริ่มจากการพิจารณามอเตอร์ที่ได้รับการจ่ายไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อันเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐาน ซึ่งการดำเนินการศึกษาและผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผล จะมีลักษณะและรูปแบบเหมือนกับการจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กทุกประการ โดยได้แสดงลักษณะและรูปแบบของผลลัพธ์อย่างละเอียดไว้ในกรณีจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กในบทที่ 7 ดังที่ปรากฏผ่านมาแล้ว

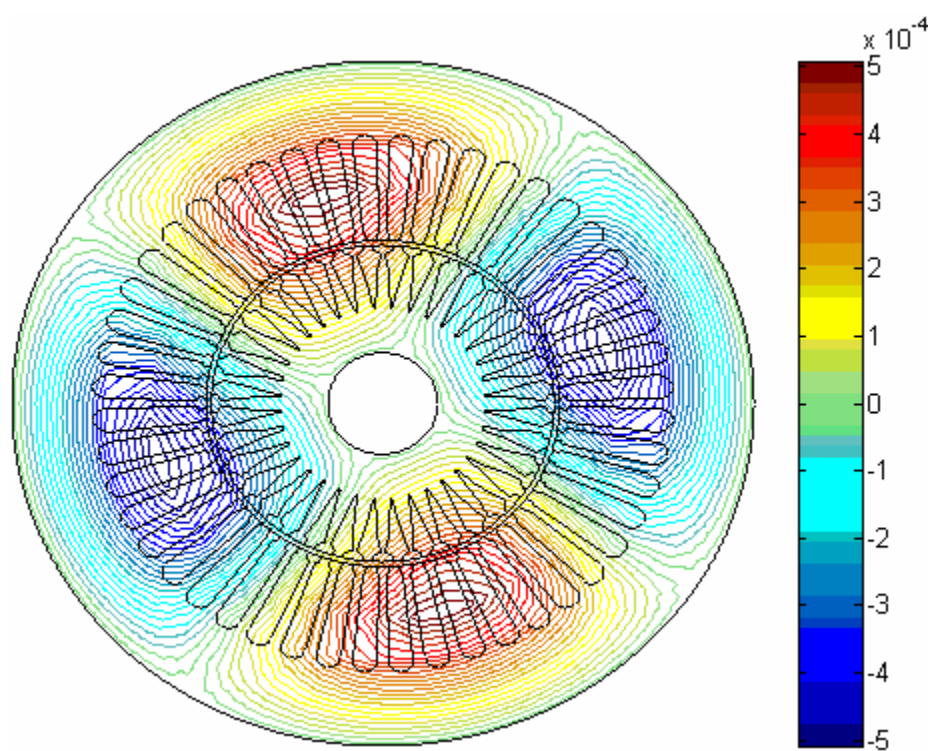
9.3.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงไว้ในบทที่ 7 โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° เทียบกับแกน $x+$ แสดงได้ดังรูปที่ 9.6 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ได้ปรากฏให้เห็นถึงขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไปจำนวน 4 ขั้ว เท่ากับจำนวนขั้วที่ใช้ในการจำลองผลของมอเตอร์ขนาดใหญ่อย่างเด่นชัด โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหมุนจะเริ่มเข้าทางเดินเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ 180° ซึ่งมีวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะเช่นเดียวกับการพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็ก แต่ขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A เมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีค่ามากกว่า และทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่ (รูปที่ 9.6) ได้กระจายเข้าไปในร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์ในปริมาณที่สูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก (รูปที่ 7.2 ของบทที่ 7) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากมอเตอร์ขนาดใหญ่มีจำนวนร่องของสเตเตอร์มากกว่าร่องของโรเตอร์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะที่คล้องกันตามแกนของสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีความเป็นไปได้สูงขึ้น ที่เส้นแรงแม่เหล็กจะใช้ทางเดินลวงล้ำแกนเข้าไปในร่องของสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นการปฏิสัมพันธ์ตามคุณลักษณะของขั้วแม่เหล็ก และเมื่อใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์คำนวณค่าการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี (F_r) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ประกอบกับการพิจารณาค่า F_r ในแต่ละซี่เทียบกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 9.7 โดยจากรูปจะสังเกตเห็นว่า เมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่ซึ่งประกอบไปด้วยฟันสเตเตอร์ทั้งหมด 48 ซี่ รูปคลื่นของ F_r จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 12 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตซ์ขั้วแม่เหล็ก โดยค่าของ F_r ในแต่ละซี่เทียบกับเวลาจะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามแรงที่มากกระทำกับฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ และมีคาบประมาณ 0.01 วินาที หรือมีความถี่เป็น 100 Hz เท่ากับ 2 เท่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับผลของมอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกัน แต่ขนาดของ F_r ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่เป็นสาเหตุ

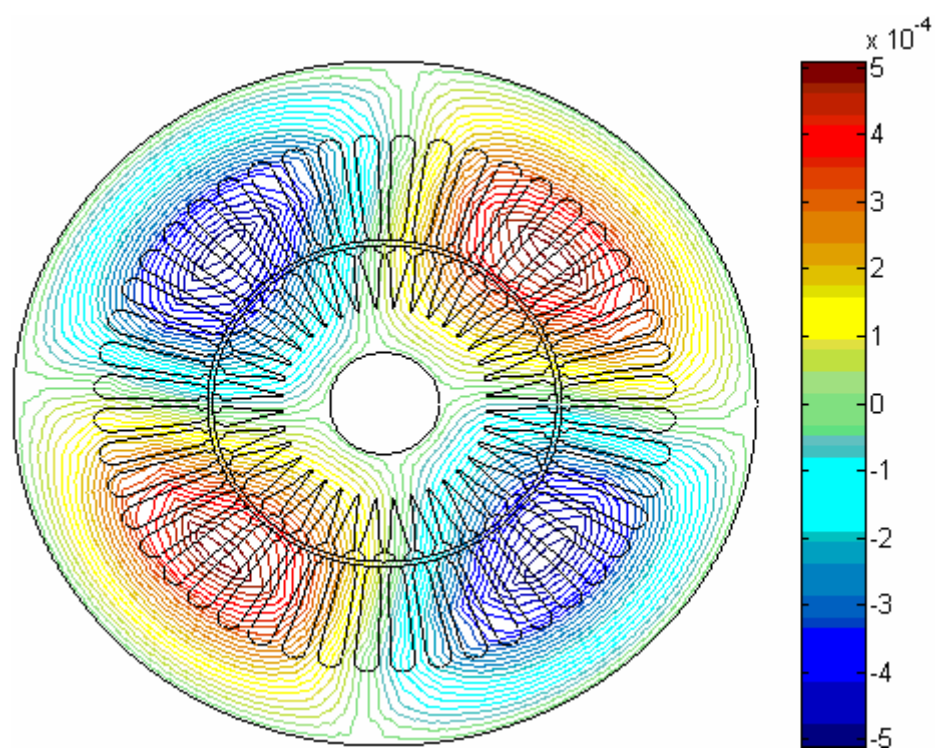
ให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์จะมีขนาดสูงกว่าประมาณ 10 เท่า และรูปคลื่นของ F_r เมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีความต่อเนื่องของรูปคลื่นมากกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 7.5 ของบทที่ 7 ที่ผ่านมา ซึ่งมีสาเหตุจากปริมาณฟลักซ์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่มีจำนวนซี่ที่มากกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก ดังนั้นจำนวนครั้งที่ F_r กระทำกับฟลักซ์ตลอดทั้งแกนจะมีค่ามากขึ้นกว่า จึงส่งผลให้รูปคลื่นของ F_r มีความต่อเนื่องมากขึ้นกว่าเช่นกัน ส่วนการคำนวณค่า THD ซึ่งใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงผลในเชิงปริมาณของความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมทางขนาดของ F_r ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกในความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.8 ซึ่งสเปกตรัมของค่า F_r ในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 12 มีค่า THD เท่ากับ 9.60%, 12.24%, 12.25%, 15.65%, 17.76%, 22.51%, 20.50%, 15.94%, 12.05%, 11.87%, 8.42% และ 8.16% ตามลำดับ ซึ่งมีค่า THD เฉลี่ยจากทั้งหมดทุกซี่ เท่ากับ 13.91% โดยมอเตอร์ทั้งสองขนาดเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ต่างก็มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ความถี่ 100 Hz ปรากฏอยู่อย่างเด่นชัดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบที่ความถี่อื่น



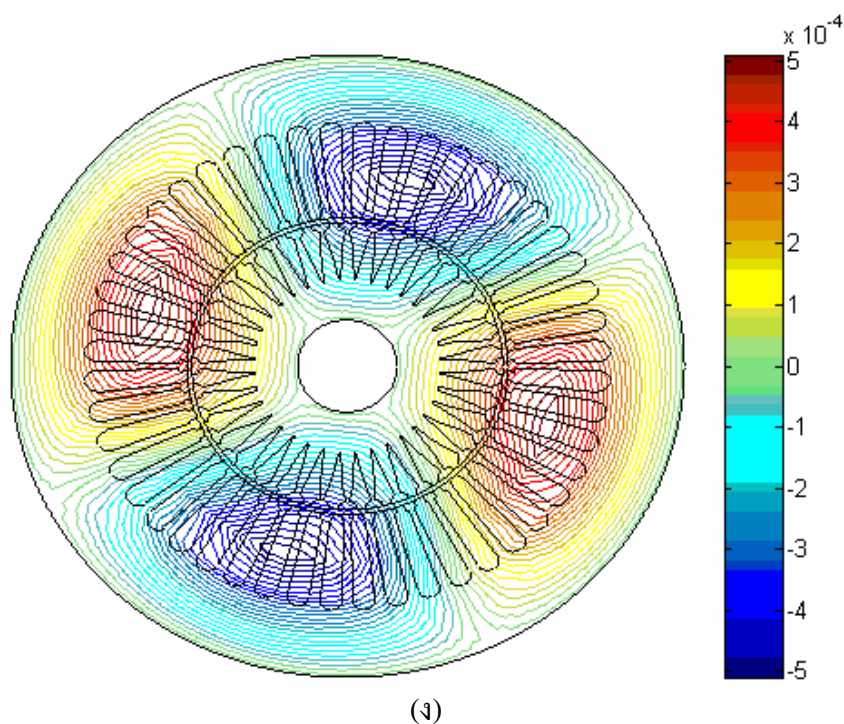
(ก)



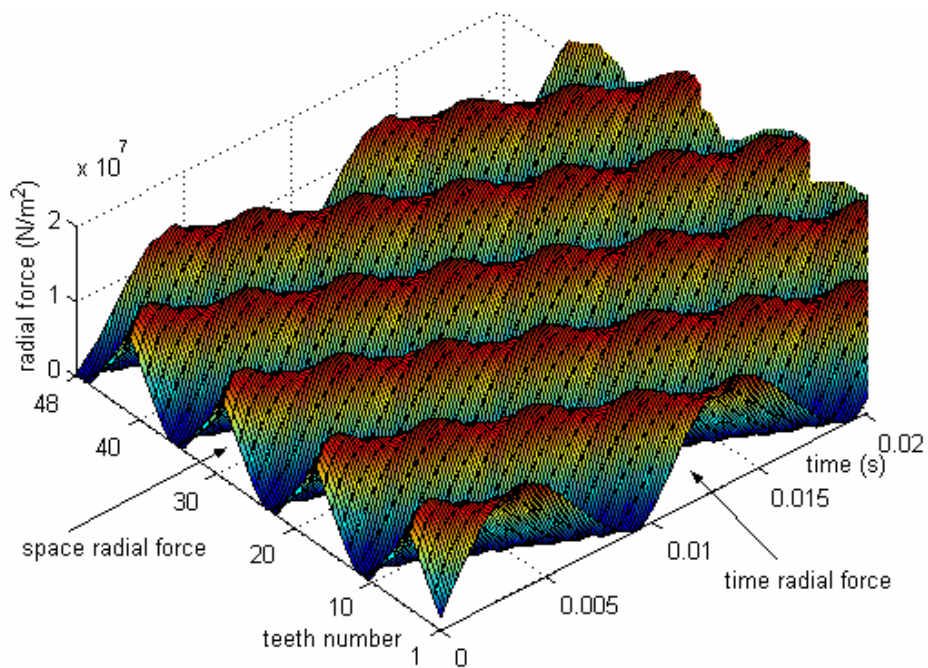
(a)



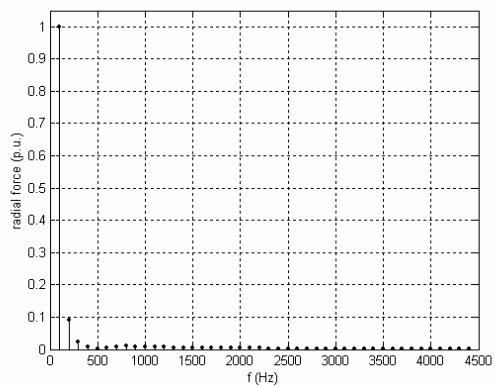
(b)



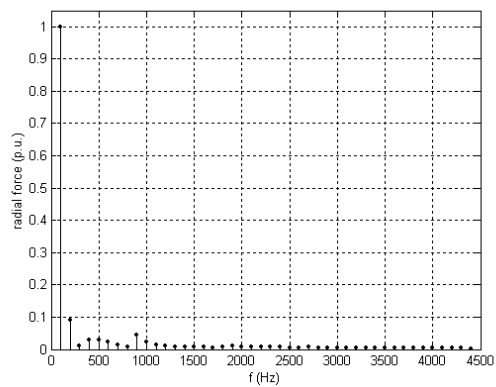
รูปที่ 9.6 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์
เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



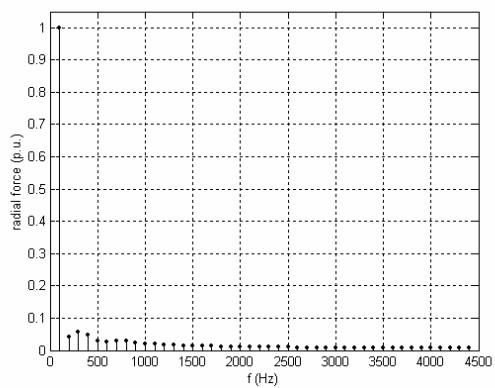
รูปที่ 9.7 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่
เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์



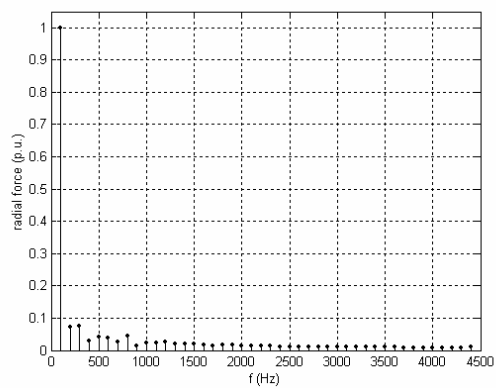
(ก)



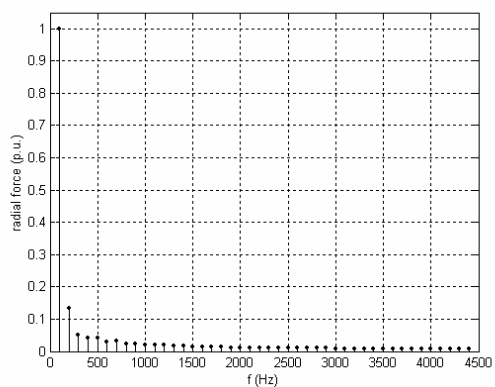
(ข)



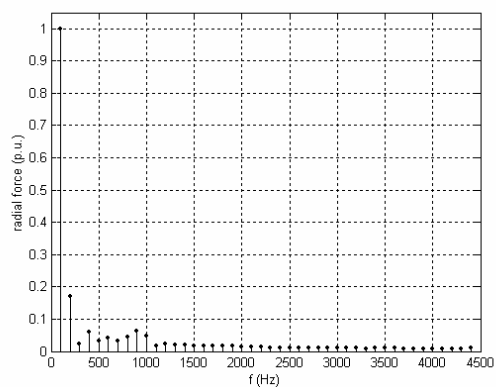
(ค)



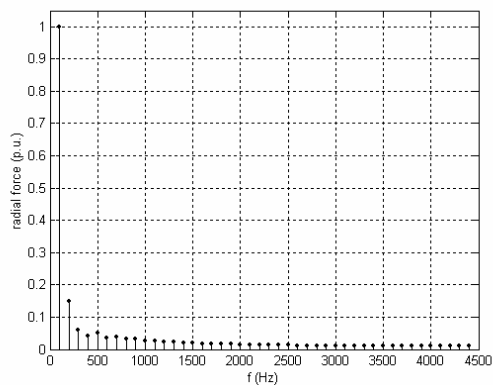
(ง)



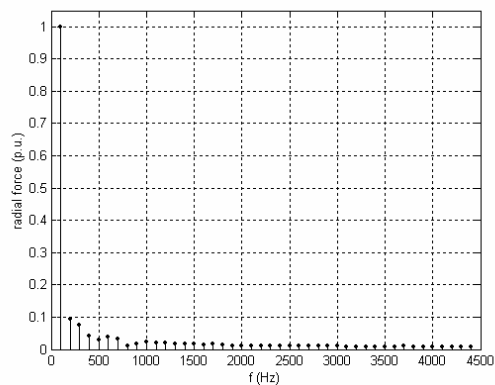
(จ)



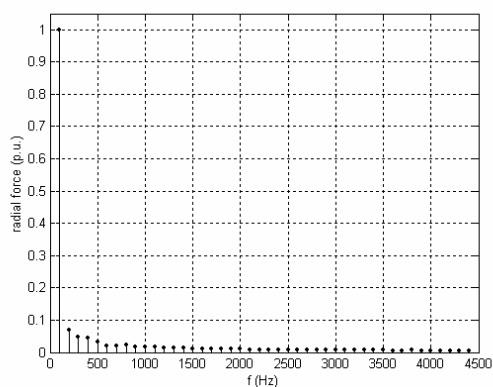
(ฉ)



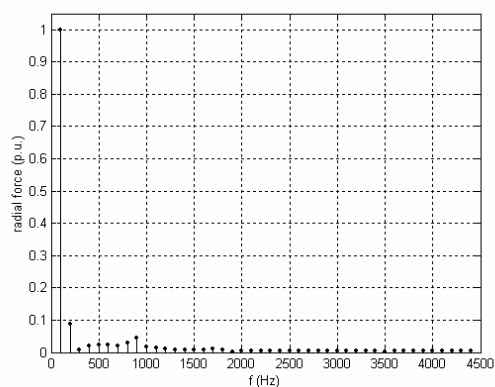
(ข)



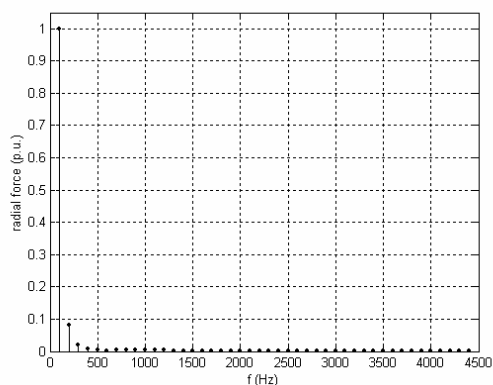
(ค)



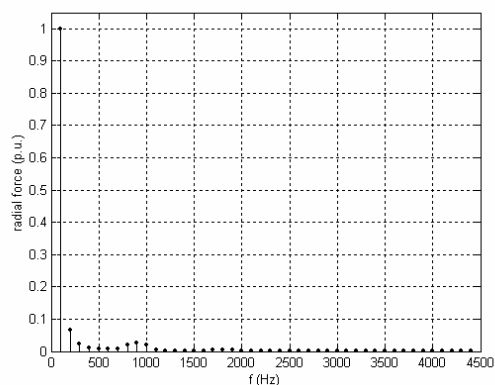
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

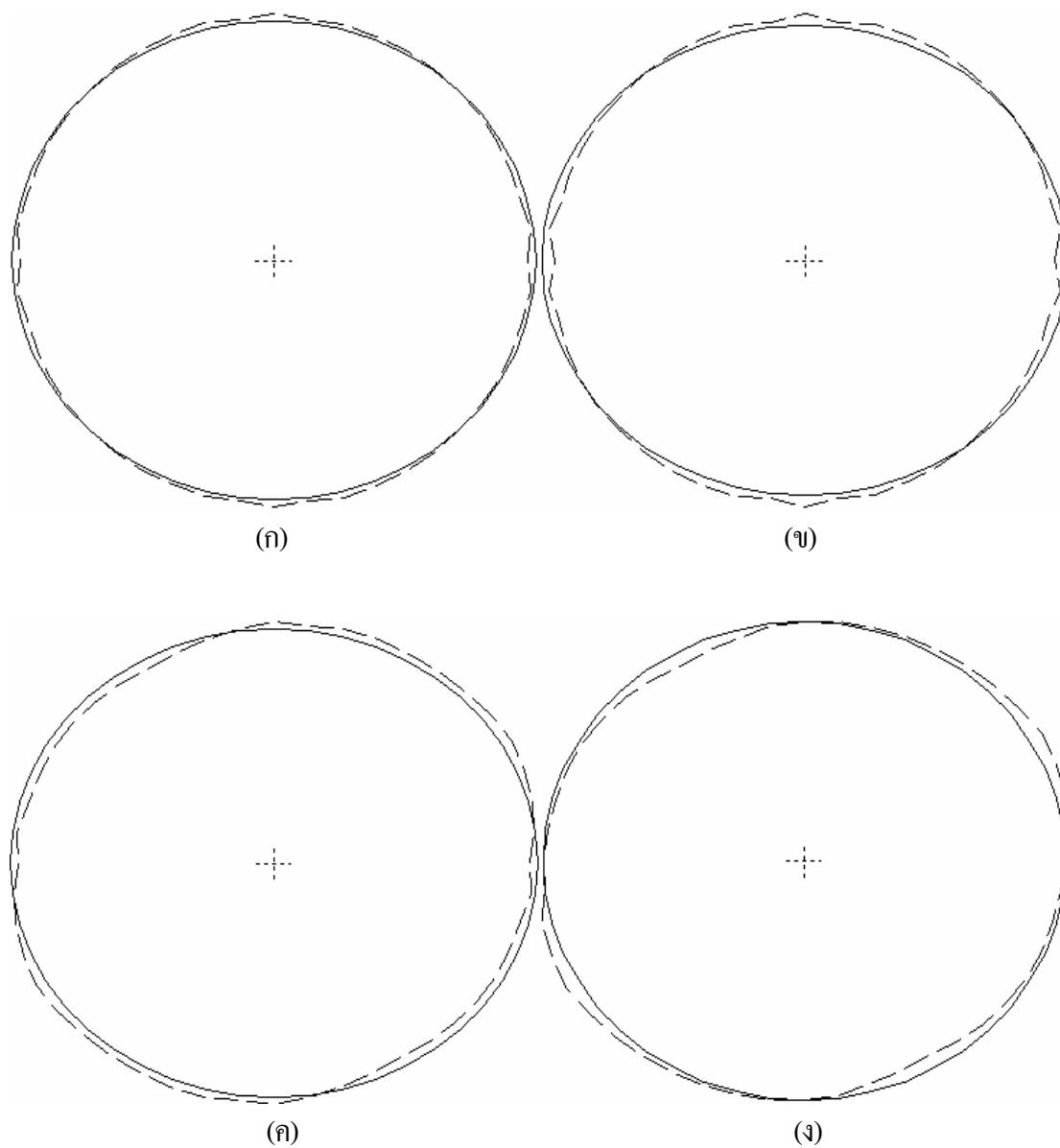
รูปที่ 9.8 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้แหล่งจ่าย
รูปคลื่นไซน์ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซีที่ 1, (ข) ซีที่ 2, (ค) ซีที่ 3, (ง) ซีที่ 4, (จ) ซีที่ 5,
(ฉ) ซีที่ 6, (ช) ซีที่ 7, (ซ) ซีที่ 8, (ฅ) ซีที่ 9, (ฌ) ซีที่ 10, (ฎ) ซีที่ 11 และ (ฏ) ซีที่ 12

9.3.2 ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนในมอเตอร์ มีสาเหตุมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำกับมอเตอร์ให้เกิดการสั่นสะเทือน การคำนวณการสั่นสะเทือนอาจดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับการจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 7 ผลลัพธ์การสั่นสะเทือนของมอเตอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ถูกแสดงในรูปของการกระจัดที่บิดเบี้ยวไปของสเตเตอร์ดังรูปที่ 9.9 ซึ่งเส้นประแสดงถึงการกระจัดที่ผิดรูปไปด้วยอัตราขยาย 10^8 เท่า จากตำแหน่งปกติซึ่งแทนด้วยเส้นทึบ โดยมอเตอร์ทั้งสองขนาดเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ต่างก็มีรูปร่างของการกระจัดที่บิดเบี้ยวไปในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งค่าการกระจัดเฉลี่ยเมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ของมอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 7.9999×10^{-6} mm (≈ 8 nm) โดยมีค่าการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกันอยู่ประมาณ 128 เท่า (สัดส่วนจำนวนเท่าของการสั่นสะเทือนที่ปรากฏระหว่างมอเตอร์ทั้งสองพิกัดในงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงเมื่อพิจารณาเทียบกับงานวิจัยที่เคยปรากฏมาก่อน (Kako, Tsuruta, Nagaishi, and Kohmo, 1983) และ (Neves, Carlson, Sadowski, and Bastos, 1998)) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าอันเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่ได้ปรากฏขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก

9.4 มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

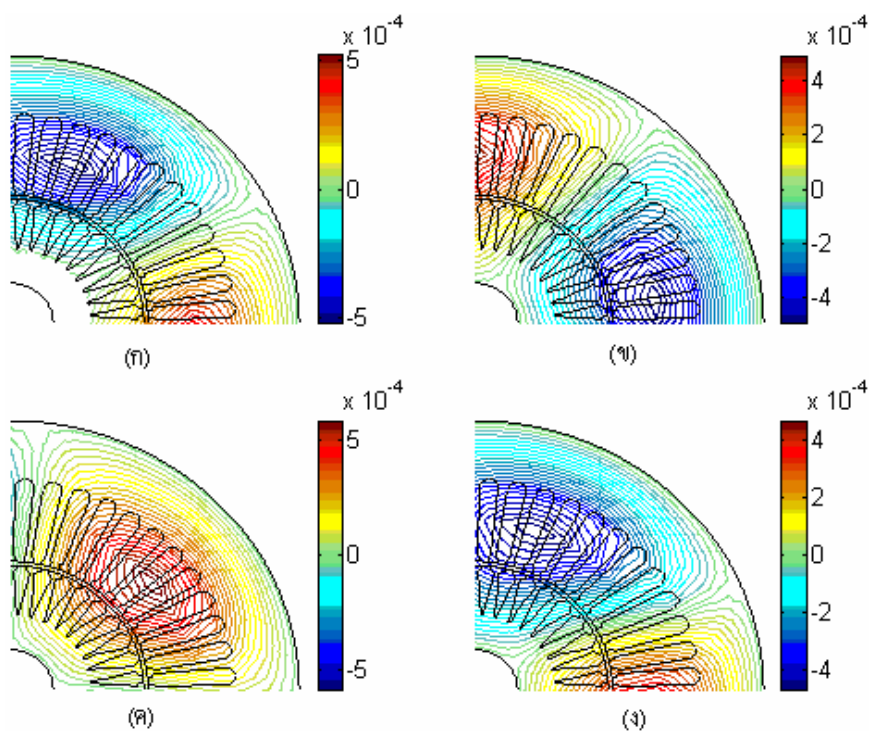
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่จ่ายให้มอเตอร์ขนาดใหญ่ มีค่าเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในกรณีที่พิจารณาแหล่งจ่ายไฟมีรูปคลื่นไซน์ดังที่ผ่านมาในข้างต้น เพื่อเป็นข้อกำหนดเดียวกันสำหรับเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายไฟคนละชนิดกัน เหมือนดังเช่นกรณีของการพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็ก



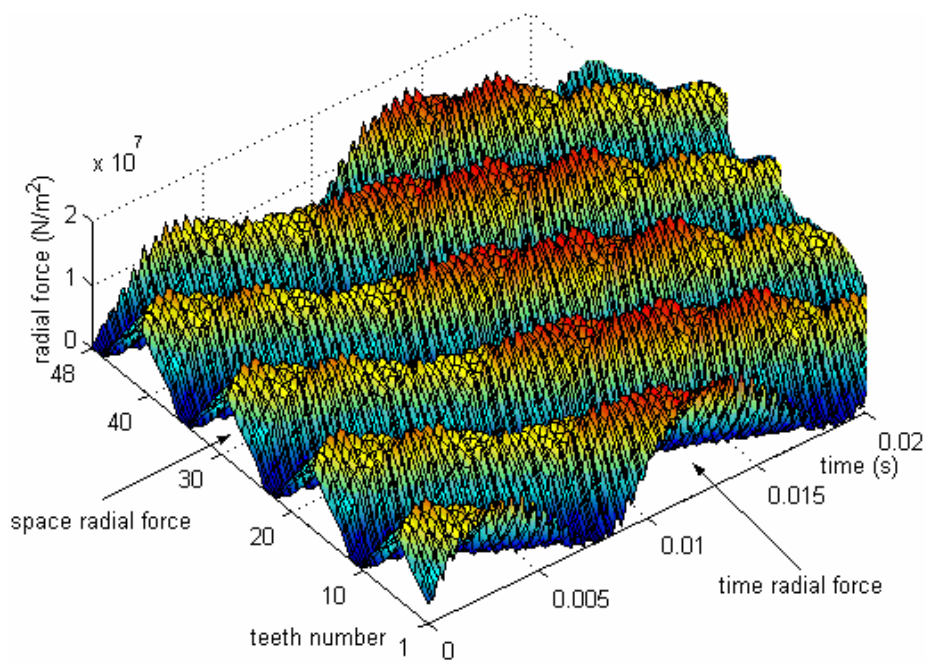
รูปที่ 9.9 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่
เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์เมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

9.4.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

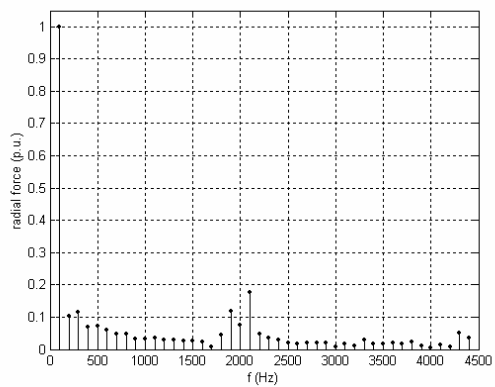
ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงไว้ในบทที่ 8 โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° แสดงได้ดังรูปที่ 9.10 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์บนพื้นที่หน้าตัดเพียง $1/4$ ของมอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ซึ่งต่างก็มีวิถีของเส้นแรงแม่เหล็กและขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวของ F_r ดังแสดงในรูปที่ 9.11 จะให้ผลลัพธ์ปรากฏออกมาค่อนข้างแตกต่างกันมาก ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า กราฟของ F_r เทียบกับเวลา จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกและมีขนาดของ F_r ไม่ต่างกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์มากนัก แต่จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในด้านความราบเรียบของการกระจายตัวของ F_r โดยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM รูปคลื่นของ F_r จะมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ราบเรียบคล้ายฟันเลื่อยสูงกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับผลของมอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกัน และรูปคลื่นของ F_r เมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีความต่อเนื่องของรูปคลื่นมากกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กดังที่เคยอธิบายเหตุผลผ่านมาแล้ว โดยค่า THD ในซีที่ 1 ถึงซีที่ 12 ดังแสดงในรูปที่ 9.12 มีค่าเท่ากับ 34.00%, 36.42%, 39.45%, 37.35%, 32.55%, 29.91%, 35.51%, 39.43%, 34.33%, 22.71%, 24.49% และ 29.86% ตามลำดับ ซึ่งทุกซีต่างก็มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ความถี่ 100 Hz ปรากฏอยู่อย่างชัดเจน พร้อมทั้งมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงประมาณ 2,000 Hz ปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นจำนวนเท่าตามอัตราส่วนมอดูเลตของสัญญาณ PWM ในแหล่งจ่ายไฟ ลักษณะการเกิดนี้เป็นไปในรูปแบบเดียวกันกับกรณีมอเตอร์ขนาดเล็ก (อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ใช้สำหรับจำลองผลในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าอัตราส่วนมอดูเลตเท่ากับ 20) ค่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ของมอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 33.01% ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ที่มีค่า 13.91% อยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งความราบเรียบในการกระจายตัวของ F_r ที่แตกต่างกันนี้ จะส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของการสันสะเทือนดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไป



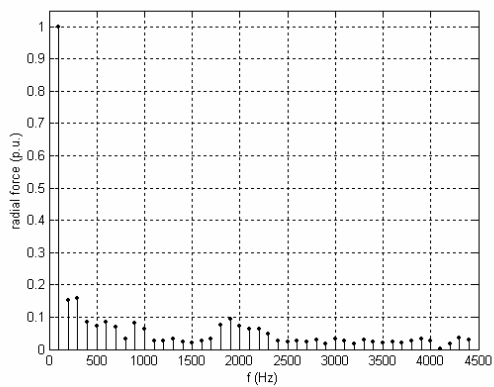
รูปที่ 9.10 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM
เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



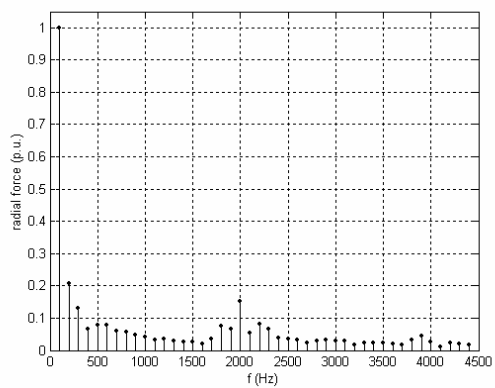
รูปที่ 9.11 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่
เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM



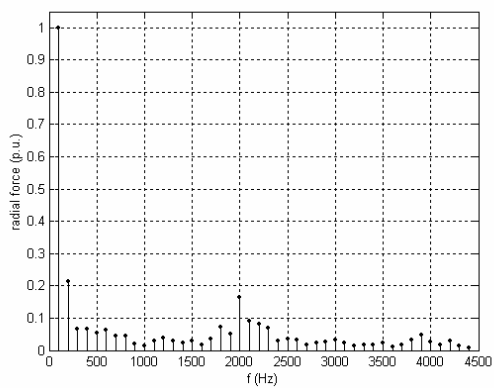
(ก)



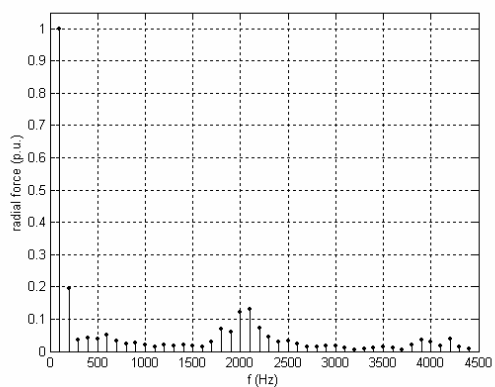
(ข)



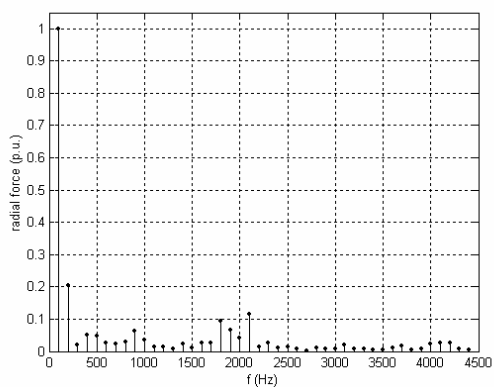
(ค)



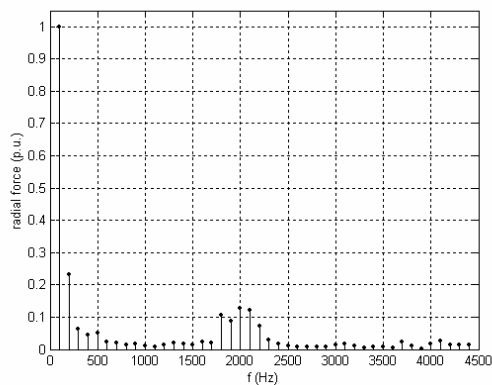
(ง)



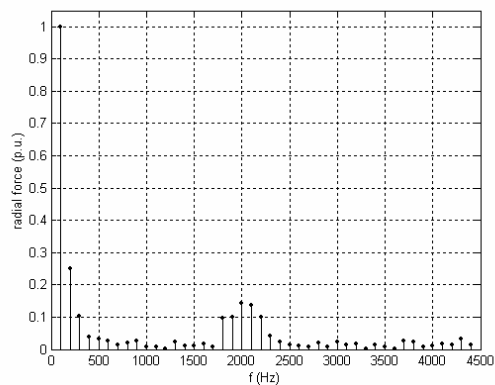
(จ)



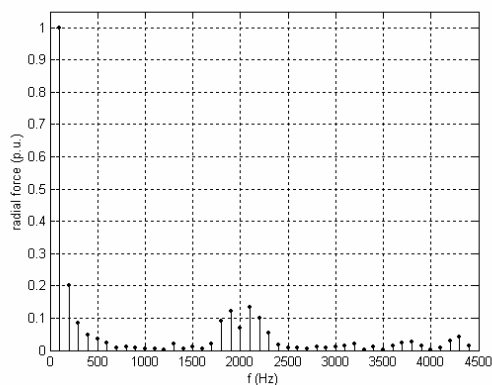
(ฉ)



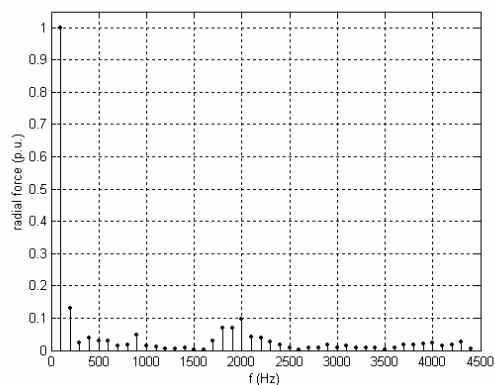
(ข)



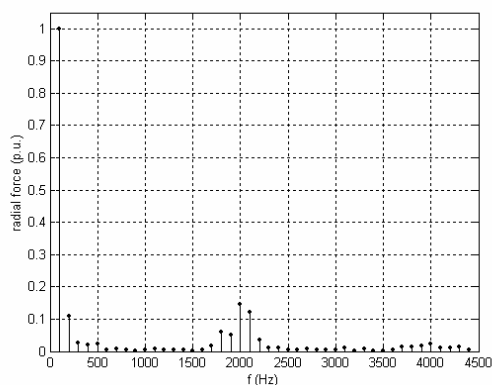
(ช)



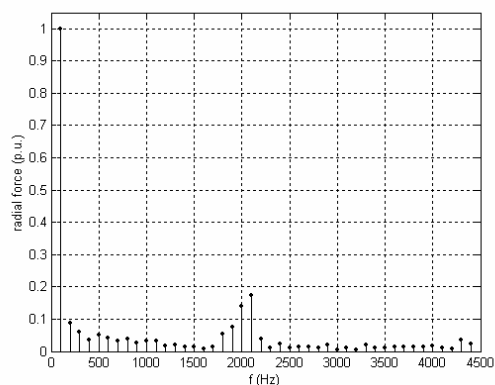
(ค)



(ง)



(จ)

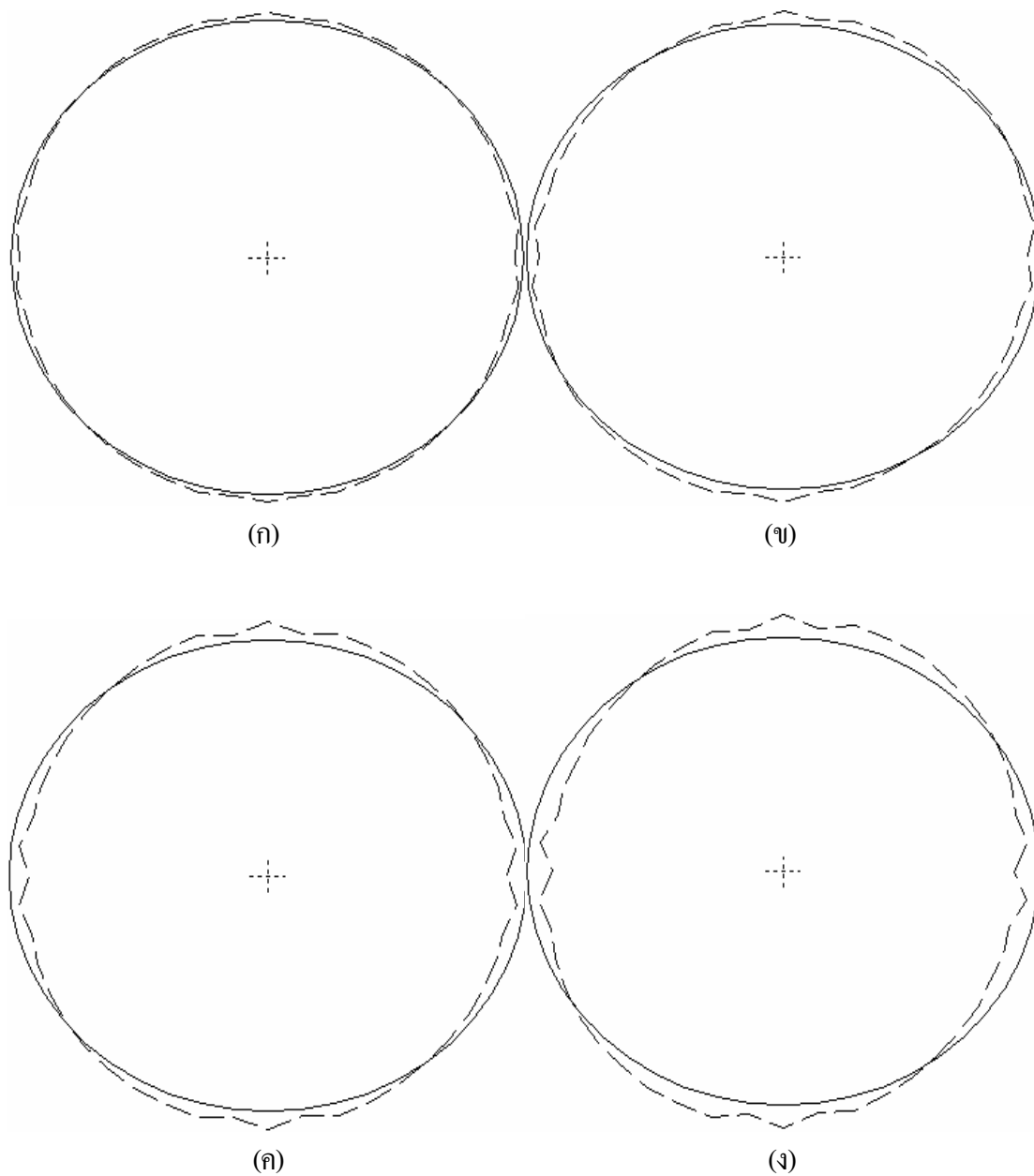


(ฉ)

รูปที่ 9.12 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5, (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8, (ฌ) ซี่ที่ 9, (ญ) ซี่ที่ 10, (ฎ) ซี่ที่ 11 และ (ฏ) ซี่ที่ 12

9.4.2 ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน

ผลการสั่นสะเทือนเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดำเนินการได้ในลักษณะเช่นเดียวกับการจำลองผลของมอเตอร์ขนาดเล็กดังที่แสดงไว้แล้วในบทที่ 8 ซึ่งผลลัพธ์การสั่นสะเทือนของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM แสดงได้ดังรูปที่ 9.13 โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่จะปรากฏรูปร่างของการกระจัดที่บิดเบี้ยวไปในลักษณะที่ไม่ราบเรียบมากกว่าเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 8.7 ของบทที่ 8 ที่ผ่านมา ซึ่งการกระจัดเฉลี่ยเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 9.0837×10^{-6} mm โดยมีค่าการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกันอยู่ประมาณ 131 เท่า ส่วนเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟต่างชนิดกัน มอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยสูงกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์อยู่คิดเป็นร้อยละ 13.55 (ปรากฏร้อยละใกล้เคียงกับมอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาในลักษณะเดียวกันกับผลของบทที่ 8 ที่ผ่านมา โดยมีค่าคิดเป็นร้อยละ 11.26) ซึ่งผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยค่าการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับสูงที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM



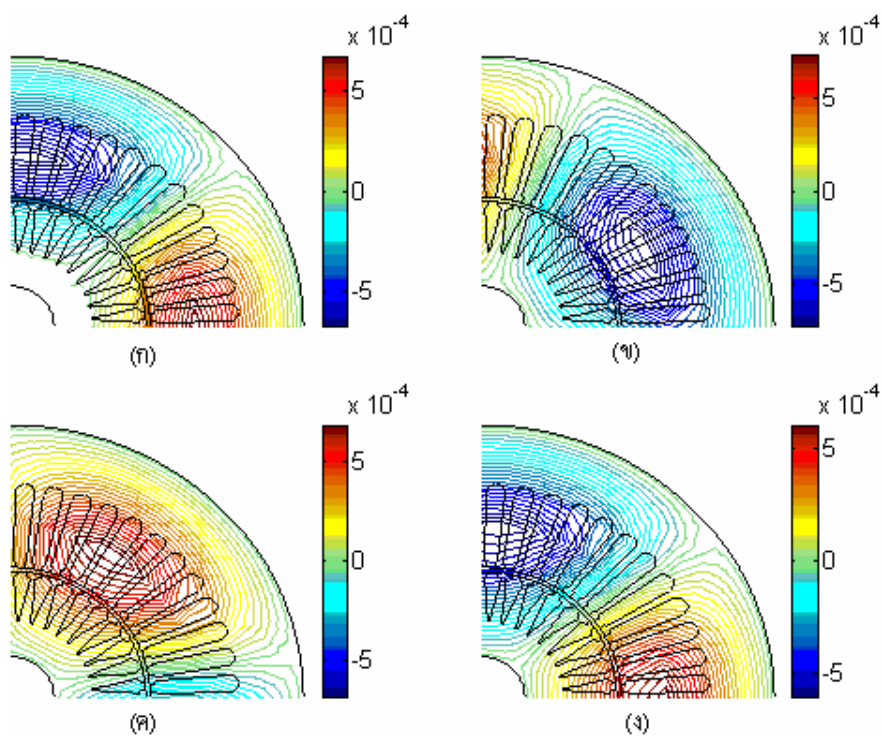
รูปที่ 9.13 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่
เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เมื่อโรเตอร์หมุนไป
(ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

9.5 มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ

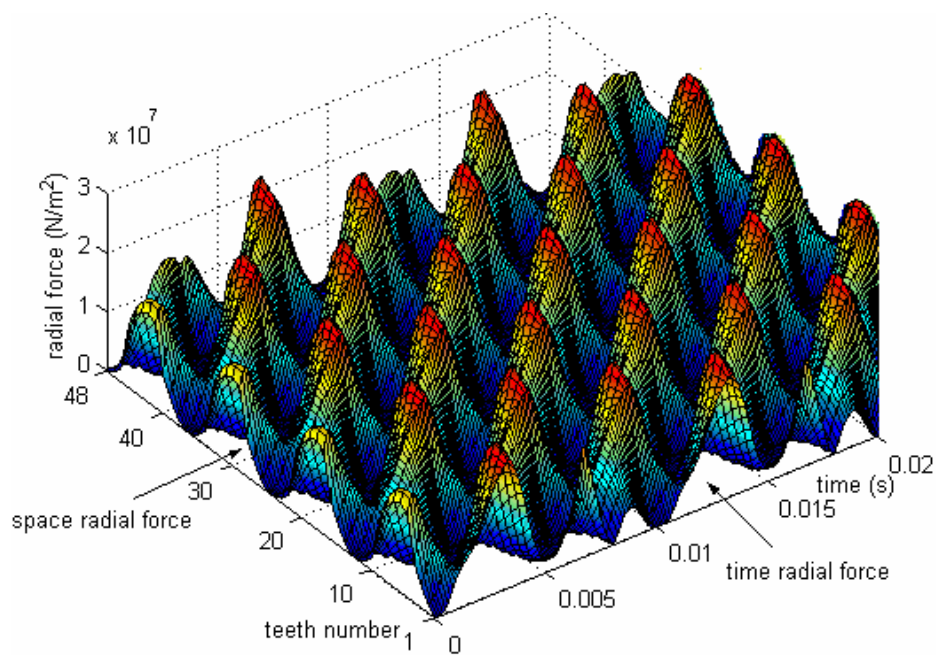
ในงานวิจัย ได้กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ มีค่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์เท่ากับในกรณีที่พิจารณาแหล่งจ่ายอื่นๆ ในข้างต้น เพื่อเป็นข้อกำหนดเดียวกันสำหรับเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองของแหล่งจ่ายไฟแต่ละชนิด

9.5.1 ผลและอภิปรายผลการกระจายสนามแม่เหล็ก

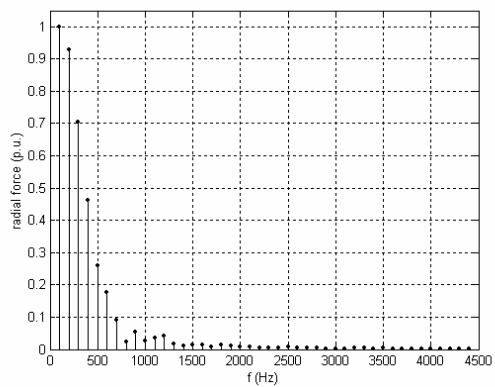
ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่แสดงค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A (Wb/mm) ในรูปคอนทัวร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับแสดงได้ดังรูปที่ 9.14 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ได้แสดงไว้ในข้างต้น แต่เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวของ F_r ดังแสดงในรูปที่ 9.15 จะให้ผลลัพธ์ออกมาแตกต่างค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟแบบอื่น ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า กราฟของ F_r เทียบกับเวลา จะมีลักษณะเป็นคาบที่รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่ได้จากการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบอื่น และมีแอมพลิจูดของ F_r ค่อนข้างสูงกว่าแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีลักษณะเหมือนกับผลของมอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 8.11 ของบทที่ 8 ที่ผ่านมา แต่จะมีแอมพลิจูดของ F_r สูงแตกต่างกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กมาก โดยค่า THD ในซีที่ 1 ถึงซีที่ 12 ดังแสดงในรูปที่ 9.16 มีค่าเท่ากับ 129.95%, 137.33%, 145.64%, 143.64%, 139.07%, 138.94%, 136.57%, 131.71%, 133.79%, 136.43%, 136.45% และ 130.47% ตามลำดับ ซึ่งทุกซีต่างก็มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ความถี่ 100 Hz ปรากฏอยู่ ประกอบกับมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกในความถี่ที่สูงขึ้นในสัดส่วนที่ค่อยๆ ลดหลั่นกันลงไปเช่นเดียวกับการพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็ก โดยผลของฮาร์มอนิกที่ปรากฏนี้ จะมีความสอดคล้องกับฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแหล่งจ่ายกระแสเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับซึ่งมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกในลักษณะอย่างนี้เช่นกัน (Belmans, Hondt, Vandenput, and Geysen, 1987) ค่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับของมอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 136.66% ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า THD เฉลี่ยเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีค่า 13.91% และ 33.01% ตามลำดับ อยู่มาก



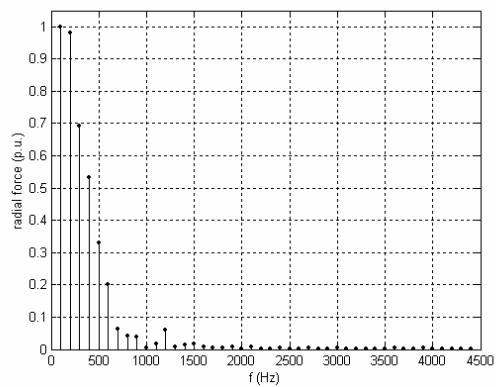
รูปที่ 9.14 เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ
เมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก) 0° , (ข) 60° , (ค) 120° และ (ง) 180°



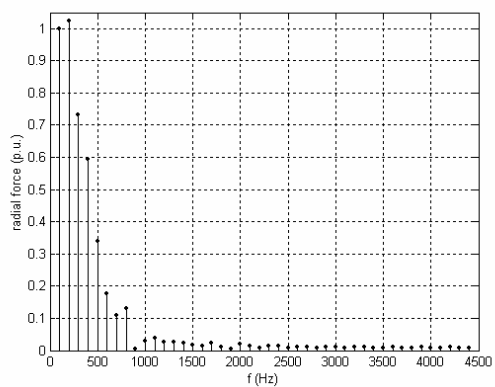
รูปที่ 9.15 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่
เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ



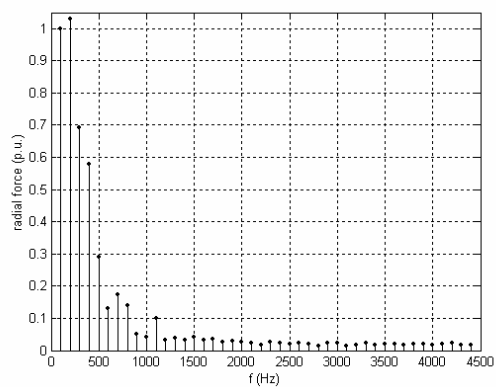
(ก)



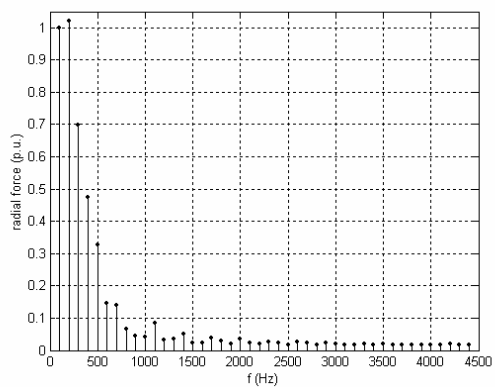
(ข)



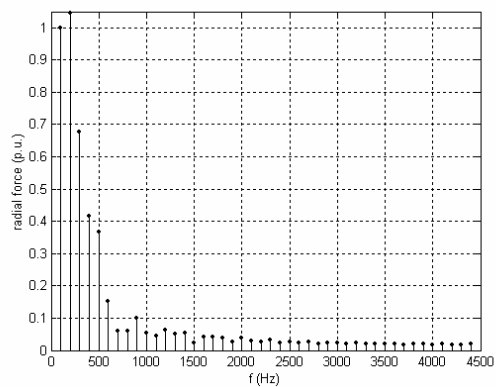
(ค)



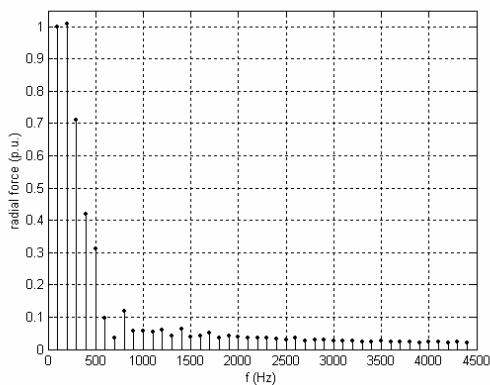
(ง)



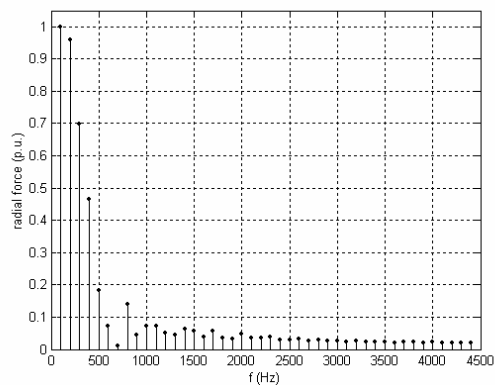
(จ)



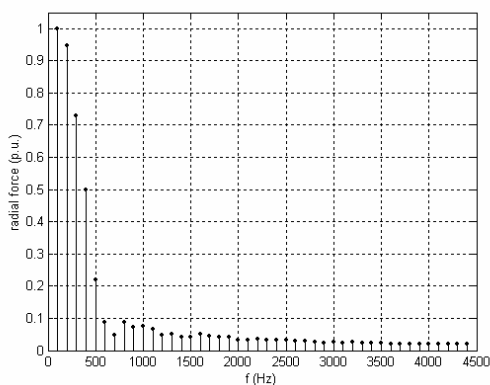
(ฉ)



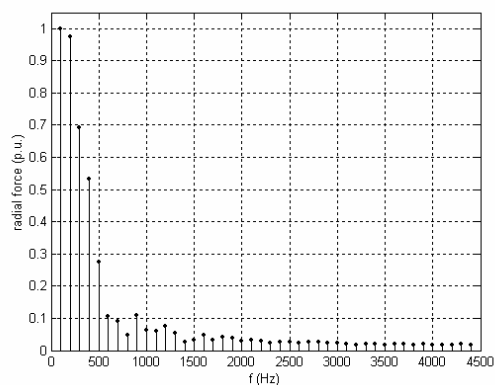
(ข)



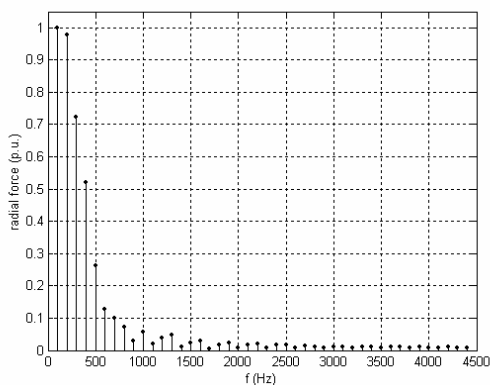
(ค)



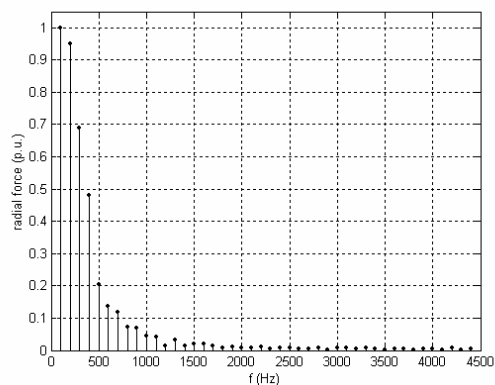
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

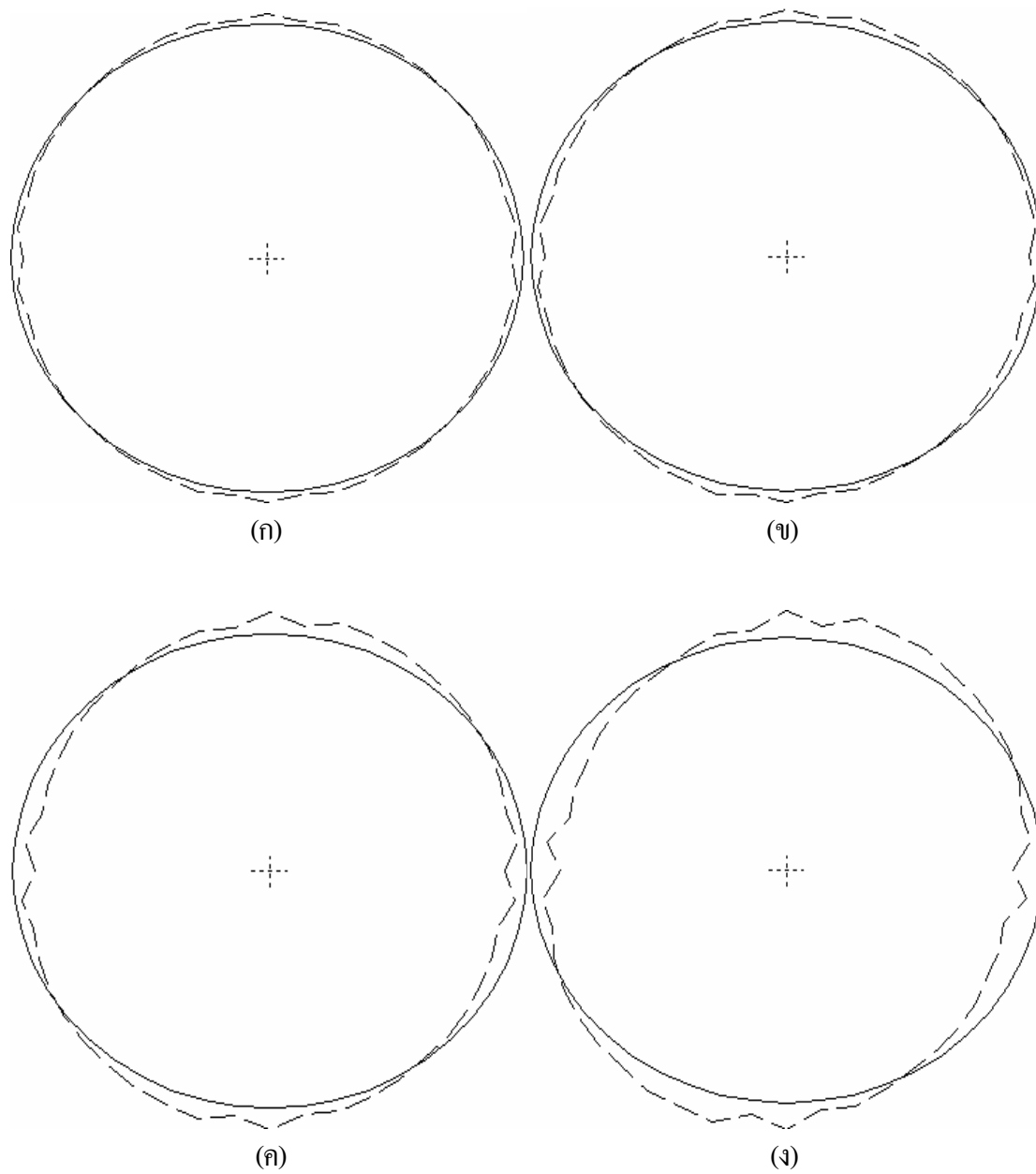
รูปที่ 9.16 สเปกตรัมทางขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์
แบบหกระดับที่กระทำกับฟันสเตเตอร์ (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5,
(ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8, (ณ) ซี่ที่ 9, (ญ) ซี่ที่ 10, (ฎ) ซี่ที่ 11 และ (ฏ) ซี่ที่ 12

9.5.2 ผลและอภิปรายผลการสั่นสะเทือน

ผลลัพธ์การสั่นสะเทือนของมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ แสดงได้ดังรูปที่ 9.17 โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่จะปรากฏรูปร่างของการกระจัดที่บิดเบี้ยวไปในลักษณะที่ไม่ราบเรียบมากกว่าเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 8.12 ของบทที่ 8 ที่ผ่าน มาอย่างเห็นได้ชัด การกระจัดเฉลี่ยเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 9.6184×10^{-6} mm โดยมีค่าการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาแหล่งจ่ายในกรณีเดียวกันอยู่ประมาณ 135 เท่า ส่วนเมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟต่างชนิดกัน มอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยสูงกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM อยู่คิด เป็นร้อยละ 20.23 และ 5.89 ตามลำดับ (ปรากฏร้อยละใกล้เคียงกับมอเตอร์ขนาดเล็กที่พิจารณาใน ลักษณะเดียวกันกับผลของบทที่ 8 ที่ผ่านมา โดยมีค่าคิดเป็นร้อยละ 14.32 และ 2.75 ตามลำดับ) ซึ่ง ผลที่ปรากฏจะสอดคล้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยการสั่นสะเทือน ที่มีค่าสูงนี้ เป็นผลมาจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับมีปริมาณค่อนข้างสูง มาก

9.6 สรุป

บทที่ 9 นี้ เป็นการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ขนาดใหญ่พิกัด 500 แรงม้า เมื่อมอเตอร์ได้รับแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และ อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับมอเตอร์ขนาดเล็กในบทที่ผ่านมา ซึ่ง ผลลัพธ์ของมอเตอร์ทั้งสองพิกัดต่างมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายแต่ละชนิด จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กประมาณ 130 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มอเตอร์ขนาดใหญ่ได้ปรากฏขนาดของแรง แม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก ซึ่งมอเตอร์ทั้งสองพิกัดจะเกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดเมื่อมี แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แต่การสั่นสะเทือนจะเกิดสูงสุดเมื่อมอเตอร์ได้รับพลังงานจาก แหล่งจ่ายชนิดอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะมีค่าการกระจัดเฉลี่ยอันเป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการ สั่นสะเทือนในมอเตอร์ มีค่ามากกว่าเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์คิดเป็นร้อยละ 13.55 และ 20.23 ตามลำดับ



รูปที่ 9.17 การบิดเบี้ยวของวงรอบด้านในสเตเตอร์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่
 เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับเมื่อโรเตอร์หมุนไป
 (ก) 1/4 รอบ, (ข) 1/2 รอบ, (ค) 3/4 รอบ และ (ง) 1 รอบ

บทที่ 10

สรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะเทือนทางกลในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกรงกระรอก เพื่อใช้ออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ของมอเตอร์ขนาดเล็กพิกัด 3 แรงม้า เพื่อปรับปรุงคุณภาพการหมุนของมอเตอร์ให้สั้นสะเทือนน้อยลง การจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติ ร่วมกับกระบวนการนิเวศน์-ราฟสันเป็นเครื่องมือสำหรับแก้สมการไม่เชิงเส้นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ประกอบกับวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อศึกษาถึงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นแรงภายนอกมากระทำกับมอเตอร์ให้เกิดการสั้นสะเทือน โดยตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณด้วยการเปรียบเทียบผลการสั้นสะเทือนจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับผลทางปฏิบัติที่ได้จากการวัดทดสอบ การออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ได้พิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ทำให้มอเตอร์มีลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วตามชั้นคุณสมบัติ B เป็นรูปแบบอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบการสั้นสะเทือน พร้อมทั้งศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั้นสะเทือนในมอเตอร์กับร่องโรเตอร์แต่ละแบบ โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟรูปลิ้นไซน์บริสุทธิ์ แหล่งจ่ายไฟอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และแหล่งจ่ายไฟอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ ประกอบกับได้ดำเนินการจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่พิกัด 500 แรงม้า เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กและผลของการสั้นสะเทือนกับกรณีของมอเตอร์ขนาดเล็ก การประดิษฐ์ไฟไนท์อีลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ภาษาการโปรแกรม BORLAND C++ โดยรับค่าอินพุตจากโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB พร้อมแสดงผลด้วยภาพกราฟฟิกต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ผล

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อาศัยรากฐานจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ ซึ่งบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอบทปริทัศน์วรรณกรรมเหล่านั้น พร้อมทั้งศึกษาทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 การทำความเข้าใจถึงสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงตาม

เวลาในมอเตอร์ค่อนข้างทำได้ยาก จึงต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และประยุกต์ใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์เพื่อใช้ในการจำลองผล การดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ และขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าว ส่วนการคำนวณขนาดของการสั้นสะพานในมอเตอร์ในรูปของการกระจัดที่ครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ต้องอาศัยการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูง ทำให้ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลด้วยการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์เช่นกัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั้นสะพานในมอเตอร์ และขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าการสั้นสะพานดังกล่าว ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 เนื้อหาในบทที่ 6 นำเสนอการอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมเพื่อใช้จำลองผลสนามแม่เหล็กและจำลองผลการสั้นสะพาน ตลอดจนโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติ พร้อมเปรียบเทียบผลการสั้นสะพานของมอเตอร์ขนาดเล็กที่ได้จากการจำลองผลกับผลที่ได้จากการวัดทดสอบ การดำเนินงานในบทที่ 7 เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าและทางกลที่ได้จากการจำลองผลสนามแม่เหล็กและการสั้นสะพานในมอเตอร์ เมื่อพิจารณารูปร่างร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการสั้นสะพาน เปรียบเทียบกับรูปร่างร่องโรเตอร์แบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นสองรูปแบบเพื่อลดผลของการสั้นสะพาน โดยพิจารณาแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์อันเป็นแหล่งจ่ายพื้นฐานที่ใช้ออกแบบมอเตอร์ และมีเกณฑ์ขนาดพื้นที่หน้าตัดของร่องโรเตอร์ที่เท่ากันเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ ลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นคงยังมีลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B รูปร่างร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้เป็นร่องอ้างอิงเพื่อการพัฒนาร่องโรเตอร์แบบใหม่ แสดงไว้ด้วยรูปที่ 7.1 และรูปร่างร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สองรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย แสดงไว้ด้วยรูปที่ 7.8 และ 7.14 ตามลำดับ การศึกษาและวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อ การสั้นสะพานเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เมื่อใช้ร่องโรเตอร์แบบต่างๆ แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 8 ส่วนการศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกในมอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายไฟรูปคลื่นไซน์ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เช่นเดียวกันกับมอเตอร์ขนาดเล็ก ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 9

การเปรียบเทียบผลการสั้นสะพานในมอเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการจำลองผลและการวัดทดสอบของมอเตอร์ขนาดเล็ก ได้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ในการพัฒนารูปร่างร่องโรเตอร์ขึ้นใหม่สองรูปแบบเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ เพื่อลดขนาดของการสั้นสะพานในมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลงกว่าเมื่อเทียบกับ

ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม ได้ดำเนินการบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทุกประการ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองรูปแบบจะมีค่าน้อยลง และยังคงรักษาลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกับร่องดั้งเดิม ซึ่งร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกและร่องโรเตอร์แบบฟันเลื่อย มีค่าการสั่นสะเทือนลดลงเมื่อเทียบกับร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมคิดเป็นร้อยละ 0.58 และ 0.12 ตามลำดับ โดยร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกจะปรากฏขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำที่สุด หรืออาจสังเกตได้จากการพิจารณาปริมาณของฮาร์มอนิกที่เป็นตัวแทนสำหรับวัดค่าความราบเรียบในการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าอันเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ซึ่งร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกได้ปรากฏปริมาณของฮาร์มอนิกมีค่าต่ำที่สุดสอดคล้องกับขนาดของการสั่นสะเทือนที่มีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน และเมื่อพิจารณารูปร่างร่องโรเตอร์แบบต่างๆ ที่มีผลต่อการสั่นสะเทือน จึงอาจสรุปได้ว่า ขนาดของการสั่นสะเทือนจะมีค่าลดลงเมื่อเลือกใช้ร่องโรเตอร์ที่ตื้นขึ้น ทั้งนี้เพราะร่องโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ทั้งสองรูปแบบมีความลึกน้อยกว่าร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิม แต่การสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณารูปร่างร่องโรเตอร์นั้นไม่ได้มีแค่ปัจจัยหลักเพียงความลึกของร่องอย่างเดียวเท่านั้น ยังมีปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของร่องประกอบด้วย ซึ่งปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตอาจส่งผลกระทบต่อสั่นสะเทือนน้อยกว่าปัจจัยทางด้านความลึก ทั้งนี้อาจมีเหตุผลเนื่องจากข้อกำหนดความต้องการด้านพื้นที่หน้าตัดที่ต้องเท่ากันของร่องแต่ละแบบ และวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์เป็นชนิดเดียวกัน ดังนั้นในการออกแบบร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงความลึกของร่องซึ่งเป็นปัจจัยหลัก ควบคู่ไปกับปัจจัยทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของร่อง พร้อมทั้งคำนึงถึงลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมกับลักษณะของงานนั้นๆ ไปพร้อมกัน ส่วนการศึกษาถึงการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ทั้งสองขนาดพิกัด เมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟต่างชนิดกัน อันได้แก่ แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เพื่อศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ของมอเตอร์ทั้งสองขนาดต่างมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยมอเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายแต่ละชนิด จะมีขนาดของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็กประมาณ 130 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มอเตอร์ขนาดใหญ่ได้ปรากฏขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่ามอเตอร์ขนาดเล็ก ในกรณีพิจารณาร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะเกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ขนาดเล็กมีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์คิดเป็นร้อยละ 11.26 และ 14.32 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณามอเตอร์ขนาดใหญ่มีค่าคิดเป็นร้อยละ 13.55 และ 20.23 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟรูปไซน์บริสุทธิ์ มอเตอร์จะเกิดการสั่นสะเทือนมีขนาดต่ำที่สุด ในขณะที่การใช้

อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับจะเกิดการสั่นสะเทือนมีขนาดสูงที่สุด โดยพิจารณาได้จากการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ จะมีการกระจายตัวในลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวกที่มีความราบเรียบค่อนข้างสูง ในขณะที่เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ จะมีการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปมากจากรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวก ซึ่งสอดคล้องกับผลของการสั่นสะเทือนที่ปรากฏ และเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติแรงบิด-อัตราเร็วเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ มอเตอร์ต่างก็ให้ลักษณะสมบัติตามชั้นคุณสมบัติ B เช่นเดียวกันกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ อีกทั้งขนาดของการสั่นสะเทือนในกรณีที่พิจารณาผลของรูปร่างร่องโรเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับต่างมีค่าไปในทิศทางเดียวกับเมื่อใช้แหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ โดยสรุปประเด็นได้ว่าร่องโรเตอร์แบบสี่เหลี่ยมร่องลึกก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีขนาดต่ำสุด ในขณะที่ร่องโรเตอร์แบบดั้งเดิมก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีขนาดสูงสุด และสามารถสรุปได้อีกว่าผลกระทบของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้มอเตอร์ต่างชนิดกัน มีผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์มากกว่าผลกระทบของรูปร่างร่องโรเตอร์ที่ต่างแบบกันอยู่ค่อนข้างมาก และในทางปฏิบัติการขับมอเตอร์ด้วย อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เป็นหนทางที่ควรเลือกใช้มากกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายโดยอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับมีฮาร์มอนิกปนเปื้อนในปริมาณมาก

10.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. นำลักษณะการมีความสมมาตรของรูปทรงมอเตอร์มาร่วมพิจารณา ซึ่งอาจใช้การประมวลผลโดยวิธีไฟในทอพลิเมนต์เพียง 1/4 ของรูปทรงกลมของมอเตอร์ จึงสามารถประหยัดเวลาและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลลงไปได้มาก
2. ปรับเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยหลีกเลี่ยงการใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งไม่เหมาะสมกับรูปแบบที่ใช้วิธีไฟในทอพลิเมนต์ โดยอาจเลือกใช้แบบจำลองที่เป็นรูปแบบอันสอดคล้องกับการใช้วิธีไฟในทอพลิเมนต์แบบพื้นฐานต่างๆ ไปเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น
3. การออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของรูปร่างร่องโรเตอร์ในแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนแล้วประมวลองค์ความรู้ที่ได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ ซึ่งอาจปรากฏรูปร่างร่องโรเตอร์ที่ลดการสั่นสะเทือนได้ยังไม่ดีถึงที่สุด ดังนั้นงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อจึงอาจนำเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization technique) มาใช้พิจารณาในการออกแบบรูปร่างร่องโรเตอร์ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อปรากฏรูปร่างร่องโรเตอร์ที่มีการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ต่ำที่สุด

ภายใต้เงื่อนไขพื้นที่หน้าตัดของร่อง ความลึกของร่อง และวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขอบเขตที่กำหนด พร้อมทั้งปรับปรุงโปรแกรมการสร้างกริดอัตโนมัติให้มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และปรับปรุงโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองผลให้ประมวลผลได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เพื่อรองรับเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดดังกล่าว การคำนวณอาจต้องพึ่งพาคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงหรือการประมวลผลแบบขนาน

4. นำวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) หรือวิธีเอลิเมนต์ขอบ (boundary element method) มาแก้ปัญหของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แทนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ดำเนินการอยู่ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานค่อนข้างยุ่งยาก ซับซ้อน โดยวิธีการที่จะนำมาทดแทนดังกล่าว มีการดำเนินงานที่ไม่ยุ่งยากและใช้เวลาในการประมวลผลเร็ว รวมถึงมีความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่อาจมีข้อจำกัดในกรณีที่มีปัญหาที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้นจึงต้องพัฒนาวิธีการดังกล่าวนี้ให้รองรับปัญหาในลักษณะเช่นนี้ด้วย

5. พัฒนาไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบ 3 มิติ จากแบบ 2 มิติที่ปรากฏแล้วในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง ละเอียด และแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สามารถหลีกเลี่ยงข้อจำกัดบางอย่างในการพิจารณาปัญหาในแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ อาทิเช่น ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากความหนาของมอเตอร์ และผลของร่องเฉียงที่ควรใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในการพิจารณา เป็นต้น

6. ปัจจุบันการเรียนการสอนทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ค่อนข้างมองเห็นภาพ หรือจินตนาการ เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งได้ยาก เนื่องจากยังขาดสื่อทางด้านสารสนเทศที่ใช้เป็นเครื่องมือแทนที่การนึกคิดหรือจินตนาการ ดังนั้นเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในการถ่ายทอดความรู้ทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ง่ายขึ้น งานพัฒนาทางวิศวกรรมที่จะดำเนินการต่อไป จึงจะพัฒนาสื่อการเรียนการสอนทางด้านสารสนเทศที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วย ภาพทางกราฟฟิกแบบ 2 มิติ 3 มิติ และภาพเคลื่อนไหว เพื่อง่ายและสะดวกในการทำความเข้าใจทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าว

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). **ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก** (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ถาวร อมตกิตติ. (2545). มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง. **ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม**. 1 (3): 27-36.
- ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. (2542). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. (2544). **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และ มาบุญชี มาการิชาวา. (2538). **เทคนิคการซ่อมแซมเลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- Alfredo, M. R., and Carlos, A. L. (1994). Magnetic vibration of three-phase induction motors supplied by inverters. **International Symposium on Industrial Electronics, IEEE**. 210-213.
- Alger, P. L. (1970). **Induction machines: their behavior and uses** (2nd ed.). New York: Gordon and Breach Publishers.
- Bickford, W. B. (1994). **A first course in the finite element method** (2nd ed.). USA: IRWIN.
- Belmans, R. J. M., D'Hondt, L., Vandenput, A. J., and Geysen, W. (1987). Analysis of the audible noise of three-phase squirrel-cage induction motors supplied by inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 23 (5): 842-847.
- Belmans, R. J. M., Verdyck, D., Geysen, W., and Findlay, R. D. (1991). Electro-mechanical analysis of the audible noise of an inverter-fed squirrel-cage induction motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 27 (3): 539-544.
- Berman, M. (1993). On the reduction of magnetic pull in induction motors with off-centre rotor. **Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE**. 1: 343-350.
- Brunelli, B., Casadei, D., Reggiani, U., and Serra, G. (1983). Transient and steady-state behaviour of solid rotor induction machines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 19 (6): 2650-2654.

- Chapman, S. J. (1998). **Electric machinery fundamentals** (3rd ed.). Singapore:McGraw-Hill.
- Chari, M. V. K., and Silvester, P. P. (1980). **Finite elements in electrical and magnetic field problems**. New York: John Wiley & Sons.
- Cochran, P. L. (1989). **Polyphase induction motors: analysis, design, and application**. New York:Marcel Dekker.
- Davis, J. T., and Bryant, R. A. (1993). NEMA induction motor vibration measurement: a comparison of methods with analysis. **Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society 40th Annual, IEEE**. 205-209.
- Demerdash, N. A., and Gillott, D. H. (1974). A new approach for determination of eddy current and flux penetration in nonlinear ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**. 74: 682-685.
- Dorrell, D. G. (1996). Calculation of unbalanced magnetic pull in small cage induction motors with skewed rotors and dynamic rotor eccentricity. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 11 (3): 483-488.
- Dorrell, D. G., Thomson, W. T., and Roach, S. (1995). Analysis of airgap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors. **Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IEEE**. 1: 563-570.
- Durantay, L., Laurent, F., Messin, Y., and Kromer, V. (1999). Large band reduction of magnetic vibrations of induction machines with “breaking of impedance” interface. **Electric Machines and Drives International Conference, IEEE**. 475-477.
- Finley, W. R. (1991). Noise in induction motors-causes and treatments. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 27 (6): 1204-1213.
- Finley, W. R., Hodowanec, M. M., and Holter, W. G. (1999). An analytical approach to solving motor vibration problems. **Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society 46th Annual, IEEE**. 217-232.
- Fu, W. N. (1999). **Electromagnetic field analysis of induction motors by finite element method and its application to phantom loading**. Ph.D. Dissertation, Hong Kong Polytechnic University, China.

- George, A., and Liu, J. W. (1981). **Computer solution of large sparse linear positive definite systems**. Prentice-Hall.
- Guldemir, H. (2003). Detection of airgap eccentricity using line current spectrum of induction motors. **Electric Power Systems Research**. 64:109-117.
- Hameyer, K., and Belmans, R. (1999). **Numerical modelling and design of electrical machines and devices**. Southampton, Boston: WIT Press.
- Henneberger, G., Sattler, Ph. K., Hadrys, W., and Shen, D. (1992). Procedure for the numerical computation of mechanical vibrations in electrical machines. **IEEE Transactions on Magnetism**. 28 (2): 1351-1354.
- Hirotsuka, I., Tsuboi, K., and Ishibashi, F. (1997). Effect of slot-combination on electromagnetic vibration of squirrel-cage induction motor under loaded condition. **Power Conversion Conference-Nagaoka, IEEE**. 2: 843-848.
- Ho, S. L., Li, H. L., Fu, W. N., and Wong, H. C. (2000). A novel approach to circuit-field-torque coupled time stepping finite element modeling of electric machines. **IEEE Transactions on Magnetism**. 36 (4): 1886-1889.
- Huebner, K. H., Dewhurst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Im, D. H., et al. (1997). Analysis of radial force as a source of vibration in an induction motor with skewed slots. **IEEE Transactions on Magnetism**. 33 (2): 1650-1653.
- Ishibashi, F., Noda, S., and Mochizuki, M. (1998). Numerical simulation of electromagnetic vibration of small induction motors. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 145 (6): 1998.
- Ishibashi, F., Kamimoto, K., Noda, S., and Itomi, K. (2003). Small induction motor noise calculation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 18 (3): 357-361.
- Kako, F., Tsuruta, T., Nagaishi, K., and Kohmo, H. (1983). Experimental study on magnetic noise of large induction motors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. 102 (8): 2805-2810.
- Kenjo, T. (1991). **Electric motors and their controls**. New York: Oxford University Press.
- Kim, B. T., Kwon, B. I., and Park, S. C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetism**. 35 (5): 3742-3744.

- Kobayashi, T., Tajima, F., Ito, M., and Shibukawa, S. (1997). Effects of slot combination on acoustic noise from induction motors. **IEEE Transactions on Magnetics**. 33 (2): 2101-2104.
- Kulworawanichpong, T. (2003). **Optimising ac electric railway power flows with power electronic control**. Ph.D. Thesis, The University of Birmingham, UK.
- Kurihara, K., and Rahman, M. A. (2004). Transient Performance analysis for permanent-magnet hysteresis synchronous motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 40 (1): 135-142.
- Kwon, Y. W., and Bang H. (2000). **The finite element method using MATLAB** (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Mikami, H., Ide, K., Takahashi M., and Kajiwara, K. (1999). Dynamic harmonic field analysis of an inverter-fed induction motor for estimating harmonic secondary current and electromagnetic force. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 14 (3): 464-470.
- Munoz, A. R., and Araya, C. L. (1994). Magnetic vibration of three-phase induction motors supplied by inverters. **International Symposium on Industrial Electronics, IEEE**. 210-213.
- Nagwa, M. E., Anthony, R. E., and Graham, E. D. (1992). Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 28 (1): 165-171.
- Nau, S. L. (1997). The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three-phase induction motors. **Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, IEE**. 396-399.
- Neves, C. G. C., Carlson, R., Sadowski, N., and Bastos, J. P. A. (1998). A study on magnetic vibration sources identification in induction motors by FEM simulation and experimental procedures. **Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, IEEE**. 1: 237-242.
- Preston, T. W., Reece, A. B. J., and Sangha, P. S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24 (1): 471-474.
- Rao, J. S., (1999). **Dynamics of plates**. New Delhi:Narosa Publishing House.

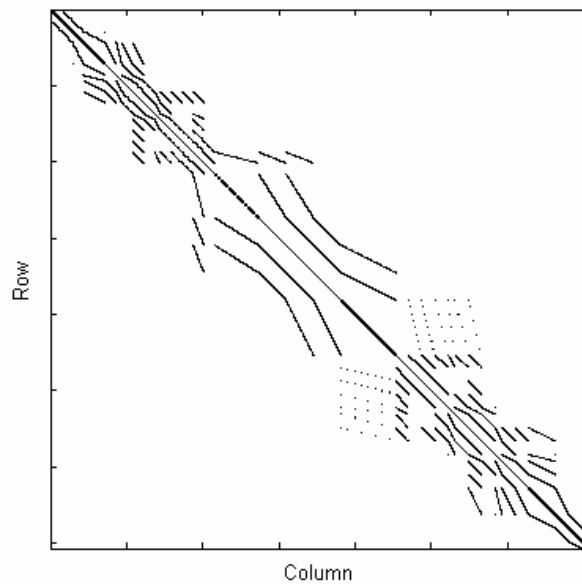
- Sakamoto, S., Hirata, T., Kobayashi, T., and Kajiwara, K. (1999). Vibration analysis considering higher harmonics of electromagnetic forces for rotating electric machines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35 (3): 1662-1665.
- Salon, S. J. (1995). **Finite element analysis of electrical machines**. USA: Kluwer Academic Publishers.
- Shen, L. C., and Kong, J. A. (1995). **Applied electromagnetism** (3rd ed.). Boston: PWS Publishing Company.
- Silvester, P. P., and Ferrari, R. L. (1996). **Finite elements for electrical engineers** (3rd ed.). New York: Cambridge University Press.
- Tarnhuvud, T., and Reichert, K. (1988). Accuracy problems of force and torque calculation in FE-systems. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24 (1): 443-446.
- Timar, P. L., Fazekas, A., Kiss, J., Miklos, A., and Yang, S. J. (1989). **Noise and vibration of electrical machines**. Hungary: Elsevier Science Publishers.
- Vassent, E., Meunier, G., and Foggia, A. (1991). Simulation of induction machines-using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations. **IEEE Transactions on Magnetics**. 27 (5): 4246-4249.
- Verma, S. P., and Balan, A. (1994). Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage induction motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 9 (2): 404-412.
- Vinay, K. I., and John, G. P. (2000). **Digital signal processing using MATLAB**. USA: Brooks/Cole Publishing Company.
- Wang, C., and Lai, J. C. S. (1999). Vibration analysis of an induction motor. **Journal of Sound and Vibration**. 224(4): 733-756.
- William, H. H., Jr. (1989). **Engineering electromagnetics** (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Yacimini, R., and Chang, S. C. (1995). Noise and vibration from induction machines fed from harmonic sources. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 10 (2): 286-292.
- Yang, S. J. (1981). **Low-noise electrical motors**. New York: Oxford University Press.

ภาคผนวก ก

การพิจารณาแบนด์วิดท์ของเมทริกซ์

การพิจารณาแบนด์วิดท์ของเมทริกซ์

การแก้สมการเมทริกซ์รวมของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำความกว้างแถบหรือแบนด์วิดท์ (bandwidth: BW) ของเมทริกซ์มาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยหลักในการลดระยะเวลาการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งหากสังเกตลักษณะของเมทริกซ์ระบบรวมที่ได้จากงานวิจัย ดังแสดงด้วยรูปที่ ก.1 จะเห็นว่า เมทริกซ์ระบบรวมประกอบด้วยค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ในบริเวณแนวทแยงมุมเท่านั้น นอกจากนี้เมทริกซ์ระบบรวมที่ปรากฏ จะมีคุณสมบัติความเป็นสมมาตรในกรณีที่พิจารณาระบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะช่วยประหยัดหน่วยความจำและเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณ ทั้งนี้เพราะสามารถเก็บข้อมูลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์เฉพาะในแถบทแยงมุมเพียงครั้งเดียวไว้ในหน่วยความจำได้



รูปที่ ก.1 การกระจายข้อมูลของเมทริกซ์ระบบรวม

การพิจารณา BW ของเมทริกซ์ระบบรวมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถอธิบายได้ โดยการพิจารณาเมทริกซ์ A ซึ่งเทียบได้กับเมทริกซ์ระบบรวมในงานวิจัย ดังแสดงด้วยรูปที่ ก.2 (George and Liu, 1981) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า BW ของเมทริกซ์ A ($BW(A)$) ในที่นี้ คือช่วงกว้างภายในกรอบจากแนวทแยงมุมกลางของเมทริกซ์โดยไม่รวมแนวทแยงมุมกลาง ออกไปจนถึงแนว

ภาคผนวก ข

วิธีการแก้สมการเชิงเส้นของระบบ

วิธีการแก้สมการเชิงเส้นของระบบ

การแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกใช้วิธีไบ-คอนจูเกตเกรเดียนต์ (bi-conjugate gradient: BCG) ซึ่งวิธีนี้จะอาศัยกระบวนการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ การใช้วิธีนี้จะเหมาะสมกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยควรมีขนาดของเมทริกซ์มากกว่า 1000×1000 ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการแก้สมการเชิงเส้นของระบบลงไปได้มาก และวิธีนี้ยังใช้ได้กับงานที่เมทริกซ์ของระบบไม่สมมาตร อย่างเช่นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากปัญหาที่นำมาพิจารณามีความไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่

กระบวนการในการแก้ระบบสมการเชิงเส้น $Ax = b$ โดยอาศัยวิธี BCG (Smith, Peterson and Mitra, 1990) จะประกอบด้วยเทอมของเวกเตอร์เศษตกค้าง (residual vector), r_m เวกเตอร์ระบุทิศทาง (direction vector), p_m เวกเตอร์คู่เศษตกค้าง (bi-residual vector), \bar{r}_m และเวกเตอร์คู่ระบุทิศทาง (bi-direction vector), \bar{p}_m โดยตัวห้อย $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ คือจำนวนรอบในการคำนวณ ซึ่งกระบวนการจะเริ่มจากการเดาค่า x_m ($m = 0$) ดังนั้นจึงได้ r_0 , p_0 , \bar{r}_0 และ \bar{p}_0 ดังสมการ

$$r_0 = p_0 = b - Ax_0 \quad (\text{ข-1})$$

$$\bar{r}_0 = r_0 \quad (\text{ข-2})$$

$$\bar{p}_0 = p_0 \quad (\text{ข-3})$$

จากนั้นเริ่มกระบวนการทำซ้ำโดยเริ่มจากคำนวณค่าความยาวขั้น (step length), α ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้หาคำตอบในรอบถัดไป ดังแสดงได้ในสมการที่ (ข-4) โดยจะอยู่ในรูปของผลคูณภายใน (inner product) และคำตอบในรอบถัดไป $m+1$ ไปสามารถแสดงได้ในสมการที่ (ข-5)

$$\alpha_m = \frac{\langle \bar{r}_m, r_m \rangle}{\langle \bar{p}_m, Ap_m \rangle} \quad (\text{ข-4})$$

$$\mathbf{x}_{m+1} = \mathbf{x}_m + \alpha_m \mathbf{p}_m \quad (\text{ข-5})$$

กระบวนการทำซ้ำในรอบที่ $m+1$ จะดำเนินการคำนวณเวกเตอร์เศษตกค้างและเวกเตอร์คู่เศษตกค้างใหม่ โดยใช้สมการที่ (ข-6) และ (ข-7) ตามลำดับ

$$\mathbf{r}_{m+1} = \mathbf{r}_m - \alpha_m \mathbf{A} \mathbf{p}_m \quad (\text{ข-6})$$

$$\bar{\mathbf{r}}_{m+1} = \bar{\mathbf{r}}_m - \alpha_m \mathbf{A}^T \bar{\mathbf{p}}_m \quad (\text{ข-7})$$

จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คู่สังยุค (bi-conjugacy), β_m ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้คำนวณเวกเตอร์ระบุทิศทางและเวกเตอร์คู่ระบุทิศทางในรอบที่ $m+1$ ดังแสดงได้ในสมการที่ (ข-8) โดยเวกเตอร์ระบุทิศทางและเวกเตอร์คู่ระบุทิศทางสามารถแสดงได้ในสมการที่ (ข-9) และ (ข-10) ตามลำดับ

$$\beta_m = \frac{\langle \bar{\mathbf{r}}_{m+1}, \mathbf{r}_{m+1} \rangle}{\langle \bar{\mathbf{r}}_m, \mathbf{r}_m \rangle} \quad (\text{ข-8})$$

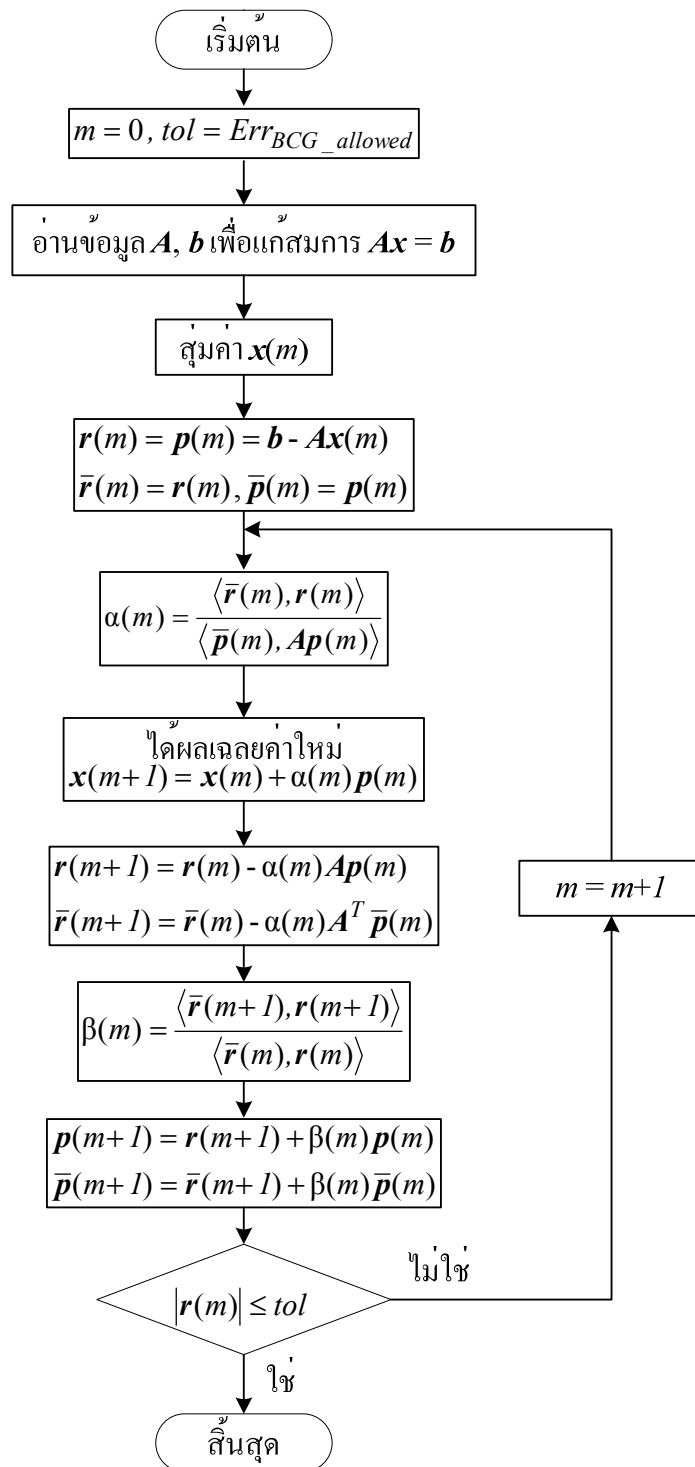
$$\mathbf{p}_{m+1} = \mathbf{r}_{m+1} + \beta_m \mathbf{p}_m \quad (\text{ข-9})$$

$$\bar{\mathbf{p}}_{m+1} = \bar{\mathbf{r}}_{m+1} + \beta_m \bar{\mathbf{p}}_m \quad (\text{ข-10})$$

จากนั้นดำเนินการทำซ้ำเพื่อคำนวณหาคำตอบ \mathbf{x}_{m+1} ในรอบใหม่ ซึ่งกระบวนการทำซ้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อขนาดของเวกเตอร์ระบุทิศทางมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์ความผิดพลาดในการลู่อู่เข้าที่ยอมรับได้ของวิธี BCG, $Err_{BCG_allowed}$ ดังแสดงได้ในสมการที่ (ข-11)

$$|\mathbf{r}_m| \leq Err_{BCG_allowed} \quad (\text{ข-11})$$

จากกระบวนการวิธี BCG ในข้างต้น จึงสามารถเขียนสรุปเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ ข.1 ดังนี้



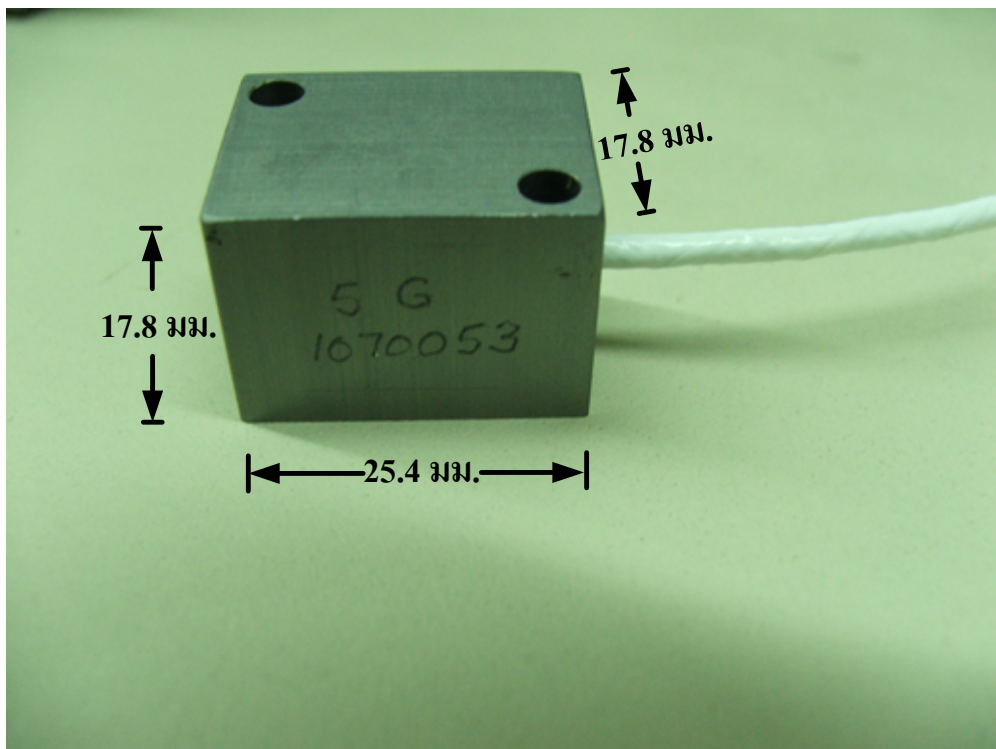
รูปที่ ข.1 แผนภูมิกะบวนการวิธี BCG

ภาคผนวก ค

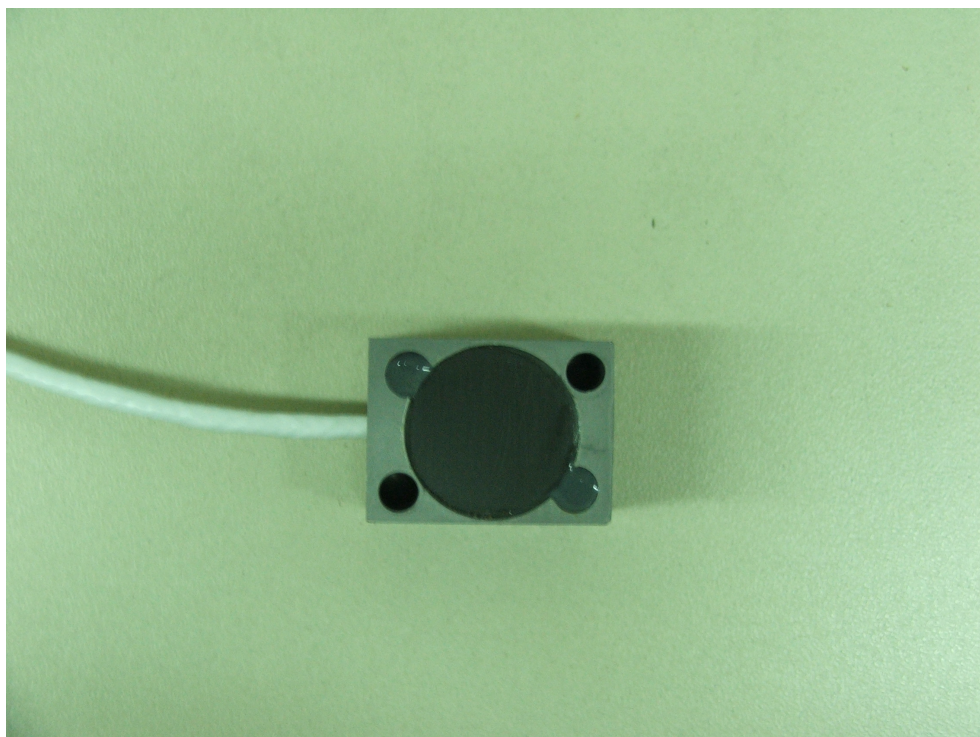
ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

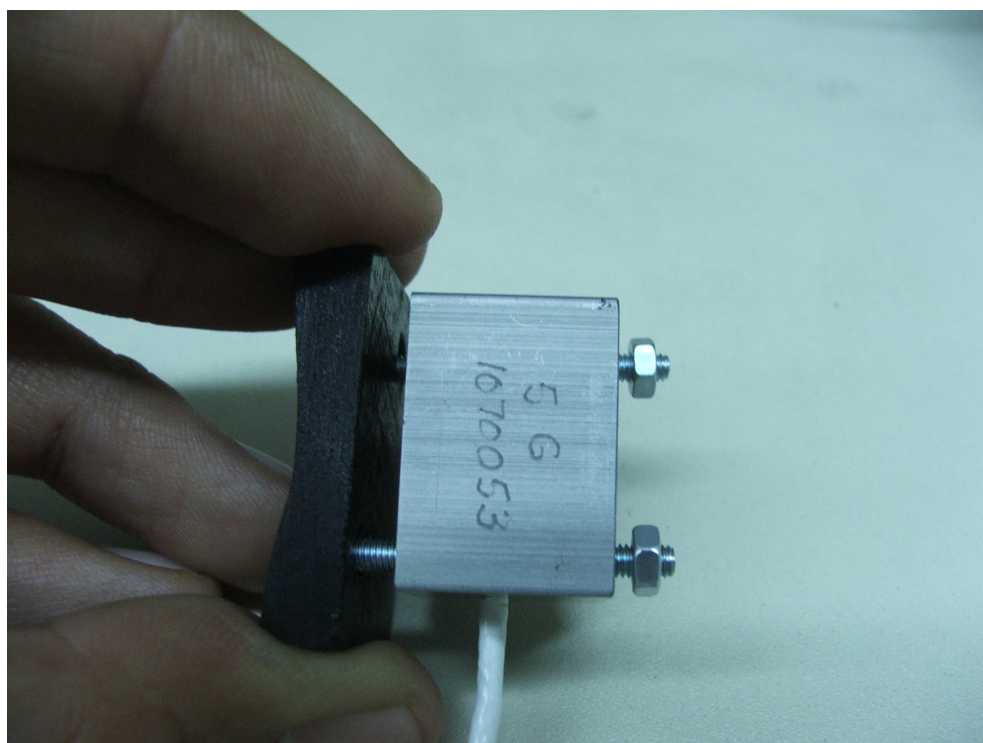
การแสดงเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 kW ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงตำแหน่งการติดตั้งมาตรความเร่ง (accelerometer) บนมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.1-ค.9



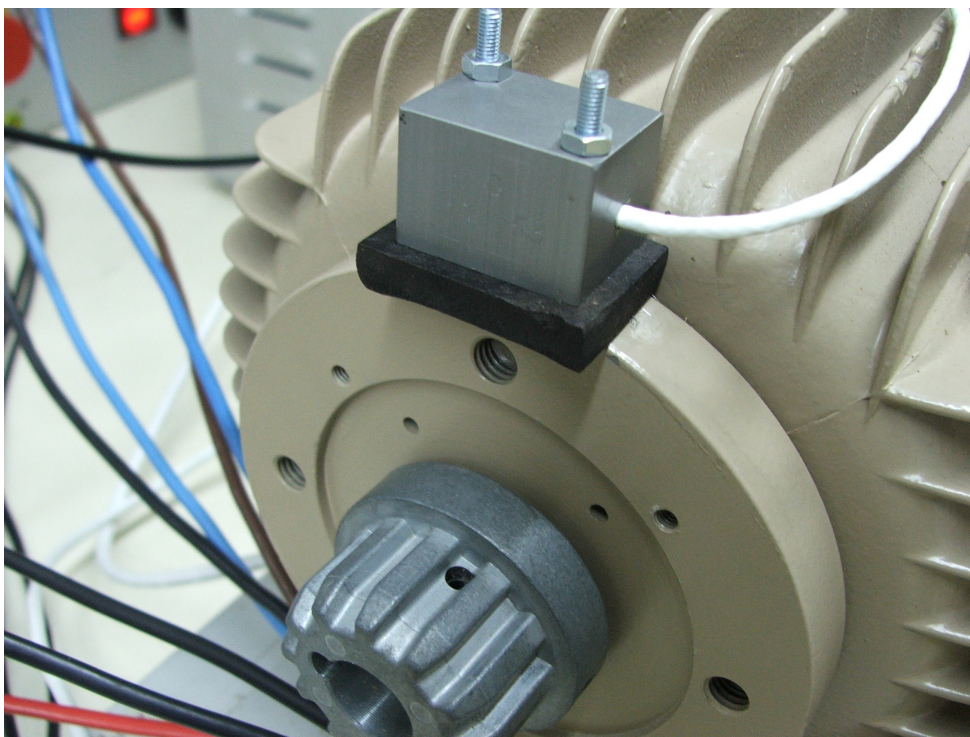
รูปที่ ค.1 มาตรความเร่งของ SENSOTEC รุ่น SM5



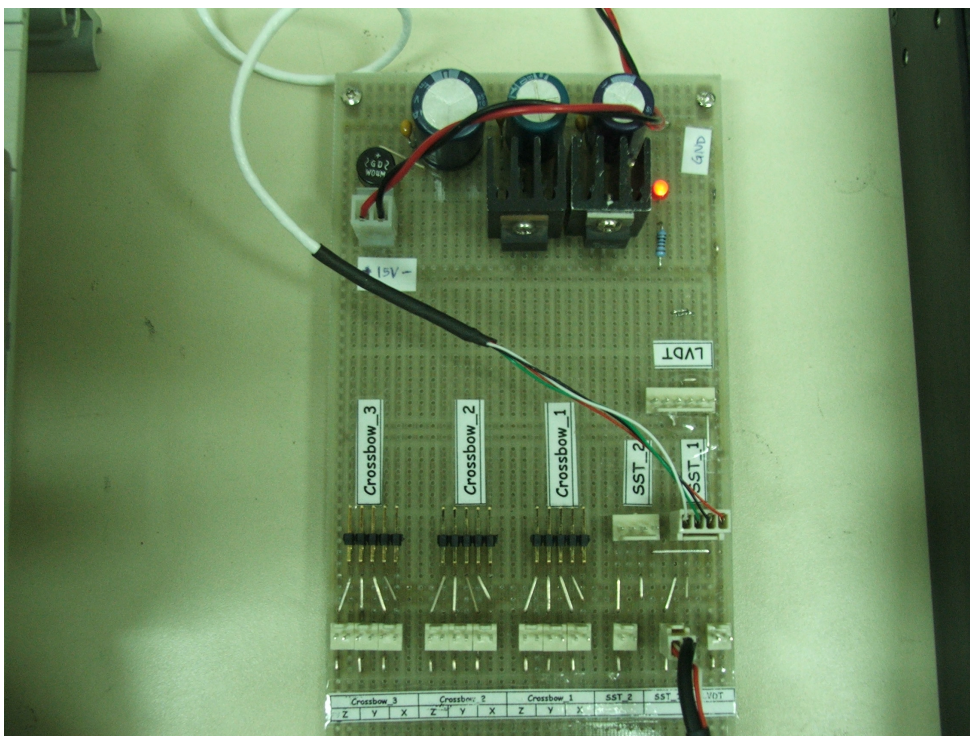
รูปที่ ค.2 ด้านแม่เหล็ก (magnet) ของมาตรความเร่งที่ใช้สัมผัสกับชิ้นงาน



รูปที่ ค.3 มาตรความเร่งพร้อมฐานไม้บางเพื่อยึดเข้ากับมอเตอร์



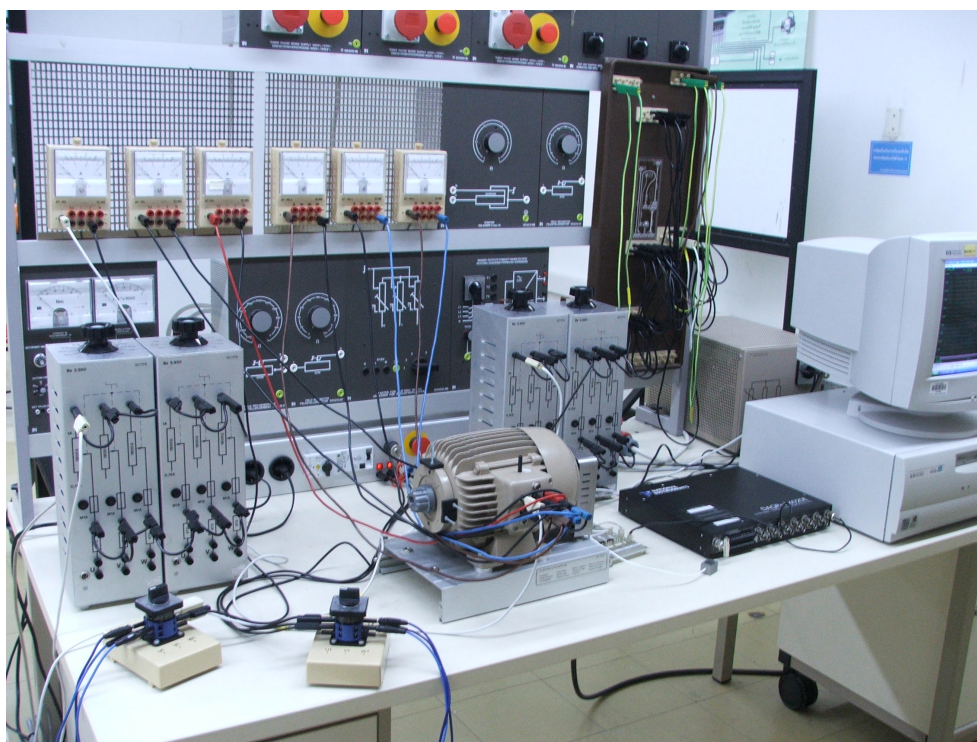
รูปที่ ค.4 ติดตั้งมาตรฐานความเร่งตรงตำแหน่งส่วนบนเหนือเพลากลางมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ



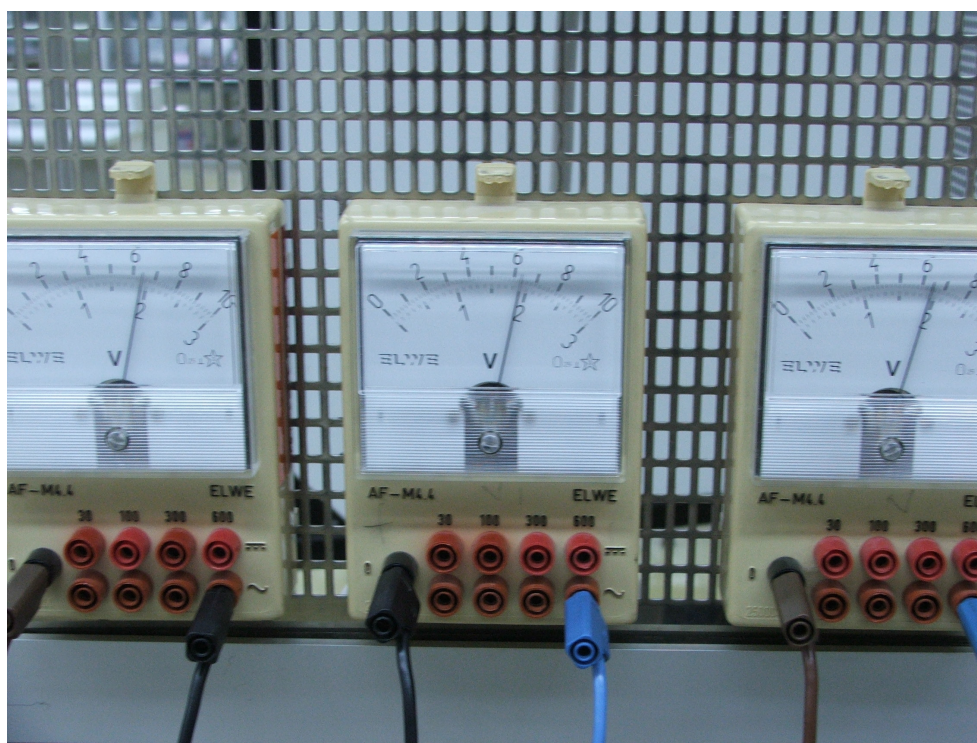
รูปที่ ค.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของมาตรฐานความเร่ง



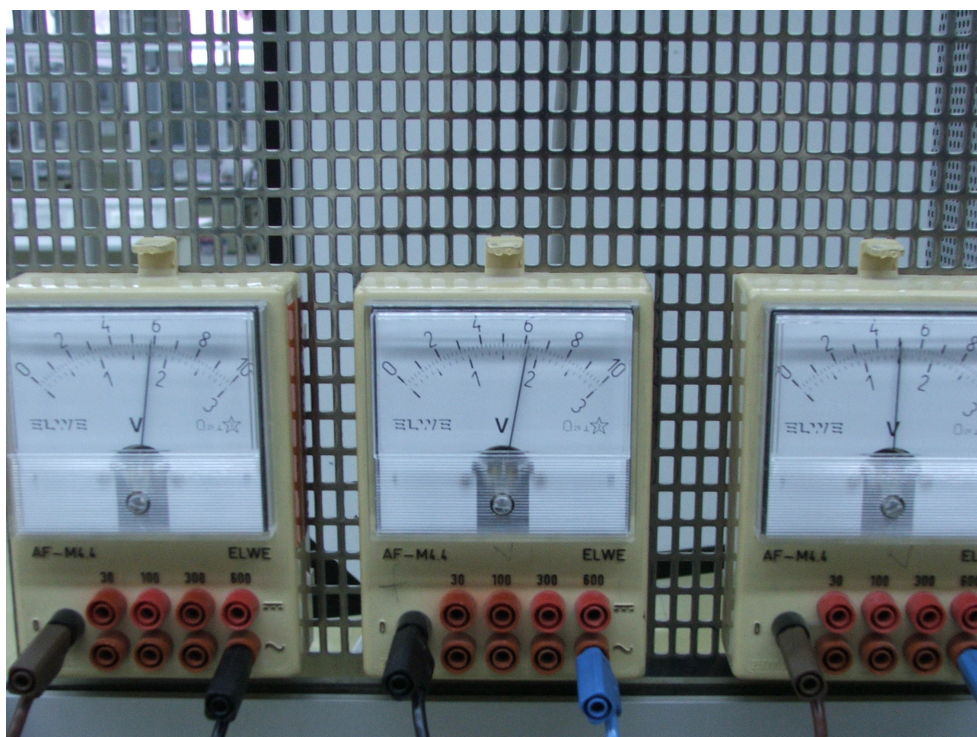
รูปที่ ค.6 ตัวลงบันทึกข้อมูล (data logger) โดยจะบันทึกค่าไปเก็บในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 1 ms



รูปที่ ค.7 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ ก.8 แรงดันทั้งสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์สมดุล



รูปที่ ก.9 แรงดันทั้งสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ไม่สมดุล

ภาคผนวก ง

การกรองแบบดิจิทัลเพื่อกำจัดปรากฏการณ์กิบบส์

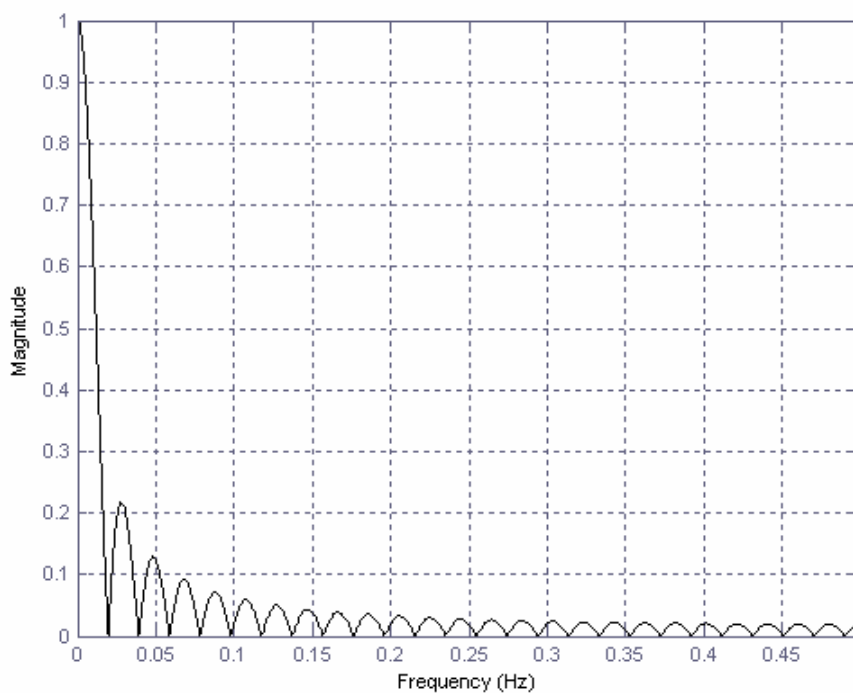
การกรองแบบดิจิทัลเพื่อกำจัดปรากฏการณ์กิบบส์

การกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital filter) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าแรงดันออฟเซต (offset voltage) เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่แท้จริงจากมาตรความเร่ง (accelerometer) โดยมาตรความเร่งจะเป็นเซ็นเซอร์ซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนความเร่งที่วัดได้ไปอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การดำเนินการหาค่าแรงดันออฟเซตได้ใช้การกรองความถี่แบบผ่านต่ำ (low pass filter) โดยจะผ่านได้เฉพาะสัญญาณ DC จนถึงความถี่ตัด (cutoff frequency: f_c) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $f_c = 10^6$ Hz และมีความถี่การชักตัวอย่างสัญญาณ (sampling rate) เท่ากับ 1 kHz โดยเป็นการกรองแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (finite impulse response: FIR) ที่มีอันดับ (order), n ของตัวกรองมีค่าเท่ากับ 50 ซึ่งเป็นอันดับที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาการกรองความถี่แบบผ่านต่ำทางอุดมคติ (Vinay and John, 2000) โดยฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function), $H(z)$ ของการกรองความถี่ดิจิทัลแบบ FIR สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (ง-1)

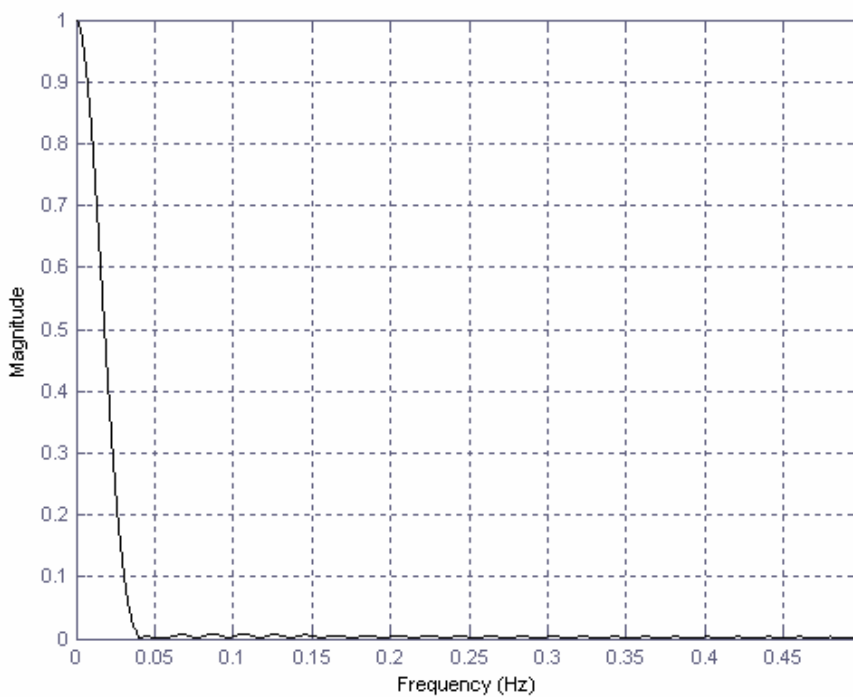
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1} \quad (\text{ง-1})$$

เมื่อ $X(z)$ และ $Y(z)$ คืออินพุตและเอาต์พุตของการกรองความถี่แบบดิจิทัลตามลำดับ และ $b(i)$ คือสัมประสิทธิ์ของการกรองความถี่ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ของการกรองความถี่ทั้งสิ้น 51 ค่า ซึ่งการกรองความถี่แบบดิจิทัลจำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้

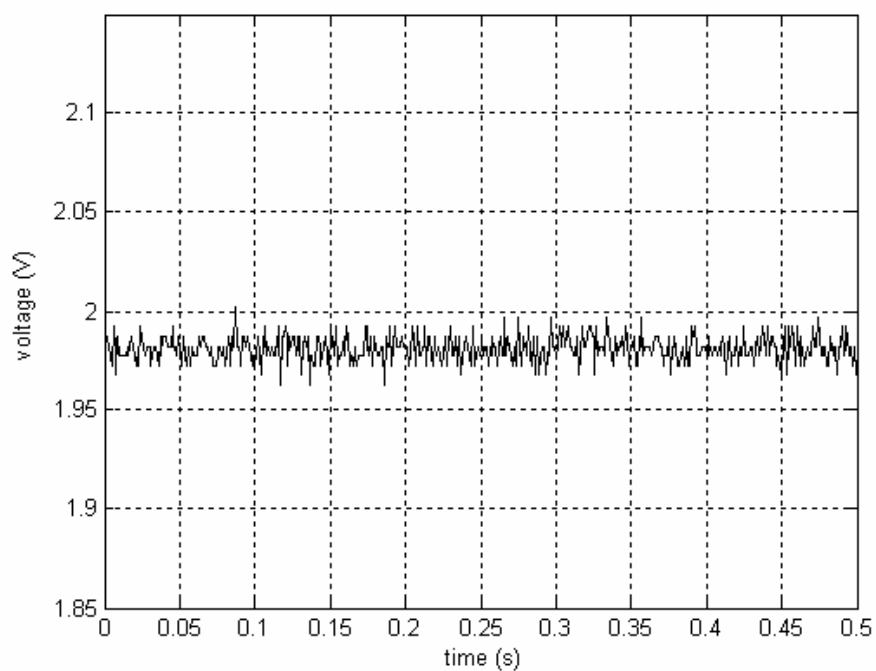
การกรองความถี่แบบดิจิทัลในงานวิจัยนี้จะทำงานร่วมกับฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง (Hamming window) ที่มีความยาวเท่ากับ 51 เช่นเดียวกับจำนวนสัมประสิทธิ์ของการกรองความถี่ ทั้งนี้เพื่อช่วยในการกำจัดปรากฏการณ์กิบบส์ (Gibbs phenomenon) จึงส่งผลให้เอาต์พุตเมื่อผ่านการกรองความถี่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น รูปที่ ง.1 และ ง.2 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลตอบสนองแอมพลิจูด (amplitude response) ของการกรองความถี่จากการใช้ toolbox ของโปรแกรม MATLAB เมื่อไม่พิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิงและมีการพิจารณา ตามลำดับ ส่วนรูปที่ ง.3 และ ง.4 เป็นการแสดงค่าแรงดันที่ได้จากมาตรความเร่งเมื่อไม่ผ่านการกรองความถี่และเมื่อผ่านการกรองความถี่ร่วมกับการพิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง ตามลำดับ



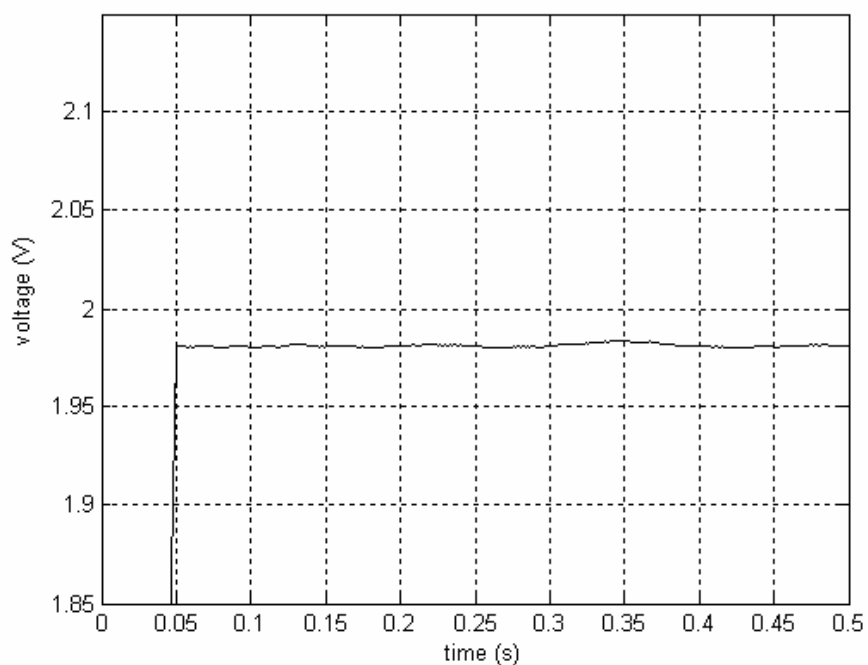
รูปที่ ๓.1 ผลตอบสนองแอมพลิจูดของการกรองความถี่เมื่อไม่พิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง



รูปที่ ๓.2 ผลตอบสนองแอมพลิจูดของการกรองความถี่เมื่อพิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง



รูปที่ ง.3 แรงดันที่ได้จากมาตรความเร่งเมื่อไม่ผ่านการกรองความถี่



รูปที่ ง.4 แรงดันที่ได้จากมาตรความเร่งเมื่อผ่านการกรองความถี่
รวมกับการพิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง

จากการเปรียบเทียบผลตอบสนองแอมพลิจูดที่ปรากฏในรูปที่ ง.1 และ ง.2 จะสังเกตเห็นว่าการกรองความถี่แบบดิจิทัลเมื่อร่วมพิจารณาฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิงในรูปที่ ง.2 จะมีคุณภาพของการกรองความถี่แบบผ่านต่ำที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ค่าสูงกว่าประมาณ 0.04 Hz แทบจะไม่ยอมให้สัญญาณใดผ่านได้เลย (แอมพลิจูดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ทั้งนี้เพราะฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิงจะช่วยในการกำจัดปรากฏการณ์กิบบส์ที่ปรากฏในรูปที่ ง.1 แต่อย่างไรก็ตามความถี่ค่าเริ่มต้นที่ไม่ยอมให้สัญญาณใดผ่านได้ในรูปที่ ง.2 (ที่มีค่าประมาณ 0.04 Hz) กลับมีค่าสูงกว่ารูปที่ ง.1 (ที่มีค่าประมาณ 0.02 Hz) ซึ่งอาจเป็นข้อด้อยเพียงเล็กน้อยของการกรองความถี่แบบดิจิทัลที่ร่วมพิจารณากับฟังก์ชันหน้าต่างแฮมมิง ส่วนค่าแรงดันที่ปรากฏในรูปที่ ง.3 และ ง.4 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันเมื่อผ่านการกรองความถี่จะมีค่าราบเรียบกว่าที่ไม่ผ่านการกรองความถี่อยู่มาก โดยมีค่าของแรงดันออฟเซตประมาณ 1.98 V ส่วนเวลาที่เริ่มตอบสนองต่อแรงดันเมื่อผ่านการกรองความถี่จะมีค่าหน่วงเวลาไปประมาณ 0.05 s ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการกรองความถี่ที่ยอมรับได้

ภาคผนวก จ

การเผยแพร่ผลงานในขณะศึกษา

การเผยแพร่ผลงานในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. P. Pao-la-or, S. Peaiyoung, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn, “Modelling and Simulation for Magnetic Flux Distribution in Induction Motors”, Proc. the 24th IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC 2005). Innsbruck, Austria, February 16-18, 2005, pp. 339-344.

2. P. Pao-la-or, S. Peaiyoung, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn, “Magnetic Field Simulation of an Induction Motor Using Nonlinear Time-Stepping Finite Element Method”, Proc. the 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference. Pattaya, Thailand, May 12-13, 2005, pp. 734-737.

3. P. Pao-la-or, T. Kulworawanichpong, S. Sujitjorn, and S. Peaiyoung, “Computation of Flux and Electromagnetic Force Distributions in Induction Motors”, Proc. the 5th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER’05). Tenerife, Spain, December 16-18, 2005, pp. 110-117.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. P. Pao-la-or, T. Kulworawanichpong, S. Sujitjorn, and S. Peaiyoung, “Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Induction Motors: A Finite Element Approach”, WSEAS Transactions on Systems, No. 3, Vol. 5, 2006, pp. 617-624.

รายการจดลิขสิทธิ์

1. สรวุฒิ สุจิตจร, ธนัชชัย กุลรวิภาณิขพงษ์ และ เผด็จ เผ่าละออ “โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับโรเตอร์หมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ภาษา C)”, 28 ตุลาคม 2548, เลขที่คำขอ 111580.

2. สรวุฒิ สุจิตจร, ธนัชชัย กุลรวิภาณิขพงษ์ และ เผด็จ เผ่าละออ “โปรแกรมคำนวณการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับโรเตอร์หมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ภาษา C)”, 28 ตุลาคม 2548, เลขที่คำขอ 111581.

3. สรวุฒิ สุจิตจร, ธนัชชัย กุลรวิภาณิขพงษ์ และ เผด็จ เผ่าละออ “โปรแกรมสร้างกริดอัตโนมัติสำหรับโรเตอร์หมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (MATLAB)”, 28 ตุลาคม 2548, เลขที่คำขอ 111582.

รายการจดสิทธิบัตร

1. สรวุฒิ สุจิตจร, สมโภชน์ ผิวเหลือง, ธนัชชัย กุลรวิภาณิขพงษ์ และ เผด็จ เผ่าละออ “รูปร่างร่องโรเตอร์ที่ลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส”, 15 พฤศจิกายน 2548, เลขที่คำขอ 106156.

ประวัติผู้เขียน

นายเผด็จ เผ่าละออ เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ.2519 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2541 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้า ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2545 โดยขณะกำลัง ศึกษาในระดับปริญญาโทได้รับทุนอุดหนุนวิจัยทางด้านการอนุรักษ์พลังงานจากทางมหาวิทยาลัย และ ในปีเดียวกันนี้ ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี โดยรับทุนตามโครงการพัฒนาอาจารย์วิทยาเขตสารสนเทศ ตามความต้องการ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โดย ระหว่างศึกษาได้เป็นอาจารย์พิเศษที่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี