

การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์
ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

MMF ANALYSIS FOR VIBRATION DETECTION OF INDUCTION MOTORS
UNDER CONDITIONS OF UNBALANCED VOLTAGE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-412

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์
ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

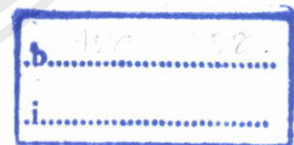
MMF ANALYSIS FOR VIBRATION DETECTION OF INDUCTION MOTORS
UNDER CONDITIONS OF UNBALANCED VOLTAGE



ณรงค์เดช ยะลาไสย

NARONGDEJ YALASAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 87066
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา พ.ศ.2551 อนึ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-020-412

**MMF ANALYSIS FOR VIBRATION DETECTION OF INDUCTION MOTORS
UNDER CONDITIONS OF UNBALANCED VOLTAGE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 2008 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-020-412



เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือน ของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
นักศึกษา	นายณรงค์เดช ยะลาไสย์
รหัสประจำตัว	46060707
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการทดสอบหาค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่เป็นผลมาจากการใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยใช้เทคนิคการวัดค่ากระแส 3 เฟส และใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายพฤติกรรมการแกว่งของแรงบิด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ขณะเดียวกันใช้ห้วงวัดความเร่งวัดค่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น วิทยานิพนธ์นี้ทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1, 3, และ 5 แรงม้า สุดท้ายนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนโดยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เทคนิคการหาค่าการสั่นสะเทือนโดยวิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและง่ายในการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	MMF Analysis for Vibration Detection of Induction Motors Under Conditions of Unbalanced Voltage
Student	Mr.Narongdej Yalasai
Student ID.	46060707
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents studies experimental results of the vibration in three-phase induction motors caused by with unbalanced voltage conditions. A measurement technique based on three-phase currents with the rotating magnetic field theory is applied to explain behaviors of the torque pulsation which results in the vibration. Meanwhile, the accelerometer is employed to measures the vibration. At 1, 3 and 5 hp induction motors to examine in the experiment. Finally the testing results will be compared with the mmf spectrum extracted by FFT. It is found that the proposed vibration estimation technique is an alternative for convenient and easy measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.พิชิต ล้ายอง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัชวดี ฉัตรอุทัย และ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท บีเจซี เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่เอื้อโอกาสในการศึกษาต่อ ขอขอบคุณหัวหน้าและเพื่อน ๆ ร่วมงานทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการวิจัยนี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณวันทนีย์ ชะลาไสย์ ที่เป็นเสมือนคู่คิด และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา และลูกชายตัวน้อยของข้าพเจ้า ค.ช.ธฤตวรรณ ชะลาไสย์ ที่เป็นกำลังใจอันเต็มเปี่ยม

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณรงค์เดช ชะลาไสย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนของการวิจัย	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์และทฤษฎี	5
2.1 วารสารปริทรรศน์	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	6
2.3 สนามแม่เหล็กหมุน	9
2.4 การสั้นสะท้อน	13
2.5 การประมวลผลสัญญาณ	15
บทที่ 3 การวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	33
3.1 วิธีการคำนวณความไม่สมดุลของระบบ	33
3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	37
3.3 การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	42
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	45
4.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด **บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 1 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ	49
4.3 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 3 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ	56
4.4 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 5 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ	63
4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	70
บทที่ 5 สรุป	89
5.1 สรุปผลการวิจัย	89
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	94
ภาคผนวก ข. ผังขอบเขตของการสันเสเทียบ	100
ภาคผนวก ค. ตารางผลการสันเสเทียบของมอเตอร์ที่สภาวะต่าง ๆ	102
ประวัติผู้เขียน	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา	16
4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ทำการทดสอบ	46
4.2 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	76
4.3 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	76
4.4 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	79
4.5 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	79
4.6 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 5 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	82
4.7 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 5 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล	82
ค.1 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	103
ค.2 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	104
ค.3 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 50%	105
ค.4 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 50%	106
ค.5 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 100%	107
ค.6 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 100%	108
ค.7 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	109
ค.8 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	110
ค.9 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 50%	111
ค.10 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 50%	112
ค.11 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 100%	113
ค.12 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ขับโหลด 100%	114
ค.13 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	115
ค.14 ผลการสิ้นสະเทือนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.14 ผลการสิ้นสละเทียนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบค่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	117
ก.16 ผลการสิ้นสละเทียนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ค่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	118
ก.17 ผลการสิ้นสละเทียนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบค่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 100%	119
ก.18 ผลการสิ้นสละเทียนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ค่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 100%	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	6
2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	7
2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก	7
2.4 โรเตอร์แบบขลวดพันรอบโรเตอร์	7
2.5 การวางขลวดสเตเตอร์ 3 เฟส และกระแสสมดุล 3 เฟส	9
2.6 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขลวดพันแบบอัดเป็นก้อน	10
2.7 สนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างจากกระแส 3 เฟส	12
2.8 ระบบของการประมวลผลสัญญาณ	17
2.9 การกรองแบบเชิงเส้น	18
2.10 การคอนโวลูชันของสัญญาณ	19
2.11 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา	19
2.12 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง	20
2.13 การคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา	20
2.14 การคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยใช้การแปลงแบบแซค	21
2.15 สัญญาณไซน์ที่เป็นรายคาบและสัญญาณพัลส์ที่ไม่เป็นรายคาบ	22
2.16 สัญญาณที่มีความแน่นอนและสัญญาณแรนดัม	22
2.17 การแซมปลิงสัญญาณอนาลอก	25
2.18 สัญญาณการแซมปลิงเฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง	26
2.19 สัญญาณจากการแซมปลิงในอุดมคติ	26
2.20 ลำดับของการแซมเปิ้ล	27
2.21 กระบวนการแซมปลิง DFT	28
2.22 การแปลงสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่	30
2.23 การแปลงสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่	31
2.24 การแปลงสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz	31
2.25 ตัวอย่างสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	32
3.1 เฟสเซอร์ของระบบ Symmetrical Component	33
3.2 วงจรสมมูลของแรงดัน Positive Sequence	37
3.3 วงจรสมมูลของแรงดัน Negative Sequence	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 วงจรสมมูลของแรงดัน Zero Sequence	39
3.5 วงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนจากระบบ Symmetrical เป็นระบบจริง	40
4.1 ไดอะแกรมชุดทดสอบ	47
4.2 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้า สมมูล (B) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	49
4.3 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้า สมมูล (B) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	49
4.4 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	50
4.5 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	50
4.6 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	51
4.7 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	51
4.8 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	52
4.9 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าต่ำ กว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	52
4.10 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 1 เฟส 1% (1O1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	53
4.11 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 1 เฟส 1% (1O1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	53
4.12 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 2 เฟส 3% (2O3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	54
4.13 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดัน ไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 2 เฟส 3% (2O3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษายานาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ...	69
4.43 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูง กว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด50%	69
4.44 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	77
4.45 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกส์สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ...	77
4.46 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	78
4.47 สเปกตรัมความถี่พลวัตร์ของช่องอากาศเชิงศูนย์กลางของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ..	78
4.48 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	80
4.49 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกส์สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ...	80
4.50 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	81
4.51 สเปกตรัมความถี่พลวัตร์ของช่องอากาศเชิงศูนย์กลางของมอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ..	81
4.52 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 5 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	83
4.53 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกส์สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 5 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ...	83
4.54 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 5 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ	84
4.55 สเปกตรัมความถี่พลวัตร์ของช่องอากาศเชิงศูนย์กลางของมอเตอร์ 5 แรงม้า ที่สภาวะต่าง ๆ ..	84
4.56 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	85
4.57 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	85
4.58 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	86
4.59 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	86
4.60 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	87
4.61 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) เป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบสำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) หรือเรียกว่าการบำรุงรักษาตามสภาพ (CBM : Condition Base Maintenance) เพื่อใช้บ่งบอกถึงความผิดปกติต่างๆ อย่างของเครื่องจักรกล โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีเครื่องจักรขนาดใหญ่และเทคโนโลยีที่ซับซ้อนมากขึ้นและมีกำลังการผลิตสูง หากเกิดการหยุดการทำงานอย่างฉับพลัน (Breakdown) จะเกิดความสูญเสียอย่างมากอันเนื่องมาจากค่าเสียโอกาสในการผลิต การตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร (Inspection) จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ทราบสภาพที่แท้จริงของเครื่องจักร เพื่อนำมาเป็นข้อมูลใช้ในการคาดการณ์และวางแผนป้องกันและแก้ไขความผิดปกติของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง

สาเหตุของการสั่นสะเทือนหลายประการพบว่ามีสาเหตุมาจากทางกลศาสตร์ และเมื่อทำการแก้ไขทางกลศาสตร์แล้ว บ่อยครั้งยังคงพบว่ามีอาการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้อบกพร่องทางไฟฟ้านั่นเอง โดยทั่วไปการหาค่าการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยวิธีแบบสัมผัส (Touch) คือ การวัดค่าจากหัววัดการสั่นสะเทือน (ระยะการเคลื่อนที่, ความเร็ว, อัตราเร่ง) ซึ่งต้องติดตั้งกับตัวโครงของมอเตอร์ ทำให้ไม่สะดวกและสิ้นเปลืองหากต้องติดตั้งกับมอเตอร์ทุกตัว และขณะที่ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน ยังคงมีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (Unbalanced Voltage) เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะบริเวณภายในนิคมอุตสาหกรรมและบริเวณโดยรอบ ซึ่งมีการติดตั้งและใช้งานมอเตอร์เป็นต้นกำลังอย่างมากมาย ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นนั้นคือมอเตอร์ถูกใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล การหาค่าการสั่นสะเทือนโดยวิธีแบบสัมผัสไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ว่าขณะนั้นมอเตอร์ถูกใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ปกติหรือไม่ ทำให้จำเป็นต้องหาวิธีการที่สามารถบ่งบอกได้ว่ามอเตอร์ถูกใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลหรือไม่สมดุลอย่างไรและมีค่าการสั่นสะเทือนมากน้อยเพียงใด วิธีแก้ไขปัญหานี้ คือ การหาค่าการสั่นสะเทือนโดยวิธีแบบไม่สัมผัส (Non-Touch) โดยใช้เทคนิคการวัดจากค่ากระแส 3 เฟส และใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายพฤติกรรมและการแกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งวิธีนี้สามารถพัฒนาให้บ่งบอกถึงความผิดปกติของมอเตอร์ได้ครอบคลุมหลายประเภท และไม่เป็นการรบกวน (Non-intrusive) ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์ที่ได้สะดวกที่สุดคือควบคุมมอเตอร์หลัก (MCC : Motor Control Center) โดยไม่จำเป็นต้องไปวัดค่าที่ตัวมอเตอร์หน้างาน ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและไม่เสียเวลา

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน โดยวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสมอเตอร์ (MCSA : Motor Current Signal Analysis) ได้มีการพัฒนาอย่างมาก เพื่อประยุกต์ใช้ในงานบำรุงรักษาตามสภาพ และสามารถทำงานได้เสมือนกับการวิเคราะห์จากสัญญาณหัววัดการสั่นสะเทือนโดยตรง การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากสัญญาณกระแสมอเตอร์มีความสะดวกที่จะประยุกต์ใช้บ่งบอกถึงความผิดปกติของมอเตอร์ได้อย่างครอบคลุมกว่า โดยเฉพาะความผิดปกติจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จึงมีแนวคิดที่นำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยจะต้องสามารถบ่งบอกถึงความผิดปกติของมอเตอร์ได้ว่า ถูกใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลหรือไม่สมดุลที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าปกติอย่างไร และมีค่าการสั่นสะเทือนในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่อีกด้วย การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากสัญญาณกระแสมอเตอร์สามารถบ่งบอกถึงความผิดปกติของมอเตอร์ได้หลายอย่าง มีการคำนวณหาค่าความถี่ที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ แต่สำหรับการหาค่าการสั่นสะเทือนที่เป็นความผิดปกติจากสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจำเป็นต้องใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายพฤติกรรม การแกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดพัลส์ของ โมเมนต์บิด (Torque Pulse) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น จากเงื่อนไขนี้ทำให้มีแนวคิดที่จะหาค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เทคนิคการวัดจากค่ากระแส 3 เฟส และใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุน และใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เป็นเครื่องมือช่วยทำการวิเคราะห์หาค่าสเปกตรัมความถี่ วิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและง่ายในการตรวจวัด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและออกแบบ โปรแกรมวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีสวนแม่เหล็กหมุน ช่วยอธิบายพฤติกรรมของการเกิดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ได้
3. เพื่อทดสอบและยืนยันว่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือน และเพื่อประโยชน์ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรได้

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1. ได้โปรแกรมวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนจากสัญญาณกระแส (MCSA) ทดแทนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากหัววัดแบบเดิม

2. ได้เข้าใจพฤติกรรมการณ์สั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลยิ่งขึ้นจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน
3. สามารถนำโปรแกรมไปปรับใช้ในงานบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ เพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์จากสาเหตุอื่น ๆ ได้
4. ช่วยลดปัญหาการเสียหายแบบจับปล้นของมอเตอร์ ทำให้ลดค่าเสียโอกาสจากการหยุดกระบวนการผลิตที่ไม่ได้วางแผนไว้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการณ์แกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดพัลส์ของ โมเมนต์บิด (Torque Pulse) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น จากเงื่อนไขนี้ทำให้มีแนวคิดที่จะหาค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เทคนิคการวัดจากค่ากระแส 3 เฟส และใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุน และใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เป็นเครื่องมือช่วยทำการวิเคราะห์หาค่าสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุน วิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวก ประหยัด และง่ายในการตรวจวัด ทดแทนการวิเคราะห์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบเดิม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนจากสัญญาณกระแส และคำนวณค่าสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
2. ติดตั้งชุดทดสอบ และส่งค่าสัญญาณกระแส และค่าการสั่นสะเทือนจากหัววัด ไปทำการวิเคราะห์สเปกตรัมโดย โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น
3. วิเคราะห์และแสดงผลค่าสเปกตรัมของสนามแม่เหล็กหมุนและการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้อง

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และศึกษามาตรฐานของการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2. ศึกษาทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน ช่วยอธิบายพฤติกรรมการณ์ทำงานของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตามผู้จัดทำมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บบันทึกค่าข้อมูลต่าง ๆ
4. คิดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บบันทึกค่าข้อมูลที่แรงดันสภาวะต่าง ๆ
5. พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กหมุนและการสั่นสะเทือน
6. ทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นให้ทำงานได้ตามต้องการ
7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
8. สรุปผลงานวิจัย
9. เขียนวิทยานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์และทฤษฎี

2.1 วารสารปริทรรศน์

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักร ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติหลาย ๆ สาเหตุ เช่น ความไม่สมดุล (Imbalance), การเยื้องศูนย์ (Misalignment), ความผิดปกติต่าง ๆ จากลูกปืน (Bearing Faults), ความบกพร่องของเฟืองหรือฟันเฟือง (Gear Faults), ความหลวมคลอนในเครื่อง (Looseness), การสูญเสียความหล่อลื่น (Lubrication), การโค้งงอของเพลา (Bent shaft), ความผิดปกติของสายพาน (Belt fault), ความเสียหายในขดลวดของโรเตอร์ (Broken rotor bars), ความไม่สม่ำเสมอของระบบไฟฟ้าของมอเตอร์ (Unbalance voltage), การกำจร (Resonance), และอื่น ๆ ซึ่งการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจะมีการวิเคราะห์ค่าความถี่ต่าง ๆ ของความสั่นสะเทือน และสามารถระบุความผิดปกติแต่ละสาเหตุที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว

2.1.1 วิธีการตรวจจับการสั่นสะเทือน แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1.1.1 วิธีแบบสัมผัส (Touch) โดยใช้ในการติดตั้งหัววัดสัมผัสโดยตรงกับตัวโครงของเครื่องจักร โดยหัววัดมี 3 แบบ คือ 1. หัววัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) 2. หัววัดความเร็ว (Velocity) 3. หัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) โดยมีความสามารถในการตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ย่านความถี่ต่ำไปหาสูงตามลำดับ แล้วนำค่าความถี่ที่ได้จากการตรวจจับ ไปเทียบกับผังขอบเขตการสั่นสะเทือนมาตรฐาน [ภาคผนวก ข] ว่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้หรือไม่

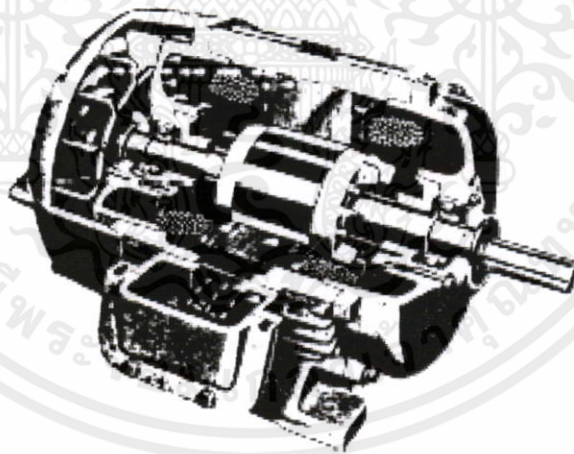
2.1.1.2 วิธีแบบไม่สัมผัส (Non-Touch) เป็นวิธีที่ประยุกต์ขึ้นมาใหม่ โดยใช้ในการวัดค่าจากกระแสเดเตอร์ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ที่แฝงมากับความถี่หลัก เพื่อระบุถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกล โดยไม่เป็นการรบกวน (Non-Intrusive) การทำงานของเครื่องจักร

2.1.2 การตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักร

การตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักร โดยไม่ต้องการรบกวนการทำงานของเครื่องจักร เริ่มต้นขึ้นเมื่อในปี 1970 Oak Ridge National Labs ในอเมริกา เป็นผู้ริเริ่มหาวิธีการในการตรวจสอบสภาพของกังหันรีแอกเตอร์ภายในโรงฟ้านิวเคลียร์โดยไม่เป็นการรบกวนหรือสัมผัสกับโครงสร้างของเครื่องจักรและสามารถทำให้ทราบถึงความผิดปกติต่าง ๆ ของเครื่องจักรได้ ในปี 2003 Dennis B., Jim C., Robert A. [1] ได้นำเสนอมาตรฐานการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เนื่องจากความผิดปกติของการเยื้องศูนย์, ลูกปืน, และโรเตอร์ ว่ามีความถี่เป็นอัตราส่วนเท่าไรกับความถี่หลัก

ไว้ใน IEEE 841 Motor Vibration [2] ในปีเดียวกัน William T. Thomson, Ronald J. Gilmore. [3] ได้นำเสนออย่างละเอียดเฉพาะในส่วนความผิดปกติเนื่องจากความเสียหายของสเตเตอร์และโรเตอร์ พร้อมกับการเชื่อมศูนย์ภายในช่องอากาศ และในปีเดียวกัน Voitto Kokko. [4] ได้นำเสนอความผิดปกติเนื่องจากความผิดปกติของสนามแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และในปี 2000 รัชต มั่งมีชัย [5-6] ได้นำเสนอทำการทดสอบมอเตอร์เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และสามารถบอกได้ว่าเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีพิกัดกำลังลดลง และมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นไม่ได้บอกถึงผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นอย่างไร และอธิบายให้เข้าใจได้ว่าทำไมเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแล้วจึงเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนเมื่อมอเตอร์ใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เพื่อช่วยอธิบายให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และสามารถนำมาใช้ทดแทนการตรวจจับการสั่นสะเทือนจากหัววัดแบบเดิมได้ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทของการวิเคราะห์ผลการทดสอบและบทสรุป

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor)



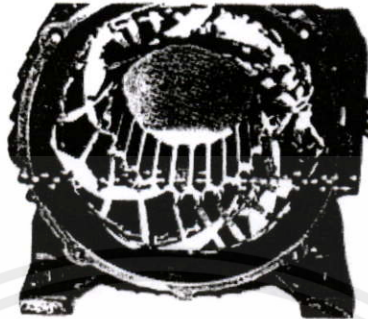
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

อินดักชัน (Induction) หมายถึง การเหนี่ยวนำ ซึ่งการหมุนของมอเตอร์เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 มอเตอร์ชนิดนี้ราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วรอบเกือบคงที่ คือความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์

2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor Construction)

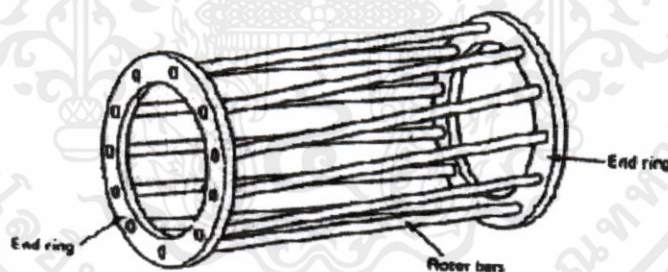
2.2.1.1 สเตเตอร์ (Stator) คือ ส่วนที่อยู่กับที่มีหน้าที่ยึดขดลวดอาเมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสลอต (Slot) ทำด้วยแผ่นลามิเนตบาง ๆ อัดเป็นรูปทรง ดังรูปที่ 2.2



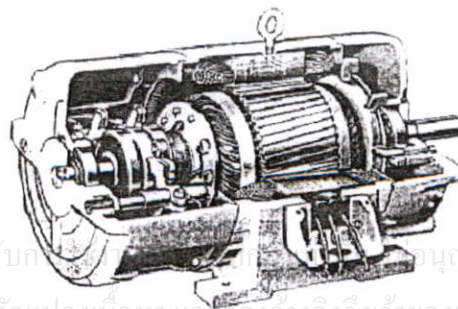
รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.2.1.2 โรเตอร์ (Rotor) คือ ส่วนที่หมุน แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.2.1.2.1 แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) มีแท่งตัวนำ (Rotor bars) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ในโรเตอร์ โดยที่ปลายทั้ง 2 ด้านของแท่งตัวนำถูกสังเคราะห์ด้วยตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ดังรูปที่ 2.3 แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2.2 แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่าง จากแบบกรงกระรอก คือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลีปรिंग (Slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ ดังรูปที่ 2.4 และมีข้อจำกัด คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์ต้องเท่ากับ จำนวนขั้วสเตเตอร์

2.2.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็ก หมุน เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่ตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทำให้เกิดแรงบิด เป็นผลให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุน

เมื่อเครื่องจักรกลมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) มากกว่า 2 โพล ความสัมพันธ์ระหว่างองศาทางไฟฟ้า (θ) ที่กำเนิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับองศาทางกล (θ_m) ที่เครื่องจักรกลหมุนไป 1 รอบ หาค่าได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.1)$$

ความถี่ (f) ของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทุก ๆ $P/2$ ของแต่ละรอบ มีความสัมพันธ์กับความถี่รอบต่อนาที (N_s) และแปลงเป็นความถี่รอบต่อวินาที ($N_s / 60$) มีหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) หาค่าได้ดังสมการที่ (2.2)

$$f = \frac{P N_s}{2 \cdot 60} \quad \text{Hz} \quad (2.2)$$

เพราะฉะนั้น จึงสามารถหาค่าความเร็วเชิงมุม (ω) ของคลื่นแรงดันไฟฟ้า ได้จาก ความสัมพันธ์กับความเร็วทางกล (ω_m) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ดังสมการที่ (2.3)

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m \quad \text{rad/s} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากหลักการทำงานสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (N_s) ซึ่งหาค่าได้ดังสมการที่ (2.4)

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.4)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวนำของโรเตอร์ (e_{ind}) หาค่าได้ดังสมการที่ (2.5)

$$e_{ind} = vB_s l \quad (2.5)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของโรเตอร์

B_s คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l คือ ความยาวของโรเตอร์

โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะหมุนไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ แต่ไม่ได้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (N_s) กับความเร็วของโรเตอร์ (N_r) นำมาหาค่าสลิป (s) ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.6)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์ (B_r) และเกิดปฏิกิริยัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์ (B_s) จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T_r) ซึ่งหาค่าได้ดังสมการที่ (2.7)

$$T_r = kB_r B_s \quad (2.7)$$

แรงบิดจะทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วของซิงโครนัส ค่า e_{ind} และ T_r จะเท่ากับศูนย์ โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

2.3 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Field)

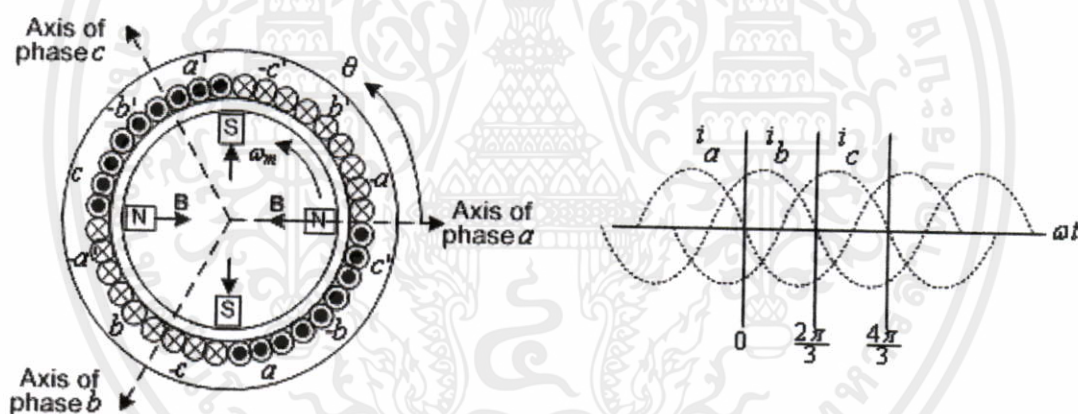
พื้นฐานของเครื่องจักรกล 3 เฟส ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีขนาดเท่ากันและวางทำมุมเฟสต่างกัน 120 องศาไฟฟ้า กระแสที่ไหลในขดลวดทั้ง 3 เฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่มีขนาดคงที่ [1-2] สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

$$i_b(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.9)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.10)$$

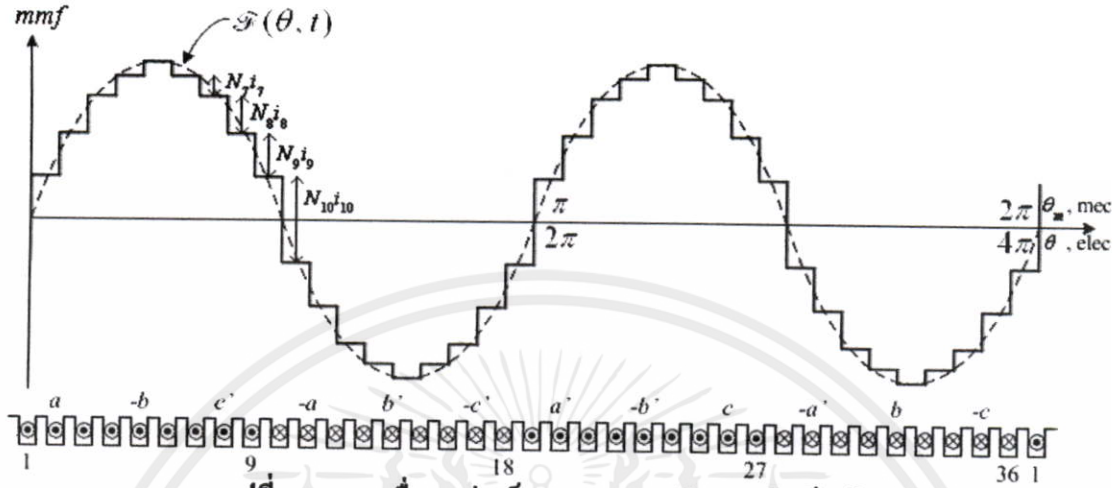
เมื่อ I_m คือ ค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กสูงสุดในแต่ละเฟส โดยกำหนดเวลาเริ่มต้นให้เฟส a เป็นแกนอ้างอิงอยู่ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ณ เวลา t ใดๆ และลำดับเฟสมีค่าเป็น abc , ค่ากระแสสมมูล 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส และกระแสสมมูล 3 เฟส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการดูดและผลักกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการดูดและผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์นี้ จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

เมื่อทำการป้อนจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยมีโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) และพันขดลวดแบบอัดเป็นก้อน (Concentrated coil) ลักษณะแรงเคลื่อนแม่เหล็กสามารถกระจายแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดพันแบบอัดเป็นก้อน

สนามแม่เหล็กที่กระจายโดยรอบช่องอากาศจะมีขนาดคงที่ ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์จะเป็นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ดังสมการที่ (2.11)

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \dots \right] \quad (2.11)$$

ซึ่งจะได้แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก $F_a(\theta, t)$ ที่มุม θ และเวลา t ใดๆ ของเฟส a ดังสมการที่ (2.12), (2.13)

$$F_a(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.13)$$

โดยที่

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph} I_m}{P} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$: Traveling wave in positive direction

$F_{\max} \cos(\theta + \omega t)$: Traveling wave in negative direction

เมื่อ $F_o(\theta, t)$ คือ ค่าแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กของเฟส a ที่มุม θ และเวลา t ใด ๆ

F_{\max} คือ ค่าแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กสูงสุดของขดลวด

k_w คือ แฟกเตอร์ของการพันขดลวด

I_m คือ ค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กสูงสุดในแต่ละเฟส

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

θ คือ ตำแหน่งของมุมใด ๆ ในมอเตอร์

ω คือ ความเร็วเชิงมุม

จากรูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลในแต่ละเฟส จะสร้างความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ขึ้นตลอดแนวความยาวของช่องอากาศ (g) สามารถหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (\mathcal{F}) ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$H = \frac{\mathcal{F}}{g} \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสี่เหลี่ยมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H_{a1}) ที่เฟส a ได้ดังสมการ

$$H_{a1} = \frac{\mathcal{F}_{a1}}{g} = \frac{4 N i}{\pi 2g} \cos \theta \quad (2.16)$$

$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{Pg} i_a \cos \theta \quad (2.17)$$

เมื่อ N_{ph} คือ จำนวนรอบขดลวดอนุกรมต่อเฟส

จากสมการ (2.17) สามารถหาแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (\mathcal{F}_{a1}) ที่เฟส a ได้ดังสมการ

$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{g} i_a \cos \theta \quad (2.18)$$

$$\mathcal{F}_{a1} = (F_{\max} \cos \theta) \cos \omega t \quad (2.19)$$

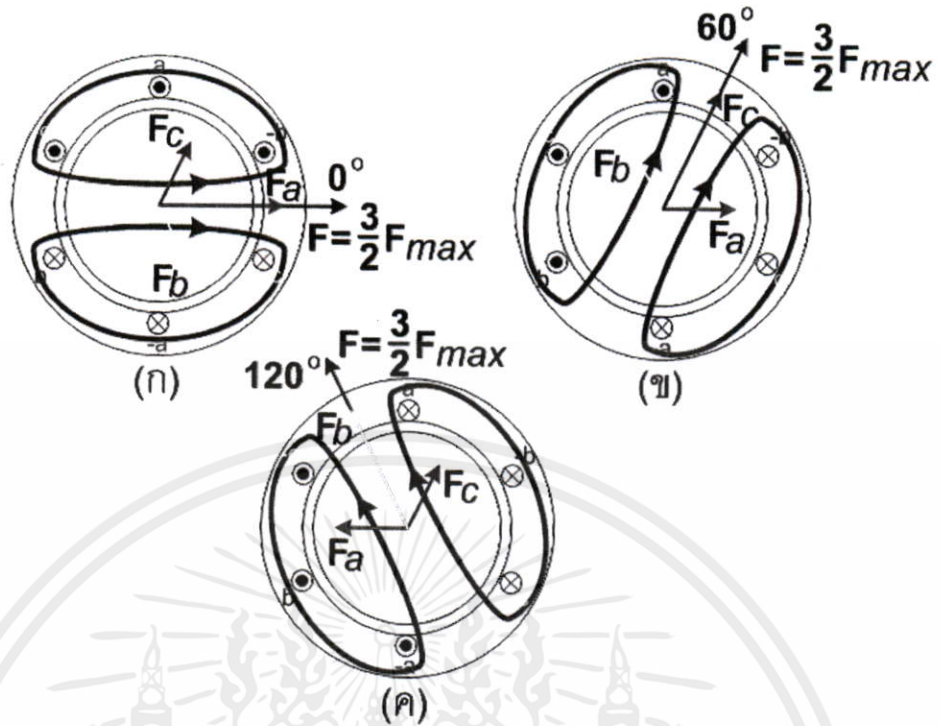
ถ้า $I_{m,a} = I_{m,b} = I_{m,c}$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_a เข้าที่ขดลวดเฟส a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการอ้างอิง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{F}_{a1} = F_{\max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t) \right] \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างจากกระแส 3 เฟส

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_b เข้าที่ขดลวดเฟส b

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{b1} &= F_{max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \mathcal{F}_{b1} &= F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \right] \end{aligned} \tag{2.21}$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_c เข้าที่ขดลวดเฟส c

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{c1} &= F_{max} \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \mathcal{F}_{c1} &= F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \right] \end{aligned} \tag{2.22}$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ที่เกิดจากการป้อนกระแสเข้าขดลวดทั้ง 3 เฟส

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) &= \mathcal{F}_{a1} + \mathcal{F}_{b1} + \mathcal{F}_{c1} \\ \therefore \mathcal{F}(\theta, t) &= \frac{3}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) \end{aligned} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2 ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การสั่นสะเทือน

2.4.1 ประเภทของการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนมีหลายรูปแบบ แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

2.4.1.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลภายในระบบ ภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบ โดยปราศจากแรงภายนอกมากระทำ

2.4.1.2 การสั่นสะเทือนแบบกระตุ้น (Forced Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลภายในระบบ อันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ

ลักษณะของแรงภายนอกที่มากระทำมีได้หลายรูปแบบ แต่ในเครื่องจักรแบบหมุน การกระตุ้นของระบบมักจะอยู่ในรูปของแรงกระตุ้นแบบคาบ และเนื่องจากแรงกระตุ้นแบบคาบนั้นจะสามารถแยกย่อยออกเป็นผลรวมของการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้ ดังนั้นจึงนิยมพิจารณาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือน โดยใช้แบบจำลองในรูปแบบของแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิก เมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิก การสั่นสะเทือนของระบบจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับแรง คือ จะสั่นสะเทือนด้วยความถี่เดียวกันกับความถี่ของแรงที่มากระตุ้น

2.4.2 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักรจะสามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกถึงสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วย ความถี่ ขนาดของการสั่นสะเทือน มุมเฟส

2.4.2.1 ความถี่ ในที่นี้หมายถึง ความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น CPM (Cycle Per Minute) พารามิเตอร์ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้ถ้าหากนำพารามิเตอร์นี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบน โดเมนความถี่

2.4.2.2 ขนาดของการสั่นสะเทือน เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้บ่งบอกสภาพของเครื่องจักร โดยทั่วไปแล้วถ้าหากขนาดของการสั่นสะเทือนมีขนาดใหญ่ ย่อมหมายถึงเครื่องจักรมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์หลักที่นิยมใช้ ได้แก่ การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement), ความเร็ว (Velocity), และอัตราเร่ง (Acceleration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้อื่นโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ถือว่าผิดกฎหมาย
2.4.2.2.1 การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวลจากจุดไม่ว่าการสมดุล หรือขนาด $x(t)$ ในผลเฉลยของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดียว หรือในกรณีที่วัดค่าจาก

ค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด (Peak to Peak) เป็นระยะทางทั้งหมดที่มวลเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบ

2.4.2.2 ความเร็วของการสั่นสะเทือน คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวล มวลจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อมวลเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และจะมีความเร็วสูงสุดในขณะที่มวลเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ค่าการขจัดจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วเป็น

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.24)$$

2.4.2.3 อัตราเร่งในการสั่นสะเทือน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา จะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลอยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2.25)$$

จะพบว่าในกรณีของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดี่ยว ความสัมพันธ์ของการขจัด ความเร็ว และอัตราเร่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$x = X \sin \omega t \quad (2.26)$$

$$v = \omega X \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.27)$$

$$a = \omega^2 X \sin(\omega t + \pi) \quad (2.28)$$

2.4.2.3 มุมเฟส เป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งส่วนที่มีการสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่บนตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องจักร มีหน่วยเป็นองศา

2.4.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เมื่อป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุด จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น และจะเหนี่ยวนำกระแสขึ้นในตัวนำโรเตอร์ ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ เกิดการดูดและผลัก สร้างแรงบิดทางไฟฟ้าขึ้น ทำให้โรเตอร์เกิดการหมุน ฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเป็นสนามแม่เหล็กหมุน โดยจะหมุนเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส ซึ่งจะมีค่ามากกว่าความเร็วโรเตอร์หมุน

จากที่กล่าวมาข้างต้น หากป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสทั้ง 3 เฟส และทำให้สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลทำให้การเหนี่ยวนำกระแสที่โรเตอร์มีค่าเปลี่ยนไป ตลอดจนแรงบิดของโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้การหมุนของโรเตอร์มีความผิดปกติเป็นแบบหน่วงและกระชาก มอเตอร์จึงเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น

ซึ่งหากอยู่ในสถานะสมดุล ที่ป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟสให้กับมอเตอร์ เช่น ป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เท่ากันทั้ง 3 เฟส จะทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นมีขนาดเท่ากัน และมีมุมเฟส (Phase shift) ต่างกัน 120 องศาไฟฟ้า

แต่หากป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ คือ หากมีเฟสใดเฟสหนึ่งเกินกว่าหรือต่ำกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์ จะทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นมีขนาดต่างกัน และมีมุมเฟสเปลี่ยนไปไม่เป็น 120 องศาไฟฟ้า ส่งผลให้สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะมีผลของระบบไม่สมดุลลำดับลบ (Negative Sequence)

2.5 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

2.5.1 บทนำเกี่ยวกับสัญญาณและระบบ

สัญญาณของระบบและคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) สามารถแบ่งสัญญาณได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.5.1.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา (Continuous-time signal)

2.5.1.2 สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time signal)

สรุปหัวข้อหลัก ๆ ที่เกี่ยวกับสัญญาณทั้ง 2 ประเภทดังกล่าว ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

	สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา	สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา
การแทน	ODE	DE (difference equation)
การ Transform	Laplace Transform	Z-transform
โดเมนเวลา	Convolution	Discrete Convolution
โดเมนความถี่	Fourier transform	Discrete Fourier Transform + Fast Fourier Transform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา

ในการศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณนั้นจำเป็นต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาอันหนึ่งอาจแสดงในรูป Ordinary Differential Equation (ODE) จากนั้นก็จะมีวิธีการแปลงสัญญาณจากโดเมนหนึ่ง (เช่น โดเมนเวลา) ไปอยู่ในอีกโดเมนหนึ่ง (โดเมนความถี่) การแปลงดังกล่าวช่วยให้การวิเคราะห์สัญญาณง่ายขึ้น

2.5.2.1 การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่แปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ ไปเป็น $X(s)$ หรืออยู่ใน s-domain (โดย $s = \sigma + j\omega$)

$$X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-st) dt \tag{2.29}$$

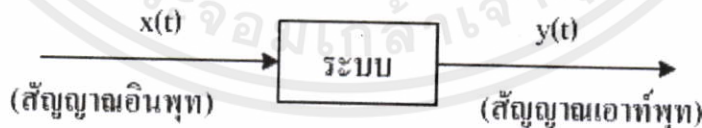
นั่นคือการแปลงลาปลาซสามารถแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตได้

2.5.2.2 การแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางโดเมนความถี่

นอกจาก $X(t)$ สามารถแทนด้วยการแปลงลาปลาซแล้ว ยังสามารถแปลงเข้าสู่โดเมนความถี่ โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) และฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะกล่าวในภายหลังในรายละเอียด

2.5.2.3 การแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาในโดเมนเวลา

เมื่อพิจารณาระบบ (system) ในการประมวลผลสัญญาณ Signal Processing สามารถอ้างถึงเป็นบล็อกได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบของการประมวลผลสัญญาณ

2.5.2.4 ระบบ สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

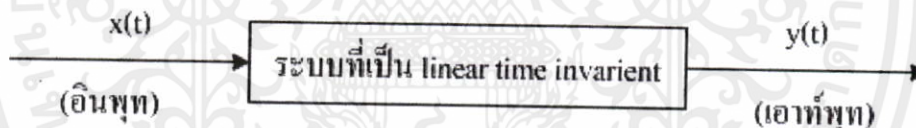
2.5.2.4.1 ระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear) และระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) ระบบที่เป็นเชิงเส้นนั้นสามารถใช้หลักการวางซ้อน (Superposition) ได้ ส่วนระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะไม่สามารถใช้ได้

2.5.2.4.2 ระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time invariant) และระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varying) ในระบบที่เป็นแบบ Time invariant นั้น ถ้ามีการเลื่อนหรือล่าช้าทางเวลาด้านอินพุทของระบบ จะมีการเลื่อนหรือล่าช้าทางเวลาในด้านเอาต์พุทของระบบที่เท่ากัน ส่วนระบบแบบ Time varying จะไม่เป็นเช่นนั้น

2.5.2.4.3 ระบบที่มีความจำ (Memory) และระบบที่ไม่มีควมจำ (Memoryless) ระบบที่มีความจำ เช่น Network ทางไฟฟ้า ที่มีตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ส่วนระบบที่ไม่มีควมจำ เช่น network ทางไฟฟ้า ที่มีแต่ความต้านทานอย่างเดียว

2.5.2.4.4 ระบบ Causal (Non-anticipatory) และระบบ Non-causal (Anticipatory) ในระบบแบบ Causal นั้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุท เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอินพุท ส่วนระบบ non-causal นั้น สัญญาณเอาต์พุทอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุทก็ตาม ดังนั้น โดยทั่วไปแล้วระบบที่เราพิจารณาจะถือเป็นระบบแบบ linear time – invariant

2.5.2.5 การคอนโวลูชัน (Convolution)



รูปที่ 2.9 การกรองแบบเชิงเส้น (Linear filtering)

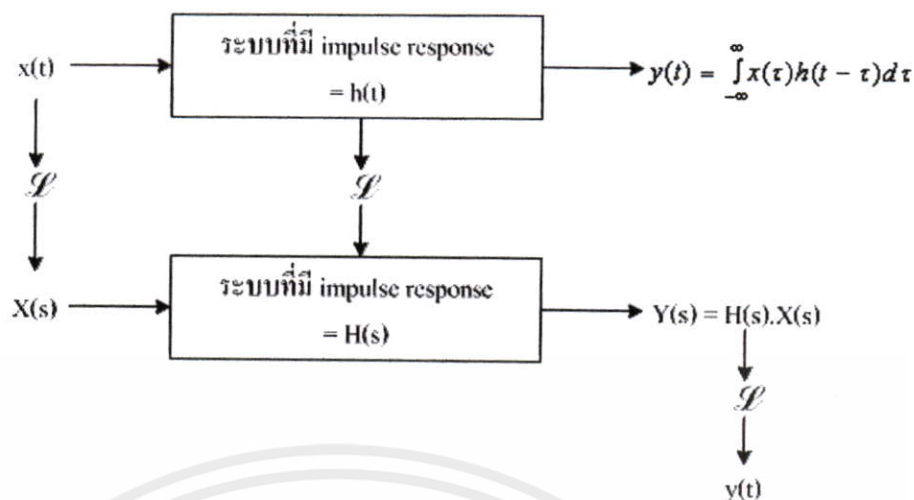
เป็นหลักการที่สำคัญอันหนึ่งใน Signal Processing บางครั้งจะถูกเรียกว่า การกรองแบบเชิงเส้น (linear filtering) ถ้าพิจารณาระบบที่เป็น linear time invariant ดังรูปที่ 2.9

ณ เวลาที่ $t = \tau$ และระบบมีการตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) = $h(t)$ จะได้ว่า

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \tag{2.30}$$

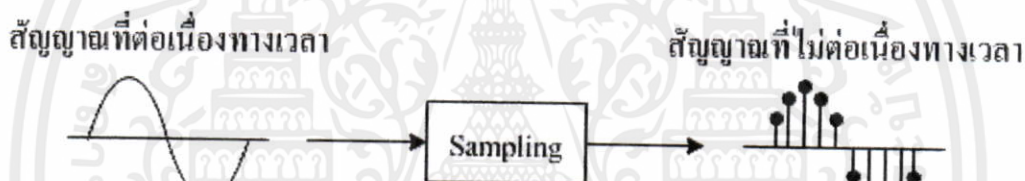
หรือเขียนย่อได้ว่า $y(t) = h(t) \times x(t)$ (2.31)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ข้อสังเกต จะเห็นได้ว่า การคอนโวลูชันของสัญญาณนั้นจะมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ แต่การใช้การแปลงลาปลาซจะช่วยทำให้การคำนวณง่ายขึ้น (เป็นแค่การคูณ) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การคอนโวลูชันของสัญญาณ

2.5.3 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time signal)



รูปที่ 2.11 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา

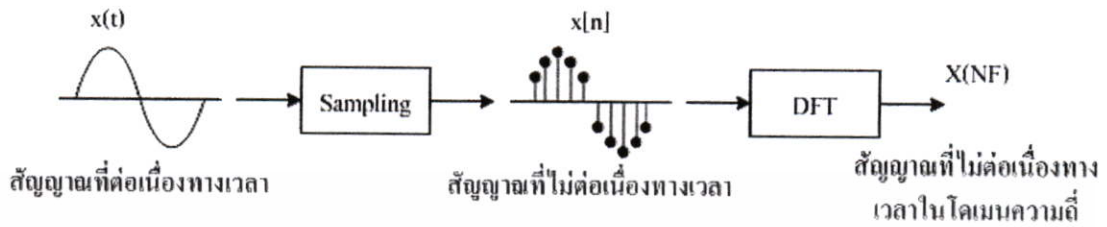
จากที่กล่าวมาข้างต้น สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาสามารถใช้แบบจำลองของ ODE และจากนั้นอาจถูกแทนด้วยการแปลงลาปลาซ หรือการแปลงฟูเรียร์ เพื่อการวิเคราะห์เชิงสัญญาณ เช่นกันเราสามารถใช้อะไร ODE แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete ODE) และการแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete transform) กับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

2.5.3.1 การแปลงแบบแซด (z-transform)

สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Digital) นั้นเริ่มได้รับความสนใจประมาณ 50 ปีที่แล้ว และพบว่า การแปลงลาปลาซนั้นไม่เหมาะสมกับสัญญาณแบบนี้ ดังนั้นการแปลงแบบแซดจึงถูกนำมาใช้แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.5.3.2 การแทนสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางโดเมนความถี่ สัญชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น จากที่กล่าวไว้ว่าการแปลงฟูเรียร์สามารถแปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ได้ แต่บางครั้งสัญญาณดังกล่าว ซึ่งเมื่อมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ด้วย อาจทำให้การ

แปลงฟูเรียร์นั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ การแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform : DFT) จึงถูกนำมาใช้แทน โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.12

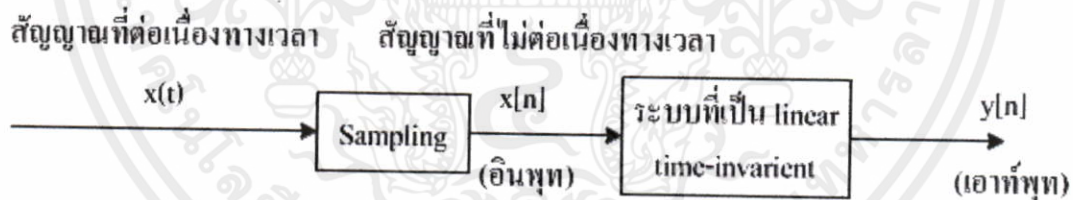


รูปที่ 2.12 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transforms (DFT))

จากการที่ Cooley และ Turkey ได้ค้นพบวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) ซึ่งเป็นการดัดแปลง DFT ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถทำให้เกิดผลหรือทำได้ในทางดิจิทัลคอมพิวเตอร์ และนำมาวิเคราะห์สัญญาณได้เป็นอย่างดี จึงนับได้ว่า FFT เป็นพื้นฐานของ Discrete-time Signal Processing (DSP)

2.5.3.3 การแทนสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาในโดเมนเวลา

เช่นเดียวกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา เราจะพิจารณาถึงการคอนโวลูชัน แต่เป็นคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time Convolution) สรุปได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา

ณ. $n = j$ และระบบมีการตอบสนองอิมพัลส์ = $h[n]$ จะได้

$$y[n] = \sum_{i=0}^{\infty} h[n-i]x[i] \quad (2.32)$$

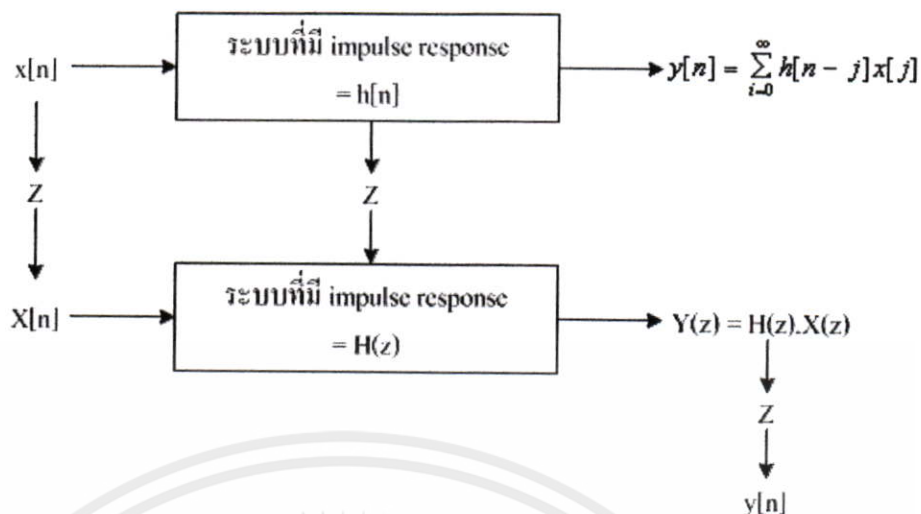
หรือจะได้

$$y[n] = h[n] \times x[n] \quad (2.33)$$

โดย $*$ = การคอนโวลูชัน (ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาเอกสารนี้ไว้เป็นของตนเอง ไม่สามารถนำออกหรือเผยแพร่ในที่สาธารณะได้ หากต้องการนำออกหรือเผยแพร่ในที่สาธารณะ กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อสังเกต จะเห็นได้ชัดว่าการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลานั้นมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์แต่การแปลงแบบแซค จะช่วยทำให้การคำนวณง่ายขึ้น (เป็นแค่การคูณ) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยใช้การแปลงแบบแซด

2.5.4 Discrete-time Signal Processing (DSP)

ในอดีต Signal Processing จะเป็นแบบสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา อุปกรณ์ที่ใช้อาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ไปจนถึงแอมพลิฟายเออร์ ซึ่งการทำและการเปลี่ยนแปลงแก้ไขด้านฮาร์ดแวร์นั้นเป็นไปได้ยาก เช่น เส้นประวง (delay line) ใน DSP จะเป็นแค่ ชิพรีจิสเตอร์ ซึ่งทำได้ง่าย แต่ในอดีตจะต้องเป็นเส้นตัวนำที่มีความยาวค่าหนึ่ง ดังนั้น DSP จึงถูกนำมาใช้แทนที่และได้รับความนิยม และถูกนำมาใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การสื่อสารแบบดิจิทัล เรดาร์ การส่งสัญญาณวิทยุ โทรศัพท์ การควบคุม การกรองสัญญาณ การวิเคราะห์สัญญาณ ในช่วงช่วงขณะ และช่วงอิมพัลส์ และอื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนี้ DSP ยังมีความยืดหยุ่นในลักษณะที่ว่าสามารถทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ โดยเฉพาะในแง่ของการโปรแกรมการสร้างลักษณะวงจรที่ไม่สามารถทำได้ในแบบอนาล็อก ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงหัวใจหลัก ๆ ของ DSP คือ ชนิดของสัญญาณการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสัญญาณ โดยใช้ DFT และ FFT และ Digital Filter

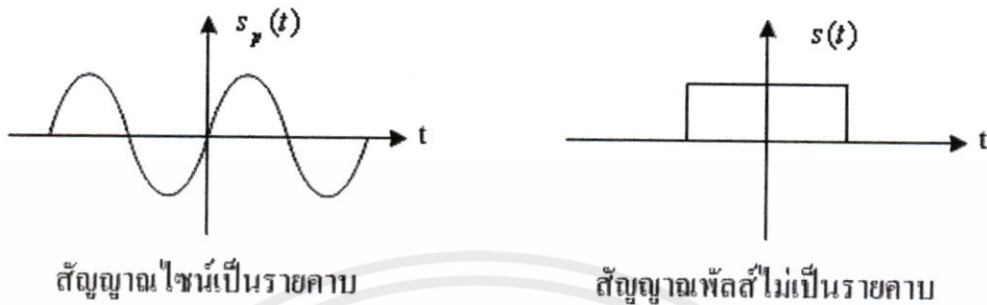
อนึ่ง DSP เป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่เป็นตัวเลขเดี่ยว ๆ ไม่ต่อเนื่อง MATLAB สามารถนำมาใช้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะทำให้ผู้เรียนสามารถได้ลงมือปฏิบัติจริง และเห็นผลลัพธ์จริงอันจะนำมาสู่ความเข้าใจในวิชา DSP อย่างได้ผล นอกจากนี้ MATLAB มีฟังก์ชันที่เรียกมาใช้งานกับ Signal Processing เท่านั้น

2.5.5 สัญญาณและการจัดกลุ่ม

ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น โดยทั่วไป สามารถแบ่งกลุ่มของสัญญาณได้ดังนี้ โดยขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.5.5.1 สัญญาณรายคาบ (Periodic Signal) และสัญญาณไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Signal)

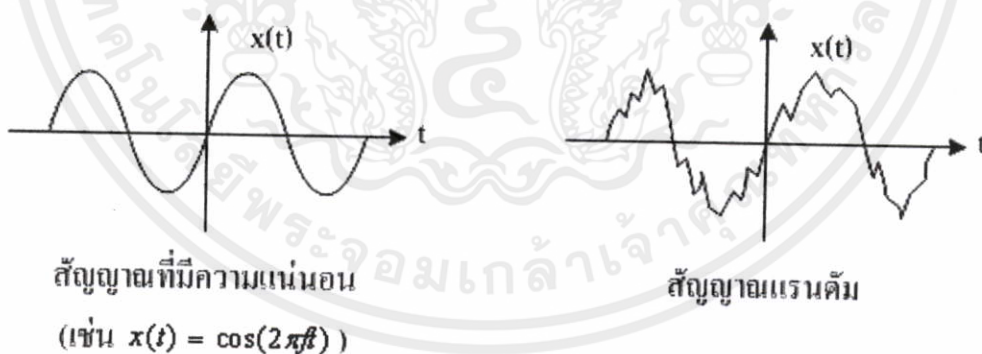
ให้สัญญาณร่ายคาบ มีรูปสมการเป็น $s_p(t) = s(t + T_0), \forall T_0$
 และสำหรับสัญญาณที่ไม่เป็นร่ายคาบ $s(t) \neq s(t + T_0), \exists T_0$



รูปที่ 2.15 สัญญาณ ไซน์ที่เป็นร่ายคาบและสัญญาณพัลส์ที่ไม่เป็นร่ายคาบ

2.5.5.1 สัญญาณที่มีความแน่นอน (Deterministic Signal) และสัญญาณแรนดอม (Random Signal)

สัญญาณที่มีความแน่นอนในทุกเวลา คือ สัญญาณที่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ สัญญาณแรนดัม คือ สัญญาณที่ไม่มีความแน่นอน การหาค่าของสัญญาณจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากกลุ่มของส่วนที่ตัดมาพิจารณาโดยใช้หลักทางสถิติและความน่าจะเป็น (Probability)



รูปที่ 2.16 สัญญาณที่มีความแน่นอนและสัญญาณแรนดัม

2.5.5.2 สัญญาณอนาลอก (Analog Signal) และสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร สัญญาณอนาลอก เป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทางเวลา
 ไม่ว่าจะนิยามทั้งสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time Signal) และถูก
 ประเมินค่า (quantize)

2.5.6 การวิเคราะห์สัญญาณโดยทฤษฎีฟูรีเยร์ (Fourier)

ในทาง Signal Processing นอกจากจะสนใจสัญญาณในโดเมนเวลา (Time Domain) แล้ว ยังต้องศึกษาถึงสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) หรือสเปกตรัมความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณด้วย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณด้วยทฤษฎีของฟูรีเยร์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) และการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) ซึ่งโดยทั่วไปอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบ และการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transforms) ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ

กำหนดให้ $s_p(t)$ = สัญญาณรายคาบที่มีเวลา T_0 (p แทน periodic)
 $s(t)$ = สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ

ใช้อักษรตัวเล็กในโดเมนเวลา เช่น $s_p(t)$ หรือ $s(t)$ ใช้อักษรตัวใหญ่ในโดเมนความถี่ เช่น $S_p(f)$ หรือ $S(f)$

2.5.6.1 อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series)

ให้ $s_p(t)$ เป็น periodic signal ที่มี period = T_0 สัญญาณ $s_p(t)$ นี้สามารถแทนได้ด้วยผลรวมของ sine และ cosine ดังนี้

$$s_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (2.34)$$

โดยที่

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s_p(t) dt \quad (2.35)$$

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s_p(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt, n = 1, 2, \dots \quad (2.36)$$

$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s_p(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt, n = 1, 2, \dots \quad (2.37)$$

อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ในสมการ (2.34) นั้น สามารถทำให้อยู่ในรูปง่ายขึ้นในรูปของ Complex Exponential ด้วยได้

$$\cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{j2\pi n t}{T_0}\right) + \exp\left(\frac{-j2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (2.38)$$

$$\sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) = \frac{1}{2j} \left[\exp\left(\frac{j2\pi n t}{T_0}\right) - \exp\left(\frac{-j2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (2.39)$$

โดยแทนสมการ (2.38), (2.39) ลงใน (2.34) และจัดรูปใหม่ได้ดังสมการ (2.40)

$$s_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[(a_n - jb_n) \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) + (a_n + jb_n) \exp\left(\frac{-j2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad (2.40)$$

หรือ

$$s_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) \quad (2.41)$$

โดยที่

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} s_p(t) \exp\left(\frac{-j2\pi nt}{T_0}\right) dt, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

2.5.6.2 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform)

ถ้า Periodic Signal มี $T_0 \rightarrow \infty$ จะกลายเป็น Non-periodic Signal

จาก

$$s(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} s_p(t)$$

$$s_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) s_p(t)$$

ถ้ากำหนดให้ $\Delta f = 1/T_0$, $f_n = n/T_0$ และ $S(f_n) = C_n T_0$ จะได้

$$s_p(t) \Rightarrow s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \exp(j2\pi ft) df$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (2.42)$$

ข้อสังเกต

1. Frequency-domain \Rightarrow ตัวอักษรใหญ่
Time domain \Rightarrow ตัวอักษรเล็ก
2. จาก $S(f) \Rightarrow s(t)$ และ $S(f)$ คือ Fourier Transform ของ $s(t)$
3. จาก $s(t) \Rightarrow S(f)$ และ $s(t)$ คือ Inverse Fourier transforms ของ $S(f)$
“ $s(t)$ และ $S(f)$ คือ Fourier Transform Pair”
4. ความสัมพันธ์ระหว่าง Laplace Transform กับ Fourier Transform

$$\text{Fourier Transform คือ } S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j2\pi ft) dt$$

$$\text{Laplace Transform คือ } S(s) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-st) dt$$

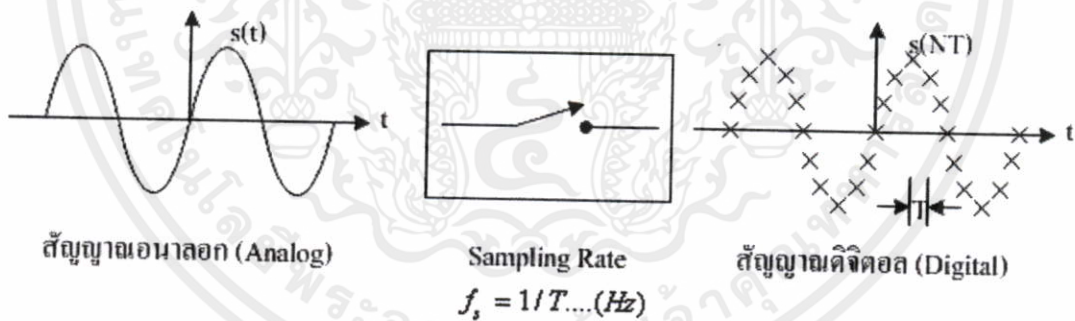
โดยที่ $s = \sigma + j\omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จะเห็นได้ว่า Fourier Transform อาจหาได้จาก Laplace Transform โดยให้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 $s = j\omega = 2\pi f$

โดยทั่วไปแล้ว Fourier Transform เพียงพอต่อการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ เช่นใน วิชาด้านการสื่อสาร ซึ่งสนใจเฉพาะช่วงสภาวะคงที่ (Steady state) แต่ Laplace Transform นั้นจะใช้ ในการวิเคราะห์ในช่วงชั่วขณะ (Transient) มาเกี่ยวข้องด้วย

2.5.7 การชักตัวอย่าง (Sampling) ของสัญญาณ

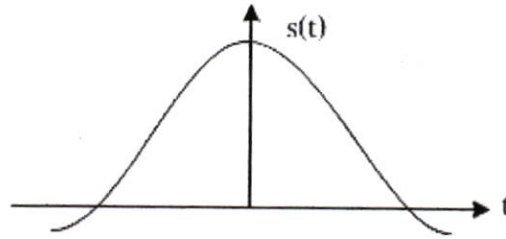
จากการแบ่งกลุ่มของสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว สัญญาณอนาล็อก (Analog) คือ สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณที่วัดจากอุปกรณ์ตรวจจับ Sensor อย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาในด้านของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์การสื่อสาร ซึ่งแนวโน้มจะหันมาใช้ระบบดิจิทัล (Digital) มากขึ้นด้วย ข้อดี เช่น ทนต่อสัญญาณรบกวน ยืดหยุ่นต่อการใช้งาน โดยเข้าได้กับระบบดิจิทัลอื่น ๆ มีรูปแบบที่รวมกันอยู่ ทำให้สามารถส่งไปได้หลายแบบ สามารถใช้แบนด์วิธได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงเรื่องของการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) และการเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลได้โดยการเข้ารหัส (Encryption) สัญญาณดิจิทัล คือ สัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา เช่น ข้อมูลไบนารีที่ได้จากเอาต์พุตของคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็น 0 กับ 1 หรืออีกแง่หนึ่ง คือ สัญญาณอนาล็อกที่ถูกแซมเปิล (Sample) ด้วยอัตราแซมเปิล (Sampling Rate) $1/T$ เฮิร์ต (และ T คือ คาบเวลาการแซมเปิล) ซึ่งได้สัญญาณที่มีค่าเดี่ยว ๆ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Discrete-time Signal



รูปที่ 2.17 การแซมเปิลสัญญาณอนาล็อก

2.5.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานการแซมเปิล

ขบวนการแซมเปิล (Sampling Process) เป็นขบวนการพื้นฐานอันหนึ่งของ Digital Signal Processing, Digital Communications และงานอื่น ๆ ที่ใช้สัญญาณดิจิทัล โดยสัญญาณอนาล็อก จะถูกแปลงไปเป็นลำดับของการแซมเปิล (Sequences of Sampling) ที่มีระยะเท่า ๆ กัน ไม่ว่าจะใช้วิธีใดก็ตาม สิ่งหนึ่งที่เป็นที่พึงประสงค์ของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้พิจารณาสัญญาณหนึ่ง $s(t)$ เฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง



รูปที่ 2.18 สัญญาณการแชนเปลิ่งเฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง

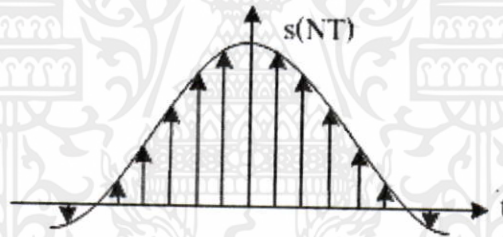
ถ้าสัญญาณ $s(t)$ นี้ถูกแชนเปลิ่งด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ คือ 1 ครั้ง ใน T วินาที ผลที่ได้จะเป็นลำดับของการแชนเปลิ่งที่มีช่วงห่าง 1 วินาที (แทนด้วย $s(NT)$)

โดยที่ N = จำนวนเต็ม

T = คาบเวลาการแชนเปลิ่ง (Sampling Period)

$f_s = 1/T$ = อัตราการแชนเปลิ่ง (Sampling Rate)

รูปแบบของการแชนเปลิ่งในอุดมคติ นั้นมีชื่อเรียกว่า Instantaneous Sampling ถ้าให้ $s(t)$ = สัญญาณที่ได้จากการแชนเปลิ่งสัญญาณ $s(t)$ จะมีผลดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัญญาณจากการแชนเปลิ่งในอุดมคติ

“สัญญาณที่มีแบนด์วิดท์จำกัด และมีองค์ประกอบความถี่ไม่เกิน f เฮิรต สามารถแทนค่าได้ด้วยค่าแชนเปลิ่งของตัวมัน โดยมีช่วงที่สม่ำเสมอไม่เกิน” หรือแทนค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$T \leq 1/(2f) \quad (2.43)$$

และ $2f$ = อัตราไนควิสต์ (Nyquist Rate)

$T = 1/(2f)$ = ช่วงไนควิสต์ (Nyquist interval)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น นั่นคือ ทรานโคดที่แชนเปลิ่งสัญญาณ $s(t)$ ด้วยช่วงไม่เกินความช่วงไนควิสต์ ($1/2f$ วินาที) สัญญาณอนาลอก $s(t)$ เดิมสามารถหาค่ากลับคืนมาได้จากลำดับของแชนเปลิ่ง $s(NT)$, $n=0$,

$\pm 1, \pm 2, \dots$ โดยไม่มีความคิดเพี้ยน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในการแซมเปิลสัญญาณที่มีค่าความถี่ f จะต้องแซมเปิลสัญญาณนั้นด้วยอัตราแซมเปิลถึง f_s โดยที่

$$f_s \geq 2f \tag{2.44}$$

และความถี่ที่เท่ากับ $f_s / 2$ จะเรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency)

เหตุผลของการที่ต้องมีเงื่อนไขข้างต้น เนื่องจากถ้าแซมเปิลด้วย $f_s < 2f$ (ช้าเกินไป) แล้วจะเกิดการเคลือบแฝง (Aliasing) ของสัญญาณ นั่นคือ จะไม่สามารถนำสัญญาณเดิมกลับมาคืนได้ เช่น สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีความถี่ $f = 50$ เฮิร์ต เพื่อป้องกันการเคลือบแฝงของสัญญาณ จะต้องแซมเปิลถึงดังกล่าวด้วยอัตรา $f_s \geq 2f$ นั่นคือ มากกว่าหรือเท่ากับ 100 เฮิร์ตขึ้นไป และความถี่ไนควิสต์ของกรณีนี้คือ 50 เฮิร์ต

2.5.8 การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform)

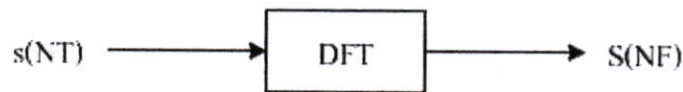
จากพื้นฐานความรู้เรื่องการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) นั้นสัญญาณที่ใช้ถือว่ามีความต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Signal) ปัจจุบันมีการนำระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (ระบบ Digital) มาใช้จึงได้มีการพัฒนาเป็น Discrete Fourier Transform (DFT) ซึ่งใช้เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลในโดเมนเวลา (Time Domain) ให้เป็นเซตของจุดในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ขบวนการ DFT ก็จะเริ่มจากการแซมเปิลถึงสัญญาณอนาลอก $s(t)$ ให้ได้เป็นลำดับของแซมเปิล ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลำดับของการแซมเปิล

โดย T = คาบเวลาการแซมเปิลถึง
 N = จำนวนการแซมเปิลถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และให้ขบวนการแซมเปิลถึงมีอัตราแซมเปิลถึงมากกว่าหรือเท่ากับความถี่สูงสุดของสัญญาณ ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ด้วย หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อ สำนักพิมพ์จากนั้นก็ป้อน $s(NT)$ เข้าสู่กระบวนการ DFT และได้ผลลัพธ์ คือ $S(NF)$ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กระบวนการแปลงถึง DFT

$S(NF)$ จะแสดงถึงลำดับของ N แคมป์ที่อยู่ที่ห่างกันในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) อยู่ f_s เฮิร์ต เทคนิค Numerical Computation นั้นสามารถทำได้เป็นอย่างดีกับ Discrete Fourier Transform ดังนั้นจึงสามารถใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ DFT ของสัญญาณเพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณหรือการจำลองแบบ (Simulation) ต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม DFT มีอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่ออันดับค่า N มีค่ามาก แต่ทั้ง $s(NT)$ กับ $S(NF)$ มีลักษณะเป็น Discrete และ Periodic ดังนั้นจะพบว่ารูปแบบการคำนวณใหม่จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการคำนวณได้ ซึ่งก็คือ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT)

2.5.9 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT)

จุดมุ่งหมายของ FFT ก็เพื่อลดเวลาการคำนวณของคอมพิวเตอร์ลง โดยใช้ข้อดีของการคำนวณซ้ำประสิทธิภาพของ DFT ที่สามารถกระทำได้ในลักษณะซ้ำ (Iterative Manner) ดังนั้นจึงช่วยลดเวลาในการคำนวณ วิธีการของ FFT คือ การจัดแบ่งแล้วทำการคำนวณ (Divide and Conquer) และจะให้จำนวนข้อมูล N เป็นค่า 2 ยกกำลัง M ($N = 2^M$) โดย M เป็นจำนวนเต็มบวก

ถ้าเปรียบเทียบการคำนวณ DFT จะมี

การคูณจำนวนเชิงซ้อน = N^2 ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N^2)$

การบวกจำนวนเชิงซ้อน = $N(N-1)$ ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N(N-1))$

ในขณะที่การคำนวณแบบ FFT จะมี

การคูณจำนวนเชิงซ้อน = N ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N \log_2 N)$

การบวกจำนวนเชิงซ้อน = $N \log_2 N$ ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N \log_2 N)$

2.5.10 การคำนวณ FFT ใน MATLAB

MATLAB มีฟังก์ชัน FFT ที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้เลย มีรูปแบบ คือ

2.5.10.1 แบบ 1 อาร์กิวเมนต์

รูปแบบคือ $y = \text{fft}(x)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ x คือ Input Argument และเป็นเวกเตอร์ที่แทนจุดของสัญญาณใน Time Domain โดยผ่านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก y คือ Output Argument และเป็นเวกเตอร์ขนาดเดียวกันที่มีค่า Complex ที่แทนถึง

Frequency Domain Content ของสัญญาณอินพุท

ถ้าจำนวนค่าของสัญญาณใน Time Domain เป็นค่านกกำลัง 2, MATLAB ใช้ FFT Algorithm ในการคำนวณ

ถ้าจำนวนค่าของสัญญาณใน Time Domain ไม่เป็นค่านกกำลัง 2, MATLAB ใช้ DFT Algorithm ในการคำนวณ

2.5.10.2 แบบ 2 อาร์กิวเมนต์

รูปแบบคือ $y = \text{fft}(x, L)$

x คือ Input Argument และเป็นเวกเตอร์ที่แทนจุดของสัญญาณใน Time Domain

L คือ Input Argument เป็นจำนวนเต็มซึ่งแสดงถึงจำนวนจุดสำหรับเวกเตอร์

เอาท์พุท

y คือ Output Argument และเป็นเวกเตอร์ที่มีค่า Complex ที่แทนถึง Frequency Domain Content ของสัญญาณ Input L

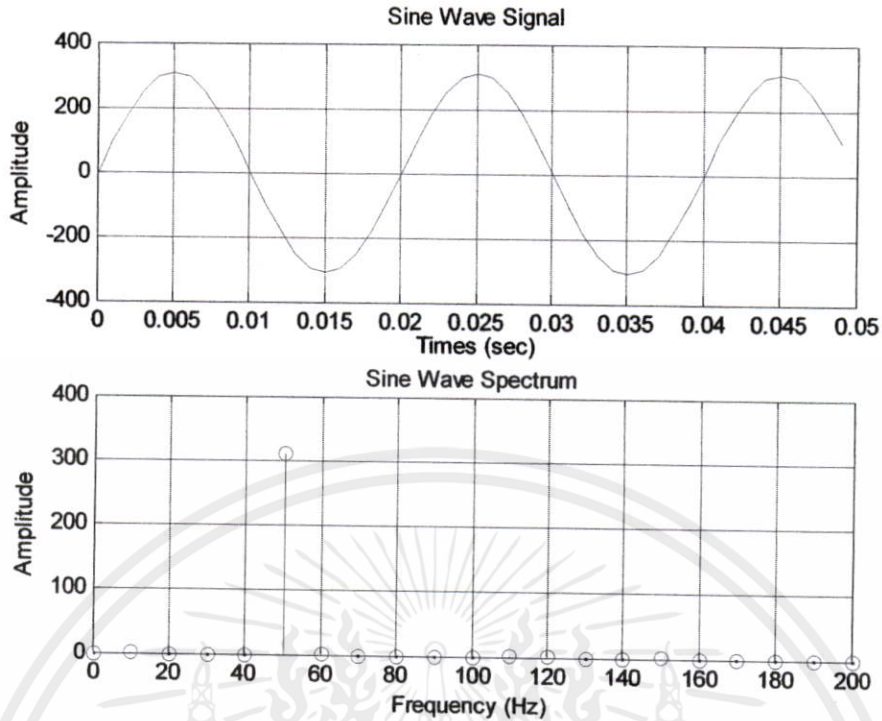
ถ้าค่า L มีค่าเป็นนคกำลัง 2 MATLAB ใช้ FFT Algorithm ในการคำนวณ

ถ้าค่า L มีค่าไม่เป็นนคกำลัง 2 MATLAB ใช้ DFT Algorithm ในการคำนวณ

2.5.11 การวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analysis)

สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกซึ่งเป็นไปตามลักษณะของแรงที่มากระตุ้นซึ่งเป็นแบบฮาร์โมนิกด้วย และเป็นสัญญาณที่ถูกแสดงอยู่บน โดเมนเวลา การวินิจฉัยสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักรจะ ได้จากการพิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียวถ้าหากแรงที่มากระตุ้น ไม่อยู่ในรูปของสัญญาณฮาร์โมนิกแต่เป็นสัญญาณลักษณะคาบแล้ว ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้วิธีการที่จะแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบออกมาเป็นสัญญาณเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ และเมื่อได้ข้อมูลหรือผลเฉลยซึ่งประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ก็จะสามารวินิจฉัยได้ละเอียดขึ้นถึงสาเหตุของการผิดปกติได้ การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ คือ การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม โดยจะใช้การวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบมาเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การแปลงสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่อง Signal Processing และการนำหลักการแปลงฟูเรียร์มาใช้แปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ การวิเคราะห์สเปกตรัม คือ การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะนี้หากนำมาใช้กับเครื่องจักรจะให้ข้อมูลของการสั่นสะเทือนได้มากกว่าข้อมูลจากการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา เพื่อเป็นการทำความเข้าใจให้ดีขึ้นสำหรับการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมนี้สัญญาณรูปคลื่นไซน์บนโดเมนเวลาจะถูกพิจารณาเป็นกรณีแรก สัญญาณนี้จะมีค่าความถี่ค่าเดียวซึ่งก็คือ 50 Hz ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้ไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ก็จะมีสัญญาณเพียงค่าเดียว (50 เฮิร์ต) บนแกนความถี่ แสดงดังรูปที่ 2.22

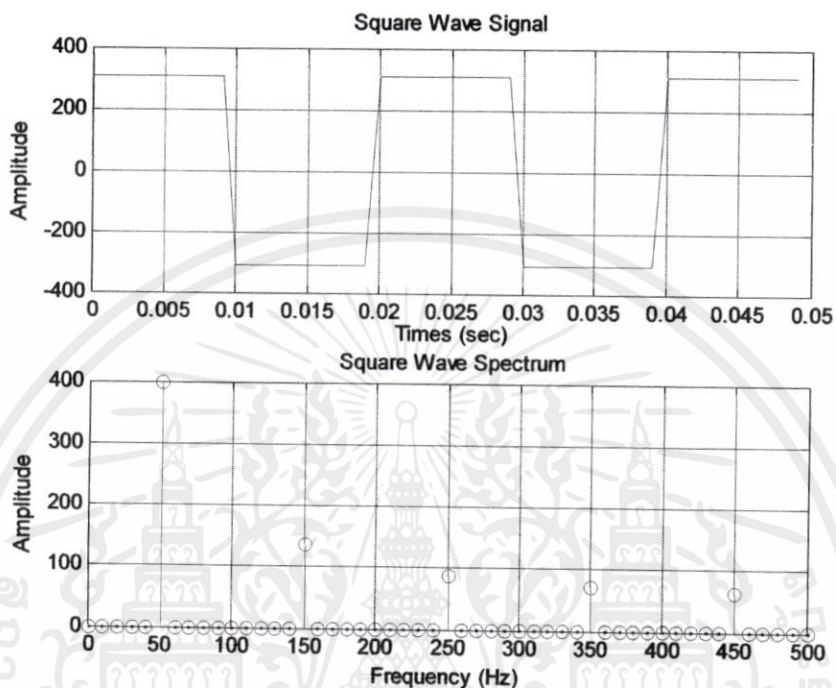
$$v(t) = v_m \sin(\omega t) \quad (2.45)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \frac{v_m}{\sqrt{2}} \quad (2.46)$$

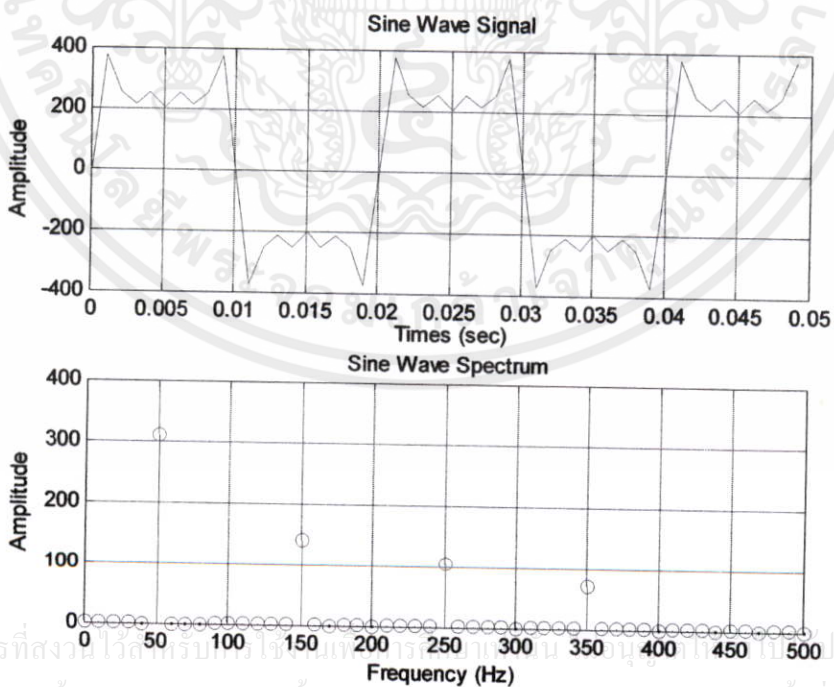
ในกรณีที่สองเมื่อสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 50Hz เขียนบนโดเมนเวลา เมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์โมนิกได้หลายความถี่ โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.23

$$v(t) = \frac{4v_{dc}}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad (2.47)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = v_{dc} \quad (2.48)$$



รูปที่ 2.23 การแปลงสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่



รูปที่ 2.24 การแปลงสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

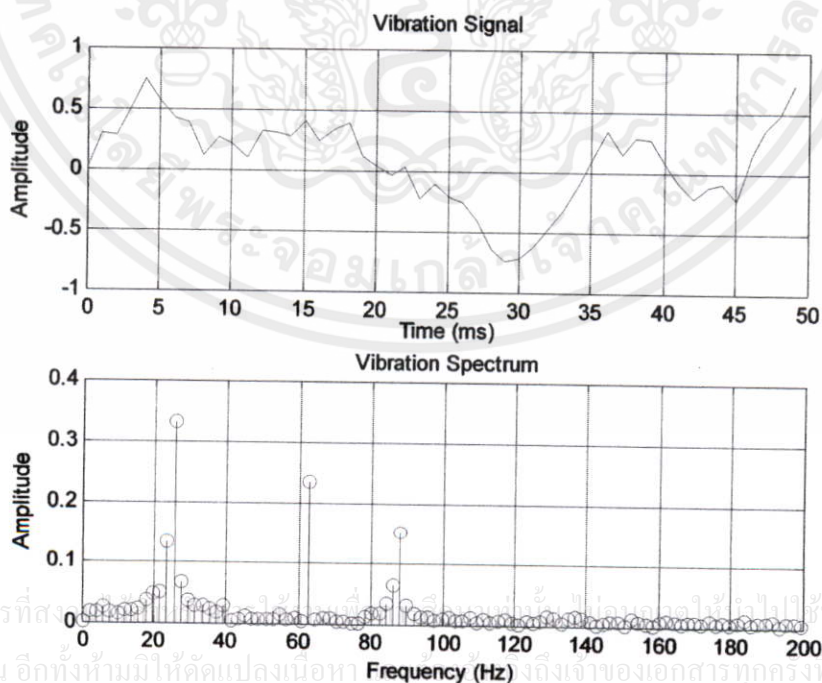
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบก่อนการนำออกนอกระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

$$v(t) = Vm \sin(\omega t) + \frac{Vm}{3} \sin(3\omega t) + \frac{Vm}{5} \sin(\omega t) + \frac{Vm}{7} \sin(\omega t) \quad (2.49)$$

ในกรณีที่สามเมื่อสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz เขียนบนโดเมนเวลาเมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์โมนิกได้ที่ความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 2.24

เมื่อนำการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมมาใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักรก็จะทำให้ได้ข้อมูลในการบอกขนาดการสั่นสะเทือนซึ่งถูกแสดงในรูปแบบของค่ารวม (Overall Values) โดยจะมีค่าเป็นตัวเลขค่าหนึ่งนั้น จริงแล้วจะประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่าง ๆ กันอยู่ที่แต่ละความถี่ ซึ่งที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่ามากที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่าน้อย จุดที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่ามากมักเป็นตัวบ่งบอกว่าถ้ามีปัญหาเกิดขึ้นก็จะเกิดจากชิ้นส่วนที่ทำงานเกี่ยวข้องกับค่าความถี่นั้น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบรวม (Overall Vibration) จะเป็นการบอกลักษณะทั่วไปถึงขนาดการสั่นสะเทือนว่ามีขนาดอยู่ในเกณฑ์ที่จะยอมรับได้หรือไม่เท่านั้น แต่การวิเคราะห์แบบสเปกตรัมจะบอกถึงค่าความถี่ใดมีขนาดการสั่นสะเทือนผิดปกติจากข้อมูลเหล่านี้มักจะสามารนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดการสั่นสะเทือนได้ ดังนั้นการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมจึงให้ข้อมูลที่ละเอียดกว่าและมีความสามารถในการบ่งบอกสาเหตุการเกิดการสั่นสะเทือนได้มากกว่า



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

บทที่ 3

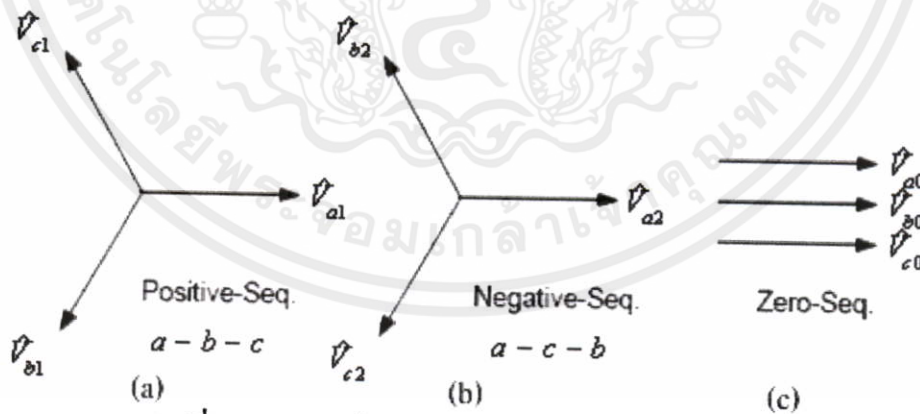
การวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

3.1 วิธีการคำนวณความไม่สมดุลของระบบ (Method of Symmetrical Component)

Symmetrical Component [10] ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาทางจรหลายเฟสในสภาวะไม่สมดุลโดย C.L.Fortescue เป็นผู้นำเสนอ Fortescue พิสูจน์ว่าในระบบ n เฟสที่ไม่สมดุลสามารถที่จะแก้ปัญหาด้วยระบบ n เฟส ที่สมดุลได้โดยเรียกว่า Symmetrical Component ในระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสการมีภาระ 1 เฟสต่ออยู่ในระบบทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ไม่เท่ากันทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลขึ้นในระบบ โดยสมมติให้ระบบเป็น Linear System การหากระแสไฟฟ้าในระบบไม่สมดุลสามารถใช้วิธีการ Superposition โดยการพิจารณาแยกแต่ละ Sequence ของกระแสไฟฟ้า

จาก Fortescue's Theorem ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ไม่สมดุลสามารถที่จะคำนวณในแบบสมดุลได้โดยใช้ระบบสมดุลดังต่อไปนี้

- Positive Sequence Components (1) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120 องศา โดยมี Phase Sequence เหมือนกับระบบเดิม
- Negative Sequence Components (2) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120 องศา โดยมี Phase Sequence ตรงกันข้ามกับระบบเดิม
- Zero Sequence Components (0) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 0 องศา แสดงดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.1 เฟสเซอร์ของระบบ Symmetrical Component

การแก้ปัญหาวิธีการคำนวณความไม่สมดุลของระบบโดยใช้ Symmetrical Component สมมติให้ระบบเป็นระบบ abc ของ Positive Sequence Component คือ abc ด้วย และ Negative Sequence Components คือ acb อักษรย่อของแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้เป็น V_a, V_b, V_c ตามลำดับ การกำหนด Sequence ใช้เลข 1 แทน Positive Sequence Component (V_{a1}), เลข 2 แทน Negative

Sequence Components (\hat{V}_{a2}) และเลข 0 แทน Zero Sequence Components (\hat{V}_{a0}) ตามลำดับ จาก รูปที่ 3.1 (a) แสดงเฟสเซอร์ของ Positive Sequence Component, 3.1 (b) แสดงเฟสเซอร์ของ Negative Sequence Component และ 3.1 (c) แสดงเฟสเซอร์ของ Zero Sequence Component สามารถจัดรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ให้อยู่ในรูปของ Sequence Component ได้ดังนี้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a0} + \hat{V}_{a1} + \hat{V}_{a2} \quad (3.1)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{b0} + \hat{V}_{b1} + \hat{V}_{b2} \quad (3.2)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{c0} + \hat{V}_{c1} + \hat{V}_{c2} \quad (3.3)$$

ทำการลดตัวแปร \hat{V}_b และ \hat{V}_c โดยทำการแปลงตัวแปรผ่าน \hat{a} Operator ($\hat{a} = 1 \angle 120^\circ$) ให้อยู่ในตัวแปร \hat{V}_a เพียงตัวเดียว ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned} \hat{V}_{b0} &= \hat{V}_{a0} & \hat{V}_{c0} &= \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{b1} &= \hat{a}^2 \hat{V}_{a1} & \hat{V}_{c1} &= \hat{a} \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{b2} &= \hat{a} \hat{V}_{a2} & \hat{V}_{c2} &= \hat{a}^2 \hat{V}_{a2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

นำสมการที่ (3.4) ไปแทนในสมการที่ (3.1), (3.2) และ (3.3) จะได้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a0} + \hat{V}_{a1} + \hat{V}_{a2} \quad (3.5)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{a0} + \hat{a}^2 \hat{V}_{a1} + \hat{a} \hat{V}_{a2} \quad (3.6)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{a0} + \hat{a} \hat{V}_{a1} + \hat{a}^2 \hat{V}_{a2} \quad (3.7)$$

หรืออยู่ในรูปเมตริก คือ

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ เมื่อ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ทำการ Invert A จะได้

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

แล้วนำมาหา \hat{V}_{a0} , \hat{V}_{a1} และ \hat{V}_{a2} โดยนำ \mathbf{A}^{-1} คูณตลอด จะได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3.12) และ (3.14) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{S}_{3\phi} = 3 \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} & \hat{V}_{a1} & \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\hat{S}_{3\phi} = 3\hat{V}_{a0}\hat{I}_{a0} + 3\hat{V}_{a1}\hat{I}_{a1} + 3\hat{V}_{a2}\hat{I}_{a2}$ ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.15) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้โดยกำหนดให้ \hat{V}_1 คือ Positive Sequence และ \hat{V}_2 คือ Negative Sequence ดังสมการข้างล่าง

$$\hat{V}_1 = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + \hat{a}\hat{V}_b + \hat{a}^2\hat{V}_c) \quad (3.16)$$

$$\hat{V}_2 = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + \hat{a}^2\hat{V}_b + \hat{a}\hat{V}_c) \quad (3.17)$$

เมื่อ $\hat{a} = 1\angle 120^\circ$ และ $\hat{a}^2 = 1\angle 240^\circ$

ตัวอย่างที่ 3.1 การคำนวณระบบไฟฟ้าที่สมดุลแบบ Positive Sequence

โดยกำหนดให้ $\hat{V}_a = 220\angle 0^\circ$, $\hat{V}_b = 220\angle -120^\circ$, $\hat{V}_c = 220\angle 120^\circ$

จะได้

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + (1\angle 120^\circ \times 220\angle -120^\circ) + (1\angle 240^\circ \times 220\angle 120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ) = 220\angle 0^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_2 &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + (1\angle 240^\circ \times 220\angle -120^\circ) + (1\angle 120^\circ \times 220\angle 120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + 220\angle 120^\circ + 220\angle 240^\circ) = 0 \end{aligned}$$

สรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าสมดุลมีค่าแรงดัน Positive Sequence มีค่าเท่ากับ $220\angle 0^\circ$, และค่าแรงดัน Negative Sequence มีค่าเท่ากับศูนย์

ตัวอย่างที่ 3.2 การคำนวณระบบไฟฟ้าที่สมดุลแบบ Negative Sequence (เฟสหมุนกลับ)

โดยกำหนดให้ $\hat{V}_a = 220\angle 0^\circ$, $\hat{V}_b = 220\angle 120^\circ$, $\hat{V}_c = 220\angle -120^\circ$

จะได้

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + (1\angle 120^\circ \times 220\angle 120^\circ) + (1\angle 240^\circ \times 220\angle -120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + 220\angle 240^\circ + 220\angle 120^\circ) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_2 &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + (1\angle 240^\circ \times 220\angle 120^\circ) + (1\angle 120^\circ \times 220\angle -120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (220\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ) = 220\angle 0^\circ \end{aligned}$$

สรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าสมดุลมีค่าแรงดัน Negative Sequence มีค่าเท่ากับ $220\angle 0^\circ$, และค่าแรงดัน Positive Sequence มีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตัวอย่างที่ 3.3 การคำนวณระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลแบบผิดปกติลงกราวด์ 1 เฟส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเนื้อหาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ $\hat{V}_a = 110\angle 0^\circ$, $\hat{V}_b = 220\angle -120^\circ$, $\hat{V}_c = 220\angle 120^\circ$

จะได้

$$\begin{aligned}\hat{V}_1 &= (1/3) \times (110\angle 0^\circ + (1\angle 120^\circ \times 220\angle -120^\circ) + (1\angle 240^\circ \times 220\angle 120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (110\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ + 220\angle 0^\circ) = 183.33\angle 0^\circ\end{aligned}$$

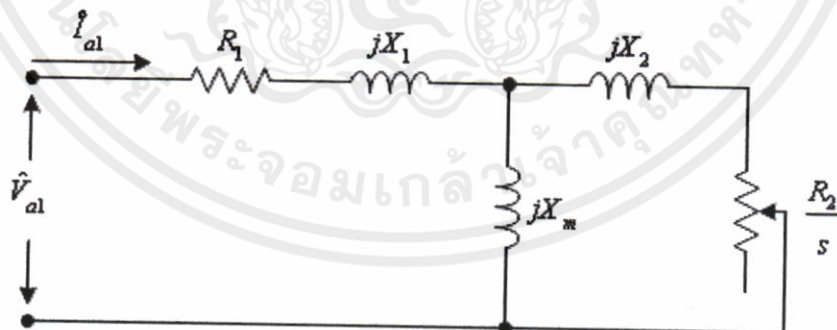
$$\begin{aligned}\hat{V}_2 &= (1/3) \times (110\angle 0^\circ + (1\angle 240^\circ \times 220\angle -120^\circ) + (1\angle 120^\circ \times 220\angle 120^\circ)) \\ &= (1/3) \times (110\angle 0^\circ + 220\angle 120^\circ + 220\angle 240^\circ) = 36.67\angle 180^\circ\end{aligned}$$

สรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าไม่สมดุลแบบผิดปกติลงกราวด์ 1 เฟส มีค่าแรงดัน Positive Sequence ลดลงจากค่าแรงดันพิกัด, และค่าแรงดัน Negative Sequence มีค่ามุมเฟสเลื่อนออกมาจาก (out of phase) มุมเฟสของระบบ คือ 180 องศา เมื่อเทียบกับแรงดัน Positive Sequence

3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

วิธีการ Symmetrical Component มักถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาทางด้าน Power System เพราะในระบบเกิดสถานะไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา เพื่อหาค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าในสถานะแรงดันไม่สมดุลหรือเกิดการลัดวงจรในแบบต่าง ๆ การนำ Symmetrical Component มาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงบิดและกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล จาก Symmetrical Component สามารถแยกแรงดันไฟฟ้าได้ 3 Sequence เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ จะทำให้เกิดวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 วงจร แตกต่างกันตามแรงดันป้อนเข้าดังนี้

เมื่อ Positive Sequence Voltage ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำวงจรสมมูลยังคงเหมือนเดิม เพราะ Positive Sequence Voltage มี Sequence เดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสามารถเขียนวงจรสมมูลได้



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของแรงดัน Positive Sequence

นอกจากนี้ Negative Sequence มีลำดับตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ทำให้สร้างสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ สามารถหาค่าสลิป (s) ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ได้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3.18)$$

$$N_r = N_s(1 - s) \quad (3.19)$$

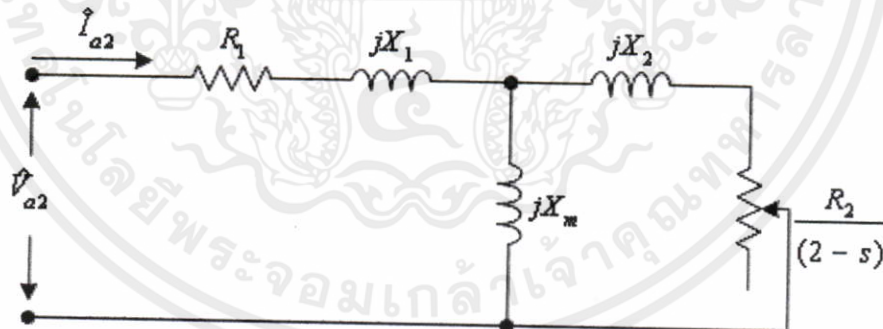
จากสมการที่ 3.19 ทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ไปทางเดียวกัน เมื่อมี Negative Sequence Voltage ป้อนเข้ามอเตอร์ โดยยัดทิศทางสนามแม่เหล็กเป็นหลัก ทิศทางการหมุนของโรเตอร์จึงเป็นลบ ค่าสลิปลบ (Slip Negative : s_2) หาค่าได้จากสมการที่ (3.20)

$$s_2 = \frac{N_s + N_r}{N_s} \quad (3.20)$$

จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสลิปลบ (s_2) กับสลิป (s) ดังสมการที่ (3.21)

$$s_2 = (2 - s) \quad (3.21)$$

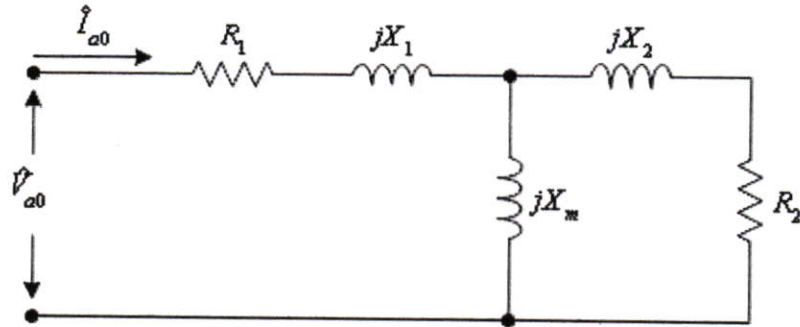
วงจรสมมูลของแรงดัน Negative Sequence สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของแรงดัน Negative Sequence

จากนิยามของ Zero Sequence Components เปรียบเทียบกับแรงดัน ไฟฟ้า 1 เฟส ที่มี Line 3 เส้น ดังนั้นเมื่อ Zero Sequence Voltage ป้อนเข้ามอเตอร์ Stator จะไม่สร้างสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้อัตราการหมุนของโรเตอร์เป็นลบ Slip มีค่าเท่ากับ 1 สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.4

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของแรงดัน Zero Sequence

จากรูปวงจรสมมูลทั้ง 3 สามารถหาสมการของกระแส, แรงบิด, และกำลังสูญเสียได้ โดยกำหนดให้

$$\hat{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.22)$$

$$\hat{Z}_m = jX_m \quad (3.23)$$

$$\hat{Z}_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (3.24)$$

ค่า \hat{Z}_1 และ \hat{Z}_m มีค่าเท่าเดิมใน Positive, Negative และ Zero Sequence ส่วนค่า \hat{Z}_2 ใน Positive, Negative และ Zero Sequence มีค่าดังสมการด้านล่าง ตามลำดับ

$$\hat{Z}_{2(1)} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (3.25)$$

$$\hat{Z}_{2(2)} = \frac{R_2}{(2-s)} + jX_2 \quad (3.26)$$

$$\hat{Z}_{2(0)} = R_2 + jX_2 \quad (3.27)$$

ค่าอิมพีแดนซ์รวมของ Positive, Negative และ Zero Sequence มีค่าดังสมการด้านล่าง ตามลำดับ

$$\hat{Z}_{1(1)} = \hat{Z}_{1(1)} + \left(\frac{\hat{Z}_{m(1)} \hat{Z}_{2(1)}}{\hat{Z}_{m(1)} + \hat{Z}_{2(1)}} \right) \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออื่นที่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{Z}_{1(2)} = \hat{Z}_{1(2)} + \left(\frac{\hat{Z}_{m(2)} \hat{Z}_{2(2)}}{\hat{Z}_{m(2)} + \hat{Z}_{2(2)}} \right) \quad (3.29)$$

$$\hat{Z}_{I(0)} = \hat{Z}_{1(0)} + \left(\frac{\hat{Z}_{m(0)}\hat{Z}_{2(0)}}{\hat{Z}_{m(0)} + \hat{Z}_{2(0)}} \right) \quad (3.30)$$

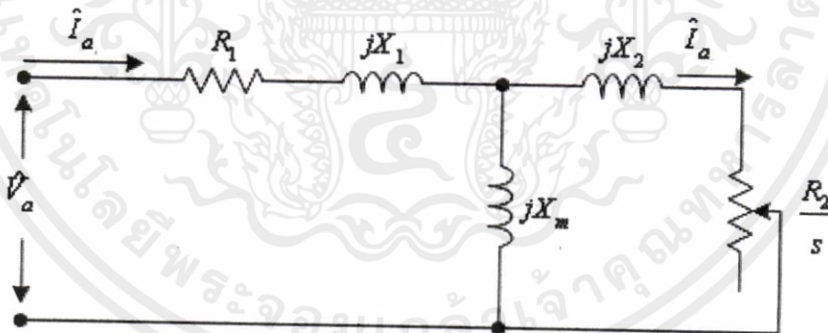
ค่ากระแสไฟฟ้าของ Positive, Negative และ Zero Sequence มีค่าดังสมการด้านล่าง ตามลำดับ

$$\hat{I}_{a(1)} = \frac{\hat{V}_{a(1)}}{\hat{Z}_{I(1)}} \quad (3.31)$$

$$\hat{I}_{a(2)} = \frac{\hat{V}_{a(2)}}{\hat{Z}_{I(2)}} \quad (3.32)$$

$$\hat{I}_{a(0)} = \frac{\hat{V}_{a(0)}}{\hat{Z}_{I(0)}} \quad (3.33)$$

เมื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบ Symmetrical Component ได้แล้ว จะทำการเปลี่ยนค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ากลับไปสู่ระบบจริง และใช้สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้ สามารถหาค่า \hat{I}_a , \hat{I}_b และ \hat{I}_c ได้จากสมการที่ (3.12) และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้ารวมได้จากสมการที่ (3.15)



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนจากระบบ Symmetrical เป็นระบบจริง

กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส จะได้จากส่วนจำนวนจริงของสมการที่ (3.15) เท่านั้น จากรูปที่ 3.5 กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส หาได้จากสมการที่ (3.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$P_{SCL} = I_a^2 R_1 + I_b^2 R_1 + I_c^2 R_1 \quad (3.34)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบแปลนหรือทำซ้ำและดัดแปลงเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

ค่ากำลังไฟฟ้าส่งผ่านช่องอากาศ หาได้จากสมการที่ (3.35)

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} \quad (3.35)$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าผ่านช่องอากาศมาถึง โรเตอร์ จะเกิดกำลังสูญเสียของขดลวด โรเตอร์

$$P_{RCL} = I_{a_r}^2 R_2 + I_{b_r}^2 R_2 + I_{c_r}^2 R_2 \quad (3.36)$$

สามารถหาค่ากำลังกลที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ (3.37)

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (3.37)$$

สามารถหาค่ากำลังกลด้านออกได้จากสมการที่ (3.38)

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot} \quad (3.38)$$

สามารถหาค่าแรงบิดที่เพลาได้จากสมการที่ (3.39)

$$T_{sh} = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (3.39)$$

การวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวงจรสมมูลในสถานะปกติ เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล สมการในการวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะปกติไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากขอบเขตของสมการกำหนดให้ใช้ได้เฉพาะในสถานะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสมดุลเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์มอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ จึงใช้วิธี Symmetrical Component มาประยุกต์ใช้กับสมการมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยแยกวงจรสมมูลออกเป็น 3 วงจรและใช้วิธี Superposition แยกคำนวณและนำกลับมารวมกันอีกครั้ง เพื่อหาค่าจริง ขอบเขตของวิธี Symmetrical Component คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องใช้งานในช่วง Linear เท่านั้น บทต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล, แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล, เงื่อนไขของการทดสอบ, ผลการทดสอบ, และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.3 การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้มอเตอร์มีพิทักด์กำลังลดลง และมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลง คือ เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะทำให้มอเตอร์เกิดการสันสะเทือนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแกว่งของแรงบิดที่เกิดขึ้นภายใน 1 รอบ โดยสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีหลักการสนามแม่เหล็กหมุน ช่วยอธิบายพฤติกรรมของการแกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ จากนั้นไปจะอธิบายถึงค่าความถี่ที่เป็นผลมาจากพฤติกรรมการสันสะเทือนของมอเตอร์ ซึ่งค่าสเปกตรัมความถี่ของการสันสะเทือนมีความสัมพันธ์กับสเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นมาพร้อมกับสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก โดยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างชัดเจนระหว่างสถานะสภาวะสมดุลกับสภาวะไม่สมดุล

3.3.1 ค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ เป็นผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ได้จากกระแสแต่ละเฟสแต่ละเฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล จะทำให้กระแสแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน จึงทำให้ผลของสนามแม่เหล็กหมุนที่ได้จากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์มีความสม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน จึงไม่เกิดการแกว่งของแรงบิด ทำให้มอเตอร์ไม่เกิดการสันหรือมีการสันสะเทือนน้อย แต่เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะทำให้กระแสแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน และมีค่ามุมเฟสเลื่อน (phase shift) ซึ่งเป็นผลมาจากลำดับลบของระบบ (negative sequence) จึงทำให้ผลของสนามแม่เหล็กหมุนที่ได้จากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์มีความไม่สม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด จึงทำให้มอเตอร์เกิดการสันสะเทือนเพิ่มมากขึ้น จากสมการที่ (2.20) สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กของเฟส A ประกอบด้วย $\cos(\theta - \omega t)$ คือ เทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตาม และ $\cos(\theta + \omega t)$ คือ เทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนกลับ เป็นค่าตัวประกอบเพิ่มจากความถี่หลัก ซึ่งทั้งหมดจะเป็นฮาร์โมนิกส์ลำดับคี่ (3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} , ...) สามารถหาค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf frequency : f_{mmf}) [7] ได้ดังสมการ

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s \quad (3.40)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่แหล่งจ่าย (supply frequency : 50 Hz)
 k_{odd} คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับคี่ (odd harmonics : 1^{st} , 3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} , 9^{th} , ...)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆโดยไม่ได้รับอนุญาตการนำไปใช้

3.3.2 ค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุน

แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กหมุนได้มาจากการเหนี่ยวนำของกระแสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ และวงแหวนส่วนปลายของโรเตอร์ ในขณะที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะขยายผลไปยังพฤติกรรมของมอเตอร์ และความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่สเตเตอร์เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของขนาดกระแสเตเตอร์เป็นอย่างมาก ซึ่งกระแสเตเตอร์ที่ไม่สมดุลนี้จะถูกถ่ายโอนไปเป็นฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด ทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด และส่งผลต่อทำให้เกิดเสียงฮัมดิ่งและการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น จากสมการที่ (2.23) ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ที่ได้จากกระแสเตเตอร์ขณะมอเตอร์ทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ของสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field frequency : f_{rev}) [7] ซึ่งเป็นผลมาจากลำดับคของระบบด้วย สามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$f_{rev} = k_{even} f_s \quad (3.41)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่แหล่งจ่าย (supply frequency : 50 Hz)
 k_{even} คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ (even harmonics : 2nd, 4th, 6th, 8th, 10th, ...)

3.3.3 ค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน

ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นผลมาจากเมื่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนมีความไม่สม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด ทำให้มอเตอร์หมุนแบบไม่ราบรื่น และด้วยพฤติกรรมของการหน่วงและกระชากของความเร็วรอบนี้ จึงทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น สามารถหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน (vibration frequency : f_v) [7] หรือเรียกว่า ความถี่โรเตอร์หมุน (rotor frequency : f_r) ได้ดังสมการ

$$f_v = f_{rm} (1 - s) \quad (3.42)$$

เมื่อ f_{rm} คือ ความถี่หมุนทางกล (mechanical frequency : 25 Hz),

$$\text{โดยที่ } f_{rm} = \frac{2}{P} f_s$$

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ค่าความถี่ของการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ

ขณะที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น และเป็นผลต่อเนื่องทำให้เกิดพลวัตรของการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (dynamic eccentricity frequency : f_{de}) [7] ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าความถี่นี้จะเกิดขึ้นแฝงรวมมา กับค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] ; k = 1,3,5,\dots \quad (3.43)$$

จากค่าความถี่ทั้ง 4 ค่าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ฉะนั้นการตรวจจับความผิดปกติจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์จากค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับการสั่นสะเทือนได้ ทดแทนการตรวจจับด้วยหัววัดการสั่นสะเทือนแบบเดิม สามารถทำได้สะดวก ไม่เป็นการรบกวนเครื่องจักร และประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

4.1.1 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่สถานะต่าง ๆ

ระบบไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นระบบ 3 เฟส มีระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส สูงกว่าหรือต่ำกว่าปกติอยู่ตลอดเวลา แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์พิจารณาจากแรงดันไม่สมดุล 3 ระดับ มีความรุนแรงจากน้อยจนถึงมาก แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ 1%, 3% และ 5% โดยค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std 141-1993 [4] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1)

$$\%PVU = \frac{(V_{avg} - V_{min})}{V_{avg}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (4.2)$$

เมื่อ $\%PVU$ คือ เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Percentage Phase Voltage Unbalanced)

V_{avg} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟสเฉลี่ย

V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟสต่ำสุด

จากตารางที่ 4.1 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ป้อนจ่ายมอเตอร์ในสถานะต่าง ๆ ได้แก่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ และทำการศึกษาผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองของมอเตอร์ในกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลค่าเดียวกันแต่มีสถานะไม่สมดุลที่ไม่เหมือนกัน เช่น มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าหรือต่ำกว่า 220 โวลต์ จำนวน 1 เฟส, 2 เฟส และ 3 เฟส ตามลำดับ

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมี 3 พิกัดกำลัง ได้แก่

1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 220/380 โวลต์, ขนาด 1 แรงม้า, 4 ขั้วแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที, ความถี่ 50 เฮิรตซ์, กระแสไฟฟ้า 3.3/1.9 แอมแปร์, โรเตอร์กรงกระรอก
2. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 220/380 โวลต์, ขนาด 3 แรงม้า, 4 ขั้วแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที, ความถี่ 50 เฮิรตซ์, กระแสไฟฟ้า 8.7/5.0 แอมแปร์, โรเตอร์กรงกระรอก

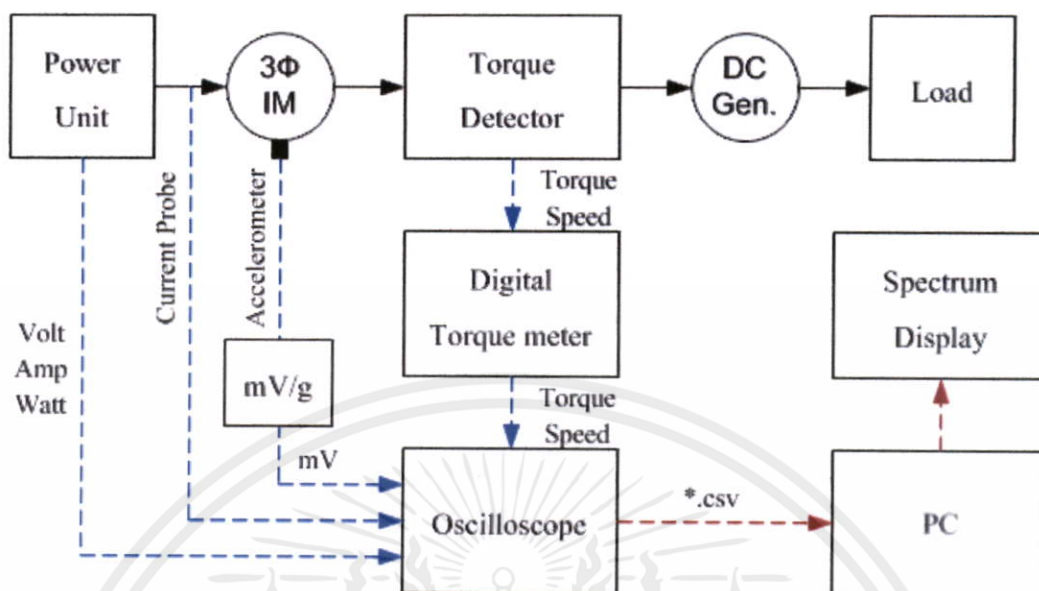
3. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 220/380 โวลต์, ขนาด 5 แรงม้า, 4 ขั้วแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที, ความถี่ 50 เฮิรตซ์, กระแสไฟฟ้า 13.7/7.9 แอมแปร์, โรเตอร์กรงกระรอก

ในการทดสอบต่อมอเตอร์แบบสตาร์ไม่ต่อนิวทรอล (Star Isolated Neutral) ห้องที่ใช้ทดสอบไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิห้องเท่ากันและในขณะที่ทำการทดสอบมีอุณหภูมิประมาณ 25-30 °C

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ทำการทดสอบ

%PVU	V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์	ความหมาย
0	220	220	220	B	แรงดันไฟฟ้าสมดุล
1	216	220	220	1U1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1%
1	215	217	220	2U1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 1%
1	213	215	218	3U1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 1%
1	224	220	220	1O1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1%
1	225	223	220	2O1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 1%
1	227	225	222	3O1%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3 เฟส 1%
3	210	220	220	1U3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 3%
3	208	215	220	2U3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3%
3	206	213	218	3U3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 3%
3	230	220	220	1O3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 3%
3	232	225	220	2O3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3%
3	234	227	222	3O3%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3 เฟส 3%
5	204	220	220	1U5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5%
5	200	213	220	2U5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5%
5	298	211	218	3U5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5%
5	236	220	220	1O5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5%
5	240	227	220	2O5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5%
5	242	229	222	3O5%	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ไคอะแกรมชุดทดสอบ

จากรูปที่ 4.1 แสดงไคอะแกรมของชุดทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย

1. Power Unit ประกอบด้วย 1 Phase Variable Transformer ขนาด 5 kVA จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 15 แอมป์ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ 0-260 V จำนวน 3 ชุด ทำหน้าที่ป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ให้กับมอเตอร์

2. Torque Detector เป็นเครื่องมือวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่เพลของมอเตอร์ สามารถวัดแรงบิดสูงสุดได้ (490 N-m) และมีความเร็วรอบสูงสุด 6000 rpm โดยทำการวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ แล้วส่งสัญญาณไปที่ Digital Torque meter เพื่อแสดงผล

3. Digital Torque meter ทำหน้าที่แสดงผลค่าแรงบิด, ความเร็วรอบ และกำลังค่านอกของมอเตอร์ พร้อมทั้งส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นอนาลอก ให้กับ Oscilloscope เพื่อบันทึกข้อมูล

4. Accelerometer type 8710M8, 104.9 mV/g ชนิดติดตั้งที่ผิว วัดค่าการสั่นสะเทือนที่ตัวโครงมอเตอร์ และผ่านการแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าส่งสัญญาณให้กับ Oscilloscope เพื่อบันทึกข้อมูล

5. Current Probe ยี่ห้อ Fluke ทำหน้าที่วัดค่ากระแสด้านเข้ามอเตอร์ โดยการคล้องที่เฟสแต่ละเฟส จำนวน 3 ชุด และแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าส่งสัญญาณให้กับ Oscilloscope เพื่อบันทึกข้อมูล

6. Generator ทำหน้าที่จำลองภาระทางกลให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 10kW

7. Oscilloscope ทำหน้าที่บันทึกข้อมูล แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส, กระแสไฟฟ้า 3 เฟส, แรงบิด, ความเร็วรอบ และการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

8. PC คือ คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ โดยนำค่ากระแส 3 เฟส และค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ที่ได้รับจาก Oscilloscope ในรูปแบบไฟล์ *.csv มาคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กหมุนเพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่ที่ผิดปกติเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เปรียบเทียบกับความถี่ของการสั่นสะเทือน และแสดงผลของสเปกตรัมความถี่ของทั้งสอง เพื่อยืนยันว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือน และเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ตรวจจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้

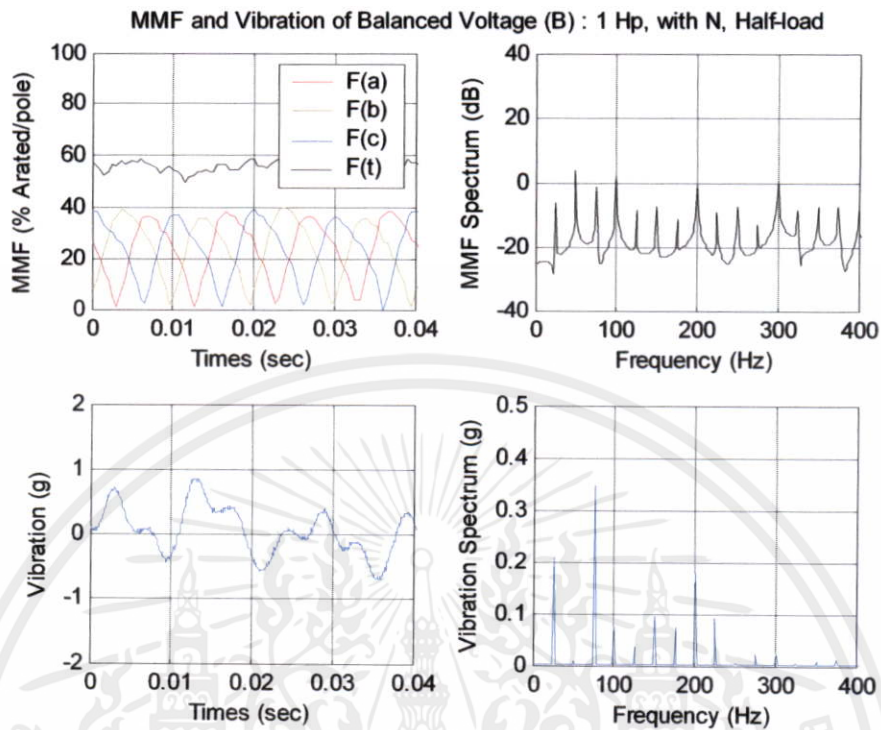
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทำการทดสอบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

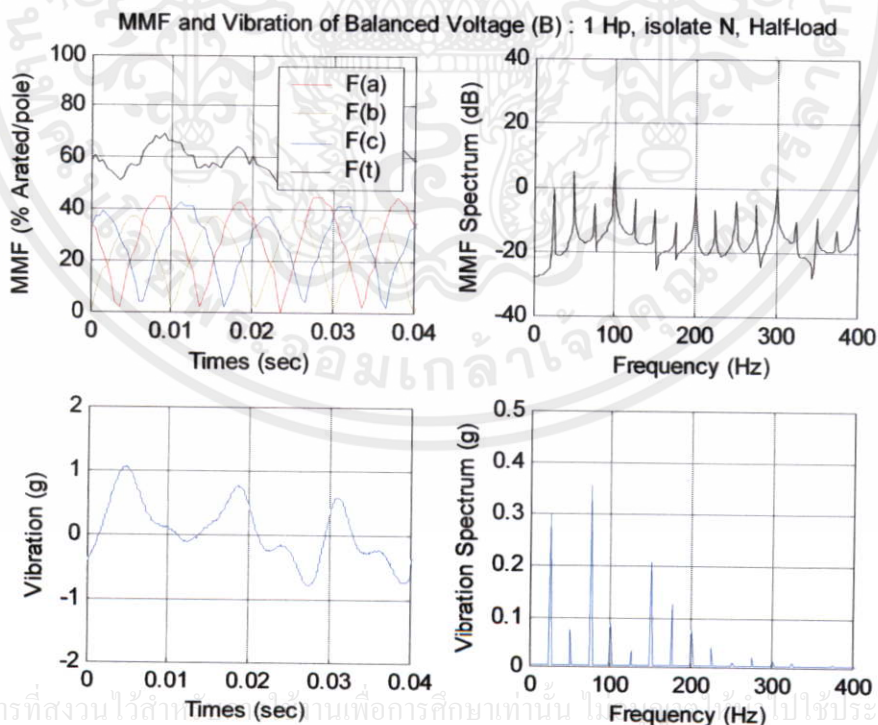
1. ติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดตามไดอะแกรมชุดทดสอบ รูปที่ 4.1
2. ทำการป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.1 ให้กับมอเตอร์ขณะไม่ขับโหลด (No-Load)
3. ทำการเก็บบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส, กระแสไฟฟ้า 3 เฟส, แรงบิด, ความเร็วรอบ และการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ที่สภาวะต่าง ๆ ตามข้อ 2. ในรูปแบบไฟล์ *.csv
4. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 2. และ 3. โดยเปลี่ยนให้มอเตอร์ขับโหลดที่ 50% (Haft-Load) และ 100% (Full-Load) ตามลำดับ
5. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 2. ถึง 4. อีกครั้ง โดยเปลี่ยนขนาดของมอเตอร์ให้เป็น 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ตามลำดับ
6. นำค่ากระแสไฟฟ้า 3 เฟส และค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ที่บันทึกได้ในรูปแบบไฟล์ *.csv มาทำการประมวลผลสัญญาณบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมเม็ทแล็บ (MATLAB) และแสดงผลสเปกตรัมความถี่ที่สภาวะต่าง ๆ
7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
8. สรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 1 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ



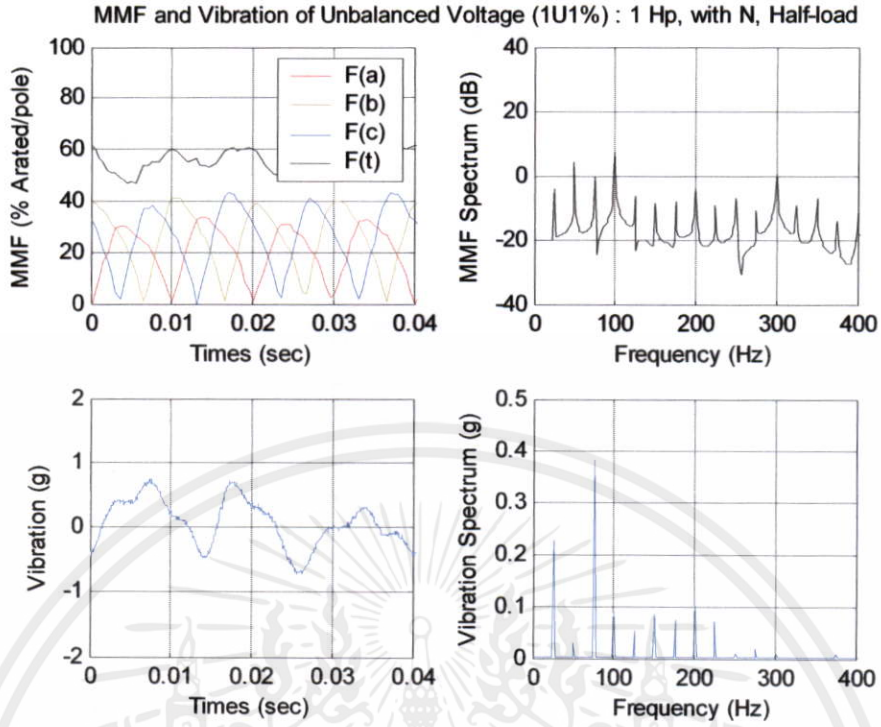
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้า สมดุล (B) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



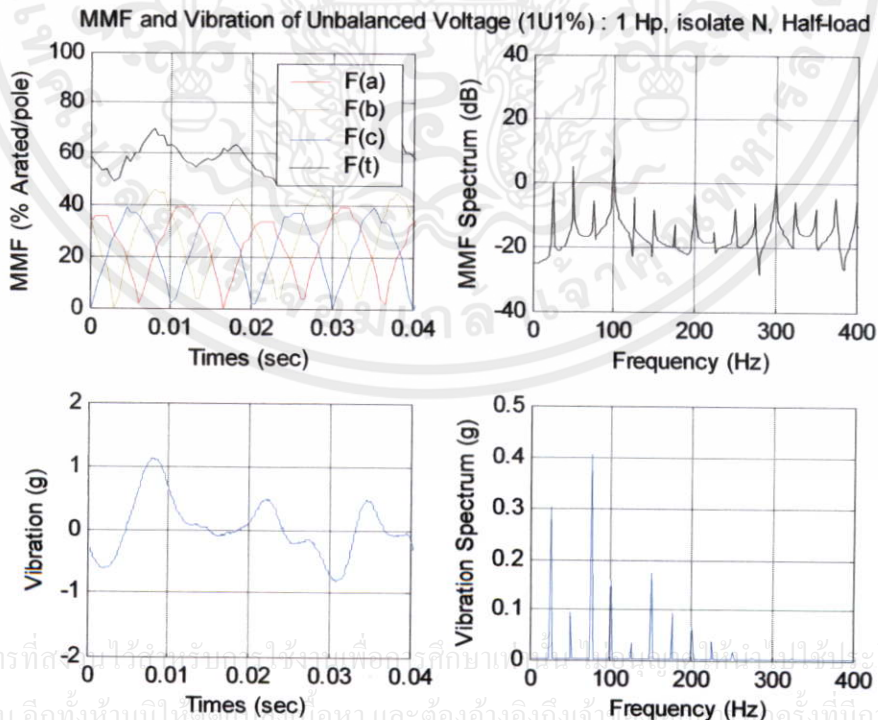
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้า

สมดุล (B) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

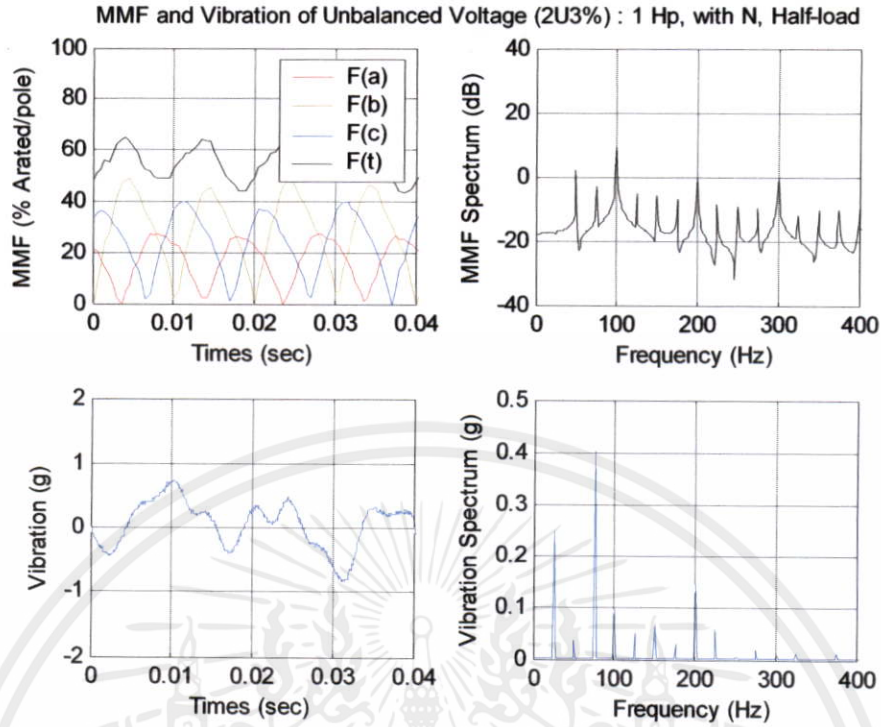


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

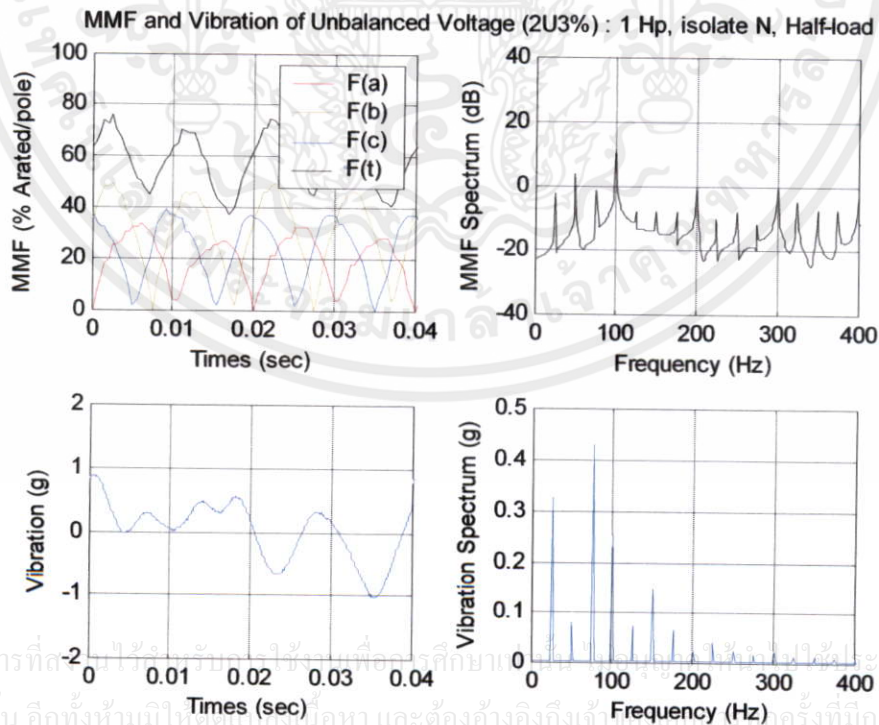


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้ออกไปโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
หากมีการนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ จะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

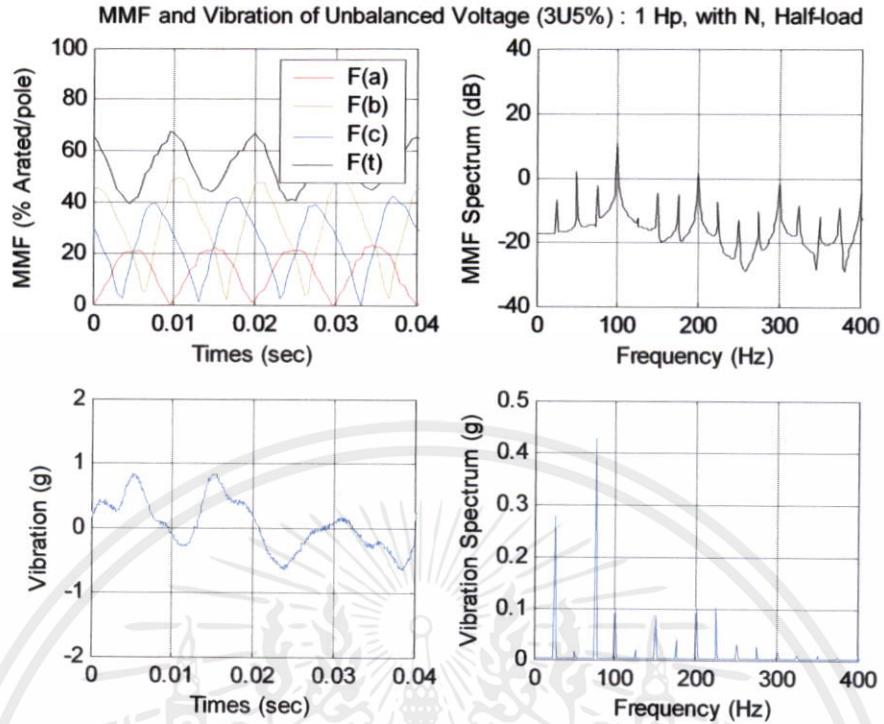


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

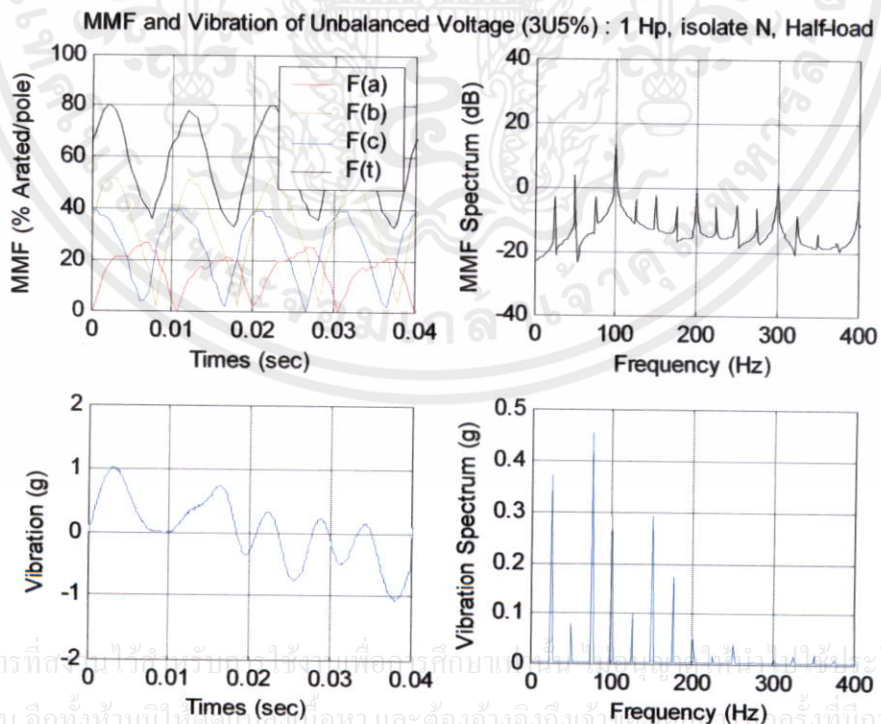


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำ

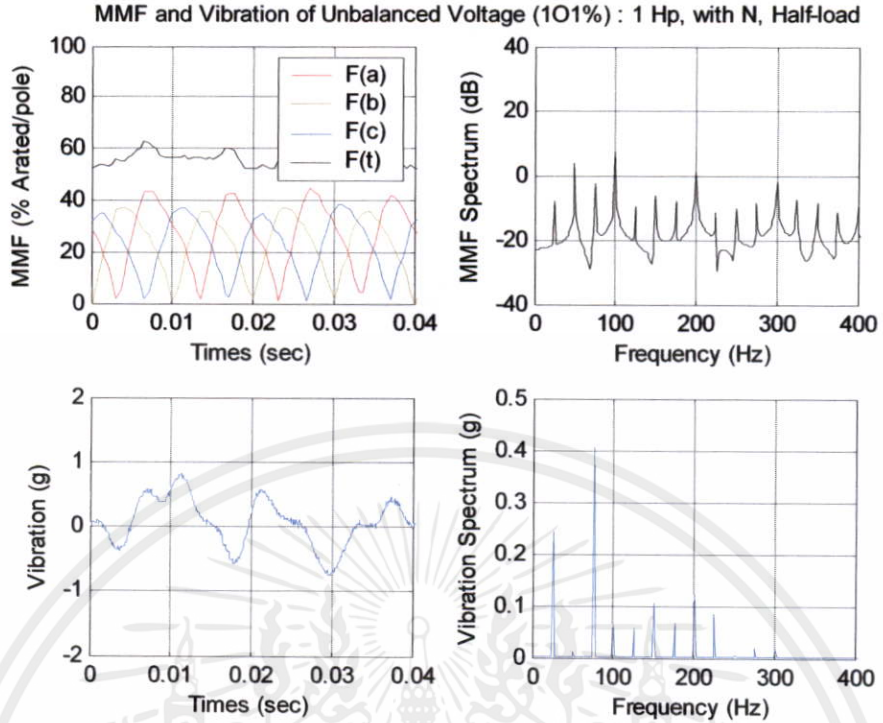
กว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



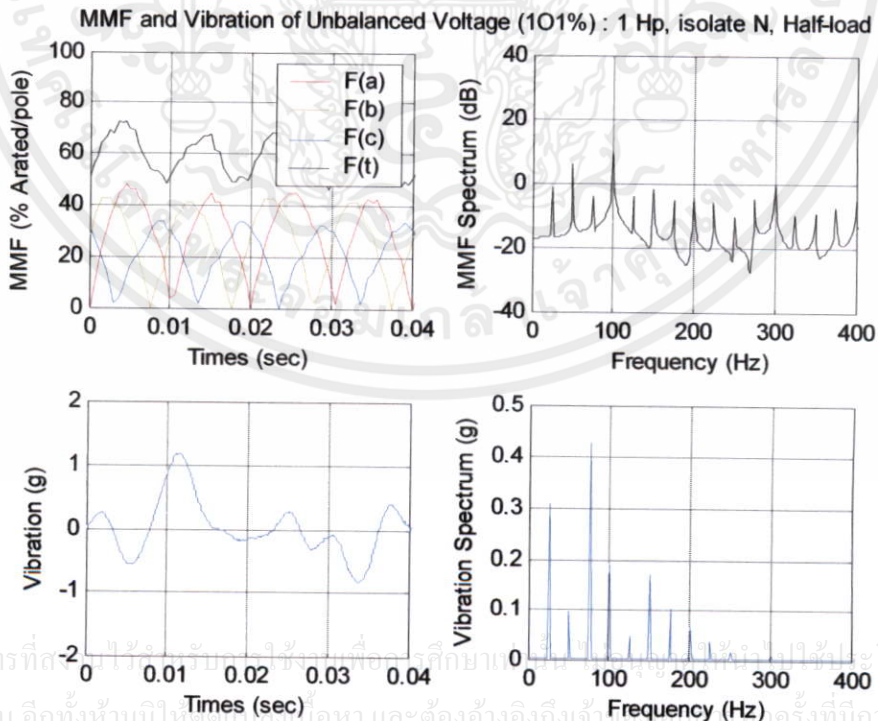
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

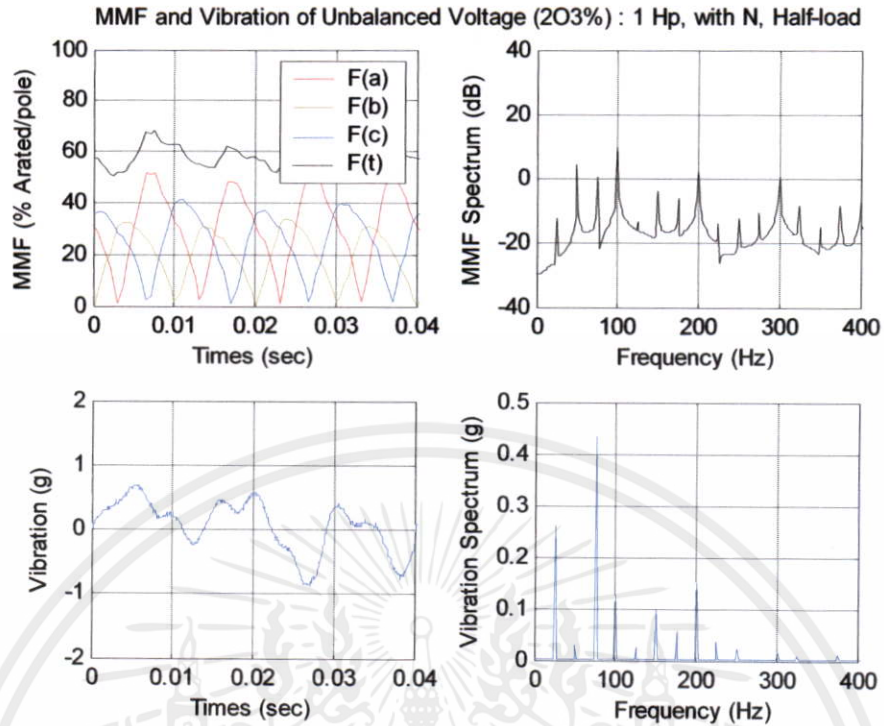


รูปที่ 4.10 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

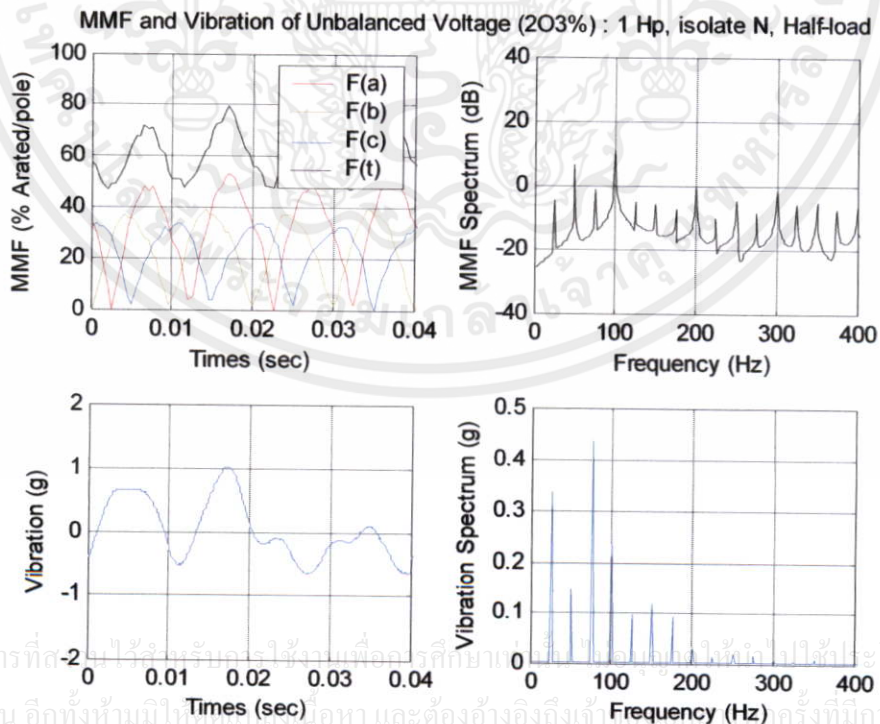


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

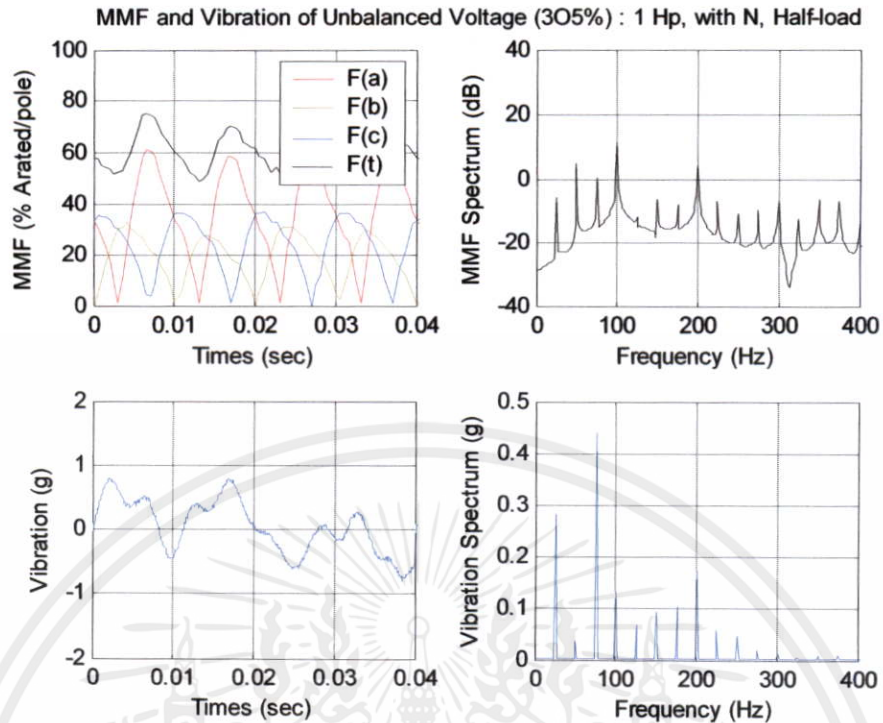
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ซ้ำหรือหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้



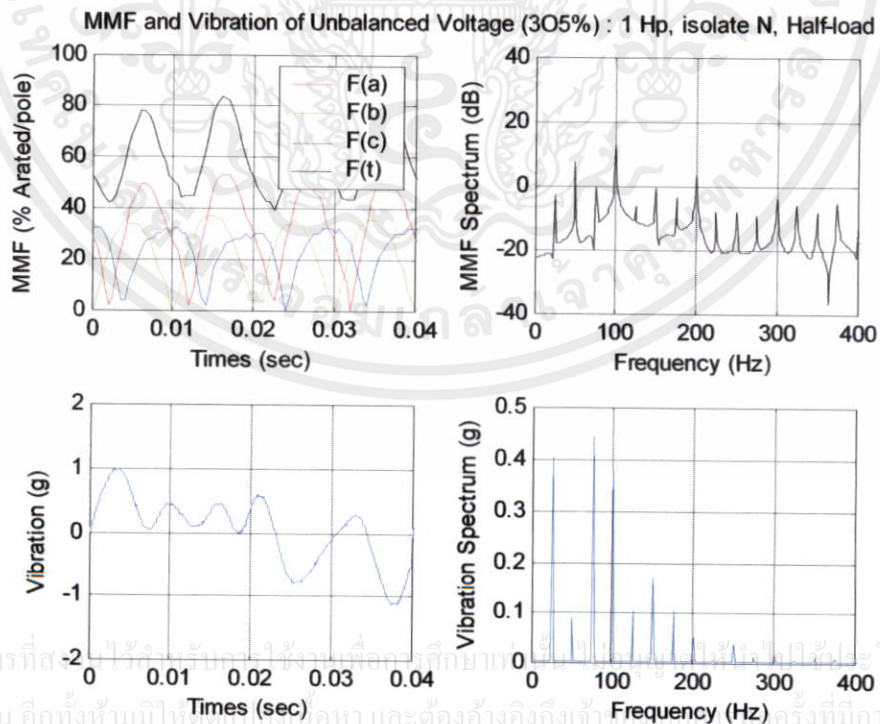
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

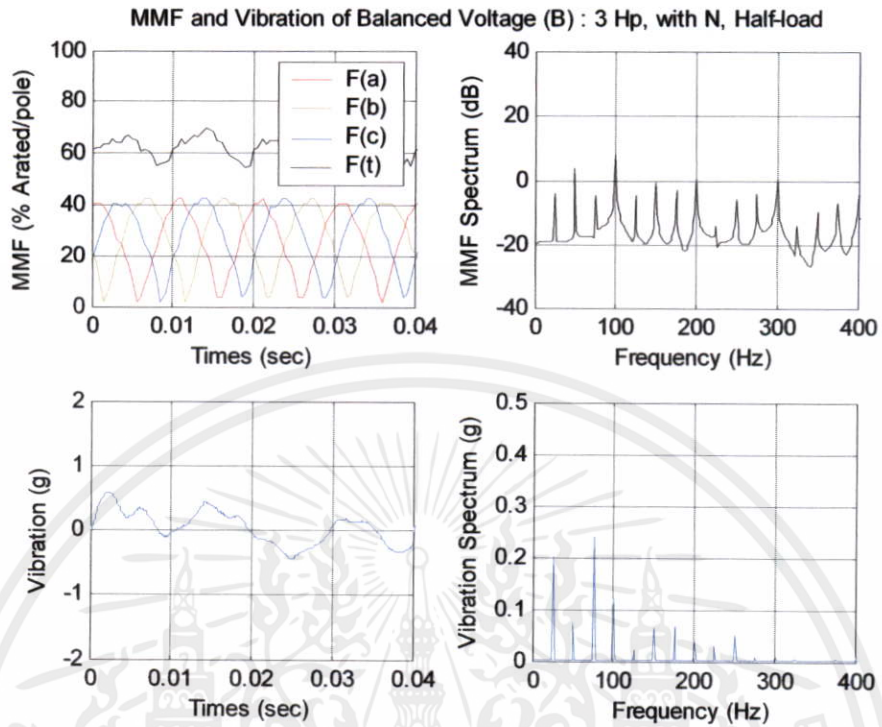


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

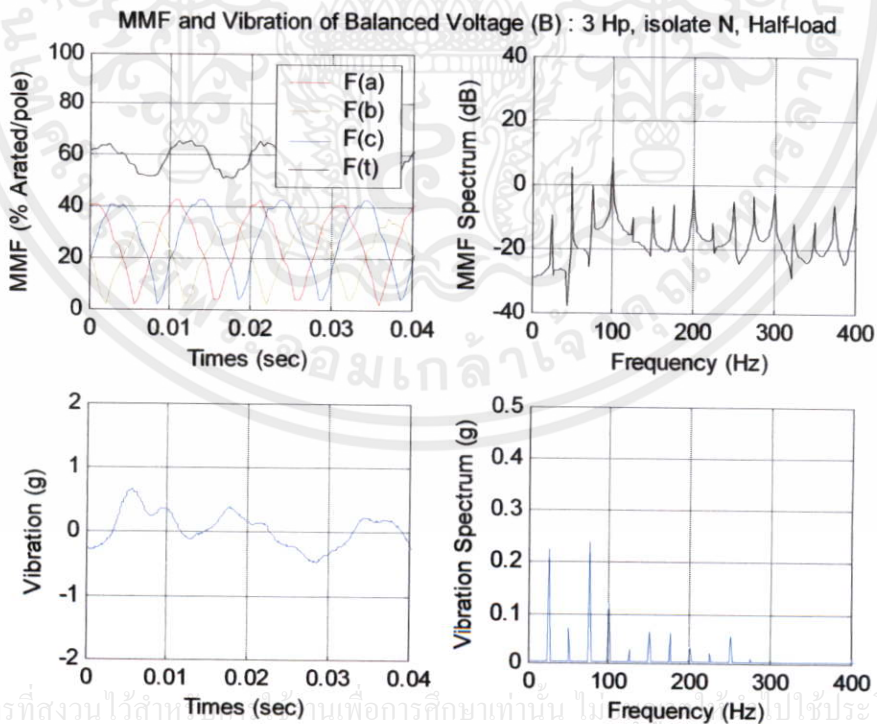


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

4.3 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 3 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ



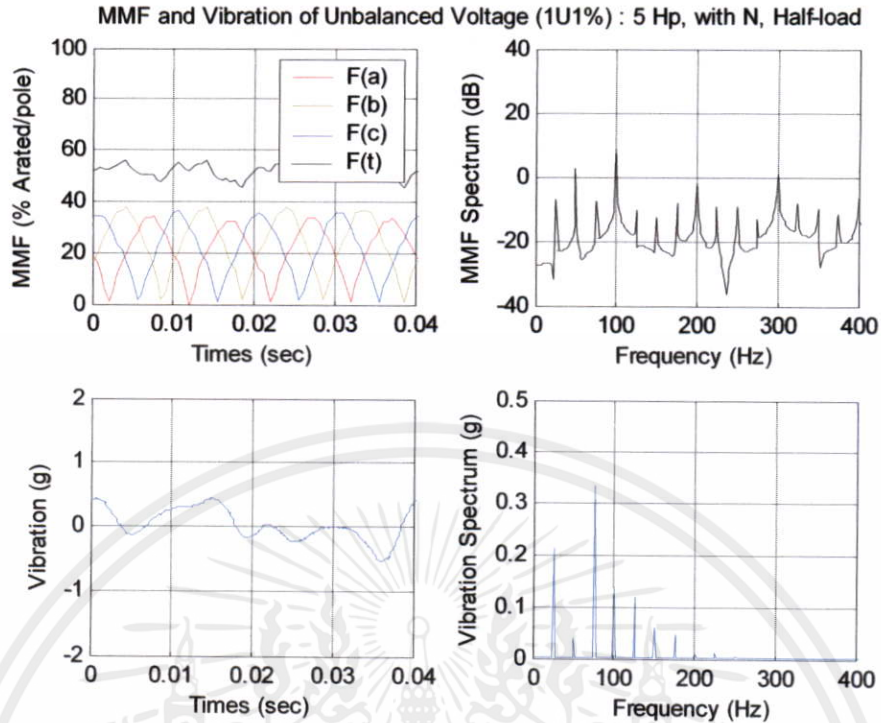
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล (B) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวตรอล ขั้วโหลด 50%



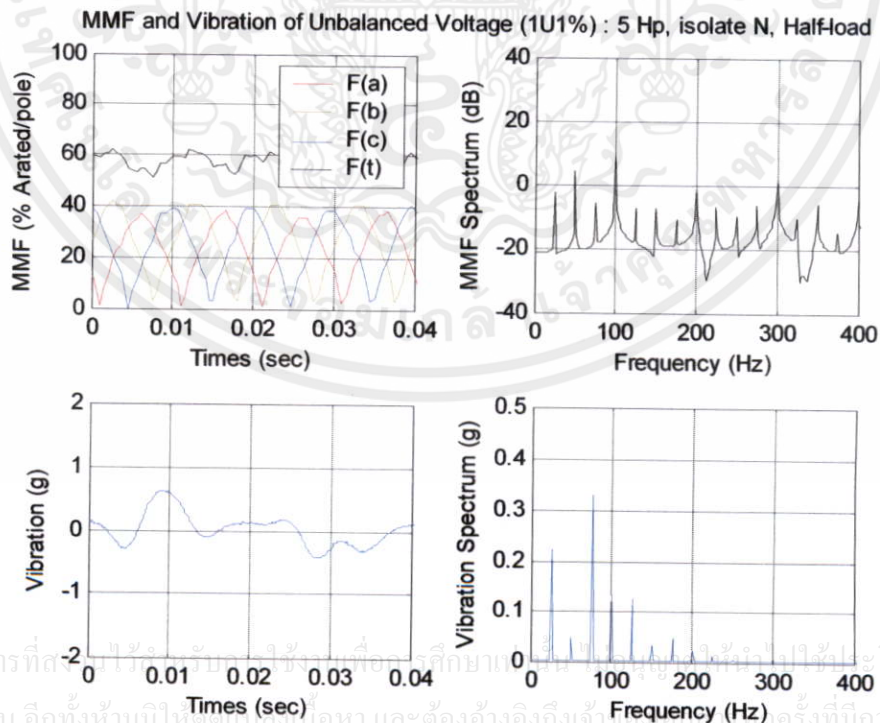
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.17 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่

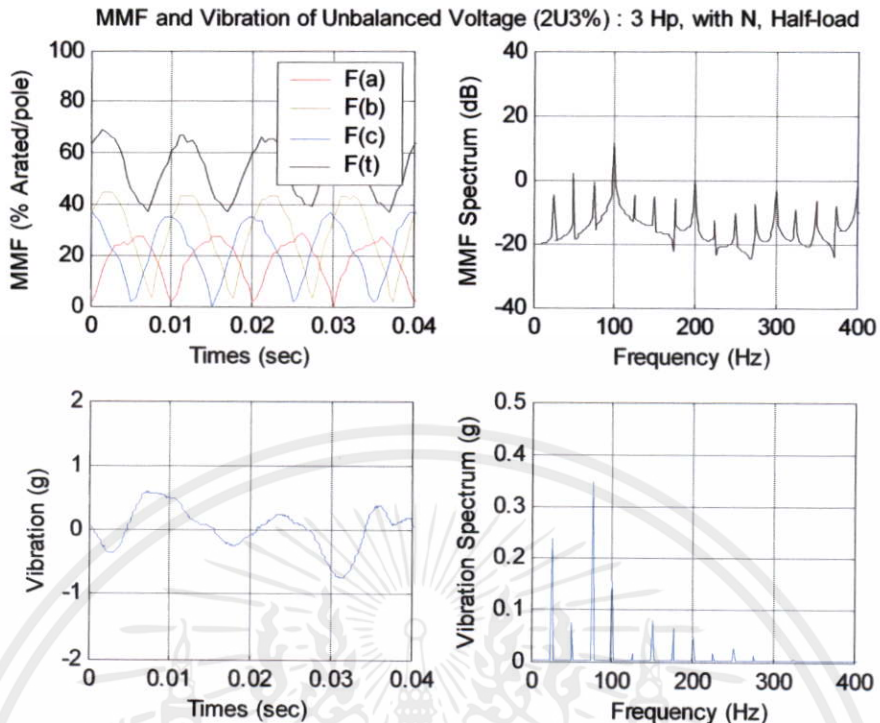
สมดุล (B) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวตรอล ขั้วโหลด 50%



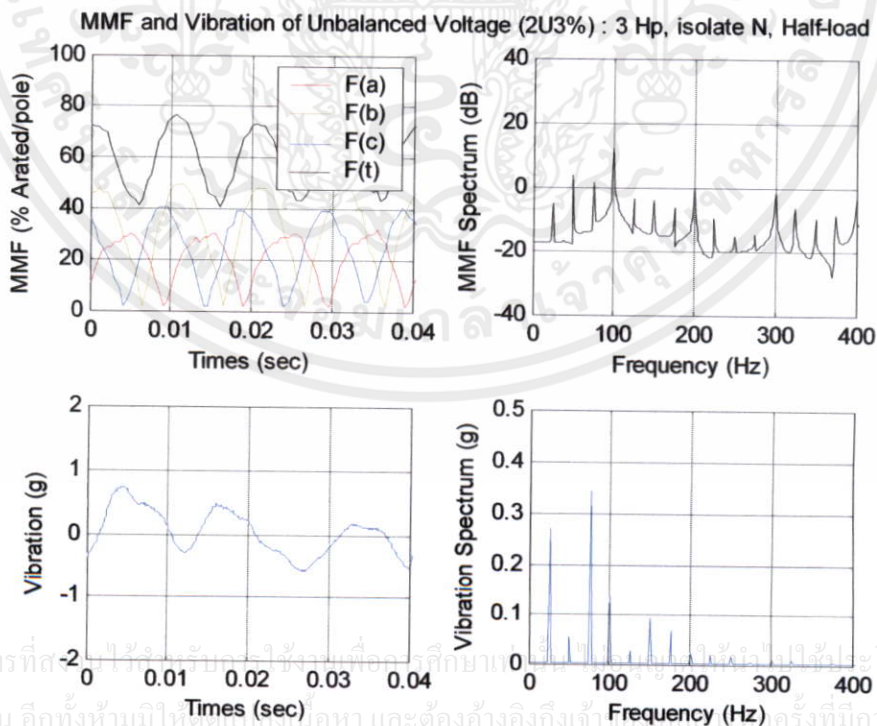
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



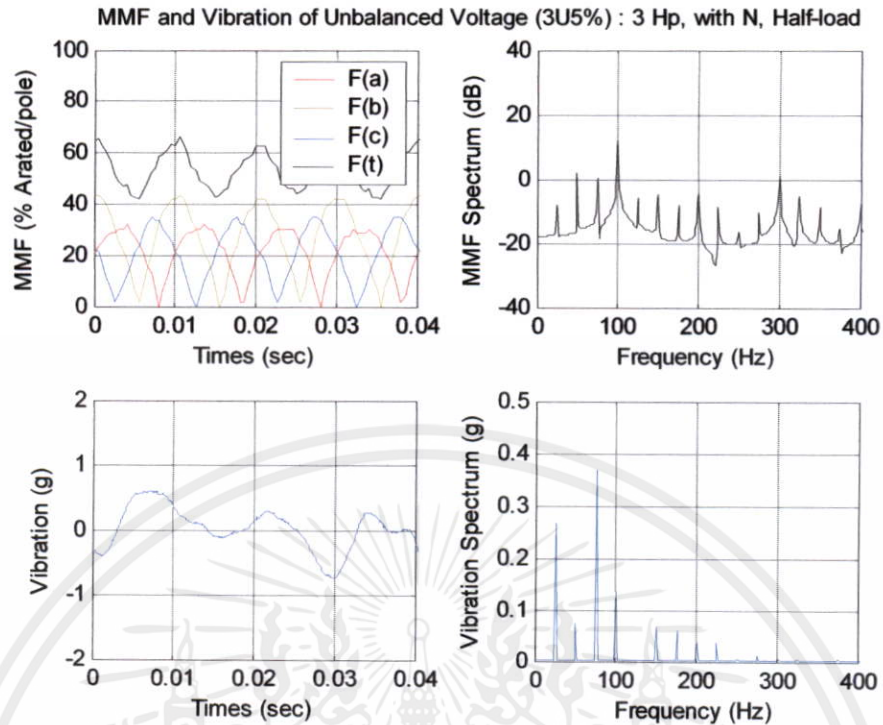
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



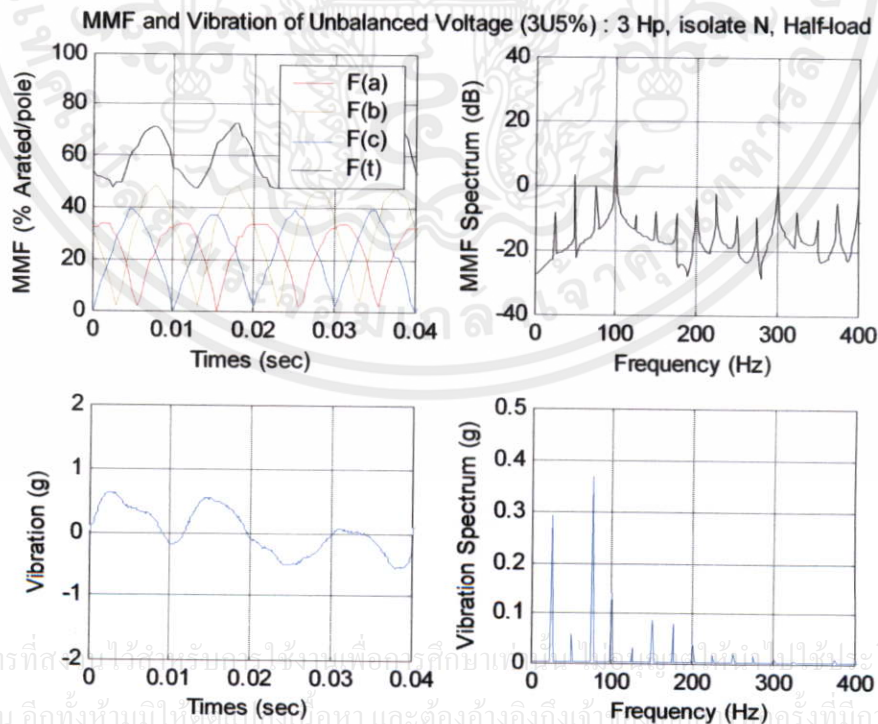
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



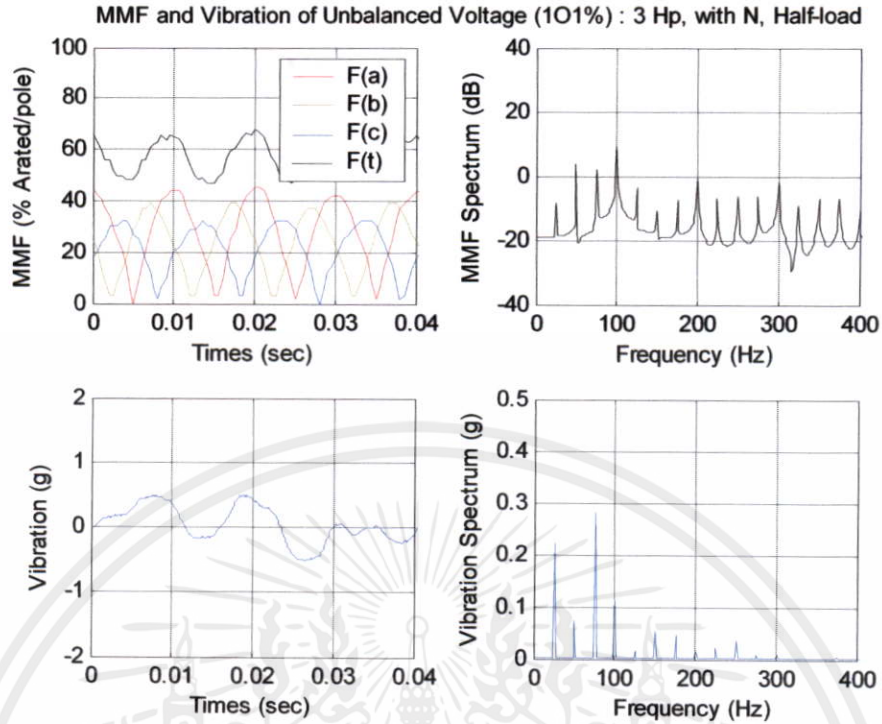
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



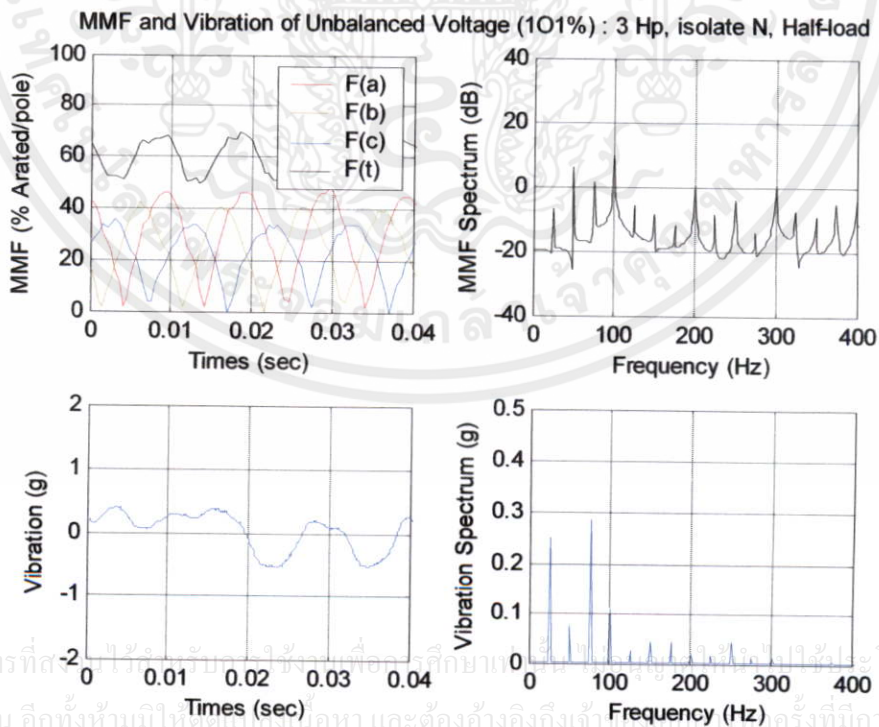
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



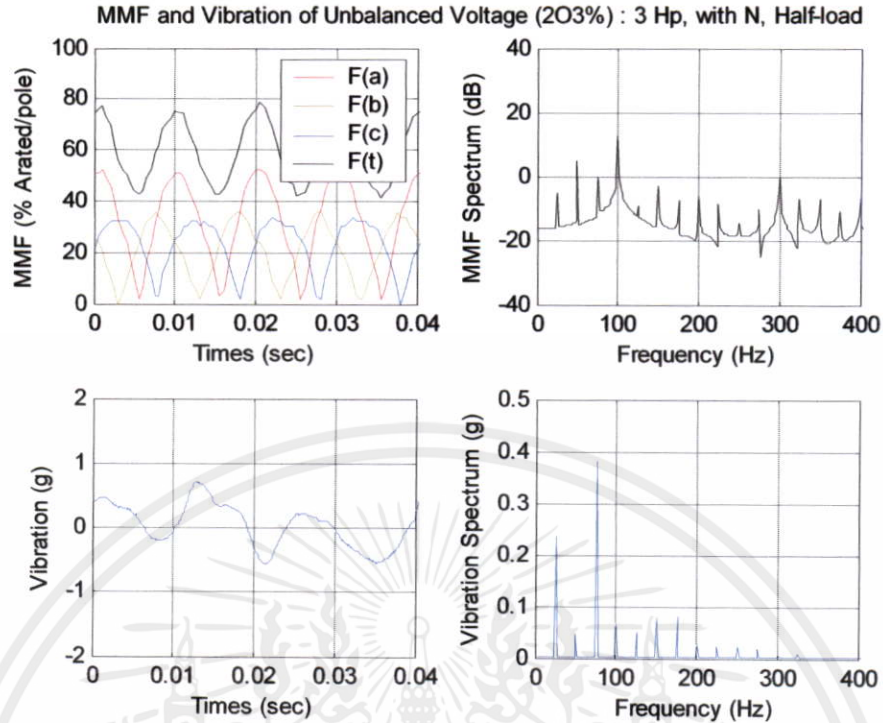
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



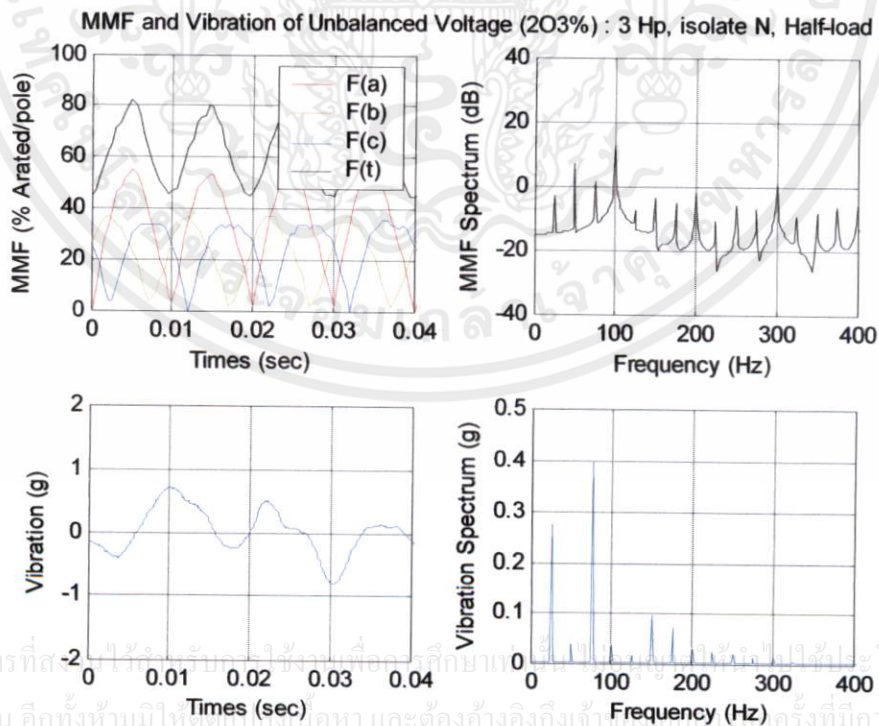
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



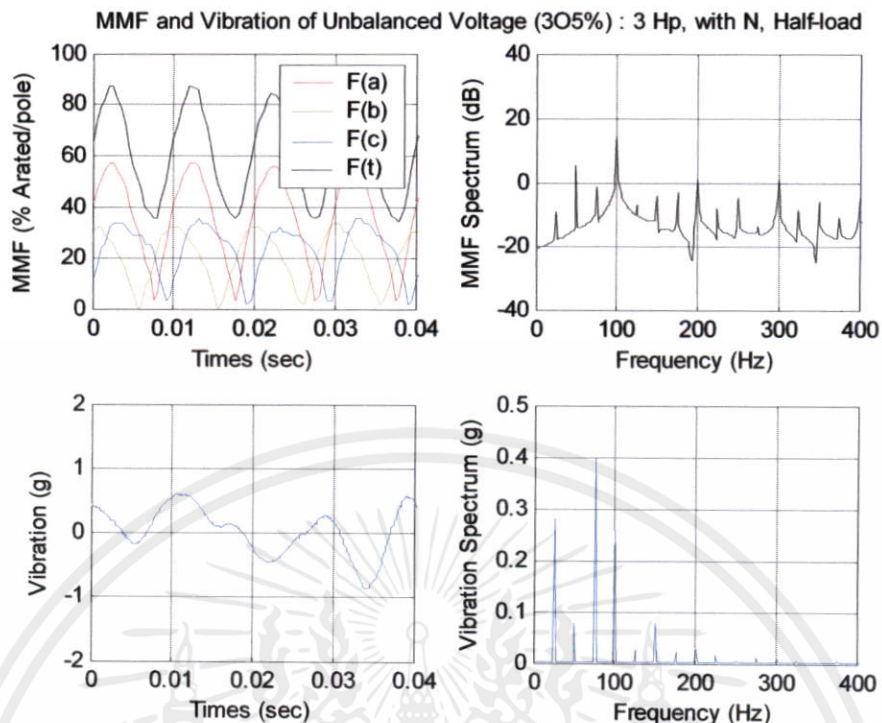
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



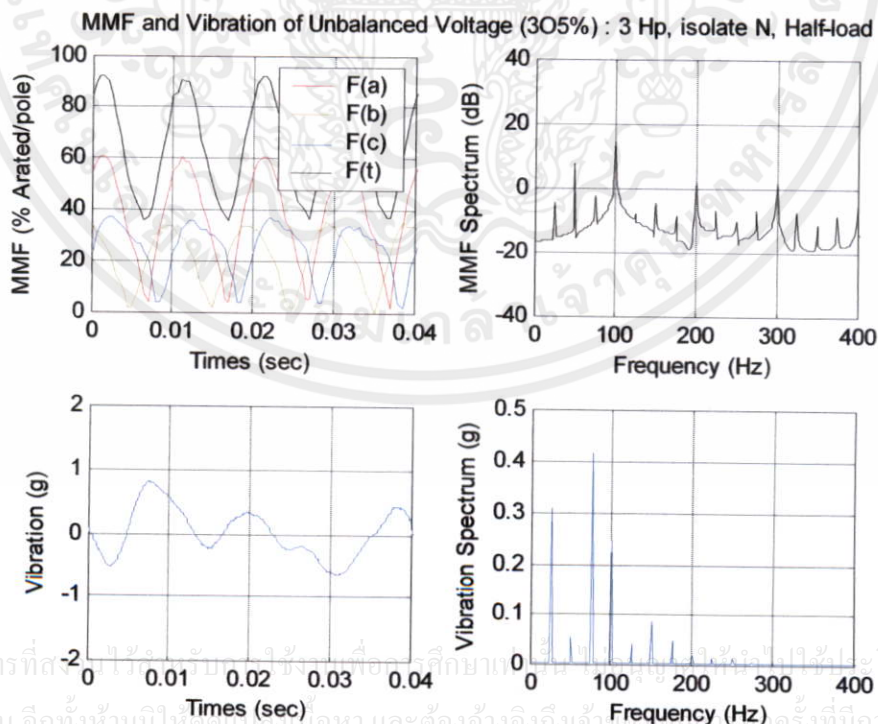
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขับ โหลด 50%



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขับ โหลด 50%



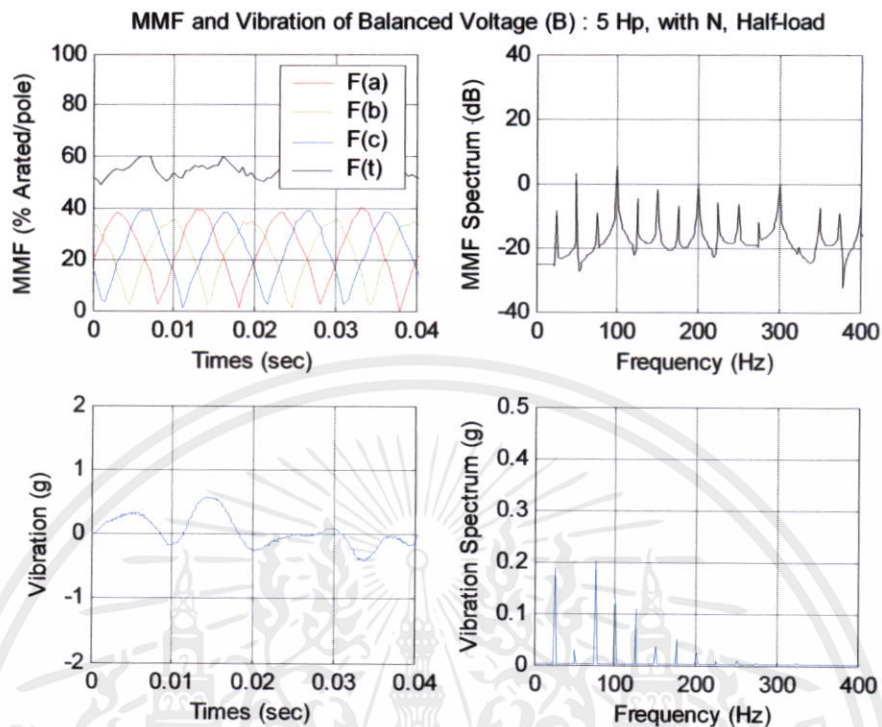
รูปที่ 4.28 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



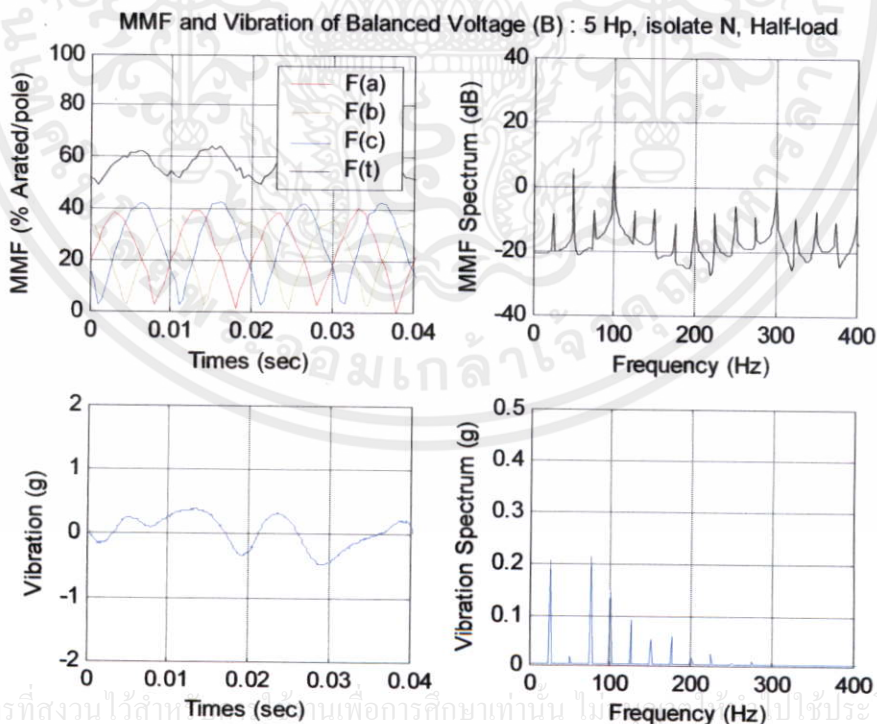
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ถือว่าผิดกฎหมาย

4.4 ผลการทดสอบ มอเตอร์พิกัด 5 แรงม้า ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ



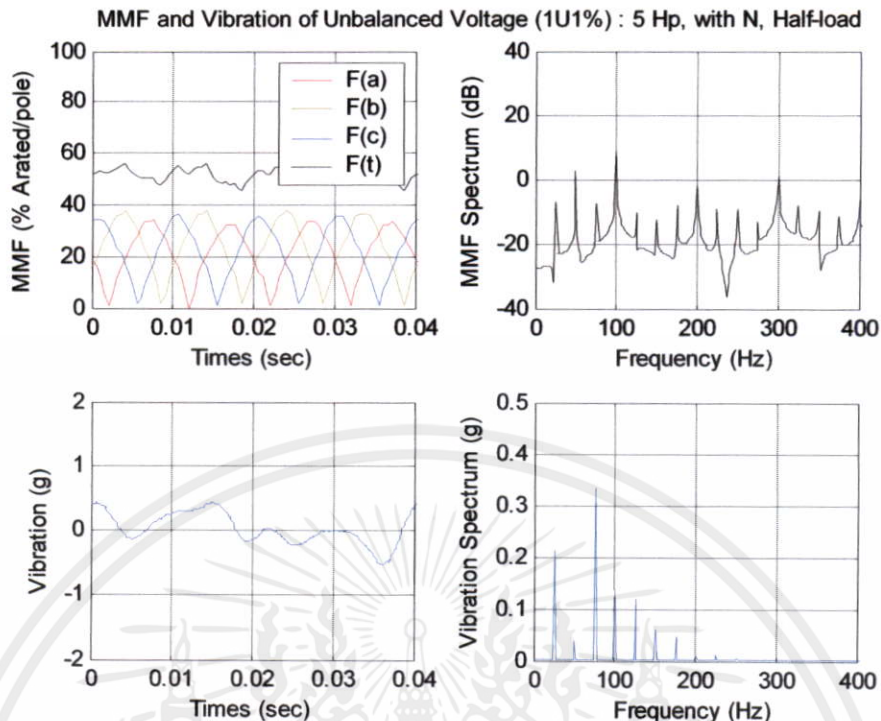
รูปที่ 4.30 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล (B) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวตรอล ขั้วโหลด 50%



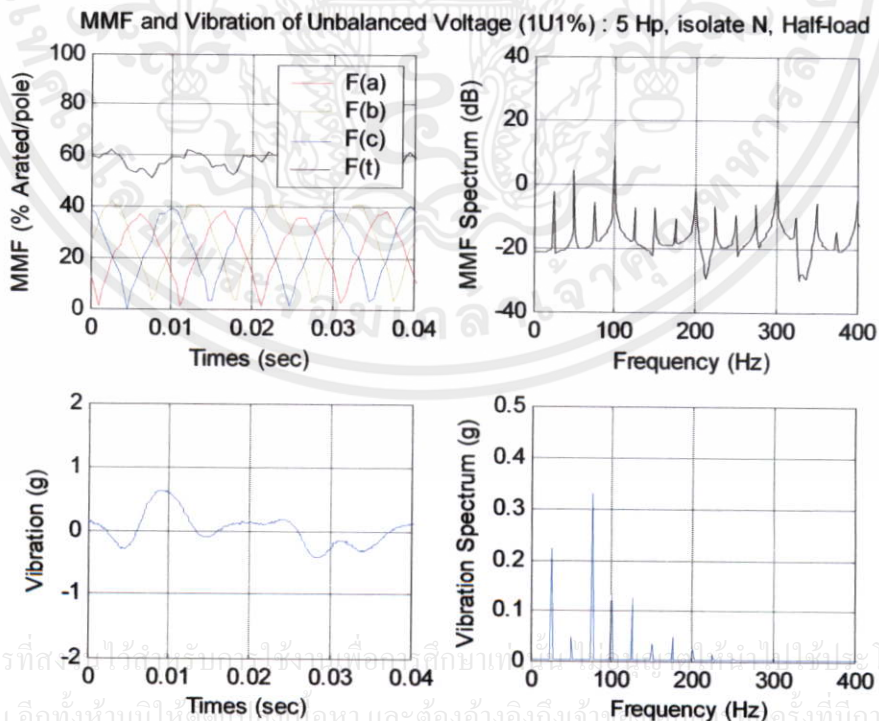
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.31 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้า

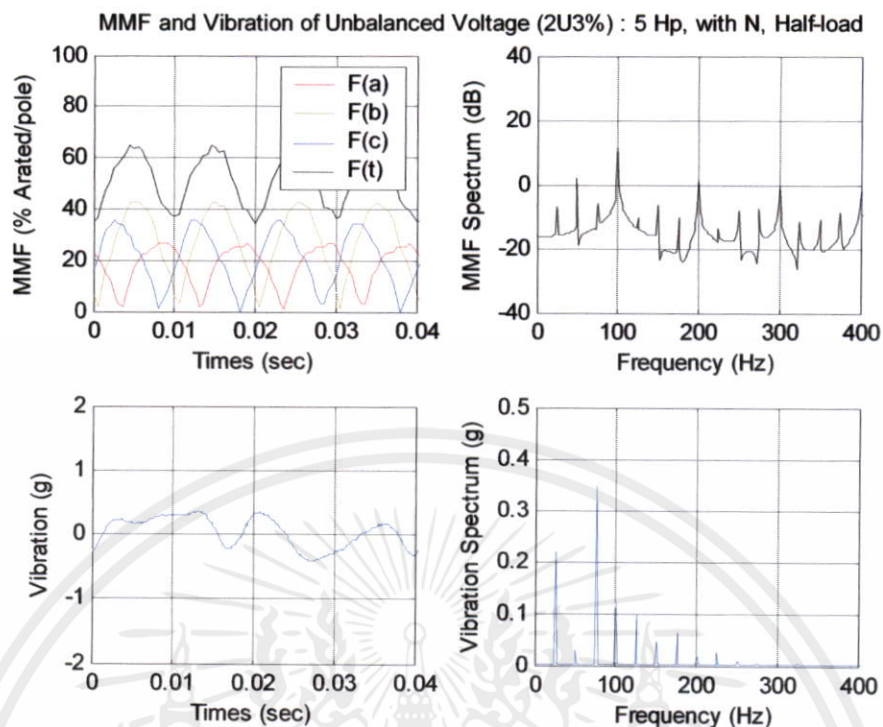
สมดุล (B) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวตรอล ขั้วโหลด 50%



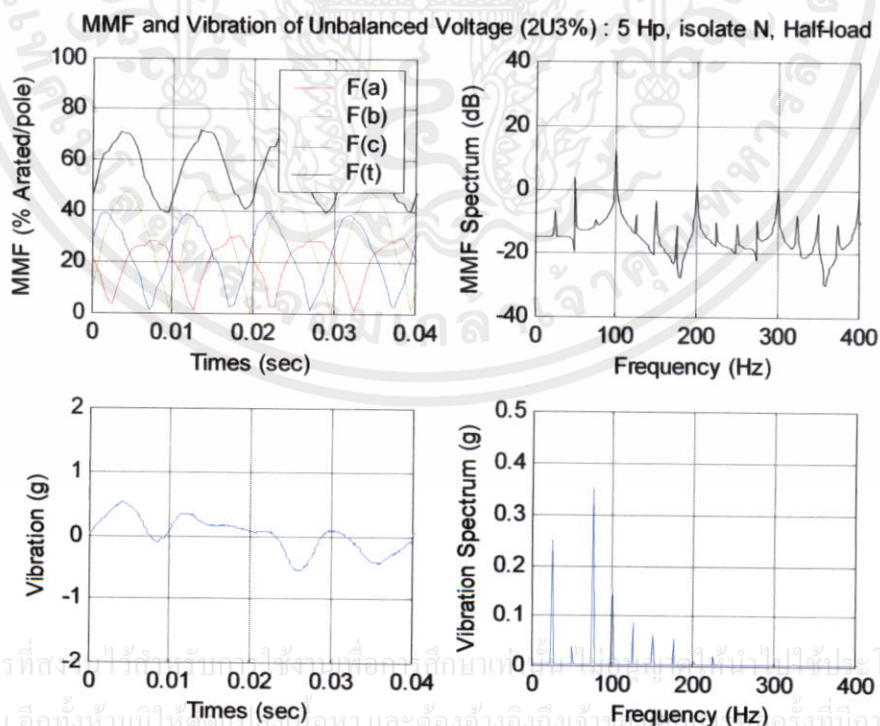
รูปที่ 4.32 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวตรอน ขั้วโหลด 50%



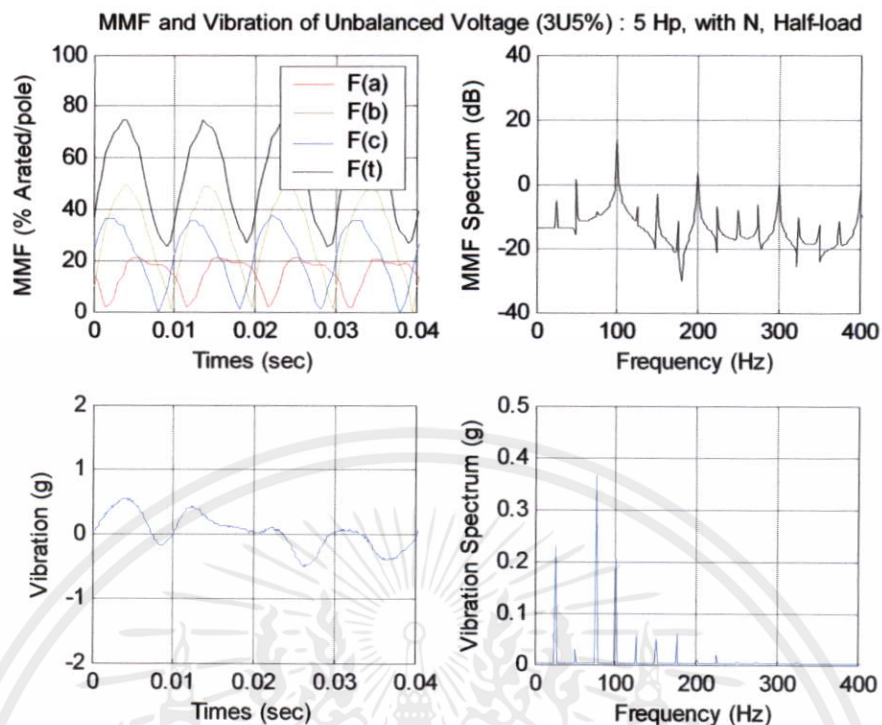
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวตรอน ขั้วโหลด 50%



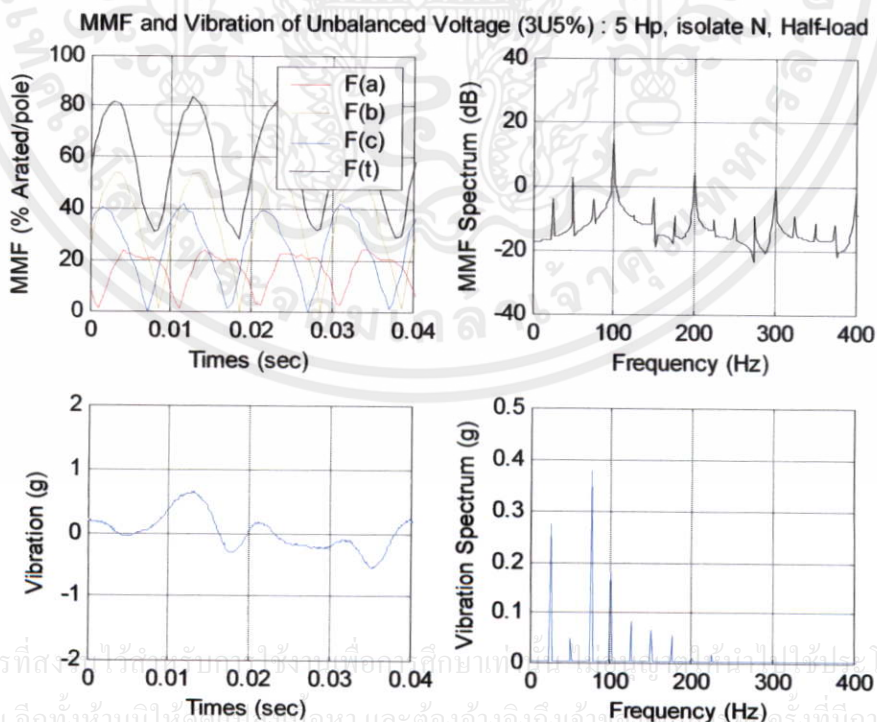
รูปที่ 4.34 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% (2U3%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

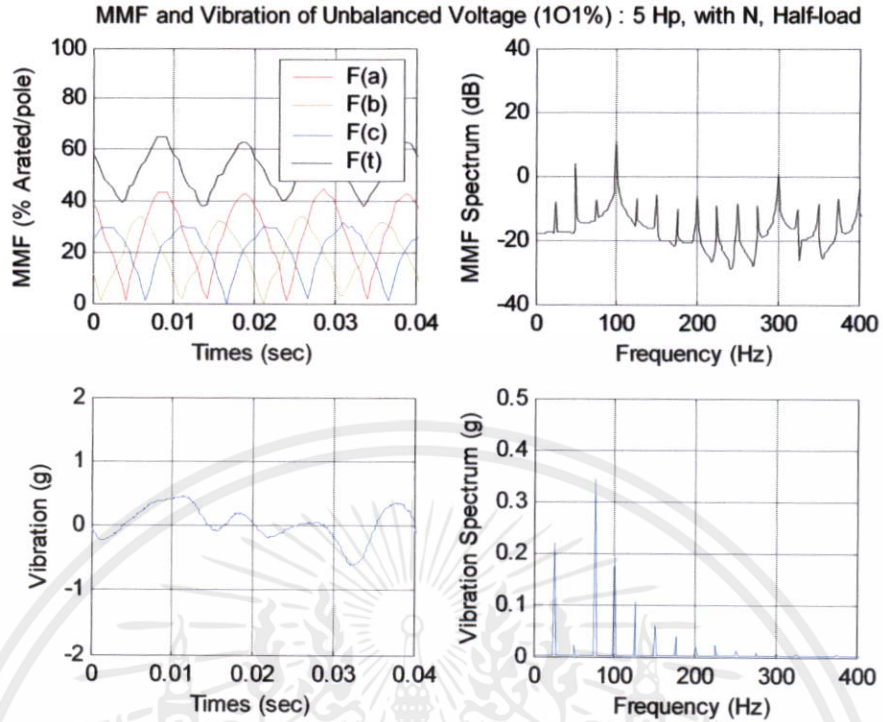


รูปที่ 4.36 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

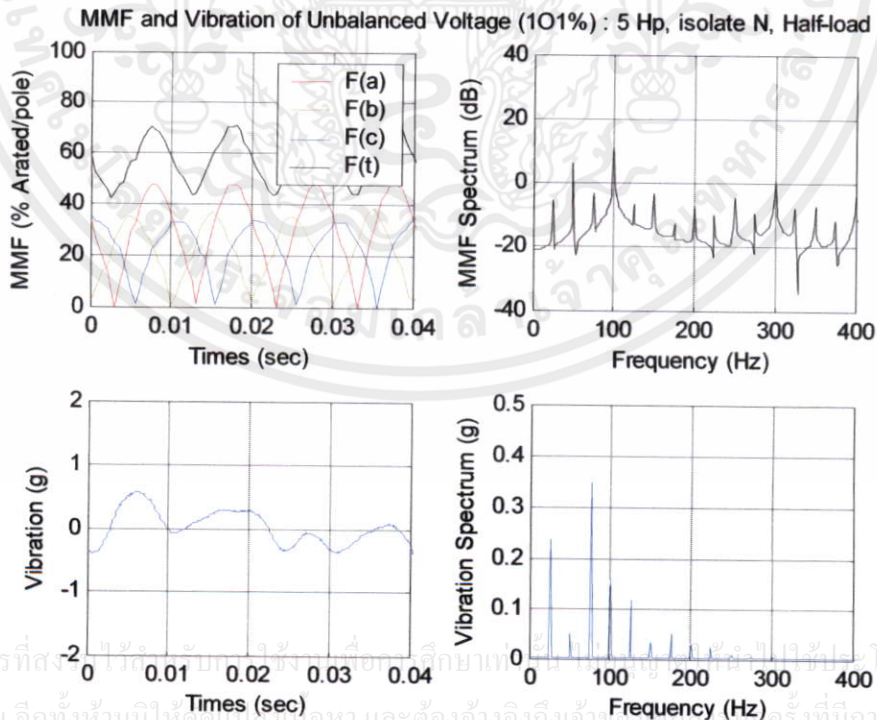


รูปที่ 4.37 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% (3U5%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

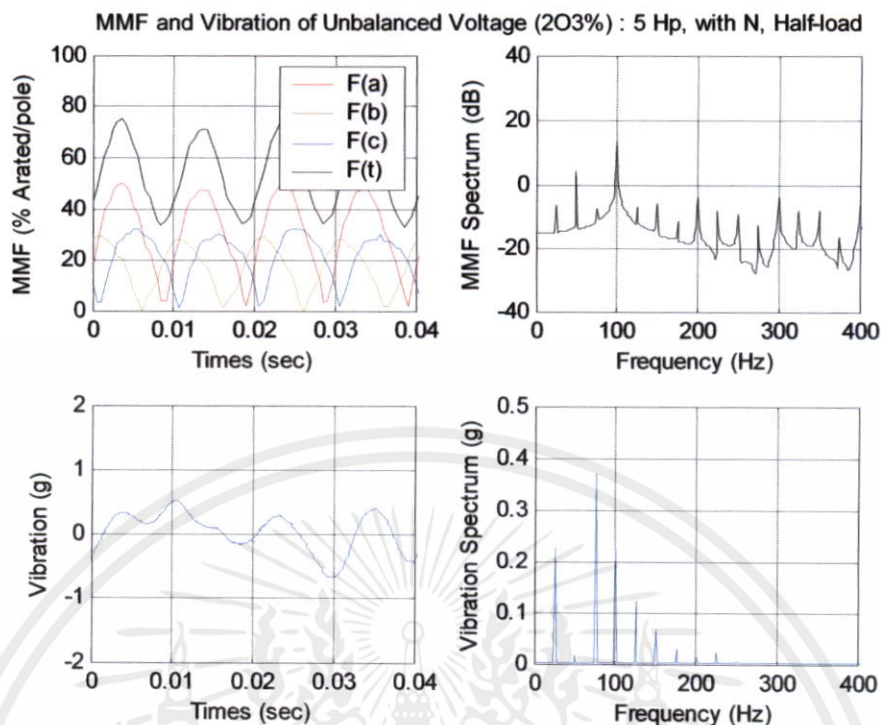


รูปที่ 4.38 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

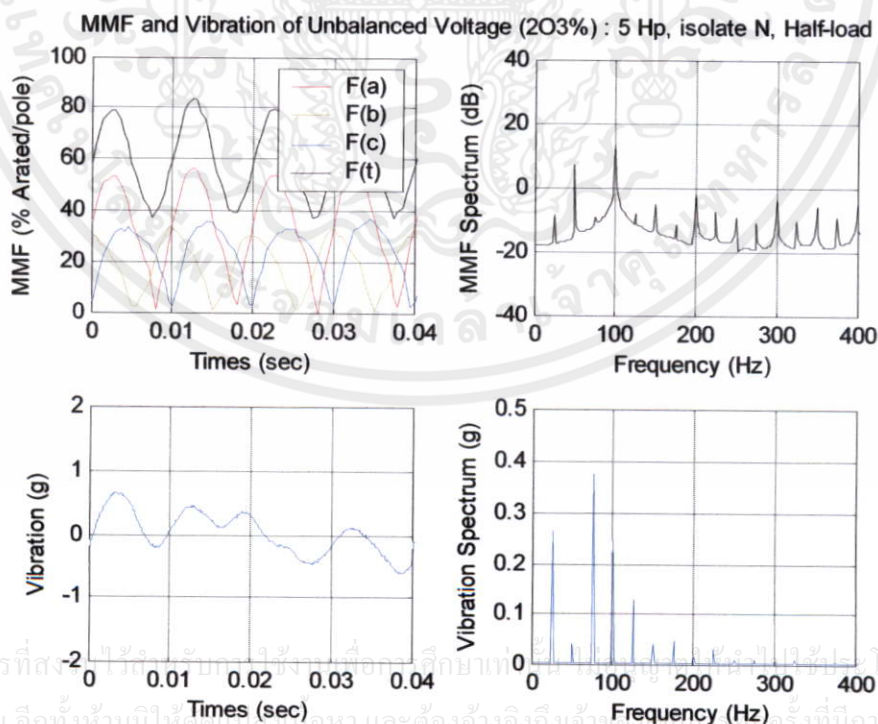


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (101%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

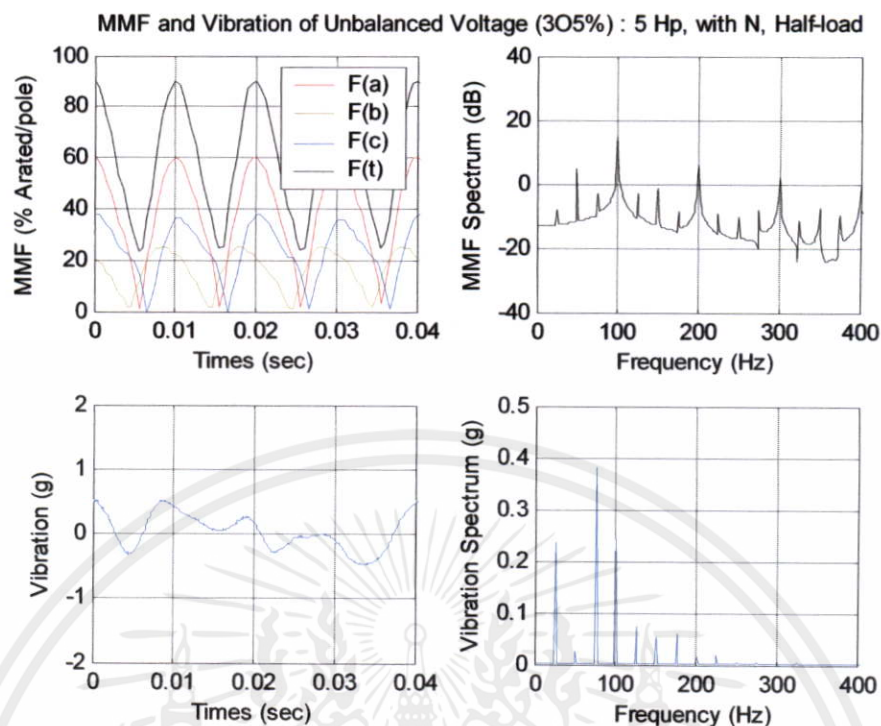
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



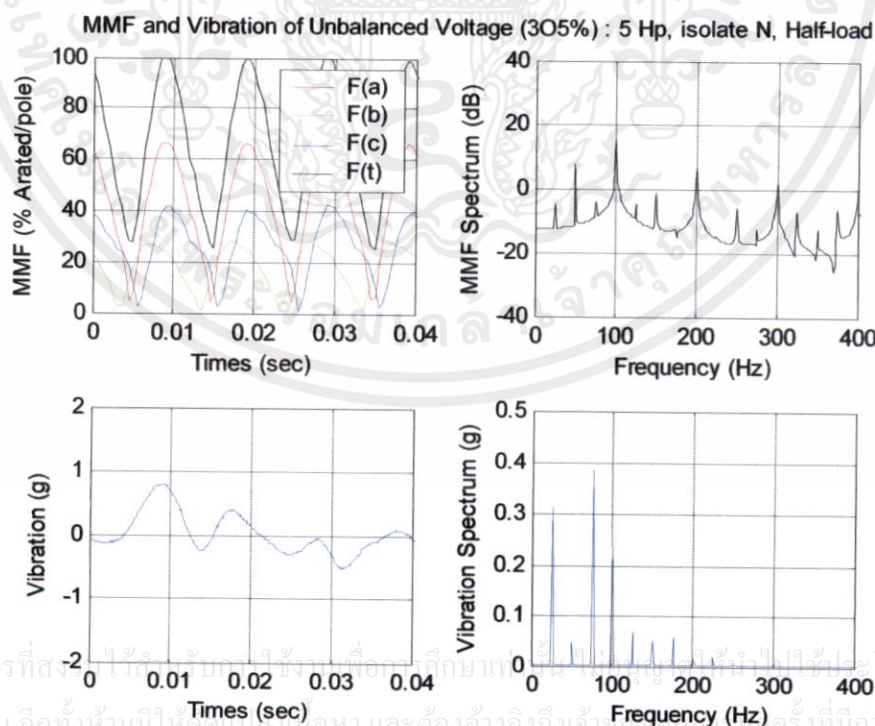
รูปที่ 4.40 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% (203%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%



รูปที่ 4.42 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



รูปที่ 4.43 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% (305%) ของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ สามารถวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของความถี่ที่เกิดขึ้นได้ 4 ค่า ดังต่อไปนี้

4.5.1 ค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ได้จากกระแสแต่ละเฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน และถูกถ่ายโอนไปเป็นแรงบิด เมื่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ทำให้ไม่เกิดการแกว่งของแรงบิด จึงทำให้อัตราการหมุนอย่างราบรื่นหรือเกิดการสั่นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะมีความไม่สม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด จึงทำให้อัตราการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น สามารถหาค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf frequency : f_{mmf}) ได้ดังสมการ

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s \quad (4.3)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่แหล่งจ่าย (supply frequency : 50 Hz)
 k_{odd} คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับคี่ (odd harmonics : 1st, 3rd, 5th, 7th, 9th, ...)

4.5.2 ค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุน

แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กหมุนได้มาจากการเหนี่ยวนำของกระแสสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ และวงแหวนส่วนปลายของโรเตอร์ ในขณะที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะขยายผลไปยังพฤติกรรมของมอเตอร์ และความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่สเตเตอร์เพียงเล็กน้อย สามารถส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของขนาดกระแสสเตเตอร์เป็นอย่างมาก ซึ่งกระแสสเตเตอร์ที่ไม่สมดุลนี้จะถูกถ่ายโอนไปเป็นฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด ทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด และส่งผลต่อทำให้เกิดเสียงฮัมดังและการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น จากสมการที่ (2.23) ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ที่ได้จากกระแสสเตเตอร์ขณะมอเตอร์ทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ของสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field frequency : f_{rev}) [7] ซึ่งเป็นผลมาจากลำดับคี่ของระบบด้วย สามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$f_{rev} = k_{even} f_s \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ f_s คือ ความถี่แหล่งจ่าย (supply frequency : 50 Hz)
 k_{even} คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ (even harmonics : $2^{nd}, 4^{th}, 6^{th}, 8^{th}, 10^{th}, \dots$)

4.5.3 ค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน

ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นผลมาจากเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนมีความไม่สม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด ทำให้มอเตอร์หมุนแบบไม่ราบรื่น และด้วยพฤติกรรมของการหน่วงและกระชากของความเร็วรอบนี้ จึงทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น สามารถหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน (vibration frequency : f_v) [7] หรือเรียกว่า ความถี่โรเตอร์หมุน (rotor frequency : f_r) ได้ดังสมการ

$$f_v = f_{rm}(1-s) \quad ; \quad f_{rm} = \frac{2}{P} f_s \quad (4.5)$$

- เมื่อ f_{rm} คือ ความถี่หมุนทางกล (rotational mechanical frequency : 25 Hz)
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

4.5.4 ค่าความถี่ของการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ

ขณะที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น และเป็นผลต่อเนื่องทำให้เกิดพลวัตของการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (dynamics eccentricity frequency : f_{de}) [7] ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าความถี่นี้จะเกิดขึ้นแผ่รวมมากับค่าความถี่ของการสั่นสะเทือน สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] \quad ; \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (4.6)$$

ตัวอย่างที่ 4.1 จากรูปที่ 4.2 มอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สถานะสมดุล (B) แบบค่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%, $N_r = 1475$ rpm

จะได้
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1475}{1500} = 0.0167$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ไปและต้องแจ้งถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{mmr} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1 - s) = 25 \times (1 - 0.0167) = 24.583 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1-0.0167)}{4} + 1 \right] = 62.29 \text{ Hz}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 จากรูปที่ 4.8 มอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะไม่สมดุล (3U5%) แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%, $N_r = 1461 \text{ rpm}$

จะได้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1461}{1500} = 0.026$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1 - s) = 25 \times (1 - 0.026) = 24.35 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1-0.026)}{4} + 1 \right] = 62.17 \text{ Hz}$$

ตัวอย่างที่ 4.3 จากรูปที่ 4.15 มอเตอร์ 1 แรงม้า ที่สภาวะไม่สมดุล (3O5%) แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%, $N_r = 1447 \text{ rpm}$

จะได้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1447}{1500} = 0.0353$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1 - s) = 25 \times (1 - 0.0353) = 24.117 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1 - s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1 - 0.026)}{4} + 1 \right] = 62.17 \text{ Hz}$$

ตัวอย่างที่ 4.4 จากรูปที่ 4.21 มอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะไม่สมดุล (2U3%) แบบไม่ต่อสายนิวทรอล
 ขั้วโหลด 50%, $N_r = 1445 \text{ rpm}$

จะได้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0.0367$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1 - s) = 25 \times (1 - 0.0367) = 24.082 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1 - s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1 - 0.0367)}{4} + 1 \right] = 62.04 \text{ Hz}$$

ตัวอย่างที่ 4.5 จากรูปที่ 4.27 มอเตอร์ 3 แรงม้า ที่สภาวะไม่สมดุล (2O3%) แบบไม่ต่อสายนิวทรอล
 ขั้วโหลด 50%, $N_r = 1450 \text{ rpm}$

จะได้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.0333$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1 - s) = 25 \times (1 - 0.0333) = 24.167 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1-0.0333)}{4} + 1 \right] = 62.08 \text{ Hz}$$

ตัวอย่างที่ 4.6 จากรูปที่ 4.43 มอเตอร์ 5 แรงม้า ที่สภาวะไม่สมดุล (305%) แบบไม่ต่อสายนิวทรอล
 ขั้วโหลด 50%, $N_r = 1450 \text{ rpm}$

จะได้
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1447}{1500} = 0.0353$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$f_{mmf} = k_{odd} f_s = 1^{st} \times 50, 3^{rd} \times 50 = 50, 150 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{rev} = k_{even} f_s = 2^{nd} \times 50, 4^{th} \times 50 = 100, 200 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_v = f_{rm} (1-s) = 25 \times (1-0.0353) = 24.117 \text{ Hz}$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$f_{de} = f_s \left[k \frac{(1-s)}{P} + 1 \right] = 50 \times \left[1 \times \frac{(1-0.0353)}{4} + 1 \right] = 62.05 \text{ Hz}$$

4.5.5 ค่าขนาดของความถี่ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์

ผลที่ได้จากการคำนวณค่าความถี่ต่าง ๆ จากตัวอย่างข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมจากผลการทดสอบ จึงพิจารณาได้ว่า

4.5.5.1 ค่าขนาดความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf frequency : f_{mmf}) ใช้บ่งบอกถึงสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลหรือไม่สมดุลต่ำกว่าหรือสูงกว่าปกติอย่างไร โดยหากขนาดแอมพลิจูดมีค่าน้อยกว่าค่าที่สภาวะสมดุล (< 3 dB แบบต่อนิวทรอล, < 5 dB แบบไม่ต่อนิวทรอล) แสดงว่าอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และหากขนาดแอมพลิจูดมีค่ามากกว่าค่าที่สภาวะสมดุล แสดงว่าอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ

4.5.5.2 ค่าขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field frequency : f_{rev}) ใช้บ่งบอกถึงการสั่นสะเทือนของมอเตอร์จากการวิเคราะห์จากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก โดยในทางอุดมคติเมื่อสภาวะสมดุลค่าความถี่นี้จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์มีค่าเท่ากันตลอดรอบการหมุน แต่เมื่อสภาวะไม่สมดุลค่าความถี่นี้จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กหมุน โดยหากขนาดแอมพลิจูดของค่าความถี่นี้มีค่าน้อยกว่า 4 dB (แบบต่อนิวทรอล), และ 8 dB (แบบไม่ต่อนิวทรอล) แสดงว่าอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและ

เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นน้อยมาก และหากขนาดแอมพลิจูดมีค่ามากกว่าค่าที่สภาวะสมดุล (> 3-8 dB) แสดงว่าอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลและเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นมาก ตามลำดับ โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ

4.5.5.3 ค่าขนาดความถี่ของการสั่นสะเทือน (vibration frequency : f_v) ใช้บ่งบอกถึงค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริง โดยหากขนาดแอมพลิจูดมีค่าอยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ดี (Good 0.08g-0.2g) แสดงว่ามอเตอร์มีการสั่นสะเทือนอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ และหากขนาดแอมพลิจูดมีค่ามากกว่าขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ดี (0.2g-0.3g Fair, 0.3g-0.5g Rough, 0.5g-0.8g Very Rough, > 0.8g Extremely Rough) แสดงว่ามอเตอร์มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นมาก ตามลำดับ โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ

4.5.5.4 ค่าขนาดความถี่ของการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (dynamics eccentricity frequency : f_{de}) ใช้บ่งบอกถึงค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ใช้พิจารณาควบคู่กับค่าขนาดของความถี่การสั่นสะเทือนโดยหากขนาดแอมพลิจูดมีค่าน้อยกว่าขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ดี (Good 0.08g-0.2g) แสดงว่ามอเตอร์มีการสั่นสะเทือนอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ และหากขนาดแอมพลิจูดมีค่ามากกว่าขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ดี (0.2g-0.3g Fair, 0.3g-0.5g Rough, 0.5g-0.8g Very Rough, > 0.8g Extremely Rough) แสดงว่ามอเตอร์มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นมาก ตามลำดับ โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่พลวัตของช่องอากาศเยื้องศูนย์กลางที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ

4.5.6 กราฟความสัมพันธ์ของสเปกตรัมความถี่ต่าง ๆ

จากรูปผลการทดสอบและวิเคราะห์สัญญาณ แบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลัก ๆ ตามขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบ คือ 1, 3, และ 5 แรงม้า ตามลำดับ โดยในแต่ละช่วงยังแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุลต่าง ๆ (ตารางที่ 4.1) แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล ขณะไม่จับโหลดและจับโหลด 50% ตามลำดับ

4.5.6.1 ค่าสเปกตรัมความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า

ตั้งแต่รูปที่ 4.2 ถึง 4.15 แสดงผลการทดสอบของมอเตอร์ 1 แรงม้า, สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือน นำมาเขียนค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ขณะไม่จับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล ได้ดังตารางที่ 4.2 และขณะจับโหลด 50 % แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล ได้ดังตารางที่ 4.3

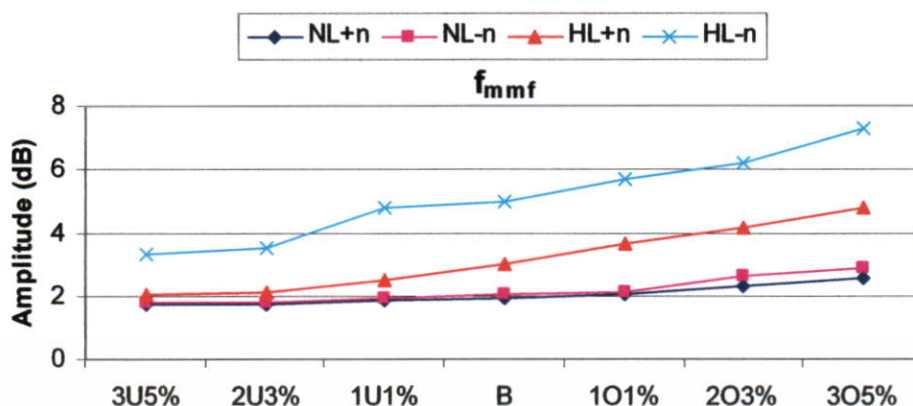
ตารางที่ 4.2 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล

1 Hp, with Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			fmmf		frev		fv		fde (k=1)	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1498	0.00133	50	1.91	100	1.4	24.97	0.0322	62.48	0.011
1U1%	1498	0.00133	50	1.85	100	3.4	24.97	0.0325	62.48	0.016
2U3%	1496	0.00267	50	1.76	100	5.5	24.93	0.0352	62.47	0.027
3U5%	1495	0.00333	50	1.72	100	6.7	24.92	0.0363	62.46	0.028
1O1%	1498	0.00133	50	2.05	100	4.2	24.97	0.0335	62.48	0.018
2O3%	1497	0.00200	50	2.33	100	6.1	24.95	0.0353	62.48	0.028
3O5%	1496	0.00267	50	2.53	100	7.3	24.93	0.0381	62.47	0.031
1 Hp, isolated Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1497	0.00200	50	2.02	100	1.5	24.95	0.0335	62.48	0.012
1U1%	1496	0.00267	50	1.95	100	3.6	24.93	0.0341	62.47	0.017
2U3%	1496	0.00267	50	1.81	100	6.1	24.93	0.0382	62.47	0.028
3U5%	1497	0.00200	50	1.78	100	7.5	24.95	0.0453	62.48	0.046
1O1%	1497	0.00200	50	2.14	100	4.8	24.95	0.0355	62.48	0.018
2O3%	1496	0.00267	50	2.65	100	6.8	24.93	0.0443	62.47	0.036
3O5%	1496	0.00267	50	2.87	100	7.9	24.93	0.0495	62.47	0.058

ตารางที่ 4.3 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 1 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล

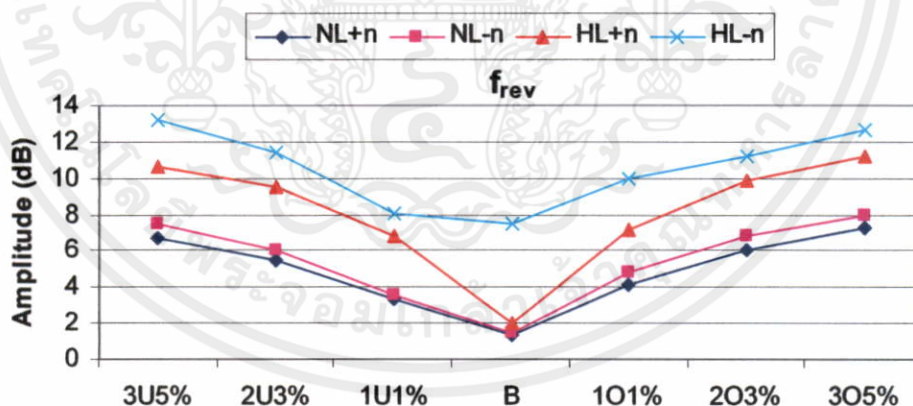
1 Hp, with Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			fmmf		frev		fv		fde (k=1)	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1475	0.01667	50	3.02	100	2.01	24.58	0.212	62.29	0.347
1U1%	1470	0.02000	50	2.51	100	6.81	24.50	0.224	62.25	0.382
2U3%	1463	0.02467	50	2.13	100	9.52	24.38	0.256	62.19	0.401
3U5%	1461	0.02600	50	2.02	100	10.6	24.35	0.275	62.18	0.424
1O1%	1470	0.02000	50	3.64	100	7.14	24.50	0.236	62.25	0.403
2O3%	1467	0.02200	50	4.13	100	9.83	24.45	0.262	62.23	0.432
3O5%	1465	0.02333	50	4.81	100	11.22	24.42	0.278	62.21	0.439
1 Hp, isolated Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1451	0.03267	50	5.02	100	7.51	24.18	0.297	62.09	0.353
1U1%	1450	0.03333	50	4.81	100	8.04	24.17	0.305	62.08	0.405
2U3%	1444	0.03733	50	3.53	100	11.45	24.07	0.332	62.03	0.429
3U5%	1444	0.03733	50	3.32	100	13.27	24.07	0.367	62.03	0.452
1O1%	1451	0.03267	50	5.71	100	9.94	24.18	0.311	62.09	0.425
2O3%	1450	0.03333	50	6.24	100	11.18	24.17	0.342	62.08	0.437
3O5%	1447	0.03533	50	7.32	100	12.63	24.12	0.405	62.06	0.443

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์แสดงขนาดสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนที่สภาวะต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.44 ถึง 4.47 ตามลำดับ



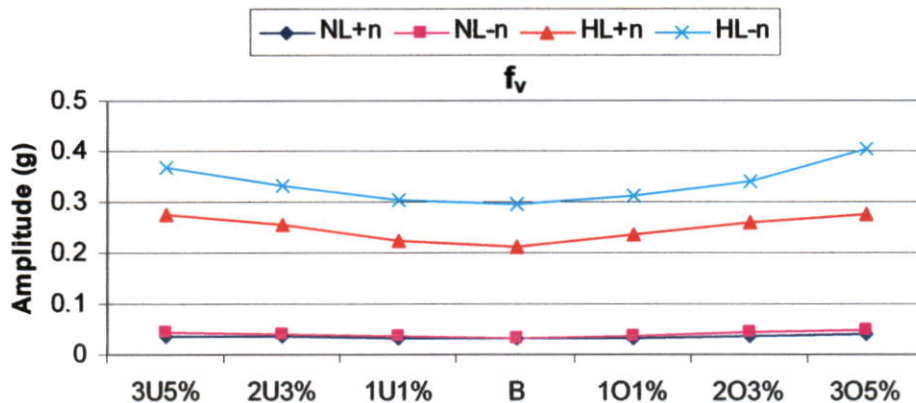
รูปที่ 4.44 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 1 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะแปรผันตามสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลดต่ำลง และเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



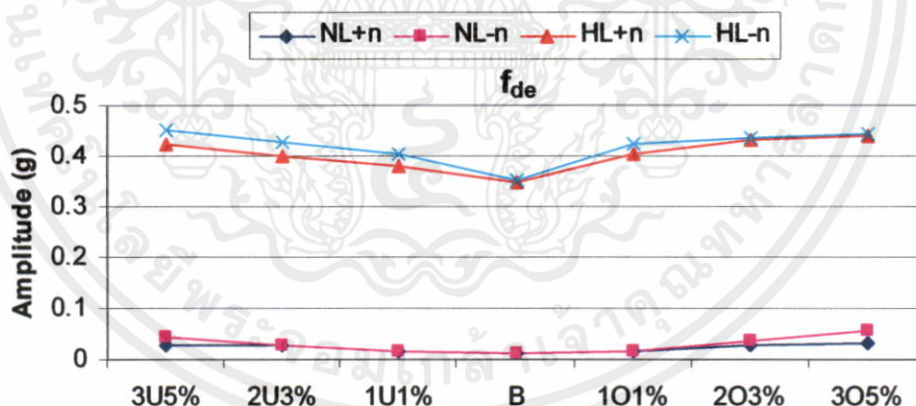
รูปที่ 4.45 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 1 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.45 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนที่สูงกว่าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



รูปที่ 4.46 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



รูปที่ 4.47 สเปกตรัมความถี่ปลว้ตรของช่องอากาศเชิงศูนย์ของมอเตอร์ 1 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ปลว้ตรของช่องอากาศเชิงศูนย์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ปลว้ตรของช่องอากาศเชิงศูนย์ที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)

4.5.6.2 ค่าสเปกตรัมความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า

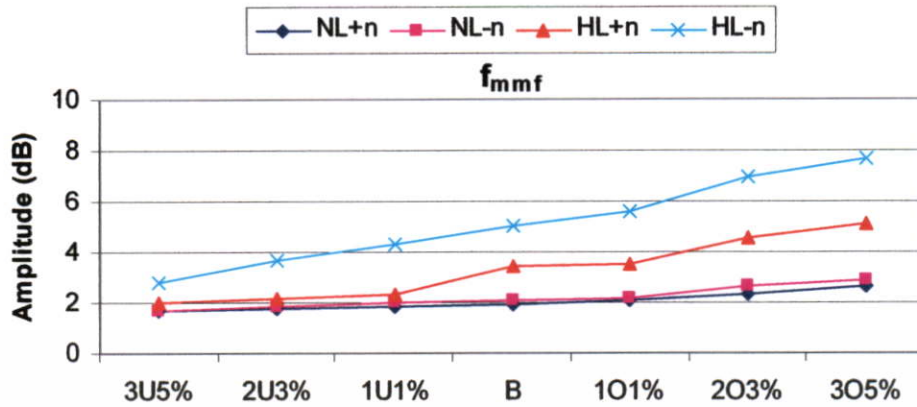
ตั้งแต่รูปที่ 4.16 ถึง 4.29 แสดงผลการทดสอบของมอเตอร์ 3 แรงม้า, สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือน นำมาเขียนค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล ได้ดังตารางที่ 4.4 และขณะขับโหลด 50 % แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล ได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล

3 Hp, with Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			f _{mmf}		f _{rev}		f _v		f _{de (k=1)}	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1497	0.00200	50	1.93	100	1.7	24.95	0.0331	62.48	0.012
1U1%	1496	0.00267	50	1.87	100	3.6	24.93	0.0335	62.47	0.017
2U3%	1497	0.00200	50	1.78	100	5.8	24.95	0.0355	62.48	0.028
3U5%	1497	0.00200	50	1.69	100	7.2	24.95	0.0364	62.48	0.029
1O1%	1496	0.00267	50	2.08	100	4.3	24.93	0.0342	62.47	0.018
2O3%	1497	0.00200	50	2.36	100	6.3	24.95	0.0358	62.48	0.029
3O5%	1497	0.00200	50	2.62	100	7.7	24.95	0.0384	62.48	0.032
3 Hp, isolated Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1497	0.00200	50	2.07	100	1.8	24.95	0.0335	62.48	0.012
1U1%	1496	0.00267	50	1.98	100	3.7	24.93	0.0341	62.47	0.018
2U3%	1497	0.00200	50	1.83	100	6.3	24.95	0.0382	62.48	0.029
3U5%	1497	0.00200	50	1.72	100	7.8	24.95	0.0455	62.48	0.047
1O1%	1496	0.00267	50	2.15	100	4.9	24.93	0.0351	62.47	0.019
2O3%	1497	0.00200	50	2.61	100	7.1	24.95	0.0462	62.48	0.037
3O5%	1497	0.00200	50	2.91	100	7.9	24.95	0.0502	62.48	0.059

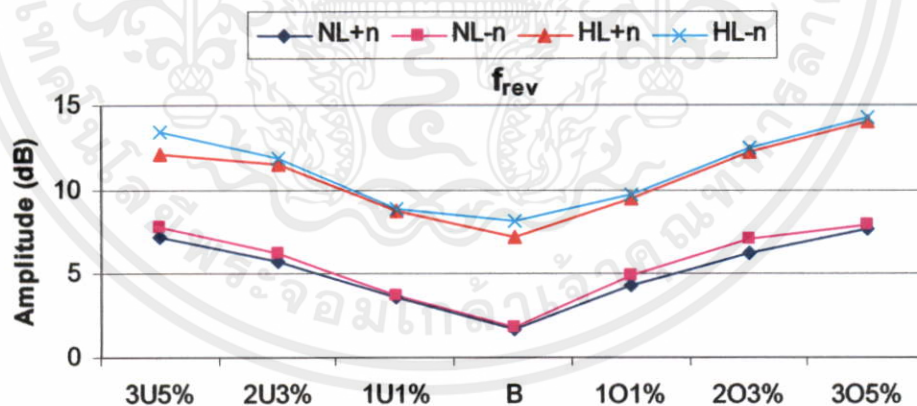
ตารางที่ 4.5 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล

3 Hp, with Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			f _{mmf}		f _{rev}		f _v		f _{de (k=1)}	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1475	0.01667	50	3.42	100	7.24	24.58	0.201	62.29	0.238
1U1%	1470	0.02000	50	2.34	100	8.81	24.50	0.212	62.25	0.342
2U3%	1463	0.02467	50	2.13	100	11.49	24.38	0.256	62.19	0.359
3U5%	1461	0.02600	50	2.01	100	12.06	24.35	0.265	62.18	0.368
1O1%	1470	0.02000	50	3.56	100	9.43	24.50	0.222	62.25	0.282
2O3%	1467	0.02200	50	4.58	100	12.26	24.45	0.237	62.23	0.381
3O5%	1465	0.02333	50	5.14	100	14.02	24.42	0.281	62.21	0.397
3 Hp, isolated Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1452	0.03200	50	5.05	100	8.11	24.20	0.221	62.10	0.237
1U1%	1450	0.03333	50	4.32	100	8.37	24.17	0.242	62.08	0.332
2U3%	1445	0.03667	50	3.66	100	11.94	24.08	0.272	62.04	0.343
3U5%	1446	0.03600	50	2.81	100	13.47	24.10	0.292	62.05	0.365
1O1%	1451	0.03267	50	5.57	100	9.72	24.18	0.251	62.09	0.285
2O3%	1450	0.03333	50	6.99	100	12.47	24.17	0.274	62.08	0.397
3O5%	1447	0.03533	50	7.72	100	14.26	24.12	0.308	62.06	0.414



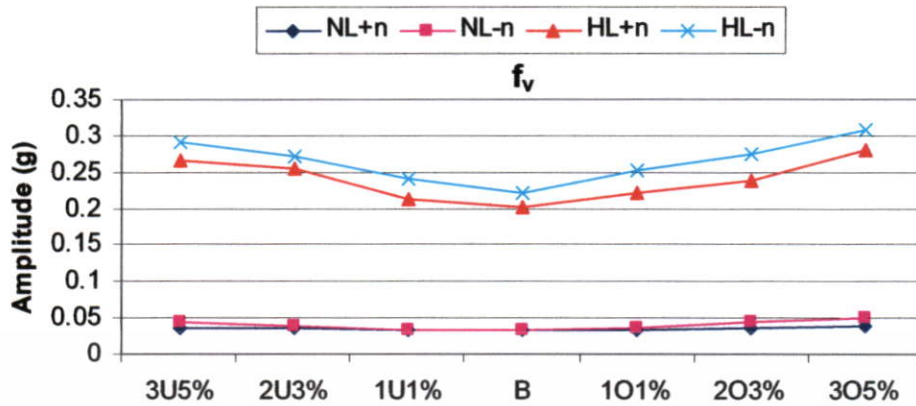
รูปที่ 4.48 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 3 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะแปรผันตามสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลดต่ำลง และเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



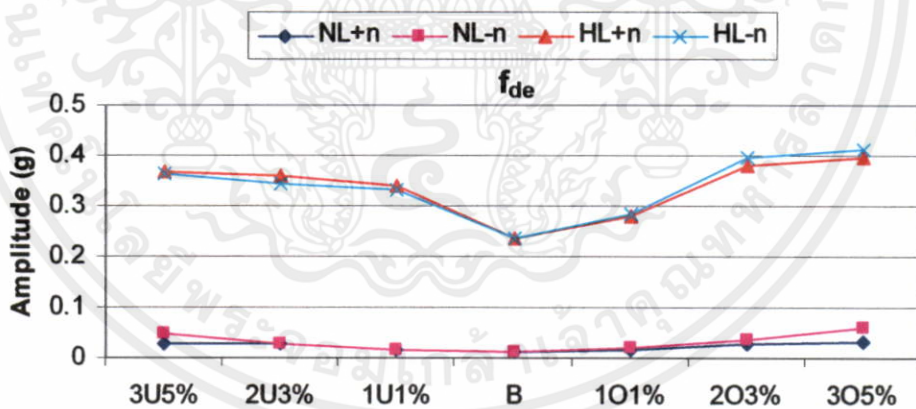
รูปที่ 4.49 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนที่สูงกว่าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



รูปที่ 4.50 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



รูปที่ 4.51 สเปกตรัมความถี่พลวัตของช่องอากาศเชิงศูนย์ของมอเตอร์ 3 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.51 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่พลวัตของช่องอากาศเชิงศูนย์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่พลวัตของช่องอากาศเชิงศูนย์ที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)

4.5.6.3 ค่าสเปกตรัมความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ 5 แรงม้า

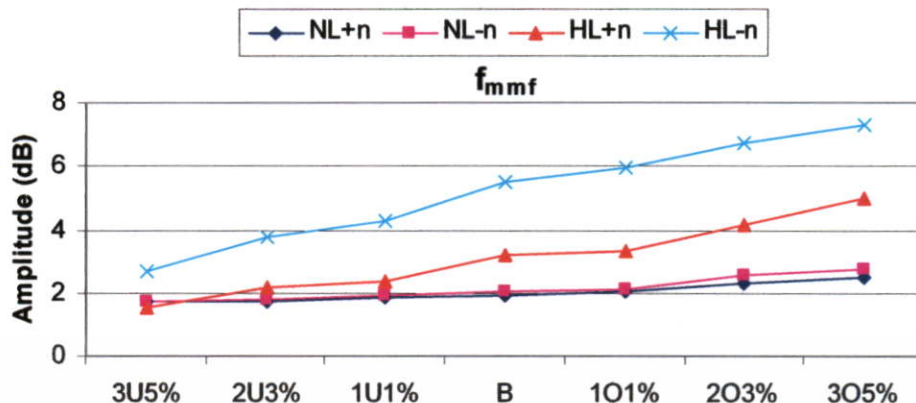
ตั้งแต่รูปที่ 4.30 ถึง 4.43 แสดงผลการทดสอบของมอเตอร์ 5 แรงม้า, สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กและการสั่นสะเทือน นำมาเขียนค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล ได้ดังตารางที่ 4.6 และขณะขับโหลด 50 % แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 5 แรงม้า ขณะไม่ขับโหลด แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล

5 Hp, with Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			f _{mmf}		f _{rev}		f _v		f _{de (k=1)}	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1498	0.00133	50	1.92	100	1.3	24.97	0.0316	62.48	0.009
1U1%	1498	0.00133	50	1.84	100	3.2	24.97	0.0323	62.48	0.012
2U3%	1496	0.00267	50	1.75	100	5.1	24.93	0.0347	62.47	0.023
3U5%	1496	0.00267	50	1.71	100	6.3	24.93	0.0358	62.47	0.026
1O1%	1498	0.00133	50	2.03	100	4.1	24.97	0.0331	62.48	0.016
2O3%	1497	0.00200	50	2.28	100	5.8	24.95	0.0349	62.48	0.024
3O5%	1496	0.00267	50	2.51	100	6.7	24.93	0.0376	62.47	0.029
5 Hp, isolated Neutral, No-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1497	0.00200	50	2.03	100	1.6	24.95	0.0331	62.48	0.011
1U1%	1497	0.00200	50	1.94	100	3.5	24.95	0.0339	62.48	0.016
2U3%	1496	0.00267	50	1.78	100	5.9	24.93	0.0376	62.47	0.024
3U5%	1497	0.00200	50	1.75	100	7.1	24.95	0.0448	62.48	0.041
1O1%	1497	0.00200	50	2.12	100	4.4	24.95	0.0352	62.48	0.018
2O3%	1496	0.00267	50	2.57	100	6.5	24.93	0.0418	62.47	0.035
3O5%	1496	0.00267	50	2.77	100	7.3	24.93	0.0498	62.47	0.055

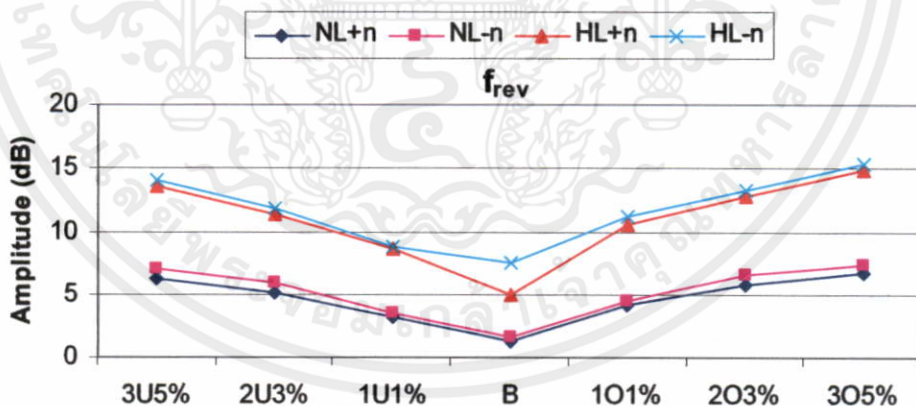
ตารางที่ 4.7 ค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่สภาวะต่าง ๆ ของมอเตอร์ 5 แรงม้า ขณะขับโหลด 50% แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรัล

5 Hp, with Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	MMF				Vibration			
			f _{mmf}		f _{rev}		f _v		f _{de (k=1)}	
			(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1468	0.02133	50	3.18	100	5.04	24.47	0.187	62.23	0.201
1U1%	1468	0.02133	50	2.34	100	8.81	24.47	0.212	62.23	0.332
2U3%	1463	0.02467	50	2.19	100	11.35	24.38	0.217	62.19	0.347
3U5%	1463	0.02467	50	1.52	100	13.66	24.38	0.231	62.19	0.365
1O1%	1469	0.02067	50	3.33	100	10.57	24.48	0.219	62.24	0.343
2O3%	1467	0.02200	50	4.13	100	12.79	24.45	0.227	62.23	0.371
3O5%	1469	0.02067	50	4.98	100	14.89	24.48	0.237	62.24	0.381
5 Hp, isolated Neutral, Half-load										
%PUV	Nr (rpm)	Slip (s)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(dB)	(Hz)	(g)	(Hz)	(g)
B	1451	0.03267	50	5.53	100	7.52	24.18	0.204	62.09	0.212
1U1%	1449	0.03400	50	4.32	100	8.37	24.15	0.221	62.08	0.328
2U3%	1445	0.03667	50	3.76	100	11.81	24.08	0.251	62.04	0.351
3U5%	1445	0.03667	50	2.69	100	14.13	24.08	0.273	62.04	0.378
1O1%	1451	0.03267	50	5.97	100	11.16	24.18	0.235	62.09	0.346
2O3%	1449	0.03400	50	6.71	100	13.24	24.15	0.264	62.08	0.375
3O5%	1447	0.03533	50	7.32	100	15.36	24.12	0.311	62.06	0.384



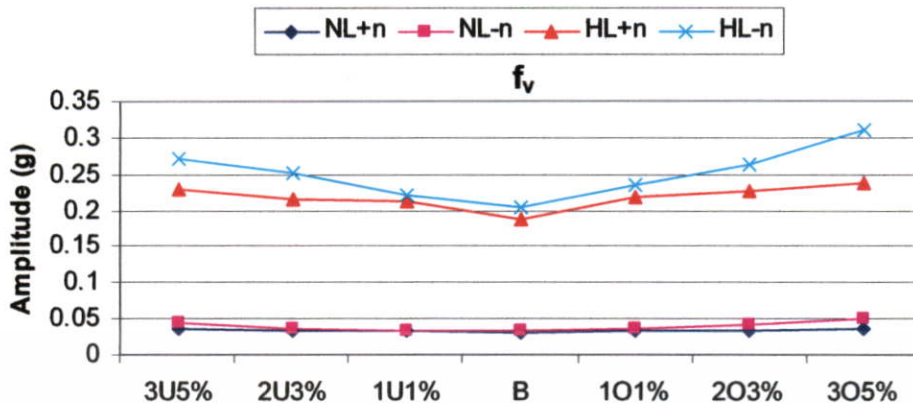
รูปที่ 4.52 สเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ 5 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.52 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะแปรผันตามสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลดต่ำลง และเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ จะทำให้ค่าสเปกตรัมความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



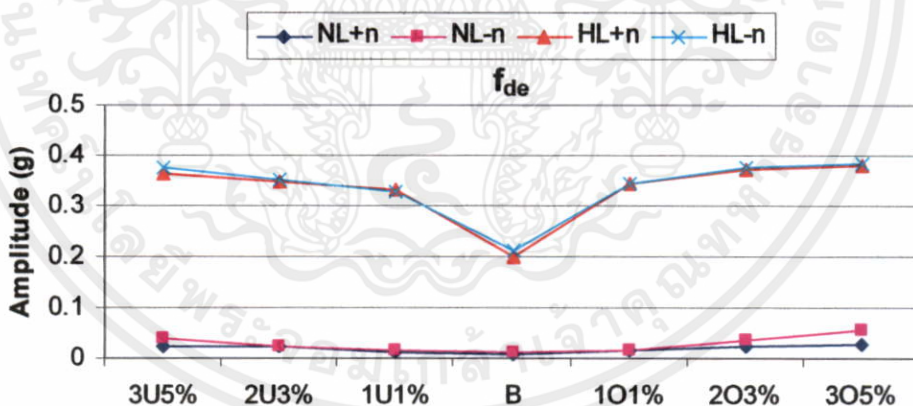
รูปที่ 4.53 สเปกตรัมความถี่ฮาร์โมนิกของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 5 แรงม้าที่สถานะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.53 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุนที่สูงกว่าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)



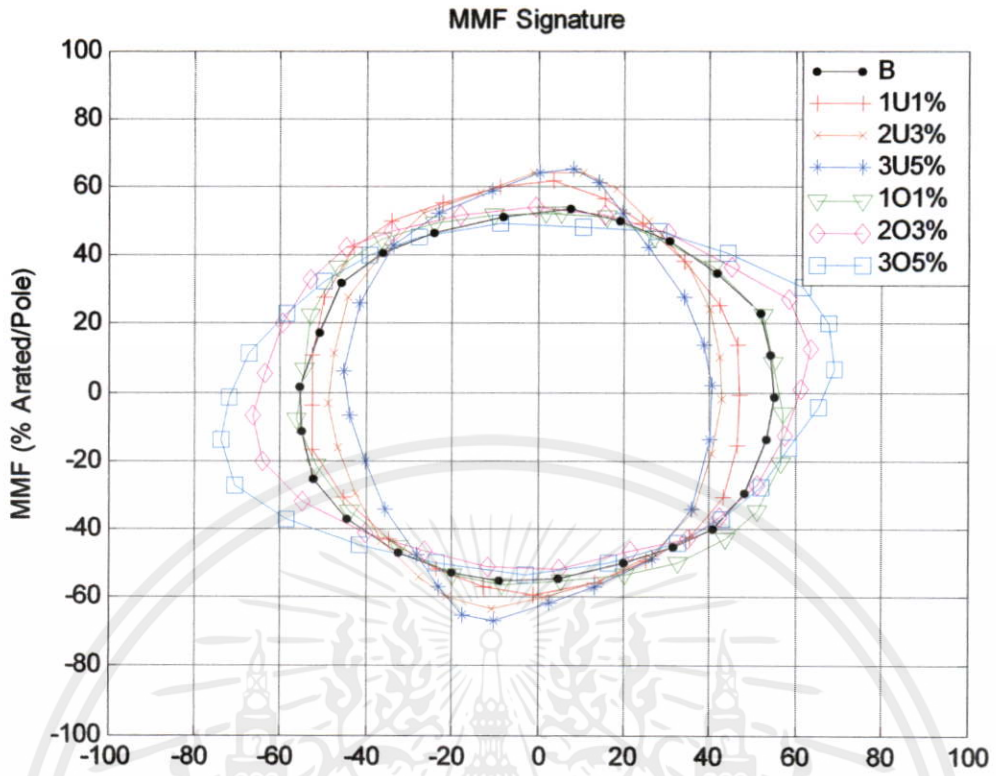
รูปที่ 4.54 สเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 5 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.54 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)

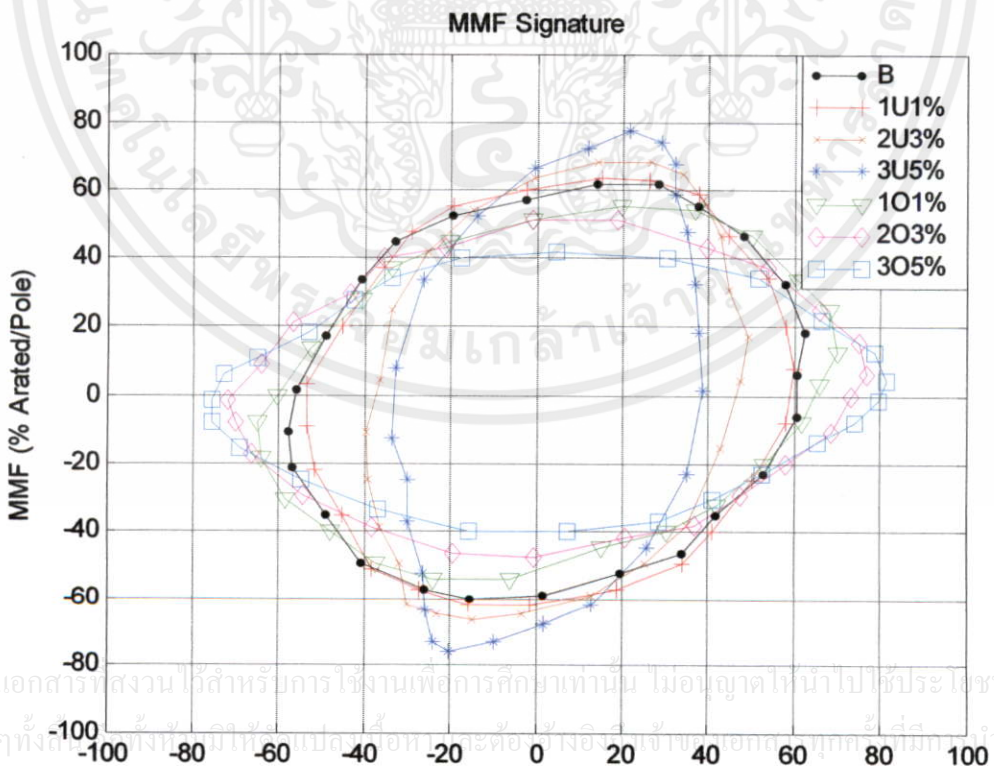


รูปที่ 4.55 สเปกตรัมความถี่ปลั้วตรของช่องอากาศเชิงศูนย์ของมอเตอร์ 5 แรงม้าที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.55 แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัมความถี่ปลั้วตรของช่องอากาศเชิงศูนย์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมความถี่ปลั้วตรของช่องอากาศเชิงศูนย์ที่สูงกว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)

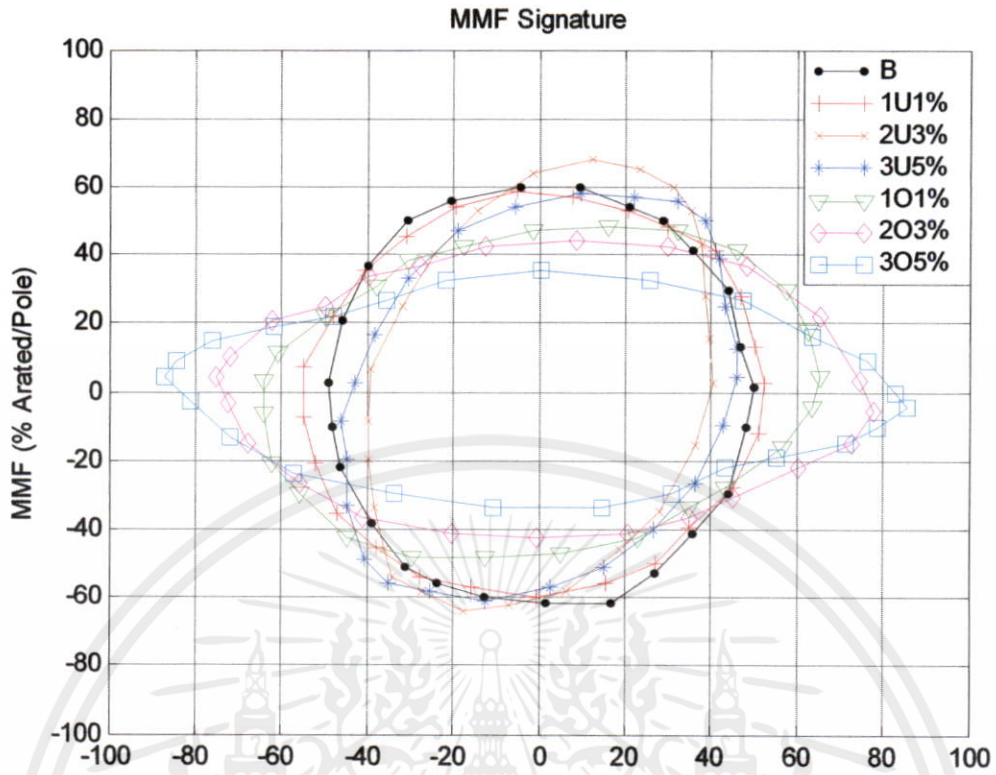


รูปที่ 4.56 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%

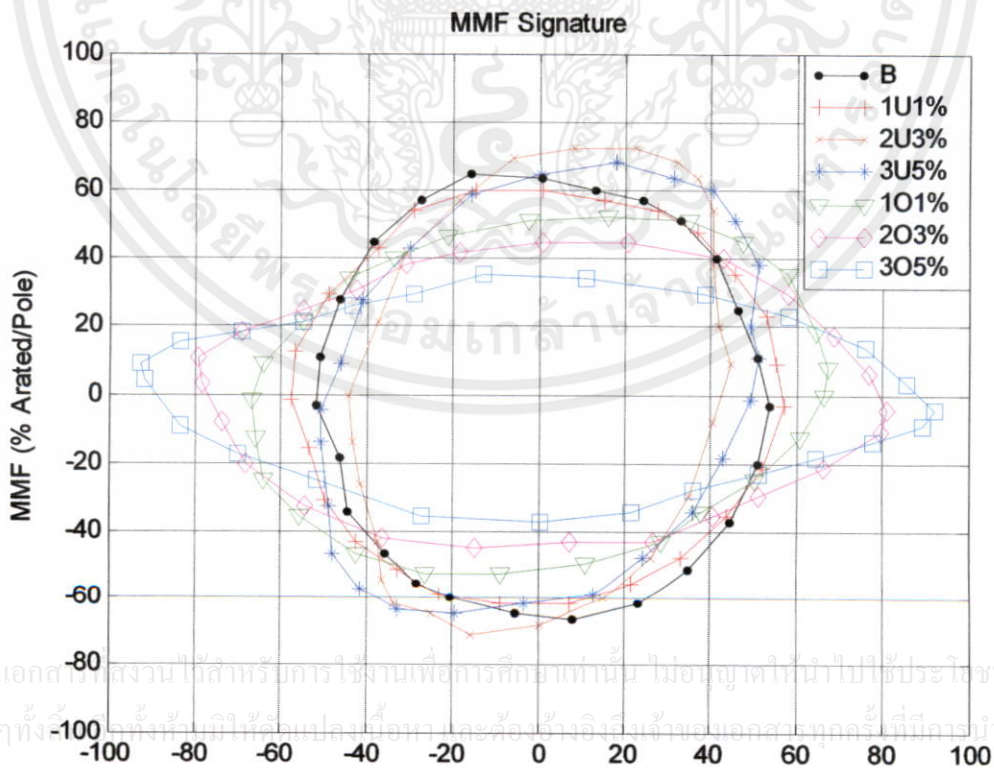


รูปที่ 4.57 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงชื่อหนังสือและหัวข้ออ้างอิงเข้าสู่ระบบเอกสารของคณะศึกษาศาสตร์ได้ไปใช้

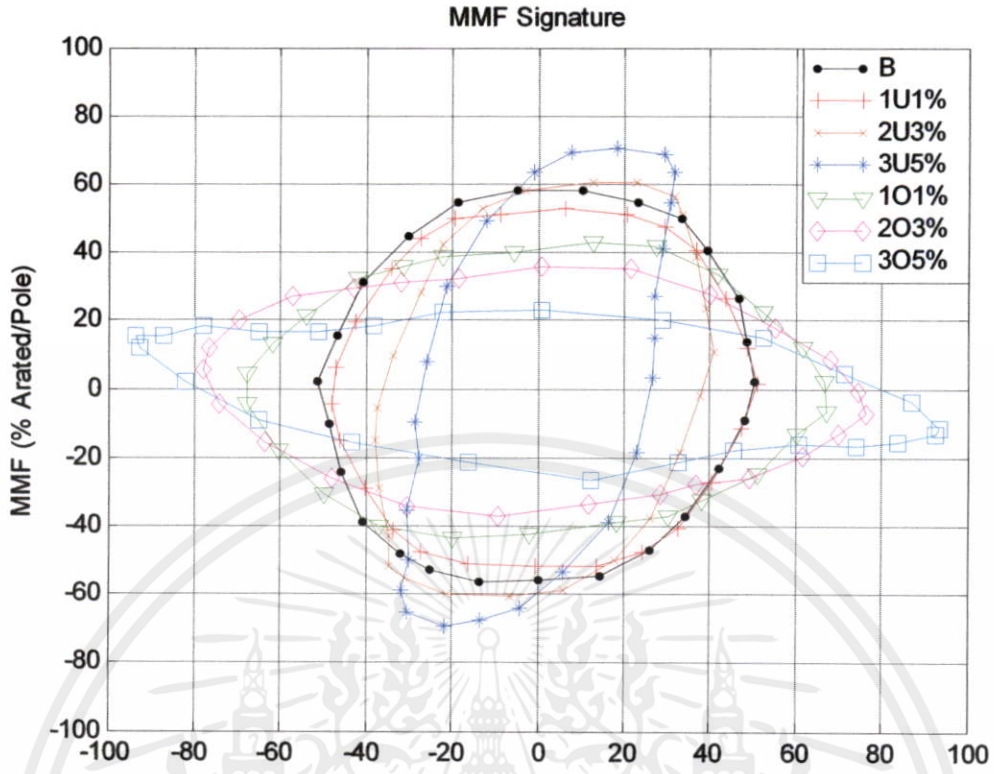


รูปที่ 4.58 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%

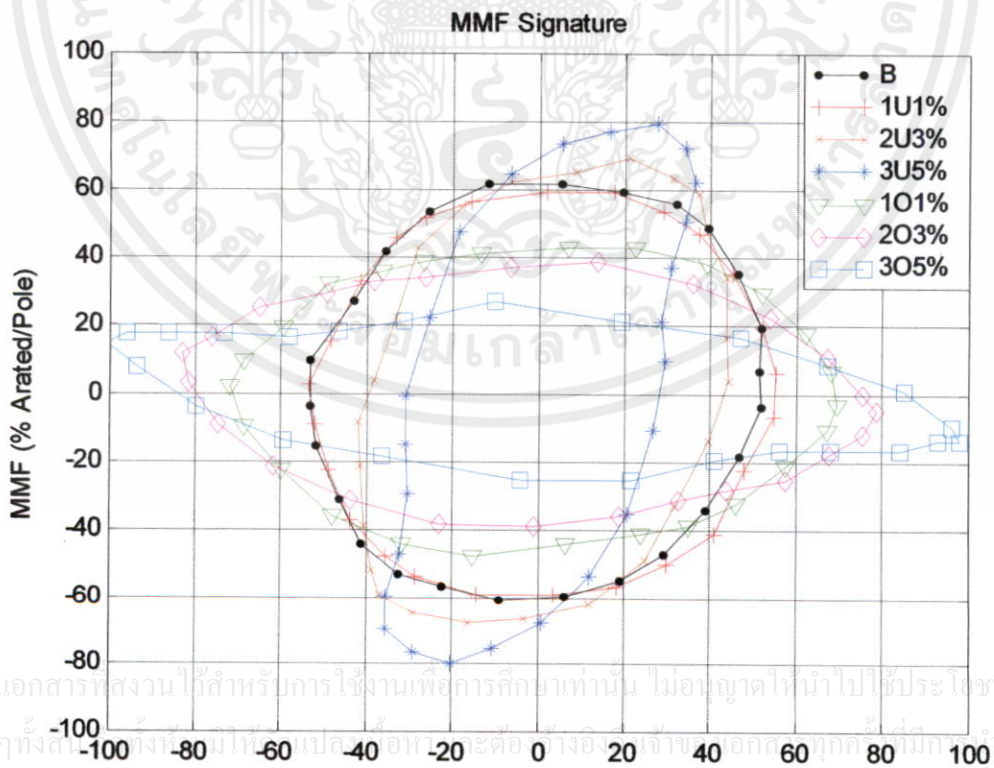


รูปที่ 4.59 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากพบการละเมิดลิขสิทธิ์ กรุณาแจ้งไปยังฝ่ายกฎหมายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 4.60 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%



รูปที่ 4.61 แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรวมของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้วโหลด 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและขอให้อภัยไว้ก่อน

จากรูปที่ 4.56 ถึง 4.61 แสดงลักษณะการกระจายของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์พิกัด 1, 3, และ 5 แรงม้า แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล ขั้ว โหลด 50% ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะมีลักษณะบิดเบี้ยวไปจากสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล ซึ่งขนาดและทิศทางของการบิดเบี้ยวขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ต่ำกว่าปกติหรือสูงกว่าปกติที่เฟสใดบ้าง จำนวนที่เฟส และเปอร์เซ็นต์ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%PUV) และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรอล จะมีขนาดแอมพลิจูดและอัตราการบิดเบี้ยวสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องมาจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence)

จากตารางที่ ค.1 ถึง ค.18 (ภาคผนวก ค) แสดงผลของค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ที่พิกัด 1, 3, และ 5 แรงม้า แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล ขณะไม่ขั้ว โหลดและขั้ว โหลด 50%, 100% ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% อย่างละเอียด ตามลำดับสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อมอเตอร์ยังไม่มีขั้ว โหลด แม้ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล แบบต่อและไม่ต่อสายนิวทรอล ค่าการสั่นสะเทือนมีค่าน้อยมากอยู่ที่ $< 0.1g$ อยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่เรียบ (Smooth, ภาคผนวก ข), เมื่อมอเตอร์มีการขั้ว โหลด 50% มอเตอร์เริ่มมีการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล มีค่าการสั่นสะเทือนอยู่ที่ $0.25g-0.3g$ อยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่พอใช้ (Fair) และที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (1% ถึง 5%) มีค่าการสั่นสะเทือนอยู่ที่ $> 0.3g-0.4g$ อยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่ขรุขระ (Rough) ตามลำดับของเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%PUV) โดยแบบไม่ต่อสายนิวทรอลมีค่าการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence), และเมื่อมอเตอร์มีการขั้ว โหลด 100% มอเตอร์มีการสั่นสะเทือนมากกว่าขณะไม่ขั้ว โหลด แต่น้อยกว่าขณะขั้ว โหลด 50% เพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากขณะขั้ว โหลด 100% มอเตอร์มีความเร็วรอบลดลงต่ำกว่าขณะขั้ว โหลด 50% จึงเกิดแรงเหวี่ยงเนื่องจากโหลดน้อยกว่า จึงทำให้ค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าเล็กน้อย โดยที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล มีค่าการสั่นสะเทือนอยู่ที่ $0.2g-0.25g$ อยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่พอใช้ (Fair) และที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (1% ถึง 5%) มีค่าการสั่นสะเทือนอยู่ที่ $> 0.25g-0.35g$ อยู่ในขอบเขตของการสั่นสะเทือนที่พอใช้ (Fair) ถึงขรุขระ (Rough) ตามลำดับของเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%PUV) โดยแบบไม่ต่อสายนิวทรอลมีค่าการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าแบบต่อสายนิวทรอล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จากสัญญาณกระแส 3 เฟส นำมาคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ และเขียนโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อวิเคราะห์หาค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ จากการทดสอบ สามารถทำนายได้ถึงค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อถูกใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ โดยได้ผลสรุปว่าค่าความถี่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf frequency : f_{mmf}) มีค่าเป็น 1 เท่า (ลำดับที่ 1^{st} , 3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} , ...) ของความถี่ไฟฟ้าหลัก (supply frequency : f_s) และขนาดแอมพลิจูดจะแปรผันลดลงหรือสูงขึ้นตามสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ต่ำกว่าปกติหรือสูงกว่าปกติปกติ ตามลำดับ และขณะเดียวกันจะทำให้เกิดค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field frequency : f_{rev}) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากค่ากระแส 3 เฟสที่ไม่สมดุล มีค่าเป็น 2 เท่า (ลำดับที่ 2^{nd} , 4^{th} , 6^{th} , 8^{th} , ...) ของความถี่ไฟฟ้าหลัก ซึ่งขนาดแอมพลิจูดจะแสดงให้เห็นชัดเจนเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%PUV > 1%) โดยที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติที่ %PUV เดียวกัน และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรัล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรัล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence) และขณะเดียวกันค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับค่าความถี่โรเตอร์หมุน (rotor frequency : f_r) มีค่าเป็น $(1 - s)$ เท่าของความถี่หมุนทางกล (rotational mechanical frequency : f_m) ขนาดแอมพลิจูดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (%PUV > 1%) โดยที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าที่สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติที่ %PUV เดียวกัน และผลการทดสอบแบบไม่ต่อสายนิวทรัล จะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าแบบต่อสายนิวทรัล เนื่องจากผลของลำดับลบของระบบ (negative sequence) ความถี่ของการสั่นสะเทือนนี้เป็นผลมาจากเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนมีความไม่สม่ำเสมอตลอดรอบการหมุน ส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด ทำให้มอเตอร์หมุนแบบไม่ราบรื่น และด้วยพฤติกรรมของการหน่วงและกระชากของความเร็วยังทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อมอเตอร์ใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เป็นผลทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น โดยใช้หลักการสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายถึงพฤติกรรมการแกว่งของแรงบิดภายในช่องอากาศ ที่

เกิดขึ้นเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากความไม่สมดุลของกระแส 3 เฟสที่ป้อนจ่าย เป็นผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด (Torque Pulsation) และอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งมุมเฟสนั้น ๆ ลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง ทำให้มอเตอร์มีพฤติกรรมการหมุนของโรเตอร์เป็นแบบหว่งและกระชากอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นที่มาของสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น และเมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของการสั่นสะเทือน พบว่าผลจากการวิเคราะห์สัญญาณทั้งสองนั้นมีผลที่สอดคล้องในทิศทางเดียวกัน จึงแสดงให้เห็นว่าเมื่อมอเตอร์ใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ดังนั้นเทคนิคการหาค่าการสั่นสะเทือนวิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและง่ายในการตรวจวัด โดยสามารถใช้วัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ได้ เพียงแค่ใช้โพรบวัดค่ากระแสของมอเตอร์และออสซิลโลสโคปที่สามารถบันทึกค่าได้แทนการใช้หัววัดการสั่นสะเทือนแบบเดิม จากทฤษฎีและผลสรุปข้างต้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานบำรุงรักษาได้ โดยพิจารณาจากอัตราการใช้งานมอเตอร์ภายใต้สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมาน้อยเพียงใด และเป็นระยะเวลาานเท่าไรแล้วเพื่อการวางแผนงานบำรุงรักษาได้อย่างทันท่วงทีในเวลาที่เหมาะสม เพื่อลดค่าความสูญเสียโอกาสในการผลิต หากมอเตอร์หยุดการทำงานอย่างฉับพลัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในระหว่างทำการทดสอบ สามารถเกิดความคิดพลาดได้เนื่องจาก การปรับค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะขณะมอเตอร์ขับโหลด เนื่องจากเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อุปกรณ์แหล่งจ่ายแรงดัน และการกระเพื่อมของแหล่งจ่ายภายนอก แต่ได้พยายามปรับให้คงที่ตลอดเวลา

ในการคำนวณและวิเคราะห์สัญญาณ ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการประมวลผล และแสดงผลสเปกตรัมความถี่ และใช้โปรแกรม EXCEL ในการทำข้อมูลทำรูปกราฟต่าง ๆ บางส่วนในการวิจัยและพัฒนาต่อไป ควรที่จะเขียนเป็น โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อความสะดวกในการคำนวณและแสดงผล และควรศึกษาความผิดปกติของมอเตอร์เนื่องจากสาเหตุอื่น ๆ เพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Dennis B., Jim C., Robert A. "IEEE 841 Motor Vibration." **IEEE Transactions on PCIC-2003**. 12 Dec 2003. pp. 121-126.
- [2] IEEE Std. 141-1993. "IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants." **IEEE**. 1993. pp. 89-91.
- [3] William T. Thomson, Ronald J. Gilmore. "Motor Current Signal Analysis to Detect Fault in Induction Motor Drives-Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories." **Proceedings of the Thirty-Second Turbo Machinery Symposium 2003**. Aug 2003. pp. 147-156.
- [4] Voitto Kokko. "Condition Monitoring of Squirrel-Cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements." **Faculty of Technology, University of Oulu, Finland**. 14 March 2003. pp. 1-157.
- [5] รัชต มั่งมีชัย, พิชิต ลำยอง, ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. "การศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่ปกติ." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21. ปีที่ 21, พฤศจิกายน 2541. หน้า 385-388.
- [6] รัชต มั่งมีชัย. "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543. หน้า 1-54.
- [7] ณรงค์เดช ยะลาไสย์, พิชิต ลำยอง. "การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30. ปีที่ 30, ตุลาคม 2550. หน้า 17-20.
- [8] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans. **ELECTRIC MACHINERY**. McGraw-Hill Book Company. 1992. pp. 147-207, 321-381.
- [9] Stephen J. Chapman. **ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS**. McGraw-Hill Book Company. 1988. pp. 1-35, 231-266.
- [10] Grainger J. Jon, Stwenson Jr. D. William. **POWER SYSTEM ANALYSIS**. New York : McGraw-Hill Book Company. 1994. pp. 135-187.
- [11] ISO 10816-2 2001 "Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - P.2 : Land-based steam turbines and generators in excess to 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min

บรรณานุกรม (ต่อ)

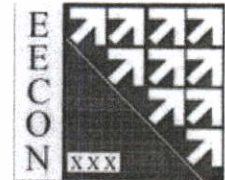
- and 3600 r/min.” **International Organization for Standardization (ISO). 2nd ed. Geneva: ISO, 2001. pp. 45.**
- [12] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo. “A DSP-based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis.” **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest Hungary.** May 2001, pp. 572-577.
- [13] Benbouzid MH., Vieira M., Theys C. “Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques.” **IEEE Transactions on Power Electronics.** Jan 1999, pp. 14-22.
- [14] Dorrell DG., Thomson WT., Roach S. “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.” **IEEE Transactions on Industry Applications.** Jan 1997, pp. 24-34.
- [15] Elkasabgy NM., Eastham AR., Dawson GE. “Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine.” **IEEE Transactions on Industry Applications.** Jan 1992, pp. 165-171.
- [16] Joksimovic GM., Penman J. “The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors.” **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** May 2000, pp. 1078-1084.
- [17] Riley CM., Lin BK., Habetler TG., Schoen RR. “A method for sensorless on-line vibration monitoring of induction machines.” **IEEE Transactions on Industry Applications.** June 1998, pp. 1240-1245.
- [18] Riley CM., Lin BK., Habetler TG., Kliman GB. “Stator current harmonics and their causal vibrations a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications.” **IEEE Transactions on Industry Applications.** Jan 1999, pp. 94-99.
- [19] Weyand K., Bosse V. “Fluxgate magnetometer for low-frequency magnetic electromagnetic compatibility measurements.” **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.** Feb 1997, pp. 617-620.
- [20] Steve Goldman. “Vibration spectrum analysis a practical approach 2nd edition.” **Industrial press.** 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



30th Electrical Engineering Conference (EECON-30)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30
25-26 ตุลาคม 2550 ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี

ABB

Seagate 



FACULTY OF ENGINEERING

NECTEC
a member of NSTDA



KMUTT
EECON - 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์แรงเค้นแม่เหล็กเพื่อตรวจับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
 MMF Analysis for Vibration Detection of Induction Motors Under Conditions of Unbalance Voltage

ณรงค์เดช ละเอียด และ พิชิต คำทอง

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร.0-2326-4175 โทรสาร.0-2326-4175 E-mail:narongdej@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบหาการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ที่เป็นผลมาจากการใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยใช้เทคนิคการวัดค่ากระแส 3 เฟสและใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายพฤติกรรมการแกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเค้นแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และขณะเดียวกันใช้วิธีวัดความถี่วัดค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยตรง บทความนี้ทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยวิธีการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ของแรงเค้นแม่เหล็กเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของการสั่นสะเทือน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมอเตอร์ใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และการหาค่าการสั่นสะเทือนโดยวิธีนี้เป็นทางเลือกวิธีหนึ่งที่จะสะดวกและง่ายในการตรวจวัด

คำสำคัญ : แรงเค้นแม่เหล็ก, การสั่นสะเทือน, แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

Abstract

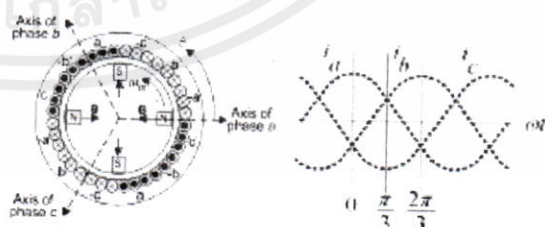
This paper presents the experimental results of vibration in induction motors 3 phase cause by under unbalanced voltage condition. Using a measurement technique based on 3 phase current and using the rotating magnetic field theory is applies to explain the behavior of pulsation of torque that built by uneven of magneto motive force (mmf) which cause the vibration and at the same time using the accelerometer measures the vibration. A 1 hp IM is used to examine in the experimental. The IM operation under balanced voltage and unbalanced voltage. Finally the testing result each will be later compared which show the spectral by FFT method of mmf and vibration to illustrate that the IM under unbalanced voltage is the cause of the vibration and the proposed of vibration estimation technique is alternative way for convenient and easy to measurement.

Keywords : mmf, vibration, unbalanced voltage

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส เป็นเครื่องจักรกลที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบสภาพการบำรุงรักษาตามสภาพ เพื่อใช้บ่งบอกถึงความผิดปกติต่างๆ อย่างของเครื่องจักรกล ซึ่งสาเหตุของการสั่นสะเทือนหลายประการ พบว่ามีสาเหตุมาจากทางกลศาสตร์ และเมื่อทำการแก้ไขทางกลศาสตร์แล้ว บ่อยครั้งยังคงพบว่าการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้อบกพร่องทางไฟฟ้านั่นเอง โดยทั่วไปการหาค่าการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยวิธีการวัดค่าจากวิธีวัดการสั่นสะเทือน (ระยะทาง, ความเร็ว, ความเร่ง) ซึ่งต้องติดตั้งกับตัวโครงของมอเตอร์ ทำให้ไม่สะดวกและสิ้นเปลืองหากต้องติดตั้งกับมอเตอร์ทุกตัว บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการหาค่าการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยใช้เทคนิคการวัดค่ากระแส 3 เฟส และใช้หลักการคำนวณสนามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายพฤติกรรมการแกว่งของแรงบิดเนื่องจากแรงเค้นแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดพัลส์ของโมเมนต์บิด (Torque Pulse) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น และใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เป็นเครื่องมือช่วยทำการวิเคราะห์หาค่าสเปกตรัม วิธีนี้จึงเป็นทางเลือกวิธีหนึ่งที่จะสะดวกและง่ายในการตรวจวัด

2. ทฤษฎีสถานแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 1. (ก) การวางขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (ข) กระแสสมดุล 3 เฟส

พื้นฐานของเครื่องจักรกล 3 เฟส ประกอบด้วยขดลวดชุดขดขั้วและชุดขั้วขนาดเท่ากันและวางที่มุมเฟสต่างกัน 120 องศาไฟฟ้า กระแสที่ไหลในขดลวดทั้ง 3 เฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่มีขนาดคงที่ [1-2] สามารถเขียนได้ดังสมการ

PW05

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (1)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (3)$$

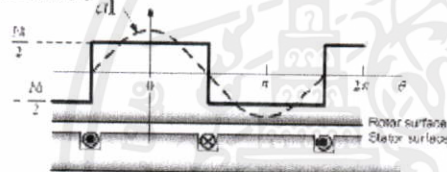
เมื่อ I_m คือ ค่าสูงสุดของกระแสที่ผ่านขดลวดในแต่ละเฟส โดยกำหนดเวลาเริ่มต้นให้เฟส a เป็นแกนอ้างอิงอยู่ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ณ เวลา t โดย และลำดับเฟสมีค่าเป็น abc, ค่ากระแสแต่ละขดลวด 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 1.

กระแสที่ไหลในแต่ละเฟส จะสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นตลอดแนวความยาวของร่องอากาศ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$H = \frac{N i}{g} \quad (4)$$

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก, N คือ แรงแลลิตอนแม่เหล็ก (mmf), และ g คือ ความยาวของร่องอากาศ, จากรูปที่ 2. เมื่อพิจารณาขดลวดเส้นสี่เหลี่ยมของแรงแลลิตอนแม่เหล็กโดยการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ สามารถเขียนได้ดังสมการ

Fundamental



รูปที่ 2. แรงแลลิตอนแม่เหล็กของขดลวดพันแบบจัดเป็นเฟส

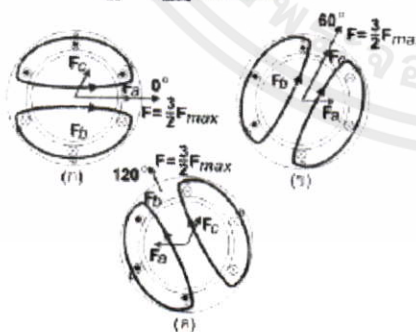
$$H_{a1} = \frac{N_a i_a}{g} = \frac{4 N_a I_m}{\pi g} \cos \theta \quad (5)$$

$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} k_d \frac{N_{ph}}{F_g} i_a \cos \theta \quad (6)$$

เมื่อ N_{ph} คือ จำนวนรอบขดลวดอนุกรมต่อเฟส, k_d คือ แฟคเตอร์ของการพันขดลวด, θ คือ ตำแหน่งของมุมโคง ในมอเตอร์

$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} k_d \frac{N_{ph}}{F_g} I_m \cos \theta \quad (7)$$

$$H_{a1} = (F_{max} \cos \theta) \cos \omega t \quad (8)$$



รูปที่ 3. สนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างจากกระแส 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สามารถพิจารณาหาค่าแรงแลลิตอนแม่เหล็กทั้ง 3 เฟส ได้ดังสมการ

$$H_{a1} = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) - \frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) \right] \quad (9)$$

$$H_{b1} = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) - \frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t - 120^\circ) \right] \quad (10)$$

$$H_{c1} = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) - \frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t - 240^\circ) \right] \quad (11)$$

$$H(\theta, t) = H_{a1} + H_{b1} + H_{c1} \quad (12)$$

$$\therefore H(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) \quad (13)$$

3. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

บทความนี้ได้ควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามขดลวดและไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำผลของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะแหล่งจ่ายในสถานะต่างๆ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามขดลวด ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ผิดปกติบนเพลทของมอเตอร์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ สามขดลวดทั้ง 3 เฟส

กรณีที่ 2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล [3] เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง [4] เช่น กระแส สลัด และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การทดสอบการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล บทความนี้จะพิจารณาเฉพาะผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่านั้น

$$\%P_{TV} = \frac{(V_{avg} - V_{max})}{V_{avg}} \quad (14)$$

$$V_{avg} = \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \quad (15)$$

เมื่อ $\%P_{TV}$ คือ เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

V_{avg} คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย, V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ตามมาตรฐาน NEMA MG-1-1993 กำหนดไว้ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ป้อนจ่ายให้กับมอเตอร์ควรมีค่าไม่เกิน 1%

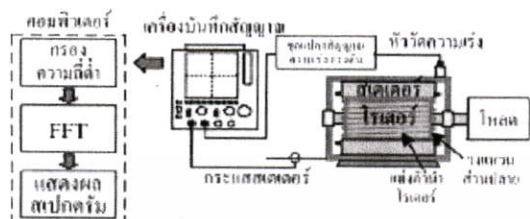
%P _{TV}	T _a	T _b	T _c	สัญลักษณ์	ความหมาย
0%	220	220	220	B	แรงดันไฟฟ้าสมดุล
1%	216	220	220	1U_1%	แรงดันไฟฟ้าค่า 1 เฟส 1%
1%	224	220	220	1O_1%	แรงดันไฟฟ้าสูง 1 เฟส 1%
1.5%	210	210	220	2U_1.5%	แรงดันไฟฟ้าค่า 2 เฟส 1.5%
1.5%	230	230	220	2O_1.5%	แรงดันไฟฟ้าสูง 2 เฟส 1.5%
2%	205	210	215	3U_2%	แรงดันไฟฟ้าค่า 3 เฟส 2%
2%	235	230	227	3O_2%	แรงดันไฟฟ้าสูง 3 เฟส 2%

ตารางที่ 1. ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สถานะต่างๆ

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีขนาดติดตั้ง 220/380 โวลต์, 50 เฮิร์ตซ์, 4 โพล, 1 แรงม้า, 3.4/2.0 แอมป์, สมดุล 36 สลัด, โรเตอร์

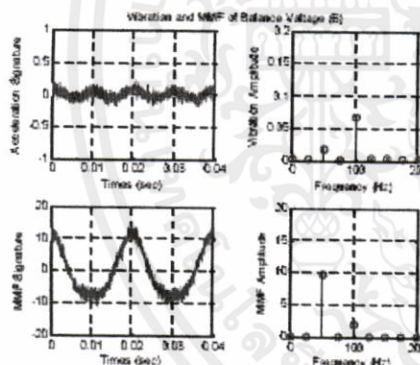
44 สลัด, คือแบบสคาร์ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4. โดยทำการทดสอบเมื่อใช้งานในสถานะแรงดันไฟฟ้าสามขดลวดและไม่สมดุลตามลำดับ



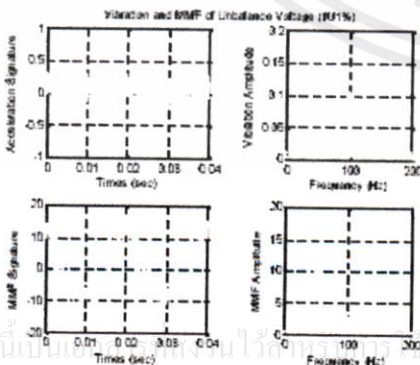
รูปที่ 4. แผนผังวงจรการทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบ

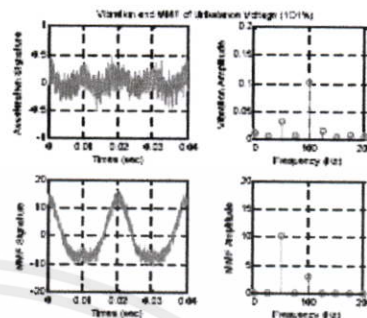
1. ทำการลั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนจ่ายมอเตอร์เปลี่ยนไป (ค่าความแรงที่ 1.) ซึ่งในการทดสอบได้เปรียบการทางกลของมอเตอร์เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 % (เมื่อเทียบกับพิกัดของมอเตอร์) จนถึง 100% แต่ละครึ่งของการเปลี่ยนการทางกล ทำการบันทึกค่าการสั่นสะเทือน แรงดัน กระแส กำลังเข้า แรงบิดที่เพล ความเร็วรอบ กำลังต้านออก นำค่ากระแส 3 เฟสที่วัดได้มาคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กและทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเปรียบเทียบกับการลั่นสะเทือน



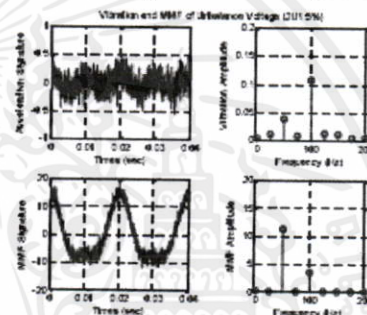
รูปที่ 5. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าสควูล (R1)



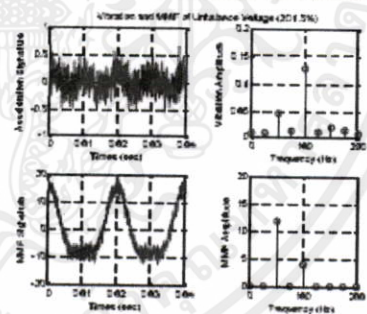
รูปที่ 6. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1U1%)



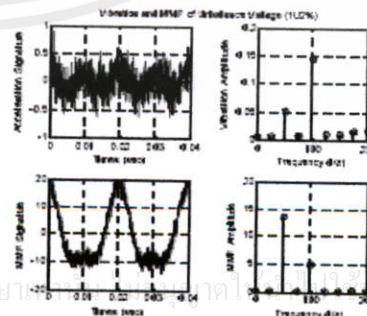
รูปที่ 7. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% (1O1%)



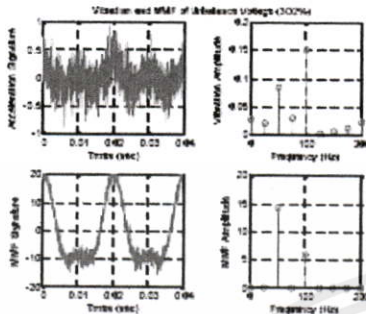
รูปที่ 8. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 1.5% (2U1.5%)



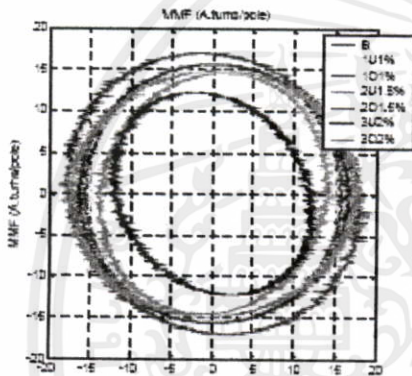
รูปที่ 9. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส 1.5% (2O1.5%)



รูปที่ 10. สเปกตรัมของการลั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 2% (3U2%)



รูปที่ 11. สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 3 เฟส 2% (302%)



รูปที่ 12. แรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์ที่แรงดันไฟฟ้าสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 5-11. แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนและสเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุลที่สภาวะต่างๆ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนและของแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าเป็น 1.2 เท่าของความถี่ไฟฟ้ามูลฐาน ส่วนขนาดความสูงของสเปกตรัมขึ้นอยู่กับค่าความสั่นสะเทือน ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับสภาวะไม่สมดุลที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และจากรูปที่ 12. แสดงให้เห็นว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีลักษณะบิดเบี้ยวไปจากสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล ซึ่งขนาดและทิศทางของการบิดเบี้ยวขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าปกติ จำนวนเฟส และไม่สมดุลก็เปอร์เซ็นต์

5. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล พบว่าค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นมีค่าเป็น 1.2 เท่าของความถี่ไฟฟ้า และเมื่อสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลกันมากๆ จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้น ทำให้ขนาดสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนและแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย

ผลจากการทดสอบหาค่าการความสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้หลักการสามแม่เหล็กหมุนช่วยอธิบายถึงพฤติกรรมการแกว่งของแรงบิดภายในร่องอากาศ ที่เกิดเนื่องมาจากความไม่สมดุลของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่สมดุลกัน จึงทำให้เกิดพัลส์ของ โทรมเมนต์บิด (Torque Pulse) และอัตราการผลิตแรงบิดของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งมุมเฟสนั้นๆ สูงขึ้นและลดลงตามค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง จึงเป็นที่มาของสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และเมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก พบว่าผลจากการวิเคราะห์สัญญาณทั้งสองนั้นมีผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี จึงแสดงให้เห็นว่าเมื่อมอเตอร์ใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ดังนั้นเทคนิคการหาค่าการสั่นสะเทือนวิธีนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสะดวกและง่ายในการตรวจวัด โดยสามารถใช้วัดในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ได้ เพียงแค่ใช้โพรบวัดค่ากระแสของมอเตอร์และสโคปที่สามารถบันทึกค่าได้แทนการใช้ตัววัดการสั่นสะเทือนแบบเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery," McGraw-Hill Book Company, 1992, pp 147-207, 321-381.
- [2] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals," McGraw-Hill Book Company, 1988, pp 1-35, 231-266.
- [3] IEEE Std. 141-1993., "IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants," IEEE, 1993, pp. 89-91.
- [4] วิศรุต มั่งนิริช, "การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545.
- [5] Kekko, Votto, "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements," University of Oulu, Finland 2003

ประวัติผู้เขียนบทความ



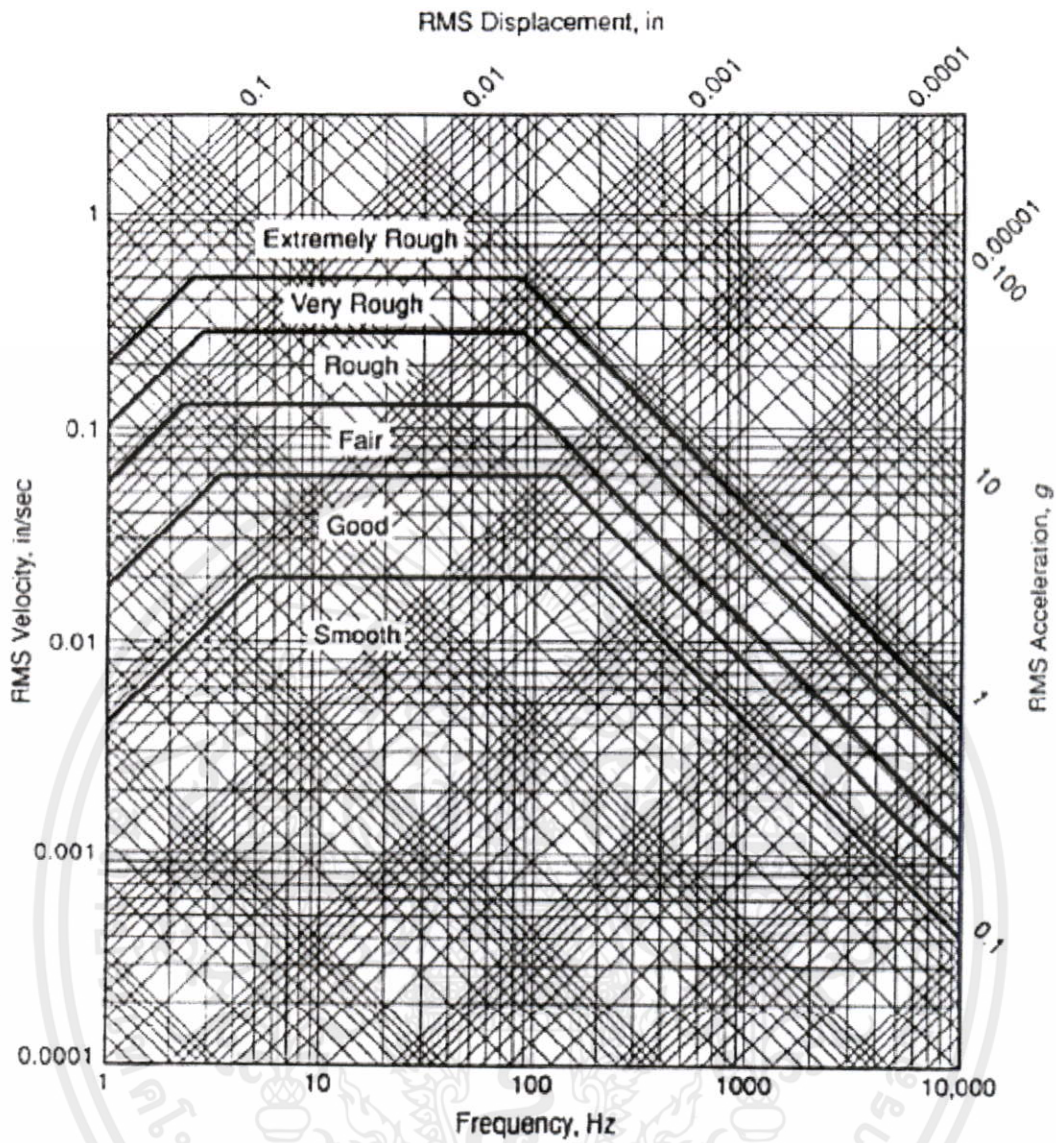
ณรงค์เดช ชาติลาสิทธิ์ สำเร็จการศึกษา วทบ. ไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. โดยทำงานวิจัยทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



พิริศ ลาของ สำเร็จการศึกษา วทบ. และ วทม. ไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. โดยทำงานวิจัยด้านการแปรรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 ผังขอบเขตของการสั่นสะเทือน [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load with Neutron			
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	nr (rpm)	ω (2πf/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.05	1.09	1.06	0	1498	156.79	0.094	0	3.64	0.035
1U1%	216	220	220	0.96	1.1	1.09	0	1498	156.79	0.094	0	3.68	0.035
2U1%	215	217	220	0.93	1.03	1.15	0	1497	156.69	0.093	0	3.71	0.035
3U1%	213	215	218	0.93	1.02	1.11	0	1497	156.69	0.091	0	3.73	0.036
1U2%	213	220	220	0.89	1.12	1.17	0	1497	156.69	0.094	0	3.77	0.036
2U2%	211	216	220	0.89	1.02	1.13	0	1497	156.69	0.091	0	3.79	0.036
3U2%	209	214	218	0.85	1.01	1.14	0	1496	156.58	0.089	0	3.86	0.037
1U3%	210	220	220	0.83	1.13	1.13	0	1497	156.69	0.092	0	3.87	0.037
2U3%	208	215	220	0.82	1.01	1.19	0	1496	156.58	0.089	0	3.98	0.038
3U3%	206	213	218	0.8	1.01	1.18	0	1496	156.58	0.088	0	4.02	0.038
1U4%	207	220	220	0.78	1.14	1.15	0	1496	156.58	0.092	0	4.05	0.039
2U4%	204	214	220	0.75	1.03	1.22	0	1496	156.58	0.091	0	4.07	0.039
3U4%	202	212	218	0.74	1.01	1.22	0	1495	156.48	0.089	0	4.09	0.039
1U5%	204	220	220	0.68	1.97	1.19	0	1496	156.58	0.092	0	4.11	0.039
2U5%	200	213	220	0.68	1.03	1.29	0	1495	156.48	0.091	0	4.11	0.039
3U5%	198	211	218	0.63	0.99	1.3	0	1495	156.48	0.091	0	4.13	0.039
1O1%	224	220	220	1.14	1.06	1.02	0	1498	156.79	0.098	0	3.75	0.036
2O1%	225	223	220	1.14	1.14	1.11	0	1498	156.79	0.101	0	3.77	0.036
3O1%	227	225	222	1.16	1.17	1.01	0	1497	156.69	0.107	0	3.78	0.036
1O2%	227	220	220	1.21	1.05	1.01	0	1498	156.79	0.099	0	3.84	0.037
2O2%	229	224	220	1.22	1.15	0.95	0	1497	156.69	0.102	0	3.88	0.037
3O2%	231	226	222	1.25	1.16	0.99	0	1497	156.69	0.105	0	3.91	0.037
1O3%	230	220	220	1.31	1.03	0.96	0	1497	156.69	0.102	0	3.99	0.038
2O3%	232	225	220	1.33	1.15	0.91	0	1497	156.69	0.106	0	4.03	0.038
3O3%	234	227	222	1.34	1.17	0.96	0	1496	156.58	0.109	0	4.09	0.039
1O4%	233	220	220	1.41	1.02	0.94	0	1497	156.69	0.105	0	4.12	0.039
2O4%	236	226	220	1.42	1.17	0.88	0	1496	156.58	0.111	0	4.15	0.040
3O4%	238	228	222	1.42	1.19	0.91	0	1496	156.58	0.112	0	4.17	0.040
1O5%	236	220	220	1.47	1.01	0.91	0	1497	156.69	0.107	0	4.21	0.040
2O5%	240	227	220	1.53	1.16	0.84	0	1496	156.58	0.115	0	4.28	0.041
3O5%	242	229	222	1.55	1.19	0.86	0	1496	156.58	0.118	0	4.31	0.041

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load Isolated Neutron			
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)	nr (rpm)	ω (2πll/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.08	1.09	1.08	0	1497	156.69	0.097	0	3.78	0.036
1U1%	216	220	220	1.01	1.12	1.11	0	1496	156.58	0.096	0	3.81	0.036
2U1%	215	217	220	0.98	1.09	1.15	0	1495	156.48	0.095	0	3.85	0.037
3U1%	213	215	218	0.96	1.07	1.11	0	1495	156.48	0.092	0	3.86	0.037
1U2%	213	220	220	0.93	1.16	1.21	0	1495	156.48	0.095	0	3.97	0.038
2U2%	211	216	220	0.93	1.05	1.17	0	1496	156.58	0.093	0	3.99	0.038
3U2%	209	214	218	0.89	1.06	1.18	0	1497	156.69	0.094	0	4.06	0.039
1U3%	210	220	220	0.89	1.21	1.11	0	1495	156.48	0.096	0	4.07	0.039
2U3%	208	215	220	0.85	1.21	1.18	0	1496	156.58	0.096	0	4.19	0.040
3U3%	206	213	218	0.84	1.09	1.15	0	1497	156.69	0.093	0	4.26	0.041
1U4%	207	220	220	0.85	1.21	1.22	0	1495	156.48	0.096	0	4.68	0.045
2U4%	204	214	220	0.82	1.11	1.29	0	1495	156.48	0.095	0	4.72	0.045
3U4%	202	212	218	0.81	1.08	1.29	0	1497	156.69	0.094	0	4.88	0.047
1U5%	204	220	220	0.75	1.3	1.15	0	1497	156.69	0.102	0	5.09	0.049
2U5%	200	213	220	0.66	1.21	1.24	0	1495	156.48	0.133	0	5.16	0.049
3U5%	198	211	218	0.65	1.19	1.23	0	1497	156.69	0.129	0	5.19	0.049
1O1%	224	220	220	1.16	1.07	1.09	0	1497	156.69	0.099	0	3.94	0.038
2O1%	225	223	220	1.18	1.11	1.04	0	1497	156.69	0.101	0	3.95	0.038
3O1%	227	225	222	1.21	1.13	1.06	0	1496	156.58	0.101	0	4.01	0.038
1O2%	227	220	220	1.25	1.09	1.05	0	1497	156.69	0.101	0	4.12	0.039
2O2%	229	224	220	1.26	1.19	0.98	0	1495	156.48	0.104	0	4.21	0.040
3O2%	231	226	222	1.29	1.21	1.03	0	1497	156.69	0.107	0	4.23	0.040
1O3%	230	220	220	1.33	0.99	1.07	0	1496	156.58	0.108	0	4.45	0.042
2O3%	232	225	220	1.37	1.07	1.01	0	1495	156.48	0.111	0	4.55	0.043
3O3%	234	227	222	1.39	1.11	1.04	0	1497	156.69	0.112	0	4.63	0.044
1O4%	233	220	220	1.47	1.09	1.01	0	1496	156.58	0.113	0	4.82	0.046
2O4%	236	226	220	1.49	1.24	0.95	0	1497	156.69	0.114	0	4.95	0.047
3O4%	238	228	222	1.49	1.26	0.98	0	1497	156.69	0.117	0	4.97	0.047
1O5%	236	220	220	1.51	0.91	1.13	0	1496	156.58	0.174	0	5.37	0.051
2O5%	240	227	220	1.61	1.05	1.04	0	1497	156.69	0.191	0	5.58	0.053
3O5%	242	229	222	1.64	1.06	1.06	0	1496	156.58	0.195	0	5.71	0.054

ตารางที่ ค.3 ผลการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 1 แรงม้า แบบต่อสายนิวทรัล ขั้วโหลด 50%

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Haft-Load (50%) with Neutron			
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	nr (rpm)	ω (2πn/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.18	1.22	1.19	2.5	1475	154.38	0.467	385.96	31.02	0.296
1U1%	216	220	220	1.01	1.31	1.27	2.5	1470	153.86	0.454	384.65	31.38	0.299
2U1%	215	217	220	1.05	1.17	1.33	2.5	1467	153.55	0.435	383.87	32.13	0.306
3U1%	213	215	218	1.04	1.19	1.29	2.5	1464	153.23	0.462	383.08	33.42	0.319
1U2%	213	220	220	0.93	1.36	1.27	2.5	1467	153.55	0.456	383.87	33.68	0.321
2U2%	211	216	220	0.94	1.18	1.41	2.5	1465	153.34	0.459	383.34	33.96	0.324
3U2%	209	214	218	0.94	1.22	1.36	2.5	1462	153.02	0.463	382.56	34.16	0.326
1U3%	210	220	220	0.87	1.34	1.32	2.5	1465	153.34	0.461	383.34	34.49	0.329
2U3%	208	215	220	0.86	1.22	1.47	2.5	1463	153.13	0.461	382.82	34.52	0.329
3U3%	206	213	218	0.86	1.21	1.41	2.5	1461	152.92	0.463	382.30	35.04	0.334
1U4%	207	220	220	0.79	1.37	1.34	2.5	1466	153.44	0.462	383.60	35.47	0.338
2U4%	204	214	220	0.81	1.23	1.48	2.5	1464	153.23	0.463	383.08	35.56	0.339
3U4%	202	212	218	0.76	1.23	1.47	2.5	1462	153.02	0.461	382.56	36.16	0.345
1U5%	204	220	220	0.72	1.44	1.36	2.5	1464	153.23	0.465	383.08	36.49	0.348
2U5%	200	213	220	0.67	1.24	1.51	2.5	1463	153.13	0.464	382.82	36.77	0.370
3U5%	198	211	218	0.67	1.25	1.51	2.5	1461	152.92	0.463	382.30	39.47	0.376
1O1%	224	220	220	1.31	1.15	1.16	2.5	1470	153.86	0.459	384.65	35.32	0.337
2O1%	225	223	220	1.31	1.26	1.14	2.5	1466	153.44	0.457	383.60	36.63	0.351
3O1%	227	225	222	1.35	1.29	1.13	2.5	1465	153.34	0.452	383.34	37.77	0.360
1O2%	227	220	220	1.42	1.12	1.11	2.5	1472	154.07	0.458	385.17	37.94	0.362
2O2%	229	224	220	1.43	1.21	1.12	2.5	1466	153.44	0.456	383.60	38.21	0.364
3O2%	231	226	222	1.45	1.27	1.09	2.5	1465	153.34	0.459	383.34	38.67	0.369
1O3%	230	220	220	1.48	1.11	1.12	2.5	1470	153.86	0.457	384.65	38.95	0.371
2O3%	232	225	220	1.53	1.24	1.02	2.5	1467	153.55	0.459	383.87	39.04	0.372
3O3%	234	227	222	1.57	1.24	1.02	2.5	1465	153.34	0.468	383.34	39.82	0.380
1O4%	233	220	220	1.63	1.09	1.06	2.5	1470	153.86	0.464	384.65	39.85	0.380
2O4%	236	226	220	1.64	1.24	0.98	2.5	1466	153.44	0.467	383.60	40.08	0.382
3O4%	238	228	222	1.65	1.25	0.99	2.5	1464	153.23	0.465	383.08	40.25	0.384
1O5%	236	220	220	1.69	1.03	1.06	2.5	1469	153.76	0.466	384.39	40.87	0.390
2O5%	240	227	220	1.74	1.21	0.93	2.5	1466	153.44	0.474	383.60	41.11	0.392
3O5%	242	229	222	1.78	1.19	0.96	2.5	1465	153.34	0.469	383.34	41.16	0.392

Motor	Rated		Hz	Pole	H (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark Half-Load (50%) Isolated Neutron			
	V	I											
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	Ir (rpm)	ω (2πH/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.32	1.21	1.42	2.5	1451	151.87	0.471	379.68	38.23	0.364
1U1%	216	220	220	1.23	1.25	1.42	2.5	1450	151.77	0.458	379.42	38.43	0.366
2U1%	215	217	220	1.19	1.17	1.48	2.5	1448	151.56	0.439	378.89	39.46	0.376
3U1%	213	215	218	1.21	1.13	1.45	2.5	1446	151.35	0.466	378.37	39.92	0.381
1U2%	213	220	220	1.09	1.52	1.43	2.5	1448	151.56	0.459	378.89	39.97	0.381
2U2%	211	216	220	1.11	1.34	1.57	2.5	1446	151.35	0.462	378.37	40.02	0.382
3U2%	209	214	218	1.11	1.38	1.52	2.5	1445	151.24	0.468	378.11	40.11	0.382
1U3%	210	220	220	1.02	1.37	1.49	2.5	1446	151.35	0.464	378.37	40.15	0.383
2U3%	208	215	220	1.01	1.23	1.56	2.5	1444	151.14	0.465	377.85	40.29	0.384
3U3%	206	213	218	1.01	1.22	1.56	2.5	1443	151.03	0.467	377.59	41.09	0.392
1U4%	207	220	220	0.95	1.53	1.51	2.5	1449	151.66	0.466	379.16	42.78	0.408
2U4%	204	214	220	0.96	1.39	1.64	2.5	1447	151.45	0.467	378.63	42.88	0.409
3U4%	202	212	218	0.92	1.39	1.63	2.5	1445	151.24	0.464	378.11	43.11	0.411
1U5%	204	220	220	0.91	1.45	1.59	2.5	1446	151.35	0.468	378.37	43.18	0.412
2U5%	200	213	220	0.81	1.34	1.65	2.5	1445	151.24	0.469	378.11	43.25	0.412
3U5%	198	211	218	0.81	1.31	1.48	2.5	1444	151.14	0.467	377.85	44.21	0.421
1O1%	224	220	220	1.41	1.08	1.36	2.5	1451	151.87	0.462	379.68	39.28	0.374
2O1%	225	223	220	1.16	1.16	1.29	2.5	1448	151.56	0.459	378.89	39.44	0.376
3O1%	227	225	222	1.33	1.16	1.31	2.5	1447	151.45	0.455	378.63	39.75	0.379
1O2%	227	220	220	1.58	1.28	1.27	2.5	1452	151.98	0.462	379.94	40.98	0.391
2O2%	229	224	220	1.59	1.37	1.26	2.5	1449	151.66	0.460	379.16	41.52	0.396
3O2%	231	226	222	1.61	1.43	1.25	2.5	1448	151.56	0.464	378.89	41.88	0.399
1O3%	230	220	220	1.65	1.01	1.36	2.5	1451	151.87	0.461	379.68	42.64	0.406
2O3%	232	225	220	1.65	1.14	1.24	2.5	1450	151.77	0.474	379.42	42.67	0.407
3O3%	234	227	222	1.51	1.16	1.23	2.5	1448	151.56	0.477	378.89	43.87	0.418
1O4%	233	220	220	1.79	1.25	1.22	2.5	1451	151.87	0.468	379.68	45.59	0.435
2O4%	236	226	220	1.81	1.41	1.12	2.5	1448	151.56	0.471	378.89	46.03	0.439
3O4%	238	228	222	1.82	1.41	1.15	2.5	1447	151.45	0.469	378.63	46.54	0.444
1O5%	236	220	220	1.84	0.91	1.35	2.5	1450	151.77	0.470	379.42	47.63	0.454
2O5%	240	227	220	1.92	1.14	1.21	2.5	1448	151.56	0.478	378.89	49.46	0.471
3O5%	242	229	222	1.96	1.14	1.21	2.5	1447	151.45	0.473	378.63	49.89	0.476

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Full-Load (100%) with Neutron			
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	nr (rpm)	ω (2πn/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.47	1.49	1.48	5	1427	149.36	0.794	746.80	28.43	0.271
1U1%	216	220	220	1.27	1.19	1.55	5	1424	149.05	0.791	745.23	28.64	0.273
2U1%	215	217	220	1.41	1.48	1.65	5	1418	148.42	0.821	742.09	29.19	0.278
3U1%	213	215	218	1.38	1.53	1.62	5	1411	147.68	0.824	738.42	29.93	0.285
1U2%	213	220	220	1.28	1.62	1.62	5	1412	147.79	0.825	738.95	30.05	0.286
2U2%	211	216	220	1.23	1.56	1.71	5	1417	148.31	0.817	741.56	30.87	0.294
3U2%	209	214	218	1.28	1.59	1.69	5	1409	147.48	0.828	737.38	31.78	0.303
1U3%	210	220	220	1.17	1.71	1.65	5	1413	147.89	0.827	739.47	32.29	0.308
2U3%	208	215	220	1.18	1.59	1.76	5	1414	148.00	0.828	739.99	32.54	0.310
3U3%	206	213	218	1.21	1.61	1.81	5	1407	147.27	0.843	736.33	33.67	0.321
1U4%	207	220	220	1.09	1.75	1.71	5	1412	147.79	0.834	738.95	33.78	0.322
2U4%	204	214	220	1.05	1.62	1.83	5	1411	147.68	0.819	738.42	33.98	0.324
3U4%	202	212	218	1.12	1.62	1.87	5	1405	147.06	0.844	735.28	34.11	0.325
1U5%	204	220	220	0.99	1.82	1.77	5	1410	147.58	0.843	737.90	34.19	0.326
2U5%	200	213	220	0.97	1.65	1.93	5	1410	147.58	0.835	737.90	34.34	0.327
3U5%	198	211	218	1.01	1.69	1.95	5	1405	147.06	0.848	735.28	34.99	0.334
1O1%	224	220	220	1.61	1.41	1.43	5	1424	149.05	0.801	745.23	32.32	0.308
2O1%	225	223	220	1.62	1.48	1.48	5	1415	148.10	0.843	740.52	32.36	0.308
3O1%	227	225	222	1.65	1.53	1.43	5	1418	148.42	0.843	742.09	32.65	0.311
1O2%	227	220	220	1.73	1.34	1.39	5	1427	149.36	0.803	746.80	32.98	0.314
2O2%	229	224	220	1.75	1.51	1.31	5	1420	148.63	0.837	743.13	33.61	0.320
3O2%	231	226	222	1.76	1.52	1.37	5	1418	148.42	0.851	742.09	33.67	0.321
1O3%	230	220	220	1.79	1.33	1.36	5	1423	148.94	0.811	744.70	33.86	0.323
2O3%	232	225	220	1.85	1.45	1.28	5	1420	148.63	0.838	743.13	33.97	0.324
3O3%	234	227	222	1.89	1.48	1.26	5	1421	148.73	0.853	743.66	34.01	0.324
1O4%	233	220	220	1.91	1.26	1.33	5	1426	149.25	0.816	746.27	34.44	0.328
2O4%	236	226	220	1.95	1.45	1.21	5	1423	148.94	0.843	744.70	34.94	0.333
3O4%	238	228	222	1.97	1.47	1.19	5	1422	148.84	0.851	744.18	35.16	0.335
1O5%	236	220	220	2.02	1.21	1.31	5	1425	149.15	0.817	745.75	35.62	0.340
2O5%	240	227	220	2.09	1.41	1.11	5	1422	148.84	0.847	744.18	35.83	0.342
3O5%	242	229	222	2.11	1.42	1.12	5	1423	148.94	0.853	744.70	36.92	0.352

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Full-Load (100%) Isolated Neutron			
1 Hp	220/380	3.3/1.9	50	4	1400	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)	Iir (rpm)	ω (2πll/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	1.62	1.65	1.65	5	1413	147.89	0.812	739.47	31.19	0.297
1U1%	216	220	220	1.43	1.35	1.71	5	1410	147.58	0.809	737.90	31.67	0.302
2U1%	215	217	220	1.56	1.64	1.83	5	1404	146.95	0.838	734.76	32.18	0.307
3U1%	213	215	218	1.54	1.69	1.78	5	1397	146.22	0.842	731.10	32.42	0.309
1U2%	213	220	220	1.44	1.78	1.78	5	1398	146.32	0.843	731.62	33.08	0.315
2U2%	211	216	220	1.39	1.72	1.87	5	1403	146.85	0.835	734.24	33.54	0.320
3U2%	209	214	218	1.44	1.75	1.85	5	1395	146.01	0.846	730.05	34.57	0.330
1U3%	210	220	220	1.33	1.86	1.81	5	1399	146.43	0.845	732.14	35.12	0.335
2U3%	208	215	220	1.34	1.75	1.92	5	1400	146.53	0.846	732.67	35.43	0.338
3U3%	206	213	218	1.37	1.76	1.96	5	1393	145.80	0.861	729.00	36.61	0.349
1U4%	207	220	220	1.25	1.91	1.87	5	1398	146.32	0.852	731.62	36.72	0.350
2U4%	204	214	220	1.21	1.78	1.99	5	1397	146.22	0.837	731.10	36.92	0.352
3U4%	202	212	218	1.28	1.78	2.03	5	1391	145.59	0.862	727.96	37.18	0.354
1U5%	204	220	220	1.15	1.98	1.93	5	1396	146.11	0.861	730.57	37.19	0.355
2U5%	200	213	220	1.13	1.81	2.09	5	1396	146.11	0.853	730.57	37.43	0.357
3U5%	198	211	218	1.16	1.85	2.11	5	1391	145.59	0.866	727.96	37.54	0.358
1O1%	224	220	220	1.77	1.57	1.59	5	1410	147.58	0.818	737.90	35.36	0.337
2O1%	225	223	220	1.78	1.64	1.64	5	1401	146.64	0.862	733.19	35.37	0.337
3O1%	227	225	222	1.81	1.68	1.59	5	1404	146.95	0.861	734.76	35.62	0.340
1O2%	227	220	220	1.89	1.5	1.55	5	1413	147.89	0.821	739.47	35.92	0.342
2O2%	229	224	220	1.91	1.67	1.47	5	1406	147.16	0.855	735.81	36.67	0.350
3O2%	231	226	222	1.91	1.68	1.53	5	1404	146.95	0.868	734.76	36.68	0.350
1O3%	230	220	220	1.95	1.49	1.52	5	1409	147.48	0.828	737.38	36.86	0.351
2O3%	232	225	220	2.01	1.61	1.44	5	1406	147.16	0.856	735.81	36.98	0.353
3O3%	234	227	222	2.05	1.64	1.42	5	1407	147.27	0.871	736.33	37.03	0.353
1O4%	233	220	220	2.06	1.42	1.49	5	1412	147.79	0.834	738.95	37.45	0.357
2O4%	236	226	220	2.12	1.61	1.37	5	1409	147.48	0.861	737.38	37.92	0.361
3O4%	238	228	222	2.13	1.63	1.35	5	1408	147.37	0.869	736.85	38.19	0.364
1O5%	236	220	220	2.18	1.37	1.47	5	1411	147.68	0.835	738.42	38.84	0.370
2O5%	240	227	220	2.25	1.57	1.27	5	1408	147.37	0.865	736.85	38.87	0.371
3O5%	242	229	222	2.26	1.58	1.27	5	1409	147.48	0.871	737.38	39.93	0.381

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load with Neutron			
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)	Iir (rpm)	ω (2πll/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	2.53	2.56	2.49	0	1497	156.69	0.182	0	3.71	0.035
1U1%	216	220	220	2.21	2.64	2.57	0	1496	156.58	0.176	0	3.73	0.036
2U1%	215	217	220	2.22	2.41	2.65	0	1497	156.69	0.175	0	3.76	0.036
3U1%	213	215	218	2.15	2.39	2.58	0	1497	156.69	0.169	0	3.78	0.036
1U2%	213	220	220	1.99	2.77	2.63	0	1497	156.69	0.174	0	3.82	0.036
2U2%	211	216	220	1.98	2.44	2.75	0	1498	156.79	0.178	0	3.84	0.037
3U2%	209	214	218	1.91	2.34	2.71	0	1496	156.58	0.176	0	3.91	0.037
1U3%	210	220	220	1.86	2.81	2.87	0	1497	156.69	0.189	0	3.92	0.037
2U3%	208	215	220	1.82	2.39	2.85	0	1497	156.69	0.181	0	4.04	0.039
3U3%	206	213	218	1.76	2.42	2.77	0	1498	156.79	0.179	0	4.11	0.039
1U4%	207	220	220	1.71	2.76	2.69	0	1498	156.79	0.192	0	4.13	0.039
2U4%	204	214	220	1.59	2.42	2.95	0	1496	156.58	0.195	0	4.14	0.039
3U4%	202	212	218	1.54	2.37	2.9	0	1497	156.69	0.202	0	4.15	0.040
1U5%	204	220	220	1.52	2.91	2.73	0	1496	156.58	0.227	0	4.15	0.040
2U5%	200	213	220	1.38	2.42	3.13	0	1497	156.69	0.238	0	4.16	0.040
3U5%	198	211	218	1.33	2.36	3.05	0	1497	156.69	0.221	0	4.17	0.040
1O1%	224	220	220	2.89	2.49	2.36	0	1496	156.58	0.191	0	3.81	0.036
2O1%	225	223	220	2.88	2.68	2.31	0	1497	156.69	0.192	0	3.82	0.036
3O1%	227	225	222	2.96	2.75	2.36	0	1498	156.79	0.198	0	3.88	0.037
1O2%	227	220	220	3.07	2.47	2.32	0	1497	156.69	0.208	0	3.91	0.037
2O2%	229	224	220	3.16	2.72	2.21	0	1498	156.79	0.205	0	3.92	0.037
3O2%	231	226	222	3.33	2.77	2.29	0	1497	156.69	0.204	0	3.96	0.038
1O3%	230	220	220	3.35	2.41	2.26	0	1498	156.79	0.218	0	4.02	0.038
2O3%	232	225	220	3.44	2.65	2.14	0	1497	156.69	0.214	0	4.07	0.039
3O3%	234	227	222	3.47	2.77	2.23	0	1498	156.79	0.224	0	4.16	0.040
1O4%	233	220	220	3.59	2.36	2.19	0	1498	156.79	0.226	0	4.17	0.040
2O4%	236	226	220	3.75	2.71	2.05	0	1497	156.69	0.239	0	4.19	0.040
3O4%	238	228	222	3.84	2.82	2.11	0	1497	156.69	0.231	0	4.22	0.040
1O5%	236	220	220	3.83	2.33	2.19	0	1498	156.79	0.257	0	4.27	0.041
2O5%	240	227	220	4.04	2.72	2.02	0	1497	156.69	0.282	0	4.31	0.041
3O5%	242	229	222	4.19	2.78	2.06	0	1497	156.69	0.287	0	4.37	0.042

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load Isolated Neutron			
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	nr (rpm)	ω (2πf/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	2.69	2.33	2.72	0	1497	156.69	0.184	0	3.86	0.037
1U1%	216	220	220	2.39	2.52	2.71	0	1496	156.58	0.181	0	3.94	0.038
2U1%	215	217	220	2.41	2.17	2.99	0	1497	156.69	0.178	0	3.98	0.038
3U1%	213	215	218	2.24	2.32	2.75	0	1496	156.58	0.176	0	3.99	0.038
1U2%	213	220	220	2.15	2.93	2.63	0	1497	156.69	0.182	0	4.02	0.038
2U2%	211	216	220	2.14	2.61	2.79	0	1496	156.58	0.181	0	4.05	0.039
3U2%	209	214	218	2.07	2.51	2.91	0	1496	156.58	0.184	0	4.07	0.039
1U3%	210	220	220	1.97	2.89	2.73	0	1497	156.69	0.185	0	4.12	0.039
2U3%	208	215	220	1.81	2.59	3.08	0	1497	156.69	0.182	0	4.13	0.039
3U3%	206	213	218	1.85	2.47	2.87	0	1496	156.58	0.181	0	4.17	0.040
1U4%	207	220	220	1.87	2.92	2.85	0	1496	156.58	0.195	0	4.23	0.040
2U4%	204	214	220	1.75	2.58	3.11	0	1496	156.58	0.206	0	4.27	0.041
3U4%	202	212	218	1.71	2.53	3.06	0	1496	156.58	0.204	0	4.28	0.041
1U5%	204	220	220	1.62	3.19	2.82	0	1496	156.58	0.245	0	4.34	0.041
2U5%	200	213	220	1.24	3.07	3.2	0	1497	156.69	0.255	0	4.39	0.042
3U5%	198	211	218	1.27	2.95	3.11	0	1496	156.58	0.243	0	4.52	0.043
1O1%	224	220	220	2.93	2.19	2.79	0	1496	156.58	0.195	0	4.04	0.039
2O1%	225	223	220	2.99	2.34	2.67	0	1497	156.69	0.198	0	4.12	0.039
3O1%	227	225	222	3.24	2.35	2.62	0	1496	156.58	0.209	0	4.18	0.040
1O2%	227	220	220	3.23	2.63	2.48	0	1497	156.69	0.222	0	4.23	0.040
2O2%	229	224	220	3.32	2.88	2.36	0	1496	156.58	0.218	0	4.26	0.041
3O2%	231	226	222	3.49	2.93	2.45	0	1497	156.69	0.221	0	4.31	0.041
1O3%	230	220	220	3.55	1.91	2.92	0	1496	156.58	0.225	0	4.35	0.041
2O3%	232	225	220	3.69	2.17	2.74	0	1497	156.69	0.223	0	4.38	0.042
3O3%	234	227	222	3.82	2.21	2.83	0	1496	156.58	0.229	0	4.39	0.042
1O4%	233	220	220	3.75	2.52	2.35	0	1496	156.58	0.244	0	4.45	0.042
2O4%	236	226	220	3.91	2.87	2.21	0	1497	156.69	0.275	0	4.46	0.043
3O4%	238	228	222	4.01	2.98	2.27	0	1497	156.69	0.305	0	4.54	0.043
1O5%	236	220	220	4.11	1.81	3.19	0	1496	156.58	0.298	0	4.58	0.044
2O5%	240	227	220	4.45	2.03	3.01	0	1497	156.69	0.331	0	4.61	0.044
3O5%	242	229	222	4.72	2.06	3.13	0	1497	156.69	0.387	0	4.67	0.045

Motor	Rated		Hz	Pole	H (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Half-Load (50%) with Neutron			
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	Iir (rpm)	ω (2πH/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	3.21	3.16	3.18	7.4	1475	154.38	1.254	1142.44	28.89	0.275
1U1%	216	220	220	3.02	3.06	3.31	7.4	1470	153.86	1.309	1138.56	29.63	0.282
2U1%	215	217	220	2.99	2.81	3.44	7.4	1467	153.55	1.311	1136.24	29.92	0.285
3U1%	213	215	218	2.95	2.71	3.39	7.4	1468	153.65	1.308	1137.01	30.51	0.291
1U2%	213	220	220	2.79	3.95	3.71	7.4	1467	153.55	1.313	1136.24	32.01	0.305
2U2%	211	216	220	2.85	3.46	4.08	7.4	1465	153.34	1.319	1134.69	32.11	0.306
3U2%	209	214	218	2.85	3.57	3.95	7.4	1464	153.23	1.315	1133.92	32.15	0.306
1U3%	210	220	220	2.55	3.21	3.53	7.4	1465	153.34	1.321	1134.69	32.21	0.307
2U3%	208	215	220	2.46	3.02	3.93	7.4	1463	153.13	1.323	1133.14	32.26	0.308
3U3%	206	213	218	2.52	2.85	3.68	7.4	1462	153.02	1.323	1132.37	32.44	0.309
1U4%	207	220	220	2.41	3.97	3.92	7.4	1466	153.44	1.325	1135.47	32.58	0.311
2U4%	204	214	220	2.43	3.59	4.27	7.4	1464	153.23	1.325	1133.92	32.81	0.313
3U4%	202	212	218	2.32	3.59	4.25	7.4	1463	153.13	1.326	1133.14	33.15	0.316
1U5%	204	220	220	1.98	3.52	3.83	7.4	1464	153.23	1.328	1133.92	33.24	0.317
2U5%	200	213	220	2.01	3.23	4.21	7.4	1463	153.13	1.321	1133.14	33.39	0.318
3U5%	198	211	218	1.99	3.03	4.07	7.4	1461	152.92	1.321	1131.59	34.46	0.329
1O1%	224	220	220	3.66	2.66	3.07	7.4	1470	153.86	1.312	1138.56	31.3	0.298
2O1%	225	223	220	3.71	2.95	2.89	7.4	1466	153.44	1.311	1135.47	31.33	0.299
3O1%	227	225	222	3.73	2.85	2.83	7.4	1465	153.34	1.316	1134.69	32.23	0.307
1O2%	227	220	220	4.11	3.31	4.27	7.4	1472	154.07	1.315	1140.11	32.35	0.308
2O2%	229	224	220	4.13	3.55	4.25	7.4	1466	153.44	1.323	1135.47	32.75	0.312
3O2%	231	226	222	4.19	3.71	3.22	7.4	1465	153.34	1.322	1134.69	33.04	0.315
1O3%	230	220	220	4.38	2.53	2.92	7.4	1470	153.86	1.341	1138.56	33.12	0.316
2O3%	232	225	220	4.21	2.92	2.75	7.4	1467	153.55	1.352	1136.24	33.15	0.316
3O3%	234	227	222	4.25	2.93	2.63	7.4	1466	153.44	1.341	1135.47	33.31	0.318
1O4%	233	220	220	4.67	3.22	3.13	7.4	1470	153.86	1.353	1138.56	33.65	0.321
2O4%	236	226	220	4.73	3.65	2.86	7.4	1466	153.44	1.356	1135.47	33.74	0.322
3O4%	238	228	222	4.75	3.65	2.95	7.4	1465	153.34	1.365	1134.69	34.97	0.333
1O5%	236	220	220	4.98	2.52	2.96	7.4	1469	153.76	1.392	1137.79	35.41	0.338
2O5%	240	227	220	5.11	3.11	2.47	7.4	1466	153.44	1.391	1135.47	36.84	0.351
3O5%	242	229	222	4.74	2.96	2.59	7.4	1465	153.34	1.398	1134.69	37.64	0.359

ตารางที่ ก.10 ผลการคำนวณของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบ ไม้อัดสายนิวตรอน ชั้นโพท 50%

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Haft-Load (50%) Isolated Neutron			
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	nr (rpm)	ω (2πn/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	3.54	2.86	3.34	7.4	1452	151.98	1.259	1124.62	31.54	0.301
1U1%	216	220	220	3.18	3.22	3.47	7.4	1450	151.77	1.314	1123.07	32.18	0.307
2U1%	215	217	220	3.15	2.96	3.8	7.4	1448	151.56	1.315	1121.52	32.47	0.310
3U1%	213	215	218	3.11	2.87	3.55	7.4	1447	151.45	1.313	1120.75	33.06	0.315
1U2%	213	220	220	2.94	4.11	3.86	7.4	1448	151.56	1.318	1121.52	34.56	0.329
2U2%	211	216	220	3.01	3.62	4.24	7.4	1446	151.35	1.325	1119.98	34.66	0.330
3U2%	209	214	218	3.01	3.73	4.11	7.4	1445	151.24	1.321	1119.20	34.72	0.331
1U3%	210	220	220	2.71	3.37	3.69	7.4	1446	151.35	1.327	1119.98	34.76	0.331
2U3%	208	215	220	2.62	3.18	4.09	7.4	1445	151.24	1.328	1119.20	34.81	0.332
3U3%	206	213	218	2.68	3.01	3.84	7.4	1443	151.03	1.323	1117.65	34.99	0.334
1U4%	207	220	220	2.57	4.13	4.08	7.4	1449	151.66	1.331	1122.30	35.13	0.335
2U4%	204	214	220	2.59	3.75	4.43	7.4	1447	151.45	1.335	1120.75	35.36	0.337
3U4%	202	212	218	2.48	3.75	4.41	7.4	1445	151.24	1.332	1119.20	35.74	0.341
1U5%	204	220	220	2.14	3.68	3.99	7.4	1446	151.35	1.334	1119.98	35.79	0.341
2U5%	200	213	220	2.16	3.39	4.36	7.4	1445	151.24	1.338	1119.20	35.94	0.343
3U5%	198	211	218	2.15	3.19	4.23	7.4	1446	151.35	1.329	1119.98	37.01	0.353
1O1%	224	220	220	3.82	2.82	3.23	7.4	1451	151.87	1.319	1123.85	33.85	0.323
2O1%	225	223	220	3.86	3.11	3.05	7.4	1448	151.56	1.316	1121.52	33.88	0.323
3O1%	227	225	222	3.89	3.01	2.99	7.4	1447	151.45	1.316	1120.75	34.78	0.332
1O2%	227	220	220	4.27	3.46	4.43	7.4	1452	151.98	1.321	1124.62	34.91	0.333
2O2%	229	224	220	4.29	3.71	4.41	7.4	1449	151.66	1.329	1122.30	35.31	0.337
3O2%	231	226	222	4.35	3.86	3.38	7.4	1448	151.56	1.327	1121.52	35.59	0.339
1O3%	230	220	220	4.54	2.69	3.06	7.4	1451	151.87	1.345	1123.85	35.67	0.340
2O3%	232	225	220	4.37	3.06	2.91	7.4	1450	151.77	1.359	1123.07	35.72	0.341
3O3%	234	227	222	4.41	3.09	2.79	7.4	1448	151.56	1.347	1121.52	35.86	0.342
1O4%	233	220	220	4.83	3.38	3.29	7.4	1451	151.87	1.358	1123.85	36.24	0.345
2O4%	236	226	220	4.89	3.81	3.02	7.4	1448	151.56	1.362	1121.52	36.29	0.346
3O4%	238	228	222	4.91	3.81	3.11	7.4	1447	151.45	1.373	1120.75	37.52	0.358
1O5%	236	220	220	5.14	2.68	3.12	7.4	1450	151.77	1.399	1123.07	37.96	0.362
2O5%	240	227	220	5.27	3.27	2.63	7.4	1448	151.56	1.397	1121.52	39.39	0.376
3O5%	242	229	222	4.86	3.12	2.75	7.4	1447	151.45	1.406	1120.75	40.19	0.383

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	V/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Full-Load (100%) with Neutron			
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)	Irr (rpm)	ω (2πll/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	4.34	4.28	4.31	14.8	1428	149.46	2.268	2212.07	23.93	0.228
1U1%	216	220	220	4.14	4.18	4.43	14.8	1424	149.05	2.262	2205.87	24.39	0.233
2U1%	215	217	220	4.11	3.93	4.56	14.8	1418	148.42	2.252	2196.58	24.39	0.233
3U1%	213	215	218	4.07	3.83	4.51	14.8	1412	147.79	2.243	2187.28	25.15	0.240
1U2%	213	220	220	3.91	5.07	4.83	14.8	1413	147.89	2.244	2188.83	26.48	0.252
2U2%	211	216	220	3.97	4.58	5.21	14.8	1417	148.31	2.251	2195.03	26.57	0.253
3U2%	209	214	218	3.97	4.69	5.04	14.8	1410	147.58	2.242	2184.18	26.62	0.254
1U3%	210	220	220	3.67	4.33	4.65	14.8	1413	147.89	2.244	2188.83	26.68	0.254
2U3%	208	215	220	3.58	4.14	5.05	14.8	1414	148.00	2.246	2190.38	26.84	0.256
3U3%	206	213	218	3.64	3.97	4.79	14.8	1407	147.27	2.235	2179.54	26.91	0.257
1U4%	207	220	220	3.53	5.09	5.04	14.8	1412	147.79	2.243	2187.28	27.05	0.258
2U4%	204	214	220	3.55	4.71	5.39	14.8	1411	147.68	2.241	2185.73	27.39	0.261
3U4%	202	212	218	3.44	4.71	5.37	14.8	1408	147.37	2.237	2181.09	27.62	0.263
1U5%	204	220	220	3.11	4.64	4.95	14.8	1411	147.68	2.241	2185.73	27.72	0.264
2U5%	200	213	220	3.13	4.35	5.33	14.8	1410	147.58	2.241	2184.18	27.93	0.266
3U5%	198	211	218	3.12	4.15	5.19	14.8	1406	147.16	2.234	2177.99	28.72	0.274
1O1%	224	220	220	4.78	3.78	4.19	14.8	1424	149.05	2.262	2205.87	25.81	0.246
2O1%	225	223	220	4.83	4.07	4.04	14.8	1415	148.10	2.248	2191.93	26.39	0.252
3O1%	227	225	222	4.85	3.97	3.95	14.8	1418	148.42	2.258	2196.58	26.73	0.255
1O2%	227	220	220	5.23	4.43	5.38	14.8	1427	149.36	2.266	2210.52	26.82	0.256
2O2%	229	224	220	5.25	4.67	5.37	14.8	1421	148.73	2.257	2201.22	27.51	0.262
3O2%	231	226	222	5.31	4.83	4.34	14.8	1418	148.42	2.252	2196.58	27.58	0.263
1O3%	230	220	220	5.51	3.65	4.04	14.8	1423	148.94	2.261	2204.32	27.59	0.263
2O3%	232	225	220	5.33	4.04	3.87	14.8	1420	148.63	2.255	2199.67	27.66	0.264
3O3%	234	227	222	5.37	4.05	3.75	14.8	1421	148.73	2.257	2201.22	27.88	0.266
1O4%	233	220	220	5.79	4.334	4.25	14.8	1426	149.25	2.265	2208.97	28.25	0.269
2O4%	236	226	220	5.85	4.67	3.98	14.8	1423	148.94	2.261	2204.32	28.25	0.269
3O4%	238	228	222	5.87	4.77	4.07	14.8	1422	148.84	2.258	2202.77	29.65	0.283
1O5%	236	220	220	6.09	3.64	4.08	14.8	1425	149.15	2.263	2207.42	31.12	0.297
2O5%	240	227	220	6.23	4.23	3.59	14.8	1422	148.84	2.258	2202.77	31.36	0.299
3O5%	242	229	222	5.86	4.08	3.72	14.8	1423	148.94	2.261	2204.32	32.25	0.307

ตารางที่ ค.12 ผลการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 3 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวตรอน ขั้วโหลด 100%

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark	Full-Load (100%) Isolated Neutron						
	V	I									Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)
3 Hp	220/380	8.7/5.0	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g								
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (ll.m)	nr (rpm)	ω (2πll/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)				
B	220	220	220	4.58	3.99	4.47	14.8	1412	147.79	2.272	2187.28	25.59	0.244				
1U1%	216	220	220	4.32	4.34	4.59	14.8	1409	147.48	2.268	2182.63	26.62	0.254				
2U1%	215	217	220	4.28	4.09	4.72	14.8	1404	146.95	2.257	2174.89	26.63	0.254				
3U1%	213	215	218	4.23	3.99	4.67	14.8	1397	146.22	2.246	2164.05	27.38	0.261				
1U2%	213	220	220	4.09	5.23	4.99	14.8	1398	146.32	2.248	2165.60	28.71	0.274				
2U2%	211	216	220	4.13	4.74	5.37	14.8	1403	146.85	2.253	2173.34	28.81	0.275				
3U2%	209	214	218	4.14	4.85	5.21	14.8	1395	146.01	2.249	2160.95	28.85	0.275				
1U3%	210	220	220	3.89	4.49	4.81	14.8	1398	146.32	2.247	2165.60	28.91	0.276				
2U3%	208	215	220	3.75	4.32	5.21	14.8	1399	146.43	2.251	2167.14	29.08	0.277				
3U3%	206	213	218	3.81	4.13	4.95	14.8	1393	145.80	2.242	2157.85	29.14	0.278				
1U4%	207	220	220	3.72	5.25	5.21	14.8	1398	146.32	2.244	2165.60	29.28	0.279				
2U4%	204	214	220	3.73	4.87	5.55	14.8	1397	146.22	2.245	2164.05	29.62	0.282				
3U4%	202	212	218	3.65	4.88	5.53	14.8	1392	145.70	2.239	2156.30	29.85	0.285				
1U5%	204	220	220	3.27	4.82	5.11	14.8	1396	146.11	2.245	2162.50	29.95	0.286				
2U5%	200	213	220	3.29	4.51	5.49	14.8	1396	146.11	2.245	2162.50	30.15	0.287				
3U5%	198	211	218	3.28	4.31	5.35	14.8	1391	145.59	2.238	2154.75	30.95	0.295				
1O1%	224	220	220	4.94	3.94	4.35	14.8	1410	147.58	2.264	2184.18	28.14	0.268				
2O1%	225	223	220	4.99	4.23	4.21	14.8	1406	147.16	2.252	2177.99	28.62	0.273				
3O1%	227	225	222	5.01	4.13	4.11	14.8	1405	147.06	2.259	2176.44	28.96	0.276				
1O2%	227	220	220	5.39	4.59	5.54	14.8	1413	147.89	2.268	2188.83	29.07	0.277				
2O2%	229	224	220	5.41	4.83	5.53	14.8	1407	147.27	2.261	2179.54	29.81	0.284				
3O2%	231	226	222	5.47	4.99	4.52	14.8	1404	146.95	2.255	2174.89	29.87	0.285				
1O3%	230	220	220	5.67	3.81	4.22	14.8	1410	147.58	2.264	2184.18	29.89	0.285				
2O3%	232	225	220	5.49	4.22	4.03	14.8	1408	147.37	2.259	2181.09	29.96	0.286				
3O3%	234	227	222	5.53	4.21	3.92	14.8	1407	147.27	2.259	2179.54	30.12	0.287				
1O4%	233	220	220	5.94	4.49	4.41	14.8	1414	148.00	2.267	2190.38	30.45	0.290				
2O4%	236	226	220	6.01	4.83	4.14	14.8	1409	147.48	2.266	2182.63	30.48	0.291				
3O4%	238	228	222	6.03	4.93	4.23	14.8	1408	147.37	2.262	2181.09	31.78	0.303				
1O5%	236	220	220	6.25	3.82	4.25	14.8	1413	147.89	2.263	2188.83	33.25	0.317				
2O5%	240	227	220	6.39	4.39	3.76	14.8	1410	147.58	2.266	2184.18	33.59	0.320				
3O5%	242	229	222	6.02	4.24	3.89	14.8	1409	147.48	2.264	2182.63	34.48	0.329				

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load with Neutron			
5 Hp	220/380	13.7/7.9	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (fl.m)	nr (rpm)	ω (2πn/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	3.52	3.57	3.55	0	1498	156.79	0.214	0	3.76	0.036
1U1%	216	220	220	3.11	3.61	3.79	0	1498	156.79	0.212	0	3.87	0.037
2U1%	215	217	220	3.04	3.35	3.97	0	1497	156.69	0.206	0	3.92	0.037
3U1%	213	215	218	2.94	3.21	3.93	0	1497	156.69	0.207	0	3.96	0.038
1U2%	213	220	220	2.72	3.76	3.89	0	1497	156.69	0.211	0	4.01	0.038
2U2%	211	216	220	2.67	3.31	4.27	0	1497	156.69	0.209	0	4.02	0.038
3U2%	209	214	218	2.62	3.23	4.16	0	1496	156.58	0.205	0	4.03	0.038
1U3%	210	220	220	2.48	3.92	4.02	0	1497	156.69	0.215	0	4.07	0.039
2U3%	208	215	220	2.36	3.36	4.37	0	1496	156.58	0.223	0	4.07	0.039
3U3%	206	213	218	2.31	3.24	4.33	0	1496	156.58	0.231	0	4.15	0.040
1U4%	207	220	220	2.14	4.11	4.16	0	1497	156.69	0.235	0	4.18	0.040
2U4%	204	214	220	1.91	3.36	4.81	0	1497	156.69	0.248	0	4.18	0.040
3U4%	202	212	218	1.88	3.31	4.63	0	1496	156.58	0.258	0	4.19	0.040
1U5%	204	220	220	1.64	4.31	4.41	0	1497	156.69	0.278	0	4.24	0.040
2U5%	200	213	220	1.57	3.44	5.11	0	1496	156.58	0.286	0	4.39	0.042
3U5%	198	211	218	1.51	3.32	4.94	0	1496	156.58	0.293	0	4.49	0.043
1O1%	224	220	220	4.03	3.28	3.49	0	1498	156.79	0.221	0	3.81	0.036
2O1%	225	223	220	4.18	3.61	3.32	0	1498	156.79	0.227	0	3.82	0.036
3O1%	227	225	222	4.17	3.64	3.35	0	1497	156.69	0.229	0	3.82	0.036
1O2%	227	220	220	4.46	3.19	3.41	0	1498	156.79	0.232	0	3.98	0.038
2O2%	229	224	220	4.67	3.57	3.24	0	1497	156.69	0.267	0	3.99	0.038
3O2%	231	226	222	4.72	3.63	3.32	0	1497	156.69	0.271	0	4.03	0.038
1O3%	230	220	220	4.93	3.14	3.37	0	1497	156.69	0.281	0	4.12	0.039
2O3%	232	225	220	4.96	3.46	3.06	0	1497	156.69	0.319	0	4.12	0.039
3O3%	234	227	222	5.05	3.61	3.09	0	1496	156.58	0.325	0	4.24	0.040
1O4%	233	220	220	5.41	2.96	3.15	0	1497	156.69	0.332	0	4.33	0.041
2O4%	236	226	220	5.66	3.45	2.95	0	1497	156.69	0.345	0	4.35	0.041
3O4%	238	228	222	5.43	3.55	3.02	0	1496	156.58	0.338	0	4.38	0.042
1O5%	236	220	220	5.91	2.91	3.12	0	1497	156.69	0.339	0	4.51	0.043
2O5%	240	227	220	6.21	3.37	2.77	0	1496	156.58	0.357	0	4.66	0.044
3O5%	242	229	222	6.33	3.48	2.81	0	1496	156.58	0.348	0	5.01	0.048

ตารางที่ ก.14 ผลการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ไม่ขับโหลด

Motor	Rated		Hz	Pole	H (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								No-Load Isolated Neutron			
5 Hp	220/380	13.7/7.9	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (H.m)	Itr (rpm)	ω (2πH/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	3.71	3.21	3.64	0	1497	156.69	0.215	0	4.16	0.040
1U1%	216	220	220	3.38	3.61	3.65	0	1497	156.69	0.218	0	4.33	0.041
2U1%	215	217	220	3.28	3.42	3.79	0	1497	156.69	0.209	0	5.06	0.048
3U1%	213	215	218	3.27	3.19	3.69	0	1496	156.58	0.207	0	5.25	0.050
1U2%	213	220	220	2.92	3.96	4.09	0	1497	156.69	0.216	0	5.35	0.051
2U2%	211	216	220	2.87	3.51	4.47	0	1496	156.58	0.218	0	5.63	0.054
3U2%	209	214	218	2.82	3.43	4.36	0	1496	156.58	0.219	0	6.39	0.061
1U3%	210	220	220	2.69	4.04	3.72	0	1497	156.69	0.212	0	7.91	0.075
2U3%	208	215	220	2.29	3.86	4.31	0	1496	156.58	0.227	0	8.89	0.085
3U3%	206	213	218	2.32	3.74	4.31	0	1496	156.58	0.216	0	9.71	0.093
1U4%	207	220	220	2.34	4.31	4.36	0	1496	156.58	0.229	0	10.17	0.097
2U4%	204	214	220	2.11	3.56	5.01	0	1495	156.48	0.235	0	10.57	0.101
3U4%	202	212	218	2.08	3.51	4.83	0	1495	156.48	0.237	0	11.72	0.112
1U5%	204	220	220	1.85	4.97	4.42	0	1497	156.69	0.248	0	13.17	0.126
2U5%	200	213	220	1.27	4.64	4.97	0	1497	156.69	0.251	0	13.36	0.127
3U5%	198	211	218	1.29	4.54	4.58	0	1497	156.69	0.247	0	14.25	0.136
1O1%	224	220	220	4.28	3.01	3.81	0	1497	156.69	0.221	0	7.18	0.068
2O1%	225	223	220	4.49	3.24	3.4	0	1496	156.58	0.225	0	7.62	0.073
3O1%	227	225	222	4.74	3.38	3.39	0	1497	156.69	0.229	0	8.57	0.082
1O2%	227	220	220	4.66	3.39	3.61	0	1497	156.69	0.234	0	8.73	0.083
2O2%	229	224	220	4.87	3.77	3.44	0	1496	156.58	0.269	0	9.63	0.092
3O2%	231	226	222	4.92	3.83	3.52	0	1496	156.58	0.271	0	10.12	0.096
1O3%	230	220	220	5.27	2.53	4.04	0	1497	156.69	0.285	0	10.29	0.098
2O3%	232	225	220	5.09	3.11	3.58	0	1496	156.58	0.325	0	11.56	0.110
3O3%	234	227	222	5.12	3.07	3.67	0	1496	156.58	0.328	0	11.97	0.114
1O4%	233	220	220	5.86	3.65	3.15	0	1497	156.69	0.334	0	12.17	0.116
2O4%	236	226	220	5.63	3.75	3.22	0	1496	156.58	0.349	0	12.17	0.116
3O4%	238	228	222	6.11	3.11	3.32	0	1496	156.58	0.341	0	12.43	0.118
1O5%	236	220	220	5.39	2.62	4.04	0	1496	156.58	0.352	0	13.51	0.129
2O5%	240	227	220	7.26	2.97	4.33	0	1497	156.69	0.365	0	14.12	0.135
3O5%	242	229	222	6.88	2.81	4.24	0	1496	156.58	0.359	0	15.12	0.144

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/Δ	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Half-Load (50%) with Neutron			
5 Hp	220/380	13.7/7.9	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (fl.m)	nr (rpm)	ω (2πf/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	4.57	4.48	4.56	12.5	1468	153.65	2.178	1920.63	24.78	0.236
1U1%	216	220	220	4.43	4.64	4.93	12.5	1468	153.65	2.172	1920.63	25.62	0.244
2U1%	215	217	220	4.49	4.01	5.05	12.5	1467	153.55	2.169	1919.33	26.21	0.250
3U1%	213	215	218	4.29	4.22	4.89	12.5	1465	153.34	2.155	1916.71	26.48	0.252
1U2%	213	220	220	3.82	5.46	5.11	12.5	1467	153.55	2.158	1919.33	26.49	0.253
2U2%	211	216	220	3.91	4.77	5.65	12.5	1465	153.34	2.173	1916.71	26.98	0.257
3U2%	209	214	218	3.92	4.92	5.46	12.5	1463	153.13	2.152	1914.09	26.99	0.257
1U3%	210	220	220	3.45	5.14	5.54	12.5	1465	153.34	2.188	1916.71	27.01	0.257
2U3%	208	215	220	3.71	4.49	5.84	12.5	1463	153.13	2.193	1914.09	27.16	0.259
3U3%	206	213	218	3.75	4.16	5.77	12.5	1462	153.02	2.212	1912.78	27.35	0.261
1U4%	207	220	220	3.29	5.49	5.42	12.5	1466	153.44	2.219	1918.02	27.78	0.265
2U4%	204	214	220	3.32	4.95	4.91	12.5	1464	153.23	2.221	1915.40	28.18	0.269
3U4%	202	212	218	3.21	4.96	5.87	12.5	1462	153.02	2.222	1912.78	28.92	0.276
1U5%	204	220	220	2.67	3.75	6.03	12.5	1464	153.23	2.223	1915.40	31.12	0.297
2U5%	200	213	220	2.99	4.81	6.63	12.5	1463	153.13	2.229	1914.09	31.59	0.301
3U5%	198	211	218	2.96	4.78	6.64	12.5	1463	153.13	2.227	1914.09	32.01	0.305
1O1%	224	220	220	5.74	4.22	4.12	12.5	1469	153.76	2.228	1921.94	27.35	0.261
2O1%	225	223	220	5.52	4.47	4.03	12.5	1466	153.44	2.189	1918.02	27.56	0.263
3O1%	227	225	222	5.52	4.45	4.02	12.5	1465	153.34	2.211	1916.71	28.45	0.271
1O2%	227	220	220	5.71	4.54	4.51	12.5	1469	153.76	2.225	1921.94	28.59	0.273
2O2%	229	224	220	5.73	4.89	4.47	12.5	1466	153.44	2.227	1918.02	28.75	0.274
3O2%	231	226	222	5.82	5.12	4.43	12.5	1465	153.34	2.234	1916.71	29.31	0.279
1O3%	230	220	220	6.62	3.93	4.12	12.5	1469	153.76	2.237	1921.94	30.03	0.286
2O3%	232	225	220	6.65	4.42	3.65	12.5	1467	153.55	2.242	1919.33	31.25	0.298
3O3%	234	227	222	6.74	4.54	3.49	12.5	1465	153.34	2.253	1916.71	31.94	0.304
1O4%	233	220	220	6.61	4.43	4.32	12.5	1469	153.76	2.265	1921.94	33.27	0.317
2O4%	236	226	220	6.71	5.04	3.94	12.5	1467	153.55	2.278	1919.33	34.09	0.325
3O4%	238	228	222	6.76	5.06	4.05	12.5	1468	153.65	2.269	1920.63	34.12	0.325
1O5%	236	220	220	7.84	4.18	3.94	12.5	1470	153.86	2.293	1923.25	34.85	0.332
2O5%	240	227	220	7.74	4.85	3.32	12.5	1471	153.96	2.312	1924.56	35.68	0.340
3O5%	242	229	222	8.21	4.95	3.31	12.5	1469	153.76	2.301	1921.94	36.27	0.346

ตารางที่ ก.16 ผลการคำนวณของมอเตอร์ 5 แรงม้า แบบไม่ต่อสายนิวทรัล ขั้วโหลด 50%

Motor	Rated		Hz	Pole	n (rpm)	Y/A	Type	Seq	Accel	Remark			
	V	I								Haft-Load (50%) Isolated Neutron			
5 Hp	220/380	13.7/7.9	50	4	1420	Y	SF-JR	abc	104.9mV/g				
%PUV	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	T (fl.m)	nr (rpm)	ω (2 π n/60)	Pin (kW)	Pout (W)	a (mV)	a (g)
B	220	220	220	5.47	4.59	4.88	12.5	1451	151.87	2.198	1898.39	28.78	0.274
1U1%	216	220	220	4.75	4.96	5.25	12.5	1449	151.66	2.184	1895.78	29.64	0.283
2U1%	215	217	220	4.81	4.33	5.37	12.5	1448	151.56	2.185	1894.47	30.26	0.288
3U1%	213	215	218	4.61	4.52	5.21	12.5	1447	151.45	2.157	1893.16	30.51	0.291
1U2%	213	220	220	4.14	5.78	5.43	12.5	1448	151.56	2.169	1894.47	30.54	0.291
2U2%	211	216	220	4.22	5.09	5.97	12.5	1447	151.45	2.184	1893.16	30.78	0.293
3U2%	209	214	218	4.23	5.24	5.78	12.5	1445	151.24	2.153	1890.54	30.86	0.294
1U3%	210	220	220	3.77	5.47	5.86	12.5	1446	151.35	2.199	1891.85	30.98	0.295
2U3%	208	215	220	4.03	4.81	6.16	12.5	1445	151.24	2.204	1890.54	31.18	0.297
3U3%	206	213	218	4.06	4.49	6.09	12.5	1444	151.14	2.223	1889.23	31.21	0.298
1U4%	207	220	220	3.61	5.81	5.74	12.5	1448	151.56	2.231	1894.47	31.23	0.298
2U4%	204	214	220	3.65	5.28	5.23	12.5	1447	151.45	2.232	1893.16	31.52	0.300
3U4%	202	212	218	3.52	5.29	6.19	12.5	1445	151.24	2.233	1890.54	31.67	0.302
1U5%	204	220	220	2.99	4.06	6.35	12.5	1446	151.35	2.234	1891.85	34.19	0.326
2U5%	200	213	220	3.31	5.13	6.95	12.5	1445	151.24	2.242	1890.54	34.64	0.330
3U5%	198	211	218	3.28	5.1	6.96	12.5	1445	151.24	2.238	1890.54	35.03	0.334
1O1%	224	220	220	6.09	4.54	4.42	12.5	1451	151.87	2.239	1898.39	31.37	0.299
2O1%	225	223	220	5.85	4.79	4.32	12.5	1448	151.56	2.201	1894.47	31.54	0.301
3O1%	227	225	222	5.85	4.77	4.34	12.5	1447	151.45	2.221	1893.16	32.12	0.306
1O2%	227	220	220	6.02	4.86	4.83	12.5	1451	151.87	2.235	1898.39	32.21	0.307
2O2%	229	224	220	6.05	5.21	4.79	12.5	1449	151.66	2.238	1895.78	32.24	0.307
3O2%	231	226	222	6.12	5.43	4.75	12.5	1448	151.56	2.245	1894.47	32.65	0.311
1O3%	230	220	220	6.94	4.25	4.43	12.5	1450	151.77	2.248	1897.08	33.05	0.315
2O3%	232	225	220	6.97	4.74	3.97	12.5	1449	151.66	2.253	1895.78	34.57	0.330
3O3%	234	227	222	7.06	4.86	3.81	12.5	1448	151.56	2.264	1894.47	34.68	0.331
1O4%	233	220	220	6.93	4.75	4.64	12.5	1451	151.87	2.276	1898.39	36.29	0.346
2O4%	236	226	220	7.02	5.36	4.26	12.5	1448	151.56	2.289	1894.47	37.11	0.354
3O4%	238	228	222	7.08	5.38	4.37	12.5	1447	151.45	2.284	1893.16	37.14	0.354
1O5%	236	220	220	8.15	4.51	4.26	12.5	1450	151.77	2.304	1897.08	37.95	0.362
2O5%	240	227	220	8.06	5.16	3.62	12.5	1448	151.56	2.324	1894.47	38.64	0.368
3O5%	242	229	222	8.53	5.27	3.62	12.5	1447	151.45	2.315	1893.16	38.72	0.369

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายณรงค์เดช ยะลาไสย์
วัน เดือน ปีเกิด	19 เมษายน 2519 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด
ที่อยู่	365/347 หมู่ 2 ถ.พุทธบูชา 47 แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
ประวัติการศึกษา	2543 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับ	“การวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อตรวจจับการสั้นสะเทือนของมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30. ปีที่ 30, ตุลาคม 2550. หน้า 17-20.
พ.ศ. 2550	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้