

**การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อสมรรถนะ  
ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส  
A STUDY OF EFFECTS OF HARMONICS ON PERFORMANCE  
OF THREE – PHASE INDUCTION MOTOR**



**ปริญาพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อสมรรถนะ  
ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

A STUDY OF EFFECTS OF HARMONICS ON PERFORMANCE  
OF THREE – PHASE INDUCTION MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิษิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ผู้จัดทำ

นายจาตุรนต์ รัตนศรีเมธา  
นางสาวชัชรินทร์ นียตวิวัฒน์ชาญชัย  
นายชัยรัตน์ อุ่นวิจิตร



อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ.พิชิต ล้ำยอง )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อสมรรถนะของ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

นายจตุรนต์      รัตศรีเมธา      47010097  
นางสาวชัชรินทร์      นียติวัฒน์ชาญชัย      47010162  
นายชัยรัตน์      อุ่ณวิจิตร      47010169  
รศ. พิเชิด      ล้ายอง      อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

เนื้อหาของปริญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เป็นการนำเสนอเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ฮาร์มอนิกส์สามเฟสของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าจากเทคนิคเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน สามารถที่จะต่อในลักษณะของการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกหรือลบ เมื่อเทียบกับการเรียงลำดับเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นความถี่และขนาดของสัญญาณที่ได้สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการสันสะเทือน แร้งบิด สมรรถนะ กระแสและกำลังป้อนเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยนำเสนอและพิจารณาฮาร์มอนิกส์อันดับแตกต่างกัน ที่มีการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าค่าต่าง ๆ

## **A Study of Effects of Harmonics on Performance of Three-phase Induction Motor**

Jaturon Rattanasrimetha

Chatcharin Niyatiwatchanchai

Chairat Unwjit

Assoc. Prof. Pichit Lumyong Advisor

### **ABSTRACT**

This project presents the effect of harmonics on performance of three phase induction motor. The technique of Brushless Synchronous Reluctance Generator (BSRG) cooperated with utility power supply for generating non-sinusoidal three phase voltage source is proposed. The three phase harmonics voltage source generating from BSRG technique can be connected in positive or negative phase sequence of utility power supply. Therefore, frequency and amplitude of waveform can be independently controlled in order to study the effect of harmonics on vibration behavior, performance, torque, input current and input power of three phase induction motor. The various orders of harmonics having positive and negative sequence at various voltage distortion factor (VDF) are illustrated and considered.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จลงได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลท่านแรกที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ คือ รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ ดูแลเอาใจใส่และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณบุคคลที่ข้าพเจ้าเคารพรักยิ่งและเป็นบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ได้ คือ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้กำเนิดและเลี้ยงดูให้เติบโตมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังคงคอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ในทุกๆ เรื่องเสมอมาอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

จาตุรนต์ รัตนศรีเมธา  
 ชัชรินทร์ นียดิวัฒน์ชาญชัย  
 ชัยรัตน์ อุ่นวิจิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานโครงการ.....	2
บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	3
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	3
2.2 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	3
2.3 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	5
2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	7
2.4.1 ความเร็วซิงโครนัสและค่าสลิปมอเตอร์.....	7
2.4.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	8
2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	12
2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อการทำงานของ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	17
2.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อการทำงานของ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	17
2.8 คุณลักษณะของแรงบิดความเร็ว.....	21
2.9 การชดเชยแรงดันเพิ่มเมื่อความถี่มีค่าต่างๆ.....	22
2.10 หลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	24
2.11 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด.....	25
2.12 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด.....	26
2.13 ช่วงการทำงานที่ความเร็วรอบสูงมาก.....	26
2.14 ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	26
2.15 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	27
2.16 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.17 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	29
2.17.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล.....	29
2.17.2 การทดสอบยึดโรเตอร์.....	30
2.18.2 การทดสอบความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์.....	30
<b>บทที่ 3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....</b>	<b>26</b>
3.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	31
3.2 ความเข้าใจและลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	31
3.2.1 กฎและความเข้าใจที่ต้องใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	31
3.2.2 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	32
3.2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายใน เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	32
3.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน.....	35
3.3.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส.....	35
3.3.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายเฟส.....	36
3.4 แรงดันเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	39
3.5 ค่าความเหนี่ยวนำและวงจรมูลย.....	42
3.5.1 ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดของโรเตอร์.....	43
3.5.2 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสเตเตอร์และโรเตอร์.....	44
3.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์.....	44
3.6 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร.....	47
3.6.1 การทดสอบเปิดวงจร.....	47
3.6.2 การทดสอบลัดวงจร.....	48
3.6.3 อัตราส่วนการลัดวงจร.....	48
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....</b>	<b>50</b>
4.1 การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	50
4.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	50
4.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส.....	52
4.1.3 วงจรเสมือนต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....	55
4.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....	58
4.2.1 การสูญเสียทองแดง.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก.....	58
4.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลด.....	60
4.3 รูปสัญญาณตกคาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	60
4.3.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน.....	60
4.3.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้า ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	62
4.3.3 การคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้า ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	63
4.3.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า.....	64
บทที่ 5 การสั่นสะเทือน.....	66
5.1 ประเภทการสั่นสะเทือน.....	66
5.1.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ.....	66
5.1.2 การสั่นสะเทือนแบบกระตุ้น.....	66
5.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน.....	67
5.2.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีหน่วง.....	67
5.2.2 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีหน่วง.....	68
5.2.3 ชนิดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	69
5.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากสาเหตุของสัญญาณทางไฟฟ้า.....	70
5.3.1 Twice Line Frequency Vibration.....	70
5.3.2 Elliptical สเตเตอร์ Due to Fundamental Flux.....	72
5.3.3 Nonsymmetrical Air gap.....	72
5.3.4 One-Time-Line-Frequency Vibration.....	73
5.4 การสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจาก ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า.....	73
บทที่ 6 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง.....	75
6.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์.....	76
6.2 เครื่องต้นกำลัง.....	76
6.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เป็นโหลดในการทดลอง.....	76
บทที่ 7 ขั้นตอนการทดลอง.....	77
7.1 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7.2 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการสั้นสะท้อน.....	78
7.3 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะ ไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า.....	78
7.4 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า.....	79
7.5 ขั้นตอนการทดสอบการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล.....	79
7.6 ขั้นตอนการทดสอบการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล.....	80
7.7 ขั้นตอนการทดสอบการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์.....	81
7.8 ขั้นตอนการทดสอบการสั้นสะท้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์.....	82
บทที่ 8 ผลการทดลอง.....	83
บทที่ 9 สรุปผลการทดลอง.....	136
บรรณานุกรม.....	143
ภาคผนวก.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	สเตเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....4
2.2	โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....4
2.3	โรเตอร์แบบฟันขดลวด.....5
2.4	แสดงคุณลักษณะของมอเตอร์ class ต่าง ๆ.....6
2.5	วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....12
2.6	วงจรสมมูลย์โดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....12
2.7	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....14
2.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็ว ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ.....17
2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่.....18
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วที่อัตราส่วน $\frac{V_s}{\omega_s}$ คงที่.....19
2.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของVVVF.....20
2.12	พื้นที่การทำงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากรูปที่ 2.11.....21
2.13	กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปต่ำ.....22
2.14	การชดเชยแรงดันเพื่อรักษาฟลักซ์ที่ความถี่ต่ำๆ.....22
2.15	การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แรงบิด กระแสอาร์เมเจอร์ กับความถี่.....25
2.16	โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ.....27
2.17	วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....28
2.18	วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....29
3.1	การเปลี่ยนรูปกำลังไฟฟ้าและกำลังกล.....32
3.2	ลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งเกิดจากขดลวด 1 ชุด N รอบ ด้านทั้ง 2 ของขดลวดห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า.....33
3.3	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟส ถูกจัดวางเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 ขั้วและด้านทั้งสองของขดลวด แต่ละชุดห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า.....34
3.4	ขดลวดบนสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว.....36
3.5	เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3เฟส.....39
3.6	เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วอนชาเลียน.....42
3.7	(ก) แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ซิงโครนัส.....46 (ข) แสดงวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 แสดงวงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรฟ้าซิงโครนัสซึ่งอยู่ในรูปของรีเกจรีแอกแตนซ์.....	47
3.9 กราฟการทดสอบการเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	47
3.10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบลัดวงจร.....	48
3.11 กราฟการทดสอบการเปิดวงจรและลัดวงจร.....	48
3.12 กราฟการทดสอบการเปิดวงจรและลัดวงจร.....	49
4.1 สเตเตอร์ และ ฝ้ครอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	50
4.2 แผนภูมิโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	51
4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านต่อร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นตัวต้นกำลัง.....	51
4.4 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์.....	52
4.5 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นคลื่นไซน์บอนด์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	53
4.6 แผนภูมิการต่ออันดับ $k^{th}$ ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก.....	54
4.7 แผนภูมิการต่ออันดับ $k^{th}$ ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ.....	55
4.8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน.....	55
4.9 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ $k^{th}$ ฮาร์มอนิกส์.....	56
4.10 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสตรงกับความถี่มูลฐาน.....	60
4.11 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา.....	61
4.12 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา.....	61
5.1 ระบบมวลเดี่ยวภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกส์.....	66
5.3 แสดงการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบมวลเดี่ยว.....	68
5.4 ระบบมวลเดี่ยวที่มีความหนืด.....	69
5.5 สเตเตอร์และโรเตอร์.....	71
5.6 One period flux wave and magnetic force wave.....	71
5.7 Electromechanical force on two and four pole motor.....	72
5.8 Unsymmetrical air gap around โรเตอร์.....	73
6.1 แสดงรูปเครื่องจักรซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.2	แสดงรูปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า.....76
7.1	แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....77
7.2	แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการสั้นสะท้อน.....78
8.1	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์.....83
8.2	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์.....83
8.3	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์.....84
8.4	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์.....84
8.5	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์.....85
8.6	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์.....85
8.7	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์.....86
8.8	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์.....86
8.9	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....87

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.10	ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับพหุคูณ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....87
8.11	กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่างๆ.....88
8.12	กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่างๆ.....88
8.13	กำลังไฟฟ้าและกระแสป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่างๆ.....89
8.14	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....90
8.15	แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....91
8.16	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....92
8.17	แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....93
8.18	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....94
8.19	แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์.....95

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
8.20	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสมมูล 3 เฟส.....	96
8.21	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 216V (1U1%).....	96
8.22	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 210V (1U3%).....	97
8.23	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 204V (1U5%).....	97
8.24	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 224V (1O1%).....	98
8.25	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 230V (1O3%).....	98
8.26	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 236V (1O5%).....	99
8.27	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 217V และเฟส c 215V (2U1%).....	99
8.28	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 215V และเฟส c 208V (2U3%).....	100
8.29	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 213V และเฟส c 200V (2U5%).....	100
8.30	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 223V และเฟส c 225V (2O1%).....	101
8.31	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 225V และเฟส c 227V (2O3%).....	101
8.32	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 227V และเฟส c 240V (2O5%).....	102
8.33	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 215V และเฟส c 213V (3U1%).....	102
8.34	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 213V และเฟส c 206V (3U3%).....	103
8.35	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 211V และเฟส c 198V (3U5%).....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.36 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 225V และเฟส c 227V (301%).....	104
8.37 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 227V และเฟส c 234V (3U5%).....	104
8.38 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 229V และเฟส c 242V (305%).....	105
8.39 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสมมูล 3 เฟส.....	106
8.40 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดัน ไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 216V (1U1%).....	106
8.41 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 210V (1U3%).....	107
8.42 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 204V (1U5%).....	107
8.43 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 224V (101%).....	108
8.44 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 230V (103%).....	108
8.45 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 236V (105%).....	109
8.46 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 217V และเฟส c 215V (2U1%).....	109
8.47 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดัน ไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 215V และเฟส c 208V (2U3%).....	110
8.48 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 213V และเฟส c 200V (2U5%).....	110
8.49 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 223V และเฟส c 225V (201%).....	111
8.50 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 225V และเฟส c 227V (203%).....	111
8.51 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a คงที่ 220V เฟส b 227V และเฟส c 240V (205%).....	112

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.52 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 215V และเฟส c 213V (3U1%).....	112
8.53 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 213V และเฟส c 206V (3U3%).....	113
8.54 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 218V เฟส b 211V และเฟส c 198V (3U5%).....	113
8.55 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 225V และเฟส c 227V (3O1%).....	114
8.56 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 227V และเฟส c 234V (3U5%).....	114
8.57 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า เฟส a 222V เฟส b 229V และเฟส c 242V (3O5%).....	115
8.58 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุล แบบแรงดันต่ำกว่าแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ ของแรงดันเฟสไม่สมดุล.....	116
8.59 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุล แบบแรงดันสูงกว่าแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ ของแรงดันเฟสไม่สมดุล.....	116
8.60 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุล แบบแรงดันต่ำกว่าแบบ 1% 2% และ 3% เมื่อเพิ่มจำนวนของ แรงดันเฟสไม่สมดุล.....	117
8.61 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุล แบบแรงดันสูงกว่าแบบ 1% 2% และ 3% เมื่อเพิ่มจำนวนของ แรงดันเฟสไม่สมดุล.....	117
8.62 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุล ระหว่างแบบแรงดันสูงกว่าและแบบแรงดันต่ำกว่า แบบ 1% 2% และ 3%.....	118
8.63 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	119
8.64 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	119

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.65 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	120
8.66 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	120
8.67 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	121
8.68 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	121
8.69 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	122
8.70 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	122
8.71 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	123
8.72 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	123
8.73 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	124
8.74 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ย่นตักดาไฟฟ้า 30 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.75 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	125
8.76 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	125
8.77 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	126
8.78 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	126
8.79 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	127
8.80 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	127
8.81 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	128
8.82 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	128
8.83 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....	129
8.84 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....	129

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.85	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางบวก.....130
8.86	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟส ในทิศทางลบ.....130
8.87	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ที่ค่าความเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ ของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับ เฟสแบบบวก.....131
8.88	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ที่ค่าความเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ ของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับ เฟสแบบลบ.....131
8.89	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ.....132
8.90	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ.....132
8.91	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ.....133
8.92	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก.....134
8.93	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก.....134
8.94	การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลด ของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก.....135
9.1	ผลกระทบของ Electromagnetic Torque กรณีจากฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ.....136
9.2	แสดงความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....140

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
9.3	แสดงผลกระทบจากการเยื้องศูนย์.....	141
ก1	การทำงานของหัวตรวจวัดประเภทระยะทาง.....	146
ก2	ลักษณะโครงสร้างของหัวตรวจวัดประเภทความเร่ง.....	147
ค1-1	การกำหนด notch depth และ notch area.....	155
ค1-2	กรอบของกระแสนินพุตที่กำหนดว่าเป็น “special wave shape” และจำแนกอุปกรณ์เป็น class D.....	160



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก1	เกณฑ์มาตรฐานสากล ISO 2372.....149
ก2	มาตรฐาน ISO 2373.....150
ค1-1	Low Voltage System Classification and Distribution Limits.....154
ค1-2	Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120V Through 69000V).....156
ค1-3	Current Distortion Limits for General Distribution Systems (69001V Through 161000V).....156
ค1-4	Current Distortion Limits for General Distribution Systems (>161 kV), Dispersed Generation and Cogeneration.....157
ค1-5	Maximum sizes of individual converter and A.C, regulator equipment under stage 1 limits.....158
ค1-6	PERMITTED HARMONIC CURRENTS FOR ANY ONE CONSUMER AT POINT OF COMMON COUPLING UNDER STAGE 2 LIMITS.....159
ค1-7	HARMONIC VOLTAGE DISTORTION LIMITS AT ANY POINT ON THE SYSTEM (INCLUDING BACKGROUND LEVELS).....159
ค1-8	Limit for Class A quipment.....162
ค1-9	Limit for Class C equipment.....162
ค1-10	Limit for Class D quipment.....163
ค1-11	Voltage distortion limits.....164
ค1-12	Compatibility levels for individual harmonic voltages in low voltage networks.....165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำงานด้วยหลักการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กผ่านช่องว่างอากาศ มีหลักการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงแต่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่มีใช้งานแพร่หลายอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกโรงงาน เนื่องจากด้วยคุณสมบัติที่เป็นมอเตอร์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ไม่มีส่วนประกอบที่ยุงยาก มีความสะดวกในการใช้งาน มีความแข็งแรง และมีความคงทน ไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้งาน รวมถึงมีการบำรุงรักษาง่าย

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรงงานนั้นโดยส่วนมากจะทำการควบคุมการทำงานด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ โดยการปรับความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่การใช้อินเวอร์เตอร์ในการจ่ายไฟนั้นมีผลกระทบคือจะเกิดฮาร์มอนิกส์ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการสูญเสียค่าใช้จ่าย และยังส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์

เมื่อทราบว่าฮาร์มอนิกส์มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การศึกษาถึงการวัดผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและน่าสนใจ เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการทำงานของมอเตอร์ ด้วยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อพยายามที่จะแยกผลกระทบของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ จุดประสงค์ของการทำแบบนี้เพื่อชี้ให้เห็นว่าการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์นั้นมีการสูญเสียที่เป็นผลมาจากอินเวอร์เตอร์น้อยเพียงใด เพื่อหาวิธีการกำจัดและลดผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานของฮาร์มอนิกส์ โดยการรวมฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านกับความถี่มูลฐาน เพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่ได้

2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยจะสนใจในด้านสัญญาณของแรงดัน กระแส ประสิทธิภาพ และการสั่นสะเทือน

3 เพื่อศึกษาผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสอย่างไร

4 เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณแรงดัน กระแส และสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่

5. เพิ่มทักษะในการประยุกต์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. วิเคราะห์สัญญาณของแรงดันและกระแสที่มีฮาร์มอนิกส์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

2. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ผสมอยู่

3. เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ

4. วิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จากหัววัดอัตราเร่ง โดยใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวัดออกมาในรูปของอัตราเร่ง

5. ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้ารวมกับความถี่มูลฐาน จะป้อนฮาร์มอนิกส์ที่ละความถี่ โดยความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าจะมีค่าความถี่ไม่เกิน 550 Hz

6. ในแต่ละความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าจะมีการปรับค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าที่ต่างค่ากันในช่วง 10 – 30 เปอร์เซ็นต์

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งเป็นขั้นตอนตามลำดับดังนี้

- ศึกษาค้นคว้าการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังว่าเกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดใดและส่งผลกระทบต่อมากน้อยเพียงใด

- ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านว่ามีหลักการการทำงานอย่างไรและขั้นตอนในการประยุกต์ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

- ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า โดยทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าต่าง ๆ ในทุกอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าเพื่อดูผลของอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่ออย่างไร

- ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ในกรณีที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล และในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า โดยทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าต่าง ๆ ในทุกอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้า เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

- วิเคราะห์ผลการทดสอบ

- สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ทำงานด้วยหลักการคล้ายคลึงกับหลักการทำงานของหม้อแปลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแล้ว สเตเตอร์เปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิที่จะทำการดอรับพลังงานเข้ามาจากสายเมนของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วถ่ายทอดพลังงานไปยังโรเตอร์ที่เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิด้วยการเหนี่ยวนำ จะแตกต่างกันที่หม้อแปลงเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่ ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่หมุนได้

#### 2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

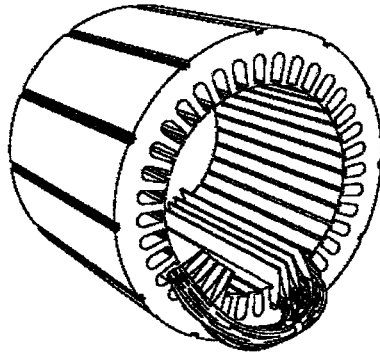
ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

##### 1. สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่หนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยแกนมอเตอร์ แกนขดลวดและขดลวด ซึ่งจะมีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิต ภายในตัวสเตเตอร์โดยการพันขดลวดซึ่งอาจจะเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับพัน

โครงมอเตอร์ (frame) ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลางฐานส่วนล่างมีลักษณะเป็นฐานตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้าง และหน้าที่ของโครงมอเตอร์ก็คือจะทำหน้าที่ยึดแกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ และผิวด้านนอกโดยรอบของโครงมอเตอร์บางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีปเพื่อจะช่วยให้การระบายความร้อน และกรณีที่เป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก ๆ โครงเหล็กจะทำด้วยเหล็กหล่อ แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่โครงเหล็กจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว นอกจากนี้โครงเหล็กอาจจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียวแผ่นม้วนเป็นรูปทรงกระบอก เชื่อมติดกัน แกนขดลวดสเตเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ มีลักษณะกลม จะเจาะรูตรงกลางและเจาะร่องภายในโดยรอบ ซึ่งจะเรียกแผ่นนี้ว่าแผ่นเหล็กลามิเนต แต่ละแผ่นจะหนาประมาณ 0.025 นิ้ว แล้วจึงนำแผ่นเหล็กบางมาอบซิลิกอนแล้วนำมาอัดเข้าด้วยกัน เรียกว่าแกนขดลวดสเตเตอร์หรือสเตเตอร์คอร์ และร่องที่ถูกเจาะภายในเรียกว่าร่องสลิตซึ่งเป็นที่สำหรับพันขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งแกนขดลวดนี้จะเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือวงจรแม่เหล็ก

ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นขดลวดทองแดงที่ใส่ไว้ในร่องสลิตภายในรอบ ๆ สเตเตอร์ ซึ่งเคลือบฉนวนไฟฟ้าอย่างดี เช่น น้ำมันวานิชที่เป็นขดลวดชั้นเดียว (1 layer winding) และ 2 ชั้น (2 layer stator) แล้วจึงนำปลายสายมาต่อกันแบบสตาร์หรือแบบเดลต้า



ภาพที่ 2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

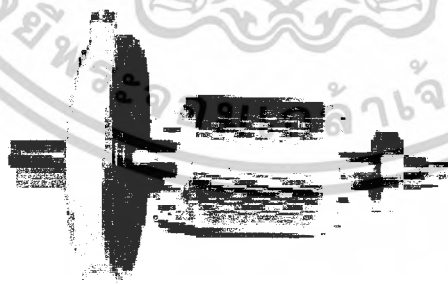
## 2. โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ที่ไม่มีขั้วยื่น (non-salient pole) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

### 1. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้จะมีความแข็งแรงทางกลสูงและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ (wound rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์จะมีแท่งตัวนำซึ่งมีการต่อลัดวงจรทางด้านหัวและท้ายของแท่งตัวนำ

แท่งตัวนำดังกล่าวจะถูกฉีตเข้าไปในแกนเหล็กกล้าซิลิคอน (silicon steel) ซึ่งถูกเจาะผิวหน้าให้เป็นร่องโดยรอบแล้วนำเข้าไปวางในแม่พิมพ์ ตรงกลางของแกนเหล็กซิลิคอนเจาะรูสำหรับใส่แกนมอเตอร์ ซึ่งแท่งตัวนำทั้งหมดจะถูกลัดวงจรเข้าด้วยกัน ดังนั้นจะไม่สามารถนำความต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ และสล๊อตของโรเตอร์จะอยู่ในลักษณะที่ขนานกับเพลลาและวางเฉียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดประโยชน์ คือช่วยให้อัตราการหมุนได้อย่างรวดเร็วโดยการลดขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (magnetic hum) และช่วยในการลดการยึดหรือล๊อคโรเตอร์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่สล๊อตของสเตเตอร์กับโรเตอร์ทั้งสอง



ภาพที่ 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor)

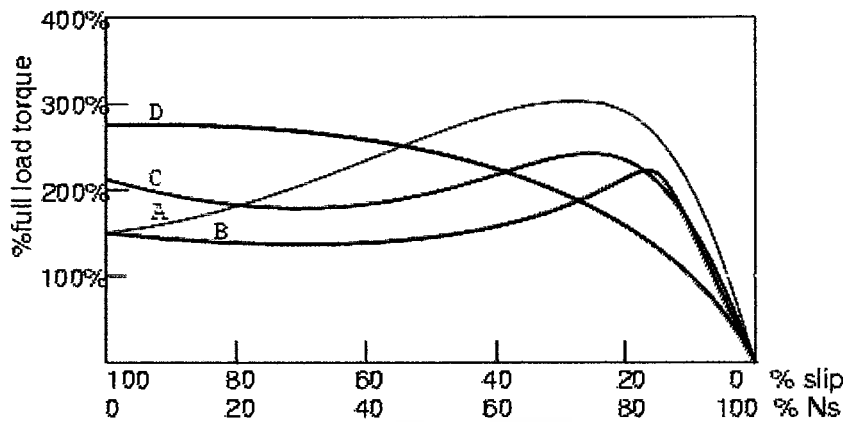
โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ พบมากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส แกนขดลวดทำด้วยเหล็กแผ่นลามิเนทบีบเป็นร่องสลิตแล้วนำมาอัดติดกันเป็นทรงกระบอก โดยมีขดลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวนไฟฟ้าพันอยู่ในร่องสลิต โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (slip ring) และมีส่วนแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้จะมีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ นอกจากนี้ยังราคาสูงเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก



ภาพที่ 2.3 โรเตอร์แบบพันขดลวด

### 2.3 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกได้เป็นหลายประเภท (class) ตามรูปร่างของสลิตที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะมีคุณลักษณะตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่างๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดขณะเริ่มหมุน กระแสขณะเริ่มหมุนและค่าของสลลิป ส่วนประกอบทางโครงสร้างที่จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละประเภทมีคุณลักษณะแตกต่างกันก็คือ การออกแบบแผ่นลามิเนทที่ประกอบขึ้นเป็นโรเตอร์ โดยกำหนดขึ้นจากสมาคมผู้ใช้ไฟฟ้านานาชาติ (National Electrical Manufacturers Association, NEMA) แบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะของการนำไปใช้งาน ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของมอเตอร์ class ต่าง ๆ

Class A เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนปกติ กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนปกติ และมี สลิปปกติ เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไปตามโรงงานอุตสาหกรรม และในงานอื่น ๆ วงจรโรเตอร์มีความต้านทานต่ำ และคาร์บอนคาร์ทต่ำ ตัวนำที่ฝังในร่องสลิตของโรเตอร์จะอยู่ใกล้ผิวหน้าเพื่อเป็นการลดคาร์บอนคาร์ทของโรเตอร์

Class B เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนปกติ กระแสขณะเริ่มหมุนต่ำ และมี สลิปปกติ เป็นมอเตอร์ที่สามารถเริ่มหมุนในขณะที่มีโหลดเต็มที่ได้ ตัวนำที่ฝังอยู่ในร่องสลิตของโรเตอร์จะมีคาร์บอนคาร์ทสูง ร่องสลิตสำหรับฝังตัวนำจะลึกและแคบ

Class C เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง กระแสขณะเริ่มหมุนต่ำ และมี สลิปปกติ มอเตอร์ชนิดนี้มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกรรอก 2 ชั้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง

Class D เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนต่ำ และมี สลิปสูง มอเตอร์ชนิดนี้มีความต้านทานของตัวนำโรเตอร์สูง จึงทำให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง

นอกจากนี้ยังมี Class E และ Class F เป็นเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเริ่มหมุนแบบ soft-start มีลักษณะเด่นในเรื่องของกระแสเริ่มหมุนต่ำ และแรงบิดในการเริ่มหมุนมีค่าต่ำ มอเตอร์ชนิดนี้มีการรั่วไหลของคาร์บอนคาร์ทสูง ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของกระแสในขณะเริ่มหมุนสูงได้ ภาพที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของ torque – speed ของมอเตอร์เหนี่ยวนำของมอเตอร์บางประเภท

## 2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 2.4.1 ความเร็วซิงโครนัสและค่าสลิปมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลประเภทกระตุ้นเดี่ยว (single excited) ซึ่งอาศัยการป้อนพลังงานเข้าทางสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังสเตเตอร์โดยการเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านช่องอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่าย ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่  $N_s$  = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่าย (Hz)

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้กับขดลวดสเตเตอร์และทำการลอคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้านโรเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับทางด้านสเตเตอร์ ระดับแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่ลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ แต่ถ้าหากว่าปล่อยโรเตอร์ของมอเตอร์ให้อิสระ โรเตอร์จะหมุนทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนแต่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน เนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วโรเตอร์ (rotor speed ;  $N_r$ ) และความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (synchronous speed :  $N_s$ ) จะเรียกว่า ค่าสลิปมอเตอร์ (slip) ซึ่งค่าสลิปจะแสดงในรูปของค่าเปอร์ยูนิตสลิป (per-unit slip) ตามสมการ

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.2)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าเปอร์ยูนิตสลิปกับความถี่ของกระแสที่ป้อนเข้าทางด้านสเตเตอร์

### 2.4.2 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไหลในสเตเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ จะมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องระหว่างขดลวดทั้งสองเรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์ส่วนมากที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าและเป็นฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องอากาศเรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดแรงบิด แต่มีผลต่อสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาจากฟลักซ์ร่วมลัพธ์ (resultant mutual flux) โดยพิจารณาในเทอมของ magnetic co-energy ที่สะสมอยู่ในช่องอากาศในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ กับโรเตอร์และมุม  $\delta_{sr}$  ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนของ co-energy กับมุม  $\delta_{sr}$

ในการพิจารณากำหนดให้สนามแม่เหล็กในแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะเส้นแม่เหล็กในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศจะได้เท่ากับ  $H_g$  ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์  $\mathfrak{F}_{sr}$

$$H_g = \mathfrak{F}_{sr} \quad (2.3)$$

สัญลักษณ์  $\mathfrak{F}_{sr}$  แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมรอบเส้นรอบวงของสเตเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์  $F_{sr}$  เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์  $F_s$  และโรเตอร์  $F_r$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad (2.4)$$

ค่า  $F$  แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์  $H$  มีการกระจายตัวแบบไซน์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

$$H_{peak} = \frac{F_{sr}}{g} \quad (2.5)$$

ค่าของ co-energy ในช่องว่างอากาศ ณ จุดใด ๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $H$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{\mu_0}{2} H^2$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ co-energy density มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ค่าเฉลี่ยของ co-energy density} &= \frac{\mu_0}{2} \frac{H_{peak}^2}{2} \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\mu_0$  = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ  
 $F_{sr}$  = ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  
 $g$  = ระยะระหว่างช่องอากาศ  
 $H_{peak}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก

ดังนั้นค่า co-energy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} W'_{fld} &= (\text{ค่าเฉลี่ยของ co-energy density})(\text{ปริมาตรของช่องว่างอากาศ}) \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D l g \\ &= \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่  $D$  = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ  
 $l$  = ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ

จากสมการที่ 2.4 จะได้ค่า co-energy ที่สะสมอยู่ในช่องอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

$$W'_{fld} = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr}) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถหาสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง co-energy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งจะได้แรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังต่อไปนี้

$$T = + \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = - \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.9)$$

ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน  $p$  ขั้ว จะได้สมการแรงบิดในรูปแบบ

$$T = -\frac{P \mu_0 \pi D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.10)$$

จะพบว่า  $F_r \sin \delta_{sr}$  เป็นส่วนประกอบของ  $F_r$  ในแนวตั้งฉากกับ  $F_s$  และ  $F_s \sin \delta_{sr}$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ  $F_s$  ในแนวตั้งฉากกับ  $F_r$  ซึ่งสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณา จะได้รับความสัมพันธ์

$$F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.11)$$

$$F_r \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.12)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และ สมการที่ 2.12 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

$$T = -\frac{P \pi \mu_0 D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_s F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.13)$$

$$T = -\frac{P \pi \mu_0 D l}{2 \cdot 2 \cdot g} F_r F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบคือ

1. แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วนโดยแบ่งเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 2.10
2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือโรเตอร์ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว จะพบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะสามารถนำเสนอในรูปค่าสูงสุดของคลื่นของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือฟลักซ์ต่อขั้ว ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  จะหาได้จากสมการ  $\mu_0 \frac{F}{g}$  เมื่อ  $F$  แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังนั้นจากสมการที่ 2.14

เมื่อต้องการที่จะนำเสนอแรงบิดในรูปของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถได้ตั้งสมการ

$$T = -\frac{P}{2} \frac{\pi D l}{2} B_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2.15)$$

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งค่าสูงสุดของรูปคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B_{sr}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กได้โดย

$$\Phi = (\text{ค่าเฉลี่ยของ } B \text{ ในแต่ละขั้ว})(\text{พื้นที่ของขั้วแม่เหล็ก}) \quad (2.16)$$

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณในรูปของไซน์ในครึ่งลูกคลื่นมีค่าเท่ากับ  $\frac{2}{\pi}$  คูณกับค่าสูงสุดของรูปคลื่นตั้งสมการ

$$T = -\frac{\pi}{2} B \frac{\pi D l}{P} = \frac{2 D l}{P} B \quad (2.17)$$

ค่า  $B$  แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการที่ 2.15 คือ

$$T = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2.18)$$

โดยที่  $\Phi_{sr}$  = ฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์  
 $\delta_r$  = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

จากสมการที่ 2.18 สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

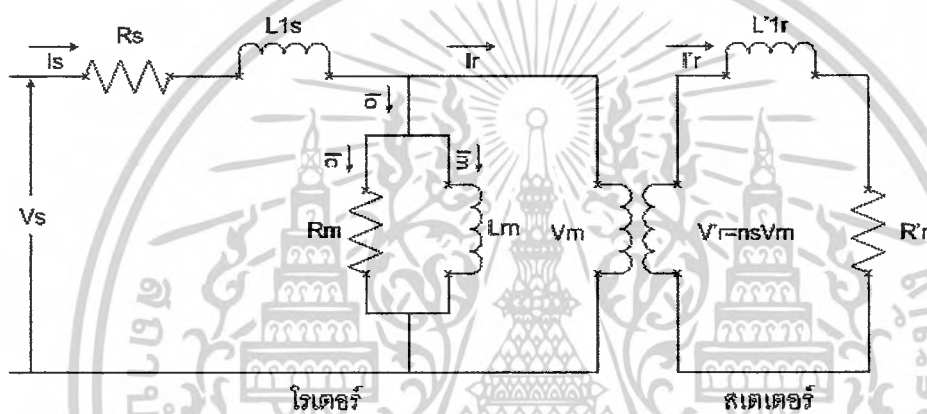
$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) |\bar{\psi}_m| |I_r| \sin \delta_r \quad (2.19)$$

เมื่อ  $|\bar{\psi}_m|$  คือ ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก  
 $|I_r|$  คือ ค่าสูงสุดของกระแสบนโรเตอร์

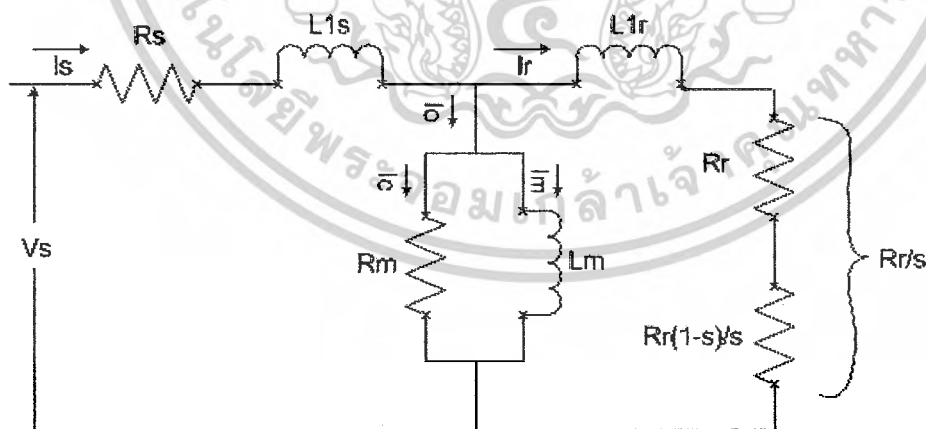
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตามที่เราได้ทราบแล้วว่าโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ 2 ส่วนด้วยกันก็คือ ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ เพียงแตกต่างกันตรงที่ด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหมุนได้ ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประการ ดังในภาพที่ 2.5 พลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านทางสเตเตอร์เท่านั้น แล้วเหนี่ยวนำพลังงานไปสู่ทางด้านโรเตอร์ สามารถเรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า single excited ซึ่งต่างจากมอเตอร์แบบซิงโครนัสที่จะต้องมีการจ่ายพลังงานให้กับสเตเตอร์และโรเตอร์ที่เรียกว่า double excited กำลังงานที่สูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากการไหลของพลังงานผ่านวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งถ้ามีความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรสมมูลย์ของตัวมอเตอร์แล้วก็จะทำให้การศึกษารูปแบบกำลังงานสูญเสียทำได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลย์โดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

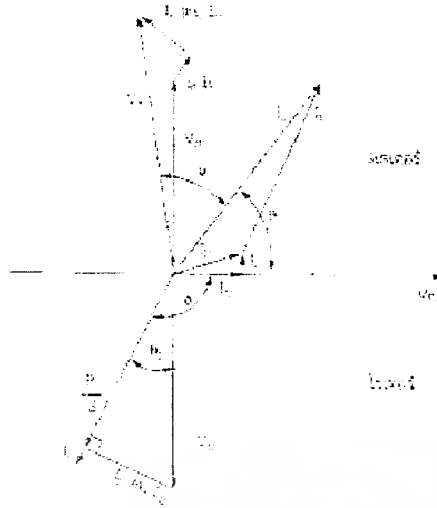
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $V_s$  คือ แรงดันต่อเฟสที่ป้อนให้มอเตอร์  
 $I_s$  คือ กระแสต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์  
 $R_s$  คือ ความต้านทานต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์  
 $L_{ls}$  คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์  
 $L_m$  คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก  
 $R_m$  คือ ความต้านทานของแกนเหล็ก  
 $I_r$  คือ กระแสต่อเฟสทางด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์  
 $R_r$  คือ ความต้านทานต่อเฟสทางด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์  
 $L_{lr}$  คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของโรเตอร์  
 $I_m$  คือ magnetizing current ต่อเฟส  
 $I_c$  คือ กระแสที่ผ่านแกนเหล็ก  
 $I_o$  คือ exciting current

จากภาพที่ 2.6

$$I_r = \frac{V_m}{\left(\frac{R_r}{s}\right) + j\omega_s L_{lr}} \quad (2.20)$$

โดยที่ค่า  $R_r$  และ  $L_{lr}$  เป็นค่าที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์แล้ว จากรูปที่ 2.6 และสมการที่ 2.19 จะเห็นว่าค่าสลิป  $s$  ยิ่งมีค่ามาก  $I_r$  ก็จะมีค่ามาก ณ จุดที่มอเตอร์หยุดนิ่ง  $s = 1$  เปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเกิดกระแสไหลปริมาณมาก และในขณะที่  $s = 0$  เปรียบเสมือนการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง การรับโหลดของมอเตอร์จะถูกส่งผ่านเข้าไปในระบบในรูปแบบของสลิปหรืออาจจะกล่าวได้ว่า ค่าสลิป  $s$  เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณโหลดของมอเตอร์ ค่าของโหลดจะแปรผันตามค่าสลิป  $s$  เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ 2.19 เราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของขนาดได้คือ

$$T = k\psi_m I_r \sin \delta \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ เนื่องจาก  $\omega_m$  จะแปรผันโดยตรงกับ  $I_m$  ดังนั้น

$$T = k' I_m I_r \sin \delta \quad (2.22)$$

ภาพที่ 2.7 หากประมาณได้ว่า  $R_m \rightarrow \infty$  จะทำให้  $I_c \rightarrow 0$  จะทำให้  $I_0 = I_m$  และมีเฟสล่าหลัง  $V_m \cong 90^\circ$  และมีผลทำให้  $I_r \cos(\delta - 90^\circ) = I_r \sin \delta$  แต่เนื่องจาก  $\cos(\delta - 90^\circ) = \sin \delta$  เราจึงเขียนสมการ  $T$  ใหม่ได้ดังนี้

$$T = k' I_m I_r \sin \theta = k' I_m I_a \quad (2.23)$$

เมื่อ  $I_a = I_r \sin \theta$  ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบของแรงบิด ที่แผ่ตัวอยู่ในกระแสโรเตอร์ สำหรับค่าทางไฟฟ้าอื่น ๆ สรุปได้ดังนี้

กำลังงานอินพุตที่จ่ายให้กับมอเตอร์

$$P_m = 3V_s I_s \cos \phi \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียในตัวนำที่สเตเตอร์

$$P_{cu-stator} = 3I_s^2 R_s \quad (2.25)$$

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_{iron} = 3 \frac{V_m^2}{R_m} \quad (2.26)$$

กำลังงานที่ข้ามช่องอากาศไปยังโรเตอร์

$$P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (2.27)$$

กำลังงานสูญเสียในตัวนำที่โรเตอร์

$$P_{cu-rotor} = 3I_r^2 R_r \quad (2.28)$$

กำลังงานไฟฟ้าขาออก

$$P_o = P_g - P_{cu-rotor} \quad (2.29)$$

กำลังงานเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์

$$P_{sh} = P_o - P_{mech-loss} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $P_{mech-loss}$  คือกำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม ส่วนกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กที่โรเตอร์นั้นได้ถูกนำไปรวมไว้กับสเตเตอร์ตั้งแต่แรกที่ยื่นวงจรสมมูลย์ไว้แล้ว

ดังนั้น

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_o}{\omega_m} \\ &= \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$\omega_M$  คือความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ  $\frac{2}{P} \omega_r$ , สำหรับ  $\omega_m = \frac{2}{P} \omega_r$  ซึ่ง  $\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ เป็นความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางกลของตัวโรเตอร์เองเสมอ ถ้าเป็นโรเตอร์ 2 ขั้ว ความเร็ว  $\omega_r$  และ  $\omega_m$  จะเท่ากัน เนื่องจากว่าในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งซึ่งถือว่าเป็น  $180^\circ$  ทางไฟฟ้า ตัวโรเตอร์จริง ๆ ก็เคลื่อนที่ไปได้  $180^\circ$  ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นกัน แต่ถ้ามอเตอร์เป็นแบบ 4 ขั้ว ในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งซึ่งถือว่าเป็น  $180^\circ$  ทางไฟฟ้า ตัวโรเตอร์จะหมุนได้เพียง  $90^\circ$  ทางกลเท่านั้น จากสมการที่ 2.2 สามารถแทน  $N$  ในสมการด้วย  $\omega$  จะได้ว่า

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

จะได้ว่า 
$$\omega_r = \omega_s - s\omega_s = (1-s)\omega_s \quad (2.32)$$

$$\omega_m = \frac{P}{2}(1-s)\omega_s \quad (2.33)$$

แทนในสมการที่ 2.31 จะได้

$$T = \frac{3I_r^2 R_r (1-s)}{s \left( \frac{2}{P} \right) (1-s) \omega_s} \quad (2.34)$$

แทนสมการที่ 2.27 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$T = \left( \frac{P}{2} \right) \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.35)$$

เนื่องจาก

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{\left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (2.36)$$

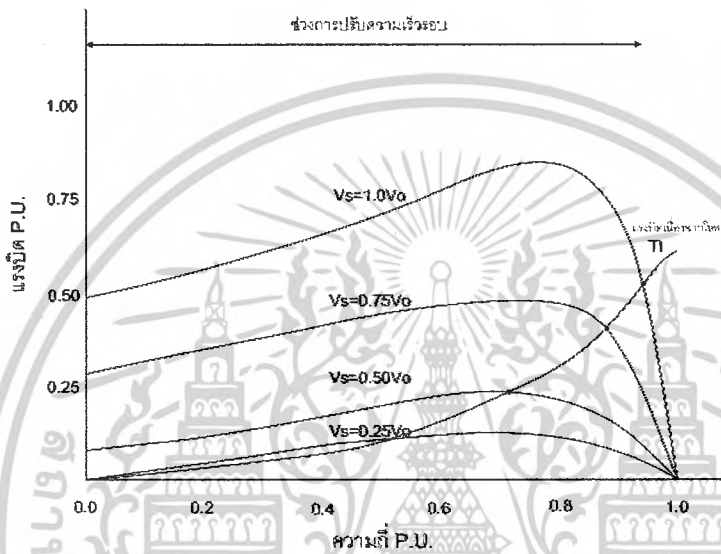
แทนสมการที่ 2.36 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$T = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \frac{R_r}{s \omega_s} \frac{V_s^2}{\left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การปรับแรงดันป้อนเข้าที่สเตรเตอร์โดยคงความถี่ไว้ถือเป็นวิธีควบคุมความเร็วรอบที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น ใช้เอซี ช็อปเปอร์ (AC chopper) ควบคุมโดยปรับค่าความต้านทาน ออโต้ทรานสฟอร์มเมอร์ (Auto - transformer) และอื่นๆ ภาพที่ 2.8 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์แรงบิด - ความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งได้จากสมการที่ 2.37 โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันในระดับต่าง ๆ กันในรูปยังแสดงถึงเส้นกราฟของโหลด โดยยกตัวอย่างเป็นโหลดประเภทใบพัด ซึ่ง  $T_L \propto \omega^2$  และแสดงจุดตัดระหว่างกราฟแรงบิดของโหลดและกราฟแรงบิดมอเตอร์ที่แรงดันต่าง ๆ กันไป



ภาพที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด - ความเร็ว ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ

จุดตัดที่เห็นคือจุดสมดุลการทำงานซึ่งมอเตอร์จะทำงาน ณ ตำแหน่งแรงบิด - ความเร็วรอบที่จุดตัดนั้น จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสลลิปมีค่ามากพอสมควรซึ่งเป็นผลให้สามารถปรับความเร็วรอบได้ระยะกว้างพอสมควร แต่ต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่งว่า ถ้าสลลิปมากเกินไปกระแสจะมากกว่าปกติที่โหลดเดียวกัน เนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำจะแปรผันโดยตรงกับ  $\omega_L$  ส่งผลต่อเนื่องให้กำลังงานสูญเสียในตัวนำมีค่ามากกว่าปกติตาม  $I^2 R$  มอเตอร์ที่ใช้จึงต้องเป็นมอเตอร์ที่ออกแบบเพื่อรองรับการทำงานช่วงสลลิปมากได้ เพราะขณะที่มอเตอร์ร้อนขึ้นแต่การระบายความร้อนมีน้อยลงเนื่องจากมอเตอร์มีความเร็วลดลง มอเตอร์พัดลมที่ใช้ตามบ้านเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุมความเร็วด้วยการเปลี่ยนระดับแรงดัน

## 2.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ถ้านำสมการที่ 2.37 มาเขียนกราฟโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ให้มากกว่าความถี่ปกติในขณะที่ยังคงค่าแรงดันคงที่ ผลที่ได้จะเป็นดังภาพที่ 2.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลงเรื่อย

ๆ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า  $\omega_L$  จะเพิ่มมากขึ้นตาม มีผลทำให้กระแสลดลง เมื่อกระแสลดลงฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศจะลดลงตาม แรงบิดของมอเตอร์ซึ่งเกิดจะแรงปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กก็จะลดลงด้วย แรงบิดสูงสุดจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$T_m = 3 \frac{P}{2} \left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{\omega_{slm} R_r}{R_r^2 + \omega_{slm}^2 L_{lr}^2} \tag{2.38}$$

โดยที่

$$s_m = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_r^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \tag{2.39}$$

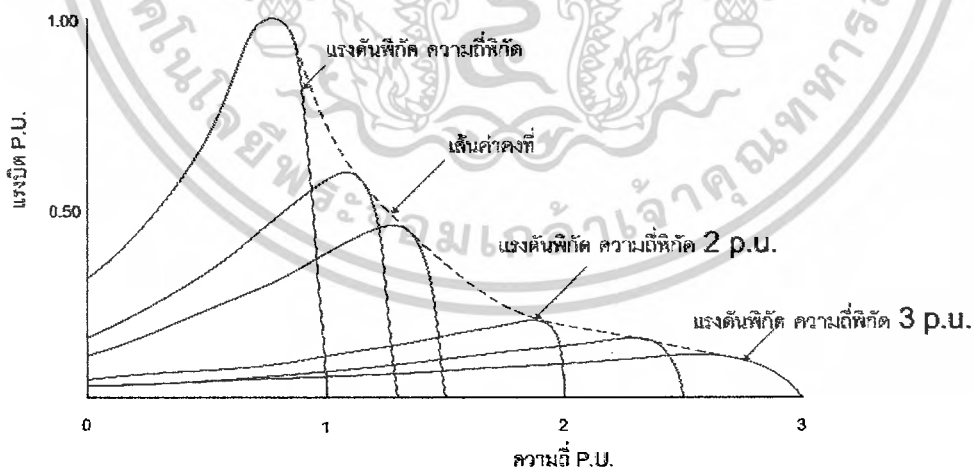
ถ้าไม่คิด  $R_s$  และ  $L_{ls}$  จะได้

$$s_m = \pm \frac{R_r}{\omega_s L_{lr}} \tag{2.40}$$

$$s_m \omega_s = \pm \omega_{slm} \tag{2.41}$$

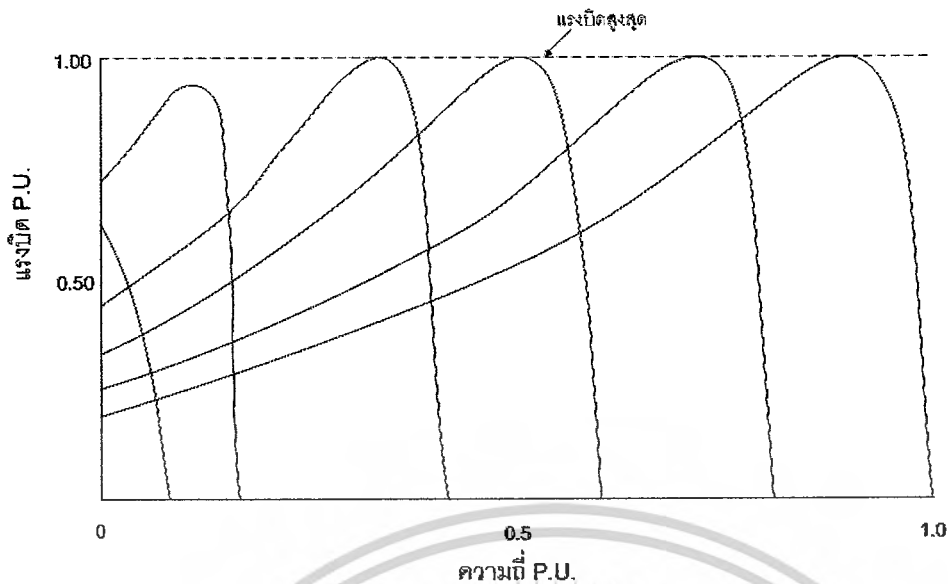
$$\omega_{slm} = \pm \frac{R_r}{L_{lr}} \tag{2.42}$$

เมื่อ  $\omega_{slm}$  คือความถี่สลลิปที่ค่าแรงบิดสูงสุด



ภาพที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด - ความเร็ว เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด – ความเร็วรอบ ที่อัตราส่วน  $\frac{V_s}{\omega_s}$  คงที่

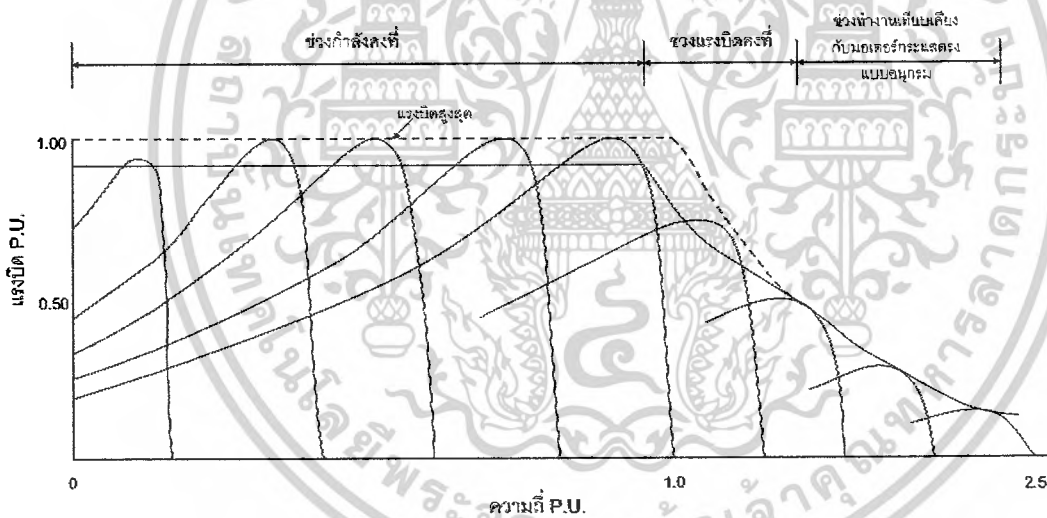
เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ 2.38 จะได้

$$T_m \omega_s^2 = \text{constant} \quad (2.43)$$

ในทางตรงกันข้ามถ้าเราลดความถี่ลงในขณะที่คงค่าแรงดันไว้ ผลก็คือ  $\omega_s$  ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้กระแสมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศมากขึ้นเรื่อย ๆ และเกิดการอิ่มตัว (saturation) ในที่สุด นอกจากนี้กระแสที่มากขึ้นจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าปกติ ดังนั้นการปรับความถี่ในพื้นที่ของกราฟที่ต่ำกว่าฟิสิกส์เราจำเป็นต้องลดค่าแรงดันลง เพื่อคงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ไม่ให้มากเกินไป ภาพที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงบิด ความเร็วรอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการคงค่า  $\frac{V_s}{\omega_s}$  ให้คงที่ไว้ ค่าแรงบิดสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.38 จึงมีค่าคงที่ทุกเว้นบริเวณที่มีความถี่ต่ำ ๆ ซึ่ง ณ บริเวณนั้นแรงดันก็ต่ำด้วยเป็นผลทำให้สัดส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานในขดลวดต่อแรงดันที่ป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสที่ควรจะเป็นที่จึงตกลง ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กลดลงและแรงบิดก็ลดลงด้วย เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในย่านความถี่ต่ำจึงมักจะเพิ่มแรงดันเข้าไป เพื่อเอาชนะแรงดันตกคร่อม (Voltage drop) ที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งเราเรียกค่าแรงดันในส่วนนี้ว่า “boost voltage” โดยทั่วไปแล้วเราจะเรียกระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและความถี่ว่า VVVF (variable Voltage Variable Frequency)

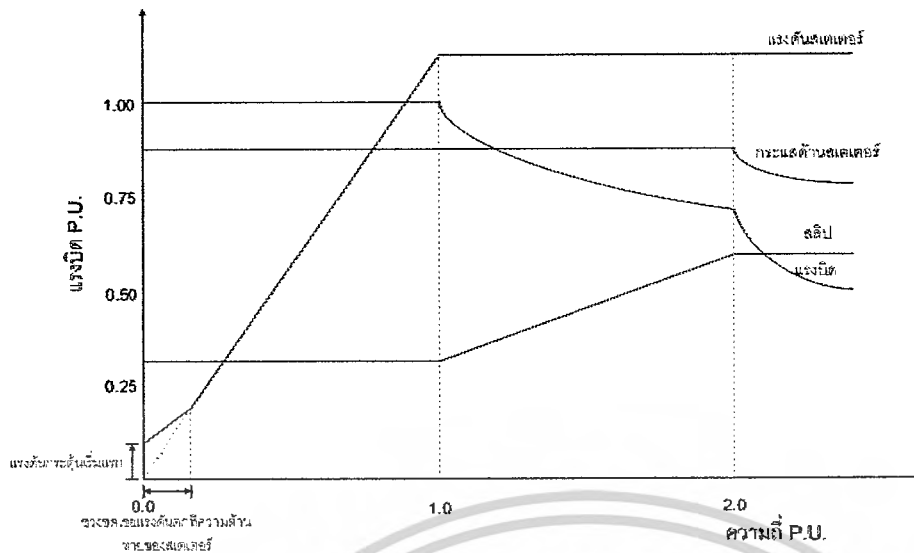
ในการควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานโดยปกติแล้วเราจะไม่ใช้งานมอเตอร์ที่ค่า  $T_m$  แต่เราจะลดลงตามการใช้งานจริง นอกจากนี้เรายังนิยมที่จะกำหนดให้แรงบิดสูงสุดของการใช้งานมีค่าต่ำกว่า  $T_m$  ซึ่งมีผลทำให้  $T$  ที่งานจริงนั้นมีค่าน้อยกว่า  $T_m$  ยังทำให้การทำงานของมอเตอร์มี

เสถียรภาพมากยิ่งขึ้นเมื่อภาระของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.11 จะเห็นว่าหลังจากบริเวณแรงบิดคงที่ (constant – torque region) เราสามารถกำหนดให้มอเตอร์ทำงานในบริเวณที่กำลังคงที่ (constant – power region) ได้ เพราะบริเวณนี้ถือเป็นบริเวณที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นต่อไปไม่ได้เนื่องจากถึงค่าที่พิกัด ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องคงค่าแรงดันไว้ เมื่อเราเพิ่มค่าความถี่ให้มากกว่าความถี่ที่พิกัด ลักษณะเส้นโค้งคุณสมบัติก็จะเปลี่ยนไปเหมือนกันภาพที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นว่านับจากจุดความถี่พิกัดนี้ ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์จะสามารถรับได้จะเป็นไปดั่งเส้นประ อย่างไรก็ตามถ้าเราไม่ได้ให้มอเตอร์รับภาระที่แรงบิดสูงสุด เราสามารถกำหนดให้มอเตอร์ทำงานในลักษณะกำลังคงที่ได้ตามแนวของเส้นที่บ่งชี้ประกกันพอดี การกำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่กำลังคงที่นี้จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ สำหรับวิธีแรกที่ทำได้คือการกำหนดค่าแรงบิด  $T$  ที่เหมาะสมเพื่อให้  $T\omega_m$  มีค่าคงที่ ค่า  $T$  นี้จะค่อย ๆ เขยิบเข้าใกล้  $T_m$  มากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ผลก็คือสลิปเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสมีค่าคงที่ต่อเนื่องไปจนถึงจุดที่  $T = T_m$  เป็นอันสิ้นสุดช่วงกำลังคงที่ ส่วนอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการปรับความถี่สลิปโดยตรงเข้าไปที่โรเตอร์ซึ่งจะกระทำได้ในกรณีที่โรเตอร์เป็นโรเตอร์แบบพินขดลวด อย่างไรก็ตามจากจุดที่  $T = T_m$  แล้ว การทำงานของมอเตอร์ก็จะเข้าสู่บริเวณ  $T_m\omega_s^2 = \text{ค่าคงที่}$  ตามภาพที่ 2.9 ต่อไป



ภาพที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด – ความเร็วรอบของ VVVF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 พื้นที่การทำงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ  
ที่ได้จากภาพที่ 2.11

## 2.8 คุณลักษณะของแรงบิดความเร็ว

จากการสัมพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์ ถ้าความถี่โรเตอร์มีค่าน้อย ๆ การรักษาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กให้มีค่าคงที่จะทำให้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลทางด้านเอาต์พุตและค่าความถี่ โรเตอร์มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นตลอดทุก ๆ ช่วงของความถี่

$$T_m = K_1 s f \quad (2.44)$$

จากสมการที่ 2.44 จะเป็นการแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด - ความเร็ว เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลงเรานิยมแสดงค่าของแรงบิดทางกลให้อยู่ในเทอมของความเร็วสลิป

$$\omega_{sl} = \frac{f_{sl}}{f} \omega_s = \frac{4\pi}{P} f_{sl} \quad (2.45)$$

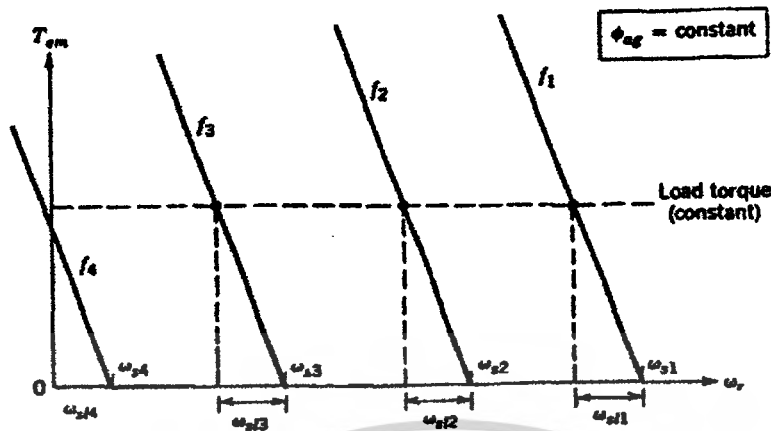
เมื่อ  $K_1$  คือ ค่าคงที่

และจากสมการที่ 2.44 และ 2.45 จะได้

$$T_m \approx K_2 \omega_{sl} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $K_2$  คือ ค่าคงที่

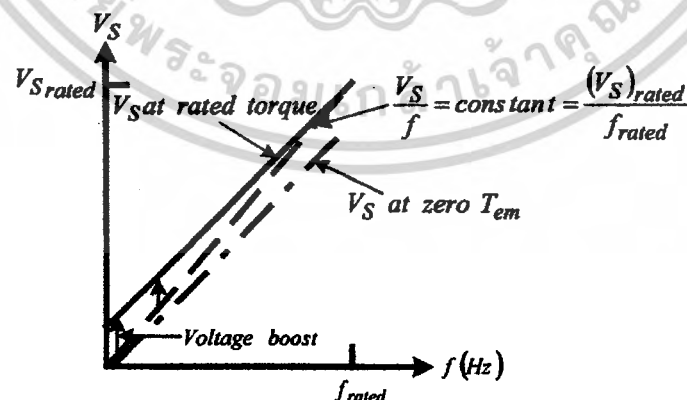
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด - ความเร็ว ที่ค่าสลลิปต่ำ

คุณลักษณะในภาพที่ 2.13 ค่าความถี่  $f$  จะถูกแทนด้วย  $f_1$  ซึ่งก็คือค่าของความถี่ซิงโครนัส  $\omega_{s1}$  นั้นเอง จากความสัมพันธ์แรงบิด - ความเร็ว จะเลื่อนไปตามแนวนอนในลักษณะที่ขนานกันไปโดยจะมีการแสดงที่ค่าความถี่ต่าง ๆ จำนวน 4 ค่า ในการอธิบายกราฟในภาพที่ 2.13 ให้เราพิจารณาที่ค่าความถี่  $f_1$  และ  $f_2$  ค่าความถี่ซิงโครนัส  $\omega_{s1}$  และ  $\omega_{s2}$  จะมีความสัมพันธ์กันค่าความถี่ โดยจะเห็นว่าค่า  $\omega_{s1}$  จะมีค่าเท่ากับ  $\omega_{s2}$  ถ้าแรงบิดของโหลดที่ความถี่ทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นจากกราฟของแรงบิดความเร็วของภาพที่ 2.13 จะเห็นว่าที่แรงบิดเท่ากัน ค่าความเร็วสลลิปก็จะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะของแรงบิด - ความเร็ว ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ มีลักษณะเหมือนกันและขนานกันไปตามแนวนอน ถ้าค่าแรงบิดของโหลดคงที่ก็จะทำให้ค่าความถี่สลลิปมีค่าคงที่ด้วย แต่ค่าของสลลิปจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลง ดังนั้นกำลังงานสูญเสียในโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลง

## 2.9 การชดเชยแรงดันเพิ่มเมื่อความถี่ที่ป้อนมีค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 2.14 การชดเชยแรงดันเพื่อรักษาฟลักซ์ที่ความถี่ต่ำ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความถี่ป้อนเข้าต่ำลง ผลของความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์จะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย แม้ว่าความถี่สลิปจะมีค่าต่ำก็ตาม สำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทั่วไปเทอมของ  $s\pi f L_r$  จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม  $R_r \frac{f}{f_{sl}}$  ในวงจรสมมูลย์ โดยที่ กระแสที่ไหลเข้าวงจรโรเตอร์ จะอินเฟสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำผ่านช่องอากาศ ถ้าเราใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดสเตเตอร์เป็นเฟสเซอร์อ้างอิง เนื่องจาก  $I_s = I_r + jI_m$  ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_s \approx [E_1 + (2\pi f L_{ls})I_m + R_s I_r] + j[(2\pi f L_{ls}) - R_s I_m] \quad (2.47)$$

เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ 2.47 เป็นส่วนที่ต่างจากกับ  $V_s$  ซึ่งไม่มีผลต่อขนาดของ  $V_s$  มากนัก ดังนั้นจึงสามารถตัดทิ้งไปได้ จะได้สมการคือ

$$V_s \approx [E_1 + (2\pi f L_{ls})I_m + R_s I_r] \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\phi_1$  คงที่  $E_1$  จะแปรผันไปตามความถี่ที่ป้อน ( $E_1 = k_s \phi_1 f$ ) และถ้า  $\phi_1$  คงที่  $I_m$  ก็จะมีค่าคงที่ด้วยจากสมการที่ 2.48 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_s = k_{13} f + R_s I_r \quad (2.49)$$

ถ้า  $f$  สูง ๆ  $R_s I_r$  จะไม่มีผลมากนักโดยสามารถละทิ้งไปได้ ดังนั้น  $V_s \approx E_1$  แต่ถ้า  $f$  ต่ำ ๆ  $R_s I_r$  จะมีผลมากขึ้นทำให้ไม่สามารถละทิ้งได้ จึงต้องเพิ่มแรงดันป้อนเข้าเพื่อให้ อัตราส่วน  $\frac{E_1}{f}$  คงที่เพื่อรักษาแรงบิดให้คงที่ที่พิกัด

## 2.10 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ ( $B$ ) จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage:  $E$ ) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่ายและเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.50)$$

$e$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

$N_s$  = จำนวนรอบของขดลวด

$\phi$  = ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (2.51)$$

แทนค่าสมการที่ 2.51 ลงในสมการที่ 2.50 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 3.20

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (2.52)$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f$  เมื่อแทนค่า  $\cos \omega t$  เท่ากับหนึ่งและทำสมการที่ 3.14 เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E = 4.44 N_s \phi f k_w \quad (2.53)$$

$k_w$  = winding factor

จากสมการที่ 2.52 จะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การปรับเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่ต่างกันอย่างมากมายจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ในการปรับความถี่ของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่ละเอียดมากกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่ทั้งนี้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย ซึ่งจากรูปที่ 3.1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_s, E, \phi$  และ  $T$  ดังนี้

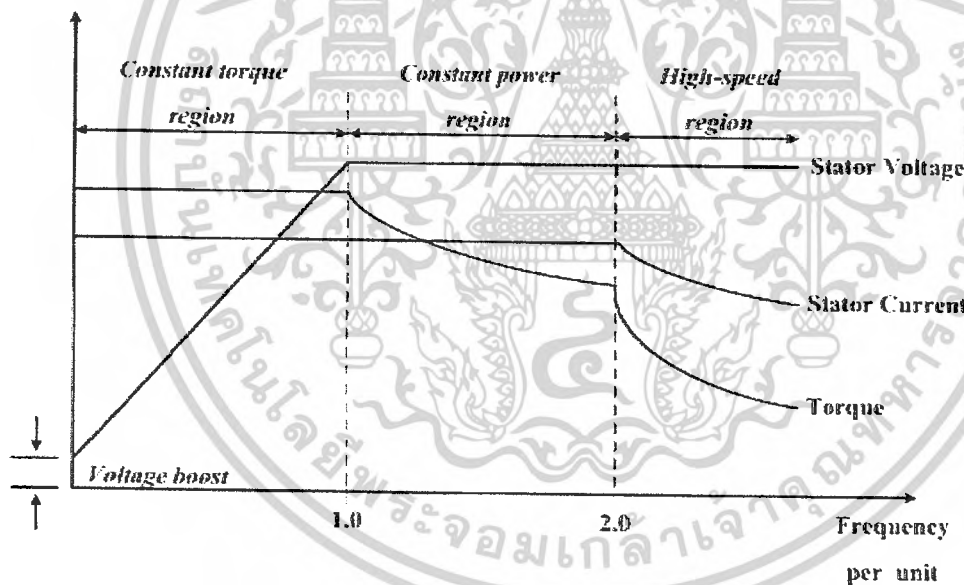
$$V_s \approx E \quad (2.54)$$

$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2 \cdot \left(\frac{E}{f}\right)^2 \quad (2.55)$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \quad (2.56)$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่  $\left(\frac{V_s}{f}\right), \left(\frac{E}{f}\right)$  มีค่าคงที่ จึงจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ตั้งแต่ที่ระดับความถี่ต่ำถึงความถี่ที่พิกัดเราเรียกการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบนี้ว่า “การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage Variable Frequency : VVVF)” ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสามารถแบ่งช่วงของการควบคุมความเร็วได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)



ภาพที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แรงบิด กระแสมอเตอร์กับความถี่

### 2.11 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจะต้องทำให้ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากภาพที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าช่วงดังกล่าวขนาดของแรงดันสเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของ

มอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่งทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ และในช่วงการทำงานนี้ค่ากระแสมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

## 2.12 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัดได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่มีค่าลดลง จะเป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงด้วยและขีดจำกัดกระแสโรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่ช่วงนี้ค่าแรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 2.57

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} T_{rated} \quad (2.57)$$

$$P_{em,max} = \omega_r T_{em,max} \quad (2.58)$$

สมการที่ 2.58 จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกลซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เราเรียกว่าช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังคงที่ (Constant Power Region)

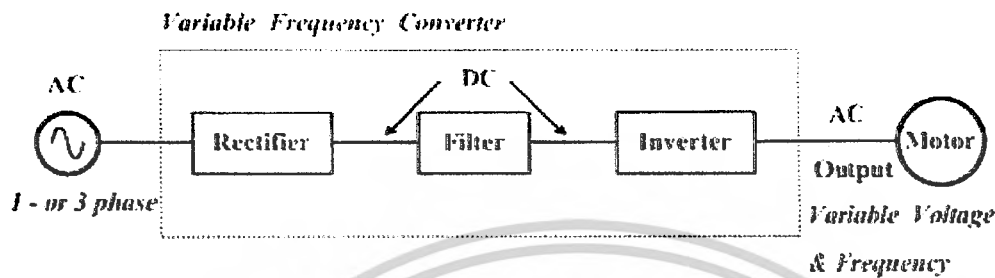
## 2.13 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่โรเตอร์คงที่)

ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตมีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่ความถี่ที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน  $1/f^2$  ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่นั้นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

## 2.14 ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ระบบเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งอาจจะเป็น 1 เฟส หรือ 3 เฟส จ่ายไฟฟ้าเข้าเครื่องปรับความเร็วรอบโดยผ่านการแปลงผันสัญญาณไฟตรงที่ได้จากวงจรดังกล่าวยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณ (Ripple) จึงต้องมีการกรองสัญญาณที่มีการกระเพื่อม

ให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้นเรียกวางจรส่วนนี้ว่าวงจรกรอง (Filter) หลังจากนั้นจะเป็นหน้าที่ของวงจรที่แปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ซึ่งในส่วนนี้จะมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และในส่วนสุดท้ายจะเป็นมอเตอร์ที่ถูกควบคุม



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ

เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะต้องมีความสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ ดังนั้นเครื่องปรับความเร็วรอบที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

- สามารถปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
- สามารถปรับแรงดันเอาท์พุทเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
- สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดที่ต้องการ

ภายในโครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบในส่วนของการกรองและการแปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

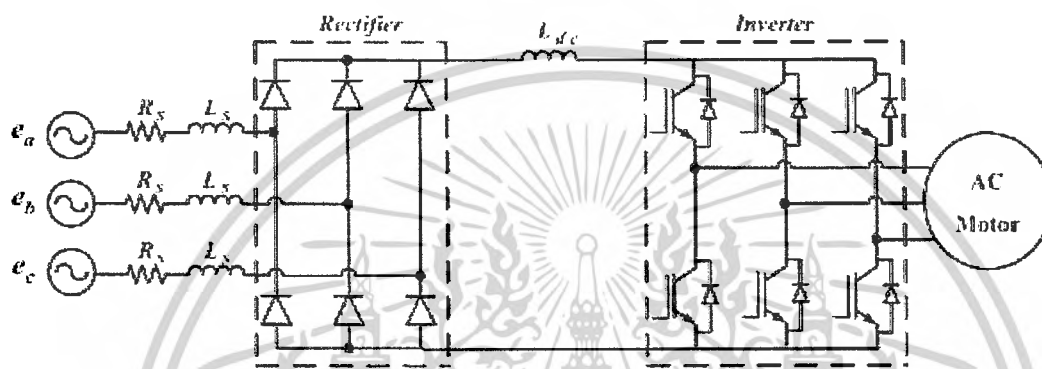
1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)
2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

โดยการบอกชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบก็จะบอกตามประเภทของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

### 2.15 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)

วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสแสดงดังภาพที่ 2.16 จะประกอบด้วยไดโอด แบบ 6 พัลส์ ทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรงที่มีการกระเพื่อมและมีอินดิคเตอร์ต่ออนุกรมใช้ในการกรองสัญญาณไฟตรงให้เรียบขึ้นและในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะใช้ไอจี

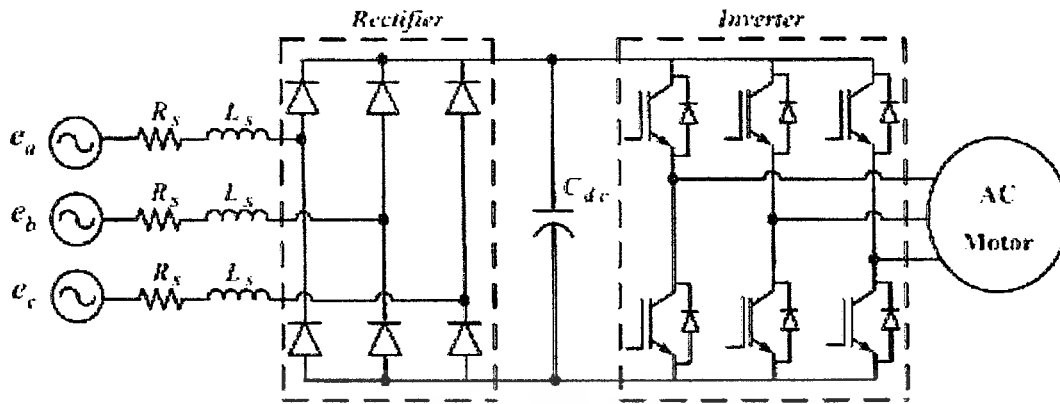
บีทีเพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที เช่น เทคนิค 6 step หรือ PWM ซึ่งข้อดีของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวก็คือรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์แต่จะมีการเกิดสไปค์ขึ้นเนื่องจากการคอมมิวเตท และนอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงความถี่เอาต์พุตที่ปรับค่าได้ในช่วงแคบๆ และที่สำคัญจะต้องทำงานในสภาวะที่มีภาระเท่านั้น โดยส่วนมากแล้วอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขนาดแรงม้าสูงๆ



ภาพที่ 2.17 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่าย

## 2.16 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

โครงสร้างทางด้านวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะมีลักษณะคล้ายๆกับแบบแหล่งจ่ายกระแส แต่จะแตกต่างกันตรงในส่วนของการกรองสัญญาณไฟตรง กล่าวคือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะใช้คาร์ปาซิเตอร์ที่มีค่าความจุสูงๆมาใช้ในการกรองสัญญาณทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับภาระ และโดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์แบบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6 Step Inverter และ PWM Inverter ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน คือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย และปรับความถี่ได้ในย่านกว้างๆ ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาล้างเวลาในเรื่องการลัดวงจรของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะแก้ไขโดยใช้วงจรลอคเอาต์พุตที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวและลักษณะของวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน แสดงภาพรูปที่ 2.17



ภาพที่ 2.18 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter มากกว่าแบบ 6 Step ทั้งนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบบ 6 Step จะมีปัญหาในเรื่องฮาร์มอนิกสั่นดับต่ำที่เกิดขึ้นทั้งจากรูปคลื่นแรงดันและกระแสในขณะที่ยินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

## 2.17 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 2.17.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test)

วิธีการก็คือจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันพิกัดของมอเตอร์ โดยที่ไม่มีการต่อภาระทางกลกับมอเตอร์ ในขณะที่ไม่มีภาระทางกลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีความเร็วโรเตอร์ ( $N_r$ ) ใกล้เคียงกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ( $N_s$ ) ค่าสลิปมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรในวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า พลังงานที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสูญเสียในรูปของการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) การสูญเสียในขดลวด (stator) และการหมุน (rotation loss) สิ่งที่เราต้องการจากการทดสอบแบบเปิดวงจรคือ  $R_c$  และ  $X_m$  โดยทำการต่อวัดค่าของ กำลัง ( $P_o$ ) แรงดัน ( $V_o$ ) และกระแส ( $I_o$ ) แล้วนำการคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 P_o &= V_o I_o \cos \theta_o \\
 \theta_o &= \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \\
 R_c &= \frac{V_o^2}{P_o} \\
 X_m &= \frac{V_o}{I_o \sin \theta_o}
 \end{aligned}
 \tag{2.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.17.2 การทดสอบยัดโรเตอร์ (Block rotor test)

สามารถทำได้โดยทำการยัดโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่กับที่ ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ค่าสลิปจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง จะเปรียบเสมือนการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ โดยเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงค่าที่พิกัดกระแส และความถี่ ในการทดสอบนี้ค่าการสูญเสียในแกนเหล็กถือว่ามิต้านน้อยมาก ซึ่งในการทดสอบแบบนี้จะทำการต่อวัตต์ ค่าพลังงาน ( $P_b$ ) แรงดัน ( $V_b$ ) และกระแส ( $I_b$ ) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_b &= V_b I_b \cos \theta_b \\
 \theta &= \cos^{-1} \frac{P_b}{V_b I_b} \\
 Z &= \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\theta_b} = R_b + jX_b \\
 R_b &= R_1 + R_2 \\
 X_1 + X_2 &= X_b
 \end{aligned} \tag{2.60}$$

### 2.17.3 การทดสอบหาความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (V-I method)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความต้านทานที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ขดใดขดหนึ่งแล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงดันขึ้นทีละน้อย แล้วทำการจดค่าแรงดันและกระแสที่แรงดันป้อนเข้าต่าง ๆ จนกระทั่งถึงค่าที่พิกัดกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปนำการหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_1$ )

## บทที่ 3

### เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมีลักษณะการใช้งาน 2 แบบคือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generators)
2. มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motors)

ในส่วนของบทนี้ จะเน้นการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

**สเตเตอร์**

เป็นส่วนอยู่กับที่ โดยที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะถูกพันเอาไว้บนสเตเตอร์

**โรเตอร์**

เป็นส่วนหมุน ซึ่งขดลวดสนาม(Field winding) พันอยู่ โรเตอร์มี 2 ลักษณะ

1. โรเตอร์แบบขั้วซาเลียน (Salient pole) ขั้วแม่เหล็กจะยื่นออกมาจากแกนของโรเตอร์
2. โรเตอร์แบบขั้วนอนซาเลียน (Non-salient pole or Cylindrical rotor) ขั้วแม่เหล็กจะ

เรียบไปกับโรเตอร์

**ขดลวดหน่วง**

จะมีอยู่ในโรเตอร์แบบขั้วซาเลียน ใช้เพื่อแก้การ Hunting ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

**เอ็กซ์ไซเตอร์**

เป็นตัวจ่ายไฟกระแสตรงเข้าที่ขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็ก

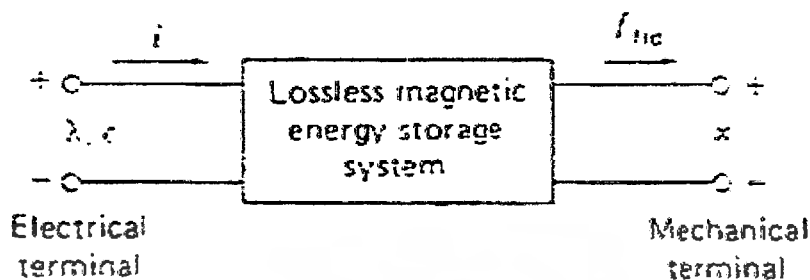
#### 3.2 ความเข้าใจและลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

3.2.1 กฎและความเข้าใจที่ต้องใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.1)$$

1. กฎของฟาราเดย์ ดังในสมการ 3.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสนามแม่เหล็ก

การเปลี่ยนรูประหว่างกำลังไฟฟ้าและกล ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงและมีการเคลื่อนที่ทางกล ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนรูปกำลังงานไฟฟ้าและกำลังงานกล

2. เมื่อมีสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกัน จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ

### 3.2.2 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

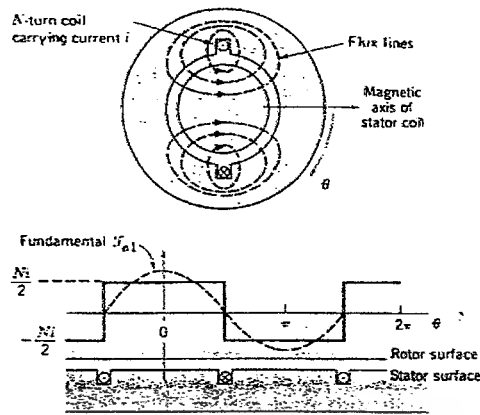
โดยปกติขดลวดอาร์เมเจอร์จะถูกพันอยู่บนสเตเตอร์ และขดลวดสนามจะพันอยู่บนโรเตอร์ ขดลวดสนามจะถูกต่ออยู่กับแรงดันไฟตรง

ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแก่โหลด จะมีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดฟลักซ์ขึ้นในช่องอากาศ และฟลักซ์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นมีผลหักล้างกับฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสนาม และจากการที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 (จากขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนาม) ทำมุมกัน จึงทำให้เกิดแรงบิดภายในขึ้นที่โรเตอร์ โดยมีทิศตรงกันข้ามกับแรงบิดภายนอกจากเครื่องต้นกำลัง ดังนั้นเพื่อให้โรเตอร์หมุนและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไปได้ เครื่องต้นกำลังจึงต้องจ่ายกำลังงานกล (แรงบิด) เพิ่ม ในขณะที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพิ่มขึ้น

### 3.2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์มีหลายชุด และถูกจัดเรียงอยู่โดยรอบช่องอากาศ โดยที่ขดลวดแต่ละชุดถูกต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กมีจำนวนขั้วตามต้องการ การศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายชุด ทำได้โดยการพิจารณาขดลวดชุดเดียวซึ่งมีจำนวน  $N$  รอบ และด้านทั้ง 2 ของขดลวดห่างกัน  $180$  องศาไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า full-pitch-coil เช่นที่แสดงในภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งเกิดจากขดลวด 1 ชุด,  $N$  รอบ ด้านทั้ง 2 ของขดลวดห่างกัน  $180$  องศาไฟฟ้า

ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎมือขวา และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นแม่เหล็กของส่วนที่เป็นโลหะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอากาศ ดังนั้นจึงสมมติได้ว่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็กจะมีค่าเฉพาะในช่องอากาศ

เนื่องจากโครงสร้างของสเตเตอร์สมมาตร สนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่มุม  $\theta$  ภายใต้วงหนึ่งจะมีขนาดเท่ากับมุม  $\pi + \theta$  ซึ่งอยู่ภายใต้วงตรงข้าม โดยสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งทั้งสอง มีทิศทางตรงกันข้ามกัน

แรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยรอบเส้นทางปิด ซึ่งแสดงด้วยเส้นฟลักซ์ (ดังภาพที่ 3.2) มีค่าเท่ากับ  $Ni$  และจากสมมติฐานที่กำหนดให้ความต้านทานทางแม่เหล็กในส่วนที่เป็นโลหะมีค่าต่ำ ดังนั้นเทอม  $\oint Hdl$  ในส่วนที่เป็นโลหะจึงมีค่าเกือบเป็นศูนย์

ดังนั้นการสูญเสียแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวงจรแม่เหล็ก จึงมีเฉพาะในช่องอากาศเท่านั้น ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ขดลวดจะถูกออกแบบจัดวางอย่างเหมาะสม เพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์มากที่สุด

เมื่อพิจารณาคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเช่นที่แสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม และเมื่อวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ ก็จะพบว่าประกอบด้วยส่วนของความถี่มูลฐาน และส่วนฮาร์มอนิกสี่

ส่วนความถี่มูลฐาน ( $F_{e1}$ ) จากการวิเคราะห์จะมีค่าเท่ากับ

$$F_{e1} = \frac{4 Ni}{\pi} \cos \theta \quad (3.2)$$

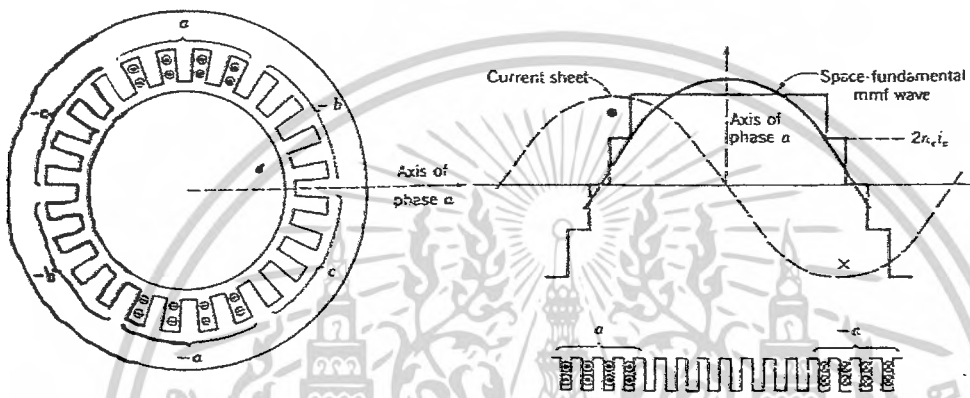
โดยที่  $\theta$  เป็นมุมที่วัดจากแกนของขดลวด

ซึ่งส่วนความถี่มูลฐานนี้เป็นคลื่นที่มีขนาด  $F_{1, peak}$  อยู่ในแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวด

$$F_{1, peak} = \frac{4 Ni}{\pi 2} \quad (3.3)$$

การศึกษาผลที่เกิดจากขดลวดที่วางอยู่ในหลายช่อง เช่นภาพที่ 3.3 ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว 3 เฟส เป็นดังนี้

ขดลวดแต่ละเฟสมีคุณลักษณะเหมือนกัน และถูกจัดวางเพื่อให้แนวแกนแม่เหล็กที่เกิดจากแต่ละเฟสทำมุมกัน 120 องศา



ภาพที่ 3.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟสถูกจัดวางเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว และด้านทั้งสองของขดลวดแต่ละชุดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

ในภาพที่ 3.3 ขดลวดถูกจัดวางเป็น 2 ชั้น ขดลวดแต่ละชุดมีจำนวน  $N$  รอบ กระแส  $i$  ไหลผ่าน ซึ่งทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์มากขึ้นกว่าที่แสดงในภาพที่ 3.2

ส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กในกรณีที่ขดลวดถูกออกแบบจัดวางให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $P$  ขั้ว โดยที่มีขดลวดจำนวน  $N_{ph}$  รอบ ต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟส คือ

$$\mathfrak{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \cos \omega t \cos \theta \quad (3.4)$$

โดยที่เทอม  $4/\pi$  มาจากการใช้ออนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์คลื่น mmf ลักษณะสามเหลี่ยมที่เกิดจากด้านของขดลวดที่วางห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

$k_w$  : ค่า Winding factor มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางขดลวด

ดังนั้นค่า  $k_w$  และ  $N_{ph}$  คือ จำนวนรอบประสิทธิผลที่ต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟส ซึ่งทำให้เกิดส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

$I_a$  คือ กระแสในเฟส a

ส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้ จะเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดจากแผ่นกระแสสมมูล ที่มีลักษณะการจัดวางแบบรูปคลื่นไซน์ เช่นที่แสดงในภาพที่ 3.3

คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังกล่าวที่ผ่านมา มีลักษณะเป็น Standing wave กระจายอยู่ในช่องอากาศแบบโคไซน์ ขนาดสูงสุดของส่วนความถี่มูลฐาน ( $F_{max}$ ) คือ

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \quad (3.5)$$

โดยที่  $I_m$  คือ ขนาดสูงสุดของกระแส  $i_a = I_m \cos \omega t$  และ  $F_{max}$  อยู่ในแนวแกนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส a

ด้วยหลักการเดียวกัน ขดลวดที่พันอยู่บนโรเตอร์ก็จะถูกออกแบบจัดวาง เพื่อให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ให้มากที่สุด เพื่อให้การลดส่วนฮาร์มอนิกซึ่งขดลวดในแต่ละช่องอาจจะมีจำนวนรอบต่างกัน เช่น ขดลวดที่อยู่ใกล้บริเวณผิวขั้ว จะมีจำนวนรอบน้อยกว่าขดลวดชุดอื่นๆที่อยู่ในช่องอื่น

### 3.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน

เพื่อที่จะให้สามารถเข้าใจทฤษฎีและการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟสได้ดี จำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดหลายเฟสด้วย

ในขั้นแรกจะวิเคราะห์คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวด 1 เฟสในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ P ขั้วก่อน ซึ่งเป็นพื้นฐาน และช่วยให้เข้าใจระบบ 3 เฟสได้ดีขึ้น

#### 3.3.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส

เมื่อกระแสซึ่งแปรผันตามเวลาแบบรูปคลื่นไซน์

$$i_a = I_m \cos(\omega t - 240) \quad (3.6)$$

ไหลผ่านขดลวด 1 เฟส จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $\mathfrak{F}_{a1}$ ) คือ

$$\mathfrak{F} = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad (3.7)$$

$$F_{max}/2$$

ขนาดสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $F_{\max}$ ) คือ

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \quad (3.8)$$

นั่นคือ

$$\mathfrak{F}_{a1} = (F_{\max} \cos \theta) \cos \omega t \quad (3.9)$$

หรือ

$$\mathfrak{F}_{a1} = F_{\max} \left[ \frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t) \right] \quad (3.10)$$

จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการที่ขดลวด 1 เฟสประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

$$\mathfrak{F}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.11)$$

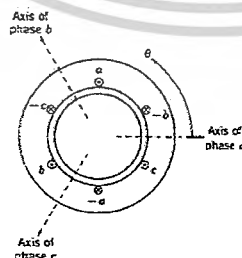
$$\mathfrak{F}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (3.12)$$

ซึ่ง  $\mathfrak{F}^+$  และ  $\mathfrak{F}^-$  เป็นคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน มีขนาดเท่ากันคือ  $F_{\max}/2$  และ หมุนในทิศทางตรงข้ามกันคือ  $\mathfrak{F}^+$  หมุนในทิศทาง  $+\theta$  และ  $\mathfrak{F}^-$  หมุนในทิศทาง  $-\theta$  ด้วยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) เท่ากัน

### 3.3.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายเฟส

ในหัวข้อนี้จะเลือกวิเคราะห์จากขดลวด 3 เฟส เช่นที่อยู่บนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส และเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction machine) โดยในที่นี้จะวิเคราะห์จากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว หรือจากคู่ขั้วใดๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ P ขั้ว

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส ขดลวดแต่ละเฟสแยกจากกันและห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า เช่นที่แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขดลวดบนสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละเฟส ก็จะต่างมุมกัน 120 องศาไฟฟ้า  
ด้วย ขดลวด a, b และ c มีกระแส

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (3.13)$$

$$i_a = I_m \cos(\omega t - 120) \quad (3.14)$$

$$i_a = I_m \cos(\omega t - 240) \quad (3.15)$$

ไหลผ่านตามลำดับเฟส a, b และ c  
จากสมการ 3.10, 3.11 และ 3.12

$$\mathfrak{I}_{a1} = \mathfrak{I}_{a1}^+ + \mathfrak{I}_{a1}^- \quad (3.16)$$

โดยที่

$$\mathfrak{I}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.17)$$

$$\mathfrak{I}_{c1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$

$$\mathfrak{I}_{c1} = \mathfrak{I}_{c1}^+ + \mathfrak{I}_{c1}^-$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = (3/2) F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \mathfrak{I}_{a1} + \mathfrak{I}_{b1} + \mathfrak{I}_{c1} \quad (3.18)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \mathfrak{I}^+(\theta, t) + \mathfrak{I}^-(\theta, t)$$

$$\mathfrak{I}^+(\theta, t) = \mathfrak{I}_{a1}^+ + \mathfrak{I}_{b1}^+ + \mathfrak{I}_{c1}^+$$

$$= 0$$

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \quad (3.19)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\mathfrak{I}_{b1} = \mathfrak{I}_{b1}^+ + \mathfrak{I}_{b1}^- \quad (3.20)$$

$$\mathfrak{I}_{b1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.21)$$

$$\mathfrak{I}_{b1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t + 120) \quad (3.22)$$

$$\mathfrak{I}_{c1} = \mathfrak{I}_{c1}^+ + \mathfrak{I}_{c1}^- \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{V}_{c1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.24)$$

$$\mathcal{V}_{c1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120) \quad (3.25)$$

ผลรวมคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $\mathcal{V}(\theta, t)$ ) คือ

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1} + \mathcal{V}_{b1} + \mathcal{V}_{c1} \quad (3.26)$$

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \mathcal{V}^+(\theta, t) + \mathcal{V}^-(\theta, t) \quad (3.27)$$

โดยที่  $\mathcal{V}^+$  เป็น คลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทางบวก หรือ Positive-traveling wave  
โดยที่  $\mathcal{V}^-$  เป็น คลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทางลบ หรือ Negative-traveling wave  
ซึ่ง

$$\mathcal{V}^-(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1}^- + \mathcal{V}_{b1}^- + \mathcal{V}_{c1}^- \quad (3.28)$$

$$= 0 \quad (3.29)$$

$$\mathcal{V}^+(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1}^+ + \mathcal{V}_{b1}^+ + \mathcal{V}_{c1}^+ \quad (3.30)$$

$$= \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.31)$$

นั่นคือ เมื่อขดลวด 3 เฟส วางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า มีกระแส 3 เฟส ต่างมุมกัน 120 องศาไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เฉพาะส่วนที่เป็น Positive-traveling wave

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (3.32)$$

ซึ่งเป็นคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เมื่อเทียบกับมุม  $\theta$  ขนาด  $(3/2)F_{\max}$  คงที่ และมีเฟส  $\omega t$  มีลักษณะเชิงเส้นเมื่อเทียบกับเวลา

เทอม  $\omega t$  แสดงให้เห็นถึงการหมุนของคลื่นไปรอบช่องอากาศ ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ามี P ขั้ว ความเร็วเชิงมุมทางกล

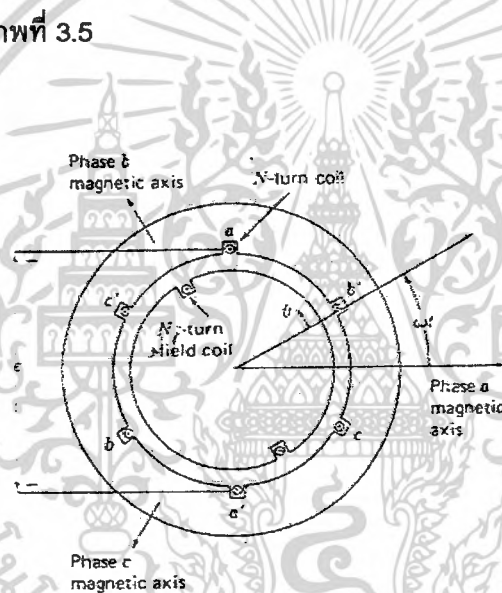
$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega \quad \text{rad/sec} \quad (3.33)$$

$$n = \frac{120f}{P} \quad \text{rev/min} \quad (3.34)$$

โดยทั่วไปสำหรับขดลวด  $q$  เฟส มีกระแส  $q$  เฟส ที่สมมูลไหลผ่าน โดยที่แต่ละเฟสห่างกัน  $2\pi/q$  rad (มุมทางไฟฟ้า) จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ที่มีขนาดคงที่เท่ากับ  $(q/2)F_{\max}$  โดยที่  $F_{\max}$  คือ  $F_{\max}$  ขนาดสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟสเดียว

### 3.4 แรงดันเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ในหัวข้อ 3.2 ได้กล่าวถึงลักษณะธรรมชาติการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวด ต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณถึงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดบนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอื่นๆ เริ่มโดยการพิจารณารูปแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้างดภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส

แต่ละขดลวดที่แสดงในภาพที่ 3.5 มีด้านห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า กำหนดให้ขดลวดสนามบนโรเตอร์ ทำให้เกิดฟลักซ์ที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ ( $B$ ) ที่ผิวของสเตเตอร์ และโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ( $\omega$ )

$$B = B_{\text{peak}} \cos \theta \quad (3.35)$$

โดยที่  $B_{\text{peak}}$  คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดที่ผ่านขดลวดเฟส a บนสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่แกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์อยู่ในแนวแกนเดียวกับแกนสนามแม่เหล็กจากขดลวดเฟส a หรือขณะที่มุม  $\theta = 0^\circ$  (ดังภาพที่ 3.5)

ปริมาณฟลักซ์ต่อขั้ว ในช่องอากาศ ( $\phi$ ) มีค่าดังนี้

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_{peak} \cos\theta l r d\theta \quad (3.36)$$

$$= 2B_{peak} l r \quad (3.37)$$

โดยที่  $l$  คือ ความยาวตามแนวแกนของสเตเตอร์

$r$  คือ รัศมีของสเตเตอร์ที่ช่องอากาศ

ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี  $P$  ขั้ว

$$\phi = \frac{2}{P} 2B_{peak} l r \quad (3.38)$$

ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ขั้วจะเป็น  $2/P$  เท่า ของกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว โดยที่มี  $l$  และ  $r$  เท่ากัน

ในขณะที่โรเตอร์หมุน ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดบนสเตเตอร์ (Flux linkage,  $\lambda$ ) จะเปลี่ยนแปลงตามโคไซน์ของมุม  $\theta$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดบนสเตเตอร์กับโรเตอร์ และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  คงที่

$$\lambda = N\phi \cos \omega t \quad (3.39)$$

โดยที่  $t$  คือ เวลาใดๆ และเลือกกำหนดให้เป็นศูนย์ ในขณะที่ที่แกนสนามแม่เหล็กของขดลวดบนสเตเตอร์กับโรเตอร์อยู่ในแนวแกนเดียวกัน

ตามกฎของฟาราเดย์ จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ  $e$  ที่ขดลวดบนสเตเตอร์

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega t - \omega N \phi \sin \omega t \quad (3.40)$$

ขั้วของแรงดันเหนี่ยวนำ  $e$  กำหนดได้จากการลัดวงจรที่ปลายของขดลวดบนสเตเตอร์ ซึ่ง  $e$  จะต้องทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของ  $\lambda$  ที่ผ่านขดลวดบนสเตเตอร์

ปริมาณฟลักซ์  $\phi$  ที่อยู่ในสมการ 3.40 ได้มาจากการสมมติให้เฉพาะขดลวดสนามบนโรเตอร์เท่านั้นที่ทำให้เกิดฟลักซ์ แต่สมการก็ใช้ได้เช่นกันกับสภาพทั่วไป ซึ่งฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศ เนื่องมาจากขดลวดทั้งบนสเตเตอร์และโรเตอร์

เทอมแรกทางขวาในสมการ 3.40 คือ แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟลักซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เรียกว่า Transformer voltage

เทอมที่ 2 ทางขวาในสมการ 3.40 คือ แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างฟลักซ์ในอากาศกับขดลวดบนสเตเตอร์ เรียกว่า Speed voltage

ซึ่งในสภาวะ Steady-state ปริมาณฟลักซ์ในช่องอากาศมีค่าคงที่ ดังนั้น แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะส่วนของ Speed voltage

โดยปกติจะใช้คำว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Electromotive force) แทนคำว่า Speed voltage ดังนั้นในช่วงเวลาที่คงที่

$$e = -\omega N \phi \sin \omega t \quad (3.41)$$

และในช่วงเวลาที่คงที่ ตามปกติ จะใช้ค่า rms (root mean square value) ทั้งสำหรับกระแสและแรงดัน

ดังนั้นจากสมการ 3.41 ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $e$  คือ

$$E_{\max} = \omega N \phi = 2\pi f N \phi \quad (3.42)$$

และค่า rms ของ  $E_{\max}$  คือ

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N \phi \quad (3.43)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ (Hz)

สมการเหล่านี้มีลักษณะเดียวกับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างขดลวดบนสเตเตอร์กับฟลักซ์ที่มีขนาดคงที่ และเคลื่อนที่ในช่องอากาศจะทำให้เกิดผลเช่นเดียวกันกับฟลักซ์ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งผ่านขดลวดที่นิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นผลของการหมุนก็คือ การเปลี่ยนสิ่งที่คงที่ตามเวลา (เช่นฟลักซ์) ให้เป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (เช่นแรงดันเหนี่ยวนำ)

แรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ 3.41 นั้น เป็นแรงดันเหนี่ยวนำ 1 เฟสเท่านั้น ในการที่จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ 3 เฟส ก็ทำได้โดยการจัดวางขดลวด 3 ชุด ห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า

สมการ 3.43 จะแสดงค่า  $rms / phase$  โดยที่  $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดที่อนุกรมกันต่อเฟส และด้านของขดลวดแต่ละชุดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

ตามปกติขดลวดแต่ละเฟสที่พันอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะถูกพันอยู่หลายช่อง ดังนั้นค่า  $k_w$  จะมีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดแต่ละชุดในเฟสเดียวกัน จะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันและทำให้ผลรวมทางเฟสของแรงดันน้อยกว่าผลรวมทางสเกลาร์

โดยมากขดลวด 3 เฟสมีค่า  $k_w$  จะประมาณเท่ากับ 0.85 – 0.95 และจากสมการ 3.43 จะได้

$$E_{rms} = \sqrt{2}k_w \pi f N_{ph} \phi \quad (3.44)$$

โดยที่  $N_{ph}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดที่อนุกรมกันต่อเฟส

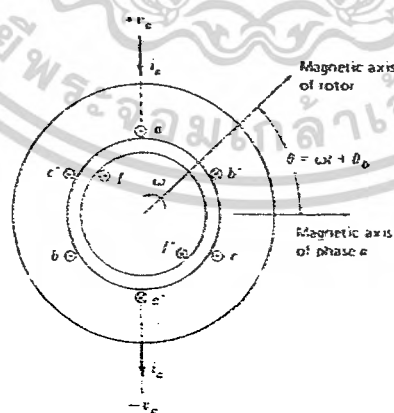
### 3.5 ค่าความเหนี่ยวนำและวงจรสมมูล

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาที่มาของวงจรสมมูล ซึ่งแสดงให้เห็นคุณสมบัติทางแรงดันและกระแสที่เอาต์พุตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครนิส (Terminal Volt-Ampere Characteristics) ขณะทำงานในช่วงเวลาที่คงที่

โดยการพิจารณาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครนิสแบบ 2 ขั้ว 3 เฟส และมีโรเตอร์แบบ non-salient ดังแสดงในภาพที่ 3.6

ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นแบบ 3 เฟส คือ ขดลวด  $aa'$ ,  $bb'$  และ  $cc'$  แต่ละขดลวดจะทำให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ และความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ

ขดลวดสนาม  $ff'$  บนโรเตอร์ ทำให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์ที่มีรูปคลื่นไซน์และหมุนไปพร้อมกับโรเตอร์



ภาพที่ 3.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครนิสแบบขั้วนอนขาลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์ที่ผ่าน (Flux linkage) ขดลวด a , b , c และ f ในเทอมของความเหนี่ยวนำและกระแส เขียนแสดงสมการได้ดังนี้

$$\lambda_a = l_{aa}i_a + l_{ab}i_b + l_{ac}i_c + l_{af}i_f \quad (3.45)$$

$$\lambda_b = l_{ba}i_a + l_{bb}i_b + l_{bc}i_c + l_{bf}i_f \quad (3.46)$$

$$\lambda_c = l_{ca}i_a + l_{cb}i_b + l_{cc}i_c + l_{cf}i_f \quad (3.47)$$

$$\lambda_f = l_{fa}i_a + l_{fb}i_b + l_{fc}i_c + l_{ff}i_f \quad (3.48)$$

โดยที่  $l_{aa}$  ,  $l_{bb}$  ,  $l_{cc}$  และ  $l_{ff}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด a , b , c และ f ตามลำดับ

$l_{ab}$  ,  $l_{ac}$  ,  $l_{af}$  , ..... ,  $l_{fc}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด 2 ขด ตามลำดับ

และสัญลักษณ์  $l$  หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าขึ้นอยู่กับมุมหรือตำแหน่งของโรเตอร์ และแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละขดลวด สามารถถูกคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์

### 3.5.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดของโรเตอร์

เนื่องจากเป็นโรเตอร์แบบขั้วอนนชาเลียน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสนามจึงไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ และโดยการพิจารณาผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากช่องบนสเตเตอร์ จะได้

$$l_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{ff} \quad (3.49)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $L$  หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์หรือมุม  $\theta$

$L_{ff0}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งคำนวณได้จากขนาดของช่องอากาศและข้อมูลเกี่ยวกับขดลวด

$L_{ff}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนของฟลักซ์ที่เกี่ยวค้องในขดลวดสนาม

ในช่วงทรานเซียนส์หรือเกิดการไม่สมดุลภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส เช่น กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้ฟลักซ์ที่เกี่ยวค้อง ( $\lambda_f$ ) ที่ผ่านขดลวดสนามมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรโรเตอร์

และเป็นผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรเมื่อต่อแรงดัน ( $V_f$ ) คงที่เข้ากับปลายของขดลวดสนามที่มีความต้านทาน ( $R_f$ ) จะทำให้เกิดกระแส  $I_f = V_f/R_f$  ไหลในขดลวด

### 3.5.2 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์

มีค่าแปรผันแบบเป็นคาบเวลากับมุม  $\theta$  ระหว่างแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามบนโรเตอร์กับขดลวดอาร์เมเจอร์เฟส a บนสเตเตอร์ เช่นที่แสดงในภาพที่ 3.6 เมื่อสมมติให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กและฟลักซ์ในช่องอากาศมีลักษณะแบบรูปคลื่นไซน์ จะได้

$$l_{af} = l_{fa} = L_{af} \cos \theta \quad (3.50)$$

และที่เฟส b และเฟส c จะแทนมุม  $\theta$  ด้วย  $\theta - 120^\circ$  และ  $\theta + 120^\circ$  ตามลำดับ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส ( $\omega$ ) จะได้สมการดังนี้

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (3.51)$$

โดยที่  $\theta_0$  คือ มุมของโรเตอร์ในขณะที่  $t = 0$  และเมื่อมีกระแส  $I_f$  ไหลในขดลวดสนาม จะได้

$$l_{af} = L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0) \quad (3.52)$$

### 3.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์

เมื่อโรเตอร์เป็นแบบขั้วอนขาละเอียดและความกว้างของช่องอากาศมีค่าสม่ำเสมอ ไม้ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  และโดยไม่พิจารณาผลจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากช่องบนโรเตอร์ จะได้

$$l_{aa} = l_{bb} = l_{cc} = L_{aa} = L_{aa0} + L_{af} \quad (3.53)$$

โดยที่  $L_{aa0}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ

$L_{af}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนฟลักซ์เกี่ยวคล้องของขดลวดอาร์เมเจอร์ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์ สามารถคำนวณได้โดยการสมมติให้เกิดขึ้นเฉพาะจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศเท่านั้น

$$l_{ab} = l_{ba} = l_{ac} = l_{ca} = l_{bc} = l_{cb} = (1/2)L_{aa0} \quad (3.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้เพราะแต่ละเฟสต่างมุมกัน  $120^\circ$  และ  $\cos(\pm 120^\circ) = -(1/2)$   
 ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a ( $\lambda_a$ ) จากสมการ 3.45 มีค่าดังนี้

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{a1})i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}(i_b + i_c) + \lambda_{af} \quad (3.55)$$

โดยที่  $\lambda_{af}$  มีค่าตามสมการ 3.52

ในกรณีที่กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส สมดุลกัน

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \text{or} \quad i_b + i_c = -i_a \quad (3.56)$$

เมื่อแทนลงในสมการ 3.55 จะได้

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{a1}\right)i_a + \lambda_{af} \quad (3.57)$$

กำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนีส ( $L_s$ ) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1.  $L_{aa0}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งเกิดจากขดลวดเฟส a
2.  $L_{a1}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนสูญเสียของฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a
3.  $(1/2)L_{aa0}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น เนื่องจากฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a ซึ่งเป็นส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศที่เกิดจากกระแสในขดลวดเฟส b และ c แรงดันที่ปลาย (Terminal voltage) ของขดลวดเฟส a ( $v_{ia}$ )

$$v_{ia} = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \frac{d\lambda_{af}}{dt} \quad (3.58)$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดเฟส a

$$e_{af} = \frac{d\lambda_{af}}{dt} = -\omega L_{af} I_f \sin(\omega t + \theta_0) \quad (3.59)$$

เป็นแรงดันที่เกิดจากฟลักซ์ ซึ่งเป็นฟลักซ์จากขดลวดสนามที่หมุน และกำหนดให้  $e_{af}$  เป็นแรงดันกระตุ้น (Excitation Voltage) จากสมการ 3.59

$$e_{af} = -\omega L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (3.60)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันกระตุ้น ( $e_{af}$ ) นำพลาซ์กซ์เกี่ยวคล้อง ( $\lambda_{af}$ ) เป็นมุม  $90^\circ$   
ค่า rms ของ  $e_{af}$  กำหนดให้เป็น  $E_{af}$

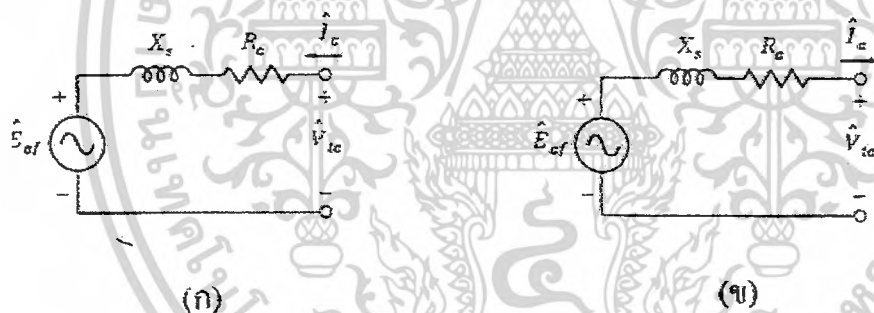
$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f k_w N_{ph} \Phi_{af} \quad (3.61)$$

โดยที่  $\Phi_{af}$  = ฟลักซ์ / ขั้ว ที่เกิดจากขดลวดสนาม

ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์ ในช่วงเวลาที่คงที่  
ทำได้สะดวก โดยการใช้สัญลักษณ์ทางเฟส ดังนั้น เมื่อเขียนสมการ 3.61 ในรูปของค่า  
อิมพีแดนซ์แบบเชิงซ้อน (Complex impedance) โดยสัญลักษณ์ทางเฟส

$$\hat{V}_{ia} = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (3.62)$$

โดยที่  $X_s = \omega L_s$  ซึ่งเรียกว่าเป็นค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์  
วงจรสมมูลในรูปค่าอิมพีแดนซ์แบบเชิงซ้อน แสดงได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ก. แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

ข. แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

โดยการกำหนดให้ มีทิศทางบวก (ลบ) เมื่อไหลเข้า (ออก) ที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
ซิงโครนัส ดังนั้น มีค่าลบ (บวก) ในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัส (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส)  
ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงสมการได้ดังนี้

$$\hat{V}_{ia} = -R_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (3.63)$$

และจะได้

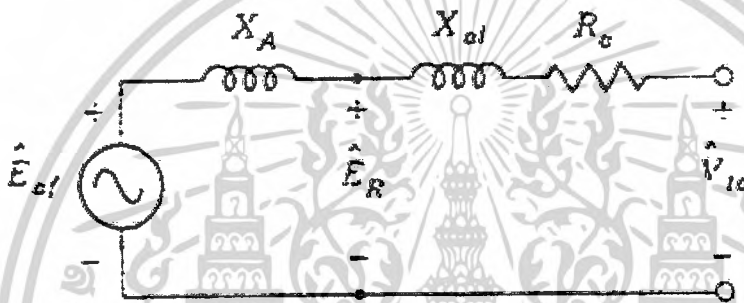
$$X_s = \omega L_s = \omega L_{al} + \omega \left( \frac{3}{2} L_{aa0} \right) = X_{al} + X_A \quad (3.64)$$

โดยที่  $X_{al} = \omega L_{al}$  คือ ค่าอาร์เมเจอร์ลิกเกจรีแอกแตนซ์

$X_A = \omega \left( \frac{3}{2} L_{aa0} \right)$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่สัมพันธ์กับส่วนความถี่มูลฐานของ  
ฟลักซ์ ซึ่งหมุนภายในช่องอากาศ เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส

แรงดันเหนี่ยวนำ  $E_R$  เป็นแรงดันที่เกิดจากฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งปกติจะเรียกว่าเป็น  
Air-gap voltage ในทางเฟส  $E_R$  จะนำ  $\Phi_R$  เป็นมุม  $90^\circ$

เมื่อนำสมการ 3.65 และ 3.66 มาเขียนวงจรสมมูลจะได้ดังภาพที่ 3.8

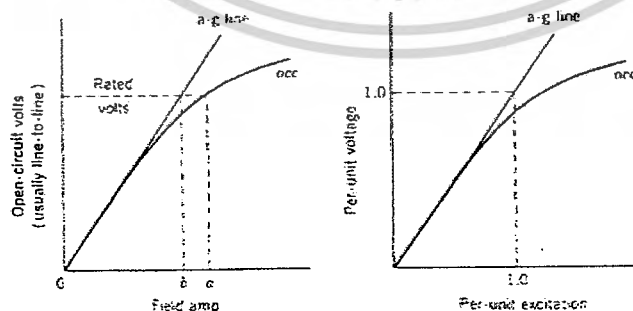


ภาพที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งอยู่ในรูปของ  
ลิกเกจรีแอกแตนซ์

### 3.6 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร (Open – Circuit and Short – Circuit Test)

#### 3.6.1 การทดสอบเปิดวงจร (Open – Circuit Test)

เมื่อวัดค่าแรงดัน  $V_{oa} (= E_{af})$  ที่กระแส  $I_f$  ค่าต่างๆ และแสดงได้ด้วยกราฟดังภาพที่ 3.9  
ในขณะที่กระแส  $I_f$  เพิ่มถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ทำให้ลักษณะของ  
กราฟเป็นดังภาพที่ 3.9

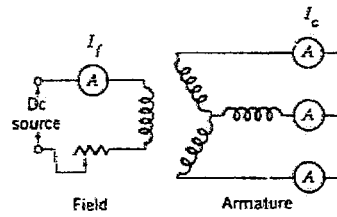


ภาพที่ 3.9 กราฟการทดสอบเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

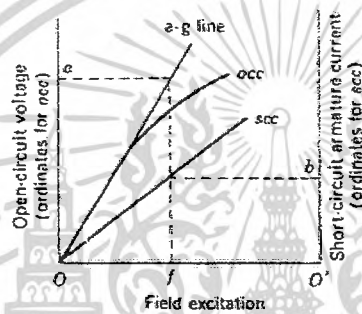
### 3.6.2 การทดสอบลัดวงจร (Short – Circuit Test)

วงจรที่ใช้ทดสอบแสดงได้ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบลัดวงจร

เมื่อวัดค่ากระแส  $I_a$  ที่กระแส  $I_f$  ค่าต่างๆ และแสดงด้วยกราฟ จะได้ดังภาพ 3.11



ภาพที่ 3.11 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร

จากการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร ทำให้สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$X_{s,ag} = \frac{E_{af,ag}}{I_{a,sc}} = \frac{V_{ta}}{I_{a,sc}} \quad (3.65)$$

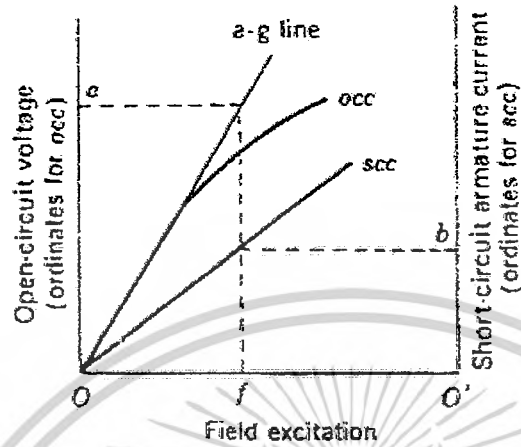
เนื่องจากการทดสอบโดยการเปิดวงจร จะเกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กในขณะที่กระแสสูงถึงค่าหนึ่ง แต่การทดสอบโดยลัดวงจร จะไม่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กในขณะที่กระแสเพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้ ค่าของซิงโครไนส์แอกแดนซ์ ที่คำนวณจากสมการ 3.65 จะถูกต้องเฉพาะในช่วงที่ไม่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก

### 3.6.3 อัตราส่วนการลัดวงจร (Short – Circuit Ratio)

อัตราส่วนลัดวงจร คือ อัตราส่วนของกระแส  $I_f$  ที่ทำให้เกิดแรงดัน  $V_{ta}$  ที่พิกัดในขณะที่ทดสอบ โดยเปิดวงจรต่อกระแส  $I_f$  ที่ทำให้เกิดกระแส  $I_a$  ที่ค่าพิกัดในขณะที่ทดสอบลัดวงจร ดังภาพที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SCR = \frac{Of'}{Of''} \quad (3.66)$$



ภาพที่ 3.12 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

#### 4.1 การสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ในการสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในกรณีการใช้เทคนิคของ Pulse Width Modulation (PWM) มาควบคุมในเรื่องของขนาดและอันดับของรูปคลื่นฮาร์มอนิกส์นั้น จะทำให้พบกับปัญหาบ้างเล็กน้อยในเรื่องของการควบคุมทิศทางในการเรียงลำดับเฟสของฮาร์มอนิกส์ การควบคุมความผิดเพี้ยนของตัดคาไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในปริณญาณิพนธ์นี้จึงนำเสนอการใช้เทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Synchronous Reluctance Generator ; BSRG) มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าสามเฟส ในการสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

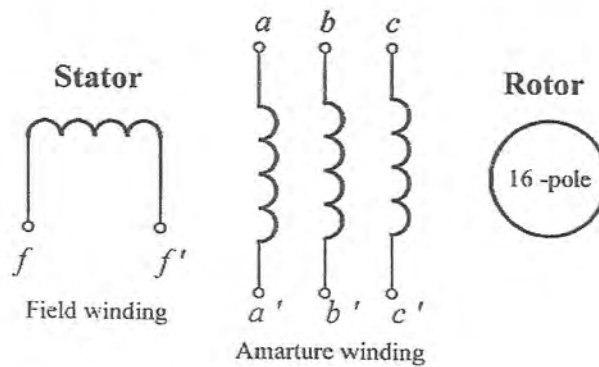
##### 4.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านดังภาพที่ 4.1 จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบสามเฟสมีขั้วแม่เหล็กจำนวน 16 ขั้ว สามารถที่จะแบ่งโครงสร้างตามลักษณะขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของขดลวดกระตุ้น (Field Winding) และขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดนี้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสโดยทั่วไปคือ ทั้งขดลวดกระตุ้นและขดลวดอาร์เมเจอร์จะถูกวางอยู่ที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นแบบ Salient Pole โดยไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ ซึ่งจากคุณสมบัติของโครงสร้างนี้เองทำให้มีความสามารถในการหมุนที่ความเร็วสูงๆได้



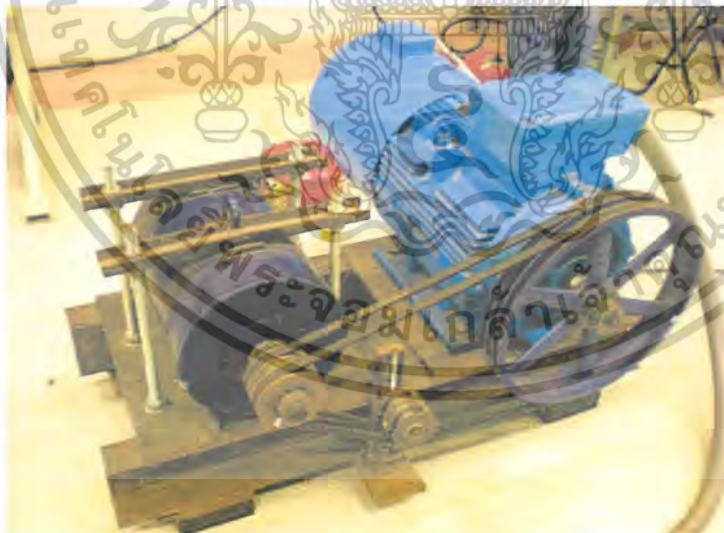
ภาพที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



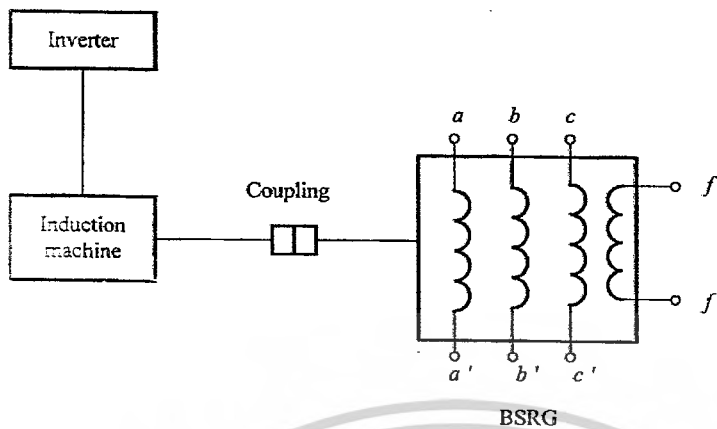
ภาพที่ 4.2 แผนภูมิโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

การสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะนำแต่ละขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าสามเฟส ในขณะที่อันดับของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการจะสามารถควบคุมได้จากความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านซึ่งได้ถูกต่อ (Coupling) ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยมีอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังภาพที่ 4.3 ตัวอย่างการปรับฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ความถี่ 350 Hz ซึ่งความเร็วซิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว จะต้องหมุนเท่ากับ 2625 รอบต่อนาที และค่าประกอบความเพี้ยนของตัดคาไฟฟ้าสามเฟสที่ปรับได้ โดยการควบคุมป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขดลวดกระตุ้นที่อยู่ทีสเตเตอร์



ภาพที่ 4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านต่อร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นตัวต้นกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์

#### 4.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส

รูปคลื่นสัญญาณตักค่าไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ในโดเมนของเวลาสามารถทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยมีองค์ประกอบของความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) และองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics frequency) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของฟูเรียร์ โดยสามารถกระจายได้ดังสมการ

$$v(t) = V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + \sum_{k=2}^{\infty} V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \quad (4.1)$$

เมื่อ	$V_{m,1}$	คือค่าตักค่าไฟฟ้าความถี่มูลฐาน
	$V_{m,k}$	คือ ค่าตักค่าไฟฟ้าอันดับที่ $k^{\text{th}}$ ฮาร์มอนิกส์
	$k$	คืออันดับของฮาร์มอนิกส์
	$\omega_0$	คือค่าความเร็วเชิงมุมความถี่มูลฐาน
	$\phi_k$	คือค่ามุมเฟสของตักค่าไฟฟ้าอันดับ $k^{\text{th}}$ ฮาร์มอนิกส์

ค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแสดงในรูปสมการความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion ,THD) ซึ่งกำหนดมาตรฐานโดย Institute of Electrical and Electronic Engineering , IEEE โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ซึ่งสามารถกำหนดในค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐานโดยค่าของความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์

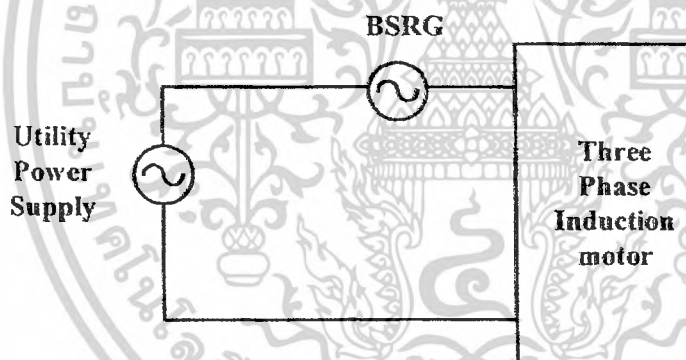
รวมของกระแสก็จะใช้องค์ประกอบความถี่ของกระแสมาวิเคราะห์ โดยที่สมการข้างล่างจะเป็นการกำหนดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของศักดาไฟฟ้าซึ่งจะมีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$THD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (4.2)$$

ค่าศักดาไฟฟ้าที่เพี้ยนไป ซึ่งเป็นผลเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้างศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ สามารถแสดงในค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (Voltage Distortion Factor , VDF) โดยเป็นค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดของฮาร์มอนิกส์กับศักดาไฟฟ้าสูงสุดมูลฐาน

$$VDF(\%) = \frac{V_{m,k}}{V_{m,1}} \times 100\% \quad (4.3)$$

โดยมีลักษณะการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปร่งถ่านอนุกรมเข้ากับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส เพื่อป้อนศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ดังภาพที่ 4.5

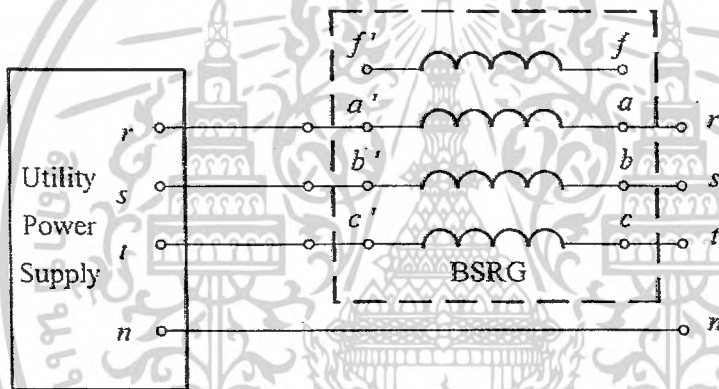


ภาพที่ 4.5 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นคลื่นไซน์ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยมีสมการศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะประกอบด้วยศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานรวมกับศักดาไฟฟ้าอันดับที่  $k^{\text{th}}$  ฮาร์มอนิกส์จากศักดาไฟฟ้าของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามการเรียงลำดับเฟสของฮาร์มอนิกส์ ซึ่งใช้การอ้างอิงจากการเรียงลำดับเฟสของศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน โดยมีสมการอันดับที่  $k^{\text{th}}$  ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟาลำดับบวก (Positive Sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อดังภาพที่ 4.5

$$\begin{aligned}
 V_R(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\
 V_S(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 120^\circ + \phi_k) \\
 V_T(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 240^\circ + \phi_k)
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

ซึ่งลักษณะการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส การต่อจะใช้การอ้างอิงของลำดับเฟส  $r$ ,  $s$ ,  $t$  โดยขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในกรณีที่ต่อให้ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก เฟส  $r$  จะนำไปต่อกับขั้ว  $a'$  เฟส  $s$  จะนำไปต่อกับขั้ว  $b'$  และเฟส  $t$  จะนำไปต่อกับขั้ว  $c'$  ตามลำดับ ส่วนปลายขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์จะนำไปต่อเพื่อจ่ายศักดาไฟฟ้าในการทดสอบ ในกรณีที่ต่อให้ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบก็จะอาศัยการต่อสลับขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ระหว่างขั้ว  $b'$  และ  $c'$

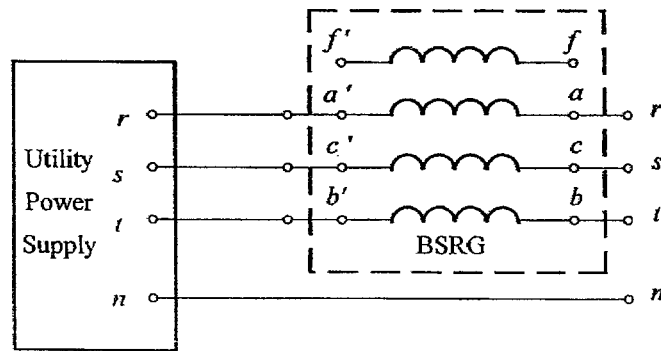


ภาพที่ 4.6 แผนภูมิการต่ออันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก

และมีสมการอันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ (Negative Sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อดังภาพที่ 4.7

$$\begin{aligned}
 V_R(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\
 V_S(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 120^\circ + \phi_k) \\
 V_T(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 240^\circ + \phi_k)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

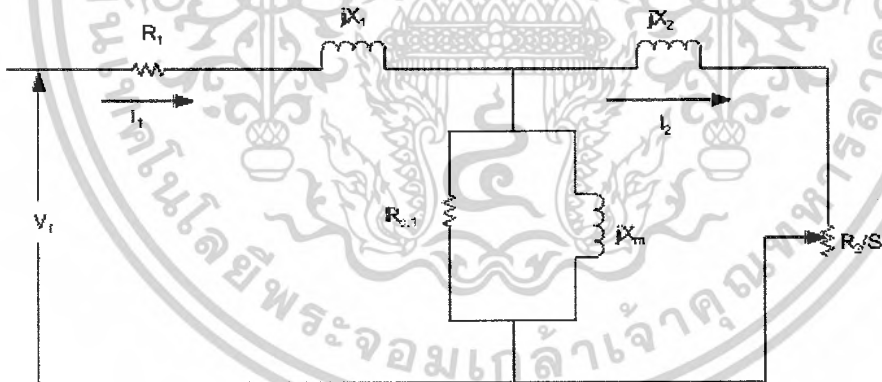
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แผนภูมิการต่ออันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์โมนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ

#### 4.1.3 วงจรเสมือนต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์โมนิกส์

ผลจากฮาร์โมนิกส์ที่ปะปนอยู่ในปัจจุบันการวิเคราะห์ผลการปฏิบัติงานหรือสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มีการพัฒนาวิเคราะห์ห้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นการวิเคราะห์คุณลักษณะทางปฏิบัติในที่นี้จะใช้อ้างอิงจากวงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟส ในส่วนกรณีของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์วงจรเสมือนที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เนื่องจากค่าพารามิเตอร์  $X_1, X_2$  และ  $X_m$  จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของฮาร์โมนิกส์จากสาเหตุดังกล่าว การวิเคราะห์ทางปฏิบัติจึงต้องประยุกต์หลักการซ้อนทับ (Superposition) มาช่วยวิเคราะห์โดยแบ่งวงจรเสมือนออกเป็นสองส่วนตามความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วนของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ารูปไซน์ความถี่มูลฐาน

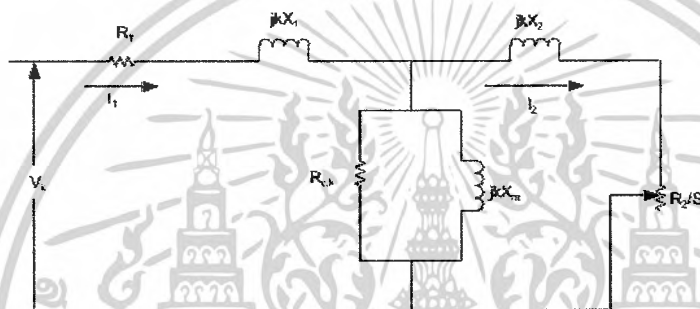


ภาพที่ 4.8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\hat{V}_1$	คือค่าศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มูลฐาน
	$\hat{I}_1$	คือค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มูลฐาน
	$R_1$	คือค่าความต้านทานที่สเตเตอร์
	$R_2$	คือค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ Transfer to stator
	$X_1$	คือค่า Stator leakage reactance
	$X_2$	คือค่า Rotor leakage transfer to stator
	$X_m$	คือค่า Magnetizing reactance
	$R_{c,1}$	คือค่า Core loss resistance ที่ความถี่มูลฐาน

และวงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับศักดาไฟฟ้าอันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์โมนิกส์แสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์โมนิกส์

เมื่อ	$\hat{V}_k$	คือค่าศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ $k^{\text{th}}$ ฮาร์โมนิกส์
	$\hat{I}_k$	คือค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ $k^{\text{th}}$ ฮาร์โมนิกส์
	$R_{c,k}$	คือค่า Core loss resistance ที่อันดับ $k^{\text{th}}$ ฮาร์โมนิกส์

ในส่วนของการวิเคราะห์ห้วงจรเสมือนในกรณีแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานจะมีพารามิเตอร์ดังภาพที่ 4.8 ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางต้านป้อนเข้า ( $Z_{i,1}$ ) กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ( $I_{i,1}$ ) และกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ( $P_{i,1}$ ) จะมีสมการกำหนดดังต่อไปนี้

$$Z_{i,1} = R_1 + jX_1 + \frac{jR_{c,1}X_m \left( \frac{R_2}{s_1} + jX_2 \right)}{j \frac{R_2}{s_1} (R_{c,1} + X_m) - X_m X_2 + jR_{c,1}(X_m + X_2)} \quad (4.6)$$

$$P_{i,1} = 3V_{i,1}I_{i,1} \cos \theta_1 \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$R_1$	คือค่าความต้านทานที่สเตเตอร์
	$R_2$	คือค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ Transfer to stator
	$X_1$	คือค่า Stator leakage reactance
	$X_2$	คือค่า Rotor leakage transfer to stator
	$X_m$	คือค่า Magnetizing reactance
	$R_{c,1}$	คือค่า Core loss resistance ที่ความถี่มูลฐาน

ในส่วนของการวิเคราะห์ห้วงจรเสมือนในกรณีแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่อันดับ  $k^{th}$  ฮาร์โมนิกส์ จะมีพารามิเตอร์ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางต้านป้อนเข้า ( $Z_{i,k}$ ) กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ( $I_{i,k}$ ) และกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ( $P_{i,k}$ ) จะมีสมการกำหนดดังต่อไปนี้

$$Z_{i,k} = R_1 + kjX_1 + \frac{jR_{c,k}kX_m\left(\frac{R_2}{s_k} + kjX_2\right)}{j\frac{R_2}{s_k}(R_{c,k} + kX_m) - kX_mkX_2 + jR_{c,k}(kX_m + kX_2)} \quad (4.8)$$

$$P_{i,k} = 3V_{i,k}I_{i,k} \cos \theta_k \quad (4.9)$$

ส่วนความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส ( $N_s$ ) จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $P$ ) และความถี่ของศักดาไฟฟ้าป้อนเข้า ( $f$ ) ดังสมการ

$$N_s = 120 \frac{f}{P} \quad (4.10)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนคงที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ( $N_r$ ) ซึ่งมีทิศทางการหมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐานในช่องอากาศความเร็วของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถหาค่า per unit slip ความถี่มูลฐาน ( $s_1$ ) ดังนี้

$$s_1 = \frac{(N_{s,1} - N_r)}{N_{s,1}} \quad (4.11)$$

และสามารถหาค่า per unit slip ของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่อันดับ  $k^{th}$  ฮาร์โมนิกส์

$$s_k = \frac{(N_{s,k} - N_r)}{N_{s,k}} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

### 4.2.1 การสูญเสียทองแดง

การสูญเสียเนื่องจากทองแดงนี้จะสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิและผลของสกินเอฟเฟค (Skin effect) บนขดลวด ซึ่งค่าของสกินเอฟเฟคในขดลวดสเตเตอร์ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในกรณีใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับพิกัดภาระ จะไม่นำมาพิจารณา แต่ผลของสกินเอฟเฟคจะมีมากในกรณีของแท่งตัวนำในโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ค่าของสกินเอฟเฟคจะไม่นำมาคิดโดยเปรียบเทียบกับค่าสลิปของความถี่มูลฐาน แต่จะใช้คิดกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ เนื่องจากฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นจากสเตเตอร์จะถูกเหนี่ยวนำไปที่โรเตอร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลของสกินเอฟเฟค ค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ ( $f_k$ ) จะแสดงได้ดังสมการ

$$R_m = R_{rdc} (1 + C_d f_k^{0.5}) \quad (4.13)$$

เมื่อ  $R_{rdc}$  คือ ค่าของความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

$d$  คือ ค่าความลึกของแท่งตัวนำ (bar depth)

$C_d$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างและวัสดุ

โดยจำนวนของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่นำมาคิดพิจารณา นั้นจะทำการคำนวณแบบทับซ้อน (Super position) โดยจะคิดทีละความถี่ของฮาร์มอนิกส์

### 4.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก

การประมาณค่าของการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กซึ่งเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กของฮาร์มอนิกส์จะทำให้ยากซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้ในการทำแกนเหล็ก จึงต้องสันนิษฐานค่าการสูญเสียจากแกนเหล็กโดยเป็นผลมาจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมของฮาร์มอนิกส์ (harmonic mutual flux) สามารถให้หลักการคิดร่วมกับการสูญเสียเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมของความถี่มูลฐาน (fundamental mutual flux) ซึ่งจะมีสมการการสูญเสียของแกนเหล็กสเตเตอร์  $P_{cs}$  ดังนี้

$$P_{cs} = k_h f \phi^2 + k_e f^2 \phi^2 \quad (4.14)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่มูลฐาน

$k_h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

$k_e$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสไหลรวม (eddy current)

ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าของการสูญเสียแกนเหล็กโรเตอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{cr} = k_h s f \phi^2 + k_e (s f)^2 \phi^2 \quad (4.15)$$

เมื่อแทนค่าความถี่ ( $f$ ) ด้วยค่าสลิป ( $s$ ) โดยที่รวมสมการสูญเสียทั้งสองสมการข้างต้นเข้าด้วยกันจะได้สมการดังนี้

$$P_c = P_{cs} + P_{cr} = \left[ k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right] f^2 \phi^2 \quad (4.16)$$

เมื่อค่าของเส้นแรงแม่เหล็กพร้อมหรือเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ จะมีค่าสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_m$ ) โดยที่ค่า  $k_c$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียแกนเหล็กดังสมการ

$$\phi = \sqrt{k_c} \frac{V_m}{f} \quad (4.17)$$

และสมการที่ (3.9) สามารถที่จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$P_c = k_c \left[ k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right] V_m^2 \quad (4.18)$$

ค่าความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือน ( $R_c$ ) สามารถที่จะหาได้ดังนี้

$$R_m = \frac{1}{k_c \left[ k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right]} \quad (4.19)$$

จากสมการดังกล่าวจะสันนิษฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮีสเทอรีซิส ( $k_h$ ) และกระแสไหลวน ( $k_e$ ) จะมีค่าคงที่ๆ ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ ( $f_k$ ) ใดๆ และเมื่อค่าสลิปฮาร์โมนิกส์ประมาณ 1 ( $s_k = 1$ ) ค่าความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือนที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ( $R_{mk}$ ) จะมีค่าต่อไปนี้

$$R_{mk} = \frac{0.5}{k_c \left[ \frac{k_h}{f_k} + k_e \right]} \quad (4.20)$$

จากสมการตั้งข้างต้นความสัมพันธ์ของการสูญเสียแกนเหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ากำลังสอง ซึ่งก็คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งการสูญเสียแกนเหล็กนี้ค่าของการเปลี่ยนแปลงสลิปจะไม่มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โพลด

การสูญเสียสเตรย์โพลดคือการสูญเสียที่นอกเหนือไปจากการสูญเสียในแกนเหล็ก และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน ในความเป็นจริงการสูญเสียสเตรย์จะประกอบไปด้วยความสูญเสียต่าง ๆ มากมาย โดยในทางปฏิบัติการสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก *End-leakage* และ *Skew-leakage* จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียสเตรย์ซึ่งจะพิจารณารูปแบบการสูญเสียสเตรย์ในรูปแบบลักษณะรูปแบบการสูญเสียของแกนเหล็ก โดยที่ค่าของการสูญเสียสเตรย์ต่อเฟส ( $P_{\sin}$ ) ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ ( $f_k$ ) จะเป็นดังนี้

$$P_{\sin} = k_{\sin} \left[ \frac{k_h}{f_k} + k_e \right] v_{\sin}^2 \quad (4.21)$$

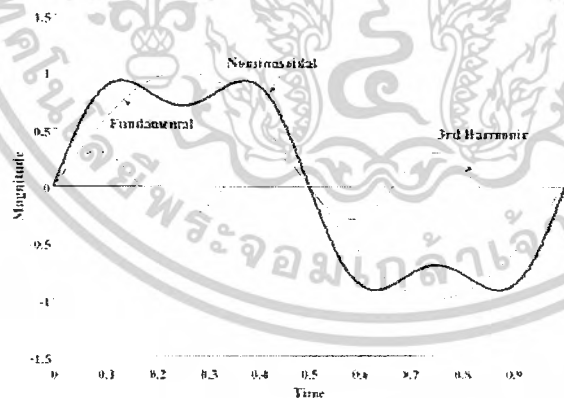
เมื่อ  $v_{\sin}$  คือค่าแรงดันผ่านความเหนี่ยวนำสเตเตอร์รั่ว (stator leakage inductance)

$k_{\sin}$  คือค่าคงที่การสูญเสียสเตรย์

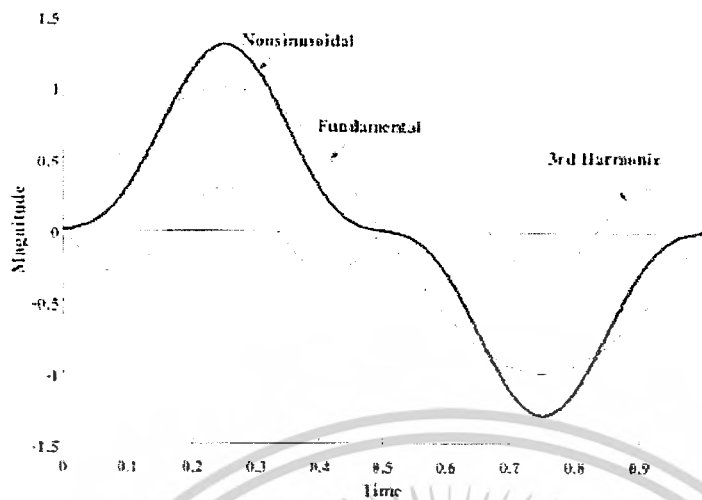
## 4.3 รูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

### 4.3.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน

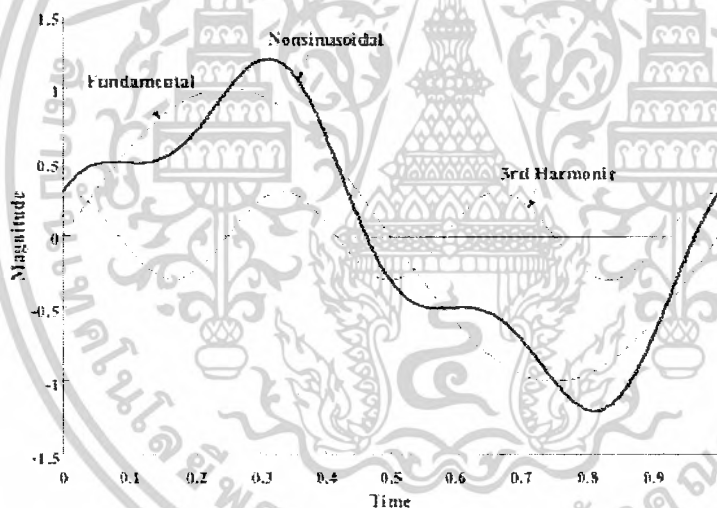
ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐานสามารถที่แสดงได้ดังภาพที่ 4.10 ถึงภาพที่ 4.12 ซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเมื่อฮาร์มอนิกส์ที่นำมารวมกับความถี่มูลฐานแล้วรูปแบบของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.10 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสตรงกับความถี่มูลฐาน



ภาพที่ 4.11 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา



ภาพที่ 4.12 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา

จากรูปดังกล่าวจะยกตัวอย่างจากฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 มารวมกับความถี่มูลฐาน สามารถที่จะเห็นผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์จะส่งผลต่อรูปสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าหรือค่า root-mean-square (rms) จากรูปสัญญาณไฟฟ้าทั่วไปหาได้จาก  $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}$  ดังนั้นการคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะสามารถทำได้โดยการกระจายค่าในองค์ประกอบของความถี่แต่ละตัวจัดรูปการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่มีรูปสัญญาณที่ซับซ้อนดัง

$$i = I_0 + I_{m,1} \sin \omega x + I_{m,2} \sin(2\omega x + a_2) + \dots + I_{m,k} \sin(k\omega x + a_k) \quad (4.23)$$

ดังนั้น

$$I = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T [I_0 + I_{m,1} \sin \omega x + I_{m,2} \sin(2\omega x + a_2) + \dots + I_{m,k} \sin(k\omega x + a_k)]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (4.24)$$

เมื่อ  $\frac{I_{m,1}^2}{\sqrt{2}} = \bar{I}_1, \frac{I_{m,2}^2}{\sqrt{2}} = \bar{I}_2, \frac{I_{m,3}^2}{\sqrt{2}} = \bar{I}_3, \frac{I_{m,k}^2}{\sqrt{2}} = \bar{I}_k$ , นำมาแทนค่าในสมการที่ 4.24

$$= \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m,1}^2 + I_{m,2}^2 + \dots + I_{m,k}^2}{2}} \quad (4.25)$$

จากสมการที่ 4.24 ใช้ในกรณีการหาค่าสูงสุดของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ และสมการที่ 4.25 จะใช้ในกรณีที่หาค่าประสิทธิผลของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ซึ่งจะเรียกค่าที่ได้จากสมการนี้อีกอย่างว่า *root-sum-square value, (rss)* ซึ่งการวัดค่าประสิทธิผลของแรงดันไฟฟ้าก็จะใช้วิธีการคำนวณลักษณะเดียวกัน

### 4.3.3 การคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบลักษณะสมการดังต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [p(t) dt] = \frac{1}{T} \int_0^T [v(t)i(t) dt] \quad (4.26)$$

เมื่อ

$$v(t) = v_{m,1} \sin(\omega t + a_1) + v_{m,2} \sin(2\omega t + a_2) + v_{m,3} \sin(3\omega t + a_3) + \dots \quad (4.27)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i(t) = I_{m,1} \sin(\omega t + a_1) + I_{m,2} \sin(2\omega t + a_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + a_3) + \dots \quad (4.28)$$

ดังนั้น

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [v_{m,1} \sin(\omega t + a_1) + v_{m,2} \sin(2\omega t + a_2) + v_{m,3} \sin(3\omega t + a_3) + \dots] \\ [I_{m,1} \sin(\omega t + a_1) + I_{m,2} \sin(2\omega t + a_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + a_3) + \dots] dt \quad (4.29)$$

เมื่อผลคูณระหว่างความถี่ฟังก์ชันไซน์จะมีค่า

$$\frac{1}{T} \int_0^T A \sin(m\omega t + a) B \sin(m\omega t + a') dt = \frac{AB}{2} \cos(a - a') \quad (4.30)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.30) จะใช้แทนในสมการที่ (4.29)

$$P = \frac{V_{m,1} I_{m,1}}{2} \cos(a_1 - a'_1) + \frac{V_{m,2} I_{m,2}}{2} \cos(a_2 - a'_2) + \frac{V_{m,3} I_{m,3}}{2} \cos(a_3 - a'_3) + \dots \quad (4.31)$$

เมื่อ

$$\frac{V_{m,i} I_{m,i}}{2} = \frac{V_{m,i}}{\sqrt{2}} \frac{I_{m,i}}{\sqrt{2}} = V_1 I_1 \\ P = V_1 I_1 \cos(a_1 - a'_1) + V_2 I_2 \cos(a_2 - a'_2) + V_3 I_3 \cos(a_3 - a'_3) + \dots \quad (4.32)$$

จากสมการที่ 4.32 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะเป็นผลรวมพีชคณิตระหว่างผลคูณของแรงดันกับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกัน

#### 4.3.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังงานไฟฟ้า

การวัดและเก็บค่าข้อมูลแรงดันไฟฟ้าในปัจจุบันได้อาศัยเทคโนโลยีดิจิทัลนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้า โดยเครื่องมือดังกล่าวได้อาศัยหลักการแปลงค่า analog เป็น digital โดยการวัดเป็นช่วงคาบเวลาหนึ่ง (T) ซึ่งช่วงเวลาของการวัดนี้ข้อมูลจะถูกเก็บมาเป็นจำนวนค่าหนึ่ง (N sample) ซึ่งการวัดข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate) ของเครื่องมือวัดจะต้องสูงเพียงพอในการนำข้อมูลที่ได้ออกมาคำนวณวิเคราะห์ต่อไป โดยการวัดค่าประสิทธิภาพ  $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}$  เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยการนำข้อมูลที่ได้ออกมาคำนวณตั้งจากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่

นำมาวิเคราะห์ ค่าประสิทธิผลจะเป็นดังสมการ (4.33) และค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีรูปแบบการคำนวณดังสมการที่ (4.34)

$$\bar{I} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_0^{N-1} i^2 dt} \quad (4.33)$$

และค่ากำลังงานฟ้าเฉลี่ย (P) จะเท่ากับ

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} v(\Delta t) i(\Delta t) \quad (4.34)$$

- เมื่อ V คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (*instantaneous voltage*)  
 i คือค่ากระแสไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (*instantaneous current*)  
 N คือจำนวนของข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การสั่นสะเทือน

#### 5.1 ประเภทของการสั่นสะเทือน

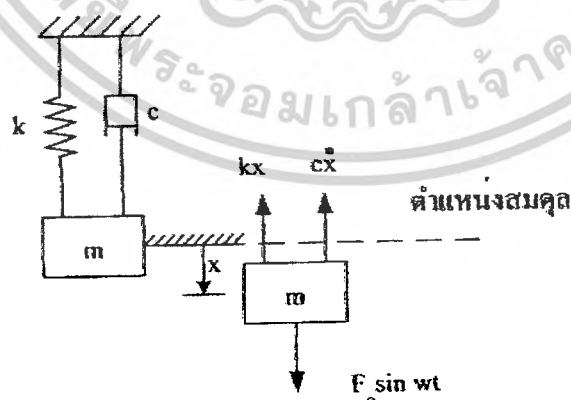
การสั่นสะเทือนมีหลายรูปแบบ แต่แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทคือ

**5.1.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration)** คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบ ภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบโดยปราศจากแรงภายนอกมากระทำ

**5.1.2 การสั่นสะเทือนแบบกระตุ้น (Force Vibration)** คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบ อันเกิดจากแรงภายนอกและการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นไปตามลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ หากความถี่ภายนอกของแรงที่มากระทำนั้น ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ของระบบ ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ขึ้น นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายขึ้นอย่างมากจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบ

ลักษณะของแรงภายนอกที่มากระตุ้นมีได้หลายรูปแบบ แต่ในเครื่องจักรแบบหมุน การกระตุ้นของระบบมักจะอยู่ในรูปของแรงกระตุ้นแบบคาบและเนื่องจากแรงกระตุ้นแบบคาบนั้นจะสามารถแยกย่อยออกเป็นผลรวมของการกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆได้ ดังนั้นจึงนิยมพิจารณาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนโดยใช้แบบจำลองในรูปของแรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก เมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอกแบบฮาร์มอนิก การสั่นสะเทือนของระบบจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับกับแรง คือ จะสั่นสะเทือนด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของแรงที่มากระตุ้น

ดังนั้นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบกระตุ้นนี้สามารถกระทำได้ โดยพิจารณาจากระบบมวลเดี่ยวที่มีความหน่วงภายใต้การกระตุ้นด้วยแรงแบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่  $\omega$  ดังรูป



ภาพที่ 5.1 ระบบมวลเดี่ยวภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการเคลื่อนที่ของระบบเขียนโดยใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติและกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (5.1)$$

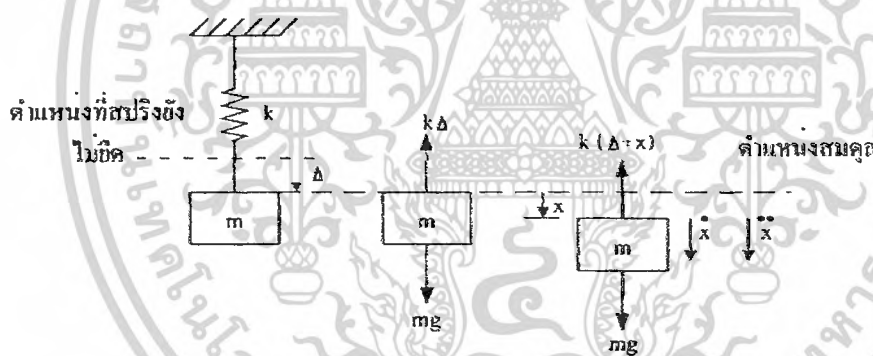
## 5.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนสามารถกระทำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นแล้วนำผลเฉลยทางคณิตศาสตร์มาพิจารณาเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะมีผลต่อขนาดของการสั่นสะเทือน ซึ่งการสั่นสะเทือนที่จะนำมาวิเคราะห์มีทั้งการสั่นสะเทือนแบบที่มีหน่วงและไม่มีหน่วง

### 5.2.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ไม่มีหน่วง (Undamped Free Vibration)

คือ การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงภายในโดยไม่มีแรงเคลื่อนภายนอกกระทำ ซึ่งเป็น การสั่นสะเทือนแบบอุดมคติ ทางทฤษฎี ไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือไม่มีหน่วง จุดประสงค์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบ

สำหรับการสั่นสะเทือนแบบอิสระนั้น ระบบหลายๆระบบสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ระบบมวลเดี่ยว (single mass system) มาอธิบาย คือ มีมวล  $m$  แขนงด้วยสปริงที่มีค่าความแข็ง (stiffness) เท่ากับ  $k$  และ  $x$  เป็นระยะยืดและหดที่วัดจากจุดสมดุล



ภาพที่ 5.2 ระบบมวลเดี่ยวและแผนผังอิสระ

สมการการเคลื่อนที่ของมวลนี้จะเขียนได้จากสมการข้อที่สองของนิวตัน

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (5.2)$$

ผลเฉลยของสมการนี้เป็น

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (5.3)$$

โดย  $\omega$  คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\frac{k}{m}}$

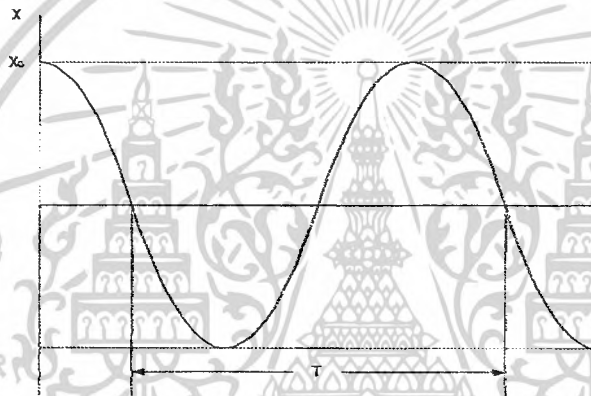
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A$  และ  $B$  เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากเงื่อนไขเริ่มต้น

ตัวอย่างของผลเฉลยของระบบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นมวล ยึดออกจากจุดสมดุลเป็นระยะ  $X_0$  และความเร็วเริ่มต้นของมวลเป็นศูนย์  $x(0) = 0$  จะเป็น

$$x = x_0 \cos \omega t \quad (5.4)$$

จากสมการที่ 5.4 สามารถเขียนเป็นไซน์โคไซน์ได้ดังรูปด้านล่าง มวลจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามการยืดและหดของสปริง โดยเวลาในการที่มวลเคลื่อนที่จากจุดสมดุลกลับไปกลับมาครบ 1 รอบ จะมีค่าเท่ากับ  $T$  ดังนั้น ความถี่ของการแกว่งดังกล่าวสามารถเขียนได้เป็น  $f_n = 1/T$  รอบต่อหน่วยเวลา ความถี่ดังกล่าว ก็คือความถี่ไซแนสของระบบ ถ้าอยู่ในรูปของหน่วยเรเดียนต่อหน่วยเวลา ความถี่ไซแนสจะถูกเขียนเป็น  $\omega_n$  โดยที่  $\omega_n = 2\pi f_n$



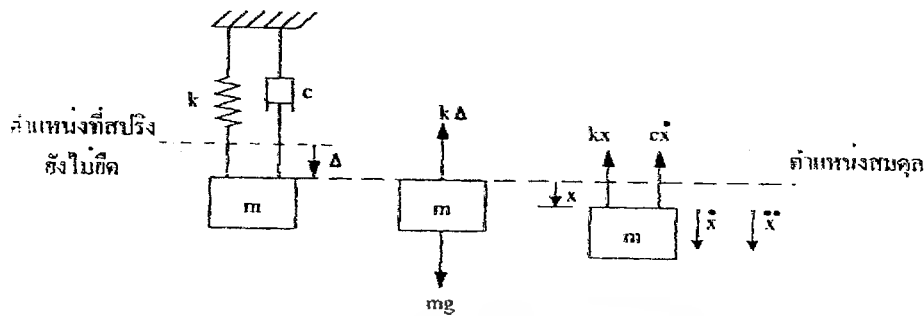
ภาพที่ 5.3 แสดงการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบมวลเดี่ยว

### 5.2.2 การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มีหน่วง (Damped Free Vibration)

ระบบต่างๆที่ใช้ในงานจริงจะมีความหน่วงแฝงอยู่ ซึ่งความหน่วงนี้จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบไป ถ้าปริมาณพลังงานสูญเสียเนื่องจากความหน่วงมีมากในการวิเคราะห์ก็ต้องนำมาคิดด้วย ความหน่วงที่พิจารณานี้จะเป็นความหน่วงแบบหนืด (Viscous Damping)

ความหน่วงแบบหนืดจะก่อให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ ( $F_d$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็วของการเคลื่อนที่ของมวล ( $\dot{x}$ ) ซึ่งเขียนเป็น  $F_d = C\dot{x}$  เมื่อ  $C$  คือค่าความหน่วง ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของระบบจะสามารถเขียนได้จากแผนผังแรงอิสระและกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (5.5)$$



ภาพที่ 5.4 ระบบมวลเดี่ยวที่มีความหนืด

### 5.2.3 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน (Type of vibration signal)

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักรจะสามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกถึงสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วย ความถี่ ขนาดของการสั่นสะเทือน มุมเฟส

1. ความถี่ ในที่นี้หมายถึงความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น CPM (Cycle Per Minute) พารามิเตอร์ความถี่นี้จะเป็นที่ปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้หากนำพารามิเตอร์นี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

2. ขนาดของการสั่นสะเทือน เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวที่ใช้บ่งบอกสภาพของเครื่องจักร โดยทั่วไปแล้วขนาดของการสั่นสะเทือนหากมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงเครื่องจักรเริ่มมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนในปัจจุบันที่มีอยู่หลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่

- การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement)
- ความเร็ว (Velocity)
- อัตราเร่ง (Acceleration)

การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวลจากจุดสมดุล หรือขนาด  $x(t)$  ในผลเฉลยของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดี่ยว หรือในกรณีที่วัดค่าจากค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด (peak to peak) จะเป็นระยะทางทั้งหมดที่ตัวเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบ

ความเร็วของการสั่นสะเทือน คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวล ดังนั้นมวลจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อมวลเคลื่อนที่อยู่จุดสูงสุดและต่ำสุด และจะมีความเร็วสูงสุดในขณะที่มวลเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ค่าการขจัดจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วเป็น

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (5.6)$$

อัตราเร่งในการสั่นสะเทือนก็คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมวลในขณะที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลอยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (5.7)$$

จะพบว่าในกรณีของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดี่ยว ความสัมพันธ์ของการขจัด ความเร็ว และอัตราเร่งสามารถเขียนได้เป็น

$$x = X \sin \omega t \quad (5.8)$$

$$v = \omega X \cos \omega t \quad (5.9)$$

$$a = -\omega^2 X \sin \omega t \quad (5.10)$$

3. มุมเฟส จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งส่วนที่มีการสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่บนตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องจักร มุมเฟสจะมีหน่วยเป็นองศา

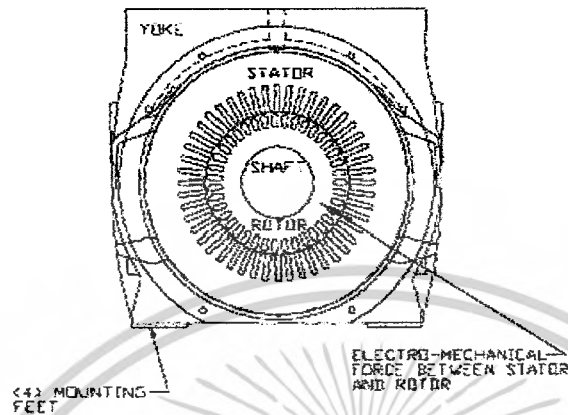
### 5.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากสาเหตุของสัญญาณทางไฟฟ้า

ในส่วนของการสั่นสะเทือนทางไฟฟ้าจะเป็นผลที่เกิดจากความผิดพลาดหรือความไม่สมบูรณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สาเหตุที่ทำให้เกิดความสั่นสะเทือนเบื้องต้นนั้นมาจาก 4 แหล่งดังนี้

#### 5.3.1 Twice Line Frequency Vibration

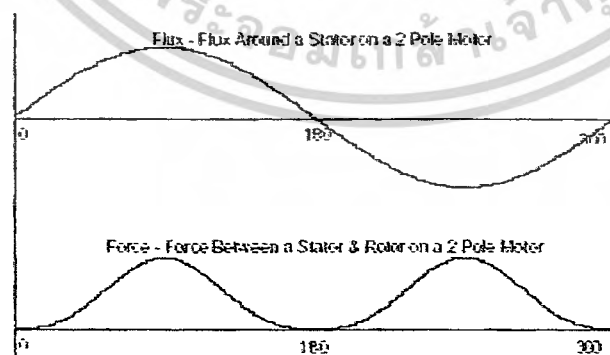
แรงหรือปฏิกิริยาระหว่างสเตเตอร์หรือโรเตอร์ ดังภาพที่ 5.5 เมื่อแหล่งจ่ายเป็น Sine wave จะมีทั้งทางบวกและลบนั้นเป็นผลที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งความต่างกันของทางกลหรือทางไฟฟ้าของการสั่นสะเทือนนั้นจะมีลักษณะความถี่เดียวกันซึ่งต้องดูที่ค่าสูงสุดทั้งทางบวกและลบจึงทำให้ 1 เฟส เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนขึ้น 2 ที่ แสดงดังภาพที่ 5.6 ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เฟรมของมอเตอร์และฐาน นอกจากนี้ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งในการ balance ทางไฟฟ้านั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับโพลหรือกระแส แต่ขึ้นอยู่กับ ampere-turn ของสเตเตอร์ และโรเตอร์นี้โดยมีลักษณะสัญญาณที่

เหมือนกันทั้ง no-load และ full-load ดังนั้นในส่วนประกอบหลักของ Twice line frequency การสั่นสะเทือนที่ถูกสร้างขึ้นโดยความไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กที่เป็นแรงดึงระหว่างฝั่งตรงข้ามกันเองของ air gap และจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด



ภาพที่ 5.5 สเตเตอร์และโรเตอร์

สำหรับมอเตอร์ 2 pole ระดับสัญญาณการสั่นสะเทือนของ twice line frequency จะปรากฏที่ 2 ช่วงเวลาความถี่การหมุน ในปัญหาของมอเตอร์แต่ละตัว เช่น การเสียดสี, ส่วนที่หลวมและตลับลูกปืนเบียดนั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ 2 ช่วงเวลาความถี่การหมุนได้ ซึ่งการสั่นสะเทือนของ twice line frequency ที่ 2 ช่วงเวลาจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อมัน in phase และหักล้างเมื่อ out of phase และจะเพิ่มอีกเมื่อ in phase อีกครั้ง สัญญาณก็จะขึ้นลงที่ความถี่ 2 ช่วงเวลา ค่าสลิปของมอเตอร์ 2 pole ในสภาวะ no load ความถี่ในการหมุน เมื่อมีโหลดความเร็วเปลี่ยนจาก 7200 rpm (120 Hz, 2 pole) จนถึงความเร็วค่าสลิป ซึ่งโรเตอร์จะหมุนช้ากว่าสลิปจะอยู่ที่ 1% ในพิกัด full load ในสภาวะ no load จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ระดับการสั่นสะเทือนจะไม่คงที่จึงต้องอ้างอิงกับ modulation ใน modulation test โดยจะให้มอเตอร์ทำงานเป็นเวลา 10-15 นาทีและบันทึกค่า max และ min

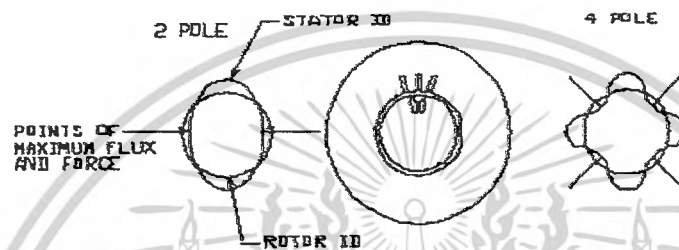


ภาพที่ 5.6 One period flux wave and magnetic force wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 Elliptical Stator Due to Fundamental Flux

ในภาพที่ 5.7 แสดงมอเตอร์ 2 pole แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นรูปวงรี การต้านการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแกนเหล็กและความแข็งแรงของโครงสร้างสเตเตอร์ ในมอเตอร์ 4 pole ระยะระหว่างจุดจะเป็น 45 องศาทางกลเป็นครึ่งหนึ่งของมอเตอร์ 2 pole ในการคำนวณกับมอเตอร์ 1000-hp , 2pole ที่ 60 Hz เกิดการสั่นสะเทือนที่ 120 Hz ที่แกนสเตเตอร์ ได้ค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดประมาณ 0.12 in/s , peak ถ้าเป็นมอเตอร์ 4 pole ในขนาดความถี่เดียวกันจะได้ค่าการสั่นสะเทือนสูงสุด 0.02-0.03 in/s ซึ่งจะน้อยกว่าขนาด twice line frequency



ภาพที่ 5.7 Electromechanical force on two and four pole motor

### 5.3.3 Nonsymmetrical Air Gap

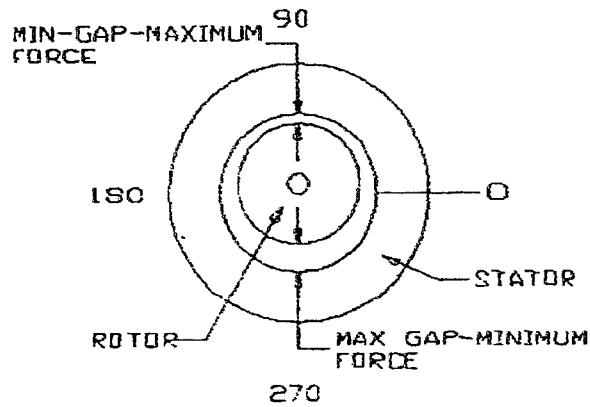
ระดับการสั่นสะเทือนของ twice line frequency เมื่อ air gap ไม่เป็นสัดส่วนระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ แสดงดังภาพที่ 5.8 ในส่วนนี้จะมีผลให้แรงแม่เหล็กมากที่สุดที่ระยะ air gap น้อยที่สุด กำลังแม่เหล็กที่ไม่สมดุลจะมีอยู่บริเวณระยะ air gap น้อยที่สุดซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Force \approx B^2 / d \quad (5.11)$$

โดย  $B$  = flux density

$D$  = ระยะ air gap

ในส่วนนี้ไม่ใช่แรงจากสเตเตอร์ดึงในทิศทางเดียว แต่จะเป็นแรงที่ดึงจากโรเตอร์ด้วย ในส่วนที่มีระยะระหว่างช่องว่างอากาศน้อยที่สุดนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เพลลา ซึ่งเป็นผลเสียต่อการใช้งานตลับลูกปืน



ภาพที่ 5.8 Unsymmetrical air gap around rotor

### 5.3.4 One-Time-Line-Frequency Vibration

แม้ว่าจะมีสัญญาณที่ไม่เด่นชัดกว่าสัญญาณของ twice line frequency แต่ก็ยังถือว่ายังมีผลอยู่สนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุลจะมีผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ line frequency เท่ากับการสั่นสะเทือนของ twice line frequency ถ้าเกิดว่าสเตเตอร์หรือโรเตอร์ เกิดการเคลื่อนที่จากข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่งทำให้จุดที่มีระยะ air gap น้อยสุด เกิดการเคลื่อนที่และมีผลต่อความถี่ในการเคลื่อนที่นี้เท่ากับความถี่ของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ เป็นผลให้สนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุลเกิดการเคลื่อนที่ไปกับจุดที่มี air gap น้อยที่สุด จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ line frequency ในการสั่นสะเทือนที่ line frequency นี้ โดยปกติจะมีน้อยมากหรือถือว่าไม่ปรากฏ แต่ถ้าระบบสเตเตอร์ หรือโรเตอร์ มีความถี่ resonant แล้วนั้นจะทำให้มีขนาด การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นได้

ซึ่งทั้ง 4 ข้อนี้เป็นการสั่นสะเทือนพื้นฐานของมอเตอร์ โดยทั่วไปแล้วสาเหตุการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะสามารถแยกเป็นสาเหตุต่างๆ ซึ่งมีลักษณะความถี่ต่างกันไป และวิธีการทดสอบที่จะหาสาเหตุการสั่นสะเทือนก็จะต่างกันไป เช่น eccentric rotor, broken rotor bar เป็นต้น ซึ่งจะอ้างอิงกับเอกสาร IEEE (An Analytical approach to Solving Motor Vibration Problem)

### 5.4 การสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

เมื่อเราจ่ายไฟฟ้าสามเฟสกระแสสลับเข้าที่ขดลวดทั้งสามของสเตเตอร์ จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นโดยที่ฟลักซ์นี้จะเหนี่ยวนำกระแสขึ้นในขดลวดโรเตอร์ สร้างแรงบิดทางไฟฟ้าทำให้ตัวโรเตอร์หมุน ฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเป็นสนามแม่เหล็กหมุนโดยจะหมุนเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะมีค่ามากกว่าความเร็วในการหมุนของตัวโรเตอร์

ด้วยสาเหตุนี้หากเราจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุลให้กับขดลวดสเตเตอร์สนามแม่เหล็กที่เกิดก็จะเป็นสนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุลทั้งสามเฟส ส่งผลทำให้การเหนี่ยวนำกระแสที่โรเตอร์มีค่า

เปลี่ยนไปตลอดจนแรงบิดของโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง การหมุนของโรเตอร์มีความผิดปกติ มอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น

หากเป็นสภาวะปกติที่เราจ่ายไฟฟ้าสมดุลทั้ง 3 เฟสให้กับมอเตอร์ เช่นจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ทั้งสามเฟสให้กับมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นแต่ละเฟสก็จะมีขนาดเท่ากัน และมี Phase Shift =120 องศาไฟฟ้า

แต่หากเราจ่ายไฟฟ้าที่ไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ คือ จ่ายไฟฟ้าสามเฟสด้วยค่าที่ไม่เท่ากัน นั่นคือ อาจมีเฟสใดเฟสหนึ่งที่เกินหรือต่ำกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นก็มีความแตกต่างและจะมีมุม Phase Shift เปลี่ยนไปไม่เป็น 120 องศา เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสนั้นจะมีผลของ Positive sequence และ Negative sequence



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

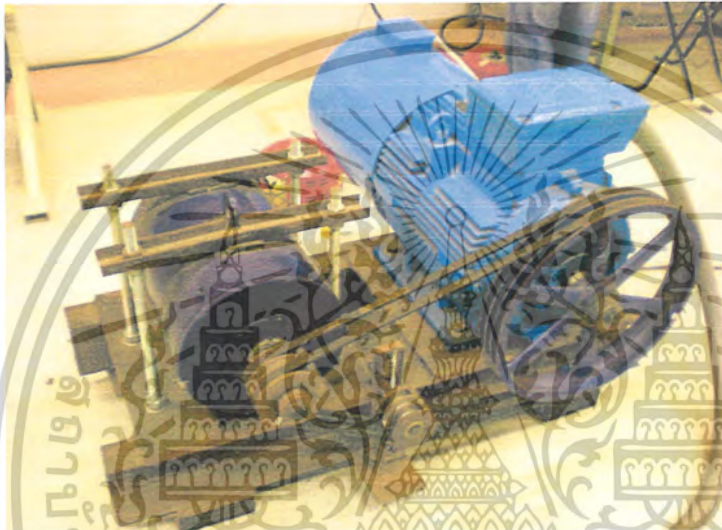
## บทที่ 6

### เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง

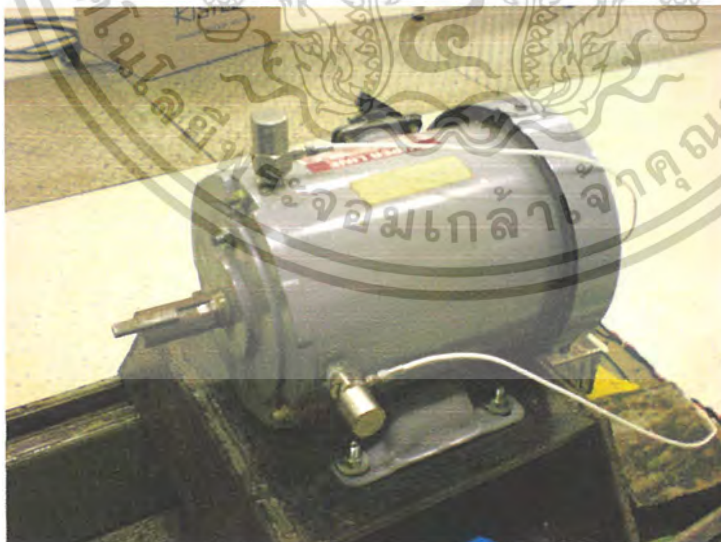
เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองในโครงงานนี้ประกอบด้วย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW ทำหน้าที่เป็นเครื่องต้นกำลัง
3. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า ทำหน้าที่ โหลดในการทดลอง

ซึ่งแสดงในภาพที่ 6.1 และ 6.2



ภาพที่ 6.1 แสดงรูปเครื่องจักรซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW



ภาพที่ 6.2 แสดงรูปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส มีลักษณะดังนี้

- โรเตอร์แบบขั้วขานเลื่อน
- จำนวน 16 ขั้ว
- พิกัดของขดลวดสนาม 10 A

### 6.2 เครื่องต้นกำลัง

คือมอเตอร์เหนี่ยวนำ (MEZ) 4 โพล ซึ่งมีพิกัดดังนี้

- พิกัดกำลัง 11 KW
- พิกัดความเร็ว 1455 rpm
- พิกัดแรงดัน 380  $\Delta$  660 Y
- พิกัดกระแส 23.2/13.3 A
- ความถี่ 50 Hz
- จำนวนเฟส 3 เฟส
- Insulation Class F

### 6.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เป็นโหลดในการทดลอง

- พิกัดกำลัง 1 hp
- TYPE SF-J
- ความถี่ 50 Hz
- Frame 80
- พิกัดแรงดัน 220  $\Delta$  380 Y
- Rating CONT
- พิกัดกระแส 3.5 2 A
- Insulation class E
- พิกัดความเร็ว 1410 rpm
- Ambient Temp 40°C

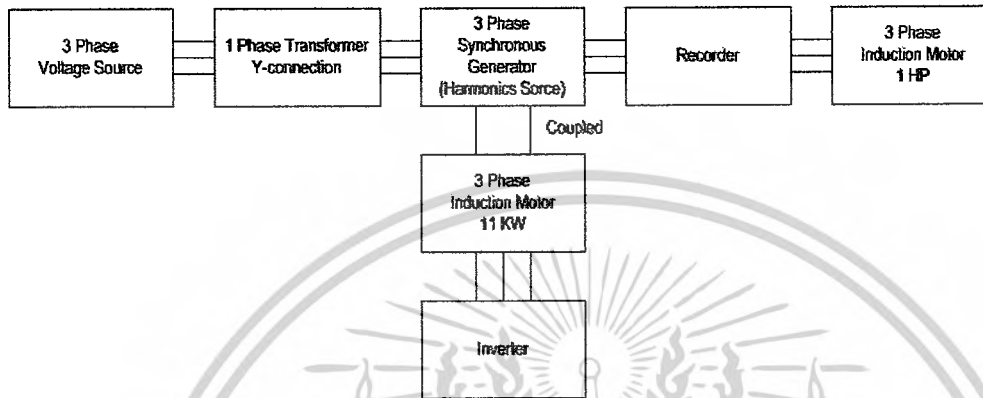
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ขั้นตอนในการทดลอง

#### 7.1 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จะแสดงดังภาพที่ 7.1

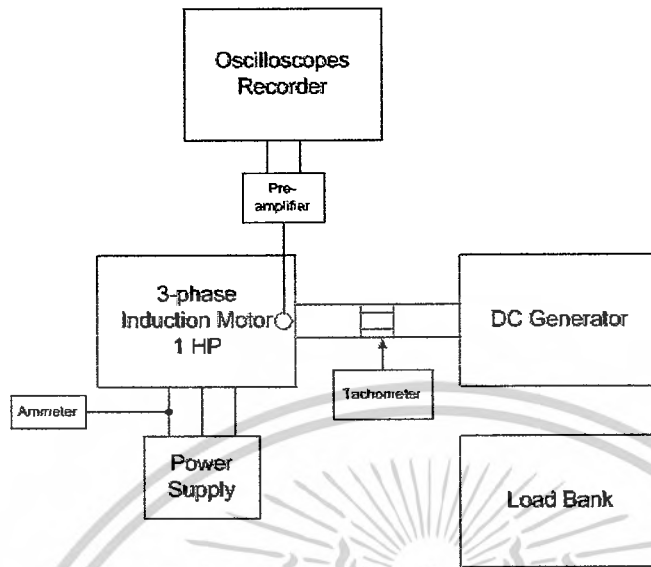


ภาพที่ 7.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส  
ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับระบบ
2. หม้อแปลง 1 เฟสต่อแบบวาย  
ทำหน้าที่จำกัดแรงดันให้เท่ากับ 220 V ทั้ง 3 เฟส
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  
เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์ให้กับระบบ ซึ่งจะกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 100-500 Hz
4. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 11 KW  
ทำหน้าที่เป็นเครื่องต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
5. อินเวอร์เตอร์  
ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 11 KW เพื่อใช้ในการกำเนิดฮาร์โมนิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
6. เครื่องบันทึกสัญญาณ  
ทำหน้าที่บันทึกค่าและรูปสัญญาณของทั้งแรงดันและกระแส เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป
7. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 1 hp

## 7.2 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการสั้นสะท้อน



ภาพที่ 7.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการสั้นสะท้อน

## 7.3 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

- 1.ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว และ BSRG เพื่อสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ และสามารถป้อนอันดับฮาร์มอนิกส์ต่างๆได้ตามต้องการ
- 2.ทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับ Oscilloscope เพื่อทำการวัดและบันทึกที่กรุปสัญญาณแรงดันและกระแสทางต้านป้อนเข้า และต่อตัว Torque Detector และ Digital Torque Meter เพื่อวัดและแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 3.ทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ คือ อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 รวมกับความถี่มูลฐาน โดยที่มีการเรียงลำดับเฟสบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ต่างๆ คือ 10,15,20 และ 25 เปอร์เซ็นต์
- 4.ทำการบันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางต้านป้อนเข้าในรูปของ ASCII File
- 5.นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 7.4 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

1.ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว และ BSRG เพื่อสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ และสามารถป้อนอันดับฮาร์มอนิกส์ต่างๆได้ตามต้องการ

2.ทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับ Oscilloscope เพื่อทำการวัดและบันทึกรูปสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านป้อนเข้า และต่อตัว Torque Detector และ Digital Torque Meter เพื่อวัดและแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.ทำการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบและทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ คือ อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 รวมกับความถี่มูลฐาน โดยมีภาระเรียงลำดับเฟสบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของตัดคาไฟฟ้า (VDF) ต่างๆ คือ 10,15,20 และ 25 เปอร์เซ็นต์

4.ทำการบันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้าในรูปของ ASCII File

5.นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

#### 7.5 ขั้นตอนการทดสอบการสันสะท้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

1.ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว เพื่อสามารถปรับขนาดแรงดันได้ตามต้องการ

2.ทำการต่อสายสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแล้วต่อเข้ากับ Oscilloscope

3.ทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการป้อนไฟฟ้าแบบสมดุลแรงดัน คือป้อนทั้ง 3 เฟสเป็น 220 V บันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งและกระแส 3 เฟส แบบ ASCII File

4.รักษาระดับแรงดันของเฟส a และ b ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส c ให้มีขนาด 216,210 และ 204 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

5.รักษาระดับแรงดันของเฟส a และ b ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส c ให้มีขนาด 224,230 และ 236 V ซึ่งเป็นแบบ Over Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

6.รักษาระดับแรงดันของเฟส a ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส b และเฟส c โดยให้เฟส b มีขนาด 217,215 และ 213 V ส่วนเฟส c ให้มีขนาด 215,208 และ 200 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

7.รักษาระดับแรงดันของเฟส a ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส b และเฟส c โดยให้เฟส b มีขนาด 223,225 และ 227 V ส่วนเฟส c ให้มีขนาด 225,232 และ 240 V ซึ่งเป็นแบบ Over Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

8.ทำการปรับขนาดแรงดันของทั้ง 3 เฟส โดยให้เฟส a มีขนาด 218 V คงที่ ส่วนเฟส b ให้มีขนาด 215,213 และ 211 V และเฟส c ให้มีขนาด 213,206 และ 198 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

9.ทำการปรับขนาดแรงดันของทั้ง 3 เฟส โดยให้เฟส a มีขนาด 222 V คงที่ ส่วนเฟส b ให้มีขนาด 225,227 และ 229 V และเฟส c ให้มีขนาด 227,234 และ 242 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

10.นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

## 7.6 ขั้นตอนการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

1.ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว เพื่อสามารถปรับขนาดแรงดันได้ตามต้องการ

2.ทำการต่อสายสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแล้วต่อเข้ากับ Oscilloscope

3.ทำการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่เครื่องหนึ่งของพิกัดกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบและทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการป้อนไฟฟ้าแบบสมดุลแรงดัน คือป้อนทั้ง 3 เฟสเป็น 220 V บันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งและกระแส 3 เฟส แบบ ASCII File

4.รักษาระดับแรงดันของเฟส a และ b ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส c ให้มีขนาด 216,210 และ 204 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

5.รักษาระดับแรงดันของเฟส a และ b ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส c ให้มีขนาด 224,230 และ 236 V ซึ่งเป็นแบบ Over Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

6.รักษาระดับแรงดันของเฟส a ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส b และเฟส c โดยให้เฟส b มีขนาด 217,215 และ 213 V ส่วนเฟส c ให้มีขนาด 215,208 และ 200 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

7.รักษาระดับแรงดันของเฟส a ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของเฟส b และเฟส c โดยให้เฟส b มีขนาด 223,225 และ 227 V ส่วนเฟส c ให้มีขนาด 225,232 และ 240 V ซึ่งเป็นแบบ Over Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

8.ทำการปรับขนาดแรงดันของทั้ง 3 เฟส โดยให้เฟส a มีขนาด 218 V คงที่ ส่วนเฟส b ให้มีขนาด 215,213 และ 211 V และเฟส c ให้มีขนาด 213,206 และ 198 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

9.ทำการปรับขนาดแรงดันของทั้ง 3 เฟส โดยให้เฟส a มีขนาด 222 V คงที่ ส่วนเฟส b ให้มีขนาด 225,227 และ 229 V และเฟส c ให้มีขนาด 227,234 และ 242 V ซึ่งเป็นแบบ Under Voltage โดยแต่ละค่าจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3

10.นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

## 7.7 ขั้นตอนการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์โมนิกส์

1.ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว และ BSRG เพื่อสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ และสามารถป้อนอันดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆได้ตามต้องการ

2.ทำการต่อสายสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแล้วต่อเข้ากับ Oscilloscope

3.ทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยป้อนไฟฟ้าแบบสมดุลแรงดัน คือ ป้อนทั้ง 3 เฟสเป็น 220 V บันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งแบบ ASCII File

4.ทำการ Run BSRG ซึ่งควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3,5 และ 7 และค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (Voltage Distortion Factor , VDF) ที่ 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยพิจารณาทั้งการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกและลบ ทำการบันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งแบบ ASCII File

5.นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

## 7.8 ขั้นตอนการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์

1. ต้องวางร็อบไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac 3 ตัว และ BSRG เพื่อสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ และสามารถป้อนอันดับฮาร์มอนิกส์ต่างๆได้ตามต้องการ

2. ทำการต่อสายสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแล้วต่อเข้ากับ Oscilloscope

3. ทำการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลัง มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบและทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยป้อนไฟฟ้าแบบสมดุลแรงดัน คือป้อนทั้ง 3 เฟสเป็น 220 V บันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งแบบ ASCII File

4. ทำการ Run BSRG ซึ่งควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3, 5 และ 7 และค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (Voltage Distortion Factor , VDF) ที่ 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยพิจารณาทั้งการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกและลบ ทำการบันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดยจะบันทึกค่าของสัญญาณจากหัววัดอัตราเร่งแบบ ASCII File

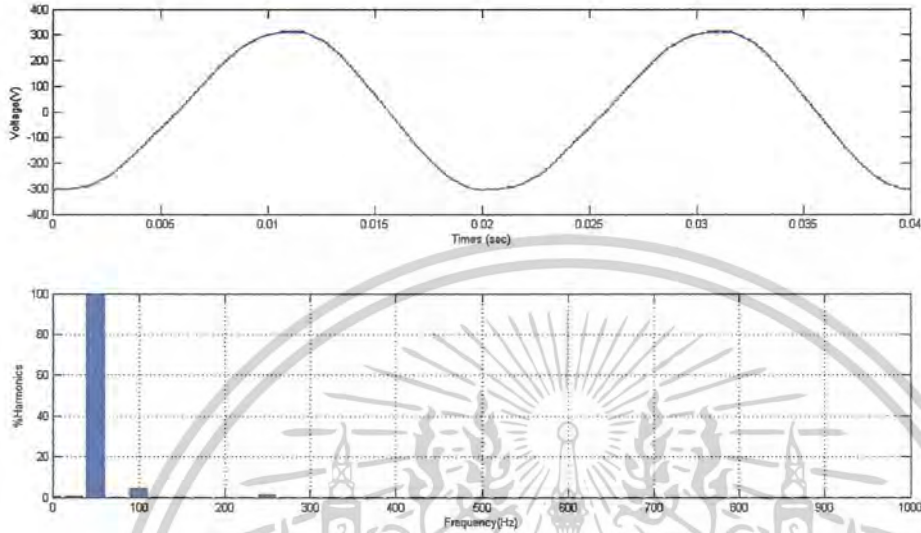
5. ทำการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดและที่พิกัดกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบและทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4

6. นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

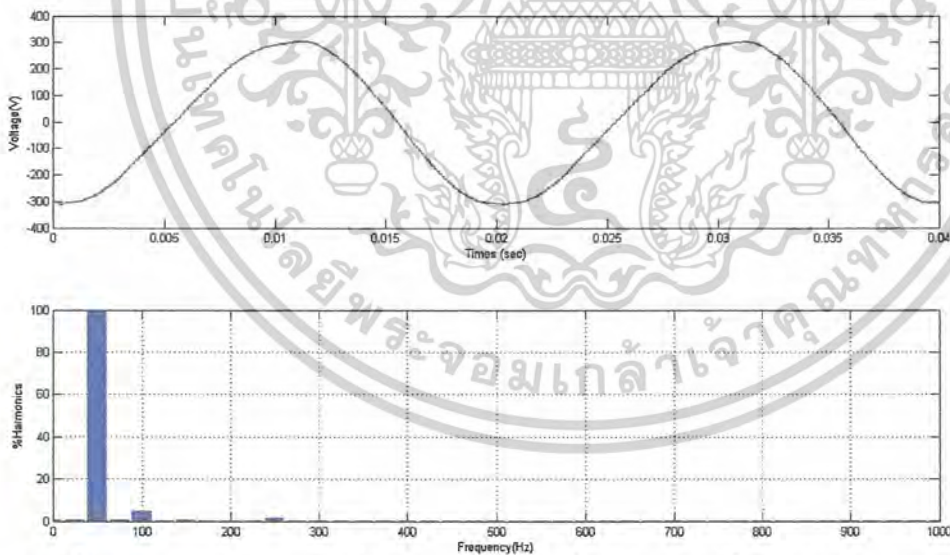
## บทที่ 8

### ผลการทดลอง

ภาพแสดงแรงดันแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ใช้ในการทดลอง

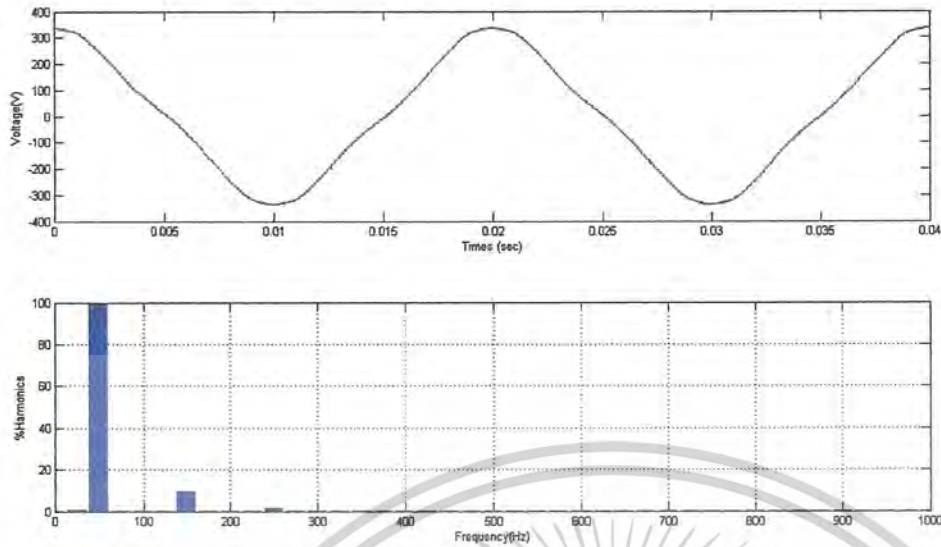


ภาพที่ 8.1 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์

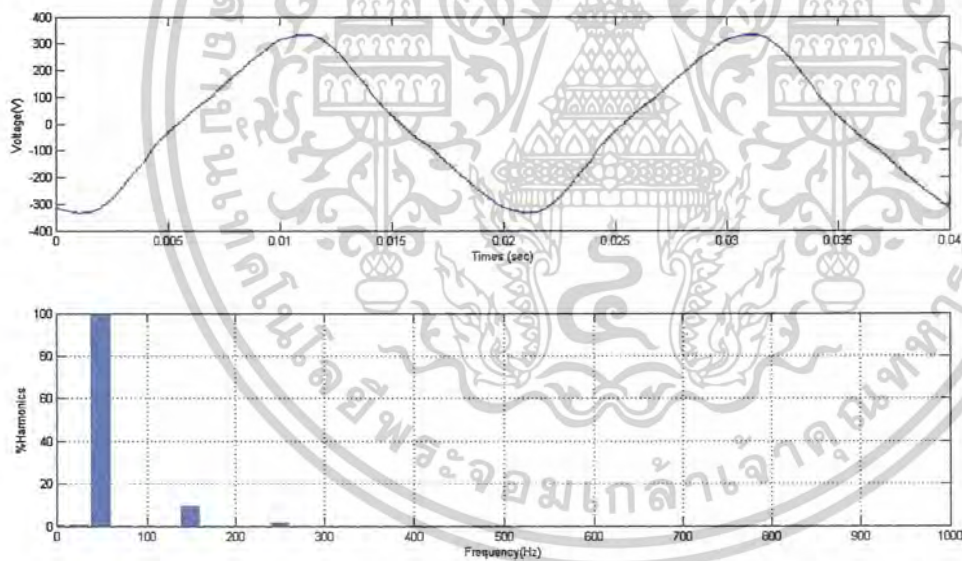


ภาพที่ 8.2 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

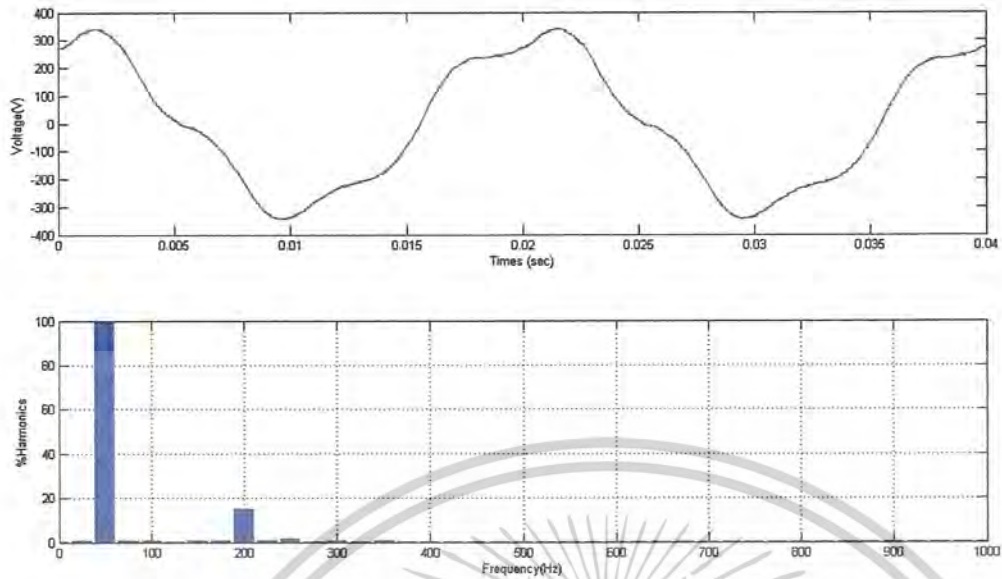


ภาพที่ 8.3 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

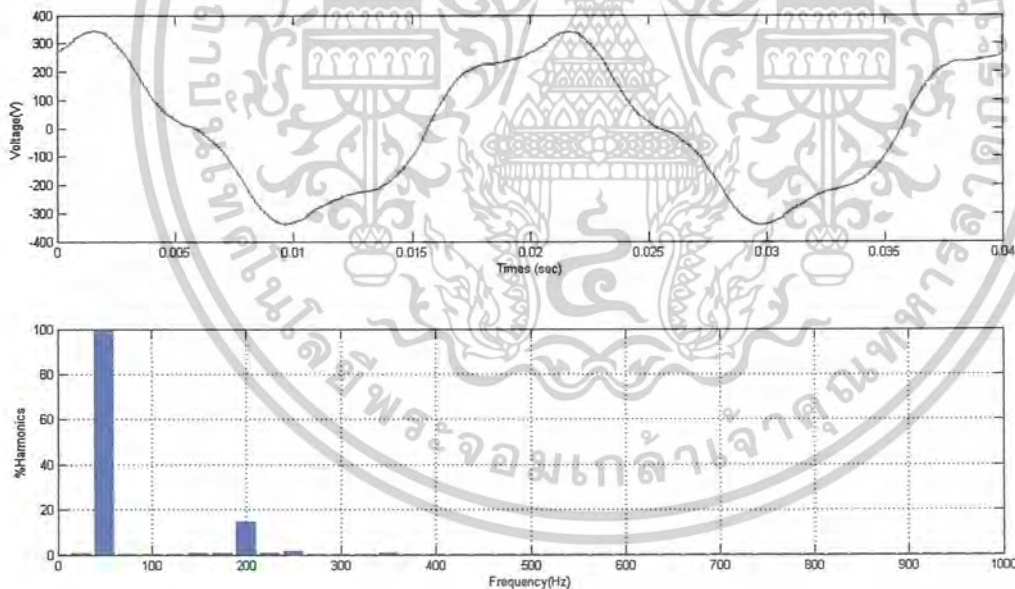


ภาพที่ 8.4 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

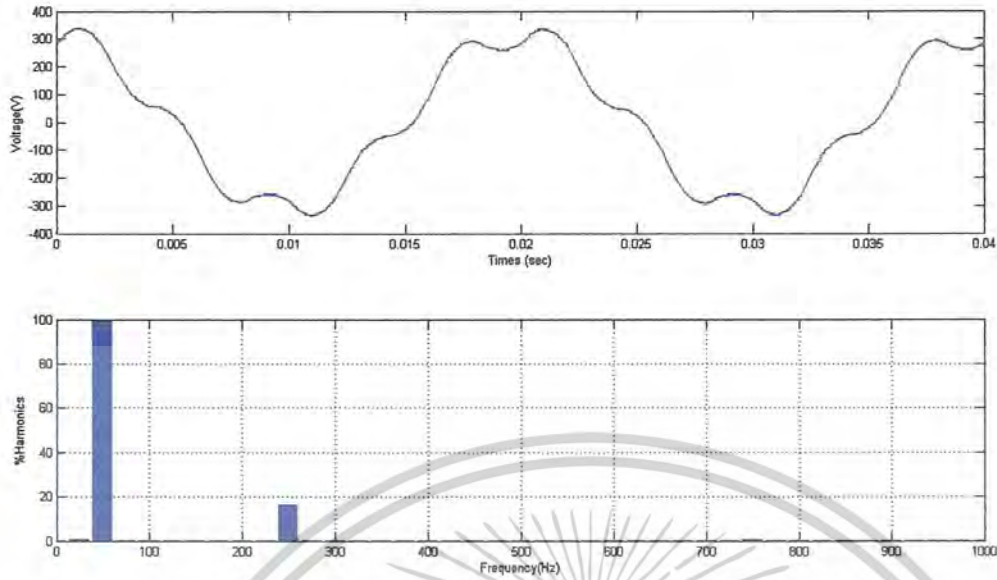


ภาพที่ 8.5 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

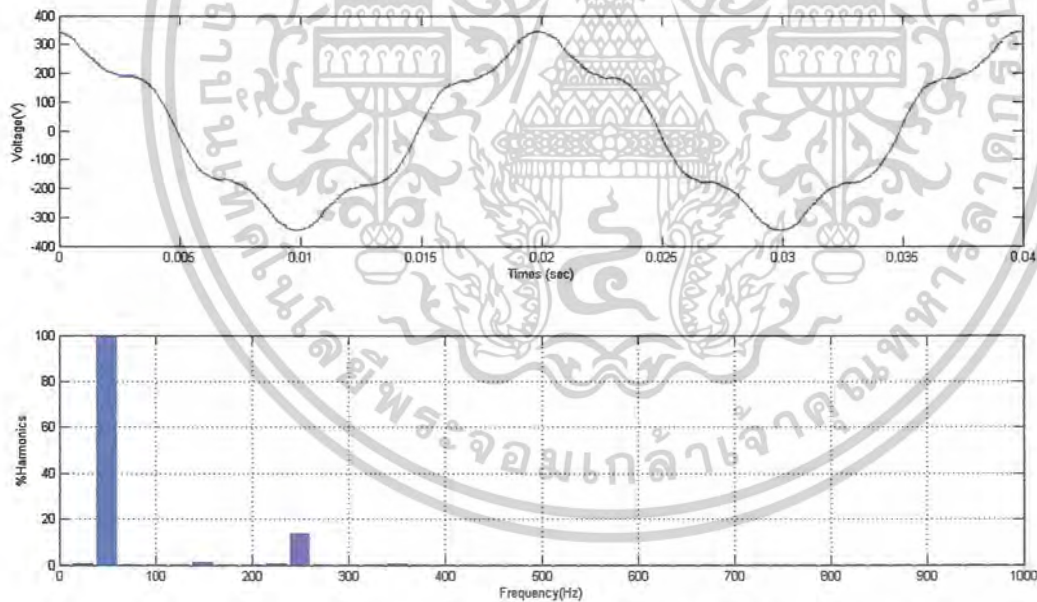


ภาพที่ 8.6 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

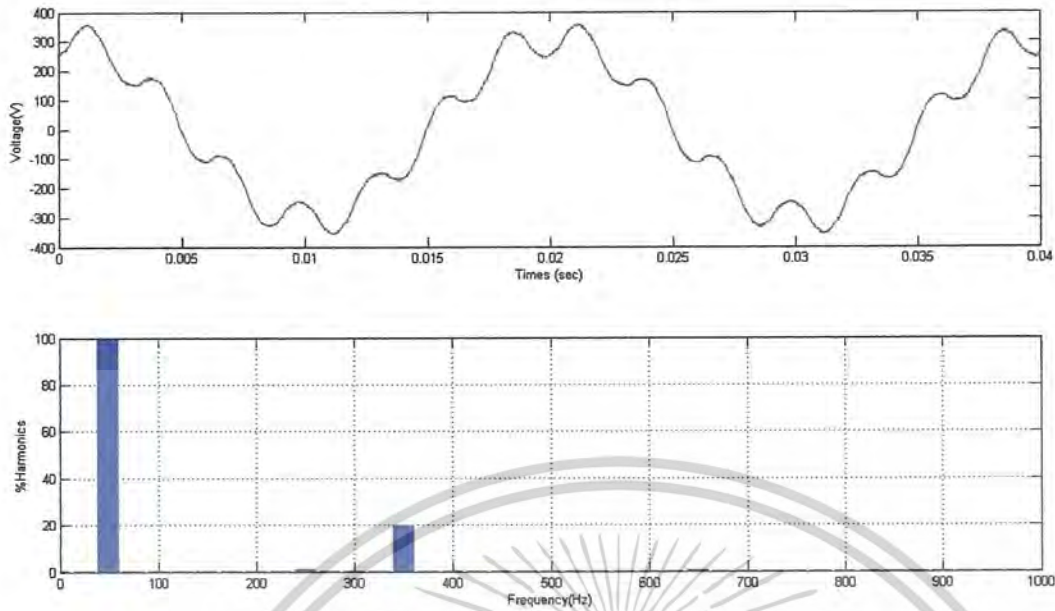


ภาพที่ 8.7 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

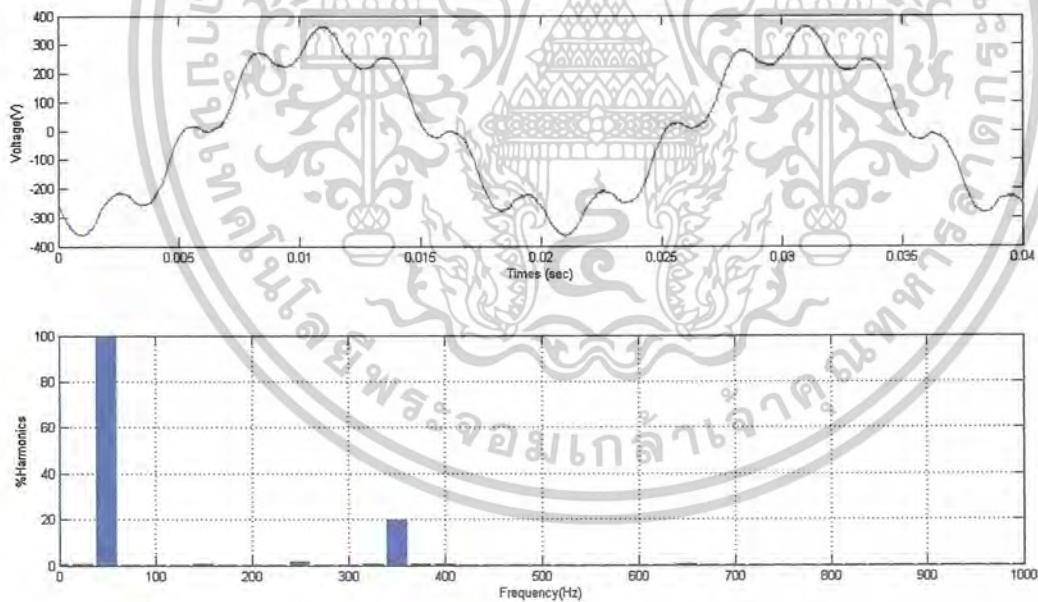


ภาพที่ 8.8 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



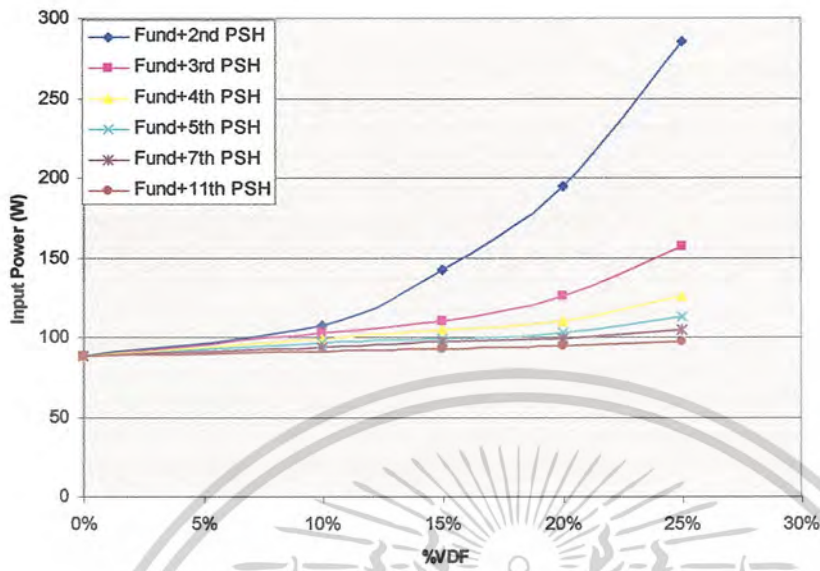
ภาพที่ 8.9 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์



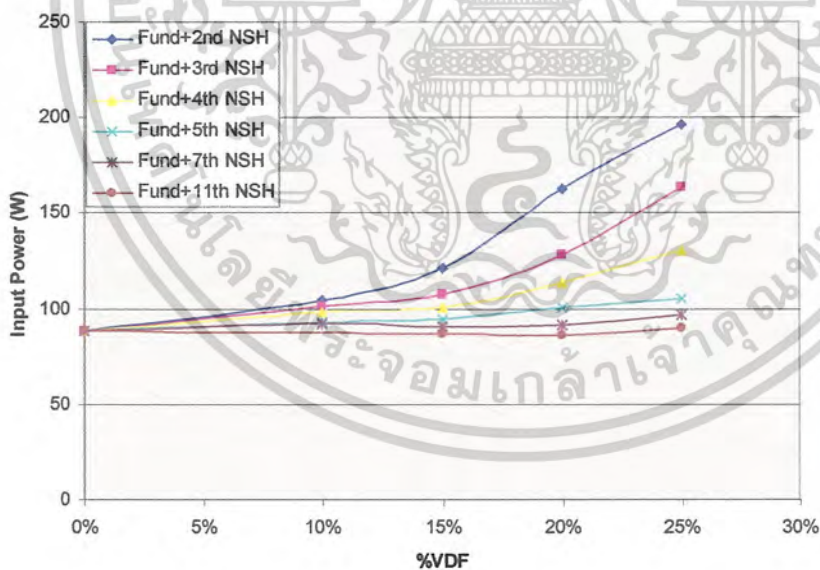
ภาพที่ 8.10 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

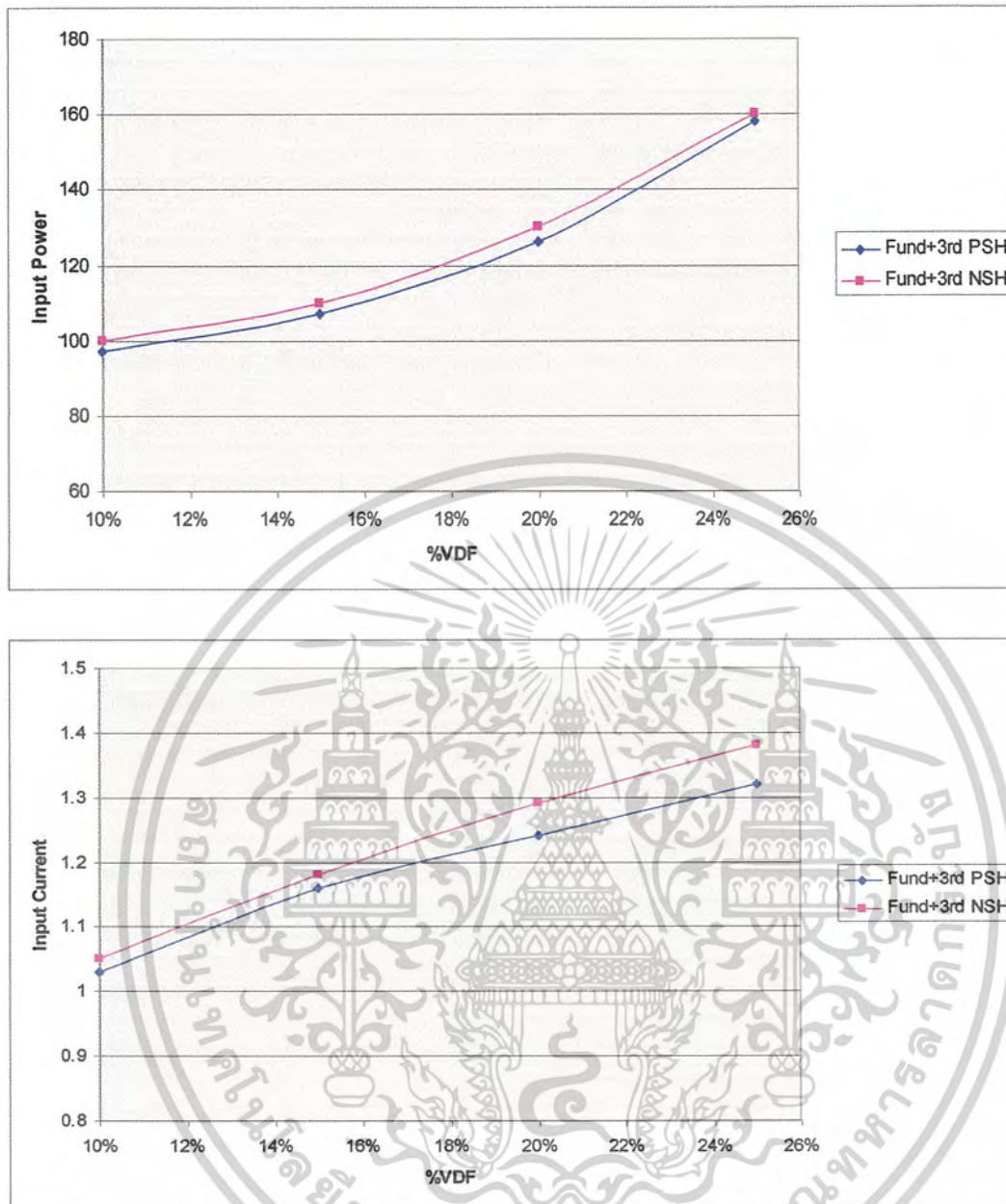


ภาพที่ 8.11 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 8.12 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 11 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่าง ๆ

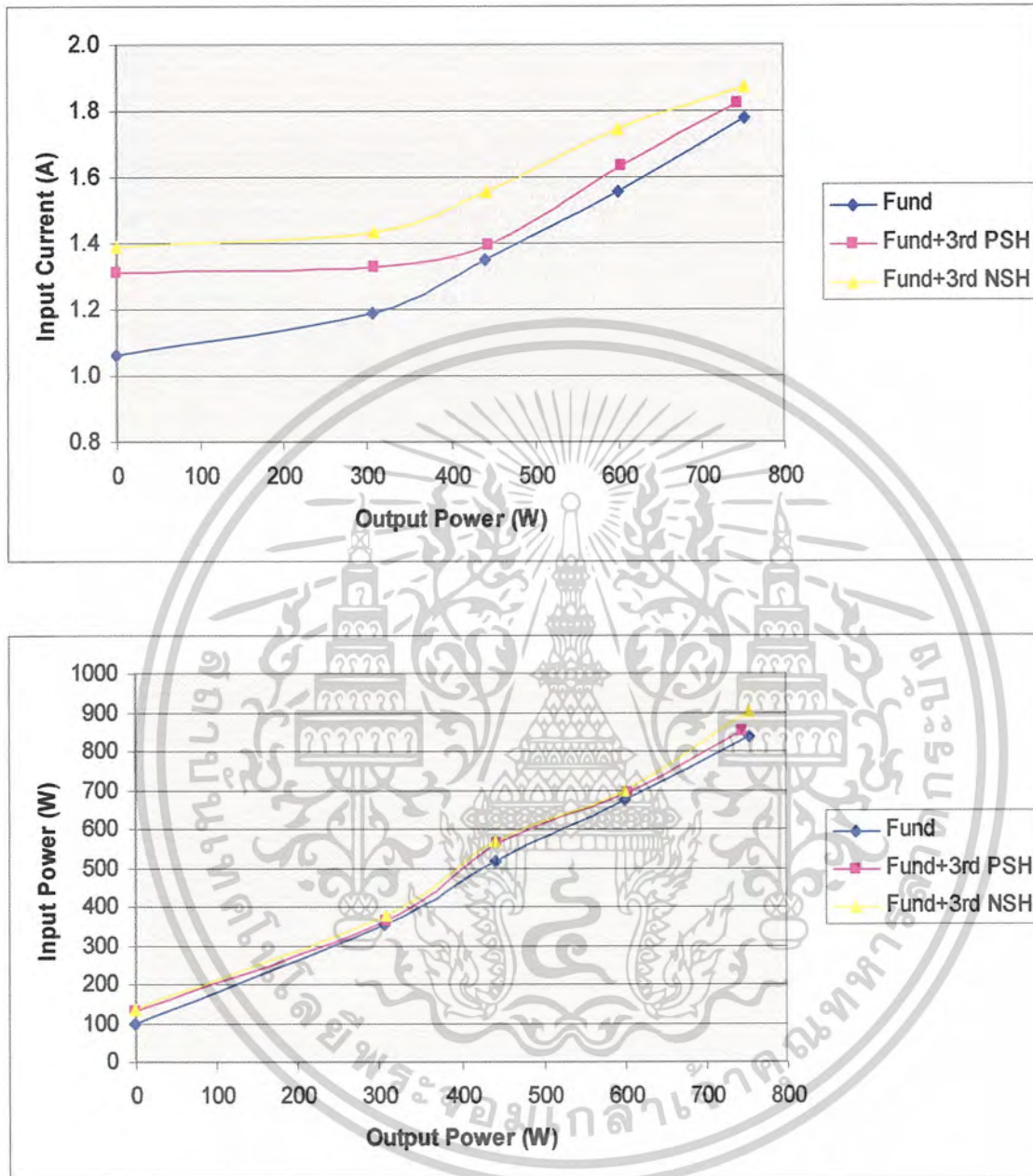
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8.13 กำลังไฟฟ้าและกระแสป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าค่าต่างๆ

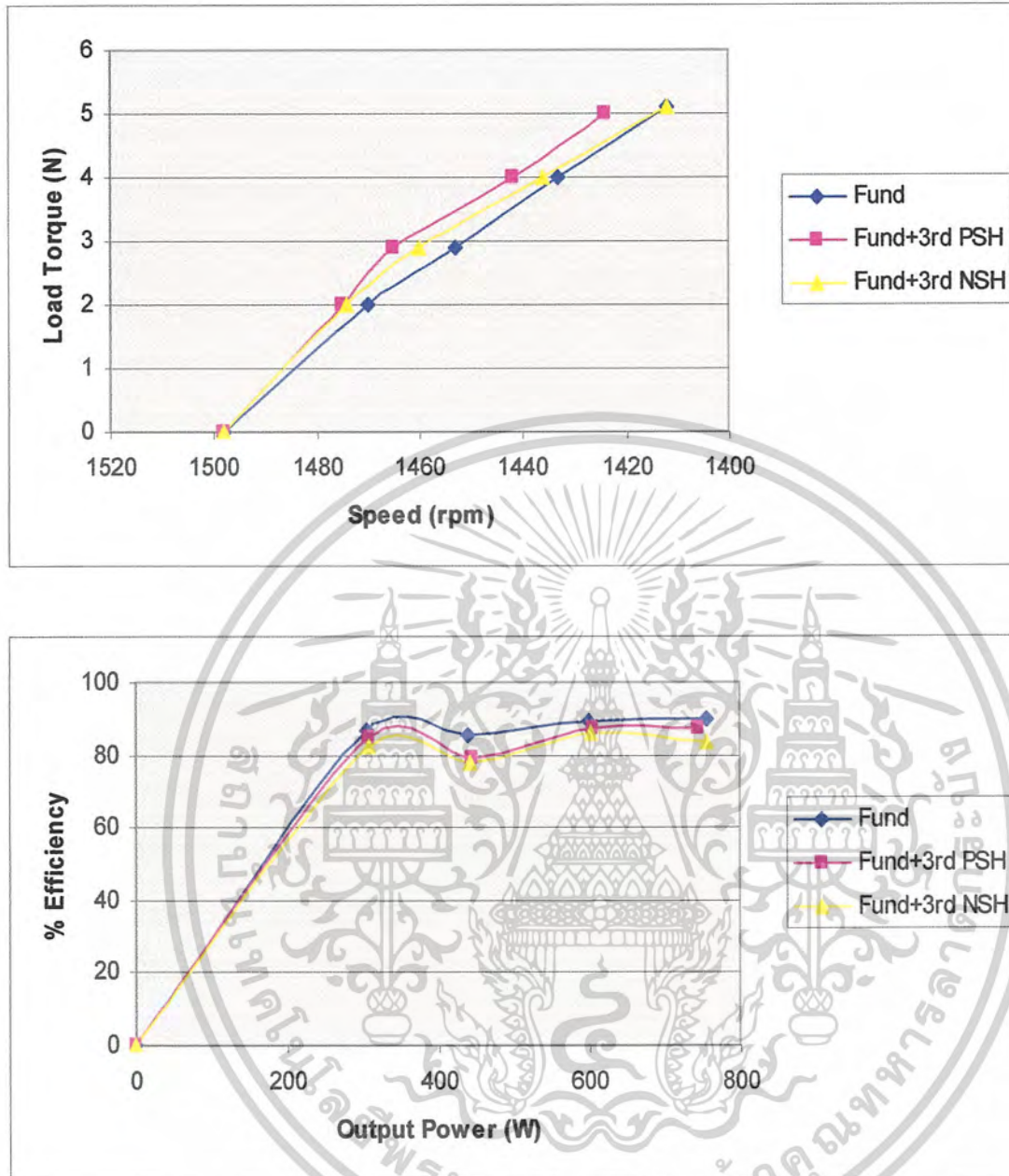
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า



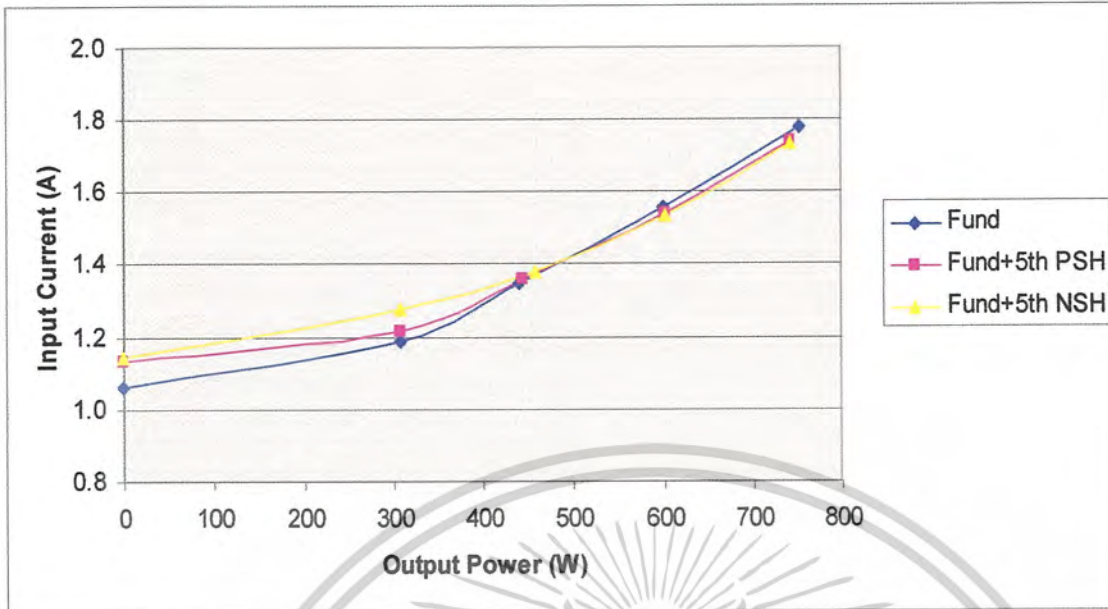
ภาพที่ 8.14 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



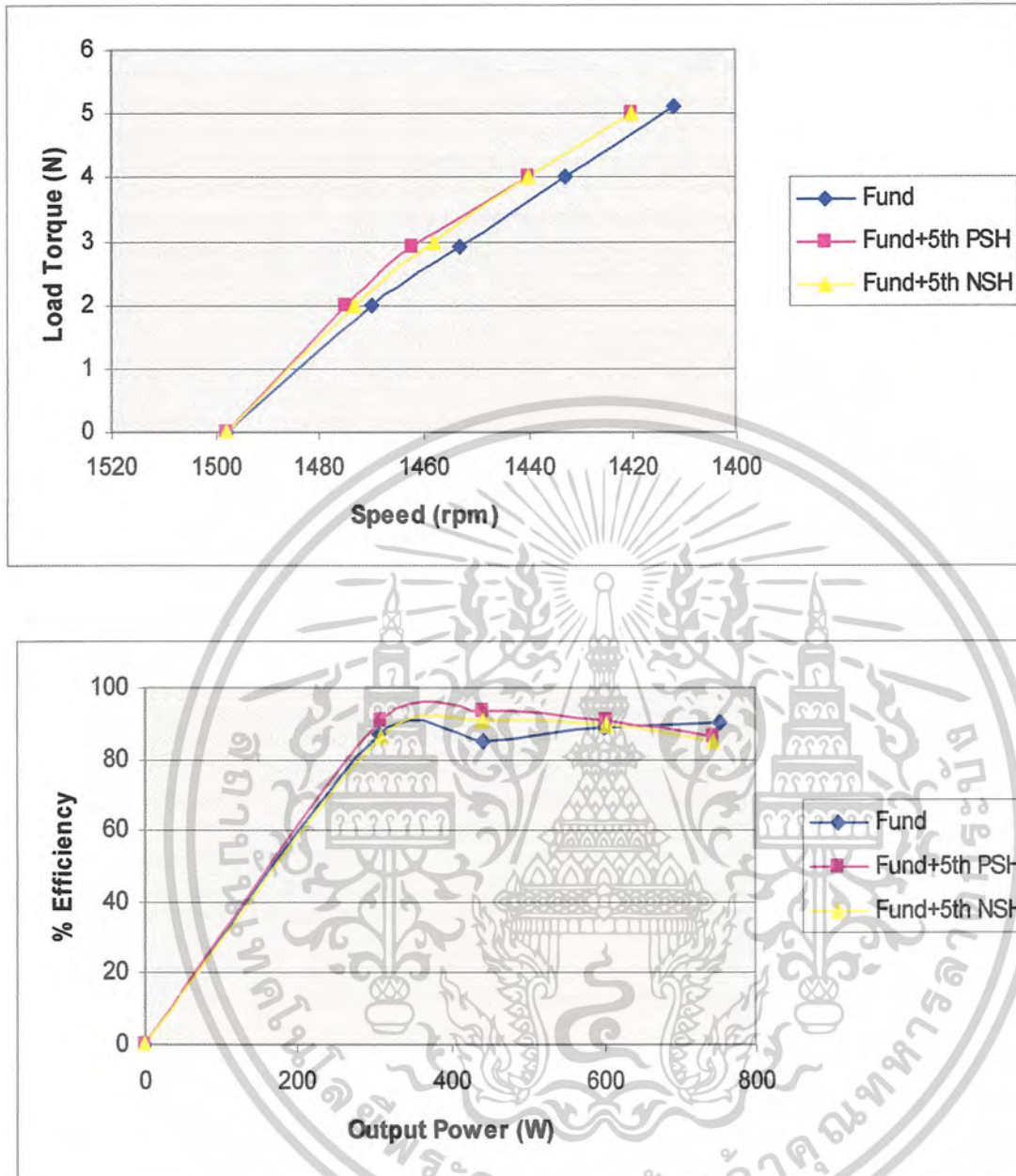
ภาพที่ 8.15 แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



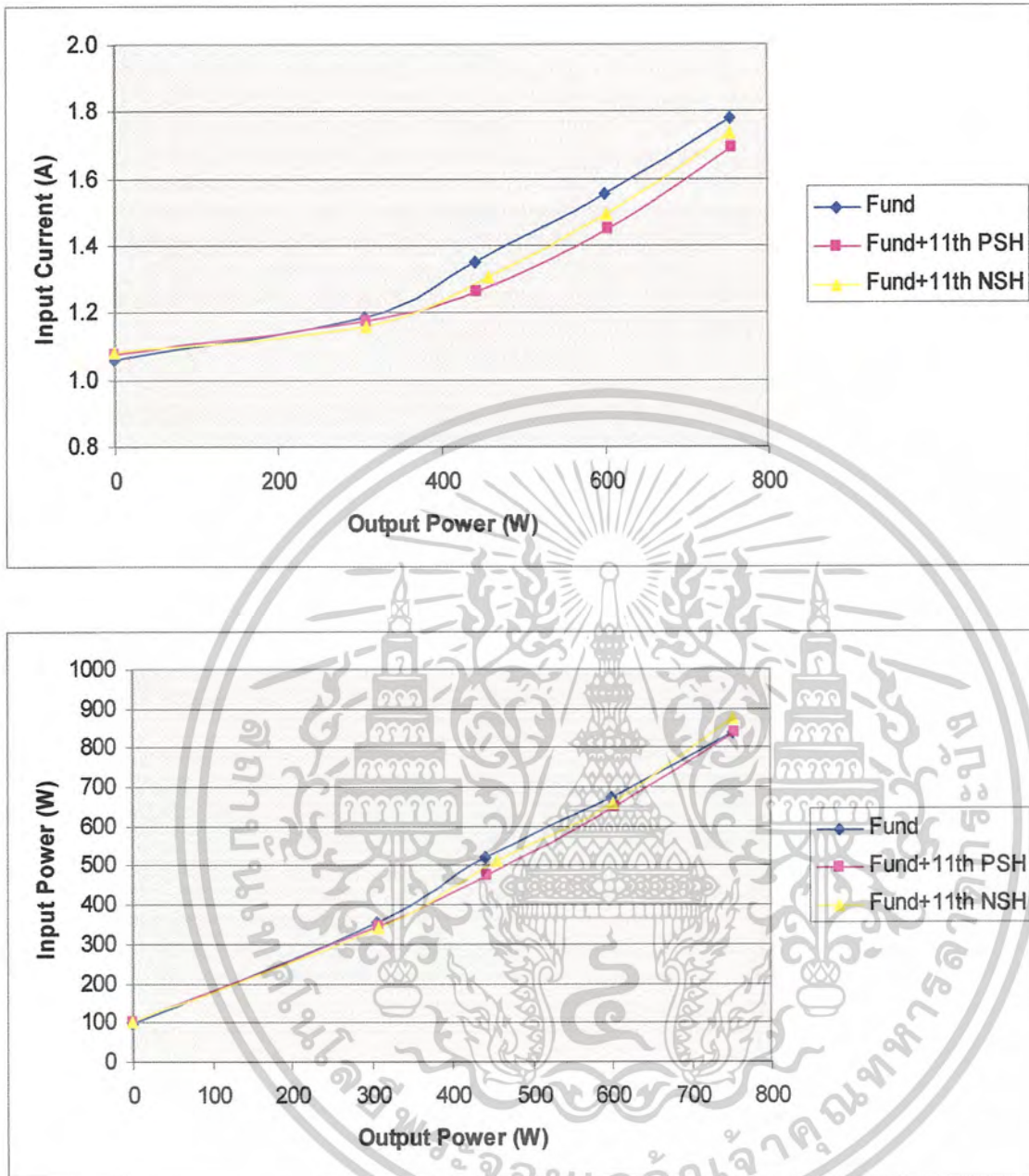
ภาพที่ 8.16 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า  
ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน  
ศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



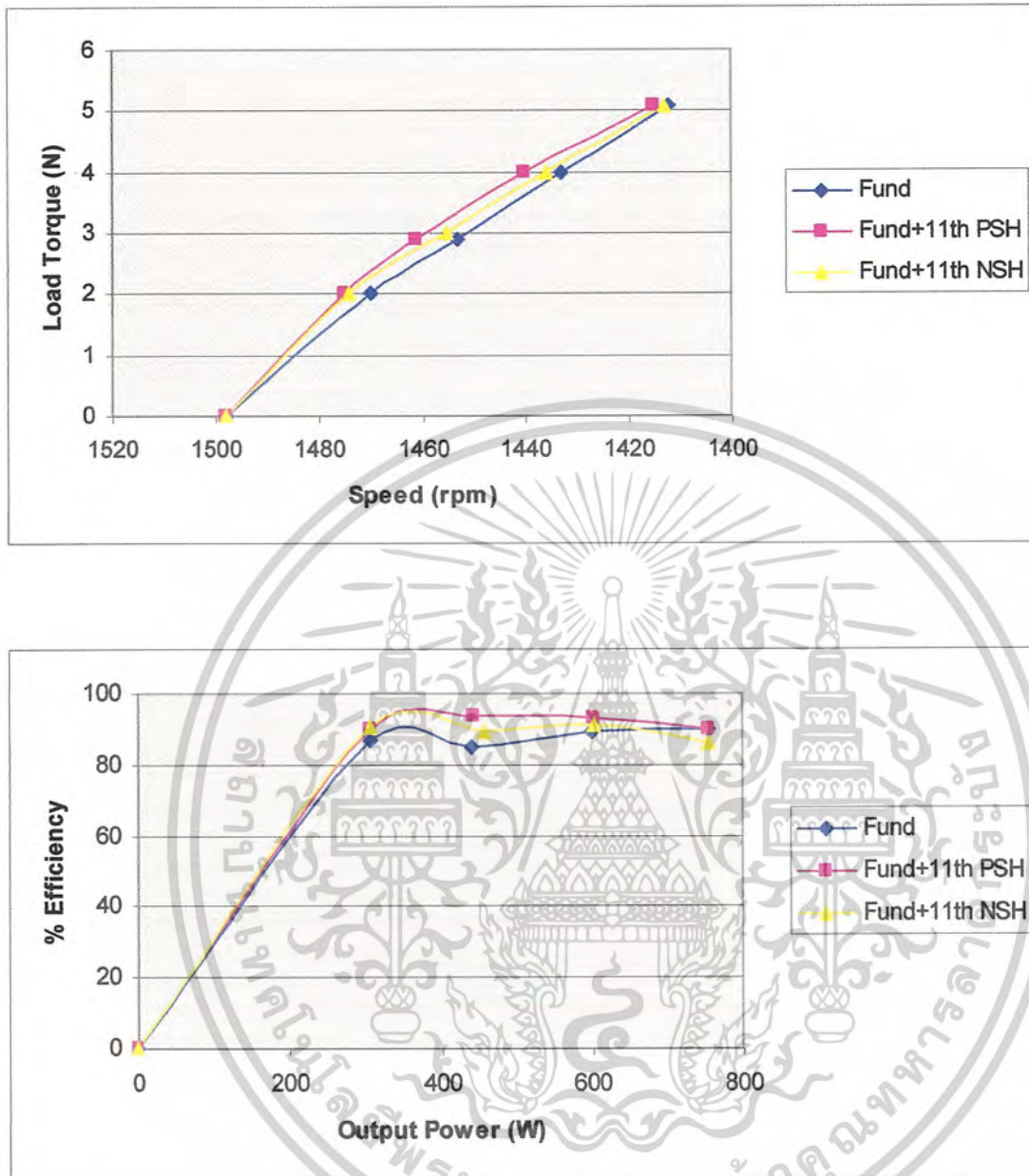
ภาพที่ 8.17 แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8.18 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

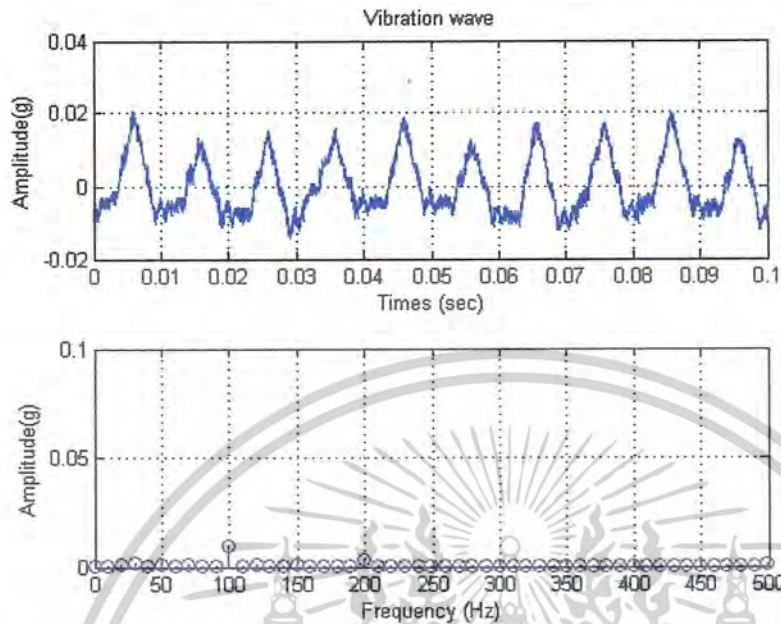
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



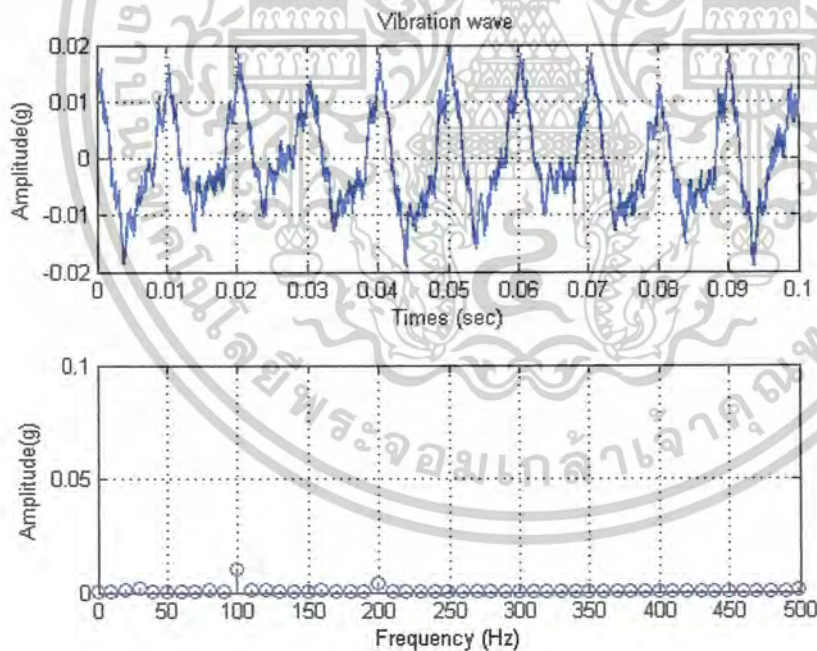
ภาพที่ 8.19 แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน สักคาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

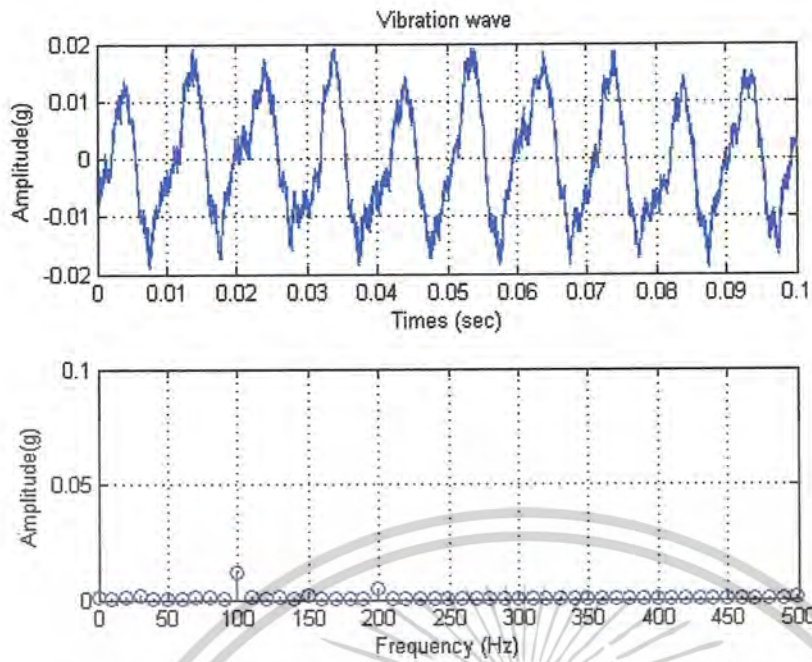


รูปที่ 8.20 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

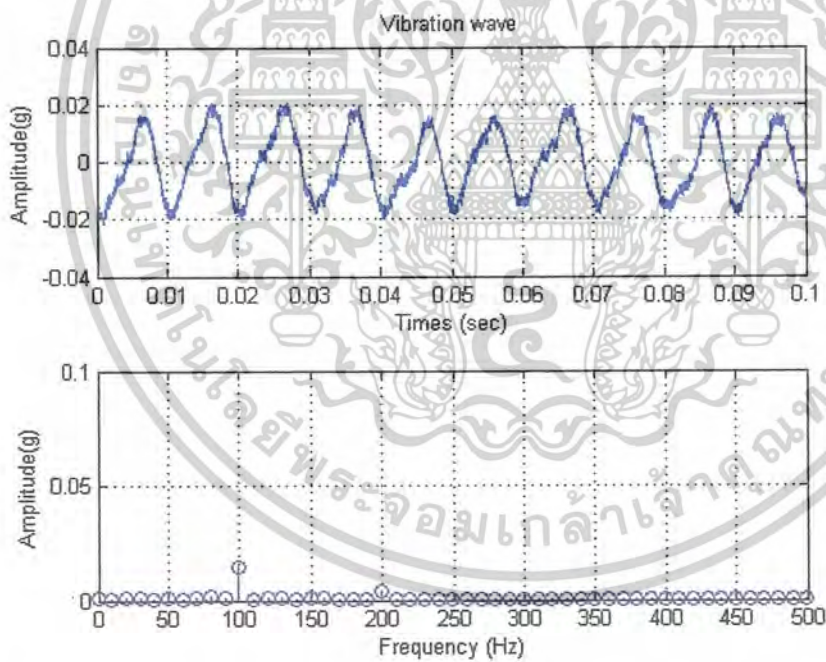


รูปที่ 8.21 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 216V (1U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

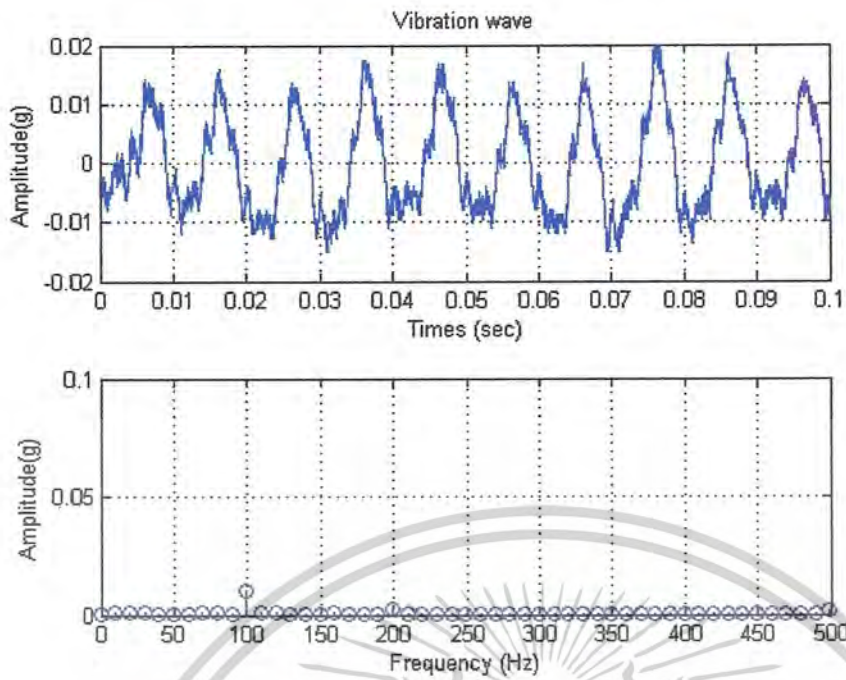


ภาพที่ 8.22 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 210V (1U3%)

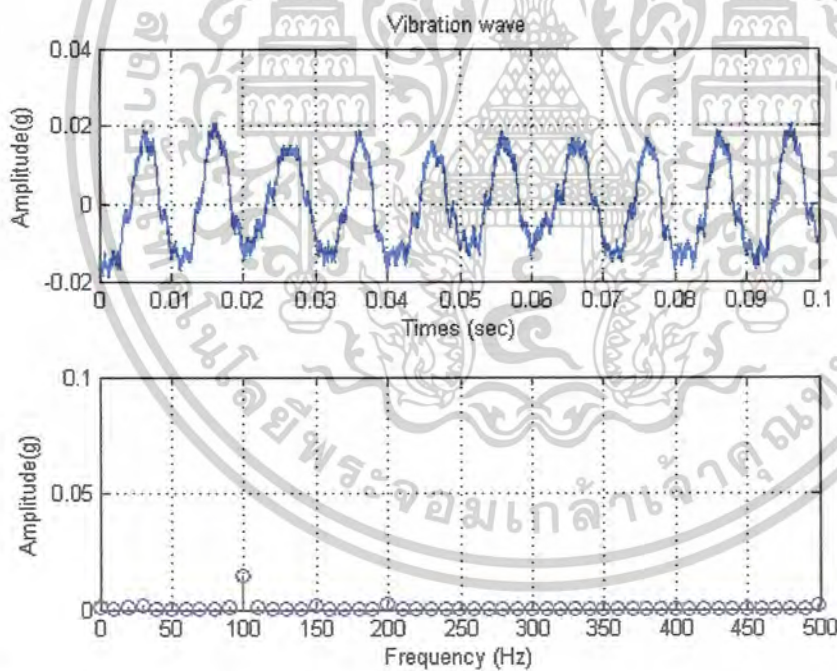


ภาพที่ 8.23 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 204V (1U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

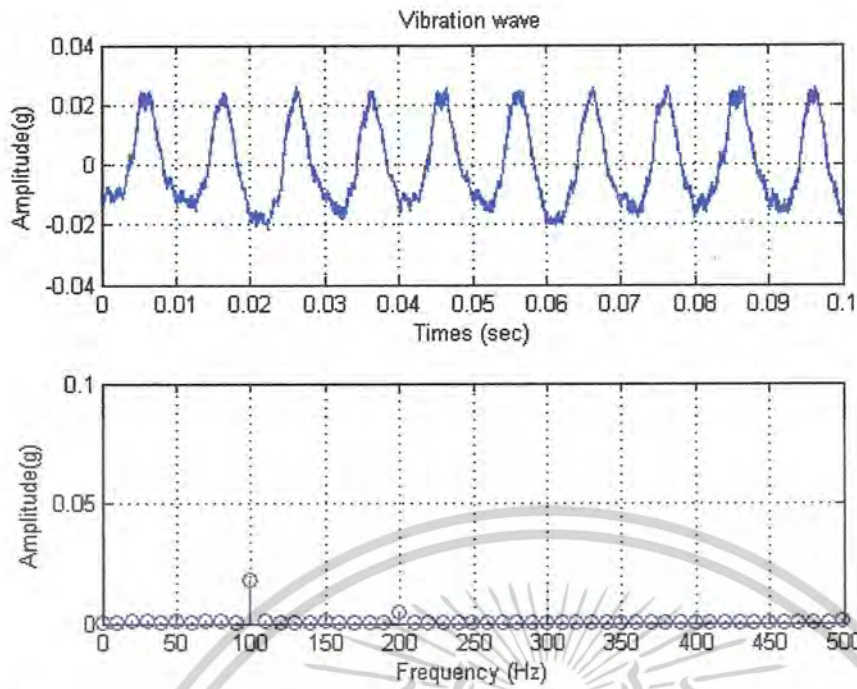


ภาพที่ 8.24 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 224V (101%)

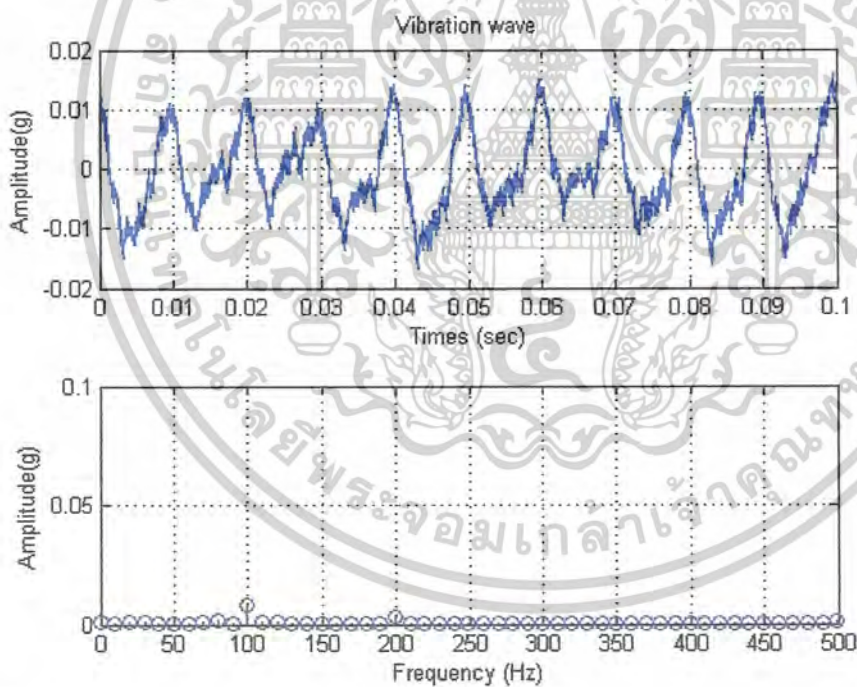


ภาพที่ 8.25 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 230V (103%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

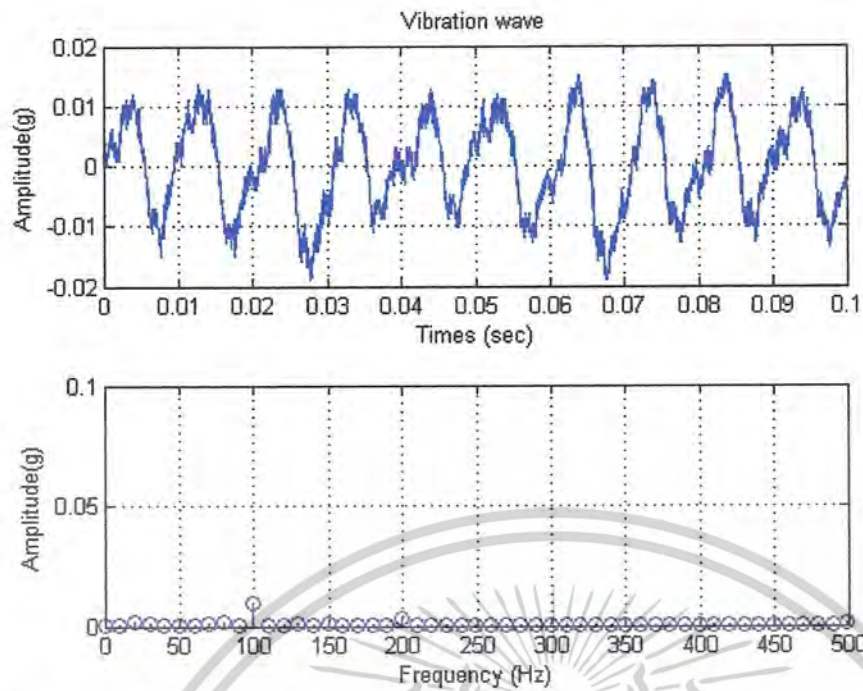


ภาพที่ 8.26 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 236V (105%)

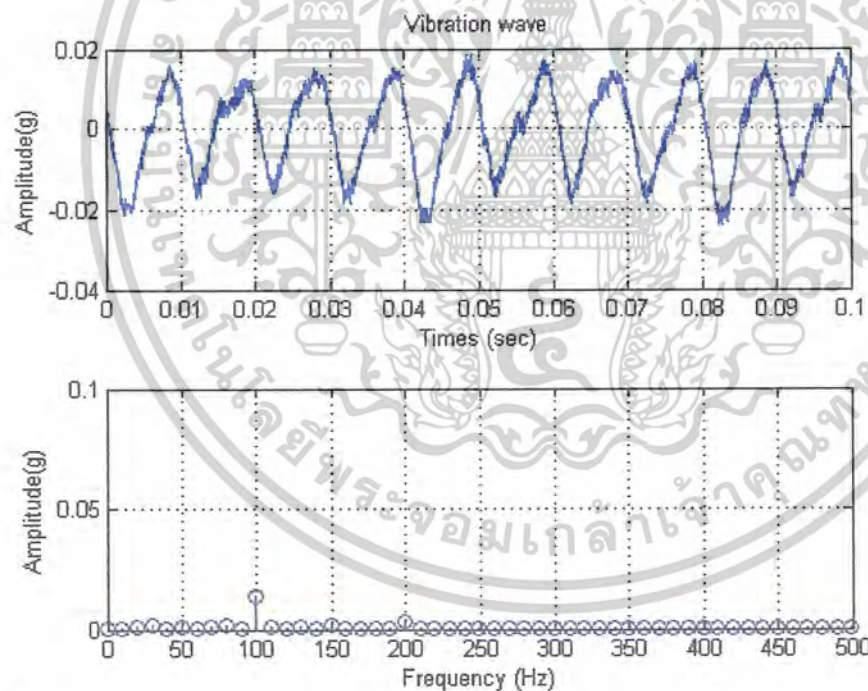


ภาพที่ 8.27 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 217V และเฟส c 215V (2U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

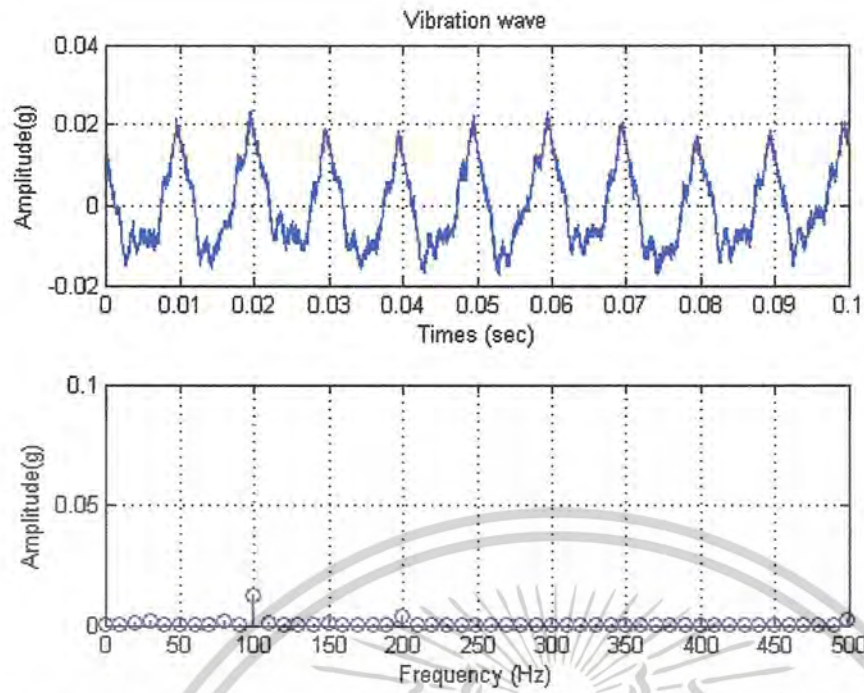


ภาพที่ 8.28 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 215V และเฟส c 208V (2U3%)

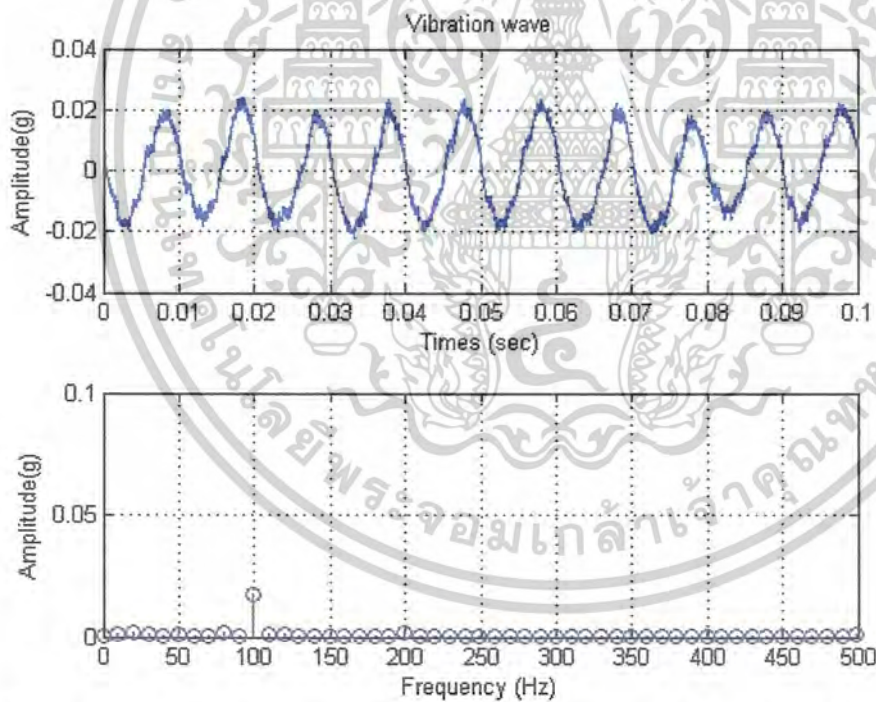


ภาพที่ 8.29 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 213V และเฟส c 200V (2U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

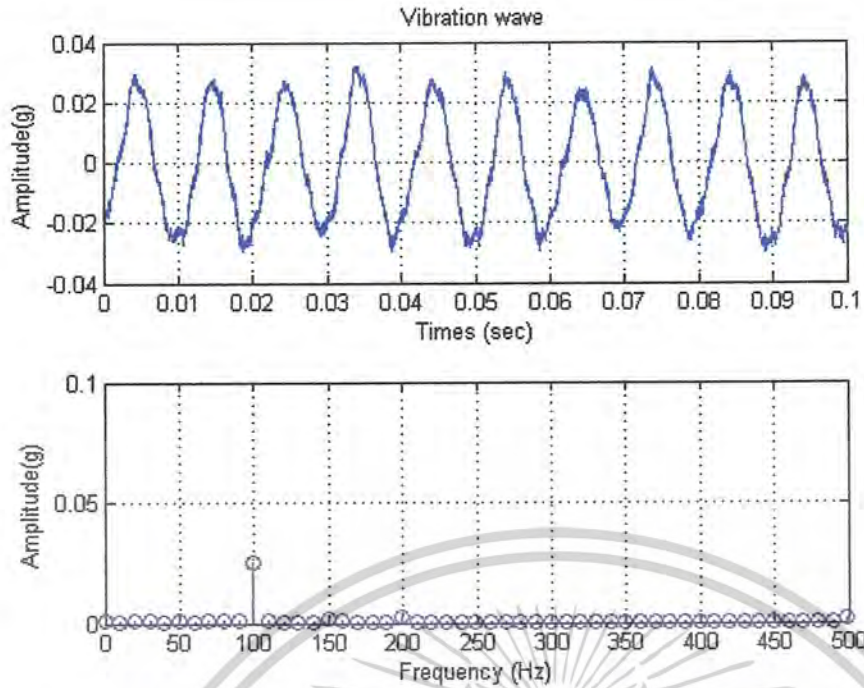


ภาพที่ 8.30 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 223V และเฟส c 225V (201%)

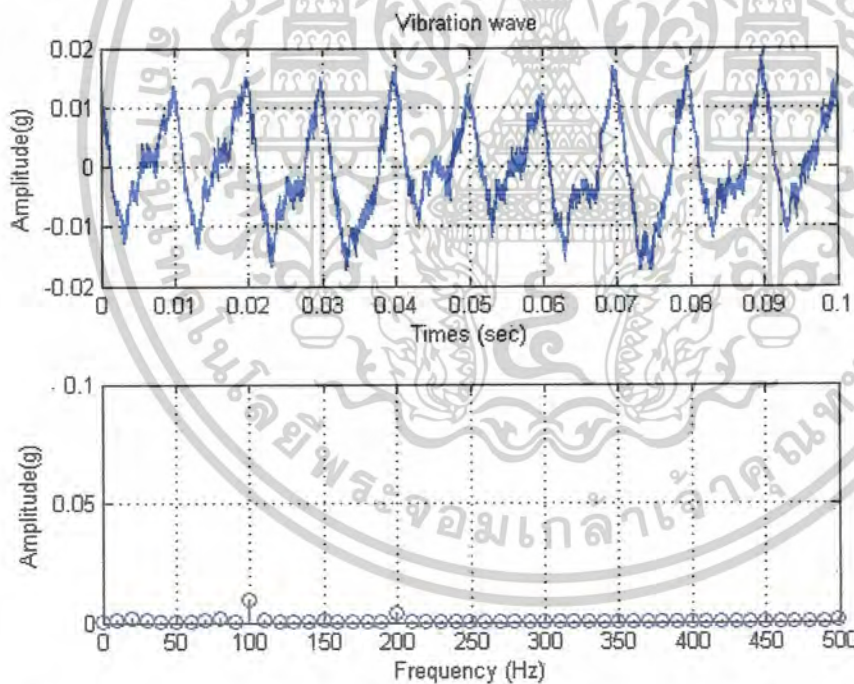


ภาพที่ 8.31 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 225V และเฟส c 227V (203%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

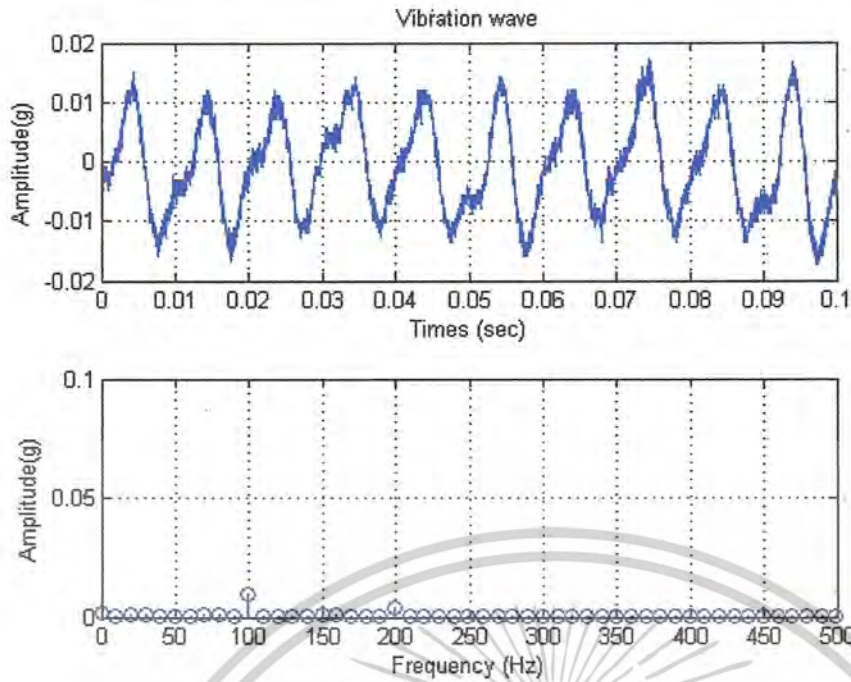


ภาพที่ 8.32 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 227V และเฟส c 240V (205%)

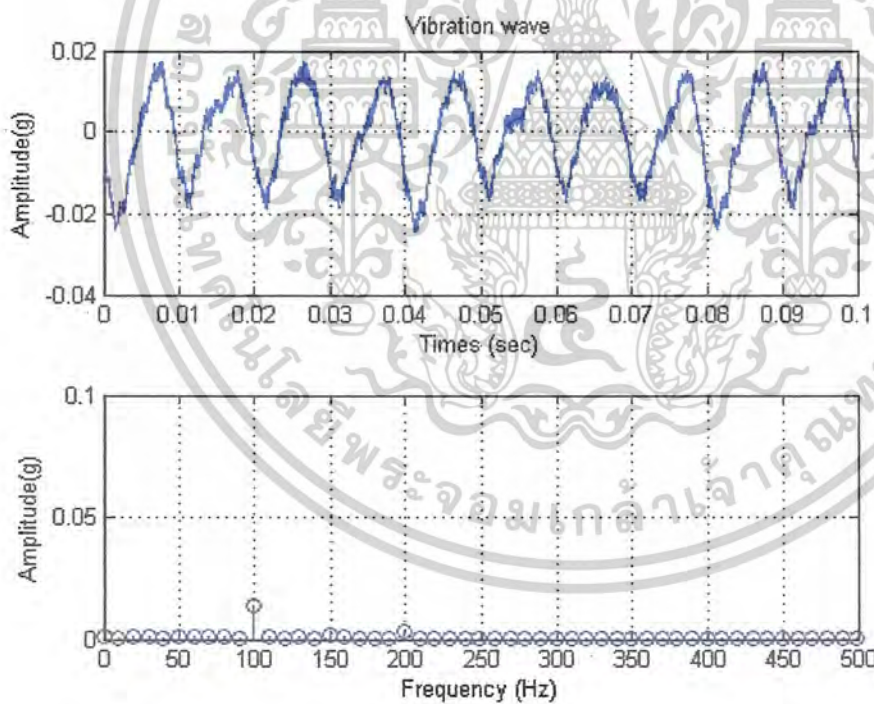


ภาพที่ 8.33 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V เฟส b 215V และเฟส c 213V (3U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

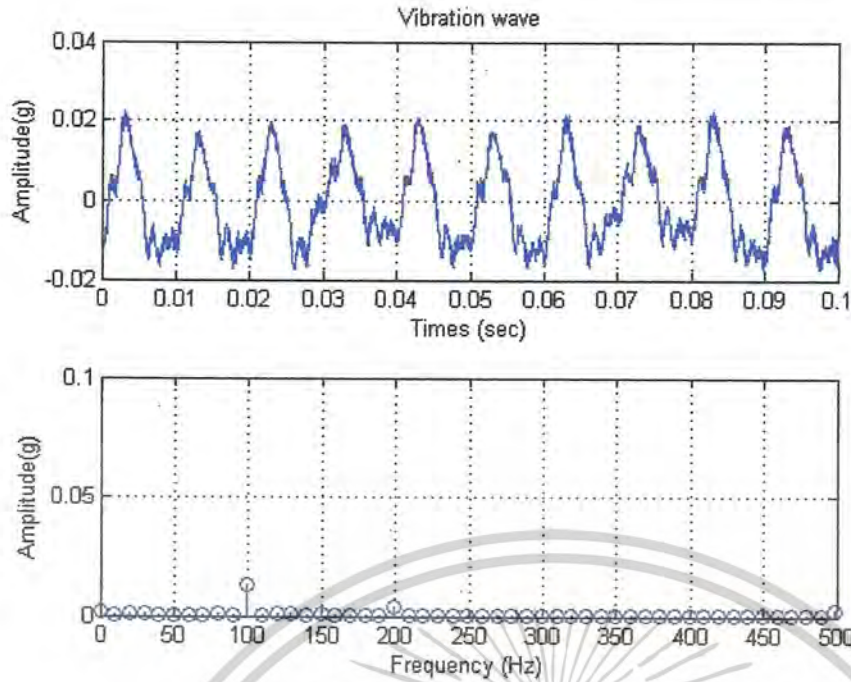


ภาพที่ 8.34 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V  
เฟส b 213V และเฟส c 206V (3U3%)

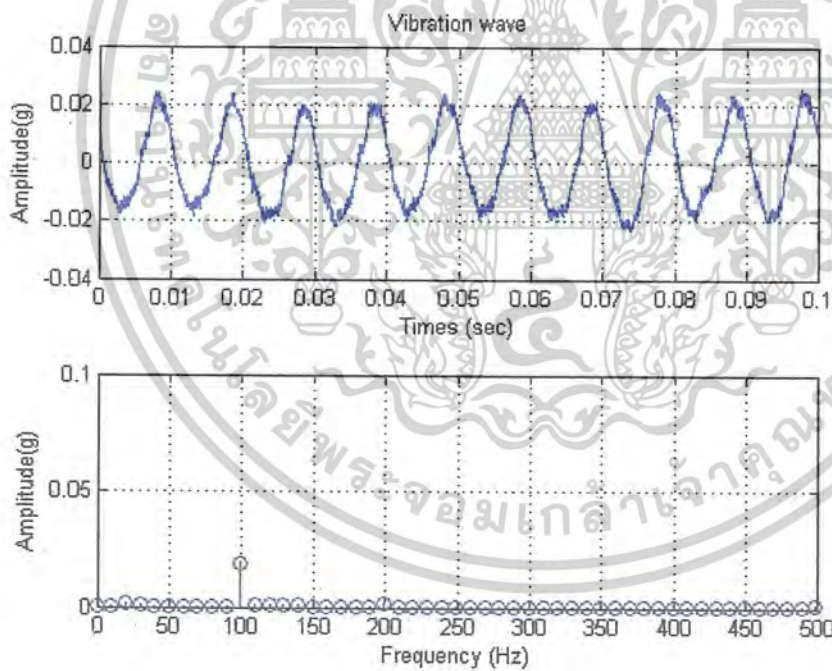


ภาพที่ 8.35 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V  
เฟส b 211V และเฟส c 198V (3U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

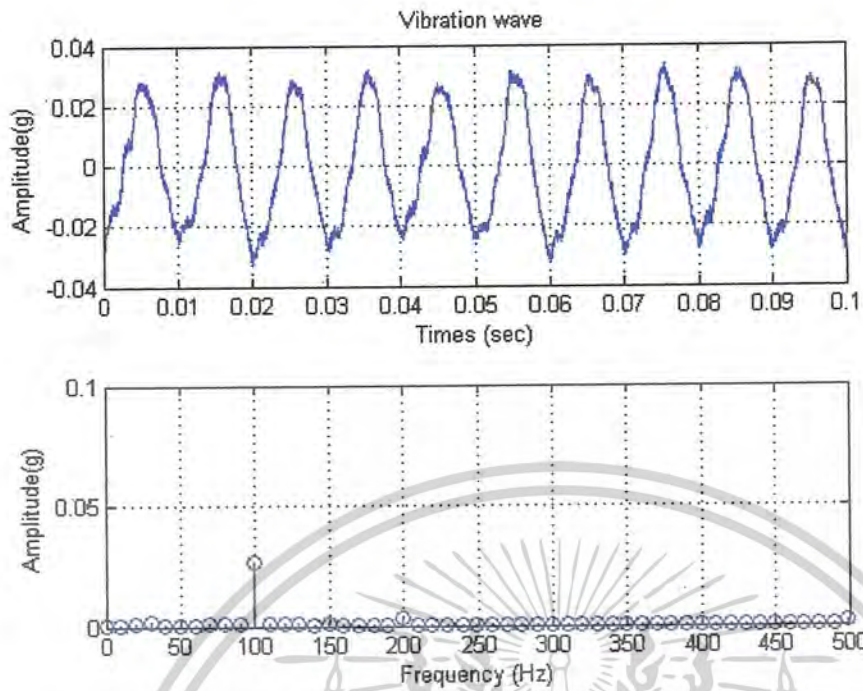


ภาพที่ 8.36 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222V  
เฟส b 225V และเฟส c 227V (301%)



ภาพที่ 8.37 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222V  
เฟส b 227V และเฟส c 234V (3U5%)

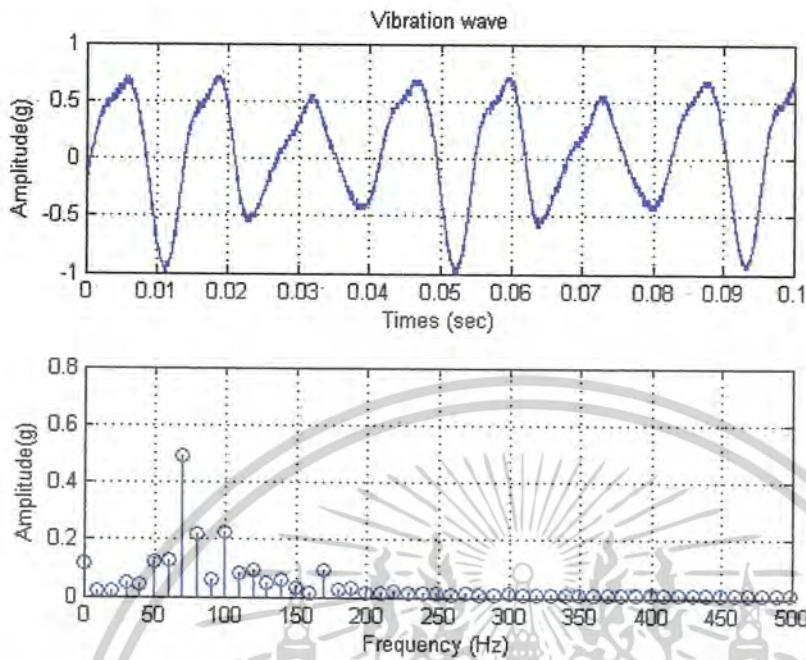
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



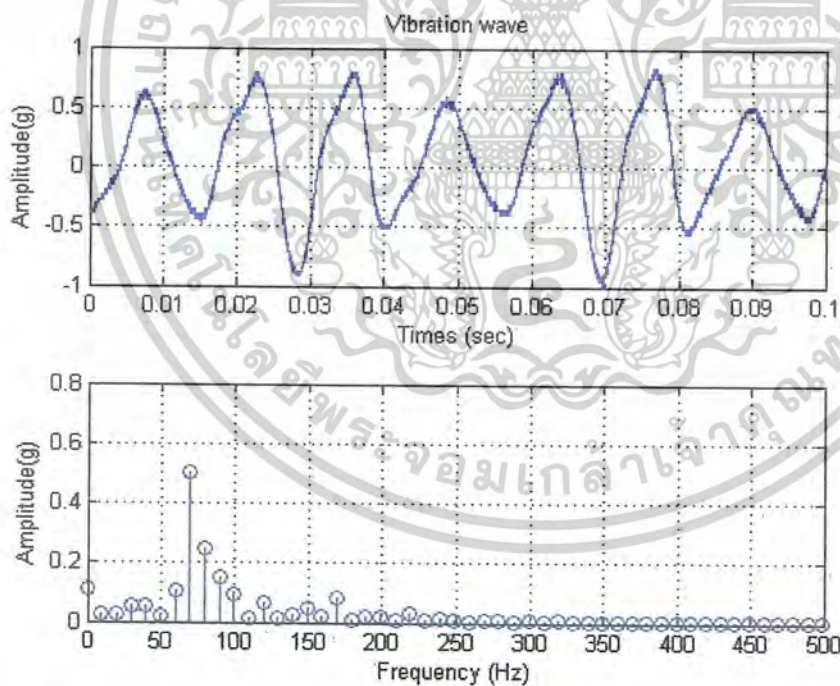
ภาพที่ 8.38 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222 V  
เฟส b 229V และเฟส c 242V (305%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะเมื่อขับภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

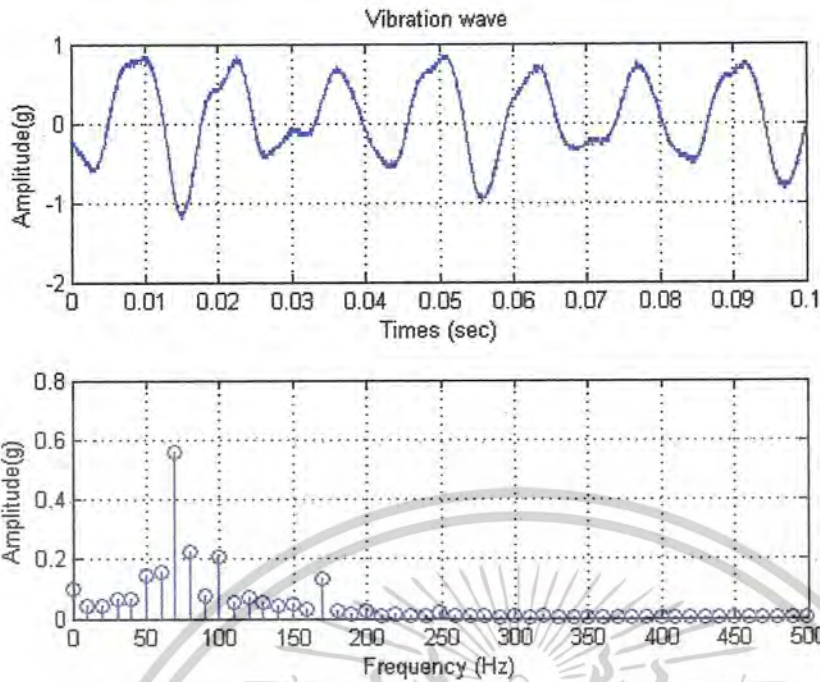


ภาพที่ 8.39 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

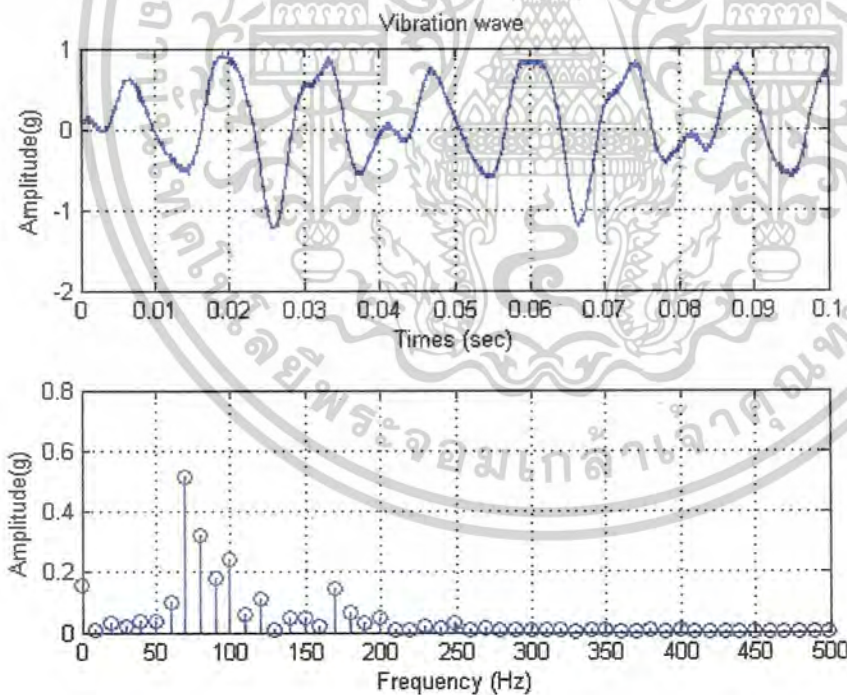


ภาพที่ 8.40 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 216V (1U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

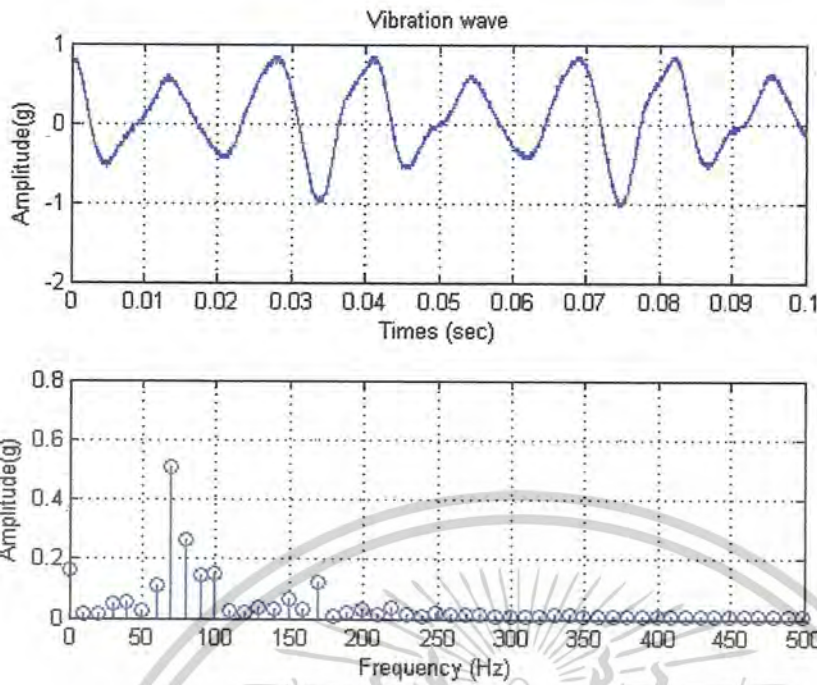


ภาพที่ 8.41 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 210V (1U3%)

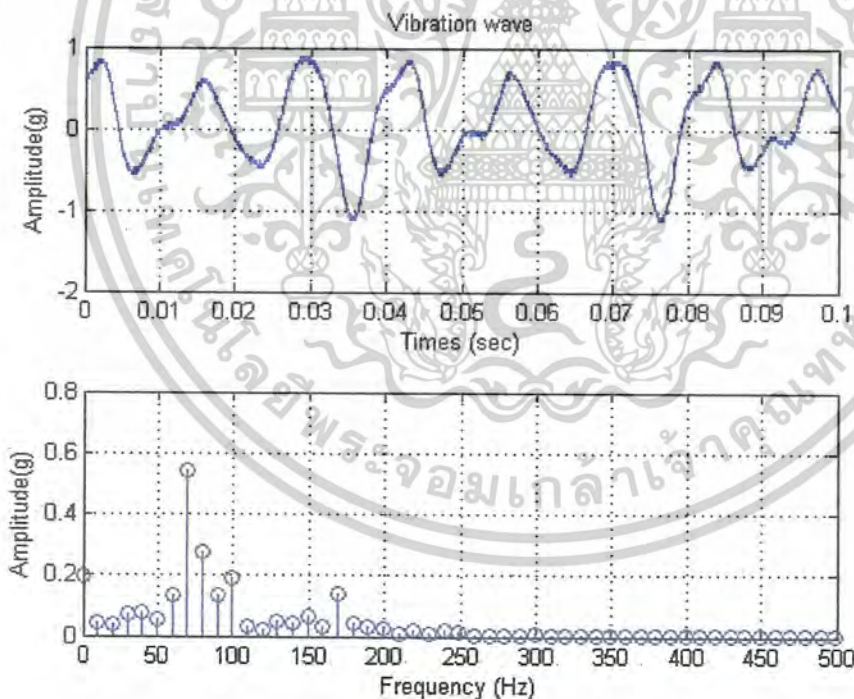


ภาพที่ 8.42 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 204V (1U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

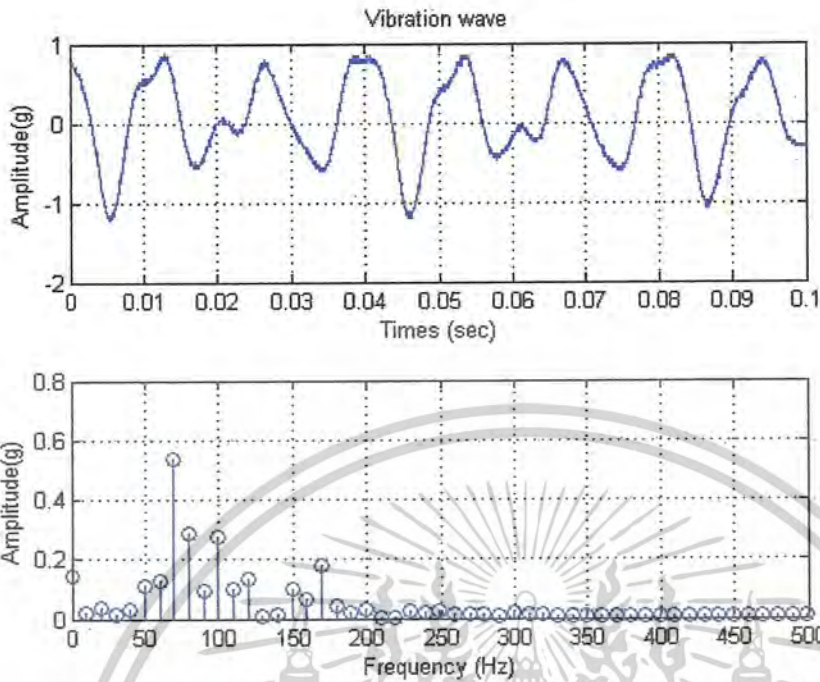


ภาพที่ 8.43 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 224V (101%)

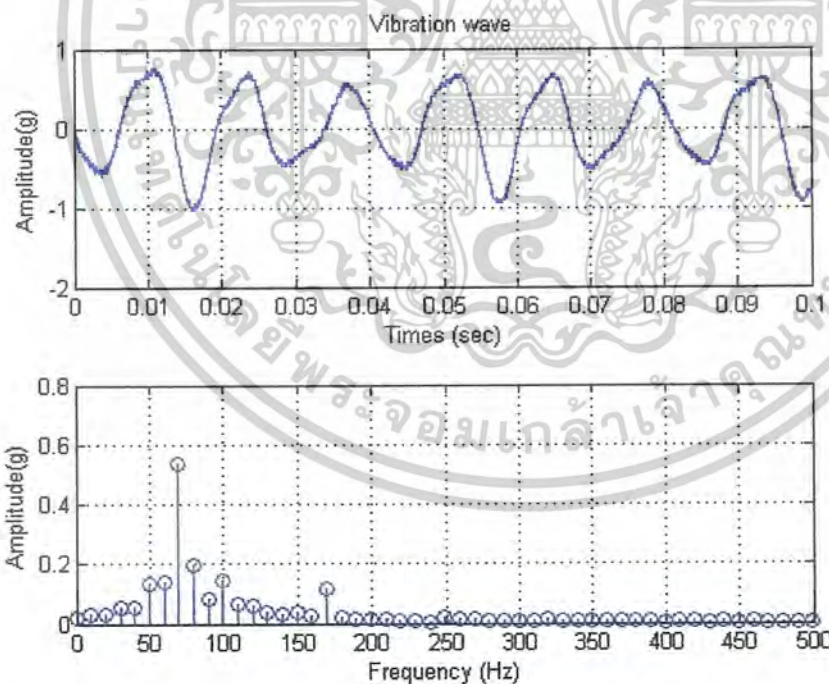


ภาพที่ 8.44 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 230V (103%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

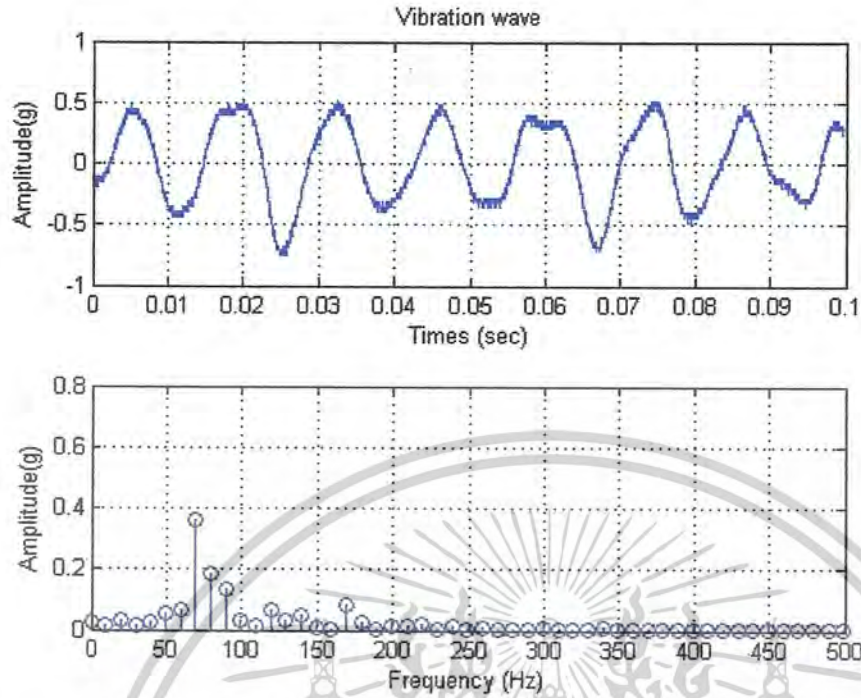


ภาพที่ 8.45 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a และ b คงที่ 220V เฟส c 236V (105%)

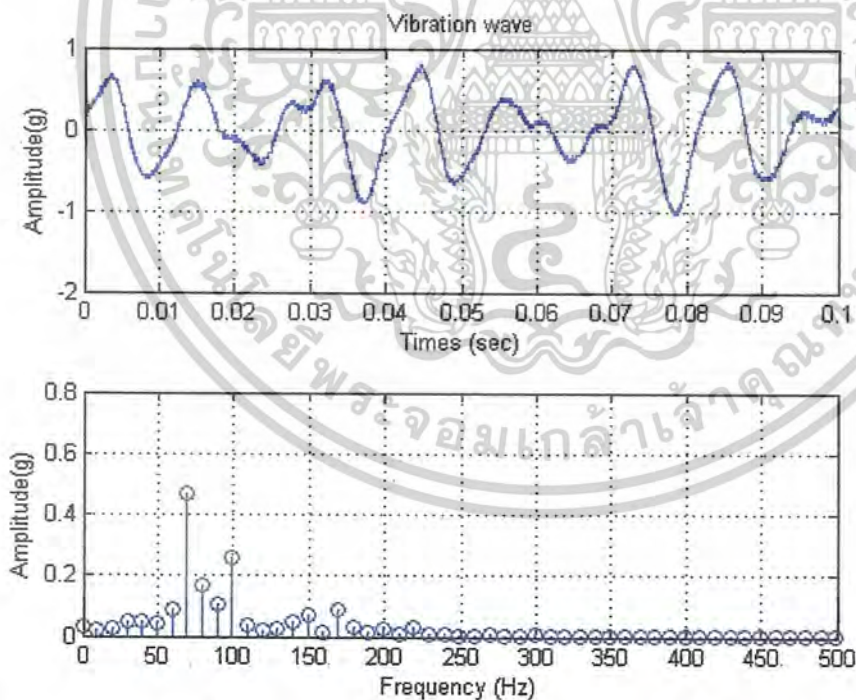


รูปที่ 8.46 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 217V และเฟส c 215V (2U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

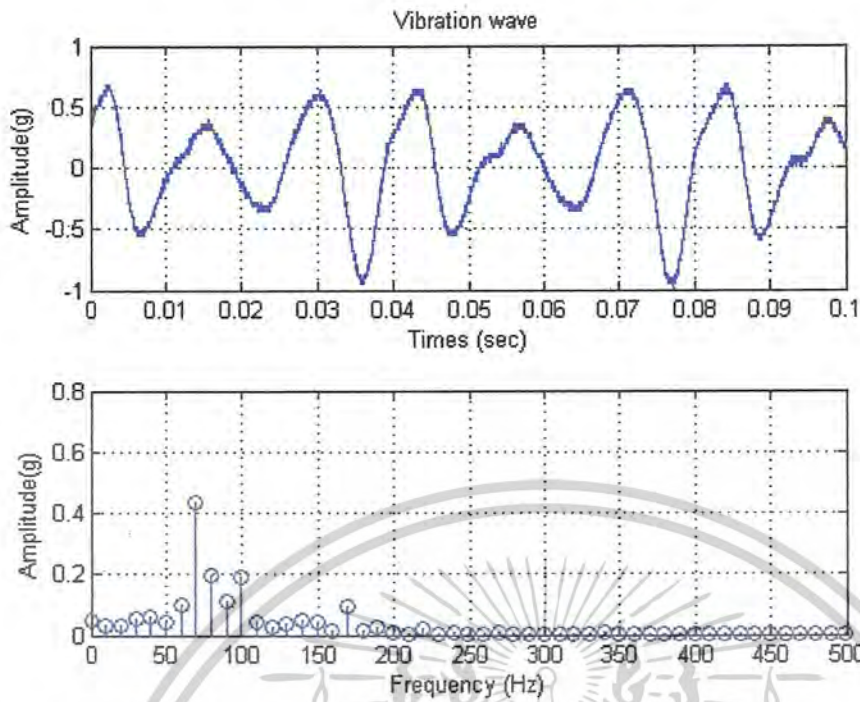


รูปที่ 8.47 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 215V และเฟส c 208V (2U3%)

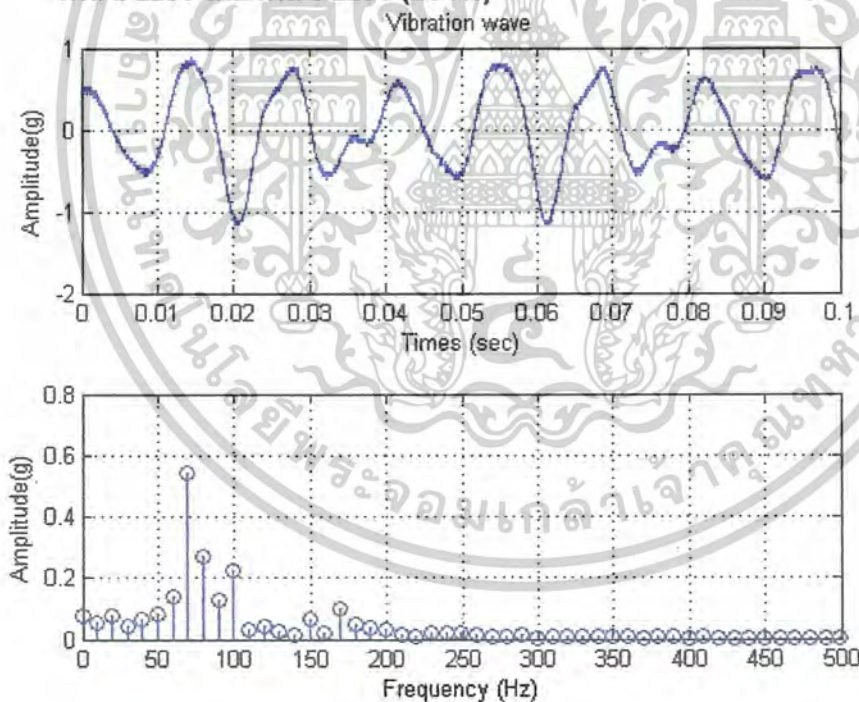


รูปที่ 8.48 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 213V และเฟส c 200V (2U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

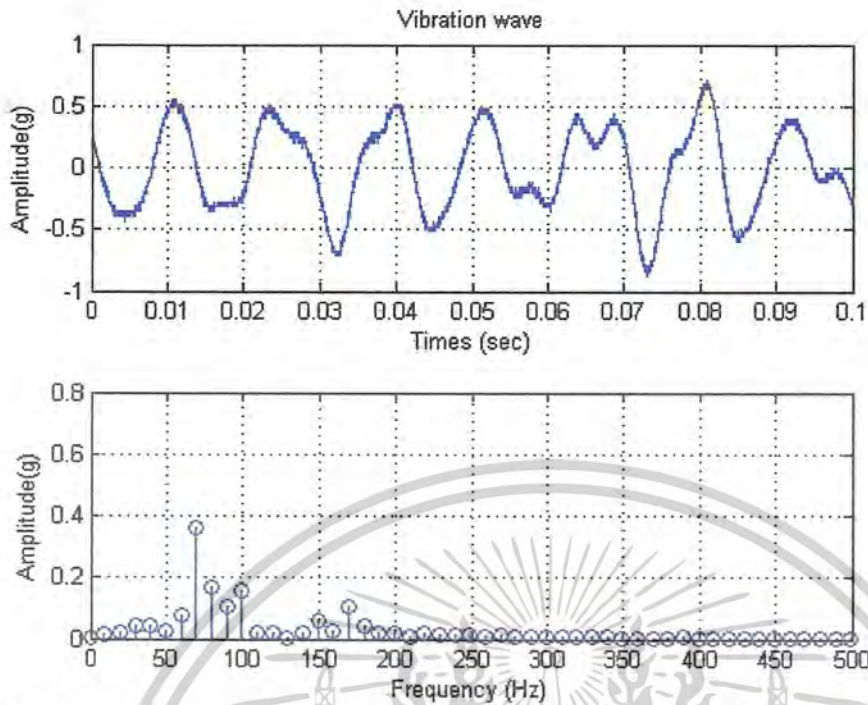


ภาพที่ 8.49 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 223V และเฟส c 225V (201%)

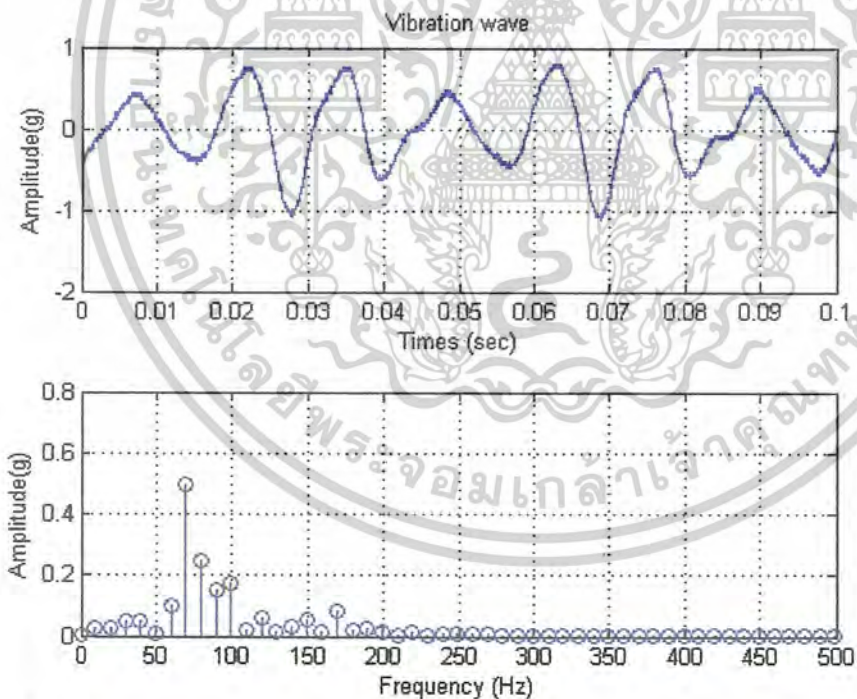


ภาพที่ 8.50 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 225V และเฟส c 227V (203%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

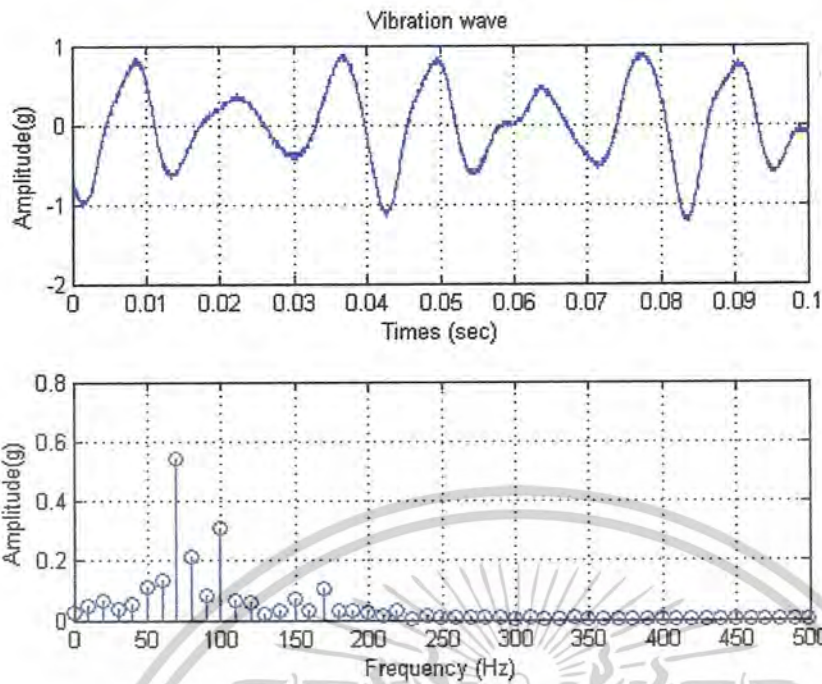


ภาพที่ 8.51 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a คงที่ 220V เฟส b 227V และเฟส c 240V (205%)

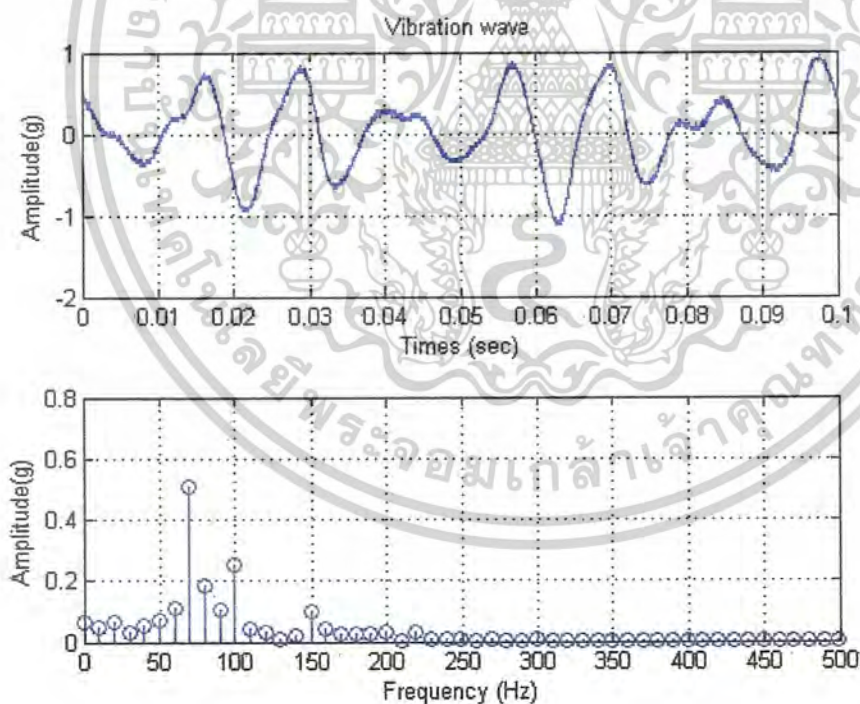


ภาพที่ 8.52 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V เฟส b 215V และเฟส c 213V (3U1%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

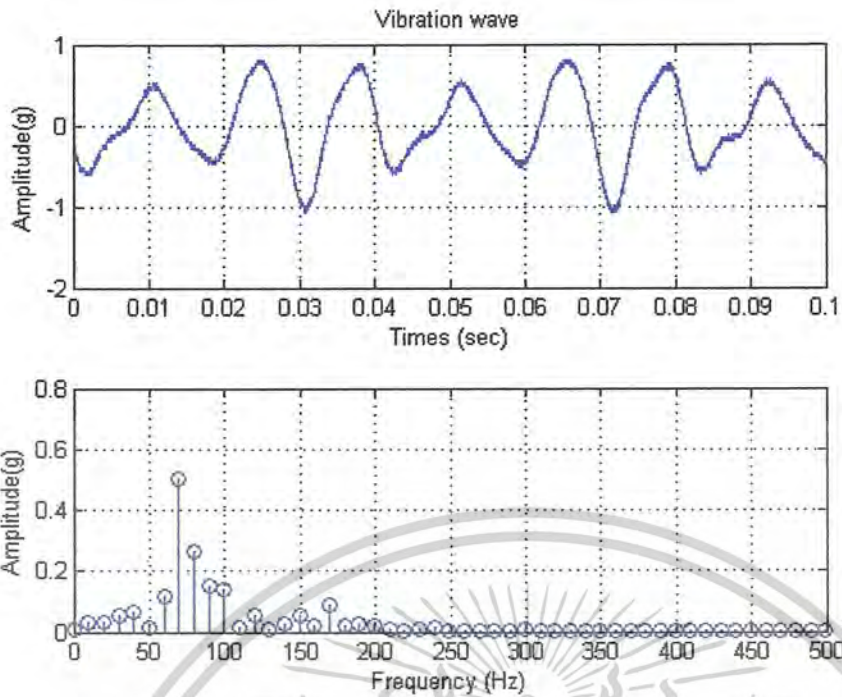


ภาพที่ 8.53 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V  
เฟส b 213V และเฟส c 206V (3U3%)

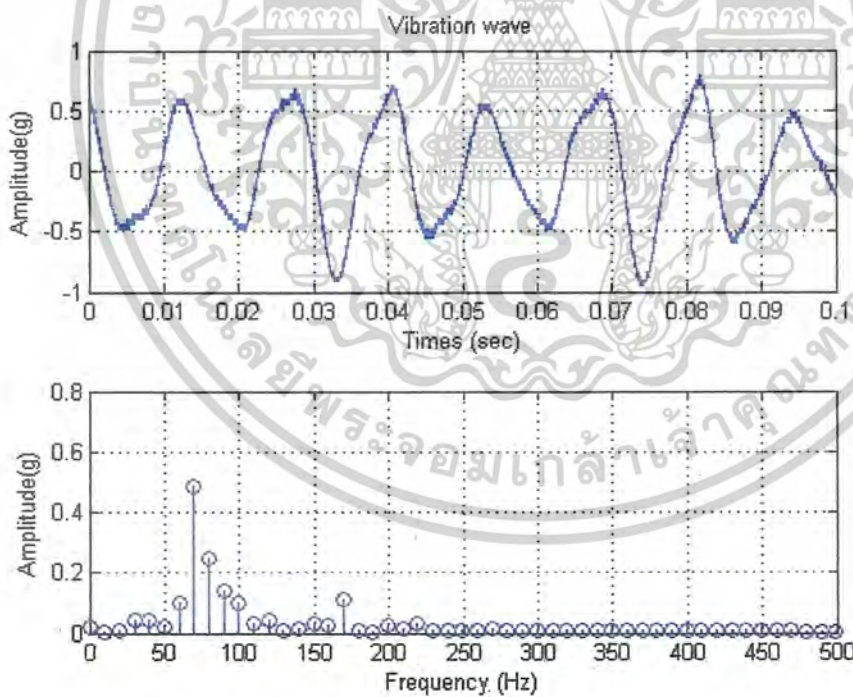


ภาพที่ 8.54 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 218V  
เฟส b 211V และเฟส c 198V (3U5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

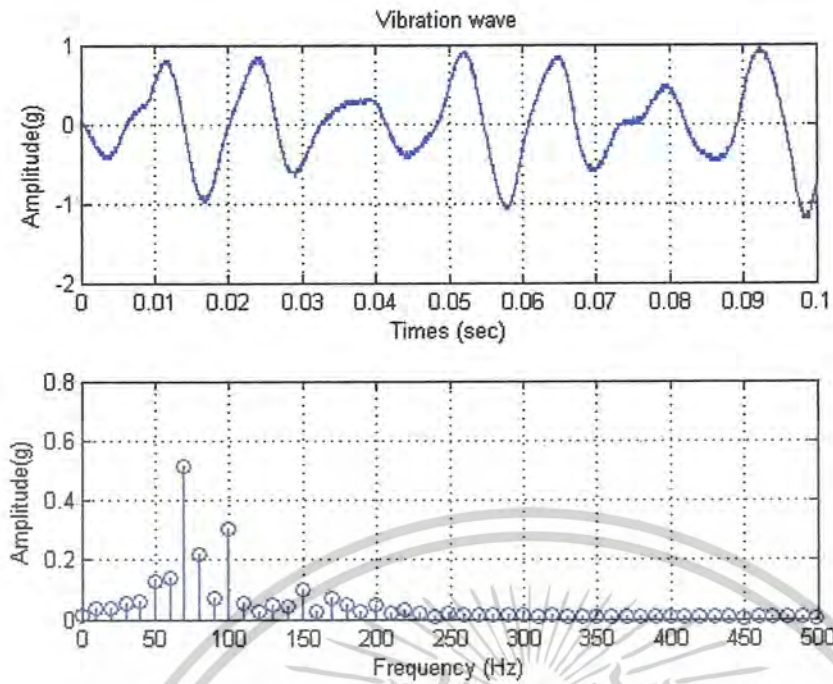


ภาพที่ 8.55 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222V  
เฟส b 225V และเฟส c 227V (301%)



ภาพที่ 8.56 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222V  
เฟส b 227V และเฟส c 234V (305%)

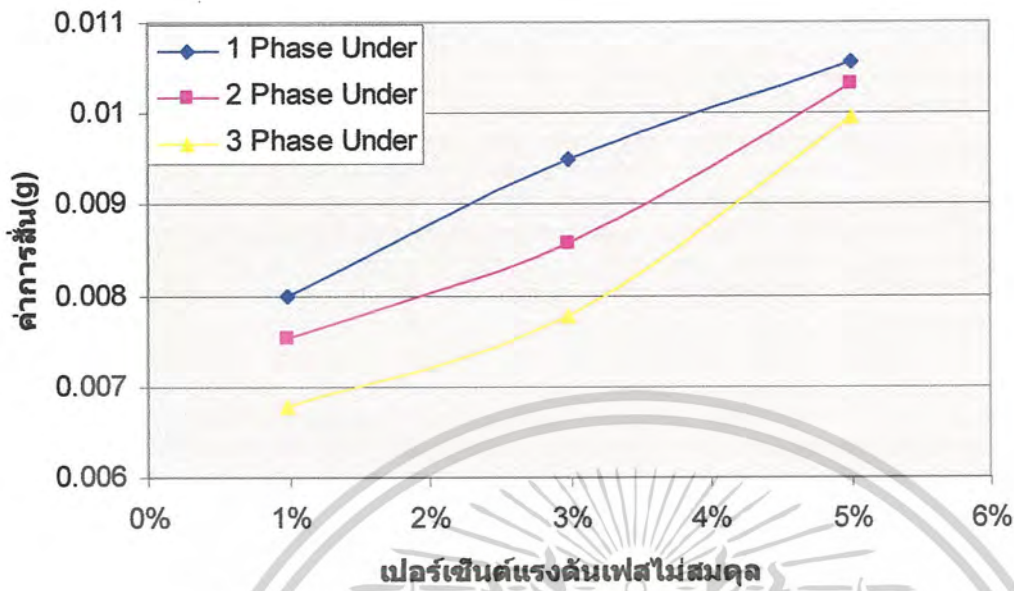
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



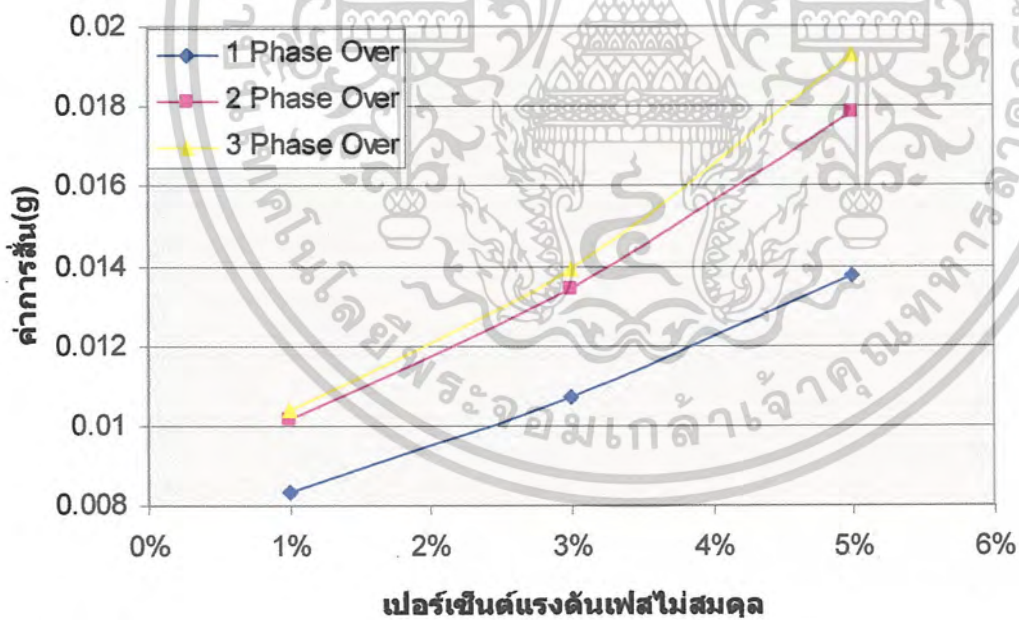
ภาพที่ 8.57 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส a 222V  
เฟส b 229V และเฟส c 242V (305%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันสามเฟสไม่สมดุลแบบต่าง ๆ

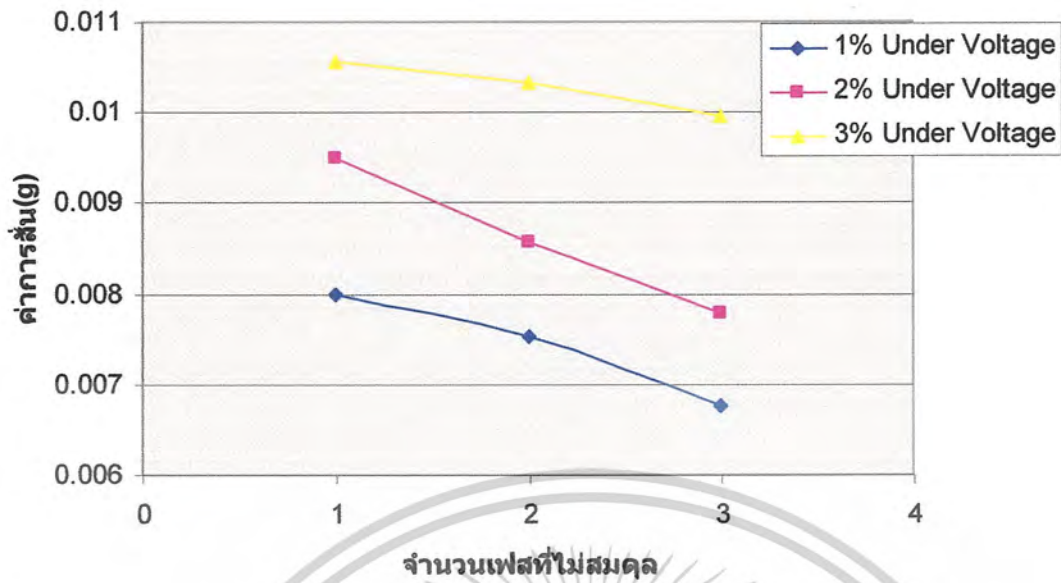


ภาพที่ 8.58 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันต่ำกว่าแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแรงดันเฟสไม่สมดุล

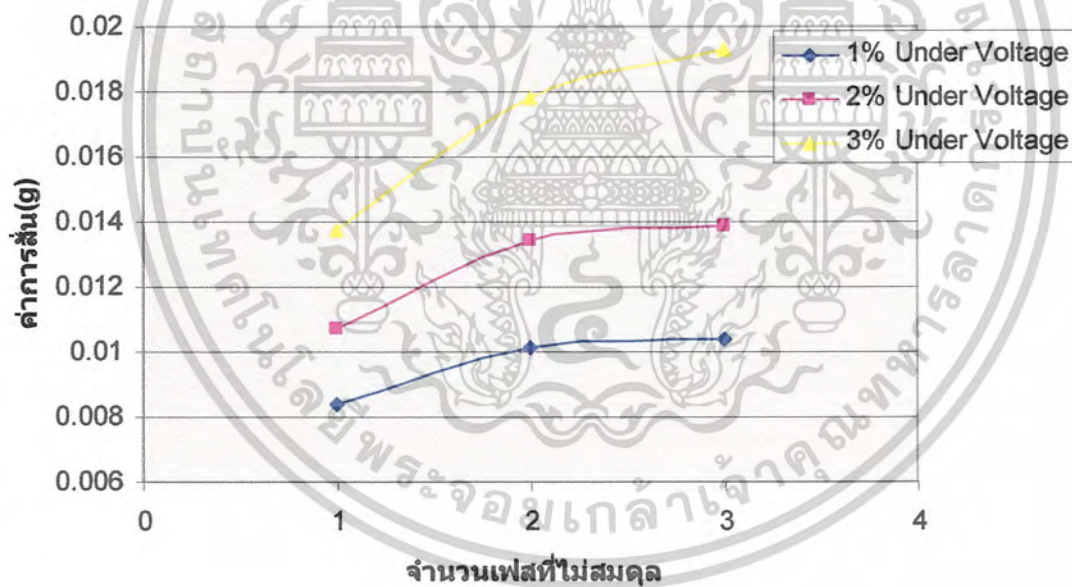


ภาพที่ 8.59 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันสูงกว่าแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแรงดันเฟสไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

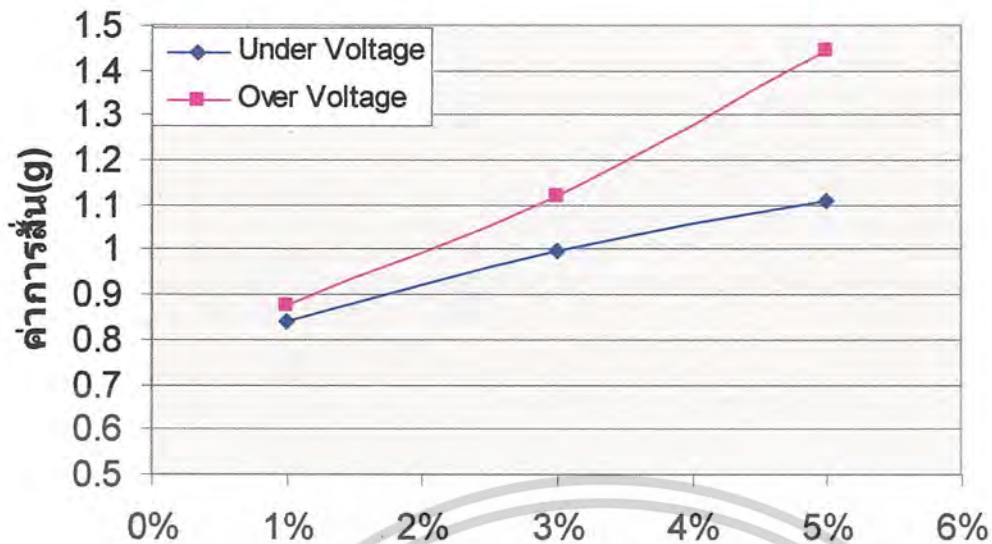


ภาพที่ 8.60 แสดงการเปรียบเทียบผลการสิ้นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันต่ำกว่าแบบ 1% 2% และ 3% เมื่อเพิ่มจำนวนของแรงดันเฟสไม่สมดุล



ภาพที่ 8.61 แสดงการเปรียบเทียบผลการสิ้นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันสูงกว่าแบบ 1% 2% และ 3% เมื่อเพิ่มจำนวนของแรงดันเฟสไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### เปอร์เซ็นต์แรงดันเฟสไม่สมดุล

ภาพที่ 8.62 แสดงการเปรียบเทียบผลการสั่นเมื่อแรงดันสามเฟสไม่สมดุลระหว่างแบบแรงดันสูงกว่าและแบบแรงดันต่ำกว่า แบบ 1% 2% และ 3%

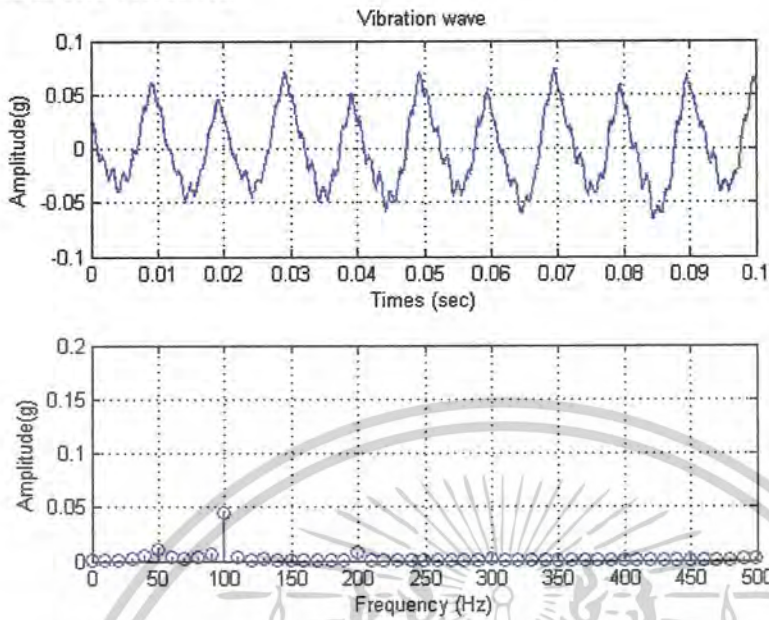
จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแรงดันเฟสไม่สมดุลทั้งแบบแรงดันต่ำกว่าและแบบแรงดันสูงกว่าทำให้การสั่นเพิ่มขึ้น

กรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันต่ำกว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเฟสของแรงดันไม่สมดุลส่งผลให้การสั่นสะท้อนลดลง แต่ในกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันสูงกว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเฟสของแรงดันไม่สมดุลส่งผลให้การสั่นสะท้อนเพิ่มขึ้น

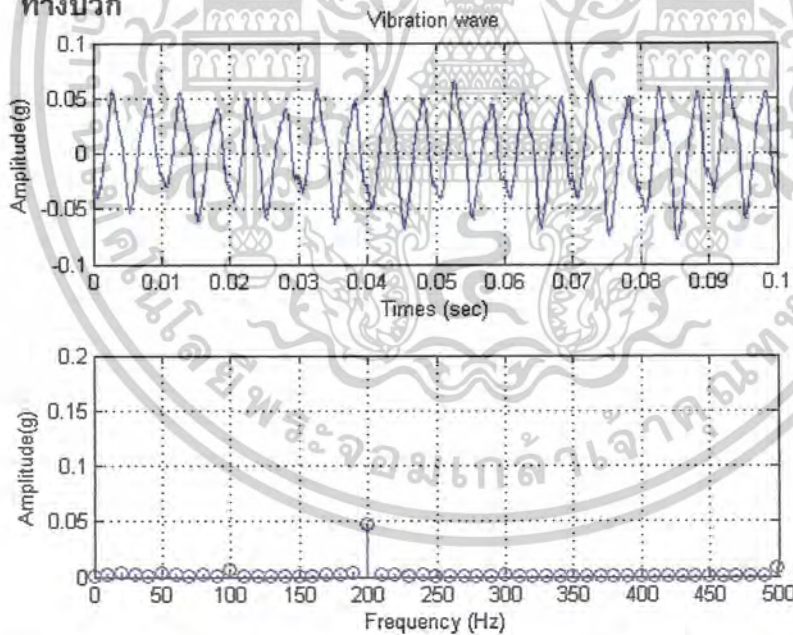
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการสั่นสะท้อนในแบบแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันต่ำกว่าและแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันสูงกว่า พบว่าการสั่นสะท้อนที่เป็นผลมาจากแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบแรงดันสูงกว่า มีค่าการสั่นสะท้อนมากกว่าที่ระดับเปอร์เซ็นต์แรงดันเฟสไม่สมดุลเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

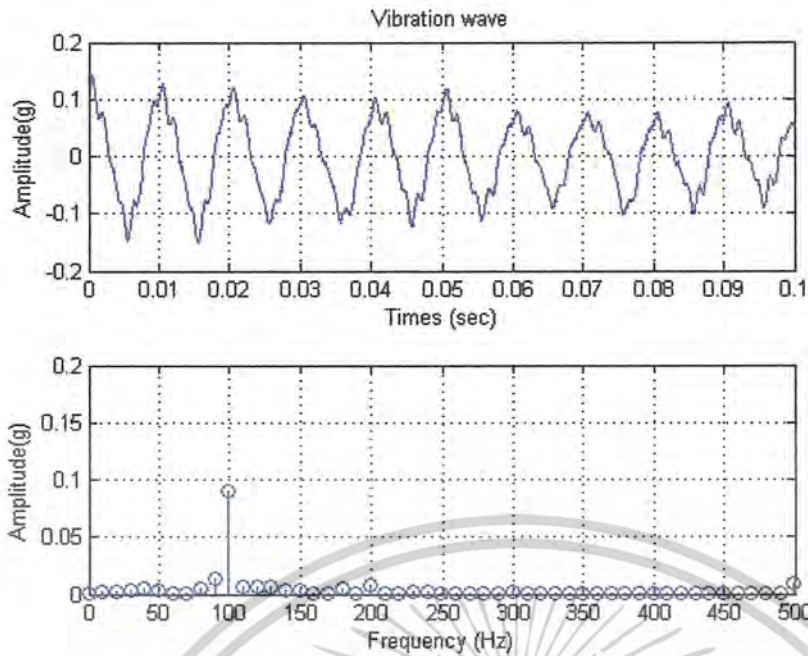


ภาพที่ 8.63 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

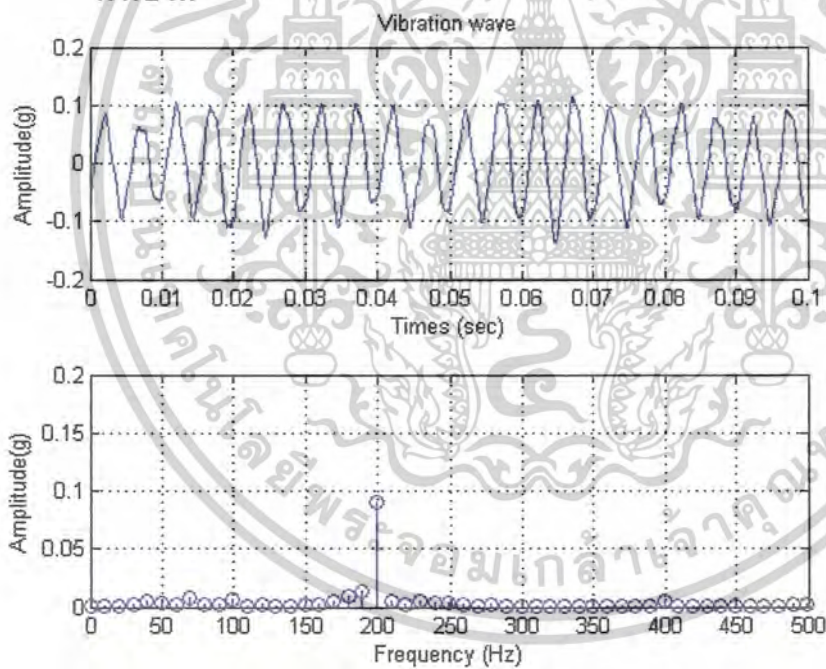


ภาพที่ 8.64 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

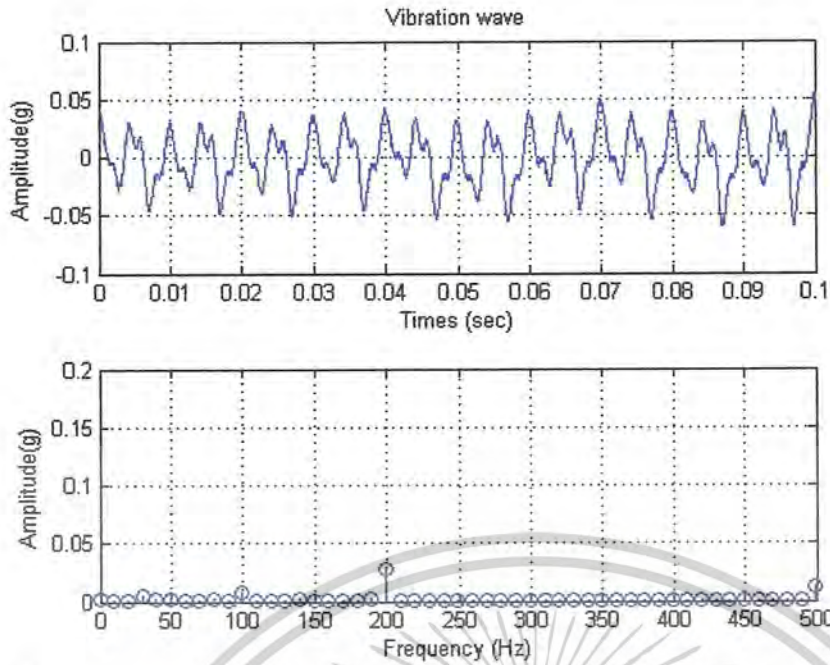


ภาพที่ 8.65 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

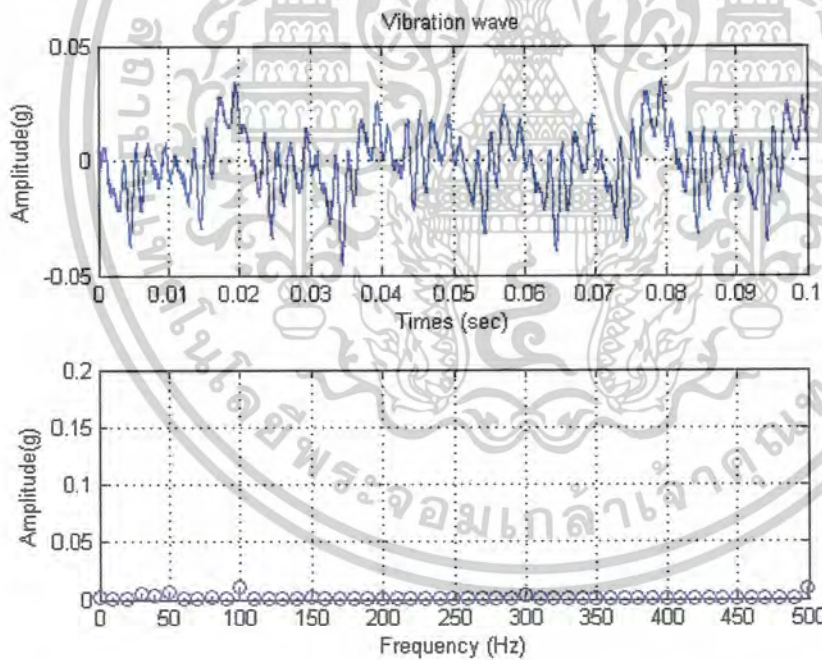


ภาพที่ 8.66 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

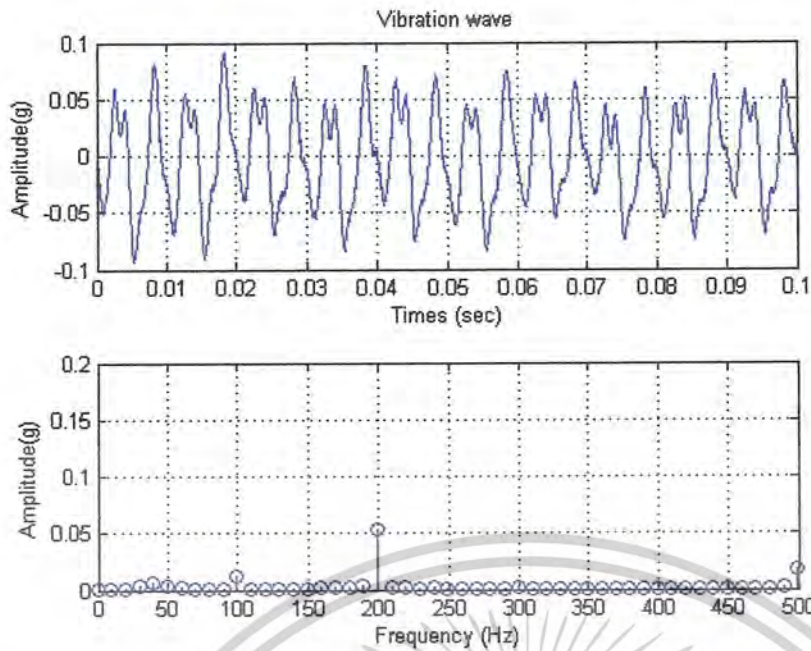


ภาพที่ 8.67 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ขนาดไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

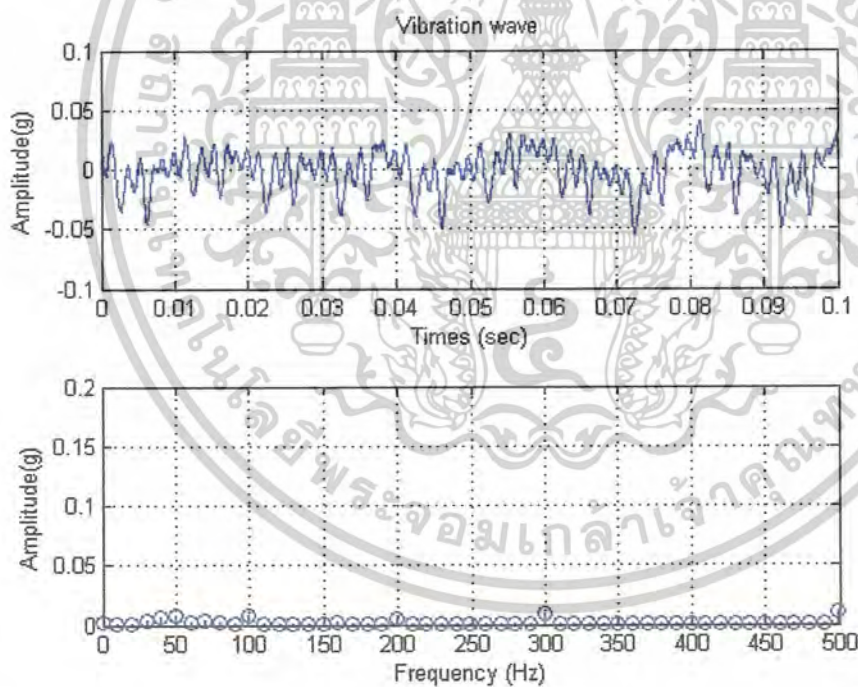


ภาพที่ 8.68 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ขนาดไฟฟ้า 15 เฮอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



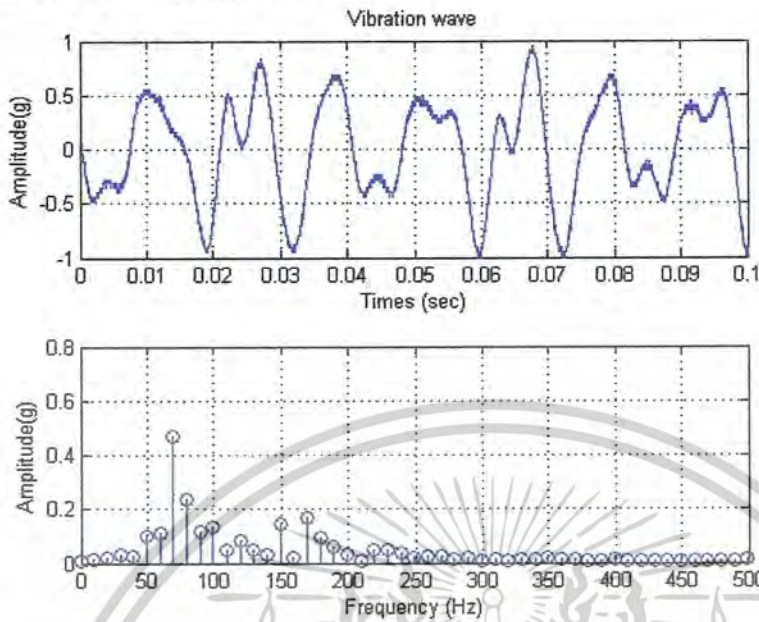
ภาพที่ 8.69 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก



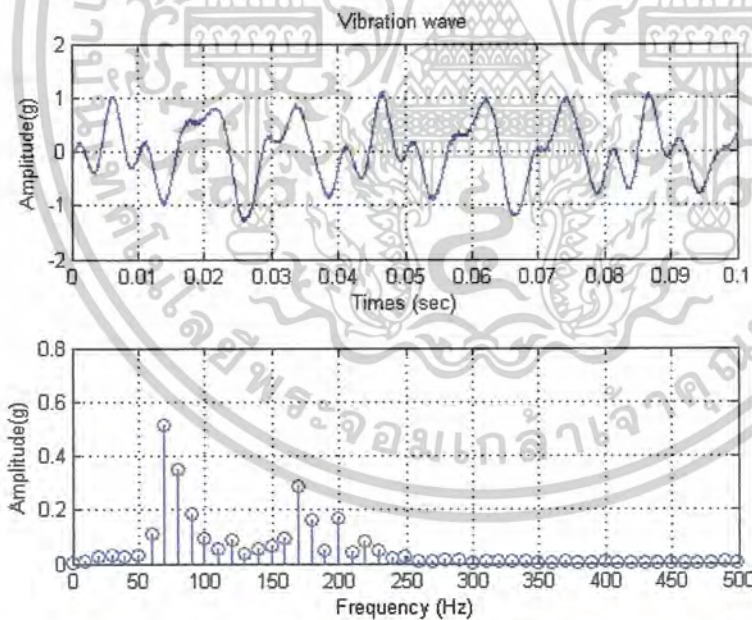
ภาพที่ 8.70 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อได้รับภาระทางกลแบบ Half Load เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

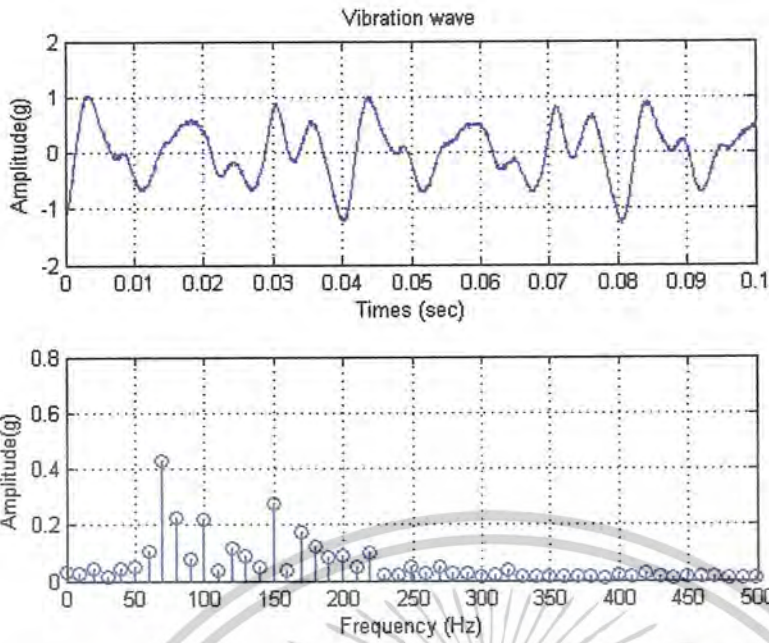


ภาพที่ 8.71 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนสัปดาห์ไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

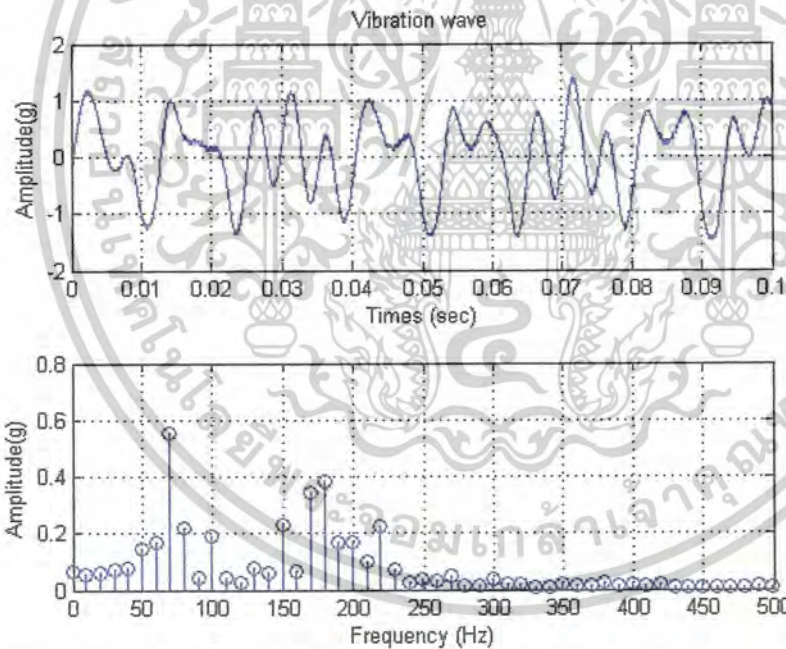


ภาพที่ 8.72 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนสัปดาห์ไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

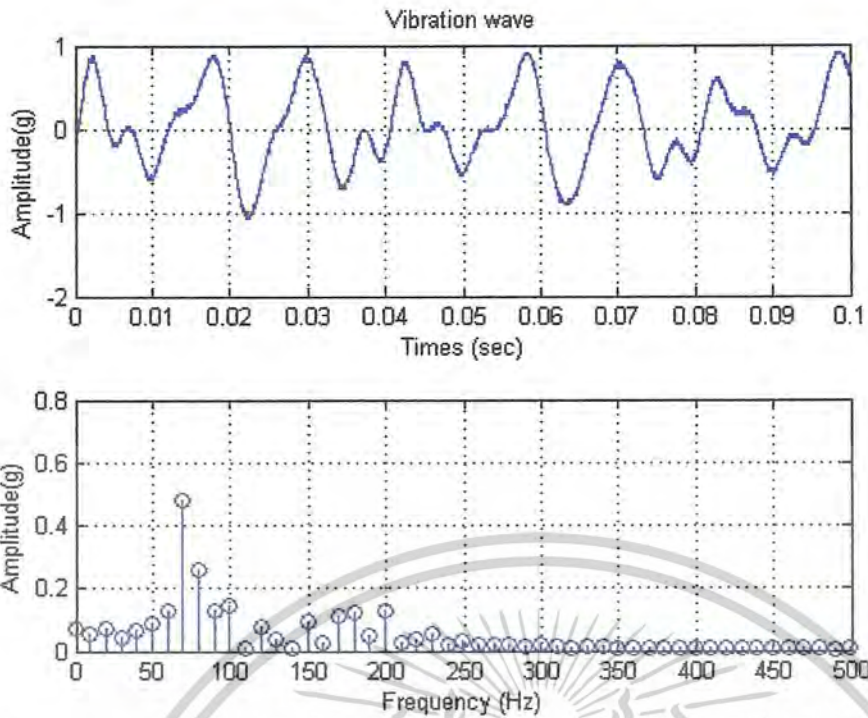


รูปที่ 8.73 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

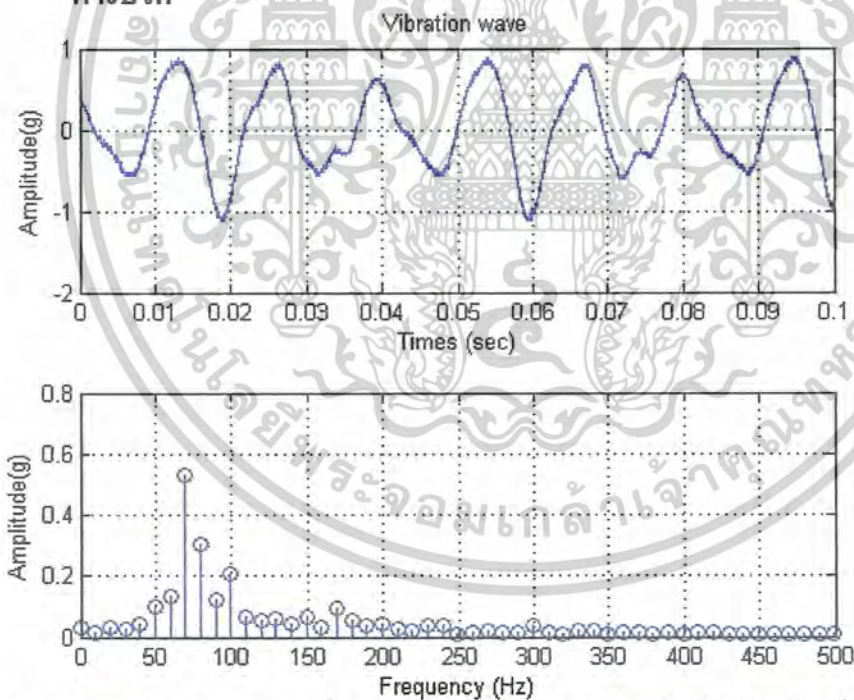


ภาพที่ 8.74 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

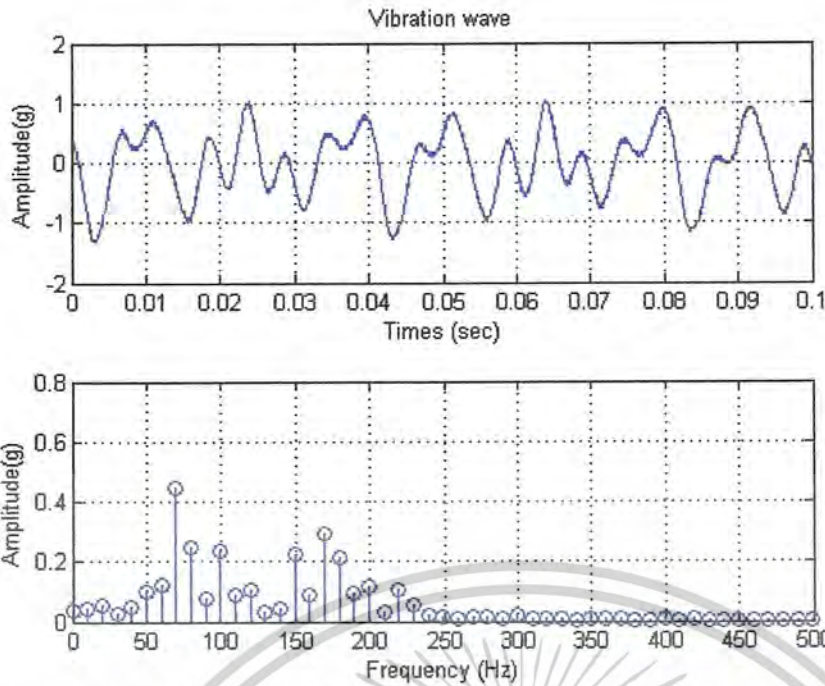


รูปที่ 8.75 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

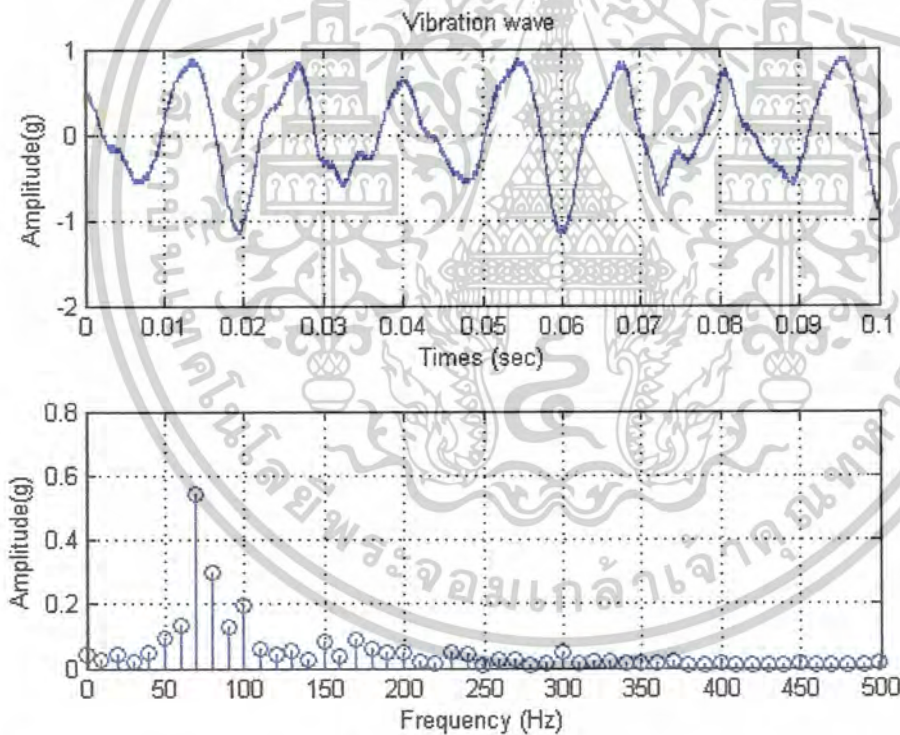


รูปที่ 8.76 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



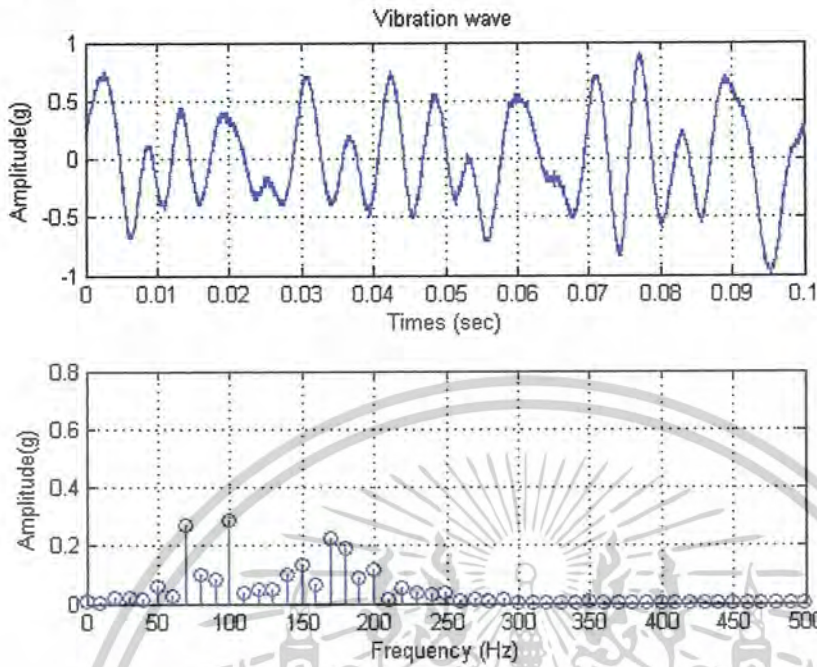
รูปที่ 8.77 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก



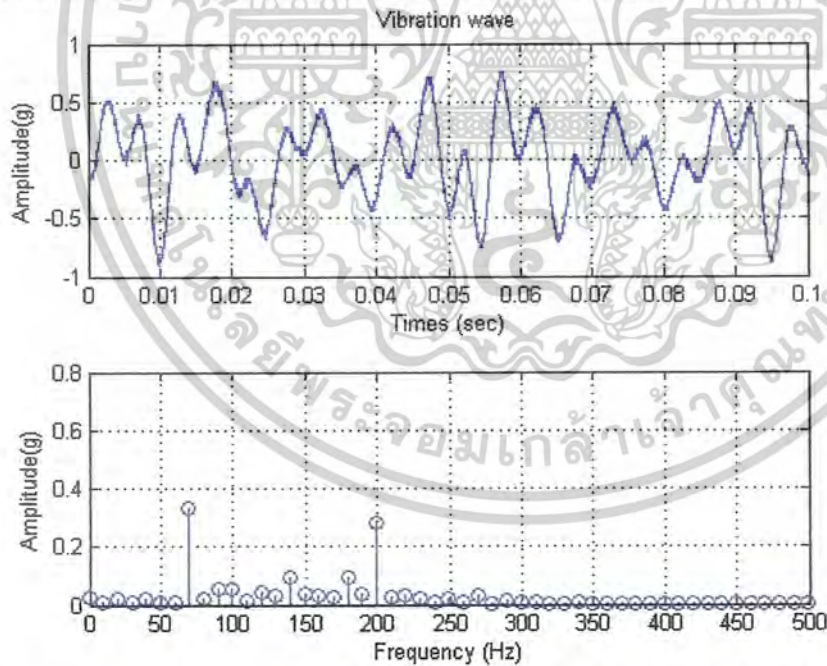
รูปที่ 8.78 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อได้รับภาระทางกลแบบ Full Load เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

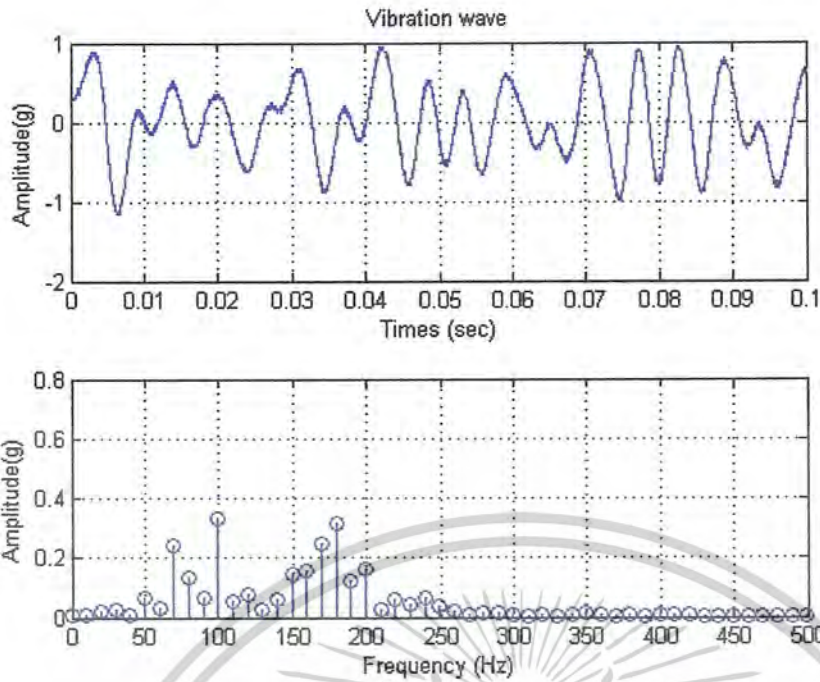


รูปที่ 8.79 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

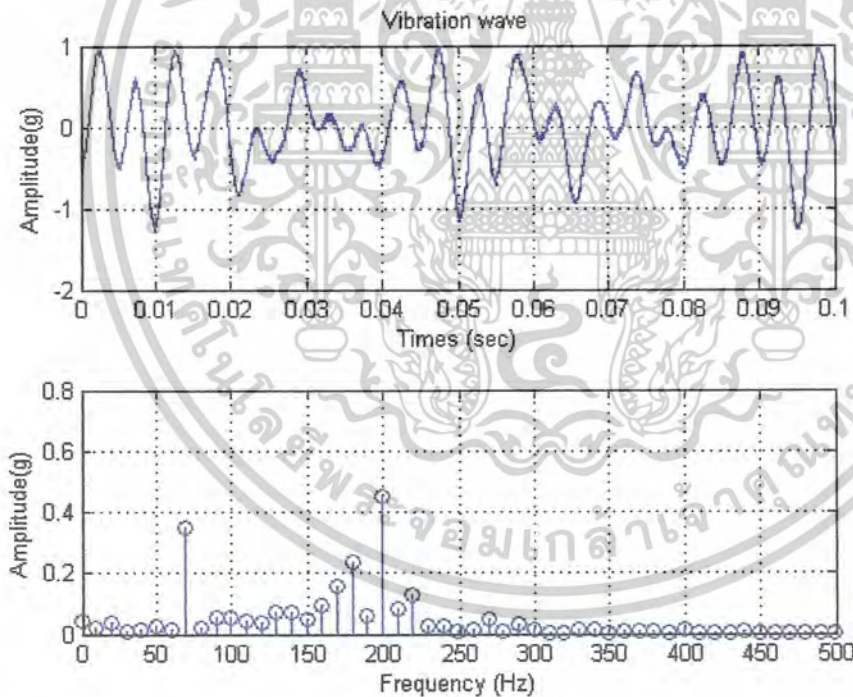


รูปที่ 8.80 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

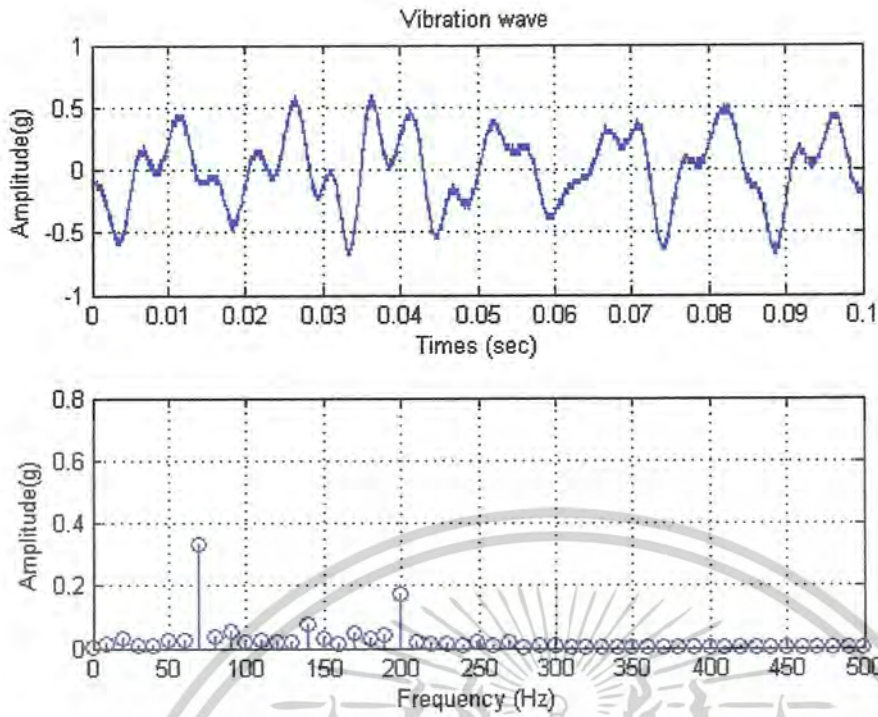


รูปที่ 8.81 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

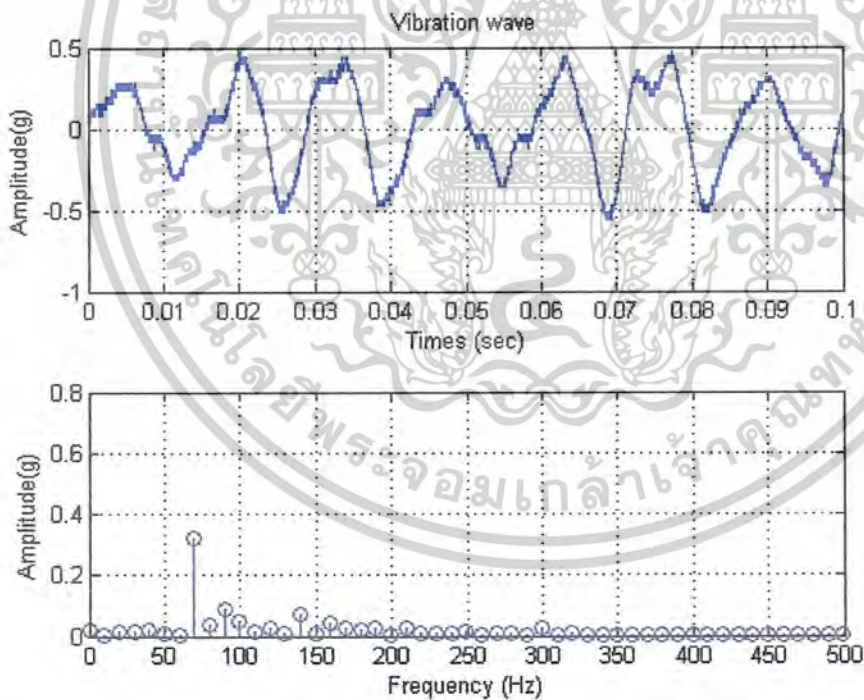


รูปที่ 8.82 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

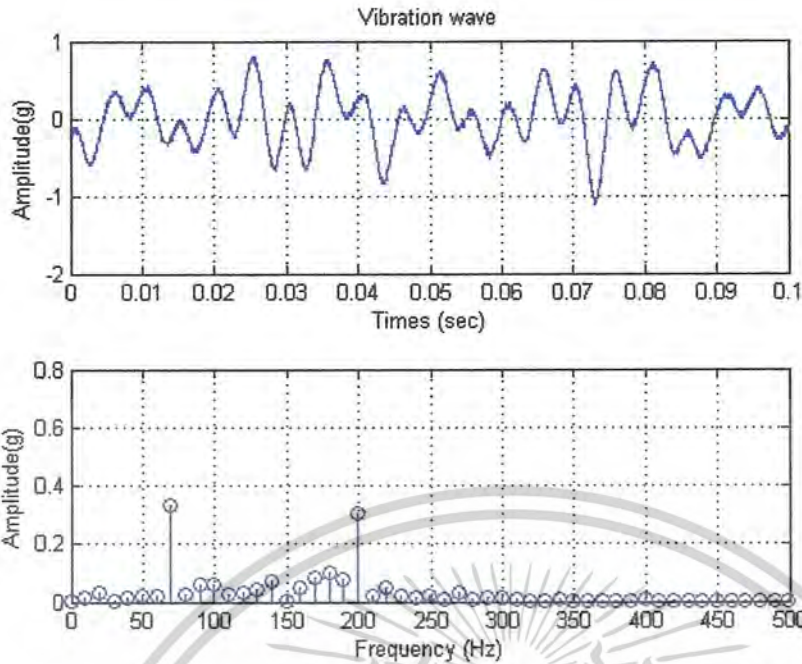


รูปที่ 8.33 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนตกคาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก

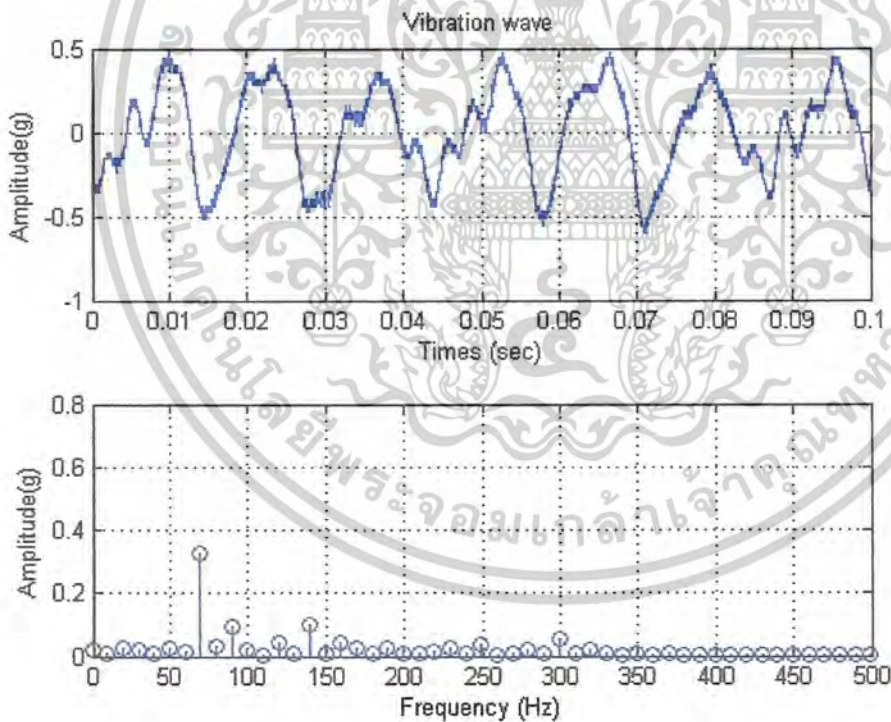


รูปที่ 8.34 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนตกคาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



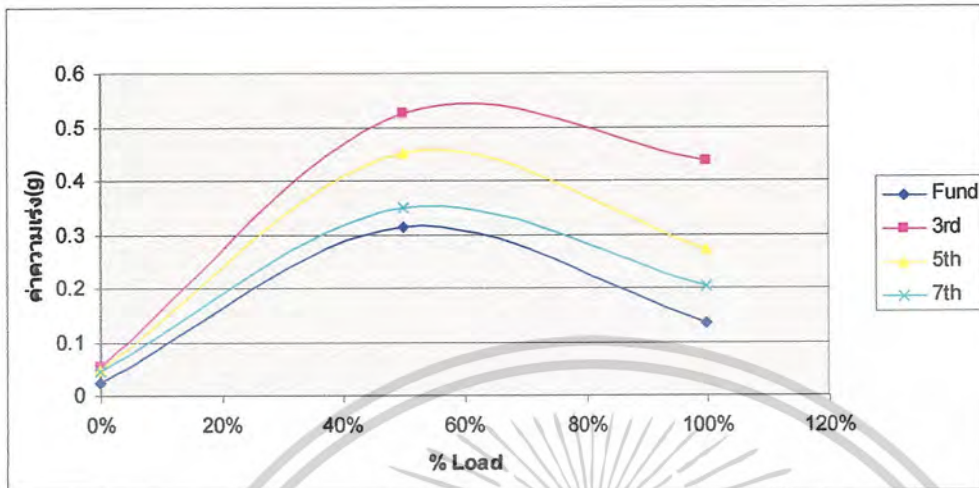
รูปที่ 8.85 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนตักตาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก



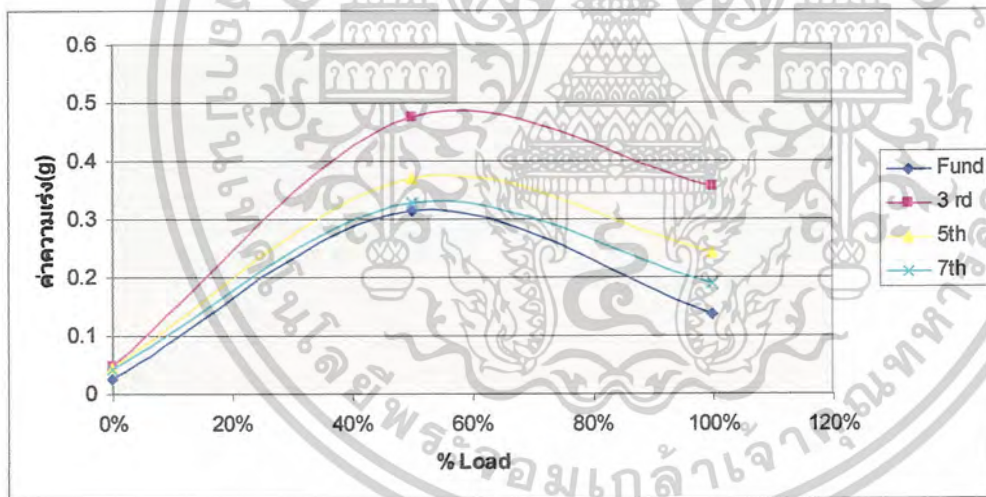
รูปที่ 8.86 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่มีค่าความเพี้ยนตักตาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ค่าความเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ ของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก



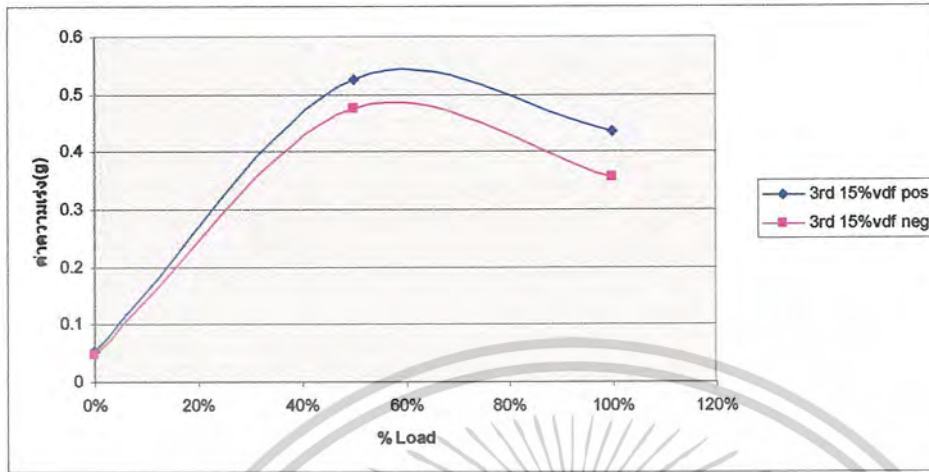
รูปที่ 8.87 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ค่าความเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ ของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก



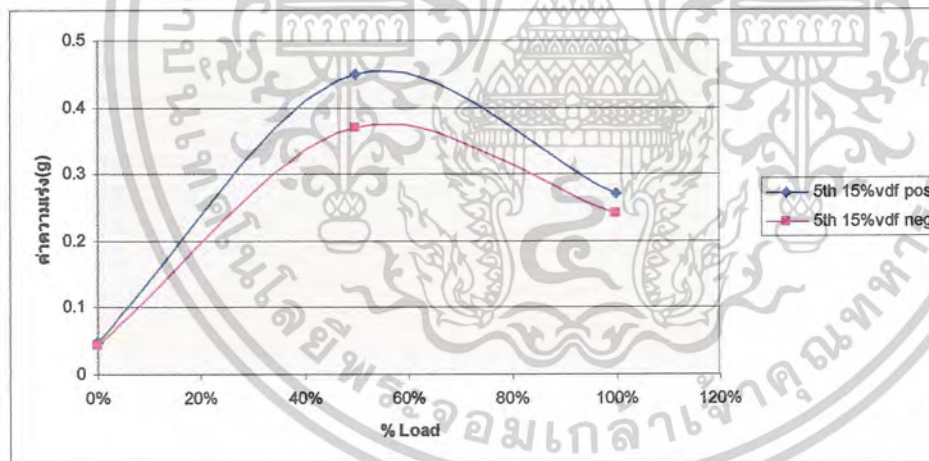
รูปที่ 8.88 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ค่าความเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ ของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ฮาร์มอนิกส์  
อันดับต่าง ๆ ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ

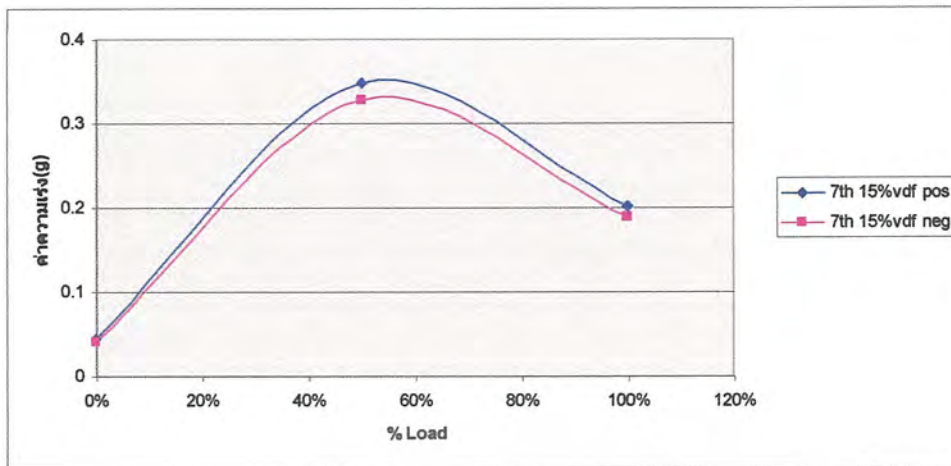


รูปที่ 8.89 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ฮาร์มอนิกส์  
อันดับที่ 3 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ



รูปที่ 8.90 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ฮาร์มอนิกส์  
อันดับที่ 5 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

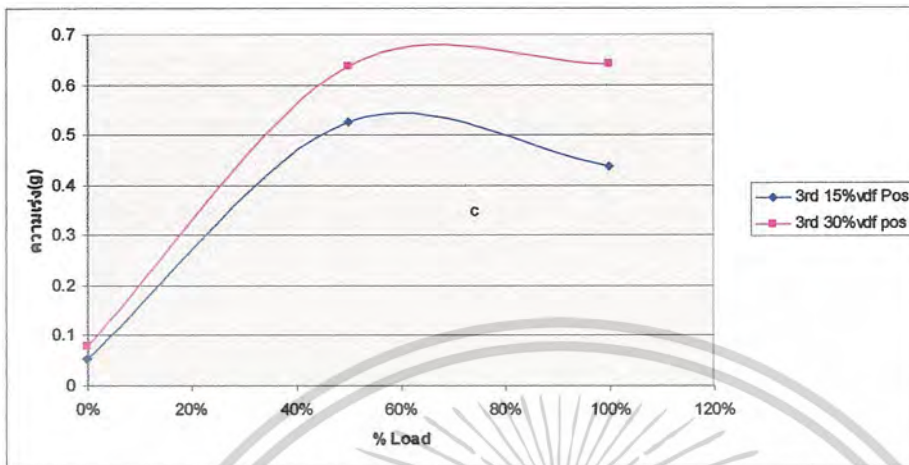


รูปที่ 8.91 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดที่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและแบบลบ

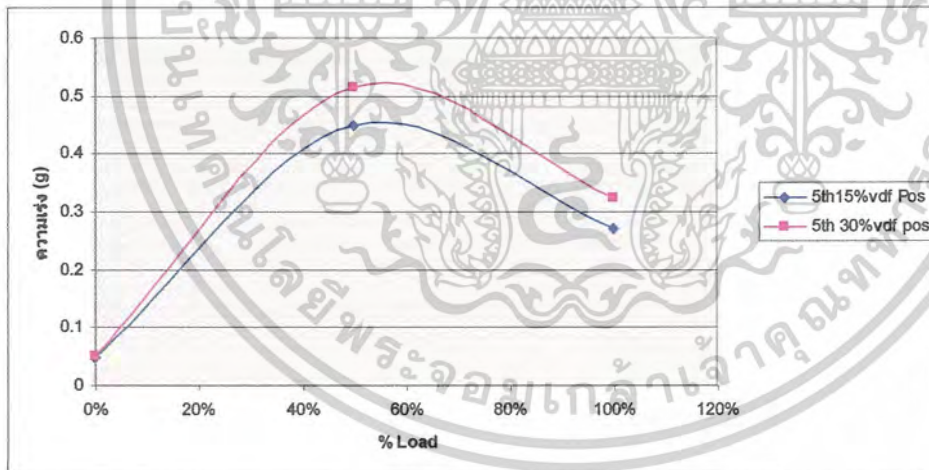


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดของฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่าง ๆ

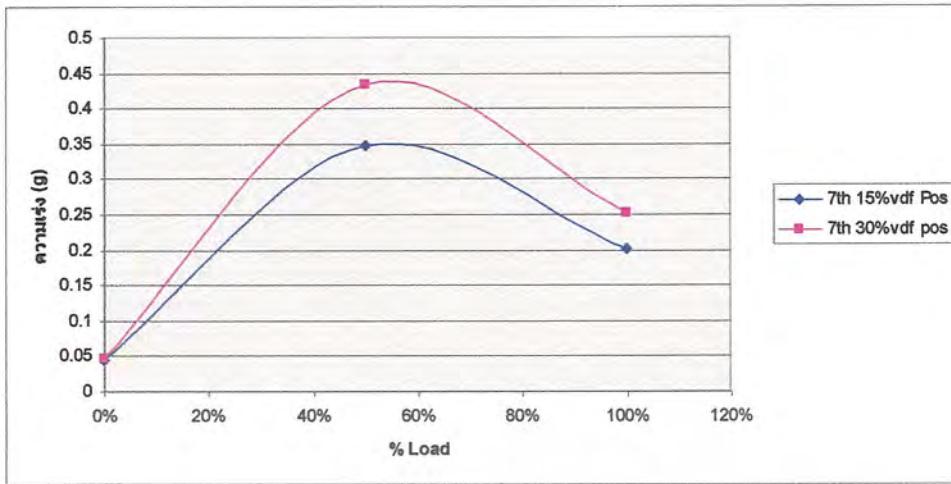


รูปที่ 8.92 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ที่มีค่าความถี่ศูนย์กลางไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก



รูปที่ 8.93 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสั่นสะเทือนกับเปอร์เซ็นต์โหลดของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 ที่มีค่าความถี่ศูนย์กลางไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.94 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการสันสะท้อนกับเปอร์เซ็นต์โหลดของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ที่มีค่าความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์และมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

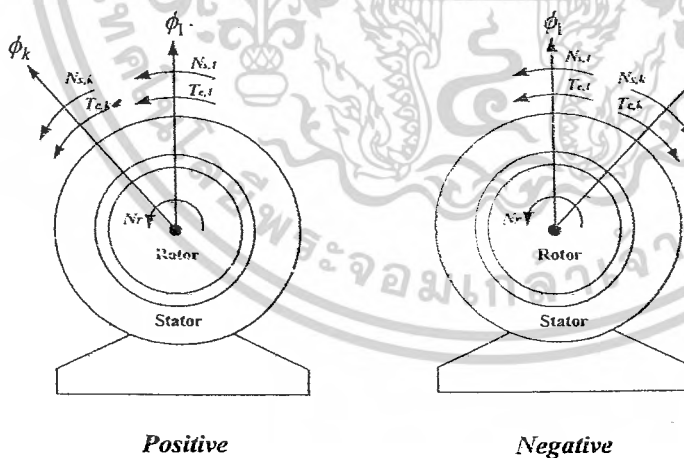
## บทที่ 9

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

จากเทคนิคการสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ตัดคาไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายชนิดนี้สามารถที่นำมาใช้ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้ จะได้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถที่จะสร้างแหล่งจ่ายตัดคาไฟฟ้า ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ได้ตามทฤษฎี ทำให้สามารถทราบว่าจะขนาดและอันดับฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างไร

ในโครงงานฉบับนี้จะส่งเสริมความเข้าใจผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นฮาร์มอนิกส์สามเฟสที่มีการเรียงลำดับในทิศทางบวกและลบเป็นฮาร์มอนิกส์ที่สามารถควบคุมได้เพื่อใช้อ้างอิงกับทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนโดยสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะขึ้นอยู่กับขนาดของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์ และอันดับของฮาร์มอนิกส์อีกทั้งขณะที่มีฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้ามาในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น ก็จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นมา 2 ส่วน คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากความถี่ตัดคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน ( $\phi_1$ ) และฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากความถี่ตัดคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ  $k^{th}$  ฮาร์มอนิกส์ ( $\phi_k$ ) ซึ่งฟลักซ์ส่วนนี้จะก่อให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นมาในแต่ละส่วนทั้งสอง



รูปที่ 9.1 ผลกระทบของ Electromagnetic Torque กรณีจากฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 9.1 กรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวกสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางการหมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจากความถี่มูลฐาน ดังนั้นแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวก ( $T_k, P$ ) นี้จะไปเสริมกับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน ( $T_1$ ) ทำให้ผลของ Electromagnetic Torque ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงขึ้นจากปกติที่ไม่ได้รับฮาร์มอนิกส์

ในทางตรงกันข้าม กรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางการหมุนสวนทางกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กหมุนของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบ ( $T_k, N$ ) นี้ จะไปต้านกับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน ( $T_1$ ) ดังนั้น Electromagnetic Torque ที่เกิดขึ้น จึงมีค่าลดลงจากสภาวะปกติ เมื่อไม่ได้รับฮาร์มอนิกส์

กรณีฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวกนั้น จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสลิปมีค่าลดลงและกรณีที่ฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบนั้นก็จะทำให้ความเร็วรอบมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าของสลิปนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็เป็นผลมาจาก Electromagnetic Torque นั้นเอง

และเมื่อพิจารณาผลของกระแสป้อนเข้าขณะป้อนฮาร์มอนิกส์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะพบว่ามีการเพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้น ซึ่งจากการใช้ทฤษฎีการวางซ้อนในการวิเคราะห์ ทำให้ทราบว่า กระแสป้อนเข้าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ เกิดมาจากแหล่งจ่าย 2 ส่วน คือ กระแสป้อนเข้าที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ( $I_1$ ) และอีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสที่ป้อนเข้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นอันดับ  $k^{\text{th}}$  ฮาร์มอนิกส์ ( $I_k$ ) เกิดมาจากแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (BSRG)

เมื่อพิจารณาที่  $P_{out}$  เดียวกันก็จะเห็นได้ว่า กรณีของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบนั้นจะมีกระแสป้อนเข้าที่สูงกว่ากรณีฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวก เนื่องจากว่าขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบเข้าไปนั้นทำให้ผล Electromagnetic Torque มีค่าลดลง ดังนั้นที่  $P_{out}$  เดียวกัน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องดึงกระแสป้อนเข้าที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ( $I_1$ ) มากขึ้น เพื่อที่จะเพิ่มขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐานให้สูงขึ้น แรงบิดที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ( $T_1$ ) นี้ก็จะเพิ่มขึ้นชดเชยให้กับผลของ Electromagnetic Torque ที่ลดลงเนื่องจากผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบได้ ซึ่งผลของกระแสป้อนเข้าที่สูงขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีลักษณะผลแนวโน้มเดียวกับกระแสที่ป้อนเข้า คือ กรณีฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงกว่ากรณีฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสบวก

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นในกรณีฮาร์มอนิกส์มีอันดับต่ำๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดค่าความ

สูญเสียสูงขึ้น และเมื่อฮาร์โมนิกส์มีอันดับสูงๆ ค่าความสูญเสียจะมีผลน้อย โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าเท่ากัน และผลของการทดสอบในกรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับโหลดภาระทางกล ผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นและค่าประสิทธิภาพจะมีผลกระทบน้อยมาก แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจากฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อฮาร์โมนิกส์มีอันดับที่ต่ำๆใกล้เคียงกับความถี่มูลฐาน และอันดับของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับสูงๆก็จะมีผลกระทบน้อยลงไปตามลำดับ โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าเท่ากัน

### การทดสอบการสันเสเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การทดสอบผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนส์รีลักแตนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งสามารถกำหนดอันดับของฮาร์โมนิกส์ การเรียงลำดับเฟสทั้งในทิศทางบวกและลบเมื่อเทียบกับแรงดันที่ความถี่มูลฐานและขนาดของฮาร์โมนิกส์ เมื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส มีผลทำให้สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์นั้นมีความผิดปกติกจากการจ่ายด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ ซึ่งปกติค่าของสนามแม่เหล็กหมุนจะมีขนาดคงที่ แต่เมื่อมีฮาร์โมนิกส์ปะปนในแรงดันที่ความถี่มูลฐานที่ป้อนเข้าทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเวลา ดังนั้น เมื่อมีขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ทำให้การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทำให้เกิดผลของการสันเสเทือนขึ้นซึ่งจะทำการวิเคราะห์ออกมาเป็น 2 ส่วน คือ ขนาดและความถี่ของการสันเสเทือน

ในการทดสอบเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ความถี่มูลฐานโดยมีแรงดันฮาร์โมนิกส์ผสมอยู่ โดยมีฮาร์โมนิกส์อันดับต่างกัน การเรียงลำดับเฟสเทียบกับแรงดันที่ความถี่มูลฐานต่างกัน และขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่ต่างกัน จะส่งผลกระทบที่ต่างกันต่อการทำงานของมอเตอร์ โดยฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำๆ จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงความเป็นรูปคลื่นไซน์มากกว่าการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับสูง ทำให้ผลของการสันมีความรุนแรงมากกว่าผลจากการป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับสูงๆ

ในกรณีการป้อนฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงดันของฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกจะมีทิศทางการหมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐานดังนั้นแรงบิดจะไปเสริมแรงบิดของสนามแม่เหล็กหมุนที่ความถี่มูลฐาน ทำให้ในกรณีนี้ผลของการสันเกิดรุนแรงกว่าที่ป้อนเข้าด้วยฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ ซึ่งทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงดันของฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ จะมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ฮาร์มอนิกส์อันดับเดียวกันและมีการเรียงลำดับเฟสแบบเดียวกัน การเพิ่มขนาดค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (%VDF) ให้สูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงขึ้นด้วย เนื่องจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์ที่มากกว่าส่งผลให้สนามแม่เหล็กหมุนมีการเปลี่ยนแปลงค่ามากขึ้น ดังนั้น จึงเกิดการสั่นสะเทือนที่มากกว่า

ในการทดสอบการสั่นสะเทือนที่เป็นผลมาจากฮาร์มอนิกส์ในสภาวะที่ไม่มีภาระทางกล หลังจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เก็บค่าจากเครื่องมือวัด พบว่า ถ้าทำการป้อนฮาร์มอนิกส์ที่เป็นการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น พบว่าเกิดที่ความถี่ซึ่งเป็นผลต่างของความถี่ของฮาร์มอนิกส์และความถี่มูลฐาน ส่วนเมื่อทำการป้อนฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบ ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของความถี่ฮาร์มอนิกส์และความถี่ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

ในด้านประสิทธิภาพฮาร์มอนิกส์อันดับที่ต่ำกว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าฮาร์มอนิกส์อันดับที่สูงกว่าเนื่องจากเหตุผลทางด้านความเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์ในแรงดันที่ป้อนเข้าซึ่งส่งผลให้สนามแม่เหล็กหมุนไม่คงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเวลามากกว่า ทำให้เกิดความสูญเสียในส่วนต่าง ๆ มากกว่า ที่เห็นได้ชัดเจนคือผลของการสั่นสะเทือนซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีค่ามากในการทดลองที่มีการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำ ๆ ดังนั้น ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแรงดันที่มีฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำ ๆ จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าฮาร์มอนิกส์อันดับสูง ๆ

นอกจากนี้การสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสยังยังมีสาเหตุมาจากการได้รับแรงดันแบบสามเฟสไม่สมดุล เนื่องจากเมื่อจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสซึ่งมีองค์ประกอบสององค์ประกอบซึ่งหมุนในทิศทางบวกและลบ ซึ่งองค์ประกอบที่หมุนในทิศทางลบจะหักล้างกันถ้าแรงดันทั้งสามเฟสสมดุลกัน แต่ในกรณีที่ไม่สมดุลจะเกิดสนามแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำส่วนองค์ประกอบที่หมุนในทิศทางลบนี้ขึ้น ทำให้ผลรวมของสนามแม่เหล็กหมุนไม่คงที่ ส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น

จากทฤษฎี หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ คือผลลัพท์ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่หมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายให้แก่ขดลวดอาร์เมเจอร์ 3 ชุด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟสเป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำโรเตอร์นั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลักและดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการดูดและผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่สมดุล จะทำให้ความหนาแน่นของ

ฟลักซ์แม่เหล็ก (B) มีค่าคงที่ตลอด

แต่เมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุล เช่น เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ขึ้น 10% คือจาก 220 โวลต์ เป็น 242 โวลต์ แต่เฟส B และ C คงที่ที่ 220 โวลต์ ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าเพิ่มขึ้น โดย B แปรผันตาม แรงดัน เมื่อแท่งตัวนำในโรเตอร์หมุนตัดผ่านขดลวดของเฟส A และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดชั่วขณะ( ขณะที่หมุนผ่านขดลวดเฟส A ) จะมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้นเพิ่มขึ้นด้วย จากสมการ

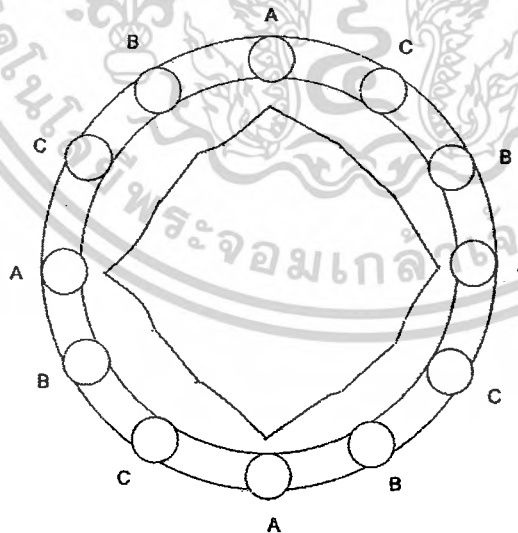
$$F = ILB$$

$$T = Fr = J \frac{d\omega}{dt}$$

และเมื่อโรเตอร์หมุนจากเฟส A ไป B ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะลดลงคือน้อยกว่าเฟส A ก็จะทำให้แรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้นลดลงด้วย

เมื่อเปลี่ยนจากเฟส B ไป C เนื่องจากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าแรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้น (ที่เฟส C) ก็จะมีค่าเท่ากับที่เฟส B

เมื่อเปลี่ยนจากเฟส C ไป A เนื่องจากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น แรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้น (ที่เฟส A) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 9.2 แสดงความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

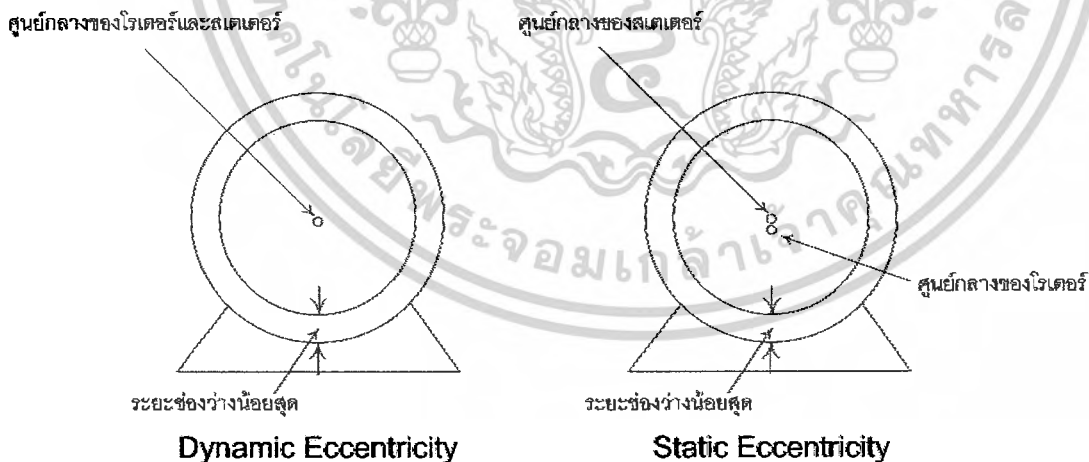
ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านแต่ละเฟสก็จะเกิดการกระเพื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์อันเนื่องมาจากการที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่สมดุล

กรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Under voltage จะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่มีขนาดต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Over Voltage กว่า ส่งผลให้ค่าการสั่นสะเทือนในกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Under Voltage กว่ามีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Over Voltage

เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแรงดันเฟสไม่สมดุลจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็กหมุนที่ไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Under voltage และกรณีแรงดันเฟสไม่สมดุลแบบ Over Voltage

การสั่นสะเทือนที่เป็นผลมาจากแรงดันไม่สมดุลในสภาวะที่ไม่มีภาระทางกล จะเกิดที่ความถี่ 100 Hz หรือ 2 เท่าของความถี่มูลฐาน (twice line frequency) เนื่องจากเมื่อทำการป้อนแรงดันไม่สมดุลจะทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ครั้งต่อหนึ่งรอบของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่หมุนตัดช่องอากาศเนื่องมาจากขดลวดทั้งบนสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าประมาณ 25 Hz เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ครั้ง ทำให้ความถี่ของการสั่นสะเทือนมีค่าเป็น 100 Hz

ในการสั่นสะเทือนก็ต้องมีตัวกำเนิดแรงสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนทางไฟฟ้าก็จะได้จากสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งตัวที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนก็จะเกิดจากความไม่สมบรูณ์ของเครื่องจักรในกรณีนี้ยกตัวอย่างเช่น การไม่ได้ศูนย์กลางระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เรียกว่า Eccentricity ซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งก็ยังสามารถได้อีก 2 ประเภท คือ Dynamic และ Static ส่วนใหญ่เกิดจากโรเตอร์เบี้ยว ส่วน Static เกิดจากศูนย์กลางของสเตเตอร์และโรเตอร์ไม่ตรงกัน



ภาพที่ 9.3 แสดงผลกระทบจากการเยื้องศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถแสดงผลของ Eccentricity ทั้ง 2 ประเภทได้จาก Low Frequency ที่ความถี่

$$f_v = (2f \pm f_r)$$

โดยที่  $f_v$  คือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน

$f_r$  คือ ความถี่ในการหมุนของโรเตอร์

เมื่อทำการทดสอบการสั่นสะเทือนเมื่อขับโหลดภาระทางกล ทั้งในกรณีที่ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลและกรณีที่ได้รับฮาร์โมนิกส์ป้อนเข้า ซึ่งจะมีผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการไม่ได้ศูนย์กลางระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ เรียกว่า Eccentricity ทำให้ช่องอากาศไม่สม่ำเสมอตลอดเส้นรอบวงหรือรัศมีมอเตอร์ มีผลให้เส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศไม่สมดุล กระแสที่เหนี่ยวนำขึ้นไม่สมดุล รวมถึงแรงบิดที่เกิดก็ไม่สมดุลด้วย ทำให้เกิดความถี่ที่เรียกว่า Eccentricity frequency (FECC) ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 75 และ 125 Hz และจะมีความถี่ Side band เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจะเกิดอยู่รอบๆ ความถี่ Eccentricity frequency (FECC) ส่วนขนาดขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 75 Hz จะมีขนาดมากกว่าที่ความถี่ 125 Hz เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 75 Hz นั้นเป็นผลมาจากการที่โรเตอร์มีทิศทางการหมุนไปทางเดียวกับทิศของสนามแม่เหล็กหมุน จึงมีผลกระทบที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] สนขยา มุกตาม่วง, สุเทพ แก้วพิณี, อุบล โสมอินทร์, อุทัย วรกำพล. "การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2545.
- [2] รัชต มั่งมีชัย. "การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543.
- [3] จิรภัทร์ อุปถัมภ์. "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมแรงดันและความถี่จากการประเมินค่าขนาดเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547
- [4] จรัส ตั้งวงศ์ชูเกตุ. "การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงาน." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2546
- [5] ชานินทร์ จูนิม. "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบความถี่สลิปเหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพสูง" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2546
- [6] เฉลิมชาติ มานพ. "การคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกส์" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2544
- [7] วีระ ชันยาภิรักษ์. "การทำงานของเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547
- [8] สุนัน หนองเล็ก. "การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้จ็เนติกอัลกอริทึม." วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] จีรวิทย์ เตรียมมานะวงศ์. “เทคนิคการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้องค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกที่แคชเมตริกซ์.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547
- [10] วรชาติ แซ่ก๊ก. “เทคนิคในการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545
- [11] ชลรัตน์ เทววรรณ, พรชัย ยงชนกกาญจนะ, วีระศักดิ์ ทับเทศ. “การศึกษาสาเหตุการสั่นสะเทือนของอินดักชันมอเตอร์โดยเทคนิควัดอัตราเร่ง.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2545
- [12] ธนิต ถาวรฤติการถ, นนทพัทธ์ งามสะอาด, อชาติศย์ สระทองคง. “การศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2548
- [13] รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก, ฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543.
- [14] P.Lumyong and C.Chat-Uthai. “ **Nonsinusoidal Voltage Technique of Source Using the Brushless Synchronous Reluctance Generator.**” IEEE Conference IPEMC 2000, August 2000,pp.887-891
- [15] Finley, W.R.; Hodowanec, M.M.; Holter, W.G. “**An analytical approach to solving motor vibration problems.**” Industrial Applications, IEEE Transactions on Volume 36, Issue 5, Sept.-Oct. 2000 Page(s):1467 - 1480
- [16] A.E. Fitzgerald, Charles Kinsley,Jr., and Stephen D.Umans , **Electrical Machinery** , 6<sup>th</sup> Edition. , Mc Graw Hill , 2003
- [17] IEEE Std 519 – 1992 **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, April 1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



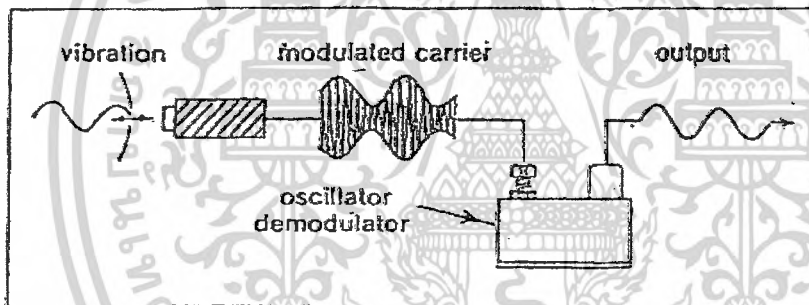
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## หัวตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือน (Transducer)

หัวตรวจวัดทำหน้าที่แปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนของวัตถุเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาขยายบันทึกหรือแสดง และนำผลมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นสะเทือน หัวตรวจวัด แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

**1. หัวตรวจวัดประเภทระยะทาง (Displacement Transducer or Displacement Probe)** เป็นหัวตรวจวัดที่ใช้หลักการ Eddy Current ในการตรวจสอบการสั่นสะเทือนชุด หัวตรวจวัดประเภทนี้ประกอบไปด้วย หัวตรวจวัด สายและ Oscillator/Demodulator หลักการทำงานก็คือ ที่ปลายหัวตรวจวัดประกอบไปด้วยขดลวด ที่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งรับสัญญาณความถี่ประมาณ 1.5 MHz มาจากเครื่อง Oscillator/Demodulator เมื่อนำหัวตรวจวัดไปไว้ใกล้กับสารตัวนำไฟฟ้า เช่น เหล็ก เป็นต้น จะเกิด Eddy Current ไหลผ่านระหว่างสื่อทั้งสองและใช้พลังงานบางส่วนของกระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Oscillator/Demodulator ส่งไปให้หัวตรวจวัดตามภาพที่ ก1 ในลักษณะนี้สัญญาณที่ได้กลับมากจะถูกแปล (Demodulate) กลับออกเป็นคลื่นการสั่นสะเทือนในลักษณะไฟตรง

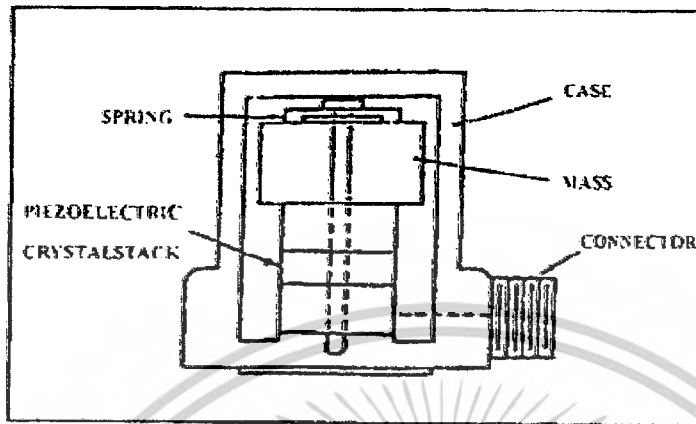


ภาพที่ ก1 การทำงานของหัวตรวจวัดประเภทระยะทาง

**2. หัวตรวจวัดประเภทความเร็ว (Velocity Pickup)** หัวตรวจวัดประเภทนี้ประกอบด้วยขดลวดที่ร่อนนอกและมีแม่เหล็กติดอยู่ตรงกึ่งกลาง ที่ปลายทั้งสองข้างของแม่เหล็กมีสปริงติดอยู่ และระบบลอยในสาร Damping Fluid ซึ่งส่วนมากเป็นสารประเภทน้ำมัน สิ่งวิเคราะห์ จุดประสงค์ของการใช้สปริงและ Damping Fluid ก็เพื่อที่จะออกแบบให้หัวตรวจวัดมีความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุด หลักการทำงานของหัวตรวจวัดประเภทนี้คือ เมื่อนำเอาหัวตรวจวัดไปติดอยู่กับวัตถุที่สั่นสะเทือน แม่เหล็กภายในหัวตรวจวัดจะเคลื่อนที่และก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด เราสามารถนำคลื่นไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ได้

**3. หัวตรวจวัดประเภทความเร่ง (Accelerometer)** หัวตรวจวัดประเภทนี้นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน การทำงานใช้หลักการของ พิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เป็นหลักการเดียวกับ

การทำงานของนาฬิกาควอทซ์ (Quartz) กล่าวคือ ตามธรรมชาติหลัก พิโซอิเล็กทริกจะส่งกระแสไฟฟ้าออกมาเมื่อถูกน้ำหนักกด ดังนั้นถ้านำหัวตรวจวัดไปติดกับวัตถุที่สั่นสะเทือนผลึกพิโซอิเล็กทริกจะถูกกดด้วยน้ำหนักตามภาพที่ ก2



ภาพที่ ก2 ลักษณะโครงสร้างของหัวตรวจวัดประเภทความเร่ง

### เครื่องตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน (Data Collector/Analyzer)

เครื่องตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนมีหลักการทำงานอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ

1. เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนตามจุดที่กำหนดไว้แล้วข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำที่อยู่ในเครื่อง

2. ทำหน้าที่เป็นเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

การทำงานของเครื่องประเภทนี้จะต้องมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากจะต้องมีการส่งผ่านข้อมูลในการติดตั้ง (Set up) อุปกรณ์และจุดตรวจวัดจากฐานข้อมูลในคอมพิวเตอร์

**เครื่องวัดมุมการสั่นสะเทือน (Phase Reference)** การวัดมุม เฟส มาร์ค (Phase Mark) หรือ ทรigger (Trigger) เป็นการสร้างสัญญาณอ้างอิงนั้นเท่าใด โดยการใช้แถบสะท้อนแสงติดที่เพลลาและใช้เทคโคมิเตอร์ (Tachometer) ตรวจวัด สัญญาณที่วัดได้จะถูกป้อนเข้าร่วมวิเคราะห์กับข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือน

เกณฑ์การสั่นสะเทือนมาตรฐานสากล ISO STANDARDS มาตรฐานหมายเลข 2372, 2373 และ 3945 เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในยุโรป และใช้กันมากในส่วนของกาการผลิตและการทดสอบเครื่อง มาตรฐานนี้กำหนดค่าการสั่นสะเทือนที่จะนำมาเปรียบเทียบไว้ว่า

1. จะต้องเป็นค่าการสั่นสะเทือนรวม ประเภทความเร็ว ที่อยู่ในย่านความถี่การวัด 10 – 1000 Hz (600 – 60000 rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ค่าที่วัดจะต้องใช้ระบบ RMS และห้ามทำการวัดในระบบอื่นๆ (เช่น ระบบ Peak เป็นต้น) แล้วนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณเปลี่ยนระบบ ยกเว้นในกรณีที่สัญญาณนั้นๆ มีลักษณะเป็น Pure Sine Wave อย่างเห็นได้ชัด

3.จุดวัดจะต้องเป็นที่โครงสร้างภายนอกที่ใกล้กับตำแหน่งของแบริ่ง (Bearing Cap) ให้มากที่สุด

4.รอบหมุนของเครื่องจักรจะต้องอยู่ในช่วง 10 – 200 Hz (600 – 12000 rpm)

ข้อโต้แย้งเรื่องมาตรฐานนี้ ส่วนมากจะถูกเพ่งประเด็นไปที่ระบบการวัดตามที่ได้กำหนดไว้ ผู้เชี่ยวชาญหลายๆ ท่านเชื่อว่า ระบบ Peak เป็นระบบที่ดีกว่าในการกำหนดเกณฑ์หรือความรุนแรงของปัญหา และชี้ให้เห็นถึงค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดจริง ในขณะที่ด้วยกันผู้เชี่ยวชาญที่สนับสนุนระบบ RMS เป็นระบบที่แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงในระบบการทำงานของเครื่องจักร สัญญาณการสั่นสะเทือนค่าหนึ่งอาจจะมีค่า Peak สูงมากแต่มีค่า RMS ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พลังงานหรือแรงกระทำที่เกิดขึ้นภายในนั้นมีน้อยแต่มีการสั่นสะเทือนสูง ดังนั้น หากต้องการกำหนดเกณฑ์เพื่อทดสอบหาสภาพที่แท้จริงของเครื่องจักรแล้ว ควรทำการตรวจสอบที่ระดับพลังงานหรือแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริงในระบบ

ตารางที่ ก1 แสดงข้อกำหนดของมาตรฐานสากลหมายเลข 2372 ซึ่งแบ่งประเภทของเครื่องจักรออกเป็น 5 ประเภทด้วยกัน คือ

ประเภทที่ 1 (Class I) เครื่องจักรขนาดเล็ก กำลังงานตั้งแต่ 15 kW (20 HP) ลงไป

ประเภทที่ 2 (Class II) เครื่องจักรขนาดกลาง กำลังงาน 15–75 kW (20–100 HP)

ประเภทที่ 3 (Class III) เครื่องจักรขนาดใหญ่ กำลังงาน 75–300 kW (100–400 HP)

ประเภทที่ 4 (Class IV) เครื่องจักรขนาดใหญ่มาก กำลังงานตั้งแต่ 300 kW (400 HP)

ขึ้นไป

ในกรณีข้างต้นนี้ จะต้องเป็นเครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่บนฐานแท่นที่แข็งแรงมั่นคง หากว่าเป็นเครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่บนฐานแท่นที่อ่อนตัวหรือสั่นสะเทือนได้ง่าย เช่น วางอยู่บนฐานสปริงหรือโครงสร้างที่ฐานแท่นสปริงซึ่งยึดติดกับโครงสร้างโรงงานอีกทีหนึ่ง ให้ปรับประเภทเครื่องจักรนี้ขึ้นไปหนึ่งระดับ เป็นประเภทที่ 5 (Class V) เป็นต้น

มาตรฐานสากลนี้ ดูเหมือนว่าจะเป็นมาตรฐานฉบับเดียวที่มีเกณฑ์กำหนดสำหรับเครื่องจักรที่วางอยู่บนแท่นที่อ่อนตัวได้ (Flexible Support) มาตรฐานสากลสองฉบับนี้ ให้คำนิยามเกี่ยวกับฐานแท่นไว้ตามคำนิยามในวิชา Rotor Dynamics ดังนี้

ฐานแท่นที่แข็งแรงมั่นคง (Rigid Support) ฐานแท่นที่มีความถี่ธรรมชาติแรกของโครงสร้างสูงกว่ารอบการทำงานของเครื่องจักร (โดยปกติจะเป็นรอบหมุนของเพลลา) ฐานแท่นที่อ่อนตัวได้ คือ ฐานแท่นที่มีความถี่ธรรมชาติแรกของโครงสร้างต่ำกว่ารอบการทำงานของเครื่องจักร (โดยปกติจะเป็นรอบหมุนของเพลลา)

ตารางที่ ก1 เกณฑ์มาตรฐานสากล ISO 2372

Ranges of radial vibration severity			Quality Judgement for separate class of machine			
Range	CMS velocity		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
	in The Range 10-1000 Hz					
	at the range limits					
	MM/S	IN/SEC				
0.28	0.28	.001				
0.45	0.45	.018	A			
0.71	0.71	.028		A		
1.12	1.12	.044	B		A	
1.8	1.8	.071		B		A
2.8	2.8	.11	C		B	
4.5	4.5	.18		C		B
7.1	7.1	.28	D		C	
11.2	11.2	.44		D		C
18	18	.71			D	
28	28	1.1				D
45	45	1.8				
71	0.28	.001				

MACHINE CLASSES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLASS 1	Small Machines to 20 HP
CLASS 2	Medium Size Machines 20 to 100 HP
CLASS 3	Large Machines 10-200 rev/sec, 400 HP and Larger Mounted on Rigid Support
CLASS 4	Large Machines 10-200 rev/sec, 400 HP and Larger Mounted on Flexible Support

#### ACCEPTANCE CLASSES

A	GOOD	C	UNSATISFACTORY
B	SATISFACTORY	D	UNACCEPTABLE

มาตรฐานสากลนี้ มีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ มรการยอมรับว่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ทำการตรวจวัดอาจมีผลเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของสิ่งแวดล้อมด้วย ซึ่งเกณฑ์ที่กำหนดไว้ข้างต้นนี้ถือว่าให้น่าไปใช้ได้ หากค่าการสั่นสะเทือนรวมของสิ่งแวดล้อมที่ผ่านฐานแท่นเข้ามายังตัวเครื่องจักรน้อยกว่า 1/3 ของค่าสั่นสะเทือนของตัวเครื่องจักรเอง หากค่าการสั่นสะเทือนรวมจากสิ่งแวดล้อมมากกว่า 1/3 แล้ว มาตรฐานไม่มีเกณฑ์ใดๆ กำหนดไว้

มาตรฐานสากลอีกฉบับหนึ่ง คือ ISO 2373 กล่าวถึง เกณฑ์การสั่นสะเทือนสำหรับผู้ผลิตเฉพาะมอเตอร์ใหม่และทำงานโดยไม่มีภาระใดๆ (No Load) โดยแบ่งประเภทของมอเตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภท ตามตารางที่ ก2

#### ตารางที่ ก2 มาตรฐาน ISO 2373

คุณภาพการผลิต	ความเร็ว (RPM)	ระยะจากจุดศูนย์กลางเพลาถึงฐานแท่นของมอเตอร์		
		80-132 mm	132-225 mm	225-400 mm
		ค่าการสั่นสะเทือน	ค่าการสั่นสะเทือน	ค่าการสั่นสะเทือน
ปกติ (Normal)	600-3,600	1.8	2.8	4.5
ดี (Reduced)	600-1,800	0.71	1.12	1.8
	1,800-3,600	1.12	1.8	2.8
พิเศษ (Special)	600-1,000	0.45	0.71	1.12
	1,800-3,600	0.71	1.12	1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## สเปคของหัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer)

Accelerometer ยี่ห้อ Kistler รุ่น 8710A50M8

## ACCELEROMETER CALIBRATION CERTIFICATE

<b>Type</b>	<b>8710A50M8</b>				
<b>Serial Number</b>	<b>2020861</b>				
Time Constant	sec	0.7	Mounted Resonant Frequency	kHz	23.0
Transverse Sensitivity	%	0.6	Mounting Torque	lbf-in	18 ± 2.0
Bias Voltage	V <sub>bc</sub>	12.0		Nm	2.0 ± 0.2

## Reference Specifications

Range	g	± 50	Temp. Range, operating	°C	-195 to 120
Max Range	g	± 300	Output Impedance	Ω	≤100

## Measurements

Frequency Hz	Sensitivity mV/g	Deviation % (ref = 100 Hz)	Frequency Response
20	104.5	-0.3	
50	104.9	-0.0	
100	104.9	0.0	
200	104.9	0.0	
500	104.9	-0.0	
1000	104.9	-0.0	
2000	105.1	0.2	
5000	106.3	1.3	
7000	108.8	3.7	
10000	110.7	5.6	

Sensitivity at 100 Hz, 10.0 g rms	mV/g	104.9	$g = 9.807 \text{ m/s}^2$ 159.2 Hz = 1000 rads/sec	
Sensitivity at 159 Hz, 10.0 g rms	mV/g	104.9		
Environmental Temperature	°C	22 ± 4	Condition	New
Relative Humidity	%	30 ± 30	NIST Test Report Number	822/269338-03
Calibration Date		12/10/2004	Calibrated By:	Paul DeGroodt

This Sensor was calibrated per Kistler Test Procedure 978-5304-701 using comparison technique against a Kistler Working Standard. Kistler Working Standards are periodically calibrated against a Kistler Reference Standard System which in turn is periodically recertified and traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). It is derived from accepted values of natural physical constants according to the International System of Units (SI). Kistler's calibration system meets or exceeds the requirements of MIL-STD-45662A, ANSI/NCSL 2540-1-1994, ISO 9001:2000, and ISO/IEC 17025. Kistler is accredited to ISO/IEC 17025 by ACLASS, Assured Calibration and Laboratory Accreditation Select Services. Certificate numbers are on file at Kistler and may be requested in writing. Estimated uncertainty of this calibration is ±2.2 % with respect to reference standard.

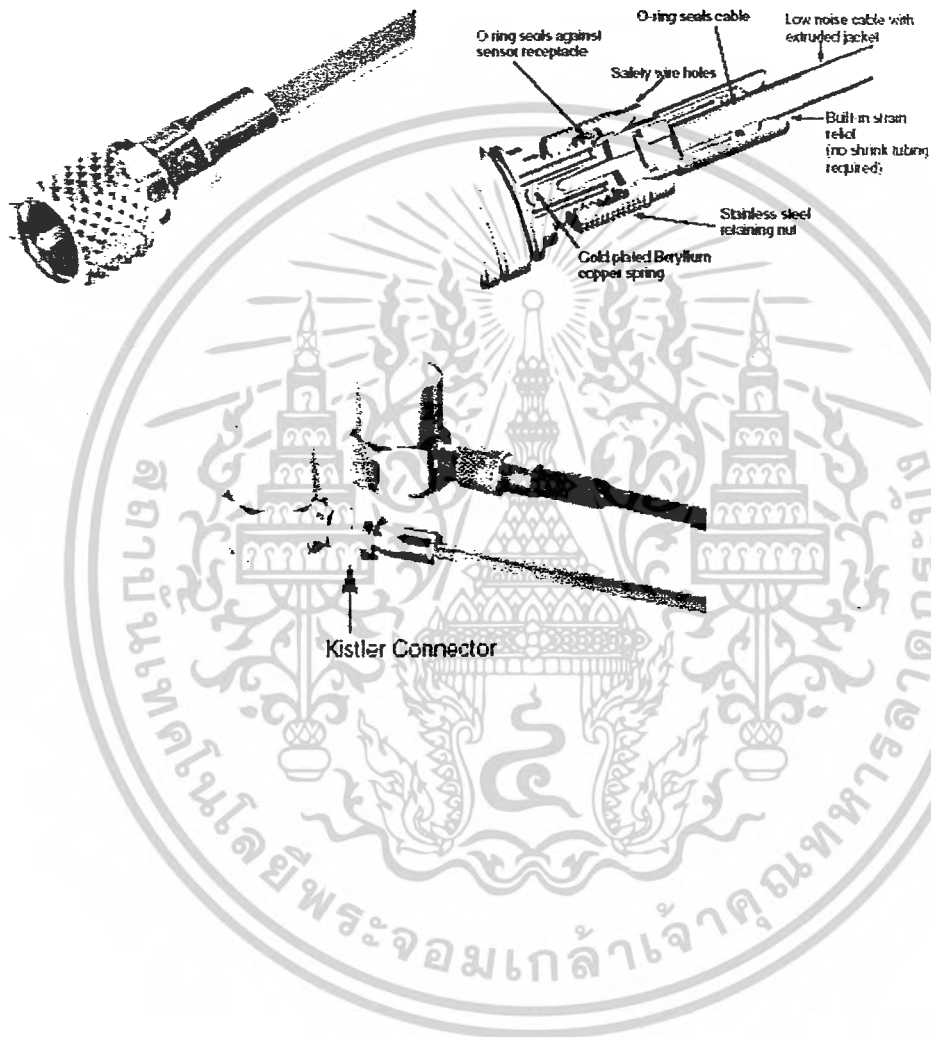
This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval of Kistler Instrument Corporation.

Reference Equipment	Type	Serial Number
Accelerometer (Working Standard)	809K112	C121187
Charge Amplifier (Working Standard)	5020	C31904
Accelerometer (Primary Standard)	8002K	C139113
Charge Amplifier (Primary Standard)	5020	C92253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สเปคของสาย Perfect Cable

สาย Perfect Cable นี้ทำมาจาก Stainless Steel ซึ่งช่วยลดน้ำหนักลง 50% และยังสามารถใช้ได้กับเซนเซอร์ทั้งชนิด Low impedance และ High impedance ซึ่งสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง -295 F (-195 C) ถึง 460 F (24 C)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค.**  
**มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์**

**ค1.มาตรฐานนานาชาติ**

ในการกำหนดมาตรฐานนั้น แต่ละประเทศสามารถกำหนดมาตรฐานของตนได้ เช่น มาตรฐานของประเทศอังกฤษแสดงด้วยย่อ BS (British Standard) มาตรฐานของประเทศเยอรมนีแสดงโดย DIN, ประเทศออสเตรเลียแสดงโดย AS เป็นต้น ซึ่งแต่ละแห่งอาจจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงมาตรฐานที่เป็นมาตรฐานสากลหรือมาตรฐานนานาชาติหรือมาตรฐานชาติใดชาติหนึ่งที่ได้รับการยอมรับเพื่อมาประยุกต์กับประเทศไทย ซึ่งองค์กรที่กำหนดมาตรฐานเหล่านี้ เช่น IEC (International Electrotechnical Commission), IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) เป็นต้น

**ค1.1มาตรฐานหรือข้อกำหนดสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า**

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระดับของความผิดเพี้ยนของกระแสที่เกิดขึ้นจากการทำงานของโหลดทางไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับระบบที่ระบุในมาตรฐานต่างๆ

**ค1.1.1มาตรฐาน IEEE 519-1992**

ในข้อกำหนดหรือ Recommended practices for individual consumers ของ IEEE 519-1992 จะสนใจที่จุดต่อร่วมของระบบ ที่เชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับผู้จ่ายไฟฟ้า (Customer – utility interface) แต่จะไม่รวมถึงระบบ High-voltage direct current (HVDC) และระบบ Static Var control (SVC) ซึ่งดูแลและดำเนินการโดยผู้ผลิตและจ่ายไฟฟ้าเอง

ระบบในอุดมคติอาจเป็นไปได้ ถ้าสามารถควบคุมฮาร์มอนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากการทำงานของโหลดไม่ให้มีปรากฏอยู่ที่ส่วนใด ๆ ในระบบไฟฟ้า ไม่ว่าจะส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง ส่วนของผู้ผลิต รวมถึงถึงส่วนของผู้ใช้ไฟอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และความสามารถในการควบคุมฮาร์มอนิกส์ควรต้องสมดุลง และบางฮาร์มอนิกส์ก็เกิดขึ้นก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ที่บางจุดในระบบ ดังนั้นข้อกำหนดที่ระบุในที่นี้มุ่งหวังเพื่อลดผลของฮาร์มอนิกส์ที่จุดต่างๆ ของระบบ โดยกำหนดขีดจำกัดของฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ของทั้งกระแสและแรงดันที่จุด PCC จุดเพื่อการวัด หรือจุดใดๆ ควบคู่กันที่ผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถที่จะเข้าถึงเพื่อการวัดฮาร์มอนิกส์ได้โดยตรงหรือสามารถประมาณค่าดัชนีฮาร์มอนิกส์ที่จุดของการเชื่อมต่อ (Point of interface, POI) ตามวิธีการที่เป็นที่ยอมรับ ในระบบอุตสาหกรรม PCC จะหมายถึงจุดต่อระหว่างโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับโหลดที่เป็นเชิงเส้น

ดัชนีที่ดีของฮาร์มอนิกส์กำหนดได้โดยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1.ค่าที่กำหนดโดยดัชนีฮาร์มอนิกส์ (Harmonic indices) ควรเป็นค่าที่มีความหมายอย่างแท้จริงและสัมพันธ์กันกับผลกระทบที่เกิดเนื่องจากฮาร์มอนิกส์อย่างปรากฏได้ชัดเจน
- 2.จะต้องเป็นไปได้สำหรับการวัดไม่ว่าจะเกินขีดจำกัดของดัชนีฮาร์มอนิกส์หรือไม่ก็ตาม

3.ดัชนีฮาร์โมนิกส์ควรจะง่ายและสามารถปฏิบัติได้ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง

ข้อแนะนำของดัชนีฮาร์โมนิกส์คือ

1.Depth of notches, total notch area and distortion (RSS) of bus voltage distorted by commutation notched (low-voltage systems)

2.ความผิดเพี้ยนของแรงดันแต่ละลำดับ และความผิดเพี้ยนโดยรวม

3.ความผิดเพี้ยนของกระแสแต่ละลำดับ และความผิดเพี้ยนโดยรวม

เมื่อได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดแล้วอาจจะยังไม่สามารถป้องกันปัญหาจากฮาร์โมนิกส์ได้ทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเข้าไปใกล้ถึงจุดจำกัด เนื่องจากระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นต้องมีการพิจารณาใหม่โดยที่การวัดฮาร์โมนิกส์ต้องทำเป็นช่วง ๆ เพื่อดูพฤติกรรมและประสิทธิภาพของระบบ ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องแน่ใจว่า

1.ตัวเก็บประจุที่ต่อเพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลัง หรือเพื่อกรองฮาร์โมนิกส์จะไม่เกิดความเครียดเกินจากฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มมากขึ้น

2.จะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมหรือขนาน

3.ระดับของฮาร์โมนิกส์ที่จุด PCC หรือจุดที่จะต่อใช้งานไม่เกินระดับที่กำหนด

#### ค1.1.1.1 การพัฒนาขีดจำกัดของความผิดเพี้ยนกระแส

ปรัชญาของการกำหนดขีดจำกัดของกระแสในข้อกำหนดนี้คือ

1.ขีดจำกัดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายจะต้องไม่เป็นเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้สำหรับคุณสมบัติโดยทั่วไปของระบบไฟฟ้า (Normal system characteristic)

2.ขีดจำกัดของความผิดเพี้ยนโดยรวมของแรงดันในระบบที่จ่ายโดยผู้ผลิตไฟฟ้า

#### ค1.1.1.2 ขีดจำกัดของ commutation notches

ความลึกของ Notch ค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์โดยรวม และพื้นที่ notch ของสายแรงดันสายที่จุดต่อร่วมควรถูกจำกัดดังตารางที่ ค1-1 โดย notch area แสดงดังภาพที่ ค1-1

### ตารางที่ ค1-1 Low Voltage System Classification and Distribution Limits

	Special Application <sup>*</sup>	General System	Dedicated System <sup>**</sup>
Notch Dept	10 %	20%	50%
THD (Voltage)	3%	5%	10%
Notch Area ( $A_n$ ) <sup>***</sup>	164000	22800	36500

Note: The value  $A_n$  for other than 480V systems should be multiplied by  $V/480$

\* Special applications include hospitals and airports.

\*\* A dedicated systems exclusively dedicated to the converter load.

\*\*\* In volt-microseconds at rated voltage and current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

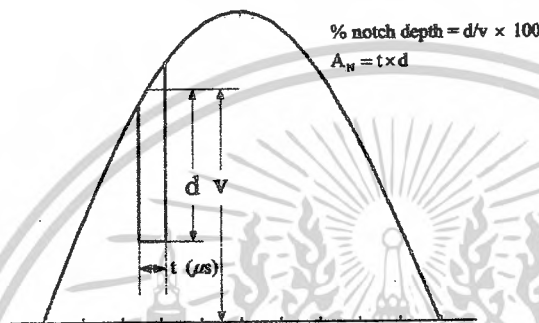
ระดับที่จำกัดนี้แนะนำให้ใช้สำหรับระบบแรงดันต่ำ (low-voltage system) ที่ซึ่งพื้นที่ Notch สามารถวัดได้โดยง่ายด้วยออสซิลโลสโคป จะสังเกตได้ว่าแฟคเตอร์ของความผิดเพี้ยนของแรงดันสัมพันธ์กับพื้นที่รวมของ notch,  $A_N$  ดังสมการ

$$A_N = V_N t_N$$

เมื่อ  $A_N$  = notch area, in volt-microsecond

$V_N$  = notch depth, in volts (line to line), of the deeper notch of the group

$t_N$  = width of notch, in microsecond



ภาพที่ ค1-1 การกำหนด notch depth และ notch area

#### ค1.1.1.3 ขีดจำกัดของความผิดเพี้ยนกระแส

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกที่เกิดจากผู้ใช้ไฟรายใดรายหนึ่งควรจะถูกจำกัดที่ระดับที่ยอมรับได้ที่จุดใช้งานใดๆในระบบ และระบบทั้งหมดควรจะต้องสามารถทำงานได้โดยปราศจาก substantial (very large in amount or degree) ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกในที่ตั้งต่างๆ ของระบบ ระดับที่จำกัดของฮาร์โมนิกในข้อกำหนดนี้ ระบุค่าสูงสุดของกระแสผิดเพี้ยนที่ยอมให้สำหรับผู้ใช้อุปกรณ์หนึ่งๆ ค่าจำกัดที่ระบุจะเกี่ยวข้องกับดัชนี ที่เรียกว่า Total Demand Distortion (TDD)

Total Demand Distortion : The total root sum square (RSS) harmonic current distortion, in percent of maximum demand load current (15 or 30 min demand)

ขีดจำกัดที่แสดงดังตารางที่ ค1-2, ค1-3 และ ค1-4 ควรใช้เป็นค่าสำหรับออกแบบระบบในกรณีที่ไม่มีมากที่สุด (Worst case) สำหรับการงานปกติ (สภาวะเมื่อระบบทำงานนานกว่าหนึ่งชั่วโมงไปแล้ว) สำหรับการงานในช่วงสั้น หรือเมื่อระบบเริ่มทำงาน หรือการทำงานในสภาวะไม่ปกติ ขีดจำกัดนี้อาจให้ได้มากกว่า 50%

**ตารางที่ ค1-2 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120V Through 69000V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20°	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the load harmonic limit above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

**ตารางที่ ค1-3 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (69001V Through 161000V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20°	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the load harmonic limit above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค1-4 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (>161 kV),  
Dispersed Generation and Cogeneration**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_h/I_L$	$<11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
$< 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the load harmonic limit above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

**ค1.1.2 มาตรฐาน Engineering recommendation G.5/3**

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานของประเทศสหราชอาณาจักร ซึ่งข้อกำหนดนี้ได้กำหนดแนวทางและขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จะไหลเข้าไปยังระบบส่งจ่ายไฟฟ้าโดยอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ทั้งที่แรงดันต่ำและแรงดันสูง และยังจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าว

วิธีการของข้อกำหนดนี้จะพิจารณาถึงโหลดที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นที่มาต่อกับระบบไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็นกลุ่ม (stage) ซึ่งขึ้นกับขนาดและชนิดของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นๆ กลุ่มแรก (stage 1) จะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ขนาดเล็กๆ ที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป และระบุนขนาดสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์หรือ เอช เร็กกูเลเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปยอมรับสำหรับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดัน 0.415, 6.6 หรือ 11 kV โดยไม่พิจารณาถึงรายละเอียดของอุปกรณ์นั้นๆ นอกจากการพิจารณาสถานะปกติที่ใช้กับโหลดชนิดใหม่ๆ เช่นอัตราความร้อนของวงจรหรือการคงค่าแรงดัน

ถ้าอุปกรณ์มีขนาดเกินขีดจำกัดที่อยู่ในกลุ่มหนึ่ง ก็จะถูกพิจารณาให้จัดอยู่ในกลุ่มสอง (stage 2) ขีดจำกัดจะเป็นขนาดสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าอาจจะฉีดเข้าไปในระบบที่จุดต่อร่วม โดยกำหนดขนาดของกระแสแต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์ และขนาดของความผิดเพี้ยนของแรงดันก่อนที่จะต่อโหลดเข้ากับระบบ

และถ้าอุปกรณ์ไม่สามารถจัดอยู่ในข้อจำกัดกลุ่มสองเพราะว่าขนาดหรือระดับของกระแสฮาร์มอนิกส์หรือระดับของแรงดันฮาร์มอนิกส์เกินกว่าที่กำหนด ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านั้นจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสาม (stage 3) ซึ่งในกลุ่มสามนี้จะมีปฏิบัติต่างๆ ประกอบด้วยค่าแรงดันผิดเพี้ยนซึ่งพิจารณาร่วมกันกับคุณลักษณะสมบัติของโหลด และระดับความผิดเพี้ยนเดิมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในระบบ รายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด G.5/3 ดูได้จากเอกสารฉบับเต็ม ตัวอย่างของขีดจำกัดของแต่ละกลุ่มแสดงดังตารางที่ ค1-5,ค1-6 และ ค1-7

#### ค1.1.2.1 ขีดจำกัด Stage 1

ตัวอย่างของข้อกำหนดสำหรับกลุ่มนี้เช่น ถ้าเป็นอุปกรณ์ 3 เฟส ขนาดสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์หรือ เอซีเร็กกูเลเตอร์แต่ละตัวที่อาจต่อเข้ากับระบบแรงดันไฟฟ้า 0.415, 6.6 หรือ 11 kV โดยที่ผู้จำหน่ายไฟฟ้าไม่ต้องพิจารณาถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ว่ากำเนิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นมาเท่าใด ข้อกำหนดนี้แสดงดังตารางที่ ค1-5

ตารางที่ ค1-5 Maximum sizes of individual converter and A.C. regulator equipment under stage 1 limits

Supply System Voltage (kV) at Point of Common Coupling	3-Phase Convertors			3-Phase A.C. Regulators	
	3-Pulse (kVA)	6-Pulse (KVA)	12-Pulse (kVA)	6-Thyristor (kVA)	12-Thyristor/ 3-Diode (kVA)
0.415	8	12	-	14	10
6.6 and 11	85	130	250*	150	100

\* This limit applies to 12-pulse devices, and to combination of 6-pulse devices always operated as 12-pulse devices, employing careful control of the firing angles and the d.c. ripple to minimise non-characteristic harmonics, eg 3<sup>rd</sup> and 7<sup>th</sup>

#### ค1.1.2.2 ขีดจำกัด Stage 2

- ถ้าอุปกรณ์ 3 เฟสที่มีขนาดสูงเกินกว่าที่ระบุไว้ในกลุ่มหนึ่ง อาจจัดให้อยู่ในกลุ่มสองได้ถ้า
- (1) การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดของผู้ใช้ไฟฟ้าไม่กำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เฟสใดๆ ที่จุดต่อรวม เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 1-6
  - (2) ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันที่มีอยู่ที่จุดต่อรวมก่อนที่จะต่ออุปกรณ์ใหม่เข้าไปต้องไม่เกิน 75% ของค่าที่ระบุในตารางที่ 1-7
  - (3) ค่ากระแสลัดวงจรของระบบต้องมีค่าเหมาะสมไม่ต่ำจนเกินไป

**ตารางที่ ค1-6 PERMITTED HARMONIC CURRENTS FOR ANY ONE CONSUMER AT POINT OF COMMON COUPLING UNDER STAGE 2 LIMITS**

Supply system voltage (kV) at PCC	Harmonic Number and Current (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
6.6 and 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	1	1		
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

\* : A tolerance of +10% or 0.5 A (whichever is the greater) is permissible, provided it applies to not more than two harmonics.

**ตารางที่ ค1-7 HARMONIC VOLTAGE DISTORTION LIMITS AT ANY POINT ON THE SYSTEM (INCLUDING BACKGROUND LEVELS)**

Supply System Voltage (kV) at Point of Common Coupling	Total Harmonic Voltage Distortion $V_T$ (%)	Individual Harmonic Voltage Distortion (%)	
		Odd	Even
0.415	5	4	2
6.6 and 11	4	3	1.75
33 and 66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

**ค1.1.2.3 ขีดจำกัด Stage 3**

เมื่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่เข้ากลุ่มข้อกำหนดในตารางที่ ค1-6 และ/หรือแรงดันผิดเพี้ยนที่จุดต่อรวมเกินกว่า 75% ของข้อกำหนดในตารางที่ ค1-7 อุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงสามารถถูกต้องเข้ากับระบบได้ หลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรายละเอียดของสภาวะของกระแสฮาร์โมนิกส์และแรงดันที่มีผลมาจากการต่อโหลดเข้าไปใหม่ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจวัดที่จุดต่างๆ ในระบบแล้วความผิดเพี้ยนต้องไม่เกินจากที่กำหนดในตารางที่ ค1-7

รายละเอียดต่างๆของข้อกำหนดต้องหาจาก ENGINEERING RECOMMENDATION G.5/3 1976 : LIMITS FOR HARMONICS IN THE UNITED KINGDOM ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค1.1.3 มาตรฐาน IEC 61000-3-2

มาตรฐาน IEC 61000-3-2 Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits- Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase) มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับที่จำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะเกิดขึ้นจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าระดับรบกวนฮาร์โมนิกส์นี้จะไม่ทำให้ระดับของความผิดเพี้ยนแรงดันไม่เกินระดับที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 61000-2-2

#### ค1.1.3.1 การจำแนกอุปกรณ์

เพื่อผลของการจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์ อุปกรณ์จะถูกจำแนกออกเป็นกลุ่มๆ ดังนี้

Class A: อุปกรณ์ 3 เฟสสมมูลและอุปกรณ์อื่นๆ ที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งดังต่อไปนี้

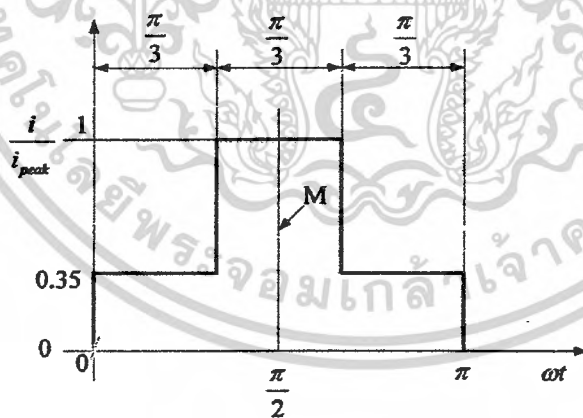
Class B: เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ (lighting Equipment)

Class C: อุปกรณ์แสงสว่าง (lighting Equipment) รวมถึงอุปกรณ์หรี่ไฟ (Dimming Device)

Class D: อุปกรณ์ที่มีรูปร่างของคลื่นกระแสอินพุตเป็นแบบพิเศษดังแสดงในภาพที่ ค1-2 และมีขนาดไม่เกิน 600 W

รูปคลื่นกระแสอินพุตของอุปกรณ์ Class B, Class C และอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ใช้การควบคุมแบบ การควบคุมเฟส (Phase angle control) จะไม่พิจารณาให้ถูกจัดอยู่ใน Class D

อุปกรณ์จะถูกพิจารณาให้ถูกจัดอยู่ใน Class D ถ้ารูปคลื่นกระแสอินพุตในแต่ละครึ่งของคาบอยู่ภายในกรอบที่แสดงในภาพที่ ค1-2 อย่างน้อย 95% ของช่วงเวลาในแต่ละครึ่งคาบ โดยที่เส้นกึ่งกลาง M อยู่ตรงกับค่ายอดของกระแสอินพุต



ภาพที่ ค1-2 กรอบของกระแสอินพุตที่กำหนดว่าเป็น “special wave shape” และจำแนกอุปกรณ์เป็น class D

### ค1.1.3.2 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์(Harmonic current limits)

1. ขีดจำกัดสำหรับอุปกรณ์ Class A ฮาร์โมนิกส์ของกระแสด้านเข้าจะต้องมีค่าเกินที่กำหนดในตารางที่ ค1-8
2. ขีดจำกัดของอุปกรณ์ Class B ฮาร์โมนิกส์ของกระแสด้านเข้าจะต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ ค1-8 คูณด้วยค่าแฟกเตอร์ 1.5
3. ขีดจำกัดของอุปกรณ์ Class C

#### (1) อุปกรณ์ส่องสว่าง

ก. เมื่อกำลังไฟฟ้าจริง  $> 25 \text{ W}$  สำหรับอุปกรณ์ส่องสว่างที่มีกำลังไฟฟ้าจริง  $> 25 \text{ W}$  กระแสฮาร์โมนิกส์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าสัมพัทธ์ดังที่แสดงในตารางที่ ค1-9

ข. เมื่อกำลังไฟฟ้าจริง  $\leq 25 \text{ W}$  อุปกรณ์ส่องสว่างนั้นจะต้องเป็นไปตามที่กำหนดอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

- (1) กระแสฮาร์โมนิกส์จะต้องไม่เกินขีดจำกัด ที่มีความสัมพันธ์กับกำลัง (power related limits) ในตารางที่ ค1-10 คอลัมน์ที่ 2
- (2) ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ความถี่มูลฐานจะต้องมีค่าไม่เกิน 85% และกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ไม่เกิน 61% นอกจากนี้รูปคลื่นของกระแสขาเข้าจะเริ่มไหลก่อนหรือที่มุม  $60^\circ$  และไม่หยุดไหลก่อนที่มุม  $90^\circ$

#### (2) อุปกรณ์หรี่แสง

(1) อุปกรณ์หรี่แสงแบบแยกชิ้นอิสระ กระแสฮาร์โมนิกส์ต้องไม่เกินขีดจำกัดในตารางที่ ค1-8 ในกรณีที่ใช้ในการควบคุมเฟสสำหรับหลอดมีไส้ มุมจุดชนวนต้องไม่เกิน  $145^\circ$

(2) อุปกรณ์หรี่ไฟที่ออกแบบรวมกับดวงโคม สำหรับโคมที่ใช้กับหลอดมีไส้ที่ควบคุมด้วยการควบคุมเฟสและมีมุมจุดชนวนเกิน  $145^\circ$  กระแสฮาร์โมนิกส์ต้องไม่เกินค่าที่แสดงในตารางที่ ค1-8 สำหรับโคมที่ใช้กับหลอด Discharge กระแสฮาร์โมนิกส์ต้องไม่เกินค่าที่แสดงในตารางที่ ค1-9 โดยคิดเป็นค่าร้อยละจากสภาวะไหลสูงสุดในตำแหน่งของการหรี่ไฟใดๆ

4. ขีดจำกัดของอุปกรณ์ Class D สำหรับอุปกรณ์ในกลุ่มนี้กระแสฮาร์โมนิกส์ด้านเข้าต้องไม่เกินค่าที่แสดงไว้ในตารางที่ ค1-10 ขีดจำกัดในตารางนี้ใช้กับอุปกรณ์ที่มีกำลังจริงด้านเข้า  $> 75 \text{ W}$

ตารางที่ ค1-8 Limit for Class A equipment

Harmonic order (n)	Maximum permissible harmonic current(A)
<b>Odd harmonics</b>	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \ 15/n$
<b>Even harmonics</b>	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \ 8/n$

ตารางที่ ค1-9 Limit for Class C equipment

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current expressed as a percentage of the input current at the fundamental frequency %
2	2
3	$30\lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$15 \leq n \leq 39$ (odd harmonic only)	3

\*  $\lambda$  is the circuit power factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ ค1-10 Limit for Class D equipment

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current per watt mA/W	Maximum permissible harmonic current A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$15 \leq n \leq 39$ (odd harmonic only)	$3.85/n$	see table 6-8

นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานอื่นๆ อีกที่ใช้ในการจำกัดค่าของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าประชาชน เช่น มาตรฐาน IEC 61000-3-4 Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3:Limits-Section 4:Limits of emission of harmonics currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A มาตรฐานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีอัตรากระแสต้านเข้ามากกว่า 16 A ต่อเฟส และต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟประชาชนขนาดแรงดันต่ำ ที่มีคุณสมบัติดังข้างล่างนี้ ส่วนระบบที่แตกต่างไปจากนี้จะอยู่นอกเหนือจากข้อกำหนดฉบับนี้

-แรงดันด้านเข้าถึง 240V เฟสเดียว สองหรือสามสาย

-แรงดันด้านเข้าถึง 600V สำหรับแรงดัน 3 เฟส สามหรือสี่สาย

-ความถี่ปกติ 50 Hz หรือ 60 Hz

การทดสอบตามข้อกำหนดนี้จะเป็นการทดสอบอุปกรณ์ที่รวมเป็นชิ้นเดียวกัน เช่น พัดลมไฟฟ้าที่ปรับความเร็วได้ โดยไม่แยกเป็นส่วนๆ เช่น คอนเวอเตอร์ตัวหนึ่ง เป็นต้น

การต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบไฟฟ้าประชาชนโดยปกติจะต้องการการตกลงเป็นพิเศษระหว่างผู้จำหน่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า การตกลงนี้จะขึ้นอยู่กับหลายแฟคเตอร์รวมถึงระดับการรบกวนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการต่ออุปกรณ์และสถานะที่แท้จริง ณ จุดที่ต่อไฟฟ้าเพื่อใช้งาน

ข้อกำหนดนี้จะระบุข้อมูลที่ต้องการเพื่อให้ผู้จำหน่ายไฟฟ้าสามารถพิจารณาถึงอุปกรณ์ที่มีฮาร์โมนิกส์และเพื่อตัดสินใจว่าจะยอมให้ต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบไฟฟ้าได้หรือไม่ ทั้งนี้จะพิจารณาจากระดับความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รายละเอียดของมาตรฐานต่างๆ เหล่านี้ต้องพิจารณาจากมาตรฐานฉบับสมบูรณ์

## ค1.2 มาตรฐานหรือข้อกำหนดสำหรับผู้ผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้า

มาตรฐานสำหรับกำหนดหรือควบคุมคุณภาพของการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้ามีอยู่หลายมาตรฐาน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงบางมาตรฐานที่นี้จะกล่าวถึงบางมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับกระแสหรือแรงดันความผิดเพี้ยนที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำเข้ามาต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

### ค1.2.1 มาตรฐาน IEEE 519-1992

ในส่วนของข้อกำหนด IEEE 519-1992 ที่กำหนดสำหรับผู้ผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น จะเป็นแพกเกจที่ใช้ระบุถึงคุณภาพของระบบไฟฟ้ารวมถึงความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก ซึ่งในส่วนนี้จะระบุถึงระดับความผิดเพี้ยนสูงสุด ณ จุดต่อร่วมการใช้ไฟฟ้า (PCC) ที่ลูกค้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย

ถ้าความผิดเพี้ยนเกินระดับที่ระบุ จะต้องมีการดำเนินการตามลำดับขั้นดังนี้

- (1) ทำการวัดฮาร์มอนิก ณ จุดที่สนใจในระบบ และรวมถึงจุด PCC และพิจารณาสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์ที่มีการกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกเกินพิกัด ถ้าตรวจพบผู้ใช้ไฟฟ้าที่เข้าข่ายนี้ ให้ขอร้องเพื่อให้ดำเนินการทำให้กระแสฮาร์มอนิกอยู่ในพิกัดโดยการติดตั้งวงจรกรอง หรือโดยลดกระแสฮาร์มอนิก
- (2) ติดตั้งวงจรกรองเพื่อควบคุมระดับฮาร์มอนิก
- (3) ติดตั้งสายส่งใหม่ ซึ่งวิธีการนี้ทำให้ระบบมีความมั่นคงขึ้น และเป็นการแยกปัญหาฮาร์มอนิกออกไปจากระบบเดิม แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงผลด้านการลงทุนด้วย

ตัวอย่างของพิกัดที่กำหนดแรงดันความผิดเพี้ยนของมาตรฐานนี้ แสดงดังตารางที่ ค1-11 โดยที่ค่าที่กำหนดในตารางนี้ ควรใช้กับการออกแบบระบบสำหรับเกิดกรณีที่ worst case สำหรับการดำเนินงานในสภาวะปกติ (สภาวะที่ทำงานนานเกินกว่าหนึ่งชั่วโมง) ส่วนในกรณีที่เริ่มต้นทำงานหรือกรณีที่มีการทำงานผิดปกติ อาจยอมให้เกินพิกัด 50%

ตารางที่ ค1-11 Voltage distortion limits

Bus voltage at PCC	Individual voltage distortion (%)	Total voltage distortion %
69 kV and below	3.0	5.0
69,001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161,001 kV and above	1.0	1.5

Note: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is in an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค1.2.2 มาตรฐาน IEC 61000-2-2

มาตรฐาน IEC 61000-2-2 Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2: Environment Section 2 : Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems มาตรฐานนี้เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวที่มีสูงถึง 10 kHz โดยที่ค่าพิกัดที่ระบุในข้อกำหนดนี้สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันโดยที่ระดับแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่แต่ละลำดับในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำแสดงดังตารางที่ ค1-12

ตารางที่ ค1-12 Compatibility levels for individual harmonic voltages in low voltage networks

Odd-harmonic non-multiple of 3		Odd harmonic multiple of 3		Even harmonic	
Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.5 \cdot 25/n$				

### ค1.3 มาตรฐานหรือข้อกำหนดฮาร์มอนิกส์สำหรับประเทศไทย

ข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการควบคุมระดับกระแสฮาร์มอนิกส์หรือแรงดันฮาร์มอนิกส์สำหรับระบบไฟฟ้าของประเทศไทยนั้น คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าที่ดำเนินการโดยไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้มีการร่างข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องขึ้น โดยที่จะใช้หลักการและแนวทางของมาตรฐานที่เป็นสากลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่น Engineer Recommendation G.5/3 มาตรฐานในกลุ่ม IEC 61000-3 และมาตรฐานในกลุ่ม IEC 61000-2 เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานที่คณะกรรมการได้ดำเนินการแล้วเช่น

1. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน
2. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้สามารถหาได้จากการไฟฟ้าทั้งสามแห่ง หรือ download ได้จาก <http://www.mea.or.th>. ข้อกำหนด/ข้อบังคับต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายจตุรนต์ รัตนศรีเมธา เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นบุตรชายคนโตจากพี่น้องทั้งหมด 3 คน จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสาขาวิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนกรรณสูตศึกษาลัยจังหวัดสุพรรณบุรี ในปีพ.ศ. 2547 จบการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2551



นางสาวชัชรินทร์ นียติวัฒน์ชาญชัย เกิดเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดนครสวรรค์ เป็นบุตรสาวคนโตจากพี่น้องทั้งหมด 2 คน จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสาขาวิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนสตรีนครสวรรค์ ในปีพ.ศ. 2547 จบการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2551



นายชัยรัตน์ อนวิจิตร เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นบุตรชายคนโตจากพี่น้องทั้งหมด 2 คน จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสาขาวิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนกรรณสูตศึกษาลัยจังหวัดสุพรรณบุรี ในปีพ.ศ. 2547 จบการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้