

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะ
ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

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



นายสนธยา มุกดาม่วง รหัส 43015138

นายสุเทพ แก้วพินิจ รหัส 43015142

นายอุบล ไสอินทร์ รหัส 43015149

นายอุทัย วรคำพล รหัส 43015194

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 49894

วันเดือนปี 2 เม.ย. 2547

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะ
ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

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



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

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

ผู้จัดทำ

1. นาย สนธยา มุกตาม่วง รหัสประจำตัว 43015138
2. นาย สุเทพ แก้วพินิจ รหัสประจำตัว 43015142
3. นาย อุบล โสมอินทร์ รหัสประจำตัว 43015149
4. นาย อุทัย วรคำพล รหัสประจำตัว 43015194



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

นายสนธยา มุกดาม่วง 43015138

นายสุเทพ แก้วพินิจ 43015142

นายอุบล โสมอินทร์ 43015149

นายอุทัย วรกำพล 43015194

ผศ. พิชิต ต่ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

เนื้อหาของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นการนำเสนอเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (BSRG) มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปไซน์ ฮาร์มอนิกส์สามเฟสของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าจากเทคนิคเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถต่อในลักษณะของการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกหรือลบ (positive or negative sequence) เมื่อเทียบกับกำลังเรียงลำดับของเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นความถี่และขนาดของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากตัวกำเนิดฮาร์มอนิกส์สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ

เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยนำเสนอและพิจารณาฮาร์มอนิกส์อันดับแตกต่างกัน ที่มีกำลังเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกหรือลบที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ต่างๆ โดยในปริญญานิพนธ์นี้จะไม่คำนึงถึงฮาร์มอนิกส์ที่กำเนิดมาจากตัวของภาระไฟฟ้าเอง

ในสภาวะปกติแล้วฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า 3 เฟสโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะไม่สมดุล (unbalance) ซึ่งจากเทคนิคเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถนำมาประยุกต์ต่อในลักษณะการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวก ลบ และศูนย์ได้ จึงได้นำเอาหลักการของทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (symmetrical component) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์สามเฟสไม่สมดุลที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

A Study of Effects of Harmonics on Performance of Three-Phase Induction Motor

Sonthaya Mukdamoung

Sutep Khawpineak

Ubon Som-in

Uthai Warakumpul

Asst.Prof. Pichit Lumyong Advisor

Abstract

This thesis presents the effect of harmonics on performance of three-phase induction motor. The technique of Brushless Synchronous Reluctance Generator (BSRG) combined with the utility power supply for generating nonsinusoidal three-phase voltage source is proposed. The three-phase harmonics voltage source generating from BSRG technique can be connected in positive or negative sequence of utility power supply. Therefore, frequency and amplitude of the waveform obtained from this harmonic generator can be independently controlled.

A study the effect of harmonics on performance of three-phase induction motor. The various order harmonics having positive and negative sequence at various Voltage Distortion Factor (VDF) are illustrated and discussed. Nevertheless this thesis isn't concerned about the harmonics that is generated by an electric load.

Normally, most harmonics in three-phase system are unbalance three-phase and form technique of Brushless Synchronous Reluctance Generator (BSRG) can be connected in positive, negative and zero sequence form symmetrical component theory can be analysis unbalance three-phase harmonic of three-phase induction motor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรนี้เสร็จลงได้ก็คือ ผศ.พิชิต ล้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	I
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1 สนามแม่เหล็กหมุน	4
2.1.1 การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนในขดลวดสามเฟส	4
2.1.2 ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าสามเฟส	6
2.2 แรงบิด (Torque)	7
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (Three – Phase Induction Motor)	8
2.3.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	9
2.4 วงจรสมมูล (Equivalent Circuit)	10
2.5 การสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	11
2.5.1 การสูญเสียในขดลวด (Copper loss)	11
2.5.2 การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)	11
2.6 การส่งผ่านกำลัง (Power Transfer)	13
2.6.1 การพิจารณาการส่งผ่านกำลังจากสมการ	13
2.7 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของรูปคลื่นรายคาบ	14
บทที่ 3 การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์	16
3.1 การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	16
3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบรีตักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน	16
3.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส	18
3.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

	หน้าที่
3.2.1 การสูญเสียทองแดง	21
3.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก	22
3.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โพลด	23
3.3 วงจรเสมือนต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์	24
3.4 รูปสัญญาณคิกคาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	26
3.4.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน	26
3.4.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	28
3.4.3 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	29
3.4.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า	30
บทที่ 4 ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรเบื้องต้น (Symmetrical Components)	31
4.1 การเรียงลำดับเฟสแบบบวก (Positive-Sequence)	31
4.2 การเรียงลำดับเฟสแบบลบ (Negative-Sequence)	32
4.3 การเรียงลำดับเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence)	33
4.4 สมการทั่วไปในการพิจารณาองค์ประกอบสมมาตร (General Equations)	33
4.5 การวิเคราะห์หม้อเตอร์โดยใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component)	35
บทที่ 5 ผลการทดลอง	37
5.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปลงถ่าน (BSRG)	39
5.2 สัญญาณคิกคาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ	42
5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	55
5.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า	56
5.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกล ในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า	62
5.6 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ป้อนฮาร์มอนิกส์แบบสามเฟสไม่สมดุล (unbalance)	66
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ความสมมาตรของรูปสัญญาณในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์	15
5-1 แสดงค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 50,100 และ150 Hz	42
5-2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 แบบเฟสไม่สมดุล	70
5-3 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสไม่สมดุล	70
5-4 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์มอนิกส์ที่เฟส A เพียงเฟสเดียว (Single phase)	71
5-5 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence)	71
5-6 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบบวก (Positive - Sequence)	72
5-7 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบลบ (Negative - Sequence)	72



สารบัญภาพ

	หน้าที่
2-1 ตำแหน่งการวางขดลวดของแต่ละเฟส	4
2-2 ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2-3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	9
2-4 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	9
2-5 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาทางสเตเตอร์	10
2-6 การส่งผ่านกำลัง และการสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	13
3-1 สเตเตอร์ และ ฝาครอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบบริล็คแทนชนิดไม่มีแปรงถ่าน	16
3-2 แผนภูมิโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบบริล็คแทนชนิดไม่มีแปรงถ่าน	17
3-3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบบริล็คแทนชนิดไม่มีแปรงถ่านต่อร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นตัวต้นกำลัง	17
3-4 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์	18
3-5 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นคลื่นไซน์ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	19
3-6 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก	20
3-7 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ	21
3-8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน	24
3-9 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์	25
3-10 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสตรงกับความถี่มูลฐาน	27
3-11 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา	27
3-12 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา	28
4-1 แสดงกลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบบวก (Positive -sequence current phasors)	31
4-2 แสดงกลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบลบ (Negative-sequence current phasors)	32
4-3 แสดงกลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบศูนย์ (zero-sequence current phasors)	33
4-4 แสดงองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ขณะที่เฟสไม่สมดุล	35
5-1 แผนภูมิการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	37
5-2 การต่ออุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการทดสอบ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
5-3 การต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	38
5-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ open-circuit และ short-circuit ที่ความถี่ 50 Hz	40
5-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ open-circuit และ short-circuit ที่ความถี่ 100 Hz	40
5-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ open-circuit และ short-circuit ที่ความถี่ 150 Hz	41
5-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ open-circuit voltage ที่ความถี่ต่างๆ	41
5-8 การเรียงลำดับเฟสของควมถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบลบลำดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์	42
5-9 ผลรวมของควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์	43
5-10 การเรียงลำดับเฟสของควมถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบบวกลำดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์	43
5-11 ผลรวมของควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์	44
5-12 การเรียงลำดับเฟสของควมถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบลบลำดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์	44
5-13 ผลรวมของควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์	45
5-14 การเรียงลำดับเฟสของควมถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบบวกลำดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์	45
5-15 ผลรวมของควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์	46
5-16 การเรียงลำดับเฟสของควมถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบลบลำดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์	46
5-17 ผลรวมของควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมควมถี่มูลฐานกับควมถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
5-30 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบบวกลำดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์	53
5-31 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปคตรัม ของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์	54
5-32 แสดงความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กที่ค่าความถี่ต่าง ๆ และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 แรงม้า	55
5-33 แสดงความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กที่ค่าความถี่ต่าง ๆ และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 5 แรงม้า	56
5.34 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 13 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่าง ๆ	57
5.35 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 13 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่าง ๆ	58
5-36 กำลังงานไฟฟ้าและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่าง ๆ	58
5-37 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยก ความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบบวก	59
5-38 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบลบ	59
5-39 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบบวก	60
5-40 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบลบ	60
5-41 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ของความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ระหว่างการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ ในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4	61
5-42 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ของความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ระหว่างการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ ในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
5-43 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดา ไฟฟ้าเท่ากับ 20 %	62
5-44 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%	63
5-45 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %	63
5-46 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%	64
5-47 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %	64
5-48 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยน ศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%	65
5-49 วงจรการต่อ Unbalance Single Phase Harmonic	66
5-50 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อป้อนฮาร์มอนิกเฟสเดียว	67
5-51 การแยกแหล่งจ่ายความถี่มาตรฐานกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกออกจากกัน โดย การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	67
5-52 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกซ์ของแต่ละการเรียงลำดับเฟส	68
5-53 การไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากองค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบต่าง ๆ	69
6-1 แสดงผลกระทบของ Electromagnetic Torque กรณีจากฮาร์มอนิกซ์มีการเรียงลำดับ เฟสแบบบวกและลบ	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าและการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีทางไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั้งทางด้านที่อยู่อาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดมลภาวะทางไฟฟ้าหรือฮาร์มอนิกส์ขึ้น

จากปัญหาของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังนี้สามารถที่จะแบ่งจากการกำเนิดออกเป็นดังนี้คือ การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวอย่างเช่น การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมเฟส, อินเวอร์เตอร์, และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่ง การทำงานของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าและเตาหลอมโลหะไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์อันดับคู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง การทำงานของอุปกรณ์ที่มีการอิมิตีวทางแม่เหล็ก และการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์โดยอุปกรณ์ shunt capacitors และ series inductors ในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในกรณีนี้จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ได้โดยตรง แต่จะทำให้เกิดการขยายขนาดของฮาร์มอนิกส์ให้สูงขึ้น จากการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่อรวมในระบบด้วย

ในส่วนของภาระทางไฟฟ้า ในงานทางด้านอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนาจึงเป็นที่มาของปัญหาที่ว่าฮาร์มอนิกส์จากแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนาจึงได้สภาพการทำงานที่แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนาจึง 3 เฟส
- เพื่อวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนาจึง 3 เฟสอย่างไร
- เพื่อวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสไม่สมดุล (Unbalance Phase) โดยใช้หลักการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนใน โครงานนี้การกำหนดการหมุนของสนามแม่เหล็กในทิศทางจากฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบจะสามารถกำหนดอันดับและขนาดของฮาร์มอนิกส์ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะอาศัยการประยุกต์เทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบบริดจ์แทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าวจะใช้ทดสอบผลกระทบของฮาร์

มอริกส์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยฮาร์มอนิกส์ที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายนี้ทำให้ทราบแนวโน้มว่าฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยฮาร์มอนิกส์ที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์จะเป็นฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ และได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดที่ต่างขนาดกันเพื่อยืนยันผลการทดสอบที่เกิดขึ้นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

นอกจากนี้ยังได้นำผลการทดสอบฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบบวก ลบ และ ศูนย์ มาเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณ โดยอาศัยการประยุกต์หลักการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) มาใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีที่ฮาร์มอนิกส์มีกระแสและศักดาไฟฟ้าไม่สมดุลย์ (Unbalance) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในโครงการฉบับนี้ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนตามลำดับดังนี้

- ศึกษาและค้นคว้าการเกิดของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังว่ามีสาเหตุการเกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดใดและส่งผลกระทบมากน้อยเพียงใด
- ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบรีลัคแทนซันชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Synchronous Reluctance Generator, BSRG) ว่ามีหลักการทำงานอย่างไรและขั้นตอนในการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบรีลัคแทนซันชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยทำการทดสอบเปิดวงจร (Open-Circuit Test) และ สัต์วงจร (Short-Circuit Test) เพื่อหากราฟคุณลักษณะและค่าอิมพีแดนซ์เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์
- ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส
- ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสถานะไม่มีภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า โดยทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่าง โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าเท่ากันในทุกอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าเพื่อดูผลของอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างจะส่งผลกระทบต่ออย่างไร
- ทดสอบดั่งรูปแบบข้างต้นแต่เพิ่มขนาดของค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าให้สูงขึ้น

- ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะขับโหลดภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า ทดสอบเหมือนในกรณีไม่มีภาระทางกลเพียงแต่ทำการต่อภาระทางกลให้กับมอเตอร์ โดยทำการเพิ่มภาระจนถึงพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ
- ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ป้อนฮาร์มอนิกส์แบบสามสามเฟสไม่สมดุล (Unbalance) โดยทำการป้อนฮาร์มอนิกส์เข้าเพียงเฟสเดียวเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)
- สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

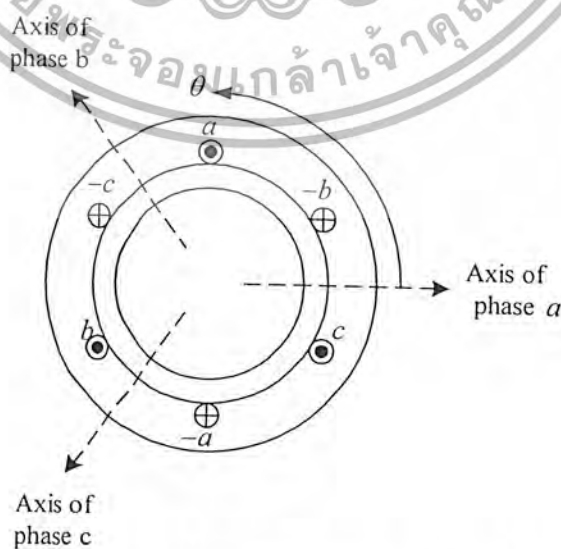
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 สนามแม่เหล็กหมุน

การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันอยู่ภายใน ซึ่งการพันขดลวดที่สเตเตอร์ในแต่ละเฟสวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า มีลักษณะลำดับเฟส A, B และ C ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหมุนอาศัยผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสในแต่ละเฟส ที่ถูกควบคุมโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นภายในนั้น เกิดจากแม่เหล็กถาวร ความเป็นจริงนั้นเกิดจากตำแหน่งของแรงลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามค่าของกระแสที่ป้อนเข้า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์ที่มีการต่อแบบสตาร์ (Star) หรือ แบบเดลต้า (Delta) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้น และสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปตามสนามแม่เหล็กหมุน เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟสของขดลวดสเตเตอร์ ในสภาวะ 3 เฟสสมดุล เราสามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหมุนจากทฤษฎีดังนี้

2.1.1 การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนในขดลวดสามเฟส

การวางขดลวดในแต่ละเฟส มีระยะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ทำให้มีแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และมีทิศทางหมุนตามลำดับเฟส (Phase Sequence) A, B และ C ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ตำแหน่งการวางขดลวดของแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-1 กระแสในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับ

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (2.1)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.3)$$

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive force, mmf) ในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ

เมื่อ mmf เฟส a

$$\mathfrak{F}_{a1} = \mathfrak{F}_{a1}^+ + \mathfrak{F}_{a1}^- \quad (2.4)$$

$$\mathfrak{F}_{a1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.5)$$

$$\mathfrak{F}_{a1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.6)$$

mmf เฟส b

$$\mathfrak{F}_{b1} = \mathfrak{F}_{b1}^+ + \mathfrak{F}_{b1}^- \quad (2.7)$$

$$\mathfrak{F}_{b1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.8)$$

$$\mathfrak{F}_{b1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \quad (2.9)$$

mmf เฟส c

$$\mathfrak{F}_{c1} = \mathfrak{F}_{c1}^+ + \mathfrak{F}_{c1}^- \quad (2.10)$$

$$\mathfrak{F}_{c1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.11)$$

$$\mathfrak{F}_{c1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.12)$$

$$F_{\max} = \frac{4}{p} K_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \quad (2.13)$$

เมื่อ

\mathfrak{F} คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า

F_{\max} คือขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

K_w คือค่าตัวประกอบการพันของขดลวด

P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)

I_a คือกระแสของแต่ละเฟส (Amp)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าสามเฟส

$$\mathfrak{V}(\theta, t) = \mathfrak{V}_{a1} + \mathfrak{V}_{b1} + \mathfrak{V}_{c1} \quad (2.14)$$

$$\mathfrak{V}(\theta, t) = \mathfrak{V}^+(\theta, t) + \mathfrak{V}^-(\theta, t) \quad (2.15)$$

$$\mathfrak{V}^+(\theta, t) = \mathfrak{V}_{a1}^+ + \mathfrak{V}_{b1}^+ + \mathfrak{V}_{c1}^+ \quad (2.16)$$

$$\mathfrak{V}^-(\theta, t) = \mathfrak{V}_{a1}^- + \mathfrak{V}_{b1}^- + \mathfrak{V}_{c1}^- = 0 \quad (2.17)$$

จากผลรวมพบว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้ามีเฉพาะ Forward Field ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\mathfrak{V}^+(\theta, t) = \mathfrak{V}_{a1}^+ + \mathfrak{V}_{b1}^+ + \mathfrak{V}_{c1}^+ \quad (2.18)$$

$$= \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2-2 ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์นั้น จะมีลักษณะที่ทำให้กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดขึ้นมา โดยการเกิดการเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนนั้นเราจะอาศัยทฤษฎีของเลนซ์ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนได้ดังรูปที่ 2-2

2.2 แรงบิด (Torque)

เมื่อจ่ายไฟสลับให้ขดลวดสเตเตอร์ จะมีการส่งผ่านพลังงานข้ามช่องว่างอากาศ (Air Gap) ไปยังโรเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) มีค่าเท่ากับ

$$N_s = 120 \frac{f}{p} \quad (2.20)$$

- เมื่อ N_s คือความเร็วเชิงโคจรของสนามแม่เหล็ก (rpm)
 f คือความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสเตเตอร์ (Hz)
 P คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ (Pole)

โดยขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ($N_r = 0$) นั้นจะมีการเหนี่ยวนำ และเกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกับแหล่งจ่าย ในสถานะที่โรเตอร์มีความเร็วในการหมุนเท่ากับ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน จะทำให้ไม่เกิดแรงบิด แต่โดยปกติความเร็วของโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะเพียงแรงเสียดทานของโรเตอร์ก็ทำให้เกิดความแตกต่างของความเร็วระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์ได้ ซึ่งความแตกต่างของความเร็วนี้สามารถอธิบายโดยค่า สลิปต่อหน่วย (Per Unit Slip) ซึ่งมีสมการดังนี้ คือ

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \quad (2.21)$$

$$\frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (2.22)$$

- เมื่อ s คือค่าสลิปต่อหน่วย (Per Unit Slip)
 N_s คือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)
 N_r คือความเร็วโรเตอร์ (rpm)
 ω_s คือความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุน (rad/sec)
 ω_r คือความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/sec)

ขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ค่าของสลลิปมีค่าเท่ากับ 1 ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์ มีค่าเท่ากับ ความถี่ของศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าที่สเตเตอร์ และเมื่อ โรเตอร์เคลื่อนที่ส่งผลให้ค่าสลลิปลดลง ในสภาวะนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ของโรเตอร์จะลดลงตามสัดส่วนของค่าสลลิป ตามสมการ

$$E_r = sE_2 \quad (2.23)$$

$$X_r = sX_2 \quad (2.24)$$

$$f_r = sf \quad (2.25)$$

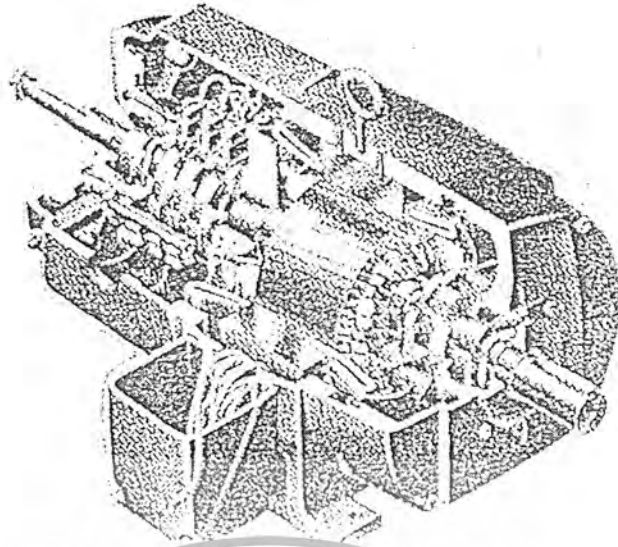
เมื่อ	E_r	คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงานปกติ (Volt)
	E_2	คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง (Volt)
	X_r	คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง (Ohm)
	X_2	คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสขณะที่โรเตอร์ทำงานปกติ (Ohm)
	f_r	คือความถี่ที่โรเตอร์ (Hz)
	f	คือความถี่ของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า (Hz)

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (Three - Phase Induction Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีส่วนประกอบทางโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และ ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) ในส่วนที่เคลื่อนที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบขดลวดพันรอบตัวหมุน (Wound rotor) ตัวหมุนแบบนี้จะมีขดลวดทองแดงพันรอบตัวหมุนปลายของขดลวดต่อกับสลลิปริง (Slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่

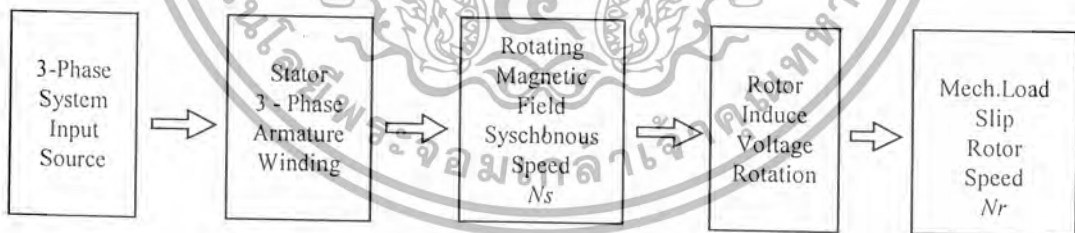
2. แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) แกนหมุนทำด้วยแผ่นเหล็กบาง (Laminate Sheet Steel) อัดซ้อนทับกัน ผิวด้านนอกถูกเจาะให้เป็นร่องเรียกว่า สล็อต (Slot) ตรงกลางเจาะรูสำหรับใส่แกนหมุน นำแกนตัวหมุนไปไว้ในพิมพ์ ทำการฉีคอลลูมิเนียมเหลว จะได้คอลลูมิเนียมอัดอยู่ในร่องสล็อต และมีครีบบอกมาเพื่อใช้ระบายความร้อน ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.3.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเริ่มจากการจ่ายไฟสลับให้กับขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านโรเตอร์ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ส่งผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด ทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูป 2-4



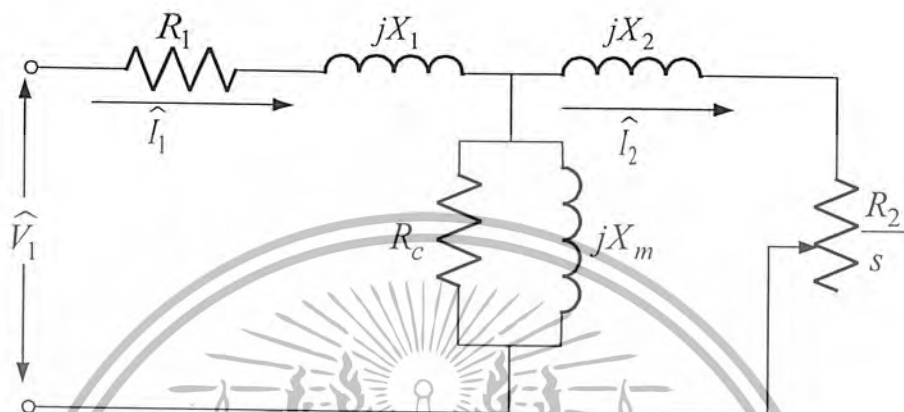
รูปที่ 2-4 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นไม่สามารถที่จ่ายศักดาไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่จะอาศัยการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ที่โรเตอร์ ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานข้ามช่องว่างอากาศ ซึ่งเราสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆในแต่ละเฟส ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะการทำงานที่สลิปใดๆ ได้โดยการวิเคราะห์วงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuit)

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ขณะใช้งานที่ค่าสลิปต่างๆ เราจะใช้วงจรสมมูลย์มาตรฐานต่อเฟส ซึ่งมีลักษณะค่าของความต้านทานและรีแอกแตนซ์เท่ากันทั้งสามเฟส ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นๆ ในการวิเคราะห์เราใช้สภาวะที่ทั้งสามเฟสมีสักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เท่ากัน (Voltage Balance)



รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาทางสเตเตอร์

เมื่อ

- \widehat{V}_1 คือ ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสเตเตอร์ (Volt)
- \widehat{I}_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสเตเตอร์ (Amp)
- \widehat{I}_2 คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด โรเตอร์ (Amp)
- R_1 คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ohm)
- R_2 คือความต้านทานขดลวด โรเตอร์ (Ohm)
- R_c คือความต้านทานในแกนเหล็ก (Ohm)
- X_1 คือลิกเกจันรีแอกแตนซ์ขดลวดสเตเตอร์ (Ohm)
- X_2 คือลิกเกจันรีแอกแตนซ์ขดลวด โรเตอร์ที่ส่งผ่านมาด้านสเตเตอร์ (Ohm)
- X_m คือแมกนิตไคซิ่งรีแอกแตนซ์ (Ohm)

จากวงจรสมมูลย์สามารถหาค่ากระแสที่โรเตอร์ที่พิจารณาทางด้านสเตเตอร์จากสมการ

$$I_2 = \frac{sE_2}{Z_2} \tag{2.26}$$

$$= \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \tag{2.27}$$

$$= \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}} \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานจะแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. การสูญเสียในขดลวด (Copper Loss)
2. การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

1. การสูญเสียในขดลวด (Copper Loss)

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ ขดลวดของมอเตอร์จะประกอบด้วยส่วนที่พันบนสเตเตอร์ และในส่วนของโรเตอร์ ซึ่งการสูญเสียในขดลวดจะเกิดเมื่อมีกระแสไหลในขดลวด พิจารณามอเตอร์ทำงานโดยต่อภาระทางกลที่เพลามอเตอร์ นั้นหมายความว่าเกิดกระแสไหลในโรเตอร์จากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กผ่านช่องอากาศ ซึ่งกระแสส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดบนโรเตอร์ ถ้ายังต่อภาระทางกลมากขึ้นกระแสในโรเตอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น (Slip มากขึ้น) นั่นก็คือมอเตอร์จะดึงกระแสทางด้านสเตเตอร์เพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อสร้างแรงบิดให้เพียงพอในการขับภาระทางกลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสทางด้านสเตเตอร์มีค่าสูงรวมกับกระแสที่เกิดในโรเตอร์ที่สูงขึ้นทำให้ผลรวมของการสูญเสียในขดลวดสูงขึ้นจากการช่วยภาระที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณามอเตอร์ไม่ต่อภาระทางกลกระแสด้านโรเตอร์จะมีค่าต่ำมาก (Slip ต่ำ) เนื่องจากค่าความต้านทานโรเตอร์มีค่าสูงนั่นเอง นั่นก็คือค่าความสูญเสียในขดลวดบนโรเตอร์จะน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียที่เกิดบนสเตเตอร์ที่เกิดจากกระแสที่ไหลในสเตเตอร์มากกว่ากระแสในโรเตอร์ ดังนั้นการสูญเสียจากขดลวดด้านโรเตอร์จึงสามารถที่จะไม่นำมาพิจารณาได้ในกรณีมอเตอร์ไม่มีภาระทางกล

2. การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. เกิดจากมีกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Loss)
2. เกิดจากการกลับตัวของสนามแม่เหล็ก (Hysteresis Loss)

พิจารณาการสูญเสียที่เกิดจกกระแสไหลวนในแกนเหล็ก พิจารณาได้จากสมการ

$$P_e = K_e \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ K_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะของแกนเหล็ก

B_{\max} คือ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

f คือ ค่าความถี่ที่ป้อน

เมื่อพิจารณาสมการแล้วการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจะแปรผันตามตัวแปรกำลังสองของค่าความหนาแน่นของค่าฟลักซ์แม่เหล็ก กับความถี่กำลังสอง นั่นก็คือยิ่งความถี่เพิ่มมากขึ้นค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กก็ยิ่งมากขึ้นที่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่าเดียวกัน ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้นที่ความถี่เดียวกันการสูญเสียก็สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

ส่วนการสูญเสียเนื่องจากการกลับตัวของสนามแม่เหล็กพิจารณาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$P_h = K_h \cdot B_{\max}^x \cdot f \quad (2.30)$$

- เมื่อ K_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)
 B_{\max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
 f คือ ค่าความถี่ที่ป้อน
 x คือ ค่าคงที่

เมื่อพิจารณาสมการแล้วค่าความสูญเสียที่เกิดจากการกลับตัวของสนามแม่เหล็กก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก นั่นก็คือค่าความสูญเสียจะขึ้นอยู่กับสองตัวแปร คือ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กยกกำลังค่า ๆ หนึ่งและความถี่ที่จ่ายให้

เมื่อรวมค่าความสูญเสียทั้งสองเข้าด้วยกันก็จะได้การสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กทั้งหมด นั่นก็คือเป็นไปตามสมการ

$$P_c = K_h \cdot B_{\max}^x \cdot f + K_e \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \quad (2.31)$$

- เมื่อ f คือ ความถี่มูลฐาน
 K_h คือ สัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)
 K_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสไหลวน (Eddy current)

เมื่อให้ x ในสมการมีค่าเท่ากับ 2 เพื่อลดทอนตัวแปรในสมการลงดังนั้นสมการเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_c = K_h \cdot B_{\max}^2 \cdot f + K_e \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \quad (2.32)$$

ถ้าให้

$$I = K_h \cdot B_{\max}^2 \quad (2.33)$$

$$J = K_e \cdot B_{\max}^2 \quad (2.34)$$

เมื่อแทนค่า I และ J ลงในสมการจะได้

$$P_c = I \cdot f + J \cdot f^2 \quad (2.35)$$

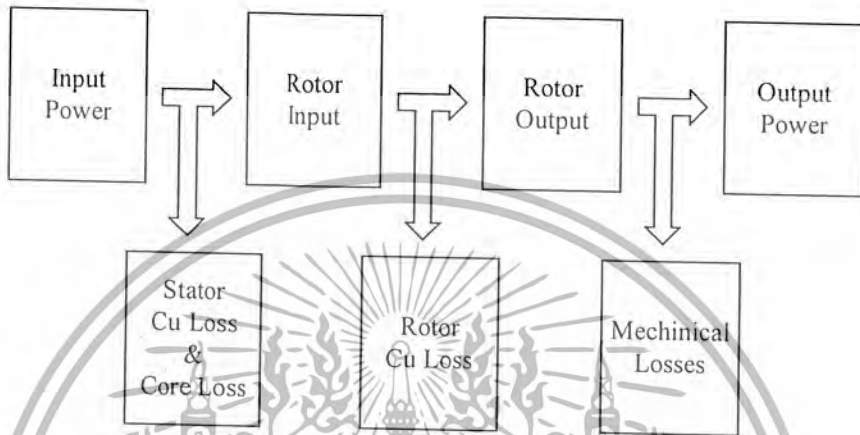
ย้าย f มาหาร จะได้

$$\frac{P_c}{f} = I + J \cdot f \quad (2.36)$$

เมื่อพิจารณาสมการการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากแกนเหล็กแล้วสรุปได้ว่าการสูญเสียจากแกนเหล็กทั้งหมดจะแปรผันตามค่าความถี่ของระบบและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

2.6 การส่งผ่านกำลัง (Power Transfer)

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสทางด้านป้อนเข้านั้นจะเป็นแรงดัน และกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ส่วนทางด้านเอาต์พุตนั้นจะมีลักษณะลัดวงจรไว้ ทำให้ไม่มีพลังงานไฟฟ้าออกมา แต่จะเปลี่ยนเป็นรูปพลังงานกลแทน คือ การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ในระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานในแต่ละช่วงนั้นจะมีการสูญเสีย ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาจากรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 การส่งผ่านกำลัง และการสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.6.1 การพิจารณาการส่งผ่านกำลังงานจากสมการ

$$\begin{aligned}
 P_i &= V_i I_i \cos \theta_i && \text{(Electrical Power Input)} \\
 P_{cu,1} &= 3I_1^2 R_1 && \text{(Stator Copper Loss)} \\
 P_{cu,2} &= 3I_2^2 R_2 = sP_g && \text{(Rotor Copper Loss)} \\
 P_g &= 3I_2^2 R_2 / s && \text{(Rotor Input or Power Across Air Gap)} \\
 P_e &= P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g && \text{(Rotor Output or Electromagnetic Power)} \\
 T_e &= P_e / \omega_r = P_g / \omega_s && \text{(Electromagnetic Torque)} \\
 P_o &= P_e - P_r && \text{(Output Power or Mechanical Power)} \\
 T_o &= P_o / \omega_r && \text{(Output Torque)}
 \end{aligned}$$

เมื่อจ่ายไฟสลับให้กับสเตเตอร์ในขั้นต้นจะเกิดการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นจะส่งพลังงานข้ามช่องอากาศ (Air gap Power) ซึ่งเป็นพลังงานป้อนให้โรเตอร์ ทำให้โรเตอร์มีกระแสไหล เกิดการสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor Cu loss) และส่วนหนึ่งเป็นการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) ซึ่งส่วนนี้เรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) พลังงานทางด้านขาออกของโรเตอร์เป็นพลังงานสนามแม่เหล็กทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่และเกิดสูญเสียที่เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์เคลื่อนที่ คือ การสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงลม(Friction and Windage Loss) ซึ่งเราเรียกรวมว่า การสูญเสียคงที่ (Stray Load Loss) พลังงานที่ได้ทางด้านเอาท์พุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะเป็นพลังงานทางกลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์นั่นเอง

2.7 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของรูปคลื่นรายคาบ

รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ($f(t)$) รายคาบที่มีความถี่เชิงมุม (ω) สามารถที่จะกระจายให้อยู่ในเทอมองค์ประกอบของความถี่ ได้ดังนี้

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)\} \quad (2.37)$$

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 \quad (2.38)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.39)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.40)$$

เมื่อ $k=0, \dots, \infty$

จากสมการ เมื่อ $\omega = 2\pi/T$

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \quad (2.41)$$

รูปของเฟสเซอร์ในเทอมของค่า root mean square (rms) สามารถที่จะใช้อธิบายองค์ประกอบของความถี่ ได้ดังนี้

$$F = F_k e^{j\phi_k} \quad (2.42)$$

เมื่อขนาดของ root mean square เท่ากับ

$$F_k = \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.43)$$

และมุมเฟสเลื่อน (Phase Shift) เท่ากับ

$$\phi_k = \tan^{-1} \left(\frac{-b_k}{a_k} \right) \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า root mean square ของฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถกระจายให้อยู่ในเทอมของ root mean square ขององค์ประกอบอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$F = \sqrt{\left(F_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} F_k^2 \right)} \tag{2.45}$$

รูปสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์เป็นฟังก์ชันคาบ มีลักษณะสมมาตร สามารถที่จะทำการคำนวณหา ค่า a_k และ b_k โดยใช้สมการที่ (2.31) และ (2.32) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง

Symmetry	Condition Required	a_k and b_k
Odd	$f(-t) = -f(t)$	$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(k\omega t) d(\omega t)$ $a_k = 0$
Even	$f(-t) = f(t)$	$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos(k\omega t) d(\omega t)$ $b_k = 0$
Half-wave	$f(t) = f(t + \frac{1}{2}T)$	$a_k = b_k = 0$ for even k $a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos(k\omega t) d(\omega t)$ for odd k $b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(k\omega t) d(\omega t)$ for odd k
Odd Quarter-wave	Odd and Half-wave	$a_k = 0$ for all k $b_k = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(t) \sin(k\omega t) d(\omega t) & \text{for odd } k \\ 0 & \text{for even } k \end{cases}$
Even Quarter-wave	Even and Half-wave	$b_k = 0$ for all k $a_k = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(t) \cos(k\omega t) d(\omega t) & \text{for odd } k \\ 0 & \text{for even } k \end{cases}$

ตารางที่ 2-1 ความสมมาตรของรูปสัญญาณในการวิเคราะห์ฟูเรียร์

บทที่ 3

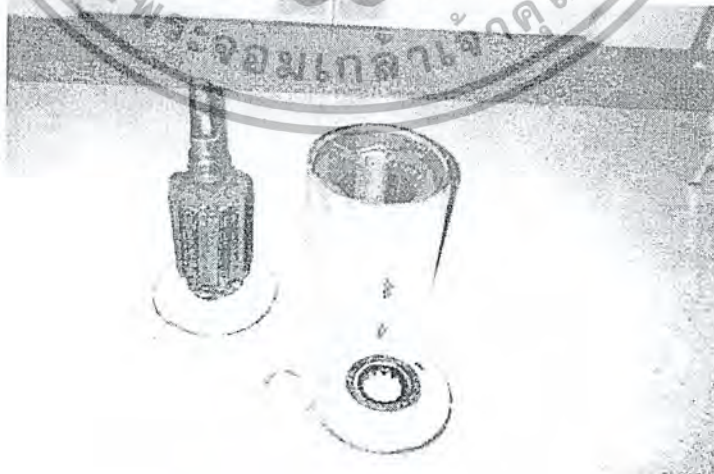
การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

3.1 การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งกรณีการใช้เทคนิคของ Pulse Width Moduration (PWM) มาควบคุมในเรื่องของขนาดและอันดับของรูปคลื่นฮาร์มอนิกส์นั้น จะทำให้พบกับปัญหาบ้างเล็กน้อยในเรื่องของการควบคุมทิศทางในการเรียงลำดับเฟสของฮาร์มอนิกส์ การควบคุมความผิดเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในปริยญาณิพนธ์นี้จึงนำเสนอการใช้เทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Synchronous Reluctance Generator, BSRG) มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟส ในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

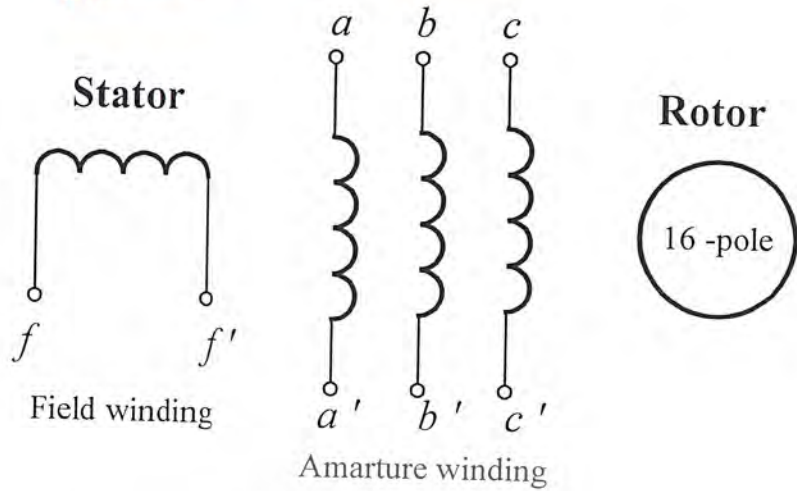
3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านดังรูปที่ 3-1 จะเป็นเครื่องกำเนิดจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบสามเฟสมีขั้วแม่เหล็กจำนวน 16 ขั้ว สามารถที่จะแบ่งโครงสร้างตามลักษณะขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนของขดลวดกระตุ้น (Field winding) และขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ดังแสดงในรูปที่ 3-2 ซึ่งความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดนี้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสโดยทั่วไป ก็คือ ทั้งขดลวดกระตุ้นและขดลวดอาร์มาเจอร์จะถูกวางอยู่ที่สเตเตอร์ และ โรเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นแบบ Salient Pole โดยไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ ซึ่งจากคุณสมบัติของโครงสร้างนี้เองทำให้มีความสามารถในการหมุนที่ความเร็วสูงๆ ได้



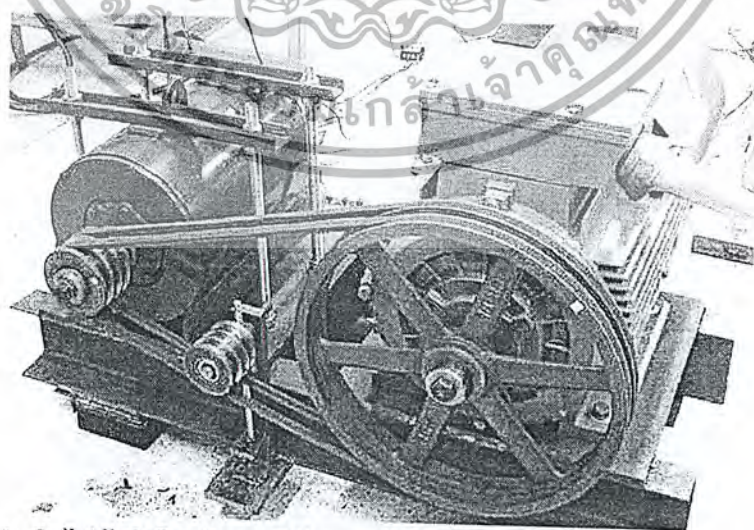
รูปที่ 3-1 สเตเตอร์ และ ฝาครอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



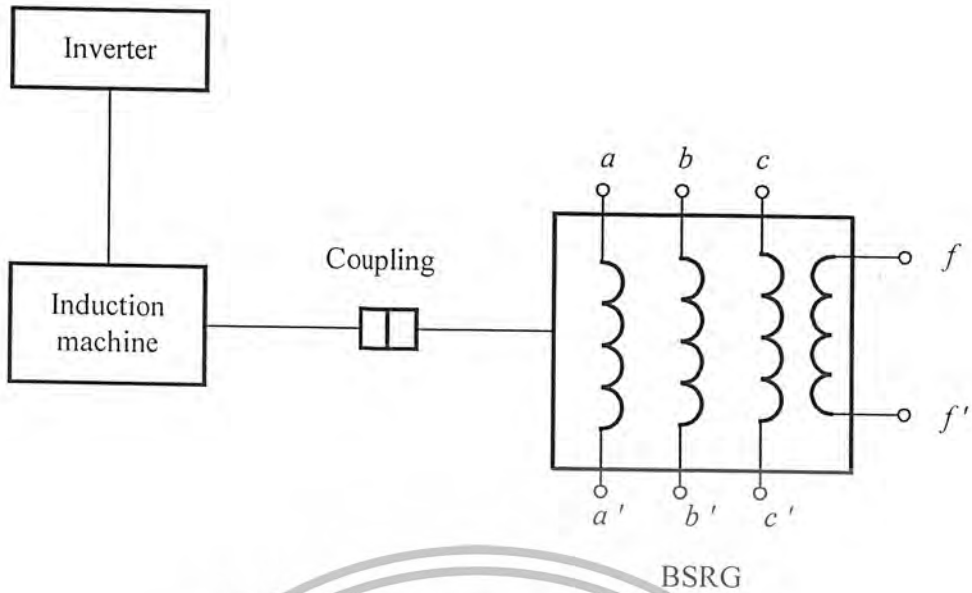
รูปที่ 3-2 แผนภูมิโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะนำแต่ละขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟส ในขณะที่อันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการจะสามารถควบคุมได้จกความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านซึ่งได้ถูกต่อ (Coupling) ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยมีอินเวอร์เตอร์ (Invertor) เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 3-4 ตัวอย่างการปรับฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ความถี่ 350 เฮิรตซ์ ซึ่งคงมเร็วซิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้วจะต้องหมุนเท่ากับ 2625 รอบต่ออนาที และค่าประกอบความถี่ของศักดาไฟฟ้าจะสามารถที่จะปรับได้โดยการควบคุมป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขดลวดกระตุ้นที่อยู่ทีสเตเตอร์



รูปที่ 3-3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านต่อร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นตัวต้นกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์

3.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส

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

$$v(t) = V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + \sum_{k=2}^{\infty} V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \tag{3.1}$$

- เมื่อ $V_{m,1}$ คือค่าศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน
- $V_{m,k}$ คือค่าศักดาไฟฟ้าอันดับที่ k^{th} ฮาร์มอนิกส์
- k คืออันดับของฮาร์มอนิกส์
- ω_0 คือค่าความเร็วเชิงมุมความถี่มูลฐาน
- ϕ_k คือค่ามุมเฟสของศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์

ค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแสดงในรูปสมการของความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) ซึ่งกำหนดมาตรฐาน โดย Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 [20] ซึ่งสามารถกำหนดในค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐาน โดยค่าของความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมทั้งศักดาและกระแสไฟฟ้า จะใช้กำหนดลักษณะเดียวกัน โดยค่าของความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสก็จะใช้องค์ประกอบความถี่ของกระแสมาวิเคราะห์ โดยที่สมการ ข้างล่างจะเป็นการกำหนดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของศักดาไฟฟ้าซึ่งจะมีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (3.2)$$

ค่าของสัปดาห์ไฟฟ้าที่เพี้ยนไป ซึ่งเป็นผลเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้างสัปดาห์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ สามารถแสดงในค่าตัวประกอบความเพี้ยนของสัปดาห์ไฟฟ้า (Voltage Distortion Factor, VDF) โดยเป็นค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัปดาห์ไฟฟ้าสูงสุดของฮาร์โมนิกส์กับสัปดาห์ไฟฟ้าสูงสุดมูลฐาน

$$VDF(\%) = \frac{V_{m,k}}{V_{m,1}} \times 100\% \quad (3.3)$$

โดยมีลักษณะการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านอนุกรมเข้ากับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส เพื่อป้อนสัปดาห์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ดังรูปที่ 3-5

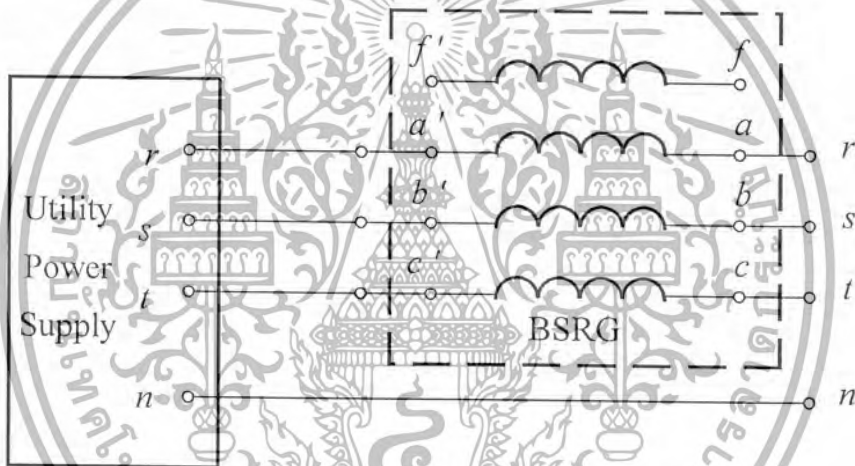


รูปที่ 3-5 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดสัปดาห์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยมีสมการสัปดาห์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งสัปดาห์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะประกอบด้วยสัปดาห์ไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานรวมกับสัปดาห์ไฟฟ้าอันดับที่ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ จากสัปดาห์ไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสามารถที่จะแบ่งออกเป็นสองแบบตามการเรียงลำดับเฟสของสัปดาห์ไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามการเรียงลำดับเฟสของฮาร์โมนิกส์ ซึ่งใช้การอ้างอิงจากการเรียงลำดับเฟสของสัปดาห์ไฟฟ้าความถี่มูลฐาน โดยมีสมการอันดับที่ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ สัปดาห์ไฟฟ้าลำดับบวก (Positive Sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อดังรูปที่ 3-6

$$\begin{aligned}
 v_R(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\
 v_S(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 120^\circ + \phi_k) \\
 v_T(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 240^\circ + \phi_k)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

ซึ่งลักษณะการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส การต่อจะใช้การอ้างอิงของลำดับเฟส r, s, t โดยขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในกรณีที่ต่อให้ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก เฟส r จะนำไปต่อกับขั้ว a' เฟส s จะนำไปต่อเข้ากับขั้ว b' และเฟส t จะนำไปต่อเข้ากับขั้ว c' ตามลำดับ ส่วนปลายขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์จะนำไปต่อเพื่อจ่ายศักดาไฟฟ้าในการทดสอบ ในกรณีที่ต่อให้ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบก็จะอาศัยการต่อสลับขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ระหว่างขั้ว b' และขั้ว c'

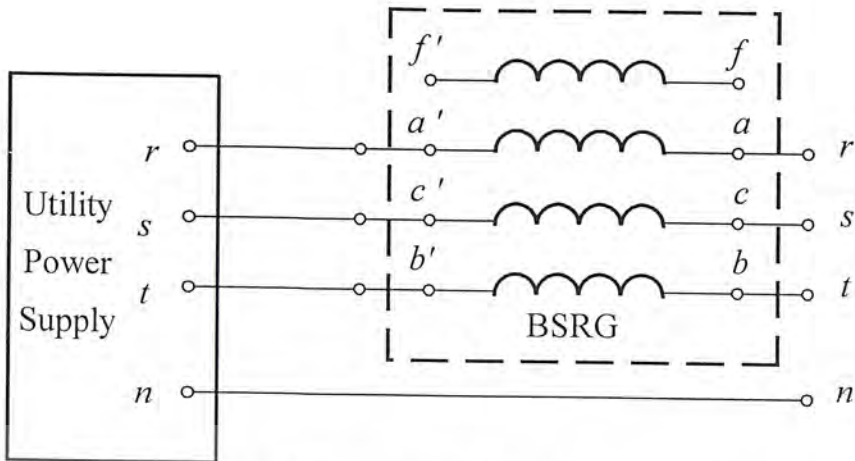


รูปที่ 3-6 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก

และมีสมการอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ (Negative Sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อดังรูปที่ 3-7

$$\begin{aligned}
 v_R(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\
 v_S(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 120^\circ + \phi_k) \\
 v_T(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 240^\circ + \phi_k)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ตัดคาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ

3.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์โมนิกส์

3.2.1 การสูญเสียทองแดง

การสูญเสียเนื่องจากทองแดงนี้จะสัมพันธ์กับค่าสูญเสียกับค่าอุณหภูมิและผลของสกินเอฟเฟค (Skin Effect) บนขดลวด ซึ่งค่าของสกินเอฟเฟคในขดลวดสเตเตอร์ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในกรณีใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับพิกัดภาระ จะไม่นำมาพิจารณาแต่ผลของสกินเอฟเฟคจะมีมากในกรณีของแท่งตัวนำในโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ค่าของสกินเอฟเฟคจะไม่นำมาคิดโดยเปรียบเทียบกับค่าสลิปของความถี่มูลฐาน แต่จะใช้คิดกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นจากสเตเตอร์จะถูกเหนี่ยวนำไปที่โรเตอร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลของสกินเอฟเฟค ค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ (f_k) จะแสดงได้ดังสมการ

$$R_{rm} = R_{rdc} (1 + C_1 d f_k^{0.5}) \tag{3.6}$$

- เมื่อ R_{rdc} คือค่าของความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง
- d คือค่าความลึกของแท่งตัวนำ (Bar depth)
- C_1 คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและวัสดุ

โดยจำนวนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่นำมาคิดพิจารณานั้นจะใช้ การคำนวณแบบทับซ้อนโดยจะคิดที่ละความถี่ของฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก

การประมาณค่าของการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กซึ่งเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กของฮาร์มอนิกส์จะทำให้ยากซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้ในการทำแกนเหล็ก จึงต้องสันนิษฐานค่าการสูญเสียจากแกนเหล็ก โดยเป็นผลมาจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมของฮาร์มอนิกส์ (Harmonic mutual flux) สามารถใช้หลักการคิดร่วมกับการสูญเสียเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมของความถี่มูลฐาน (Fundamental mutual flux) ซึ่งจะมีสมการการสูญเสียของแกนเหล็กสเตเตอร์ (P_{cs}) ดังนี้

$$P_{cs} = k_h f \Phi^2 + k_e f^2 \Phi^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ f คือความถี่มูลฐาน

k_h คือสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

k_e คือค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสไหลวน (Eddy current)

ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าของการสูญเสียแกนเหล็กโรเตอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{cr} = k_h s f \Phi^2 + k_e (s f)^2 \Phi^2 \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่าความถี่ (f) ด้วยค่าสลิป (s) โดยที่รวมสมการการสูญเสียทั้งสองสมการข้างต้นเข้าด้วยกันจะได้สมการดังนี้

$$P_c = P_{cs} + P_{cr} = \left[k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right] f^2 \Phi^2 \quad (3.9)$$

เมื่อค่าของเส้นแรงแม่เหล็กร่วมหรือเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ จะมีค่าสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V_m) โดยที่ค่า k_c คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียแกนเหล็กดังสมการ

$$\Phi = \sqrt{k_c} \frac{V_m}{f} \quad (3.10)$$

และสมการ 3.9 สามารถที่จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_c = k_c \left[k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right] V_m^2 \quad (3.11)$$

ค่าของความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือน (R_m) สามารถที่จะหาได้ดังนี้

$$R_m = \frac{1}{k_c \left[k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right]} \quad (3.12)$$

จากสมการดังกล่าวจะสันนิษฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (k_h) และกระแสไหลวน (k_e) จะมีค่าคงที่ๆค่าความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (f_k) ใดๆ และเมื่อค่าสลิปฮาร์มอนิกส์ประมาณ 1 ($s_k=1$) ค่าความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือนที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ (R_{mk}) จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$R_{mk} = \frac{0.5}{k_c \left[\frac{k_h}{f_k} + k_e \right]} \quad (3.13)$$

จากสมการดังกล่าวข้างต้นความสัมพันธ์ของการสูญเสียแกนเหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ากำลังสอง ซึ่งก็คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งการสูญเสียแกนเหล็กนี้ค่าของการเปลี่ยนแปลงสลิปจะไม่มีผล

3.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลด

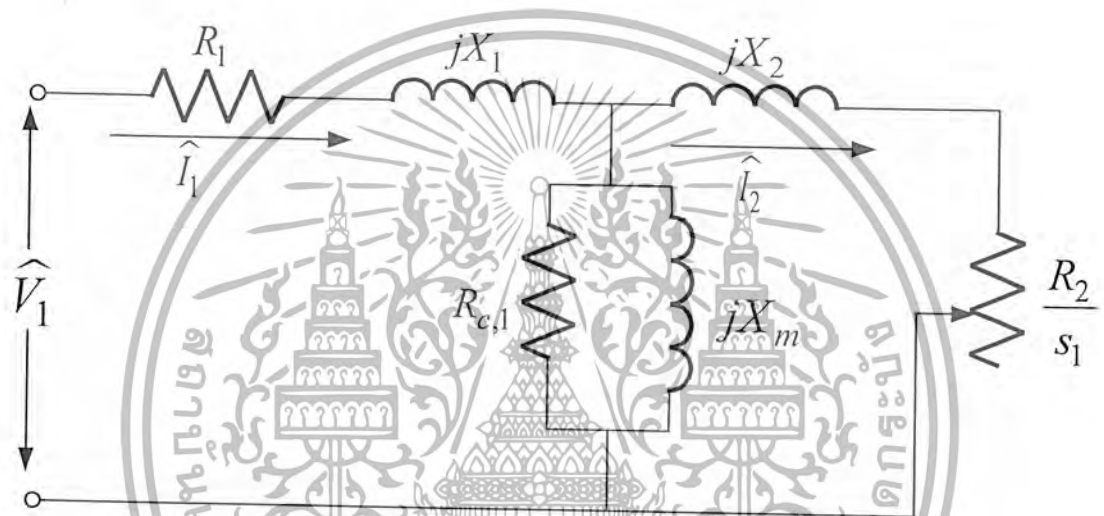
การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลดคือ การสูญเสียที่นอกเหนือไปจากการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียเนื่องจากการหมุน ในความเป็นจริงการสูญเสีย สเตรย์จะประกอบไปด้วยความสูญเสียต่างๆมากมาย โดยในทางปฏิบัติการสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก End-leakage และ Skew-leakage จะเป็นสาเหตุของการสูญเสีย สเตรย์ซึ่งจะพิจารณาในรูปแบบการสูญเสียสเตรย์ในรูปแบบลักษณะรูปแบบการสูญเสียของแกนเหล็ก โดยที่ค่าของการสูญเสียสเตรย์ที่สเตเตอร์ต่อเฟส (P_{sin}) ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (f_k) จะเป็นดังนี้

$$P_{\text{sin}} = k_{\text{sin}} \left[\frac{k_h}{f_k} + k_e \right] V_{\text{sin}}^2 \quad (3.14)$$

เมื่อ V_{sin} คือค่าแรงดันผ่านความเหนี่ยวนำสเตเตอร์รั่ว (Stator leakage inductance)
 k_{sin} คือค่าคงที่การสูญเสียสเตรย์

3.3 วงจรเสมือนต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

ผลจากฮาร์มอนิกส์ที่ปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ในปัจจุบันการวิเคราะห์ผลการปฏิบัติงานหรือสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มีการพัฒนาการวิเคราะห์อย่างแพร่หลาย ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางปฏิบัติในที่นี้จะใช้การอ้างอิงจากวงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟส ในส่วนกรณีของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์วงจรเสมือนที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ X_1, X_2 และ X_m จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ จากสาเหตุดังกล่าวการวิเคราะห์ทางปฏิบัติจึงต้องประยุกต์หลักการการซ้อนทับ (Superposition) มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยแบ่งวงจรเสมือนออกเป็นสองส่วนตามความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในส่วนของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ารูปไซน์ความถี่มูลฐาน

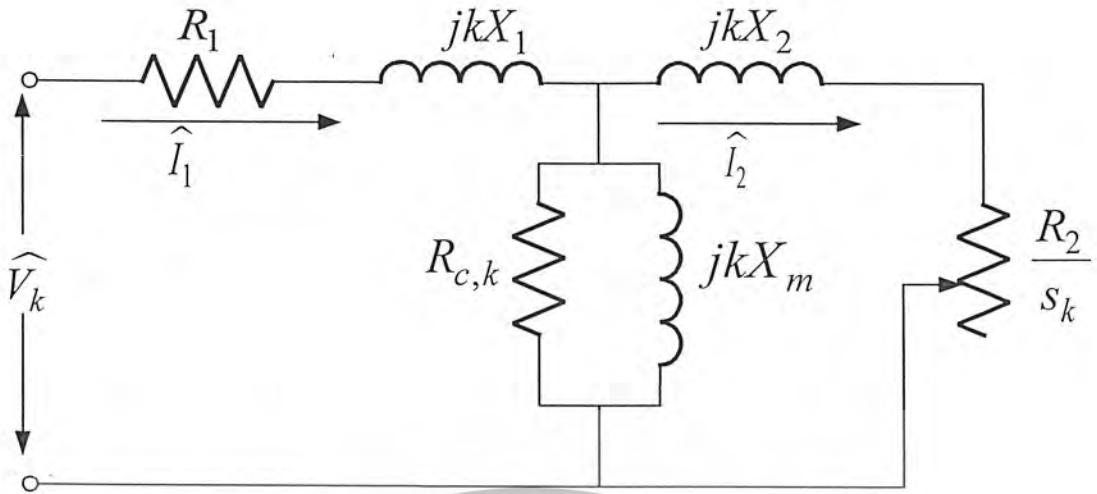


รูปที่ 3-8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน

- 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^{th} ฮาร์มอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 3-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-9 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งขั้วในกรณีความถี่ตกค่าไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

เมื่อ

\widehat{V}_k คือค่าศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

\widehat{I}_k คือค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

$R_{c,k}$ คือค่า core loss resistance ที่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

ในส่วนของการวิเคราะห์ห้วงจรเสมือนในกรณีแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานจะมีพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3-8 ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางค่านป้อนเข้า ($Z_{i,1}$) กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ($I_{i,1}$) และกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ($P_{i,1}$) จะมีสมการกำหนดดังต่อไปนี้

$$Z_{i,1} = R_1 + jX_1 + \frac{jR_{c,1}X_m \left(\frac{R_2}{s_1} + jX_2 \right)}{j \frac{R_2}{s_1} (R_{c,1} + X_m) - X_m X_2 + jR_{c,1} (X_m + X_2)} \quad (3.15)$$

$$P_{i,1} = 3V_{i,1}I_{i,1} \cos \theta_1 \quad (3.16)$$

เมื่อ

R_1 คือค่าความต้านทานที่สเตเตอร์

R_2 คือค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ Transfer to stator

X_1 คือค่า Stator leakage reactance

X_2 คือค่า Rotor leakage reactance transfer to stator

X_m คือค่า Magnetizing reactance

$R_{c,1}$ คือค่า Core loss reactance ที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนการวิเคราะห์วงจรเสมือนในกรณีแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกจะมีพารามิเตอร์ดังรูป 3-9 ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านป้อนเข้า ($Z_{i,k}$) กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ($I_{i,k}$) และกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ($P_{i,k}$) จะมีสมการกำหนดดังต่อไปนี้

$$Z_{i,k} = R_1 + kjX_1 + \frac{jR_{c,k}kX_m \left(\frac{R_2}{s_k} + kjX_2 \right)}{j \frac{R_2}{s_k} (R_{c,k} + kX_m) - kX_m kX_2 + jR_{c,k} (kX_m + kX_2)} \quad (3.17)$$

$$P_{i,k} = 3V_{i,k} I_{i,k} \cos \theta_k \quad (3.18)$$

ส่วนความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส (N_s) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (P) และความถี่ของศักดาไฟฟ้าป้อนเข้า (f) ดังสมการ

$$N_s = 120 \frac{f}{P} \quad (3.19)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนคงที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง (N_r) ซึ่งมีทิศทางการหมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐานในช่องอากาศความเร็วของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กสามารถหาค่า per unit slip ความถี่มูลฐาน (s_1) ดังนี้

$$s_1 = \frac{(N_{s,1} - N_r)}{N_{s,1}} \quad (3.20)$$

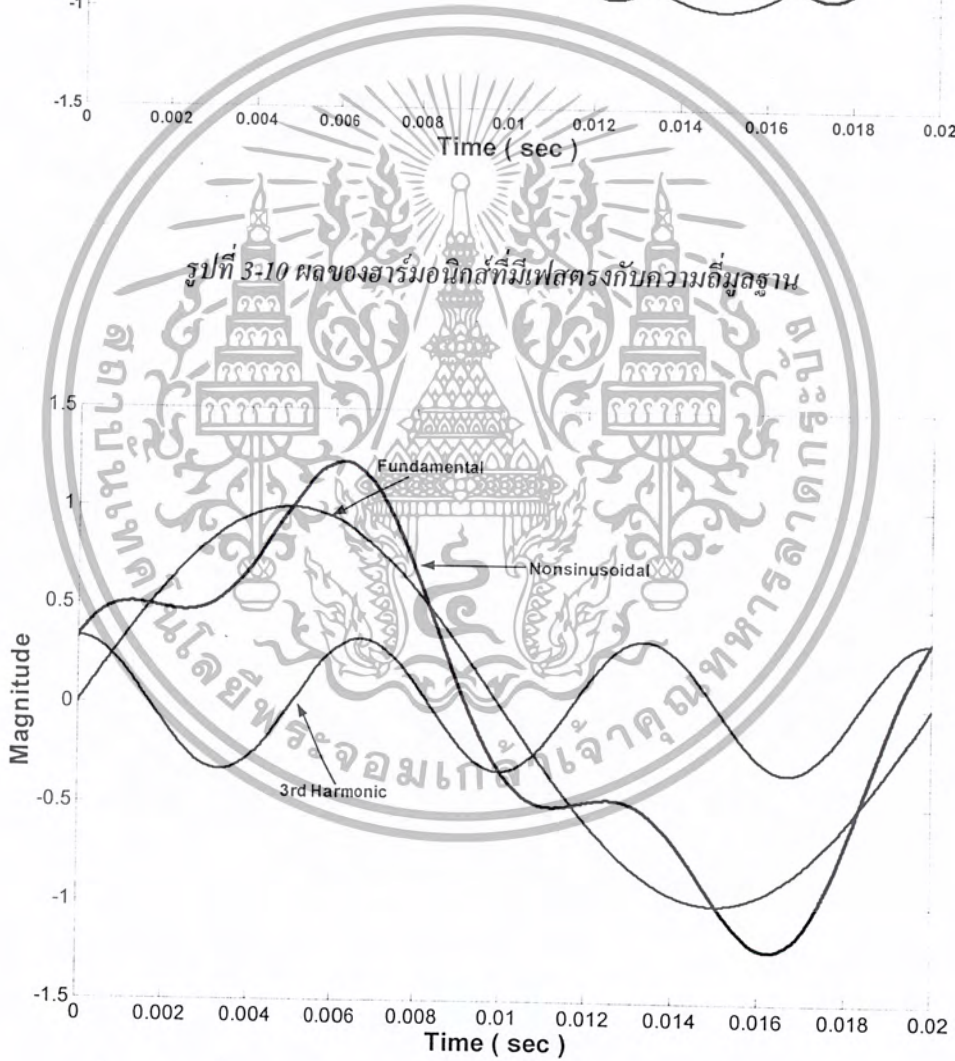
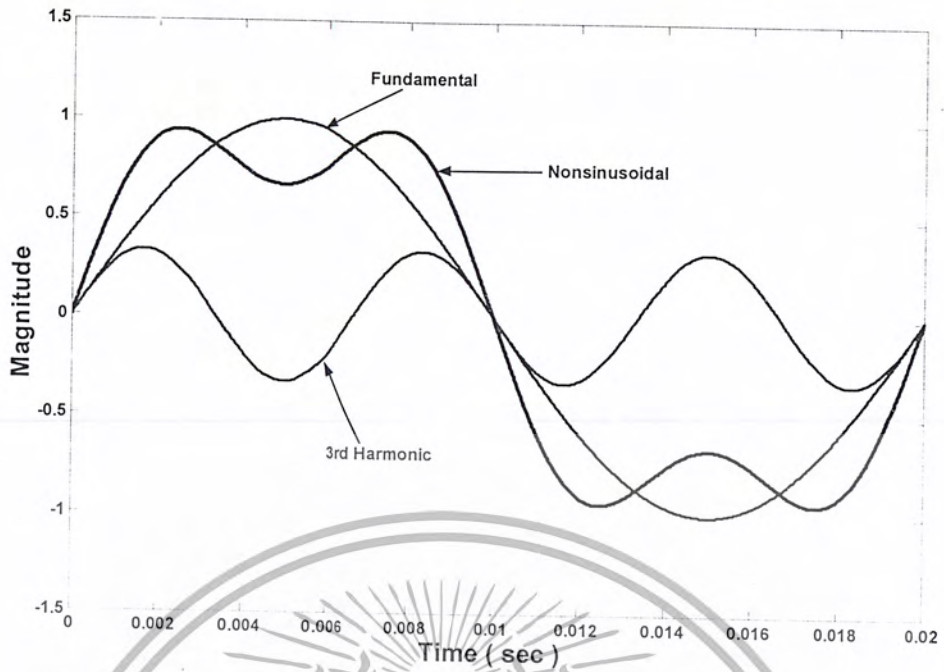
และสามารถหาค่า per unit slip ของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

$$s_k = \frac{(N_{s,k} - N_r)}{N_{s,k}} \quad (3.21)$$

3.4 รูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

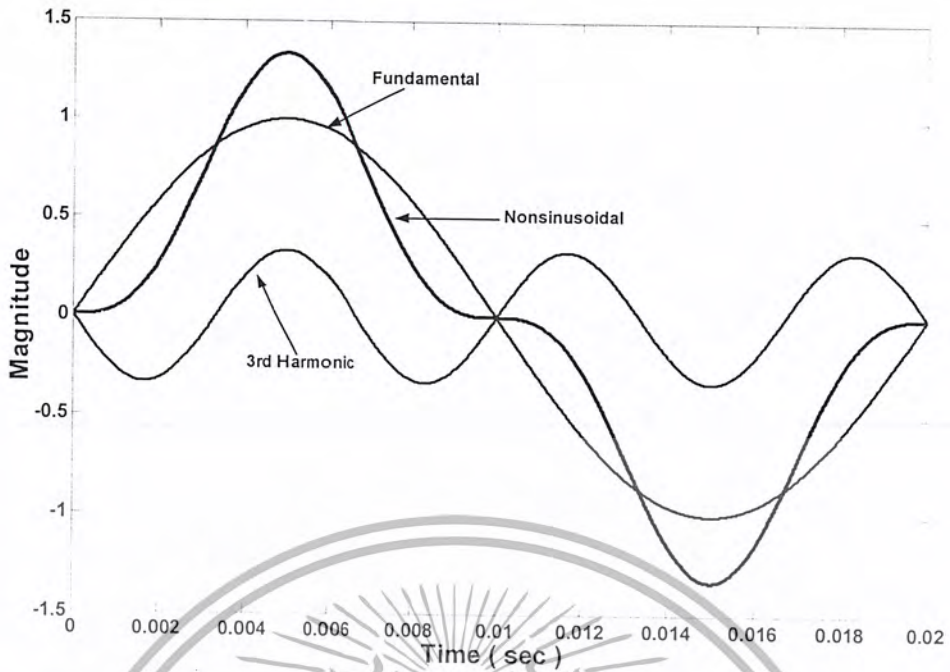
3.4.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน

ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐานสามารถที่แสดงได้ดังรูปที่ 3-10 ถึงรูปที่ 3-12 ซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเมื่อฮาร์โมนิกส์ที่นำมารวมกับความถี่มูลฐานแล้วรูปแบบของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3-11 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 ผลของฮาร์โมนิกที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา

จากรูปดังกล่าวจะยกตัวอย่างฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 มารวมกับความถี่มูลฐานสามารถที่จะเห็นผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกจะส่งผลต่อรูปสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

3.4.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ผลของสัญญาณไฟฟ้าหรือค่า root mean square (rms) จากรูปสัญญาณไฟฟ้าทั่วไปหาได้จาก $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}$ ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะสามารถที่จะหาได้โดยการกระจายค่าในองค์ประกอบของความถี่แต่ละตัว ดังรูปการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่มีรูปสัญญาณที่ซับซ้อน ดังเช่น

$$i = I_0 + I_{m,1} \sin(\omega t) + i_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots + i_{m,k} \sin(k\omega t + \alpha_k)$$

ดังนั้น

$$I = \left\{ \frac{1}{T} \left[I_0^2 + I_{m,1}^2 \sin^2(\omega t) + I_{m,2}^2 \sin^2(2\omega t + \alpha_2) + I_{m,3}^2 \sin^2(\omega t + \alpha_3) + \dots + I_{m,k}^2 \sin^2(k\omega t + \alpha_k) \right] dt \right\}^{1/2}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m,1}^2 + I_{m,2}^2 + I_{m,3}^2 + I_{m,4}^2 + \dots + I_{m,k}^2}{2}} \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\frac{I_{m,1}}{\sqrt{2}} = I_1$, $\frac{I_{m,2}}{\sqrt{2}} = I_2$ และ $\frac{I_{m,k}}{\sqrt{2}} = I_k$ แทนค่าในสมการ 3.22 จะได้

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_k^2} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.22 ข้างบนจะใช้ในกรณีของการทราบค่าสูงสุดของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ และสมการที่ 3.23 จะใช้ในกรณีที่ทราบค่าประสิทธิภาพผลของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ซึ่งจะเรียกค่าที่ได้จากสมการนี้ใหม่ว่า root - sum- square value , (rss) ซึ่งการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพผลของแรงดันไฟฟ้าก็จะใช้วิธีการคำนวณลักษณะเดียวกัน

3.4.3 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การกำหนดค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบลักษณะสมการดังต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (3.24)$$

เมื่อ $v(t) = v_{m,1} \sin(\omega t + \alpha_1) + v_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + v_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots$

และ $i(t) = I_{m,1} \sin(\omega t + \alpha'_1) + I_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha'_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha'_3) + \dots$

ดังนั้น

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [v_{m,1} \sin(\omega t + \alpha_1) + v_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + v_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots] [I_{m,1} \sin(\omega t + \alpha'_1) + I_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha'_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha'_3) + \dots] dt \quad (3.25)$$

เมื่อผลคูณระหว่างความถี่ฟังก์ชันไซน์จะมีค่า

$$\frac{1}{T} \int_0^T A \sin(n\omega t + \alpha) B \sin(n\omega t + \alpha') dt = \frac{AB}{2} \cos(\alpha - \alpha') \quad (3.26)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.26 จะใช้แทนในสมการที่ 3.25 ได้เป็น

$$P = \frac{V_{m,1} I_{m,1}}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha'_1) + \frac{V_{m,2} I_{m,2}}{2} \cos(\alpha_2 - \alpha'_2) + \frac{V_{m,3} I_{m,3}}{2} \cos(\alpha_3 - \alpha'_3) + \dots \quad (3.27)$$

เมื่อ

$$P = V_1 I_1 \cos(\alpha_1 - \alpha'_1) + V_2 I_2 \cos(\alpha_2 - \alpha'_2) + V_3 I_3 \cos(\alpha_3 - \alpha'_3) + \dots \quad (3.28)$$

จากสมการที่ 3.28 ข้างต้น จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตระหว่างผลคูณของแรงดันกับกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

การวัดและเก็บค่าข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันได้อาศัยเทคโนโลยีดิจิทัลนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้า โดยเครื่องมือดังกล่าวได้อาศัยหลักการแปลงค่า analog เป็น digital โดยการวัดเป็นช่วงคาบเวลาหนึ่ง (T) ซึ่งในช่วงเวลาของการวัดนี้ ข้อมูลจะถูกเก็บเป็นจำนวนค่าหนึ่ง (N sample) ซึ่งการวัดข้อมูลรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate) ของเครื่องมือวัดจะต้องสูงอย่างเพียงพอในการนำข้อมูลที่ได้ออกการวัดมาวิเคราะห์ต่อไป โดยจากค่าประสิทธิผล $\sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^T [f(t)]^2 dt}$ เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยนำข้อมูลที่ได้ออกการวัดมาคำนวณได้จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์ ค่าประสิทธิผลจะเป็นดังสมการที่ 3.29

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_0^{N-1} i^2 (\Delta t)} \quad (3.29)$$

และค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P) จะเท่ากับ

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} v(\Delta T) i(\Delta T) \quad (3.30)$$

เมื่อ

- v คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา
- i คือค่ากระแสไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา
- N คือจำนวนของข้อมูล

บทที่ 4

ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรเบื้องต้น (Symmetrical Components)

ในระบบไฟฟ้าสามเฟสในการพิจารณากระแสและแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรซึ่งจะอ้างอิงการเรียงลำดับของเฟสของแต่ละเฟสเทียบกัน ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน นั่นก็คือ การเรียงลำดับเฟสแบบบวก (Positive Sequence) การเรียงลำดับเฟสแบบลบ (Negative Sequence) และการเรียงลำดับเฟสแบบศูนย์ (Zero Sequence) ซึ่งค่าที่นำมาพิจารณานั้นจะใช้ค่าต่อเฟสทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า

4.1 การเรียงลำดับเฟสแบบบวก (Positive - Sequence)

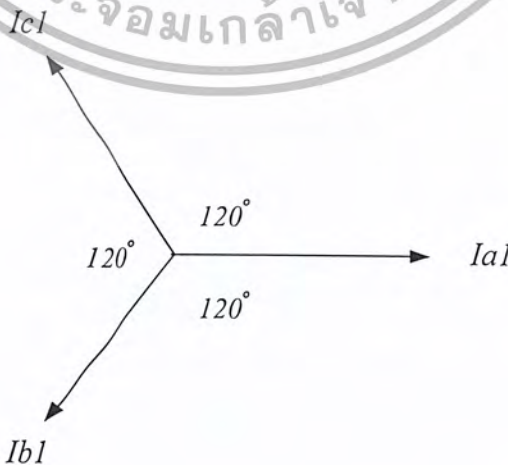
การเรียงลำดับเฟสแบบบวกจะประกอบด้วยกระแสและแรงดันต่อเฟสที่มีขนาดเท่ากัน และ มุมเฟสแตกต่างกันอยู่ 120° ซึ่งมีการเรียงลำดับเฟสเป็น a, b, c ดังแสดงในรูปที่ 4-1 ซึ่งแสดงการเรียงลำดับเฟสของกระแส และหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ของระบบที่ป้อนให้ ในทำนองเดียวกันกับค่าแรงดันไฟฟ้าก็พิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน

ในการพิจารณามุมเฟสเพื่อค่าสะดวกในการพิจารณาจะแทนด้วยเฟสเซอร์หนึ่งหน่วยและมุมเท่ากับ 120° ด้วยตัวแปร a

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \tag{4.1}$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 + j0.866 \tag{4.2}$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1.0 + j0 \tag{4.3}$$



รูปที่ 4-1 กลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบบวก(Positive -Sequence Current Phasors)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{a1} = I_1 \quad (4.4)$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1} = a^2 I_1 = I_1 \angle 240^\circ \quad (4.5)$$

$$I_{c1} = a I_{a1} = a I_1 = I_1 \angle 120^\circ \quad (4.6)$$

$$V_{a1} = V_1 \quad (4.7)$$

$$V_{b1} = a^2 V_1 = V_1 \angle 240^\circ \quad (4.8)$$

$$V_{c1} = a V_1 = V_1 \angle 120^\circ \quad (4.9)$$

4.2 การเรียงลำดับเฟสแบบลบ (Negative-Sequence)

การเรียงเฟสแบบลบจะประกอบด้วยกระแสและแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่มีขนาดเท่ากันและมุมเฟสห่างกัน 120 องศาหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4-2 ถ้าให้การเรียงเฟสแบบบวก (Positive Sequence) เป็น a, b, c ดังนั้นการเรียงเฟสแบบลบ (Negative Sequence) จะเป็น a, c, b หรือ Positive Sequence เป็น a, c, b ในบางระบบไฟฟ้ากำลัง Negative Sequence ก็จะเป็น a, b, c ซึ่ง Negative Sequence สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ $I_{a1} = I_1$

$$I_{a2} = I_2 \quad (4.10)$$

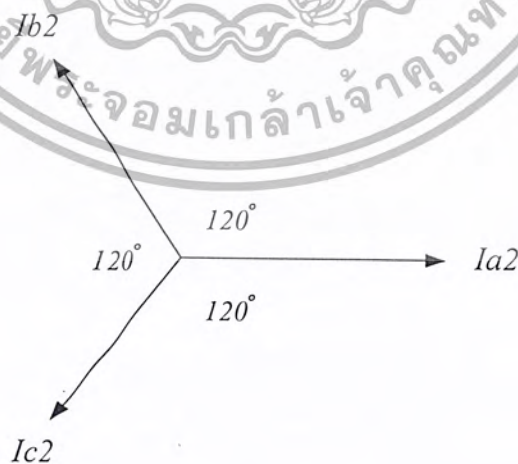
$$I_{b2} = a I_{a2} = a I_2 = I_2 \angle 120^\circ \quad (4.11)$$

$$I_{c2} = a^2 I_{a2} = a^2 I_2 = I_2 \angle 240^\circ \quad (4.12)$$

$$V_{a2} = V_2 \quad (4.13)$$

$$V_{b2} = a V_2 = V_2 \angle 120^\circ \quad (4.14)$$

$$V_{c2} = a^2 V_2 = V_2 \angle 240^\circ \quad (4.15)$$



รูปที่ 4-2 กลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบลบ (Negative-Sequence Current Phasors)

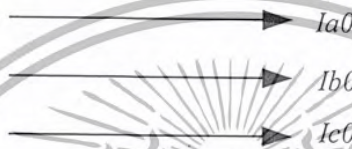
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเรียงลำดับเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence)

การเรียงเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence) สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันคือขนาดแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีขนาดเท่ากันแต่แตกต่างกันที่มุมเฟส การเรียงเฟสแบบศูนย์จะมีมุมเฟสเดียวกันทั้งสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4-3 ซึ่งแสดงได้ดังสมการ 4.16 และ 4.17

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \quad (4.16)$$

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0 \quad (4.17)$$



รูปที่ 4-3 กลุ่มเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence Current Phasors)

4.4 สมการทั่วไปในการพิจารณาองค์ประกอบสมมาตร (General Equations)

ระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่สมดุล (Unbalance Phase) เป็นการยากที่จะคำนวณหาค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเช่นนี้จะมององค์ประกอบของเน็ตเวิร์คต่าง ๆ รวมกันอยู่ นั่นก็คือจะมีส่วนที่เป็นองค์ประกอบของการเรียงเฟสแบบบวก (Positive Sequence) การเรียงเฟสแบบลบ (Negative Sequence) และการเรียงเฟสแบบศูนย์ (Zero Sequence) รวมกันอยู่ดังสมการ 4.18 ถึง 4.23

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (4.18)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (4.19)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (4.20)$$

$$V_a = V_1 + V_2 + V_0 \quad (4.21)$$

$$V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \quad (4.22)$$

$$V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \quad (4.23)$$

จากสมการ 4.18 ถึง 4.23 สามารถเขียนในรูปเมตริกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

โดยที่ค่า I_a , I_b และ I_c หรือ V_a , V_b และ V_c เป็นค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลต่อเฟส (line- to- neutral) ที่ต้องการหา เมื่อรู้ค่าองค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในทางกลับกันองค์ประกอบการเรียงเฟสแบบต่าง ๆ ก็สามารถหาได้เมื่อรู้ค่ากระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลที่เฟสต่าง ๆ ดังสมการ 4.26 ถึง 4.31

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (4.26)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (4.27)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (4.28)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (4.29)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (4.30)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (4.31)$$

จากสมการ 4.26 ถึง 4.31 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกได้เป็น

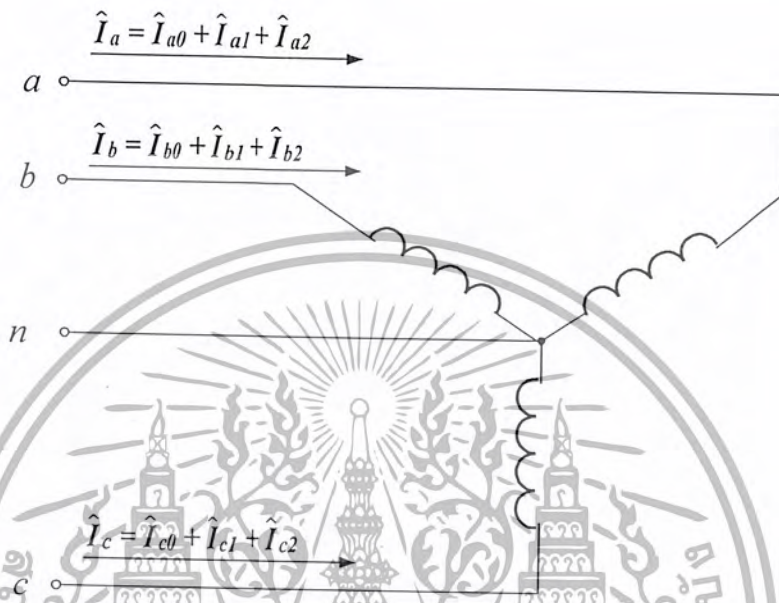
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์หม้อเตอร์โดยใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)

เนื่องจากในระบบไฟฟ้ากระแสและแรงดันไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ณ เวลาต่าง ๆ ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดการไม่สมดุลของเฟสจึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก ด้วยสาเหตุนี้เองกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดต่าง ๆ จึงเกิดการไม่สมดุลขึ้น พิจารณารูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าหม้อเตอร์ขณะที่เฟสไม่สมดุล

พิจารณารูปที่ 4-4 ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าหม้อเตอร์ขณะที่เกิดไม่สมดุลของเฟส ซึ่งกระแสหรือแรงดันจะเป็นผลรวมขององค์ประกอบลำดับเฟสแบบบวก (Positive Sequence) ลำดับเฟสแบบลบ (Negative Sequence) และลำดับเฟสแบบศูนย์ (Zero Sequence) ซึ่งการคำนวณค่าต่าง ๆ สามารถหาได้โดยนำวิธีทฤษฎีสมมาตรมาช่วยวิเคราะห์ ตามสมการ 4.26 ถึง 2.3 ในกรณีรู้ค่าของแต่ละลำดับเฟสซีแวนซ์ โดยแทนค่า I_0, I_1 และ I_2 หรือ V_0, V_1 และ V_2 ด้วยค่า I_{a0}, I_{a1}, I_{a2} หรือ V_{a0}, V_{a1}, V_{a2} ดังนั้นสมการจึงเขียนได้ดังการที่ 4.34 และ 4.35 ในกรณีที่ใช้เฟส a อ่างอิง

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือต้องการรู้ค่าองค์ประกอบของลำดับเฟสแบบต่าง ๆ ก็หาค่าได้เช่นกัน ในกรณีที่รู้ค่ากระแสที่ไหลในสายหรือแรงดันในแต่ละเฟส ดังสมการที่ 4.36 และ 4.37

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.37)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

การทดสอบในโครงการวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวน 3 ตัว 3 ขนาด ในการทดสอบโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 3 ตัว จะมีคุณลักษณะดังนี้

มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

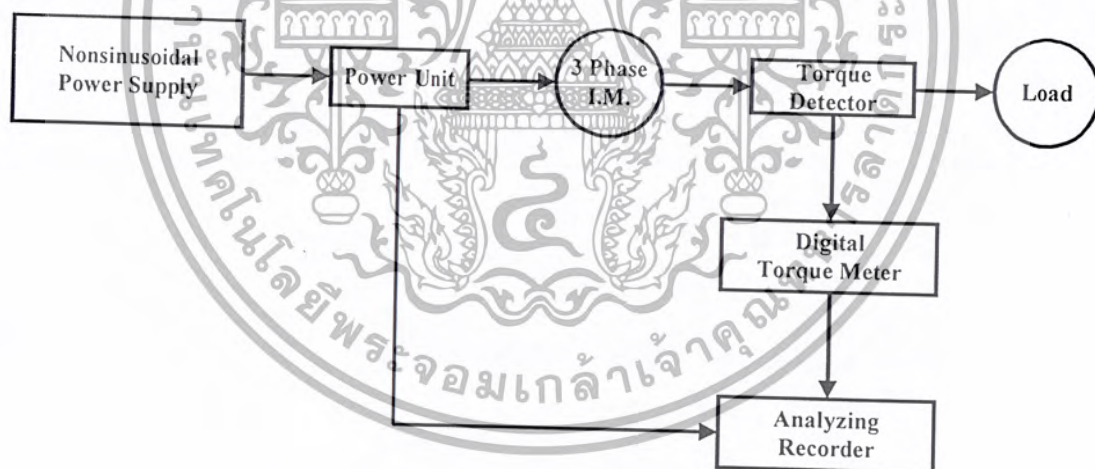
3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 2.0 แอมป์ ความเร็วรอบที่พิกัด 1400 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์

มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 5.0 แอมป์ ความเร็วรอบที่พิกัด 1420 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์

มอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 7.9 แอมป์ ความเร็วรอบที่พิกัด 1420 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์



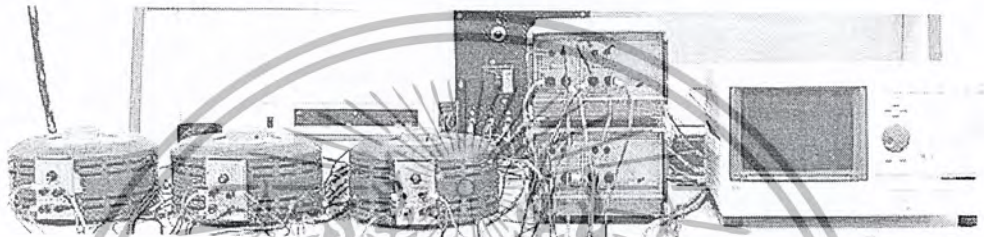
รูปที่ 5-1 แผนภูมิการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

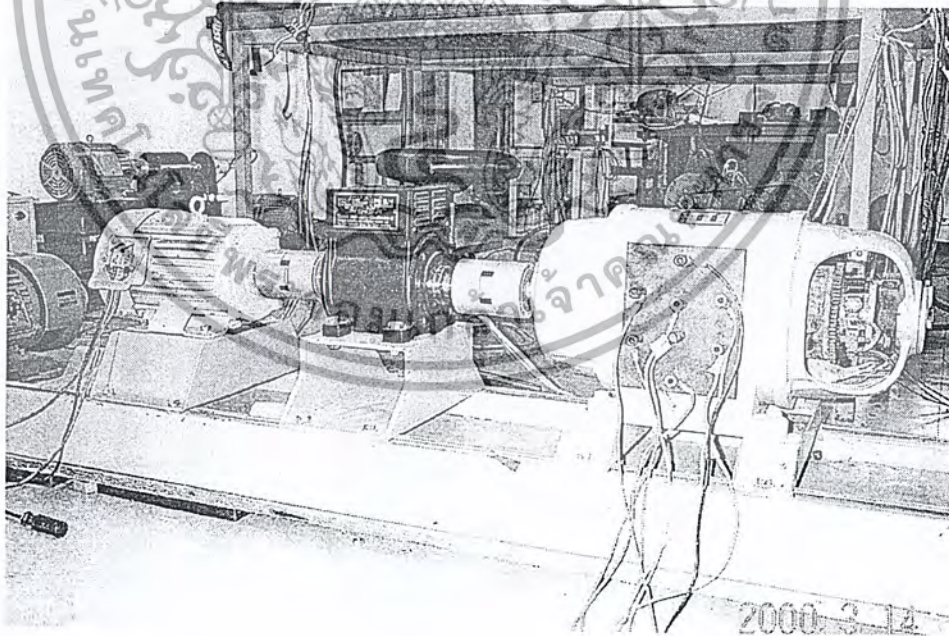
- Power unit ของ Yokogawa Model 365961 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสแบบปรับค่าเป็นอัตราส่วนจำนวน 3 ตัวทำหน้าที่จ่ายสถานะแรงดันและกระแสไฟฟ้าป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยมีค่าความถูกต้อง 0.2 % of range และความถี่ของการวัด 50 to 60 Hz with higher harmonics of up to 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Torque detector และ Digital Torque meter ของ Ono Sokki model TS-200 ทำหน้าที่วัดและแสดงผลของแรงบิดและความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- Analyzing Recorder ของ Yokogawa Model AR 1100A ทำหน้าที่บันทึกค่าข้อมูลแรงดันกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด-ความเร็วที่เพลลา โดยใช้ค่า Sampling rate ตลอดการทดสอบที่ 50 kHz และค่าช่วงความยาวของข้อมูลที่ทำการวัดจำนวน 2000 ข้อมูล
- Load ทำหน้าที่เป็นภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยภาระที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาด 220 โวลต์ พิกัดกระแส 16 แอมป์ 3 กิโลวัตต์



รูปที่ 5-2 การต่ออุปกรณ์การทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5-3 การต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประสงค์ของการทดสอบในโรงงานนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะเริ่มจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปลงถ่าน การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า การทดสอบขณะขับโหลดภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้าและการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ป้อนฮาร์มอนิกส์แบบสามเฟสไม่สมดุล (Unbalance)

5.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปลงถ่าน

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปลงถ่าน เพื่อหาค่าเชิงโครนัสอิมพีแดนซ์ และหากราฟคุณลักษณะเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบในลำดับต่อไป โดยทำการทดสอบขณะที่ไม่มีโหลด เปิดวงจร (Open - Circuit Test) และลัดวงจร (Short - Circuit Test) ดังนี้

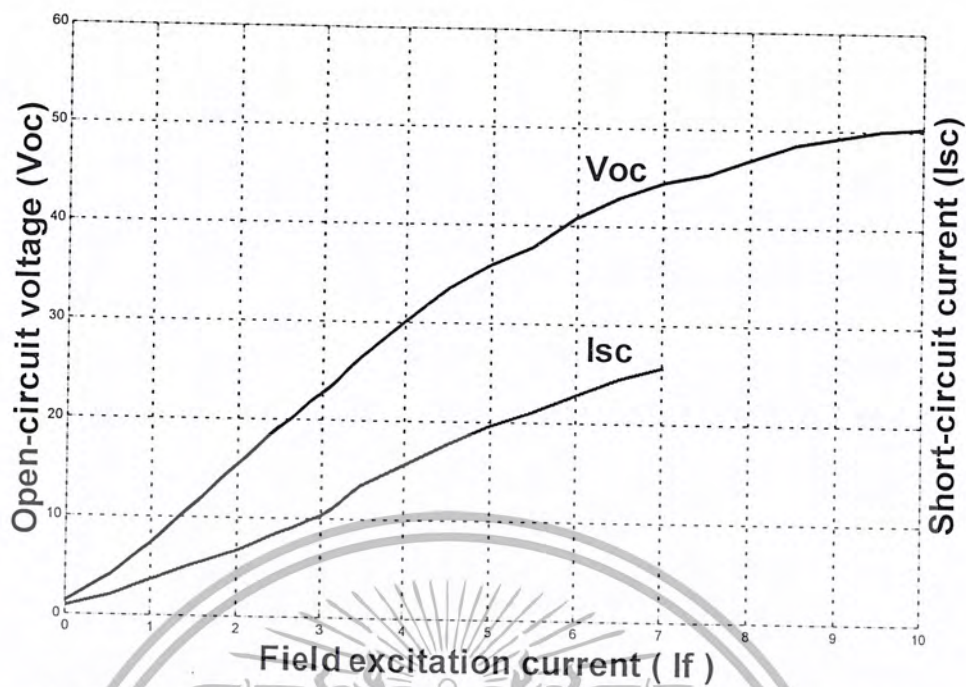
5.1.1 การทดสอบเปิดวงจร

เป็นการทดสอบเพื่อหา Magnetization Curve ด้วยการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความเร็วเชิงโครนัสแล้วค่อยๆ เพิ่มกระแสกระตุ้น (I_f) และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz และ 150 Hz

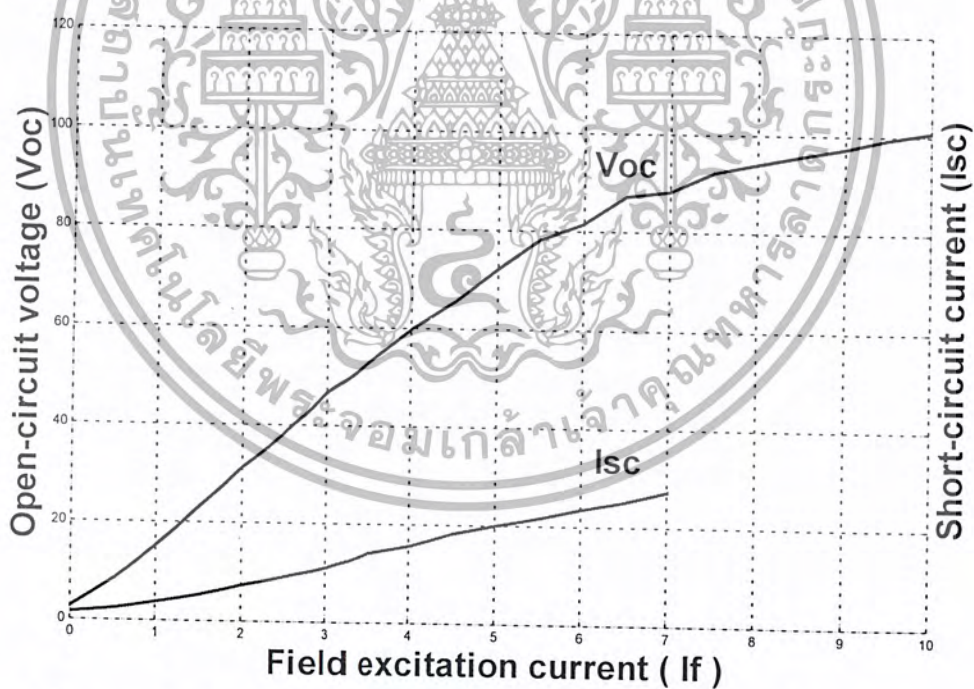
5.1.2 การทดสอบลัดวงจร

หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความเร็วเชิงโครนัส และลัดวงจรขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วค่อยๆ เพิ่มกระแสกระตุ้น (I_f) แล้วบันทึกค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz และ 150 Hz

จากผลการทดสอบทั้งสองวิธี ที่ความถี่ต่างๆ คมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสทางด้านป้อนเข้า (Input) เทียบกับกระแสกระตุ้น ดังรูปที่ 5-4 ถึง 5-7 และตารางที่ 5-8 เป็นการแสดงค่าเชิงโครนัสอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้

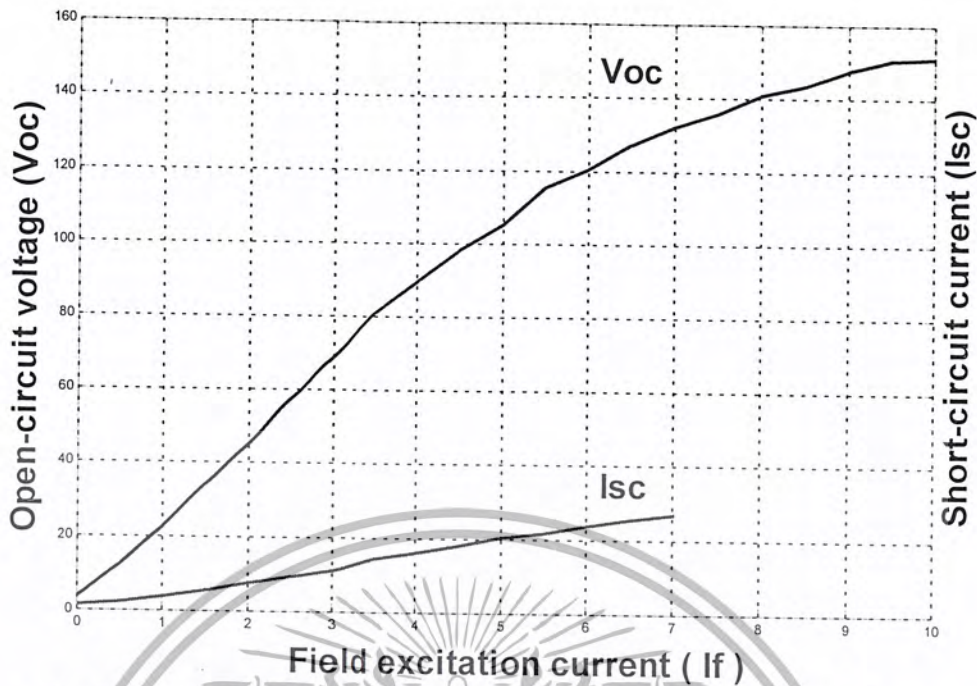


รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์จากการทดสอบ Open-Circuit และ Short-Circuit ที่ความถี่ 50 Hz

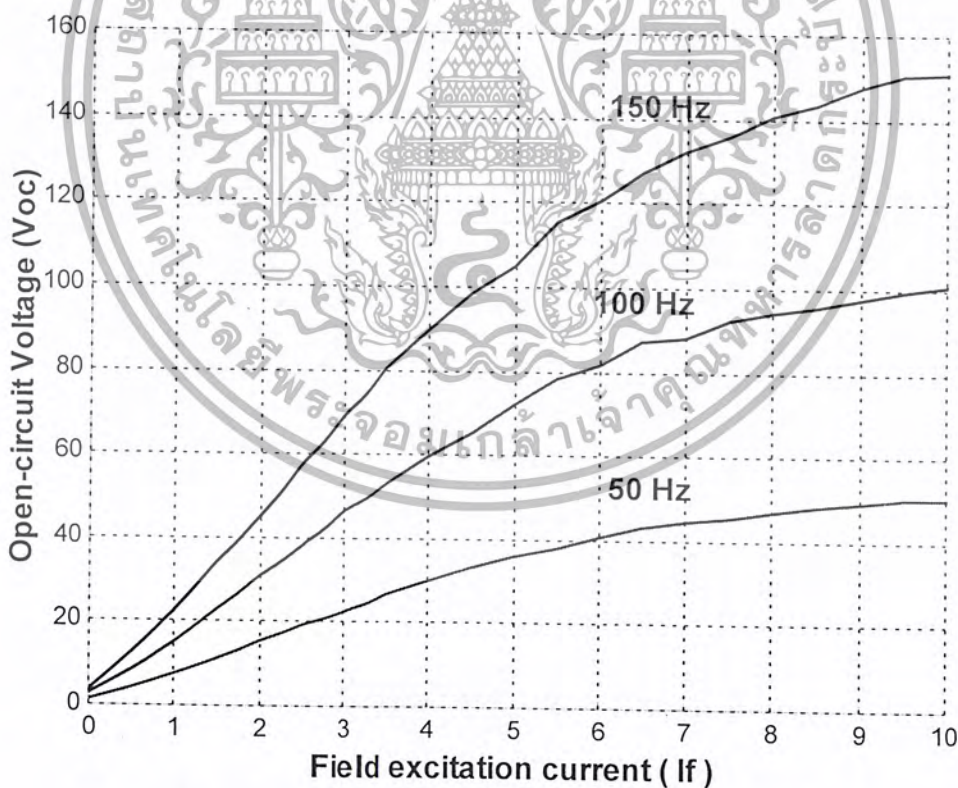


รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์จากการทดสอบ Open-Circuit และ Short-Circuit ที่ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์จากการทดสอบ Open-Circuit และ Short-Circuit ที่ความถี่ 150 Hz



รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์จากการทดสอบ Open-Circuit ที่ความถี่ต่างๆ

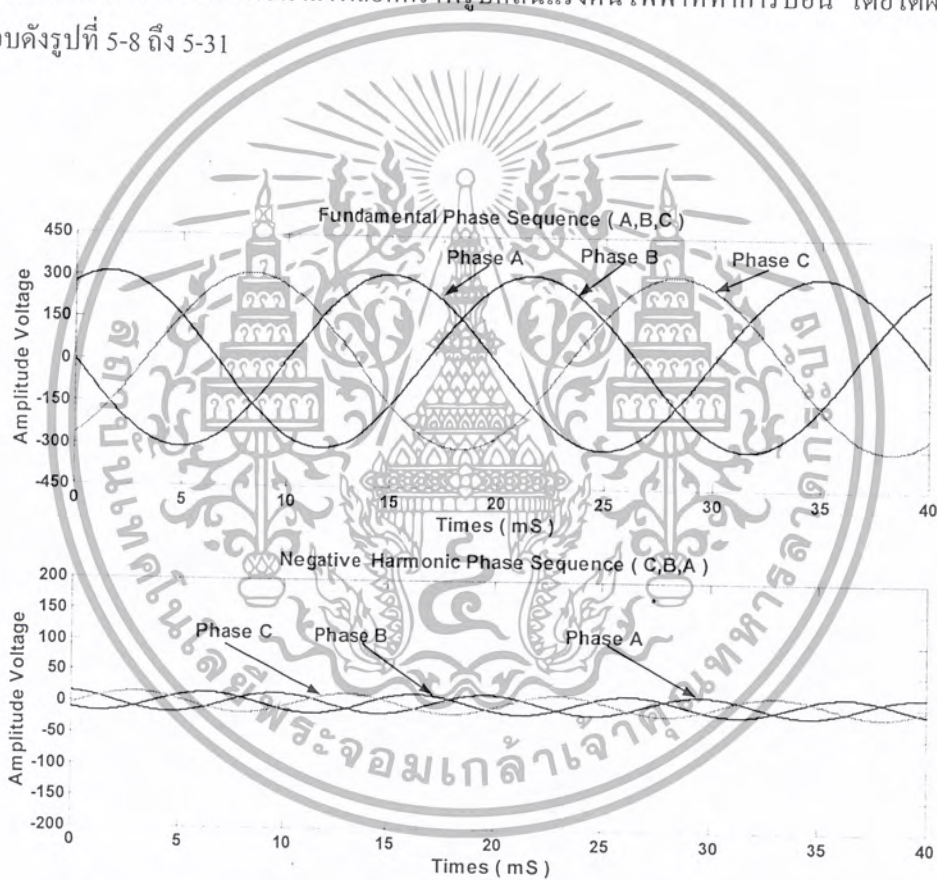
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่	V_{oc}	I_{sc}	I_f (rated)	Z_s	R_a	X_s
50	36.03	19.67	5.00	1.832	0.448	1.776
100	72.21	19.93	5.00	3.623	0.448	3.595
150	105.22	20.40	5.00	5.158	0.448	5.138

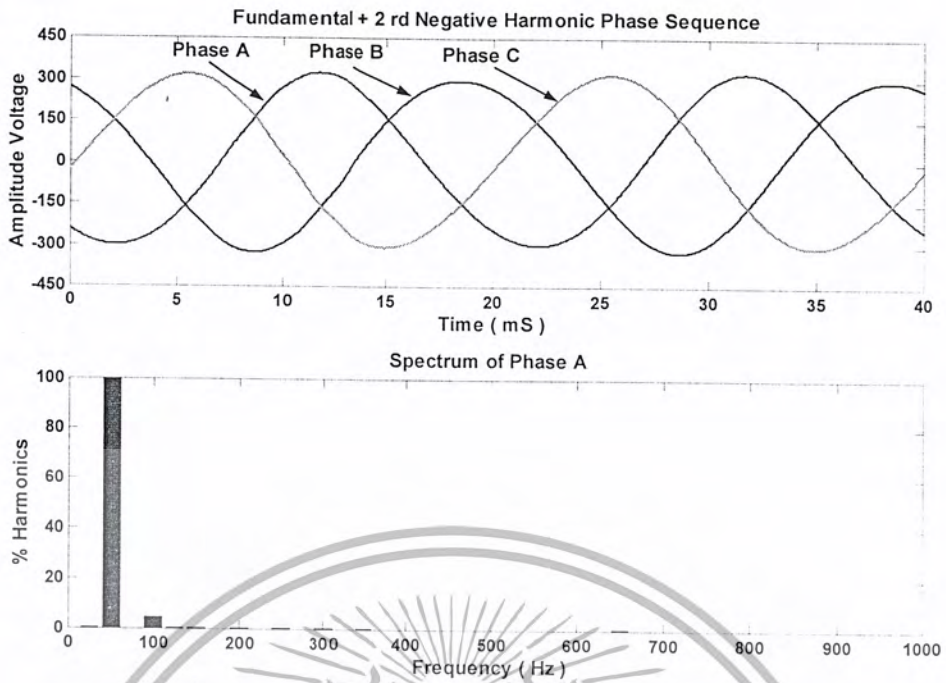
ตารางที่ 5-1 ค่าเชิงโครนัสอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 50,100 และ 150 Hz

5.2 สัญญาณตกคาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ

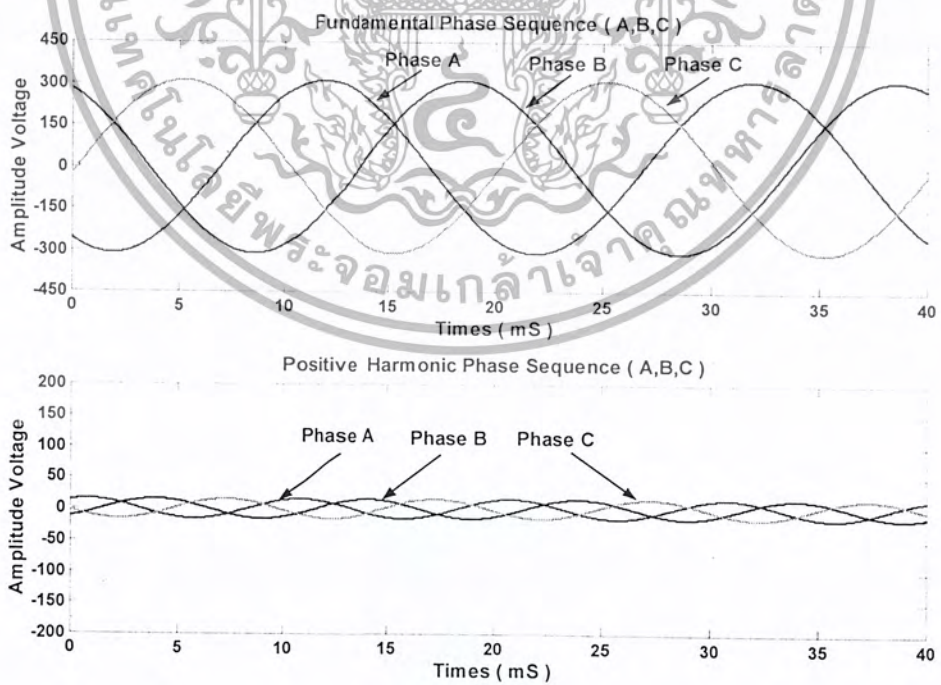
การทดสอบสัญญาณที่สร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีลำดับฮาร์โมนิกส์ที่แตกต่างกัน ที่ค่า %VDF ต่างๆ จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดัน เพื่อนำมาพล็อตกราฟรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ทำการป้อน โดยได้ผลจากการทดสอบดังรูปที่ 5-8 ถึง 5-31



รูปที่ 5-8 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบกลับลำดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์

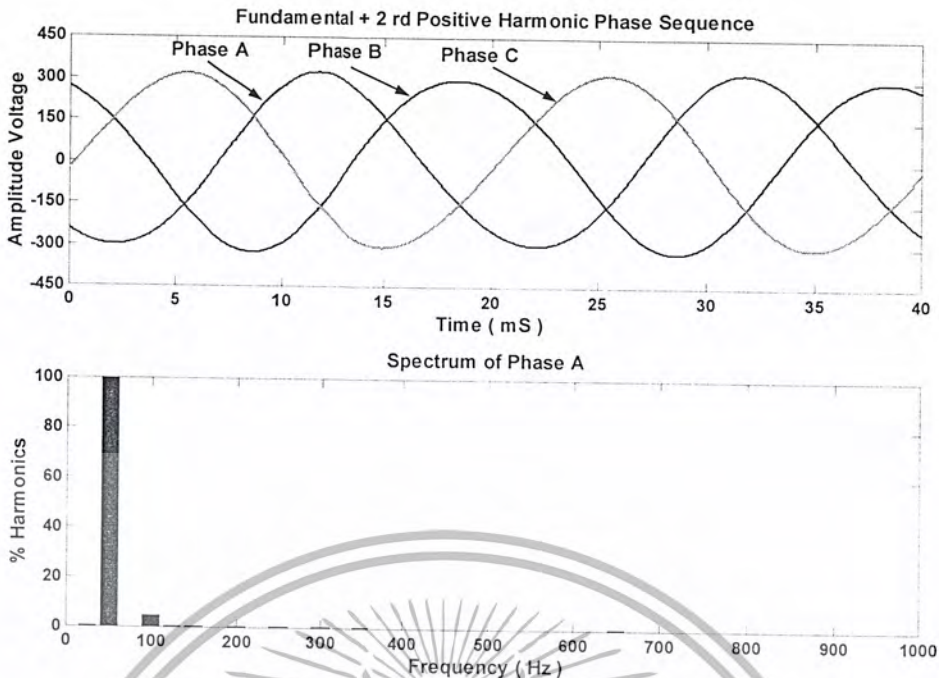


รูปที่ 5-9 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปคตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์

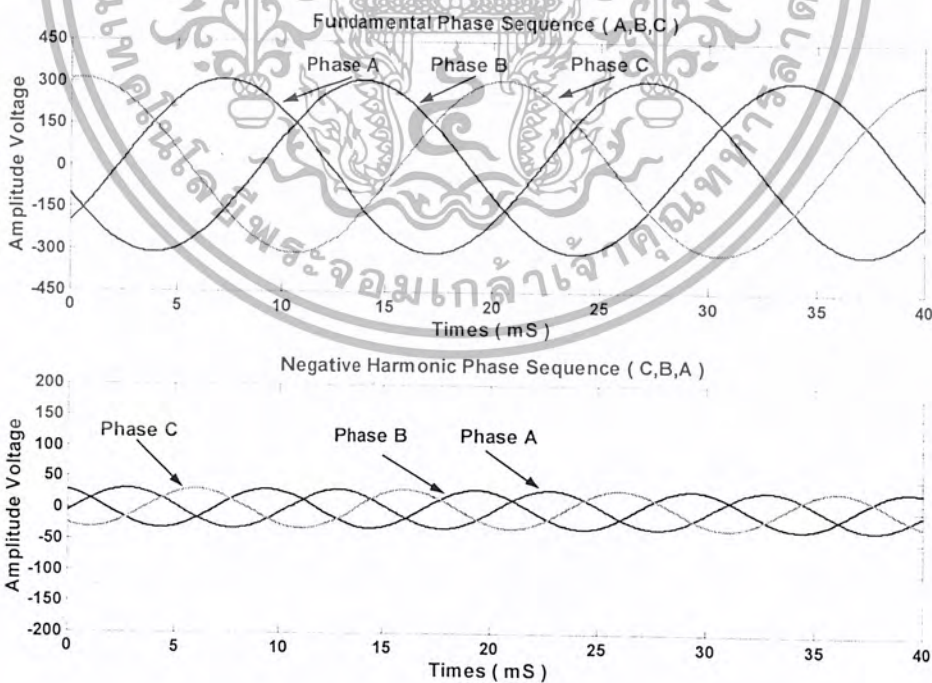


รูปที่ 5-10 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

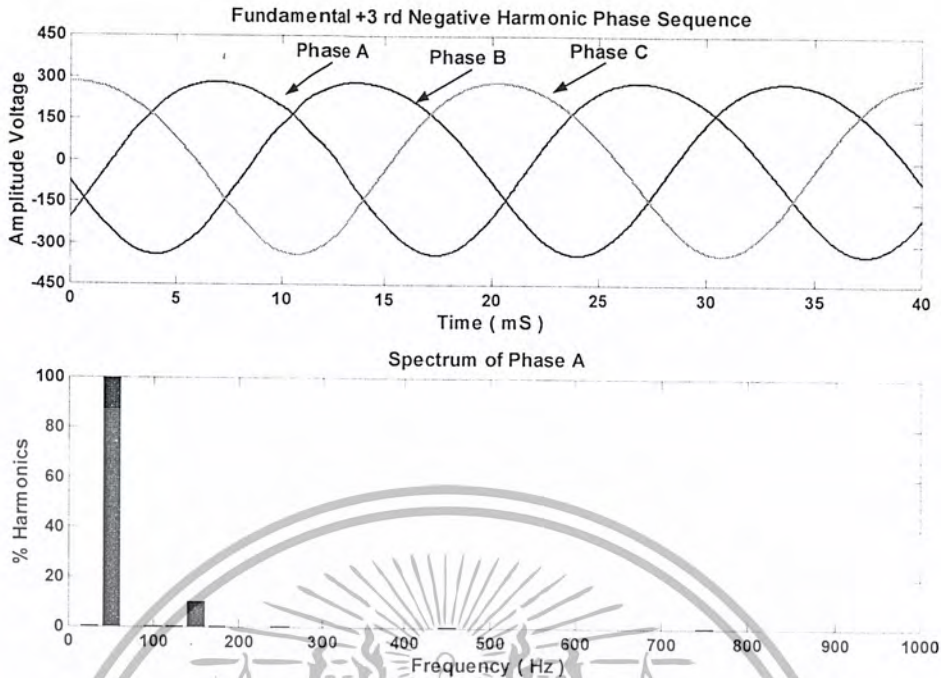


รูปที่ 5-11 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปคตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยน ตักดาไฟฟ้า 5 เปอร์เซ็นต์

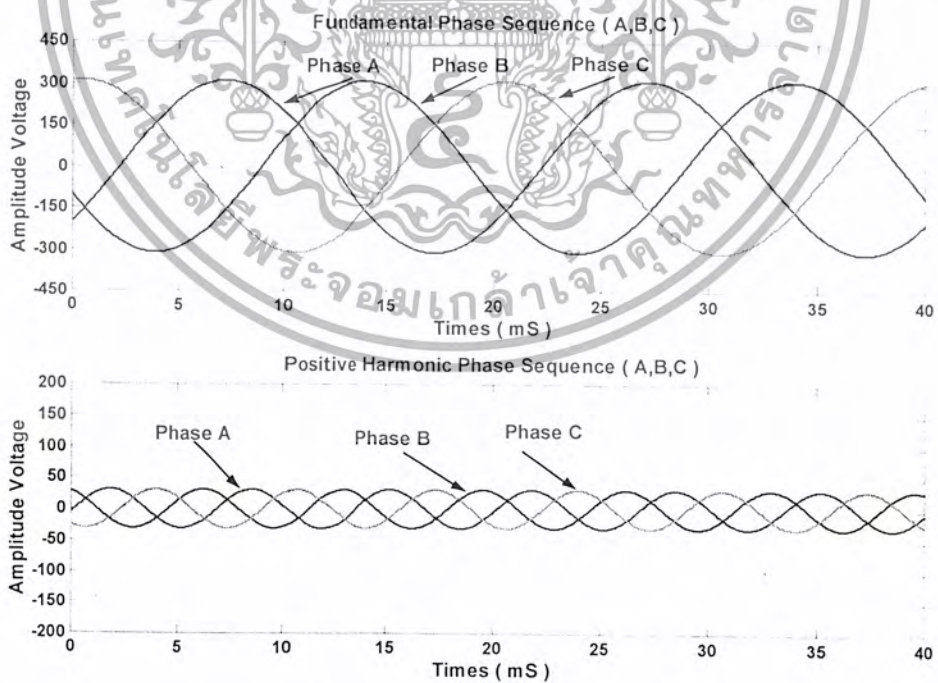


รูปที่ 5-12 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่การเรียงลำดับแบบลบ ลำดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนตักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

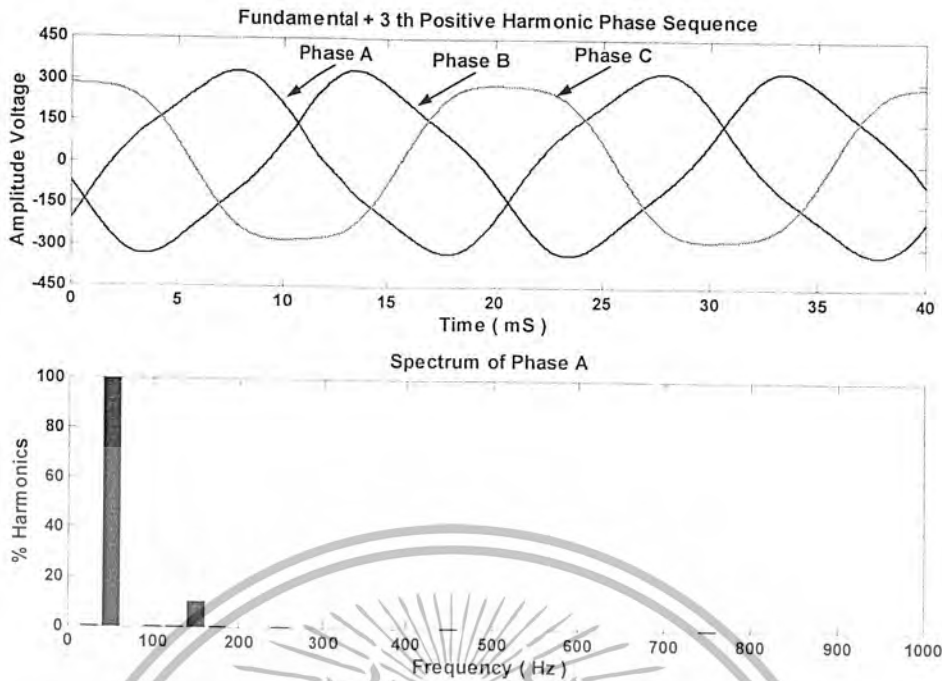


รูปที่ 5-13 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

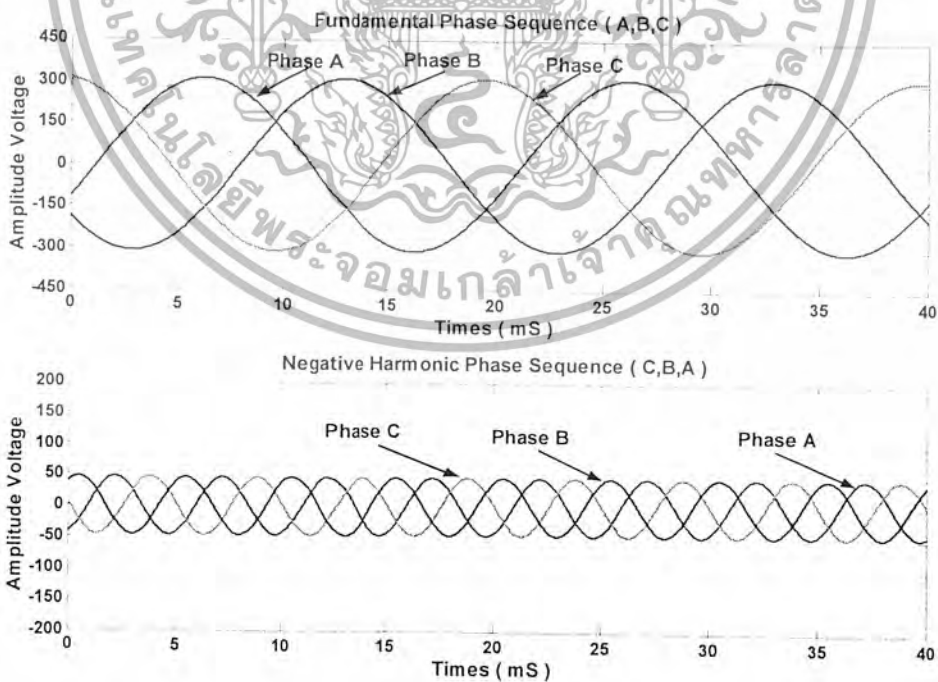


รูปที่ 5-14 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

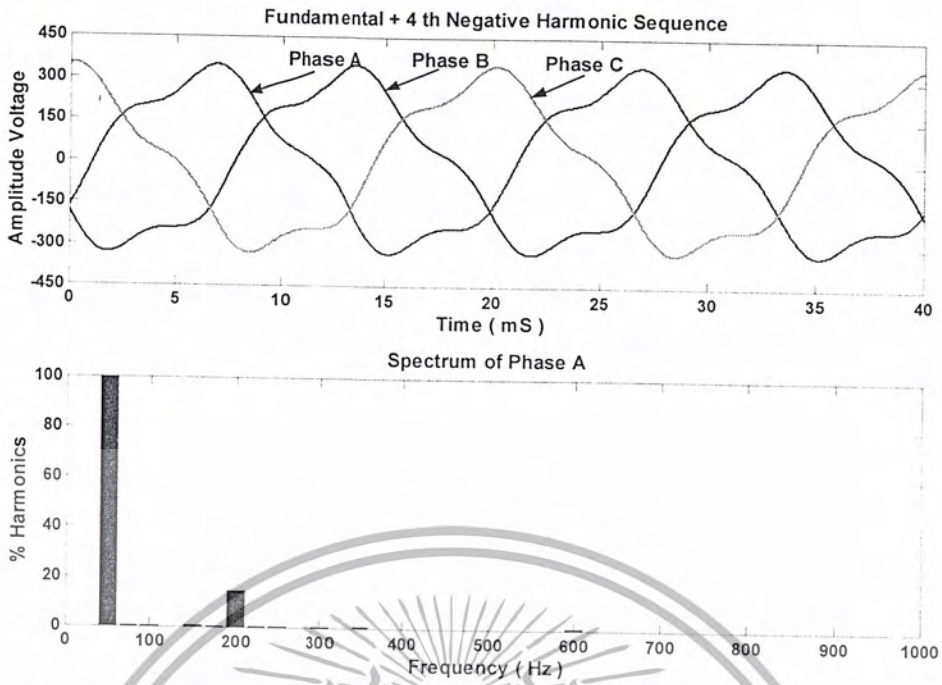


รูปที่ 5-15 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 10 เปอร์เซ็นต์

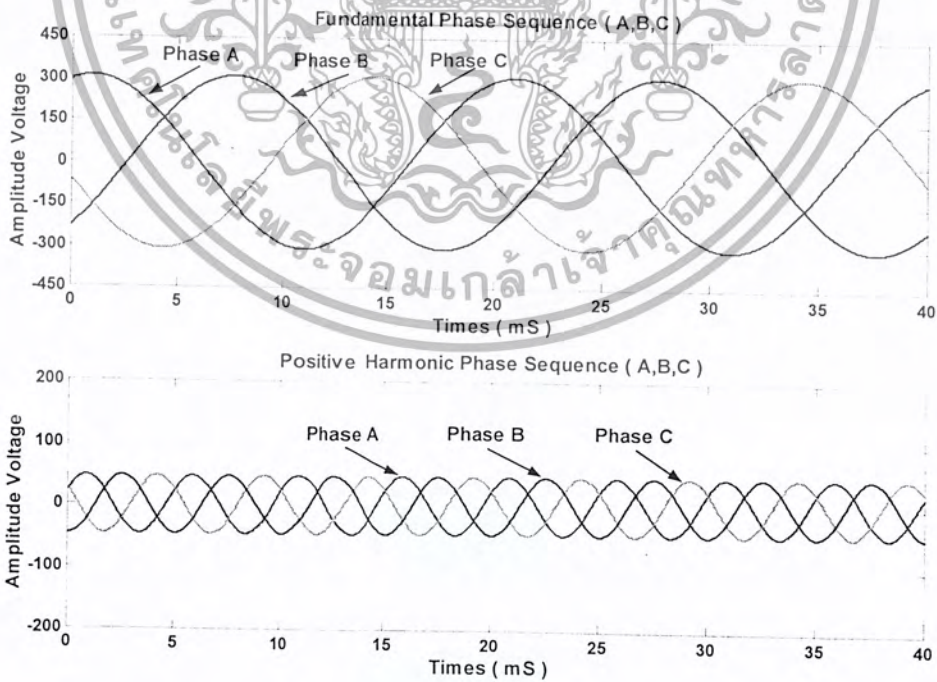


รูปที่ 5-16 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบลบ ลำดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

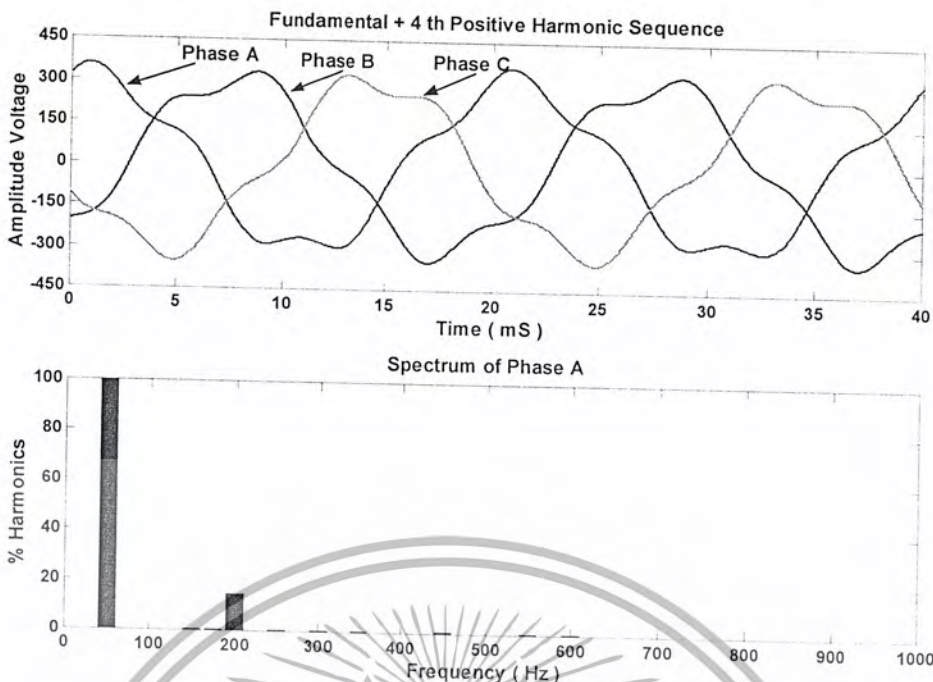


รูปที่ 5-17 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปคตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

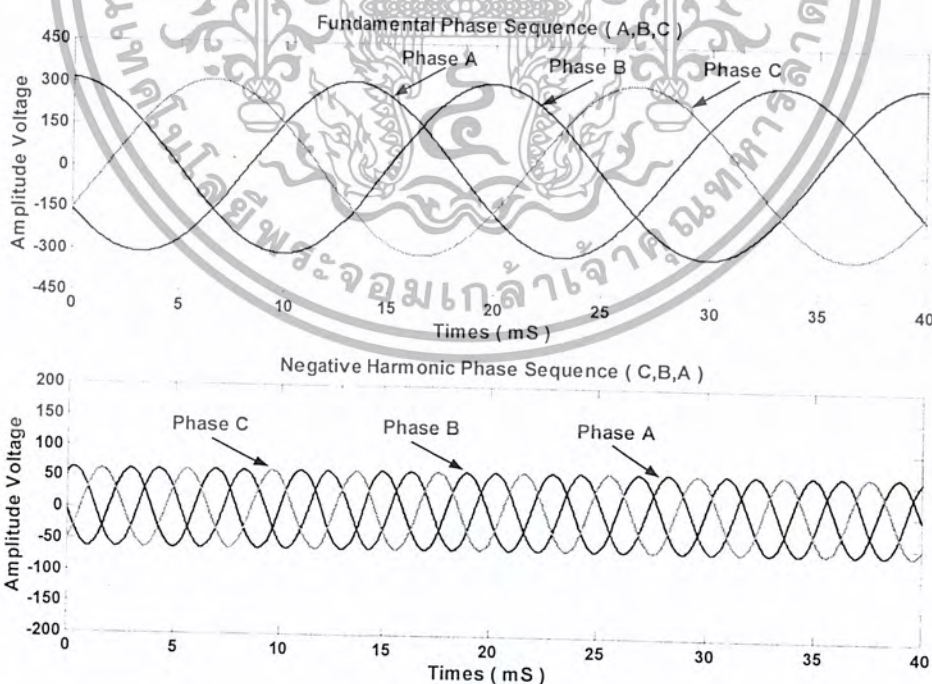


รูปที่ 5-18 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

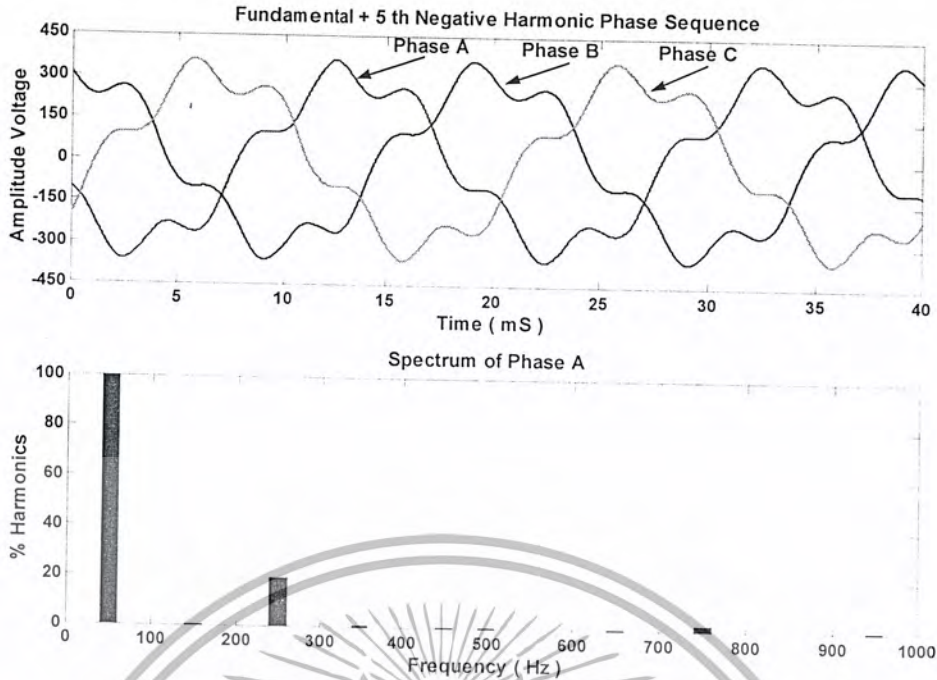


รูปที่ 5-19 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 15 เปอร์เซ็นต์

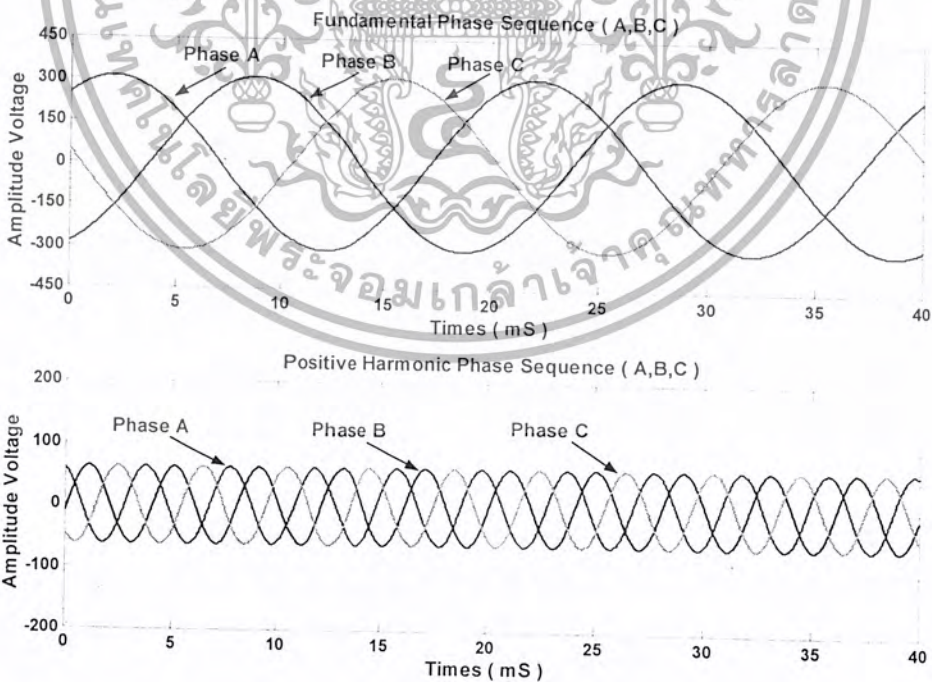


รูปที่ 5-20 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกที่มีการเรียงลำดับแบบลบ ลำดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

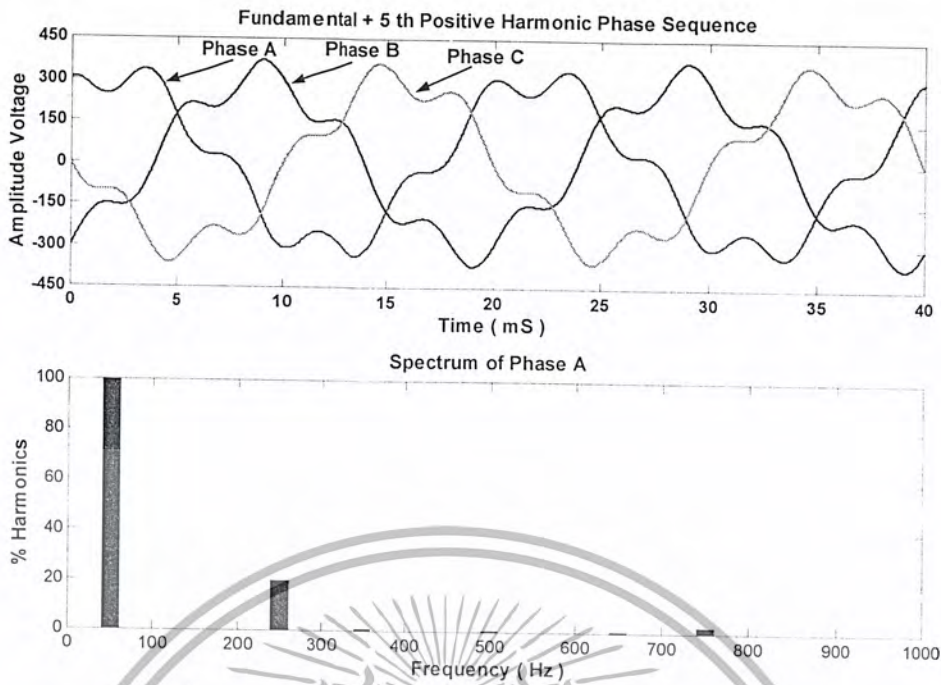


รูปที่ 5-21 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

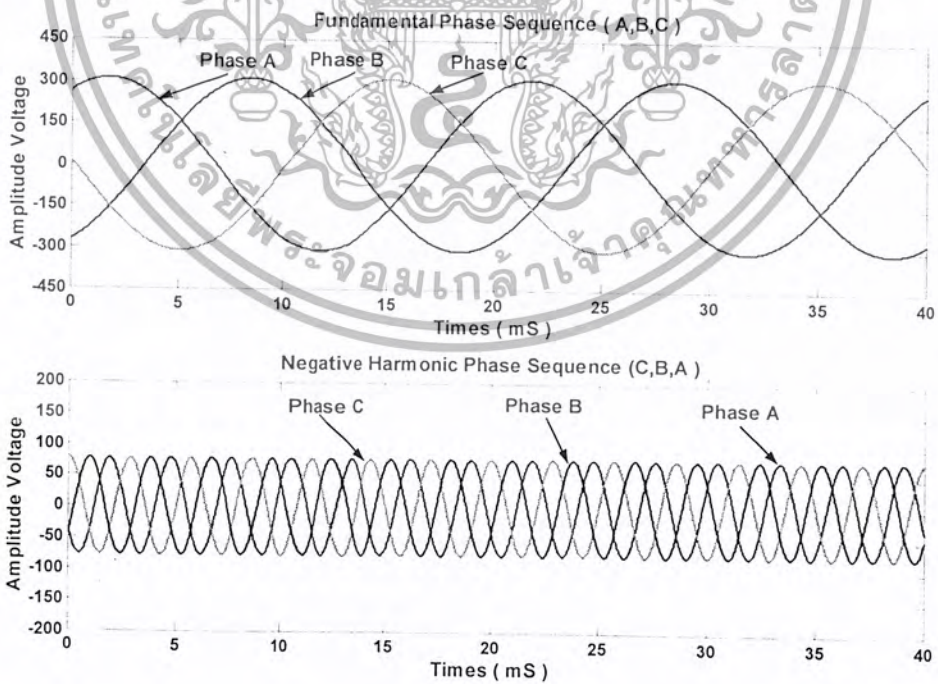


รูปที่ 5-22 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

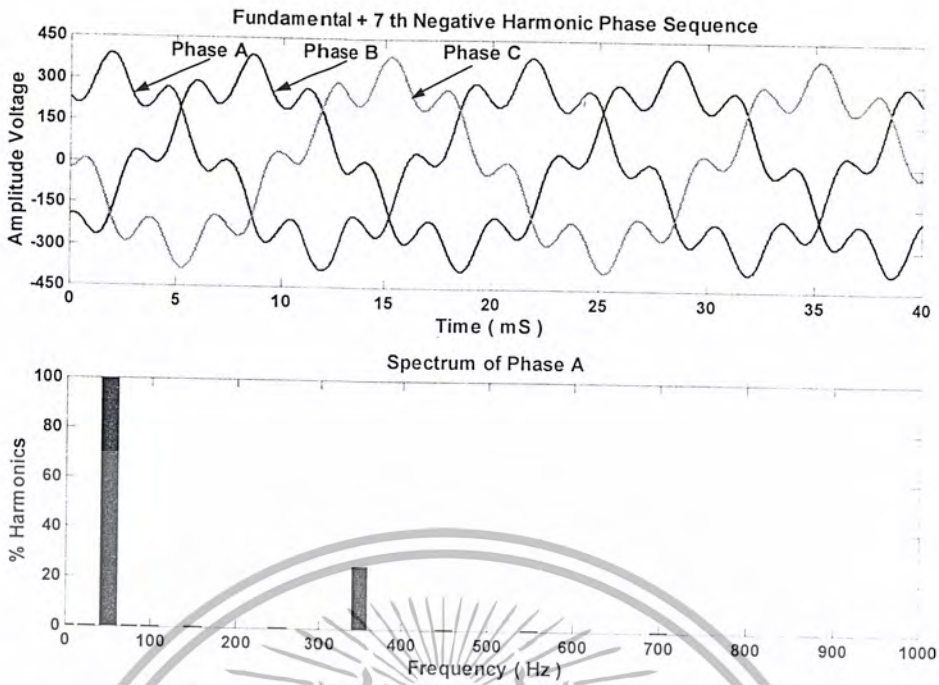


รูปที่ 5-23 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกสัที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนตักไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์

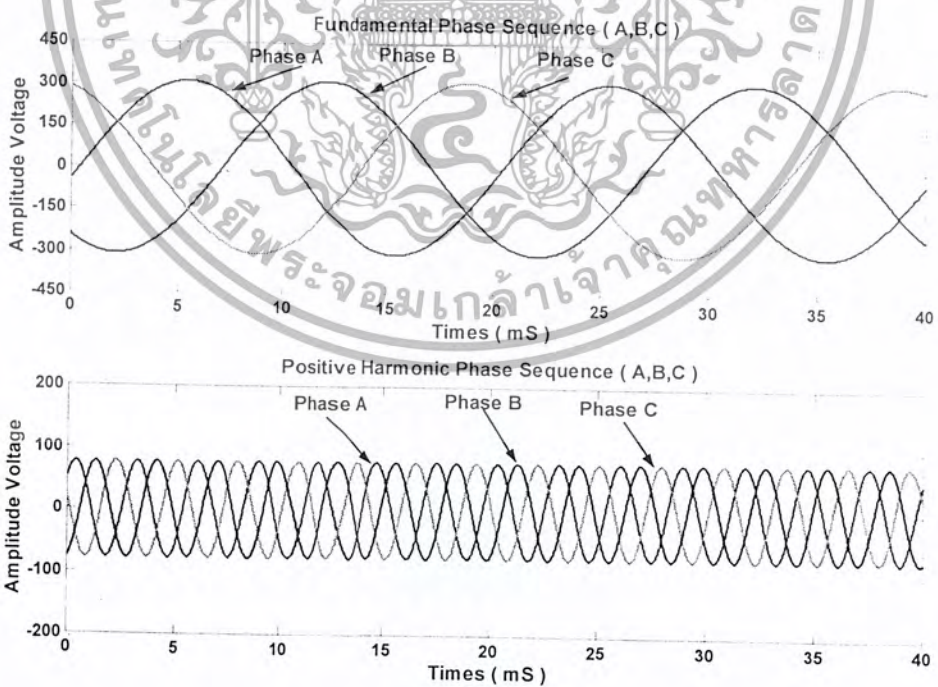


รูปที่ 5-24 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกสัที่มีการเรียงลำดับแบบลบ ลำดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนตักไฟฟ้า 25 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

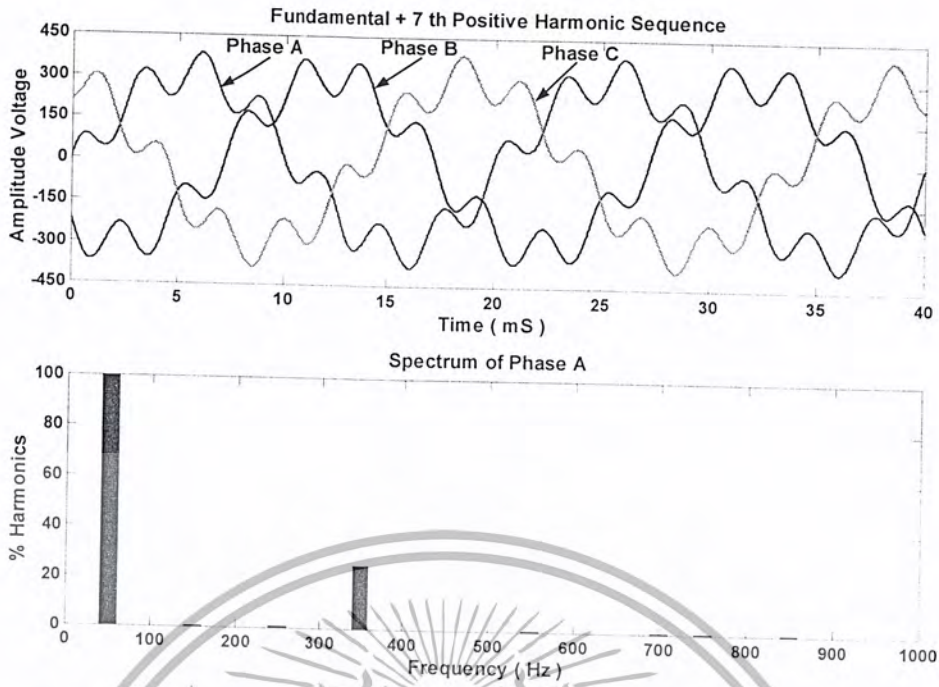


รูปที่ 5-25 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 25 เปอร์เซ็นต์

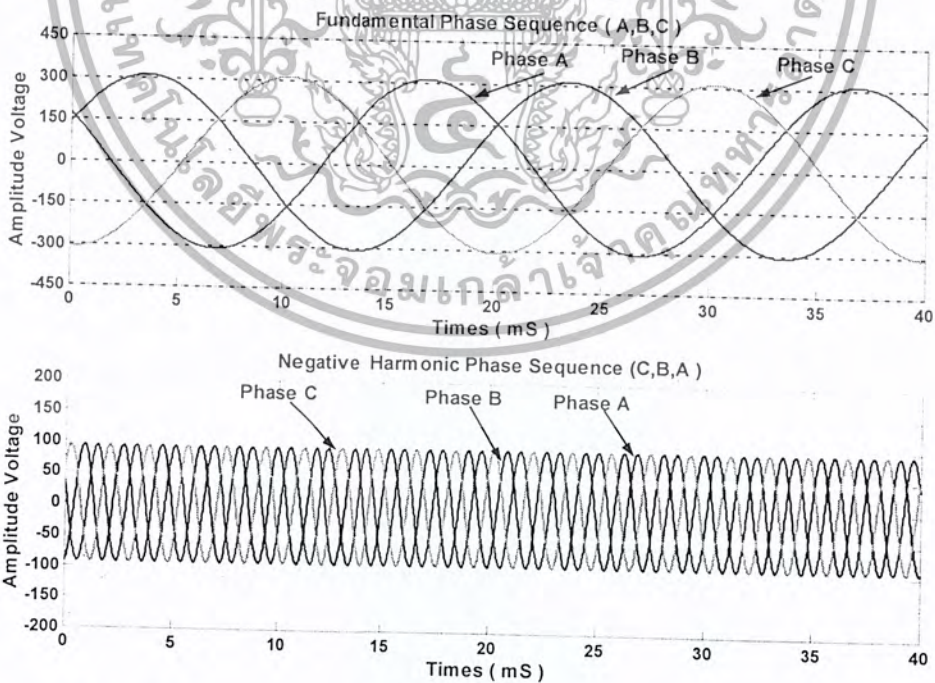


รูปที่ 5-26 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 25 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

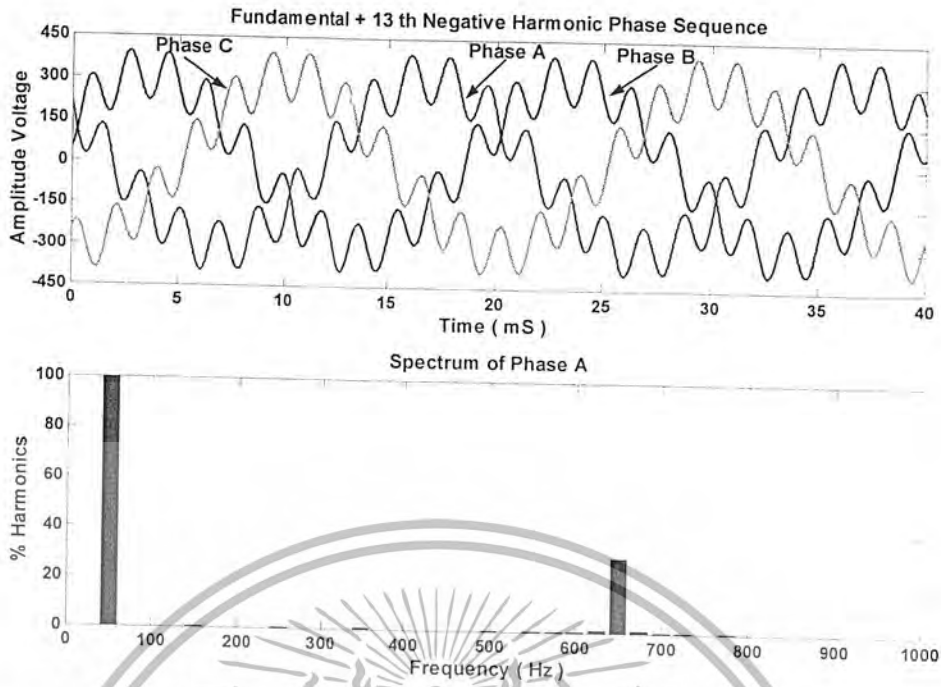


รูปที่ 5-27 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกสัที่มีกรเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปคตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 25 เปอร์เซ็นต์

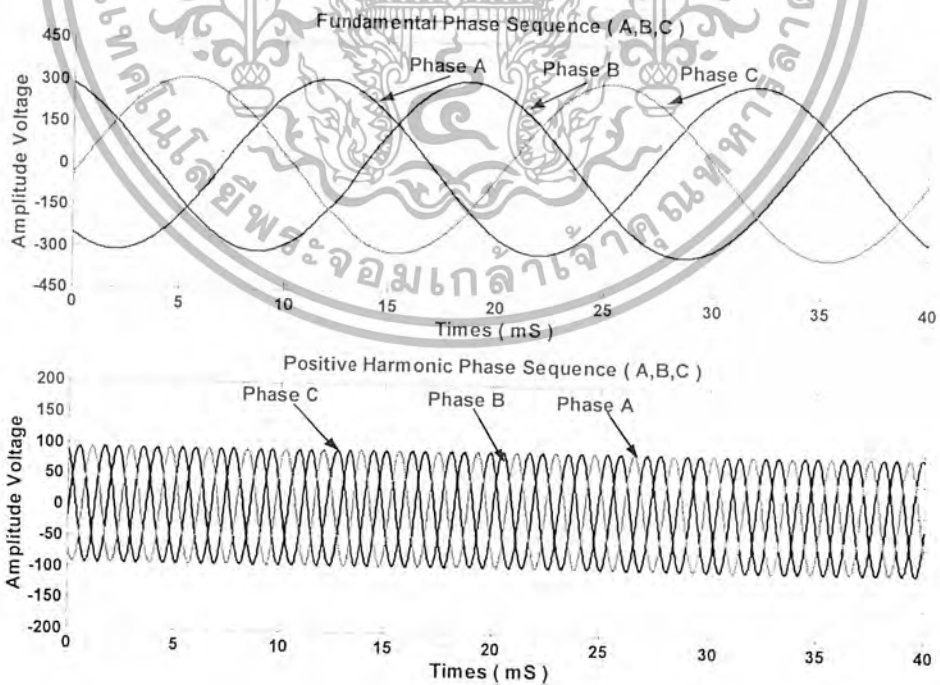


รูปที่ 5-28 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกสัที่การเรียงลำดับแบบลบ ลำดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

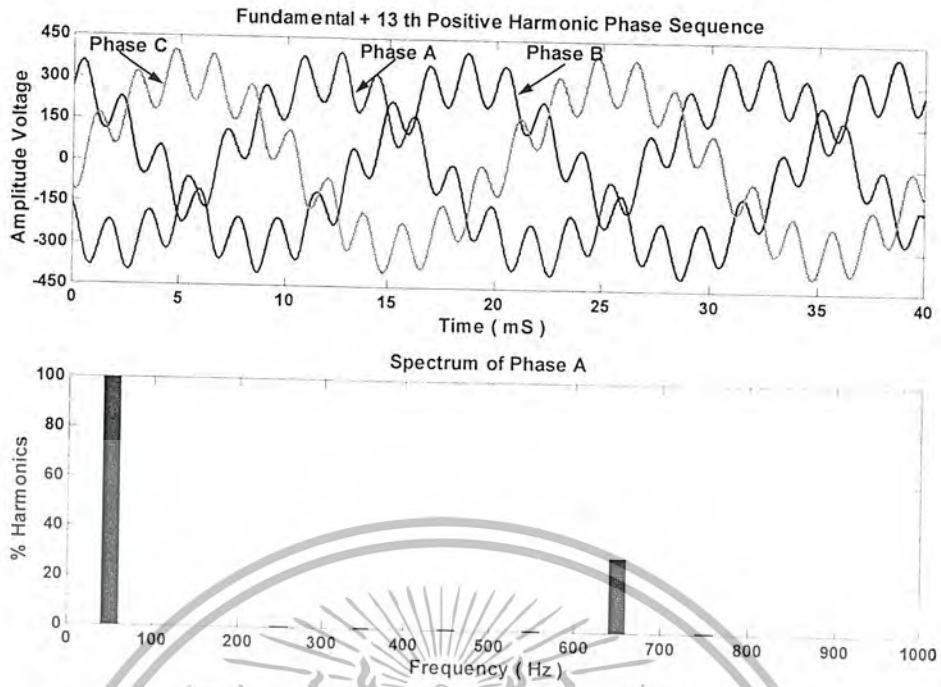


รูปที่ 5-29 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกสัที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบ และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5-30 การเรียงลำดับเฟสของความถี่มูลฐานเปรียบเทียบกับเฟสฮาร์โมนิกสัที่มีการเรียงลำดับแบบบวก ลำดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-31 ผลรวมของความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก และสเปกตรัมของผลรวมความถี่มูลฐานกับความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 13 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนศักดาไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์



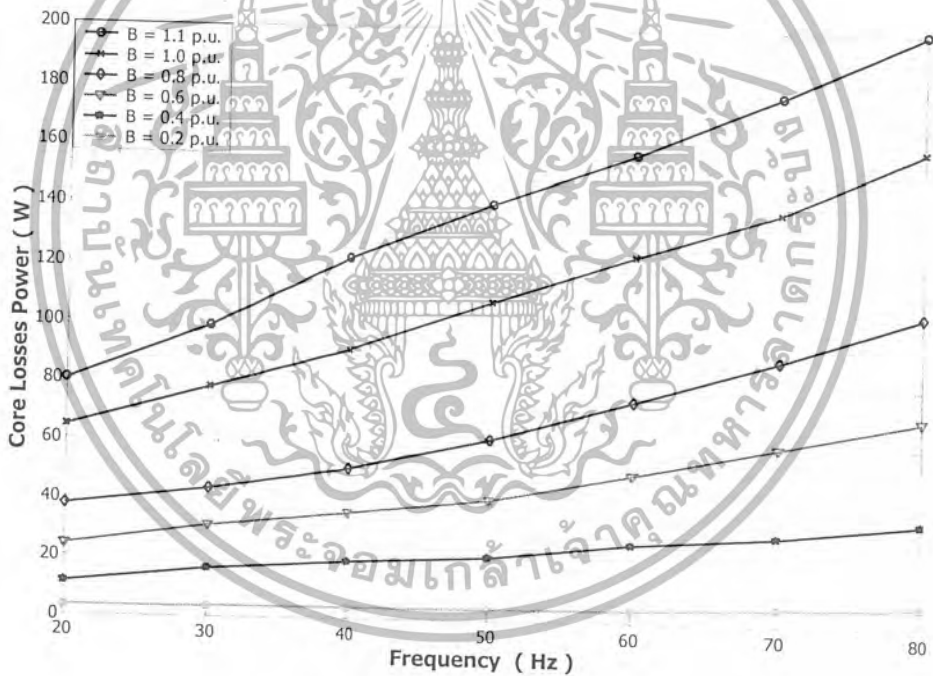
5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

การสูญเสียในแกนเหล็กโดยหลักจะเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) และเกิดจากการกลับตัวของสนามแม่เหล็ก (Hyteresis Loss) ซึ่งการสูญเสียทั้งสองนี้จะแปรผันตามค่าความถี่ของระบบและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

ในการทดสอบจะทำการปรับความถี่จาก 80 Hz - 20 Hz โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ด้วยการคงค่า V/f ให้คงที่ ในทดสอบทำการปรับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กโดยกำหนดค่าเป็นเปอร์ยูนิต (Per-Unit) เพื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่

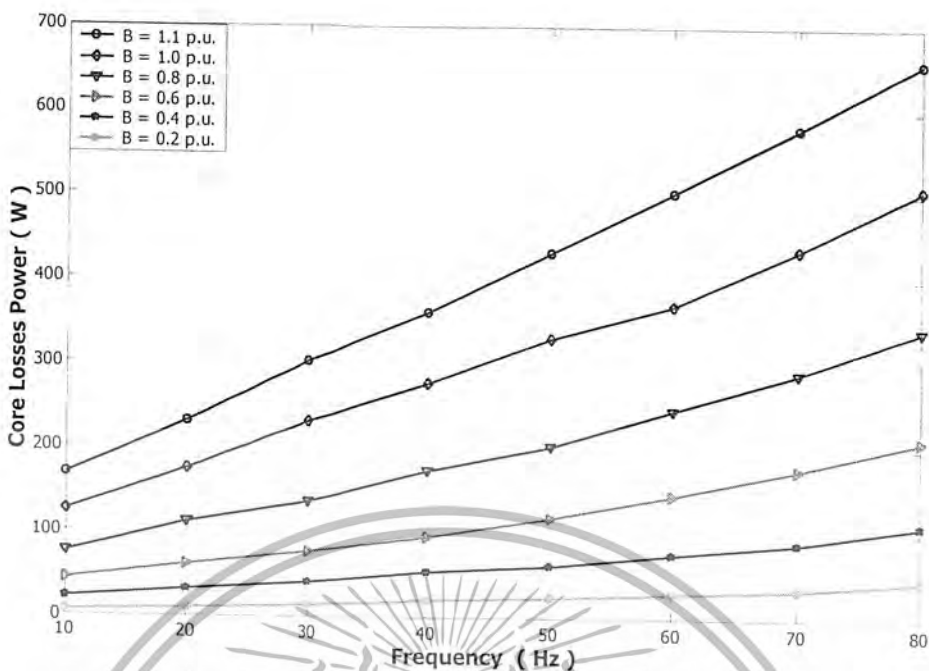
จากผลการทดสอบสามารถพิจารณาแนวโน้มได้ว่าการสูญเสียของแกนเหล็กจะแปรผันตามค่าความถี่ และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยจะค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กต่ำๆ ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 5-32 และ 5-

33



รูปที่ 5-32 ความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กที่ค่าความถี่ต่าง ๆ และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-33 ความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กที่ค่าความถี่ต่างๆ และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 5 แรงม้า

5.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสถานะไม่มีภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

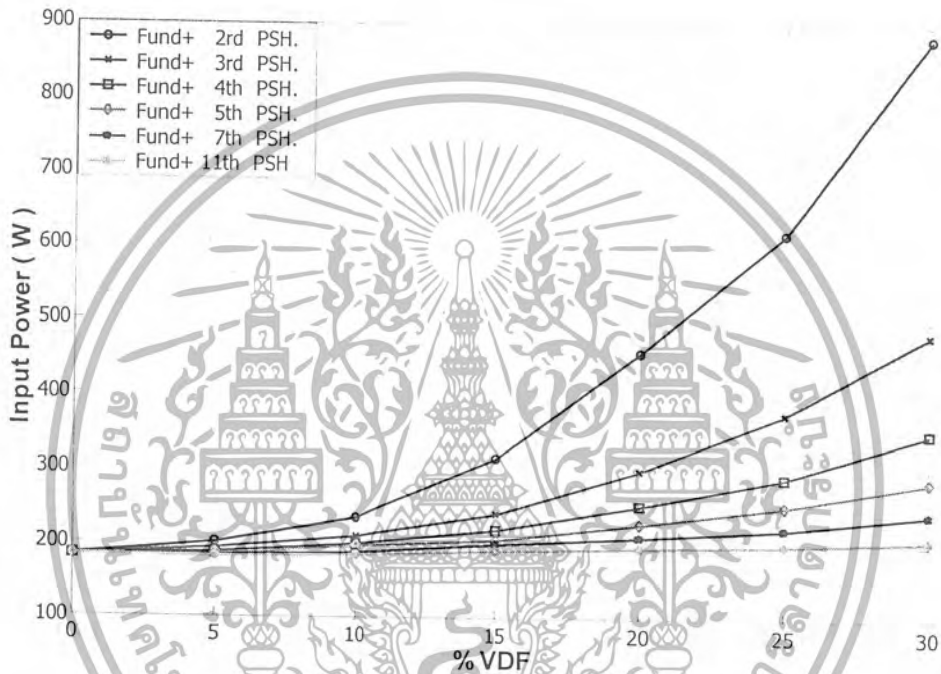
ในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะไม่มีภาระทางกล โดยได้ใช้สัญญาณศักดาไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ได้สร้างขึ้นทดสอบเพื่อดูผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างไร ในกรณีที่ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่างกัน โดยมีการเรียงลำดับเฟสบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ต่างๆ

การทดสอบเราจะทำการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่างกัน โดยมีการเรียงลำดับเฟสบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ต่างๆ แล้วบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้าเพื่อนำมาคำนวณผล และแสดงรูปความสัมพันธ์

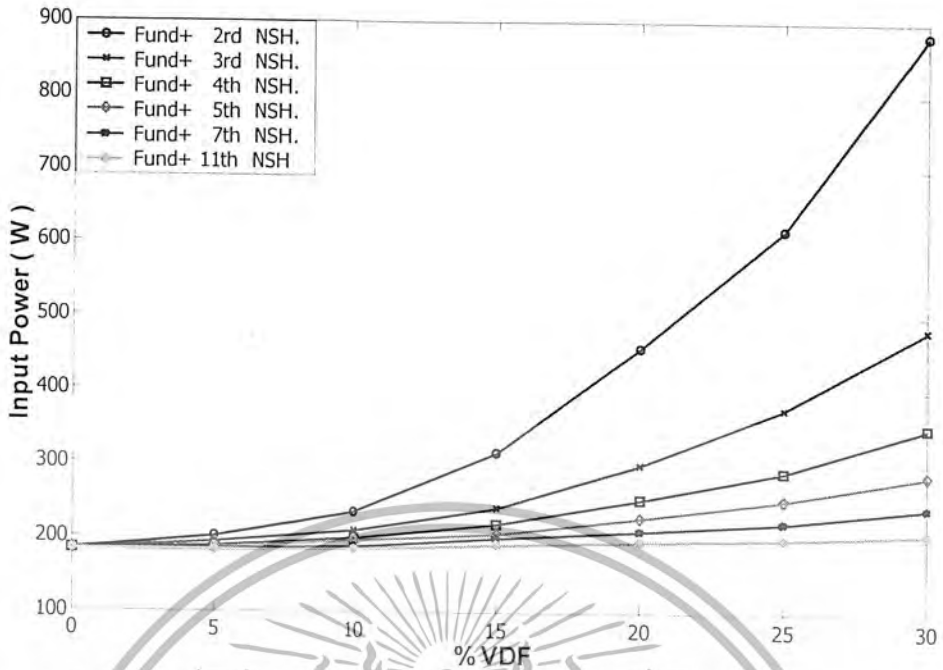
รูปที่ 5-34 และ 5-35 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 13 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกและลบที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อฮาร์มอนิกส์มีอันดับต่ำๆ ใกล้กับความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ที่ค่า %VDF เดียวกัน และฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบจะส่งผลให้กระแสที่ป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกดังรูปที่ 5-36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

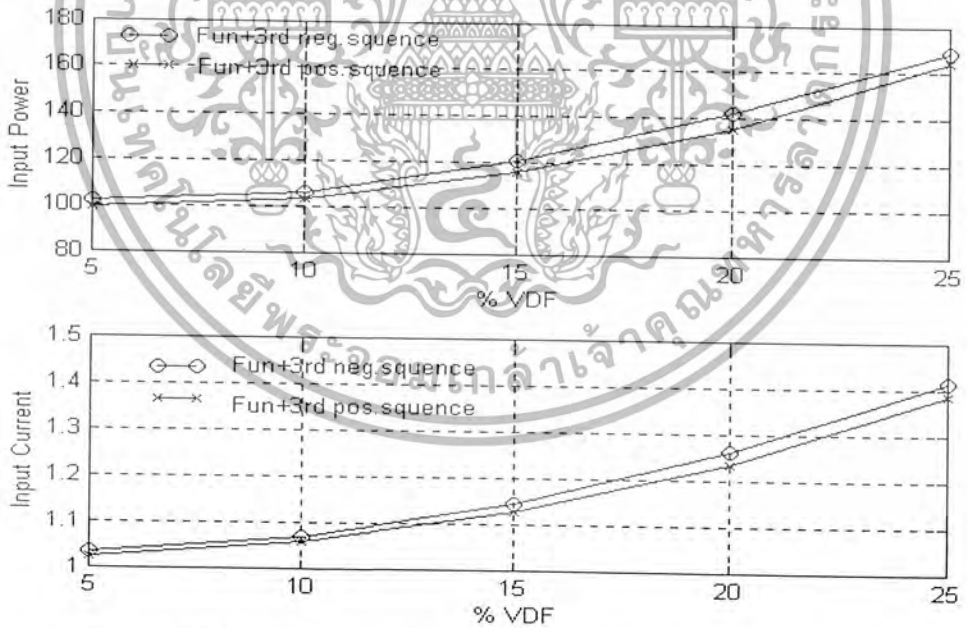
รูปที่ 5-37 และ 5-42 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า โดยทำการแยกฮาร์มอนิกส์ออกจากความถี่หลักมูลเพื่อวิเคราะห์ผลซึ่งพบว่าผลของกระแสและกำลังของฮาร์มอนิกส์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อฮาร์มอนิกส์มีอันดับต่ำๆ ใกล้เคียงความถี่มูลฐาน ในส่วนของความถี่หลักมูลพบว่าผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของแรงต้านสนามแม่เหล็ก แต่ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกจะส่งผลกระทบต่อความถี่หลักมูลเล็กน้อย



รูปที่ 5-34 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 13 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่างๆ

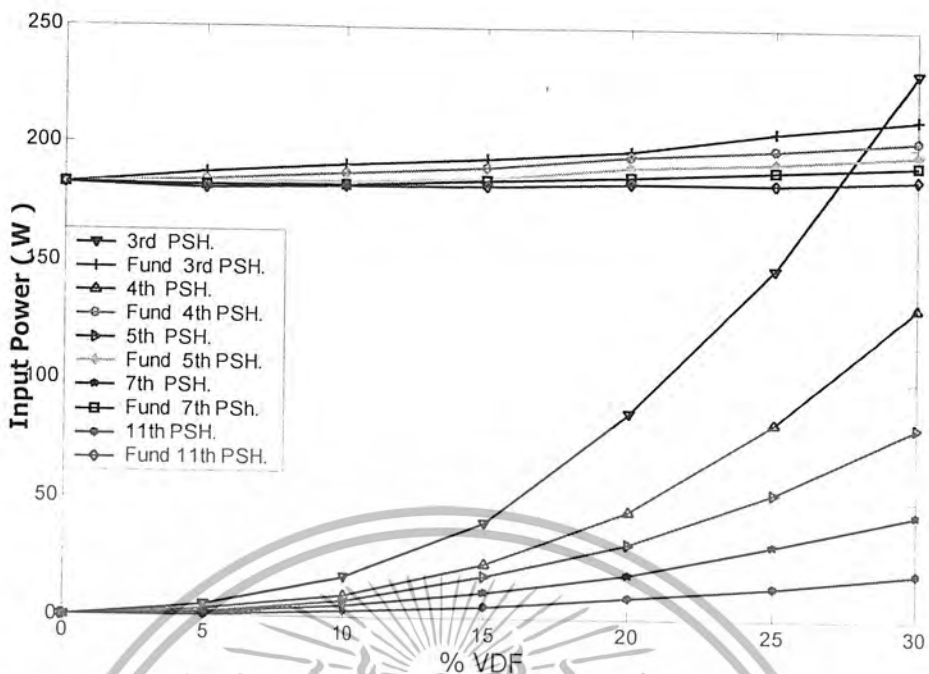


รูปที่ 5-35 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2,3,4,5,7 และ 13 มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางลบที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่างๆ

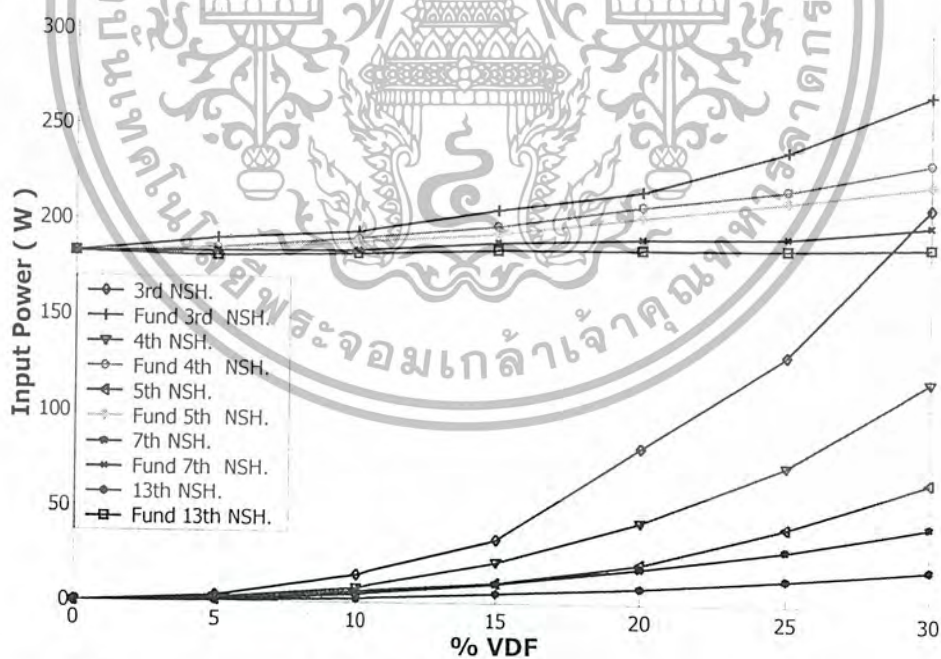


รูปที่ 5-36 กำลังงานไฟฟ้าและกระแสป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

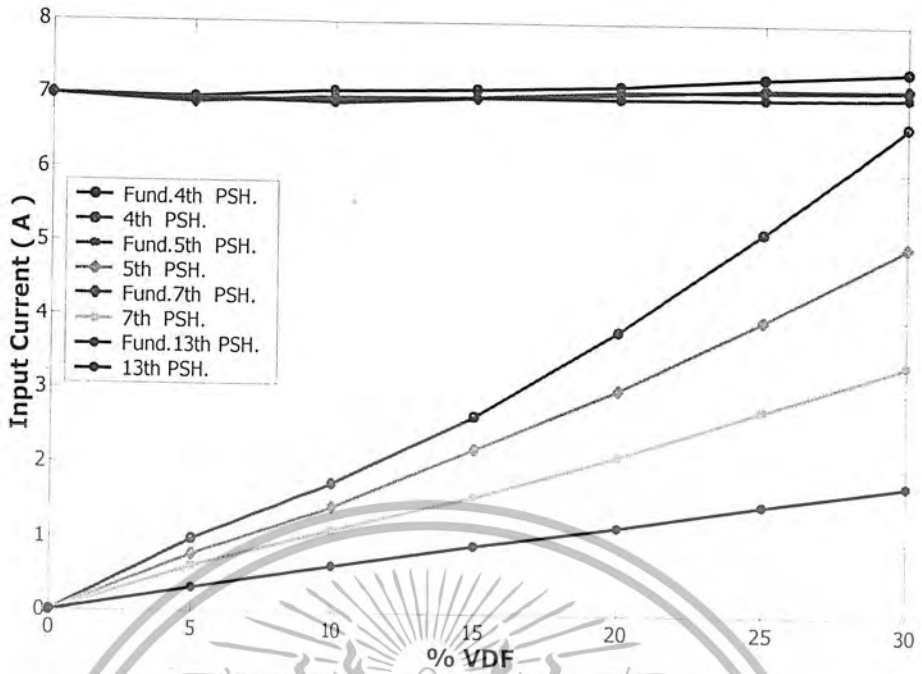


รูปที่ 5-37 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบบวก

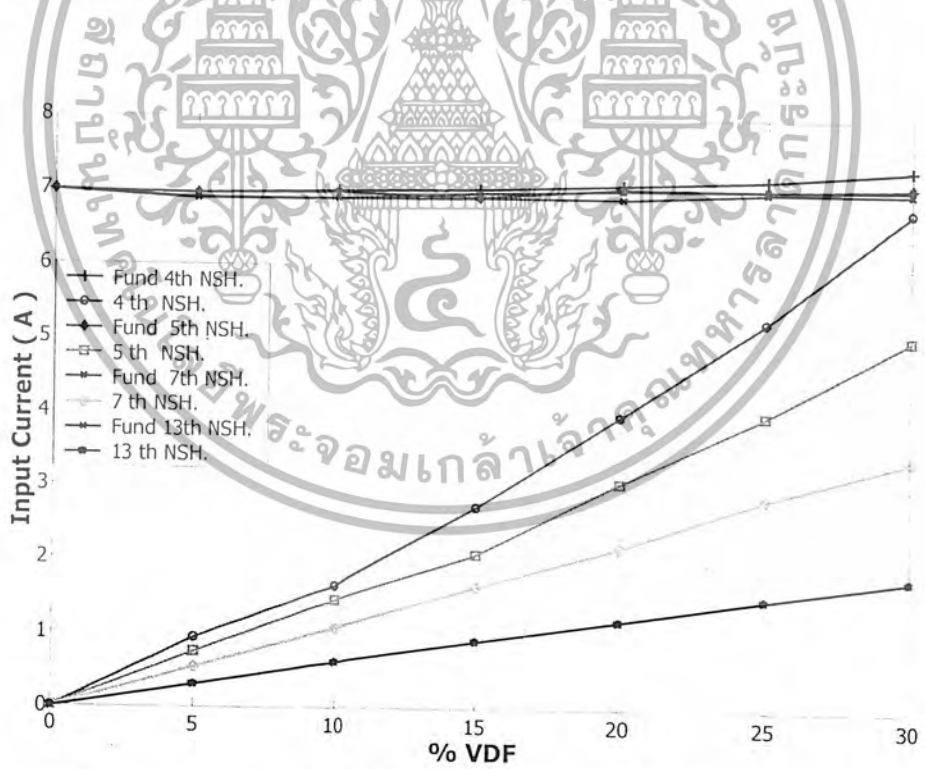


รูปที่ 5-38 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

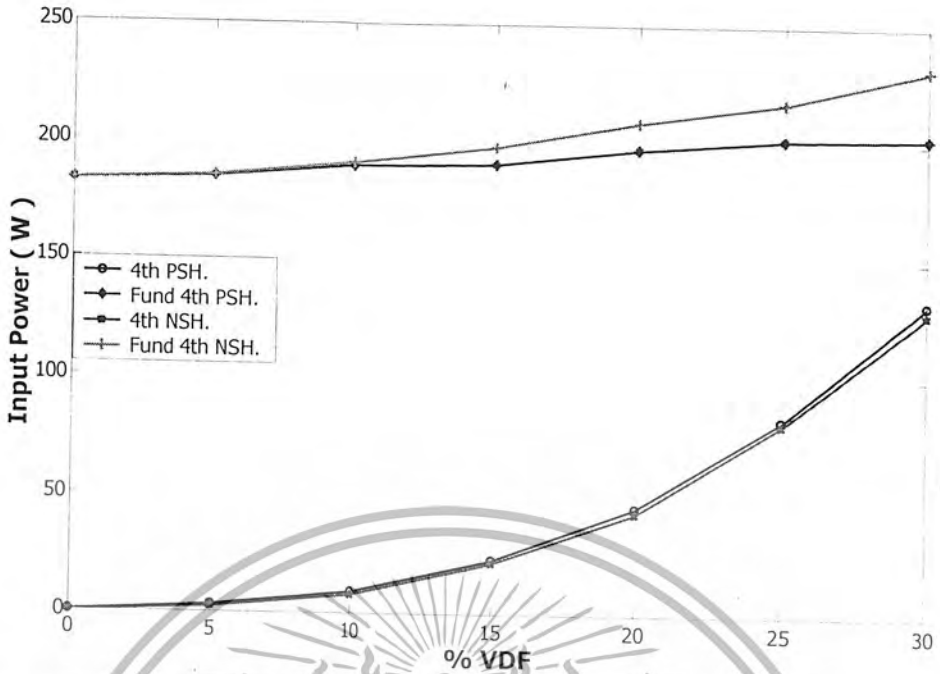


รูปที่ 5-39 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบบวก

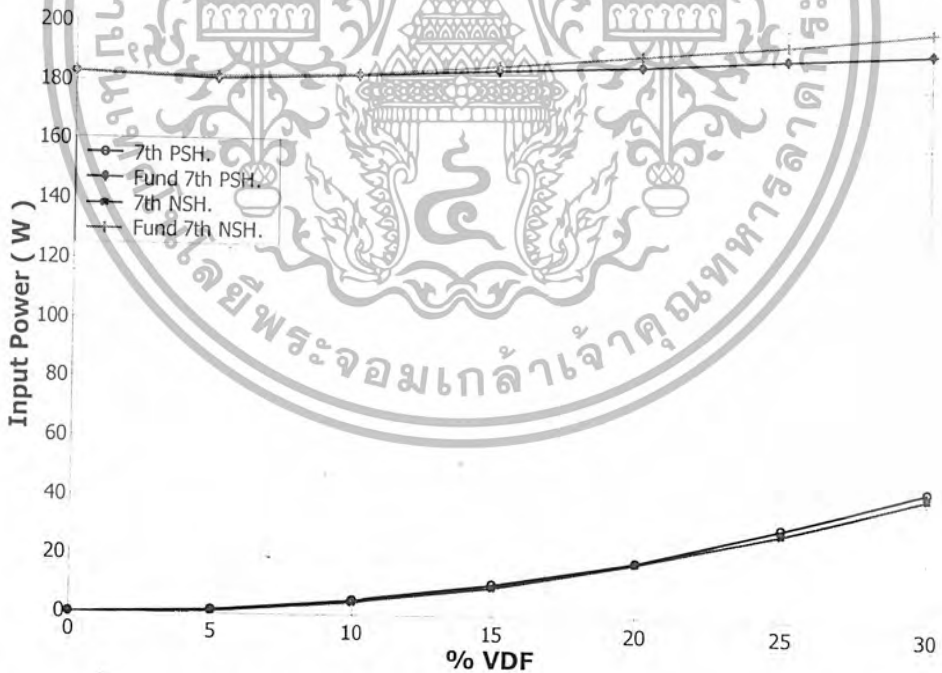


รูปที่ 5-40 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า เมื่อแยกความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-41 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ของ ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกสี่ระหว่างการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ ในกรณีป้อนฮาร์มอนิกสี่อันดับที่ 4



รูปที่ 5-42 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ของ ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกสี่ระหว่างการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ ในกรณีป้อนฮาร์มอนิกสี่อันดับที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

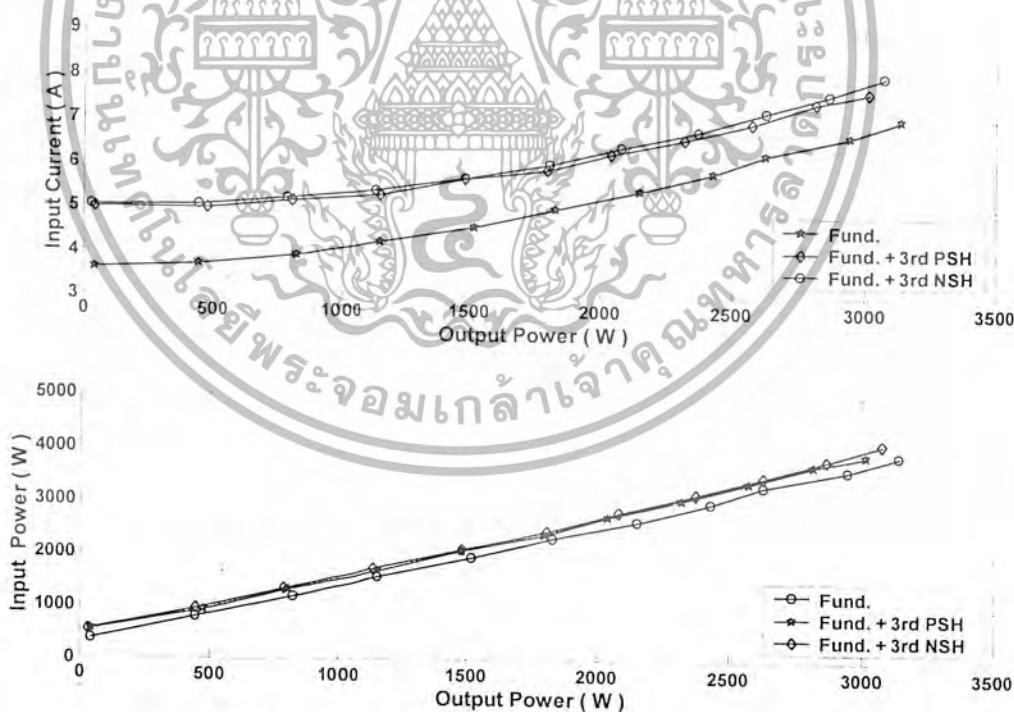
5.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขับโหลดภาระทางกลในกรณีที่ได้รับฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้า

จากรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ได้สร้างขึ้น จะใช้ในการทดสอบเพื่อดูสมรรถนะในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขับโหลดภาระทางกลว่าจะมีผลอย่างไร เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ กัน และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

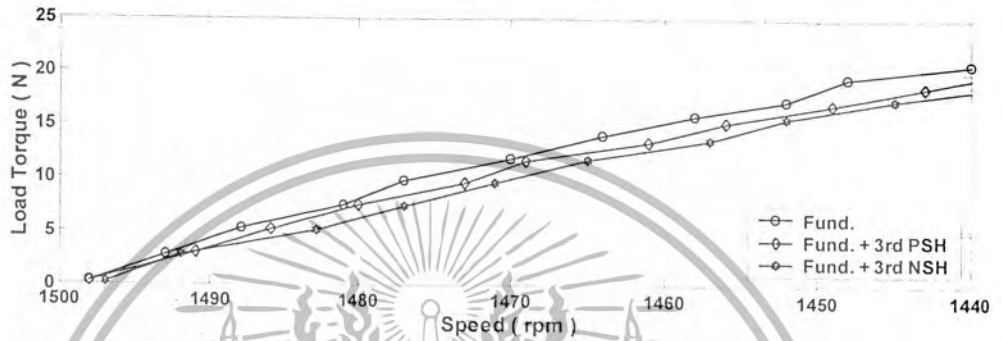
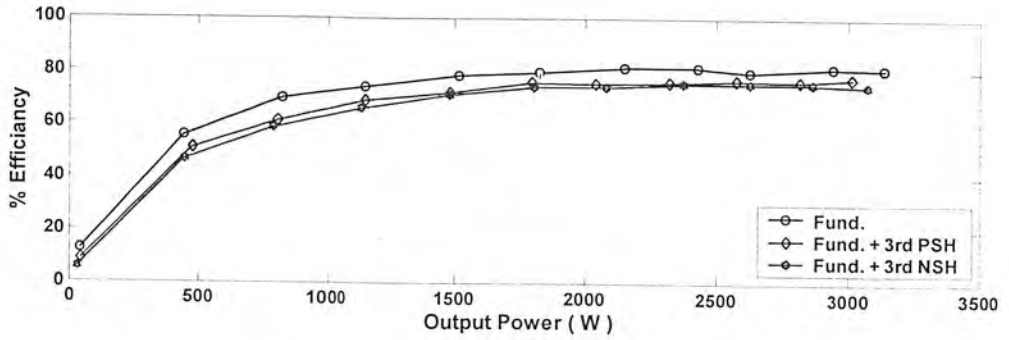
การทดสอบเราจะทำการเพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนกระทั่งถึงพิกัดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบและแต่ละครั้งของการเพิ่มภาระทางกล จะบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้าเพื่อนำมาคำนวณผล และแสดงรูปความสัมพันธ์

รูปที่ 5-43,5-45 และ5-47 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3,7 และ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

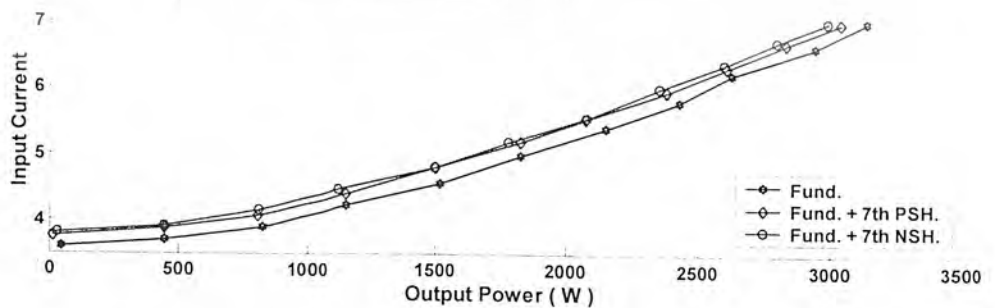
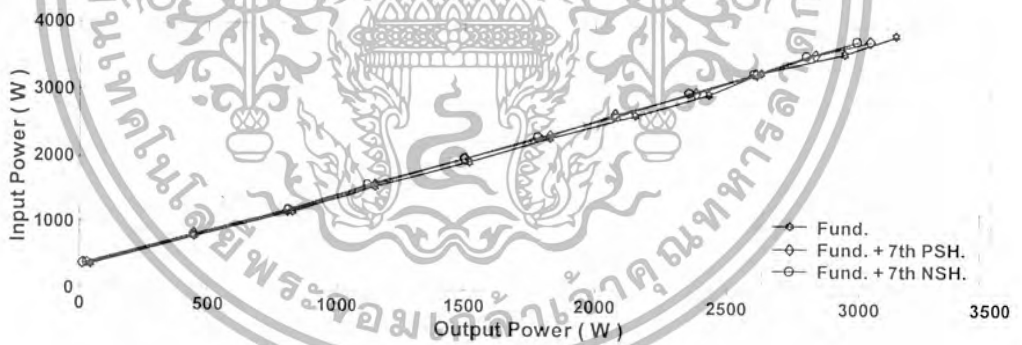
รูปที่ 5-44,5-46 และ5-48 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับกำลังงานขับภาระทางกล และแรงบิดที่เพลากับความเร็ว ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3,7 และ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5-43 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

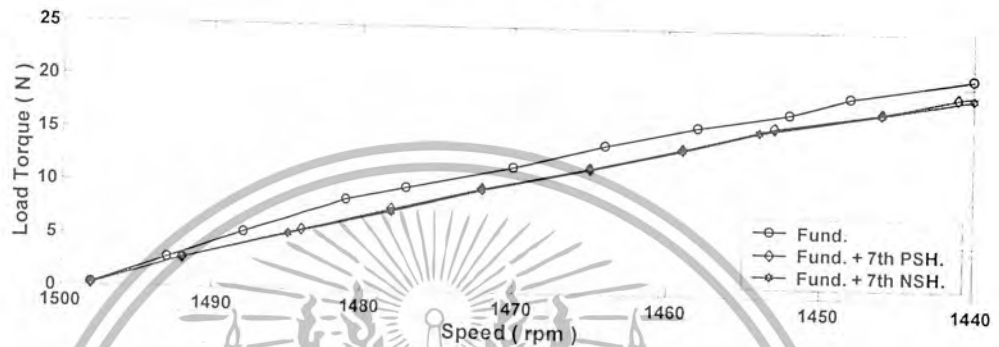
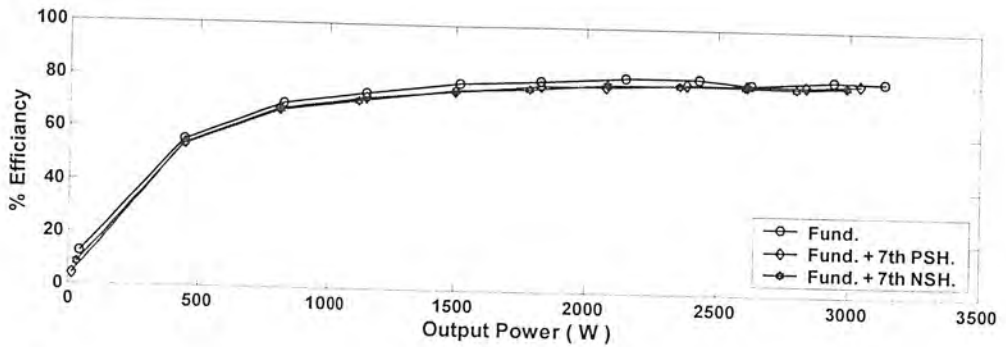


รูปที่ 5-44 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%

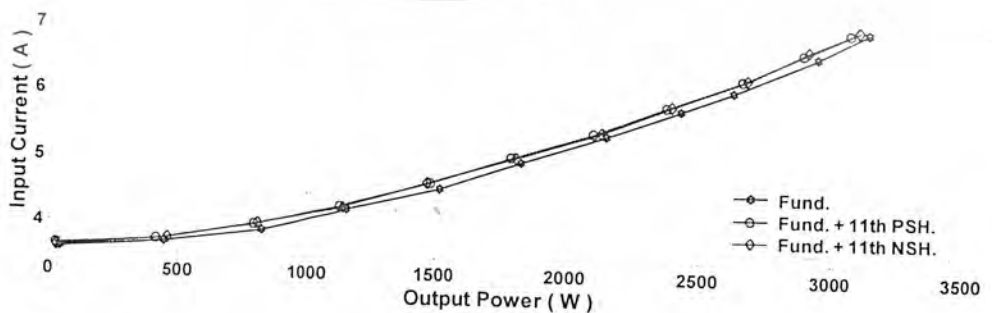
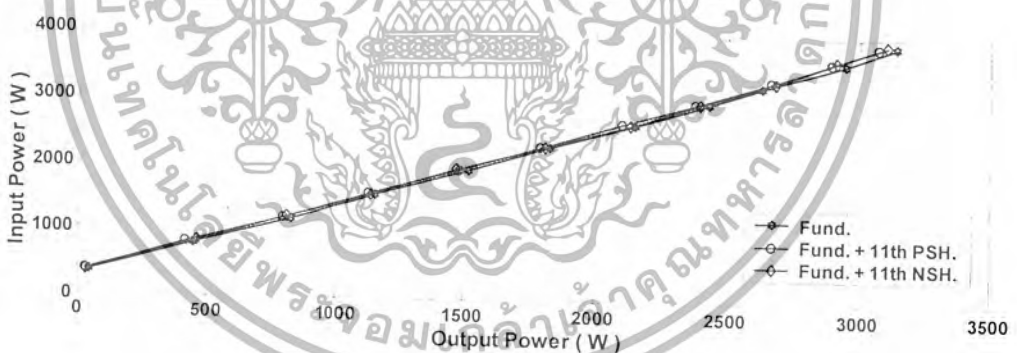


รูปที่ 5-45 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

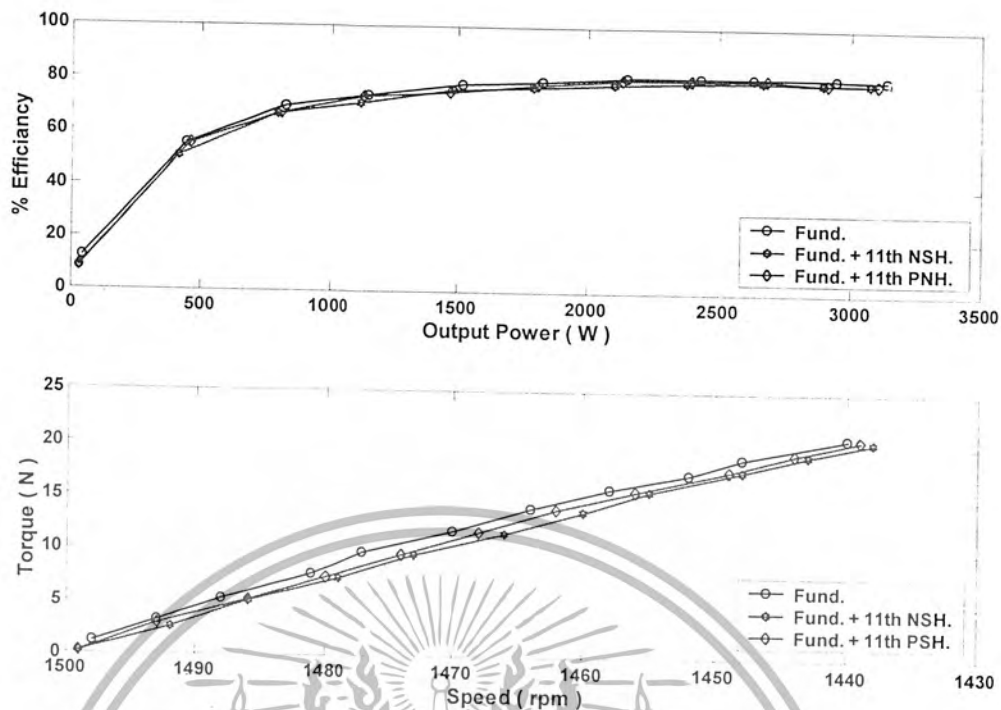


รูปที่ 5-46 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%



รูปที่ 5-47 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกอันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-48 ประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกอันดับที่ 11 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 20%



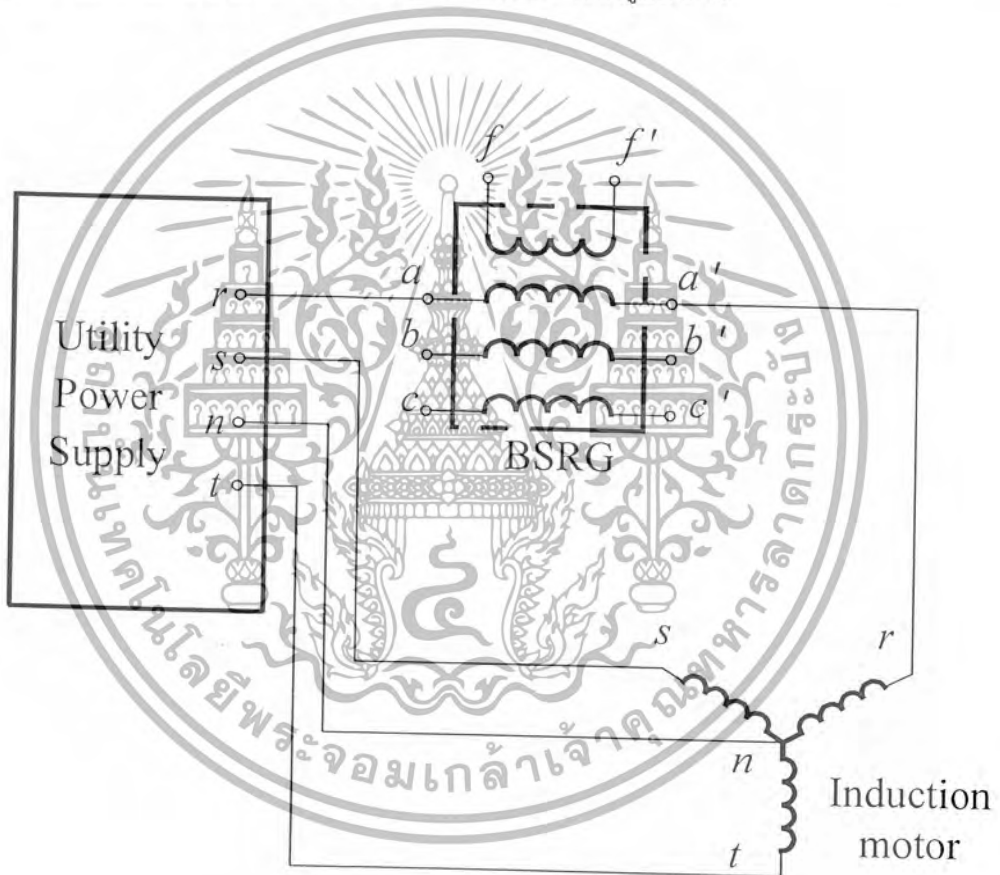
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลการวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ขณะไม่มีภาระทางกล ในกรณีที่ป้อนฮาร์โมนิกส์แบบเฟสไม่สมดุล (Unbalance Phase)

จากผลการทดสอบหม้อเตอร์ที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เป็นแบบเฟสสมดุล (Balance Phase) ในสภาพความเป็นจริงมีโอกาสดกน้อยมากดังนั้นเพื่อให้เข้าใจในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเป็นแบบเฟสไม่สมดุล (Unbalance Phase) จะอธิบายขั้นตอนในการวิเคราะห์ตลอดจนการประยุกต์ใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) มาช่วยในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

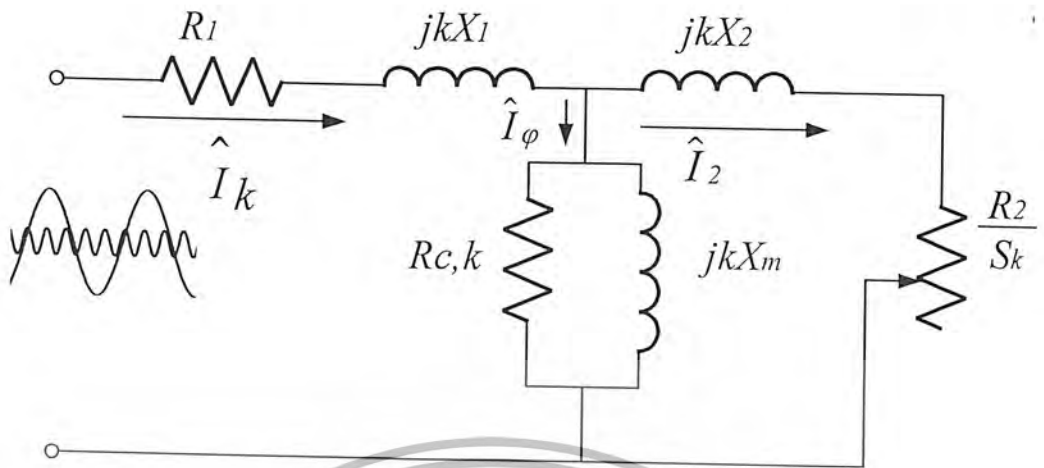
ฮาร์โมนิกส์เฟสเดียว (Single Phase Harmonic)

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ชนิดเฟสไม่สมดุลเบื้องต้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยป้อนฮาร์โมนิกส์เฟสเดียวให้กับหม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีวงจรการต่อคังรูปที่ 5-49



รูปที่ 5-49 วงจรการต่อ Unbalance Single Phase Harmonic

จากรูปข้างต้นสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 5-50



รูปที่ 5-50 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อป้อนฮาร์โมนิกส์เฟสเดียว

ในรูปที่ 5-50 แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบด้วยกันคือ

1. แหล่งจ่ายที่เป็นแหล่งจ่ายของความถี่มูลฐาน (Voltage Fundamental Source)
2. แหล่งจ่ายที่เป็นส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Voltage Harmonic Source)

จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆ โดยใช้ Analyzing Recorder เพื่อนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณแยกแหล่งจ่ายทั้งสองออกจากกันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab Program) ดังแสดงในรูปที่ 5-51



รูปที่ 5-51 การแยกแหล่งจ่ายความถี่มูลฐานกับแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ออกจากกันโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

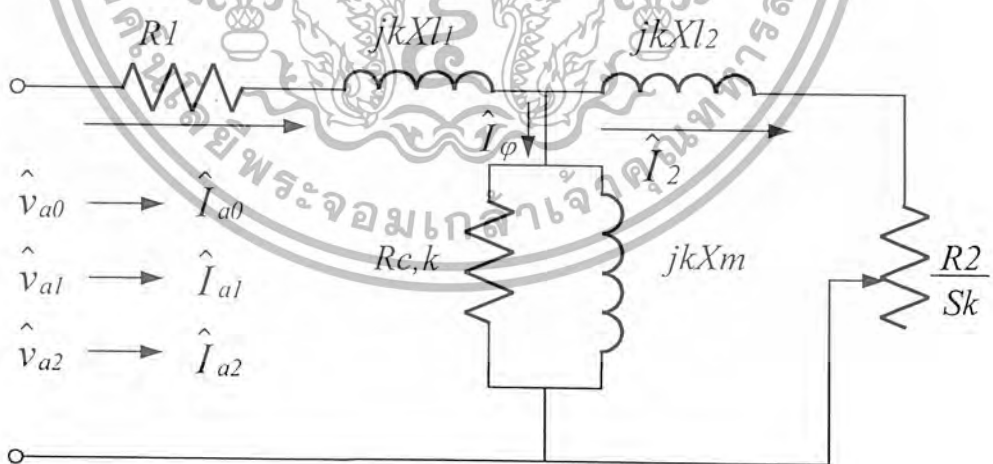
จากนั้นนำเฉพาะส่วนของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์มาวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetric Component) ที่ว่าด้วยเรื่องของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์จะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบบวก (Positive Sequence) องค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบศูนย์ (Zero Sequence) ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.1

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} \quad 5.1$$

สามารถหาอัตราส่วนของการเรียงลำดับเฟสได้โดยอาศัยสมการที่ 5.2 นั่นก็คือ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad 5.2$$

จากนั้นนำแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์แต่ละการเรียงลำดับเฟสไปอินทิเกรตกับวงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuit) ที่นำมาได้ในกรณีที่ป้อนแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบเฟสสมดุล (Balance Three Phase Harmonic) เพื่อคำนวณหากระแสไฟฟ้าของแต่ละการเรียงลำดับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-52



รูปที่ 5-52 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ของแต่ละการเรียงลำดับเฟส

เมื่อนำกระแสไฟฟ้าของแต่ละการเรียงลำดับเฟสมาบวกกันทางเวกเตอร์ (Vector) โดยอาศัย ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรที่ว่าด้วยเรื่องกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 5.3

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} \quad 5.3$$

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าของแต่ละการเรียงลำดับเฟสผ่านทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรที่ว่าด้วย เรื่องกระแสไฟฟ้าก็จะได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายของแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-53



รูปที่ 5-53 การไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากองค์ประกอบการเรียงลำดับเฟสแบบต่าง ๆ

จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดข้างต้น ซึ่งจากที่ได้ทดสอบและการคำนวณค่าที่ได้ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรสามารถที่นำมาอธิบายฮาร์มอนิกสัณนิคเฟสไม่สมดุลได้จริง ดังตัวอย่างในการคำนวณ

การคำนวณฮาร์มอนิกเฟสไม่สมดุล (Unbalance Single Phase Harmonic)

%vdf	Single Phase				
	$V_{r,k}$	$I_{r,k}$	$\theta_{r,k}$	$pf_{r,k}$	Nr
15	32.268	0.772	17.46	82.21	1499
30	66.512	1.681	14.04	82.52	1499

ตารางที่ 5-2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 แบบเฟสไม่สมดุล

%vdf	Zero Sequence					Positive Sequence					Negative Sequence					Single Phase				
	$V_{r,k}$	$I_{r,k}$	$\theta_{v,k}$	$\theta_{i,k}$	$pf_{r,k}$	$V_{r,k}$	$I_{r,k}$	$\theta_{v,k}$	$\theta_{i,k}$	$pf_{r,k}$	$V_{r,k}$	$I_{r,k}$	$\theta_{r,k}$	$\theta_{i,k}$	$pf_{r,k}$	$V_{r,k}$	$I_{r,k}$	$\theta_{v,k}$	$\theta_{i,k}$	$pf_{r,k}$
15%	10.75	0.198	17.46	-67.48	84.94	10.75	0.198	17.46	-64.268	81.72	10.75	0.198	17.46	-65.33	82.79	32.26	0.59	17.46	-65.6	83.15
30%	22.17	0.409	14.04	-70.90	84.94	22.17	0.408	14.04	-67.688	81.72	22.17	0.409	14.04	-68.75	82.79	66.51	1.22	14.04	-69.1	83.15

ตารางที่ 5-3 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกที่มีเฟสไม่สมดุล

ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า ที่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5th

%vdf	$V_{r,k}$	$V_{s,k}$	$V_{t,k}$	$V_{k,av}$	$I_{r,k}$	$I_{s,k}$	$I_{t,k}$	$I_{k,av}$	$\theta_{r,k}$	$\theta_{s,k}$	$\theta_{t,k}$	$\theta_{k,av}$	$P_{r,k}$	$P_{s,k}$	$P_{t,k}$	$P_{k,av}$	Pt
5	12.553	-	-	12.553	0.348	-	-	0.348	78.952	-	-	78.952	0.838	-	-	0.837	0.837
10	22.161	-	-	22.161	0.487	-	-	0.487	81.103	-	-	81.103	1.668	-	-	1.669	1.669
15	32.268	-	-	32.268	0.772	-	-	0.772	82.212	-	-	82.212	3.377	-	-	3.376	3.376
20	44.250	-	-	44.250	1.117	-	-	1.117	79.617	-	-	79.617	8.909	-	-	8.908	8.908
25	55.086	-	-	55.086	1.420	-	-	1.420	77.670	-	-	77.670	16.706	-	-	16.704	16.704
30	66.512	-	-	66.512	1.681	-	-	1.681	78.795	-	-	78.795	21.722	-	-	21.726	21.726

ตารางที่ 5-4 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์โมนิกส์ที่เฟส A เพียงเฟสเดียว (Single phase)

%vdf	$V_{r,k}$	$V_{s,k}$	$V_{t,k}$	$V_{k,av}$	$I_{r,k}$	$I_{s,k}$	$I_{t,k}$	$I_{k,av}$	$\theta_{r,k}$	$\theta_{s,k}$	$\theta_{t,k}$	$\theta_{k,av}$	$P_{r,k}$	$P_{s,k}$	$P_{t,k}$	$P_{k,av}$	Pt
5	12.502	12.257	11.731	12.163	0.367	0.291	0.327	0.328	75.501	75.273	85.536	78.770	1.150	0.908	0.299	0.777	2.331
10	22.135	22.847	21.544	22.175	0.596	0.608	0.544	0.583	80.323	74.376	80.985	78.561	2.218	3.741	1.836	2.564	7.692
15	34.553	33.894	33.971	34.139	0.845	0.942	0.895	0.894	79.535	78.823	74.786	77.715	5.303	6.188	7.980	6.494	19.482
20	43.326	44.366	43.719	43.804	1.100	1.221	1.142	1.154	78.542	77.667	76.758	77.656	9.466	11.573	11.434	10.807	32.420
25	55.663	55.949	55.639	55.750	1.546	1.516	1.463	1.508	78.246	75.825	78.289	77.453	17.529	20.771	16.527	18.264	54.791
30	66.451	65.902	66.078	66.144	1.800	1.904	1.858	1.854	77.636	77.967	76.032	77.212	25.610	26.163	29.636	27.144	81.431

ตารางที่ 5-5 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบศูนย์ (Zero-Sequence)

%vdf	$V_{r,k}$	$V_{s,k}$	$V_{t,k}$	$V_{k,av}$	$I_{r,k}$	$I_{s,k}$	$I_{t,k}$	$I_{k,av}$	$\theta_{r,k}$	$\theta_{s,k}$	$\theta_{t,k}$	$\theta_{k,av}$	$P_{r,k}$	$P_{s,k}$	$P_{t,k}$	$P_{k,av}$	Pt
5	11.368	10.753	11.425	11.182	0.241	0.292	0.246	0.260	63.742	78.734	88.718	77.065	1.211	0.612	0.063	0.651	1.952
10	22.244	21.515	21.880	21.879	0.489	0.416	0.511	0.472	83.893	75.528	70.788	76.736	1.157	2.236	3.683	2.369	7.108
15	33.697	33.189	33.704	33.530	0.669	0.765	0.785	0.740	74.226	73.329	80.806	76.120	6.129	7.280	4.227	5.952	17.857
20	43.776	44.447	44.065	44.096	0.917	1.074	1.031	1.007	74.357	74.299	80.108	76.255	10.822	12.914	7.806	10.551	31.652
25	54.872	55.897	55.600	55.456	1.392	1.290	1.297	1.326	76.418	78.628	73.157	76.068	17.939	14.215	20.897	17.705	53.115
30	65.382	66.582	66.012	65.992	1.708	1.622	1.673	1.668	76.664	76.874	73.741	75.759	25.755	24.526	30.910	27.078	81.235

ตารางที่ 5-6 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบบวก (Positive - Sequence)

%vdf	$V_{r,k}$	$V_{s,k}$	$V_{t,k}$	$V_{k,av}$	$I_{r,k}$	$I_{s,k}$	$I_{t,k}$	$I_{k,av}$	$\theta_{r,k}$	$\theta_{s,k}$	$\theta_{t,k}$	$\theta_{k,av}$	$P_{r,k}$	$P_{s,k}$	$P_{t,k}$	$P_{k,av}$	Pt
5	10.855	11.465	11.181	11.167	0.290	0.301	0.302	0.298	87.136	82.134	83.072	84.114	0.158	0.472	0.407	0.341	1.024
10	21.650	22.289	21.965	21.968	0.541	0.552	0.554	0.549	81.340	79.534	79.312	80.062	1.763	2.234	2.256	2.081	6.244
15	33.210	33.739	33.621	33.523	0.685	0.696	0.693	0.691	81.141	80.155	81.337	80.878	3.505	4.013	3.510	3.672	11.017
20	42.963	43.644	43.582	43.396	1.005	1.030	1.026	1.020	81.663	80.273	80.730	80.889	6.261	7.595	7.203	7.009	21.027
25	55.214	55.853	55.628	55.565	1.312	1.332	1.330	1.325	79.747	79.183	79.225	79.385	12.894	13.965	13.827	13.562	40.686
30	65.861	66.817	66.644	66.441	1.656	1.692	1.680	1.676	79.195	78.330	78.643	78.723	20.444	22.874	22.054	21.776	65.327

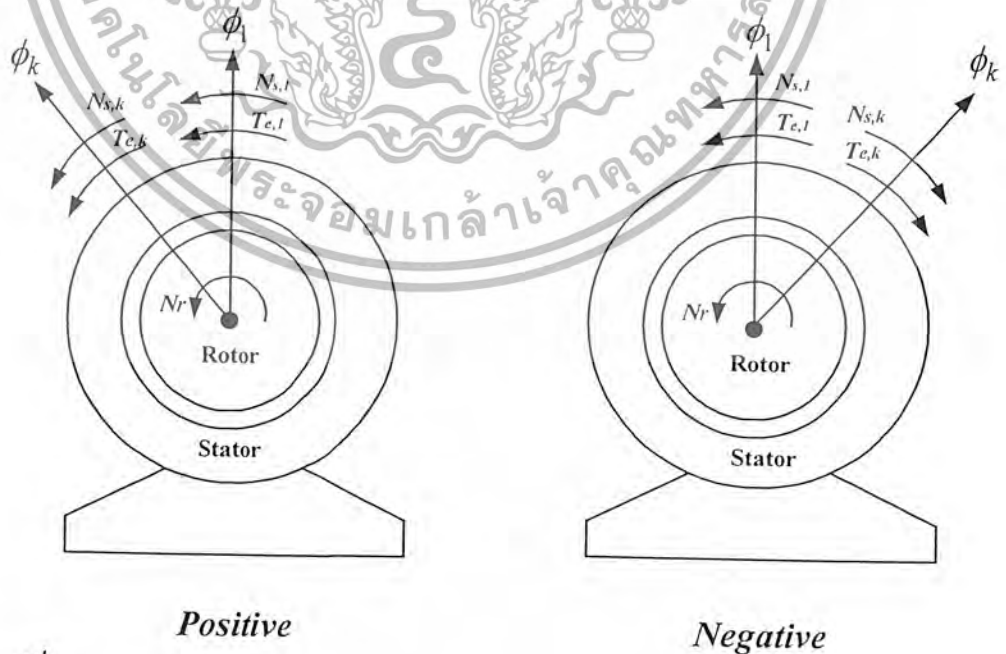
ตารางที่ 5-7 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้าขณะที่ป้อนฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงอันดับเฟสแบบลบ (Negative - Sequence)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากเทคนิคการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ศักดาไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายชนิดนี้สามารถที่นำมาใช้ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้ จากรูปที่ 5-8 ถึง 5-31 จะแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถที่จะสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ได้ตามทฤษฎี ทำให้สามารถทราบว่าคุณสมบัติและอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างไร

ในโครงงานฉบับนี้จะส่งเสริมความเข้าใจผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นฮาร์มอนิกส์สามเฟสที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกและลบเป็นฮาร์มอนิกส์ที่สามารถควบคุมได้เพื่อใช้อ้างอิงกับทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน โดยสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์นี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของความสัมพันธ์ของรูปคลื่นไซน์ และอันดับของฮาร์มอนิกส์ อีกทั้งขณะที่มีฮาร์มอนิกส์ป้อนเข้ามาในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น ก็จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นมา 2 ส่วนคือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน (ϕ_1) และฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ (ϕ_k) ซึ่งฟลักซ์ส่วนนี้จะก่อให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นมาในแต่ละส่วนทั้งสอง



รูปที่ 6-1 ผลกระทบของ Electromagnetic Torque กรณีจากฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกและลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6-1 กรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวกสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางการหมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ดังนั้นแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวก (T_k, P) นี้จะไปเสริมกับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน (T_1) ทำให้ผลของ Electromagnetic Torque ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงขึ้นจากปกติที่ไม่ได้รับฮาร์มอนิกส์

ในทางตรงกันข้าม กรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางการหมุนสวนทางกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กหมุนของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบ (T_k, N) นี้จะไปต้านกับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน (T_1) ดังนั้น Electromagnetic Torque ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลงจากสภาวะปกติ เมื่อไม่ได้รับฮาร์มอนิกส์

กรณีฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวกนั้น จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสลลิปมีค่าลดลงและกรณีที่ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสลบนั้นก็ทำให้ความเร็วรอบมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าของสลลิปนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็เนื่องมาจาก Electromagnetic Torque นั้นเอง

และเมื่อพิจารณาผลของกระแสป้อนเข้าขณะป้อนฮาร์มอนิกส์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะพบว่ามีการกระแสป้อนเข้าเพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติขณะที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไม่มีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้น ซึ่งจากการใช้ทฤษฎีการวางซ้อนในการวิเคราะห์ ทำให้ทราบว่า กระแสป้อนเข้าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ เกิดมาจากแหล่งจ่าย 2 ส่วน คือ กระแสป้อนเข้าที่เกิดจากความถี่มูลฐาน (I_1) และอีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสที่ป้อนเข้าที่ความถี่สัปดาห์ไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ (I_k) เกิดมาจากแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (BSRG)

เมื่อพิจารณาที่ P_{out} เดียวกันก็จะเห็นได้ว่า กรณีของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบนั้นจะมีกระแสป้อนเข้าที่สูงกว่ากรณีฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสบวก เนื่องจากว่าขณะที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสลบเข้าไบนั้นทำให้ผล Electromagnetic Torque มีค่าลดลง ดังนั้นที่ P_{out} เดียวกัน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องดึงกระแสป้อนเข้าที่เกิดจากความถี่มูลฐาน (I_1) มากขึ้น เพื่อที่จะเพิ่มขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐานให้สูงขึ้นดังรูปที่ 5-41 และ 5-42 แรงบิดที่เกิดจากความถี่มูลฐาน (T_1) นี้ก็จะเพิ่มขึ้นชดเชยให้กับผลของ Electromagnetic Torque ที่ลดลงเนื่องจากผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบได้ ซึ่งผลของกระแสป้อนเข้าที่สูงขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีลักษณะผลแนวโน้มเดียวกับกระแสที่ป้อนเข้า คือ กรณีฮาร์มอนิกส์มีการเรียงเฟสแบบลบ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสบวก ดังแสดงดังรูปที่ 5-43, 5-45 และ 5-47

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะไม่มีภาระทางกล ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นในกรณีที่ฮาร์มอนิกส์มีอันดับต่ำๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดค่าความสูญเสียสูงขึ้น และเมื่อฮาร์มอนิกส์มีอันดับสูงๆ ค่าความสูญเสียจะมีผลน้อย โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักย์ไฟฟ้าทั่วกัน และผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการทดสอบในกรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อขับโหลดภาระทางกล ผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นและค่าประสิทธิภาพจะมีผลกระทบน้อยมาก แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจากฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อฮาร์โมนิกส์เมื่อฮาร์โมนิกส์มีอันดับที่ต่ำๆ ใกล้เคียงความถี่มูลฐาน และอันดับของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับสูงขึ้นก็จะมีผลกระทบน้อยลงไปตามลำดับโดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าเท่ากัน

จากที่เราทำการทดสอบฮาร์โมนิกส์แบบสามเฟสที่มีความสมดุล ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก,ลบ และศูนย์ เพื่อที่จะนำมาอธิบายผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะจริง ซึ่งเป็นแบบสามเฟสไม่สมดุล โดยใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร(Symmetrical Component) คำนวณในกรณีที่เกิดฮาร์โมนิกส์เป็นแบบเฟสไม่สมดุล (Unbalance Phase)

จากตารางที่ 5-2 และ 5-3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ผลของฮาร์โมนิกส์เพื่อหาค่าต่าง ๆ ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อระบบไม่สมดุล(Unbalance Phase) และใช้เป็นแนวทางในการศึกษาฮาร์โมนิกส์แบบสามเฟสไม่สมดุลในระดับต่อไป



บรรณานุกรม

- [1] P.K. Sen and H.A. Landa . “Derating of Induction Motor Due to Waveform Distortion”. IEEE Trans. On Industry Application, Vol.26, No.6,Nov./Dec 1990, pp.1120-1107.
- [2] P.C. Sarikas. “Harmonics Survey within an Industrial Facility.” Southcon/96, 1996,pp.575581
- [3] R. Yacamini and S.C.Chang. “Noise and Vibration from Induction Machines Fed from Harmonics Sources. ” IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.10,No. 2 ,1996, pp. 286-292.
- [4] A. Vamvakari, et.at “Analysis of Supply Voltage Distortion Effect on Induction Motor Operation. ” IEEE International Conference IEMD’ 99, 1999,pp.360-362.
- [5] C.Y. Lee and W.J.Lee. “Effects of Nonsinusoidal Voltage on Operation Performance of a Three – Phase Induction Motor.” IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No.2, June 1999, pp. 193–891.
- [6] B.K. Bose et. At. “Loss Modeling of Converter Induction Machines System for Variable Speed Drive.” Proceedings of the 1992 International Conference on Power Electronics and Motion Control, 1992, pp.114-120.
- [7] M.R. Udayagiri and T.A.Lipo. “Simulation of Inverter Fed Induction Motor Including Core Losses.” IEEE ICON’99 Conf. Rec., 1989, pp.232-237.
- [8] T.M. Underland and N. Mohan. “ Overmodulation and Loss Considerations in High Frequency Modulated Transistorized Induction Motor Drives.” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.3, No.4, Oct 1988, pp 447 –452.
- [9] A. Boglietti et. Al. “Interfluence of the Inverter Characteristics on the Iron Losses in PWM Inverter Fed Induction Motors.” IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 32, No.5 Sep./Oct 1996, pp. 1190 –1194.
- [10] D. Maly, D. W. Nonvotny and C. Thompson. “The Influnce of Winding Capacitance on High Frequency Time Harmonic Losses in Induction Machines.” Conference Record of Industry Applications Society Annual Meeting the 1992, 1992, pp.33 – 39.
- [11] J.C. Cleare et. al. “ Additional Losses due to Operation of Machines from Inverter .” IEEE Halt Day Colloquim on Testing of Electrical Machines (Ref.No.) 1999/161, 1999, pp.5/1 -5/8
- [12] T.J. Sobczyk and B.L. Spinski. “ Analysis of Phase Controlled Converter for Induction Motor.” IEEE Trans. on Power Eletronics, Vol.5,No.2, Apr 1990, pp.172-181.
- [13] E.N. Hildebran and H. Roehrdanz. “Losses in Three – Phase Induction Machines Fed by PWM Converter.” IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.16, No.3, Sep 2001,pp.228-233.

- [14] K.J. Bradly et. al. "Enhanced Harmonic Injection for Determination of Harmonic Loss in Induction Machines." IEEE Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drive, No.475. Sep 2000, pp.212-217.
- [15] S. Khomfai, V. Kinnares and P. Viriya. "Investigation Into Core Losses due to Harmonics Voltage in PWM fed Induction Motors." IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems PED' 99 July 1999, pp. 104-109.
- [16] S. Khomfai, V. Kinnares and P. Viriya. "Influence of PWM Characteristic on the Core Losses due to Harmonic Voltage in PWM Fed Induction Motors." IEEE Power Engineering Society 2000, May 2000, pp. 365-369.
- [17] 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.
- [18] เฉลิมชัย คงมั่นประกายกิจ พิชิต ล้ายอง และขวัญฉวี ฉัตรอุทัย. "การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 205 - 210.
- [19] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator, ANSI/IEEE Std. 112-1996, 1997.
- [20] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, ANSI/IEEE Std. 519 - 1992, 1993.
- [21] A. E. Fitzgerald, C. K. Kingsley, Jr and S. D. Umans. Electric Machinery. 5th Ed. Singapore : McGraw - Hill. 1990.
- [22] M. G. Say. The Performance and Design of Alternating Current Machines. 3rd Ed. London : Pitman Press 1958.
- [23] R. M. Kerchner and G. F. Corcoran. Alternating Current Circuit. 4th Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1960.
- [24] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins. Power Electronics. 2rd Ed. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [25] J.Lewis Blackburn Consultant Bothell, Washington. Symmetrical Components for Power Systems Engineering.