

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อแรงบิดของ
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

STUDY OF EFFECTS OF HARMONICS ON TORQUE OF
THREE-PHASE INDUCTION MACHINES



เฉลิมชัย คงมันประกายกิจ
CHALERMCHAI KHONGMANPRAKAIKIT

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 44052
วัน, เดือน, ปี..... 25 ต.ค. 2545

b..... ๗๗๕๕๑๗๗
i..... ๒๒๒๖๓๑๗

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-93-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดที่ผู้พิมพ์หรือผู้จำหน่ายหนังสือเล่มนี้ขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ของสาธารณชนซึ่งผู้ใดจะนำไปใช้

**STUDY OF EFFECTS OF HARMONICS ON TORQUE OF
THREE-PHASE INDUCTION MACHINES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-9546-93-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส
นักศึกษา	นาย เฉลิมชัย คงมันประกายกิจ
รหัสประจำตัว	43061009
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นการนำเสนอเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคจรนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (BSRG) มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปไซน์ ฮาร์มอนิกส์สามเฟสของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าจากเทคนิคเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคจรนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถต่อในลักษณะของการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกหรือลบ (positive or negative sequence) เมื่อเทียบกับการเรียงลำดับของเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นความถี่และขนาดของรูปสัญญาณที่ได้จากตัวกำเนิดฮาร์มอนิกส์สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อกระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยนำเสนอและพิจารณาฮาร์มอนิกส์อันดับแตกต่างกัน ที่มี การเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ค่าต่างๆ โดยที่งานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงฮาร์มอนิกส์ที่กำเนิดมาจากตัวของภาระไฟฟ้าเอง

Thesis Title	Study of Effects of Harmonics on Torque of Three-Phase Induction Machines
Student	Mr. Chalermchai Khongmanprakaikit
Student ID.	43061009
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof. Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents the effects of harmonics on torque of three-phase induction machines. 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 in order to study the effect of harmonics on the input current and input power and torque of induction machines. 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.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำสั่งสอนของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชิต ถ้ายอง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ทั้งในด้านการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการทำงานที่ทำให้ผู้เขียนได้แนวคิดที่ดีและเป็นประโยชน์มาโดยตลอด ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง.

และ ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางในการทำวิจัยมาโดยตลอด.

ขอกราบขอบพระคุณ คุณจำเนียร ระกำ ที่เลี้ยงดู และสนับสนุนผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา และญาติพี่น้องทุกๆ คนรวมทั้งมิตรสหายที่เป็นผู้สนับสนุนและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา

เฉลิมชัย คงมันประกายกิจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 สนามแม่เหล็กหมุน.....	4
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	7
2.3 กำลังงานส่งผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	10
2.4 การวิเคราะห์วงจรเสมือน.....	11
2.5 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของรูปคลื่นรอยคาบ.....	13
บทที่ 3 การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....	16
3.1 การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	16
3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบบริล็คแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	16
3.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส.....	17
3.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....	21
3.2.1 การสูญเสียทองแดง.....	21
3.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลด.....	23
3.3 วงจรเสมือนต่อเฟสมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์.....	23
3.4 รูปสัญญาณสัปดาห์ไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	25
3.4.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน.....	25
3.4.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	27
3.4.3 การคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์.....	27
3.4.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 สัญญาณสัปดาห์ไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า.....	42
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า.....	47
4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า.....	52
บทที่ 5 ผลการจำลองแบบ.....	57
5.1 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า.....	58
5.2 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า.....	64
5.1 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อัลกอริทึมของโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	80
ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสมมาตรของรูปสี่เหลี่ยมในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์.....	15
5.1 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัว.....	58
5.2 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล.....	58
5.3 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล.....	64
5.4 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 5 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวางขดลวดสามเฟส.....	4
2.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นในสเตเตอร์ที่เวลาต่างๆ.....	7
2.3 ภาพตัดขวางมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	7
2.4 แผนภูมิการส่งกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	10
2.5 วงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลลิปเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพารามิเตอร์ต่างกัน.....	13
3.1 แผนภูมิโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	16
3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	17
3.3 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดของฮาร์มอนิกส์.....	17
3.4 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	19
3.5 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก.....	20
3.6 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ.....	20
3.7 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน.....	24
3.8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์มอนิกส์.....	24
3.9 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสตรงกับความถี่มูลฐาน.....	25
3.10 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา.....	26
3.11 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา.....	26
4.1 แผนภูมิการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	30
4.2 การต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	31
4.3 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2^{nd} ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	32
4.4 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2^{nd} ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	32
4.5 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3^{rd} ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	33
4.6 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 rd ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	33
4.7 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 4 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า.....	34
4.8 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 4 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	34
4.9 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	35
4.10 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	35
4.11 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 6 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	36
4.12 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 6 th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	36
4.13 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า.....	37
4.14 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	37
4.15 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 8 th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า.....	38
4.16 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 8 th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	38
4.17 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 9 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า.....	39
4.18 สัญญาณศักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 9 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	สัญญาณคักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 10 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า.....40
4.20	สัญญาณคักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 10 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....40
4.21	สัญญาณคักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า.....41
4.22	สัญญาณคักคาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ.....41
4.23	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....42
4.24	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....43
4.25	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....43
4.26	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....44
4.27	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....44
4.28	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....45
4.29	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....45
4.30	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....46
4.31	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคักคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....47
4.33	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....48
4.34	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....48
4.35	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....49
4.36	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....49
4.37	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....50
4.38	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....50
4.39	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....51
4.40	แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....51
4.41	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....52
4.42	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....53
4.43	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....53
4.44	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	54
4.46 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	55
4.47 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	55
4.48 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	56
4.49 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	56
5.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า.....	57
5.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า.....	57
5.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า.....	58
5.4 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	59
5.5 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	60
5.6 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	60
5.7 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	61
5.8 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	61
5.9 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	62
5.10 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	62

เอกสารนี้เป็น **อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %** ข้อมูลในเล่มนี้ใช้ประโยชน์ได้ **การคำนวณ**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	63
5.12 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	63
5.13 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	65
5.14 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	65
5.15 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	66
5.16 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	66
5.17 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	67
5.18 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	67
5.19 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	68
5.20 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	68
5.21 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	69
5.22 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	70
5.23 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....71
5.25	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....72
5.26	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....72
5.27	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....73
5.28	แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....73
5.29	แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....74
5.30	แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11 th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %.....74
6.1	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์มอนิกส์.....75
6.2	กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์มอนิกส์โดยผล การจำลองแบบ.....76
6.3	กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์มอนิกส์.....76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความก้าวหน้าและการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั้งทางด้านที่อยู่อาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดมลภาวะทางไฟฟ้าขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวจากบทความการศึกษาวิจัย [1-2] แสดงให้เห็นว่ามลภาวะทางไฟฟ้าที่กำเนิดจากการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆที่ต่อรวมในระบบด้วย

ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดการกระตุ้นแนวทางในการวิเคราะห์ผลของมลภาวะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลาย [3-16] ในส่วนของภาระทางไฟฟ้าในงานทางด้านอุตสาหกรรมโดยส่วนหนึ่งจะเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงเป็นที่มาของปัญหาที่ว่าฮาร์มอนิกส์จากแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังกล่าว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยมีจุดประสงค์ในวิเคราะห์ว่าฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างไร โดยฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์จะเป็นฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆ และค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันอันดับกันจะส่งผลกระทบแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นฮาร์มอนิกส์แบบสามเฟสที่มีการเรียงลำดับในทิศทางบวกและลบ (positive and negative sequence) เพราะฮาร์มอนิกส์แบบนี้สามารถทำการวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์ได้อย่างชัดเจนว่าฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันนี้สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์โดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนมาใช้ร่วมในการวิเคราะห์ ซึ่งจะสามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับหลักการดังกล่าว

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนในวิทยานิพนธ์นี้การกำหนดการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางจากฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบจะสามารถกำหนดอันดับและขนาดของฮาร์มอนิกส์ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะอาศัยการประยุกต์เทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ [17-18] ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าวจะใช้ในการทดสอบผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยฮาร์มอนิกส์ที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายนี้ทำให้ทราบแนวโน้มว่าฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการวัดและวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์โดยทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่างขนาดกันเพื่อยืนยันผลการทดสอบและเพื่อดูแนวโน้มผลที่เกิดขึ้นว่าผลที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์นี้เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดแตกต่างกันผลการทดสอบจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณโดยอาศัยการประยุกต์หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนและทฤษฎีการทับซ้อนมาใช้ในการวิเคราะห์กับวงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนตามลำดับข้างล่างดังรายละเอียดจะประกอบอยู่ในวิทยานิพนธ์

-ศึกษาค้นคว้าการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังว่ามีสาเหตุการเกิดขึ้นว่าเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดใดและส่งผลกระทบมากน้อยเพียงใด

-ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Synchronous Reluctance Generator, BSRG) ว่ามีหลักการทำงานอย่างไรและขั้นตอนในการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

-ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่แตกต่างกันโดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าเท่ากันในทุกอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าเพื่อดูผลของอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างจะส่งผลกระทบต่ออย่างไร

-ทดสอบดังรูปแบบข้างต้นแต่เพิ่มขนาดของค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าให้สูงขึ้น

-ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบ
ดูแนวโน้มผลการทดสอบว่ามีแนวโน้มอย่างไรและเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบว่าในกรณีของ
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่างขนาดกันผลกระทบของฮาร์มอนิกส์จะส่งผลแบบเดียวกันหรือไม่

-สร้างรูปแบบวงจรเสมือนมาใช้ในการวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีที่ป้อนโดย
แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

-พิจารณาผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบ
ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์รูปแบบวงจรเสมือนที่สร้างขึ้น

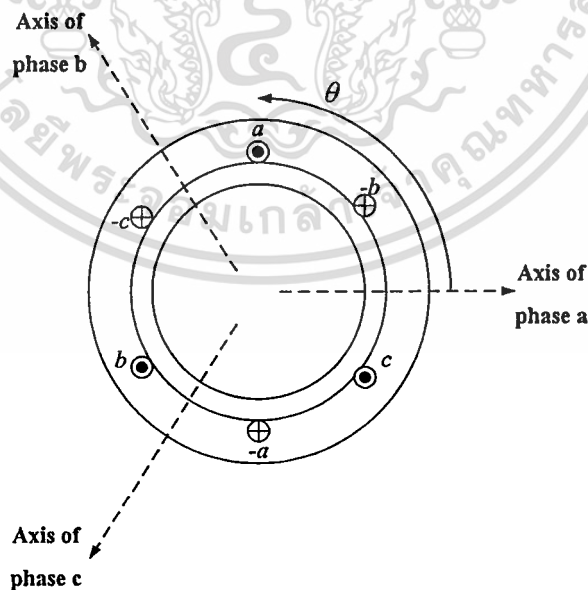
-สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 สนามแม่เหล็กหมุน

หลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนนี้เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟรมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งทำให้คล้ายกับว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในนั้นเกิดจากการหมุนของแม่เหล็กถาวร ซึ่งความเป็นจริงเกิดจากตำแหน่งของแรงลัพท์ของเส้นแรงแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามค่าของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จากเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้จะเห็นได้ว่าการพันขดลวดอยู่ที่สเตเตอร์ โดยแต่ละเฟรมมีมุมต่างกัน 120 องศาไฟฟ้าตามลำดับเฟส A, B, และ C ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่สเตเตอร์ โดยจะต่อแบบสตาร์ (Star or Y) หรือ เดลต้า (Delta) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้า ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์นั้น จะทำให้เกิดผลของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปตามสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้ โดยจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขสามเฟสสมดุลงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวางขดลวดสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force, mmf) ในแต่ละเฟสเท่ากับ

$$F_a = F_{\max} \cos(\omega t) \cos \theta \quad (2.1)$$

$$F_b = F_{\max} (\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$F_c = F_{\max} (\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \quad (2.3)$$

เมื่อ θ คือมุมองศาทางไฟฟ้า

ω คือความเร็วเชิงมุม

โดยที่

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \quad (2.4)$$

เมื่อ K_w คือค่าตัวประกอบของการพันขดลวด

N_{ph} คือจำนวนรอบต่อเฟส

P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากฟังก์ชัน $\cos a \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a-b) + \cos(a+b))$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.1)

$$F_a = \frac{1}{2} F_{\max} (\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)) \quad (2.5)$$

$$F_a = F_{a1}^+ + F_{a1}^- \quad (2.6)$$

โดยในเทอมของ F_{a1}^+ คือ Forward field ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$F_{a1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.7)$$

โดยในเทอมของ F_{a1}^- คือ Backward field ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

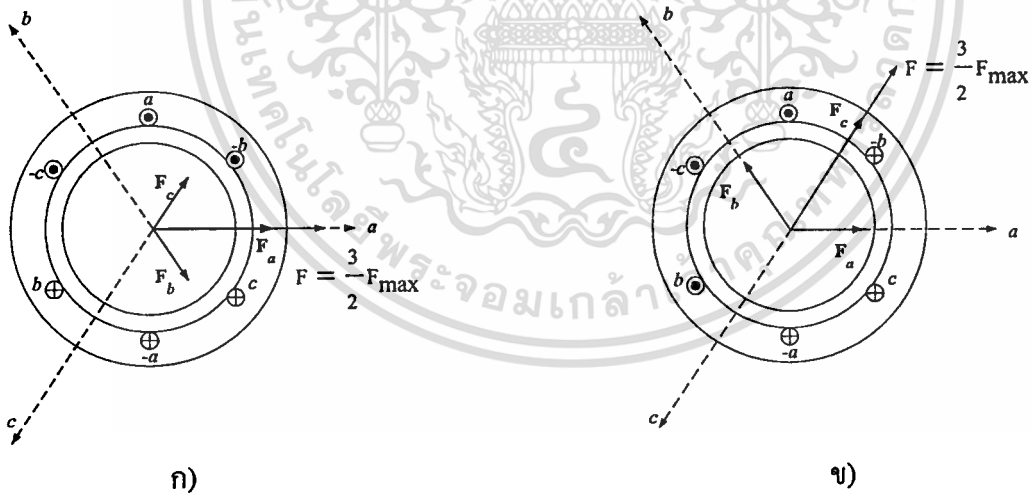
$$F_{a1}^- = -\frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.8)$$

ในขณะที่เดียวกันแรงเคลื่อนแม่เหล็กในเฟส b และ c จะอยู่ในแนวแกน $\theta=120^\circ$ และ $\theta=-120^\circ$ ตามลำดับ ดังนั้นผลรวมของเทอม Backward field จะมีค่าเท่ากับ

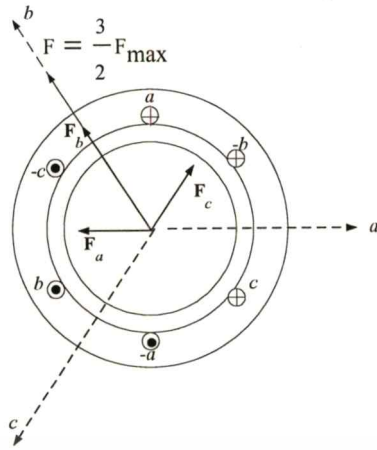
$$F^-(\theta, t) = F_{a1}^- + F_{b1}^- + F_{c1}^- = 0 \quad (2.9)$$

ผลรวมของ Forward field มีค่าเท่ากับ

$$F^+(\theta, t) = F_{a1}^+ + F_{b1}^+ + F_{c1}^+ = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่รวมที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ที่เวลาต่างๆ

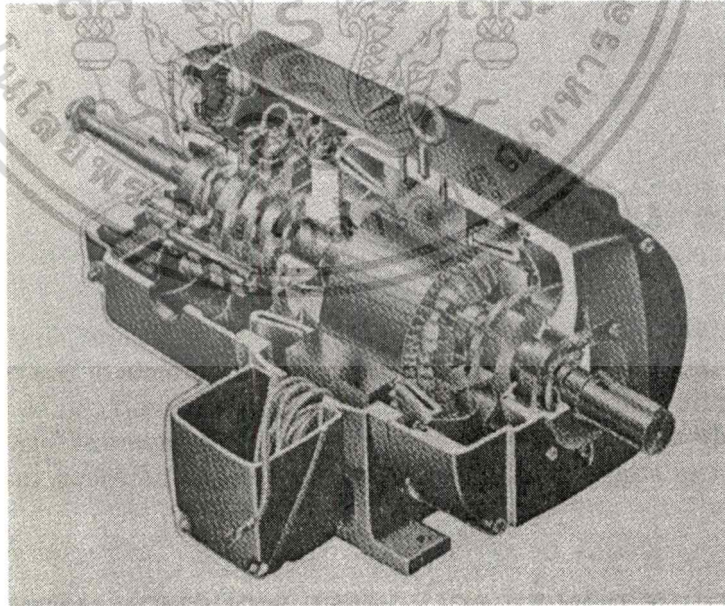


ก)

รูปที่ 2.2 (ต่อ)

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะโครงสร้างคือ ส่วนที่อยู่กับที่สแตเตอร์(Stator) และส่วนหมุนหรือโรเตอร์(Rotor) ซึ่งส่วนที่อยู่กับที่นั้นมีหน้าที่ยัดขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ที่บรรจุอยู่ในร่องสลีต (Slot) และส่วนหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้สามารถที่จะออกเป็นลักษณะโครงสร้างได้อีก 2 ชนิดคือ



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage rotor) แกนหมุนทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตอัดซ้อนกัน เซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สล๊อต ตรงกลางแผ่นเจาะรูสำหรับสอดเพลลา และนำแกนตัวหมุนไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดอยู่ในร่องสล๊อต และมีครีบยื่นออกไปสองข้างเพื่อระบายความร้อน

- แบบขดลวดพันรอบตัวหมุน (Wound rotor) ตัวหมุนแบบนี้จะมีขดลวดทองแดงพันรอบตัวหมุน ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลลิปริง (Slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนของตัวหมุน โดยส่วนของตัวหมุนจะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในช่องอากาศ (Air gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และตัวหมุน สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad (2.11)$$

โดยที่ N_s คือความเร็วเชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f คือความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับขดลวดสเตเตอร์

P คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่ตัวหมุนอยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในตัวหมุน ซึ่งมีความถี่เดียวกับแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า แต่ในขณะที่ตัวหมุนที่ความเร็วเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ตัวหมุน ดังนั้นจะไม่มีแรงบิดเกิดขึ้น และขณะที่ตัวหมุนมีความเร็วใดๆ (N_r) ที่แตกต่างจากความเร็วเชิงโคโรนัส จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นบนตัวหมุนและทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งความแตกต่างของความเร็วตัวหมุนนี้จะแสดงอยู่ในค่าของ สลิป (Per-unit Slip) ซึ่งแสดงเป็นค่าต่อหน่วย

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.12)$$

โดยที่ ω_s คือความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator angular frequency)

ω_r คือความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของตัวหมุน (Rotor angular frequency)

s คือค่า per-unit slip

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ขณะที่ตัวหมุนอยู่กับที่ เส้นแรงแม่เหล็กของ

สนามแม่เหล็กจะหมุนกวาดผ่านขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส แรงเคลื่อนไฟ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าเหนียวหน้าที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นจะมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์ และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันฟ้าเหนียวในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนียวในโรเตอร์จะเท่ากับ ความถี่ของสเตเตอร์ กรณีนี้ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยอัตราที่เส้นแรงแม่เหล็ก กวาดผ่านตัวนำจะช้าลง ค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนียวของโรเตอร์จะ ลดลงเป็นสัดส่วนกับสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = sE_2 \quad (2.13)$$

$$X_r = sE_2 \quad (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป

$$f_r = sf \quad (2.15)$$

เมื่อ E_r คือแรงดันไฟฟ้าเหนียวของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ

E_2 คือแรงดันไฟฟ้าเหนียวของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่

X_r คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสขณะโรเตอร์อยู่กับที่

f_r คือความถี่โรเตอร์

f คือความถี่ของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ากับมอเตอร์เหนียว

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังงานกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าไม่ได้เกิดจากการที่แรงดันไฟฟ้าให้กับโรเตอร์ โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดกำลังงานผ่านช่องว่างอากาศ ด้วยการเหนียวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ที่โรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนียวต่อเฟสก็คือสมการที่ (2.13) ถ้าเอาแรงเคลื่อนจำนวนนี้หารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์ (Z_2) ก็จะได้กระแสโรเตอร์ต่อเฟส (I_2) ไหลอยู่ในโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ ได้ดังนี้

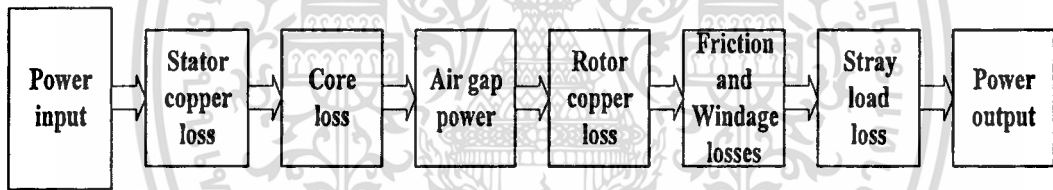
$$I_2 = \frac{sE_2}{Z_2} = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2^2 + s^2 X_2^2)}} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) ใช้คำนวณหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ทั้งขณะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มหมุน (Start) และเมื่อหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใดๆก็ได้ โดยขณะเริ่มหมุนให้แทนค่าสลิป $s=1$ ลงในสมการ (2.16) กระแสโรเตอร์ขณะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มหมุนดังนี้

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}} \quad (2.17)$$

2.3 กำลังงานส่งผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีกำลังงานด้านเข้าเป็นกำลังงานไฟฟ้าสามเฟสของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และใน ส่วนกำลังทางด้านออกของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกตัดวงจรจึงไม่มีกำลังไฟฟ้าทางด้านออก แต่จะมีกำลังงานกลออกมาแทน ความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าทางด้านเข้า (P_{in}) และกำลังงานกลในด้านออก (P_{out}) แสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 2.4

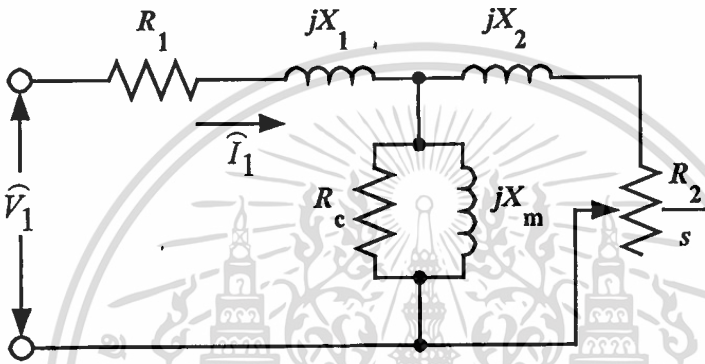


รูปที่ 2.4 แผนภูมิการส่งกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กำลังงานไฟฟ้าสามเฟสป้อนเข้าขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดการสูญเสียขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์เป็นอันดับแรก และการสูญเสียในลำดับต่อมาคือการสูญเสียในรูปของ Hysteresis และ Eddy current ซึ่งการสูญเสียในส่วนนี้เรียกโดยรวมว่า การสูญเสียแกนเหล็ก (Core losses) และกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านข้ามช่องว่างอากาศ ซึ่งจะเรียกกำลังในส่วนนี้ว่า กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (Air gap power) ซึ่งเป็นกำลังทางด้านเข้าของโรเตอร์ ซึ่งในส่วนนี้ก็จะมีการสูญเสียในขดลวดของโรเตอร์ และใน ส่วนของการสูญเสียทางกล (Mechanical losses) ในส่วนของโรเตอร์นี้จะมีการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานลมและความฝืดของลูกปืน (Friction and Windage losses) และการสูญเสียเนื่องมาจากสเตรย์โหลด (Stray load losses) และกำลังงานที่เหลือก็จะเป็นกำลังงานกลที่ใช้ในการขับภาระหรือกำลังงานกลในด้านออก (Power output, P_{out})

2.4 การวิเคราะห์ห้วงจรเสมือน

การวิเคราะห์ห้วงจรเสมือนและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีการใช้งาน วงจรเสมือนเป็นสิ่งที่จะสามารถทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ภายในต่างๆที่เปลี่ยนแปลงได้เช่น กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้าสูญเสีย แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นๆได้ วงจรเสมือนที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีลักษณะความเท่ากันในพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของทั้งสามเฟส ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้วงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟส [22] มาใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งใช้ในกรณีแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้าสมดุล ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- เมื่อ \hat{V}_1 เป็นค่าคิกคาไฟฟ้าป้อนเข้า
 \hat{I}_1 เป็นค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้า
 R_1 เป็นค่าความต้านทานที่สเตเตอร์
 R_2 เป็นค่าความต้านทานที่โรเตอร์ที่ transfer to stator
 X_1 เป็นค่า Stator leakage reactance
 X_2 เป็นค่า Rotor leakage reactance transfer to stator
 X_m เป็นค่า Magnetizing reactance
 R_c เป็นค่า Core loss resistance

เมื่อป้อนคิกคาไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ช่องว่างอากาศ เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดสเตเตอร์ที่พันอยู่บนแกนเหล็ก สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าได้จากสมการ (2.18)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\theta \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดความสูญเสียขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss, P_{scl})

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.19)$$

จากรูปที่ 2.4 ความสูญเสียเนื่องจากแรงต้านทานลมและความฝืดของลูกปืน (Friction and Windage losses, $P_{F\&W}$) และการสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลด (Stray load losses, P_{misc}) และการสูญเสียแกนเหล็ก (Core losses, P_{core}) ซึ่งการสูญเสียโดยรวมของการสูญเสียดังกล่าวจะถูกเรียกรวมกันว่า Rotational losses (P_{rot}) ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$P_{rot} = P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \quad (2.20)$$

สามารถที่จะหาค่ากำลังไฟฟ้าส่งผ่านช่องว่างอากาศ (P_{airgap}) ได้จาก

$$P_{airgap} = P_{in} - P_{scl} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.21)$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดความสูญเสียขึ้นที่ขดลวดของโรเตอร์ (P_{rcl}) ส่วนความสูญเสียแกนเหล็กของโรเตอร์จะถูกรวมอยู่กับ Rotational losses แล้ว

$$P_{rcl} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.22)$$

กำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากโรเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังงานกล (P_{conv}) เมื่อลบด้วยค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดของโรเตอร์

$$P_{conv} = P_{airgap} - P_{rcl} \quad (2.23)$$

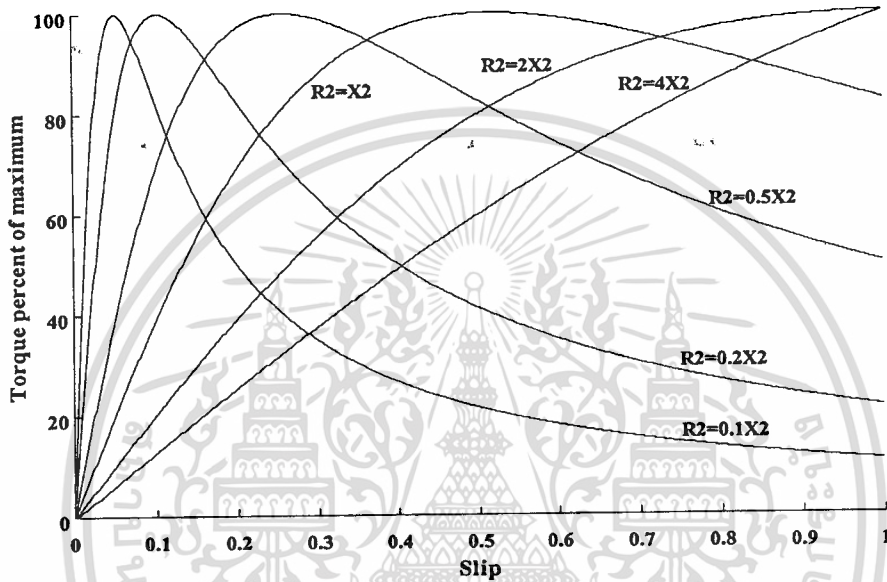
ฉะนั้นกำลังงานกลทางด้านออก (P_{out}) จะสามารถหาได้จากการนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากโรเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังงานกลลบด้วยค่า Rotational losses ดังสมการข้างล่าง

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบันฯ

แรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากการนำค่ากำลังงานกลทางค้ำนอก (P_{out}) หารด้วยความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r)

$$T_m = \frac{P_{out}}{\omega_r} \tag{2.25}$$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิปเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพารามิเตอร์ต่างกัน

ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงบิดและค่าสลิปต่อหน่วยจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ภายในของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีลักษณะอย่างไรนั้นวงจรเสมือนทำให้สามารถทราบถึงคุณลักษณะทางปฏิบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

2.5 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของรูปคลื่นรายนายคาบ

รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ $f(t)$ รายนายคาบที่มีความถี่เชิงมุม (ω) สามารถที่จะกระจายให้อยู่ในเทอมขององค์ประกอบความถี่ได้ดังนี้

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)\} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $F_0 = \frac{1}{2} a_0$ คือค่าเฉลี่ยจากสมการที่ (2.26)

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(k\omega t) d(\omega t) \quad k=0, \dots, \infty \quad (2.27)$$

และ

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(k\omega t) d(\omega t) \quad k=0, \dots, \infty \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) เมื่อ $\omega=2\pi/T$

$$F_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.29)$$

ในสมการ (2.26) องค์ประกอบของแต่ละความถี่ $[f_k(t)=a_k \cos(k\omega t)+b_k \sin(k\omega t)]$ สามารถที่แสดงได้ในรูปของเฟสเซอร์ในเทอมของค่า root-mean-square (rms)

$$F_k = F_k e^{j\phi_k} \quad (2.30)$$

เมื่อขนาดของค่า root-mean-square (rms) เท่ากับ

$$F_k = \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.31)$$

และเฟสเลื่อน (ϕ_k) จะมีสมการดังต่อไปนี้

$$\tan(\phi_k) = \frac{(-b_k)}{a_k} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า root-mean-square ของฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถที่จะกระจายให้อยู่ในเทอมของค่า root-mean-square ขององค์ประกอบอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$F = \sqrt{\left(F_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} F_k^2 \right)} \quad (2.33)$$

การใช้คุณสมบัติความสมมาตรของรูปสัญญาณในการคำนวณหาค่า a_k และ b_k โดยสมการ (2.27) และ (2.28) จะใช้ตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นตารางสรุปความสมมาตรในการวิเคราะห์ฟูเรียร์

ตารางที่ 2.1 ความสมมาตรของรูปสัญญาณในการวิเคราะห์ฟูเรียร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้ประโยชน์ตามการคำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

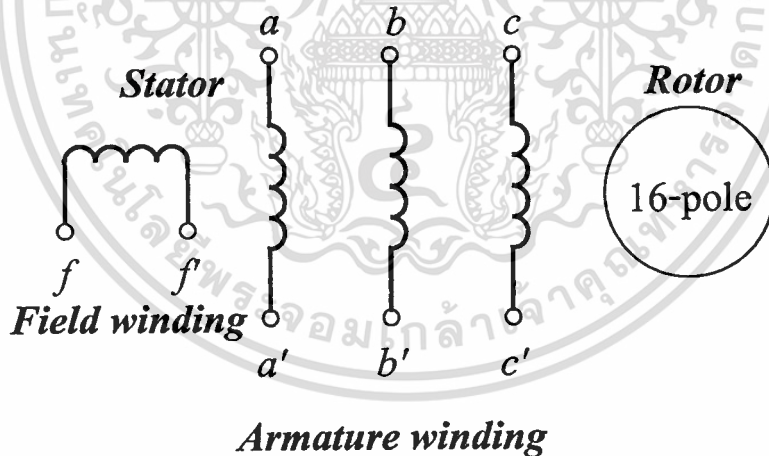
บทที่ 3

การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

3.1 การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

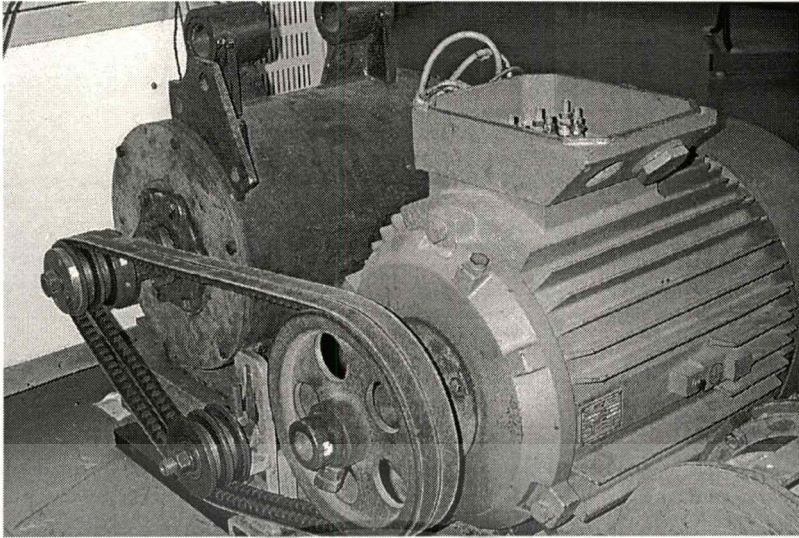
โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Synchronous Reluctance Generator, BSRG) จะเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบสามเฟส มีขั้วแม่เหล็กจำนวน 16 ขั้ว สามารถที่จะแบ่งตามลักษณะขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้เป็นสองส่วนคือส่วนของขดลวดกระตุ้น (Field winding) และขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดนี้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสโดยทั่วไปคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะไม่มีขดลวดที่โรเตอร์จึงมีความสามารถในการหมุนที่ความเร็วสูงๆ ได้



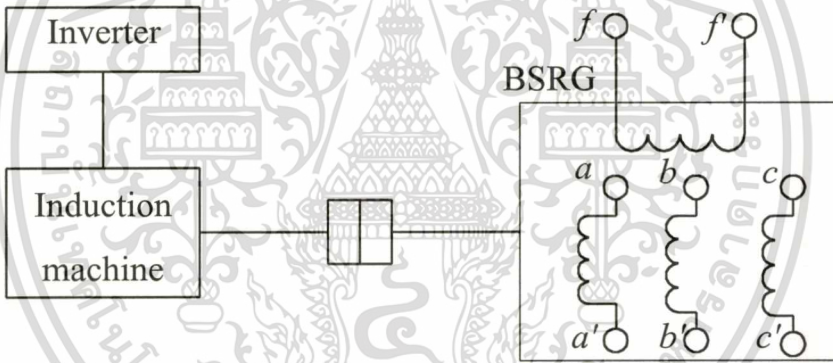
รูปที่ 3.1 แผนภูมิโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

โดยที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสามเฟส ในขณะที่อันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการจะสามารถควบคุมที่ความเร็วของโรเตอร์ ดังตัวอย่างการปรับฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11 ความถี่ 550 เฮิรตซ์ ความเร็วเชิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้วจะเท่ากับ 4125 รอบต่ออนาที และค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าจะสามารถที่จะปรับได้โดย

เอกสารป้อนไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้ากับขดลวดกระตุ้นที่อยู่ใต้เตเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบรีลัคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน



รูปที่ 3.3 แผนภูมิการปรับอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์

3.1.2 การต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าสามเฟส

รูปคลื่นสัญญาณศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ในโดเมนของเวลาสามารถทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยมีองค์ประกอบของความถี่มูลฐาน(Fundamental frequency) และองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics frequency) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของฟูเรียร์ โดยสามารถกระจายได้ดังสมการ (3.1)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V_{m,1}$ คือค่าศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน

$V_{m,k}$ คือค่าศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

k คืออันดับของฮาร์โมนิกส์

ω_0 คือค่าความเร็วเชิงมุมความถี่มูลฐาน

ϕ_k คือค่ามุมเฟสของศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

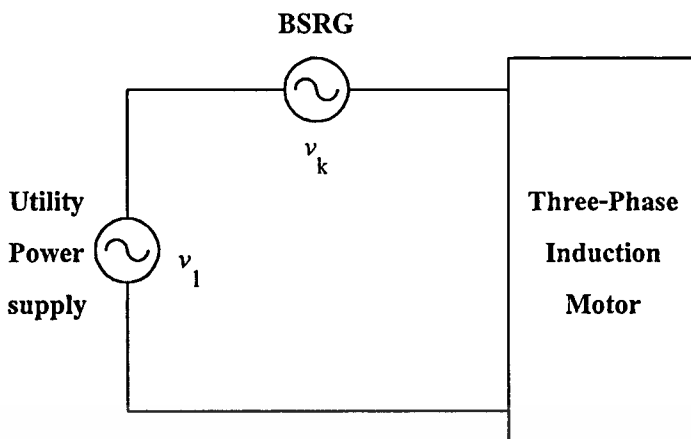
ค่าของความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแสดงให้อยู่ในสมการของความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) ซึ่งกำหนดมาตรฐานโดย Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 [20] ซึ่งสามารถกำหนดในค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐานโดยค่าของความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมทั้งศักดาและกระแสไฟฟ้า จะใช้การกำหนดลักษณะเดียวกัน โดยค่าของความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสก็จะใช้องค์ประกอบความถี่ของกระแสมาวิเคราะห์ (THD_i) โดยที่สมการ (3.2) จะเป็นการกำหนดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของศักดาไฟฟ้าซึ่งจะมีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

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

ค่าของศักดาไฟฟ้าที่เพี้ยนไป ซึ่งเป็นผลเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้างศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ สามารถแสดงในค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (Voltage Distortion Factor, VDF) โดยเป็นค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดของฮาร์โมนิกส์กับค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดของความถี่มูลฐาน

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

โดยมีลักษณะการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่ง โครนัสแบบบริลด์แทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน อนุกรมเข้ากับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเพื่อป้อนศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ดังรูปที่ 3.4

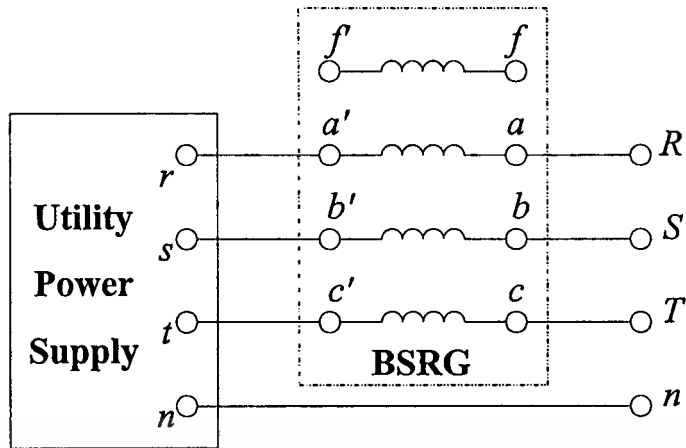


รูปที่ 3.4 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โดยมีสมการศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะประกอบด้วยศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานรวมกับศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ จากศักดาไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสามารถที่จะแบ่งออกเป็นสองแบบตามการเรียงลำดับเฟสของศักดาไฟฟ้าของฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนเข้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามการเรียงลำดับเฟสของฮาร์โมนิกส์ ซึ่งใช้การอ้างอิงจากการเรียงลำดับเฟสของศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน โดยมีสมการอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก (positive sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อ ดังรูปที่ 3.5

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

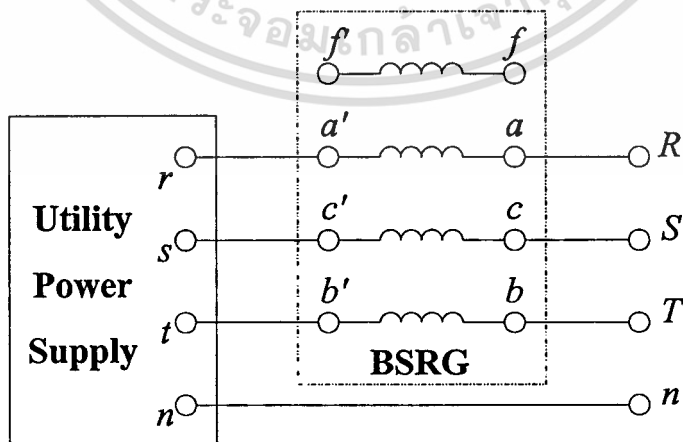
ซึ่งลักษณะการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิง โครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส การต่อจะใช้การอ้างอิงของลำดับเฟส r , s และ t โดยขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิง โครนัสแบบรีล็กแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในกรณีที่ต้องให้ฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวก เฟส r จะนำไปต่อเข้ากับขั้ว a' , เฟส s จะนำไปต่อเข้ากับขั้ว b' และเฟส t จะนำไปต่อเข้ากับขั้ว c' ตามลำดับ ส่วนปลายขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์จะนำไปต่อเพื่อจ่ายศักดาไฟฟ้าในการทดสอบ ในกรณีที่ต้องให้ฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบก็จะอาศัยการต่อสลับขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ระหว่างขั้ว b' และขั้ว c' ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสบวก

และมีสมการอันดับอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ (negative sequence) ดังนี้และมีแผนภูมิการต่อดังรูปที่ 3.6

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



รูปที่ 3.6 แผนภูมิการต่ออันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์ศักดาไฟฟ้าลำดับเฟสลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 รูปแบบการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์

3.2.1 การสูญเสียทองแดง

การสูญเสียเนื่องจากทองแดงนี้จะสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิและผลของสกินเอฟเฟค (Skin effect) บนขดลวด ซึ่งค่าของสกินเอฟเฟคในขดลวดสเตเตอร์ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในกรณีใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับพิกัดภาระ จะไม่นำมาพิจารณา แต่ผลของสกินเอฟเฟคจะมีมากในกรณีของแท่งตัวนำในโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ค่าของสกินเอฟเฟคจะไม่นำมาคิดโดยเปรียบเทียบกับค่าสลิปของความถี่มูลฐาน แต่จะใช้คิดกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ เนื่องจากฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นจากสเตเตอร์จะถูกเหนี่ยวนำไปที่โรเตอร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลของสกินเอฟเฟค ค่าความต้านทาน โรเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ (f_k) จะแสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ R_{rdc} คือค่าของความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

d คือค่าความลึกของแท่งตัวนำ (bar depth)

C_1 คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างและวัสดุ

โดยจำนวนของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่นำมาคิดพิจารณานั้นจะใช้การคำนวณแบบทับซ้อน (Super position) โดยจะคิดทีละความถี่ของฮาร์มอนิกส์

3.2.2 การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก

การประมาณค่าของการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กซึ่งเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กของฮาร์มอนิกส์จะทำให้ยากซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ใช้ในการทำแกนเหล็ก จึงต้องสันนิษฐานค่าการสูญเสียจากแกนเหล็กโดยเป็นผลมาจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมของฮาร์มอนิกส์ (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 คือค่าสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อค่าของเส้นแรงแม่เหล็กรวมหรือเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ จะมีค่าสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V_m) โดยที่ค่า k_c คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียแกนเหล็กดังสมการ

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

และสมการที่ (3.9) สามารถที่จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

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

ค่าของความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือน (R_m) สามารถที่จะหาได้ดังนี้

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

จากสมการดังกล่าวจะสันนิษฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮีสเทอรีซิส (k_h) และกระแสไหลวน (k_e) จะมีค่าคงที่ๆ ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (f_k) ใดๆ และเมื่อค่าสลิปฮาร์มอนิกส์ประมาณ 1 ($s_k=1$) ค่าความต้านทานการสูญเสียแกนเหล็กเสมือนที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ (R_{mk}) จะมีค่าดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการข้างต้นความสัมพันธ์ของการสูญเสียแกนเหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ากำลังสอง ซึ่งก็คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งการสูญเสียแกนเหล็กนี้ค่าของการเปลี่ยนแปลงสลิปจะไม่มีผล

3.2.3 การสูญเสียเนื่องจากสเตรย์โหลด

การสูญเสียสเตรย์โหลดคือการสูญเสียที่นอกเหนือไปจากการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียเนื่องจากการหมุน ในความเป็นจริงการสูญเสียสเตรย์จะประกอบไปด้วยความสูญเสียต่างๆ มากมาย โดยในทางปฏิบัติการสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก End-leakage และ Skew-leakage จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียสเตรย์ซึ่งจะพิจารณารูปแบบการสูญเสียสเตรย์ในรูปแบบลักษณะรูปแบบการสูญเสียของแกนเหล็ก โดยที่ค่าของการสูญเสียสเตรย์ที่สเตเตอร์ค่อเฟส (P_{sin}) ที่ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ (f_k) จะเป็นดังนี้

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

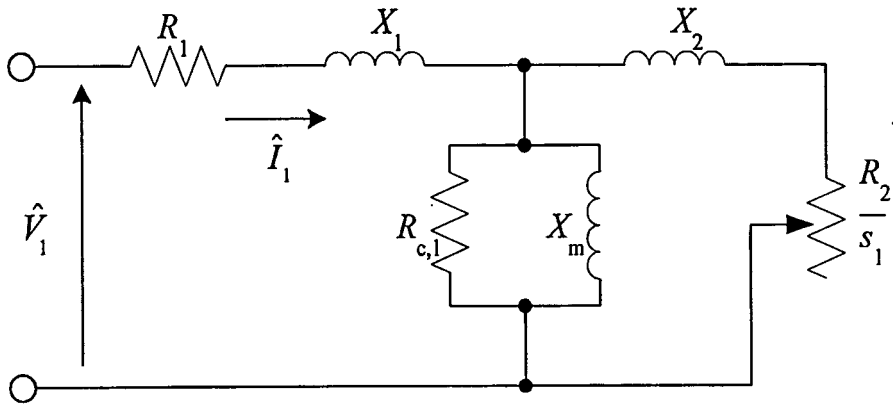
เมื่อ V_{sin} คือค่าแรงดันผ่านความเหนี่ยวนำสเตเตอร์รั่ว (stator leakage inductance)

k_{sin} คือค่าคงที่การสูญเสียสเตรย์

3.3 วงจรเสมือนต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับฮาร์โมนิกส์

ผลจากฮาร์โมนิกส์ที่ปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ในปัจจุบันการวิเคราะห์ผลการปฏิบัติงานหรือสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มีการพัฒนาการวิเคราะห์อย่างแพร่หลาย ดังจากบทความวิชาการ [3-16] ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การวิเคราะห์คุณลักษณะทางปฏิบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้การอ้างอิงจากวงจรเสมือนมาตรฐานต่อเฟส [22] ในส่วนกรณีของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์วงจรเสมือนที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ X_1 , X_2 และ X_m จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของฮาร์โมนิกส์ จากเหตุผลดังกล่าวการวิเคราะห์คุณลักษณะทางปฏิบัติจึงต้องประยุกต์หลักการการทับซ้อน (superposition) มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยแบ่งวงจรเสมือนออกเป็นสองส่วนตามความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้า

กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในส่วนของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ารูปไซน์ความถี่มูลฐานเน้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

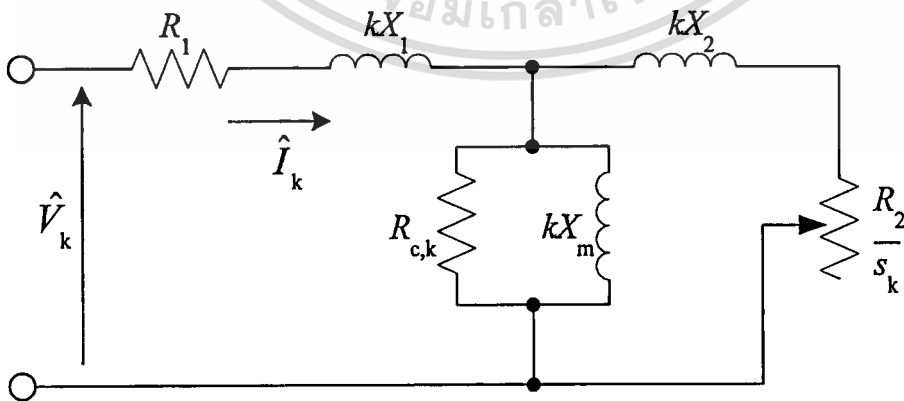


รูปที่ 3.7 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่คักค่าไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่
 มาตรฐาน

- เมื่อ \hat{V}_1 เป็นค่าคักค่าไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มาตรฐาน
- \hat{I}_1 เป็นค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มาตรฐาน
- R_1 เป็นค่าความต้านทานที่สเตเตอร์
- R_2 เป็นค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ transfer to stator
- X_1 เป็นค่าStator leakage reactance
- X_2 เป็นค่าRotor leakage reactance transfer to stator
- X_m เป็นค่าMagnetizing reactance
- $R_{c,1}$ เป็นค่าCore loss resistance ที่ความถี่มาตรฐาน

และวงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับคักค่าไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีความถี่คักค่าไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ
 k^{th} ฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \hat{v}_k เป็นค่าศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

\hat{i}_k เป็นค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

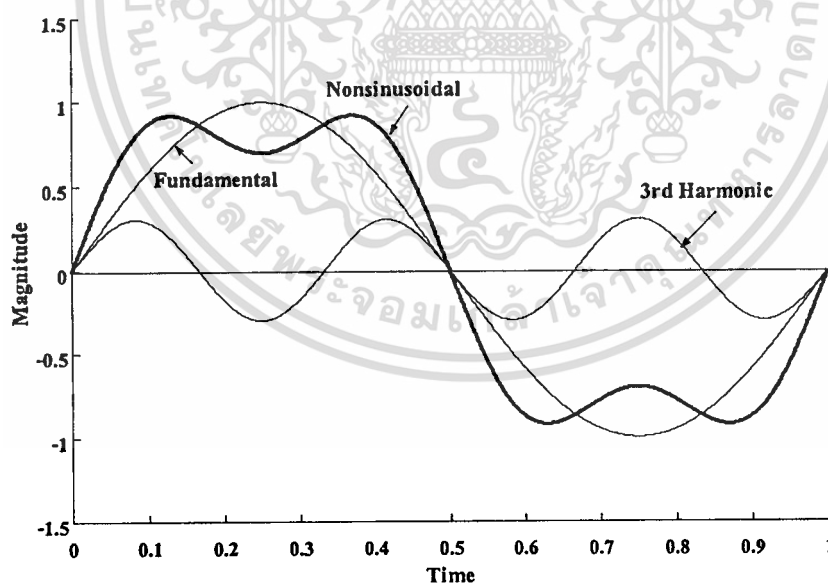
$R_{c,k}$ เป็นค่าCore loss resistance ที่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

ซึ่งการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการของการทับซ้อนมารวมนิเคราะห์จะกล่าวในหัวข้อของรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

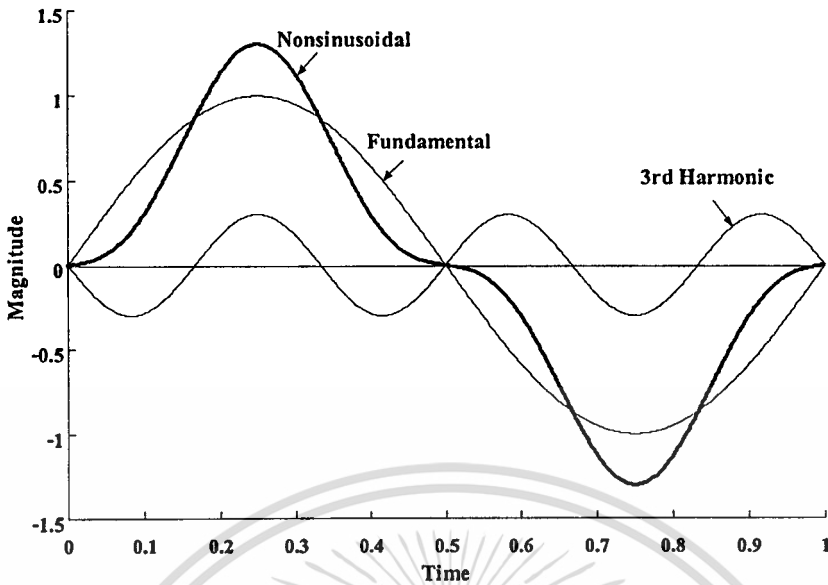
3.4 รูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

3.4.1 ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐาน

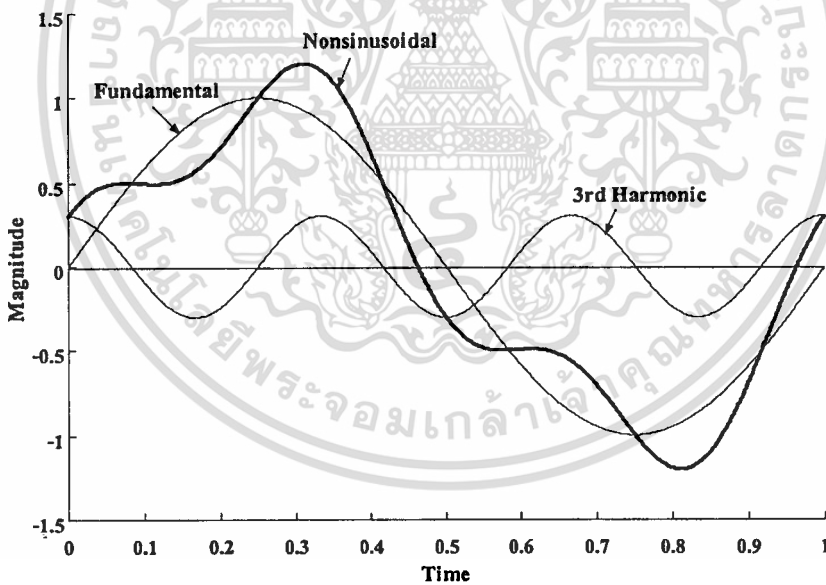
ผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อความถี่มูลฐานสามารถที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.11 ซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเมื่อฮาร์โมนิกส์ที่นำมารวมกับความถี่มูลฐานแล้วรูปแบบของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.9 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสตรงกับความถี่มูลฐาน



รูปที่ 3.10 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 180 องศา



รูปที่ 3.11 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสเลื่อนจากความถี่มูลฐาน 90 องศา

จากรูปดังกล่าวจะยกตัวอย่างจากฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 มารวมกับความถี่มูลฐานสามารถที่จะเห็นผลของเฟสเลื่อนของฮาร์โมนิกส์จะส่งผลกระทบต่อรูปสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าหรือค่า root-mean-square (rms) จากรูปสัญญาณไฟฟ้าทั่วไปหาได้จาก $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}$ ดังนั้นการคำนวณค่าประสิทธิผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะสามารถทำได้โดยการกระจายค่าในองค์ประกอบของความถี่แต่ละตัว ดังรูปการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่มีรูปสัญญาณที่ซับซ้อนดัง $i = I_0 + I_{m,1} \sin \omega t + I_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots + I_{m,k} \sin(k\omega t + \alpha_k)$ ดังนั้น

$$I = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [I_0 + I_{m,1} \sin \omega t + I_{m,2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_{m,3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots + I_{m,k} \sin(k\omega t + \alpha_k)]^2 dt \right\}^{1/2}$$

$$= \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m,1}^2 + I_{m,2}^2 + I_{m,3}^2 + I_{m,4}^2 + \dots + I_{m,k}^2}{2}} \quad (3.15)$$

เมื่อ $\frac{I_{m,1}}{\sqrt{2}} = I_1$, $\frac{I_{m,2}}{\sqrt{2}} = I_2$ และ $\frac{I_{m,k}}{\sqrt{2}} = I_k$ นำมาแทนค่าในสมการที่ 3.15

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_k^2} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.15) จะใช้ในกรณีของการทราบค่าสูงสุดของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ และสมการที่ (3.16) จะใช้ในกรณีที่ทราบค่าประสิทธิผลของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ซึ่งจะเรียกค่าที่ได้จากสมการนี้ก็คืออย่างว่า root-sum-square value, (rss) ซึ่งการวิเคราะห์ค่าประสิทธิผลของแรงดันไฟฟ้าก็จะใช้วิธีการคำนวณลักษณะเดียวกัน

3.4.3 การคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าเมื่อรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

การกำหนดค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย โดยทั่วไปจะลักษณะอยู่ในรูปแบบลักษณะสมการดังต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (3.17)$$

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

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

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{m,1}\sin(\omega t + a_1) + V_{m,2}\sin(2\omega t + a_2) + V_{m,3}\sin(3\omega t + a_3) + \dots][I_{m,1}\sin(\omega t + a'_1) + I_{m,2}\sin(2\omega t + a'_2) + I_{m,3}\sin(3\omega t + a'_3) + \dots] dt \quad (3.18)$$

เมื่อผลคูณระหว่างความถี่ฟังก์ชันไซน์จะมีค่า

$$\frac{1}{T} \int_0^T A\sin(m\omega t + a)B\sin(m\omega t + a') dt = \frac{AB}{2} \cos(a - a') \quad (3.19)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.19) จะใช้แทนในสมการที่ (3.18)

$$P = \frac{V_{m,1}I_{m,1}}{2} \cos(a_1 - a'_1) + \frac{V_{m,2}I_{m,2}}{2} \cos(a_2 - a'_2) + \frac{V_{m,3}I_{m,3}}{2} \cos(a_3 - a'_3) + \dots \quad (3.20)$$

เมื่อ $\frac{V_{m,1}I_{m,1}}{2} = \frac{V_{m,1}}{\sqrt{2}} \frac{I_{m,1}}{\sqrt{2}} = V_1 I_1$

$$P = V_1 I_1 \cos(a_1 - a'_1) + V_2 I_2 \cos(a_2 - a'_2) + V_3 I_3 \cos(a_3 - a'_3) + \dots \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.21) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตระหว่างผลคูณของแรงดันกับกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน

3.4.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังงานไฟฟ้า

การวัดและเก็บค่าข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันได้อาศัยเทคโนโลยีดิจิทัลนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้า โดยเครื่องมือดังกล่าวได้อาศัยหลักการแปลงค่า analog เป็น digital โดยการวัดเป็นช่วงคาบเวลาหนึ่ง (T) ซึ่งในช่วงเวลาของการวัดนี้ ข้อ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มูลจะถูกเก็บค่ามาเป็นจำนวนค่าหนึ่ง (N sample) ซึ่งการวัดข้อมูลรูปสัญญาณไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่น ไซน์อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling rate) ของเครื่องมือวัดจะต้องสูงอย่างเพียงพอในการนำข้อมูลที่ ได้จากการวัดมาคำนวณวิเคราะห์ต่อไป โดยจากค่าประสิทธิผล $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}$ เมื่อนำมา วิเคราะห์โดยนำข้อมูลที่ ได้จากการวัดมาคำนวณตั้งจากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์ ค่า ประสิทธิภาพจะเป็นดังสมการ (3.22) และค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีรูปแบบการคำนวณดังสมการ ที่ (3.23)

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_0^{N-1} i^2 (\Delta T)} \quad (3.22)$$

และค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย (P) จะเท่ากับ

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} v(\Delta T) i(\Delta T) \quad (3.23)$$

เมื่อ v คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (instantaneous voltage)

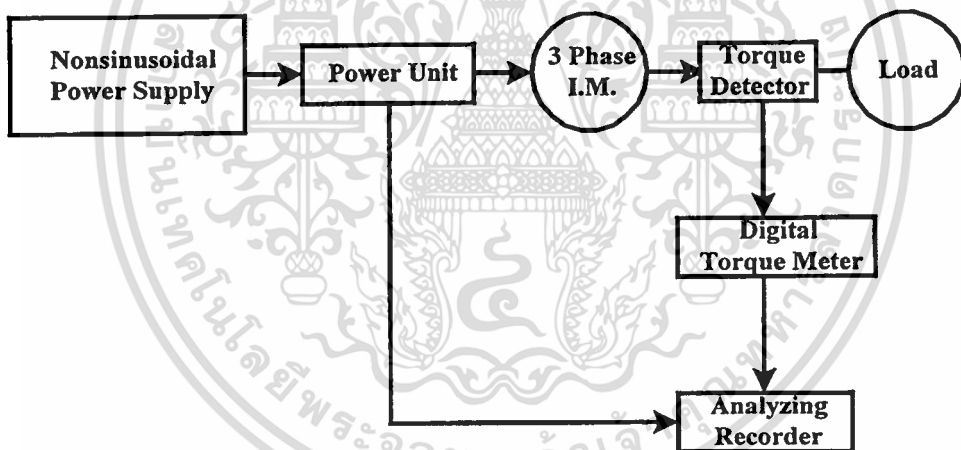
i คือค่ากระแสไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (instantaneous current)

N คือจำนวนของข้อมูล

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวน 3 ตัว 3 ขนาดในการทดสอบโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 3 ตัวจะมีคุณลักษณะดังนี้ขนาด 1 แรงม้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 2.0 แอมป์ ความเร็วที่พิกัด 1400 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์ และขนาด 3 แรงม้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 5.0 แอมป์ ความเร็วที่พิกัด 1420 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์ และขนาด 5 แรงม้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก กระแสที่พิกัด 7.9 แอมป์ ความเร็วที่พิกัด 1420 รอบต่อนาที ต่อแบบสตาร์ การใช้มอเตอร์ทั้งสามขนาดเพื่อจุดประสงค์ในการยืนยันผลการทดสอบในผลของฮาร์มอนิกส์ต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่ามีผลแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยมีแผนภูมิการทดสอบดังรูปที่ 4.1



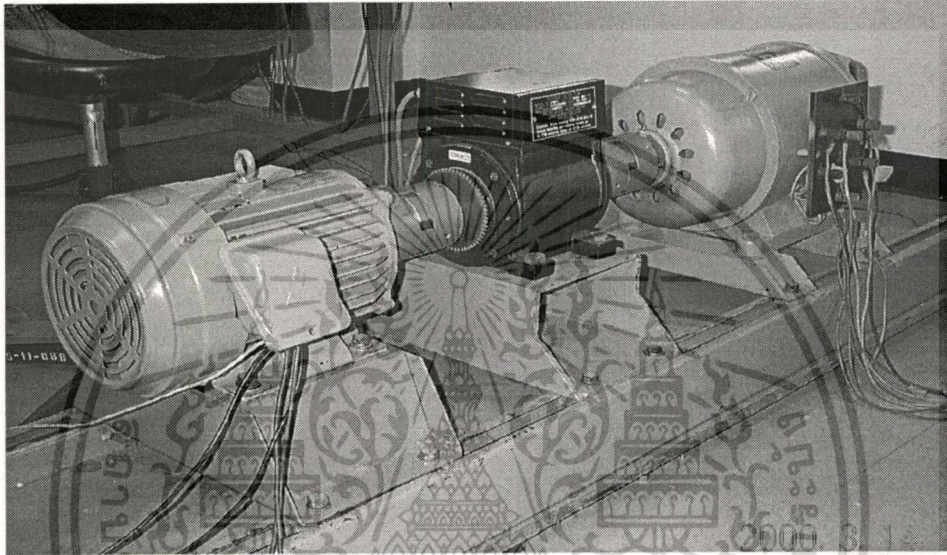
รูปที่ 4.1 แผนภูมิการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยมีอุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

- Power unit ของ Yokogawa Model 365961 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสแบบปรับค่าเป็นอัตราส่วนจำนวน 3 ตัวทำหน้าที่จ่ายสภาวะแรงดันและกระแสไฟฟ้าป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีค่าความถูกต้อง 0.2 % of range และความถี่ของการวัด 50 to 60 Hz with higher harmonics of up to 2 kHz
- Torque detector และ Digital torque meter ของ Ono Sokki model TS-200 ทำหน้าที่วัดและแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Analyzing Recorder ของ Yokogawa Model AR 1100A ทำหน้าที่บันทึกค่าข้อมูลแรงดัน กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด-ความเร็วที่เพลา โดยใช้ค่า Sampling rate ตลอดการทดสอบที่ 50 kHz และค่าช่วงความยาวของข้อมูลที่ทำการวัดจำนวน 2000 ข้อมูล
- Load ทำหน้าที่เป็นภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยภาระที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาด 220 โวลต์ พิกัดกระแส 16 แอมป์ 3 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.2 การต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

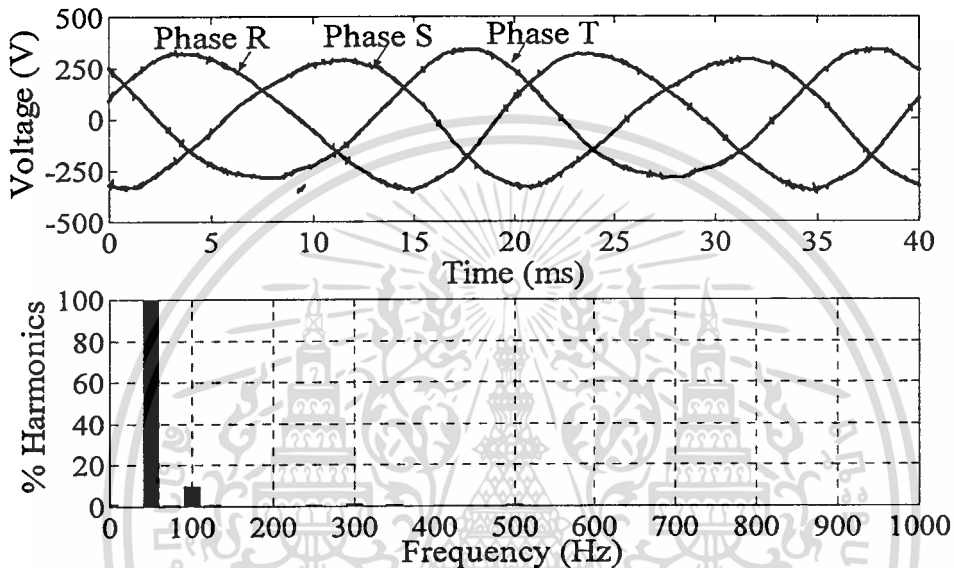
จุดประสงค์ของการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดสอบหากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อป้อนสถานะศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ซึ่งในการทดสอบได้เพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนกระทั่งถึงที่พิกัดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบและแต่ละครั้งของการเพิ่มภาระทางกล จะบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้า แรงบิด-ความเร็วที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้าจะนำไปคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.22) และ (3.23) ตามลำดับ และนำมาแสดงรูปความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.74 โดยรูปแบบการทดสอบจะเป็นดังนี้

- ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้ารวมกับความถี่มูลฐาน จะป้อนฮาร์มอนิกส์ที่ละความถี่ โดยความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าจะมีค่าความถี่ไม่เกิน 550 Hz
- ในแต่ละความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าจะมีการปรับค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าที่ต่างค่ากันในช่วง 10 – 25 %

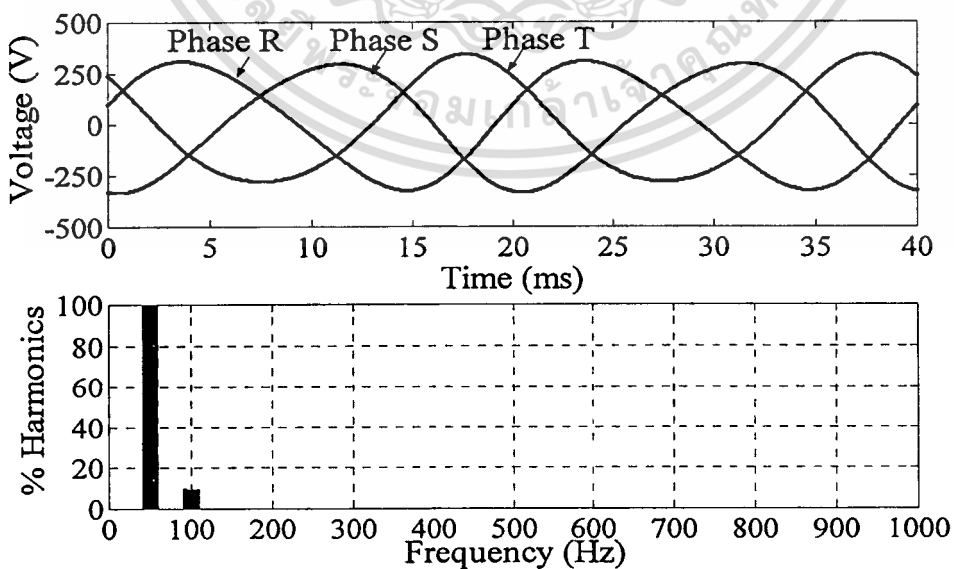
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 สัญญาณศักดาไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ

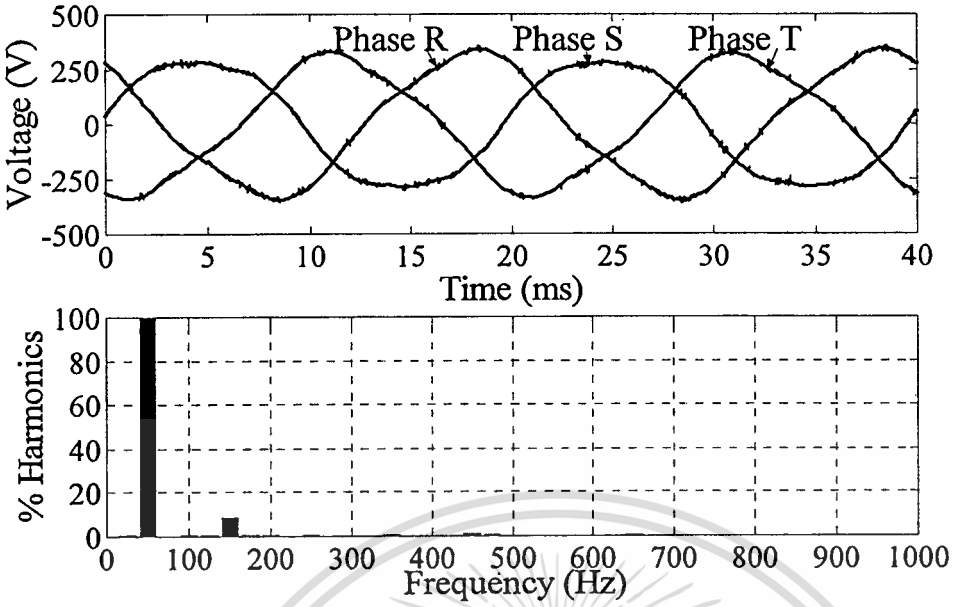
รูปสัญญาณการทดสอบจะมีรูปสัญญาณดังต่อไปนี้รูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.22 จะเป็นรูปที่แสดง ศักดาไฟฟ้าสามเฟสที่สร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรีล็กแทนซ์ ชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยศักดาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะใช้ในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยจะแสดงผลของศักดาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจริงเทียบกับผลการจำลองแบบ



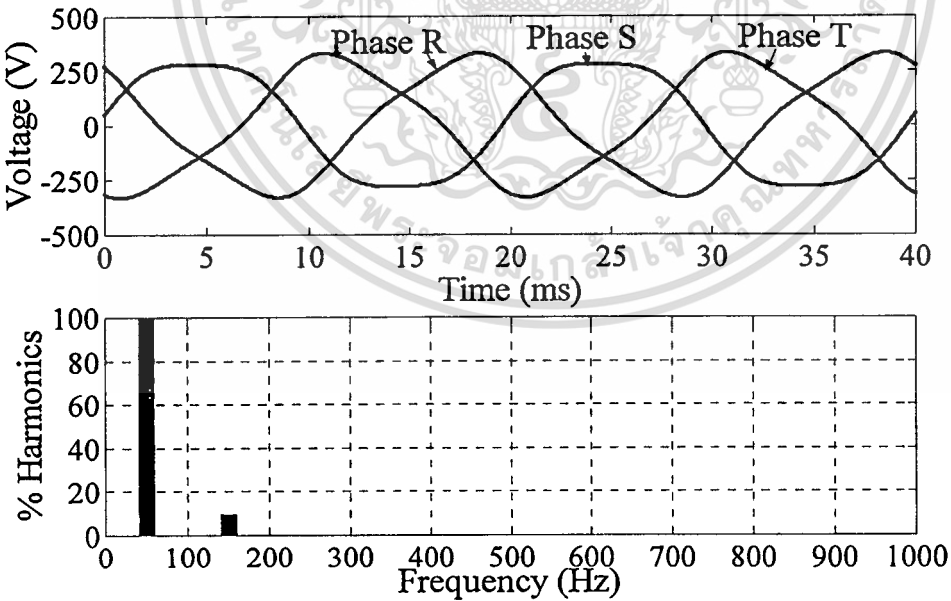
รูปที่ 4.3 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีฮาร์มอนิกอันดับที่ 2nd ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า



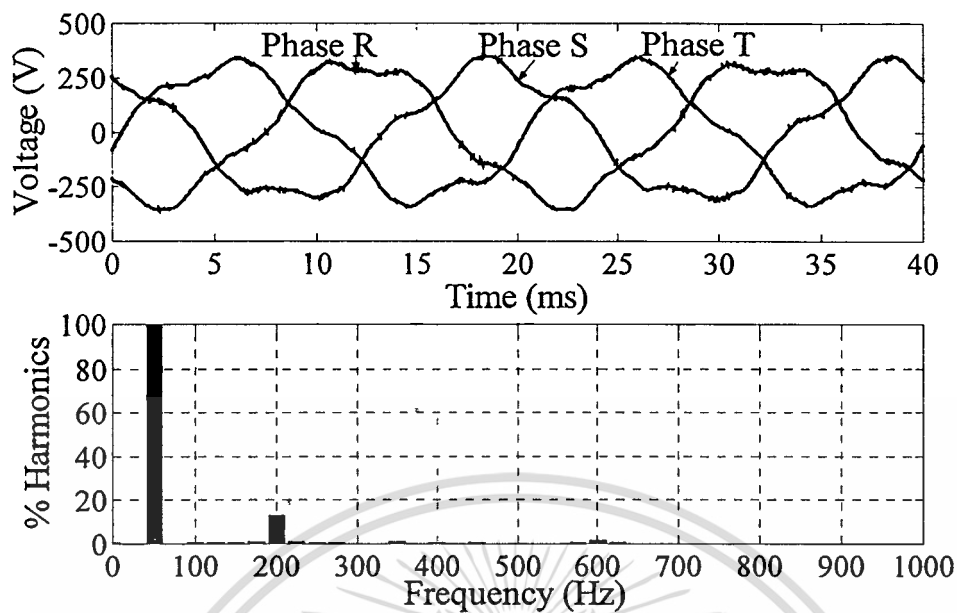
รูปที่ 4.4 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีฮาร์มอนิกอันดับที่ 2nd ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ



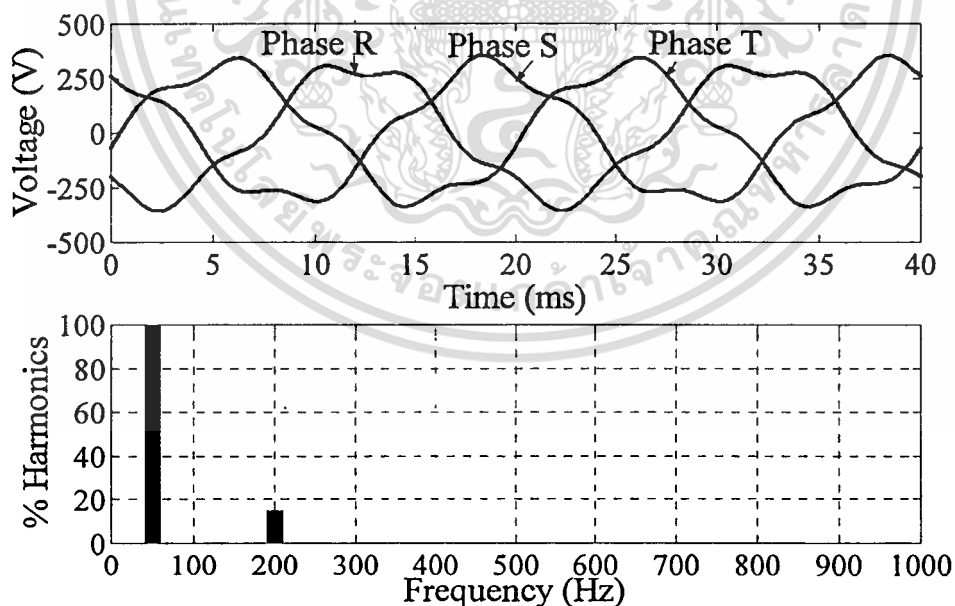
รูปที่ 4.5 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า



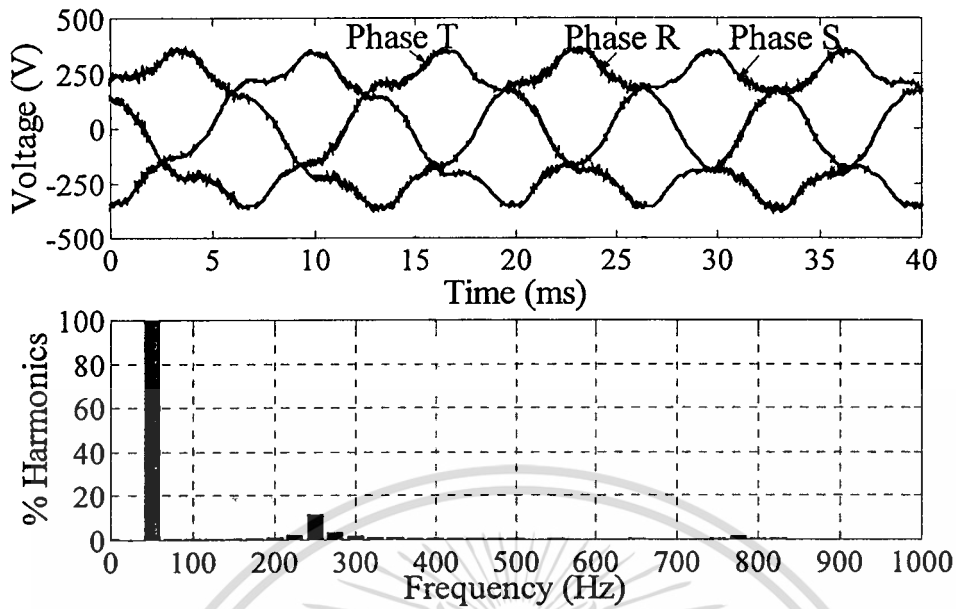
รูปที่ 4.6 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd ค่า %VDF=10 โดยฮาร์มอนิกมีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ



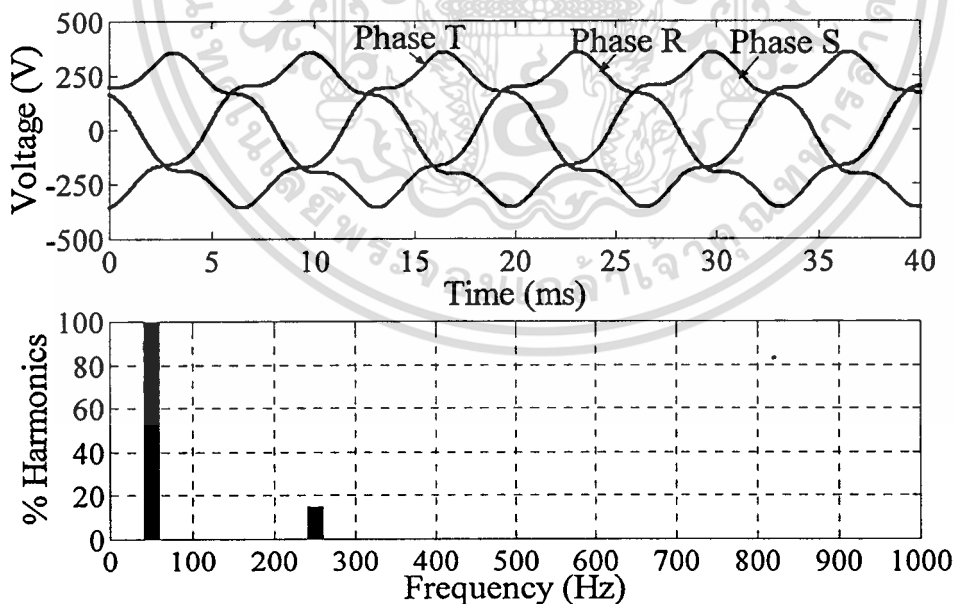
รูปที่ 4.7 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 4th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า



รูปที่ 4.8 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 4th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์มอนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

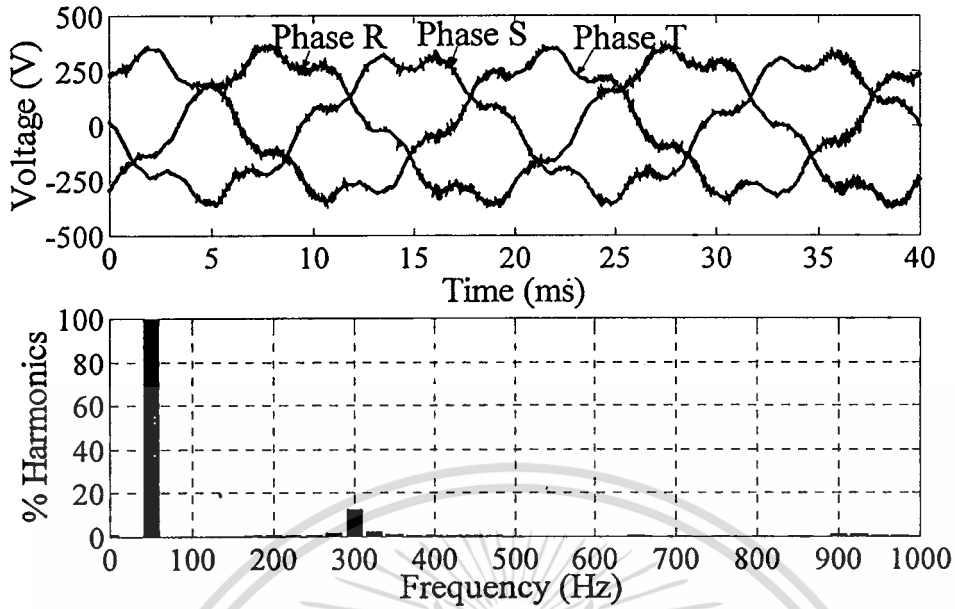


รูปที่ 4.9 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีพ็อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า

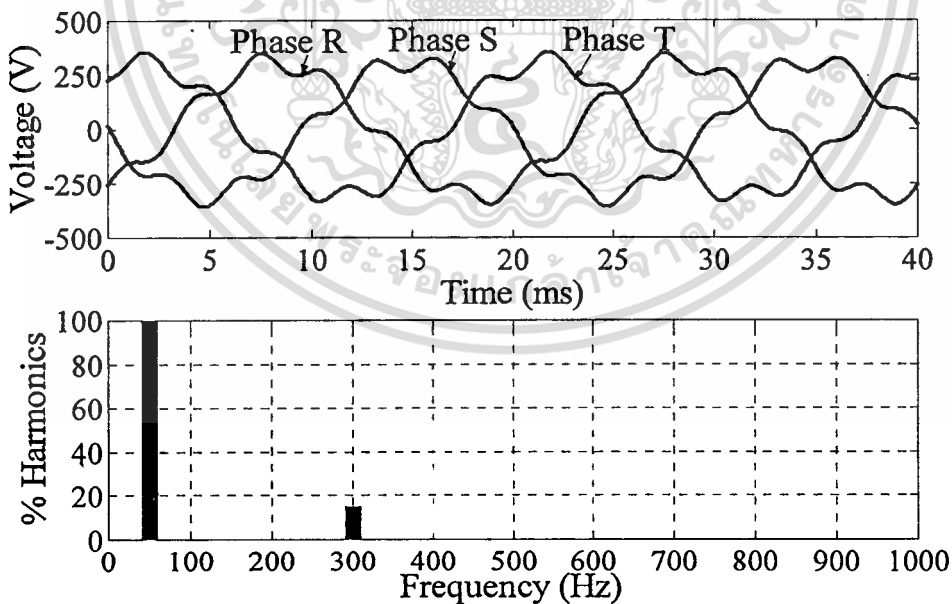


รูปที่ 4.10 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีพ็อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

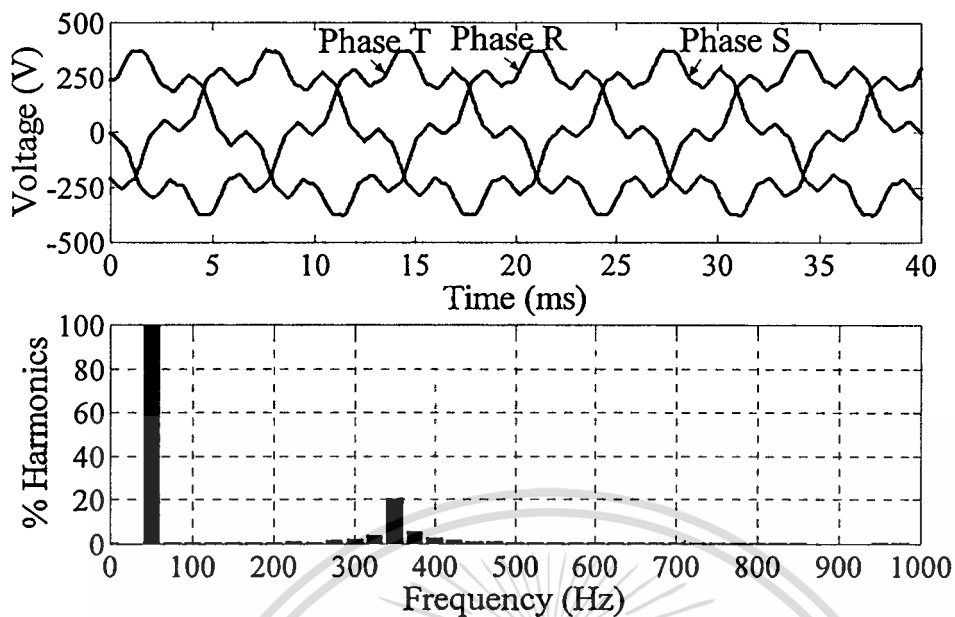


รูปที่ 4.11 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 6th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์โมนิกส์ มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า

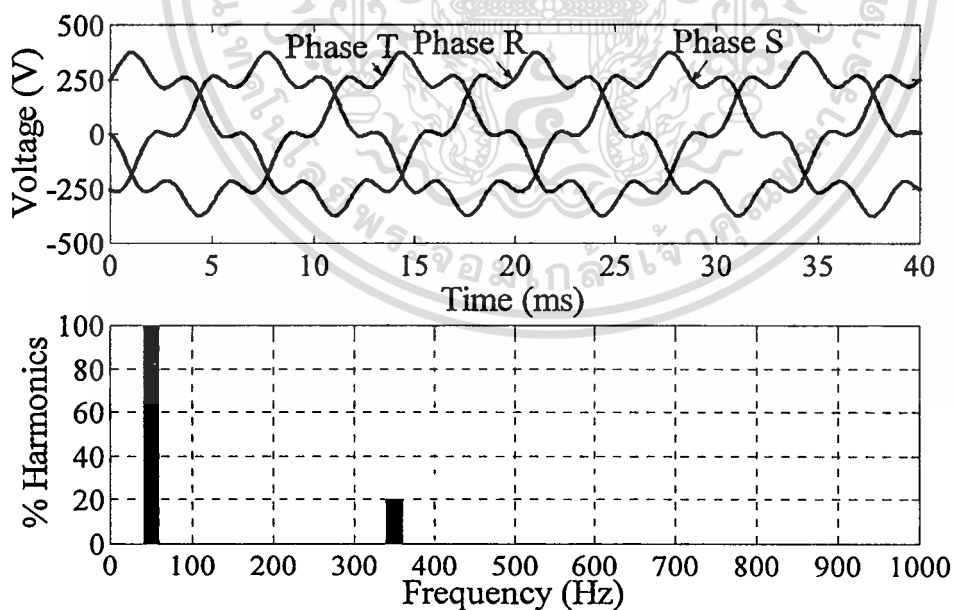


รูปที่ 4.12 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 6th ค่า %VDF=15 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

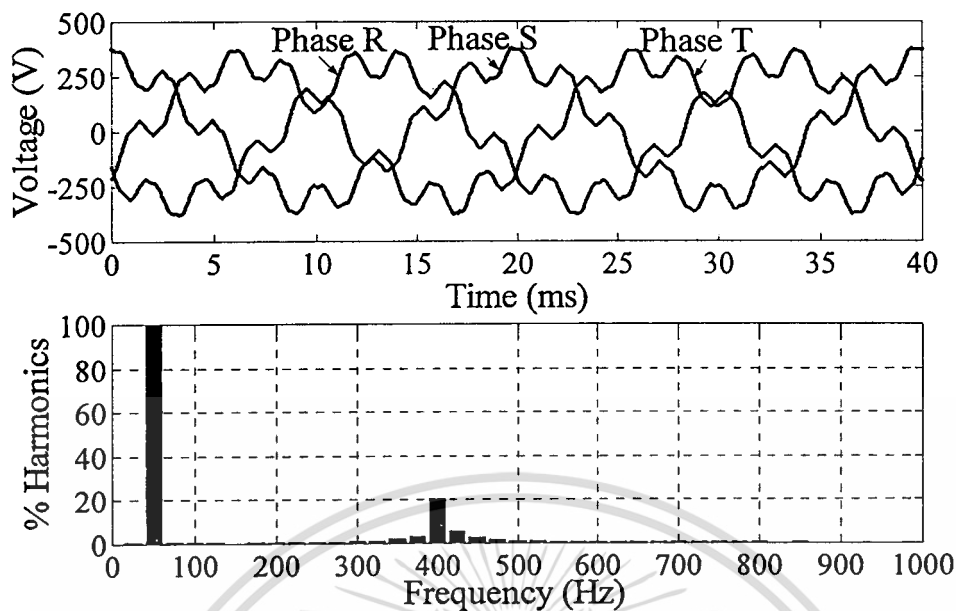


รูปที่ 4.13 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า

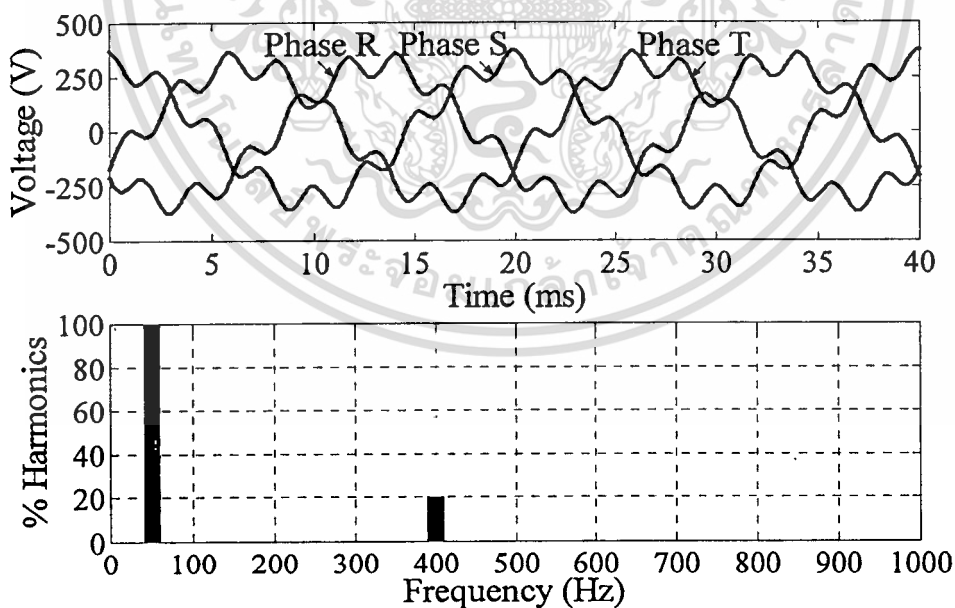


รูปที่ 4.14 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 1 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

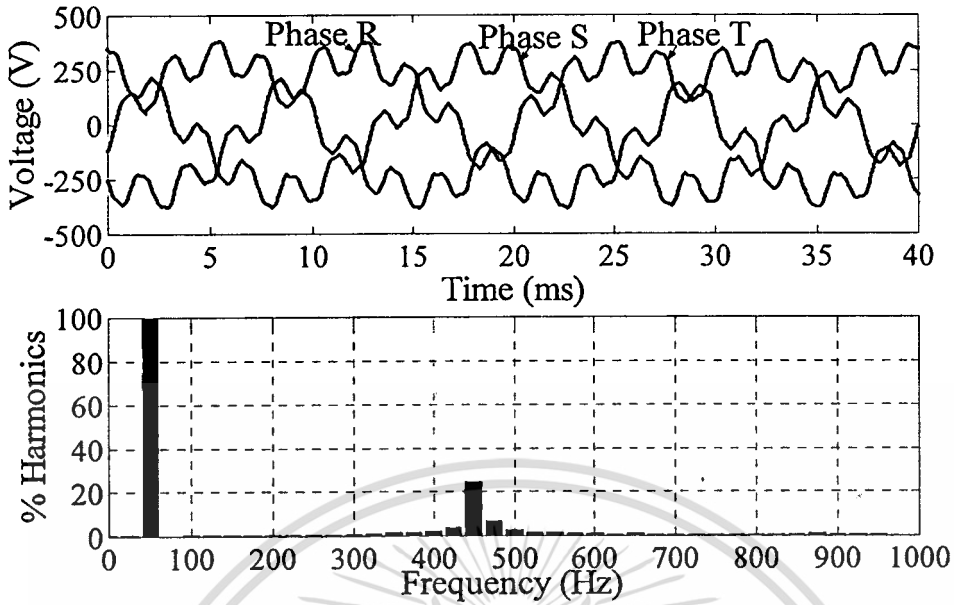


รูปที่ 4.15 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 8th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์โมนิก-
-นิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า

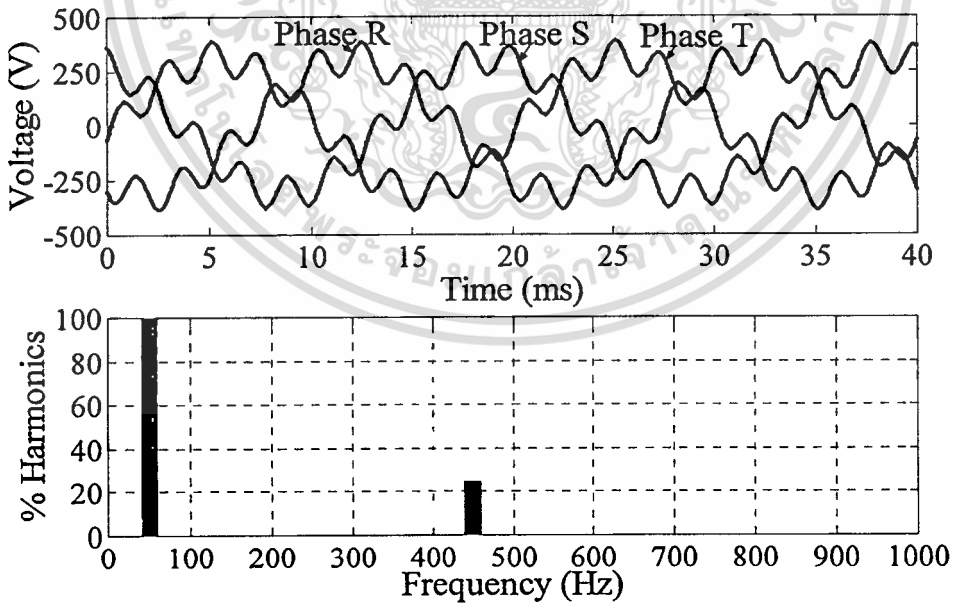


รูปที่ 4.16 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 8th ค่า %VDF=20 โดยฮาร์โมนิก-
-นิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

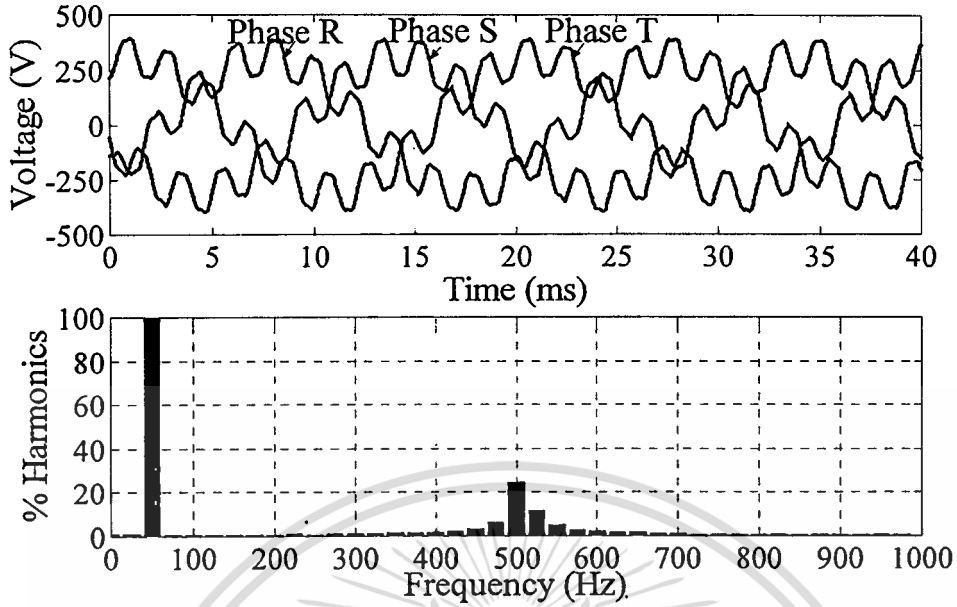


รูปที่ 4.17 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 9th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า

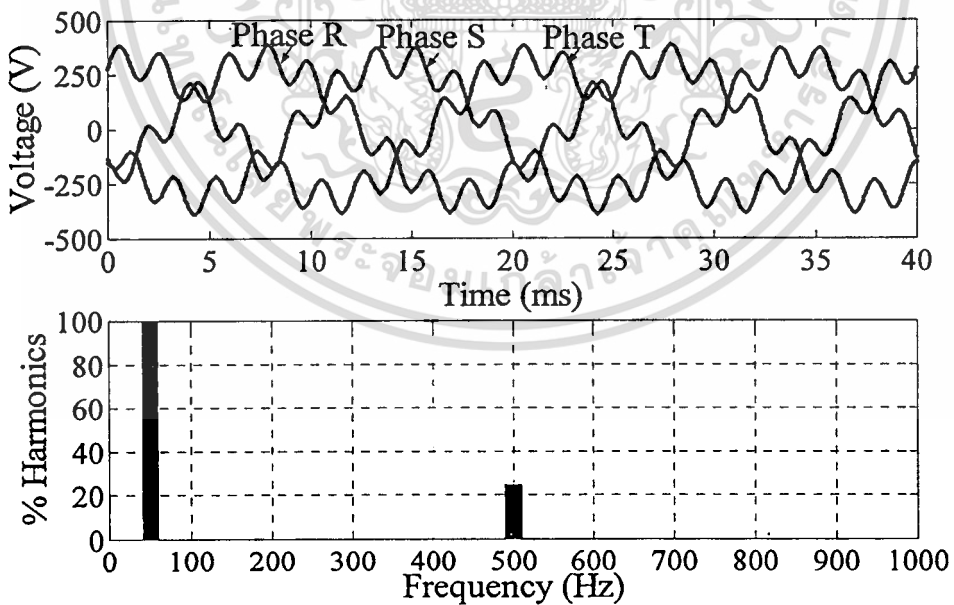


รูปที่ 4.18 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 9th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 5 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

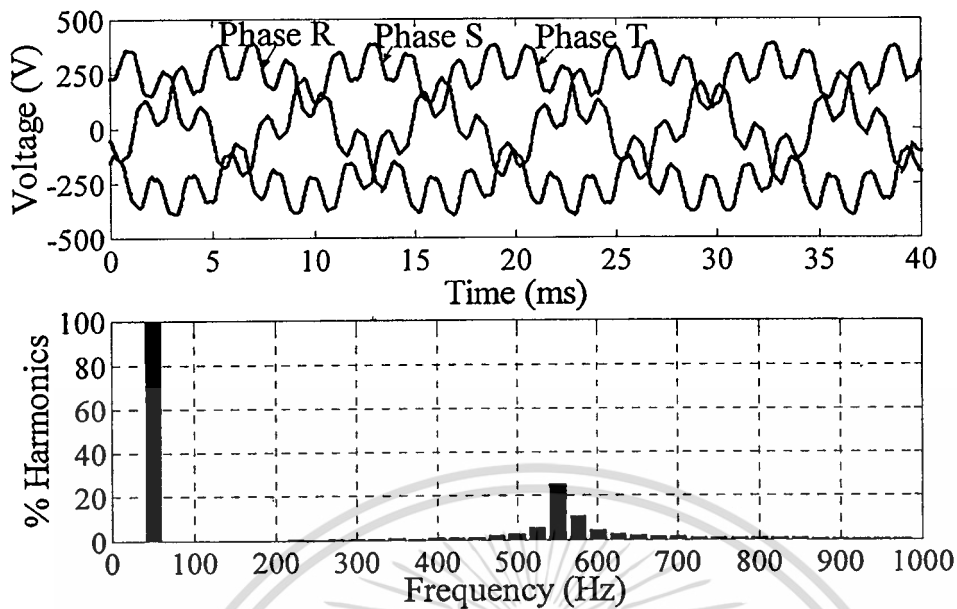


รูปที่ 4.19 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 10^{th} ค่า %VDF=25 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า

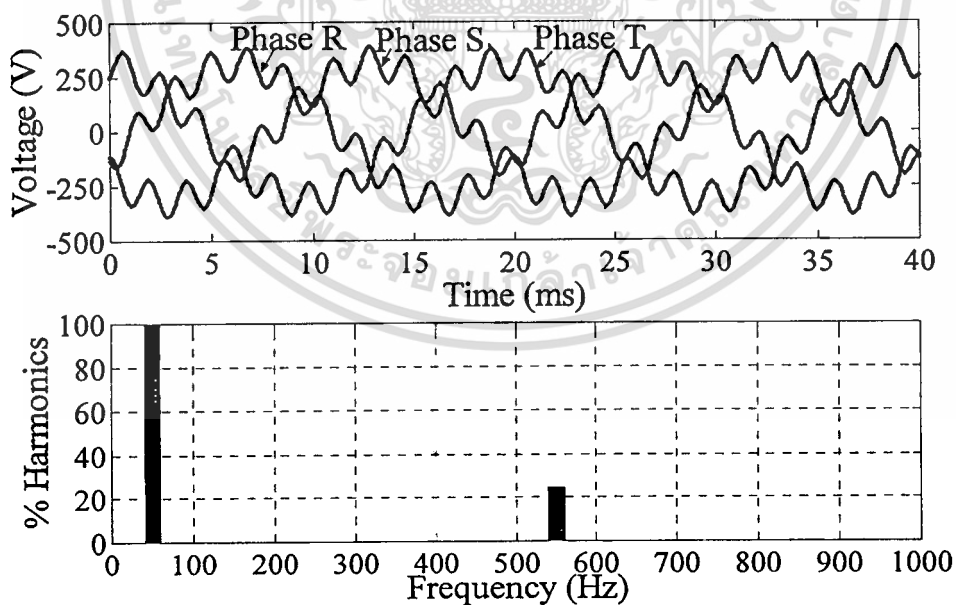


รูปที่ 4.20 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์มอนิกอันดับที่ 10^{th} ค่า %VDF=25 โดยฮาร์มอนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 11th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า

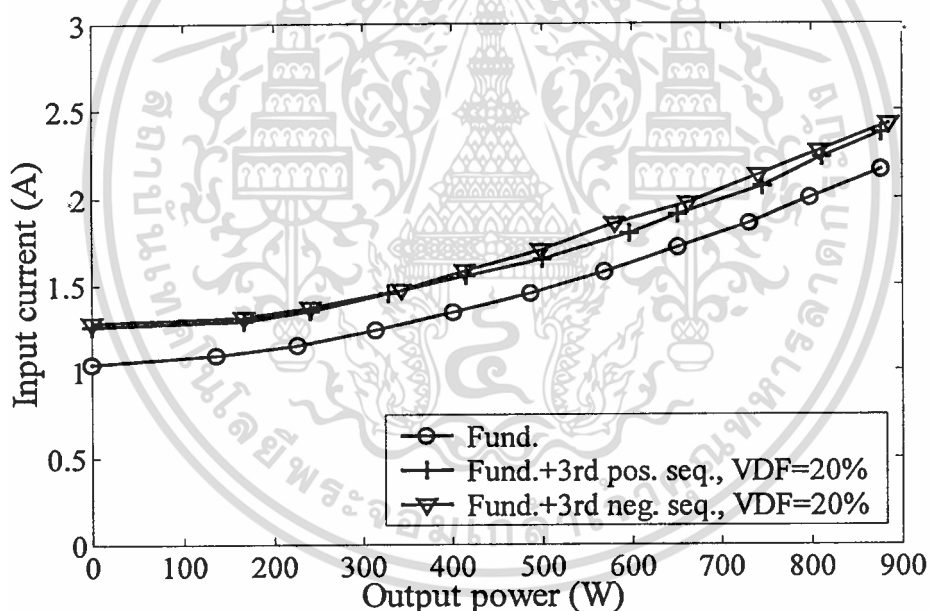


รูปที่ 4.22 สัญญาณศักดาไฟฟ้าในกรณีป้อนฮาร์โมนิกอันดับที่ 11th ค่า %VDF=25 โดยฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกใช้ทดสอบมอเตอร์ 3 แรงม้า โดยผลการจำลองแบบ

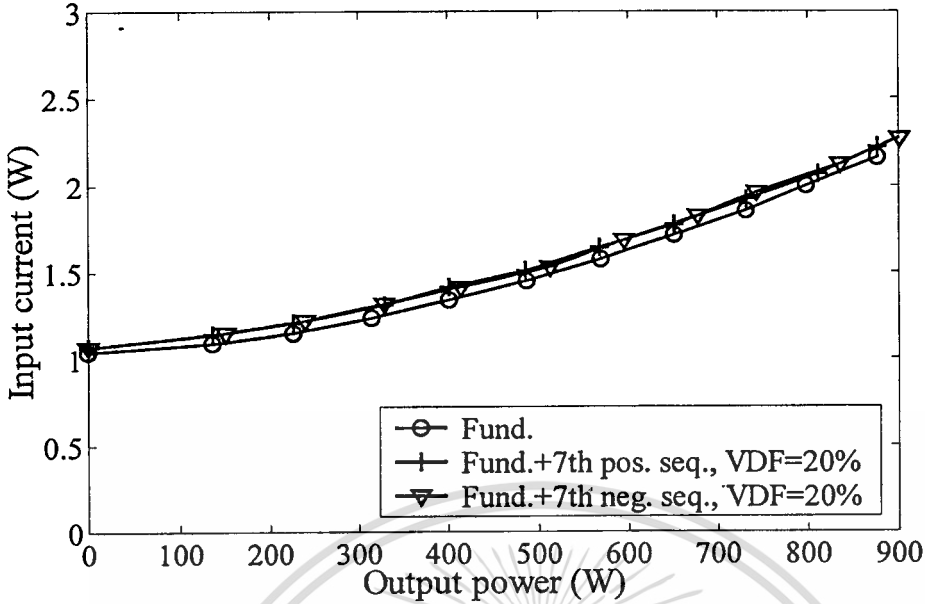
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

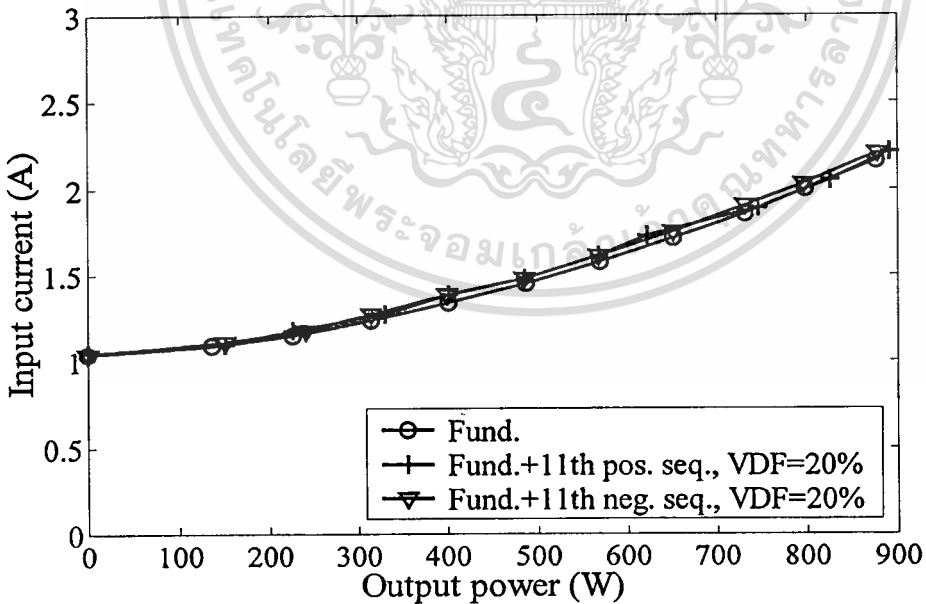
จากรูปสัญลักษณ์คิกคาไฟฟ้าไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ได้สร้างขึ้นจะใช้ในการทดสอบเพื่อคุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่าจะมีผลอย่างไรเมื่อได้รับฮาร์โมนิกส์ในอันดับต่างๆ กันและมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งในรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.31 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เพลลาเทียบกับความเร็ว



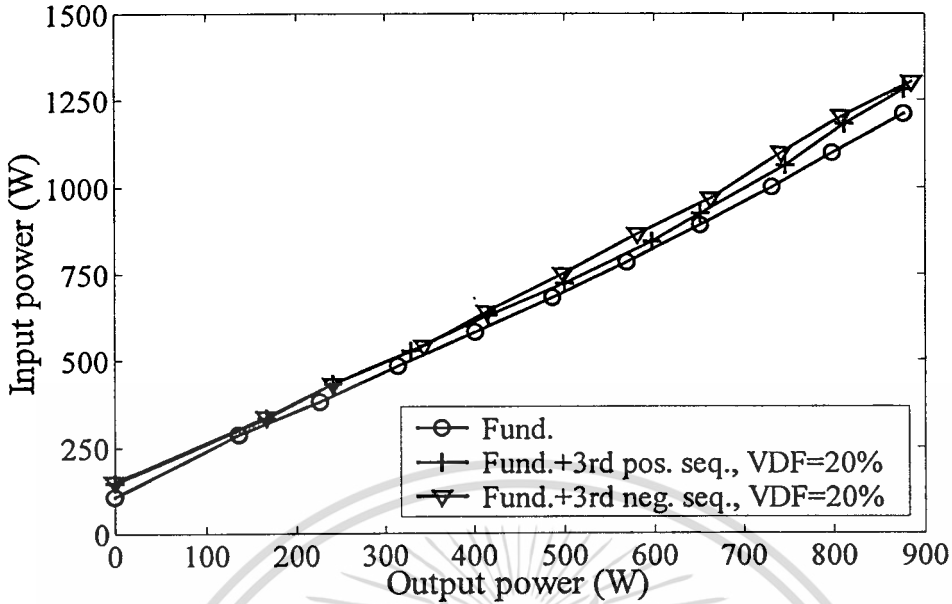
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



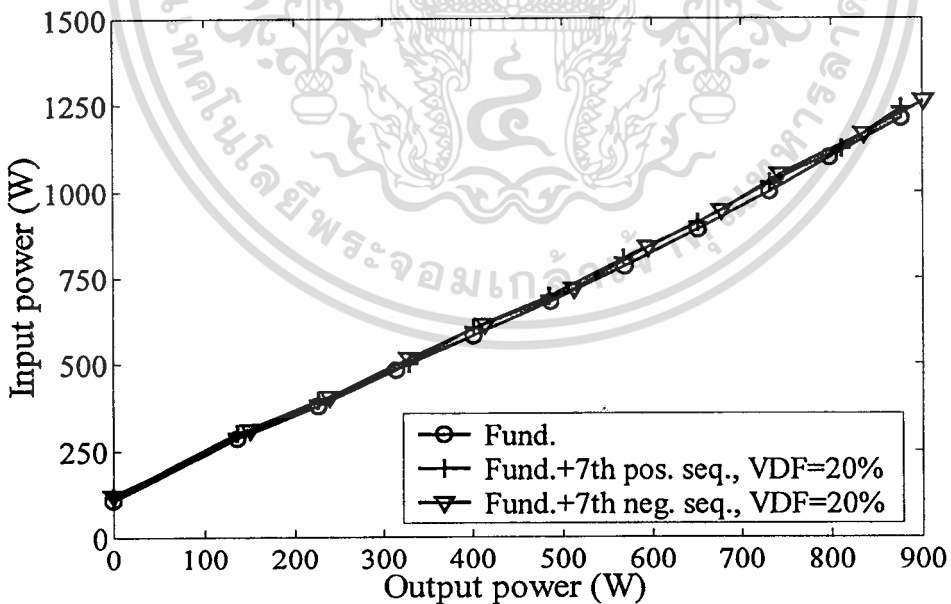
รูปที่ 4.24 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 4.25 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

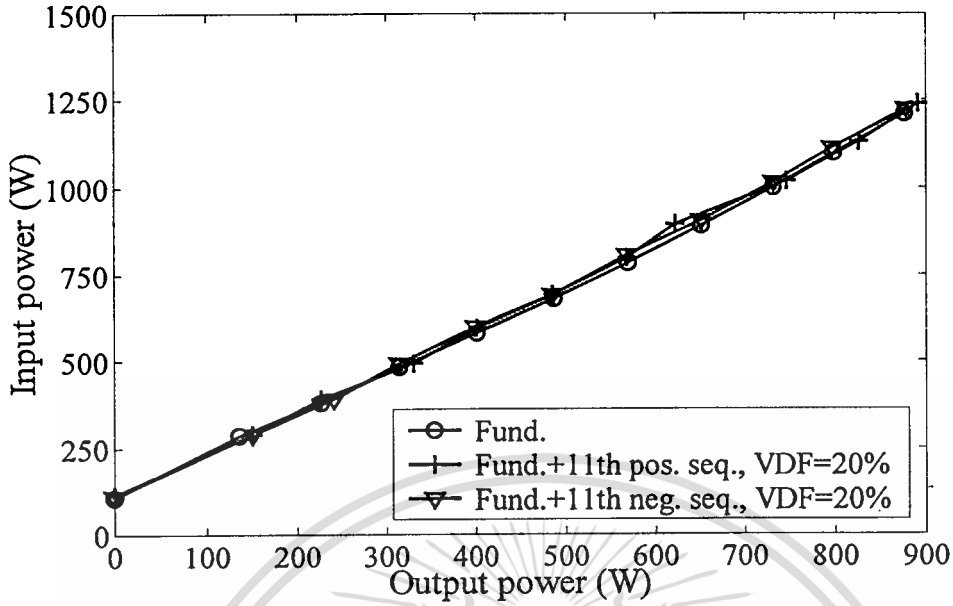


รูปที่ 4.26 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

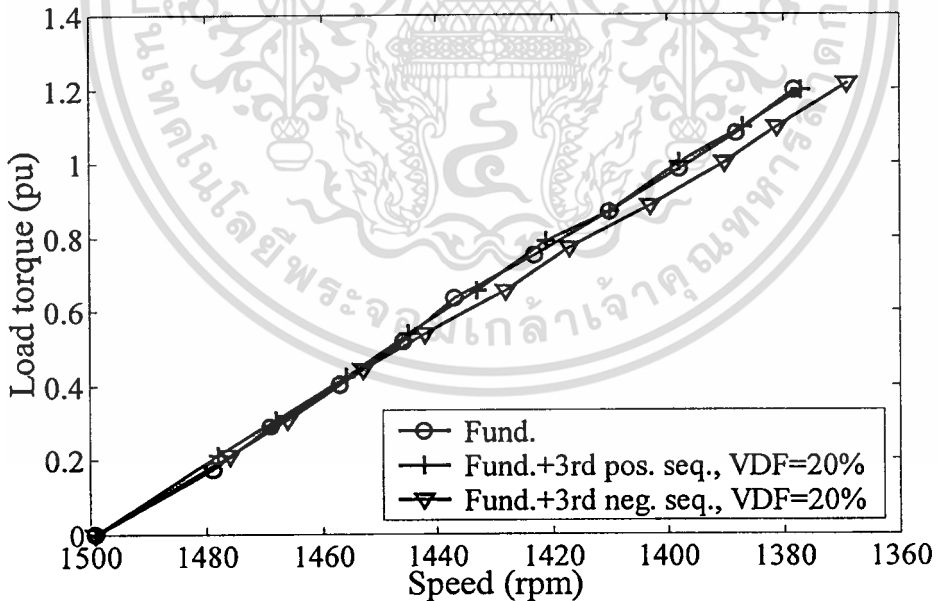


รูปที่ 4.27 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

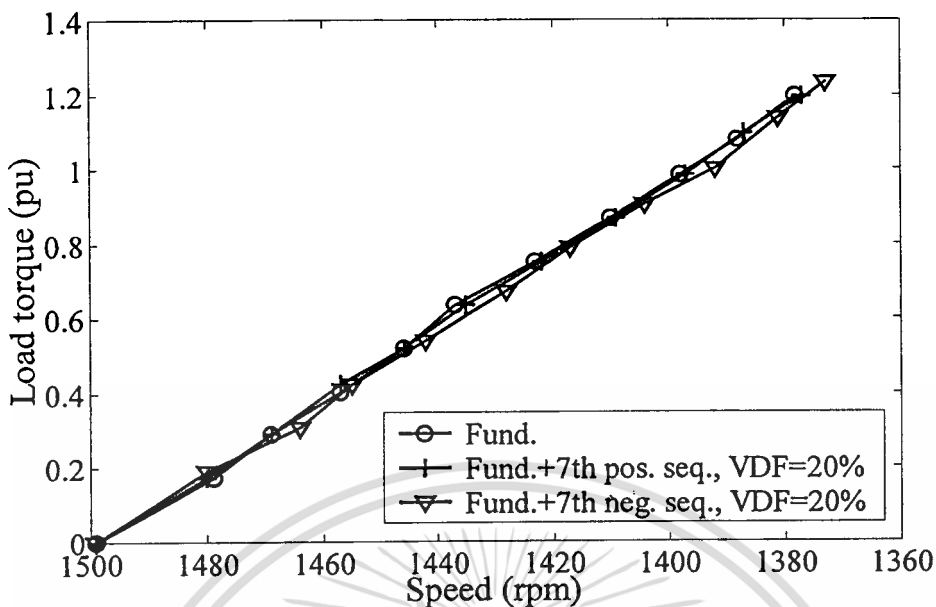


รูปที่ 4.28 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

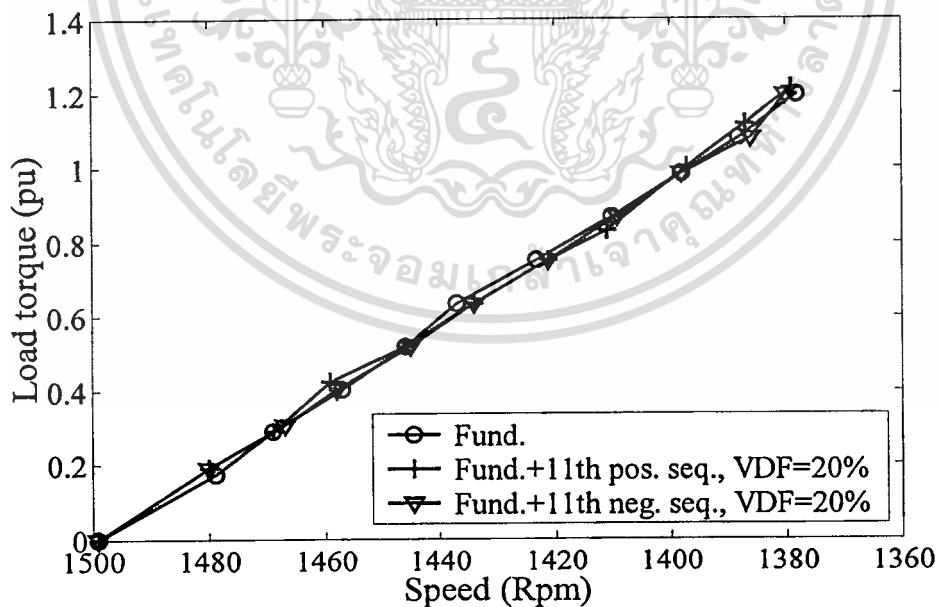


รูปที่ 4.29 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

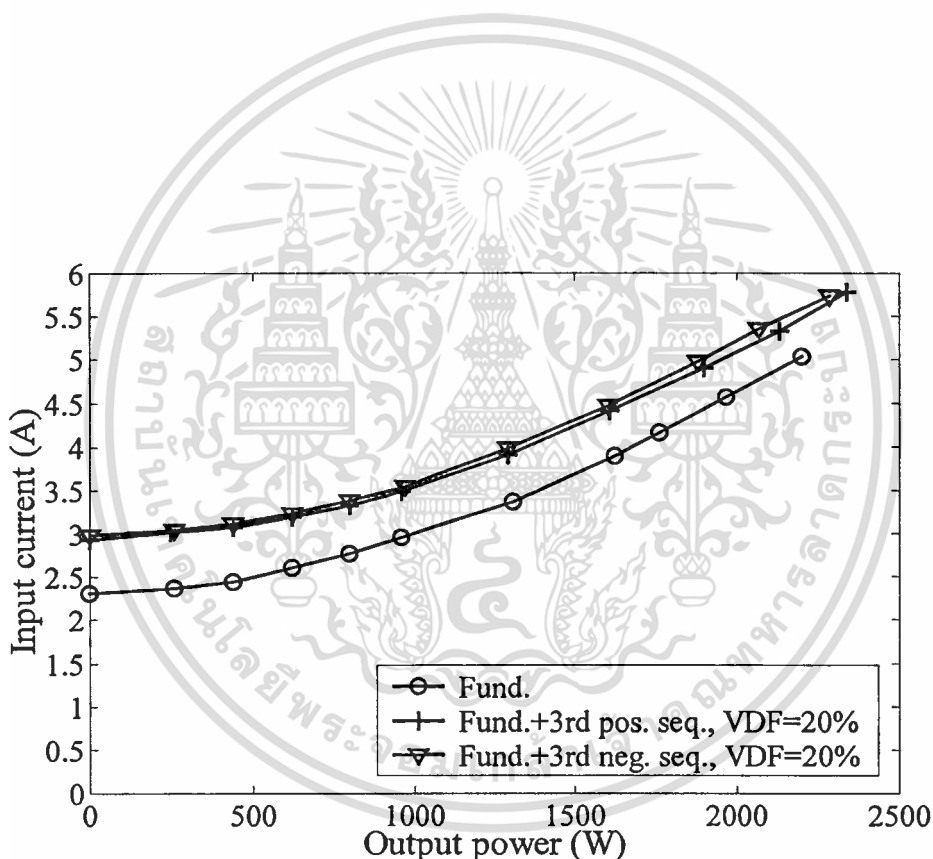


รูปที่ 4.31 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

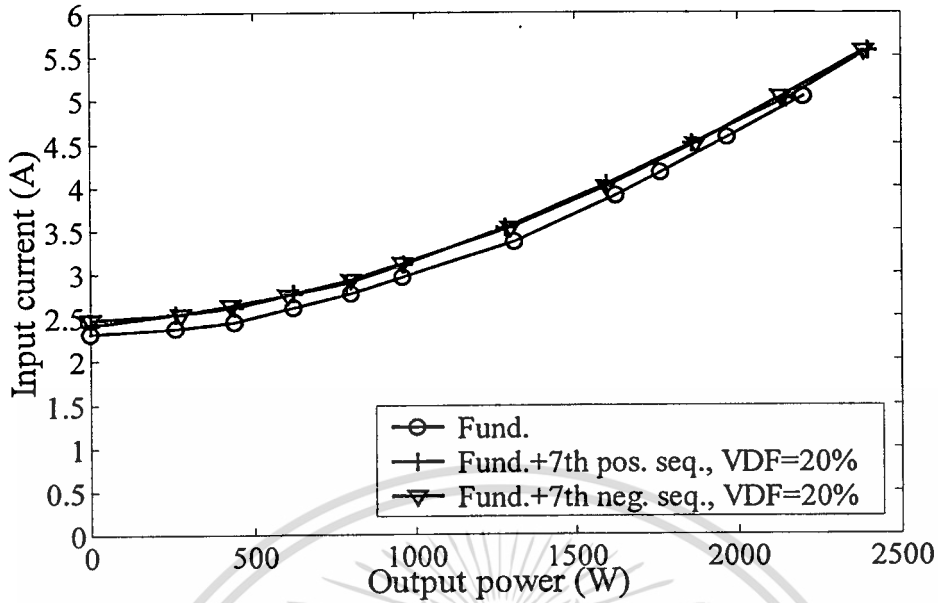
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

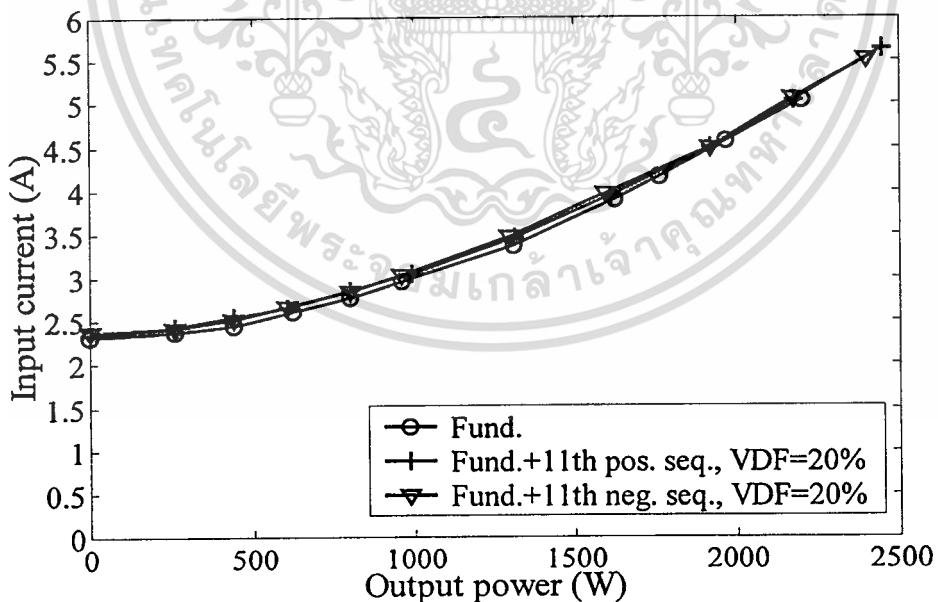
จากรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ได้สร้างขึ้นจะใช้ในการทดสอบเพื่อดูสมรรถนะในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้าว่าจะมีผลอย่างไรเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ กันและมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งในรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.34 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.35 ถึงรูปที่ 4.37 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.38 ถึงรูปที่ 4.40 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เพลาเทียบกับความเร็ว



รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

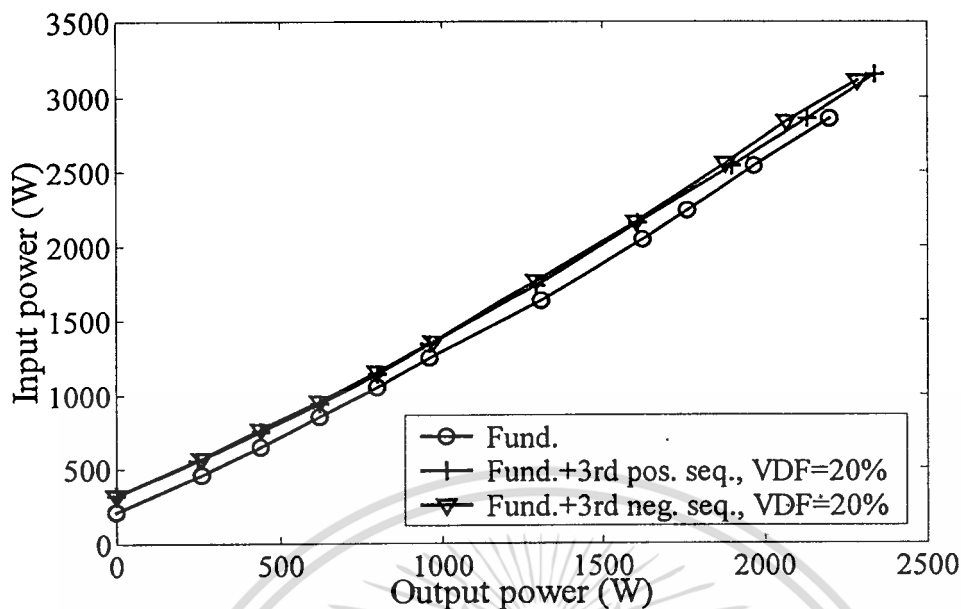


รูปที่ 4.33 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งยว่นำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

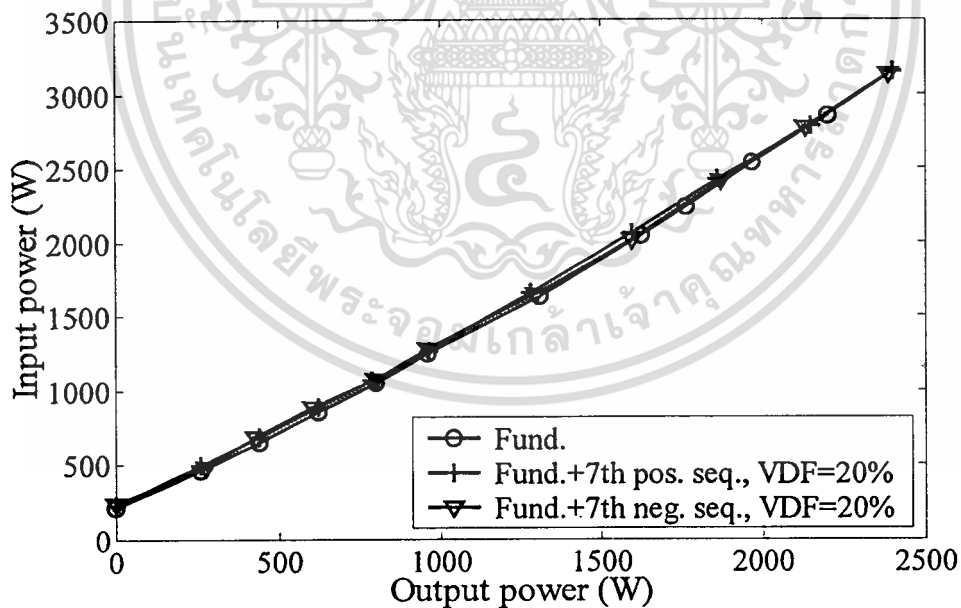


รูปที่ 4.34 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งยว่นำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

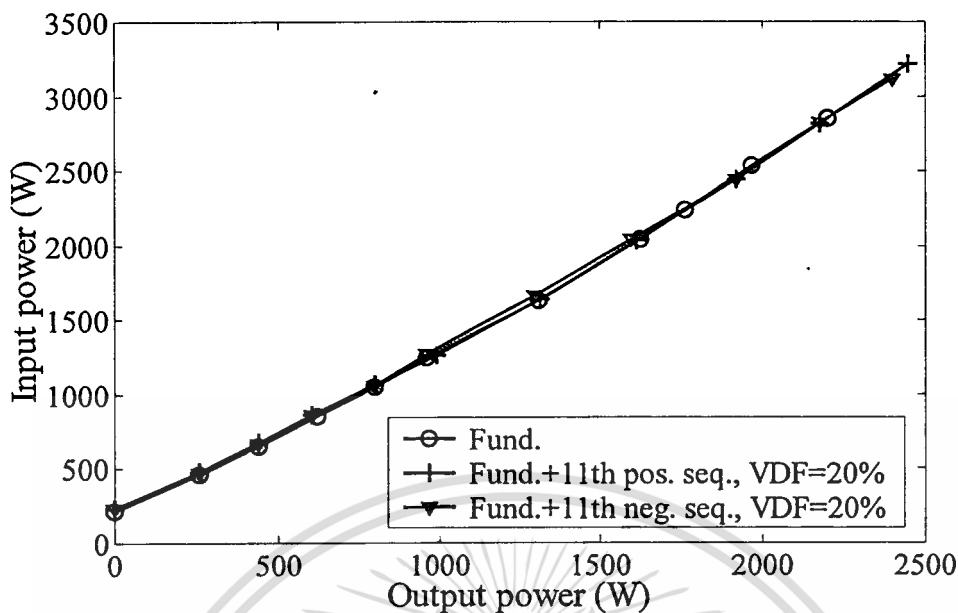


รูปที่ 4.35 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

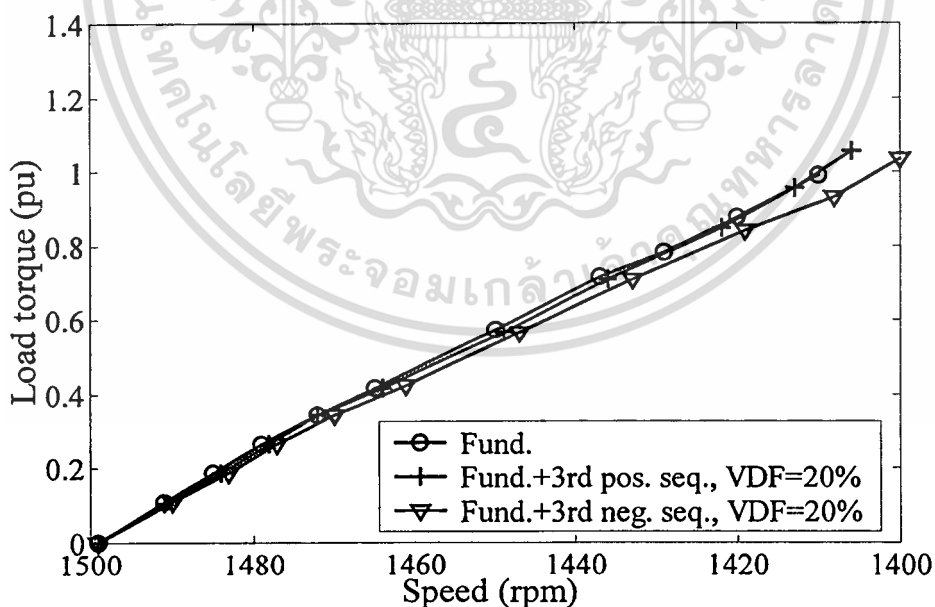


รูปที่ 4.36 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

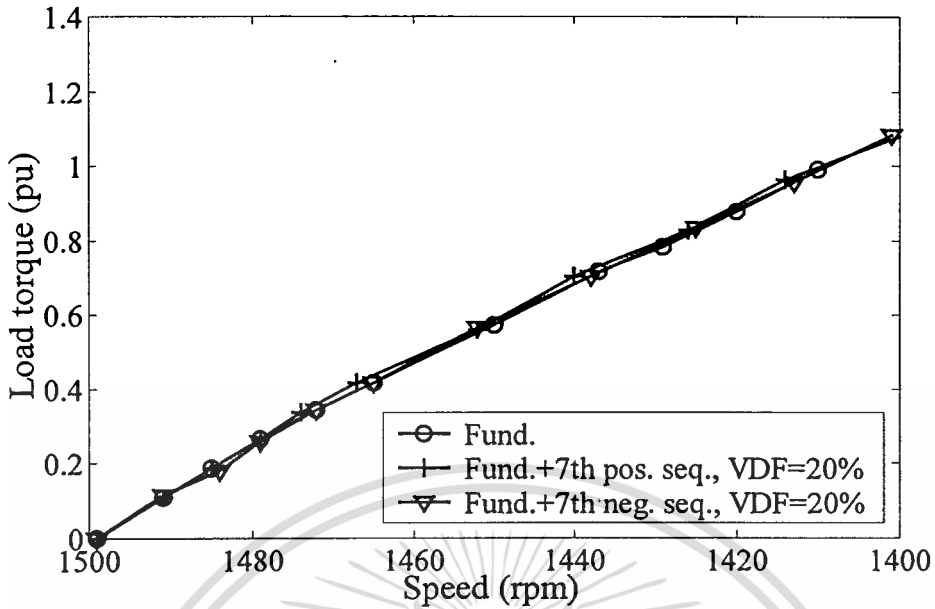


รูปที่ 4.37 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

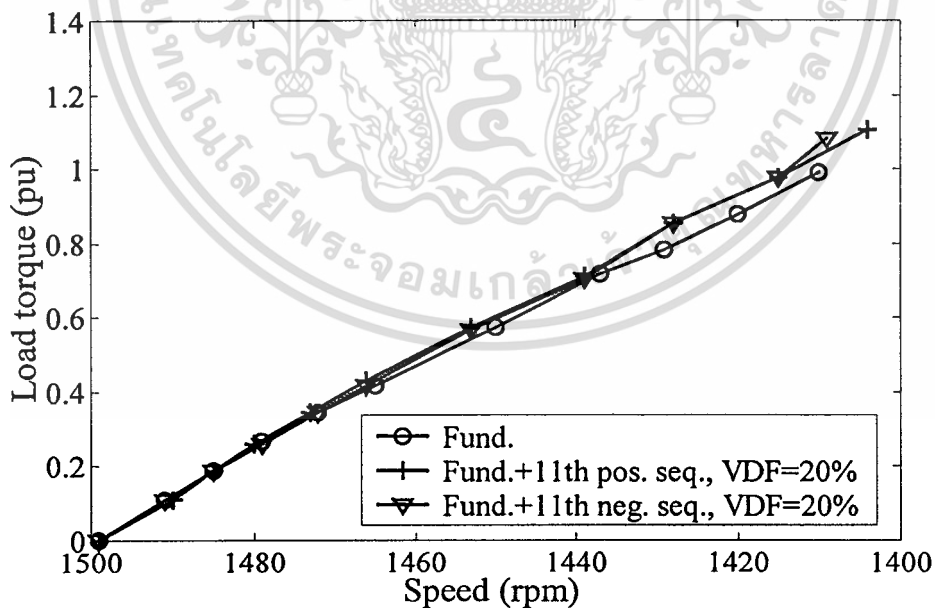


รูปที่ 4.38 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



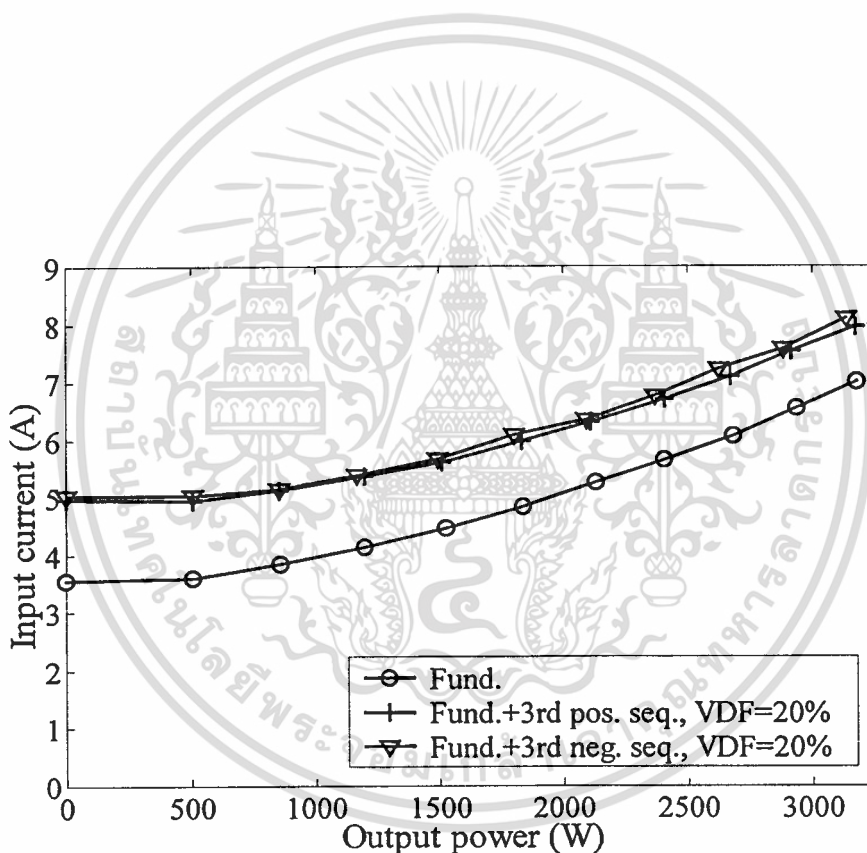
รูปที่ 4.39 แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



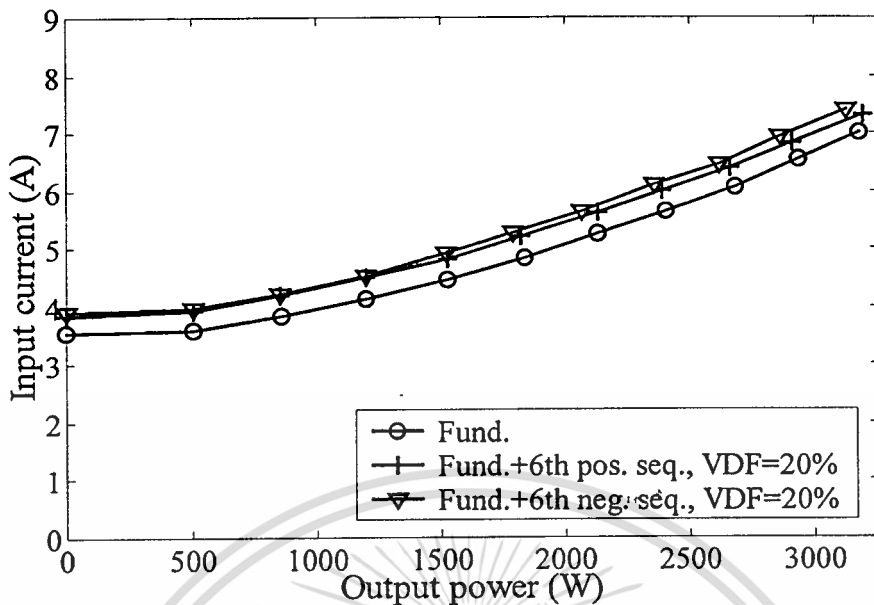
รูปที่ 4.40 แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

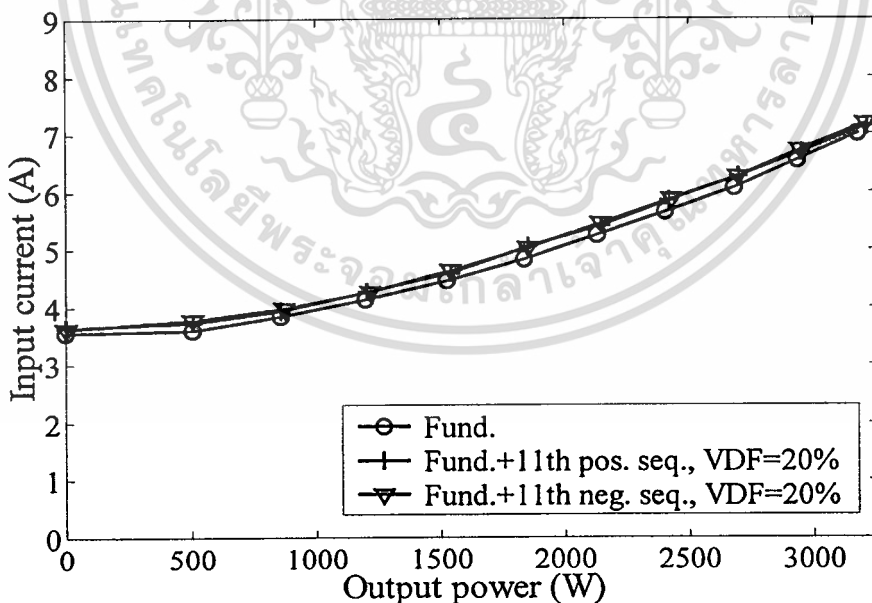
จากรูปสัญญาณคิกคาไฟฟ้าไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ได้สร้างขึ้นจะใช้ในการทดสอบเพื่อดูสมรรถนะในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าว่าจะมีผลอย่างไรเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ กันและมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งในรูปที่ 4.41 ถึงรูปที่ 4.43 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.44 ถึงรูปที่ 4.46 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้ากับกำลังงานขับภาระทางกล และรูปที่ 4.47 ถึงรูปที่ 4.49 จะเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เพลาเทียบกับความเร็ว



รูปที่ 4.41 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนคิกคาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

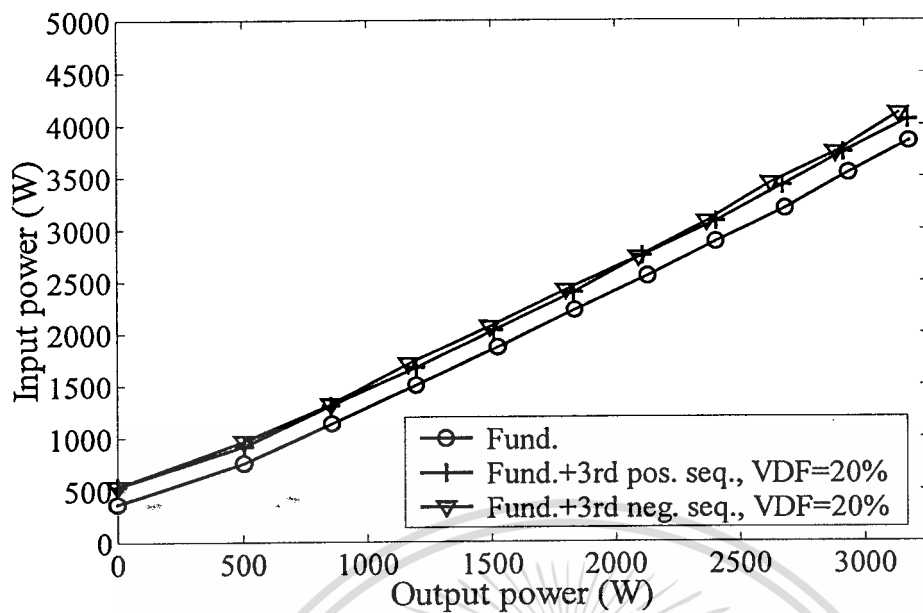


รูปที่ 4.42 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

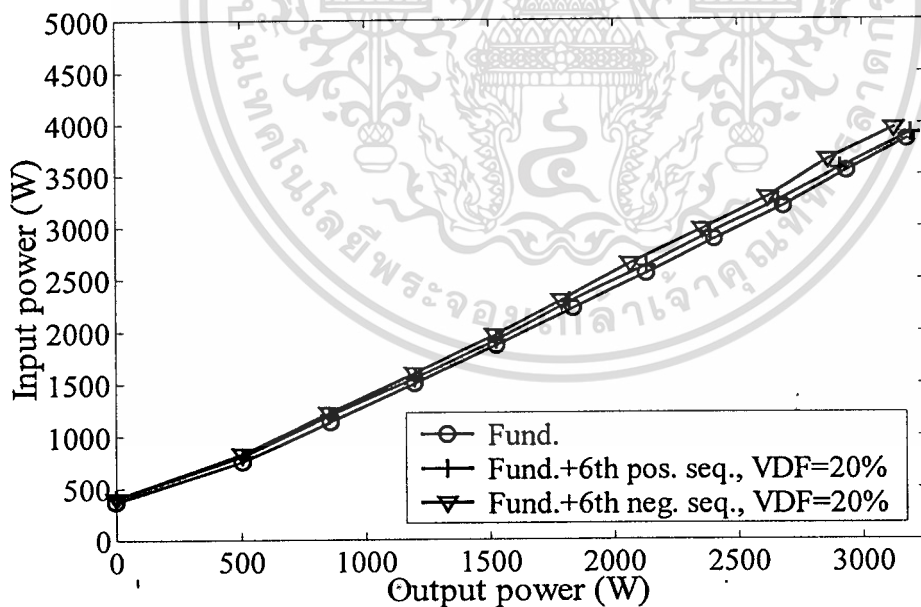


รูปที่ 4.43 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

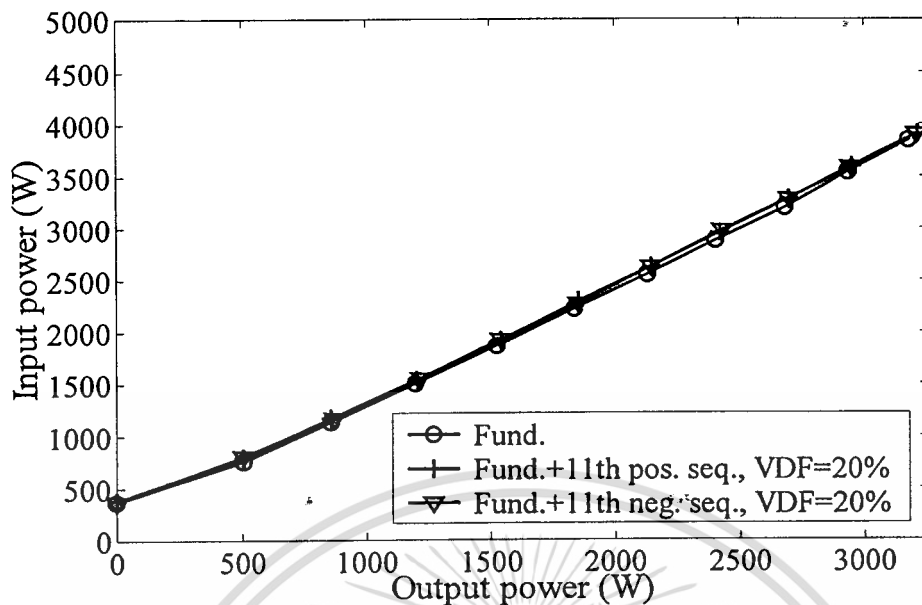
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



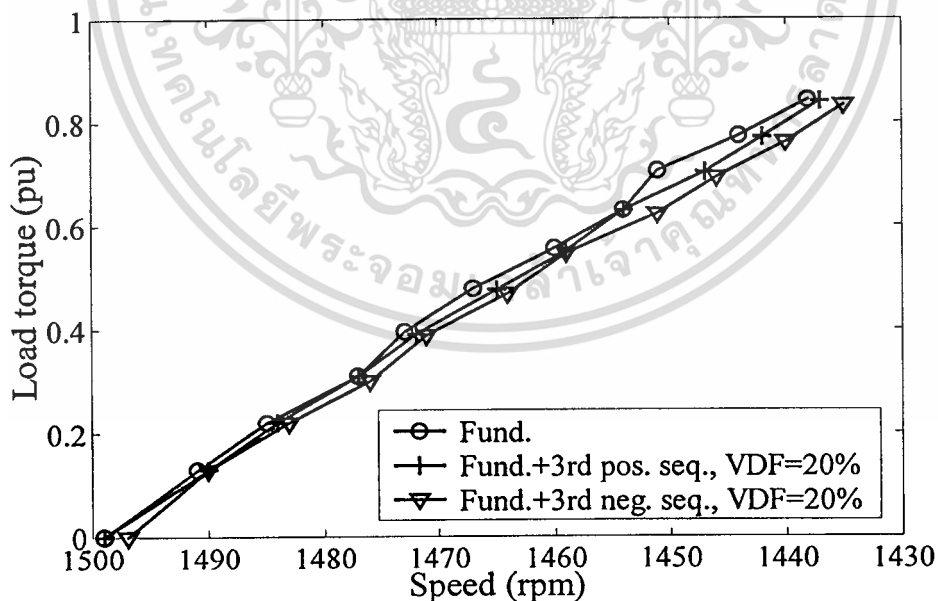
รูปที่ 4.44 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 4.45 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

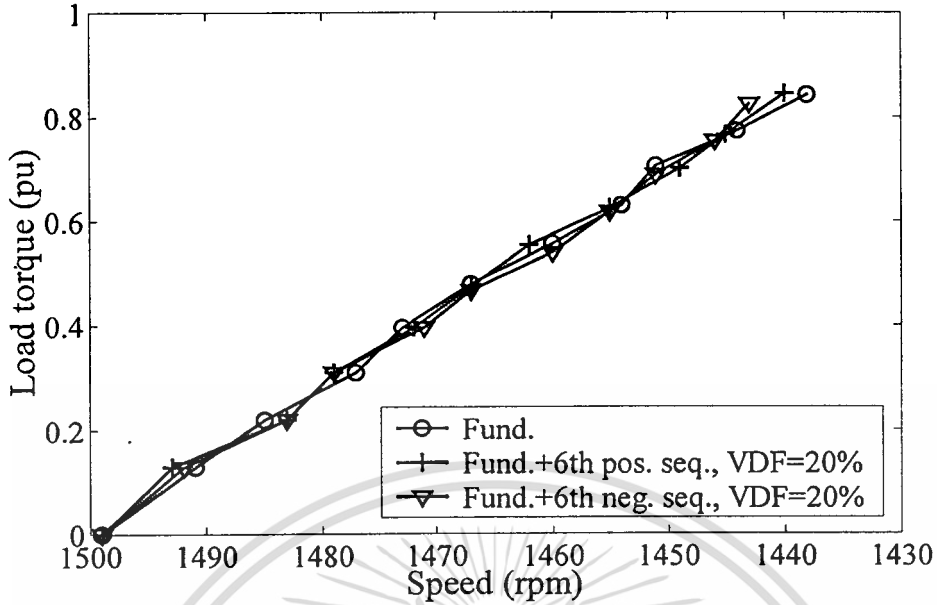


รูปที่ 4.46 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

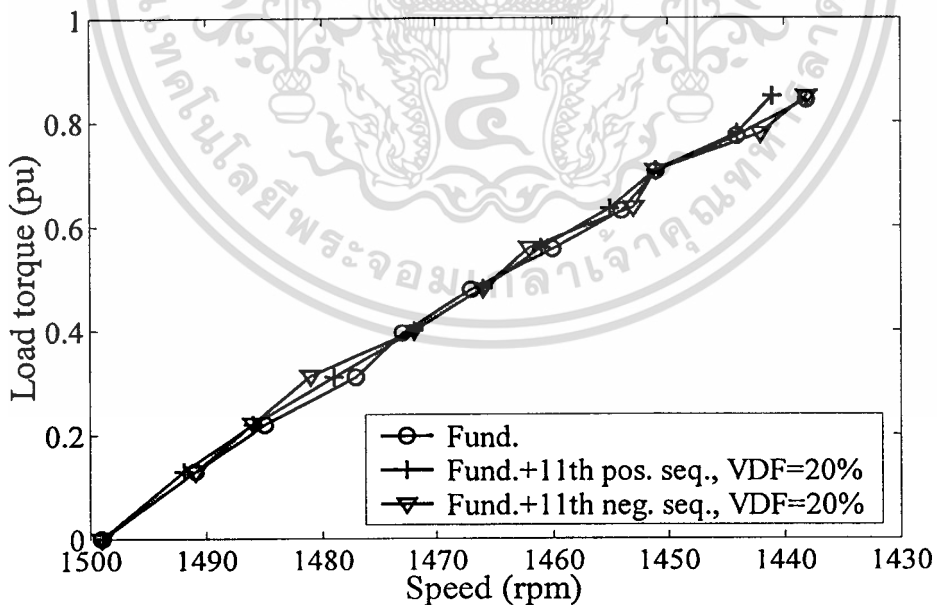


รูปที่ 4.47 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

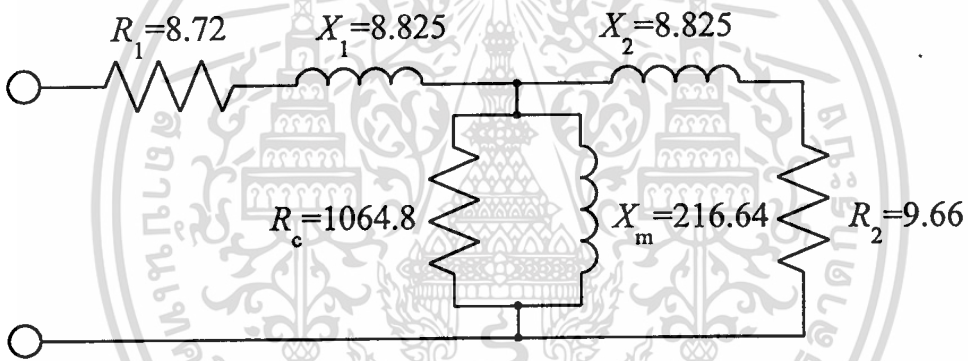


รูปที่ 4.49 แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

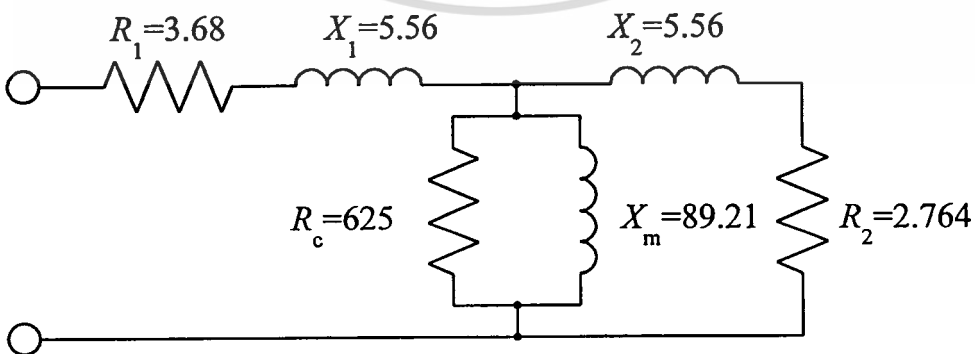
บทที่ 5

ผลการจำลองแบบ

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในบทที่ 4 จะนำมาเปรียบเทียบผลของกระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าและแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัว โดยผลจากการจำลองแบบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันกับทฤษฎีวงจรเสมือนเมื่อใช้หลักการการทับซ้อนมารวมวิเคราะห์ในกรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันฮาร์มอนิกส์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสทั้งสามขนาดมีพารามิเตอร์ภายในที่ใช้ในการจำลองแบบดังต่อไปนี้

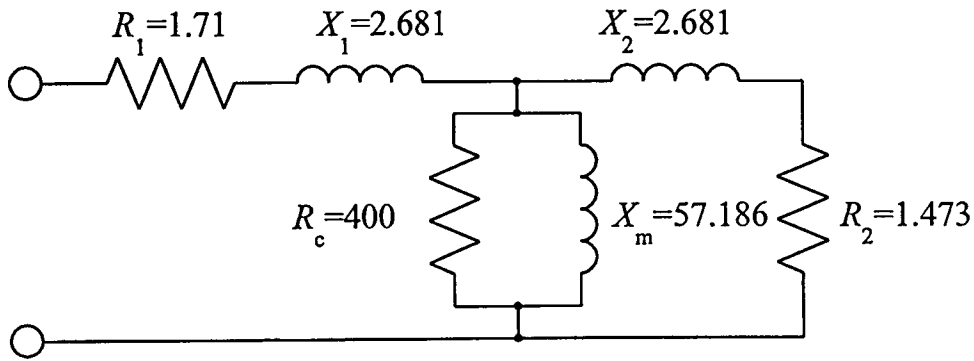


รูปที่ 5.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 5.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

ตารางที่ 5.1 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัว

	Rotational Losses (W)
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า	6.0
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า	12.5
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า	18.0

5.1 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

จากค่าพารามิเตอร์ของต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่แสดงในรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 จะใช้ในการจำลองแบบโดยที่ตารางที่ 5.2 ใช้ในการแสดงผลค่ากระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระทางกลเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล

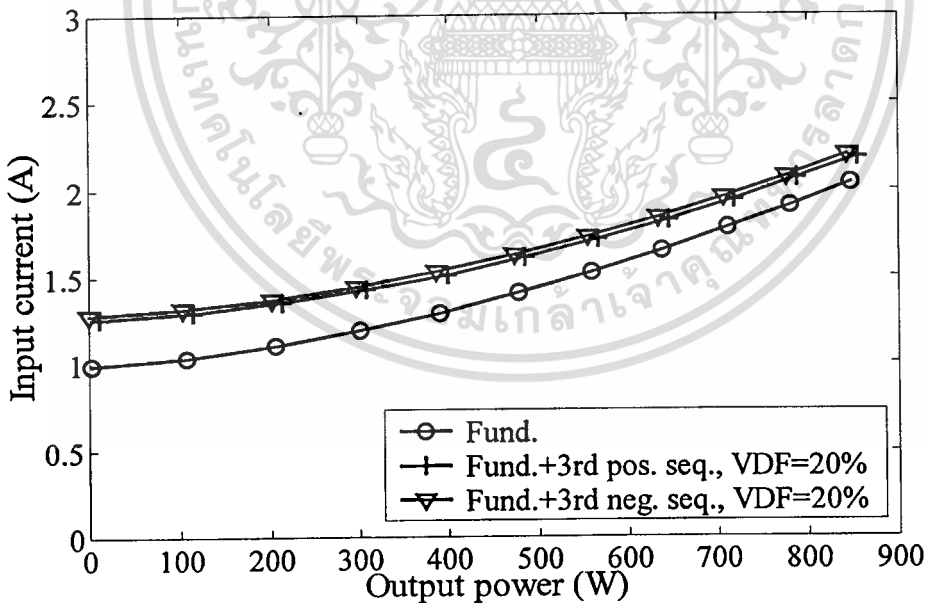
		Simulation		Test		% Error	
		I (A)	P (W)	I (A)	P (W)	I (A)	P (W)
Sinusoidal		0.990	139.04	1.00	137.28	-1.01	1.266
3 rd	Positive	1.265	179.21	1.21	176.20	4.348	1.68
	Negative	1.285	181.95	1.24	176.25	3.502	3.133
4 th	Positive	1.163	160.75	1.14	159.77	1.978	0.61
	Negative	1.169	161.50	1.15	167.57	1.625	-3.759
5 th	Positive	1.108	154.46	1.10	153.37	0.722	0.706
	Negative	1.110	154.61	1.08	152.16	2.703	1.585

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

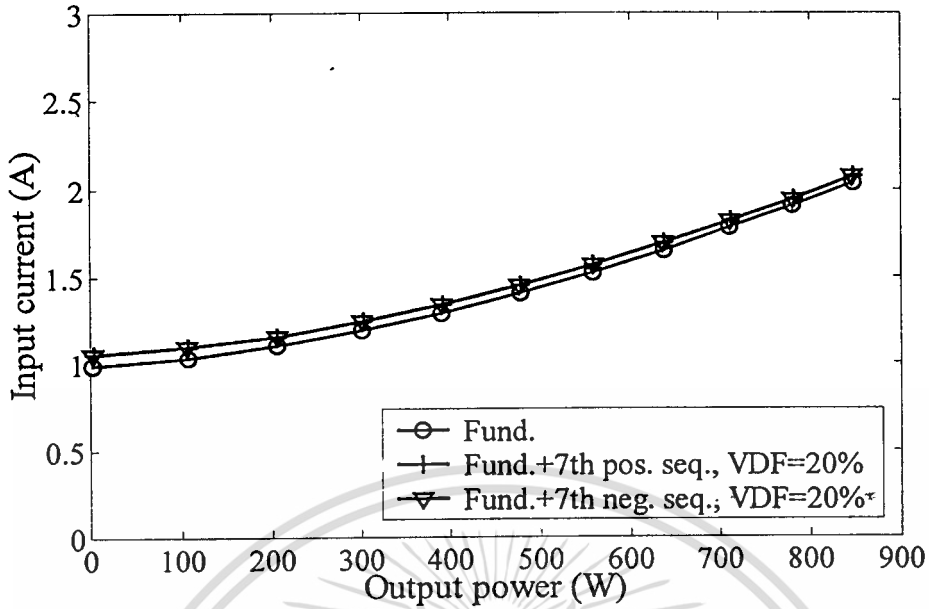
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

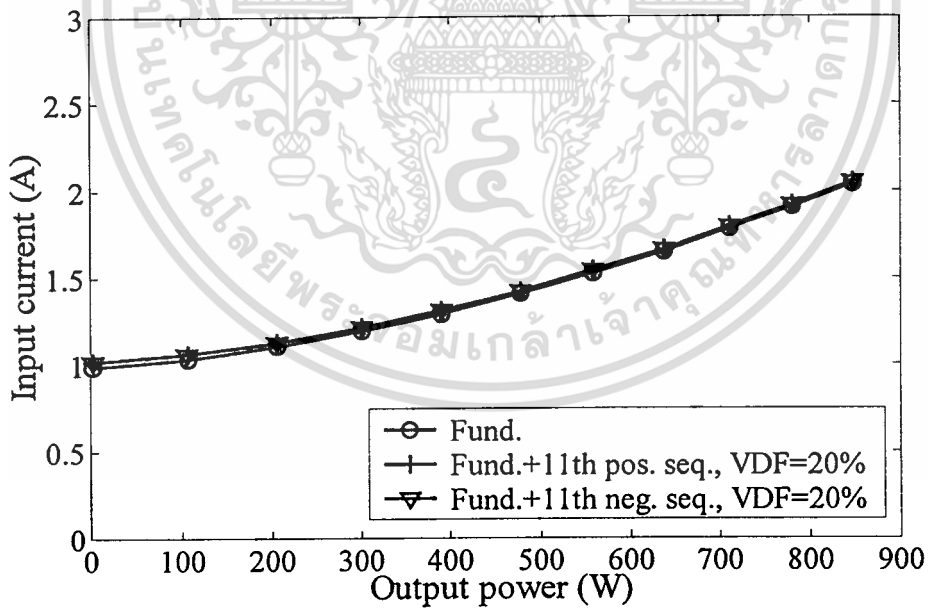
6 th	Positive	1.075	150.65	1.06	148.03	1.395	1.739
	Negative	1.076	150.75	1.06	152.09	1.487	-0.889
7 th	Positive	1.053	148.31	1.05	145.35	0.285	1.996
	Negative	1.054	148.35	1.06	148.20	-0.569	0.101
8 th	Positive	1.039	146.75	1.05	144.12	-1.059	1.792
	Negative	1.039	146.75	1.05	145.45	-1.059	0.886
9 th	Positive	1.029	145.75	1.05	143.77	-2.041	1.358
	Negative	1.029	145.75	1.05	142.74	-2.041	2.065
10 th	Positive	1.022	144.92	1.04	141.72	-1.761	2.208
	Negative	1.022	144.92	1.05	145.56	-2.740	-0.442
11 th	Positive	1.017	144.38	1.03	142.24	-1.278	1.482
	Negative	1.017	144.38	1.04	146.68	-2.262	-1.593



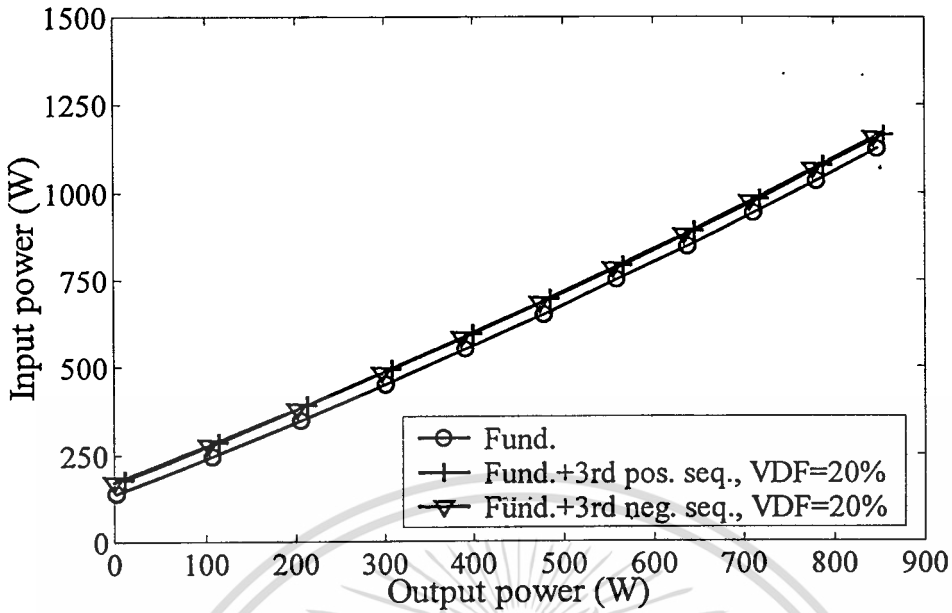
รูปที่ 5.4 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



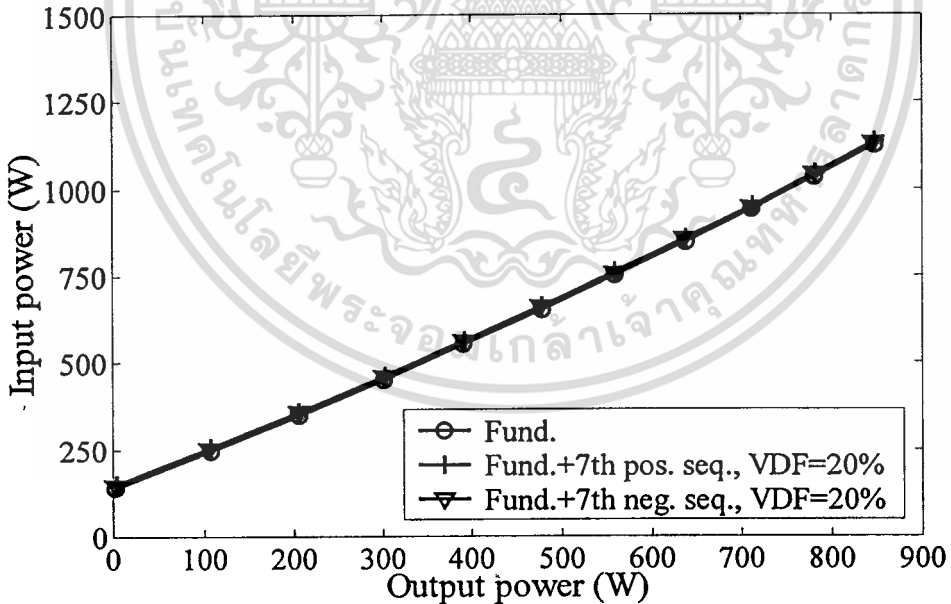
รูปที่ 5.5 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



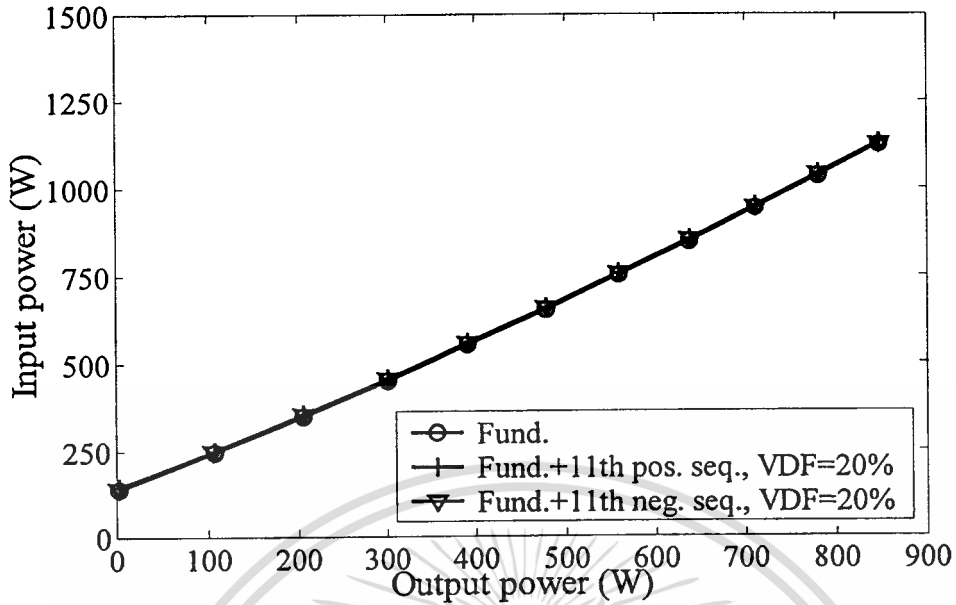
รูปที่ 5.6 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



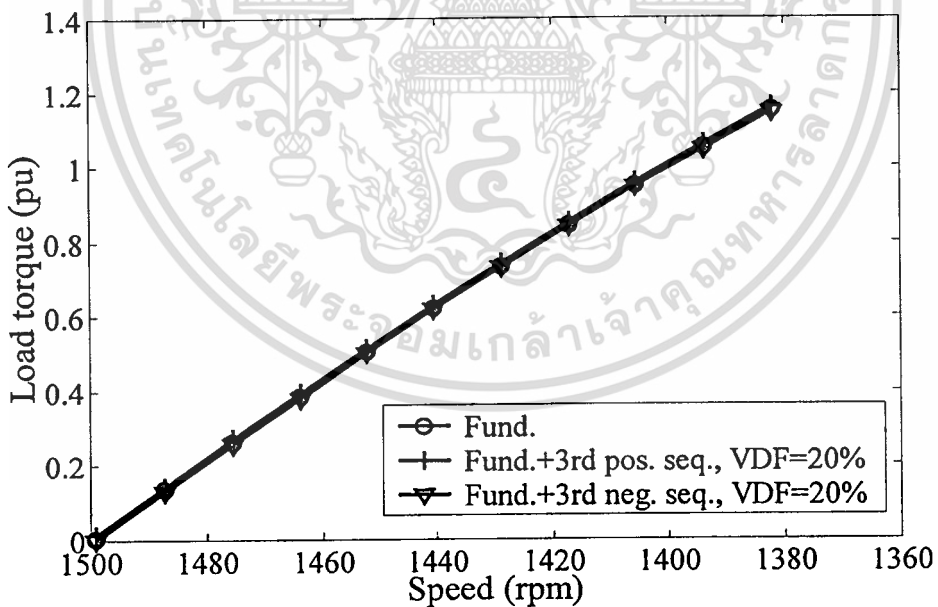
รูปที่ 5.7 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



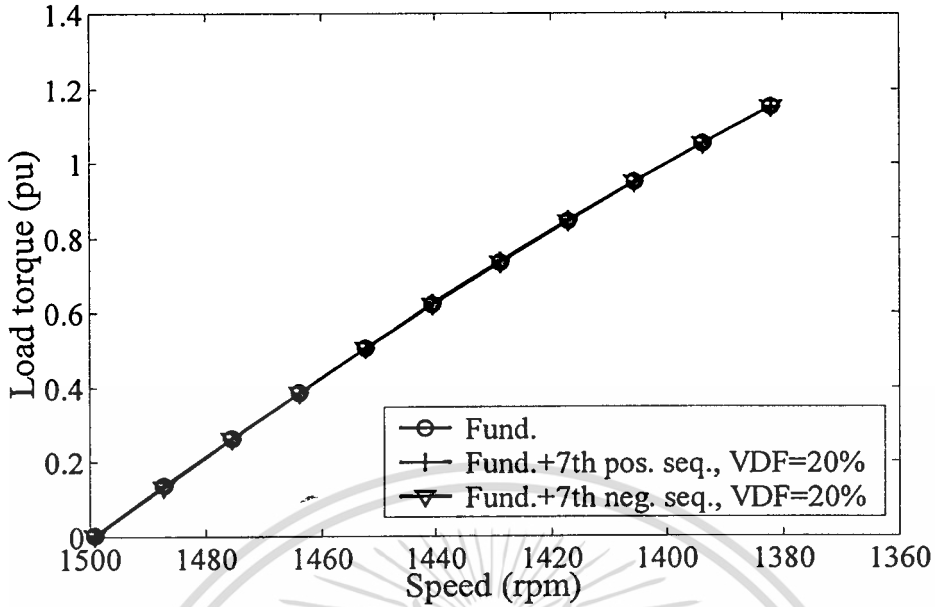
รูปที่ 5.8 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



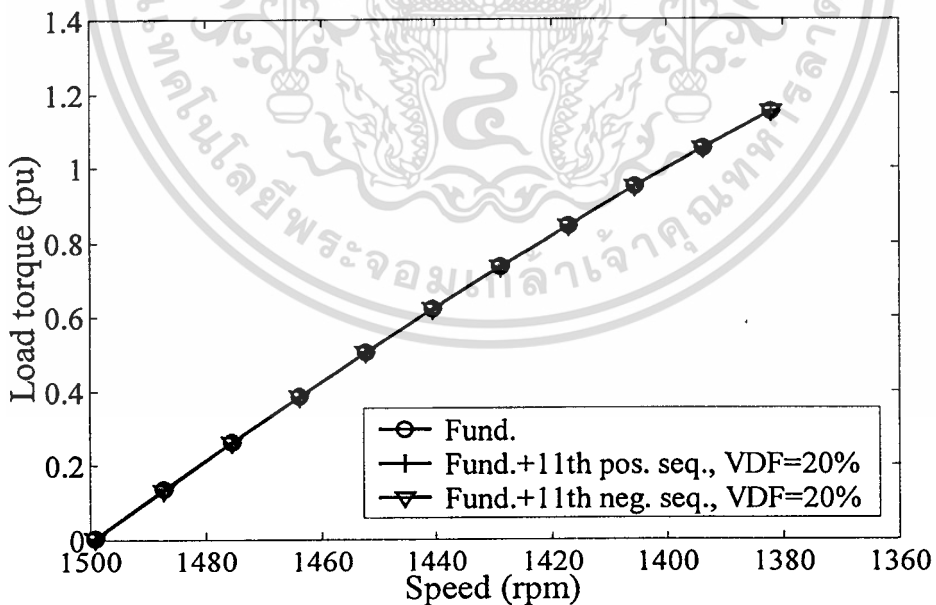
รูปที่ 5.9 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.10 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.11 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



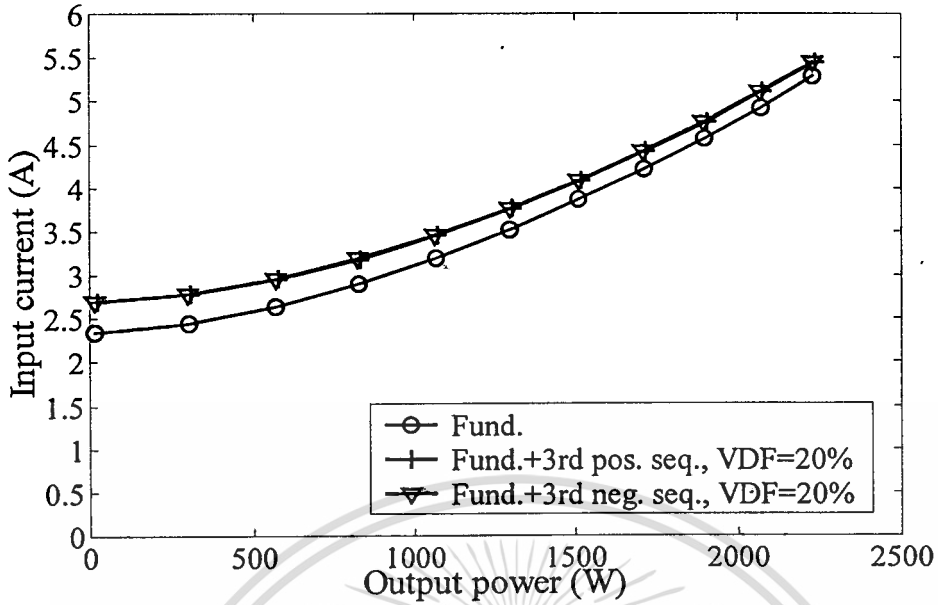
รูปที่ 5.12 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

5.2 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

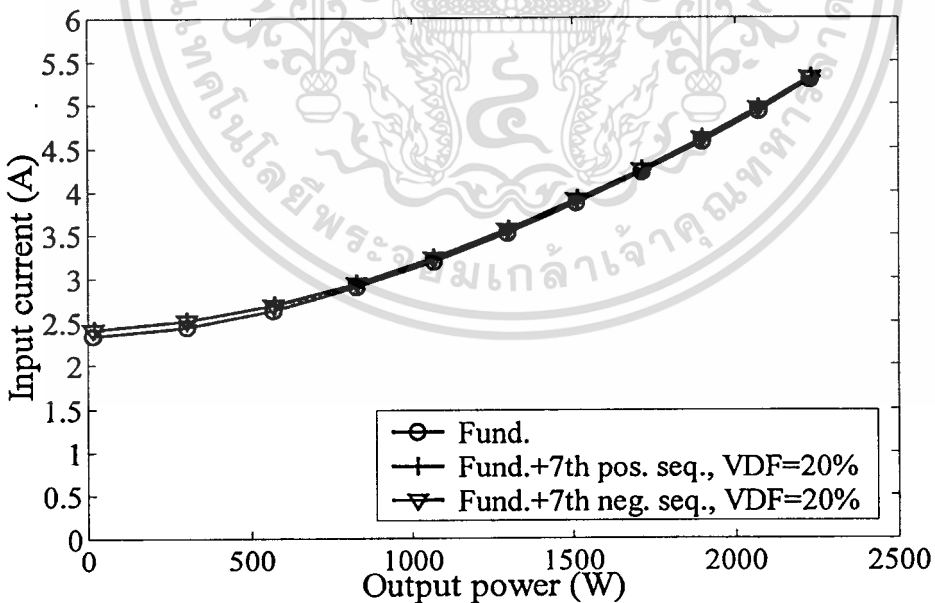
จากค่าพารามิเตอร์ของต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่แสดงในรูปที่ 5.2 และตารางที่ 5.1 จะใช้ในการจำลองแบบโดยที่ตารางที่ 5.3 ใช้ในการแสดงผลค่ากระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระทางกลเมื่อได้รับฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

ตารางที่ 5.3 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล

		Simulation		Test		% Error	
		I (A)	P (W)	I (A)	P (W)	I (A)	P (W)
Sinusoidal		2.337	248.04	2.31	221.40	1.155	10.740
3 rd	Positive	2.685	284.48	2.92	281.73	-8.752	0.967
	Negative	2.694	285.26	2.99	298.26	-10.987	-4.557
4 th	Positive	2.544	270.25	2.63	263.65	-3.381	2.442
	Negative	2.547	270.51	2.60	256.38	-2.081	5.223
5 th	Positive	2.473	264.02	2.59	257.86	-4.731	2.333
	Negative	2.474	264.04	2.47	239.14	0.162	9.430
6 th	Positive	2.433	260.51	2.38	234.37	2.178	10.034
	Negative	2.433	260.52	2.45	239.16	-0.699	8.199
7 th	Positive	2.408	258.89	2.36	234.43	1.993	9.448
	Negative	2.408	258.89	2.47	240.39	-2.575	7.146
8 th	Positive	2.392	257.36	2.35	232.20	1.756	9.776
	Negative	2.392	257.36	2.40	233.43	-0.334	9.298
9 th	Positive	2.380	256.32	2.37	232.57	0.420	9.266
	Negative	2.380	256.32	2.38	230.99	0.000	9.882
10 th	Positive	2.372	255.58	2.38	238.65	-0.337	6.624
	Negative	2.372	255.58	2.34	237.48	1.349	7.082
11 th	Positive	2.366	255.04	2.34	229.61	1.099	9.971
	Negative	2.366	255.04	2.37	234.74	-0.169	7.960

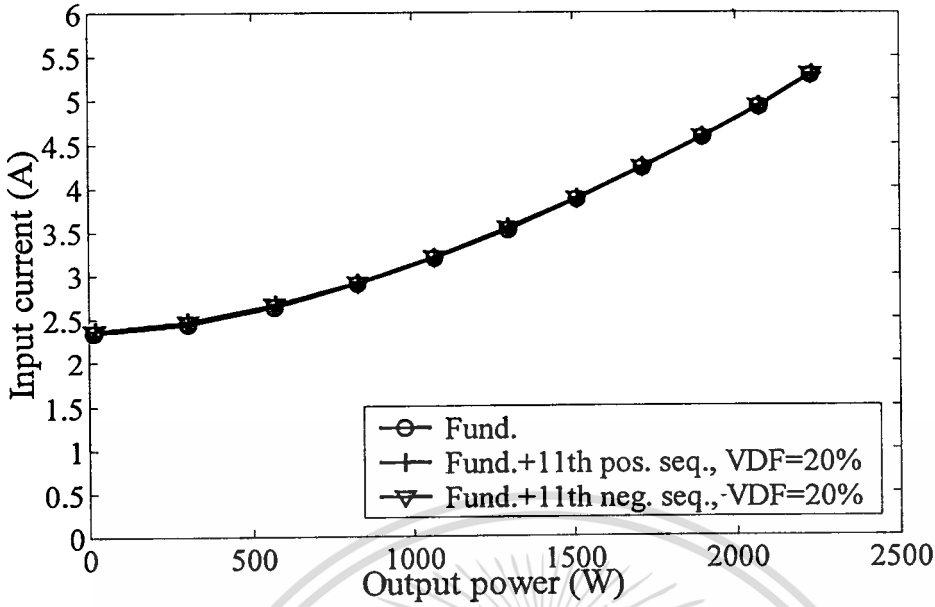


รูปที่ 5.13 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

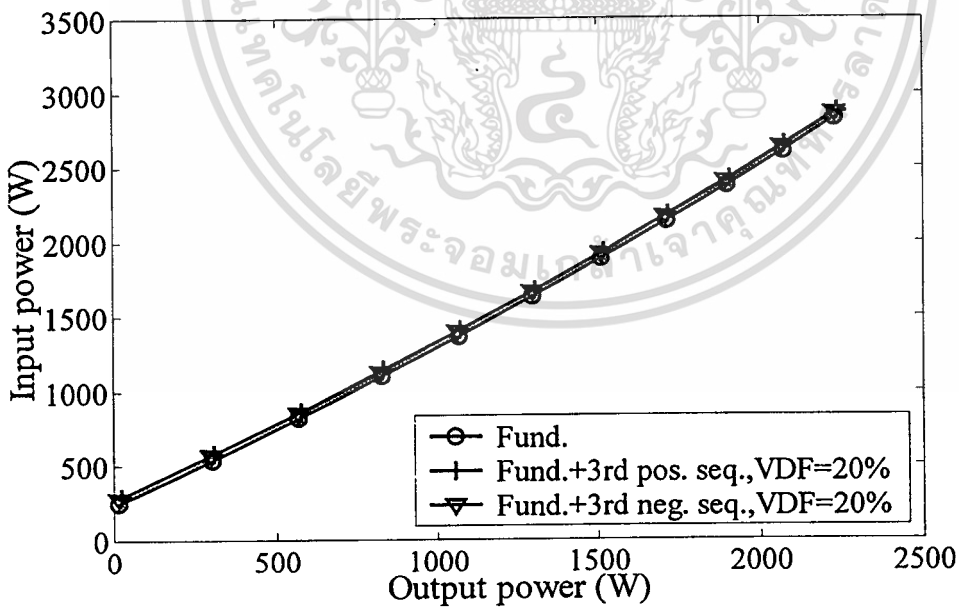


รูปที่ 5.14 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

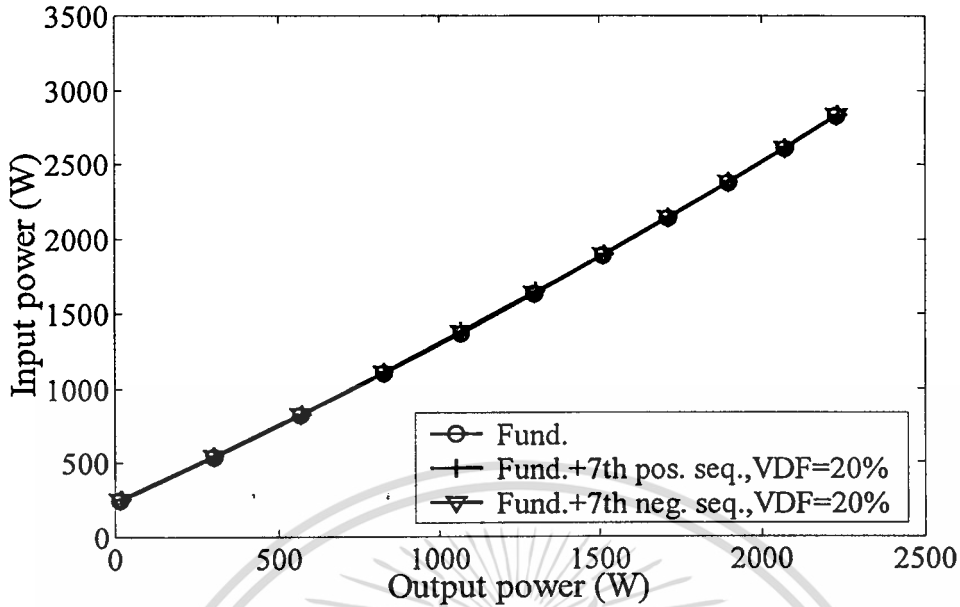
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



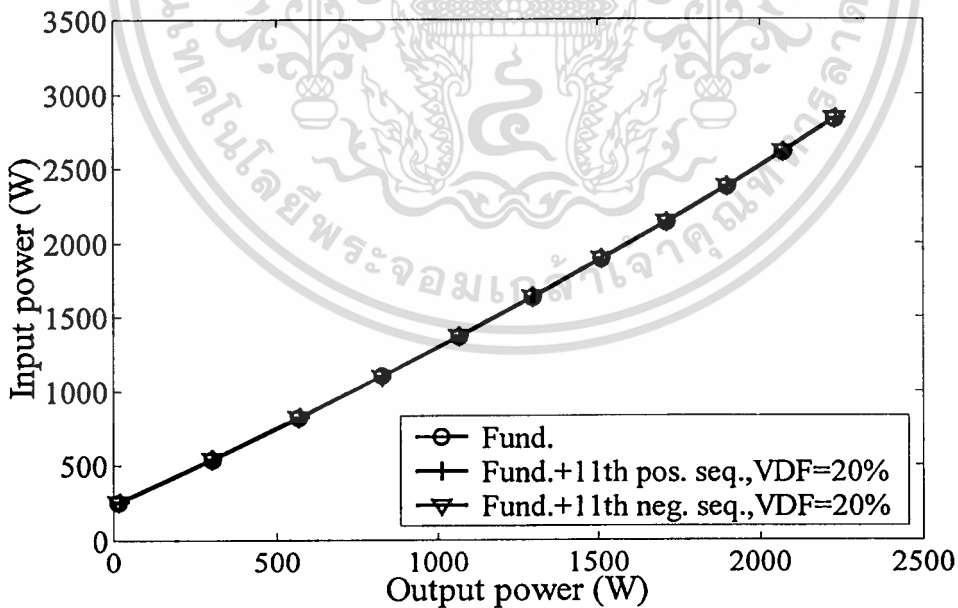
รูปที่ 5.15 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.16 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

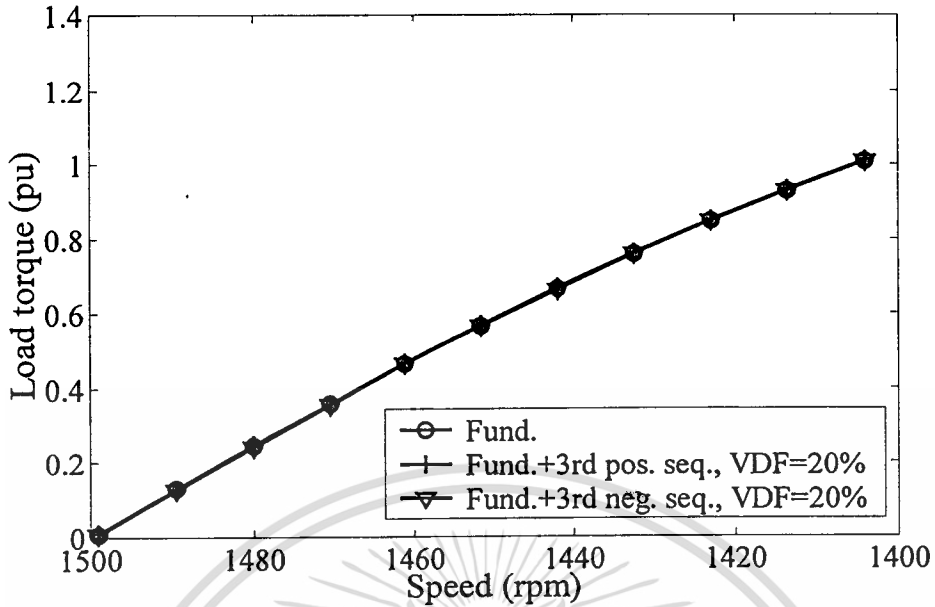


รูปที่ 5.17 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

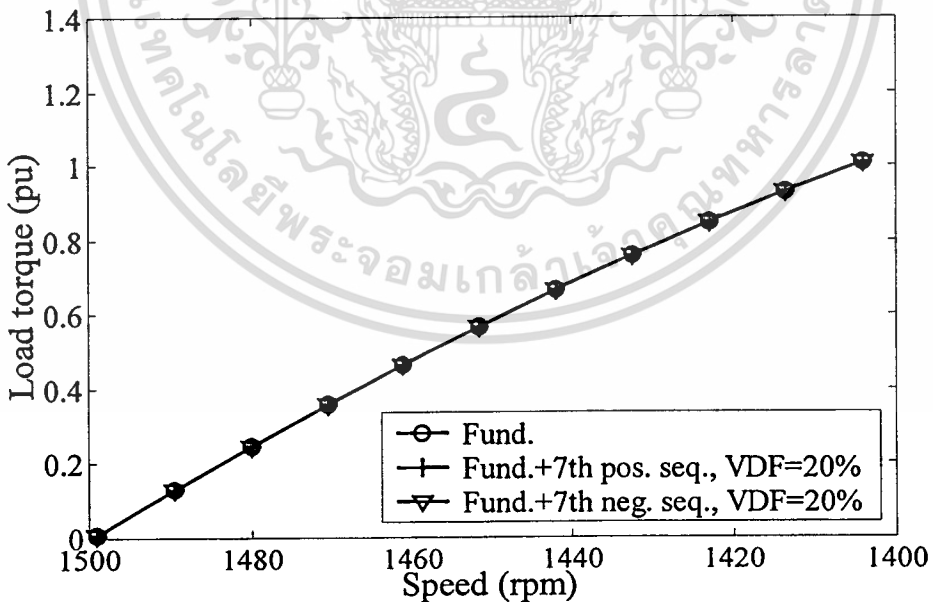


รูปที่ 5.18 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

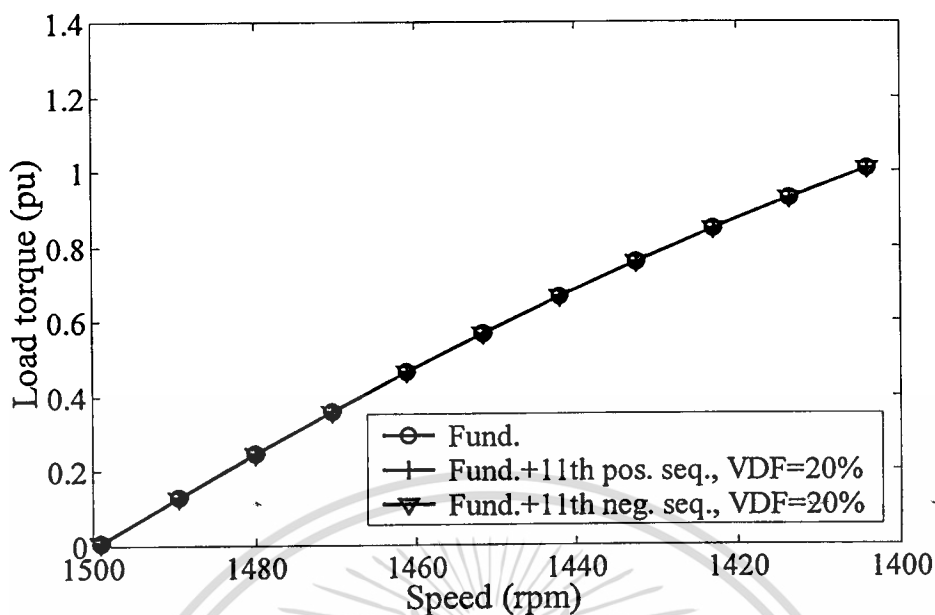


รูปที่ 5.19 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.20 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 7th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 แรงบิดที่เพลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

5.3 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

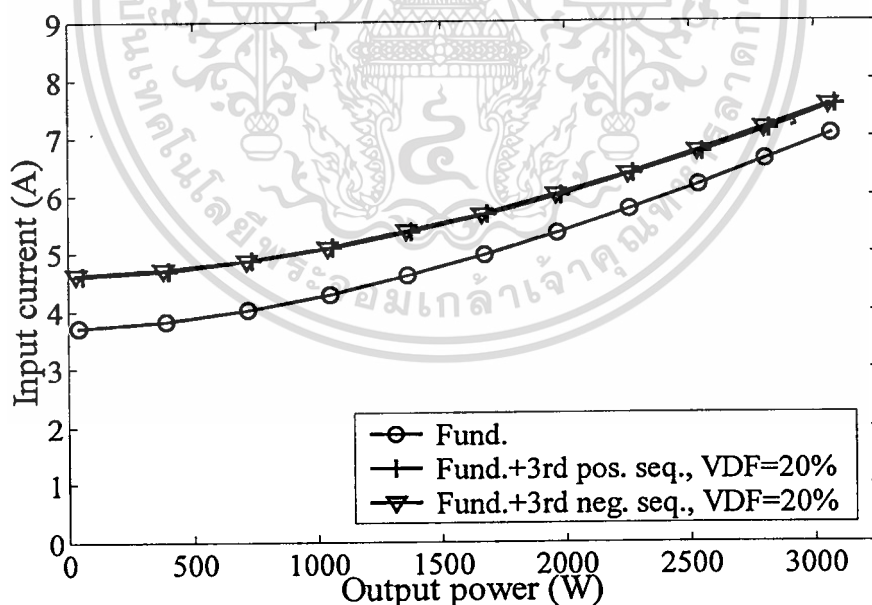
จากค่าพารามิเตอร์ของต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่แสดงในรูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.1 จะใช้ในการจำลองแบบโดยที่ตารางที่ 5.4 ใช้ในการแสดงผลค่ากระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระทางกลเมื่อได้รับฮาร์โมนิกส์ในอันดับต่างๆ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

ตารางที่ 5.4 ผลการจำลองแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 5 แรงม้าขณะไม่มีภาระทางกล

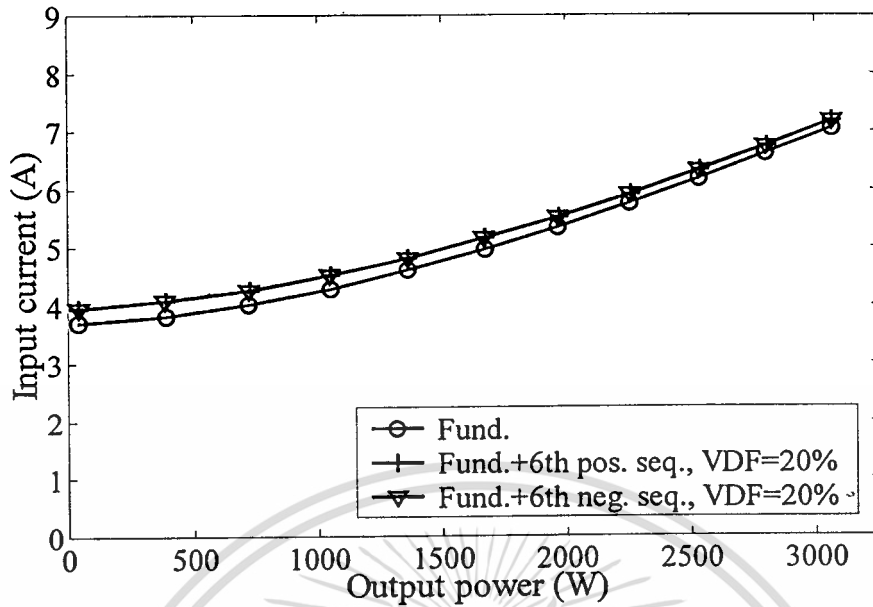
		Simulation		Test		% Error	
		I (A)	P (W)	I (A)	P (W)	I (A)	P (W)
Sinusoidal		3.708	404.67	3.61	370.30	2.643	8.493
3 rd	Positive	4.601	477.12	4.97	527.71	-8.020	-10.592
	Negative	4.623	479.21	5.02	528.53	-8.571	-10.292
4 th	Positive	4.247	449.98	4.35	467.01	-2.425	-3.785
	Negative	4.253	450.08	4.42	471.86	-3.927	-4.839
5 th	Positive	4.066	436.50	3.98	407.05	2.115	6.747
	Negative	4.068	436.52	4.09	423.86	-0.540	2.900

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

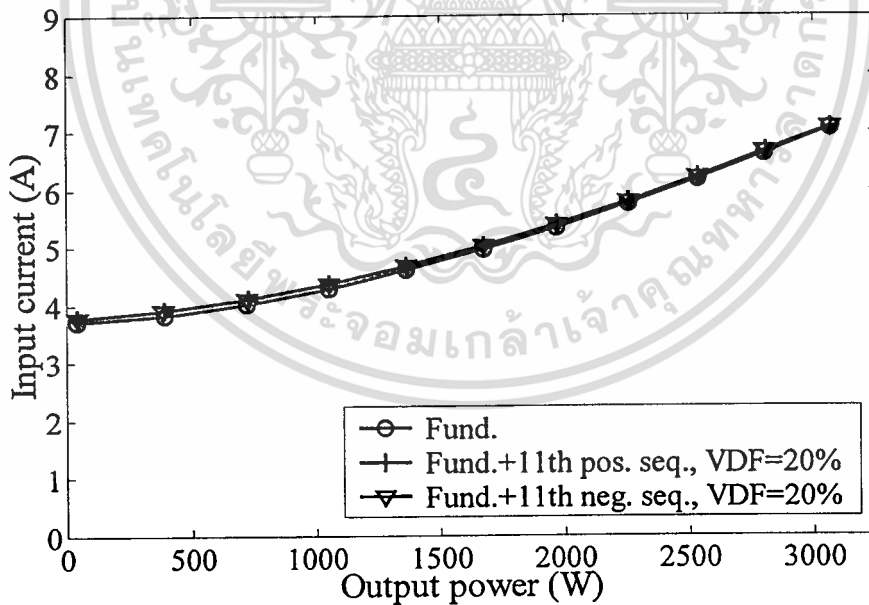
6 th	Positive	3.962	427.92	3.85	399.08	2.827	6.740
	Negative	3.962	427.92	3.90	401.08	1.565	6.272
7 th	Positive	3.897	423.75	3.76	384.99	3.516	9.147
	Negative	3.897	423.75	3.81	389.88	2.232	7.993
8 th	Positive	3.854	421.01	3.64	379.20	5.553	9.931
	Negative	3.854	421.01	3.69	389.70	4.255	7.437
9 th	Positive	3.824	419.11	3.62	378.98	5.335	9.575
	Negative	3.824	419.11	3.66	379.76	4.289	9.389
10 th	Positive	3.802	417.74	3.64	376.17	4.261	9.951
	Negative	3.802	417.74	3.66	378.69	3.735	9.348
11 th	Positive	3.786	416.71	3.65	374.93	3.592	10.026
	Negative	3.786	416.71	3.62	376.31	4.385	9.695



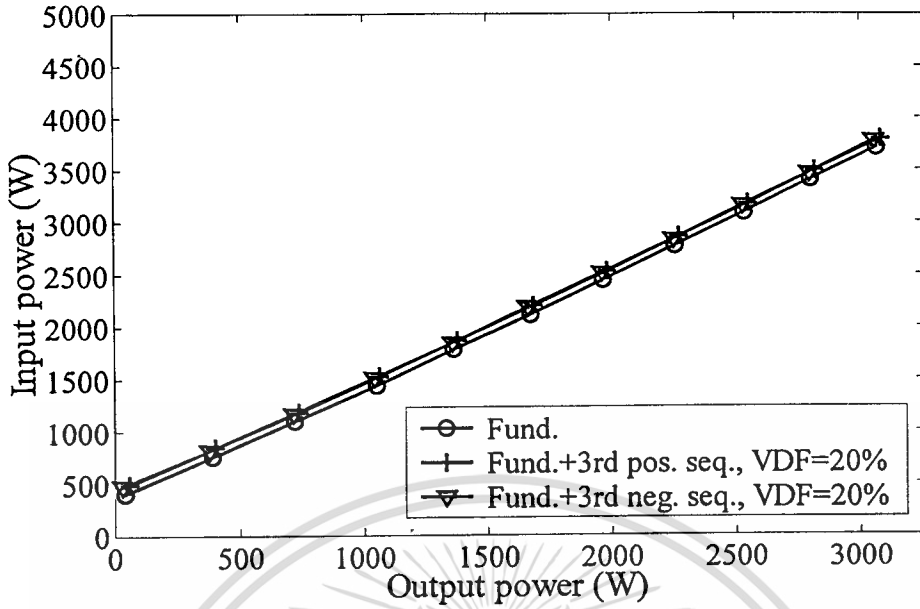
รูปที่ 5.22 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



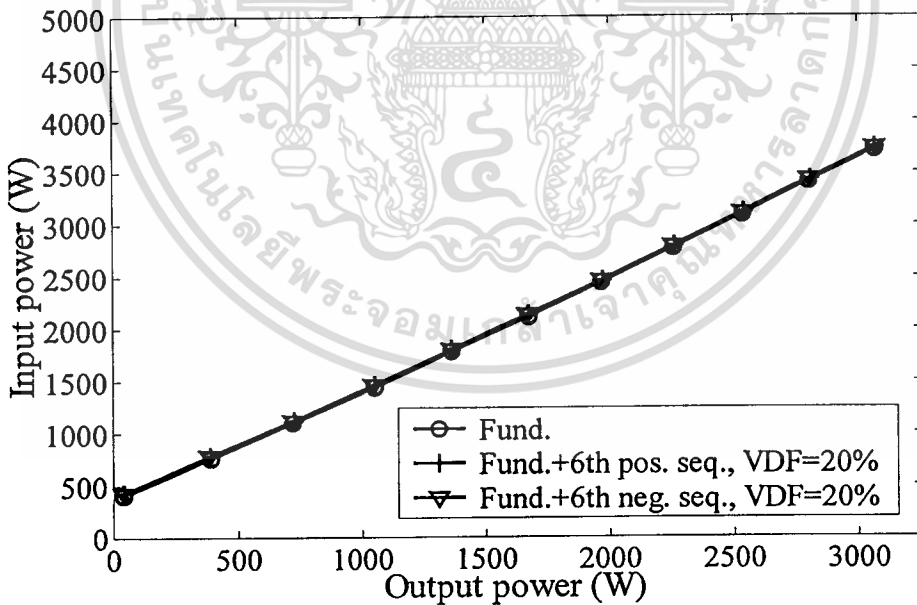
รูปที่ 5.23 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



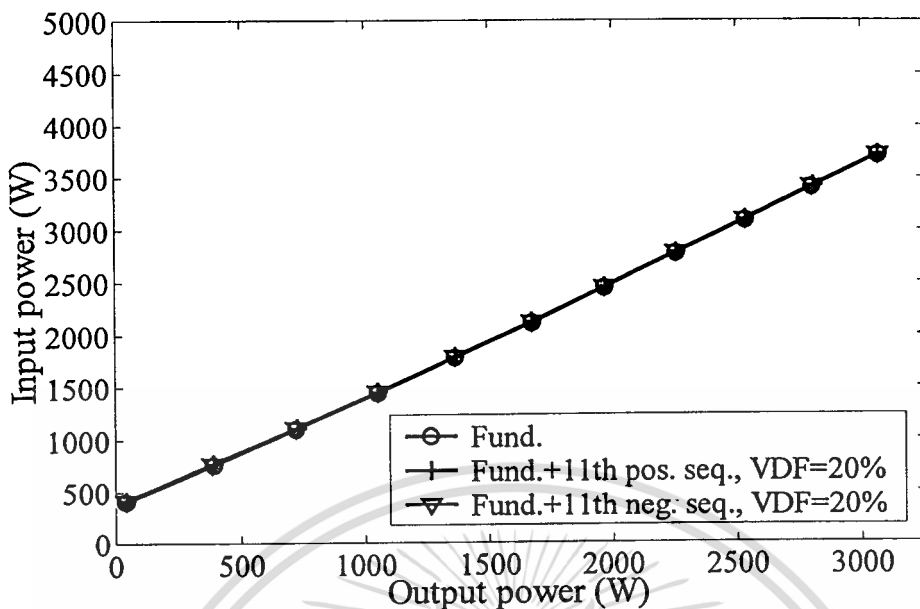
รูปที่ 5.24 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



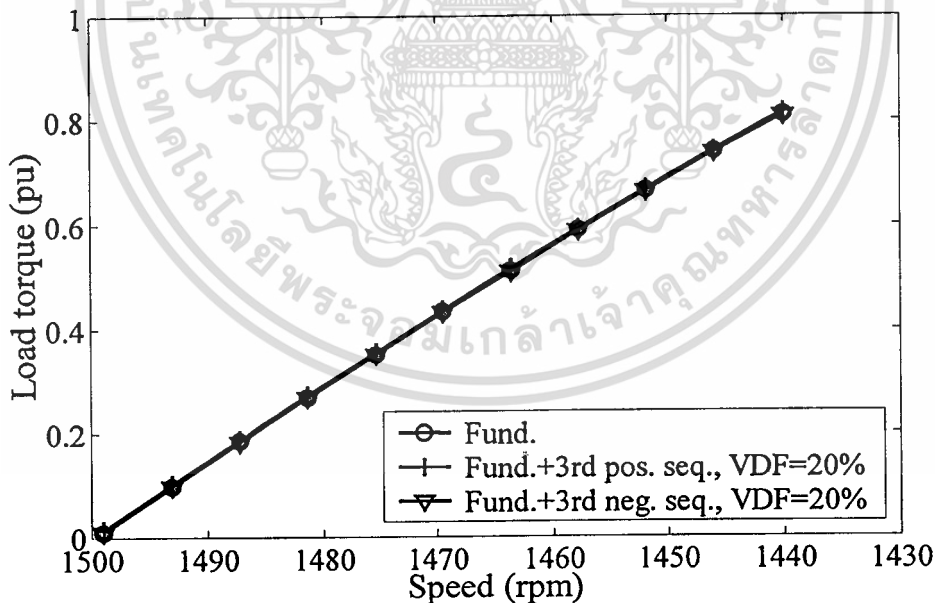
รูปที่ 5.25 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.26 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

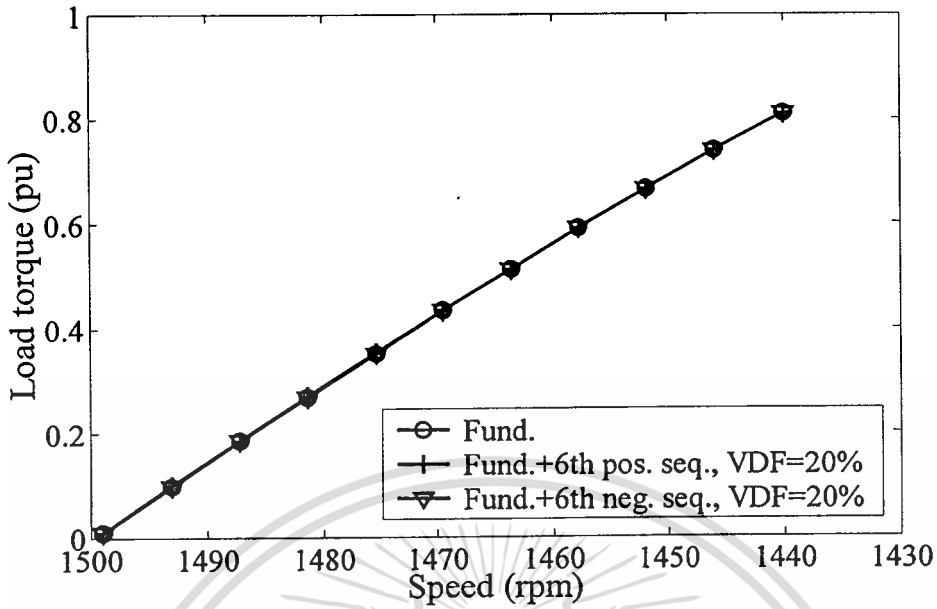


รูปที่ 5.27 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

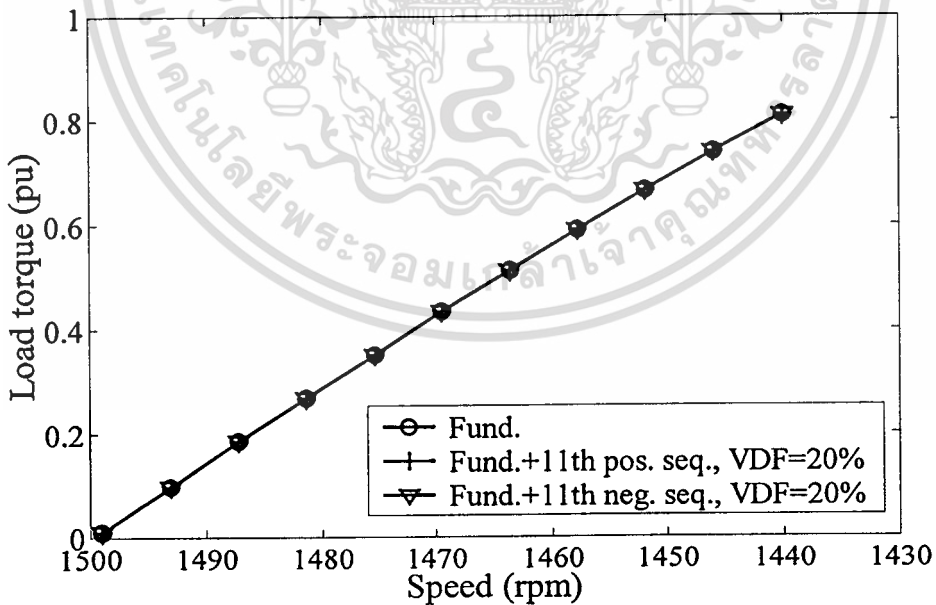


รูปที่ 5.28 แรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 3rd ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 6th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %



รูปที่ 5.30 แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ในกรณีแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 11th ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 20 %

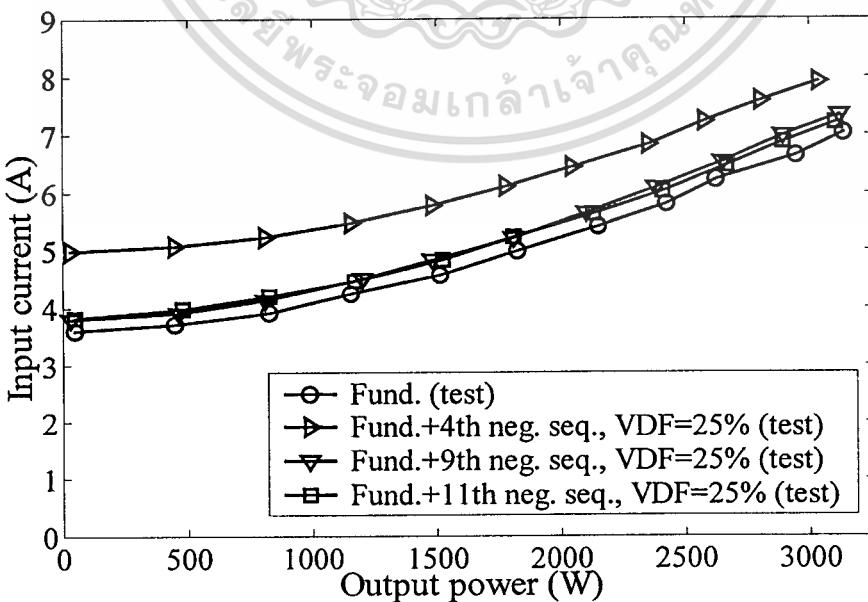
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

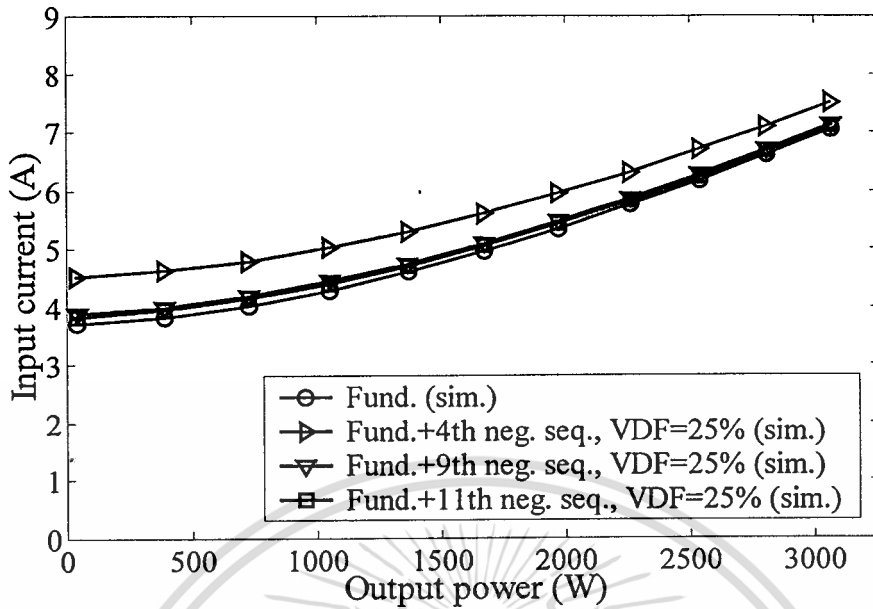
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากเทคนิคการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สแบบรีตักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ศักดาไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายชนิดนี้สามารถที่นำมาใช้ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ จากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.22 จะแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สแบบรีตักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านสามารถที่จะสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ได้ตามทฤษฎีทำให้สามารถทราบขนาดและอันดับของฮาร์โมนิกส์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างไร.

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะส่งเสริมความเข้าใจในผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งฮาร์โมนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นฮาร์โมนิกส์สามเฟสที่มีการเรียงลำดับเฟสในทิศทางบวกและลบเป็นฮาร์โมนิกส์ที่สามารถควบคุมได้เพื่อใช้อ้างอิงกับทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนเมื่อกรณีฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสบวกสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นก็จะไปเสริมกับสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน ในทางตรงกันข้ามเมื่อฮาร์โมนิกส์มีการเรียงลำดับเฟสลบสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นก็จะไปต้านกับสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐานซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีดังกล่าวจะแสดงอยู่ในบทที่ 4 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบลบจะมีผลมากกว่าฮาร์โมนิกส์ที่มีการเรียงลำดับเฟสแบบบวกเล็กน้อย.

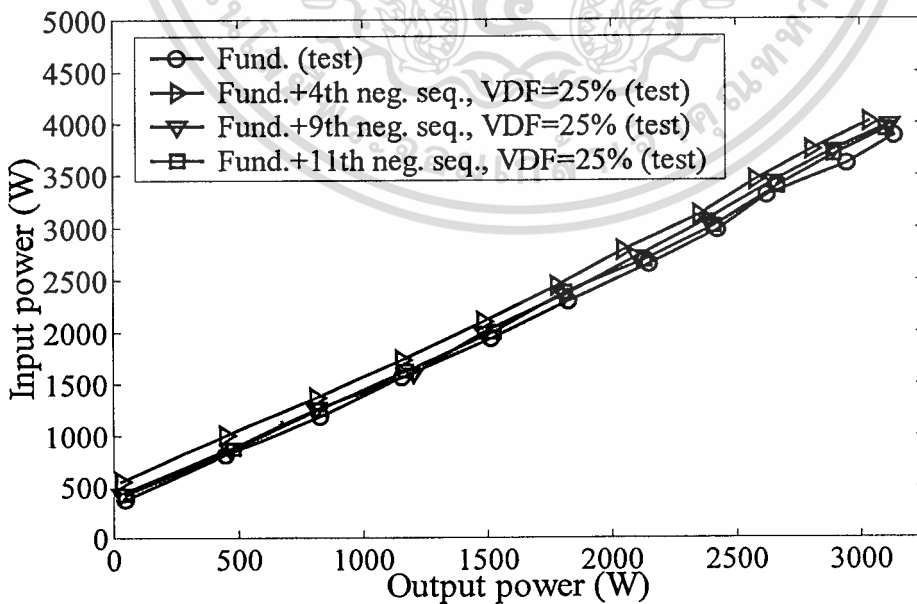


รูปที่ 6.1 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.2 กระแสไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์มอนิกส์โดยผลการจำลองแบบ

ผลจากรูปที่ 6.1 และ 6.2 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ผลจากการคำนวณจากทฤษฎีที่ได้สันนิษฐานขึ้น ผลจะมีลักษณะสอดคล้องและมีแนวโน้มทิศทางเดียวกับผลการทดสอบที่เกิดขึ้น.



รูปที่ 6.3 กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้าในกรณีมีฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบในรูปที่ 6.1 และ 6.3 แสดงได้ว่ากระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีของฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ จะมีผลทำให้กระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกอันดับสูงๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดค่าความสูญเสียสูงขึ้น และเมื่อกรณีฮาร์มอนิกอันดับสูงๆ ค่าความสูญเสียจะมีผลน้อย โดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากัน.

จากผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสามขนาดผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นถึงผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบจากฮาร์มอนิกน้อยมาก แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจากฮาร์มอนิกจะมีผลต่อกระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออันดับของความถี่ฮาร์มอนิกมีอันดับต่ำๆ ใกล้เคียงกับความถี่มูลฐาน และอันดับของความถี่ฮาร์มอนิกมีอันดับสูงๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อกระแสและกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าจะมีผลน้อยลงไปตามลำดับโดยที่ค่าตัวประกอบความเพี้ยนศักดาไฟฟ้าเท่ากัน ซึ่งดูจากผลการทดสอบจากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.49 จะมีผลการทดสอบที่มีลักษณะเดียวกันกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสามขนาด และจากผลการจำลองแบบในบทที่ 5 ฮาร์มอนิกแบบสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ในการอ้างอิงกับทฤษฎีได้อย่างสอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่า การสร้างแหล่งจ่ายศักดาไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยอาศัยการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีแบบรีตักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน สามารถสร้างความชัดเจนในผลของการทดสอบเพื่อยืนยันกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุน ผลจะมีลักษณะสอดคล้องและมีแนวโน้มทิศทางเดียวกับผลการทดสอบ.

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. K. Sen and H. A. Landa. "Derating of Induction Motor Due to Waveform Distortion." IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 6, Nov./Dec 1990, pp. 1102-1107.
- [2] P. C. Sarikas. "Harmonics Survey within an Industrial Facility." Southcon/96, 1996, pp.575-581.
- [3] R. Yacamini and S. C. Chang. "Noise and Vibration from Induction Machines Fed from Harmonic Sources." IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, 1996, pp. 286-292.
- [4] A. Vamvakari, et. al. "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 the 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. al. "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 Motors Including Core Losses." IEEE IECON'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. "Influence of the Inverter Characteristics on the Iron Losses in PWM Inverter Fed Induction Motors." IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No.5, Sep./Oct 1996, pp. 1190-1194.
- [10] D. Maly, D. W. Novotny and C. Thompson. "The Influence of Winding Capacitance on High Frequency Time Harmonic Losses in Induction Motor." Conference Record of Industry Applications Society Annual Meeting the 1992, 1992, pp. 33-39.
- [11] J. C. Clare et. al. "Additional Loss due to Operation of Machines from Inverters." IEE Half Day Colloquium on Testing of Electrical Machines (Ref. No.)1999/161, 1999, pp. 5/1-5/8
- [12] T. J. Sobczyk and B. L. Sapinski. "Analysis of Phase Controlled Converters for Induction Motors." IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 5, No. 2, Apr 1990, pp. 172-181.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] E. N. Hildebrand 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. Bradley et. al. "Enhanced Harmonic Injection for Determination of Harmonic Loss in Induction Machines." IEEE Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives, No. 475 Sep 2000, pp. 212-217.
- [15] S. Khomfai, V. Kinnares and P. Viriya. "Investigation Into Core Losses due to Harmonics Voltages 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 คงมันประกายกิจ พิชิต ถ้ำของ และชัชวาลย์ ฉัตรอุทัย. "การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22 - 23 พฤศจิกายน 2544, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 205-210.
- [19] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, ANSI/IEEE Std 112-1996, 1997.
- [20] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 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**. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% M-file created for calculate equivalent circuit
% write by Chalermchai Khongmanprakaikit
% reference method of calculation from "The performance and design of alternating
% current machines" Third edition, M. G. Say
% for calculate superposition of fundamental and harmonics part
% in this M-file create for thesis
% "A Study of Effects of Harmonics on Torque of Three-Phase Induction Machines"
% for analysis Induction Motor 3 Hp
% *****
%
% In this case calculate fundamental frequency
%
% *****
% Stator resistance (ohm)
r1= input('Enter value of R1 for analysis');
% Stator reactance (ohm)
x1= input('Enter value of X1 for analysis');
% Rotor resistance (ohm)
r2= input('Enter value of R2 for analysis');
% Rotor reactance (ohm)
x2= input('Enter value of X2 for analysis');
% Core loss resistance (ohm)
rm= input('Enter value of Rm for analysis');
% Magnetizing reactance (ohm)
xm= input('Enter value of Xm for analysis');
% Fundamental frequency
f=50;
% Angular frequency
wo=2*pi*f;
l1=x1/wo; % Inductance of stator
l2=x2/wo; % Inductance of rotor

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

nr=1:1499; % Rotor speed of fundamental frequency
ns=(120*f)/p; % Synchronous speed of fundamental frequency
% order of harmonic
k=input('Enter value of order harmonics for analysis');
% slip of fundamental
s=(ns-nr)/ns;
% Magnetizing admittance, ym
ym=1/rm-j*(1/xm);
% Stator Impedance
z1=r1+j*x1;
% Constant, c1
c1=abs(1+(z1*ym));
z2=(r2./s)+j*x2;
z=z2./(z1+(c1.*(z2)));
%*****
% Calculate for three-phase
%*****
% Voltage applied to terminal, Vphase
v1=220;
E1=v1.*z;
i2=E1./z2;
% Rotor input or Power air gap
Pg=3.*(abs(i2.^2)*(r2))./s;
% Rotor losses
closs=3.*(abs(i2.^2).*r2);
% Friction and windage losses
fric= input('Enter value of Friction loss for analysis');
% Total losses in rotor
Lt=closs+fric;
% Rotor output power
Pm=Pg-Lt;

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ
 ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ

```

% Load torque
Tm=Pm./wr;
y=ym*z2;
yi=1+y;
i11=i2.*yi;
an=angle(i11);
% Stator input current, (A)
i1=abs(i11);
% Stator input power, (W)
P1=abs(abs(v1).*i1.*cos(an));
% Power input of three phase
Pin=3.*P1;
%*****
%
%In this case calculate harmonics frequency
%
%*****
% for all harmonic sequence
x1k=k*wo*11;
x2k=k*wo*12;
xmk=xm*k;
nsk=(120*f*k)/p; % synchronous speed of harmonic
sk=(nsk-nr)/nsk; % slip of harmonic
% Magnetizing admittance of harmonic, ymk
ymk=1/rm-j*(1/xmk);
% Stator Impedance
z1k=r1+j*x1k;
% Constant, c1
c1k=abs(1+(z1k*ymk));
z2k=(r2./sk)+j*x2k;
zk=z2k./(z1k+(c1k.*(z2k)));

```

เอกสารนี้ Calculate, k ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% VDF=Voltage Distorsion Factor
vdf=input('Enter value of VDF for analysis');
% Harmonic Voltage , Vphase
v1k=vdf*(v1);
E1k=v1k.*zk;
i2k=E1k./z2k;
% Rotor input of harmonics or power airgap of air gap
Pgk=3.*(abs((i2k.^2).*(r2))./sk);
% Rotor losses of harmonic
clossk=3.*(abs(i2k.^2).*r2);
% Rotor output
Pmk=Pgk-clossk;
Tmk=Pmk/wr;
yk=ymk.*z2k;
yik=1+yk;
i11k=i2k.*yik;
ank=angle(i11k);
% Stator current of harmonic, (A)
i1k=abs(i11k);
% Stator power of harmonic, A
P1k=abs(abs(v1k).*i1k.*cos(ank));
Pk=3.*P1k;
%*****
% for harmonic positive sequence
%*****
Pip=Pin+Pk;
Tmp=Tm+Tmk;
ip=sqrt(i1.^2+i1k.^2);
%*****
% for negative sequence
%*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Pinn=Pin+Pk;
Tmn=Tm-Tmk;
in=sqrt(i1.^2+i1k.^2);
%*****
% End of program
%*****

% M-file created for the transform Time domain to Freq domain
% using FFT transform Algorithm
% [Abs(freq)] = res01(data,sampling frequency, Hz)
% x = Data signal
% fs = Sampling frequency (Hz)
%
% *****
function [hertz, magX] = res01(x,fs);
n = length(x);
t = 1/fs;
k = 0:n-1;
kt = k*t;
%*****
% FFT the signal x and plot freq in k points
%*****
X = fft(x);
magX = abs(X);
h=find(magX == max(magX));
value=magX(h);
magX=(magX/value)*100;
%*****
% Plot spectra of frequency
%*****
hertz = k*(1/(n*t));

```

```

bar( hertz(1:n/50), magX(1:n/50) );axis([0 1000 0 100]);
%plot ( hertz,magX)
xlabel('Frequency (Hz)', ylabel('% Harmonics')
grid,
return
%*****
% End of program
%*****

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 1

สาขาบทความ

- ❖ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ❖ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ❖ ระบบควบคุมและถาวรวัตถุ (CT)
- ❖ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

สนับสนุนการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษามลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสาม 3 เฟส A Study of Effects of Harmonics on Performance of Three – Phase Induction Motor

เฉลิมชัย กงมันประภากิจ พิชิต ถ้ายอง และ ชัยวุฒิ ฉัตรจุฑา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทร: (02)3267985 โทรสาร: (02)3267985 E-mail: s3061009@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสาม ซึ่งเป็นการนำเสนอเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแบบรีติคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน(BSRG) มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสไม่เป็นรูปไซน์ ฮาร์มอนิกที่สามเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเทคนิค BSRG สามารถต่อในลักษณะการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกหรือลบ (positive or negative sequence) เมื่อเทียบกับการเรียงลำดับของเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นความถี่และขนาดของรูปสัญญาณที่ได้จากตัวกำเนิดฮาร์มอนิกสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ เพื่อศึกษามลกระทบของฮาร์มอนิกต่อกระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสาม โดเมนแอมพลิจูดและทอร์คฮาร์มอนิกอันดับที่ 3th, 7th และ 11th ที่มีการเรียงลำดับของเฟสในทิศทางบวกและลบ ที่ค่าตัวประกอบความถี่ของฮาร์มอนิก (VDF) ค่าต่างๆ

Abstract

This paper 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 in order to study the effect of harmonics on the input current and input power of induction motor. The 3th, 7th and 11th order harmonics having positive and negative sequence at various Voltage Distortion Factor (VDF) are illustrated and discussed.

Keywords: harmonics, induction machines, nonsinusoidal waveform

1. บทนำ

จากปัญหาของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันซึ่งฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามารถที่จะแบ่งจากการกำเนิดออกเป็นดังนี้คือการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวอย่างเช่นการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมเฟส, อินเวอร์เตอร์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง การทำงานของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าและเตาหลอมโลหะไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง การทำงานของอุปกรณ์ที่มีการอิมิตีวาทังแม่เหล็ก และการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์โดยอุปกรณ์ shunt capacitors และ series inductors ในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในกรณีนี้จะไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกได้โดยตรงแต่จะทำให้เกิดการขยายขนาดของฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น การใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งมีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นในงานทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าอุปกรณ์เหล่านี้ก่อให้เกิดมลภาวะทางไฟฟ้า [1-2]. ในส่วนของภาระทางไฟฟ้า ในงานทางด้านอุตสาหกรรม โดยส่วนหนึ่งจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสามซึ่งเป็นที่มาของปัญหาที่ว่าฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสามภายใต้สภาวะการทำงานที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิก [3-5]. ในบทความนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแบบรีติคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่านในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ [6] ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าวจะใช้ในการทดสอบผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสาม โดยฮาร์มอนิกที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายนี้ทำให้ทราบแนวโน้มว่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสสาม เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวสามารถกำหนดขนาดและอันดับ k^{th} ของฮาร์มอนิก.

2. หลักการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบใหม่เป็นรูปไซน์

จากโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแบบรีติคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส มีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่ขั้วของขดลวดกระตุ้น และขดลวดอาร์มเจอร์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตัมชนิดนี้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิง

PW36

โครนัสโดยทั่วไปคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงโครนัสแบบรีคแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะไม่มีขดลวดที่โรเตอร์จึงมีความสามารถในการหมุนที่ความเร็วสูงๆได้ โดยที่ขดลวดอาร์มเจอร์ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า 3 เฟส ในขณะที่อินดักชันมอเตอร์ที่ต้องการจะสามารถควบคุมที่ความเร็วของโรเตอร์ ดังตัวอย่างการปรับอาร์มมิกซ์อินดักชันที่ 11 ความถี่ 550 เฮิรตซ์ ความเร็วจริงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้วจะทำกับ 4125 รอบต่ออนาที และค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้าจะสามารถปรับได้โดยการปรับไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้ากับขดลวดกระตุ้นที่อยู่ใต้เคเตอร์.

โดยมีสมการศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งขั้วว่า ซึ่งศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะประกอบด้วยศักดาไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานรวมกับศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ของฮาร์โมนิกซ์ จากศักดาไฟฟ้าของฮาร์โมนิกซ์ที่ป้อนเข้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามการเรียงลำดับเฟสของฮาร์โมนิกซ์ ซึ่งใช้การอ้างอิงจากการเรียงลำดับเฟสของศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน โดยมีสมการอันดับ k^{th} ของฮาร์โมนิกซ์ที่ศักดาไฟฟ้าลำดับที่บวก (positive sequence) ดังนี้

$$\begin{aligned} v_k(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\ v_s(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 120^\circ + \phi_k) \\ v_r(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t - 240^\circ + \phi_k) \end{aligned} \quad (1)$$

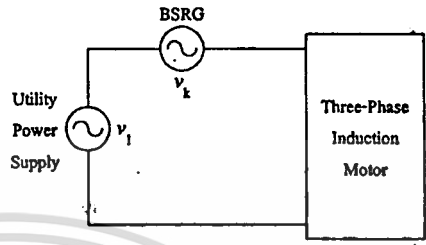
และมีสมการอันดับ k^{th} ของฮาร์โมนิกซ์ที่ศักดาไฟฟ้าที่แบบลำดับที่ลบ (negative sequence) ดังนี้

$$\begin{aligned} v_k(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + \phi_k) \\ v_s(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 120^\circ + \phi_k) \\ v_r(t) &= V_{m,1} \sin(\omega_0 t - 240^\circ) + V_{m,k} \sin(k\omega_0 t + 240^\circ + \phi_k) \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ $V_{m,1}$ เป็นค่าศักดาไฟฟ้าความถี่มูลฐาน
 $V_{m,k}$ เป็นค่าศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกซ์
 k เป็นอันดับของฮาร์โมนิกซ์
 ω_0 เป็นค่าความเร็วเชิงมุมความถี่มูลฐาน
 ϕ_k เป็นค่ามุมเฟสของศักดาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกซ์
 ค่าของศักดาไฟฟ้าที่เขียนไป ซึ่งเป็นผลเนื่องจากฮาร์โมนิกซ์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้างศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ตามแสดงในค่าตัวประกอบความเพี้ยนของศักดาไฟฟ้า (VDF) ดังนี้

$$VDF(\%) = \frac{V_{m,k}}{V_{m,1}} \times 100\% \quad (3)$$

โดยมีลักษณะการต่อ BSRG อนุกรมเข้ากับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้อนศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิการต่อ BSRG เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อกำเนิดศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งขั้ว

3. วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งขั้ว

ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วเชิงโครนัส (N_s) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งขั้ว (P) และความถี่ของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (f) ดังสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (4)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง (N_r) ซึ่งมีทิศทางการหมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่มูลฐานในช่องอากาศ ความเร็วของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถหาค่า per-unit slip ความถี่มูลฐาน (s_1) ดังนี้

$$s_1 = \frac{N_{s,1} - N_r}{N_{s,1}} \quad (5)$$

และสามารถหาค่า per-unit slip ของตัวหมุนเมื่อเทียบกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกซ์ (s_k)

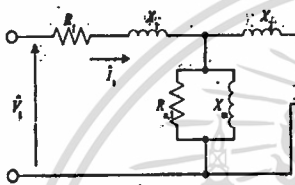
$$s_k = \frac{N_{s,k} - N_r}{N_{s,k}} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_{c1} เป็นค่าความเร็วเชิงโรตอร์ของความถี่มูลฐาน

N_{sk} เป็นค่าความเร็วเชิงโรตอร์ของอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว นำสามารถที่จะกำหนดได้จากวงจรสมมูลมาตรฐานที่แสดงในรูปที่ 2 ในส่วนกรณีของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปไซน์วงจรสมมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ X_1, X_2 และ X_m จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของฮาร์โมนิกส์ จากเหตุผลดังกล่าวการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จึงต้องประยุกต์หลักการ superposition มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยแบ่งวงจรสมมูลออกเป็น 2 ส่วนตามความถี่ของสัคคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว ในส่วนของแหล่งจ่ายสัคคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีรูปไร้วัดความถี่มูลฐานแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวในกรณีความถี่สัคคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นความถี่มูลฐาน

เมื่อ V_s เป็นค่าสัคคาไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มูลฐาน

i_s เป็นค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าความถี่มูลฐาน

R_1 เป็นค่าความต้านทานที่สเตเตอร์

R_2 เป็นค่าความต้านทานโรตอร์ที่ transfer to stator

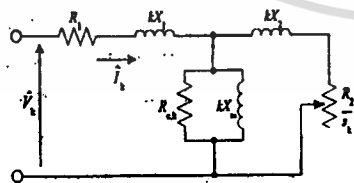
X_1 เป็นค่า Stator leakage reactance

X_2 เป็นค่า Rotor leakage reactance transfer to stator

X_m เป็นค่า Magnetizing reactance

R_{c1} เป็นค่า Core loss resistance ที่ความถี่มูลฐาน

และวงจรสมมูลของสัคคาไฟฟ้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวในกรณีความถี่สัคคาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

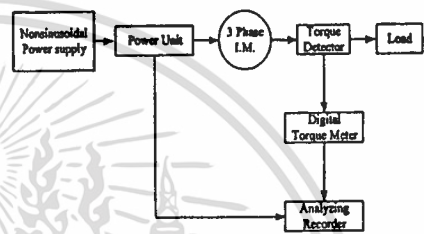
เมื่อ V_k เป็นค่าสัคคาไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

i_k เป็นค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าอันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

R_{ck} เป็นค่า Core loss resistance ที่อันดับ k^{th} ฮาร์โมนิกส์

4. วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบในบทความนี้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการทางทดแทนการทดสอบและแสดงดังรูปที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวที่ใช้ทดสอบมีขนาด 5 แรงม้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก ความเร็วที่ติด 1420 รอบต่อวินาที คือแบบสตา



รูปที่ 4 แผนภูมิการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว 3 เฟส

- Power unit ทำหน้าที่จ่ายสถานะสัคคาและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว
- Torque detector and digital torque meter ทำหน้าที่วัดและแสดงค่าแรงบิดและความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว
- Load ทำหน้าที่เป็นภาระทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว
- Analyzing recorder ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลสัคคาและกระแสไฟฟ้า

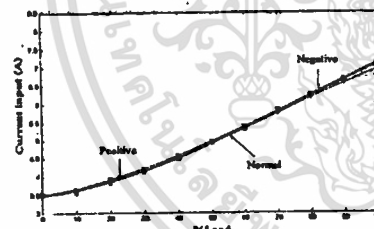
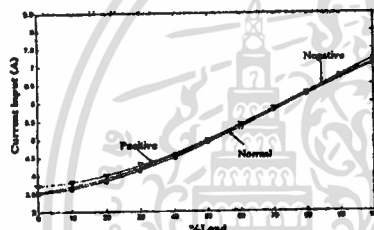
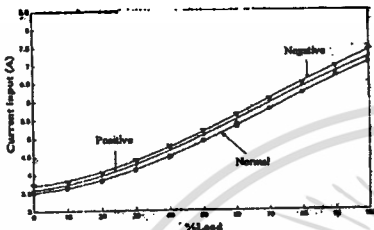
5. ผลการทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบหลักถึงไฟฟ้าป้อนเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวเมื่อป้อนสถานะสัคคาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ซึ่งในการทดสอบได้เพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวจนกระทั่งถึงที่ติดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวที่ใช้ทดสอบและแต่ละครั้งของการเพิ่มภาระทางกล จะบันทึกค่าสัคคาและกระแสไฟฟ้าทางด้านป้อนเข้า แรงบิดที่เพลลา ความเร็วรอบ ซึ่งสัคคาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นการแสดงรูปสัญญาณสัคคาไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสที่ป้อนเข้าที่ทดสอบโดยมีค่าสัคคาไฟฟ้าความถี่มูลฐานเท่ากันทุกเฟสขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งรูปคลื่นทั้ง 3 เฟสจะมีลักษณะแตกต่างกันอันเป็นผลจากการป้อนฮาร์โมนิกส์โคโรที่รูป 5ก) ป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3, VDF=10% ลำดับเฟสลบ 5ข) ป้อนฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3, VDF=15% ลำดับเฟสบวก 5ค) ป้อนฮาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพศลบ เพศของรูปสัญญาณที่แสดงเป็นของฟต T โครรูปที่แสดงเป็นรูปสัญญาณขณะที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวนำภาระทางกลที่ปกติ.

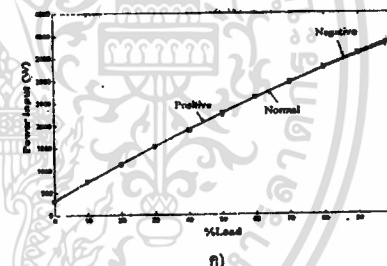
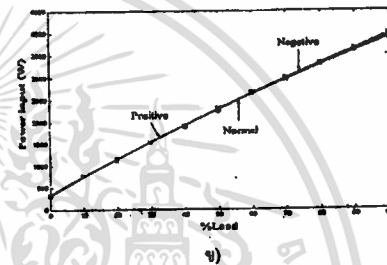
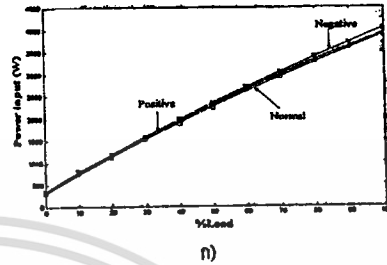
ส่วนรูปที่ 7 เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวนำภาระที่มีภาระเร่งค่าลบเพศของฮาร์มอนิกส์ที่เป็นบวกและลบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการป้อนศักดาไฟฟ้าโดยแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าเป็นรูปไซน์ เมื่ออันดับของฮาร์มอนิกส์ต่างกันและค่าตัวประกอบความถี่ของศักดาไฟฟ้าเท่ากันโดยที่รูป 7ก)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าเมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าในกรณีแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ ก) 3rd, 10% ข) 7th, 10% ค) 11th, 10%

ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3, VDF=10% 7ข) ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7, VDF=10% 7ค) ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11, VDF=10% รูปที่ 8 เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวนำภาระที่มีภาระเร่งค่าลบเพศของฮาร์มอนิกส์ที่เป็นบวกและลบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการป้อนศักดาไฟฟ้าโดยแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า

เป็นรูปไซน์ เมื่ออันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต่างกันและค่าตัวประกอบความถี่ของศักดาไฟฟ้าเท่ากันโดยที่รูป 8ก) ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3, VDF=10% 8ข) ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7, VDF=10% 8ค) ป้อนฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11, VDF=10%.



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าในกรณีแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ ก) 3rd, 10% ข) 7th, 10% ค) 11th, 10%

6. สรุป

จากเทคนิคการสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์โดยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีแบบรีดักแทนซ์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ศักดาไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายชนิดนี้สามารถที่นำมาใช้ในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวนำได้ จากรูปผลการทดสอบรูปที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่า BSRG สามารถที่จะสร้างแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าไม่เป็นรูปไซน์ได้ตามทฤษฎี ทำให้สามารถทราบว่าจะขนาดและอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวอย่างไร จากรูปผลการ

ประวัติผู้เขียน

นาย เฉลิมชัย คงมันประกายกิจ เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2519 ที่จังหวัดราชบุรีสำเร็จการศึกษาปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542

เริ่มเข้ารับราชการในปี พ.ศ. 2541 ตำแหน่งนายช่างเทคนิค 2 ที่ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปัจจุบันรับราชการตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย 3 ที่ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

