

การทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
PERFORMANCE TEST OF INDUCTION MACHINE FED BY VARIOUS
VOLTAGE CONDITIONS



โดย

นาย มงคล อารักษ์โพชนงค์
นาย ยศพงษ์ ศรีพงษ์สุวรรณ
นาย รังสรรค์ ศรีแก้ว
นาย วิชัย กริชจรรย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.พิชิต ฉ่ำยอง
รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
อ. วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61371
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
PERFORMANCE TEST OF INDUCTION MACHINE FED BY VARIOUS VOLTAGE
CONDITIONS

ผู้จัดทำ

1. นาย มงคล อารักษ์โพชนงค์ รหัสประจำตัว 44010368
2. นาย ยศพงษ์ ศรีพงษ์สุวรรณ รหัสประจำตัว 44010386
3. นาย รังสรรค์ ศรีแก้ว รหัสประจำตัว 44010393
4. นาย วิชัย กริชจนรัช รหัสประจำตัว 44010442





(รศ.พิชิต ลำยอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(รศ.ดร.ชัยวุฒิ นัตถกุลทัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อ. วีระศักดิ์ วงศ์วิวัตติ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

นาย มงคล	อารักษ์โพชมงคล	44010368
นาย ยศพงษ์	ศรีพงษ์สุวรรณ	44010386
นาย รังสรรค์	ศรีแก้ว	44010393
นาย วิชัย	กริชจนรัช	44010442
รศ.พิชิต	ถ้ายอง	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
อ. วีระศักดิ์	วงศ์วิวัติ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547		

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายข้อเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น เช่น ใช้งานและบำรุงรักษาง่าย ทนทาน รวมถึงราคาที่เหมาะสม นอกจากนี้การประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังสามารถทำได้หลากหลาย

โครงการนี้มุ่งศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟลักษณะต่างๆ ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่ที่พบมักจะถูกจ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดมีการศึกษาว่าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีฮาร์มอนิกส์ปะปนอยู่จะส่งผลเช่นไรกับประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟปกติ โดยโครงการนี้จะแบ่งเงื่อนไขในการเปรียบเทียบ ด้วยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental) เป็นตัวอ้างอิงระหว่างแหล่งจ่ายไฟปกติและแหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์ โดยทำการทดสอบที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz, 40 Hz และ 50 Hz และที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz

เพื่อให้เกิดการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นโครงการนี้จึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐานของ ไออีอีอี เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ตลอดจนหาข้อสรุปถึงผลการทดลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Test of Induction Machine Fed by Various Voltage Conditions

Mongkol	Arukpojchong
Yossapong	Sripongsuwan
Rungsan	Srikaew
Vichai	Kritchanaarat
Associate. Prof.Pichit	Lumyong
Associate. Prof.Dr.Chaiwut	Chat-u-thai
Werasak	Wongwiwat Advisor

ABSTRACT

Nowadays the induction motor is broadly used in any industry because of having the more advantages of operation when comparing with another types such as optimum price , easy using and maintenance.

This project emphasizes on studying out the effect of various voltage conditions of any source that fed into an induction motor. Mostly, the application of induction motor is fed with inverter source. Consequently, studying of passing energy is fed by an inverter, having harmonics that how influence the efficiency of induction motor when comparing a normal source. So the experiment is divided to the conditions that depend on a fundamental voltage values , examined at fundamental frequency of 30 Hz , 40 Hz and 50 Hz while the switching frequency of the inverter were adjusted to 0.5 kHz, 1.5 kHz and 3 kHz.

So as to squeezed the high-efficiency-test, this project examined follow the IEEE standard for keep the parameters and the data in order to analyze the efficiency of induction motor, including a percentage of power loss and conclude at all.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จออกมาได้ด้วยความร่วมมือและความร่วมแรงจากบุคคลหลายๆท่านด้วยกัน บุคคลแรกที่มีส่วนสำคัญซึ่งให้คำแนะนำที่ดี หลักการคิด ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆมาโดยตลอด ท่านผู้นั้นก็คือ รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รวมไปถึงพี่ๆปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งทางทีมงานขอกล่าวขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และเหนือสิ่งอื่นใด ผู้ที่ให้กำเนิด และ เป็นกำลังใจตลอดจนหยิบยื่นโอกาสที่ดีเสมอมาจนมีทุกวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ข้าพเจ้าตระหนักถึงพระคุณอันหาที่เปรียบสุดมมิได้ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	3
2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	4
2.3 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Power loss)	5
2.4 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.5 ความหมายของฮาร์มอนิกส์	9
2.5.1 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion : THD)	9
2.5.2 ตัวประกอบกำลัง (Power factor)	10
2.5.3 อันดับฮาร์มอนิกส์ที่เป็นไปได้ (Possible Harmonics)	10
2.6 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
2.6.1 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อแรงบิด	11
2.6.2 ผลของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อค่าความสูญเสียส่วนต่าง ๆ	13
2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการหาค่าพารามิเตอร์แบบมาตรฐาน	15
บทที่ 3 อินเวอร์เตอร์และทฤษฎี PWM	19
3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส Current - Source Inverter	19
3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน Voltage - Source Inverter	20
3.2.1 6-Step อินเวอร์เตอร์	20
3.2.2 PWM อินเวอร์เตอร์	21
3.3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การรักษาอัตราส่วนระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่มูลฐานคงที่ (Constant Voltage per Frequency)	24
3.5 การควบคุมการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable voltage, Variable Frequency) หรือ VVVF	25
บทที่ 4 การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ	26
4.1 สร้างเงื่อนไขและการออกแบบการทดสอบ	26
4.2 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 Method B	26
4.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ	27
4.4 ผลการทดลอง	28
4.4.1 ผลการทดลอง No-load	28
4.4.2 ผลการทดลอง On-load	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์	39
5.1 วิจารณ์การทดลอง	40
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ก-1 Name plate ของมอเตอร์	ก-1
ตารางที่ ก-2 ค่าที่ได้จากการทดสอบไร้ภาระ(no-load test)และนำไปใช้คำนวณ	ก-4
ตารางที่ ก-3 ค่าที่ได้จากการทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-rotortest) และนำไปใช้คำนวณ	ก-5
ตารางที่ ก-4 การทดสอบหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า	ก-6
ตารางที่ ก-5 ค่า X_1 และ X_m จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996	ก-9
ตารางที่ ข-1 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 50 Hz	ข-1
ตารางที่ ข-2 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 40 Hz	ข-2
ตารางที่ ข-3 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 30 Hz	ข-3
ตารางที่ ข-4 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ความถี่ Fundamental 50 Hz	ข-4
ตารางที่ ข-5 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ความถี่ Fundamental 40 Hz	ข-4
ตารางที่ ข-6 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ความถี่ Fundamental 30 Hz	ข-5
ตารางที่ ข-7 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 50 Hz	ข-6
ตารางที่ ข-8 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 40 Hz	ข-7
ตารางที่ ข-9 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชานซ์ ความถี่ Fundamental 30 Hz	ข-8
ตารางที่ ข-10 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz	ข-9
ตารางที่ ข-11 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz	ข-11
ตารางที่ ข-12 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz	ข-13
ตารางที่ ข-13 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz	ข-15
ตารางที่ ข-14 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz	ข-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz	ข-17
ตารางที่ ข-16 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz	ข-18
ตารางที่ ข-17 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz	ข-19
ตารางที่ ข-18 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นPWM อินเวอร์เตอร์ ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz	ข-20
ตารางที่ ข-19 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็นชานนี้ที่ ความถี่Fundamental 50 Hz	ข-21
ตารางที่ ข-20 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz	ข-22
ตารางที่ ข-21 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz	ข-23
ตารางที่ ข-22 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz	ข-24
ตารางที่ ข-23 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นชานนี้ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz	ข-25
ตารางที่ ข-24 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz	ข-26
ตารางที่ ข-25 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz	ข-27
ตารางที่ ข-26 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz	ข-28

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	3
รูปที่ 2-2 แผนผังหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส	4
รูปที่ 2-3 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	5
รูปที่ 2-4 การกระเพื่อมของแรงบิด	11
รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน	16
รูปที่ 3-1 วงจรกำลังของ Current Source Inverter	20
รูปที่ 3-2 วงจรกำลังของ 6-Step อินเวอร์เตอร์	21
รูปที่ 3-3 รูปคลื่นทางด้านเอาต์พุตของ 6-Step อินเวอร์เตอร์	21
รูปที่ 3-4 รูปสัญญาณ PWM	22
รูปที่ 3-5 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	23
รูปที่ 3-6 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วยกเว้นเมื่ออัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่	25
รูปที่ 4-1 รูปการต่อวงจรทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายไฟปกติ	28
รูปที่ 4-2 รูปการต่อวงจรทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายไฟด้วยอินเวอร์เตอร์	28
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าของแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์ที่ความถี่ 30,40 และ 50 Hz	30
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับความถี่สวิตซ์ซิ่งของแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นชานน์ที่ความถี่ 30,40 และ 50 Hz	30
รูปที่ 4-5 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	30
รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	31
รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	31
รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	32
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	33
รูปที่ 4-11 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	33
รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	34
รูปที่ 4-13 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	34
รูปที่ 4-14 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	35
รูปที่ 4-15 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	35
รูปที่ 4-16 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	36
รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ความถี่ 50 Hz ระหว่าง (ก)และ(ข)แหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	37
รูปที่ 4-18 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	37
รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์	38

บทที่ 1

บทนำ

Introduction

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(induction motor) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการผลิต เนื่องจากมีราคาถูก มีความน่าเชื่อถือสูง บำรุงรักษาง่าย ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ทำงานได้ที่มีอุณหภูมิสูงและสามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงอันตรายได้ ซึ่งเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(DC motor) ที่จะต้องมีการบำรุงรักษาอยู่ตลอดเวลา และเสี่ยงต่อความไม่ปลอดภัยอันเนื่องมาจากประกายไฟที่เกิดจากแปรงถ่าน มอเตอร์เหนี่ยวนำมีทั้ง 1 เฟส ที่ใช้ตามบ้านเรือน และ 3 เฟสที่นิยมใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรม มีทั้งขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ มอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยมีการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบโวลต์เดจกที่ ซึ่งในบางครั้งเมื่อมีการขับโหลดมากขึ้น อาจทำให้เกิดแรงดันตก (Voltage drop) แรงดันเกิน(Over voltage) หรือเสิร์จโวลต์เดจ(Surge voltage) ในกรณี 3 เฟส อาจเกิดสภาวะ 3 Phase failures หรือ Unbalance Voltage

นอกจากนี้การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังถูกประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีหลายวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น การควบคุมแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า, การเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ตลอดจนหลักการเปลี่ยนความถี่ที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

โครงการวิศวกรรมนี้มุ่งศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟลักษณะต่างๆที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่ที่พบมักจะถูกจ่ายด้วย อินเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดมีการศึกษาว่าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีฮาร์มอนิกสัปะปนอยู่จะส่งผลเช่นไรกับประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟปกติ โดยโครงการนี้จะแบ่งเงื่อนไขในการเปรียบเทียบ ด้วยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental) เป็นตัวอ้างอิงระหว่างแหล่งจ่ายไฟปกติและ แหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์ โดยทำการทดสอบที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz, 40 Hz และ 50 Hz และที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz ในกรณีที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งเป็นความถี่มูลฐานหลัก การทดสอบจะเน้นการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกสัปะปนของแหล่งจ่ายตลอดจนหาข้อสรุปถึงผลที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า ที่สภาวะแหล่งจ่ายลักษณะต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบหาข้อสรุปผลที่เกิดขึ้น สังกัดว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างไร มีความสอดคล้องกับทฤษฎีมากน้อยเพียงใด

ศึกษาการทดสอบหาประสิทธิภาพที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ ทั้งในกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเป็นชายน์ และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบไม่เป็นชายน์(อินเวอร์เตอร์) จากนั้นศึกษาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมอเตอร์ สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ความถี่ต่างๆ ที่ได้ กำหนดเงื่อนไขเอาไว้และสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะโหลดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทดสอบสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเป็นชายน้และไม่เป็นชายน้ที่ความถี่ 30,40,50 Hz ที่ความถี่สวิดซ์ซิ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz และ 3 kHz
- 1.3.2 ศึกษาำลังไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเป็นชายน้และไม่เป็นชายน้
- 1.3.3 ทดสอบตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้เพื่อเป็นข้ออ้างอิงในการเปรียบเทียบ
- 1.3.4 นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียและประสิทธิภาพตลอดจนผลกระทบเนื่องจากฮาร์โมนิกส์โดยเปรียบเทียบในแต่ละเงื่อนไขที่ตั้งเอาไว้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยในโครงการวิศวกรรมนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งมีเรื่องหลักๆอยู่ 3 เรื่อง คือ ทฤษฎีพื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หลักการของอินเวอร์เตอร์ ฮาร์โมนิกส์ โดยมีรายละเอียดตามบทที่ 2,3 จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้ศึกษามาออกแบบการทดลองโดยการทดลองนี้จะออกแบบโดยแบ่งเงื่อนไขในการเปรียบเทียบ ด้วยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental) เป็นตัวอ้างอิงระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายไฟปกติ โดยทำการทดสอบที่ความถี่มูลฐาน 30,40 และ 50 Hz โดยที่แหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์จะปรับค่าสวิดซ์ซิ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz

จากนั้นเมื่อได้ข้อสรุปตามข้างต้นแล้วก็ทำการทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ซึ่งใช้วงจรการทดสอบที่ออกแบบตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ตลอดจนหาข้อสรุปการทำงาน ผลที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้,แนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้เพิ่มเติม และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- 1.5.1 ได้ศึกษาถึงความสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและค่าความสูญเสียรวมของทั้งระบบที่แหล่งจ่ายที่เป็นชายน้ และแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นชายน้ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์
- 1.5.2 ได้ศึกษาถึงค่าความสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดแต่ละสภาวะที่ความถี่ต่างๆ
- 1.5.3 สามารถเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์ที่จะนำมาใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่พิกัดโหลดต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

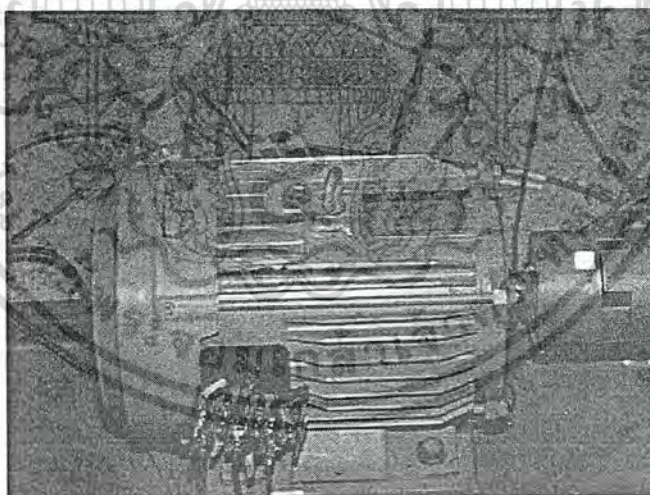
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้มากในอุตสาหกรรม คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel - Cage Induction Motor) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ด้วยการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเอซี

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสามเฟส แบบกรงกระรอกเพราะมอเตอร์ชนิดนี้ราคาไม่แพงมากนักและต้องการการบำรุงรักษาต่ำ และมีความเร็วรอบเกือบคงที่ คือความเร็วรอบจะลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งจนกระทั่งขั้วโพลเด็มนั้นที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์เต็มข้อเสีย คือ

- ควบคุมความเร็วยาก
- ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ค่าประกอบกำลังต่ำและล่าช้า
- กระแสไฟฟ้าที่เริ่มต้นหมุนมักเป็น 5 หรือ 7 เท่าของกระแสขั้วโพลเด็มนั้น



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

2.1.1 สเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ วางซ้อนกันอยู่ภายในโครง (Frame) และมี

ร่องสเตเตอร์ (Slot) เพื่อใช้สำหรับพันขดลวด ภายในสเตเตอร์จะพันขดลวดไว้เป็นสามเฟสเพื่อใช้กับระบบ

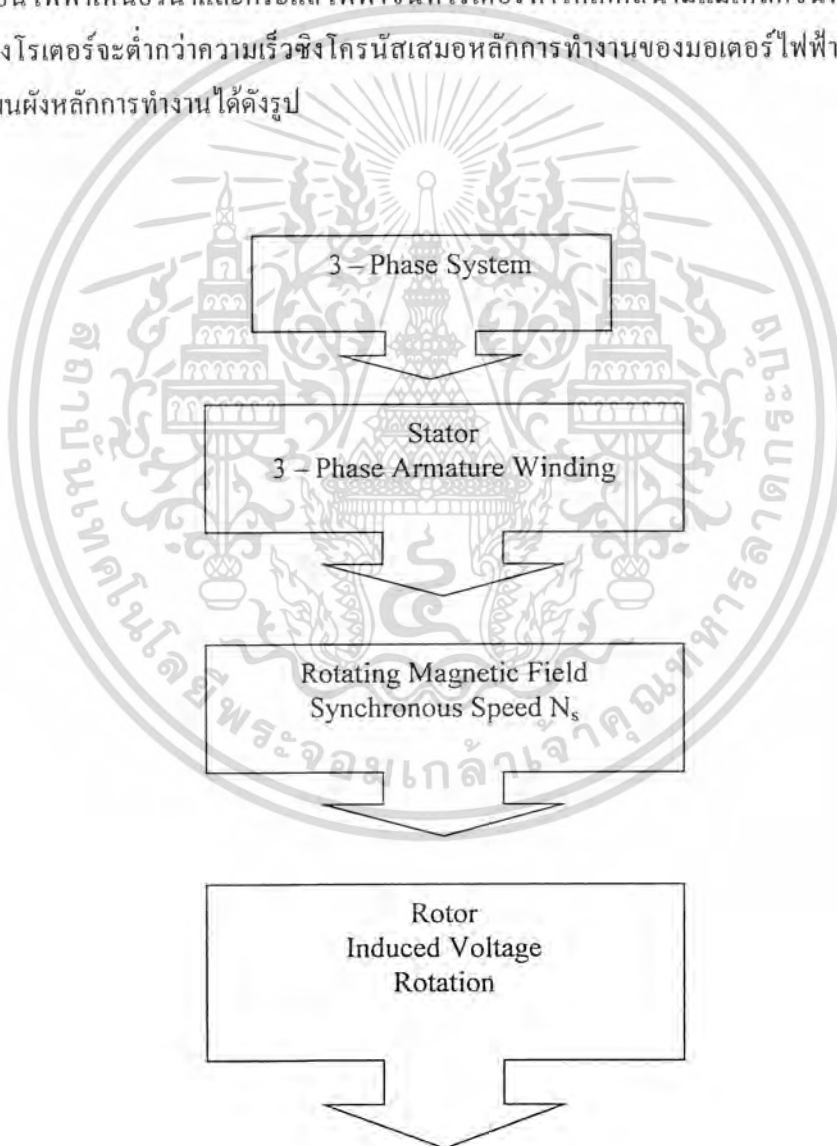
เอกสารที่เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และในเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏในเอกสารนี้โดยไม่รับผิดชอบต่อค่า
ไฟฟ้าสามเฟส จำนวนขั้วแม่เหล็กที่พันจะมีค่าคงที่ โดยขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของมอเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โรเตอร์ (Rotor) หรือส่วนที่เคลื่อนที่

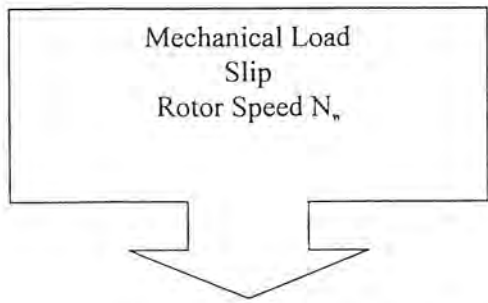
โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) ประกอบด้วยแท่งอลูมิเนียมฝังอยู่ในท่อนโรเตอร์ซึ่งเป็นเหล็กอ่อนแผ่นบาง ๆ ประกอบเป็นท่อนโรเตอร์ปลายทั้งสองด้านของแท่งอลูมิเนียมจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนคังนั้นจึงมีลักษณะคล้ายกรงกระรอกแท่งอลูมิเนียมที่ฝังอยู่กับโรเตอร์จะวางเฉียงกับแนวแกนเพลลาเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กข้ามช่องว่างอากาศ (Air Gap) จากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์สม่ำเสมอ

2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อป้อนไฟฟ้าสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์เคลื่อนที่หมุนไปรอบช่องว่างอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส (N_s) สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์หมุน ซึ่งความเร็วของโรเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอหลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสสามารถแสดงเป็นแผนผังหลักการทำงานได้ดังรูป



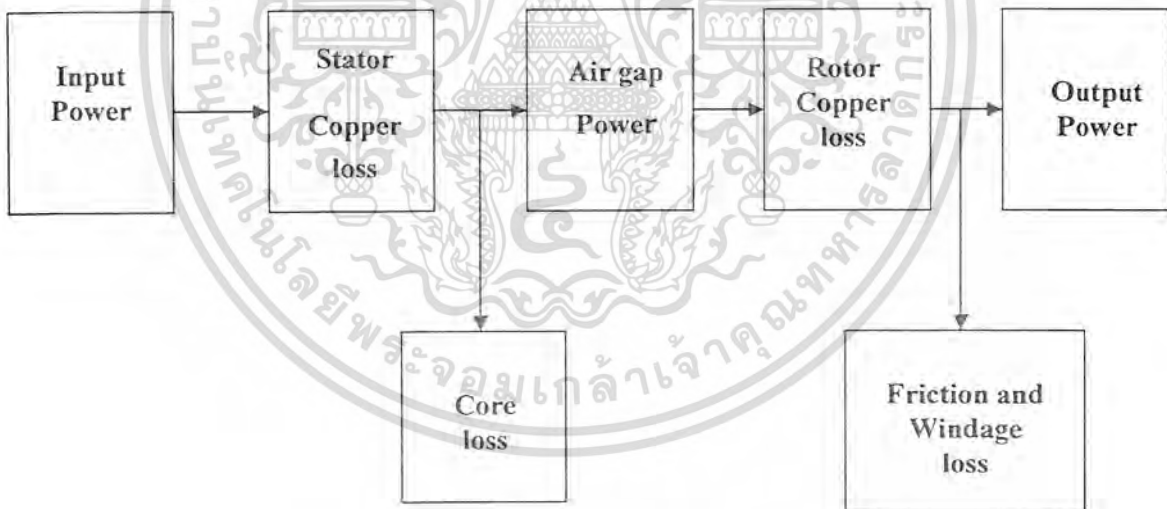
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนผังหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส

2.3 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Power loss)

การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังทางกลของมอเตอร์นั้นจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าโดยตรงให้กับมอเตอร์แต่เป็นการถ่ายทอดผ่านช่องว่างอากาศด้วยการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ที่โรเตอร์ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่นกระจายอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปความร้อนในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังทางกลที่ขั้วทางกล ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบสามเฟสและกำลังกลที่มอเตอร์ขั้วภาระโหลด สามารถแสดงด้วยแผนผัง ดังรูป



รูปที่ 2.3 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากแผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ในรูปแรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งส่วนนี้จะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในรูปความร้อน กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศให้กับโรเตอร์ เรียกว่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (Air gap Power) เมื่อถ่ายเทกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic Power) ซึ่งเป็นกำลังทางกล ในส่วนนี้จะสูญเสียกำลังไปเนื่องจากแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and windage losses) จากกำลังไฟฟ้าที่เหลือจะเป็นกำลังทางกลที่จะไปขับภาระทางกล

การสูญเสียในแกนเหล็กเกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์แต่ละขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแรงบิดของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนสเตเตอร์เท่านั้น

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กลดลงจึงได้รวมการสูญเสียเหล่านี้เข้าด้วยกันเรียกว่า Rotational and core losses และพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าให้กับมอเตอร์ (Input power)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.1)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ (Stator-copper loss)

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.2)$$

กำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (Power across air-gap)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.3)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในโรเตอร์ (Rotor-copper loss)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2.4)$$

กำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g \quad (2.5)$$

แรงบิดที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าที่ไปขับทางกล (Output power)

$$P_{out} = P_e - P_r = T_o \omega_r \quad (2.7)$$

แรงบิดทางกล (Output torque)

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{p} \quad (2.9)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} = (1-s)\omega_s \quad (2.10)$$

โดยที่

ω_s คือ ความเร็วเชิงโคโรนาเชิงมุม

ω_r คือ ความเร็วโรเตอร์เชิงมุม

กำลังไฟฟ้าส่วนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ (2.2) กำลังไฟฟ้าส่วนที่สูญเสียจากความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ในสมการที่ (2.4) และกำลังสูญเสียในส่วนของ Rotational and core losses เมื่อนำกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งสามส่วนมารวมกันจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์

$$Power\ loss = Power\ input - Power\ output \quad (2.11)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.12)$$

หรือ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนอยู่นิ่ง (Stator) และส่วนหมุน (Rotor) คล้ายมอเตอร์ทั่วๆ ไป โดยส่วนที่อยู่นิ่งมีขดลวดพันไว้ และจัดให้เป็นแบบสองเฟสหรือสามเฟสตามแต่จะออกแบบไว้ซึ่งไม่ต้องการวงแหวน สลิป (Slip-Ring) หรือคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) จึงสามารถสร้างได้ง่าย มีโครงสร้างแข็งแรงทนทาน บึกบึน ต่อการใช้งานและมีราคาถูก ส่วนหมุนอาจจะเป็นขดลวดพัน หรือแบบกรงกระรอก ถ้าหากมอเตอร์เป็นแบบสองเฟสส่วนหมุนมักเป็นแบบกรงกระรอก ส่วนหมุนจะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเอซี ผ่านส่วนอยู่นิ่ง โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ ซึ่งขดลวดของส่วนที่อยู่นิ่งทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ขึ้นในช่องอากาศ (Air-Gap) ระหว่างส่วนอยู่นิ่งกับส่วนหมุนและหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous) ดังสมการ (2.14)

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.14)$$

เมื่อ N_s เป็นอัตราเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก

f เป็นค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเอซี

P เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole) ที่เกิดขึ้นจากขดลวดบนส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator)

โดยการพิจารณาสมการ (2.14) N_s เราสามารถเปลี่ยนอัตราเร็วของมอเตอร์เอซีได้ โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเอซี หรือเปลี่ยนจำนวน Pole

ในการควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เอซีด้วยการเปลี่ยนค่าความถี่ จะเป็นผลทำให้สนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์ (Flux) แม่เหล็กเปลี่ยนค่าไปตามสมการ (2.15)

$$V = k\phi f \quad (2.15)$$

เมื่อ V เป็นค่าแรงดัน rms ที่ป้อนเข้าที่ขั้วของมอเตอร์

k เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับตัวประกอบรูปแบบ (Form Factor) ตัวประกอบขดลวด (Winding factor) และ จำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้ในมอเตอร์

ϕ เป็นค่าฟลักซ์สูงสุดต่อหนึ่ง Pole ของมอเตอร์

ตามปกติมอเตอร์จะถูกออกแบบให้ฟลักซ์มีค่าอยู่ตรงส่วนเข้าโค้งของเส้นโค้ง ลักษณะสมบัติของการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization Curve) ซึ่งถ้าเราลดความถี่ลง ฟลักซ์จะมีค่าสูงขึ้นและเข้าไปในบริเวณอิ่มตัว ทำให้มีกำลังสูญเสียในเหล็ก (Iron Loss) มีค่ามากขึ้นทำให้สเตเตอร์กินกระแสเพิ่มขึ้น ทำให้มีกำลังสูญเสียในทองแดง (Copper Loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผล ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ดังนั้นเราต้องลดค่าแรงดันให้เป็นสัดส่วนที่ความถี่ลดลง เพื่อให้ ฟลักซ์ยังคงมีค่าอยู่ตรงส่วนเข้าโค้งของเส้นโค้งของการทำให้เป็นแม่เหล็ก ในทางกลับกันกับข้อความที่กล่าวข้างบน ถ้าเราเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นจะทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง เป็นผลทำให้มอเตอร์มีแรงบิดลดลงด้วย ดังนั้นเราต้องเพิ่มแรงดันให้มีค่าสูงขึ้นด้วย เพื่อให้ฟลักซ์และแรงหมุนมีค่าคงเดิม ซึ่งข้อความนี้เท่ากับหมายความว่า เพื่อรักษาให้ฟลักซ์มีค่าคงที่เราต้องปรับค่าแรงดันให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ หรือรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ วิธีการแบบนี้เรียกว่า “วิธีการแรงดันต่อ Hz คงที่” หรือ “วิธีโวลต์ต่อเฮิร์ตซ์คงที่”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ความต้านทานของขดลวดของมอเตอร์มีค่าน้อยมากสามารถละทิ้งได้ แรงดันตกคร่อมความต้านทานของขดลวดจะมีค่าเท่ากับศูนย์โดยประมาณ แรงดันเอซีที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์โดยการเหนี่ยวนำ แต่ในกรณีที่ความต้านทานของขดลวดมีค่าใหญ่ก็จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมขดลวดมีค่ามากกว่าศูนย์ และถ้าความถี่มีค่าลดลงด้วย แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุไปทำให้ฟลักซ์ในช่องอากาศมีค่าลดลง และเป็นผลให้มอเตอร์มีแรงหมุนลดลงด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติ สำหรับความถี่ที่ต่ำกว่า 20 Hz โดยประมาณแล้ว เราต้องรักษาแรงหมุนที่อัตราเร็วต่ำไว้ให้ได้ด้วยการเพิ่มค่า โวลต์ต่อเฮิร์ตซ์ ให้มีค่าสูงกว่าปกติ

2.5 ความหมายของฮาร์มอนิกส์

ฮาร์มอนิกส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 Hz ฮาร์มอนิกส์ คือ 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz เป็นฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ส่วนฮาร์มอนิกส์อันดับอื่น ก็หาได้จากการนำเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน ในรูปของค่า rms หรือเรียกว่า ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion : THD)

2.5.1 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion : THD)

ตามมาตรฐาน IEEE ได้ให้ความหมายไว้คือ “ค่าที่บอกถึงปริมาณองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน” Harmonics Voltage และ Harmonics Current

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}{V_1^2}} \times 100\%$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}{I_1^2}} \times 100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}{I_1}} \times 100\% \quad (2.17)$$

2.5.2 ตัวประกอบกำลัง (Power factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA หรือ kVA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ เราอาจกล่าวถึงตัวประกอบกำลังในรูปของค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

$$PF = \frac{\text{Activepower}}{\text{Apparentpower}} \quad (2.18)$$

$PF =$ อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงของรูปคลื่นความถี่หลักต่อกำลังปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลัก หรืออาจกล่าวได้ว่า DPF คือค่าโคไซน์ของมุมต่างเฟสของแรงดันความถี่หลักกับกระแสความถี่หลัก

$$DPF = \frac{\text{Activepower (Fund)}}{\text{Apparentpower (Fund)}}$$

$$DPF = \cos \theta_1$$

$$\theta_1 = \text{มุมระหว่าง } V_1 \text{ กับ } I_1$$

(2.19)

2.5.3 ฮาร์โมนิกที่เป็นไปได้ (Possible Harmonics)

ฮาร์โมนิกที่มีผลที่มีต่อองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะเป็นฮาร์โมนิกเลขคี่ ฮาร์โมนิกที่เป็นไปได้ หรือฮาร์โมนิกที่มีผลมากที่สุดจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$h = 2nm \pm 1 \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- h = อันดับของฮาร์โมนิกที่เป็นไปได้
 - n = จำนวนเต็มบวก
 - m = จำนวนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ในกรณี 3 เฟส ฮาร์มอนิกที่เป็นไปได้เมื่อ $n = 1$ จะเท่ากับ

$$(2 \times 1 \times 3) - 1 = \text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5}$$

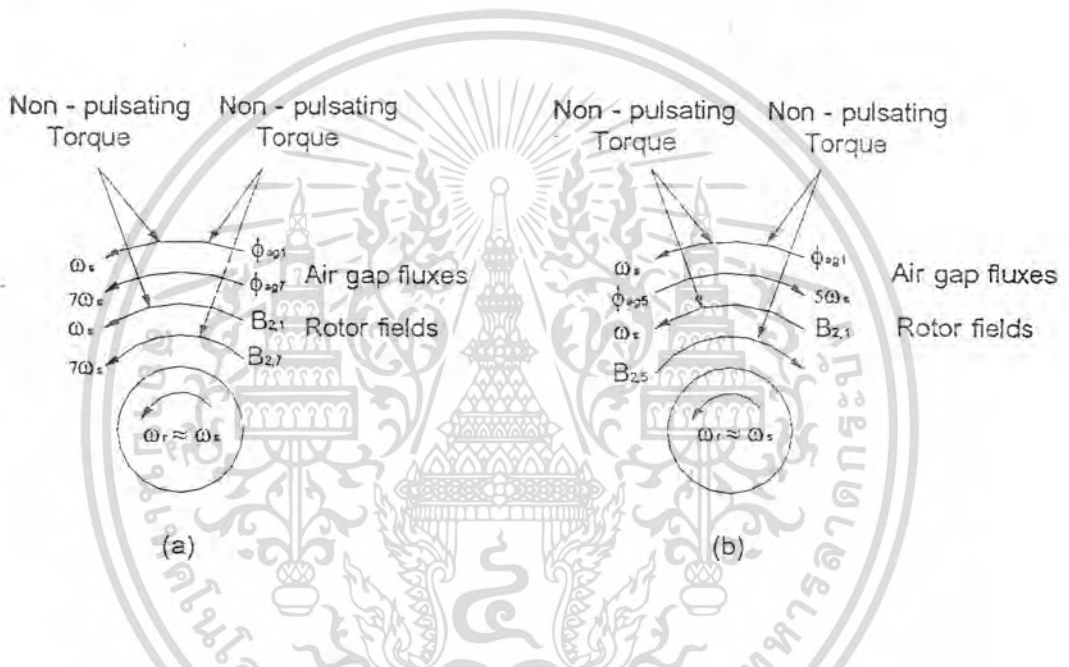
และ $(2 \times 1 \times 3) + 1 = \text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7}$

2.6 ผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.6.1 ผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อแรงบิด

- การกระเพื่อมของแรงบิด (Pulsation Torque)

ฮาร์มอนิกจะส่งผลทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด ถ้าแรงบิดกระเพื่อมที่ความถี่ต่ำ ๆ จะทำให้ความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเป็นผลทำให้เพลลาของมอเตอร์ต้องทำงานหนักมากขึ้น



รูปที่ 2-4 การกระเพื่อมของแรงบิด

จากรูปที่ 2.4(a) การกระตุ้นของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ทำให้เกิดฟลักซ์ในช่องอากาศที่หมุนด้วยความเร็ว $7\omega_s$ ในทิศทางเดียวกับฟลักซ์ในช่องอากาศที่เกิดจากความถี่มูลฐานและในทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์

จากรูปที่ 2.4(b) การกระตุ้นของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ทำให้เกิดฟลักซ์ในช่องอากาศที่หมุนด้วยความเร็ว $5\omega_s$ ในทิศทางตรงข้ามฟลักซ์ในช่องอากาศที่เกิดจากความถี่มูลฐานและในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์

- แรงบิดที่คงที่ (Steady Torque)

การเคลื่อนที่ของฟลักซ์ในช่องอากาศที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสฮาร์มอนิกที่โรเตอร์ที่มีความถี่สลิป จะทำให้เกิดฮาร์มอนิก mmf ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสลิปที่โรเตอร์โดย mmf และฟลักซ์ในช่องอากาศจะเกิดขึ้นได้จาก ฮาร์มอนิกในอันดับที่เท่า ๆ กัน ที่สัมพันธ์กับ ฮาร์มอนิกในอันดับอื่น ๆ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ จะทำให้เกิดแรงบิดที่คงที่ขึ้น จึงทำให้สามารถหาค่าแรงบิดฮาร์มอนิกได้จากความสัมพันธ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_k = \pm \frac{3I_{2,k}^2 R_{2,k} / S_k}{k\omega_s} \tag{2.21}$$

โดยแรงบิดที่เป็นค่าบวกจะเกิดจาก Positive Sequence Harmonics ($k = 6n+1$) และแรงบิดที่เป็นค่าลบจะเกิดขึ้นจาก Negative Sequence Harmonics ($k = 6n-1$)

และสามารถหาแรงบิดที่ Fundamental ได้จาก

$$T = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_s} S \tag{2.22}$$

และเมื่อนำสมการแรงบิดทั้ง 2 มาหารกันจะได้

$$\frac{T_k}{T_1} = \pm \left(\frac{I_{2,k}}{I_2} \right)^2 \left(\frac{R_{2,k}}{R_2} \right) \left(\frac{S}{kS_k} \right) \tag{2.23}$$

ที่ Slip fundamental (S_1) จะมีค่าน้อยมาก เมื่อมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัดซึ่งจะได้ค่า Slip ที่ Fundamental เป็น

$$S_k = \frac{k \pm 1}{k} \tag{2.24}$$

และเมื่อนำสมการ S_k ไปแทนในสมการที่ 2.21 จะได้

$$\frac{T_k}{T_1} = \pm \left(\frac{I_{2,k}}{I_2} \right)^2 \left(\frac{R_{2,k}}{R_2} \right) \left(\frac{S}{k \pm 1} \right) \tag{2.25}$$

โดยทั่วไป การหากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ โดยที่ค่าความต้านทานในวงจรสามารถละเลยได้

เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ ดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{2,k} = \frac{V_{1,k}}{X(X_1 + X_2)} \quad (2.26)$$

หรือสามารถหากระแสที่ Fundamental ได้จาก

$$I_{2,1} = \frac{V_{1,1}}{1(X_1 + X_2)} \quad (2.27)$$

เมื่อ $V_{1,1}$ และ $I_{2,1}$ เป็นค่าที่ Fundamental ของมอเตอร์และสำหรับแรงดันจากแหล่งจ่ายสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$V_k = \frac{V_1}{K} \quad (2.28)$$

เมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะได้

$$\begin{aligned} I_{2,5} &= \frac{\frac{V_1}{5}}{5(X_1 + X_2)} \\ &= \frac{V_1}{25(X_1 + X_2)} \end{aligned}$$

เช่นกันเมื่อพิจารณาที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ค่ากระแส $I_{2,7}$ จะได้เป็น

$$\begin{aligned} I_{2,7} &= \frac{\frac{V_1}{7}}{7(X_1 + X_2)} \\ &= \frac{V_1}{49(X_1 + X_2)} \end{aligned}$$

2.6.2 ผลของฮาร์มอนิกสที่มีต่อค่าความสูญเสียส่วนต่าง ๆ

เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไม่ได้เป็นรูปไซน์ดังนั้นมอเตอร์จะได้รับแรงดันฮาร์มอนิกส ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศ ที่หมุนด้วยความเร็วสูงกว่าสนามแม่เหล็กเนื่องจากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่มูลฐานมาก ดังนั้นกระแสที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์จะไม่ขึ้นกับสลิปของมอเตอร์ ทำให้กระแสเนื่องจากแรงดันฮาร์โมนิกส์อาจมีค่ามากกว่ากระแสขององค์ประกอบมูลฐาน ดังนั้น จึงสามารถบอกได้ว่าแรงดันฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์มากขึ้น

- ค่าความสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)

กระแสฮาร์โมนิกส์ในขดลวดสเตเตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นที่มอเตอร์ โดยการสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P_{cu1} = 3I_{rms}^2 R_1 \quad (2.29)$$

ซึ่ง I_{rms} คือผลรวมของกระแส rms ที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} I_{rms} &= \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots I_k^2} \\ &= \sqrt{I_1^2 + I_h^2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

เมื่อแทนค่า I_{rms} จากสมการ (2.30) ลงในสมการ (2.29) จะได้

$$P_{cu1} = 3(I_1^2 + I_h^2) R_1 \quad (2.31)$$

เมื่อดูจากสมการจะแสดงให้เห็นการสูญเสียฮาร์โมนิกส์ของขดลวดจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์มีเพียงเล็กน้อย และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสที่สนามแม่เหล็ก ส่งผลกระทบให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์รั่วไหลมากขึ้น ดังนั้นค่าของกระแสฮาร์โมนิกส์จึงมีความสัมพันธ์กับการรั่วไหลของฟลักซ์

- ค่าความสูญเสียของขดลวดโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

ถ้าเราสมมติให้ความต้านทานมีค่าคงที่ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ เป็นผลจากขดลวดสเตเตอร์แบบยาว - วาวด์ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่มีการเพิ่มขึ้นของความต้านทานในสเตเตอร์ และความถี่ซึ่งจะขึ้นกับรูปร่าง ขนาด และการจัดวางตัวนำในสล็อตของสเตเตอร์อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในโรเตอร์ Skin effect จะมีผลอย่างมากซึ่งทำให้ค่าความต้านทานในโรเตอร์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่เป็นแบบฝังแท่งตัวนำไว้ในร่องสล็อต (deep-bar rotor) กระแสที่เหนี่ยวนำในโรเตอร์จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 ของค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนย้อนกลับ (Backward) และในขณะที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 7 จะหมุนไปข้างหน้า (Forward) จะทำให้เกิดกระแส โรเตอร์ด้วยความถี่อันดับที่ 6 นั่นคือ 300Hz ในกรณีที่กำหนดให้แหล่งจ่ายมีความถี่ 50Hz ทำนองเดียวกันฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นในโรเตอร์ด้วยความถี่ 600Hz ค่าความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับจะมีมากกว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

ในความเป็นจริงการเพิ่มขึ้นของผลจาก Skin effect จะขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของตัวนำ และการเอกลำเป็นเอกลำที่ลงวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตำแหน่งการวางของตัวนำที่วางข้ามช่องกันทั้งของสเตเตอร์และโรเตอร์ เนื่องจากองค์ประกอบของความไม่วางกลมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดให้ตัวนำทองแดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าลึก 2 cm ในร่องสลีทโรเตอร์ ซึ่งมีรูปร่างทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีอัตราส่วนที่ความถี่ 50Hz ความต้านทานกระแสสลับ และความต้านทานกระแสตรง มีค่าอัตราส่วนประมาณ 1.3 และที่ความถี่ 300Hz จะมีอัตราส่วนเป็น 3.3 และที่ 600Hz จะมีอัตราส่วนเป็น 4.7

ดังนั้นความต้านทานโรเตอร์จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ฮาร์มอนิก การสูญเสียของขดลวดที่ Rotor จะคำนวณได้จากฮาร์มอนิกแต่ละตัว โดยทั่วไป เมื่อ K^{th} คือฮาร์มอนิกที่ลำดับใด ๆ ที่นำมาใช้คำนวณการสูญเสียของขดลวดที่ Rotor คือ

$$P_{cu2,k} = 3I_{2,k}^2 R_{2,k}$$

เมื่อ $I_{2,k}$ คือ กระแสโรเตอร์ที่ฮาร์มอนิกลำดับใด ๆ และ $R_{2,k}$ คือความต้านทานที่โรเตอร์ที่เกิดจากผลของ Skin effect เมื่อเราให้ค่า $R_{2,k}$ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีค่าเท่ากับ $3R_2$ และให้ค่า $R_{2,k}$ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่าเท่ากับ $4R_2$ ซึ่งจะเหมาะกับการเอาไปใช้ลดค่าเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์ เพราะการรั่วไหลของอินดักแตนซ์ในโรเตอร์จะลดลงเพียงเล็กน้อย เป็นผลมาจาก Skin effect ผลรวมของค่าสูญเสียของฮาร์มอนิกในขดลวดจะนำเอาผลรวมต่าง ๆ ในอินดักซ์ชันมอเตอร์มารวมกัน ส่วนมากการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์ จะกำหนดได้จากกระแสฮาร์มอนิกเป็นตัวสำคัญ ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิผลของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่สัญญาณขานนี้

- ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ (Core Loss)

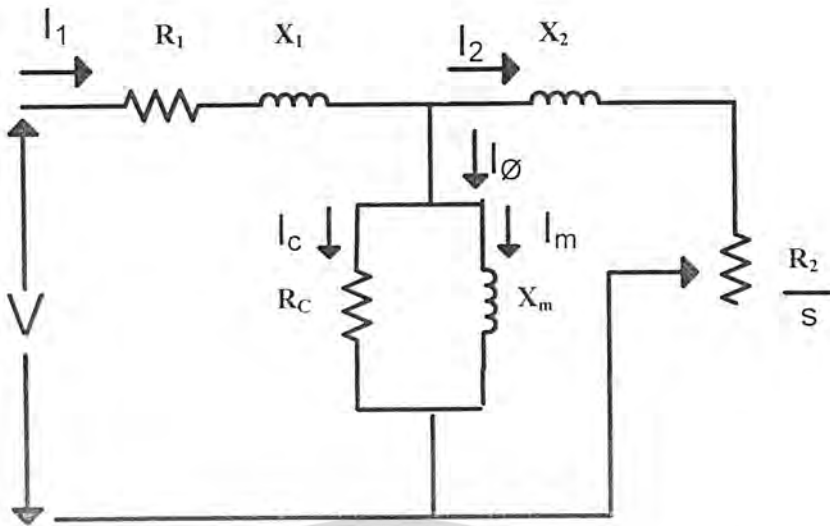
ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ จะเกิดขึ้นได้จากผลของฮาร์มอนิก เนื่องจากแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่ขานนี้ ทำให้เกิดการสูญเสียที่ปลายขดลวด (end – leakage) ซึ่งเป็นการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เป็นผลให้เกิดเส้นแม่เหล็กรั่วไหลที่ปลายสุดของขดลวดซึ่งผลของกระแสรั่วไหลนี้จะแทรกอยู่ตามรอบ ๆ แกนเหล็ก end – leakage มีผลกระทบทั้งที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ และการสูญเสียนี้อาจขึ้นอยู่กับรูปร่าง และลักษณะการพันขดลวดเป็นสำคัญ

2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการหาค่าพารามิเตอร์แบบมาตรฐาน

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์มีขดลวดสามเฟสที่สมมาตรและต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสที่สมดุลโดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในสภาวะคงตัวเพื่อความง่ายต่อการที่พิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งถูกต่ออยู่กับลักษณะสตาร์ โดยที่กระแสและแรงดันพิจารณาเป็นปริมาณใน 1 เฟส

วงจรสมมูลแบบนี้จะเป็นวงจรสมมูลที่มีความละเอียดในการคำนวณมากกว่าการคำนวณด้วยวงจรสมมูลแบบประมาณ ซึ่งในที่นี้จะคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจะมาจากการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test) การทดสอบขณะยึดโรเตอร์ (Blocked –rotor) 25% ของพิกัดความถี่ การทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Friction and Windage Losses) และการทดสอบ VI-method test ซึ่งรายละเอียดวิธีการทดสอบจะกล่าวไว้ในบทนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน (Standard Equivalent Circuit)

การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std. 112-1996 จะมีวิธีการและขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าของ X_m จากสมการที่ (2.32) โดยเราต้องสมมติค่า $\frac{X_1}{X_m}$ และ X_1 ขึ้นมาก่อน

$$X_m = \frac{mV_o^2}{VAR_o - mI_o^2 X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2 \tag{2.32}$$

เมื่อ

$$VAR_o = \sqrt{(mV_o I_o)^2 - P_o^2} \tag{2.33}$$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าของ $X_{1,b}$ จากสมการที่ (2.34) โดยใช้ค่าของ $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1

$$X_{1,b} = \frac{VAR_b}{mI_{1,b}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right) \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.35) ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าของ X_1 จากสมการที่ (2.36)

$$X_1 = \frac{f}{f_b} X_{1,b} \quad (2.36)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าของ X_m จากสมการ (2.32) โดยใช้ค่าของ X_1 จากขั้นตอนที่ 3 และอัตราส่วน $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาไปจนกระทั่งค่าของ X_1 และ X_m ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกว่าจะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% เมื่อได้ค่าของ X_1 และ X_m ตามที่กำหนดแล้วก็สามารถนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ได้ตามลำดับต่อไปนี้

$$X_1 = \frac{X_1}{\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}} \quad (2.37)$$

$$P_{core} = P_n - P_{f\&g} - mL_0^2 R_1 \quad (2.38)$$

การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ($P_{core\ loss}$) ตามสมการต้องทดสอบและหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการหมุน ออกมาก่อนซึ่งวิธีการทดสอบ และการหาค่าจะกล่าวไว้ในข้างต้น

$$G_c = \frac{P_{core}}{mV_0^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m} \right)^2 \quad (2.39)$$

$$R_c = \frac{l}{G_c} \quad (2.40)$$

$$R_2 = \left(\frac{P_{1,b}}{mL_{1,b}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 (X_{1,b} G_c) \quad (2.41)$$

ค่าของความต้านทาน R_I จะหาโดยการทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดซึ่งอาศัยหลักการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$R_I = \frac{1\Delta V_{dc}}{2\Delta I_{dc}} \quad (2.42)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อินเวอร์เตอร์และทฤษฎี PWM

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟ (Utility Power System) และมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V/f) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
3. สามารถจ่ายกระแสได้เต็มพิกัดที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดคงที่ที่ต้องการ

หลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้า AC 3 เฟส จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดัน DC โดยใช้วงจรเรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า DC ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า AC ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ซึ่งอินเวอร์เตอร์ได้นำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้เช่น

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้การแสสลับสำรอง เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลักเกิดขัดข้องซึ่งเรียกแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนี้ว่า STAND-BY POWER SUPPLIES (UPS)
2. ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับโดยการเปลี่ยนความถี่ ซึ่งเรียกว่า AC VARIABLE SPEED DRIVE (VSD) โดยหลักการทำงานของ VSD คือ เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตาม
3. ใช้แปลงไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ
4. ใช้ในเตาหลอมเหล็กที่ใช้ความถี่สูง ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กทำให้ร้อน

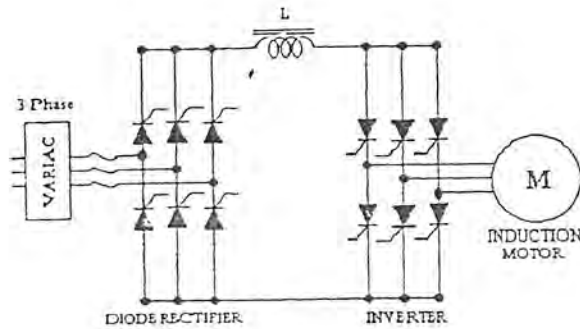
ในการปัจจุบันได้มีการใช้อินเวอร์เตอร์กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นจึงควรเลือกชนิดของอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับงานซึ่งก็จะสามารถจำแนกชนิดของอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter) : CSI
2. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter) : VSI

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current - Source Inverter)

อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยวงจร Controlled Rectifier และ Current Filter Choke โดยไม่มีคาปาซิเตอร์เป็นวงจรทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์และมี Current Mode Inverter เป็นวงจรทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ Controlled Rectifier และ Filter Choke จะทำหน้าที่เป็น Variable DC ควบคุมการไหลของกระแสเข้ามออเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับเพื่อทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นของกระแส 3 เฟส ซึ่งสามารถเอกสสารนิเป็นเอกสารที่สุ่ววนได้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว้ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 วงจรกำลังของ *Current Source Inverter*

ข้อดีของการใช้การควบคุมแบบ อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส ในการขับเคลื่อนมอเตอร์คือ มอเตอร์จะสามารถทำงานได้ 4 ควอดแรนต์โดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับ Over Current ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส คือ ทำงานแบบ Open Loop ไม่ได้เพราะ Filter Choke มีขนาดใหญ่และทางด้านอินพุตเป็น control Rectifier ซึ่งจะทำให้พาวเวอร์แฟกเตอร์ของระบบมีค่าต่ำเมื่อโหลดมีค่าน้อย ๆ ช่วงความถี่ในการทำงานต่ำกว่า อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน ไม่สามารถทำงานได้ที่ No Load และการควบคุมมอเตอร์หลายตัวโดยใช้อินเวอร์เตอร์ตัวเดียวทำได้ยาก

3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน Voltage-Source Inverter

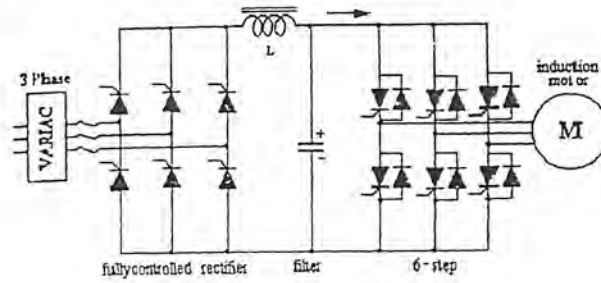
โครงสร้างแรงดันดีซีลิงก์มีขนาด Filter Capacitor C ที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าสูงที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดและโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6-STEP อินเวอร์เตอร์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ ข้อดีของโวลต์เดจซอร์สอินเวอร์เตอร์ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่ายซึ่งปรับความถี่ได้ในย่าน ที่กว้างและสามารถใช้ได้กับมอเตอร์หลายๆ ตัวพร้อมๆ กัน ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาในเรื่องของการสัดวงจร (Shot Through) ของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งภายในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้วงจรล็อกเอาต์(Locked Out) ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เป็นส่วนในการป้องกัน

3.2.1 6-Step Inverter

6-Step Inverter สามารถควบคุมจ่ายแรงดันเอาต์พุตที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ จากรูปที่ 2.2 จะมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ส่วนของ DC Link ใช้ Fully Controlled Rectifier และจะมีการควบคุมความถี่ของเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์ แรงดัน โล้นทางด้านเอาต์พุตที่ได้ จะมีรูปร่างเป็นคลื่นกึ่งสแควร์ (Quasi-Square Wave) ส่วนแรงดันเฟสจะมีรูปคลื่นเป็น 6-STEP ดังแสดงรูปที่ 2.2 อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์ จะมีการสวิตซ์เพียง 2 ครั้ง ในหนึ่งคาบความถี่ของแรงดันมูลฐาน และเนื่องจากต้องการควบคุมแรงดัน DC Link โดยใช้เรกติไฟเออร์ที่มีทรินสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตัดต่อโซลิดสเตท โดยการควบคุมแรงดัน DC Link โดยการควบคุมทำให้พาวเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุตมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นข้อเสีย เราสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนมาใช้

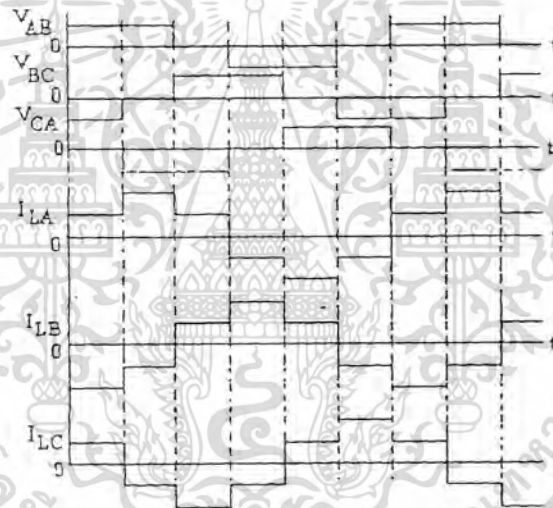
DC/DC คอนเวอร์เตอร์ ที่เป็น ซอปรเปอร์ควบคุม ทำให้พาวเวอร์แฟกเตอร์ดีขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 วงจรกำลังของ 6-Step อินเวอร์เตอร์

โดยปกติ Voltage Fed Drives ชนิด 6-STEP นี้ใช้กับมอเตอร์ขนาดกำลังต่ำไปจนถึงขนาดปานกลาง และจะใช้ได้ดีในช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์สูงจะไม่มีปัญหาของการ Switching Loss แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการควบคุมเพื่อที่จะให้ V/f คงที่ซึ่งจะต้องควบคุมวงจรกำลัง 2 ส่วน คือ ในส่วนของ DC Link และอินเวอร์เตอร์ทำให้ระบบซับซ้อนและยุ่งยาก ทำให้เสถียรภาพของระบบต่ำลง



รูปที่ 3-3 รูปคลื่นทางด้านเอาต์พุตของ 6-Step อินเวอร์เตอร์

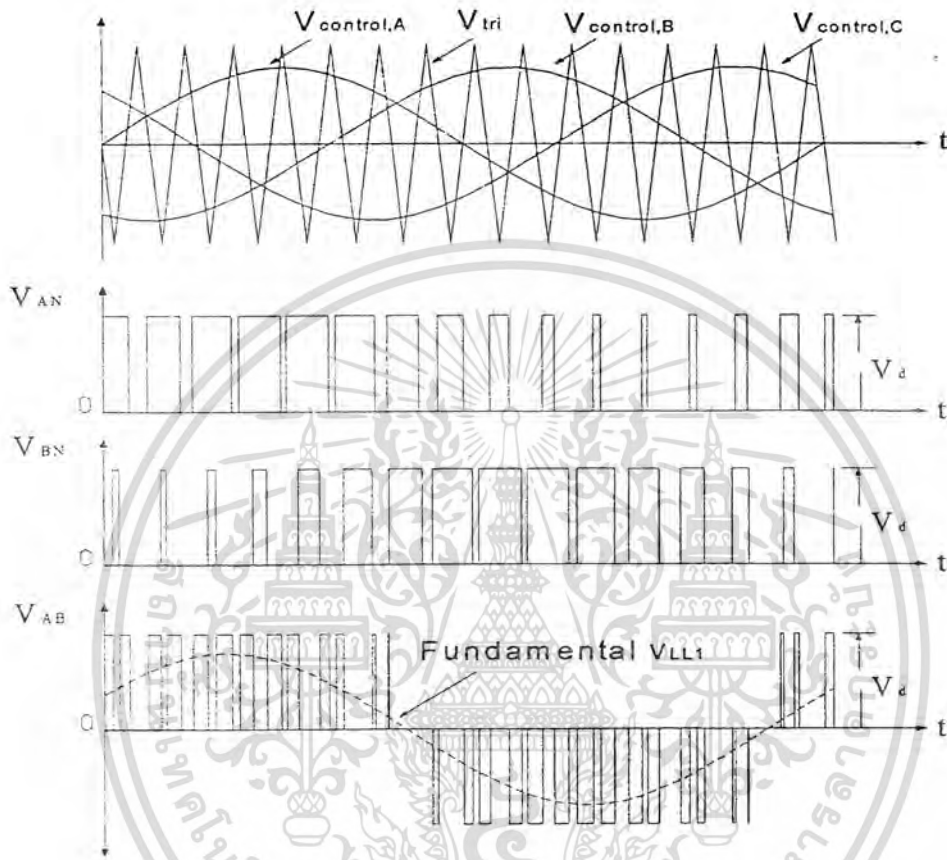
3.2.2 PWM อินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของ PWM อินเวอร์เตอร์ ในส่วนของแรงดันดีซีลิงค์สามารถใช้เรกติไฟเออร์ที่เป็นไดโอด ทำให้แรงดันของดีซีลิงค์มีค่าคงที่ซึ่งไม่อาจสามารถควบคุมแรงดันดีซีได้ ทำให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านอินพุตดีขึ้นและลดขนาด LC ฟิลเตอร์ให้เล็กลง ดังนั้นความถี่และแรงดันเอาต์พุตของแรงดันมูลฐานสามารถควบคุมโดยใช้เทคนิคของPWMที่จะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำน้อยลงแต่จำนวนครั้งของการสวิทช์ซึ่งสูงขึ้น กรณีที่ปริมาณด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงตัว เราควบคุมองค์ประกอบหลักมูลและลดฮาร์มอนิกส์ได้โดยการควบคุมรูปแบบการสวิทช์หรือจังหวะเวลาการสวิทช์ ผลลัพธ์ที่ได้คือรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดคงตัวแต่มีความกว้างที่แปรเปลี่ยนตามความเหมาะสม เรียกการมอดูเลตความกว้างพัลส์

ซึ่งมีหลายวิธี วิธีที่สำคัญ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การมอดูเลตแบบพัลส์-ชายน์ [3] (Sinusoidal – Pulse Modulation) ซึ่งเป็นการใช้การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันควบคุมที่เป็นรูปคลื่น 3 เฟส ($V_{control}$) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าและมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแอมพลิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วยความที่เท่ากับค่าความถี่ของการสวิตช์ซึ่งจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบไปควบคุมลำดับของการสับสวิตช์อีกที



รูปที่ 3-4 รูปสัญญาณ PWM

2. การมอดูเลตเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ต่อ (Harmonic Elimination) ซึ่งใช้การวิเคราะห์หอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณ PWM เพื่อกำหนดจังหวะเวลาการสวิตช์ที่ทำให้ฮาร์มอนิกส์ต่ำๆ มีค่าเป็นศูนย์และองค์ประกอบหลักมูลมีค่าตามที่กำหนด ทำให้สะดวกแก่การกรองหรือทำให้รูปคลื่นมีตัวประกอบลดความเพี้ยนที่ต่ำลง

3. การมอดูเลตโดยควบคุมรูปคลื่นของกระแสด้านออกด้วยวิธีการป้อนกลับแบบฮิสเทอรีซิสเมื่อรูปคลื่นของกระแสเริ่มแตกต่างจากรูปชายน์เป็นปริมาณเท่ากับ $\pm \Delta I / 2$ (โดยที่ ΔI คือแถบฮิสเทอรีซิส) ก็จะทำการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์เพื่อเพิ่มหรือลดค่าของกระแสทำให้กระแสยังคงอยู่ในแถบฮิสเทอรีซิสรอบๆ รูปชายน์ การเปลี่ยนแอมพลิจูดของสัญญาณอ้างอิงรูปว่า การกรองฮาร์มอนิกส์จากรูปคลื่น PWM ให้ผลตามที่ต้องการ

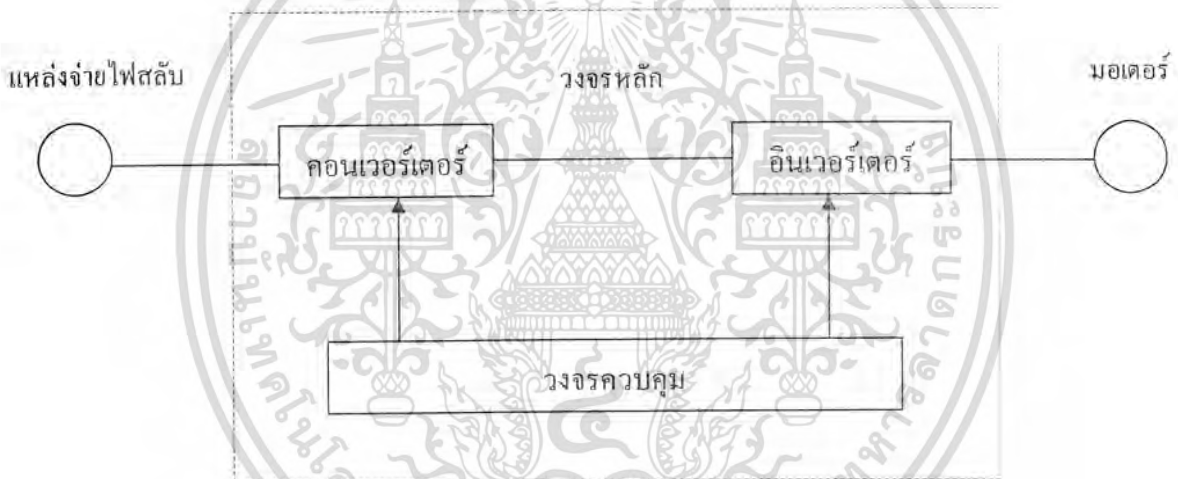
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรถ่ายในของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างความถี่และแรงดันขนาดต่าง ๆ มาขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่าง ๆ

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟ 50 Hz หรือ 60 Hz ไฟสลับนี้แบ่งเป็นไฟตรง โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์นอกจากนั้นยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น

อินเวอร์เตอร์ชนิดใช้งานทั่วไป (General Purpose Inverter) จะประกอบด้วยส่วนคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ รวมอยู่ในเครื่องเดียวกันเสมอ คอนเวอร์เตอร์มีหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรงเป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่ง ส่วนอินเวอร์เตอร์ก็เป็นอุปกรณ์แปลงไฟตรงเป็นไฟสลับทั้งสองส่วนนี้จะใช้องค์ประกอบวงจรที่แตกต่างกัน และมีการทำงานที่ต่างกัน

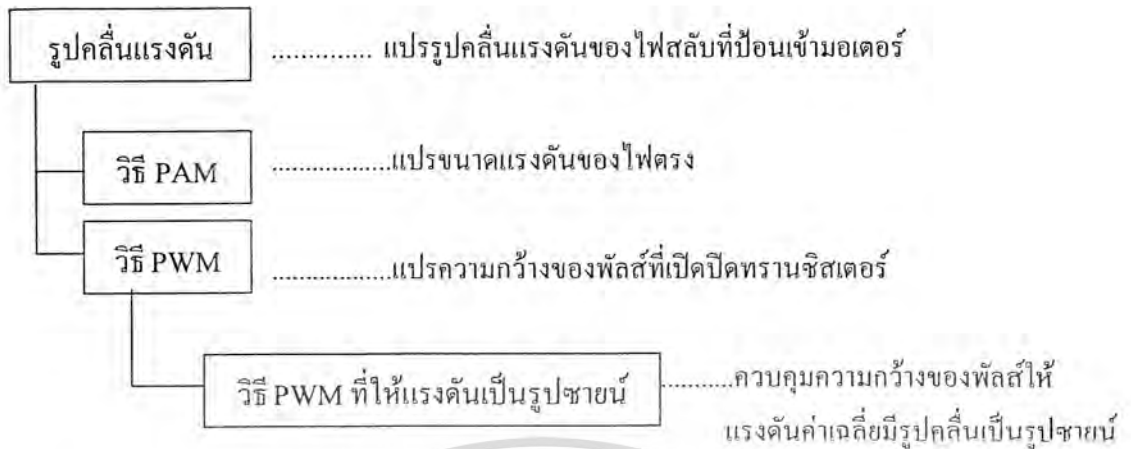


รูปที่ 3-5 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

วิธีการเปลี่ยนขนาดแรงดัน

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ นอกจากการแปรความถี่เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์แล้ว ยังต้องแปรขนาดแรงดันตามความถี่ที่เปลี่ยนไป เพื่อรักษาอัตราส่วน V/f ให้คงที่ การแปรขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์มีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันมากในอินเวอร์เตอร์ชนิดใช้งานทั่วไป คือ วิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันขาออกที่ป้อนให้มอเตอร์ การแปรรูปคลื่นแรงดันนี้ก็ยังมีหลายวิธีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การแปลงแรงดันด้วยวิธีการต่าง ๆ นี้จะมีผลต่อลักษณะสมบัติการควบคุมมอเตอร์เช่นการสั่นสะเทือน สัญญาณรบกวนการกระเพื่อมหรือริปเปิล (Ripple) แรงบิดและกระแสและผลตอบของแรงบิด เป็นต้น

วิธี PWM นั้นจะต้องกำเนิดพัลส์ที่ ON-OFF หลายครั้งในหนึ่งไซเคิล ความกว้างของแต่ละพัลส์จะไม่เท่ากัน เพื่อให้แรงดันเฉลี่ยมีรูปคลื่นซายน์ จำนวนพัลส์ที่กำเนิดใน 1 วินาทีเรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) การควบคุมแรงดันด้วยวิธี PWM นี้ จะทำให้เกิดการสั่นที่มอเตอร์ และเสียงรบกวนซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความถี่แคเรียร์นี้

อินเวอร์เตอร์ที่มีเสียงรบกวนน้อย (Low Noise Inverter) จะใช้ความถี่แคเรียร์สูงมากประมาณ 15 – 20 kHz ซึ่งความข่านนี้มนุษย์จะไม่ค่อยได้ยินเสียง เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดเสียงรบกวนต่ำนี้ไปขับมอเตอร์ก็เกือบจะไม่ได้ยินเสียงรบกวนเลย

3.4 การรักษ้อัตราส่วนระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่มูลฐานคงที่ (Constant Voltage per Frequency)

ลักษณะของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมความถี่นั้นกล่าวคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วยรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จำเป็นต้องเพิ่มความถี่เชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่จะเป็นผลทำให้ Air gap flux ของมอเตอร์ลดลง มาก ๆ สังเกตได้จากสมการที่(3.1)

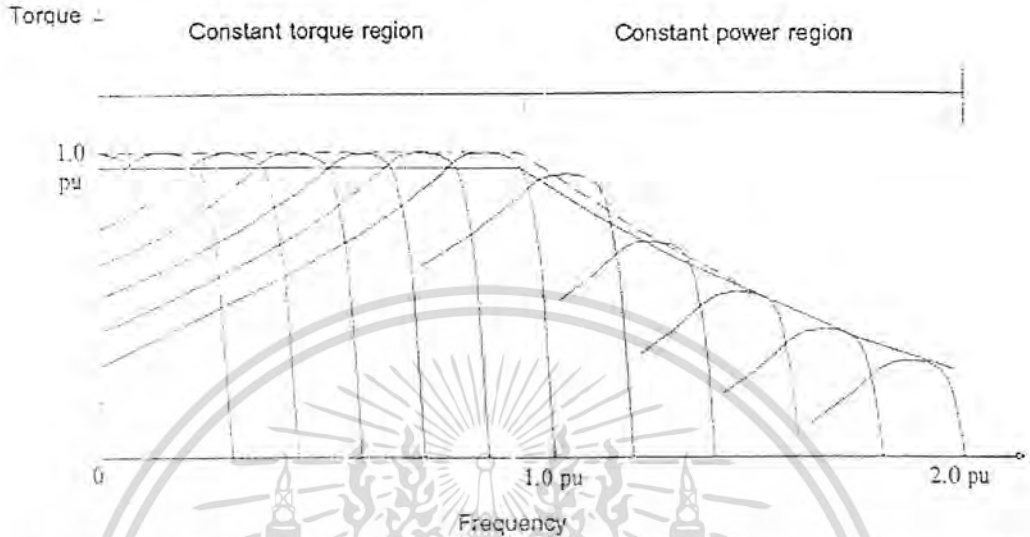
$$E = 4.44 N f \phi$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \tag{3.1}$$

$$T_m \propto \phi^2 \propto \left(\frac{E}{f}\right)^2 \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Air gap flux ลดลงจะทำให้ Maximum Torque ของมอเตอร์ลดลงแต่ในการที่จะรักษา Air gap flux และ Maximum Torque ให้คงที่ จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ตามความถี่ด้วยเพื่อรักษาความสัมพันธ์ของ $\frac{E}{f}$ ให้คงที่เพื่อให้ Maximum torque คงที่



รูปที่ 3-6 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความถี่รอบเมื่ออัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่

การควบคุมให้มอเตอร์มี Maximum Torque คงที่จะกระทำได้เฉพาะในย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วกำหนด (Base Speed) หรือความถี่ต่ำกว่า Base Frequency ในย่านความเร็วที่สูงกว่าความเร็วกำหนดจะไม่สามารถรักษา Maximum Torque ให้คงที่ เนื่องจากที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วกำหนด หรือความถี่ของแรงดันเอาต์พุตสูงกว่า Base Frequency จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สูงกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์ ถ้าแรงดันสูงเกินพิกัดของมอเตอร์มากๆ จะมีผลทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องรักษาแรงดันของเอาต์พุตให้คงที่ ณ ที่ความเร็วกำหนด ซึ่งมีผลทำให้ Maximum torque ลดลงเนื่องจากการลดลงของ Air gap flux เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้น การควบคุมความเร็วในย่านนี้ กำลังเอาต์พุตสูงสุดของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ดังนั้นถึงเรียกการทำงานในช่วงความเร็วสูงกว่าความเร็วกำหนด Constant Horse Power หรือ Field weakening Mode

3.5 การควบคุมการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage, Variable Frequency) หรือ VVVF

เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันดี และเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

ชนิดมอเตอร์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติ slip ต่ำซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนความเร็วเชิงโรตอร์ส ของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ การที่จะเปลี่ยนความเร็วเชิงโรตอร์สได้นี้สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งลักษณะการควบคุมความถี่นั้นจะคล้ายกับการควบคุมดิซิมอเตอร์กล่าวคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของ

อินดิคชั่นมอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 สร้างเงื่อนไขและการออกแบบการทดสอบ

จุดประสงค์ของปฏิญานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบหาประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PWM อินเวอร์เตอร์จะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยจะทดสอบเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์ปกติ เพื่อให้การทดสอบมีหลักยึดในการเปรียบเทียบและอ้างอิงดังนั้นเงื่อนไขการทดสอบจึงถูกกำหนดเอาไว้คือ

เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental) ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ และแหล่งจ่ายไฟปกติ ซึ่งจะทำการทดสอบที่ความถี่ 30, 40 และ 50 Hz และที่ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz ของ PWM อินเวอร์เตอร์ โดยในการทดสอบที่แต่ละค่าความถี่ซึ่งต่ำกว่าความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (50 Hz) คือ ที่ 30, 40 Hz เมื่อทดสอบจะต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าให้เป็นสัดส่วน ให้อัตราส่วน แรงดันไฟฟ้าต่อความถี่มีค่าคงที่เพื่อรักษาเส้นแรงแม่เหล็กที่พิกัดที่

ในการทดสอบนี้ PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการทดสอบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ขับ โหลดที่พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้โดยที่แรงดันไฟฟ้าไม่ตก ที่ความถี่ 50 Hz เท่านั้น ส่วนที่ความถี่ 30, 40 Hz PWM อินเวอร์เตอร์ ไม่สามารถขับ โหลดเท่าที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลอัตราส่วน แรงดันไฟฟ้าต่อความถี่มีค่าไม่คงที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการทดสอบจะทดสอบในช่วงที่อัตราส่วน แรงดันไฟฟ้าต่อความถี่มีค่าคงที่เท่านั้น

ส่วนวิธีการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ทั้งแบบแหล่งจ่ายด้วย PWM อินเวอร์เตอร์และแบบจ่ายด้วยชาน์ปกติให้มีค่าเท่ากัน จะทำด้วยวิธีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสด้วย Digital Oscilloscope โดยจะเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของแบบจ่ายด้วยชาน์ปกติในแต่ละสถานะ โหลดที่ทดสอบก่อน ซึ่งค่าที่เก็บ จะอยู่ในรูปตัวเลข (ASCII) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน อันดับหนึ่ง โดยวิธีใช้ฟังก์ชันการแปลงอนุกรมฟูเรียร์ (FFT) ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งการควบคุมแรงดันไฟฟ้ามูลฐานให้เท่ากันระหว่างแบบแหล่งจ่ายด้วย PWM อินเวอร์เตอร์และแบบจ่ายด้วยชาน์ปกติ นั้นจะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน อันดับหนึ่งเฉลี่ยของทั้งสามเฟสเพื่อเป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบ ซึ่งการป้อนด้วยค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐานของ PWM อินเวอร์เตอร์นั้นทำให้ต้องป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าพิกัดมอเตอร์ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการจ่าย โหลดให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะทำการเพิ่มขึ้นทีละระดับตั้งแต่ 20-100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดมอเตอร์ไฟฟ้า

จากนั้นจึงนำข้อมูลการทดสอบมาหาค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานะ โหลด เพื่อนำมาเปรียบเทียบและศึกษาถึงผลกระทบของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไซน์

4.2 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996 Method B

เป็นการทดสอบที่อ้างอิงตามมาตรฐาน โดยนำค่าต่างๆที่ได้จากการทำการทดสอบหาพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลมาใช้ โดยการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้านี้จะอาศัยเอกสารที่บังคับเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการขับ โหลดทางไฟฟ้า ซึ่งจะขับในสถานะ โหลดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4-1 และ 4-2 โดยแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า นั้นจะเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่าย 2 ชนิด คือ

1. แหล่งจ่ายไฟปกติที่เป็นขายน
2. แหล่งจ่ายไฟจาก PWM อินเวอร์เตอร์

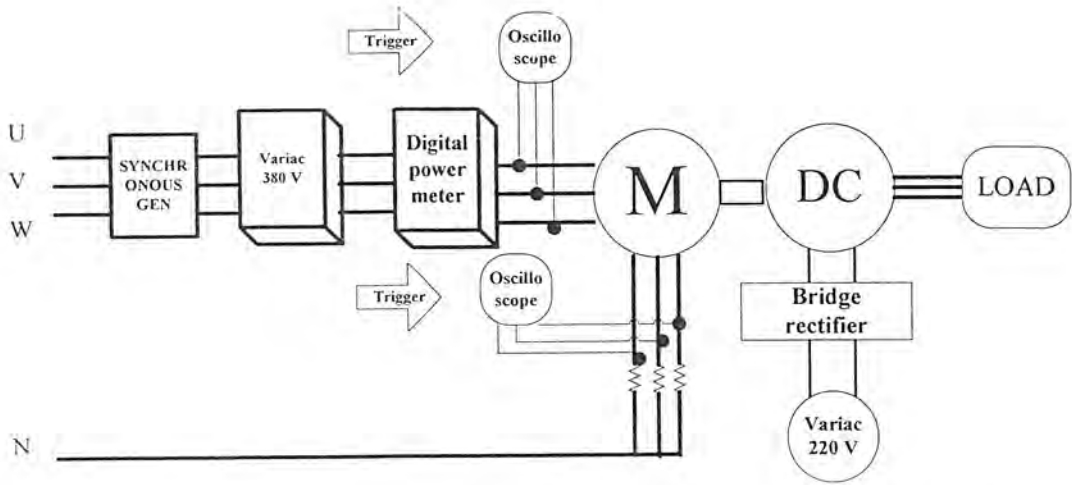
4.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้าที่ความถี่ต่างๆ เปรียบเทียบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายไฟปกติ

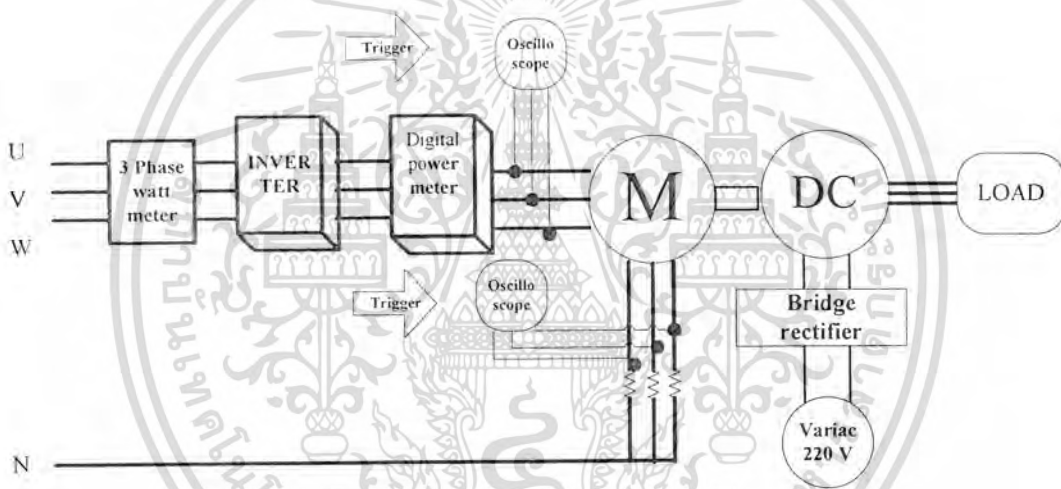
- ต้องวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4-1 แต่ไม่คัปป์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อที่จะ ปรับค่าที่ Torque meter ให้มีความถูกต้อง
- ตั้งค่าการทริกเกอร์ของออสซิลโลสโคปทั้ง 2 ตัวไว้ 4 วินาที เพื่อเก็บค่า แรงดันไฟฟ้า, กระแส พร้อมกันทั้งสามเฟส
- ต้องวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4-1 และ 4-2 แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้ามูลฐานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้โดย การป้อนแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยค่าทั้งแบบแหล่งจ่ายด้วย PWM อินเวอร์เตอร์และแบบจ่ายด้วยขายนปกติ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสด้วย Digital Power meter
- จ่ายไฟกระแสตรงเท่ากับค่าพิกัดเข้าที่ขดลวดพิวส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในการใช้ขับ โหลดไฟฟ้า
- ทำการขับ โหลดโดยการเปิดหลอดอินแคนเดสเซนต์ตามสภาวะ โหลดต่างๆที่กำหนดไว้
- บันทึกค่าต่างๆด้วย Digital Power meter และ Digital Oscilloscope โดยอาศัยการทริกของสัญญาณและเก็บข้อมูลในเชิงตัวเลข(ASCII) และรูปภาพ
- หลังจากหยุดการขับ โหลดในแต่ละครั้งจะต้องรอจนการสัญญาณคงค้างจะหมดไป
- ทำตามขั้นตอน โดยทดสอบที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz, 40 Hz และ 50 Hz และที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz

การเปรียบเทียบที่ค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน โดยจะใช้แรงดันไฟฟ้ามูลฐาน ของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นขายนปกติเป็นหลักซึ่งเป็นตัวแปรคงที่ ส่วนตัวแปรที่แปรผันที่จะต้องควบคุมคือ ค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐานของ PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งการป้อนด้วยค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน ของ PWM อินเวอร์เตอร์ นั้นในตอนเริ่มจะต้องใช้การเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้น โดยการเปรียบเทียบเป็นบัญญัติไตรยางศ์โดย ที่ค่า 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ของ PWM อินเวอร์เตอร์ มีค่าแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานประมาณ 270 โวลต์ ดังนั้นเมื่อต้องการให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน ของ PWM อินเวอร์เตอร์ เท่ากับ ค่าค่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐานของแหล่งจ่ายไฟที่เป็นขายนปกติที่มีค่าเท่ากับ 311 โวลต์ จะต้องให้ PWM อินเวอร์เตอร์ จ่ายแรงดันออกมาโดยประมาณ 250-254 โวลต์ โดยแต่ละครั้งในการทดสอบที่สภาวะโหลดต่างๆ จะต้องนำค่าที่เก็บได้จากออสซิลโลสโคปมาแตกอันดับของฮาร์มอนิกส์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 รูปการต่อวงจรทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายไฟปกติ



รูปที่ 4-2 รูปการต่อวงจรทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบจ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์

4.4 ผลการทดลอง

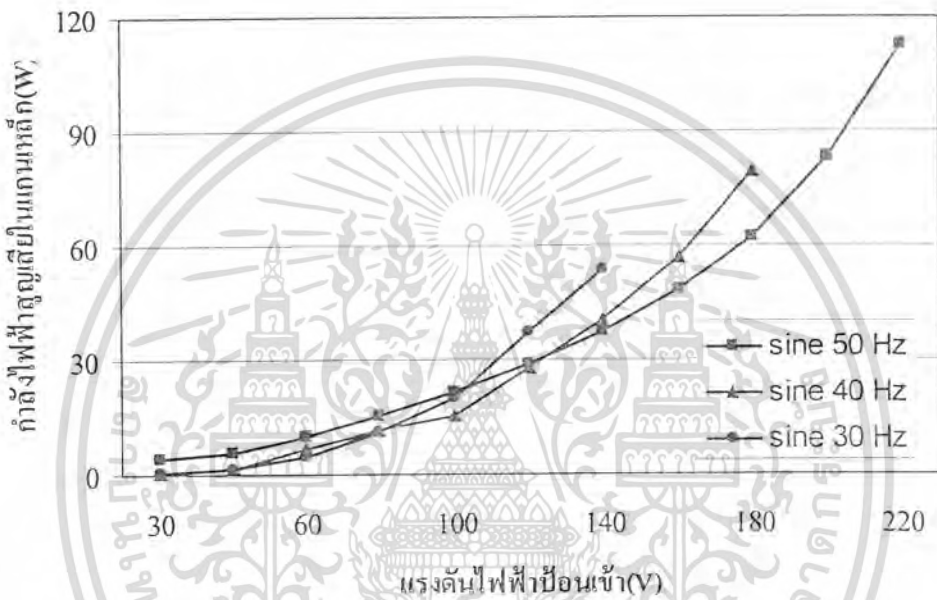
4.4.1 ผลการทดลอง No-load

จากการทดสอบ No-load ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็ก โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันและความถี่ที่แตกต่างกันแต่ยังรักษาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าต่อความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าในช่วงระดับแรงดันตั้งแต่ช่วง 30 จนถึงระดับ 100 โวลท์ที่ความถี่ 30,40 และ 50 Hz จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กใกล้เคียงกันมาก แต่พอระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 100 โวลท์ขึ้นไปจะพบว่า เมื่อเราพิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ความถี่ต่ำจะมีค่ามากกว่าที่ความถี่สูง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลลดลงเพราะว่าค่าอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับความถี่ ทำให้กระแสที่ไหลเข้าไปในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นจึงส่งผลให้ความสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

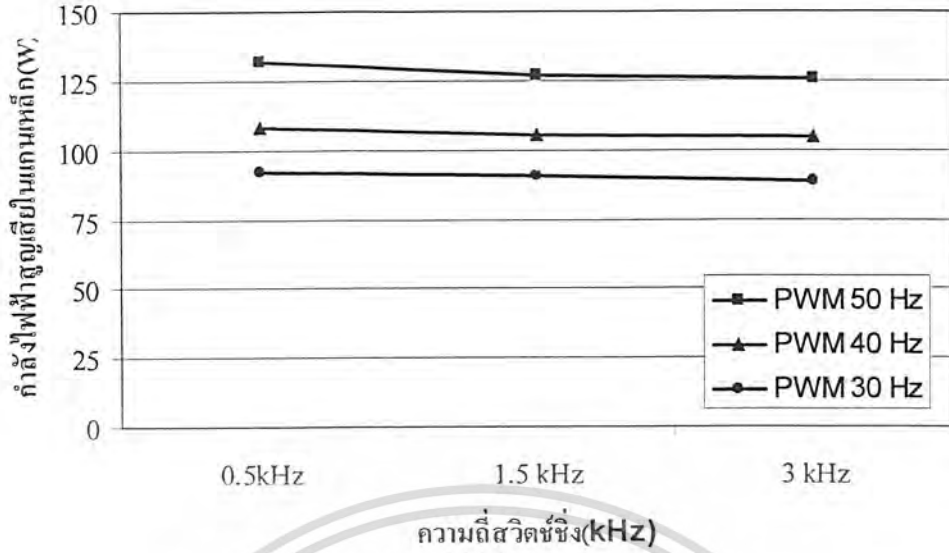
แต่ถ้ามองอีกด้าน คุณลักษณะของแกนเหล็กซึ่งทราบว่าคุณค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะแปรผันตรงกับ 4 ค่าหลักๆคือ ความถี่ ค่าคงที่ฮิสเทอรีซิส ค่าคงที่กระแสไหลวน และ เส้นแรงแม่เหล็กลัพท์ แต่จากการทดสอบจะพบว่าถึงแม้การลดลงของความถี่จะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลงก็จริงแต่มีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กระแสไหลวนเข้าไปในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงขึ้น

ส่วนถ้าเปรียบเทียบที่แรงดันไฟฟ้าพิกัดของความถี่นั้นๆ จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ความถี่สูงจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าความถี่ต่ำเนื่องจากกระแสและความถี่ที่สูงขึ้น และที่ความถี่ 30 และ 40 Hz ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปให้เท่ากับที่ความถี่ 50 Hz ได้ เนื่องจากจะเกิดผลกระทบจากเส้นแรงแม่เหล็กลัพท์อิ่มตัว



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าของแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์ที่ความถี่ 30, 40 และ 50 Hz

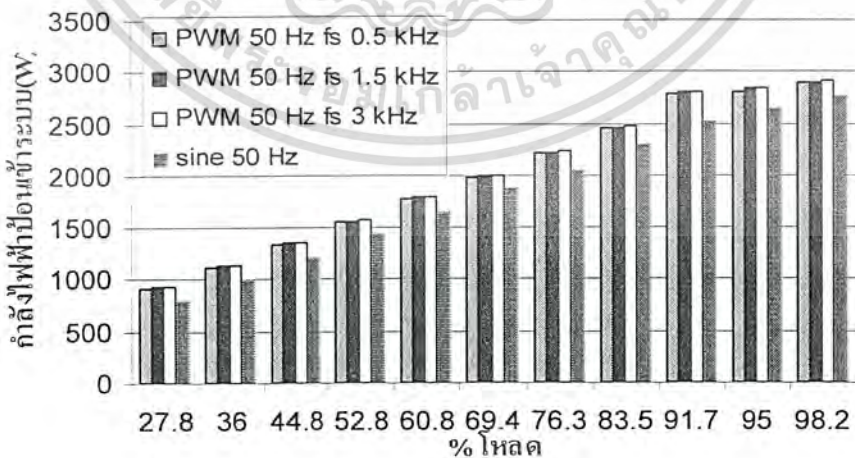
จากรูปที่ 4-4 จะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นชานซ์ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ Fundamental ต่างกัน ที่ความถี่สูงจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่า และเมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ ซึ่ง ที่ความถี่ fundamental เดียวกัน กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจะมีแนวโน้มต่ำลงตามความถี่สวิตซ์ซึ่งที่สูงขึ้น



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับความถี่สวิตซ์ซิ่งของแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นชายนที่ความถี่ 30, 40 และ 50 Hz

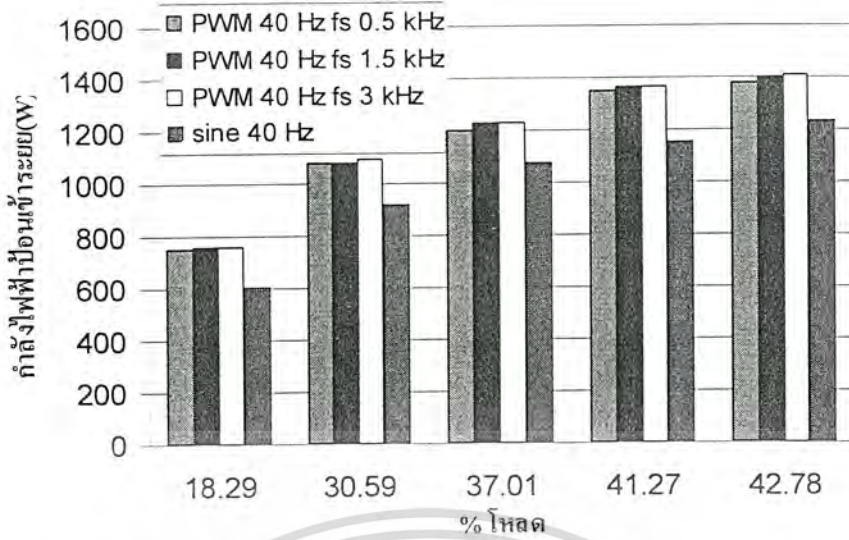
4.4.2 ผลการทดลอง On-load

จากผลการทดสอบ On-load จะเป็นผลการทดสอบจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งมี 2 กรณีด้วยกันคือ กรณีแรก แหล่งจ่ายที่เป็นชายนที่ควบคุมความถี่ fundamental จากซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ ส่วนกรณีที่สอง คือ PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมความถี่ fundamental ที่ป้อนเข้ามอเตอร์โดยและความถี่สวิตซ์ซิ่งที่ 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz จากรูปที่ 4-5 ถึงรูปที่ 4-7 เป็นความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าทั้งระบบ เมื่อระบบมี PWM อินเวอร์เตอร์ เป็นตัวควบคุมความถี่จะมีค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าทั้งระบบมากกว่าระบบที่มีแหล่งจ่ายชายนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากผลของความสูญเสียที่อินเวอร์เตอร์

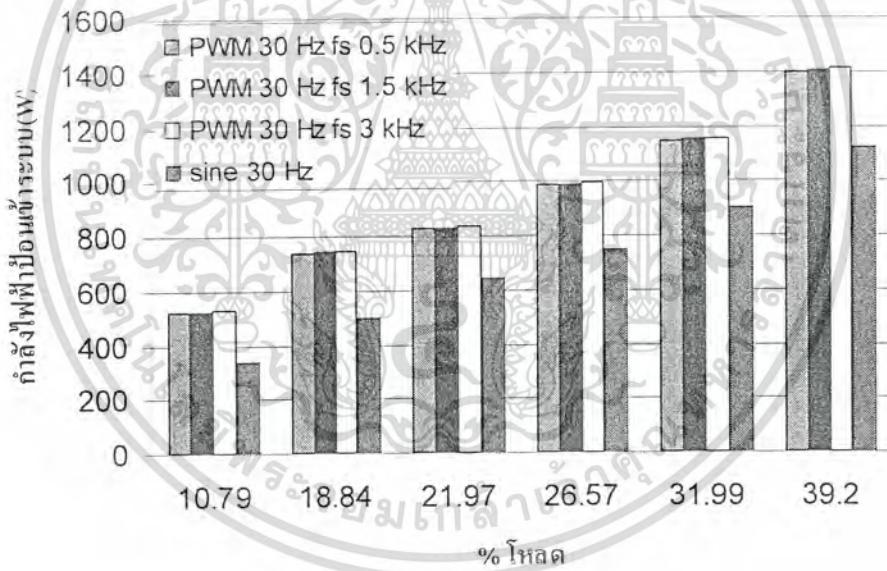


รูปที่ 4-5 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายนกับ PWM อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



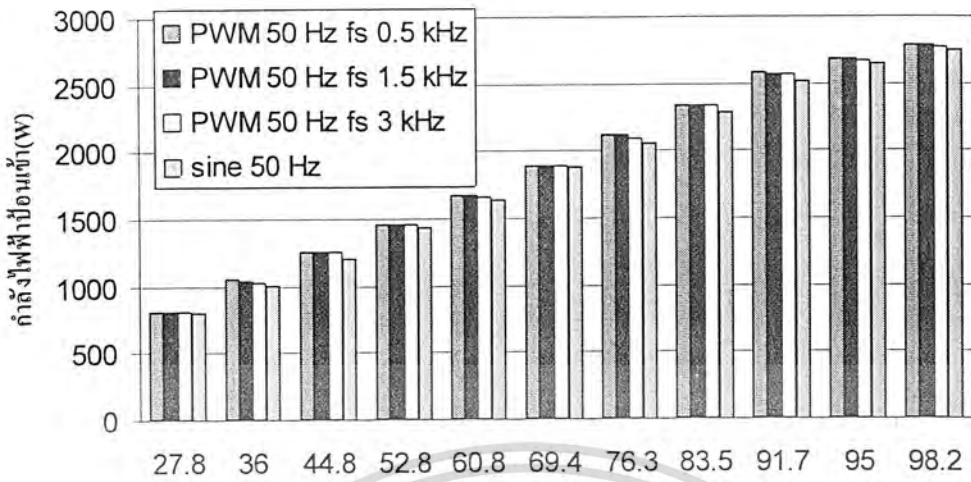
รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายนกับ PWM อินเวอร์เตอร์



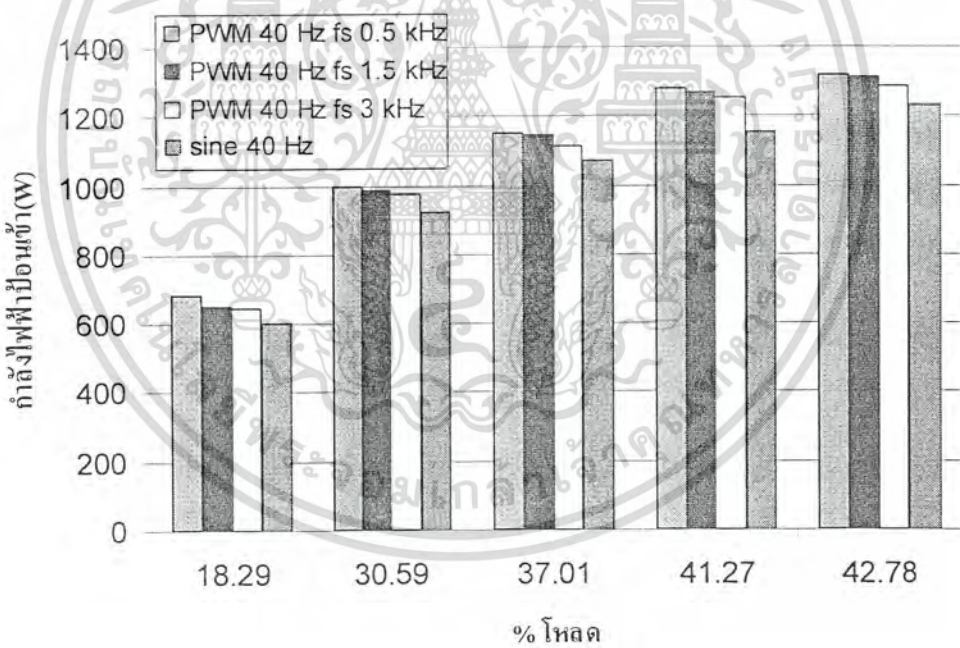
รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าระบบที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายนกับ PWM อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4-8 ถึงรูปที่ 4-10 เป็นความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อป้อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชายนและ PWM อินเวอร์เตอร์ จากผลการทดสอบจะเห็นว่าแหล่งจ่ายที่เป็นชายนจะใช้กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าน้อยกว่าแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นผลมาจาก แรงดันฮาร์มอนิกอันดับส่วนเกินของแรงดันไฟฟ้า fundamental ของ PWM อินเวอร์เตอร์ และ ถ้าพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนค่าความถี่สวิตซ์ซึ่งแล้ว จะพบว่าความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz จะมีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์มากกว่าความถี่สวิตซ์ซึ่งค่าอื่นดังนั้นถ้าเราเพิ่มความถี่สวิตซ์ซึ่งให้มีค่าสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์จะมีค่าลดลงเข้าใกล้กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชายนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางศูนย์ฯ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อศูนย์ฯ

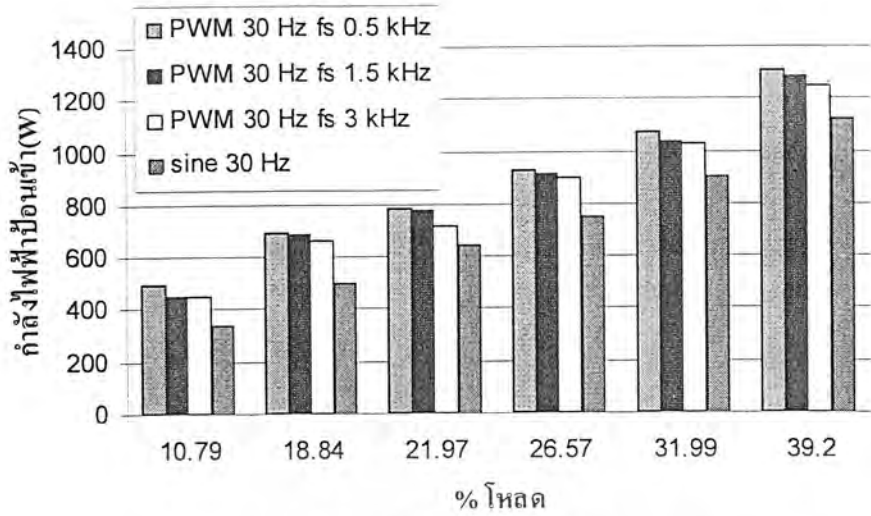


รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นขายน้กับ PWM อินเวอร์เตอร์



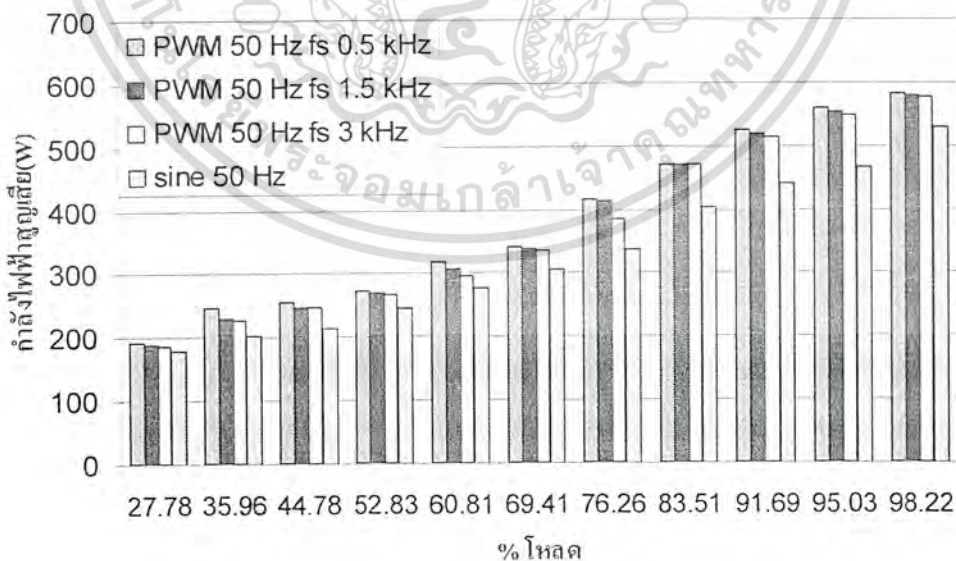
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นขายน้กับ PWM อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



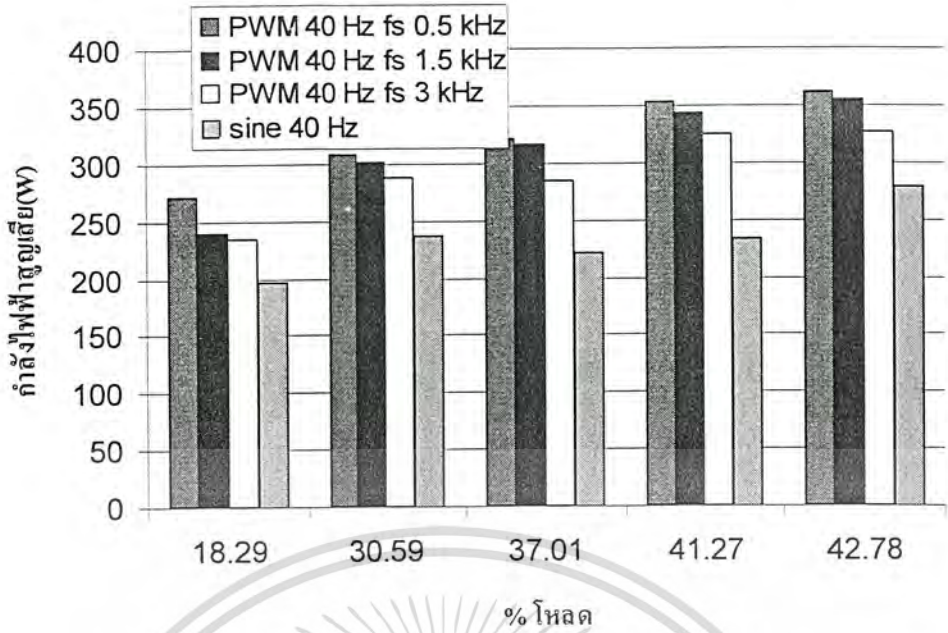
รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4-11 ถึงรูปที่ 4-13 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อป้อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์และ PWM อินเวอร์เตอร์ จากผลการทดสอบจะเห็นว่าแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ และ ถ้าพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนค่าความถี่สวิตซ์ซึ่งแล้ว จะพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคือ ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมอเตอร์มากกว่าความถี่สวิตซ์ซึ่งค่าอื่นดังนั้น ถ้าเราเพิ่มความถี่สวิตซ์ซึ่งให้มีค่าสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์จะมีค่าลดลงเข้าใกล้กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์มากขึ้น

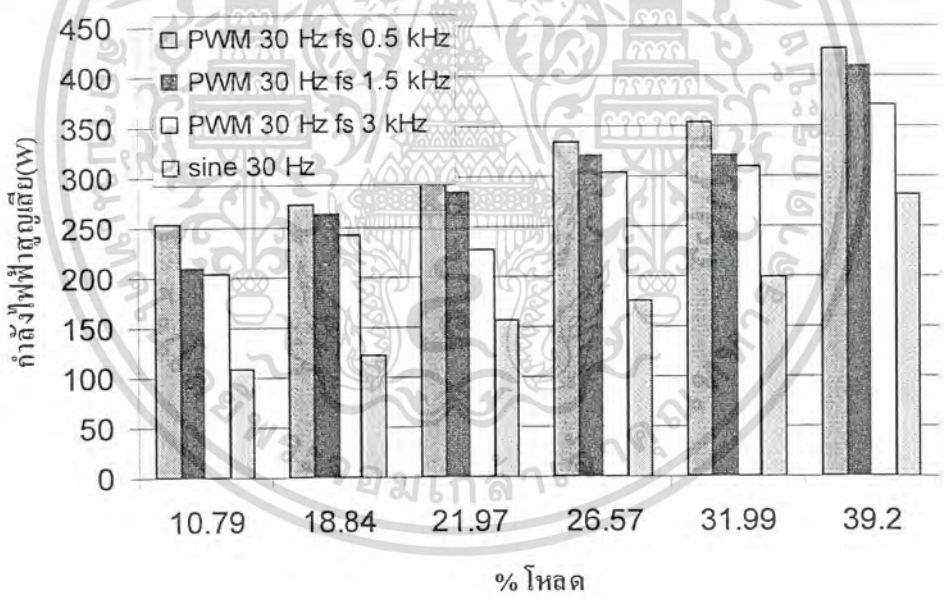


รูปที่ 4-11 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



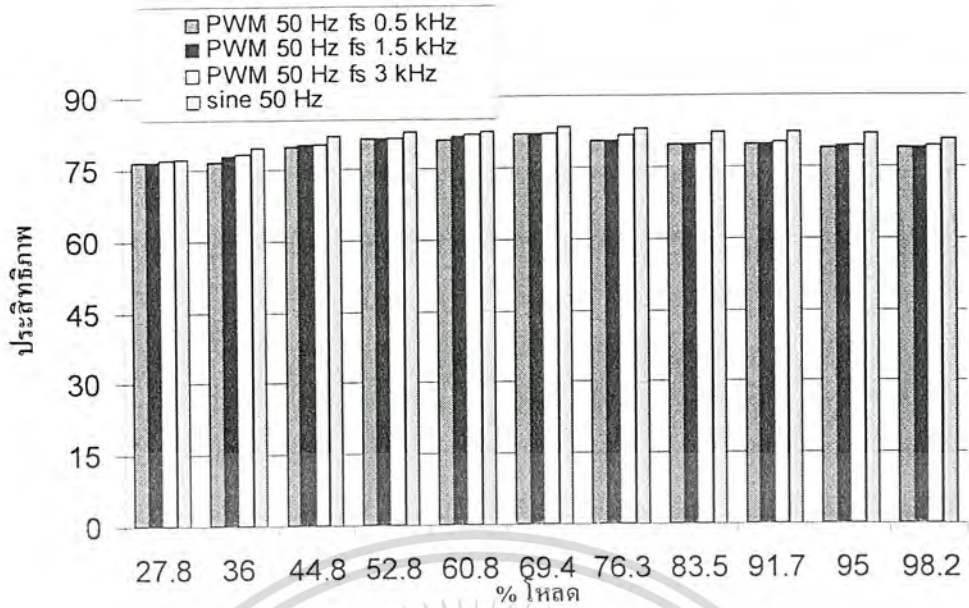
รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟสูงสุดเฉลี่ยของมอเตอร์ที่ความถี่ 40 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายน้กับ PWM อินเวอร์เตอร์



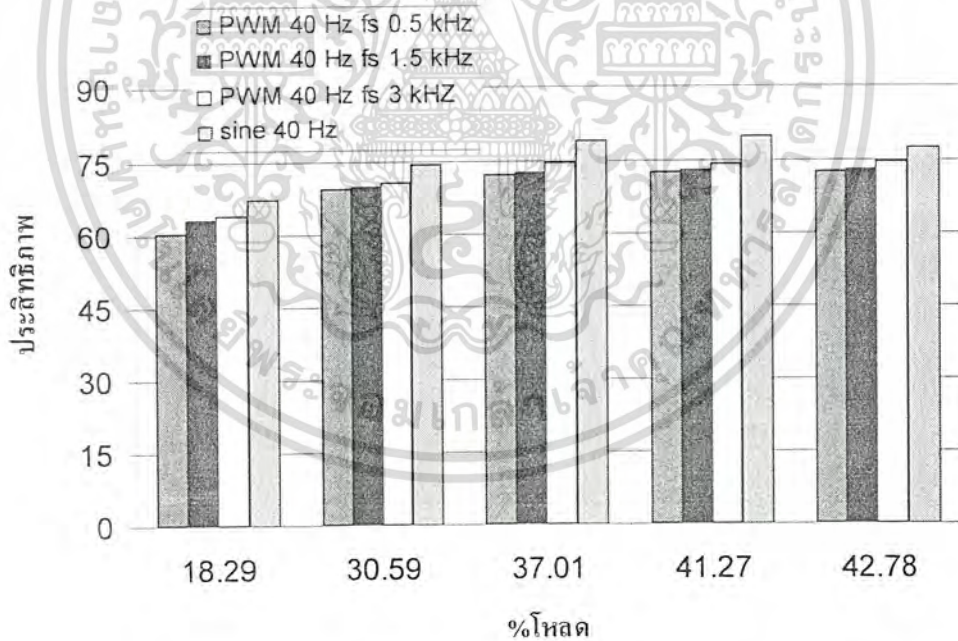
รูปที่ 4-13 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟสูงสุดเฉลี่ยของมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายน้กับ PWM อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4-14 ถึงรูปที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละลักษณะของแหล่งจ่ายและจะพบว่าเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชายน้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดส่วนกรณีที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

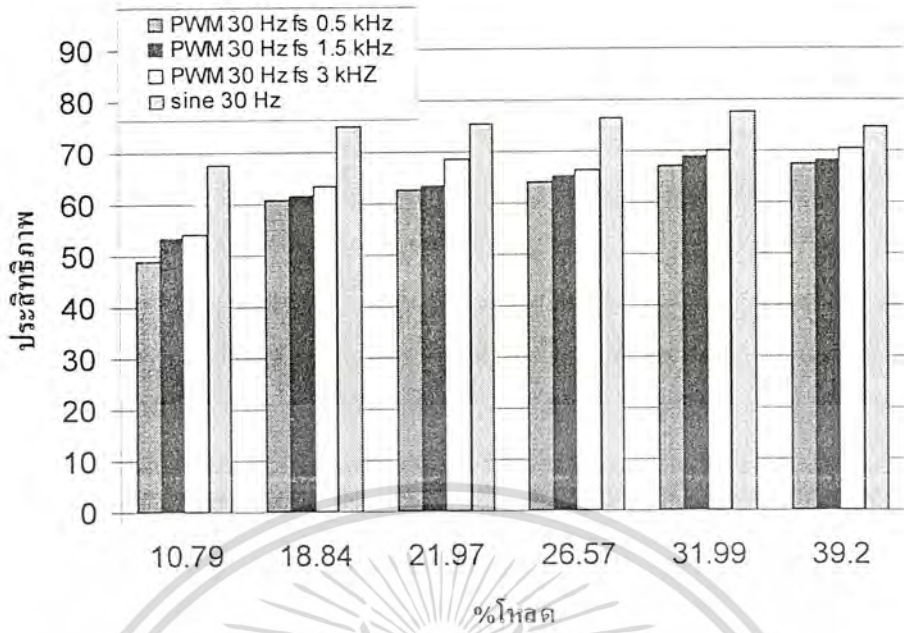


รูปที่ 4-14 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 Hz ระหว่าง แหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์



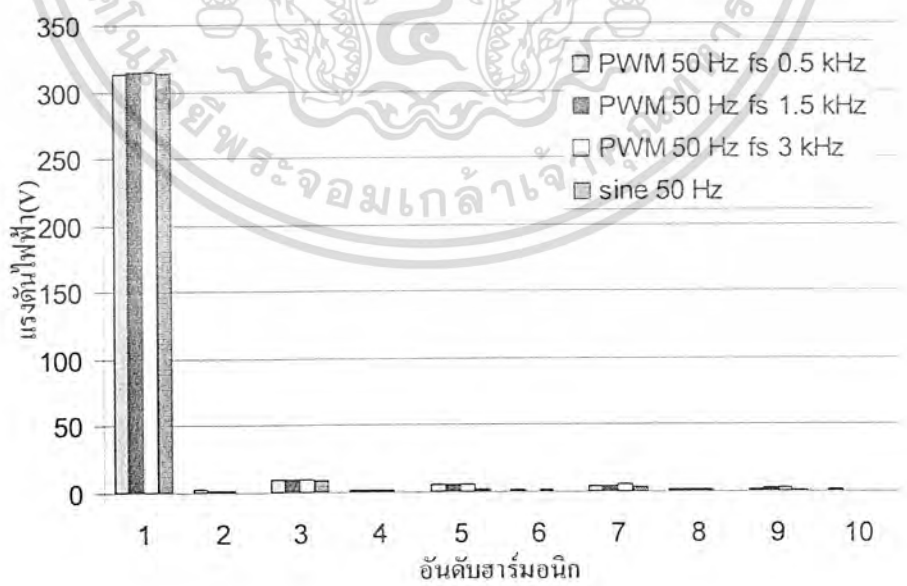
รูปที่ 4-15 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 40 Hz ระหว่าง แหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



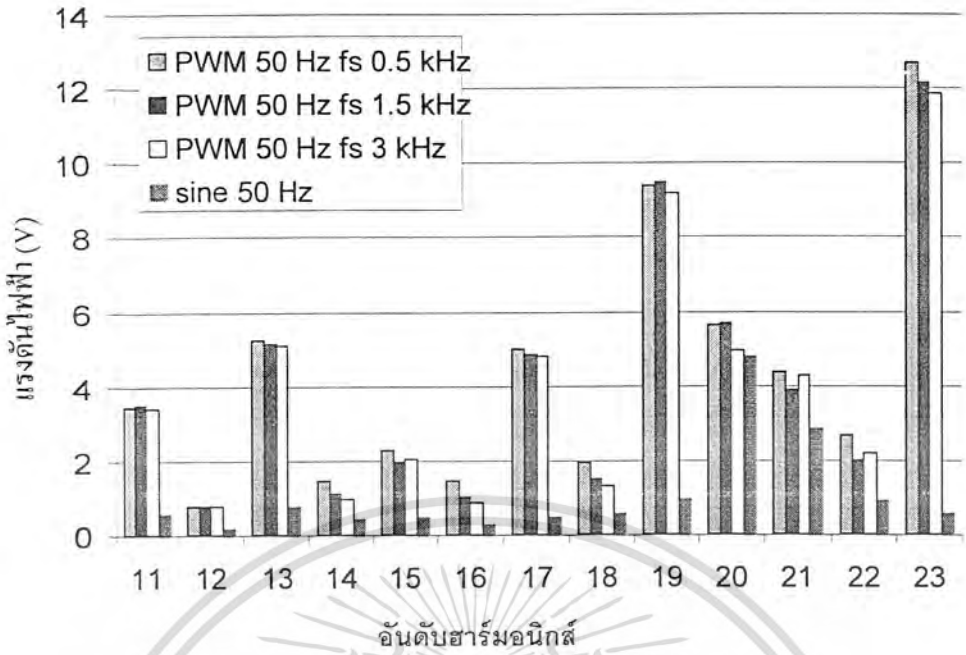
รูปที่ 4-16 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 30 Hz ระหว่าง แหล่งจ่ายที่เป็นชาน์กับ PWM อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันดับต่างๆที่ความถี่ 50 Hz โดยจะเห็นว่าที่แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกลักษณะของแหล่งจ่าย เนื่องจากการควบคุมของการทดสอบ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอันดับส่วนเกินที่เหลือจะเป็นแรงดันฮาร์มอนิกส์ ซึ่งแหล่งจ่ายที่เป็นชาน์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์



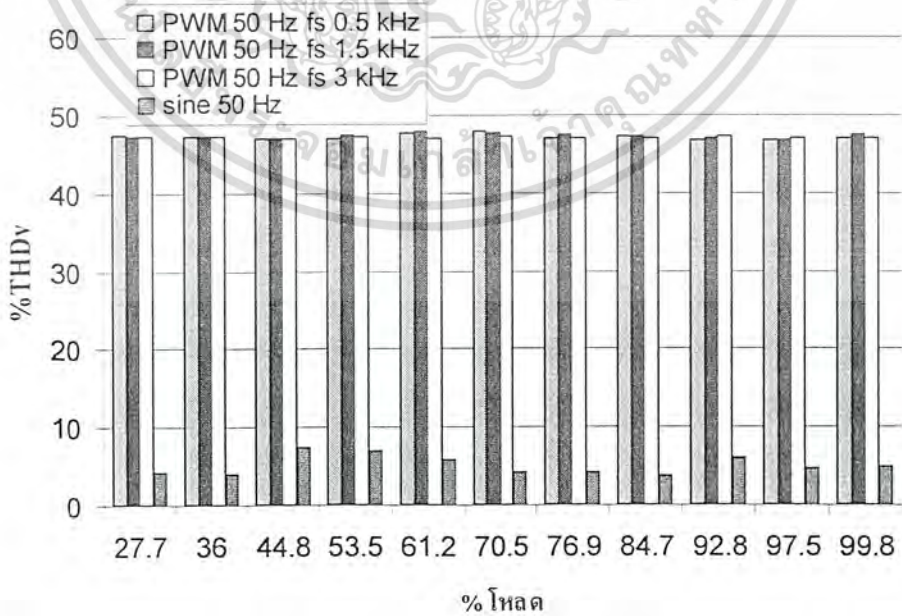
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

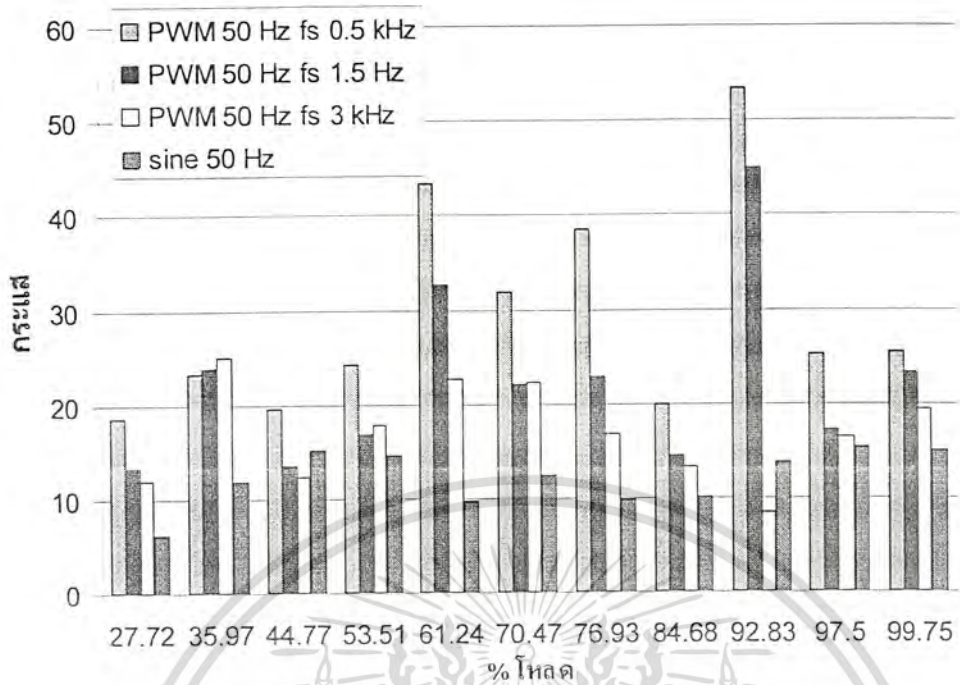


รูปที่ 4-17 (ก) และ (ข) เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานกับ PWM อินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4-18 และ 4-19 เป็นกราฟที่แสดงถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะพบว่าที่แหล่งจ่ายที่เป็นชานจะมีค่าความผิดเพี้ยน (THD) น้อยกว่าแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์และมีความสอดคล้องกับผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 4-18 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าความถี่ 50 Hz ระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีเฉพาะที่อาคารดังกล่าวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าความถี่ 50 Hz ระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชายน้กับ PWM อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์

การทดลองของโครงการวิศวกรรมนี้ เพื่อทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า โดยวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากแหล่งจ่าย 2 กรณี คือ แหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์ที่ควบคุมความถี่ fundamental ส่วนกรณีที่สอง คือ แหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ โดยควบคุมความถี่ fundamental ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 30,40 และ 50 Hz ทั้ง 2 กรณี และปรับความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ 0.5 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz ในกรณีที่ป้อนแหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งในการทดสอบจะขับโหลดตั้งแต่ 20-100 % เพื่อดูประสิทธิภาพและ ค่าความสูญเสียตลอดจนผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ซึ่งตามการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะพบว่าที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงมากขึ้นที่ความถี่มูลฐานเดียวกันค่าความสูญเสียที่เกิดในอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงดังนั้นในการเลือกใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงจุดที่สมดุลระหว่างความสูญเสียที่สูงขึ้นของอินเวอร์เตอร์กับการลดลงของความสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ของแหล่งจ่ายนั้นเมื่อดูจากกราฟการเปรียบเทียบอันดับแรงดันฮาร์มอนิกส์ของแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์ และแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์จะพบว่าแรงดันไฟฟ้ามูลฐาน fundamental มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการควบคุมของการทดสอบเพื่อเป็นตัวแทนหลักที่ชี้วัดไว้ในการอ้างอิงของการทดสอบ แต่แรงดันไฟฟ้าที่อันดับความถี่อื่น ๆ มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมากเมื่อเทียบกันระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์และแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ซึ่งก็หมายความว่า แรงดันไฟฟ้าส่วนเกินที่เหลือเมื่อหักลบระหว่างแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์ และแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ในแต่ละอันดับแล้วก็คือ ค่าความสูญเสียที่มากขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้ที่เงื่อนไขความถี่มูลฐานเดียวกัน แหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าทุกๆสภาวะโหลด จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกจ่ายด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์มีประสิทธิภาพสูงกว่าแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์

นอกจากนี้เมื่อมองถึงประสิทธิภาพรวมของระบบแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าต่ำกว่าแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์มาก ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีค่าความถี่สวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพรวมของระบบดีขึ้น และจากผลการทดสอบที่ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz ถึงแม้ว่าความสูญเสียในอินเวอร์เตอร์จะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่สวิตซ์ซึ่งอื่นแต่ถ้าพิจารณาทั้งระบบแล้วก็จะเห็นว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกใช้ ส่วนถ้ามองผลกระทบทางด้านลักษณะกายภาพของมอเตอร์ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งทั้งสามค่าจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีลักษณะการหมุนที่นิ่งและมีเสียงรบกวนในตัวมอเตอร์น้อยกว่าที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำ เพราะว่าที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงสัญญาณที่ออกจาก PWM อินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายที่เป็นชานซ์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกสั่นนั้นจะเห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากแหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ จะมีค่ามากกว่าแหล่งจ่ายที่เป็นขายน้ํามาก โดยสามารถสังเกตได้จากค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (THD_v) และ (THD_i) ซึ่งผลของฮาร์มอนิกสั่นเองที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง, ความร้อนในมอเตอร์สูงขึ้นตลอดจนแรงบิดที่กระเพื่อมเนื่องจากผลที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับบวกและลบ

5.1 วิจารณ์การทดลอง

โครงการนี้ทำการทดสอบอยู่ในขอบเขตเพื่อศึกษาถึงค่าความสูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า โดยในการทดสอบนั้นอาจมีข้อผิดพลาดอันเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละครั้งที่ทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล โดยทีมงานผู้จัดทำพยายามควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดมีน้อยที่สุดเพื่อให้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการทดสอบนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาโครงการนี้เพิ่มเติม และเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ตามมาตรฐานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์โดยประมาณ เนื่องจากค่าต่างๆเหล่านี้ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าทอร์ค กำลังกล กำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะปฏิบัติงานจริงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราควรทำความเข้าใจในหลักการทดสอบได้แก่ การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์(resistance method) การทดสอบขณะไม่มีโหลด(no-load test) การทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์ (Block-rotor test) โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 method F มีรายละเอียดของ Nameplate ดังตารางที่ ก-1

INDUCTION MOTOR 3 PHASE 3 HP TYPE SF-JR			
HERTZ	50	60	FRAME 100L
VOLT	220 380	220 380	RATING CONT
AMP	8.7 5	8.3 4.8	INS CLASS F
RPM	1420	1710	AMB.TEMP 40 °C
HIS.C	4004		WEIGHT 24 Kg.

ตารางที่ ก-1 Name plate ของมอเตอร์

ก-1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ (Parameter test)

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 มีขั้นตอนในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้คือ การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์(R_1) , การทดสอบขณะไร้ภาระทางกล (no-load test) และการทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์ (Block rotor test)

ก-1.1 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า	1	ตัว
- ดิจิตอลพาวเวอร์มิเตอร์ 3 เฟส	1	ตัว
- 3 phase variac	1	ตัว
- Synchronous generator	1	ตัว
- Junction box	2	ชุด
- เครื่องมือวัดความต้านทาน (resistance method)	1	ชุด
- Tachometer	1	ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- ปลั๊ก 3 ตา 2 ชุด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

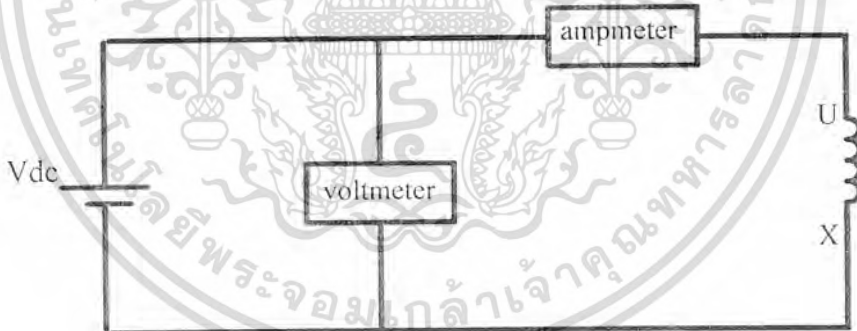
- เครื่องวัดอุณหภูมิขดลวด	1	ชุด
- สายต่อวงจร	30	เส้น
- Torque detector	1	ตัว
- Torque meter	1	ตัว

ก-1.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์ (R_1)

การทดสอบหาค่า R_1 เฉพาะส่วนที่แยกออกจาก R_2 , X_1 และ X_2 เรียกว่า การทดสอบแบบ DC TEST หรือ resistance method ซึ่งโดยพื้นฐานถ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ เนื่องจากเป็นกระแสตรงจึงไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันให้เกิดในวงจรของโรเตอร์ รวมทั้งไม่มีผลต่อการไหลของกระแสโรเตอร์ จึงทำให้ค่า Reactance ของมอเตอร์มีค่าเป็น 0 เมื่อมีการจ่ายกระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่จำกัดขนาดการไหลของกระแสในมอเตอร์โดยเฉพาะคือ ความต้านทานสเตเตอร์ (R_1) นั่นเอง

ค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_2) มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ R_2 เป็นตัวกำหนดรูปร่างของ Torque-speed curve รวมทั้งกำหนดความเร็วในขณะที่เกิดการลุดกระชากของแรงบิด ในการหาค่าความต้านทานโรเตอร์หรือ R_2 โดยเฉพาะต้องหาค่า R_1 ซึ่งสามารถหาค่าออกจากความต้านทานรวมได้

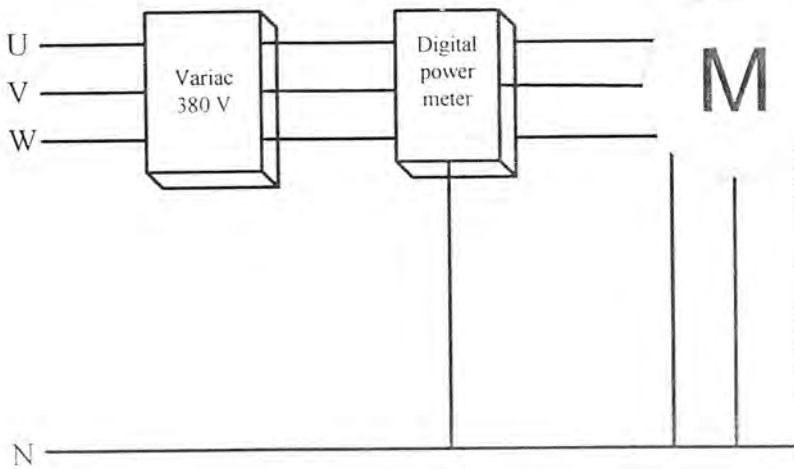


รูปที่ ก-1 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

- การทดสอบขณะไม่มีโหลด (no-load test)

ทำการทดสอบที่สัปดาห์ไฟฟ้าและความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ไม่มีภาระทางกล แล้วบันทึกค่า V_0 , I_0 และ มุม กำลังไฟฟ้า, ความต้านทานที่สเตเตอร์, อุณหภูมิ โดยกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก, ขดลวดสเตเตอร์, และความสูญเสียเนื่องจากการหมุนวงจรทดสอบแสดงตามรูปที่ ก-2

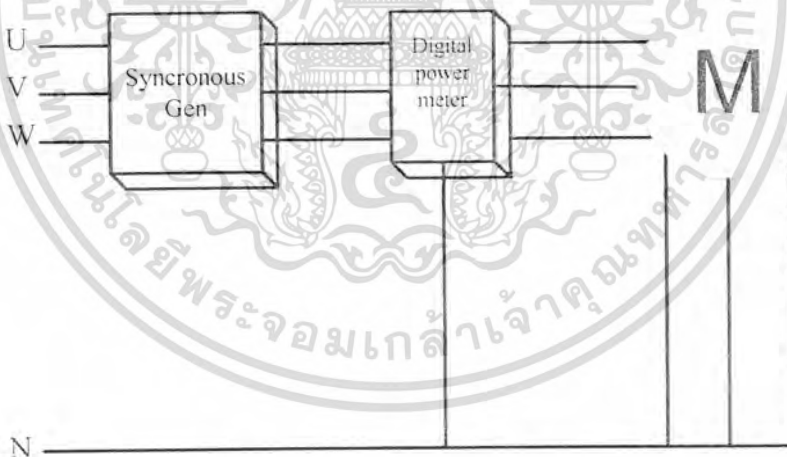
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 วงจรการทดสอบขณะไม่มีโหลด

-การทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์ (Block rotor test)

จะทำการทดสอบโดยการยึดตัวหมุนให้หยุดนิ่ง แล้วค่อยปรับสวิตช์คาไฟฟ้าจนกระทั่งกระแสที่ป้อนเข้าเป็นค่าที่พิกัด และป้อนความถี่ที่ 25% ตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 ของความถี่พิกัดมอเตอร์ โดยการใช้ ซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวจ่ายให้ แล้วบันทึกค่าเงินเดียวกันทำ no-load ด้วย Digital power meter วงจรการทดสอบแสดงตามรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 วงจรการทดสอบยึดโรเตอร์

- การทดสอบหาค่าสลลิป

การทดสอบหาค่าสลลิปทำได้โดยการติดแถบสะท้อนไว้ที่เพลลาของโรเตอร์ Tachometer จะวัดค่าความเร็วทางกลที่เพลลาโรเตอร์ด้วยหลักการสะท้อนของแสงสามารถคำนวณหาค่าสลลิปได้จาก

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบหาค่า Friction and Windage losses

การหาค่า Friction and Windage losses ทำได้โดยจ่ายแรงดันที่พิกัดและจะลดแรงดันลงไปเรื่อยๆ จากนั้นก็นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟโดยให้แกนนอน เป็นแรงดันยกกำลังสอง ส่วนแกนตั้งเป็น $P_{out} - 3I^2R$ วงจรการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ ก-2

การทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์(R_1)

ที่อุณหภูมิ 23.5° c ขดลวด UX=3.1 , VY=3.1, WZ=3.1 โอห์ม

การทดสอบไร้ภาระ (no-load test)

Vphase	I _{line}	Power	angel	R _{stator}	Temp
221.9	2.348	178.5	83.45	3.156	28.2

ตารางที่ ก-2 ค่าที่ได้จากการทดสอบไร้ภาระ (no-load test) และนำไปใช้คำนวณ

U X = 3.16 โอห์ม V Y = 3.14 โอห์ม W Z = 3.17 โอห์ม

YOKOGAWA	Uover:	40ns	2.5MS/s			
CHI	600Vpk	40ns	2.5MS/s			
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	1 219.957	223.653	222.361	0.000	221.990	0.000
Uma[V]	1 222.465	226.178	225.352	0.000	224.665	0.000
Udc[V]	1 0.034	0.393	0.178	-0.057	0.201	-0.057
Uac[V]	1 219.957	223.653	222.361	0.000	221.990	0.000
Irms[A]	1 2.166	2.489	2.390	0.000	2.348	0.000
Ima[A]	1 2.144	2.489	2.378	0.000	2.337	0.000
Idc[A]	1 0.011	0.010	0.007	0.010	0.009	0.010
Iac[A]	1 2.166	2.489	2.390	0.000	2.348	0.000
P [W]	1 0.0643k	0.0893k	0.0249k	-0.0000k	0.1785k	-0.0000k
S [VA]	1 0.4764k	0.5568k	0.5313k	0.0000k	1.5645k	0.0000k
Q [var]	1 0.4721k	0.5496k	0.5308k	0.0000k	1.5524k	0.0000k
λ []	1 0.13490	0.16044	0.04683	Error	0.11408	Error
φ [°]	1G 82.25	G 80.77	G 87.32	Error	83.45	Error
fU [Hz]	1 49.961	49.944	49.964	Error	---	---
fI [Hz]	1 Error	Error	Error	Error	---	---
U+pk[V]	1 299.88	305.41	300.84	1.53	---	---
U-pk[V]	1 -299.11	-304.54	-300.74	-1.71	---	---
I+pk[A]	1 3.32	3.76	3.61	0.23	---	---
I-pk[A]	1 -3.25	-3.70	-3.61	-0.25	---	---
CfU []	1 1.363	1.366	1.353	Error	---	---
CfI []	1 1.532	1.511	1.513	Error	---	---
FfU []	1 1.098	1.098	1.096	Error	---	---
FfI []	1 1.122	1.111	1.116	Error	---	---
Z [Ω]	1 101.553	89.8398	93.0559	Error	283.708	Error
Rs [Ω]	1 13.6992	14.4135	4.35818	Error	32.3648	Error

Stopped 148

2005/01/25 12:37:18

รูปที่ ก-4 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไร้ภาระ(no-load test)

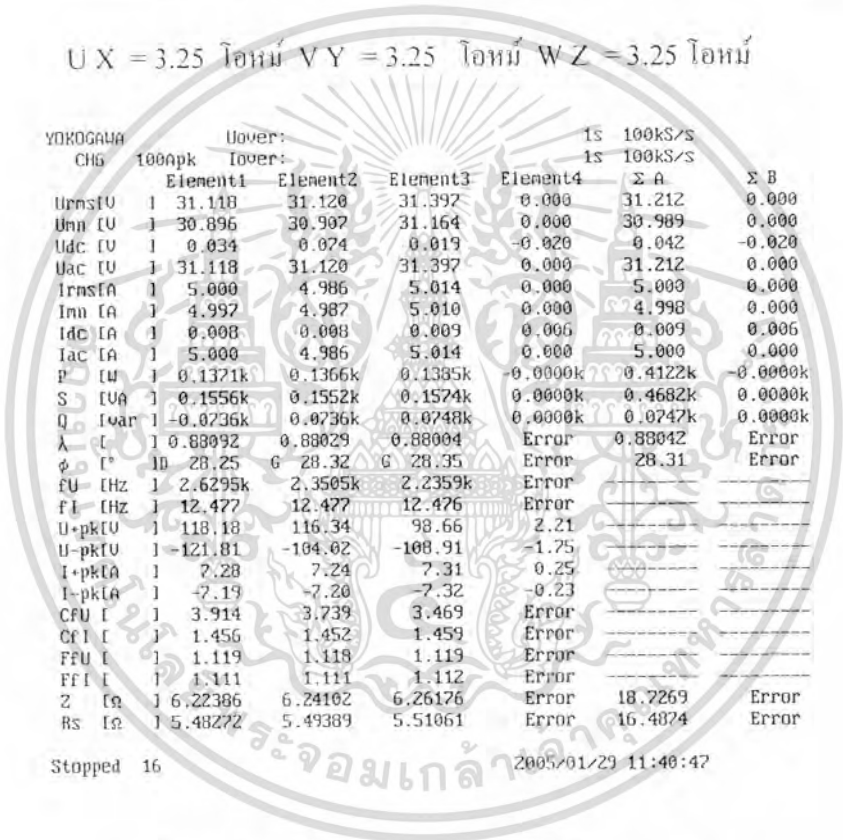
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบยัดโรเตอร์ (Block-rotor test)

V_{phase}	I_{line}	Power	Angle	R_{stator}	Temp
31.21	5	412.2	28.31	3.25	34.5

ตารางที่ ก-3 ค่าที่ได้จากการทดสอบยัดโรเตอร์ (Block-rotor test) และนำไปใช้คำนวณ

$U_X = 3.25$ โอห์ม $V_Y = 3.25$ โอห์ม $W_Z = 3.25$ โอห์ม



YOKOGAWA CHG	1000pk	Uover: 10over:	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
UmsVU	1	31.118	31.120	31.397	0.000	31.212	0.000	0.000
UmsIU	1	30.896	30.907	31.164	0.000	30.989	0.000	0.000
UdcIU	1	0.034	0.074	0.019	-0.020	0.042	-0.020	-0.020
UacIU	1	31.118	31.120	31.397	0.000	31.212	0.000	0.000
ImnsIA	1	5.000	4.986	5.014	0.000	5.000	0.000	0.000
ImnIA	1	4.997	4.987	5.010	0.000	4.998	0.000	0.000
IdcIA	1	0.008	0.008	0.009	0.006	0.009	0.006	0.006
IacIA	1	5.000	4.986	5.014	0.000	5.000	0.000	0.000
P	1W	0.1371k	0.1366k	0.1385k	-0.0000k	0.4122k	-0.0000k	-0.0000k
S	1VA	0.1556k	0.1552k	0.1574k	0.0000k	0.4682k	0.0000k	0.0000k
Q	1var	-0.0736k	0.0736k	0.0748k	0.0000k	0.0747k	0.0000k	0.0000k
λ	1	0.88092	0.88029	0.88004	Error	0.88042	Error	Error
φ	1°	28.25	28.32	28.35	Error	28.31	Error	Error
fU	1Hz	2.6295k	2.3505k	2.2359k	Error			
fI	1Hz	12.477	12.477	12.476	Error			
U+pkIU	1	118.18	116.34	98.66	2.21			
U-pkIU	1	-121.81	-104.02	-108.91	-1.75			
I+pkIA	1	7.28	7.24	7.31	0.25			
I-pkIA	1	-7.19	-7.20	-7.32	-0.23			
CFU	1	3.914	3.739	3.469	Error			
CfI	1	1.456	1.452	1.459	Error			
FFU	1	1.119	1.118	1.119	Error			
FfI	1	1.111	1.111	1.112	Error			
Z	1Ω	6.22386	6.24102	6.26176	Error	18.7269	Error	Error
Rs	1Ω	5.48272	5.49389	5.51061	Error	16.4874	Error	Error

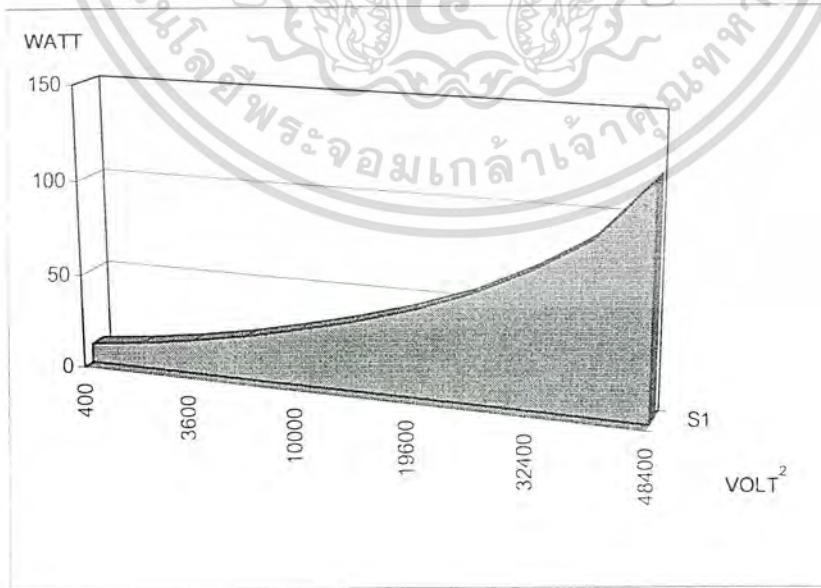
Stopped 16 2005/01/29 11:40:47

รูปที่ ก-5 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยัดโรเตอร์ (Block-rotor test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

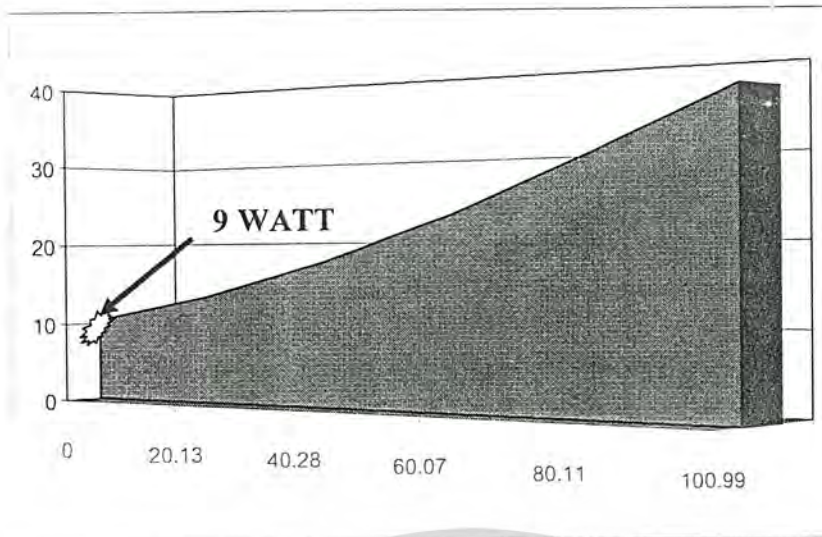
Vp	Po	Io	Stator 3I ² R	Po-3i ² R	R avg
20.13	11	0.301	0.844	10.156	3.106
40.28	14.6	0.351	1.149	13.451	3.11
60.07	20	0.472	2.08	17.92	3.119
80.11	26.8	0.606	3.465	23.335	3.146
100.99	35.2	0.76	5.456	29.744	3.154
120.14	44.6	0.907	7.798	36.802	3.16
140.22	56.6	1.077	11.02	45.58	3.167
159.97	71.7	1.267	15.28	56.42	3.173
180.61	93.4	1.531	22.382	71.018	3.183
199.77	121	1.831	32.084	88.916	3.19
220.35	170.6	2.28	49.904	120.696	3.2

ตารางที่ ก-4 การทดสอบหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ ก-6 (ก) การพล็อตกราฟระหว่าง $P_0 - 3I_0^2 R$ กับ V^2 ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า

(ข) รูปขยายสเกลหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า

จากตารางที่ ก-4 สามารถหาค่า Friction and Windage losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 3 แรงม้า จากการพล็อตให้แกน x เป็นค่าแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง (V^2) ส่วนแกน y เป็นค่า Friction and Windage losses โดยเมื่อเราพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟวิ่งไปตัดแกน x ที่ประมาณ 9 วัตต์ ดังนั้นเราจึงได้ค่า Friction and Windage losses = 9 วัตต์

จากตารางที่ ก-2, ก-3 ค่าที่ได้จากการทดสอบไร้ภาระ (no-load test) และ ค่าที่ได้จากการทดสอบขั้วดีโรเตอร์ (Block-rotor test) นำไปใช้คำนวณเพื่อหาค่า VAR_o , VAR_b จากสมการ

$$VAR_o = \sqrt{(mV_o I_o)^2 - P_o^2}$$

$$VAR_o = \sqrt{(3 \times 221.99 \times 2.348)^2 - 178.5^2}$$

$$= 1552.8 \text{ W}$$

$$VAR_b = \sqrt{(mV_{2,b} I_{1,b})^2 - P_{1,b}^2}$$

$$VAR_b = \sqrt{(3 \times 31.21 \times 5)^2 - 412.2^2}$$

$$= 221.93 \text{ W}$$

จากข้อมูลที่ได้ข้างต้นสามารถคำนวณหาค่าของ X_1 และ X_m ได้โดยขั้นแรกจะต้องกำหนดค่า X_1 และ X_m ด้วยการสมมติค่าเริ่มต้นขึ้นมาก่อน จากนั้นทำการคำนวณซ้ำด้วยการวนลูปไปเรื่อยจนกระทั่งค่า X_1 และ X_m ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกว่าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1%
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_m = \frac{mV_0^2}{VAR_0 - mI_0^2 X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2$$

$$X_{1,b} = \frac{VAR_b}{mI_{1,b}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)$$

$$X_1 = \frac{f}{f_b} X_{1,b}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

รอบที่ 1 กำหนดให้ X_1 และ X_m มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$X_m = \frac{3 \times 220.99^2}{1552.8 - 3 \times 2.348^2 \times 1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{1}} \right)^2$$

$$= 24.038 \text{ ohm / phase}$$

$$X_{1,b} = \frac{221.93}{3 \times 5^2 (1+1+1)} (1+1)$$

$$= 1.9725 \text{ ohm / phase}$$

$$X_1 = \frac{50}{12.5} \times 1.975$$

$$= 7.8911 \text{ ohm / phase}$$

รอบที่ 2 กำหนดให้ X_1 และ X_m มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากข้อที่ 1 จะได้

$$X_m = \frac{3 \times 220.99^2}{1552.8 - 3 \times 2.348^2 \times 7.891} \left(\frac{1}{1 + \frac{7.891}{24.0381}} \right)^2$$

$$= 58.8656 \text{ ohm / phase}$$

$$X_{1,b} = \frac{221.93 (1+7.891/24.0381)}{3 \times 5^2 (1+1+7.891/24.0381)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.6882 \text{ ohm / phase}$$

$$X_1 = \frac{50}{12.5} \times 1.6882$$

$$= 6.7527 \text{ ohm / phase}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของ } X_m = \left| \frac{58.8656 - 24.0381}{58.8656} \right| = 59.16 \%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของ } X_1 = \left| \frac{6.7527 - 7.8911}{6.7527} \right| = 16.85 \%$$

ค่าของ X_1 และ X_m ดังตัวอย่างที่คำนวณยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ จะต้องคำนวณหาโดยการวนลูป จนกระทั่งมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% หรือจนกระทั่งมีค่าคงที่ดังแสดงตามตารางที่ ก-5

ครั้งที่	X_m	$X_{1,b}$	x_1	%ERROR	
				X_m	x_1
1	24.0381	1.9728	7.8911		
2	58.8656	1.6882	6.7527	59.16%	16.85%
3	80.7552	1.5725	6.2901	27.10%	7.355
4	87.7559	1.535	6.1401	7.97%	2.44%
5	88.9082	1.5296	6.1183	1.29%	0.35%
6	89.0778	1.5288	6.1152	0.19%	0.05%
7	89.1023	1.5287	6.1147	0.02%	0.0085

ตารางที่ ก-5 ค่า X_1 และ X_m จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Std 112-1996

จากตารางที่ ก-5 จะได้ว่าค่าของ $X_m = 89.1023 \text{ ohm / phase}$ และ $X_1 = 6.1147 \text{ ohm / phase}$

คำนวณหาค่าความต้านทาน R_c และ R_2 สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กได้ดังนี้

$$P_{\text{core}} = P_o - P_{f \& w} - 3I_o^2 R_1$$

$$P_{\text{core}} = 178.5 - 9 - 3 \times 2.348^2 \times 3.15$$

$$P_{\text{core}} = 117.31 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถหาค่า R_c ได้ดังนี้

$$G_c = \frac{P_{core}}{mV_0^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m} \right)^2$$

$$G_c = \frac{117.31}{3 \times 220.99^2} \left(1 + \frac{6.1147}{89.1023} \right)^2$$

$$= 0.0009 \text{ mho/phase}$$

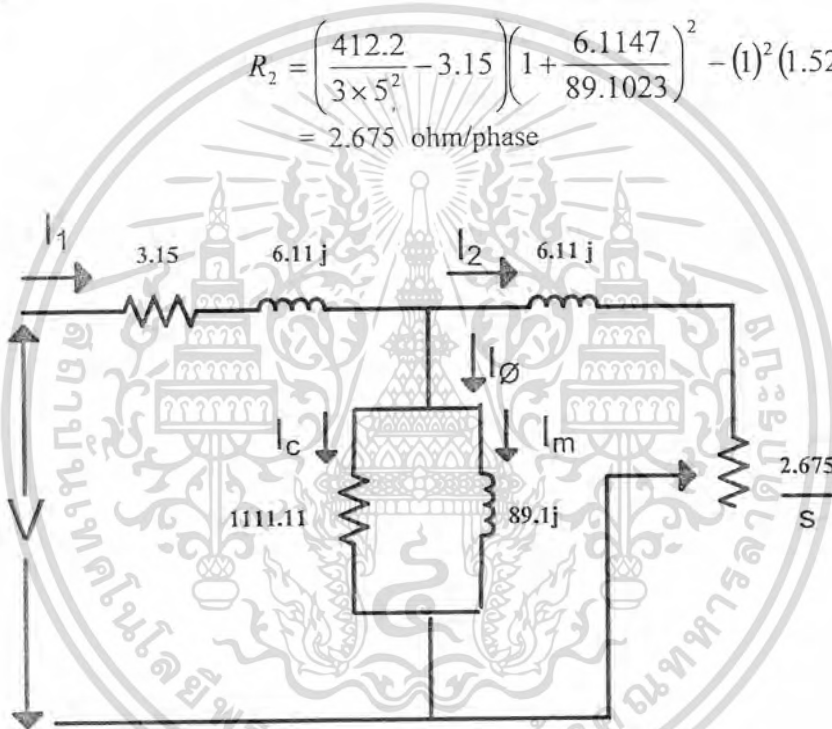
$$R_c = 1/0.0009$$

$$= 1.11 \text{ k ohm}$$

หา R_2 ได้ดังนี้

$$R_2 = \left(\frac{412.2}{3 \times 5^2} - 3.15 \right) \left(1 + \frac{6.1147}{89.1023} \right)^2 - (1)^2 (1.5287 \times 0.0009)$$

$$= 2.675 \text{ ohm/phase}$$



รูปที่ ก-7 วงจรสมมูลแบบมาตรฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ผลการทดสอบ No-load

จากการทดสอบ No-load ซึ่งเป็นการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยในตารางที่ ข-1 ถึง ข-3 เป็นตารางผลการทดสอบ No-load โดยการทดสอบจะควบคุมที่ความถี่ Fundamental ให้คงที่แล้วเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าโดยให้อัตราส่วน แรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz จะใช้ แรงดันพิกัด 220 V ที่ความถี่ 40 Hz จะใช้แรงดันพิกัด 176 V ที่ความถี่ 30 Hz จะใช้แรงดันพิกัด 132 V

VOLT	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)			TOTAL	P _{core} (W)
	U	V	W	U	V	W	U	V	W		
30	30.2	30	30.3	0.31	0.32	0.31	4.66	4.66	4.67	13.99	4.08
40	40.4	40.3	40.4	0.36	0.36	0.36	5.4	5.33	5.32	16.05	5.83
60	60.43	60.4	60.43	0.48	0.49	0.48	7	7.1	7.12	21.22	10.04
80	80.23	80.3	80.23	0.62	0.62	0.62	9.2	9.33	9.34	27.87	15.24
100	100.2	100.28	100.2	0.77	0.77	0.77	12	12.1	12.13	36.23	21.63
120	120.3	120.28	120.31	0.93	0.94	0.93	15.32	15.33	15.33	45.98	28.81
140	140.21	140.3	140.22	1.1	1.2	1.1	19.3	19.43	19.32	58.05	37.62
160	160.32	160.3	160.31	1.3	1.3	1.33	24.56	24.66	24.67	73.89	48.17
180	180.41	180.4	180.4	1.55	1.58	1.55	31.32	31.33	31.35	94	62.30
200	200.12	200.1	200.12	1.86	1.86	1.86	41.56	41.66	41.65	124.87	83.18
220	220.03	220.1	220.02	2.31	2.33	2.31	57.3	57.33	57.34	171.97	112.54

ตารางที่ ข-1 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็นขายน้ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz

VOLT	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)			TOTAL	P _{core} (W)
	U	V	W	U	V	W	U	V	W		
30	30.2	30.1	30.2	0.33	0.32	0.33	3.5	3.35	3.5	10.35	0.32
40	40.2	40.1	40.21	0.4	0.41	0.4	4.1	4.12	4.11	12.33	1.82
60	60.43	60.4	60.43	0.57	0.58	0.58	6.3	6.23	6.33	18.86	6.68
80	80.23	80.21	80.23	0.76	0.75	0.76	8.6	8.58	8.62	25.8	11.34
100	100.2	100.2	100.21	0.97	0.95	0.95	10.98	10.9	10.99	32.87	15.34
120	120.31	120.28	120.32	1.19	1.14	1.18	16.66	16.65	16.66	49.97	27.81
140	140.2	140.19	140.23	1.45	1.46	1.44	23.1	22.95	23.3	69.35	40.75
160	160.31	160.3	160.33	1.81	1.82	1.81	32.33	32.23	32.33	96.89	56.93
176	176.4	176.4	176.41	2.25	2.26	2.26	45.66	45.63	45.67	136.96	79.69

ตารางที่ ข-2 การทดสอบ *No-load* ที่แหล่งจ่ายเป็นขายน้ที่ความถี่ *Fundamental 40 Hz*

VOLT	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)			TOTAL	P _{core} (W)
	U	V	W	U	V	W	U	V	W		
30	30.12	30.1	30.22	0.39	0.38	0.39	3.65	3.68	3.63	10.96	0.52
40	40.1	40.05	40.12	0.51	0.51	0.52	4.3	4.23	4.41	12.94	1.38
60	60.3	60.28	60.34	0.75	0.74	0.75	6.32	6.3	6.33	18.95	4.63
80	80.2	80.18	80.21	1.02	1	1.03	10.12	10.1	10.12	30.34	11.31
100	100.21	100.19	100.21	1.33	1.3	1.33	15.23	15.21	15.22	45.66	19.94
120	120.34	120.29	120.34	1.79	1.77	1.79	25.66	25.5	25.68	76.84	37.56
132	140.18	140.18	140.21	2.27	2.25	2.27	37.2	37.01	37.21	111.42	53.73

ตารางที่ ข-3 การทดสอบ *No-load* ที่แหล่งจ่ายเป็นขายน้ที่ความถี่ *Fundamental 30 Hz*

ตารางที่ ข-4 ถึงตารางที่ ข-6 เป็นตารางบันทึกผลการทดสอบ No-load เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 50,40 และ 30 Hz เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความถี่ Fundamental ให้คงที่แล้วปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ Fundamental นั้นๆ

ความถี่ สวิตซ์ซิ่ง	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)			TOTAL	P _{core} (W)	PF
	U	V	W	U	V	W	U	V	W			
0.5kHz	253.3	253.2	253.31	2.21	2.2	2.18	62.33	62.09	62.35	186.77	132.03	0.11
1.5 kHz	253.4	253.1	253.2	2.2	2.21	2.2	60.71	60.66	60.65	182.02	126.87	0.1
3 kHz	253.32	253	253.3	2.19	2.2	2.2	60.02	59.89	60.08	179.99	125.25	0.1

ตารางที่ ข-4 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz

ความถี่ สวิตซ์ซิ่ง	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)			TOTAL	P _{core} (W)	PF
	U	V	W	U	V	W	U	V	W			
0.5kHz	231.21	231.03	231.22	2.54	2.53	2.53	59.33	59.25	59.31	177.89	108.40	0.11
1.5 kHz	231.02	231.01	231.12	2.56	2.53	2.55	58.56	58.66	58.63	175.85	105.40	0.11
3 kHz	231.08	231	231.1	2.55	2.5	2.55	58.3	58.32	58.34	174.96	104.51	0.1

ตารางที่ ข-5 การทดสอบ No-load ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz

ความถี่ สวิตซ์ซิ่ง	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER(W)			TOTAL	P _{core} (W)	PF
	U	V	W	U	V	W	U	V	W			
0.5kHz	200.1	200.01	200.09	2.65	2.6	2.6	55.89	55.9	55.88	167.67	92.31	0.12
1.5 kHz	200.1	200	200.05	2.57	2.55	2.45	54.05	54.1	54.2	162.35	90.93	0.11
3 kHz	201.02	200.01	200	2.63	2.66	2.64	54.23	54.3	54.3	162.83	88.47	0.1

ตารางที่ ข-6 การทดสอบ *No-load* ที่แหล่งจ่ายเป็น *PWM* อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ *Fundamental 30 Hz*



ข.2 ผลการทดสอบ On-load

ในการทดสอบการจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการจ่ายโหลดที่ 10-100 % ตามตารางที่ข-8 ถึง ข-10 เป็นการจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นชานน์ ซึ่งในการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขนาดของค่าแรงดันไฟฟ้า fundamental เกี่ยวกับขนาดแรงดันไฟฟ้า fundamental ของPWM อินเวอร์เตอร์

% LOAD	OUTPUT SINE WAVE AT 50 HZ															
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	PF	Ploss (W)	%Eff
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL						
27.72	220.46	222.55	220.81	2.41	2.8	2.55	271	306	225	802	4	1482	0.012	0.4677	181.54	77.36
35.97	220.17	222.04	220.15	2.56	2.98	2.68	339	380	289	1008	5.2	1479	0.014	0.5558	203.03	79.85
44.77	220.6	224.01	222.54	2.82	3.2	2.94	403	450	364	1217	6.5	1473	0.018	0.6102	215	82.34
53.51	220.95	222.37	220.78	3.04	3.43	3.13	479	527	437	1443	7.8	1467	0.022	0.6809	246.34	82.94
61.24	219.04	222.84	221.37	3.25	3.71	3.38	539	607	504	1650	9	1455	0.03	0.7219	279.39	83.06
70.47	219.62	223.32	221.81	3.57	3.99	3.66	618	680	587	1885	10.4	1449	0.034	0.7578	307.72	83.67
76.93	220.59	221.41	220.99	3.83	4.2	3.84	682	737	641	2060	11.4	1443	0.038	0.7903	338.22	83.5
84.68	217.57	221.17	219.24	4.12	4.55	4.18	755	825	720	2300	12.6	1437	0.042	0.8155	404.88	82.4
92.83	219.45	219.98	219.8	4.56	4.87	4.65	852	889	779	2520	13.9	1428	0.048	0.8361	442.46	82.4
97.5	220.49	225.22	222.66	4.58	5.09	4.61	869	957	824	2650	14.6	1428	0.048	0.8326	467.83	82.3
99.75	220.56	224.16	223.2	4.71	5.2	4.85	893	986	882	2761	15	1422	0.052	0.8398	529.46	80.83

ตารางที่ ข-7 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชานน์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz

% LOAD	OUTPUT SINE WAVE AT 40 HZ															
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	PF	Ploss (W)	%EFF
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL						
18.24	175.68	175.03	175.56	2.57	2.46	2.46	207	189	208	604	3.3	1182	0.015	0.4605	196.72	67.48
30.64	175.36	174.62	175.04	2.9	2.79	2.81	314	297	313	924	5.6	1170	0.025	0.6204	238.22	74.22
38.1	175.06	174.47	174.74	3.08	3	3.03	362	351	364	1077	7	1164	0.03	0.6755	223.19	79.26
41.27	175.1	174.24	174.76	3.21	3.09	3.14	391	374	393	1158	7.6	1161	0.032	0.7016	234.45	79.75
42.78	174.92	174.08	174.69	3.32	3.22	3.26	416	403	418	1237	7.9	1158	0.035	0.723	279.52	77.40
49.02	174.64	173.99	174.17	3.58	3.46	3.5	473	453	469	1395	9.1	1152	0.04	0.7592	297.72	78.66

ตารางที่ ข-8 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชายน้ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz

% LOAD	OUTPUT SINE WAVE AT 30 HZ															
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	PF	Ploss (W)	%EFF
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL						
10.35	129.26	128.65	129.96	2.22	2.15	2.15	117	109	116	342	2.5	885	0.01	0.4133	110.43	67.71
16.79	130.55	130.49	130.65	2.39	2.34	2.36	167	162	169	498	4.1	876	0.02	0.5562	123.11	75.33
21.89	131.49	130.10	130.55	2.65	2.57	2.59	218	210	219	647	5.4	867	0.03	0.6548	157.00	75.73
25.77	131.49	130.90	130.20	2.85	2.77	2.79	255	245	253	753	6.4	861	0.04	0.7089	176.23	76.60
31.48	131.87	130.92	131.86	3.16	3.09	3.12	303	297	304	904	7.9	852	0.05	0.767	199.48	77.93
37.71	130.71	130.38	131.83	3.63	3.63	3.65	373	374	379	1126	9.6	840	0.06	0.8217	281.97	74.96

ตารางที่ ข-9 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็นชานนี้ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz

ในตารางที่ ข-10 ถึงตารางที่ ข-19 เป็นการทดสอบการจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental และ ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่างๆ

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
27.78	251.68	251.35	251.67	2.60	2.53	2.58	269	265	279	813	4	1485	0.01	0.418
35.96	253.81	254.32	255.37	2.86	2.77	2.84	351	343	358	1052	5.2	1479	0.014	0.448
44.78	254.95	253.98	255.13	3.02	3.03	3.02	414	423	420	1257	6.5	1473	0.018	0.544
52.83	249.99	249.75	250.03	3.22	3.21	3.17	491	483	481	1455	7.7	1467	0.022	0.606
60.81	249.74	250.06	251.03	3.46	3.42	3.53	547	556	575	1678	8.9	1461	0.026	0.644
69.41	251.54	251.28	251.49	3.75	3.73	3.68	639	629	627	1895	10.2	1455	0.03	0.675
76.26	251.69	250.12	250.95	4.13	3.97	4.00	724	686	713	2123	11.3	1449	0.034	0.699
83.51	251.49	249.95	251.23	4.42	4.25	4.32	795	756	789	2340	12.4	1440	0.04	0.718
91.69	249.20	249.02	249.03	4.68	4.72	4.63	864	865	848	2577	13.7	1431	0.046	0.737
95.03	248.31	247.09	248.07	4.94	4.75	4.79	918	871	898	2687	14.2	1431	0.046	0.748
98.22	250.40	250.47	250.37	4.95	4.96	4.84	939	931	910	2780	14.8	1419	0.054	0.752

ตารางที่ ข-10 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
27.78	251.68	251.35	251.67	2.60	2.53	2.58	269	265	279	813	108.00	191.28	88.27	76.47	67.50
35.96	253.81	254.32	255.37	2.86	2.77	2.84	351	343	358	1052	68.00	247.03	93.93	76.51	71.87
44.78	254.95	253.98	255.13	3.02	3.03	3.02	414	423	420	1257	88.00	254.87	93.46	79.72	74.51
52.83	249.99	249.75	250.03	3.22	3.21	3.17	491	483	481	1455	98.00	272.7	93.69	81.25	76.13
60.81	249.74	250.06	251.03	3.46	3.42	3.53	547	556	575	1678	107.00	317.03	94.01	81.11	76.24
69.41	251.54	251.28	251.49	3.75	3.73	3.68	639	629	627	1895	86.00	341.65	95.66	81.97	78.41
76.26	251.69	250.12	250.95	4.13	3.97	4.00	724	686	713	2123	96.00	416.32	95.67	80.39	76.91
83.51	251.49	249.95	251.23	4.42	4.25	4.32	795	756	789	2340	111.00	471.07	95.47	79.87	76.25
91.69	249.20	249.02	249.03	4.68	4.72	4.63	864	865	848	2577	212.00	525.05	92.40	79.63	73.57
95.03	248.31	247.09	248.07	4.94	4.75	4.79	918	871	898	2687	123.00	560.16	95.62	79.15	75.69
98.22	250.40	250.47	250.37	4.95	4.96	4.84	939	931	910	2780	115.00	581.88	96.03	79.07	75.93

ตารางที่ ข-10 (ต่อ)การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
27.78	250.43	250.95	250.81	2.42	2.36	2.38	271	264	275	810	4	1485	0.01	0.442
35.96	250.29	250.13	250.76	2.74	2.62	2.68	346	333	356	1035	5.2	1479	0.014	0.513
44.78	251.55	250.60	251.87	2.86	2.73	2.78	423	401	426	1250	6.5	1473	0.018	0.54
52.83	251.51	251.08	251.13	3.13	3.02	3.05	491	471	489	1451	7.7	1467	0.022	0.587
60.81	254.38	253.95	254.22	3.42	3.35	3.31	566	547	550	1668	8.9	1461	0.026	0.6273
69.41	252.90	252.41	253.27	3.65	3.58	3.69	628	620	645	1893	10.2	1455	0.03	0.6617
76.26	253.20	253.36	254.55	3.93	3.94	3.94	704	706	710	2120	11.3	1449	0.034	0.6849
83.51	256.10	255.17	256.40	4.12	4.00	4.12	777	763	792	2338	12.4	1440	0.04	0.6931
91.69	252.16	251.35	253.03	4.50	4.32	4.41	869	831	869	2570	13.7	1431	0.046	0.7207
95.03	251.15	249.63	250.71	4.61	4.49	4.64	894	876	911	2681	14.2	1431	0.046	0.7325
98.22	252.29	250.98	252.45	4.82	4.68	4.71	955	923	944	2777	14.8	1419	0.054	0.737

ตารางที่ ข-11 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
27.78	250.43	250.95	250.81	2.42	2.36	2.38	271	264	275	810	120.00	188.28	87.10	3690.54	66.85
35.96	250.29	250.13	250.76	2.74	2.62	2.68	346	333	356	1035	98.00	230.03	91.35	3486.66	71.05
44.78	251.55	250.60	251.87	2.86	2.73	2.78	423	401	426	1250	102.00	247.87	92.46	3386.65	74.12
52.83	251.51	251.08	251.13	3.13	3.02	3.05	491	471	489	1451	109.00	268.7	93.01	3079.89	75.79
60.81	254.38	253.95	254.22	3.42	3.35	3.31	566	547	550	1668	122.00	307.03	93.18	2781.62	76.03
69.41	252.90	252.41	253.27	3.65	3.58	3.69	628	620	645	1893	98.00	339.65	95.08	2655.81	78.02
76.26	253.20	253.36	254.55	3.93	3.94	3.94	704	706	710	2120	105.00	413.32	95.28	2418.30	76.70
83.51	256.10	255.17	256.40	4.12	4.00	4.12	777	763	792	2338	126.00	469.07	94.89	2372.16	75.85
91.69	252.16	251.35	253.03	4.50	4.32	4.41	869	831	869	2570	228.00	518.05	91.85	2126.19	73.34
95.03	251.15	249.63	250.71	4.61	4.49	4.64	894	876	911	2681	151.00	554.16	94.67	2108.42	75.10
98.22	252.29	250.98	252.45	4.82	4.68	4.71	955	923	944	2777	125.00	578.88	95.69	2044.71	75.75

ตารางที่ ข-11 (ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซิ่ง 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
27.78	250.53	250.44	251.18	2.49	2.40	2.47	267	261	280	808	4	1485	0.01	0.438
35.96	250.90	250.99	252.02	2.70	2.63	2.70	339	337	355	1031	5.2	1479	0.014	0.5111
44.78	249.73	249.31	249.95	2.79	2.73	2.73	421	409	419	1249	6.5	1473	0.018	0.5459
52.83	259.05	258.19	259.27	3.24	3.12	3.07	498	474	478	1450	7.7	1467	0.022	0.5571
60.81	258.89	258.74	259.41	3.46	3.35	3.44	551	541	565	1657	8.9	1461	0.026	0.6053
69.41	252.36	250.90	252.88	3.66	3.50	3.60	637	611	631	1890	10.2	1455	0.03	0.663
76.26	254.03	252.81	254.18	4.00	3.83	3.90	709	674	707	2090	11.3	1449	0.034	0.6863
83.51	254.99	253.87	254.98	4.15	3.98	4.07	758	724	756	2338	12.4	1440	0.04	0.6952
91.69	254.24	253.53	254.48	4.39	4.34	4.41	857	854	870	2565	13.7	1431	0.046	0.7168
95.03	253.89	253.70	254.72	4.54	4.49	4.55	891	884	899	2675	14.2	1431	0.046	0.7269
98.22	253.75	252.91	253.60	4.76	4.67	4.66	938	915	921	2774	14.8	1419	0.054	0.734

ตารางที่ ข-12 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ 3 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
27.78	250.53	250.44	251.18	2.49	2.40	2.47	267	261	280	808	130	186.28	86.14	76.95	66.28
35.96	250.90	250.99	252.02	2.70	2.63	2.70	339	337	355	1031	110	226.03	90.36	78.08	70.55
44.78	249.73	249.31	249.95	2.79	2.73	2.73	421	409	419	1249	113	246.87	91.70	80.23	73.58
52.83	259.05	258.19	259.27	3.24	3.12	3.07	498	474	478	1450	132	267.7	91.66	81.54	74.73
60.81	258.89	258.74	259.41	3.46	3.35	3.44	551	541	565	1657	145	296.03	91.95	82.13	75.53
69.41	252.36	250.90	252.88	3.66	3.50	3.60	637	611	631	1890	110	336.65	94.50	82.19	77.67
76.26	254.03	252.81	254.18	4.00	3.83	3.90	709	674	707	2090	140	383.32	93.72	81.66	76.53
83.51	254.99	253.87	254.98	4.15	3.98	4.07	758	724	756	2338	133	469.07	94.62	79.94	75.63
91.69	254.24	253.53	254.48	4.39	4.34	4.41	857	854	870	2565	236	513.05	91.57	80.00	73.26
95.03	253.89	253.70	254.72	4.54	4.49	4.55	891	884	899	2675	165	548.16	94.19	79.51	74.89
98.22	253.75	252.91	253.60	4.76	4.67	4.66	938	915	921	2774	138	575.88	95.26	79.24	75.48

ตารางที่ ข-12(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์จึง 3 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
18.29	230.81	231.03	231.52	2.66	2.58	2.61	228	221	234	681	3.3	1185	0.012	0.375
30.59	230.94	230.76	230.89	3.06	2.98	3.03	331	327	337	995	5.6	1173	0.022	0.474
37.01	226.78	226.73	227.33	3.14	3.09	3.16	382	376	392	1150	6.8	1164	0.03	0.539
41.27	226.90	226.63	227.06	3.33	3.27	3.27	428	420	428	1276	7.6	1161	0.032	0.569
42.78	224.84	224.89	225.40	3.40	3.33	3.37	442	433	444	1319	7.9	1158	0.035	0.580

ตารางที่ ข-13 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
18.29	230.81	231.03	231.52	2.66	2.58	2.61	228	221	234	681	69	271.70	90.80	60.10	54.57
30.59	230.94	230.76	230.89	3.06	2.98	3.03	331	327	337	995	80	307.49	92.56	69.10	63.95
37.01	226.78	226.73	227.33	3.14	3.09	3.16	382	376	392	1150	50	321.56	95.83	72.04	69.04
41.27	226.90	226.63	227.06	3.33	3.27	3.27	428	420	428	1276	74	352.45	94.52	72.38	68.41
42.78	224.84	224.89	225.40	3.40	3.33	3.37	442	433	444	1319	56	361.52	95.93	72.59	69.63

ตารางที่ ข-13 (ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
18.29	231.02	230.15	231.73	2.62	2.58	2.58	210	220	218	648	3.3	1185	0.012	0.360
30.59	230.17	229.59	230.46	3.02	2.94	2.97	331	319	339	989	5.6	1173	0.022	0.480
37.01	225.61	225.94	225.97	3.16	3.08	3.14	380	377	387	1144	6.8	1164	0.03	0.540
41.27	230.46	2229.18	229.85	3.28	3.29	3.30	422	421	422	1267	7.6	1161	0.032	0.556
42.78	225.39	224.89	225.76	3.37	3.31	3.35	437	432	444	1313	7.9	1158	0.035	0.580

ตารางที่ ข-14 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5 KHZ															
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)			
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM	
18.29	231.02	230.15	231.73	2.62	2.58	2.58	210	220	218	648	107	238.70	85.83	63.16	54.21	
30.59	230.17	229.59	230.46	3.02	2.94	2.97	331	319	339	989	93	301.49	91.40	69.52	63.54	
37.01	225.61	225.94	225.97	3.16	3.08	3.14	380	377	387	1144	81	315.56	93.39	72.42	67.63	
41.27	230.46	2229.18	229.85	3.28	3.29	3.30	422	421	422	1267	95	343.45	93.02	72.89	67.81	
42.78	225.39	224.89	225.76	3.37	3.31	3.35	437	432	444	1313	88	354.52	93.71	72.98	68.39	

ตารางที่ ข-14(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
18.29	230.10	230.74	230.91	2.53	2.42	2.49	216	210	227	643	3.3	1185	0.012	0.380
30.59	227.25	227.44	227.59	2.93	2.83	2.87	328	316	331	975	5.6	1173	0.022	0.497
37.01	225.28	225.69	225.81	3.10	3.04	3.10	373	364	371	1113	6.8	1164	0.03	0.534
41.27	223.56	223.41	223.77	3.23	3.20	3.22	416	412	421	1249	7.6	1161	0.032	0.579
42.78	221.13	221.38	222.49	3.29	3.24	3.29	426	423	435	1284	7.9	1158	0.035	0.590

ตารางที่ ข-15 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 40 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
18.29	230.10	230.74	230.91	2.53	2.42	2.49	216	210	227	643	112	233.70	85.17	63.65	54.21
30.59	227.25	227.44	227.59	2.93	2.83	2.87	328	316	331	975	115	287.49	89.45	70.51	63.07
37.01	225.28	225.69	225.81	3.10	3.04	3.10	373	364	371	1113	114	284.56	90.71	74.43	67.52
41.27	223.56	223.41	223.77	3.23	3.20	3.22	416	412	421	1249	113	325.45	91.70	73.94	67.81
42.78	221.13	221.38	222.49	3.29	3.24	3.29	426	423	435	1284	126	326.52	91.06	74.57	67.91

ตารางที่ ข-15(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 40 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 30 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
10.79	201.21	202.01	201.89	2.68	2.64	2.63	165	164	166	495	2.6	888	0.002	0.445
18.84	199.75	199.94	200.65	2.89	2.80	2.87	230	226	238	694	4.6	876	0.02	0.484
21.97	198.36	198.25	199.71	2.98	2.92	2.97	260	257	269	786	5.4	870	0.03	0.517
26.57	200.07	200.26	200.86	3.23	3.15	3.20	311	305	314	930	6.6	861	0.04	0.565
31.99	198.53	198.84	199.42	3.49	3.43	3.49	355	353	363	1070	8	855	0.05	0.308
39.2	197.03	196.72	197.15	3.94	3.88	3.92	437	430	440	1307	10	840	0.06	0.405

ตารางที่ ข-16 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 30 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 0.5 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
10.79	201.21	202.01	201.89	2.68	2.64	2.63	165	164	166	495	26	253.36	95.01	48.82	46.38
18.84	199.75	199.94	200.65	2.89	2.80	2.87	230	226	238	694	41	272.27	94.42	60.77	57.38
21.97	198.36	198.25	199.71	2.98	2.92	2.97	260	257	269	786	43	294.28	94.81	62.56	59.32
26.57	200.07	200.26	200.86	3.23	3.15	3.20	311	305	314	930	55	335.21	94.42	63.96	60.38
31.99	198.53	198.84	199.42	3.49	3.43	3.49	355	353	363	1070	80	354.08	93.04	66.91	62.25
39.2	197.03	196.72	197.15	3.94	3.88	3.92	437	430	440	1307	93	427.80	93.36	67.27	62.80

ตารางที่ ข-16(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 30 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
10.79	202.54	201.59	202.77	2.63	2.63	2.59	142	150	160	452	2.6	888	0.002	0.284
18.84	200.31	200.27	200.96	2.84	2.76	2.77	235	222	228	685	4.6	876	0.02	0.408
21.97	199.12	199.20	199.92	2.95	2.90	2.96	256	257	263	776	5.4	870	0.03	0.49
26.57	199.53	199.18	199.46	3.16	3.05	3.14	306	297	312	915	6.6	861	0.04	0.49
31.99	197.82	197.26	197.33	3.35	3.32	3.40	342	343	353	1038	8	855	0.05	0.522
39.2	196.52	196.57	197.07	3.90	3.83	3.88	432	424	433	1289	10	840	0.06	0.565

ตารางที่ ข-17 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 30 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 1.5 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
10.79	202.54	201.59	202.77	2.63	2.63	2.59	142	150	160	452	73	210.36	86.10	46.54	46.03
18.84	200.31	200.27	200.96	2.84	2.76	2.77	235	222	228	685	56	263.27	92.44	38.43	56.91
21.97	199.12	199.20	199.92	2.95	2.90	2.96	256	257	263	776	53	284.28	93.61	36.63	59.32
26.57	199.53	199.18	199.46	3.16	3.05	3.14	306	297	312	915	75	320.21	92.42	35.00	60.08
31.99	197.82	197.26	197.33	3.35	3.32	3.40	342	343	353	1038	115	322.08	90.03	31.03	62.09
39.2	196.52	196.57	197.07	3.90	3.83	3.88	432	424	433	1289	114	409.80	91.87	31.79	62.67

ตารางที่ ข-17(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 50 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3 KHZ													
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				TORQUE (N-m)	SPEED (rpm)	SLIP	P F
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL				
10.79	201.88	202.73	202.71	2.58	2.48	2.54	146	143	157	446	2.6	888	0.002	0.290
18.84	199.22	199.56	200.24	2.73	2.68	2.69	220	218	226	664	4.6	876	0.02	0.410
21.97	195.78	196.59	197.40	2.69	2.63	2.70	236	236	247	719	5.4	870	0.03	0.455
26.57	196.99	196.53	196.66	3.05	3.03	3.03	301	298	299	898	6.6	861	0.04	0.500
31.99	195.95	195.69	196.10	3.34	3.28	3.30	343	338	344	1025	8	855	0.05	0.527
39.2	200.03	200.00	201.03	3.52	3.92	3.97	411	416	423	1250	10	840	0.06	0.530

ตารางที่ ข-18 การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

% LOAD	OUTPUT INVERTER AT 30 HZ SWITCHING FREQUENCY AT 3 KHZ														
	VOLTAGE (V)			CURRENT (A)			POWER (W)				POWER LOSS (W)		EFFICIENCY (%)		
	U	V	W	U	V	W	U	V	W	TOTAL	INVERTER	MOTOR	INVERTER	MOTOR	SYSTEM
10.79	201.88	202.73	202.71	2.58	2.48	2.54	146	143	157	446	84	204.36	84.15	87.85	45.59
18.84	199.22	199.56	200.24	2.73	2.68	2.69	220	218	226	664	81	242.27	89.13	90.43	56.61
21.97	195.78	196.59	197.40	2.69	2.63	2.70	236	236	247	719	113	227.28	86.42	90.49	59.10
26.57	196.99	196.53	196.66	3.05	3.03	3.03	301	298	299	898	100	303.21	89.98	92.62	59.60
31.99	195.95	195.69	196.10	3.34	3.28	3.30	343	338	344	1025	130	309.08	88.74	93.19	61.98
39.2	200.03	200.00	201.03	3.52	3.92	3.97	411	416	423	1250	162	370.80	88.53	94.37	62.27

ตารางที่ ข-18(ต่อ) การทดสอบจ่ายโหลดที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ Fundamental 30 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

ตารางที่ ข-19 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็นขายนที่ความถี่Fundamental50 Hz

order	% โหลด										
	27.72	35.97	44.77	53.51	61.24	70.47	76.93	84.68	92.83	97.5	99.75
1	313.67	313.92	315.01	314.77	314.56	313.61	313.40	313.04	314.59	313.68	313.77
2	0.54	0.61	0.55	1.17	0.78	0.48	0.50	0.68	0.71	0.63	0.67
3	11.50	11.26	11.23	10.31	10.93	7.67	8.34	8.15	7.42	7.97	7.85
4	0.39	0.29	0.27	0.78	0.45	0.50	0.38	0.51	0.27	0.38	0.39
5	2.19	3.04	3.18	2.03	2.75	2.85	3.77	3.00	3.12	3.30	3.14
6	0.10	0.20	0.21	0.65	0.35	0.36	0.55	0.55	0.19	0.43	0.39
7	2.91	3.48	3.62	3.70	3.60	3.63	4.55	3.79	3.98	4.11	3.96
8	0.13	0.24	0.13	0.57	0.31	0.67	0.81	0.73	0.31	0.62	0.56
9	0.75	0.97	1.21	1.47	1.22	1.85	1.79	1.94	2.29	2.00	2.08
10	0.11	0.17	0.16	0.48	0.27	0.50	0.39	0.18	0.06	0.21	0.15
11	0.87	0.46	0.50	0.70	0.55	0.51	0.62	0.60	0.52	0.58	0.56
12	0.15	0.14	0.33	0.42	0.29	0.16	0.18	0.14	0.10	0.14	0.13
13	0.61	0.71	0.62	0.68	0.67	0.83	0.68	0.98	0.96	0.87	0.94
14	0.17	0.27	0.26	0.69	0.41	0.31	0.24	0.69	0.59	0.51	0.60
15	0.25	0.27	0.59	0.38	0.41	0.48	0.80	0.55	0.61	0.65	0.61
16	0.20	0.22	0.38	0.57	0.39	0.18	0.43	0.22	0.13	0.26	0.20
17	0.34	0.44	0.66	0.69	0.59	0.43	0.58	0.46	0.37	0.47	0.43
18	0.44	0.63	0.86	0.73	0.74	0.50	0.85	0.55	0.14	0.51	0.40
19	0.51	1.18	1.50	1.44	1.37	1.02	1.18	0.79	0.40	0.79	0.66
20	1.57	1.90	3.51	4.38	3.26	4.99	7.09	7.46	5.65	6.74	6.62
21	4.86	5.59	4.81	4.64	5.01	1.85	1.81	0.77	0.39	0.99	0.72
22	1.29	1.19	0.97	1.98	1.38	0.92	0.81	0.31	0.45	0.52	0.43
23	0.35	0.34	1.39	0.66	0.80	0.34	0.59	0.48	0.38	0.48	0.45
24	0.23	0.40	0.63	0.45	0.49	0.43	0.46	0.57	0.27	0.44	0.43
25	0.19	0.35	0.69	0.52	0.52	0.25	0.34	0.26	0.20	0.27	0.25
26	0.22	0.22	0.52	0.33	0.35	0.29	1.00	0.52	0.45	0.66	0.54
27	0.59	0.52	0.46	0.44	0.48	0.42	0.18	0.23	0.08	0.16	0.16
28	0.19	0.26	0.35	0.40	0.34	0.15	0.09	0.31	0.11	0.17	0.19
29	0.13	0.23	0.26	0.32	0.27	0.26	0.18	0.18	0.08	0.15	0.14
%THD_v	4.3	4.2	7.47	7	5.98	4.32	4.42	3.98	6.21	4.87	5.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-20 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่
Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

order	% โหลด										
	27.72	35.97	44.77	53.51	61.24	70.47	76.93	84.68	92.83	97.5	99.75
1	313.73	313.82	313.56	313.43	314.30	314.84	313.89	313.88	312.50	312.45	313.83
2	2.44	2.68	1.53	3.26	2.12	1.82	2.95	1.57	1.10	1.71	1.40
3	11.14	10.87	9.67	7.52	9.38	10.30	5.11	9.15	8.40	8.97	8.33
4	1.45	1.32	0.51	1.68	0.92	1.63	2.17	0.72	0.65	0.46	0.76
5	4.31	6.50	3.37	2.76	6.98	6.99	3.30	7.95	7.17	8.29	3.14
6	1.11	0.78	0.58	2.78	0.79	0.67	2.61	0.14	0.76	0.70	0.61
7	8.36	1.96	9.81	7.00	3.03	3.17	4.57	2.24	0.69	0.44	7.41
8	1.77	1.09	1.22	2.33	0.36	1.05	2.53	0.31	0.46	0.14	0.57
9	0.83	1.75	1.73	1.41	1.30	2.88	0.92	1.22	2.55	1.95	1.57
10	1.74	1.06	0.41	2.83	0.92	0.49	3.11	0.29	0.18	0.89	0.53
11	5.12	2.64	5.44	3.78	2.97	2.45	3.23	1.69	1.98	2.65	6.05
12	1.81	1.16	0.53	3.16	0.98	0.91	2.96	0.53	0.82	0.69	0.42
13	6.80	3.04	6.96	5.88	4.36	4.47	6.54	4.27	3.75	3.05	8.79
14	2.34	1.25	0.91	2.81	1.11	1.07	2.75	0.42	0.90	0.63	1.65
15	3.13	1.96	3.20	3.65	1.29	0.49	3.65	1.55	0.74	1.61	3.74
16	2.12	0.66	0.28	3.27	2.01	1.08	2.87	0.42	1.38	0.44	1.41
17	7.59	5.45	6.98	5.36	5.24	3.07	5.36	4.00	4.18	3.49	6.92
18	3.18	1.17	1.40	4.03	2.48	1.90	3.35	0.79	1.45	0.98	0.50
19	11.12	6.01	8.91	11.50	10.57	8.61	10.67	8.90	10.79	10.94	5.38
20	2.55	1.19	2.46	6.84	4.89	6.69	6.05	8.67	8.20	9.21	5.28
21	11.68	7.94	3.75	1.93	2.76	0.54	6.92	2.07	4.14	2.83	3.58
22	3.89	4.14	1.88	3.28	1.63	3.15	5.11	1.31	1.43	1.76	1.81
23	16.49	12.40	13.15	13.67	9.01	10.18	14.29	10.93	11.54	11.57	16.40
24	4.21	4.60	3.89	4.24	2.38	3.41	4.75	1.95	1.70	2.02	1.94
25	19.27	17.63	16.67	18.18	13.24	15.93	19.67	15.32	14.70	14.18	16.68
26	3.54	5.07	0.98	3.99	5.28	3.65	4.17	1.92	2.25	2.74	2.50
27	13.92	13.52	8.47	14.18	10.03	12.15	14.61	8.84	8.13	8.32	8.90
28	5.59	7.16	4.58	5.47	7.20	4.96	6.44	3.56	4.02	4.57	5.06
29	41.22	38.16	37.28	39.56	36.71	36.67	38.25	32.46	30.48	31.02	35.36
%THD _v	47.43	47.22	47.01	46.93	47.7	47.86	47.06	47.32	46.82	46.8	47.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-21 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่
Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

order	% โหลด										
	27.72	35.97	44.77	53.51	61.24	70.47	76.93	84.68	92.83	97.5	99.75
1	313.7	313.6	312.8	314.8	316	316	314.9	313.4	312.8	312.1	314.4
2	1.563	1.658	1.808	2.838	1.301	0.842	1.869	2.344	1.788	0.947	1.216
3	11.34	11.71	6.806	7.893	8.898	8.667	10.41	9.89	9.165	8.422	8.945
4	0.943	1.207	0.796	0.44	0.751	0.146	0.458	2.029	0.744	0.217	0.313
5	3.038	5.782	3.909	3.359	6.582	6.12	5.614	9.259	8.549	7.896	2.739
6	0.885	0.65	1.17	0.342	0.246	0.273	0.6	1.451	0.325	0.328	0.282
7	9.572	2.097	10.11	5.28	4.435	3.324	2.607	1.008	0.957	1.267	6.636
8	1.131	0.503	1.062	0.612	0.308	0.082	1.663	1.585	0.744	0.599	0.862
9	3.154	1.415	2.737	1.848	1.454	1.662	2.741	3.1	2.512	3.383	1.291
10	0.604	0.767	0.74	0.458	0.121	0.736	0.871	1.632	0.43	0.268	0.257
11	6.158	2.637	4.577	3.062	2.089	2.488	1.122	3.898	3.38	3.231	5.625
12	0.117	0.735	1.104	0.121	0.424	0.375	1.225	1.926	0.311	0.695	1.319
13	6.782	3.639	5.366	5.427	5.699	5.04	6.364	6.071	3.217	3.527	9.242
14	1.436	0.687	1.609	0.518	0.459	0.963	0.864	2.546	1.23	0.876	1.035
15	2.326	1.807	1.929	2.045	1.449	2.062	1.626	2.901	1.201	0.474	3.837
16	1.179	0.626	1.99	0.617	0.817	0.795	0.776	2.572	0.445	0.751	0.595
17	8.555	5.497	5.94	3.82	3.963	4.46	2.67	6.109	3.314	4.06	5.054
18	0.428	1.288	3.095	1.02	1.249	0.555	2.412	2.956	1.078	0.73	1.873
19	9.154	6.163	9.712	8.939	9.243	6.987	10.07	13.23	11.28	11.9	9.079
20	2.54	2.859	4.076	2.373	4.381	7.352	6.643	10.05	9.03	8.512	5.882
21	8.766	5.64	0.752	3.605	2.511	2.092	2.78	5.389	3.685	4.644	3.167
22	2.171	0.83	2.976	2.935	2.371	1.937	1.841	1.979	1.602	1.719	1.785
23	14.54	10.39	14.19	11.57	10.2	10.72	10.37	12.76	11.36	12.37	15.3
24	1.177	1.744	3.848	1.933	2.439	2.629	2.901	2.181	1.889	2.332	3.652
25	15.71	15.13	17.05	14.37	15.44	16.72	16.57	16.2	14.08	14.35	18.05
26	3.621	3.816	4.255	1.978	2.986	1.917	1.254	1.128	1.952	1.794	1.256
27	8.767	9.392	14.94	8.131	10.71	8.483	8.328	11.5	8.544	8.11	8.91
28	5.585	5.199	7.384	4.517	4.816	3.86	4.84	3.804	3.734	2.908	4.593
29	37.76	34.16	42.65	35.29	35.31	32.3	33.48	34.54	31.67	30.4	35.61
%THD _v	47.21	47.32	46.97	47.43	47.84	47.79	47.48	47.31	46.92	46.87	47.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-22 แสดงค่าอันดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่
Fundamental 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

order	% โหลด										
	27.72	35.97	44.77	53.51	61.24	70.47	76.93	84.68	92.83	97.5	99.75
1	313	314.7	312.8	314.2	312.5	314.5	312.5	314.4	314.8	313.8	314.5
2	2.925	1.463	1.808	1.238	2.138	0.578	1.715	1.216	1.741	2.677	0.578
3	10.83	10.34	6.806	8.655	8.15	9.183	8.967	8.945	7.393	10.87	9.183
4	1.224	0.943	0.796	0.225	2.062	0.27	0.463	0.313	1.201	1.321	0.27
5	6.2	3.038	3.909	4.12	8.871	6.545	8.294	2.739	3.363	6.501	6.545
6	0.821	0.885	1.17	0.758	1.697	0.67	0.704	0.282	0.912	0.783	0.67
7	7.716	8.572	10.11	10.38	1.964	1.37	0.444	6.636	5.691	1.961	1.37
8	0.229	1.131	1.062	0.075	1.183	1.189	0.138	0.862	1.188	1.094	1.189
9	0.586	3.154	2.737	2.16	3.719	2.419	1.95	1.291	1.764	1.75	2.419
10	0.401	0.604	0.74	0.398	1.552	0.247	0.894	0.257	0.551	1.063	0.247
11	3.632	6.158	4.577	5.654	3.211	1.883	2.645	5.625	1.894	2.644	1.883
12	1.311	0.117	1.104	0.21	1.441	0.119	0.693	1.319	0.934	1.156	0.119
13	4.299	6.782	5.366	6.523	4.805	3.561	3.049	9.242	6.025	3.042	3.561
14	0.834	1.436	1.609	0.363	1.693	0.656	0.628	1.035	0.462	1.247	0.656
15	0.98	2.326	1.929	3.201	3.08	1.259	1.61	3.837	2.079	1.956	1.259
16	0.506	1.179	1.99	0.79	2.107	0.323	0.438	0.595	0.784	0.663	0.323
17	1.981	8.555	5.94	6.966	5.579	3.461	3.486	5.054	2.779	5.454	3.461
18	0.634	0.428	3.095	0.784	2.157	0.944	0.977	1.873	1.459	1.172	0.944
19	2.812	9.154	9.712	8.737	11.66	9.638	10.94	9.079	8.747	6.008	9.638
20	1.044	2.54	4.076	2.105	7.641	9.01	9.209	5.882	3.074	1.192	9.01
21	6.275	8.766	0.752	4.561	6.46	2.691	2.826	3.167	3.314	7.944	2.691
22	0.133	2.171	2.976	3	2.816	1.616	1.762	1.785	2.64	4.145	1.616
23	0.583	14.54	14.19	14.64	13.88	11.58	11.57	15.3	9.968	12.4	11.58
24	0.553	1.177	3.848	1.439	2.464	1.619	2.017	3.652	3.479	4.6	1.619
25	3.277	15.71	17.05	14.84	16.63	14.86	14.18	18.05	16.22	17.63	14.86
26	1.237	3.621	4.255	2.992	1.576	1.583	2.745	1.256	1.562	5.074	1.583
27	0.781	8.767	14.94	9.594	11.21	7.788	8.316	8.91	7.679	13.52	7.788
28	1.273	5.585	7.384	5.656	3.786	4.238	4.57	4.593	5.881	7.164	4.238
29	32.16	37.76	42.65	38.7	33.82	31.51	31.02	35.61	35.02	38.16	31.51
%THD _v	47.18	47.25	46.92	47.16	46.97	47.23	46.95	47.09	47.2	47.08	47.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-23 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นชายนที่ความถี่ Fundamental 50 Hz

order	% โหลด										
	27.72	35.97	44.77	53.51	61.24	70.47	76.93	84.68	92.83	97.5	99.75
1	3.67	3.79	4.12	4.42	4.81	5.20	5.53	5.98	6.42	6.65	6.85
2	0.10	0.10	0.04	0.12	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08	0.04	0.07
3	0.08	0.14	0.10	0.11	0.12	0.13	0.10	0.11	0.09	0.10	0.08
4	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02
5	0.05	0.09	0.10	0.11	0.15	0.16	0.21	0.20	0.23	0.29	0.28
6	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01
7	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.04	0.08	0.05	0.03	0.07	0.07
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01
12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
14	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
15	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
16	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
%THD _v	6.2	11.88	15.15	14.74	9.69	12.5	9.87	10.23	13.9	15.52	15.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-24 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz
ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 0.5 kHz

order	% โหลด										
	27.7	36	44.8	53.5	61.2	70.5	76.9	84.7	92.8	97.5	99.8
1	3.50	3.82	4.13	4.35	4.59	5.03	5.42	5.98	6.23	6.65	6.73
2	0.04	0.05	0.08	0.08	0.06	0.11	0.05	0.12	0.06	0.05	0.06
3	0.06	0.03	0.06	0.01	0.03	0.11	0.07	0.05	0.05	0.15	0.16
4	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.06	0.03	0.03	0.00
5	0.05	0.12	0.09	0.15	0.17	0.19	0.15	0.12	0.16	0.20	0.04
6	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02
7	0.20	0.12	0.27	0.21	0.21	0.20	0.17	0.18	0.19	0.12	0.32
8	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01
9	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01
10	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01
11	0.06	0.03	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.04	0.11
12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
13	0.07	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.05	0.03	0.11
14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
15	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01
16	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
17	0.06	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04
%THDi	18.6	23.27	19.6	24.33	43.42	31.93	38.52	20	53.33	25.21	25.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-25 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ Fundamental 50 Hz
ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 1.5 kHz

order	% โหลด										
	27.7	36	44.8	53.5	61.2	70.5	76.9	84.7	92.8	97.5	99.8
1	3.35	3.68	3.91	4.28	4.49	5.02	5.41	5.71	5.91	6.38	6.52
2	0.08	0.03	0.05	0.06	0.10	0.07	0.07	0.06	0.09	0.10	0.11
3	0.03	0.04	0.02	0.06	0.07	0.08	0.04	0.08	0.06	0.07	0.07
4	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01
5	0.06	0.15	0.13	0.17	0.18	0.16	0.14	0.21	0.17	0.19	0.07
6	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
7	0.20	0.12	0.25	0.19	0.20	0.20	0.18	0.18	0.17	0.16	0.30
8	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02
9	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03
10	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.06	0.02	0.08	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.02	0.11
12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
13	0.07	0.03	0.05	0.06	0.09	0.07	0.08	0.07	0.05	0.04	0.10
14	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
15	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
16	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
17	0.06	0.05	0.06	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.05
%THD _v	13.29	23.93	13.41	16.79	32.73	22.13	22.91	14.38	44.9	17.25	23.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-26 แสดงค่าอันดับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ *Fundamental* 50 Hz ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 3 kHz

order	% โหลด											
	27.7	36	44.8	53.5	61.2	70.5	76.9	84.7	92.8	97.5	99.8	
1	3.44	3.67	3.97	4.37	4.71	4.95	5.45	5.67	5.94	6.32	6.52	
2	0.07	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.08	0.10	
3	0.05	0.03	0.09	0.06	0.06	0.01	0.07	0.05	0.16	0.08	0.15	
4	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.00	
5	0.05	0.14	0.11	0.15	0.17	0.19	0.13	0.18	0.18	0.18	0.06	
6	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	
7	0.19	0.12	0.28	0.21	0.20	0.20	0.16	0.18	0.17	0.14	0.32	
8	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	
9	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	
10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	
11	0.05	0.05	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.11	
12	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	
13	0.07	0.03	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	0.12	
14	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	
15	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	
16	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
17	0.04	0.04	0.05	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	
%THD,	11.94	24.97	12.29	17.76	22.73	22.22	16.9	13.23	8.35	16.48	19.43	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] IEEE Standards 122-1996, “ IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generator”, American National (ANSI), 1996.
- [2] A.E. Fitzgerald ,Charles Kingsley, Jr ,Stephen D.Umans “Eletric Machinery”, McGraw-Hill Book Company, 2003, pp 306-347.
- [3] Gopal K. Dubey “Power Semiconductor Controlled Drives”, Prentice-Hall International, Inc, 1989, pp 203-265.
- [4] รศ.ดร.โคทม อาริยา, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2” หน้า 21-24, ปี 2544.
- [5] รศ. พิชิต ถ้ายอง, “เครื่องจักรไฟฟ้า 1 “ หน้า 107-162, ปี 2540.
- [6] รศ.ดร. วิริยะ พิเศษจำเริญ, “ เอ.ซี. มอเตอร์คอนโทรล” หน้า 127-186.
- [7] รศ.ดร. มนต์ สังวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, “คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์”, สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, ปี 2543.
- [8] “ 46 เรื่องน่ารู้ไฟฟ้าทั่วไป, ต่อลงดิน, ฮาร์มอนิกส์” ซีดียูเคชั่น, ปี 2546.

