

ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์

STUDY THE PARAMETERS OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR

BY CONTROLLING THE FREQUENCY OF INVERTER

นายอุทิศรงค์ ศรีโสภะ รหัส 50364782

นางสาวสุวิมล เวฬุ รหัส 50364898

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... ๗ 9 อ.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 1574055/
เลขเรียกหนังสือ..... ๒๕.
เลขประจำตัว..... ๑/๒๓๘

2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553



ชื่อหัวข้อโครงการ	ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์
ผู้ดำเนินโครงการ	นายฤทธิรงค์ ศรีโสภณ รหัส 50364782
	นางสาวสุวิมล เวฬุ รหัส 50364898
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2553

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขับเคลื่อนต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะข้อดีของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีราคาถูกและสะดวกต่อการบำรุงรักษา อย่างไรก็ตามการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำมักเป็นปัญหาเสมอ ในปัจจุบันสามารถแก้ปัญหาได้โดยการประยุกต์ใช้งานด้วยอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งยังสามารถทำให้การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงและสามารถประหยัดพลังงาน โครงการนี้จึงได้นำเสนอผลกระทบของการนำอินเวอร์เตอร์มาควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความถี่, ฮาร์โมนิกส์ และกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงาน ได้ถูกศึกษา

**Project title** Study the Parameters of Three Phase Induction Motor by Controlling the Frequency of Inverter

**Name** Mr. Rittirong Srisopa ID. 50364782  
Ms. Suwimol Welu ID. 50364898

**Project advisor** Assistant Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic year** 2010

---

### **Abstract**

Induction motor is recently used in many applications in particular for electric drives in manufactory due to its advantages for example low cost and easy maintenance. However, speed control of the induction motor is usually questioned, but the problem of its speed control is lately solved as purposing inverter. Furthermore, the operation of induction motor can be better performance and lower energy saving. This project is purposed effect of the applied inverter to control speed of induction motor. Particularly, frequency, harmonic and current of the motor is studied.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเรื่องศึกษาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือรวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำโครงการนี้จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ขอขอบคุณ นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ และ นายณัฐพล สิริศรีจันทร์ นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการแนะนำอุปกรณ์ในการทดสอบผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยควบคุมอินเวอร์เตอร์จนทำให้โครงการครั้งนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้ดำเนินโครงการ นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำโครงการนี้ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้ส่งเสียค่าเล่าเรียนและเป็นกำลังใจให้รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่เยาว์วัยจนจนถึงปัจจุบัน จนทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้ ทางคณะผู้ดำเนินโครงการจะไม่ลืมพระคุณของทุกท่านที่เราได้กล่าวมาข้างต้นตลอดไป

นายฤทธิรงค์ ศรีโสภะ

นางสาวสุวิมล เวฬุ

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาบัตร .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงาน .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน .....	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน.....	2
1.4 แผนการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	4
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	4
2.1.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	5
2.1.3 สลิป.....	6
2.1.4 การส่งผ่านกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	7
2.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส .....	8
2.3 หลักการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น .....	8
2.3.1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของอินเวอร์เตอร์ .....	9
2.3.2 การควบคุมความเร็วรอบของอินเวอร์เตอร์ .....	10
2.3.3 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ .....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 รูปแบบการนำการควบคุมมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ไปใช้งาน.....	15
2.4 โหลดของมอเตอร์.....	16
2.4.1 การประเมินโหลดของมอเตอร์.....	18
2.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	19
2.5.1 การใช้งานมอเตอร์ให้เหมาะสมกับโหลด.....	21
2.6 เพาเวอร์แฟกเตอร์.....	21
2.6.1 ผลกระทบเนื่องจากเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ.....	22
2.7 ฮาร์โมนิกส์.....	23
2.7.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์.....	23
2.7.2 ผลกระทบอื่นเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์.....	24
2.7.3 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์.....	25
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	27
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	27
3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	33
4.1 ทดสอบการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในความถี่ต่างๆ.....	34
4.2 ทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์แบบไม่มีโหลด.....	35
4.3 ทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์แบบมีโหลด.....	36
4.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	40
4.5 กระแสฮาร์โมนิกส์.....	44
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	54
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	54
5.2 ประเมินผลการทดลอง.....	55
5.3 ปัญหา ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข.....	55
5.4 ข้อดีของการศึกษาผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	56
5.5 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	56
เอกสารอ้างอิง .....	59
ภาคผนวก.....	58
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	76



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ..... 11
2.2	ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่แตกต่างกัน ..... 11
2.3	วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์แต่ละวิธี..... 14
2.4	รูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์โดยวิธี PWM แบบ Sine Wave..... 15
2.5	การสูญเสียประเภทต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ..... 20
2.6	อันดับฮาร์โมนิกส์และลำดับเฟสต่างๆ..... 25
2.7	ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า..... 26
2.8	ค่าขีดจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิกส์..... 26
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สถานะไม่มีโหลด..... 35
4.2	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 30 Hz ..... 36
4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 40 Hz..... 37
4.4	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 50 Hz ..... 38
4.5	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 60 Hz ..... 39
4.6	ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยมีความถี่ 30 Hz..... 40
4.7	ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยมีความถี่ 40 Hz..... 41
4.8	ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยมีความถี่ 50 Hz..... 42
4.9	ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยมีความถี่ 60 Hz..... 43
4.10	กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 30 Hz..... 44
4.11	กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 40 Hz..... 45
4.12	กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 50 Hz..... 46
4.13	กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 60 Hz..... 47

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	4
2.2 การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	6
2.3 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	7
2.4 อินเวอร์เตอร์ .....	8
2.5 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ .....	9
2.6 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ .....	12
2.7 โหลดแรงบิดคงที่ .....	17
2.8 โหลดแรงบิดแปรผัน .....	17
2.9 โหลดกำลังคงที่ .....	17
2.10 การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์ .....	19
2.11 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า .....	22
2.12 ฮาร์โมนิกส์แฝงในลำดับต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นความถี่หลักมูล .....	23
3.1 วงจรการทดลองในสถานะที่มีโหลด .....	27
3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อกับมิเตอร์ที่ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า .....	28
3.3 การต่อวงจรในสถานะไม่มีโหลด .....	29
3.4 อินเวอร์เตอร์ .....	31
3.5 ออสซิลโลสโคป .....	31
3.6 เครื่องวัดกระแส (ต่อกับออสซิลโลสโคป) .....	31
3.7 เครื่องวัดความเร็วรอบ .....	31
3.8 Power & Harmonics Analyzer .....	31
3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	31
3.10 Electrodynamicometer .....	32
3.11 แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส .....	32
3.12 แผนภาพวงจรรวมในการทดลอง .....	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 (ก) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 20 Hz.....	34
(ข) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 30 Hz.....	34
(ค) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 40 Hz.....	34
(ง) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 50 Hz.....	34
(จ) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 60 Hz.....	34
4.2 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 0%.....	35
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 0%.....	35
(ค) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลด 0%.....	35
(ง) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสถานะโหลด 0%.....	35
4.3 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	36
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	36
4.4 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	37
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	37
4.5 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	38
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	38
4.6 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	39
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	39
4.7 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	44
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	44
4.8 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	45
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	45
4.9 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	46
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	46
4.10 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 60 Hz ในสถานะโหลด 50%.....	47
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 60 Hz ในสถานะโหลด 100%.....	47
4.11 แผนภูมิแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ.....	48
4.12 แผนภูมิแสดงกระแสของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ.....	49
4.13 แผนภูมิแสดงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ.....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แผนภูมิแสดงค่า $P_{in}$ และ $P_{out}$ ของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ .....	51
4.15 แผนภูมิแสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ .....	52
4.16 แผนภูมิแสดงค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ .....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็้ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) แบบ 3 เฟส ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านพักอาศัย เช่น ปั้มน้ำ ระบบสายพานลำเลียง พัดลมเป่าอากาศ และคอมเพรสเซอร์ของระบบเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

เนื่องจากความหลากหลายของประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ การควบคุมมอเตอร์จึงจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความต้องการของผู้ใช้ เช่น แรงบิด ความเร็วรอบ รวมไปถึงค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการขับมอเตอร์ ดังนั้น การเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับการใช้งาน รวมถึงการเลือกวิธีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ควรพิจารณาถึงในด้านวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ โดยปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกัน

จากปัญหาที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ โดยนำเสนอหลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยมีการนำเอาอินเวอร์เตอร์เข้ามาเป็นตัวเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน โดยใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสมาควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในสถานะที่ไม่มีโหลดจนถึงสถานะ โหลดเต็มพิกัด



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเข้าใจผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยใช้อินเวอร์เตอร์ ในสถานะที่ไม่มีโหลดจนถึงสถานะโหลดเต็มพิกัด

1.5.2 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยใช้อินเวอร์เตอร์ ในสถานะที่ไม่มีโหลดจนถึงสถานะโหลดเต็มพิกัด

1.5.3 สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่เพื่อให้เกิดประโยชน์

## 1.6 งบประมาณ

1.6.1 ค่ากระดาษและถ่ายเอกสาร	500 บาท
1.6.2 ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ในการสร้างชิ้นงาน	1,000 บาท
1.6.3 ค่าจัดทำรูปเล่ม	500 บาท
รวมเป็นเงิน	<u>2,000</u> บาท

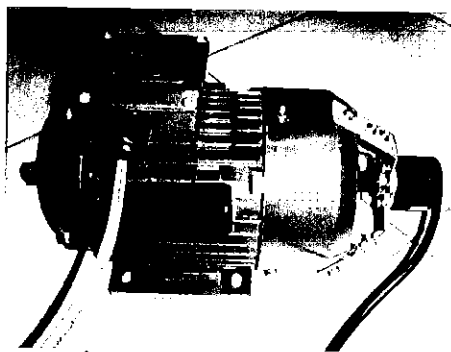
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสแบบเหนี่ยวนำ มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความเร็วรอบคงที่ เนื่องจากความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อนำไปใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมความเร็วแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำให้สามารถควบคุมความเร็ว (Speed) ของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วตามพิกัดของมอเตอร์นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม

#### 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor)

มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพง ต้องการการดูแลรักษาน้อย และมีความเร็วค่อนข้างคงที่ คือ ความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

##### 2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

###### 1. สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีโครงสร้างคล้ายกับของซิงโครนสมอเตอร์ โดยทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนเข้าด้วยกัน และทำเป็นช่องสอดไว้บรรจุขดลวดตัวนำ (Winding)



และจำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ ขณะที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ ส่งผลให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุน (Rotating) ด้วยความเร็ว ที่ถูกเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส ดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อกำหนดให้  $N_s$  = ความเร็วซิงโครนัส

$f$  = ความถี่หลักมูลของไฟฟ้ากระแสสลับ

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

จากสมการที่ (2.1) พบว่า ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะแปรผันตรงกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า แต่เนื่องจากที่เพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะหมุนโดยมีความเร็วรอบน้อยกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนเล็กน้อย ที่ถูกเรียกว่า ความเร็วสลลิป (Slip) ซึ่งมีค่าประมาณ 1% ถึง 3% ขึ้นอยู่กับภาระ (Load) ของมอเตอร์

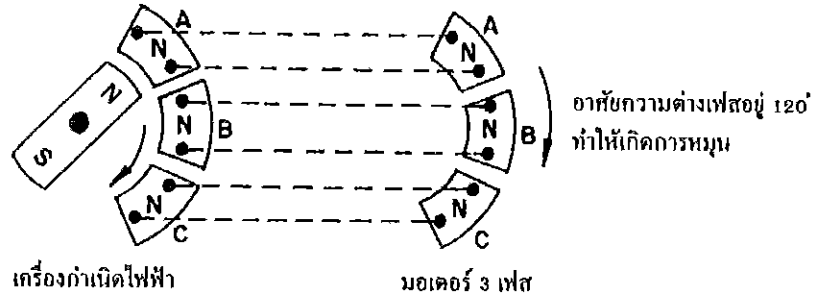
## 2. โรเตอร์ (Rotor)

ส่วนที่หมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกตามโครงสร้างได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบแรก คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และแบบที่สอง คือ โรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound Rotor Motor) ซึ่งในโครงงานที่ศึกษานี้ เลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก มีรูปร่างของโรเตอร์เป็นรูปทรงกระบอก ผิวเรียบๆ โรเตอร์จะเรียง ที่ผิวด้านนอกฝั่งแท่งตัวนำที่ทำจากทองแดงตลอดแนวความยาวของโรเตอร์ ที่ปลายแต่ละด้านของแท่งตัวนำบนโรเตอร์ต่อลวดวงจรด้วยวงแหวนทองแดง สำหรับโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กและกลาง จะใช้แท่งตัวนำอลูมิเนียมฉีดเข้าไปในโรเตอร์

### 2.1.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส จ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์นั้น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้น จะเกิดการผลัดและคู่กับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้จากการคู่และผลัดกัน ระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

หลักการหมุนของสนามแม่เหล็กโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส จากรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงให้เห็นว่า ถ้าเราจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ให้กับขดลวดในสเตเตอร์ในช่วงขณะหนึ่ง สมมติให้เป็นครึ่งไซเคิลบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ด้านขวามือ



รูปที่ 2.2 การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยการต่อไฟฟ้าเฟส A เข้ากับเฟส A ของมอเตอร์, ต่อไฟฟ้าเฟส B เข้ากับเฟส B ของมอเตอร์ และต่อไฟฟ้าเฟส C เข้ากับเฟส C มอเตอร์ เมื่อกระแสไฟฟ้าในด้านครึ่งไซเคิลบวกเฟส A ไหลเข้าไปในขดลวดของเฟส A ของมอเตอร์ จะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในเฟส A ของมอเตอร์นั้น ทำให้เกิดขั้ว N ขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในเฟส A ที่จ่ายให้กับเฟส A ของมอเตอร์อยู่นั้น ค่อยๆ ลดลง อำนาจแม่เหล็กขั้ว N ก็ค่อยๆ ลดอำนาจหรือความเข้มลงด้วย และในขณะเดียวกัน ที่เฟสถัดไปก็จะมีอำนาจแม่เหล็กคล้ายๆ กับเฟส A ในช่วงเวลาถัดไป จนครบ 3 เฟส ในหนึ่งขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (คือเฟส A เฟส B และเฟส C) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกสิ้นสุดเรียบร้อยแล้ว ในครึ่งไซเคิลลบถัดไป ที่ขั้วแม่เหล็กดังกล่าว ก็จะเปลี่ยนสถานะจากขั้ว N ไปเป็นขั้ว S และในอีกหนึ่งขั้วแม่เหล็กถัดไป ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กแรกที่กล่าวถึง ซึ่งลักษณะเช่นนี้ เหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เหมือนกับหมุนไปรอบๆ นี้เรียกสั้นๆ ว่า สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)

### 2.1.3 สลิป (Slip, S)

ในทางปฏิบัตินั้น โรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยปกติแล้วความเร็วของโรเตอร์จะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วนั้น จะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่ออยู่กับมอเตอร์นั้น

ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่ที่สเตเตอร์หรือความเร็วซิงโครนัส ( $N_s$ ) และความเร็วรอบของโรเตอร์ขณะใช้งาน (Actual Speed,  $N$ ) เรียกว่า สลิปของมอเตอร์โดยปกติเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์สลิป สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2.2)$$

$$\%Slip = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \quad (2.3)$$

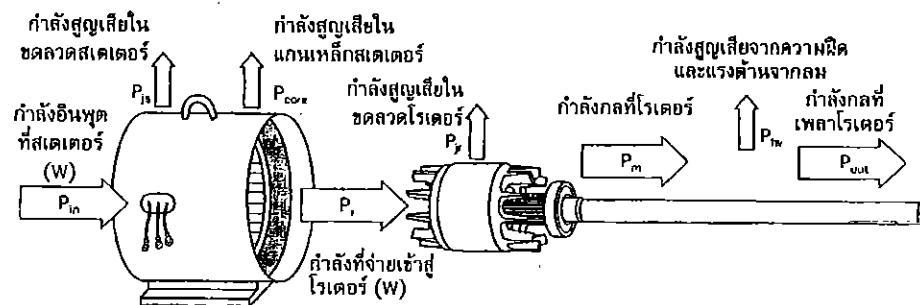
แต่ในบางครั้ง  $N_s - N$  ก็เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip Speed)

จะได้ ความเร็วของโรเตอร์ คือ

$$N = N_s(1 - s) \quad (2.4)$$

#### 2.1.4 การส่งผ่านกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ไปยังเพลลาของมอเตอร์ เป็นไปตามลำดับการไหลของพลังงาน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

กำลังอินพุต เป็นพลังงานไฟฟ้าอินพุต ( $P_{in}$ ) ที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ผ่านขดลวดสเตเตอร์ ที่สเตเตอร์นั้นจะแบ่งการสูญเสียได้ 2 ส่วน ได้แก่ กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ ( $P_{js}$ ) มีค่าเท่ากับ  $I^2R$  และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ ( $P_{core}$ ) กำลังที่เหลือออกมา คือ กำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ ( $P_r$ ) อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ส่งผ่านมายังโรเตอร์นั้น จะมีกำลังสูญเสียจากขดลวดของโรเตอร์ ( $P_{js}$ ) เท่ากับ  $I^2R$  นั่นคือ พลังงานกลที่ออกมาจากโรเตอร์ ( $P_m$ ) คือ ผลต่างของ  $P_r - P_{js}$  ซึ่งพลังงานกลนี้ จะต้องเอาชนะการสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม ซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่เพลลาของโรเตอร์ ( $P_{fw}$ ) จึงจะได้กำลังงานกลที่เพลลา

ของโรเตอร์ ( $P_{out}$ ) ที่สามารถส่งให้กับโหลดได้ จากแผนผังในรูปที่ 2.3 สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ ดังนี้

$$P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (2.5)$$

$$P_{out} = \tau \omega_m \quad (2.6)$$

โดยที่

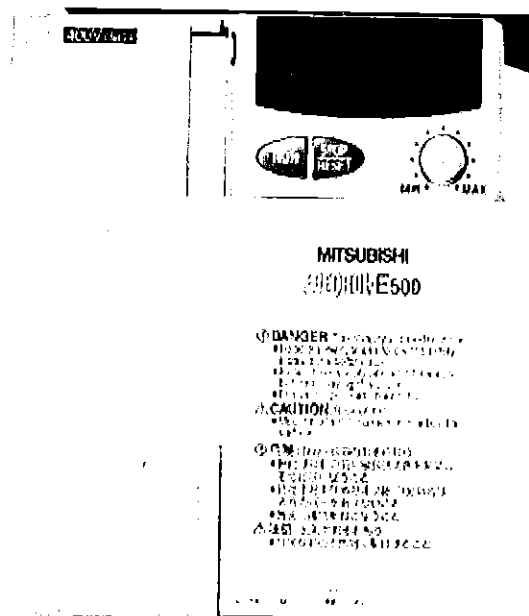
$$\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.8)$$

## 2.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three Phase Inverters)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นิยมถูกเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverters) โดยจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมีหน้าที่หลัก คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 2.4 แสดงอินเวอร์เตอร์ที่มีขายตามทั่วไป

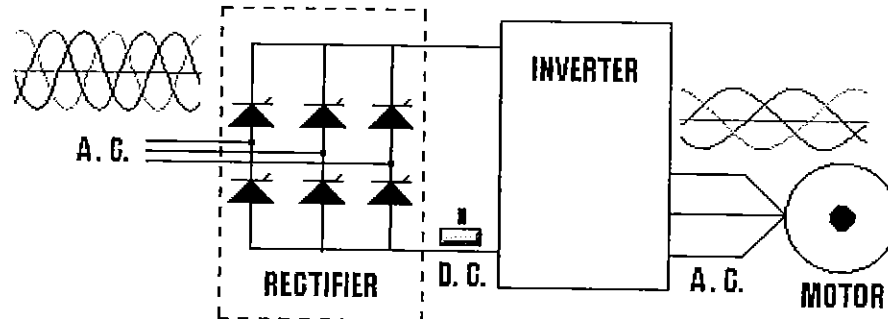


รูปที่ 2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverters)

## 2.3 หลักการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์วิตท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulate, PWM)

### 2.3.1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของอินเวอร์เตอร์

จากรูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่าย ๆ ของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ และมีการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

#### 1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรกติไฟเออร์หรือวงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่ เปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วยเพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียวหรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส (สำหรับอินเวอร์เตอร์บางประเภท จะใช้ SCR ทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรได้)

#### 2. วงจรไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง (DC Link Circuit)

ดีซีลิงก์หรือวงจรเชื่อมโยงทางกระแสตรง คือ วงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแส และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พักตึงแรงดันไฟฟ้า 400 VDC หรือ 800 VDC โดยขึ้นอยู่กับแรงดันของด้านอินพุต ว่าจะเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่ กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องจากการเบรก หรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมากๆ) และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกับมาตกคร่อมคาปาซิเตอร์และทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่าความต้านทานอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และ

ต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

### 3. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด (ส่วนใหญ่จะใช้ IGBT) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation)

### 4. วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุม ทำหน้าที่ รับข้อมูลจากผู้ใช้ เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผลและส่งเอาต์พุตออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ผู้ใช้งานต้องการ

เนื่องจาก การแปลงจากกระแสสลับไปเป็นกระแสสลับโดยตรงเลยนั้น ความถี่สูงสุดที่ได้ทางด้านเอาต์พุต จะไม่เกินความถี่ทางด้านอินพุต ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าที่บอกไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์ แต่การเปลี่ยนจากกระแสสลับไปเป็นกระแสตรงและแปลงกลับมาเป็นกระแสสลับอีกครั้ง จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ได้สูงกว่าความถี่ทางด้านอินพุต

#### 2.3.2 การควบคุมความเร็วรอบโดยอินเวอร์เตอร์

เนื่องจาก ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการซิงโครนัส-สปีด ดังสมการที่ (2.1) พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทาง คือ

1. เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ )
2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ( $f$ )

ดังนั้น หากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ คือ 50 Hz. (หรืออาจเป็น 60 Hz. ในบางประเทศ เช่น อเมริกา) ความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัวก็就会有ความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

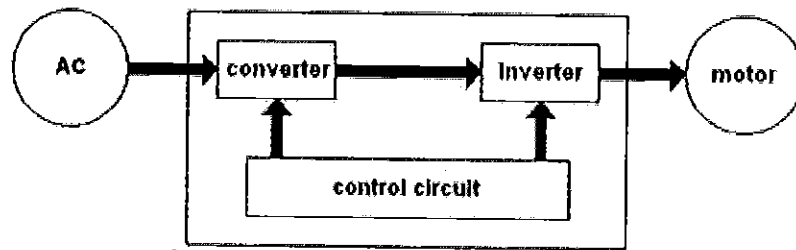
จำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ )	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 Hz. (rpm)	3,000	1,500	1,000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 Hz. (rpm)	3,600	1,800	1,200	900	720	600

จากตารางที่ 2.1 พบว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปครั้งละมากๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3,000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1,500 รอบต่อนาทีหรือจาก 1,500 รอบต่อนาที เปลี่ยนไปเป็น 3,000 รอบต่อนาที (กรณีเปลี่ยนจากการต่อแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กไปเป็นการต่อแบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก หรือจากต่อ 4 ขั้วแม่เหล็กลดลงมาเหลือ 2 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่ละเอียด ทำได้เฉพาะในสภาวะที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญ คือ ต้องใช้มอเตอร์ที่ออกแบบมาพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับความต้องการของงานในหลายๆ ประเภท ที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในสภาวะมีโหลด เพื่อให้ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้น ในกระบวนการผลิตทั่วไป จึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่า เนื่องจาก สามารถควบคุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่แตกต่างกัน

ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (Hz.)	1	10	20	30	40	50
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 Hz. (rpm)	60	600	1,200	1,800	2,400	3,000

### 2.3.3 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยนำพลังงานที่ได้นี้ ไปทำการขับเคลื่อนเครื่องจักรอื่นๆ ต่อไป ความเร็วของมอเตอร์ สามารถกำหนดได้โดย

1. แรงบิดของโหลด
2. จำนวนขั้วของมอเตอร์
3. ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้กับมอเตอร์
4. แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$N_s = \frac{120f}{P} \times (1-s) \quad (2.9)$$

โดย เทอม  $1-s$  กำหนดโดยโหลด

จากสมการที่ (2.9) พบว่า ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้มอเตอร์มีความเร็วเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ โดยให้แรงดันคงที่ จะมีผลทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันควบคู่กับความถี่ด้วย และการที่จะเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ต่อเป็นอินพุตเข้าไปในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเลือกความถี่ได้ เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการได้



การเปลี่ยนแปลงแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้







1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (Pulse Amplitude Modulation, PAM)
2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ ที่ใช้เพื่อเปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (Pulse Width Modulation, PWM)

-เป็น Square Wave

-เป็น Sine Wave

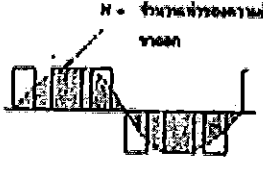



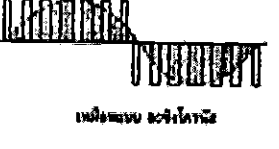

โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์แต่ละวิธี

วิธีควบคุม	ความถี่ต่ำ (แรงดันต่ำ)	ความถี่สูง (แรงดันสูง)	จุดเด่น
วิธี PAM PULSE AMPLITUDE MODULATION			- เสียมอเตอร์เบา - ประสิทธิภาพดี - ควบคุมขนาด แรงดันที่คอน เวอร์เตอร์ - ผลตอบซ้ำ
วิธี PWM PULSE WIDTH MODULATION			- ส่วน อินเวอร์เตอร์ สามารถควบคุม ความถี่และ แรงดันได้ทั้งหมด - ได้ยินเสียง ความถี่สูงจาก มอเตอร์
วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็น รูปซายน์			- เดินมอเตอร์ได้ เร็วที่ความเร็วต่ำ - ฮาร์โมนิกต่ำมี ขนาดเล็ก - ได้ยินเสียง ความถี่สูงจาก มอเตอร์

วิธี PWM แบบ Sine Wave นั้น จะมีการเปิด-ปิดสวิตช์หลายๆ ครั้งในหนึ่งไซเคิลและการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่า ความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์โดยวิธี PWM แบบ Sine Wave

รูปแบบการควบคุม		ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	จุดเด่น
แบบซิงโครนัส (SYNCHRO-NOUS)	ความถี่แคเรียร์แปรตามความถี่ขาออก			-สามารถควบคุมฮาร์มอนิกได้ -แรงดันขาออกสูงสุดเกือบเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
แบบอะซิงโครนัส (ASYNCHRO-NOUS)	ความถี่แคเรียร์คงที่ ไม่สัมพันธ์กับความถี่ขาออก			-เสียงรบกวนจากมอเตอร์ จะเป็นเสียงเดียว ไม่น่ารำคาญ
แบบผสม	ย่านความถี่ต่ำเป็นอะซิงโครนัส และย่านความถี่สูงเป็นซิงโครนัส			-สามารถควบคุมได้ดีทั้งย่านความถี่ต่ำตลอดจนถึงความถี่สูง

### 2.3.4 รูปแบบการนำการควบคุมมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ไปใช้งาน

#### 1. การสตาร์ท

ทำได้โดย ตั้งความถี่แก้อินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สตาร์ท มอเตอร์ก็จะสร้างแรงบิดขึ้นมา จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะค่อยๆ เพิ่มความถี่ขึ้นไป จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์สูงกว่าแรงบิดของโหลด มอเตอร์จึงเริ่มหมุน

#### 2. การเร่งความเร็วและการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่

หลังจากสตาร์ทอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์แล้ว ความถี่ขาออกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเพิ่มความถี่นี้ คือ เวลาการเร่งความเร็วและเมื่อความถี่ขาออก

เท่ากับความต้องการแล้ว การเร่งความเร็วก็จะหยุด อินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่การทำงานในช่วงเวลา การเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่

### 3. การลดความเร็ว

ทำได้โดย การตั้งความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่ขาออก อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงมาเรื่อยๆ ตามช่วงเวลารลดความเร็วที่ได้ตั้งไว้ ในขณะที่ลดความถี่ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่ามากกว่าความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ ทำให้มอเตอร์ทำงานเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตไฟจ่ายกลับไปให้อินเวอร์เตอร์ (Regeneration) ทำให้แรงดันไฟตรง (แรงดันตกคร่อมไดโอด) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ภายในอินเวอร์เตอร์จะมีวงจรที่ทำหน้าที่รับพลังงานที่เกิดจากการจ่ายไฟกลับ (Regeneration) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบรกมอเตอร์ วงจรนี้เรียกว่า วงจรเบรกคืนพลังงาน

ในช่วงการลดความเร็วจะทำงานในลักษณะนี้หลายๆ ครั้ง ถ้าพลังงานมีค่าน้อย (แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการลดความเร็วมีขนาดเล็ก) อัตราการใช้งานวงจรเบรกก็จะต่ำ บางครั้งอาจจะไม่ทำงานเลยก็มี

อัตราการใช้งานวงจรเบรกนี้ ได้รับการออกแบบโดยการพิจารณาในแง่ของการระบายความร้อนไว้ที่ 2% ถึง 3% เท่านั้น ถ้ามีการใช้เบรกบ่อยหรือใช้เบรกนานเกินไป อาจจะทำให้เกิดปัญหาการระบายความร้อนของตัวด้านทาน และอาจทำให้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์เสื่อมได้

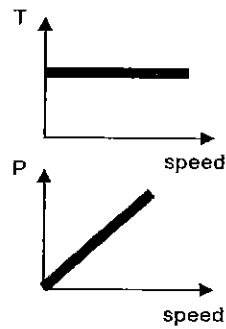
### 4. การหยุด

อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงจนถึงระดับหนึ่ง และจะผลิตไฟตรงเข้าไปในมอเตอร์เพื่อทำงานเป็นเบรก จนมอเตอร์หยุดหมุน เรียกว่า การเบรกด้วยไฟตรง

## 2.4 โหลดของมอเตอร์

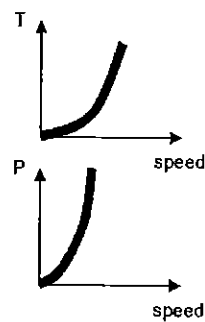
ในความหมายของปริมาณภาระงาน (โหลด) ของมอเตอร์ เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่จะต้องจะเข้าใจ โดยทั่วไป โหลดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. โหลดแรงบิดคงที่ (Constant Torque) คือ โหลดที่มีความต้องการกำลังส่งออกแปรผันกับความเร็วในการทำงานแต่ไม่แปรผันกับแรงบิด ตัวอย่างของโหลดแรงบิดคงที่ ได้แก่ สายพานลำเลียงเตาเผาแบบหมุนและเครื่องสูบลมแบบแทนที่คงที่



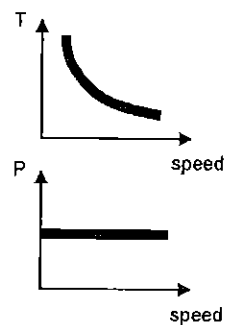
รูปที่ 2.7 โหลดแรงบิดคงที่ (Constant Torque)

2. โหลดแรงบิดแปรผัน (Variable Torque) คือ โหลดที่มีความต้องการแรงบิดแปรผันกับความเร็วในการทำงาน ตัวอย่างของโหลดแรงบิดผันแปร ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบแรงหมุนเหวี่ยง (แรงบิดจะผันแปรไปกับค่าความเร็วยกกำลังสอง)



รูปที่ 2.8 โหลดแรงบิดแปรผัน (Variable Torque)

3. โหลดกำลังคงที่ (Constant Power) คือ โหลดที่มีความต้องการแรงบิดที่แปรผกผันกับความเร็ว ตัวอย่างของโหลดกำลังคงที่ ได้แก่ เครื่องจักรต่างๆ



รูปที่ 2.9 โหลดกำลังคงที่ (Constant Power)

### 2.4.1 การประเมินโหลดของมอเตอร์

เนื่องจากการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จะทำให้ยากภายใต้สภาพการทำงานปกติ โดยสามารถประเมินโหลดของมอเตอร์ เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ เมื่อปริมาณโหลดเพิ่มสูงขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ทำให้ได้ประโยชน์สูงสุด เมื่อมีปริมาณโหลดเต็มที่

การคำนวณปริมาณ โหลดจะใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Load = \frac{P_i \times \eta}{HP \times 0.7457} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\eta$  คือ ค่าประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์แสดงเป็น %

$HP$  คือ อัตรากำลังแรงม้าที่ระบุไว้ในป้ายชื่อ

$Load$  คือ โหลดซึ่งก็คือกำลังส่งออก โดยคิดเป็น % ของอัตรากำลังที่ระบุไว้

$P_i$  คือ ค่ากำลัง 3 เฟสในหน่วยกิโลวัตต์ (kW)

มี 3 วิธีการสำหรับการคำนวณ โหลดของมอเตอร์ที่มีการทำงานแบบแยกอิสระ

1. การวัดกำลังอินพุต วิธีนี้ จะคำนวณ โหลดในฐานะที่เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังอินพุต (วัดโดยเครื่องวิเคราะห์กำลัง) และอัตรากำลังที่กำหนดไว้ ในสถานะที่มีโหลด 100%
2. การวัดกระแสในสายโหลด ใช้วิธีการคำนวณ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังกระแสไฟฟ้า (วัดโดยเครื่องวิเคราะห์กำลัง) กับค่ากำลังกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ วิธีการนี้จะถูกใช้ เมื่อไม่ทราบค่าตัวประกอบกำลังและทราบเพียงค่ากำลังกระแสไฟฟ้านั้น และแนะนำว่าควรใช้วิธีนี้เมื่อมีเปอร์เซ็นต์ของโหลดน้อยกว่า 50%
3. วิธีการเลื่อนไหลโหลด จะถูกคำนวณ โดยการเปรียบเทียบค่าการเลื่อนไหลที่วัดได้ เมื่อมอเตอร์กำลังทำงาน โดยมีการเลื่อนไหลสำหรับมอเตอร์ที่มีโหลดเต็มที่ วิธีการนี้ มีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำ แต่สามารถนำมาใช้กับเครื่องมือวัดความเร็วรอบของการหมุนเท่านั้น (ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวิเคราะห์กำลัง)

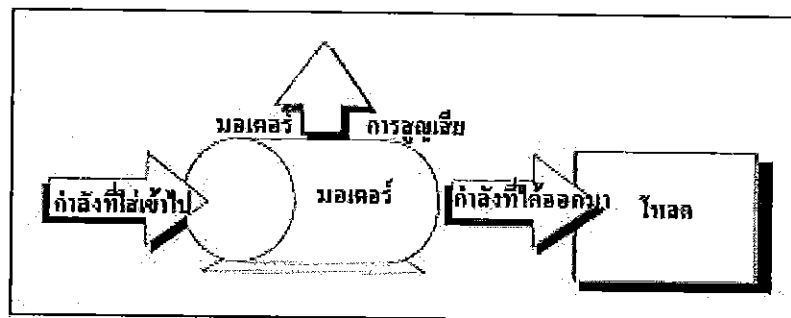
## 2.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า หมายถึง กำลังงานที่ต้องการใช้งานจริง (Useful Power)หารด้วยกำลังทางค้ำานอินพุต (Input Power) ซึ่งในทางอุดมคติ นั้น กำลังที่ต้องการใช้งานจริง จะต้องมีค่าเท่ากับกำลังทางค้ำานอินพุต แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้น กำลังทางค้ำานอินพุตจะมากกว่ากำลังทางค้ำานเอาต์พุตเสมอ

ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุด เมื่อกำลังสูญเสียที่ขึ้นอยู่กับโหลด (Load-Dependent Losses) และกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นอยู่กับ โหลด (Load-Independent Losses) มีค่าเท่ากัน นั้นหมายความว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกำลังค้ำานเอาต์พุตของมอเตอร์

ส่วนมากประสิทธิภาพจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก และจะมีค่าสูงใกล้เคียงค่าประสิทธิภาพตามพิกัดของมอเตอร์ที่ออกแบบ โดยเฉพาะขณะที่โหลดของมอเตอร์มีค่าอยู่ในระหว่าง 60% ถึง 85% (เฉลี่ยประมาณ 75%) และค่าประสิทธิภาพจะตกลงอย่างรวดเร็ว หากโหลดของมอเตอร์โดยเฉลี่ย เริ่มมีค่าน้อยกว่า 50% ลงมา ดังนั้น หากมอเตอร์อยู่ในสภาวะรับโหลดน้อย ก็จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียเป็นอย่างมาก และในกรณีที่มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์นั้นก็จะมีความสูงขึ้นด้วย (ในบางครั้ง ประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ไม่สูงขึ้นตามไปด้วย) ถ้ามอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำจะทำให้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์มีค่าต่ำลง ทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากขึ้น

มอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เพื่อทำงานให้ได้ปริมาณที่แน่นอน ในกระบวนการนี้จะมีการสูญเสียพลังงานไป ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ถูกวัดโดยปริมาณการสูญเสียภายใน ซึ่งจะถูกลดลงได้โดยการเปลี่ยนรูปแบบการออกแบบและการทำงานของมอเตอร์ การสูญเสียจะผันแปรไปได้ตั้งแต่ประมาณ 2% ถึง 20% ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การสูญเสียประเภทต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ประเภทของการสูญเสีย	เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียทั้งหมด (100%)
การสูญเสียหลัก	25
การสูญเสียผันแปร: การสูญเสีย $I^2R$ ของขดลวดที่อยู่กับที่	34
การสูญเสียผันแปร: การสูญเสีย $I^2R$ ของแกนหมุน	21
การสูญเสียจากแรงเสียดทานและการหมุนพันขดลวด	15
การสูญเสียจากการบายเบนของโหลด	5

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์ มีดังนี้

1. อายุ มอเตอร์ใหม่จะมีประสิทธิภาพมากกว่า
2. กำลังการผลิต เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามอัตรากำลังการผลิต
3. ความเร็ว มอเตอร์ที่มีความเร็วสูงกว่า มักจะมีประสิทธิภาพมากกว่า
4. ประเภท มอเตอร์แบบกรงกระรอกมักจะมีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์แบบวงแหวนเลื่อน
5. อุณหภูมิ มอเตอร์ที่ปิด และทำให้เย็นโดยใช้พัดลม จะมีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์ที่ใช้ฉนวนกันและป้องกันการหยุด
6. การหมุนพันขดลวดให้มอเตอร์ อาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง
7. โหลด



### 2.5.1 การใช้งานมอเตอร์ที่เหมาะสมกับโหลด

เมื่อโหลดของมอเตอร์ลดลง ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโหลดลดลงต่ำกว่าร้อยละ 40 ของพิกัด เนื่องจาก เมื่อโหลดลดลงกำลังสูญเสียส่วนหนึ่งยังคงที่ เช่น กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียจากพัฒนาความร้อนทำยมอเตอร์ ดังนั้น ควรเลือกใช้งานมอเตอร์ที่เหมาะสมกับโหลด ร้อยละของโหลดเทียบกับพิกัดควรสูงกว่า 60 หากพบว่าโหลดต่ำ ควรปรับปรุงให้การใช้งานมอเตอร์เหมาะสมกับโหลดมากขึ้น โดยสับเปลี่ยนมอเตอร์ที่มีอยู่ให้มีขนาดเล็กลง จะลดกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการลงได้ ทั้งนี้ ควรตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์นานพอสมควร เนื่องจาก บางกระบวนการ โหลดจะเพิ่มขึ้นเป็นบางช่วงเวลา

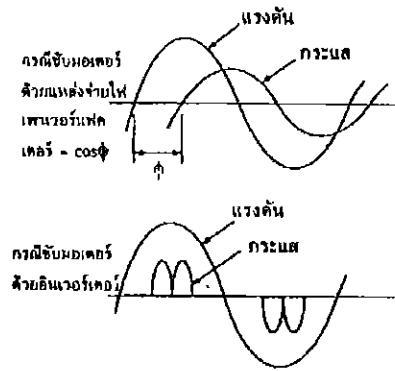
มอเตอร์มีโหลดน้อยกว่าพิกัด จะทำให้ประสิทธิภาพต่ำ และจะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำด้วย ในกรณีนี้ หากต้องการปรับปรุงเพาเวอร์แฟคเตอร์ (ทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor)) ก็จะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงขึ้น แต่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้นด้วย จึงจำเป็นต้องคิดทั้งค่าโหลดและค่าประสิทธิภาพ เมื่อจะทำการประเมินสมรรถภาพของมอเตอร์ ส่วนใหญ่แล้วจะแสดงประสิทธิภาพของปริมาณโหลดสูงสุดระบุบนป้ายชื่อของมอเตอร์

### 2.6 เพาเวอร์แฟคเตอร์

โดยทั่วไป เพาเวอร์แฟคเตอร์หรือตัวประกอบกำลัง หาได้จากความต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Displacement Angle,  $\theta$ ) ซึ่งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นี้ จะเท่ากับ  $\cos \theta$  ซึ่งถูกเรียกว่า ตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement Power Factor, DPF)

แต่ในกรณีที่รูปคลื่นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และมีองค์ประกอบคลื่นฮาร์มอนิกอยู่มาก จะไม่สามารถใช้ความต่างเฟสในการหาเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้ ถ้าใช้เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์วัดก็จะอ่านค่าได้ประมาณ 1 เสมอ

ดังนั้น ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในกรณีทั่วไป จะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power,  $P$ ) ต่อกำลังไฟฟ้าเสมือน (Apparent Power,  $S$ )



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

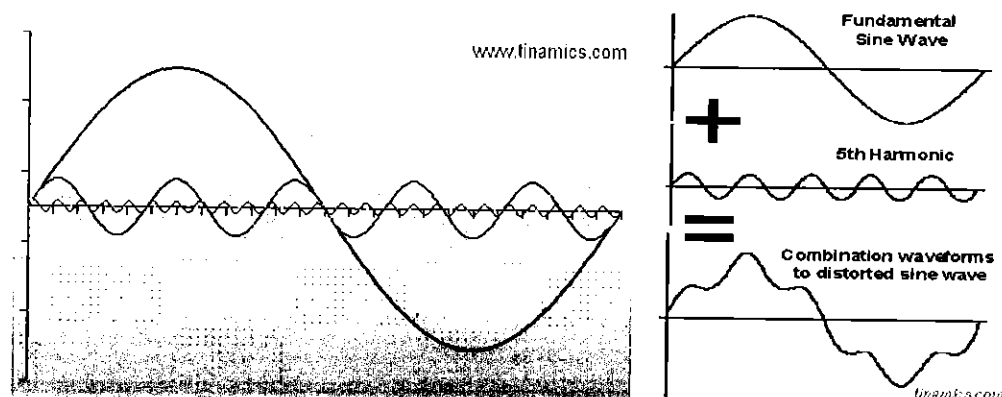
### 2.6.1 ผลกระทบเนื่องจากเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ

ระบบไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสายส่งสายป้อนและหม้อแปลง) จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์สูง การไฟฟ้าก็สามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงได้มาก แต่ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ซึ่งหมายถึง มีความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากๆ จะเป็นภาระแก่ระบบไฟฟ้า ที่ต้องส่งกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากขึ้น โดยไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างเต็มที่ เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในการผลิตและจ่ายไฟและส่งผลกระทบ ดังนี้

1. เกิดโหลดเกินในหม้อแปลง ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงและสายไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้ตามพิกัด เนื่องจากต้องจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (VAR) ทำให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงลดลง
2. เกิดแรงดันตกในระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อเพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบต่ำลง กระแสไฟฟ้าของระบบจะสูงขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อมในสายไฟของระบบไฟฟ้ามากขึ้น
3. กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะมีการเกิดกำลังสูญเสียในตัวนำไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแปรตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า
4. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากมาจากกระแสไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงแปรตามกระแสกำลังสอง เมื่อเพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบต่ำลง กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากโหลดเพิ่มขึ้น

## 2.7 ฮาร์โมนิกส์ (Effect of Harmonics)

ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) คือ ส่วนเกินของสัญญาณที่ไม่เป็นที่ต้องการ เป็นส่วนประกอบแฝง เข้ามาผสมกับรูปคลื่นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) อาจจะมาในรูปแบบของสัญญาณหรือในรูปแบบของปริมาณช่วงคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเท่าจากความถี่หลักมูลฐาน (Fundamental Frequency) ของระบบไฟฟ้า เช่น ความถี่หลักของระบบไฟฟ้าบ้านเรามีค่าเท่ากับ 50 Hz เป็นลำดับที่ 1 เมื่อมีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz และฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz เข้ามาผสมในระบบไฟฟ้าหลัก ทำให้รูปคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฮาร์โมนิกส์แฝงในลำดับต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นความถี่หลักมูล

หากสถานประกอบการ ติดตั้งโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) เช่น ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ (Variable Frequency Drive) ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสตรง (DC Drive) UPS ฯลฯ ในวงจรการจ่ายไฟ หรือแหล่งจ่ายไฟเดียวกันกับวงจรการจ่ายไฟที่มอเตอร์นั้นรับไฟอยู่ ถ้าหากมีจำนวนมาก ก็จะทำให้แรงดันเกิดการบิดเบี้ยว ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันที่ปรากฏที่ส่วนปลายของมอเตอร์ มีการบิดเบี้ยว (Distortion) ไปด้วย ลักษณะเช่นนี้ ไม่เป็นผลดีต่อมอเตอร์เลย ซึ่งหากค่าการบิดเบี้ยวมีมาก หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าเกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ระบบแรงดัน (System Voltage) มาก จะทำให้ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าต่ำ

### 2.7.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทั่วไป มาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Current-Voltage Relationship) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ไดโอดทรานซิสเตอร์ ไทริสเตอร์ เป็นต้น อุปกรณ์ในประเภทนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรเรียงกระแส วงจรปรับความเร็วของระบบขับเคลื่อน (Adjustable Speed Drive, ASD) แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองและวงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

2. อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก ได้แก่ หม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเกินพิกัดจึงส่งผลทำให้กระแสกระตุ้น (Exciting Current) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ถ้าช่วงเวลาดังกล่าว ค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดมีค่าต่ำ ก็จะทำให้ฮาร์โมนิกส์ค่าลำดับสูงเกิดขึ้น

3. อุปกรณ์ประเภทอาร์ก ได้แก่ เต้าหลอมแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก รวมไปถึงหลอดดิสชาร์จประเภทต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ มีคุณลักษณะการทำงานพื้นฐาน โดยการอาร์กโลหะและอโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขณะใช้งาน

### 2.7.2 ผลกระทบอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์

ปัญหาในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ อาจแยกพิจารณาได้ คือ แบบแรกเป็นผลกระทบที่ไม่รุนแรงแต่ทำให้เกิดความสูญเสียในระยะยาว และแบบที่สองเป็นผลกระทบที่รุนแรง อาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหายหรือเกิดระเบิดได้และยังส่งผลต่อระบบไฟฟ้าในด้านต่างๆ เช่น

- เพิ่มความสูญเสียและลดการนำกระแสในสายส่งและสายป้อน ทำให้ฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ตัดวงจรด้วยความร้อน ทำงานผิดพลาด

- เพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบ ส่งผลทำให้ปลายทางของแรงดันเพิ่มสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเครียดของฉนวน (Dielectric Stress) สูงขึ้นกว่าปกติทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

- กำลังสูญเสียที่แปรตามกระแสกำลังสอง เพิ่มขึ้นในขดลวดของหม้อแปลง

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เฟสเซอร์ของกระแสฮาร์โมนิกส์อาจมีทิศทางการหมุนที่ต่างจากเฟสเซอร์ของกระแสที่ความถี่หลักมูล โดยต่างกันไปตามลำดับเฟส สามารถแบ่งได้เป็น 3 หมวด คือ ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเฟสเป็นบวก ลำดับเฟสเป็นลบ และลำดับเฟสเป็นศูนย์ แสดงดังตารางที่

## ตารางที่ 2.6 อันดับฮาร์โมนิกส์และลำดับเฟสต่างๆ

ฮาร์โมนิกส์	ความถี่ (Hz)	ลำดับเฟส
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0

## 2.7.3 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion Evaluation)

ในกรณีที่มิฮาร์โมนิกส์ปรากฏในวงจรหรือระบบ จะมีกำลังไฟฟ้าอีกประเภทหนึ่งเพิ่มขึ้นมาจากเดิม เรียกว่า กำลังไฟฟ้าความเพี้ยน (Distortion Power,  $D$ ) ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากฮาร์โมนิกส์ มีหน่วยเป็น VA (Volt-Ampere) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นประโยชน์ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ไม่ใช่ส่วนของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power;  $Q$ )

การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 มีดังนี้

1. ชีดจำกัดกระแสเพี้ยน (Current Distortion Limits) เป็นการใชชีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยคชนี้ที่ใชกำหนดชีดจำกัดกระแสเพี้ยนคี่ (Total Harmonic Distortion of Current, THDc) หมายถึง ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้อการกระแสโหลดสูงสุด แสดงในตารางที่ 2.7

15740551

ร/ร.

๑/๗๓๗

2553

ตารางที่ 2.7 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (แรงดัน 120 V- 69 kV)

$I_{sc}/I_{Load}$	กระแสฮาร์โมนิกสูงสุดเป็น $I_{sc}/I_{Load}$ เปอร์เซ็นต์ของ $I_{Load}$ ในแต่ละลำดับที่					
	<11	11-15	17-21	23-33	>34	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1,000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1,000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

โดยที่  $I_{sc}$  คือ กระแสลัดวงจร

$I_{Load}$  คือ ความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูล)

หมายเหตุ ค่าขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับคู่ ใช้ค่าร้อยละ 25 ของลำดับที่

2. ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage Distortion Limits) เป็นการตรวจสอบกระแสฮาร์โมนิกที่ส่งกลับเข้าระบบไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสไฟฟ้าเหล่านี้ ไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้แรงดันมีความเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุในตารางที่ 2.8 ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน คือ ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสร่วม (Total Harmonic Distortion of Voltage; THDv) ซึ่งจะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่ระบุความถี่หลักมูล

ตารางที่ 2.8 ค่าขีดจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิก

ระดับแรงดัน (kV)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์โมนิก แต่ละลำดับ (%)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์โมนิกสร่วม (%THDv)
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

โดยที่  $V_n$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้า ( $V_{rms}$ )

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลอง

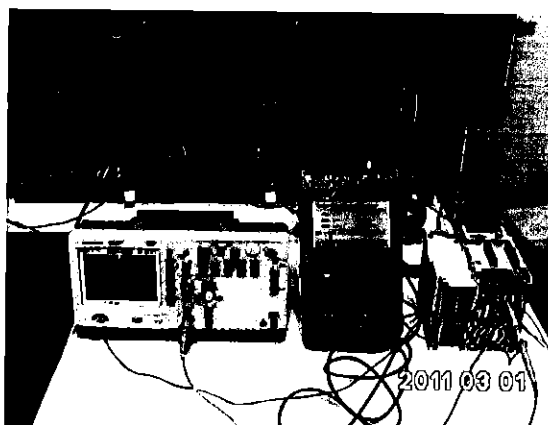
#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

การวัดค่าพารามิเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีการทำงาน ในสถานะที่ไม่มีโหลดและมีโหลด (ใช้วิธีการปรับค่าทอร์ค) ระหว่าง 10% ถึง 100% และปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 30 Hz ถึง 60 Hz แล้วทำการบันทึกรูปกราฟ โดยที่รูปกราฟที่ปรากฏบนจอภาพของออสซิลโลสโคปจะเป็นรูปคลื่นของกระแส สามารถออกแบบการทดลองได้ ดังนี้

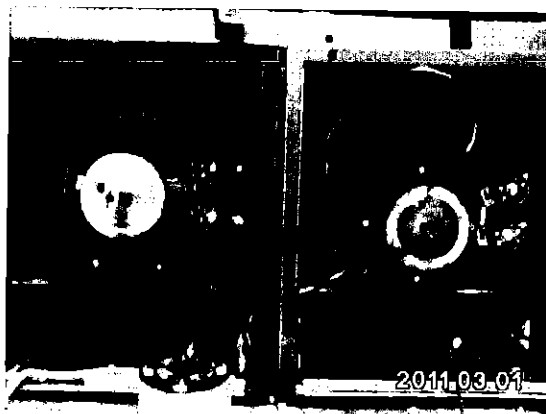
1. ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบอินเวอร์เตอร์ โดยจ่ายไฟให้กับอินเวอร์เตอร์และบันทึกสัญญาณรูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคป

2. ในสถานะที่มีโหลด

- 2.1 ทำการทดลองต่อวงจร และหาค่าทอร์คที่มีโหลด 100% โดยการปรับค่าทอร์คเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (ปรับค่าทอร์คที่เครื่อง Electrodynamometer) จนค่ากระแสมีค่าเท่ากับ 0.65 A (ดูค่ากระแสที่เครื่อง Power & Harmonics Analyzer) ซึ่งมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรการทดลองในสถานะที่มีโหลด



รูปที่ 3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อกับมิเตอร์ที่ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  
(Electrodynamometer)

2.2 นำค่าทอร์คที่โหลด 100% ที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 2.1 มาคำนวณค่าทอร์คที่โหลดขนาดระหว่าง 10% ถึง 100%

2.3 ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 30 Hz จากนั้น นำค่าทอร์คที่คำนวณได้จากข้อ 2.2 มาปรับค่าระหว่าง 10% ถึง 100% แล้วทำการบันทึกค่ากระแสเฟสของมอเตอร์, ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์, ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และค่ากระแสฮาร์มอนิกของมอเตอร์ โดยทำการบันทึกทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด ทำแบบเดียวกันนี้ที่ความถี่ 40 Hz, 50 Hz และ 60 Hz

2.5 คำนวณหาค่าแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของมอเตอร์ ที่มีโหลดระหว่าง 10% ถึง 100% ของทุกๆ ความถี่ ดังนี้

$$\text{แรงดันขาเข้า} \quad P_m = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (3.1)$$

$$\text{แรงดันขาออก} \quad P_{out} = \tau \omega_m \quad (3.2)$$

$$\text{โดยที่} \quad \omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \quad (3.3)$$

$$\text{จะได้} \quad P_{out} = \frac{2\pi \tau n_m}{60} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ แรงบิดของมอเตอร์

$n_m$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์

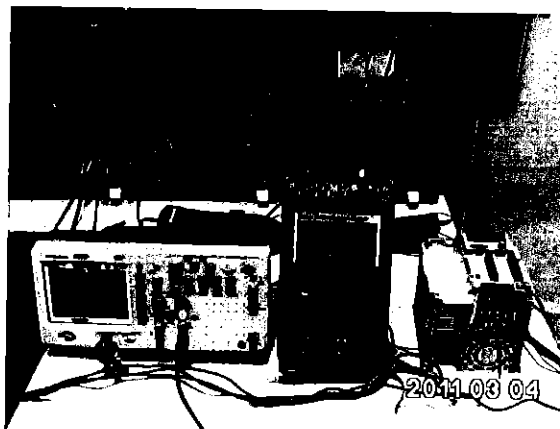
2.6 คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ที่มีโหลดระหว่าง 10% ถึง 100% ของทุกๆ ความถี่ ดังนี้



ประสิทธิภาพ 
$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.6)$$

### 3. ในสภาวะที่ไม่มีโหลด

#### 3.1 ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การต่อวงจรในสภาวะที่ไม่มีโหลด

3.2 ปรับค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ค่า 30 Hz แล้วทำการบันทึกค่ากระแสเฟสของมอเตอร์ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ของมอเตอร์ ทำแบบเดียวกันนี้ที่ความถี่ 40 Hz, 50 Hz และ 60 Hz

#### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. ศึกษาการทดสอบมอเตอร์แบบมีโหลดและแบบไม่มีโหลด และศึกษาการทดสอบอินเวอร์เตอร์
2. ศึกษาสมการหาค่า  $T_{load}$  และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์โดยการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือต่างๆ เพื่อทำการหาค่า  $T_{load}$  และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ที่ต่อโหลดต่างๆ
3. ออกแบบการต่อวงจรในการทดลองและศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้
4. ต่อวงจรการทดลองเพื่อทดสอบอินเวอร์เตอร์
5. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 3.1 เพื่อทำการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะที่มีโหลดระหว่าง 10% ถึง 100% โดยปรับค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 30 Hz แล้วบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการ พร้อมทั้งบันทึกกราฟคลื่นของกระแสจากออสซิลโลสโคปด้วย

6. ทำการทดลองลักษณะเดียวกันกับข้อ 5 แต่เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็น 40 Hz, 50 Hz และ 60 Hz ตามลำดับและทำการบันทึกค่าเช่นเดียวกับข้อที่ 5

7. ต่อดวงจรการทดลองลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 3.3 เพื่อทำการทดสอบมอเตอร์ในสถานะที่ไม่มีโหลด โดยปรับค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ค่า 30 Hz แล้วบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการพร้อมทั้งบันทึกกราฟคลื่นของกระแสจากออสซิลโลสโคปด้วย

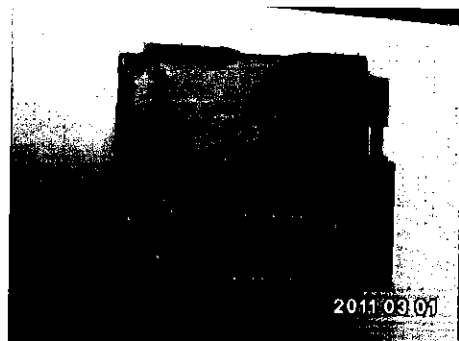
8. ทำการทดลองลักษณะเดียวกันกับข้อ 7 แต่เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็น 40 Hz, 50 Hz และ 60 Hz ตามลำดับและทำการบันทึกค่าเช่นเดียวกับข้อที่ 7

9. รวบรวมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และกราฟของกระแสที่ได้ แล้วนำมาวิเคราะห์ผล

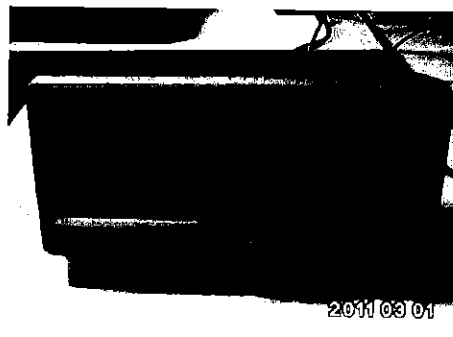
ในส่วนของการทดลองจะมีการต่อวงจร โดยใช้อุปกรณ์ ดังนี้

1. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 380 V
2. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 220 V
3. อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์
4. ชุดสายไฟ
5. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
6. อินเวอร์เตอร์
7. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า
8. ออสซิลโลสโคป
9. เครื่องวัดความเร็วรอบ
10. เครื่องวัดกระแส (ต่อกับออสซิลโลสโคป)

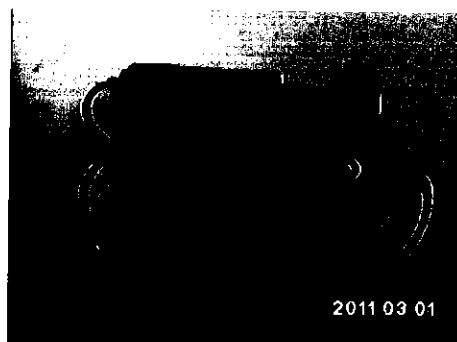
อุปกรณ์



รูปที่ 3.4 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 ออสซิลโลสโคป



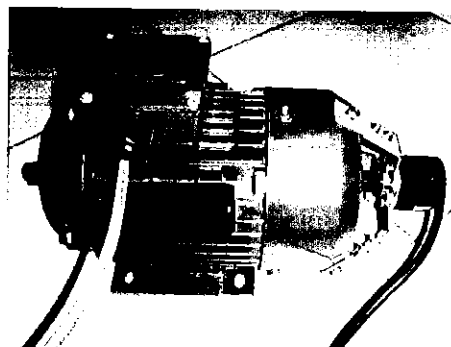
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดกระแส (ต่อกับออสซิลโลสโคป)



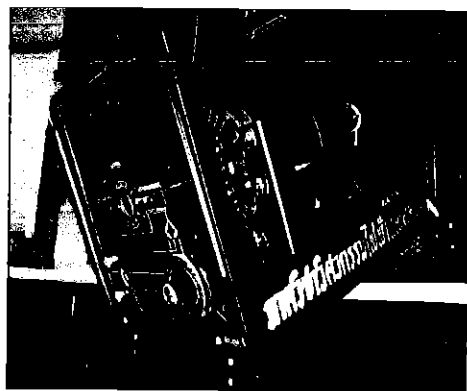
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความเร็วรอบ



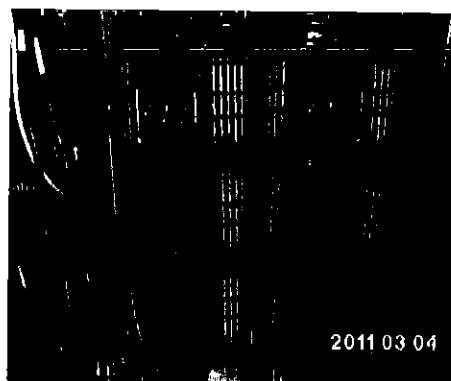
รูปที่ 3.8 Power & Harmonics Analyzer



รูปที่ 3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

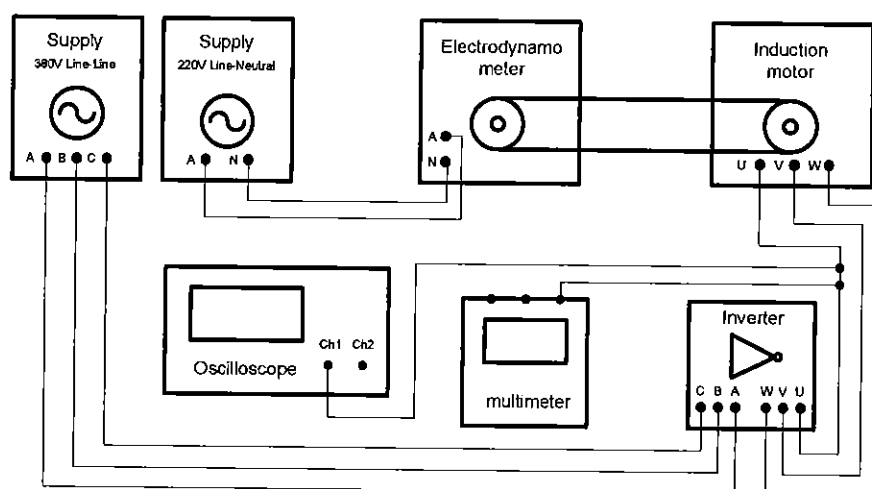


รูปที่ 3.10 Electrodynamicmeter



รูปที่ 3.11 แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

จากบทที่ 3 สามารถเขียนแผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ในการทดลองได้ ดังนี้



รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรรวมในการทดลอง

## บทที่ 4

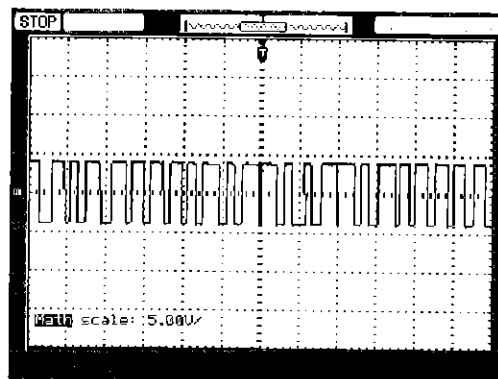
### ผลการทดลอง

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องนำมาประกอบในการวิเคราะห์โดยใช้การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและ  $T_{load}$  ในสถานะโหลดขนาดต่างๆ นำค่าที่วัดได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าหาค่ากระแสของ  $T_{load}$  ขณะสตาร์ท ของมอเตอร์ต่อแบบ Y ขณะต่อโหลดขนาดต่างๆ และหาค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ช่วงขณะสตาร์ทต่อโหลดขนาดต่างๆ มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

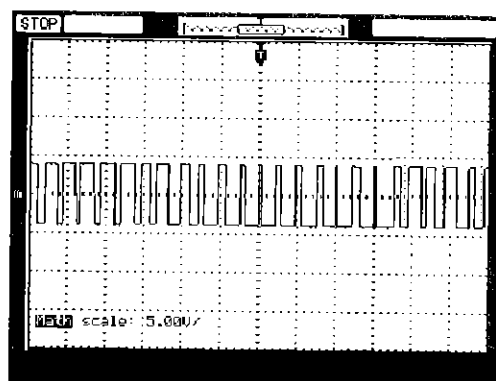
ผลการทดลองที่ได้จากการทำโครงงานนี้จะแบ่งออกเป็น 8 ส่วน คือ

- 4.1 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในความถี่ 20 Hz ถึง 60 Hz
- 4.2 ผลจากการทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์ในความถี่ 20 Hz ถึง 60 Hz ในสถานะที่ไม่มีโหลด
- 4.3 ผลจากการทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์ในความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz ในสถานะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง
- 4.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
- 4.5 กระแสฮาร์โมนิกส์
- 4.6 ผลจากการทดลองเพื่อหา  $T_{load}$  ในสถานะโหลดขนาดต่างๆ
- 4.7 ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดได้จากการทดลอง ในสถานะโหลดขนาดต่างๆ
- 4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

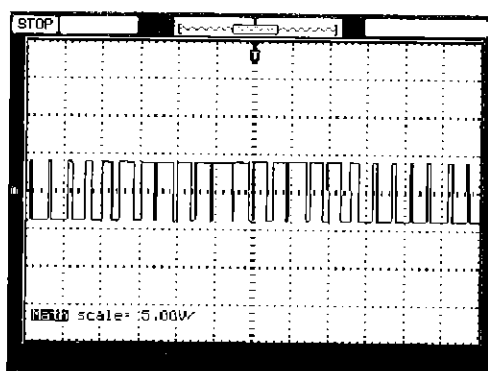
#### 4.1 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในความถี่ต่างๆ



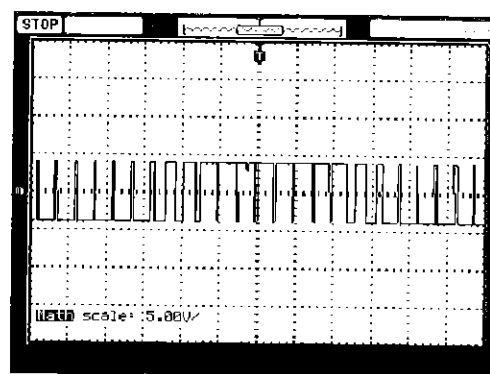
(ก)



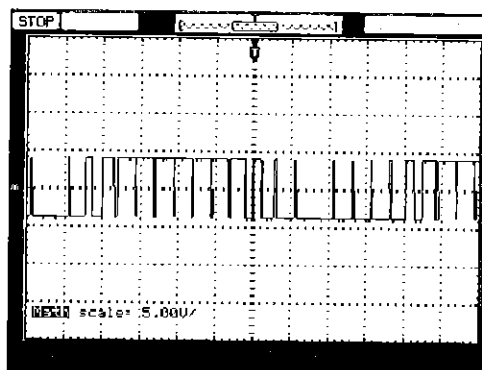
(ข)



(ค)



(ง)



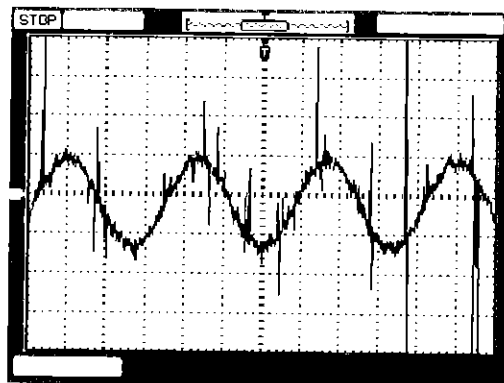
(จ)

- รูปที่ 4.1 (ก) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 20 Hz  
 (ข) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 30 Hz  
 (ค) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 40 Hz  
 (ง) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 50 Hz  
 (จ) รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM ที่ความถี่ 60 Hz

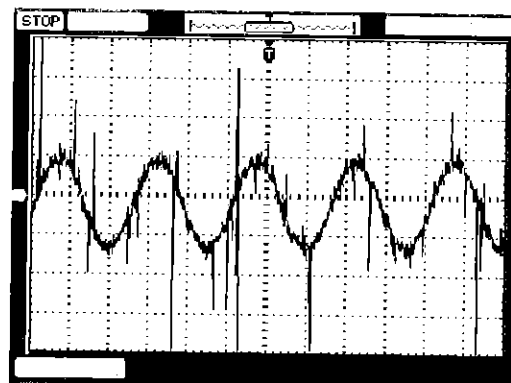
## 4.2 ทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์แบบไม่มีโหลด

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะไม่มีโหลด

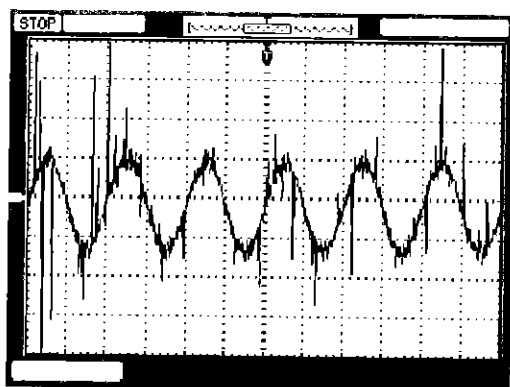
ความถี่ (Hz)	กระแส (A)	ทอร์ก (N)	ความเร็วรอบ (rpm)	เพาเวอร์แฟคเตอร์
20	0.462	0	571	0.326
30	0.488	0	870	0.226
40	0.517	0	1,172	0.146
50	0.528	0	1,478	0.126
60	0.532	0	1,761	0.123



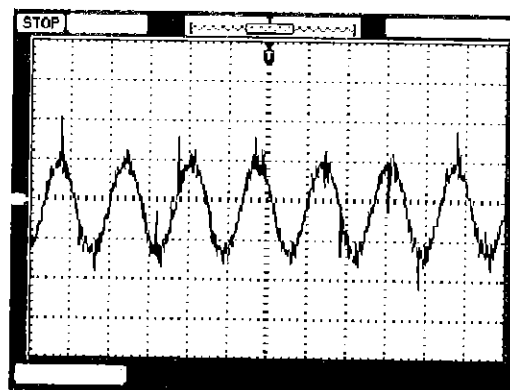
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสภาวะโหลด 0%

(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสภาวะโหลด 0%

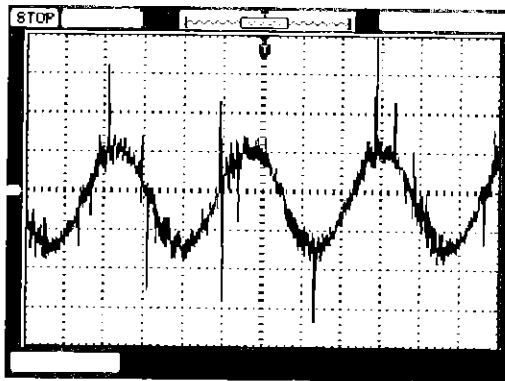
(ค) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลด 0%

(ง) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลด 0%

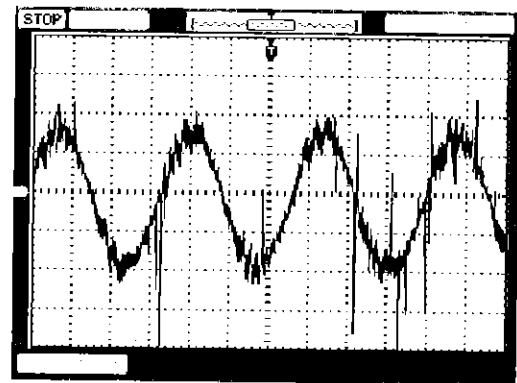
### 4.3 ทดสอบมอเตอร์เพื่อหากระแสของมอเตอร์แบบมีโหลด

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 30 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	ทอร์ก (N)	ความเร็วรอบ (rpm)	เพาเวอร์แฟกเตอร์
30	10	0.441	0.083	855	0.136
	20	0.457	0.166	838	0.206
	30	0.482	0.249	823	0.200
	40	0.504	0.332	807	0.200
	50	0.523	0.415	789	0.240
	60	0.564	0.498	766	0.280
	70	0.595	0.598	736	0.296
	80	0.612	0.664	710	0.280
	90	0.624	0.747	683	0.283
	100	0.645	0.830	661	0.346



(ก)



(ข)

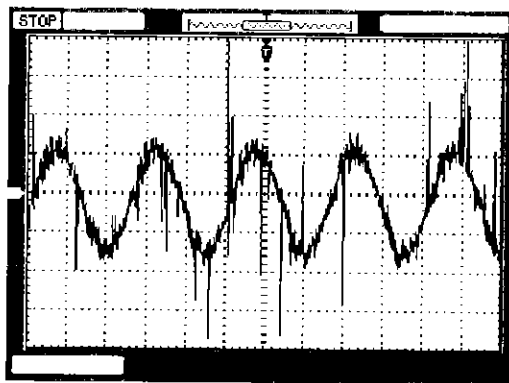
รูปที่ 4.3 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสภาวะโหลด 50%

(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 30 Hz ในสภาวะโหลด 100%

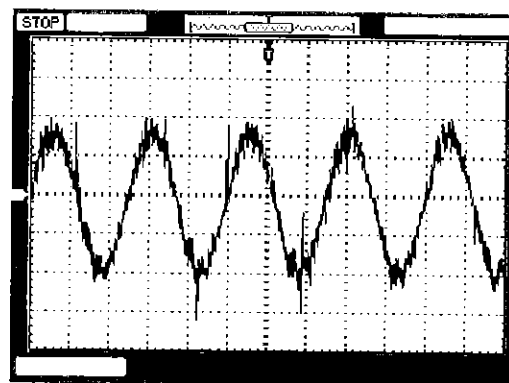


ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 40 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	ทอร์ค (N)	ความเร็วรอบ (rpm)	เพาเวอร์แฟกเตอร์
40	10	0.491	0.076	1,153	0.150
	20	0.504	0.152	1,140	0.193
	30	0.514	0.228	1,123	0.206
	40	0.532	0.304	1,111	0.236
	50	0.543	0.380	1,097	0.233
	60	0.563	0.456	1,077	0.310
	70	0.574	0.532	1,061	0.306
	80	0.596	0.608	1,041	0.373
	90	0.627	0.684	1,021	0.383
	100	0.647	0.760	1,003	0.416



(ก)



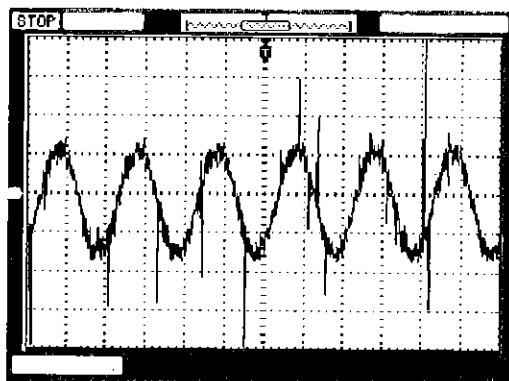
(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสภาวะโหลด 50%

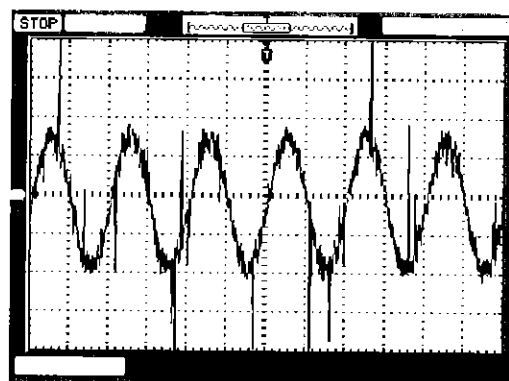
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 40 Hz ในสภาวะโหลด 100%

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 50 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	ทอร์ก (N)	ความเร็วรอบ (rpm)	เพาเวอร์แฟคเตอร์
50	10	0.495	0.070	1,453	0.176
	20	0.513	0.140	1,442	0.216
	30	0.536	0.210	1,430	0.263
	40	0.554	0.280	1,415	0.300
	50	0.569	0.350	1,401	0.283
	60	0.581	0.420	1,388	0.310
	70	0.593	0.490	1,364	0.340
	80	0.604	0.560	1,353	0.416
	90	0.625	0.630	1,334	0.456
	100	0.647	0.700	1,326	0.446



(ก)



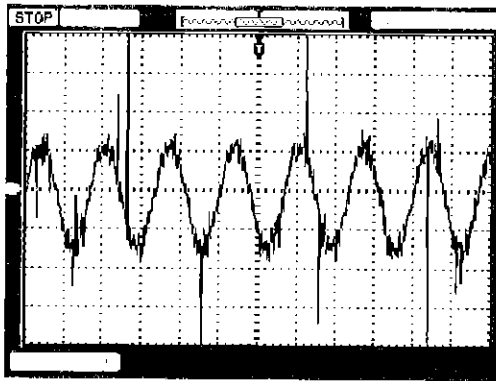
(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลด 50%

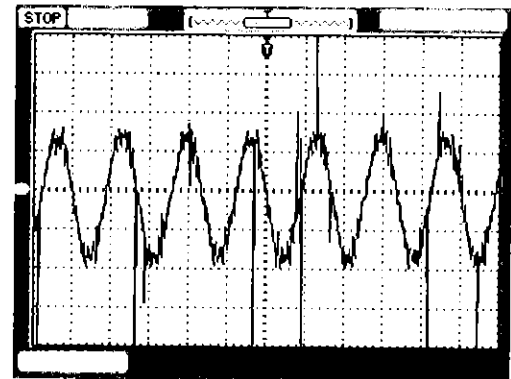
(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลด 100%

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลด 10% - 100% ความถี่ 60 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	ทอร์ค (N)	ความเร็วรอบ (rpm)	เพาเวอร์แฟคเตอร์
60	10	0.496	0.074	1,757	0.260
	20	0.502	0.148	1,744	0.343
	30	0.517	0.222	1,734	0.253
	40	0.528	0.296	1,719	0.346
	50	0.540	0.370	1,702	0.386
	60	0.581	0.444	1,676	0.446
	70	0.603	0.518	1,674	0.393
	80	0.614	0.592	1,655	0.463
	90	0.624	0.666	1,639	0.460
	100	0.646	0.740	1,631	0.450



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลด 50%

(ข) กราฟกระแสที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลด 100%

#### 4.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีความถี่ 30 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	ประสิทธิภาพ (%)
30	10	39.667	7.431	18.732
	20	62.161	14.572	23.442
	30	63.490	21.458	33.797
	40	66.430	28.054	42.231
	50	82.665	34.286	41.476
	60	104.059	39.944	38.386
	70	116.306	46.067	39.608
	80	112.844	49.390	43.769
	90	116.226	53.453	45.991
	100	147.241	57.423	39.000

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยมีความถี่ 40 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	ประสิทธิภาพ (%)
40	10	48.572	9.180	18.899
	20	64.258	18.137	28.225
	30	69.914	26.800	38.332
	40	83.023	35.351	42.579
	50	83.542	43.631	52.227
	60	115.073	51.403	44.670
	70	116.056	59.079	50.906
	80	146.445	66.246	45.236
	90	158.441	73.095	46.134
	100	177.429	79.785	44.967

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยมีความถี่ 50 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	ประสิทธิภาพ (%)
50	10	57.665	10.653	18.474
	20	73.410	21.130	28.784
	30	92.780	31.431	33.878
	40	109.386	41.498	37.937
	50	105.982	51.323	48.427
	60	118.541	61.016	51.473
	70	132.698	69.955	52.717
	80	165.769	79.362	47.875
	90	187.987	87.964	46.793
	100	190.640	97.225	50.999

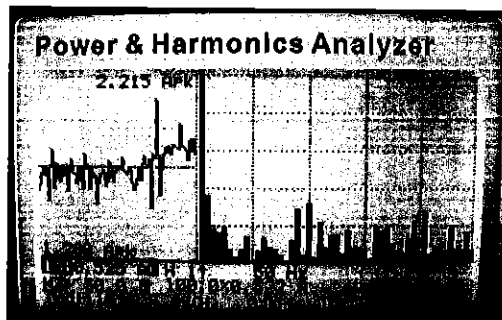
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยมีความถี่ 60 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	ประสิทธิภาพ (%)
60	10	84.876	13.616	16.043
	20	113.552	27.016	23.792
	30	86.088	40.291	46.802
	40	120.585	53.288	44.191
	50	137.797	65.952	47.861
	60	170.929	77.887	45.567
	70	155.970	90.760	58.191
	80	186.699	102.548	54.927
	90	189.221	114.251	60.380
	100	191.327	126.326	66.026

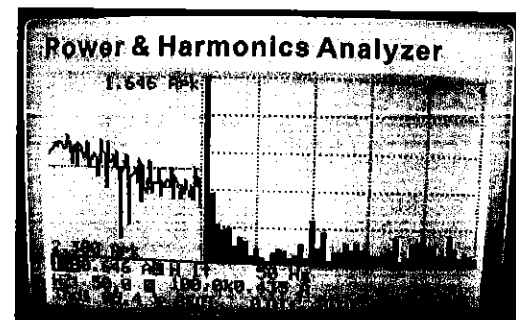
## 4.5 กระแสฮาร์โมนิกส์

ตารางที่ 4.10 กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 30 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (%)
30	10	0.441	154.4
	20	0.457	164.7
	30	0.482	135.1
	40	0.505	122.3
	50	0.523	102.6
	60	0.565	83.0
	70	0.596	87.2
	80	0.612	102.8
	90	0.624	109.9
	100	0.645	85.0



(ก)



(ข)

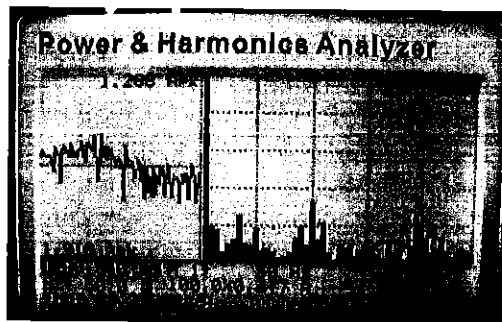
รูปที่ 4.7 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 50%

(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลด 100%

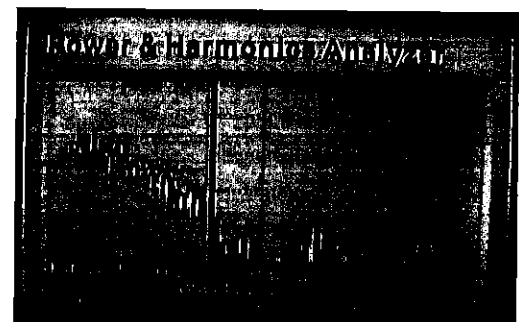


ตารางที่ 4.11 กระแสฮาร์โมนิกที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 40 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (%)
40	10	0.492	114.5
	20	0.505	117.0
	30	0.514	91.2
	40	0.533	78.3
	50	0.544	94.5
	60	0.564	85.0
	70	0.575	84.2
	80	0.596	78.2
	90	0.628	71.6
	100	0.647	75.9



(ก)



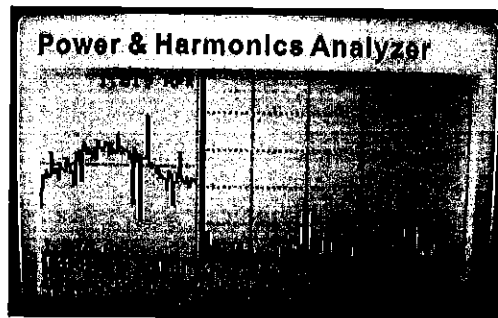
(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 50%

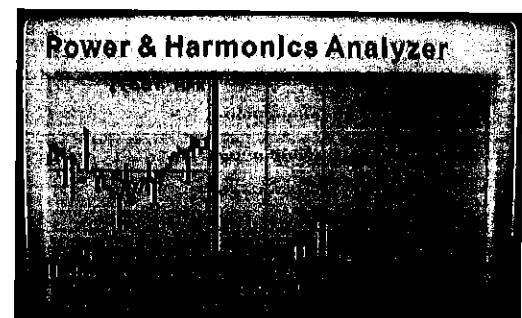
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 40 Hz ในสถานะโหลด 100%

ตารางที่ 4.12 กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 50 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (%)
50	10	0.495	87.6
	20	0.514	79.8
	30	0.536	58.6
	40	0.554	89.8
	50	0.569	73.0
	60	0.581	85.4
	70	0.593	80.6
	80	0.604	78.3
	90	0.625	71.6
	100	0.648	62.5



(ก)



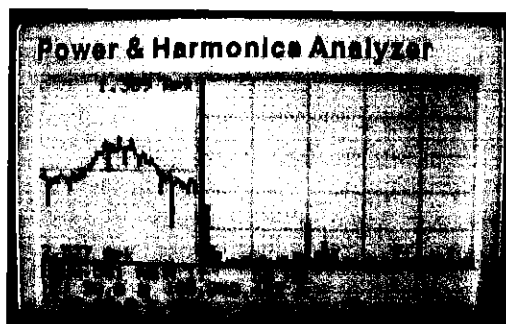
(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลด 50%

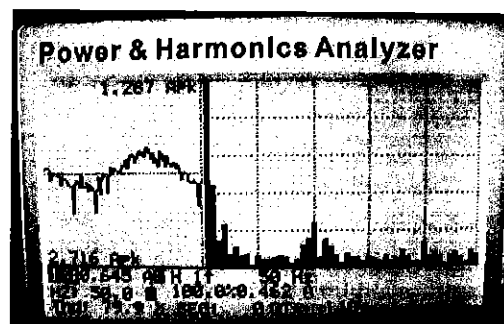
(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลด 100%

ตารางที่ 4.13 กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดระหว่าง 10% - 100% โดยมีความถี่ 60 Hz

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแส (A)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (%)
60	10	0.496	77.2
	20	0.503	77.5
	30	0.517	75.9
	40	0.528	73.2
	50	0.541	63.2
	60	0.581	63.1
	70	0.603	66.7
	80	0.614	61.7
	90	0.625	55.8
	100	0.646	64.8



(ก)



(ข)

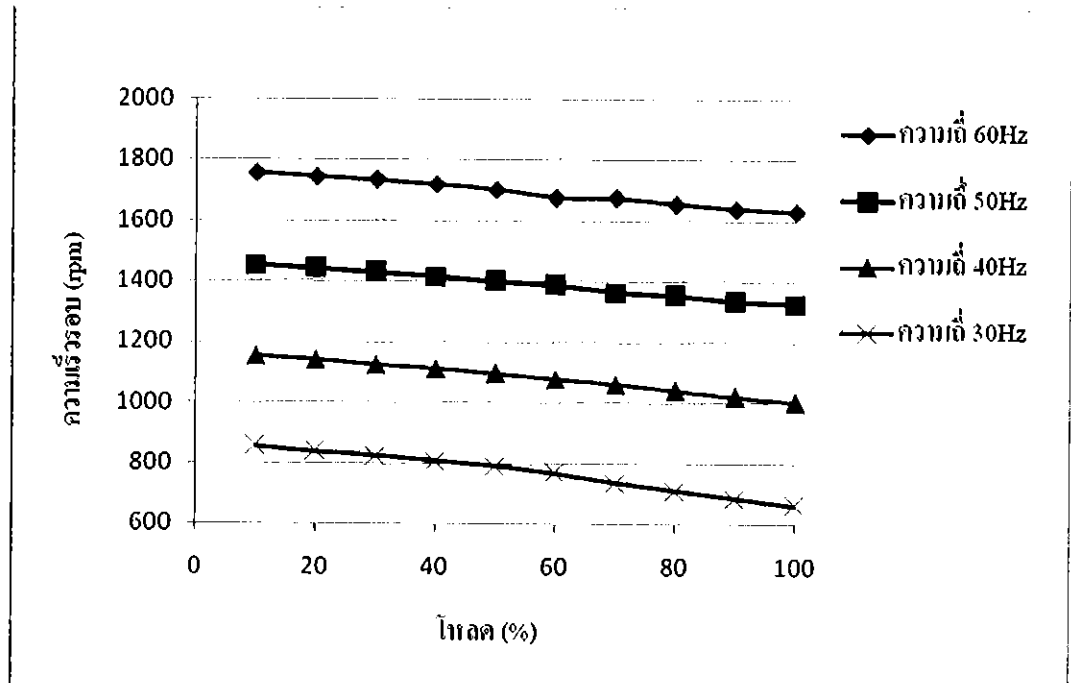
รูปที่ 4.10 (ก) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลด 50%

(ข) กราฟฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลด 100%

## 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.6.1 การเปรียบเทียบความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โหลดกับความเร็รรอบ

จากการทดลอง สามารถนำค่าความเร็รรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 60 Hz มาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โหลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.11



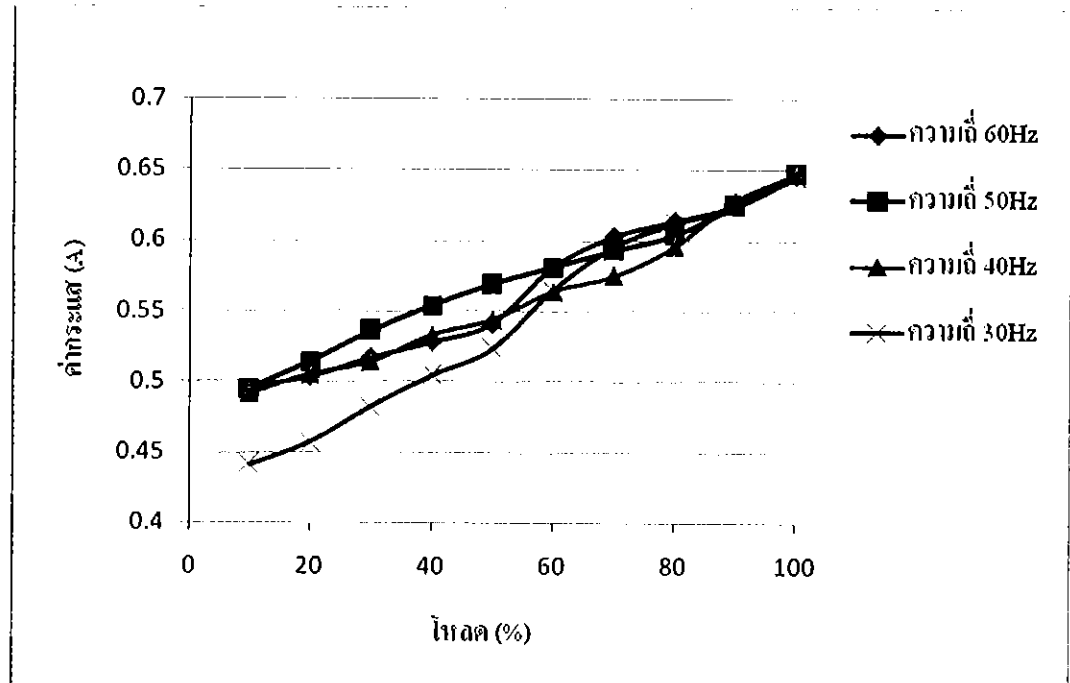
รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความเร็รรอบของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความเร็รรอบของมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น โดยในขณะที่โหลดเต็มพิกัด ความเร็รรอบจะมีค่าน้อยกว่ากว่าขณะไม่มีโหลด เนื่องจากโหลดเป็นตัวทำให้เกิดแรงบิดต้านแรงหมุนของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์มีความเร็วลดลง โดยที่ เมื่อมีแรงบิดสูง ส่งผลให้ความเร็รรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ จะมีค่าลดลง และที่แรงบิดต่ำ ส่งผลให้ความเร็รรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะที่ไม่มีโหลด

สรุปได้ว่า ความเร็รรอบแปรผกผันกับ โหลด แต่แปรผันตรงกับความถี่

#### 4.6.2 การเปรียบเทียบความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โหลดกับกระแส

จากการทดลอง สามารถนำค่ากระแสของมอเตอร์ที่ความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 60 Hz และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โหลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.12



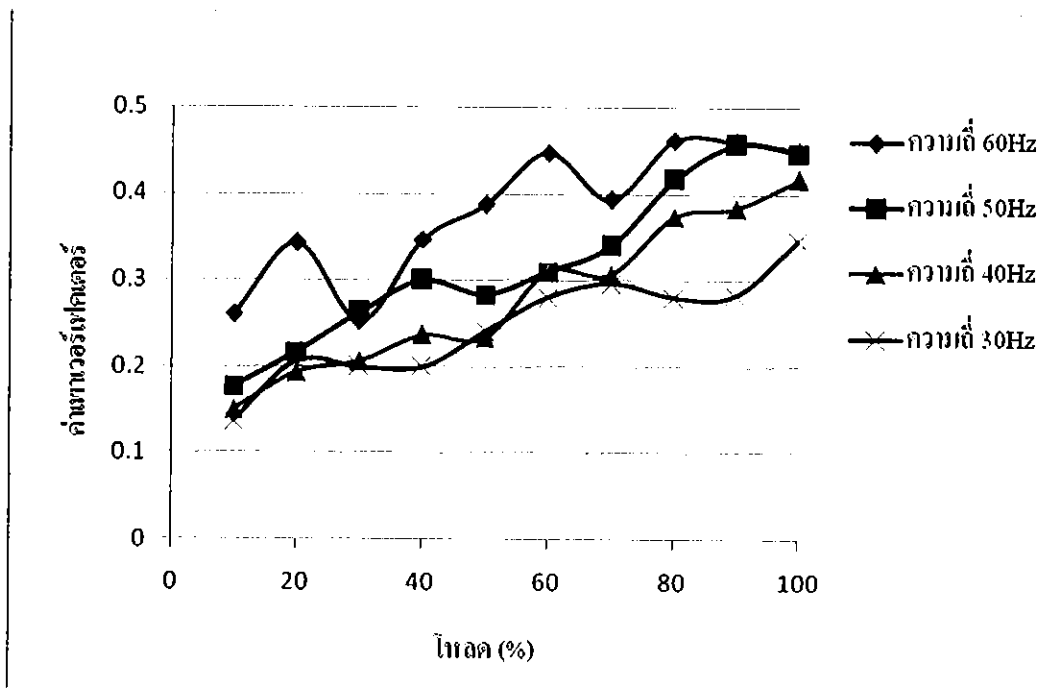
รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงกระแสของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ที่ความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 60 Hz ที่มีโหลด 100% จะมีค่ากระแส 0.65 A เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองมีกระแสสูงสุดที่ 0.65 A (จากเนมเพลท) และเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กระแสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยในแต่ละความถี่มีค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่า กระแสมีค่าแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์โหลด

สรุปได้ว่า กระแสแปรผันตรงกับโหลดและจะสูงที่สุดที่โหลดเต็มพิกัด

#### 4.6.3 การเปรียบเทียบความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โหลดกับค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์

จากการทดลอง สามารถนำค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ที่ความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 60 Hz และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โหลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.13



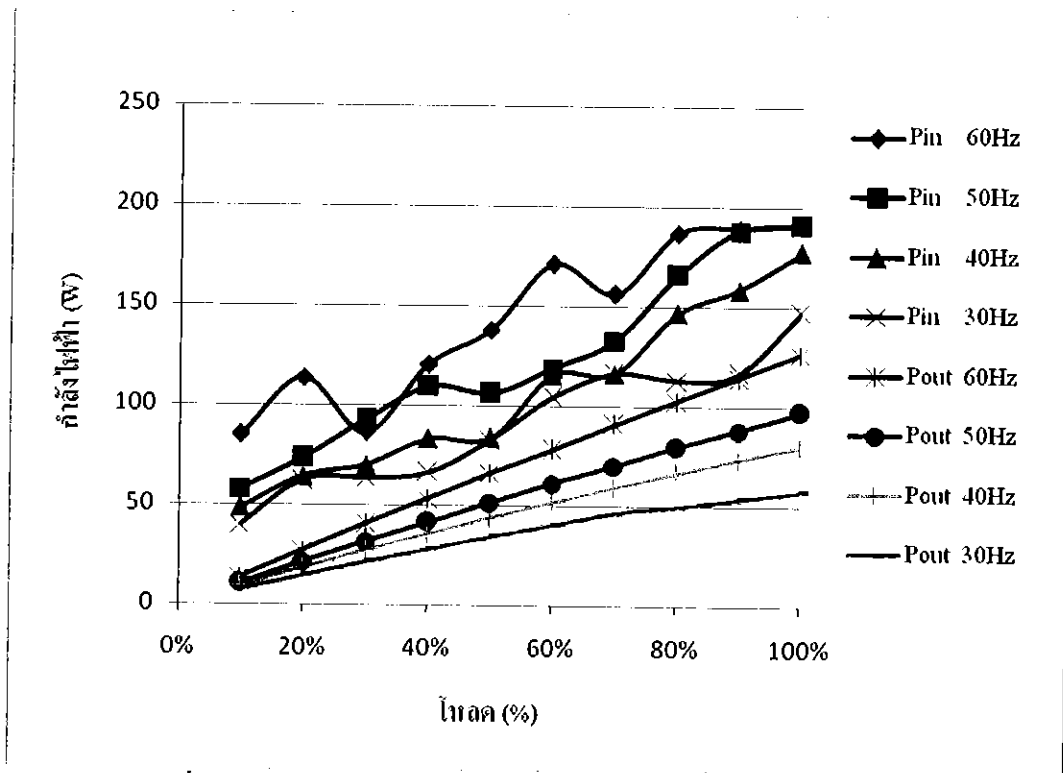
รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์มีแนวโน้มที่สูงขึ้น เมื่อมอเตอร์มีการจับโหลดในเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น และในทุกๆ ความถี่ มีผลในลักษณะเดียวกันนี้ โดยที่ ความถี่ที่ 60 Hz จะมีค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์โดยเฉลี่ยที่สูงที่สุด

สรุปได้ว่า ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์มีแนวโน้มที่จะแปรผันตรงกับโหลดและความถี่ (แต่อาจมีบางช่วงที่ไม่เป็นไปตามนั้น อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทดลอง)

#### 4.6.4 การเปรียบเทียบแต่ละความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โหลดกับค่า $P_{in}$ และ $P_{out}$

จากการทดลองสามารถนำค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โหลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.14



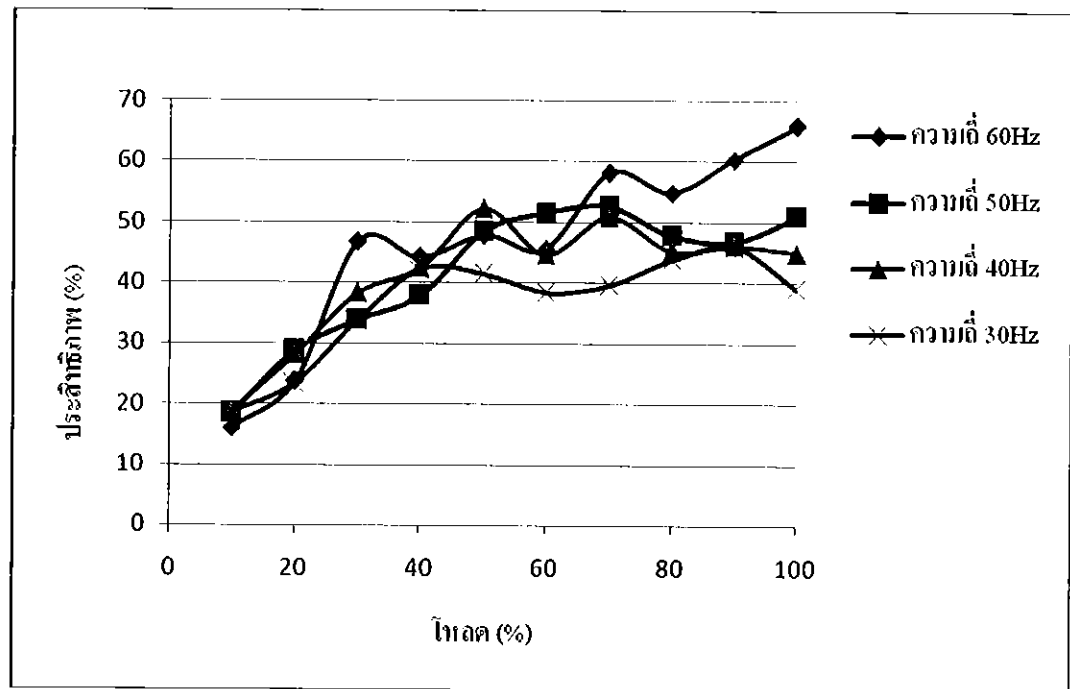
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงค่า  $P_{in}$  และ  $P_{out}$  ของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 พบว่า กำลังอินพุตจะมีค่ามากกว่ากำลังเอาต์พุต แต่ในทางอุดมคตินี้ กำลังเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกำลังอินพุต ซึ่งในการปฏิบัติจริง จะมีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นภายในมอเตอร์และโหลด ที่ความถี่อื่นๆ ก็เป็นลักษณะเช่นเดียวกันนี้ โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงที่สุดที่โหลดที่สูงที่สุด

สรุปได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต และค่ากำลังไฟฟ้าแปรผันตรงกับ โหลด และแปรผันตรงตามความถี่ (อาจมีบางช่วงที่ไม่เป็นไปตามนั้น อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทดลอง)

#### 4.6.5 การเปรียบเทียบแต่ละความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โหลดกับประสิทธิภาพ

จากการทดลอง สามารถนำค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 60 Hz นำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โหลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.15



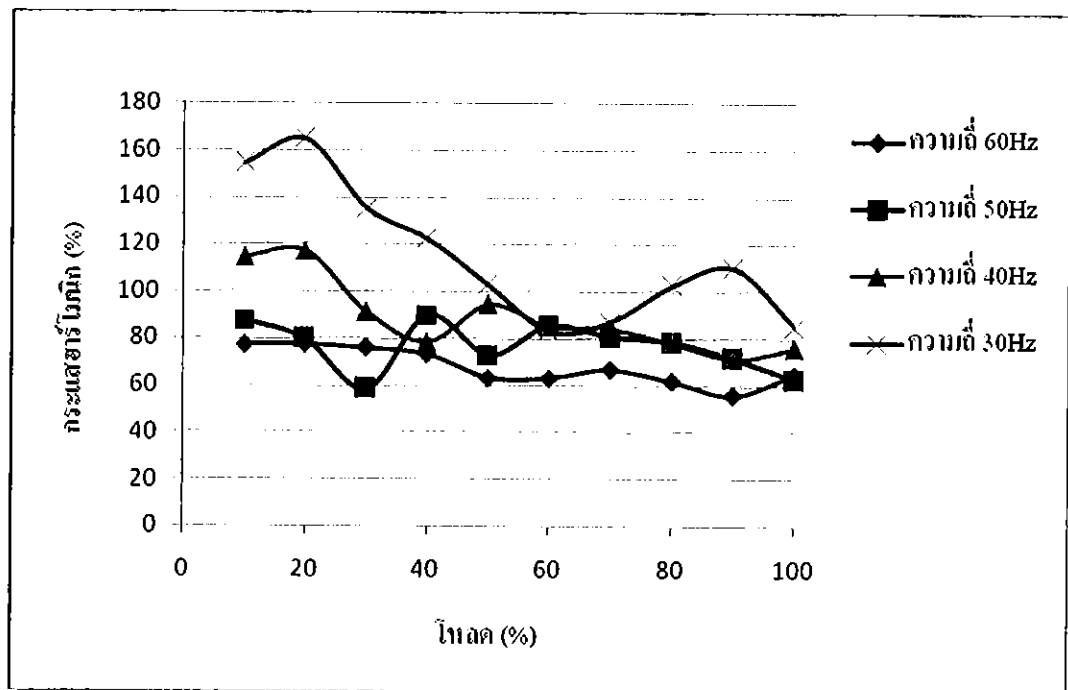
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่โหลดอยู่ในช่วง 50% ถึง 100% ซึ่งอาจจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อย และประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุด เมื่อมีสภาวะโหลดโดยเฉลี่ยประมาณ 75% ดังนั้น และที่สภาวะโหลดต่ำ คือ ในช่วงที่โหลดต่ำกว่า 50% โดยประมาณ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีการลดลงอย่างรวดเร็ว ในความถี่อื่นๆ ก็มีผลในลักษณะคล้ายกันนี้ โดยที่ ความถี่ 60 Hz จะมีค่าประสิทธิภาพ โดยเฉลี่ยแล้วสูงที่สุด



#### 4.6.6 การเปรียบเทียบแต่ละความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โพลดกับค่ากระแสฮาร์โมนิกส์

จากการทดลองสามารถนำค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ของมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์โพลด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แผนภูมิแสดงค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ของมอเตอร์ที่โพลดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อโพลดมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีแนวโน้มที่ลดลง เป็นลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในทุกๆ ความถี่ โดยที่ในช่วงความถี่สูงขึ้น จะมีค่าฮาร์โมนิกส์ที่สูงขึ้นด้วยและสูงที่สุดที่ความถี่ 60 Hz สรุปได้ว่า กระแสฮาร์โมนิกส์จะแปรผันตรงกับโพลดและความถี่

สรุปได้ว่า กระแสฮาร์โมนิกส์แปรผกผันกับโพลดและความถี่ (อาจมีบางช่วงที่ไม่เป็นไปตามนั้น อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทดลอง)

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินโครงการ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการทดลองและศึกษาผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะโหลด 10% ถึง 100% โดยควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz จากผลการทดลองพบว่า

5.1.1. การเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะที่ไม่มีโหลด จะมีค่ากระแสและความเร็วรอบคงที่ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ส่งผลให้กระแสและความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสและความเร็วรอบก็จะสูงเพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ความถี่มีผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

5.1.2. การเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะที่มีโหลด และปรับตั้งความถี่ไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ส่งผลให้กระแสและความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากระแสพิสัยของมอเตอร์ ส่วนความเร็วรอบจะลดลงเรื่อยๆ จนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสหยุดหมุน นั่นคือ โหลดมีผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่พร้อมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ส่งผลให้กระแสและความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน คือ เมื่อความถี่และโหลดเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากระแสพิสัยของมอเตอร์ ส่วนความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ที่ความถี่เดียวกันนั้น เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบน้อยลงเรื่อยๆ จนหยุดหมุน

5.1.3. ในการพิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกส้นนั้น ทำได้โดยการเดินเครื่องมอเตอร์ ในสภาวะที่มีโหลดและไม่มีโหลด ค่ากระแสฮาร์มอนิกส้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่และโหลดมีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาพบว่า เมื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สูงๆ ส่งผลให้ค่าฮาร์มอนิกส้นมีค่าลดลง นั่นคือ ที่ความถี่สูงๆ ระบบจะมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้นจึงทำให้เกิดค่าฮาร์มอนิกส้นน้อย

5.1.4 การเดินเครื่องมอเตอร์ในสภาวะที่มีโหลด ปรับตั้งความถี่ที่คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อมีโหลดเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพของมอเตอร์ก็จะสูงขึ้นด้วย แต่จะมีค่าสูงที่สุดโดยเฉลี่ยแล้วที่โหลดประมาณ 75 % และค่าประสิทธิภาพจะตกลงอย่างรวดเร็ว เมื่อโหลดมีค่าต่ำกว่า 50% ลงไป และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อความถี่สูงขึ้น ทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

ดังนั้น ในการเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสไปใช้งาน ต้องเลือกให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ โดยต้องคำนึงถึงค่ากระแสพิคกและความเร็วรอบของมอเตอร์ กำลังของมอเตอร์และยังต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยการควบคุมจากอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมด้วย

## 5.2 ประเมินผลการทดลอง

จากการดำเนินงานโครงการเมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์ ได้ผลดังนี้

5.2.1 สามารถคำนวณทอร์กได้ จากการวัดทอร์กที่โหลดมีค่า 100% โดยการนำค่าพิคกกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้ในการอ้างอิง เพื่อวัดค่ากระแสและการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ตามค่าโหลดต่างๆ

5.2.2 สามารถบันทึกผลและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ คือ กระแสเฟส กระแสฮาร์โมนิกส์ ความเร็วรอบ และเพาเวอร์แฟกเตอร์ ขณะเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสถานะโหลด 10% ถึง 100% และในสถานะที่ไม่มีโหลดที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz

5.2.3 สามารถคำนวณกำลังของมอเตอร์ทั้งขาเข้าและขาออก และคำนวณค่าประสิทธิภาพขณะเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสถานะโหลด 10% ถึง 100% และในสถานะที่ไม่มีโหลดที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz

5.2.4 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่ากระแส ความเร็วรอบ เพาเวอร์แฟกเตอร์ กระแสฮาร์โมนิกส์และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ขณะเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสถานะโหลด 10% ถึง 100% และในสถานะที่ไม่มีโหลดที่ความถี่ 30 Hz ถึง 60 Hz

## 5.3 ปัญหา ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข

5.3.1 ปัญหาเกิดจาก มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองเดินเครื่องนานไม่ได้ เนื่องจากมอเตอร์จะเกิดความร้อน จึงต้องบันทึกค่าด้วยความรวดเร็วในช่วงที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเดินเครื่องเพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหาย

5.3.2 ปัญหาเกิดจากการ ต่อวงจรผิดพลาดทำให้อุปกรณ์ในการทดลองเสียหาย เช่น การต่อกระแสไฟฟ้า 3 เฟส 380 V เข้าที่อินเวอร์เตอร์และการต่อเฟสของมอเตอร์เข้าที่อินเวอร์เตอร์ ต้องระวังอย่าให้สายสัมผัสกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ดังนั้น จึงต้องระมัดระวังในช่วงการต่อวงจรให้มาก

5.3.3 ปัญหาเกิดจาก การปรับทอร์คของโหลตมากเกินไป จนมอเตอร์มีกระแสเกินพิกัด จะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ จึงต้องระมัดระวังในการปรับค่าทอร์ค

5.3.4 ปัญหาเกิดจาก อุปกรณ์ในการทดลองมีประสิทธิภาพไม่ค่อยดีทำให้ได้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน

#### 5.4 ข้อดีของการศึกษาผลกระทบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยควบคุมอินเวอร์เตอร์

5.3.1 สามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบ เพื่อเลือกใช้มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคำนึงถึงขนาดกำลังของมอเตอร์ และการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยในการควบคุม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

5.3.2 สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์

5.3.3 เป็นแนวทางในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ และกระแสฮาร์โมนิกส์เพื่อทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด

#### 5.5 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ผลที่ได้จากการศึกษาและทดลองในโครงการนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งในโครงการนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่ เพื่อให้เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาการเลือกขนาดและการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ประหยัดพลังงานและเพื่อลดต้นทุนต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมคิด วิริยะประสิทธิ์, (2542), มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, หจก.สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, สืบค้นเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน 2553.
- [2] มงคล ทองสงคราม, (2535), เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ เล่ม 1, บริษัท รามาคารพิมพ์ จำกัด พิมพ์ครั้งที่ 1, สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2553.
- [3] ไชยชาญ หินเกิด, (2547), เครื่องกลไฟฟ้า เล่ม 2, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 5, สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2553.
- [4] ณรงค์ ขอนตะวัน, (2538), มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เล่ม 1, เอราวิณการพิมพ์, สืบค้นเมื่อวันที่ 26 มกราคม 2554.
- [5] วิชัย สังข์จันรานนท์, (2535), ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เล่ม 1, บริษัท ศ.เอเชียเพรส พิมพ์ครั้งที่ 4, สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มกราคม 2554.
- [6] ณรงค์ ขอนตะวัน, (2538), มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เล่ม 2, เอราวิณการพิมพ์, สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มกราคม 2554.

ภาคผนวก

ข้อมูลแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ต่างๆ ในสถานะที่ไม่มีโหลด

ความถี่ (Hz)	ค่ากระแส (A)			ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	0.457	0.463	0.467	0.462
30	0.494	0.481	0.490	0.488
40	0.515	0.519	0.519	0.517
50	0.527	0.530	0.529	0.528
60	0.532	0.531	0.534	0.532

ตารางที่ 2 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ต่างๆ ในสถานะที่ไม่มีโหลด

ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบ (rpm)			ค่าความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	572	572	570	571.333
30	866	873	872	870.333
40	1,174	1,171	1,173	1,172.666
50	1,470	1,495	1,469	1,478.000
60	1,766	1,753	1,764	1,761.000

ตารางที่ 3 เพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ต่างๆ ในสถานะที่ไม่มีโหลด

ความถี่ (Hz)	เพาเวอร์แฟกเตอร์			เพาเวอร์แฟกเตอร์เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	0.300	0.360	0.320	0.326
30	0.200	0.280	0.200	0.226
40	0.150	0.180	0.110	0.146
50	0.090	0.040	0.250	0.126
60	0.140	0.130	0.100	0.123

ตารางที่ 4 ค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 30 Hz ในสถานะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ค่ากระแส (A)			ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
30	10	0.439	0.444	0.440	0.441
	20	0.449	0.467	0.455	0.457
	30	0.481	0.486	0.480	0.482
	40	0.502	0.506	0.506	0.504
	50	0.525	0.525	0.520	0.523
	60	0.563	0.565	0.566	0.564
	70	0.593	0.595	0.599	0.595
	80	0.613	0.614	0.610	0.612
	90	0.625	0.626	0.621	0.624
	100	0.646	0.646	0.644	0.645



ตารางที่ 5 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 30 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ความเร็วรอบ (rpm)			ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
30	10	856	854	856	855.333
	20	841	839	836	838.666
	30	826	822	822	823.333
	40	812	803	807	807.333
	50	793	787	788	789.333
	60	766	766	767	766.333
	70	744	727	737	736.000
	80	719	702	711	710.666
	90	690	674	687	683.666
	100	675	649	659	661.000

ตารางที่ 6 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 30 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	เพาเวอร์แฟกเตอร์			เพาเวอร์แฟกเตอร์เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
30	10	0.090	0.170	0.150	0.136
	20	0.120	0.280	0.220	0.206
	30	0.230	0.190	0.180	0.200
	40	0.240	0.150	0.210	0.200
	50	0.250	0.260	0.210	0.240
	60	0.330	0.270	0.240	0.280
	70	0.310	0.290	0.290	0.296
	80	0.280	0.390	0.170	0.280
	90	0.210	0.330	0.310	0.283
	100	0.320	0.410	0.310	0.346

ตารางที่ 7 ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 30 Hz

ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (A %)			กระแสฮาร์โมนิกส์รวมเฉลี่ย (A %)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
30	10	156.300	169.400	137.400	154.366
	20	189.400	162.600	142.200	164.733
	30	121.900	141.500	142.000	135.133
	40	96.000	140.500	130.300	122.266
	50	91.400	115.600	100.700	102.566
	60	84.460	79.000	85.500	82.986
	70	88.800	81.900	90.800	87.166
	80	92.800	111.300	104.200	102.766
	90	101.400	117.000	111.200	109.866
	100	79.300	88.400	87.300	85.000

ตารางที่ 8 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 40 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ความเร็วรอบ (rpm)			ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
40	10	1,153	1,156	1,152	1,153.666
	20	1,141	1,143	1,136	1,140.000
	30	1,122	1,127	1,121	1,123.333
	40	1,108	1,116	1,109	1,111.000
	50	1,099	1,098	1,095	1,097.333
	60	1,080	1,075	1,077	1,077.333
	70	1,066	1,061	1,057	1,061.333
	80	1,049	1,044	1,032	1,041.666
	90	1,030	1,020	1,014	1,021.333
	100	1,006	1,002	1,001	1,003.000

ตารางที่ 9 ค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 40 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ค่ากระแส (A)			ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
40	10	0.495	0.496	0.484	0.491
	20	0.502	0.503	0.509	0.504
	30	0.515	0.515	0.512	0.514
	40	0.531	0.531	0.536	0.532
	50	0.543	0.54	0.548	0.543
	60	0.564	0.565	0.562	0.563
	70	0.578	0.57	0.576	0.574
	80	0.594	0.598	0.597	0.596
	90	0.627	0.627	0.629	0.627
	100	0.648	0.645	0.648	0.647

ตารางที่ 10 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 40 Hz  
ในสภาวะ โหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	เพาเวอร์แฟคเตอร์			เพาเวอร์แฟคเตอร์เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
40	10	0.150	0.140	0.160	0.150
	20	0.210	0.190	0.180	0.193
	30	0.220	0.180	0.220	0.206
	40	0.210	0.240	0.260	0.236
	50	0.270	0.240	0.190	0.233
	60	0.330	0.290	0.310	0.310
	70	0.320	0.270	0.330	0.306
	80	0.360	0.370	0.390	0.373
	90	0.410	0.390	0.350	0.383
	100	0.430	0.450	0.370	0.416

ตารางที่ 11 ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 40 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (A %)			กระแสฮาร์โมนิกส์รวมเฉลี่ย (A %)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
40	10	111.800	116.800	115.000	114.533
	20	119.900	103.600	127.600	117.033
	30	99.100	82.200	92.300	91.200
	40	84.900	74.100	75.900	78.300
	50	99.500	92.300	91.700	94.500
	60	81.600	66.600	106.800	85.000
	70	84.600	78.400	89.700	84.233
	80	76.100	69.800	88.700	78.200
	90	73.100	67.900	73.700	71.566
	100	84.900	66.900	75.900	75.900

ตารางที่ 12 ค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ค่ากระแส (A)			ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	10	0.492	0.495	0.498	0.495
	20	0.515	0.513	0.513	0.513
	30	0.532	0.538	0.538	0.536
	40	0.555	0.554	0.554	0.554
	50	0.572	0.565	0.570	0.569
	60	0.588	0.579	0.577	0.581
	70	0.594	0.594	0.591	0.593
	80	0.606	0.602	0.605	0.604
	90	0.630	0.625	0.621	0.625
	100	0.648	0.648	0.647	0.647



ตารางที่ 13 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz ในสถานะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ความเร็วรอบ (rpm)			ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	10	1,455	1,452	1,454	1,453.666
	20	1,441	1,441	1,444	1,442.000
	30	1,432	1,430	1,428	1,430.000
	40	1,416	1,414	1,417	1,415.666
	50	1,401	1,403	1,400	1,401.333
	60	1,387	1,390	1,387	1,388.000
	70	1,351	1,370	1,371	1,364.000
	80	1,347	1,355	1,359	1,353.666
	90	1,331	1,334	1,338	1,334.333
	100	1,330	1,324	1,326	1,326.666

ตารางที่ 14 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	เพาเวอร์แฟกเตอร์			เพาเวอร์แฟกเตอร์เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	10	0.080	0.240	0.210	0.176
	20	0.160	0.260	0.230	0.216
	30	0.230	0.280	0.280	0.263
	40	0.280	0.310	0.310	0.300
	50	0.320	0.250	0.280	0.283
	60	0.320	0.300	0.310	0.310
	70	0.330	0.330	0.360	0.340
	80	0.520	0.350	0.380	0.416
	90	0.540	0.440	0.390	0.456
	100	0.570	0.380	0.390	0.446

ตารางที่ 15 ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (A %)			กระแสฮาร์โมนิกส์รวมเฉลี่ย (A %)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	10	72.500	93.600	96.700	87.600
	20	83.800	78.100	77.500	79.800
	30	77.400	100.800	78.500	85.566
	40	97.800	87.200	84.500	89.833
	50	69.600	75.000	74.400	73.000
	60	73.700	89.700	92.700	85.366
	70	65.000	91.900	84.800	80.566
	80	72.500	83.800	78.600	78.300
	90	69.600	73.700	71.500	71.600
	100	48.400	64.700	74.400	62.500

ตารางที่ 16 ค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ค่ากระแส (A)			ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
60	10	0.489	0.490	0.509	0.496
	20	0.500	0.502	0.506	0.502
	30	0.515	0.517	0.519	0.517
	40	0.527	0.528	0.529	0.528
	50	0.554	0.511	0.557	0.540
	60	0.574	0.587	0.583	0.581
	70	0.600	0.605	0.605	0.603
	80	0.611	0.614	0.617	0.614
	90	0.625	0.624	0.625	0.624
	100	0.643	0.651	0.645	0.646

ตารางที่ 17 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 60 Hz ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	ความเร็วรอบ (rpm)			ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
60	10	1,762	1,755	1,756	1,757.666
	20	1,745	1,745	1,742	1,744.000
	30	1,739	1,732	1,731	1,734.000
	40	1,727	1,716	1,716	1,719.666
	50	1,704	1,702	1,702	1,702.666
	60	1,695	1,691	1,643	1,676.333
	70	1,675	1,677	1,670	1,674.000
	80	1,662	1,653	1,651	1,655.333
	90	1,643	1,641	1,634	1,639.333
	100	1,643	1,630	1,621	1,631.333

ตารางที่ 18 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 60 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	เพาเวอร์แฟกเตอร์			เพาเวอร์แฟกเตอร์เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
60	10	0.290	0.240	0.250	0.260
	20	0.350	0.350	0.330	0.343
	30	0.250	0.280	0.230	0.253
	40	0.390	0.300	0.350	0.346
	50	0.430	0.370	0.360	0.386
	60	0.440	0.460	0.440	0.446
	70	0.400	0.390	0.390	0.393
	80	0.470	0.450	0.470	0.463
	90	0.450	0.450	0.480	0.460
	100	0.400	0.460	0.490	0.450

ตารางที่ 19 ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ความถี่ 60 Hz  
ในสภาวะโหลดต่างๆ

ความถี่ (Hz)	โหลด (%)	กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (A %)			กระแสฮาร์โมนิกส์รวมเฉลี่ย (A %)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
60	10	77.200	83.100	71.300	77.200
	20	86.900	68.200	77.400	77.500
	30	91.200	69.300	67.200	75.900
	40	69.200	65.800	84.700	73.233
	50	55.300	68.800	65.500	63.200
	60	66.300	58.700	64.300	63.100
	70	57.700	66.200	76.100	66.666
	80	50.600	73.400	61.000	61.666
	90	53.300	57.900	56.200	55.800
	100	50.200	64.400	79.900	64.833

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายอุทธิรงค์ ศรีโสภา  
 ภูมิลำเนา 143/2 หมู่ 6 ต.หัวรอ อ.เมือง จ.พิษณุโลก  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนพุทธชินราชพิทยา  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [toyzaku@hotmail.com](mailto:toyzaku@hotmail.com)



ชื่อ นางสาว สุวิมล เวฬุ  
 ภูมิลำเนา 48 หมู่ 2 ต.หนองนางนวล อ.หนองฉาง จ.อุทัยธานี  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนหนองฉางวิทยา  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [p\\_o\\_m\\_sang@hotmail.com](mailto:p_o_m_sang@hotmail.com)