

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยอินเวอร์เตอร์

CONTROL THE THREE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH INVERTER



นายวัฒนา นกเที่ยง รหัส 52362182

นายสิทธิศักดิ์ จันทร์ทิม รหัส 52362304

เลขที่หนังสือ.....	พ.ศ. ๒๕๕๖
วันที่รับ.....	1-2 ก.ย. 2556
เลขทะเบียน.....	16432447
เลขเรียกหนังสือ.....	พ.จ.
มหาวิทยาลัยนครพนม ๖398 ก	

2555

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์
ผู้ดำเนินโครงการ นายวัฒนา นกเที่ยง รหัส 52362182
นายสิทธิศักดิ์ จันทร์ทิม รหัส 52362304
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2555

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.....กรรมการ
(ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะ)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์
ผู้ดำเนินโครงการ	นายวัฒนา นกเที่ยง รหัส 52362182 นายสิทธิศักดิ์ จันทร์ทิม รหัส 52362304
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ กำลังไฟฟ้า กระแส แรงดัน แรงบิด ความเร็วรอบและ อุณหภูมิของมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนไปการทดลองนี้จะทดลองที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% ของมอเตอร์ โดยจะปรับความถี่ลดลงจาก 50 เฮิรตซ์ถึง 5 เฮิรตซ์ปรับลดทีละ 5 เฮิรตซ์ซึ่ง จะแบ่งการทดลองออกเป็นสองวิธี คือ วิธีที่หนึ่งคือปรับความถี่แล้วปรับกำลังไฟฟ้ากลับมาเท่าเดิม แล้วจึงอ่านค่าต่างๆ วิธีที่สองคือปรับความถี่โดยไม่สนใจกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ทั้งนี้การ ดำเนินการทดลองจะอยู่ในขอบเขตของพิกัดกระแสและกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อป้องกันอุปกรณ์ เสียหาย จากความรู้ที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานเพื่อประยุกต์ใช้ในงานให้เหมาะสม

Project title Control the Three-Phase Induction Motor with Inverter
Name Mr. Wattana Noktaing ID. 52362182
Mr. Sittisak Juntim ID. 52362304
Project advisor Assistant Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2012

Abstract

This research is a study of the three-phase induction motor with inverter. Objective to study the changes of electric power current voltage torque speed and temperature of the motor when the frequency changes. This experiment will test the load 100%, 90%, 80%, 70%, 60% and 50% of the motor by frequency decrease of 50 Hz to 5 Hz, diluted at 5 Hz. which is divided into two experimental methods. Method one is adjust the frequency and the power came back the same, and then read the values. The second method is adjusting the frequency, ignoring the power to change. By trial will be conducted within the limits of rated current and power of the motor to prevent equipment damage. The knowledge gained from this research can be the basis for the application to work properly.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเรื่องการควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสิน ชัยวานิช ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจนกระทั่งโครงการเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรพันธ์ วงศ์กั้งแห และ ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะ ซึ่งเป็นคณะกรรมการโครงการ ที่ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำโครงการและท่านที่มีส่วนร่วมในการทำโครงการนี้ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นายวัฒนา นกเที่ยง
นายสิทธิศักดิ์ จันทร์ทิม

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณที่ใช้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor).....	4
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	5
2.3 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	7
2.4 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	21
2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	24
2.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	25
2.7 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์.....	28
2.8 การควบคุมมอเตอร์.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ ให้เหมาะสมกับมอเตอร์	35
2.10 อินเวอร์เตอร์ในท้องตลาด.....	35
บทที่ 3 วิธีคำนวณ ครงงาน	40
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2 วิธีการทดลอง	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47
4.1 ผลการทดลองที่ 1	47
4.2 ผลการทดลองที่ 2	71
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ใช้อินเวอร์เตอร์ทดสอบ	101
4.4 สรุปผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ทดสอบ.....	106
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	128
5.1 สรุปผลการทดลอง	128
5.2 ปัญหาและการแก้ไข	128
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	129
เอกสารอ้างอิง.....	130
ประวัติผู้ดำเนิน ครงงาน.....	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.5 ตารางการดำเนินงาน	2
2.1 ตารางสรุปความสัมพันธ์ความเร็วรอบของมอเตอร์กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก	25
2.2 การแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์	31
2.3 ตารางรูปแบบการควบคุม	32
4.1 โหลด 100% โดยให้กำลังคงที่ 175 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	47
4.2 โหลด 90% โดยให้กำลังคงที่ 157 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	51
4.3 โหลด 80% โดยให้กำลังคงที่ 140 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	55
4.4 โหลด 70% โดยให้กำลังคงที่ 122 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	59
4.5 โหลด 60% โดยให้กำลังคงที่ 105 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	63
4.6 โหลด 50% โดยให้กำลังคงที่ 87 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz).....	67
4.7 ปรับโหลด 100% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)..	71
4.8 ปรับโหลด 90% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz).....	76
4.9 ปรับโหลด 80% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)....	81
4.10 ปรับโหลด 70% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)..	86
4.11 ปรับโหลด 60% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)..	91
4.12 ปรับโหลด 50% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)..	96
4.13 โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% โดยไม่ใช้อินเวอร์เตอร์	101
4.14 แสดงกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	106
4.15 สรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	108
4.16 สรุปแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	110
4.17 สรุปความเร็วรอบ (r/min) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	112
4.18 สรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%.....	114
4.19 สรุปกำลังไฟฟ้า (W) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%.....	116
4.20 สรุปกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	118
4.21 สรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.22 สรูปแรงบิด ($N\cdot m$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	122
4.23 สรูปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	124
4.24 สรูปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% – 50%	126



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	4
2.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.3 ขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	6
2.5 โรเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์.....	7
2.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.7 วงจรสมมูลของ โรเตอร์.....	12
2.8 วงจรสมมูลของ โรเตอร์.....	12
2.9 วงจรสมมูลของสเตเตอร์.....	13
2.10 แผนภาพตำแหน่งกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18
2.12 วงจรหาแรงดันเทวินิน.....	18
2.13 วงจรสมมูลหาอิมพีแดนซ์เทวินิน.....	19
2.14 วงจรสมมูลเทวินิน.....	20
2.15 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	22
2.16 แสดงรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส.....	22
2.17 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว.....	23
2.18 อินเวอร์เตอร์ รุ่น E500 Mitsubishi.....	24
2.19 รูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์.....	25
2.20 คีชีเป็นเอชอี อินเวอร์เตอร์.....	27
2.21 เอชอีเป็นคีชี คอนเวอร์เตอร์.....	27
2.23 หลักทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	28
2.24 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์.....	29
2.25 การเปิดปิดสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์.....	29
2.26 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิทช์.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 วงจรกำจัดกระแสอินรัช	33
2.28 การลดความเร็วโดยอินเวอร์เตอร์	34
2.29 มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์ รุ่น FRES00.....	35
2.30 มิตซูบิชิรุ่น FR D 740.....	36
2.31 เคลต้าอินเวอร์เตอร์ รุ่น VDL	37
2.32เคลต้าอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-EL	37
2.33 เคลต้าอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-E.....	37
2.34เคลต้าอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-B.....	38
2.35 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์ VLT ไมโครไครฟ์	38
2.36แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT2800.....	39
2.37แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT ACไครฟ์.....	39
2.38แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่นVLTไครฟ์	39
3.1 ไอศเกรมสำหรับการทดลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์.....	40
3.2 การทดลอง	40
3.3มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	41
3.4วัตต์มิเตอร์.....	41
3.5 โวลต์ มิเตอร์.....	42
3.6แคลมป์มิเตอร์	42
3.7 อินเวอร์เตอร์.....	43
3.8อิเล็กทรอนิกส์ไดนาโมมิเตอร์	43
3.9แหล่งจ่ายไฟฟ้า	44
3.10 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด	44
4.1 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	48
4.2 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	48
4.3 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	50
4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	50
4.6 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	52
4.7 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	52
4.8 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	53
4.9 กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	54
4.10 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	54
4.11 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป.....	56
4.12 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	56
4.13 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	57
4.14 กราฟแสดงความเร็ว rpm เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	58
4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	58
4.16 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	60
4.17 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	60
4.18 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	61
4.19 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	62
4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	62
4.21 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	63
4.22 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	64
4.23 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	65
4.24 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	65
4.25 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	66
4.26 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	67
4.27 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	68
4.28 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	69
4.30 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	70
4.31 กราฟแสดงกำลัง (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	72
4.32 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	72
4.33 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	73
4.34 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	74
4.35 กราฟแสดงความเร็ว (r/min) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	74
4.36 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	77
4.37 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	77
4.39 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	78
4.40 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	79
4.41 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	79
4.42 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	80
4.43 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	82
4.44 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	82
4.45 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	83
4.46 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	84
4.47 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	84
4.48 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป	85
4.49 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	87
4.50 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	87
4.51 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	88
4.52 กราฟแสดงแรงบิด ($N*m$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	89
4.53 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	89
4.54 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.55 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	92
4.56 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	92
4.57 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	93
4.58 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	94
4.59 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	94
4.60 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป	95
4.61 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	97
4.62 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	97
4.63 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	98
4.64 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป.....	99
4.65 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป	99
4.66 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนแปลงไป.....	100
4.67 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง.....	101
4.68 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง.....	102
4.69 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง.....	103
4.70 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง.....	103
4.71 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง.....	104
4.72 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง	105
4.73 กราฟแสดงกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%	107
4.74 กราฟแสดงแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%	109
4.75 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%	111
4.76 กราฟสรูปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	113
4.77 กราฟกราฟสรูปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	115
4.78 กราฟสรูปกำลังไฟฟ้า (W) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	117
4.79 กราฟสรูปกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.80 กราฟสรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	121
4.81 กราฟสรุปแรงบิด ($N\cdot m$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	123
4.82 กราฟสรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	125
4.83 กราฟสรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100% - 50%.....	127



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม และในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าสำหรับใช้งานในบ้านพักอาศัย เช่น ปั๊มน้ำ ระบบสายพานลำเลียง พัดลมเป่าอากาศ และคอมเพรสเซอร์ของระบบเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น การใช้อินเวอร์เตอร์ช่วยควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นประเด็นที่จะต้องมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมของการใช้งานทั้งในด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ต้นทุนการก่อสร้าง และการประหยัดกำลังงาน เนื่องจากมีความหลากหลายของประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ กระแสสลับที่มีการจำหน่ายในปัจจุบัน ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ยังจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความต้องการของผู้ใช้ เช่น แรงบิด ความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมไปถึงกำลังงานที่จะต้องใช้ในการขับมอเตอร์ดังกล่าว โดยปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษากระแส แรงดัน ความเร็ว แรงบิดกำลังและอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ช่วยในการควบคุม โดยการปรับความเร็ว
3. เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบวิธีการตรวจวัดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์

1.3 ขอบข่ายของโครงการ

1. สามารถเปรียบเทียบแรงบิดและกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ และไม่มีอินเวอร์เตอร์
2. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และ นำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำและอินเวอร์เตอร์
2. คิดและออกแบบการทดลอง
3. บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง
4. สรุปผลการทดลอง
5. จัดทำรูปเล่มรายงาน

1.5 ตารางการดำเนินงาน

กิจกรรมการดำเนินงาน	2556			
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำและอินเวอร์เตอร์				
2. คิดและออกแบบการทดลอง				
3. บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง				
4. สรุปผลการทดลอง				
5. จัดทำรูปเล่มรายงาน				

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของอินเวอร์เตอร์ต่อแรงบิดและกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. นำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ต่อไป

1.7 งบประมาณที่ใช้

1.ค่าเอกสารประกอบการทำโครงการและค่าทำรูปเล่ม	1,000 บาท
2.ค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	1,000 บาท
รวมเป็นเงิน	<u>2,000 บาท</u>

(สองพันบาทถ้วน)

(หมายเหตุ ถัวเฉลี่ยทุกรายการ)

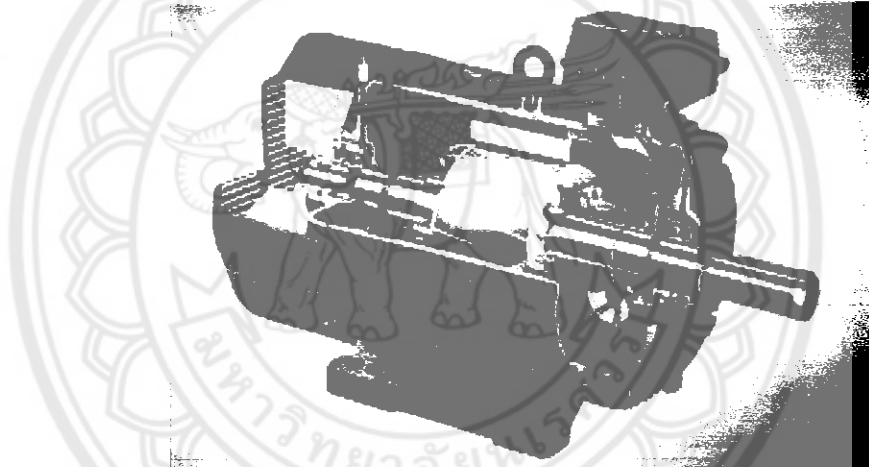


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor) นิยมใช้แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะว่าแข็งแรงทนทาน ราคาถูก ความเร็วค่อนข้างคงที่ และสะดวกในการบำรุงรักษา เพราะโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ด้วยข้อดีเหล่านี้จึงนิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขับเคลื่อนทางกลมากกว่ามอเตอร์ซิงโครนัส อย่างไรก็ตามมีข้อเสียตรงที่ค่าตัวประกอบกำลังต่ำและล่าช้า โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมอเตอร์เป็นจำนวนมากจึงควรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเพื่อไม่ให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากเกินไป ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น



รูปที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

ข้อดี (Advantage)

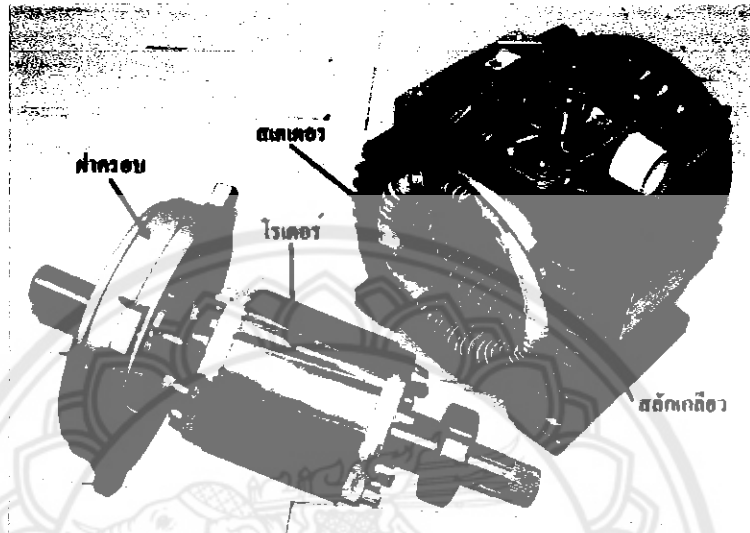
1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และ ทนทาน โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage Type)
2. ราคาไม่แพง และไม่เสียหาย
3. มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสภาวะที่มอเตอร์หมุนปกติไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้น การสูญเสียเนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อยมากและมีเพาเวอร์แฟกเตอร์สูง
4. ต้องการการดูแล และบำรุงรักษาน้อย
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน(Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนด้วยกันคือ

2.2.1 สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)

2.2.2 โรเตอร์หรือส่วนที่หมุน (Rotor)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

2.2.1 สเตเตอร์หรือตัวอยู่กับที่ (Stator)

ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนเข้าด้วยกัน และทำเป็นช่องสลักไว้เพื่อบรรจุขดลวด และ จำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่คงที่ค่าหนึ่ง และ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุน (Revolves or Rotate) ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (N_s)



รูปที่ 2.3 ขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

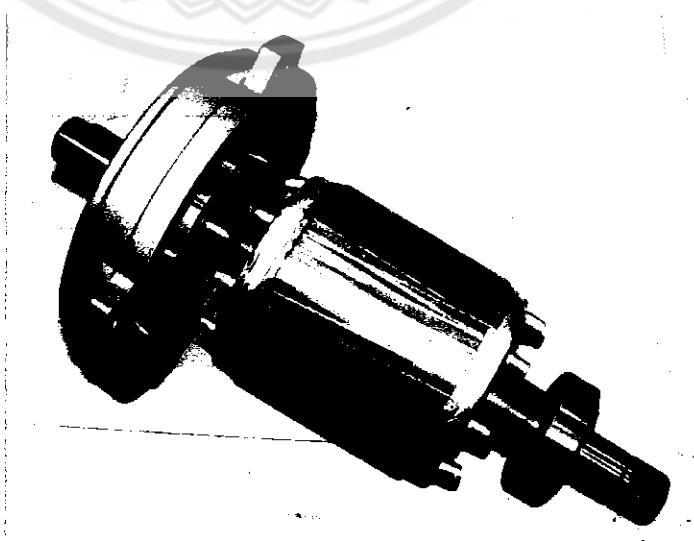
2.2.2 โรเตอร์ หรือส่วนที่หมุน (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เราเรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก โดยประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าโรเตอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ทำได้ง่ายและทนทานที่สุด โรเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสล็อตให้ขนานกัน เพื่อสำหรับฝังหรือ บรรจุตัวนำโรเตอร์ (Rotor Conductor) ลงในช่องสล็อตนั้น ตัวนำที่ฝังนี้จะไม่มีลักษณะเป็นเส้น หรือเป็นสาย แต่จะเป็นแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียม (Copper Bar or Aluminum Bar) โดยในหนึ่งสล็อตจะบรรจุแท่งทองแดง หรือ อลูมิเนียมเพียง 1 แท่งเท่านั้น และที่ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้งสองด้านนั้น ในแต่ละด้านจะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกัน โดยการบัดกรี (Brazed) หรือเชื่อมด้วยไฟฟ้า โรเตอร์ของมอเตอร์แบบกรงกระรอกนี้แท่งตัวนำจะถูกลัดวงจร ไว้อย่างถาวร ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจร โรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ สล็อตของโรเตอร์จะไม่อยู่ในลักษณะที่ขนานกับเพลลา แต่จะวางให้มีลักษณะเฉียงเล็กน้อย เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้สองทาง

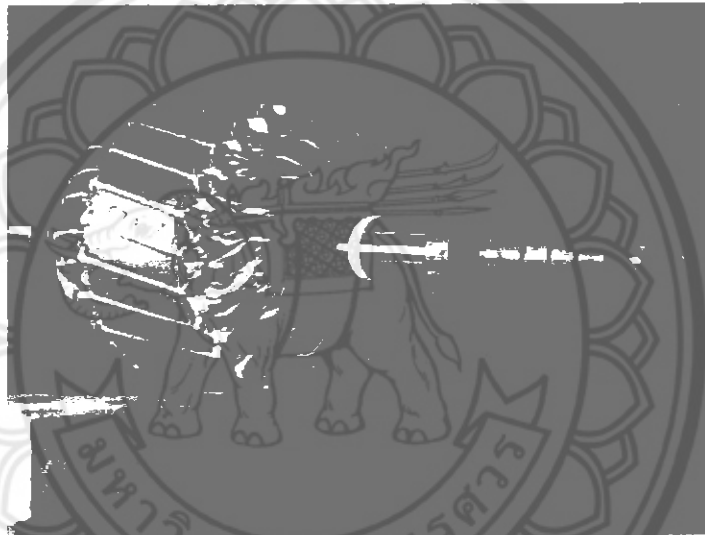
- 1) จะช่วยให้มอเตอร์หมุนได้อย่างเร็ว โดยการลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (Magnetic Hum)
- 2) จะช่วยในการลดการเกิดฮิสต์ หรือล็อกของ โรเตอร์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่ฟัน (Teeth) ของสเตเตอร์กับโรเตอร์ทั้งสอง

ส่วนแบบอื่นๆของ โรเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายกันกับโรเตอร์แบบกรงกระรอกนั้น ประกอบด้วยซิลินเดอร์ (Solid Cylinder) ของแท่งเหล็ก (Steel) ซึ่งปราศจากสล็อตสำหรับบรรจุตัวนำทั้งหมดมอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแสไหลวนในเหล็กของโรเตอร์



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก [1]

2) โรเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์ชนิดนี้จะพบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และมีการพันแบบชุดขดลวดสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ และมีปลายสายออกมา 3 ปลายต่อเข้ากับสลีปรिंगที่ติดกับเพลลาของโรเตอร์นั้น และโรเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์ สามารถที่จะนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ต่อเข้ากับสลีปรिंगของโรเตอร์ เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ เป็นการเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้น ความต้านทานที่นำมาต่อเข้าไปนี้มีลักษณะการต่อคั้งแสดงในรูปที่ 2.1 แต่เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไปแล้ว และหมุนด้วยความเร็วปกติแล้วสลีปรึงจะถูกลัดวงจรกลายเป็น โรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.5 โรเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์[1]

2.3 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อจ่ายสัญญาณรูปไซน์เวฟสมมูล 3 เฟสที่มีความถี่ ($f = \frac{\omega}{2\pi}$) ให้กับสเตเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะสมดุลทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (B_R) กระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (Air Gap) ซึ่งมีขนาดที่คงที่และหมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วที่คงที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed, ω_{sync}) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_{sync} = \frac{2\pi / (P/2)}{1/f} = \frac{2}{P} (2\pi f) = \frac{2}{P} \omega \quad (2.1)$$

ที่ความถี่ (f) ซึ่งเป็นความถี่ของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เราสามารถคำนวณหาความเร็วเชิงโรตอร์ในหน่วยของรอบ/นาทีได้จาก

$$n_{sync} = 60 \times \frac{\omega_{sync}}{2\pi} = \frac{120}{P} f \quad (2.2)$$

โดยที่

- n_{sync} = ความเร็วเชิงโรตอร์
- f = ความถี่หลักมูลของ ไฟฟ้ากระแสสลับ
- P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์สามารถหาได้จาก

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.3)$$

โดยที่

- e_{ind} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำ
- v = ความเร็วในการเคลื่อนตัวตัดฟลักแม่เหล็ก
- B = ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็ก
- l = ความยาวของตัวนำที่เคลื่อนตัวตัดกับฟลักแม่เหล็ก

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในโรตอร์ที่เกิดขึ้นการเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนตัวตัดกับสนามแม่เหล็กของแกนโรตอร์ด้านบนจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กทางด้านขวา โดยแรงดันเหนี่ยวนำด้านบนจะพุ่งออกจากหน้ากระดาษและแรงดันเหนี่ยวนำด้านล่างจะมีทิศพุ่งเข้า ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวโรตอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อโรตอร์ได้ถูกเหนี่ยวนำ กระแสสูงสุดของโรตอร์จะนำหน้าแรงดันสูงสุดของโรตอร์ กระแสที่ไหลในโรตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็ก (B_R) ขึ้นที่ตัวโรตอร์ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิดขึ้นในเครื่องกลดังสมการ

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad (2.4)$$

แรงบิดที่เกิดขึ้นจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและโรตอร์ก็จะถูกเร่งไปในทิศทางเดียวกัน

สลลิป (Slip, S)

สลลิป (S) ในทางปฏิบัตินั้นโรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยปกติแล้วความเร็วของโรเตอร์ (n_r) จะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์ (n_{sync}) ความแตกต่างของความเร็วที่เรียกว่าความเร็วสลลิป (n_{slip}) ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$n_{slip} = n_{sync} - n_r \quad (2.5)$$

โดยที่

n_{slip} = ความเร็วสลลิป

n_{sync} = ความเร็วของสนามแม่เหล็ก

n_r = ความเร็วของโรเตอร์

จากสมการสามารถนำไปหาความเร็วสลลิป ซึ่งจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถได้จากสมการนี้คือ

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100 \quad (2.6)$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} \times 100 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) สามารถนำมาเขียนสมการในรูปของความเร็วเชิงมุม (ω) [rad/sec] ได้ดังนี้

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_r}{\omega_{sync}} \times 100 \quad (2.8)$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่าถ้าความเร็วของโรเตอร์หมุนที่ความเร็วซิงโครนัสสลลิปจะมีค่าเป็นศูนย์ ($s = 0$) แต่ถ้าความเร็วของโรเตอร์หยุดนิ่งสลลิปจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($s = 1$)

นอกจากนี้เราสามารถหาค่าความเร็วของโรเตอร์ในเทอมของความเร็วซิงโครนัสและสลลิป โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ดังนี้

$$n_r = (1 - s)n_{sync} \quad (2.9)$$

หรือ

$$\omega_r = (1 - s)\omega_{sync} \quad (2.10)$$

ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดจากการเหนี่ยวนำของแรงดันและกระแสที่ตัวโรเตอร์ ซึ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุน แต่เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน ความถี่ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Speed) หรือความเร็วสลลิปดังสมการคือ

$$s = \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} \quad (2.11)$$

และความถี่ที่โรเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการคือ

$$f_r = s f_e \quad (2.12)$$

โดยที่ f_r = ความถี่ของโรเตอร์ เฮิร์ต(Hz)
 f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้โรเตอร์ เฮิร์ต(Hz)

เมื่อแทนสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้ว่า

$$f_r = s \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} f_e$$

แต่

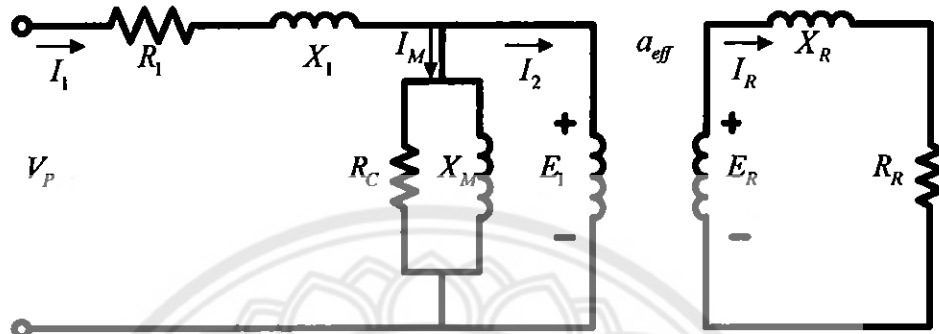
$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{p}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sync} - n_r) \quad (2.13)$$

วงจรสมมูล

การทำงานของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันและกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จากวงจรสเตเตอร์ (transformer action) การหาวงจรสมมูลของมอเตอร์สามารถเริ่มต้นจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นก็พิจารณาผลของความเร็วโรเตอร์ที่มีต่อแรงดันเหนี่ยวนำและความถี่ของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

- เมื่อ
- R_1 = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์, โอห์ม (Ω)
 - jX_1 = รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์, โอห์ม (Ω)
 - R_C = ความต้านทานที่แทนกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก, โอห์ม (Ω)
 - jX_M = รีแอกแตนซ์กระตุ้น, โอห์ม (Ω)
 - R_R = ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์, โอห์ม (Ω)
 - jX_R = รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดโรเตอร์, โอห์ม (Ω)
 - E_R = แรงดันเหนี่ยวนำบนโรเตอร์, โวลต์ (V)

ขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ (E_R) และความถี่ของโรเตอร์ (f_r) ขึ้นกับสลิป(s) ค่าสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หยุดนิ่ง (Locked-Rotor หรือ Blocked-Rotor) คือเมื่อ $s = 1$ ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสคือเมื่อ $s = 0$ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ดังนี้ $E_R = sE_{R0}$ เมื่อ E_{R0} คือแรงดันเหนี่ยวนำขณะโรเตอร์หยุดนิ่ง ในทำนองเดียวกัน เมื่อ X_{R0}

$$X_R = \omega_r L_R$$

$$= 2\pi f_r L_R$$

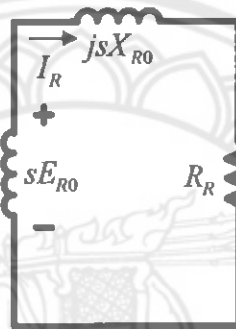
$$= 2\pi s f_e L_R$$

$$= s(2\pi f_e L_R)$$

$$X_R = sX_{R0} \quad (2.14)$$

คือ X_{R0} = รีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์หยุดหมุน

ดังนั้นวงจรสมมูลของโรเตอร์จึงอาจเขียนได้เป็น



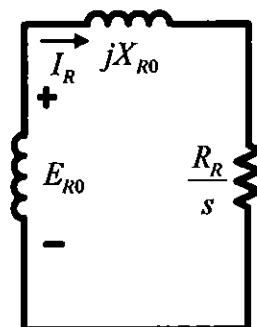
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของโรเตอร์ [2]

แต่

$$I_R = \frac{sE_{R0}}{R_R + jsX_{R0}}$$

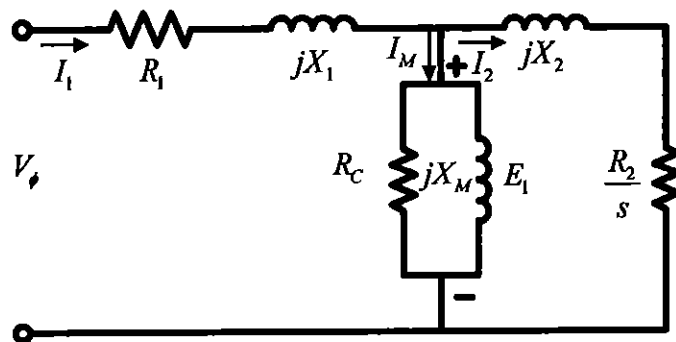
$$= \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (2.15)$$

ดังนั้นวงจรสมมูลของโรเตอร์เขียนได้เป็น



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของโรเตอร์ [2]

วงจรสมมูลอ้างอิงไปทางสเตเตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ [2]

จากรูปเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะอ้างถึงวงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถูกถ่ายโอนไปยังส่วนของสเตเตอร์ แรงดัน กระแสและค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าปกติสามารถกล่าวถึงทางด้านปฐมภูมิได้โดยอาศัยอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าดังสมการ

$$V_p = V'_s = aV_s \quad (2.16)$$

$$I_p = I'_s = \frac{I_s}{a} \quad (2.17)$$

และ

$$Z'_s = a^2 Z_s \quad (2.18)$$

ถ้าอัตราส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ a_{eff} จะสามารถเปลี่ยนค่าของแรงดันโรเตอร์ได้ดังนี้

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (2.19)$$

หาค่ากระแสได้จาก

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (2.20)$$

และหาค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ได้จาก

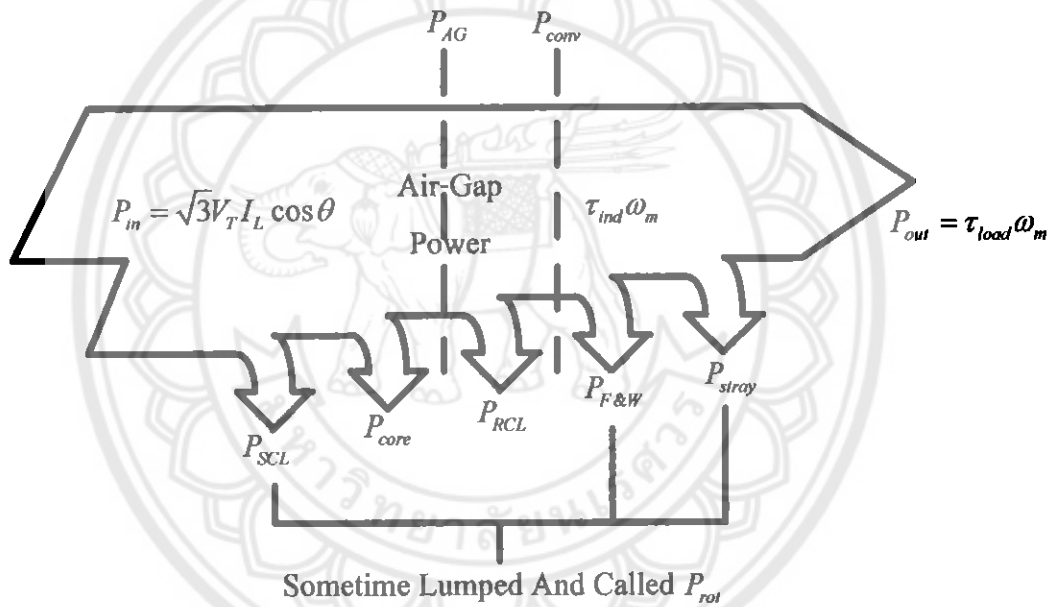
$$Z_2 = a^2_{eff} \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \tag{2.21}$$

และจะได้

$$R_2 = a^2_{eff} R_R \tag{2.22}$$

$$X_2 = a^2_{eff} X_{R0} \tag{2.23}$$

กำลังและแรงบิด (Power and Torque)



รูปที่ 2.10 แผนภาพตำแหน่งกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

จากรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากวงจรสมมูลเมื่อปิดวงจรสามารถที่หาค่ากำลังและแรงบิดในสภาวะการทำงานของมอเตอร์ได้ เมื่อป้อนกระแสให้มอเตอร์จะสามารถหาแรงคั้นของมอเตอร์ได้จากวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์

$$I_1 = \frac{V_{\phi}}{Z_{eq}} \tag{2.24}$$

โดยที่

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{R_C + jX_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \quad (2.25)$$

สามารถหาค่ากำลังสูญเสียได้จากที่ขดลวดที่สเตเตอร์ได้จาก

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.26)$$

สามารถหาค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กได้จาก

$$P_{core} = 3E_1^2 R_C \quad (2.27)$$

และกำลังสูญเสียที่ช่องอากาศได้จากสมการ

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (2.28)$$

ที่วงจรสมมูล โรเตอร์จะมีขดลวดความต้านทานในวงจรและกำลังในช่องว่างอากาศสามารถที่จะหาได้โดยคิดจากความต้านทาน R_2/s ดังนั้นจะได้ว่ากำลังสูญเสียที่ช่องอากาศสามารถหาได้จาก

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.29)$$

การสูญเสียที่ความต้านทานในวงจร โรเตอร์หาได้จาก

$$P_{RSL} = 3I_2^2 R_R \quad (2.30)$$

หรือ

$$P_{RSL} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.31)$$

หลังจากหาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กและกำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์กำลังที่เหลือก็จะเปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังทางกลจึงสามารถหาค่ากำลังที่เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานกลได้จาก

$$\begin{aligned}
 P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\
 &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\
 &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\
 P_{core} &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{2} - 1 \right) \tag{2.32}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.29) และ (2.31) นั้นสามารถหาค่าตั้งสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ได้จากกำลังในช่องว่างอากาศที่สลิปได้ดังสมการ

$$P_{RCL} = sP_{AG} \tag{2.33}$$

ดังนั้นจะได้ว่ามอเตอร์ที่มีค่าสลิปต่ำกว่ากำลังสูญเสียที่โรเตอร์ก็จะมีค่าน้อยแต่ถ้าโรเตอร์หยุดนิ่งค่าสลิปก็จะมีค่าเท่ากับ 1 ($s = 1$) และกำลังที่ช่องว่างอากาศทั้งหมดก็จะถูกใช้ไปในโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หยุดหมุนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา $P_{out} = \tau_{load} \omega_r$ ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจาก $P_{core} = P_{AG} - P_{RCL}$ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศและกำลังที่เปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้จาก

$$\begin{aligned}
 P_{core} &= P_{AG} - P_{RCL} \\
 &= P_{AG} - sP_{AG} \\
 P_{core} &= (1-s)P_{AG} \tag{2.34}
 \end{aligned}$$

ถ้ารู้ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านจากลมหรือกำลังสูญเสียทางกลและกำลังสูญเสียเนื่องจากโหลด เราสามารถที่จะหาค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา (P_{out}) ได้จาก

$$P_{out} = P_{core} - P_{F\&W} - P_{misc} \tag{2.35}$$

และสามารถหาแรงบิดเหนี่ยวนำได้จาก

$$\tau_{ind} = \frac{P_{core}}{\omega_r} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.10) แสดงความเร็วในเทอมของความเร็วซิงโครนัสและสลลิปและสมการที่ (2.34) แสดงกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{conv}) ในเทอมของกำลังสูญเสียในอากาศ (P_{AG}) และสลลิป นำสมการทั้งสองสมการแทนลงในสมการ (2.36) จะได้

$$\tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sync}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \quad (2.37)$$

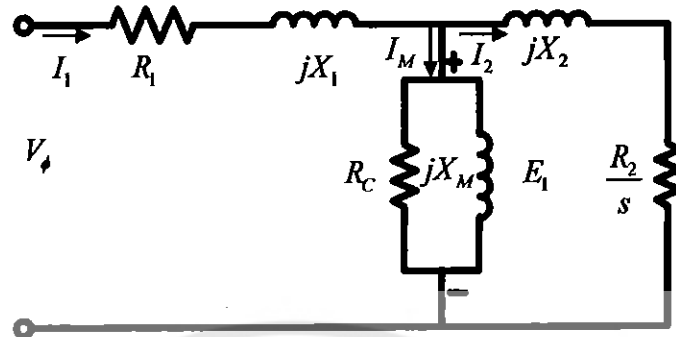
จากสมการที่ (2.29) คือสมการที่แสดงกำลังสูญเสียที่ช่องว่างอากาศในมอเตอร์เหนี่ยวนำและสมการที่ (2.31) แสดงกำลังสูญเสียที่โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ การสูญเสียที่ช่องว่างอากาศคือกำลังสูญเสียในความต้านทานของ R_2/s ขณะที่การสูญเสียที่โรเตอร์คือกำลังสูญเสียในความต้านทาน (R_2) และผลต่างของการสูญเสียทั้งสองก็คือกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_{core} = \frac{R_2}{s} - R_2 = \left(\frac{1}{s} - 1 \right) R_2$$

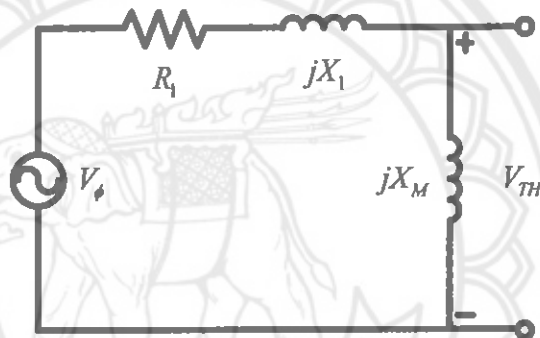
$$R_{core} = \left(\frac{1}{s} - 1 \right) R_2 \quad (2.38)$$

ลักษณะคุณสมบัติเมื่อจ่ายโหลด

เมื่อรวม P_{core} กับ P_{rot} วงจรสมมูลของมอเตอร์อ้างอิงไปทางโรเตอร์สามารถเขียนได้เป็น



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]



รูปที่ 2.12 วงจรหาแรงดันเทวินิน [2]

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังรูปที่ 2.12 จะใช้วิธีของเทวินินในการหาวงจรสมมูลของเทวินินได้โดยการใช้กฎการแบ่งแรงดันคือ

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1}$$

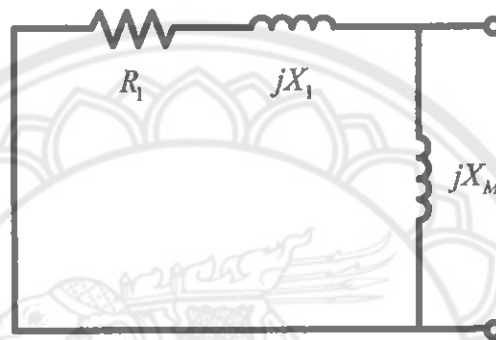
$$= V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

ขนาดของแรงดันเทวินินคือ

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_\phi \quad (2.39)$$

ถ้า $X_M \gg X_1$ และ $X_M \gg R_1$ ขนาดของแรงดันเทวินินสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลหาอิมพีแดนซ์เทวินิน [2]

หาอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลเทวินินได้จาก

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M}$$

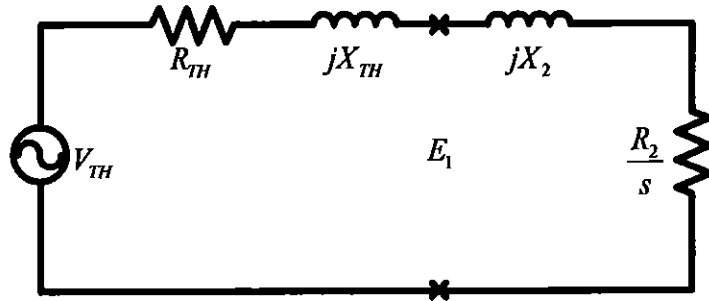
$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (2.41)$$

เพราะ $X_M \gg X_1$ และ $X_M + X_1 \gg R_1$ ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะมีประมาณดังนี้คือ

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.42)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.43)$$

จะได้วงจรสมมูลดังรูป



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเทวินิน [2]

จากวงจรจะได้ค่ากระแสคือ

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (2.44)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (2.45)$$

ขนาดของกระแสคือ

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.46)$$

หากำลังในช่องอากาศได้จาก

$$\begin{aligned} P_{AG} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (2.47)$$

และแรงคั้นเหนี่ยวหน้าที่แกนโรเตอร์หาค่าได้จาก

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{\omega_{sync} \left[(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \quad (2.48)$$

เนื่องจาก τ_{ind} ขึ้นกับ P_{AG} และ ω_{sync} แต่ ω_{sync} มีค่าคงที่ ดังนั้น τ_{max} จึงเกิดขึ้นเมื่อ P_{AG} มีค่าสูงสุดคือ

จากรูปที่ 2.14 จะได้ว่า

$$\frac{R_2}{s} = |R_{TH} + jX_{TH} + jX_2| \quad (2.49)$$

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (jX_{TH} + jX_2)^2} \quad (2.50)$$

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (jX_{TH} + jX_2)^2}} \quad (2.51)$$

แทนค่า s_{max} ในสมการที่ 2.48 จะได้

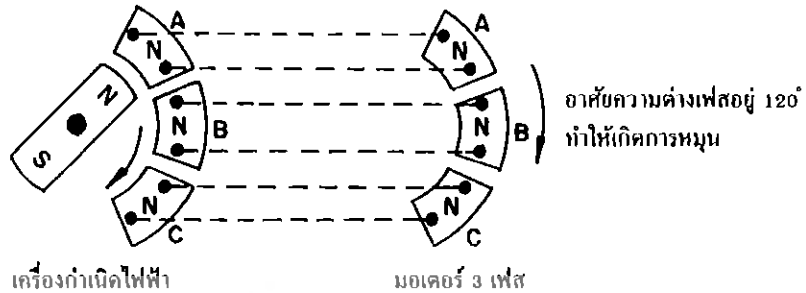
$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (jX_{TH} + jX_2)^2} \right]} \quad (2.52)$$

2.4 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์นั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลัก และดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการดูด และผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

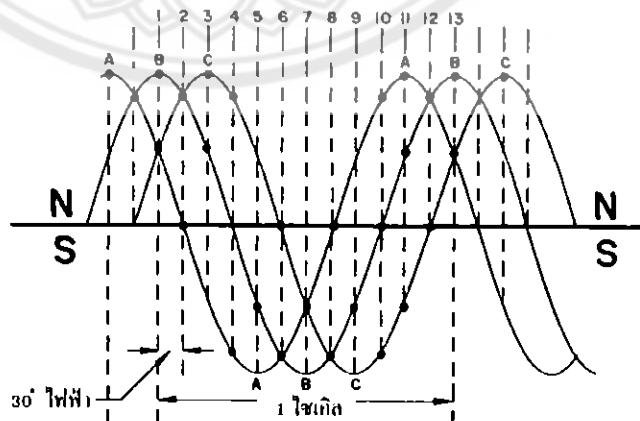
หลักการหมุนของสนามแม่เหล็กโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟสจากรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงให้เห็นว่า ถ้าเราจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสให้กับขดลวดในสเตเตอร์ ในช่วงขณะหนึ่ง สมมติให้เป็นครึ่ง

ไซเคิลบวกดังแสดงในรูปที่ 2.15 ด้านขวามือ โดยการต่อไฟฟ้าเฟส A เข้าการเฟส A ของมอเตอร์ และเฟส B เฟส C เข้ากับมอเตอร์ในเฟสถัดไป เมื่อกระแสไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกเฟส A ไหลเข้า

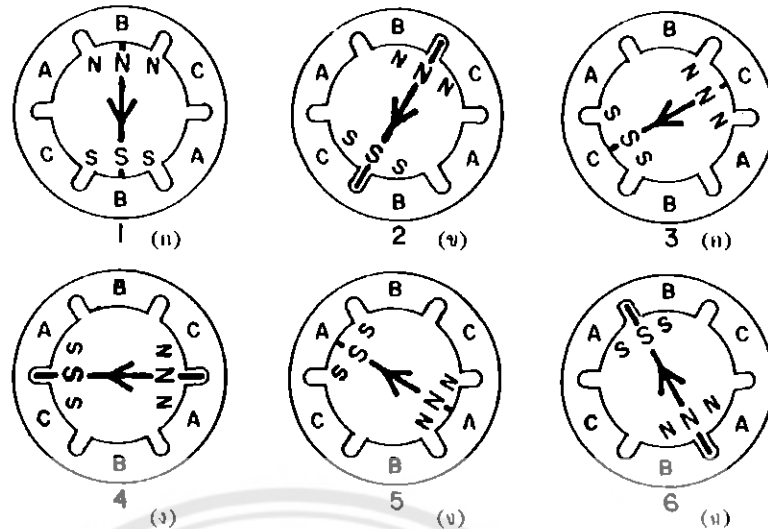


รูปที่ 2.15 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [3]

ไปในขดลวดของเฟส A มอเตอร์ จะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในเฟส A ของมอเตอร์นั้น ทำให้เกิดขั้ว N ขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ที่จ่ายให้กับเฟส A มอเตอร์ค่อยๆ ลดลงอำนาจแม่เหล็กขั้ว N ก็จะค่อยๆ ลดอำนาจ หรือความเข้มลง และในขณะที่เดียวกันที่เฟสถัดไปก็จะมีอำนาจแม่เหล็กคล้ายๆ กับเฟส A แต่ในเวลาถัดไปจนครบ 3 เฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (คือเฟส A เฟส B และเฟส C) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกสิ้นสุดเรียบร้อยแล้ว ในครึ่งไซเคิลลบถัดไปที่ขั้วแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นก็จะเปลี่ยนสถานะจากขั้ว N ไปเป็นขั้ว S และในอีกหนึ่งขั้วแม่เหล็กถัดไปก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กแรกที่กล่าวถึง ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เหมือนกับหมุนไปรอบๆ นี้เรียกสั้นๆ ว่า สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)



รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส [3]



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว [3]

จากรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 เป็นการแสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วที่สามารถพิจารณาที่ละขั้นได้คือ

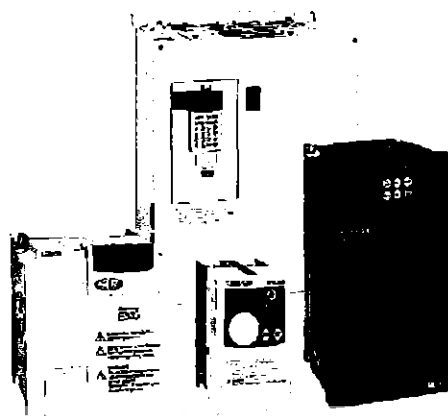
ที่จุดที่ 1 บนรูปไซเคิลไซน์จะเห็นได้ว่าเฟส B อยู่ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส A ก็เป็นขั้วเหนือ แต่ลดลงจากจุดสูงสุดและเฟส C เป็นขั้วเหนือและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ของสเตเตอร์คือเฟส B เป็นขั้วเหนือมาก เฟส A และเฟส C เป็นขั้วเหนือน้อย

ที่จุดที่ 2 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A เป็น 0 (Zero) เฟส B เป็นขั้วเหนือแต่กำลังลดลง ส่วนเฟส C เป็นขั้วเหนือแต่กำลังเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) ของสเตเตอร์ เฟส A เป็น 0 เฟส B และเฟส C เป็นขั้วเหนือและมีความเข้มเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟสคือ เฟส B กับเฟส C ดังนั้นจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (30 Electrical Degree Clockwise)

ที่จุดที่ 3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส C จะมีความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส B ลดลงจากสูงสุดและเฟส A เพิ่มขึ้นแต่ เฟส A เป็นขั้วได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ค) ของสเตเตอร์เฟส C จะเป็นขั้วเหนือและมีความเข้มมาก ส่วนเฟส B มีความเข้มของขั้วเหนือเล็กน้อย และเฟส A เป็นขั้วได้น้อย ดังนั้นจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

บนรูปคลื่นไซน์ที่จุดต่างๆ ในไซเคิลก็จะเกิดหมุนเวียนกันไปเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ที่จุดที่ 6 ในรูปที่ 2.16 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A และ เฟส B จะเป็นขั้วได้ ส่วนเฟส C จะเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ง) ของสเตเตอร์ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 150 องศาไฟฟ้าในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากจุดที่ 1 เป็นอันว่าครบไซเคิลของขั้วเหนือ หรือหมุนครบ 1 รอบ 360 องศา

2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)



รูปที่ 2.18 อินเวอร์เตอร์ รุ่น E500 Mitsubishi [6]

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งหลายท่านได้ใช้ได้เข้าไปเกี่ยวข้องแต่ไม่ทราบว่าอินเวอร์เตอร์คืออะไร ทำงานอย่างไร

อินเวอร์เตอร์หรือเรียกว่าเอซีไดรฟ์ (AC Drives) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำความเร็วรอบสามารถควบคุมได้

เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการความเร็วรอบ (Synchronous Speed) ดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous speed} \quad N = \frac{(120 \times f)}{P} \times (1 - S) = (120 \times f) / P \quad (2.53)$$

โดยที่ f = ความถี่ของกระแสไฟฟ้า

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทางคือ

1. เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กขั้ว (P)
2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ความถี่ (f)

ดังนั้นหากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่คือ 50 Hz. ความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัวก็จะมีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางดังนี้

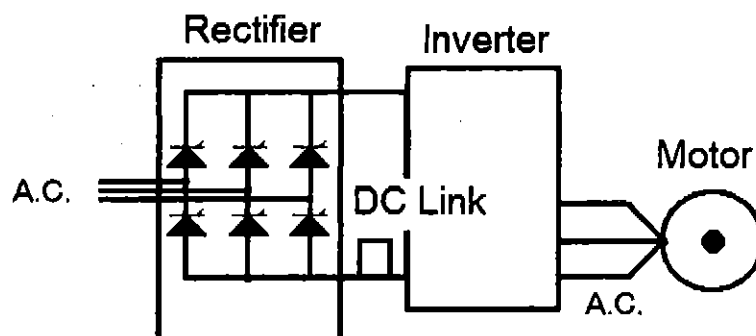
ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปความสัมพันธ์ความเร็วรอบของมอเตอร์กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก [4]

จำนวนขั้วแม่เหล็ก(P)	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50Hz (rpm)	3000	1500	1000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 Hz (rpm)	3600	1800	1200	900	720	600

จากตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไป ครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาทีหรือจาก 1500 รอบต่อนาที ไปเป็น 3000 รอบต่อนาที (กรณีเปลี่ยนจากการต่อแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก ไปเป็นการต่อแบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก หรือจาก 4 ขั้วแม่เหล็กลดลงมาเหลือ 2 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด ,ทำให้เฉพาะในขณะที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้ มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับ ความต้องการของงานในหลาย ๆ ประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ความเร็ว เหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ใน การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็ว คงที่ ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

2.6 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่าย ๆ ของอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ และมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.19 รูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ [4]

2.6.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วย เพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียวหรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส ดังรูป สำหรับอินเวอร์เตอร์บางประเภทจะใช้ ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรตัววงจรเชื่อมโยงทางคิซี

2.6.2 วงจรเชื่อมโยงทางคิซี (DC Link)

วงจรเชื่อมโยงทางคิซีคือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะประกอบด้วยแคปซิติเตอร์ที่มีขนาดใหญ่พิกัดแรงดัน ไฟฟ้า 400 โวลต์หรือ 800 โวลต์โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมาก ๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็วจะเกิดแรงดันสูงขึ้นกับมาตคร่อมแคปซิติเตอร์และทำให้ แคปซิติเตอร์เสียหายได้ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่าความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขนานกับแคปซิติเตอร์ไว้โดยทรานซิสเตอร์จะทำให้ที่เป็นสวิตซ์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

2.6.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงทางคิซี เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับวงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pule Width Modulation)

2.6.4 วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุม จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้เช่นรับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผลและส่งนำเอาที่พุดออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตาม ที่ผู้ใช้งานต้องการ

2.6.5 การแปลงผันจากคิซีเป็นเอซีและแปลงจากคิซีเป็นเอซี

เนื่องจากการแปลงจากเอซีไปเป็นเอซี โดยตรงเลขนั้นความถี่สูงสุดด้านเอาต์พุตจะไม่เกินความถี่สูงสุดของอินพุต ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วที่ออกไว้บนแผ่นป้ายมอเตอร์แต่แรก แต่การเปลี่ยนเอซี ไปเป็น คิซี และแปลงกลับมาเป็น เอซี อีกครั้งจะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ได้สูงกว่าความถี่ด้านอินพุต

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดย ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะ นำมาทำการเปลี่ยนนั้นมาจาก แบตเตอรี่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือแผงโซลาร์เซลล์ก็ได้ ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มานั้น จะเหมือนกับไฟฟ้าที่ได้จากปลั๊กไฟตามผนังบ้านทุกอย่าง โดย inverter ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์, พัดลม หรืออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับสามารถใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.20 คิซีเป็นเอซี อินเวอร์เตอร์ [5]

คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยไฟฟ้ากระแสสลับที่จะ นำมาทำการเปลี่ยนนั้น มาจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไป



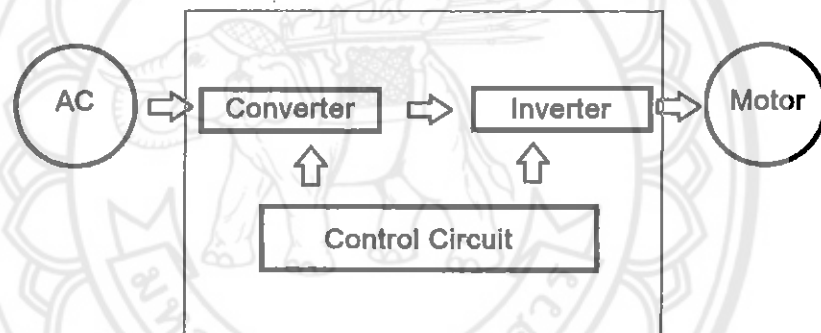
รูปที่ 2.21 เอซีเป็นคิซี คอนเวอร์เตอร์ [5]

2.7 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้า ไปเป็นพลังงานกล โดยนำพลังงานที่ได้นี้ไปทำ การขับเคลื่อนเครื่องจักร อื่นๆต่อไป ความเร็วของมอเตอร์ สามารถกำหนดได้โดย

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

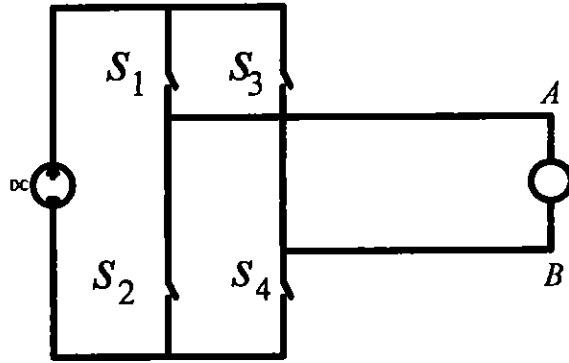
จากสมการ(2.53)จะพบว่า ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เปลี่ยนแปลง ไปก็จะมีผลทำให้มอเตอร์มีความเร็วเปลี่ยนแปลง ได้ด้วย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ โดยให้แรงดันคงที่ จะมีผลทำให้เกิดฟลักส์แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยน แรงดันควบคู่ไปกับความถี่ด้วย และการที่จะเปลี่ยนแปลง ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ สามารถทำได้โดย การใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีหลักในการทำงานดังรูป



รูปที่ 2.23 หลักทำงานของอินเวอร์เตอร์ [5]

จากรูปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ต่อเป็นอินพุตเข้าไปในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงนี้ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเลือก ความถี่ได้ เพื่อ ไปควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการ ได้ หลักการทำงานของส่วนอินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยจะนำไฟฟ้ากระแสตรงต่อ เข้ากับสวิทช์ 4 ตัว และทำการเปิด-ปิด สวิทช์ทั้ง 4 เป็นจังหวะทำให้ เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป



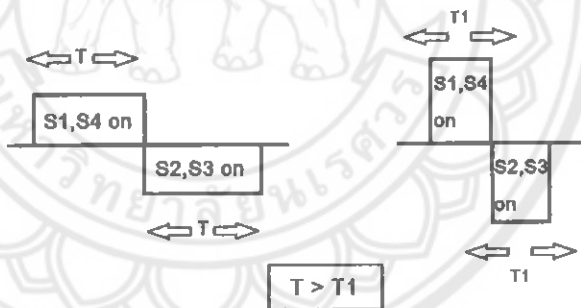
รูปที่ 2.24 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์ [5]

จากรูปที่ 2.24

-เมื่อปิดสวิตช์ S1 และ S4 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด A ไปยังจุด B

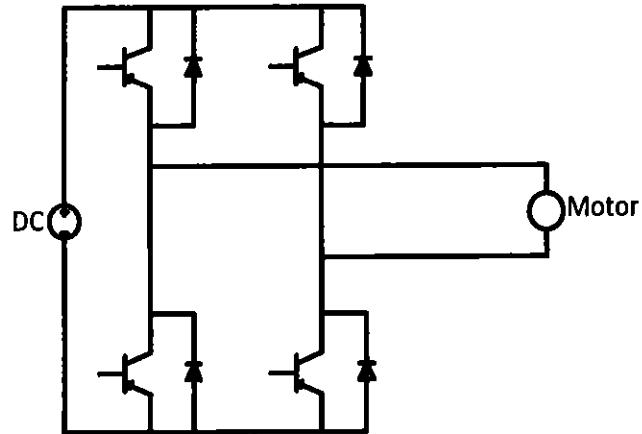
-เมื่อปิดสวิตช์ S2 และ S3 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด B ไปยังจุด A

ดังนั้นถ้าเปิด-ปิดสวิตช์ S1 และ S4 สลับกับสวิตช์ S2 และ S3 จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นนั่นเอง โดยถ้ามีการควบคุมเวลา ในการเปิด-ปิดสวิตช์ ที่ต่างกัน ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.25 การเปิดปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ [5]

ในความเป็นจริงแล้ว อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์ เนื่องจากทรานซิสเตอร์สามารถ เปิด-ปิดได้ในความถี่ที่สูงกว่า



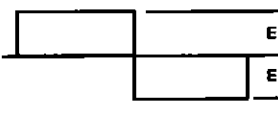
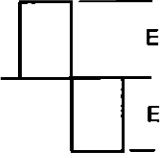
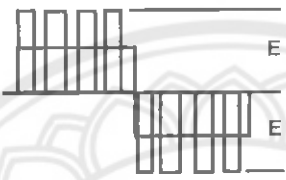



รูปที่ 2.26 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์ [5]

การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (Pulse Amplitude Modulation PAM)
2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation)
 - เป็น คลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave)
 - เป็น คลื่นไซน์ (Sine Wave)

โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ [5]

วิธีควบคุม	ความถี่ต่ำ(แรงดันต่ำ)	ความถี่สูง(แรงดันสูง)	จุดเด่น
วิธีแปรขนาดแรงดัน ของไฟตรง (Pulse Amplitude Modulation PAM)			-เสียงมอเตอร์เบา -ประสิทธิภาพดี -ควบคุมแรงดันที่คอน เวอร์เตอร์ -ผลตอบสนองช้า
วิธีแปรความกว้าง ของพัลส์ที่ใช้เปิด- ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation)			-ส่วนอินเวอร์เตอร์สามารถ ควบคุมความถี่และ แรงดัน ได้ทั้งหมด -ได้ยินเสียงความถี่สูง จากมอเตอร์
วิธีแปรความกว้าง ของพัลส์ที่ใช้เปิด- ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation)			-เดินมอเตอร์ได้เร็วที่ ความเร็วต่ำ -ฮาร์โมนิกความถี่ต่ำมี ขนาดเล็ก -ได้ยินเสียงความถี่สูง จากมอเตอร์

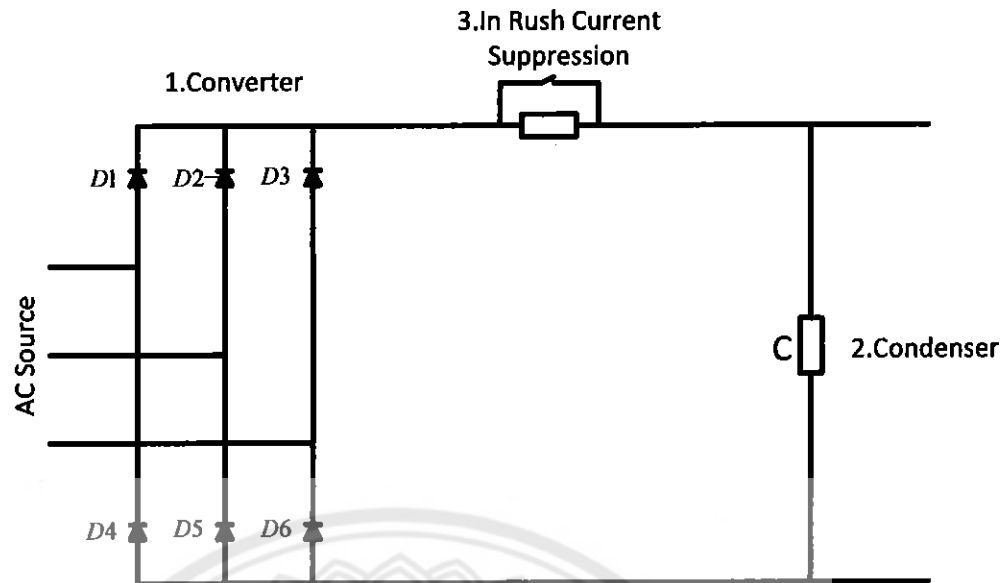
วิธี PWM แบบคลื่นไซน์(Sine Wave) นั้นจะมีการเปิด-ปิดสวิตช์หลายๆครั้งในหนึ่งไซเคิล และการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางรูปแบบการควบคุม [5]

รูปแบบการควบคุม		ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	จุดเด่น
แบบซิงโครนัส (Synchronous)	ความถี่แควรี่ แปรตามความถี่ ขาออก			-สามารถควบคุมฮาร์ โมนิกได้ -แรงดันขาออก สูงสุดเกือบเท่า แรงดันแหล่งจ่ายไฟ
แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)	ความถี่แควรี่ คง ไม่สัมพันธ์ กับความถี่ขา ออก			-เสียงรบกวนจาก มอเตอร์เป็นเสียง เดียวไม่น่ารำคาญ
แบบผสม	ย่านความถี่ต่ำ เป็นอะซิง โครนัสและย่าน ความถี่สูงเป็น ซิงโครนัส			-สามารถควบคุมได้ ดีทั้งย่านความถี่ต่ำ จนถึงย่านความถี่สูง

ส่วนคอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วย

1. ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยกลุ่มของไดโอด
2. ส่วนของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่กรองกระแส โดยใช้ตัวเก็บประจุ
3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช (In Rush Current Suppression) ทำหน้าที่จำกัดกระแส ขณะที่มีการเปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็นครั้งแรกดังรูป



รูปที่ 2.27 วงจรกำจัดกระแสอินรัช [5]

2.8 การควบคุมมอเตอร์

การควบคุมมอเตอร์ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ การสตาร์ทการเร่งความเร็วและการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ การลดความเร็วและการหยุดอินเวอร์เตอร์

2.8.1. การสตาร์ทมอเตอร์

ทำได้โดยให้สัญญาณตั้งความถี่แก่อินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สตาร์ทมอเตอร์ก็จะผลิตแรงบิด จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะค่อย ๆ เพิ่มความถี่ขึ้นไปจนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์สูงกว่าแรงบิดของ โหลด มอเตอร์จึงเริ่มหมุน

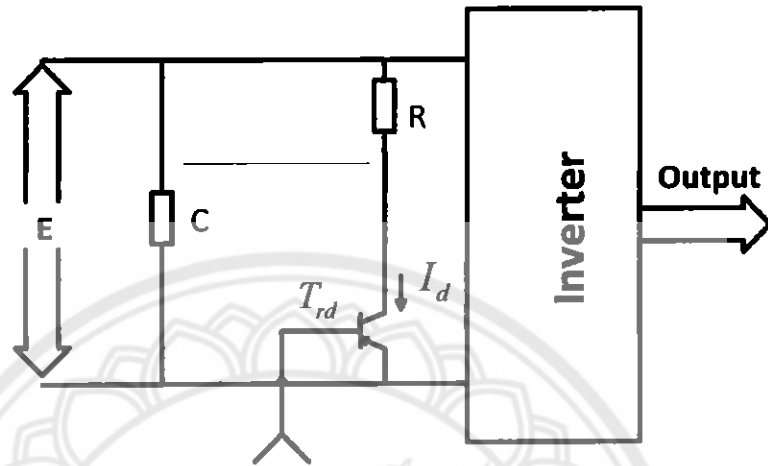
2.8.2. การเร่งความเร็วและการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่

หลังจากสตาร์ทอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์แล้ว ความถี่ขา ออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเพิ่มความถี่นี้คือเวลาการเร่งความเร็ว และเมื่อความถี่ขาออกเท่ากับความถี่ที่ต้องการ การเร่งความเร็วก็จบ อินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่การทำงานในช่วงเวลาการเดินเครื่อง ด้วยความเร็วคงที่

2.8.3. การลดความเร็วมอเตอร์

ทำได้โดยตั้งความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่ขาออก อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงมาเรื่อย ๆ ตามช่วงเวลาการลดความเร็วที่ได้ตั้งไว้ ในขณะที่ลดความถี่ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่ามากกว่าความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์จะทำงาน เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตไฟฟ้าจ่ายกลับไปให้อินเวอร์เตอร์

การฟื้นฟู (Regeneration) ทำให้แรงดัน ไฟตรง (แรงดัน กร่อม คอนเดนเซอร์) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นภายใน อินเวอร์เตอร์จะมีวงจรที่ทำหน้าที่รับพลังงานที่เกิดจากการฟื้นฟูซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบรกมอเตอร์ วงจรนี้เรียกว่า วงจรเบรกคืนพลังงานดังรูป



รูปที่ 2.28 การลดความเร็ว โดยอินเวอร์เตอร์ [5]

พลังงานที่เกิดจากการฟื้นฟูจะป้อนกลับมายังประจุที่คอนเดนเซอร์ (C) ทำให้แรงดัน (E) มีค่าสูงขึ้น ถ้าแรงดันสูงกว่าค่าที่กำหนด ทรานซิสเตอร์ (T_{rd}) ในวงจรเบรกจะทำงานทำให้มีกระแส (I_d) ไหล ผ่านตัวต้านทานเบรก (R) ทำให้ตัวต้านทานร้อนเป็นการเผาผลาญพลังงานที่เกิดจากการฟื้นฟูและพลังงานที่เก็บสะสมใน คอนเดนเซอร์ก็จะถูกคายออกมามีผลทำให้แรงดันมีค่าลดลง เมื่อลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด ทรานซิสเตอร์ T จะหยุดทำงาน กระแสเบรกก็จะหยุดไหล

อัตราการใช้น้ำมันวงจรเบรกนี้ ได้รับการออกแบบโดยการพิจารณาในแง่ของการระบายความร้อนไว้ที่ 2-3 % เท่านั้น ถ้ามีการใช้เบรกบ่อย หรือใช้เบรกนานเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาการระบายความร้อนของตัวต้านทาน และอาจ ทำให้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์เสื่อมได้

2.8.4. การหยุดมอเตอร์

อินเวอร์เตอร์จะลดความเร็วลงจนถึงระดับหนึ่ง และจะผลิต ไฟตรงเข้าไปในมอเตอร์เพื่อทำงานเป็นเบรก จนมอเตอร์หยุด เรียกว่า การเบรกด้วยไฟตรงแนวคิดในการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ ถ้าคิดว่าอินเวอร์เตอร์ เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จ่ายพลังงานเพื่อขับมอเตอร์ ก็จะคิดว่ายังเลือกอินเวอร์เตอร์ ขนาดยิ่งใหญ่เท่าใดก็ยิ่งดี สามารถติดตั้งสวิตช์ ที่เอาที่หยุดของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปิดปิดจ่ายกระแส ให้

มอเตอร์ได้ทันที เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟ แต่แนวความคิดนี้ ไม่ถูกต้องเนื่องจาก ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง และอินเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่ เกินความจำเป็น

2.9 การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับมอเตอร์

1. ความสามารถในการ ขยับมอเตอร์ขณะเร่งความเร็ว และความเร็วรอบคงที่ที่ต้องพิจารณาว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแส ที่มอเตอร์ต้องการได้หรือไม่

2. ความสามารถในการ ขยับมอเตอร์ขณะลดความเร็ว ในขณะที่ลดความเร็วมอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคืนพลังงาน กลับไปให้อินเวอร์เตอร์ ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ต้องมีความสามารถในการรับคืนและใช้พลังงานนี้ให้หมดไป

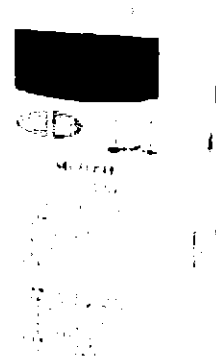
3. การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ โดยดูจากขนาดและจำนวนมอเตอร์นั้น ให้เลือกอินเวอร์เตอร์ที่มีกระแส พิกัดมากกว่าผลรวมของกระแสมอเตอร์ทุกตัว

จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์อีกอย่างหนึ่งคือสามารถขยับมอเตอร์หลาย ๆ ตัวด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว แต่วิธีการ เดินเครื่องบางแบบอาจต้องเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดใหญ่มาก จึงไม่เป็นการประหยัดและเกิดการผิดพลาด ในการเลือกขนาดได้ง่ายด้วย อินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดการควบคุม ฟลักซ์เวกเตอร์ ไม่สามารถขยับมอเตอร์ ได้หลายตัวพร้อมกันจะต้องเปลี่ยน โหมดการควบคุม ไปเป็นแบบแรงคั่นต่อความถี่เท่านั้นจึงจะขยับมอเตอร์ได้หลายตัว

2.10 อินเวอร์เตอร์ในท้องตลาด

2.10.1 มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์ (Mitsubishi Inverter)

หน้าที่การทำงานของMitsubishi inverter คือ ควบคุมการทำงานความเร็วของมอเตอร์ ตามได้ที่ตั้งไว้ในโปรแกรม



รูปที่ 2.29 มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์ รุ่น FRE500 [6]

มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์รุ่น FR (Mitsubishi Inverter FR Series) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ประสิทธิภาพสูง รองรับทุกความต้องการ ทุกความเร็วของมอเตอร์ ด้วยอายุการใช้งานที่ยาวนาน ของอะไหล่ภายในตัว มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์ด้วยการใช้งานที่ง่าย และทรงประสิทธิภาพ ของ มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์และรูปร่างขนาดเล็ก ทำให้ มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์เป็นที่นิยมของคนทั่วโลก, อินเวอร์เตอร์คือ ระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ให้เคลื่อนไหว เร็วช้า หรือตามจังหวะ โปรแกรมที่ตั้งไว้ มาต่อที่ มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์เอพอาร์ซีรี่ส์ใช้งานง่ายมาก เฆานิยามไว้ว่า หรือ แค่นิ้วเดียวคุณก็คอนโทรล (One Finger Programing) ได้แล้ว ซึ่ง มิตซูบิชิ อินเวอร์เตอร์เอพอาร์ซีรี่ส์มีมากมายหลาย



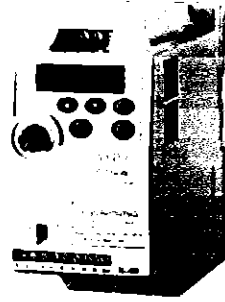
รูปที่ 2.30 มิตซูบิชิรุ่น FR D 740 [6]

2.10.2 เกลด้าอินเวอร์เตอร์ (Delta Inverter)

เกลด้าอินเวอร์เตอร์ (Delta Inverter) ด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีที่ทันสมัยของไมโคร โปรเซสเซอร์ที่ทันสมัยจะสามารถมีประสิทธิภาพการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในการปรับปรุงระบบอัตโนมัติเครื่องและประหยัดพลังงาน

เกลด้าอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD (Delta Inverter VFD) มอเตอร์กระแสสลับมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ชุดแต่ละ โคร์ฟถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานเฉพาะกระแสสลับโคร์ฟได้อย่างถูกต้องควบคุมความเร็วและแรงบิดได้อย่างราบรื่นจัดการกับภาระที่เพิ่มขึ้นและให้การควบคุมที่กำหนดเองจำนวนมากและการตั้งค่าโหมดการทำงาน อินเวอร์เตอร์สายผลิตภัณฑ์ของเกลด้าของเราให้ครบวงจรของมอเตอร์ด้วยเทคโนโลยีการควบคุมและมีการใช้หลากหลายของอุตสาหกรรมเพื่อเสริมสร้างและปรับปรุงระบบ

1) เกลด้าอินเวอร์เตอร์ รุ่นVDL (Delta Inverter VFD-L Series) 0.37 KW.-0.75 KW./220 v. สำหรับงานส่งกำลังขนาดเล็ก ใช้งานติดตั้งสะดวก มีขนาดเล็กกะทัดรัด ออกแบบมาเพื่องานที่มีพื้นที่ในการติดตั้งจำกัด มีปุ่มปรับความเร็วรอบแบบอนาล็อก บนตัวเครื่อง



รูปที่ 2.31 เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VDL [7]

2) เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VDL-EL (Delta Inverter VFD-EL Series) 0.37 KW. - 3.7KW 220v/ 380 v. Built-In EMI filterเป็นรุ่นที่ออกแบบมาให้เหมาะสมกับการประหยัดพลังงานและสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าใช้งาน ได้สะดวกและครอบคลุมทุกฟังก์ชันการทำงาน



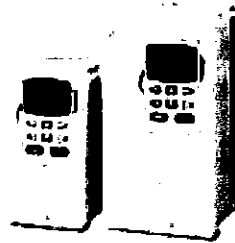
รูปที่ 2.32 เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-EL [7]

3) เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-E (Delta Inverter VFD-E Series) 0.37-7.5KW./220V.,0.37-22KW./380V.Built-in EMI filter Built-in PLCเป็นรุ่นที่เหมาะสมกับงานสร้างเครื่องจักรขนาดกลาง สามารถเขียนโปรแกรม PLC ได้โดยตรง มีฟังก์ชันการทำงานหลากหลายเพื่องานที่ต้องการความแม่นยำ



รูปที่ 2.33 เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-E [7]

4) เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-B (Delta Inverter VFD-B Series) 0.75-37KW./220V., 0.75-75KW./380V. เป็นรุ่นที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมหนักทุกประเภท ควบคุมด้วยระบบควบคุมเวกเตอร์ให้ความมั่นใจในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และตอบสนองแรงบิดเริ่มต้นได้



รูปที่ 2.34 เกล็ดำอินเวอร์เตอร์ รุ่น VFD-B [7]

2.10.3 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์ (Danfoss Inverter)

1) แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT ไมโครไดรฟ์ (Danfoss Inverter VLT Micro Drive) อินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดที่ทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบแม่ในงานที่ซับซ้อนพร้อมทั้งความลงตัวในด้านการ ประหยัดพลังงานและการทำงาน



รูปที่ 2.35 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์ VLT ไมโครไดรฟ์ [7]

2) แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT2800 (Danfoss inverter VLT 2800 series) ไดร์ฟขนาดกะทัดรัดที่มีเสถียรภาพในการทำงานสูงถูกออกแบบให้สามารถประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งด้วยรูปทรงค้ำยหนังสือให้ความสมดุลด้านการออกแบบเพื่อให้มีกำลังการใช้งาน ที่เหมาะสม พร้อมกับการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.36 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT2800 [8]

3) แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLTAC ไดร์ฟ (Danfoss Inverter VLT® HVAC Drive) อินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับงานประเภท (Heating, Ventilating and Air conditioning) ซึ่งให้ความสำคัญกับเรื่องการประหยัดพลังงานเหมาะสมกับทั้ง ปั๊มน้ำ พัดลม และ Chillerซอฟต์แวร์และฟังก์ชันการทำงานถูก ออกแบบให้เป็นเรื่องง่ายๆสำหรับทุกคน



รูปที่ 2.37 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT AC ไดร์ฟ [8]

4) แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT ไดร์ฟ (Danfoss inverter VLT® AQUA Drive) อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบให้เหมาะสมกับปั๊มและโบลเวอร์ในระบบการบริหารและจัดการน้ำ รวมทั้งระบบน้ำเสียมี่คุณสมบัติพิเศษในการใช้งาน ปั๊มได้อย่างสมบูรณ์แบบอาทิเช่นการควบคุมปั๊มพร้อมกันได้ 8 ตัว ด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวครอบคลุมการทำงานทุกรูปแบบนานาประการ



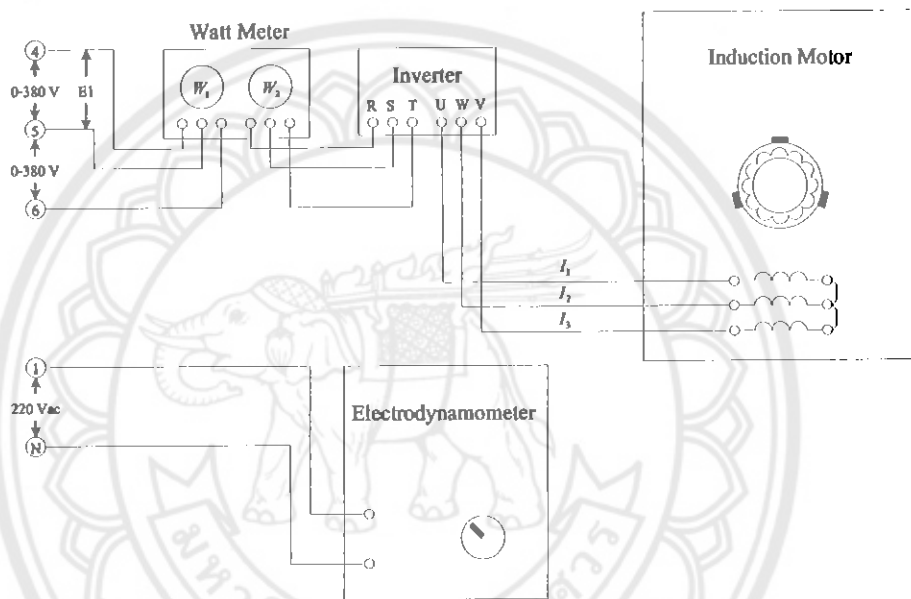
รูปที่ 2.38 แคนฟอสส์อินเวอร์เตอร์รุ่น VLT ไดร์ฟ [8]

บทที่ 3

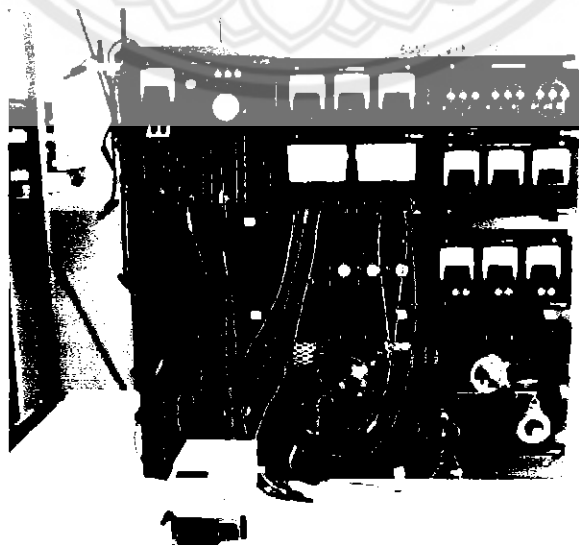
วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะเป็นการบอกถึงการทดลองการควบคุมมอเตอร์โดยอินเวอร์เตอร์ การทดลองจะแบ่งเป็น 2 การทดลองคือ

1. การทดลองแบบโหลดคงที่ แล้วปรับความถี่ตั้งแต่ 50Hz – 5 Hz
2. การทดลองแบบเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 50Hz – 5Hz โดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงของโหลด



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมสำหรับการทดลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.2 การทดลอง

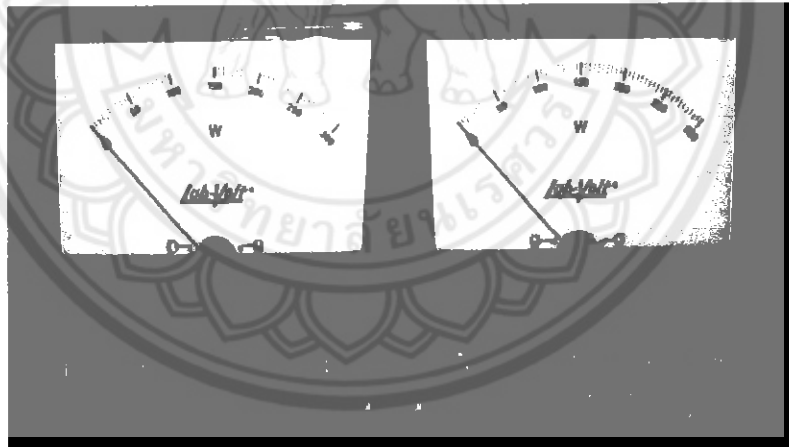
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three-Phase Induction Motors)



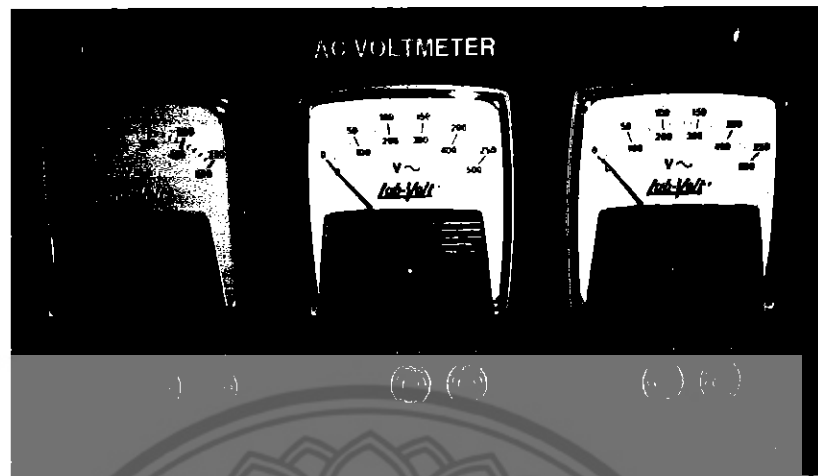
รูปที่ 3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)



รูปที่ 3.4 วัตต์มิเตอร์

3. โวลต์ มิเตอร์ (Volt Meter)



รูปที่ 3.5 โวลต์ มิเตอร์

4. แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)



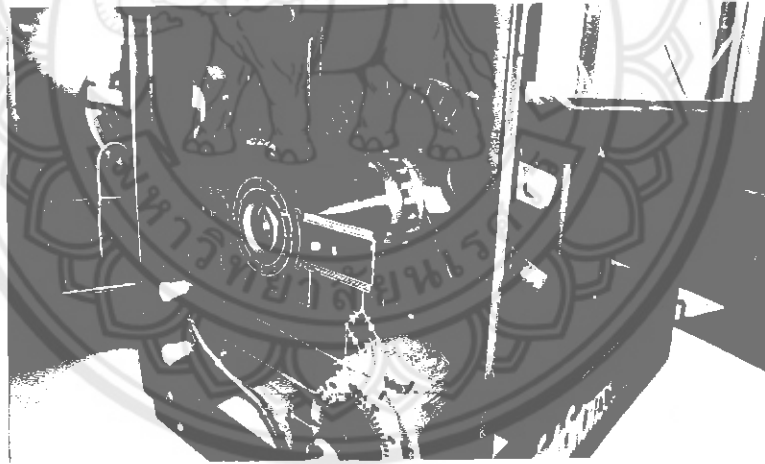
รูปที่ 3.6 แคลมป์มิเตอร์

5. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)



รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์

6. อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์ (Electrodynamometer)



รูปที่ 3.8 อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์

7.แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supple)



รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

8. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermometer)



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.1

3.2.2. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยปรับค่าแรงดันให้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันพิกัด

3.2.3. ทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ตั้งแต่ 50 Hz – 5 Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz และ การปรับโหลดให้สังเกตจากวัตต์มิเตอร์ (WATT METER) โดยที่โหลด 100% = 175W, 90% = 157W, 80% = 140W, 70% = 122W, 60% = 105W และ 50% = 87W ในการทดลองมี 2 การทดลองคือ

1) การทดลองที่ 1 โหลดคงที่ตามเปอร์เซ็นต์โหลดคือ

1.1) ที่โหลด 100% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 100%

1.2) ที่โหลด 90% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 90%

1.3) ที่โหลด 80% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 80%

1.4) ที่โหลด 70% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 70%

1.5) ที่โหลด 60% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 60%

1.6) ที่โหลด 50% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่โหลดเท่ากับ 50%

2) การทดลองที่ 2 เปลี่ยนความถี่โดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงของโหลด

2.1) ที่โหลด 100% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจการเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

2.2) ที่โหลด 90% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจการเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

2.3) ที่โหลด 80% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจการเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

2.4) ที่โหลด 70% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจการเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

2.5) ที่โหลด 60% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจ การเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

2.6) ที่โหลด 50% ให้ปรับ ความถี่ จาก 50Hz – 5Hz โดยปรับลงทีละ 5 Hz โดยที่ไม่สนใจ การเปลี่ยนโหลดของแรงบิดที่โหลด

3.2.4.เมื่อทำการเริ่มเดินมอเตอร์ให้มอเตอร์หมุนเป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการวัดค่าดังนี้ แรงดัน, กระแส, แรงบิด, ความเร็วรอบของมอเตอร์และอุณหภูมิของมอเตอร์



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองที่ 1

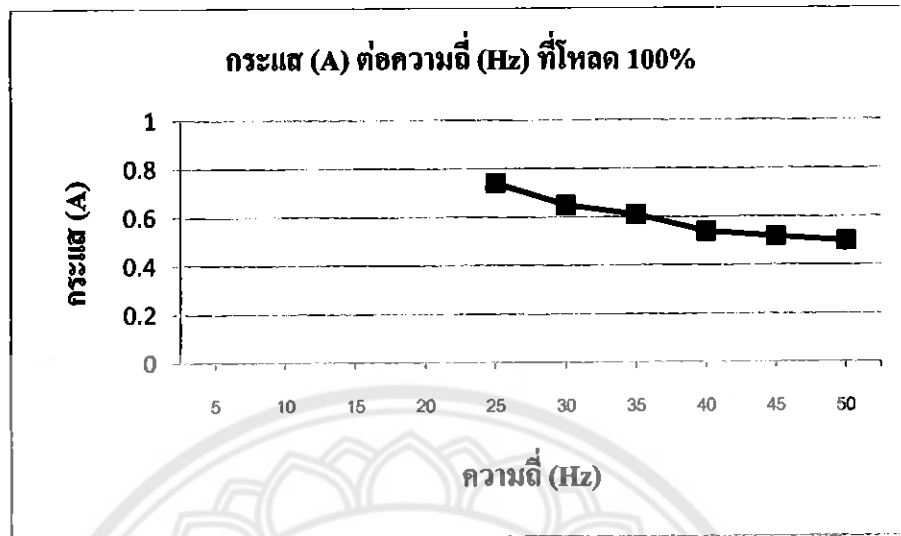
ปรับโหลด 100 %, 90 %, 80 %, 60 %, และ 50 % โดยให้กำลังไฟฟ้าแหล่งจ่าย (W) มีค่าคงที่ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบววดซ์ขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วกำลังไฟฟ้า 175 วัตต์(W),ความเร็วรอบ1240 รอบ ต่อนาที(rpm),แรงดัน 380 โวลต์ (V),กระแส 0.53แอมแปร์ (A),3เฟส,ความถี่ 50เฮิรท์ (Hz)

ตารางที่ 4.1 โหลด 100% โดยให้กำลังคงที่ 175 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	175	0.74	180	1	97	-
30	175	0.65	210	0.98	268	37.3
35	175	0.61	240	0.88	545	36.2
40	175	0.54	280	0.78	770	35.5
45	175	0.52	310	0.68	964	35.1
50	175	0.5	340	0.6	1306	33.4

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

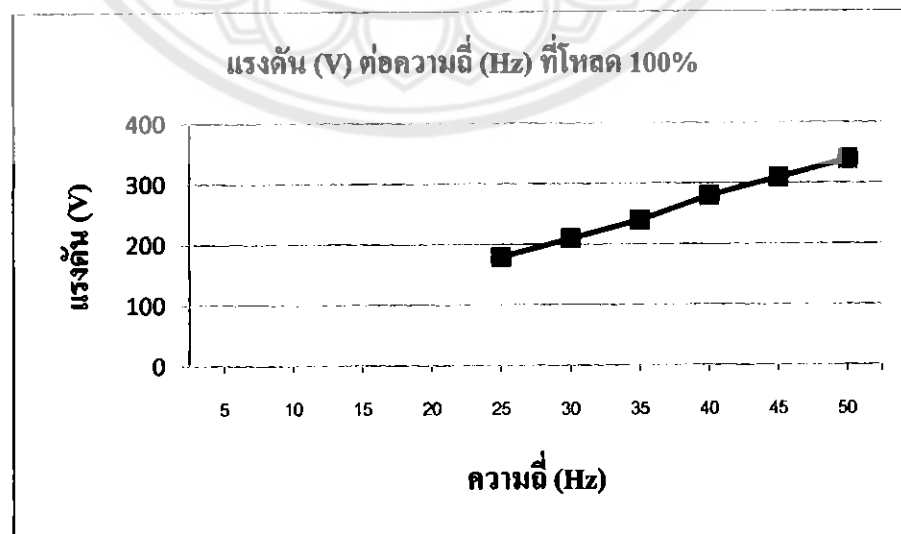
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.1 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

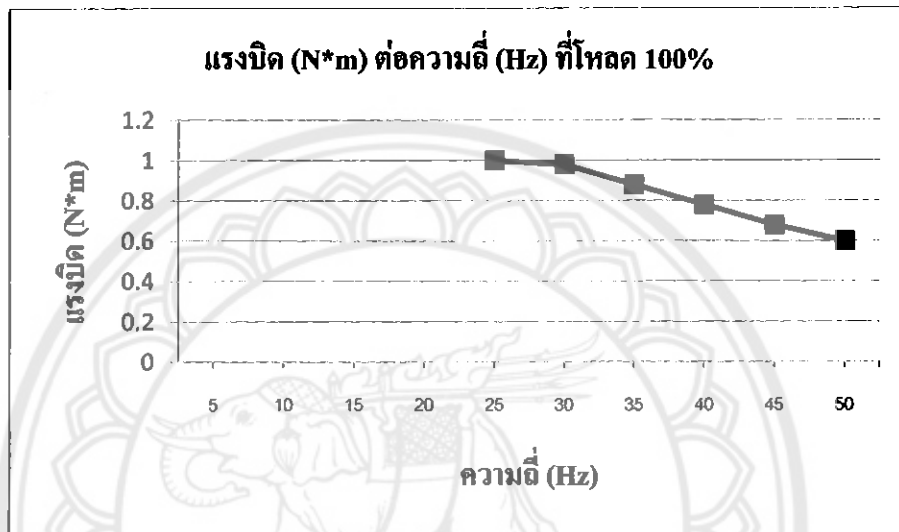
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.2 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v\sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

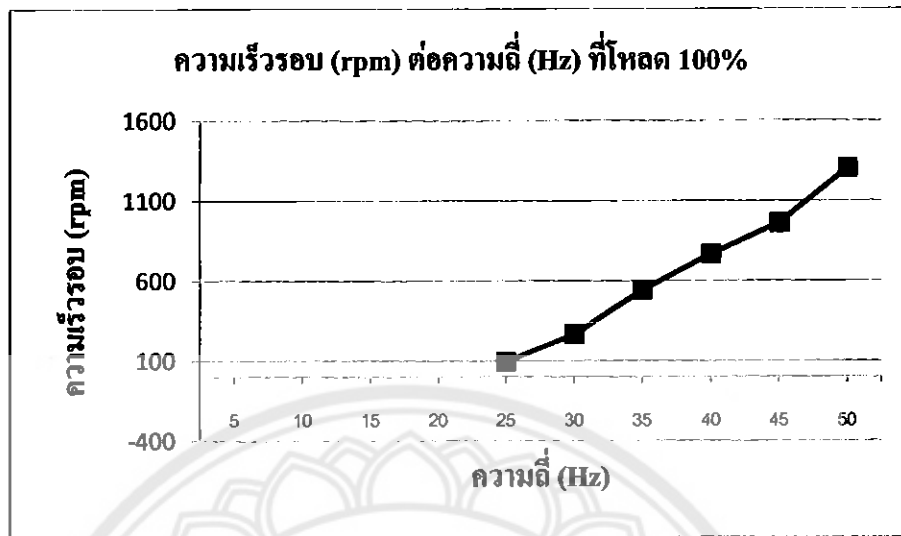


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.3 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

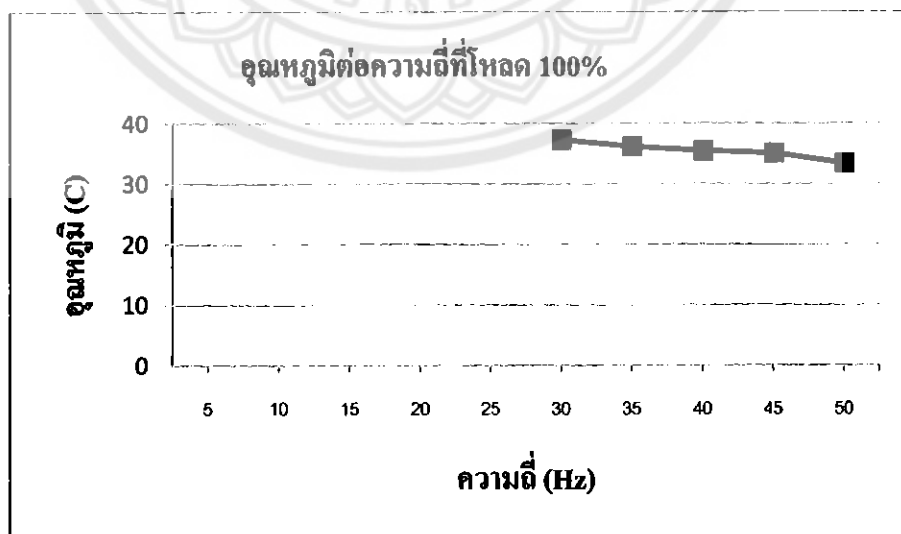


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.4 เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ

ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

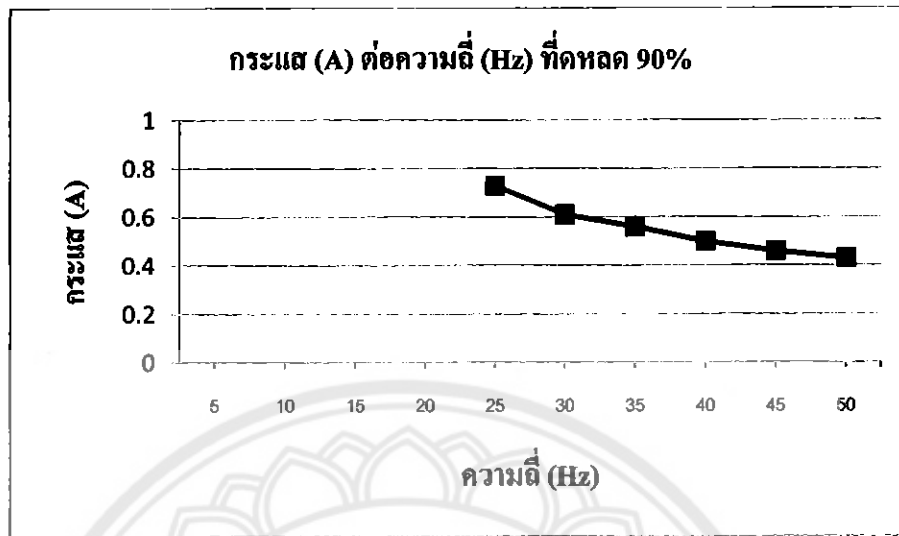
จากรูปที่ 4.5 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.2 โหลด 90% โดยให้กำลังคงที่ 157 วัตต์ (W) ที่ทุกๆความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	157	0.73	170	1	291	-
30	157	0.61	205	0.88	590	36.5
35	157	0.56	240	0.8	804	34.5
40	157	0.5	270	0.7	971	32.7
45	157	0.46	310	0.58	1184	31.5
50	157	0.43	340	0.5	1348	30.6

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

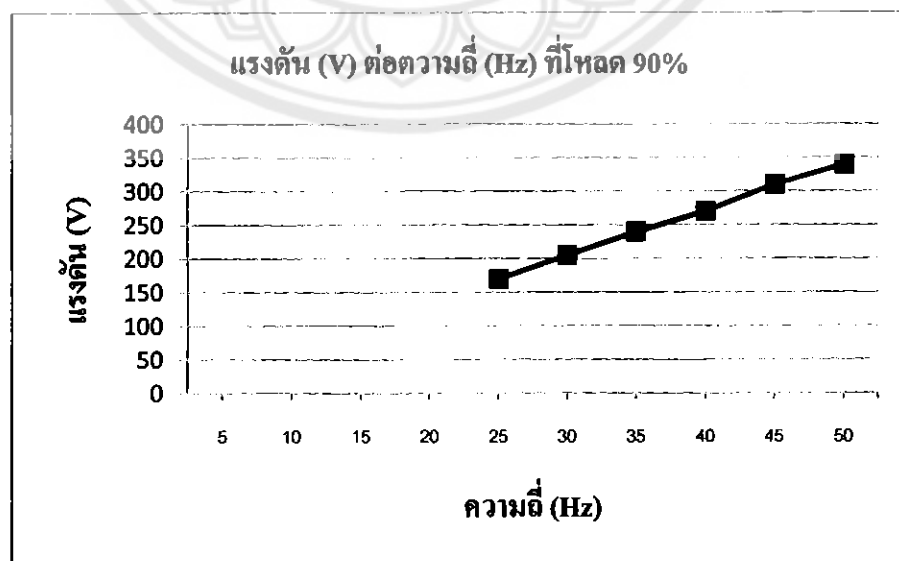
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.6 เมื่อความถี่ลดกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

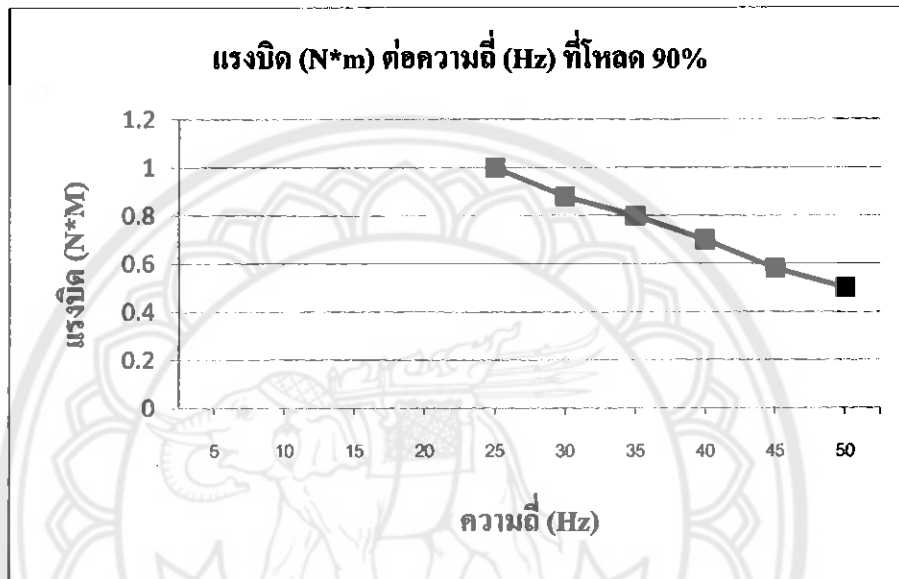
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.7 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v\sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

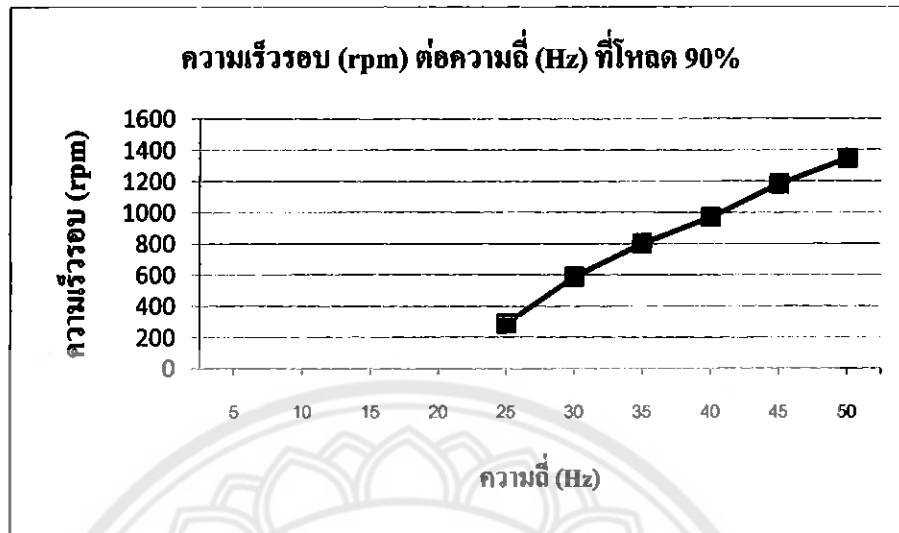


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.8 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

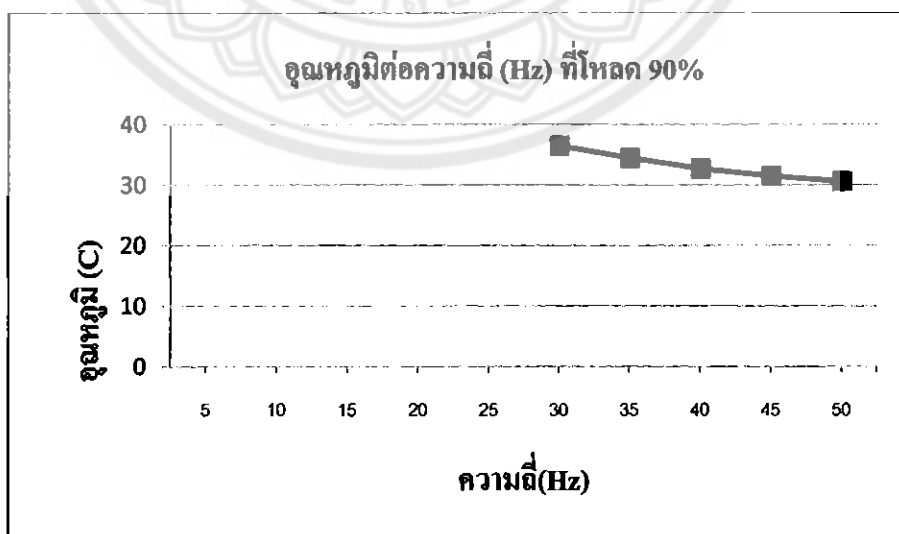


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.9 เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ

ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.10 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการ

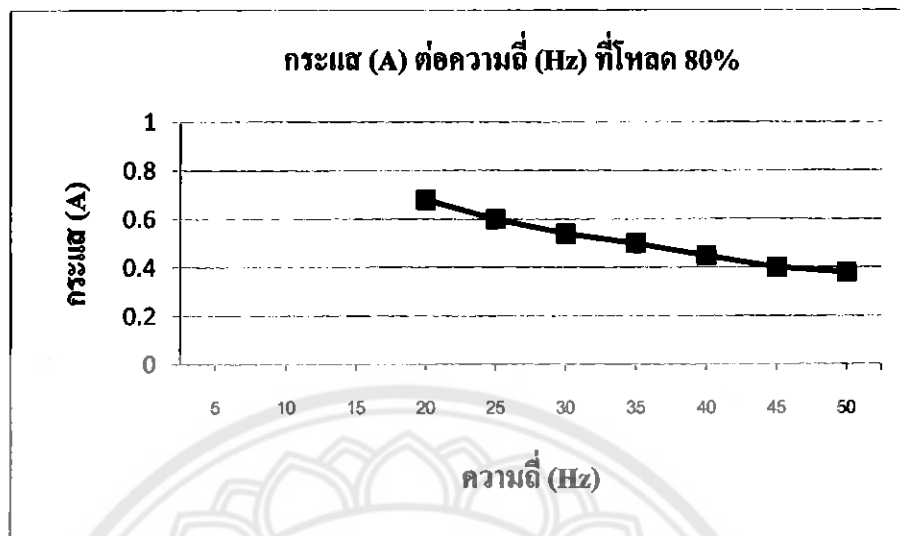
$$\text{ความร้อน} = \frac{I^2 R}{m^3} \text{ เมื่อ } I \text{ คือกระแส } R \text{ คือความต้านทาน } m^3 \text{ คือปริมาตร}$$

ตารางที่ 4.3 โหลด 80% โดยให้กำลังคงที่ 140 วัตต์ (W) ที่ทุกๆ ความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	140	0.68	140	0.9	94	-
25	140	0.6	170	0.88	390	32.0
30	140	0.54	200	0.78	636	31.5
35	140	0.5	240	0.68	835	30.7
40	140	0.45	270	0.58	1012	30.5
45	140	0.4	310	0.5	1187	29.5
50	140	0.38	340	0.42	1350	29.0

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

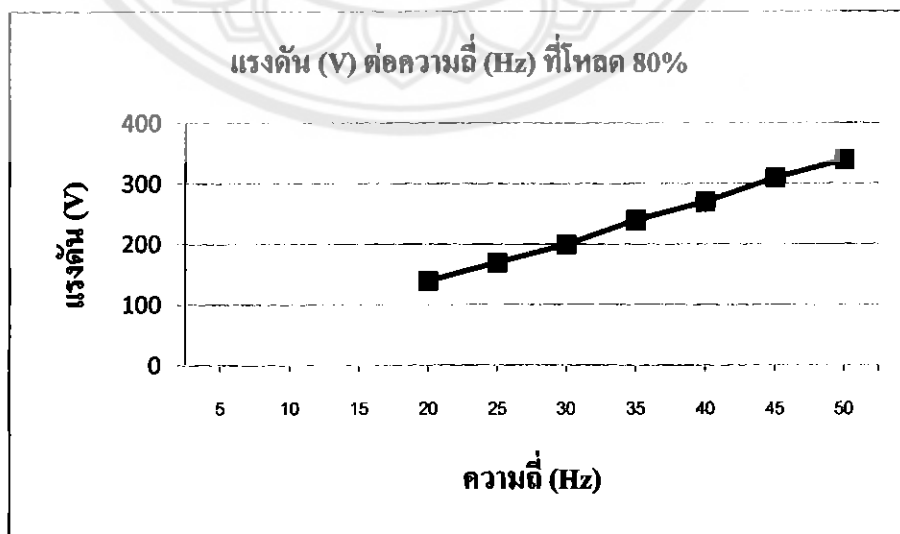
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.11 เมื่อความถี่ลดกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

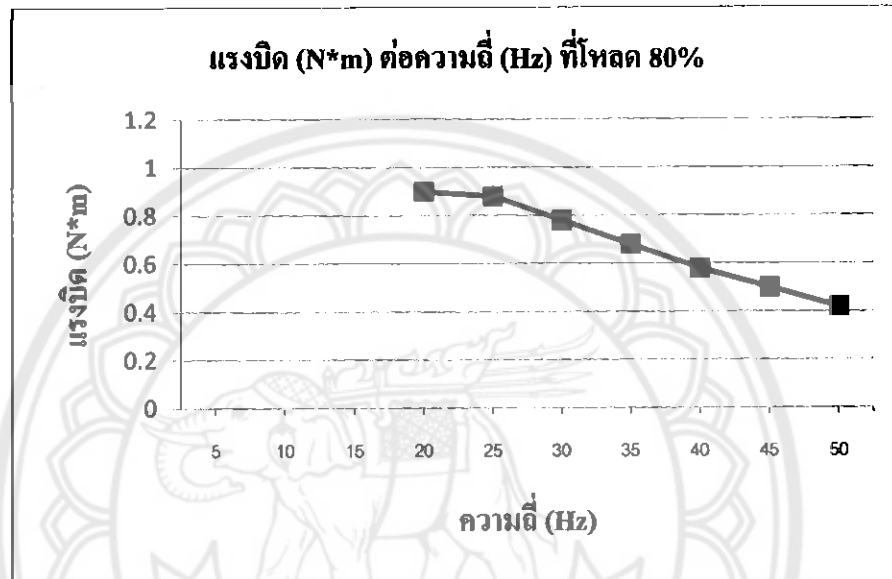
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.12 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่เปลี่ยนไป

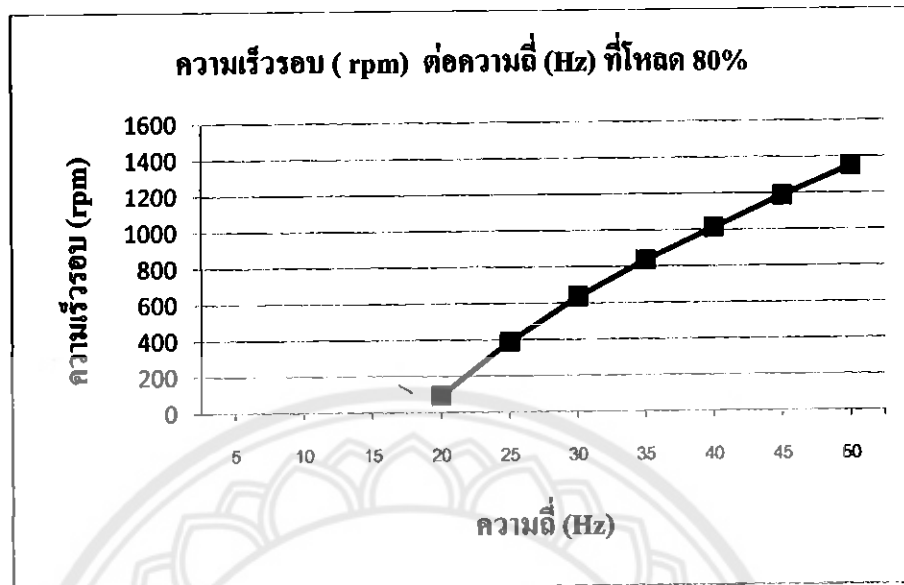


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.13 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

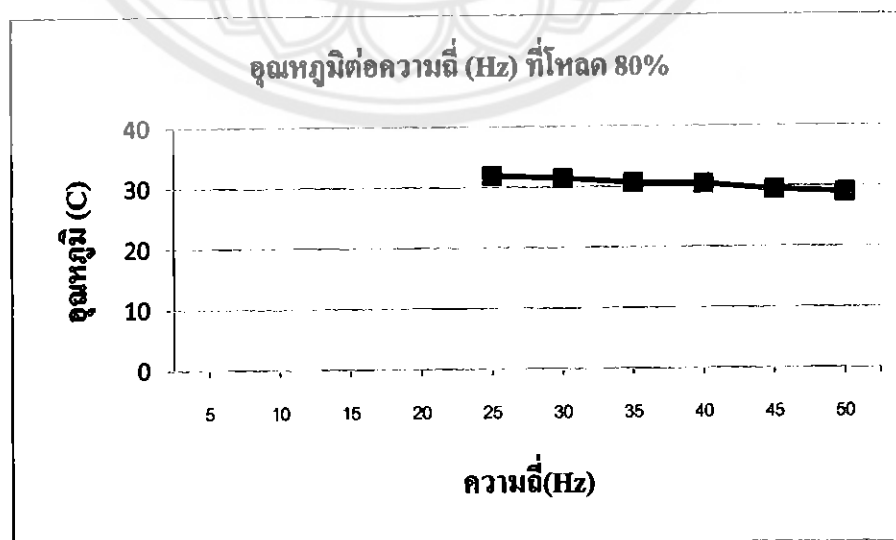


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเร็ว rpm เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.14 เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ

ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ (°C) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิ (°C) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

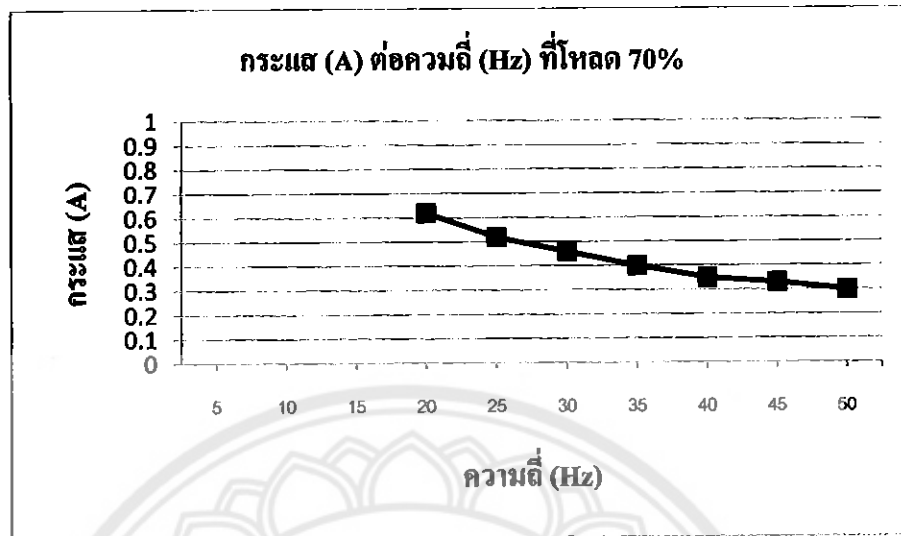
จากรูปที่ 4.15 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.4 โหลด 70% โดยให้กำลังคงที่ 122 วัตต์ (W) ที่ทุกๆ ความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	120	0.62	140	0.84	164	33.3
25	120	0.52	170	0.74	483	31.2
30	120	0.46	200	0.64	690	29.3
35	120	0.4	240	0.54	801	29.2
40	120	0.35	280	0.46	1057	29.1
45	120	0.33	305	0.4	1203	28.4
50	120	0.30	340	0.33	1363	28.0

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

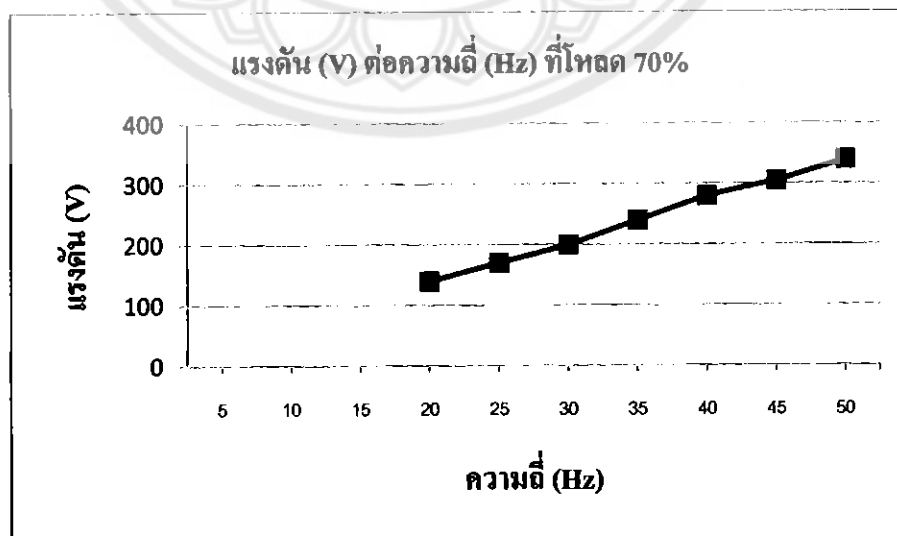
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.16 เมื่อความถี่ลดกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

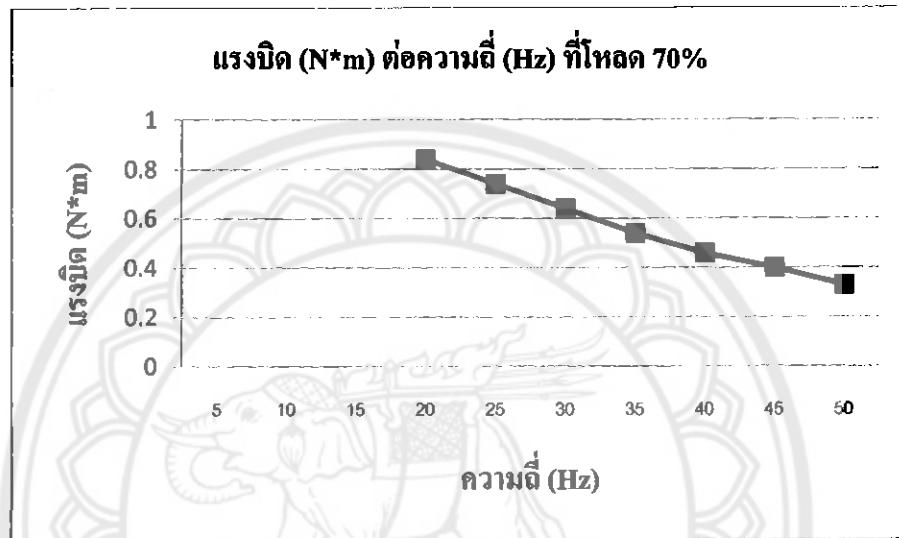
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.17 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

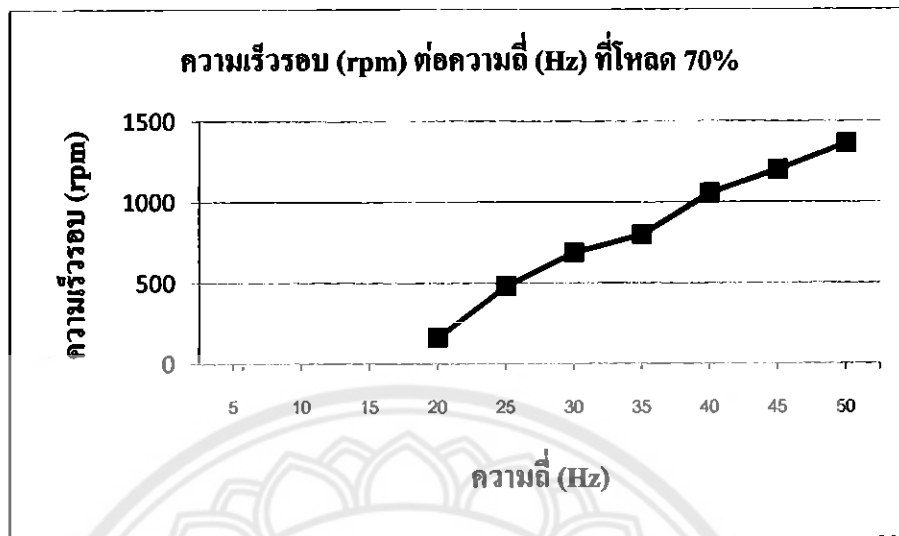
กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.18 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

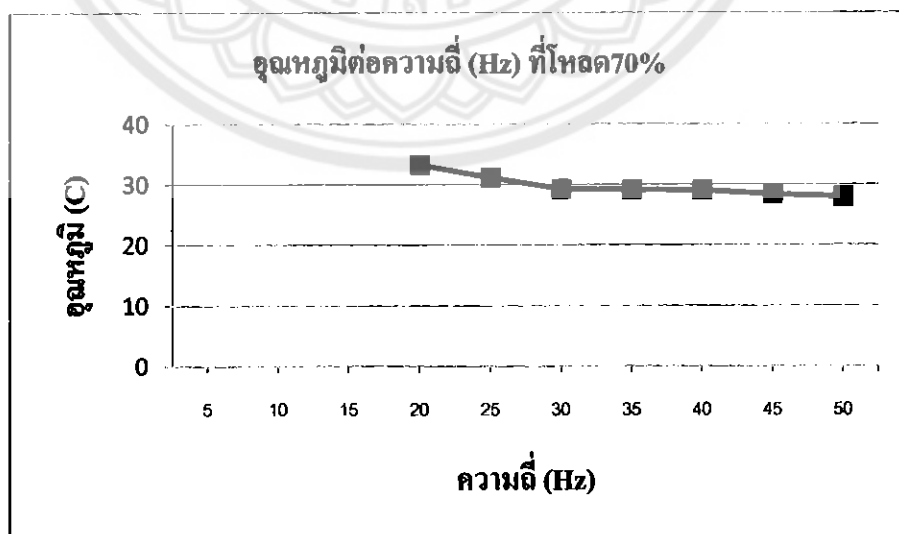


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.19 เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ

ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



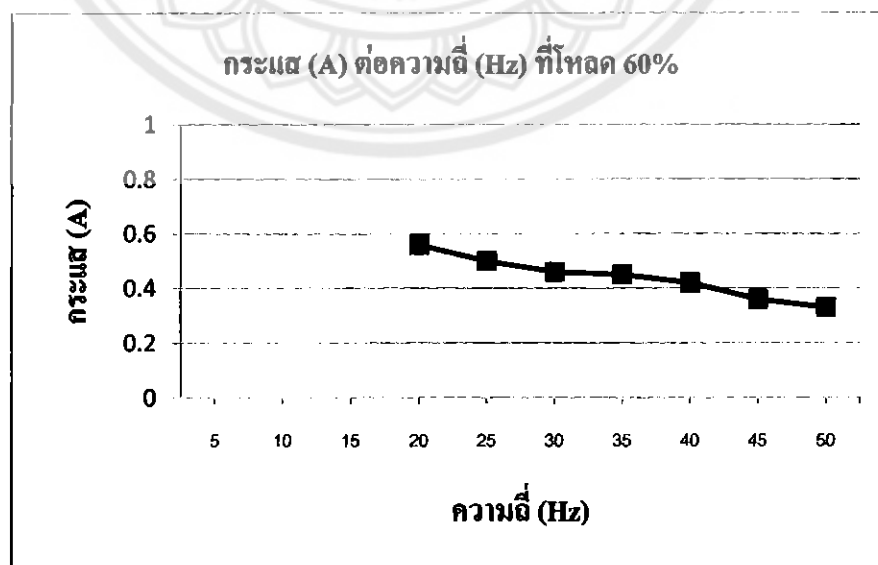
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.5 โหลด 60% โดยให้กำลังคงที่ 105 วัตต์ (W) ที่ทุกๆ ความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	105	0.56	140	0.79	261	38.1
25	105	0.5	170	0.64	530	34.0
30	105	0.46	200	0.52	716	31.2
35	105	0.45	240	0.44	885	30.6
40	105	0.42	270	0.36	1065	30.1
45	105	0.36	305	0.3	1233	29.7
50	105	0.33	340	0.24	1388	29.1

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

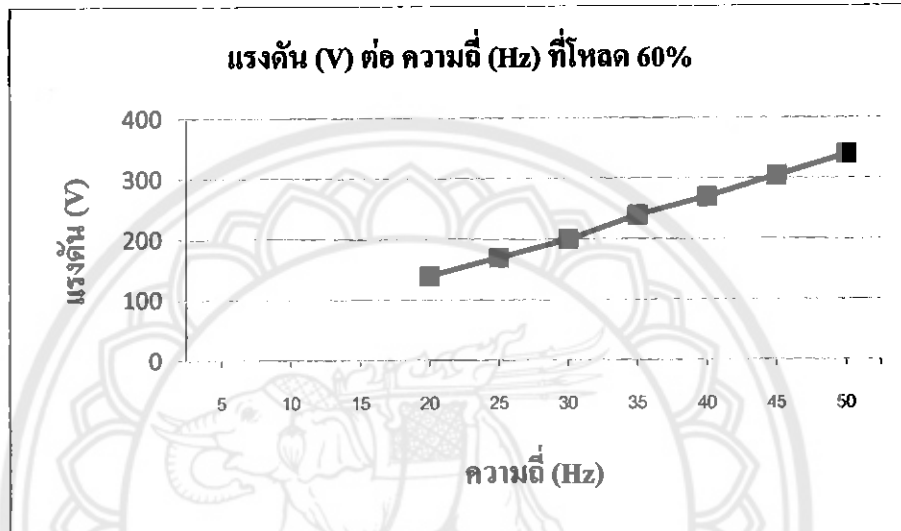
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.21 เมื่อความถี่ลดกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

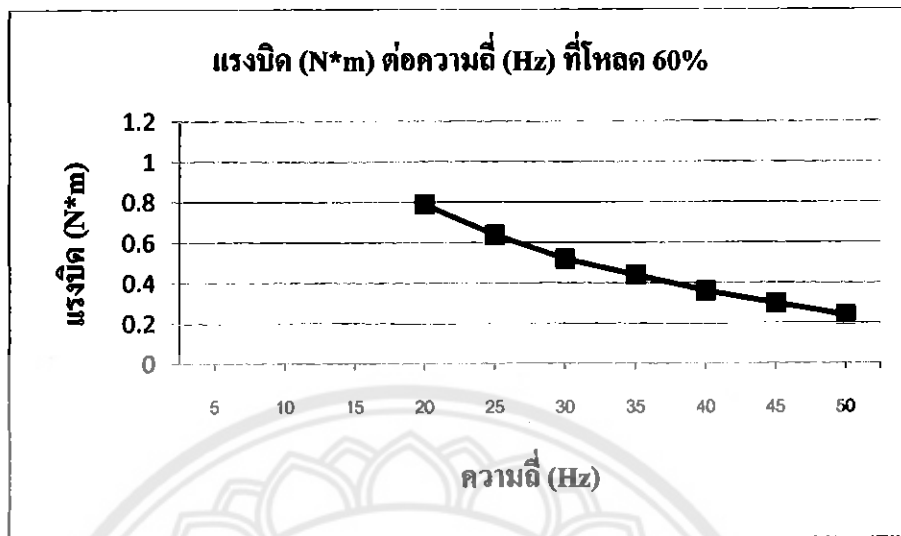
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.22 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

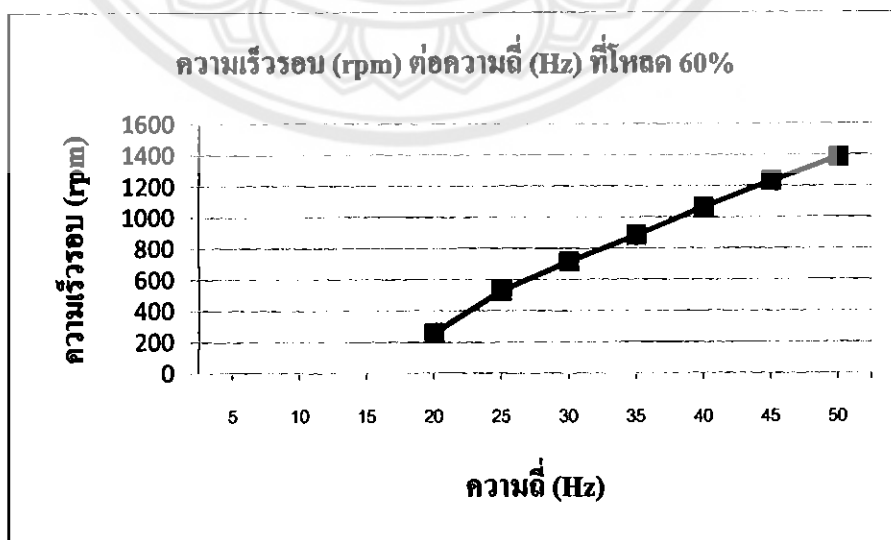


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.23 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

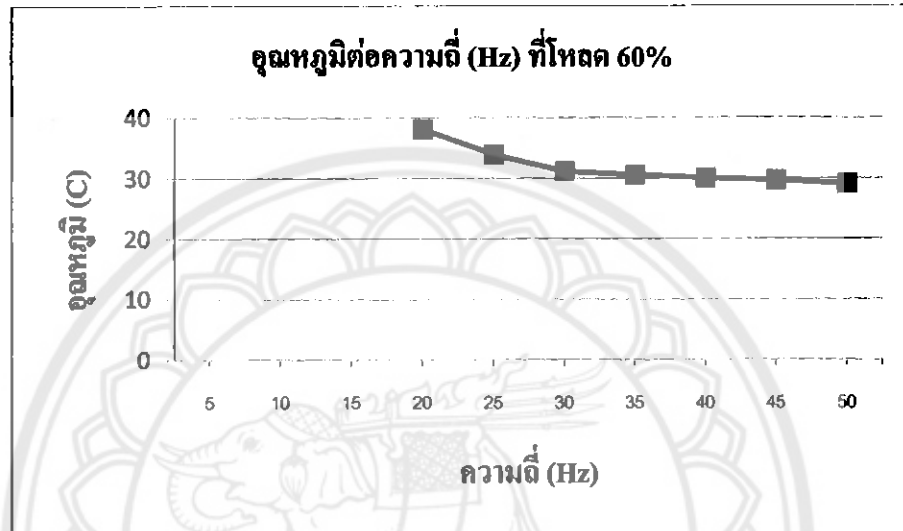
กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.24 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป

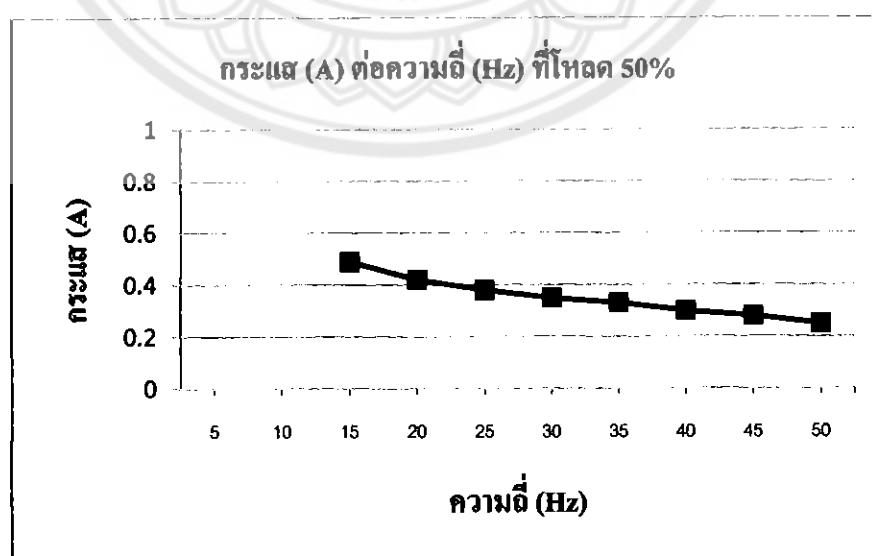
จากรูปที่ 4.25 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากกว่าสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.6 โหลด 50% โดยให้กำลังคงที่ 87 วัตต์ (W) ที่ทุกๆ ความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	87	0.49	110	0.66	130	31.4
20	87	0.42	140	0.6	384	30.2
25	87	0.38	175	0.43	598	29.0
30	87	0.35	205	0.35	791	28.2
35	87	0.33	240	0.28	926	27.5
40	87	0.3	280	0.22	1103	26.6
45	87	0.28	305	0.18	1256	26.2
50	87	0.25	340	0.14	1402	25.8

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

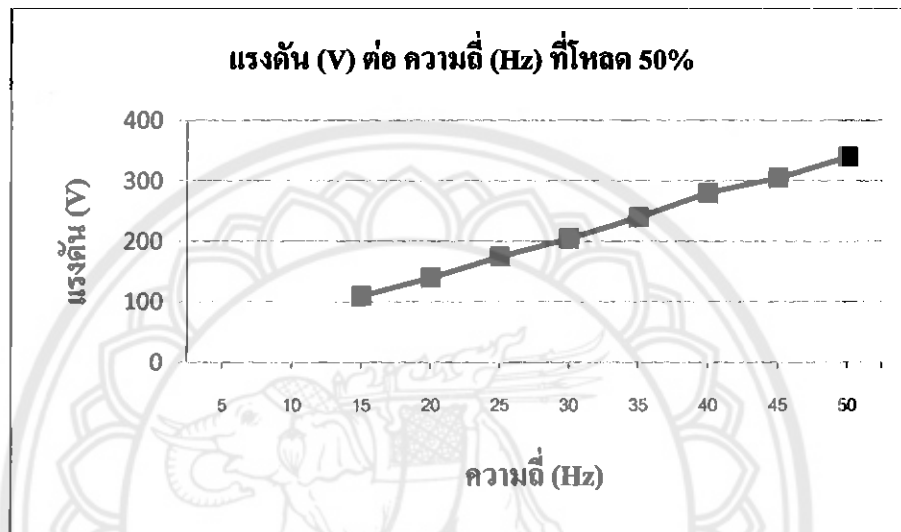
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.26 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

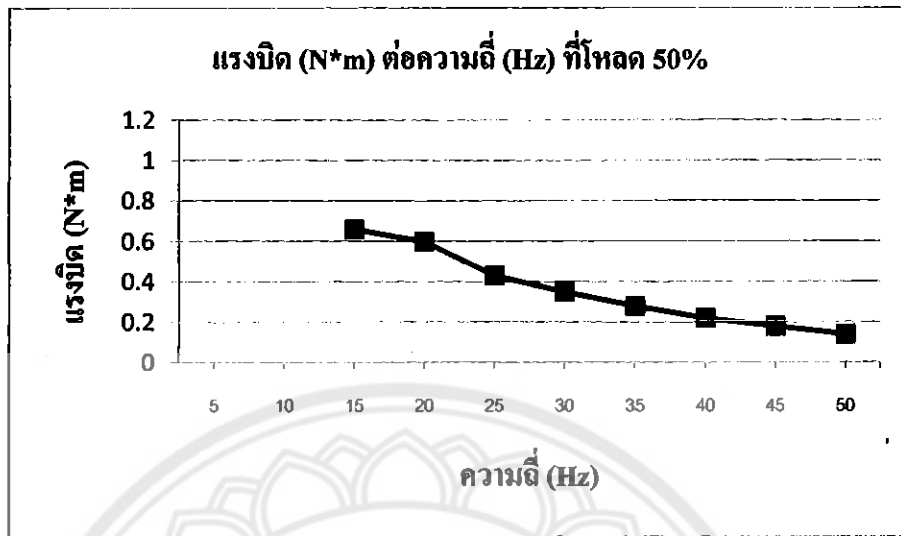
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.27 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขงใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

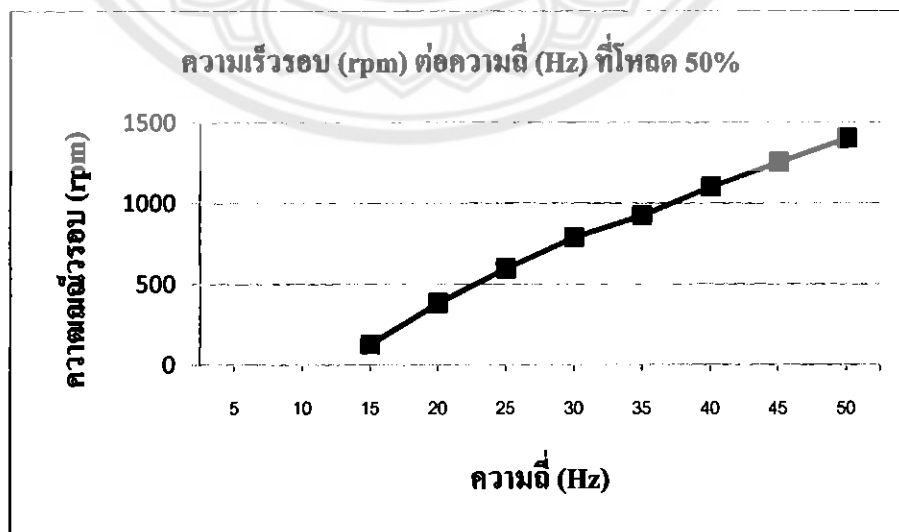


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.28 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

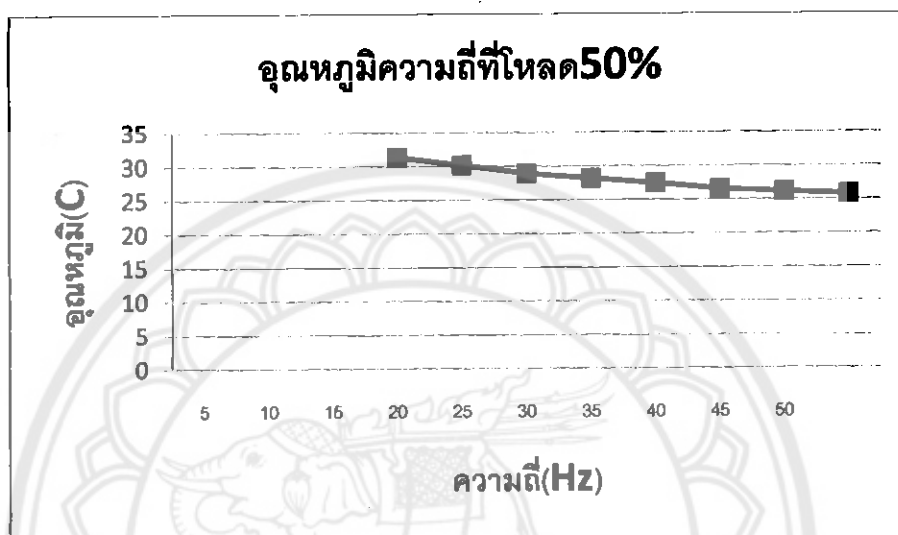
กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.29 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.30 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

4.2 ผลการทดลองที่ 2

ปรับโหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% โดยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตาม
ความถี่(Hz)

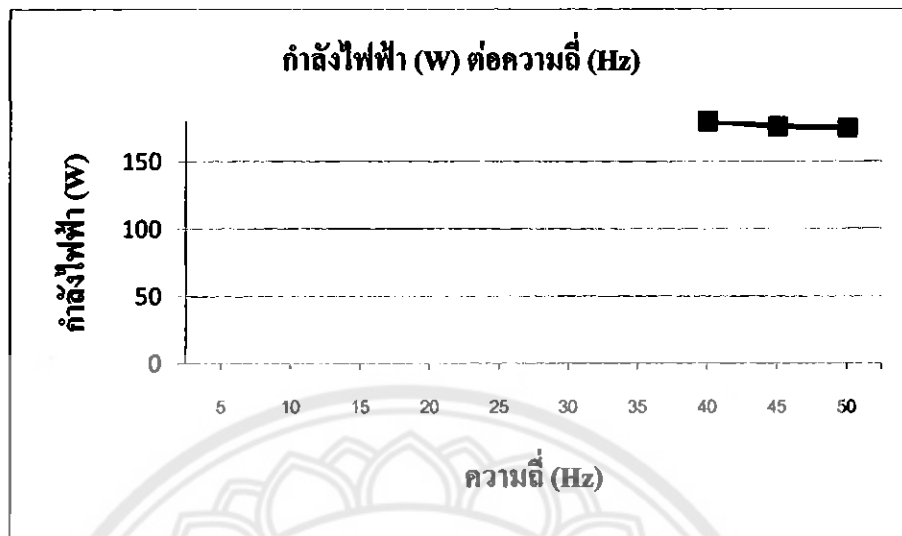
มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์ขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วกำลังไฟฟ้า 175 วัตต์(W),ความเร็วรอบ1240 รอบ
ต่อนาที(rpm),แรงดัน 380โวลต์ (V),กระแส 0.53แอมแปร์ (A),3เฟส,ความถี่ 50เฮิร์ต (Hz)

ตารางที่ 4.7 ปรับโหลด 100% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-
40	180	0.57	280	0.82	946	-
45	176	0.51	300	0.7	1118	33.7
50	175	0.5	340	0.63	1290	33.5

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่เปลี่ยนไป (Hz)

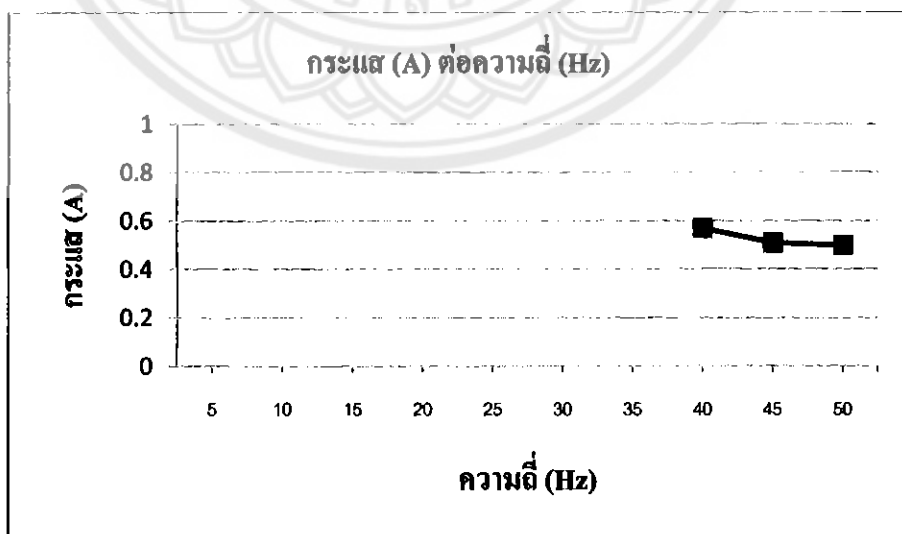


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงกำลัง (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.31 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

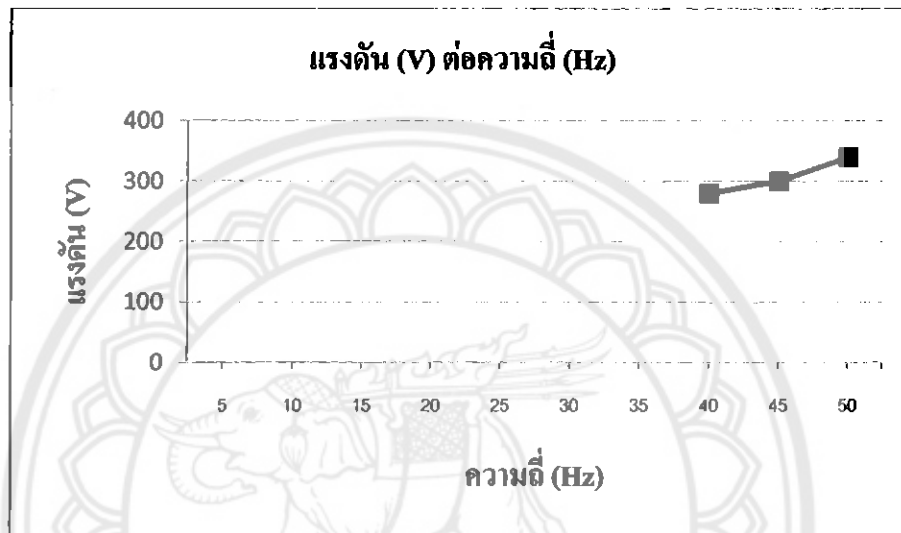
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.32 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

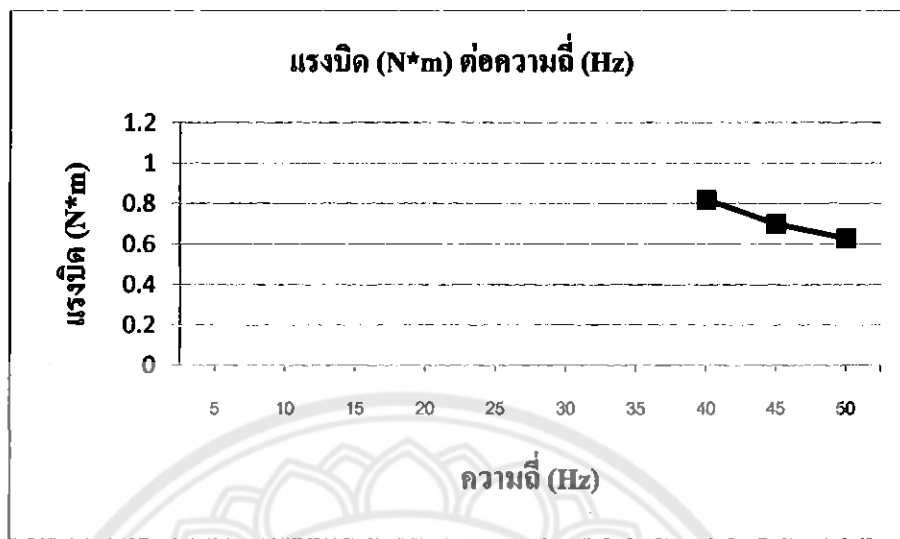
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.33 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

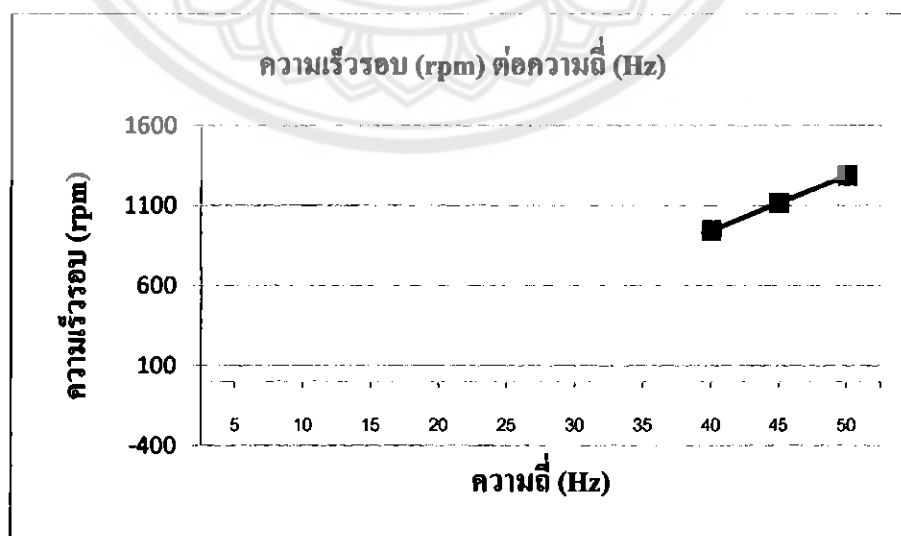


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.34 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

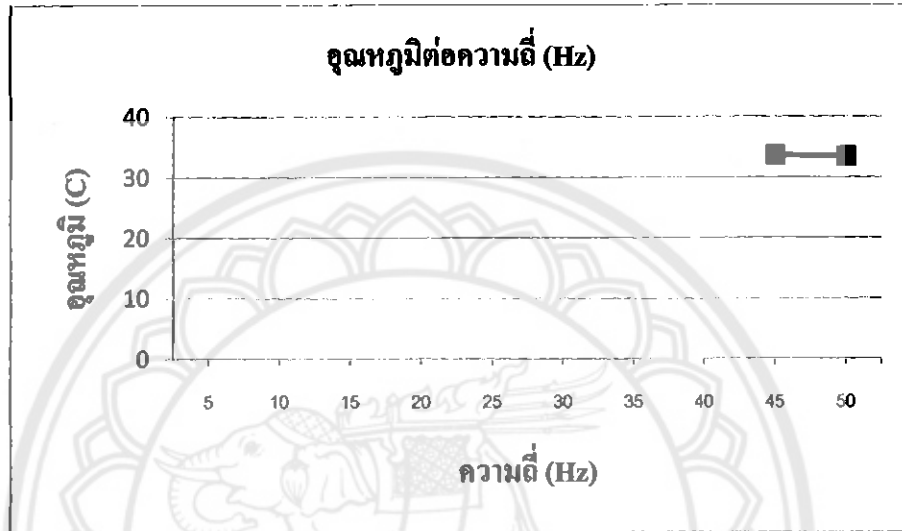
กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความเร็ว (r/min) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.35 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{P}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

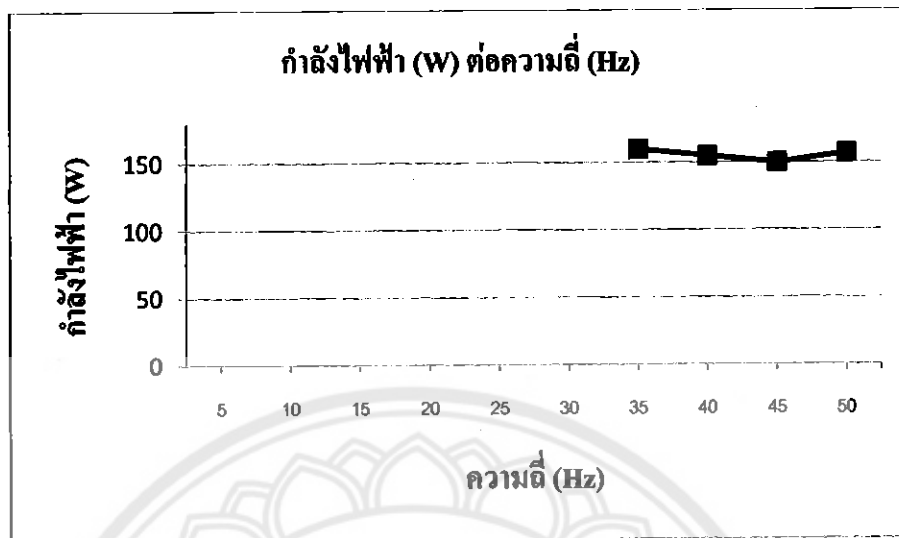
จากรูปที่ 4.36 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากกว่าสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.8 ปรับโหลด 90% แล้วปรับความถี่โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	160	0.55	240	0.8	792	-
40	155	0.5	270	0.67	998	32.9
45	150	0.45	305	0.58	1164	31.0
50	157	0.43	340	0.5	1327	30.7

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

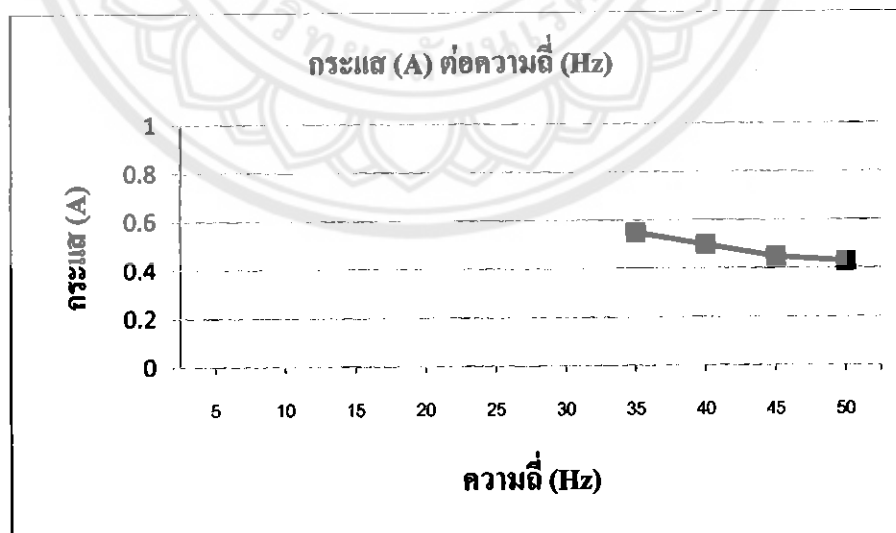


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.37 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

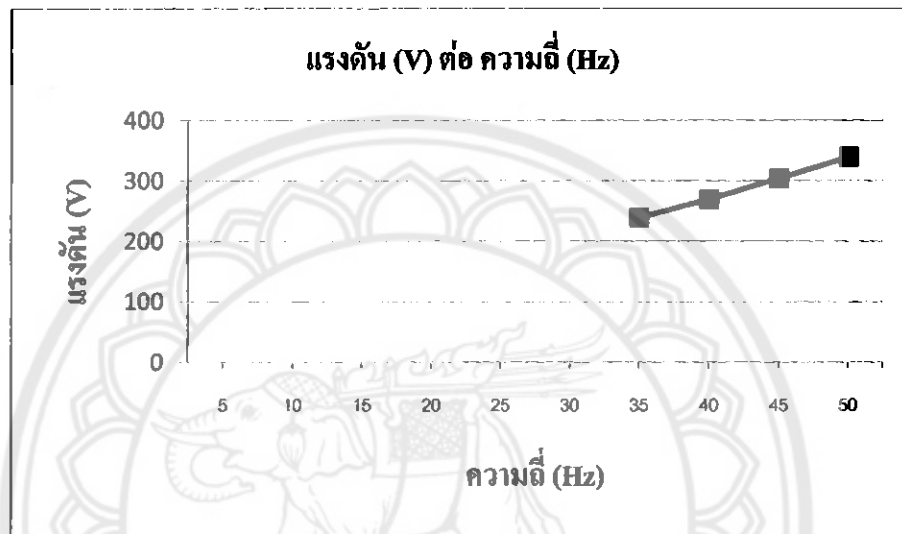
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.38 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

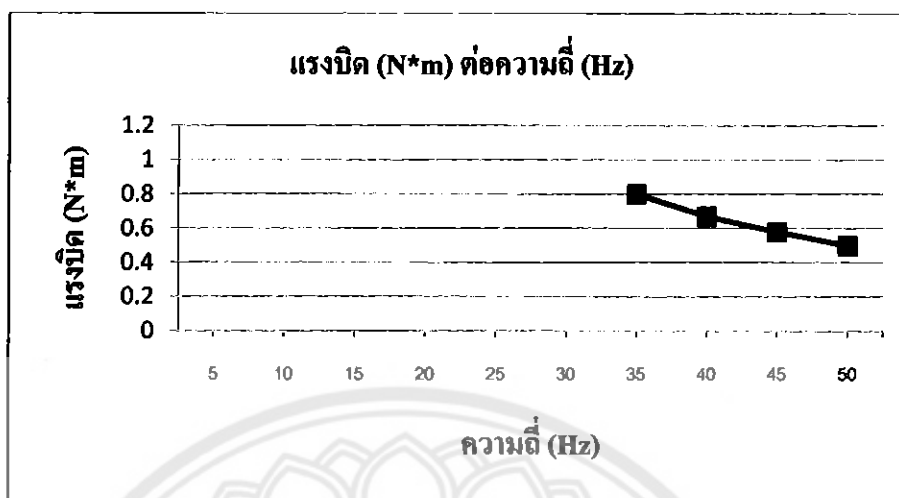
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.39 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

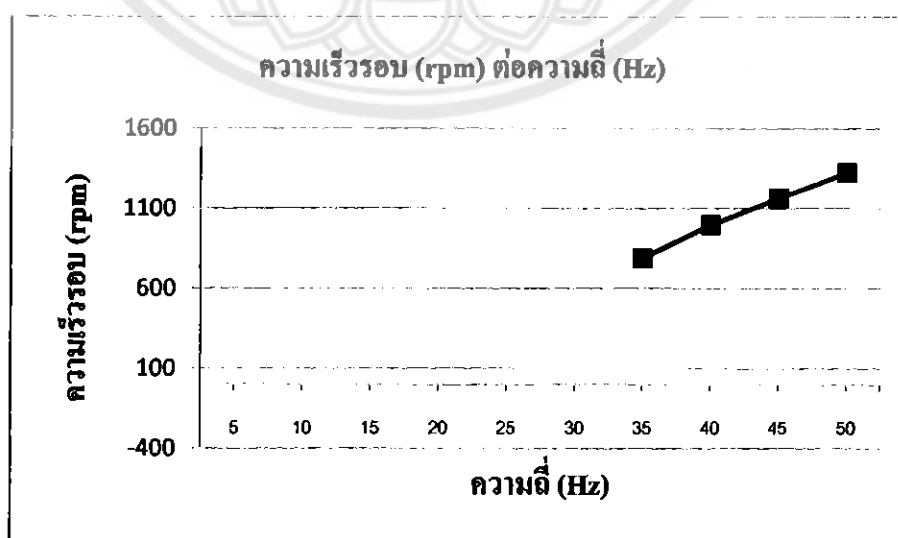


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.40 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจะค่อยเพิ่มขึ้น

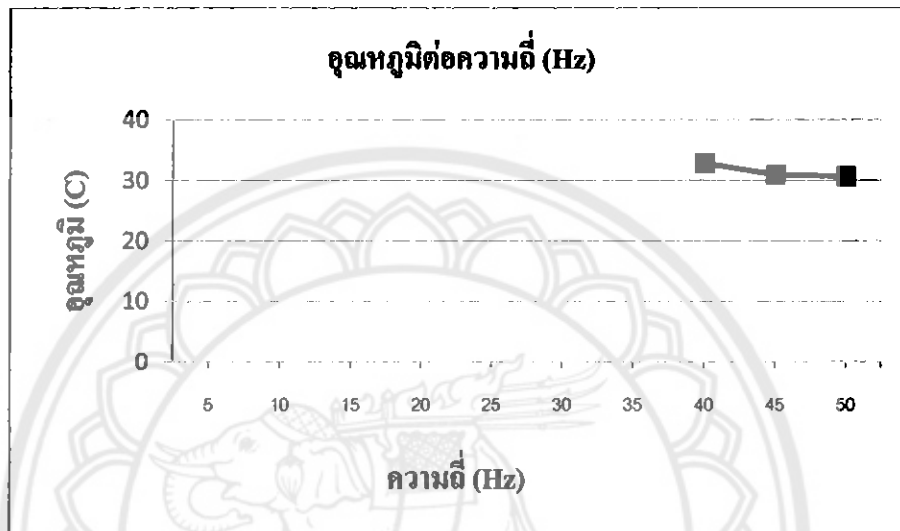
กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.41 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.42 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากกว่าสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

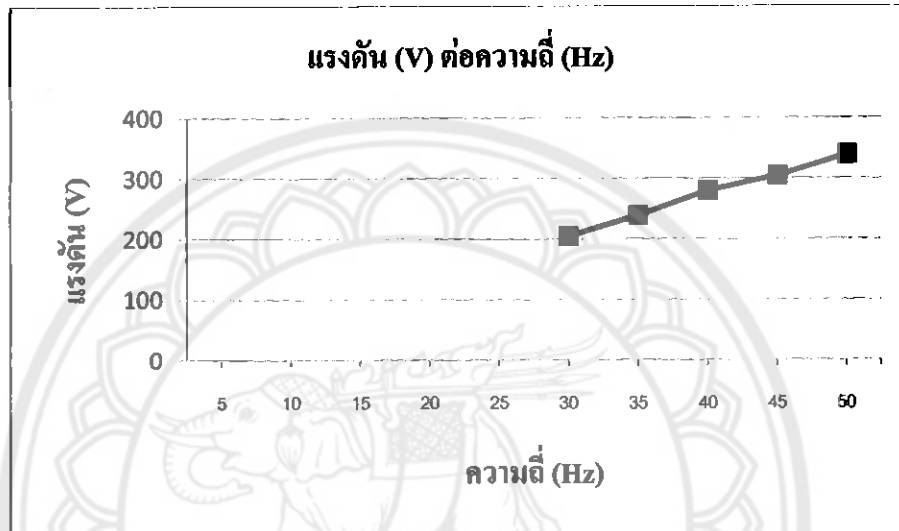
ตารางที่ 4.9 ปรับโหลด 80% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	175	0.67	205	1	532	-
35	140	0.5	240	0.68	840	32.3
40	135	0.45	280	0.56	1024	31.7
45	138	0.4	305	0.5	1195	29.4
50	140	0.38	340	0.42	1356	28.9

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
 เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

จากรูปที่ 4.44 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

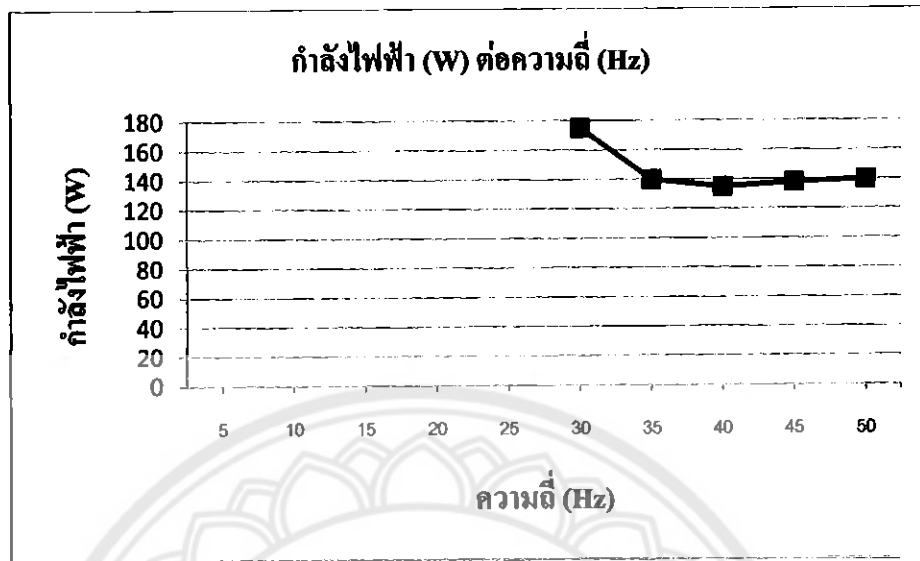
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.45 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

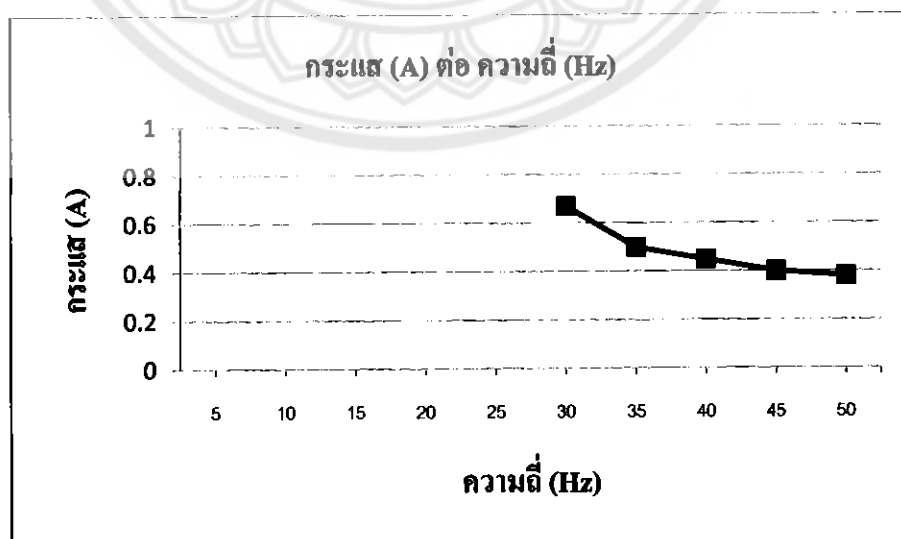


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.43 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

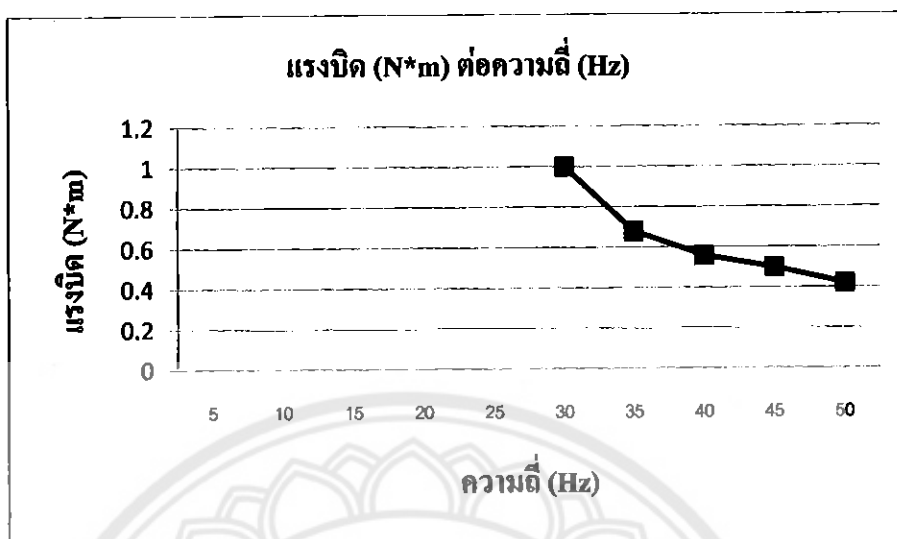
จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

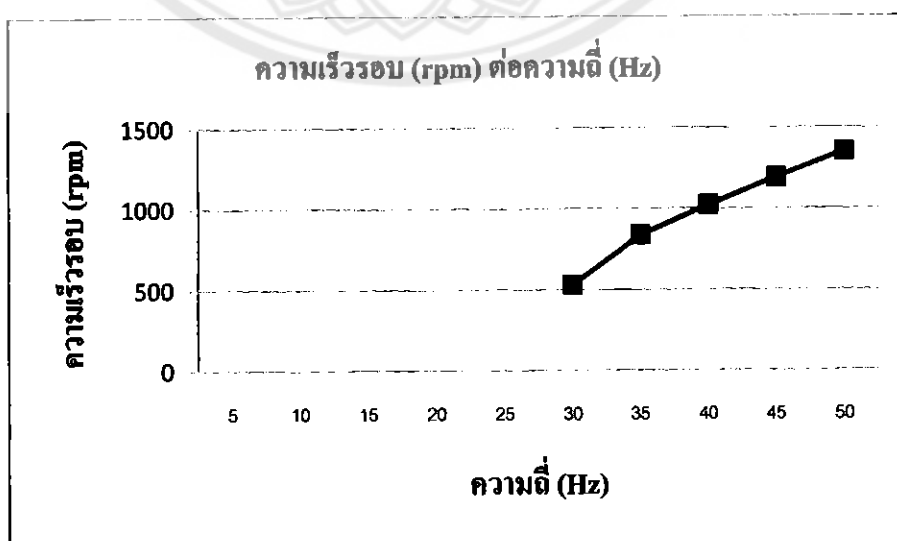


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.46 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{P}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจะค่อยเพิ่มขึ้น

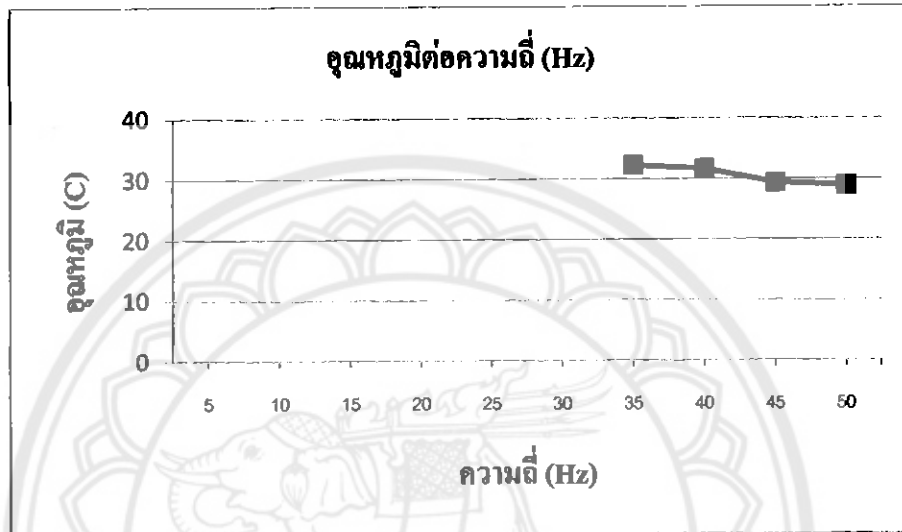
กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.47 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.48 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมา

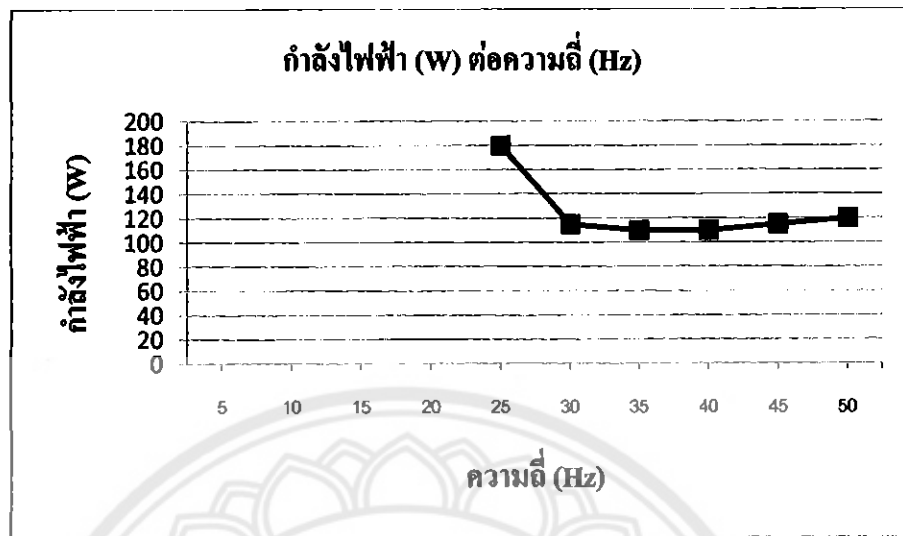
การความร้อน = $\frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.10 ปรับโหลด 70% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	180	0.8	170	1.8	267	-
30	115	0.42	200	0.6	702	31.4
35	110	0.39	240	0.5	900	30.2
40	110	0.38	280	0.42	1074	29.8
45	115	0.34	305	0.38	1204	28.6
50	120	0.3	340	0.34	1359	28.3

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

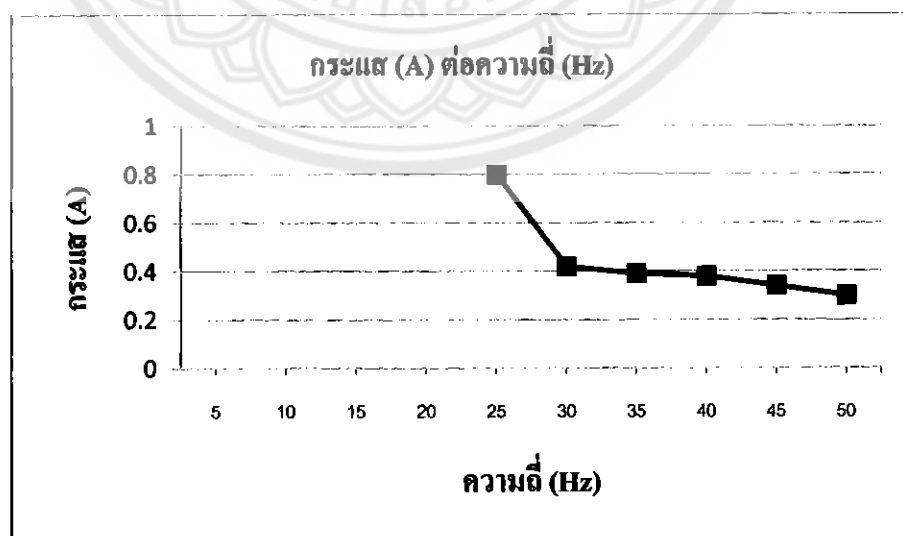


รูปที่ 4.49 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.19 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

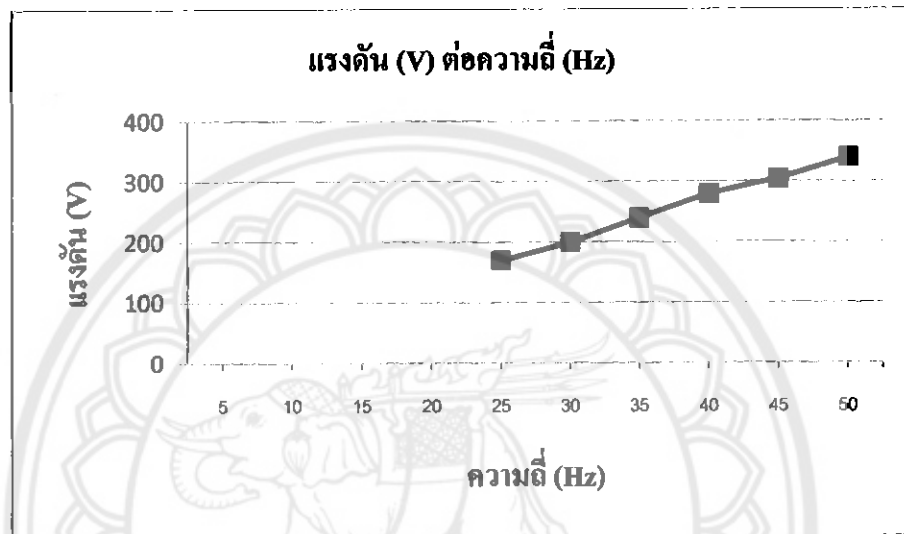
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูป 4.50 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้ กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

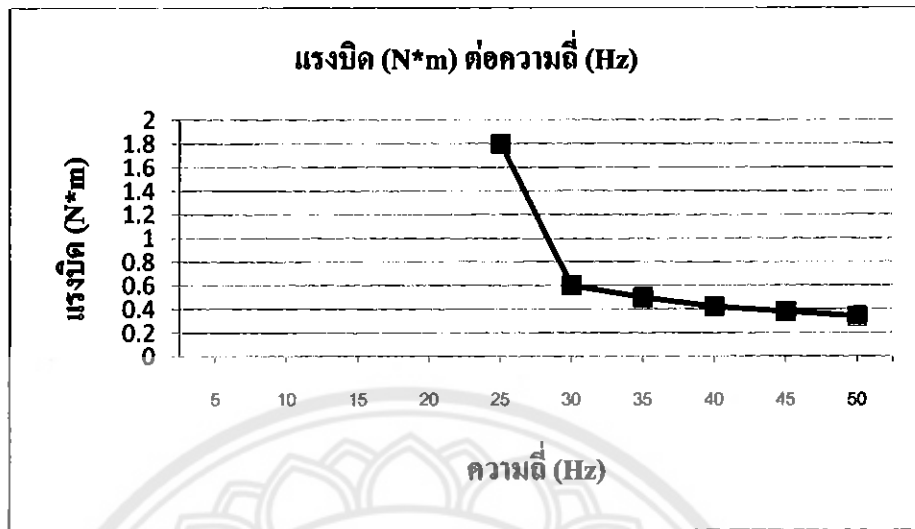
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.51 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

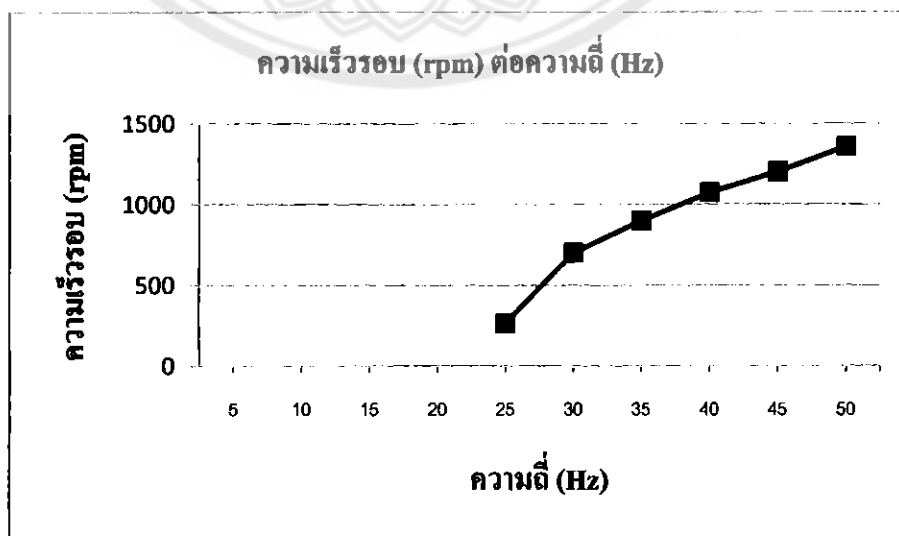


รูปที่ 4.52 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.52 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจะค่อยเพิ่มขึ้น

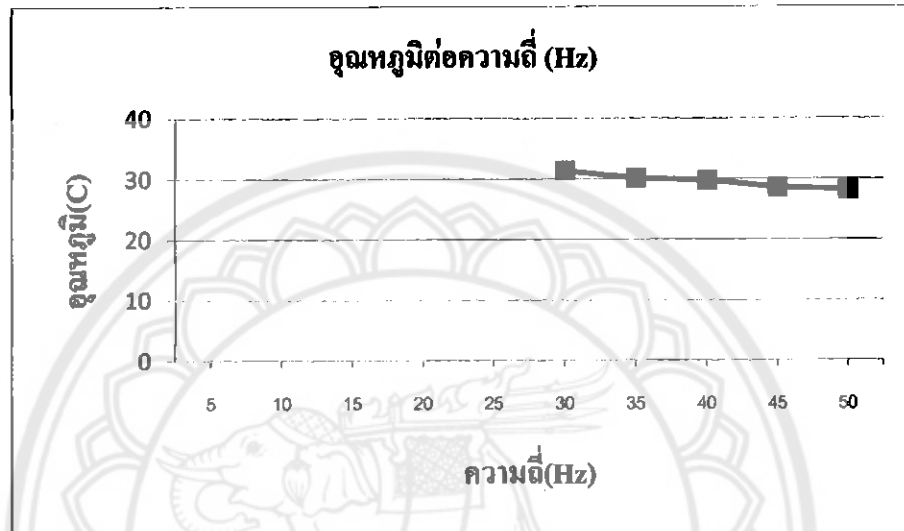
กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.53 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.54 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.54 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการ

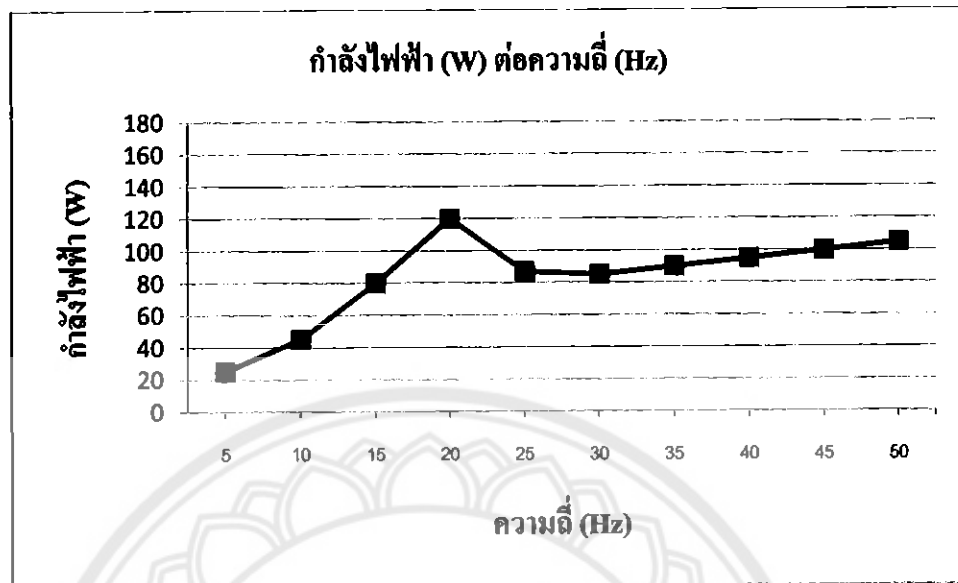
การความร้อน = $\frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.11 ปรับโหลด 60% แล้วปรับความถี่โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	25	0.05	40	0.15	19	25.4
10	45	0.25	80	0.42	64	28.0
15	80	0.52	100	0.68	116	31.8
20	120	0.63	140	0.82	187	-
25	87	0.28	170	0.5	574	29.5
30	85	0.23	200	0.4	776	26.7
35	90	0.24	240	0.33	935	27.3
40	95	0.25	280	0.3	1095	28.2
45	100	0.27	305	0.27	1245	29.0
50	105	0.35	340	0.24	1391	29.4

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

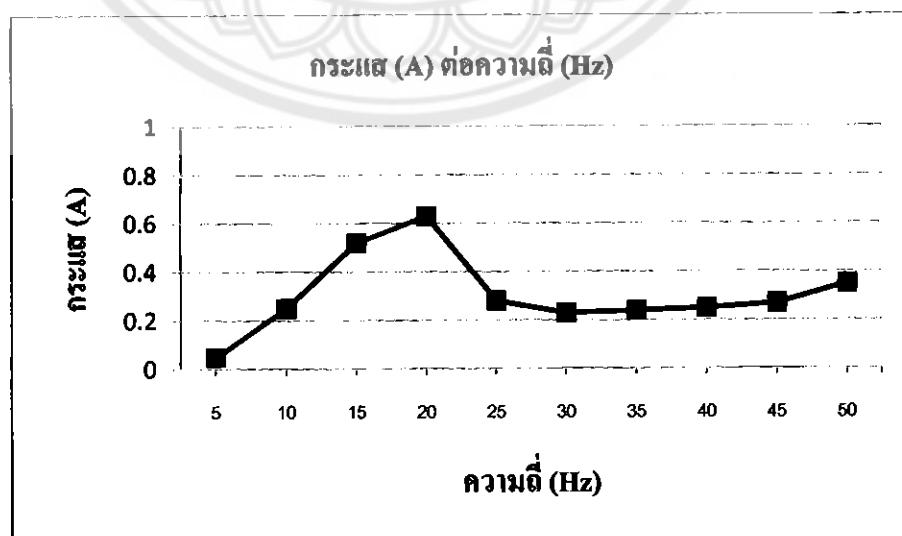


รูปที่ 4.55 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.55 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

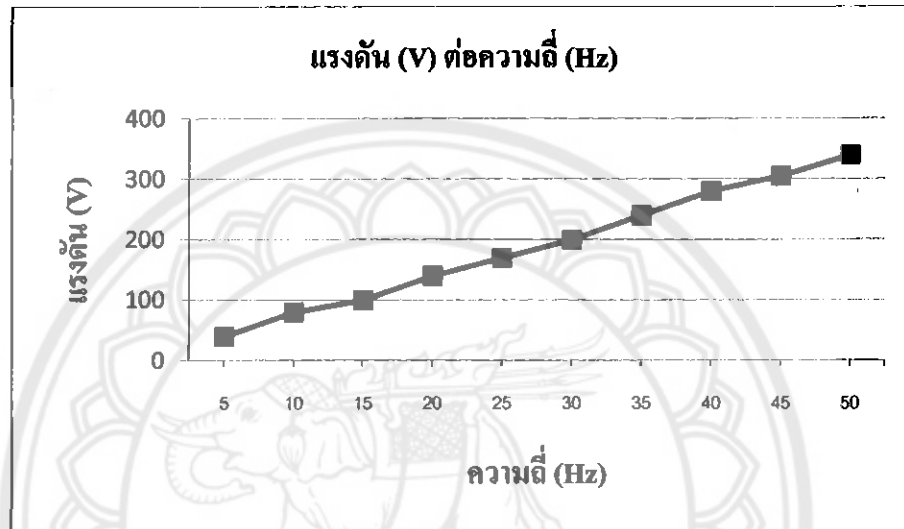
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.56 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.56 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

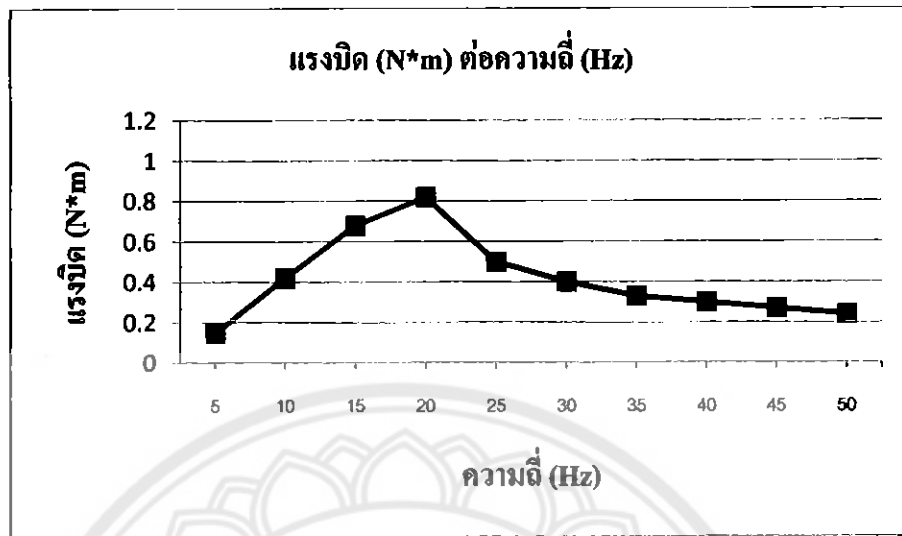
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.57 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.57 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

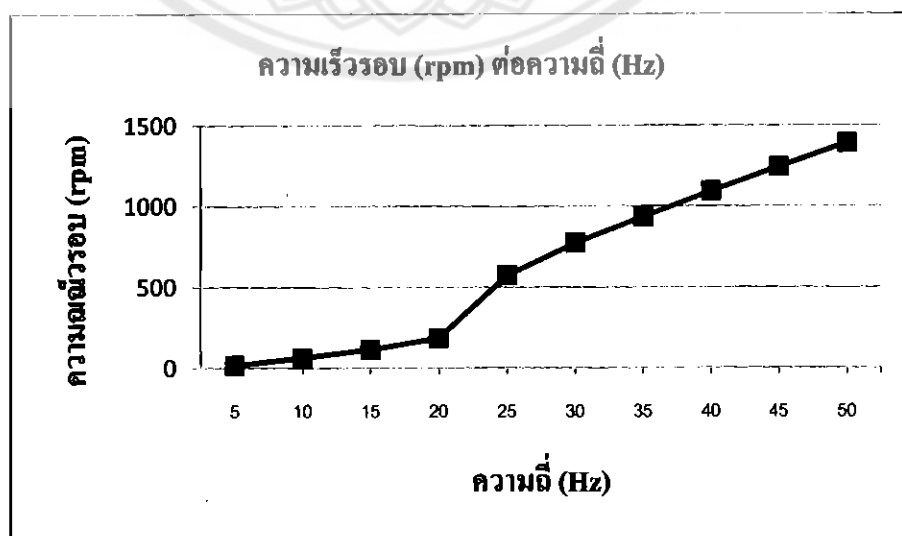
กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.58 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.58 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจะค่อยเพิ่มขึ้น

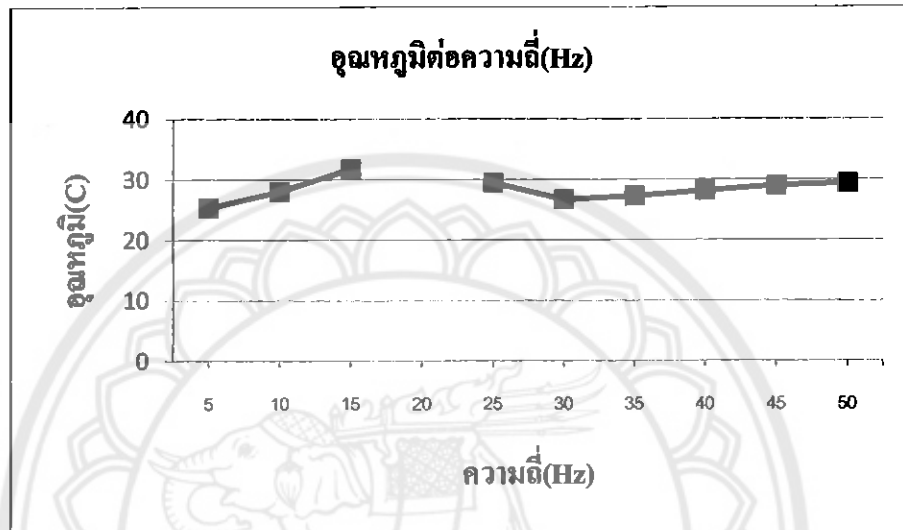
กราฟแสดงความเร็วรอบ (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.59 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนไป

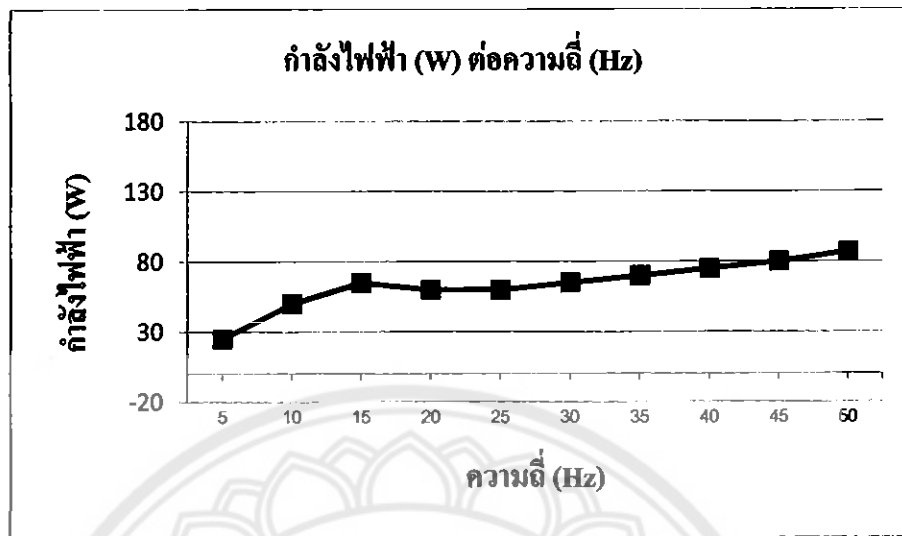
จากรูปที่ 4.60 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากกว่าสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

ตารางที่ 4.12 ปรับโหลด 50% แล้วปรับความถี่โดยปล่อยให้กำลังไฟฟ้า (W) เปลี่ยนไปตามความถี่ (Hz)

ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
5	25	0.12	40	0.8	26	24.0
10	50	0.22	80	0.42	91	24.2
15	65	0.3	100	0.54	199	29.4
20	60	0.11	140	0.32	502	26.7
25	60	0.17	170	0.26	643	24.9
30	65	0.19	200	0.21	812	25.3
35	70	0.2	240	0.2	968	25.7
40	75	0.21	270	0.17	1112	26.3
45	80	0.22	300	0.16	1261	27.7
50	87	0.25	340	0.14	1378	28.2

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
 เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

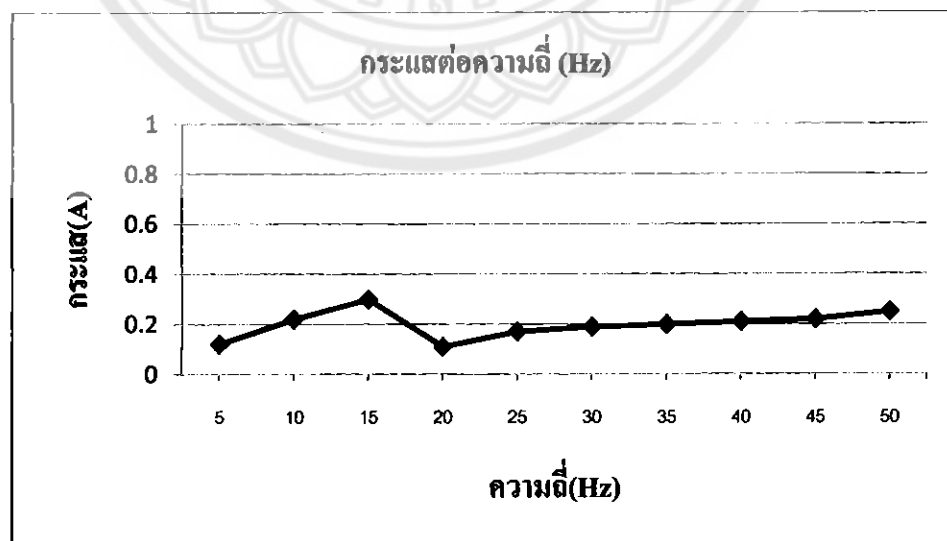


รูปที่ 4.61 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.61 เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จากสมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และ

จะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

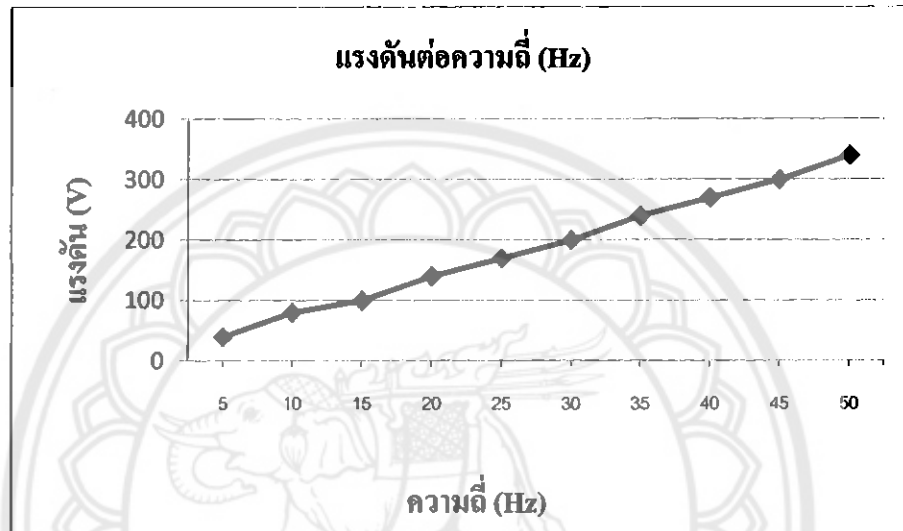
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.62 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.62 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

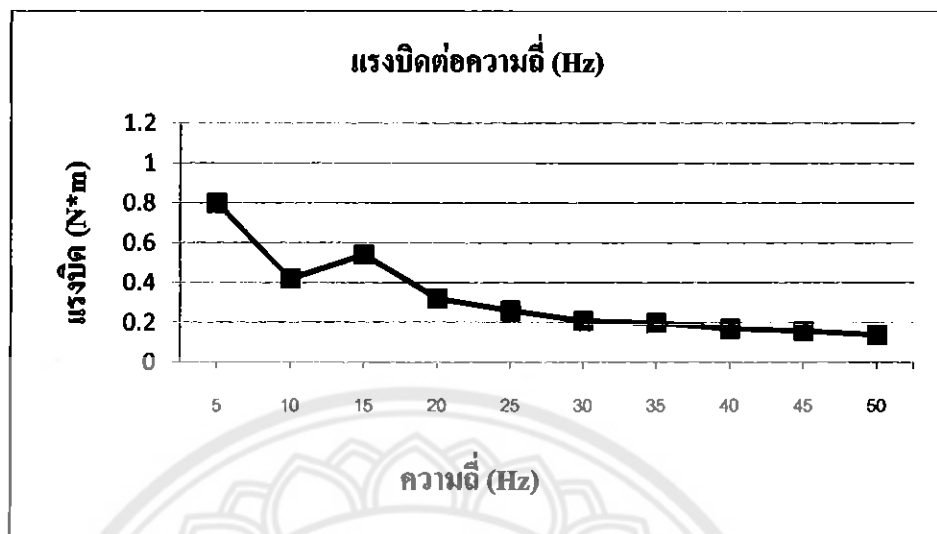
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.63 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.63 เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

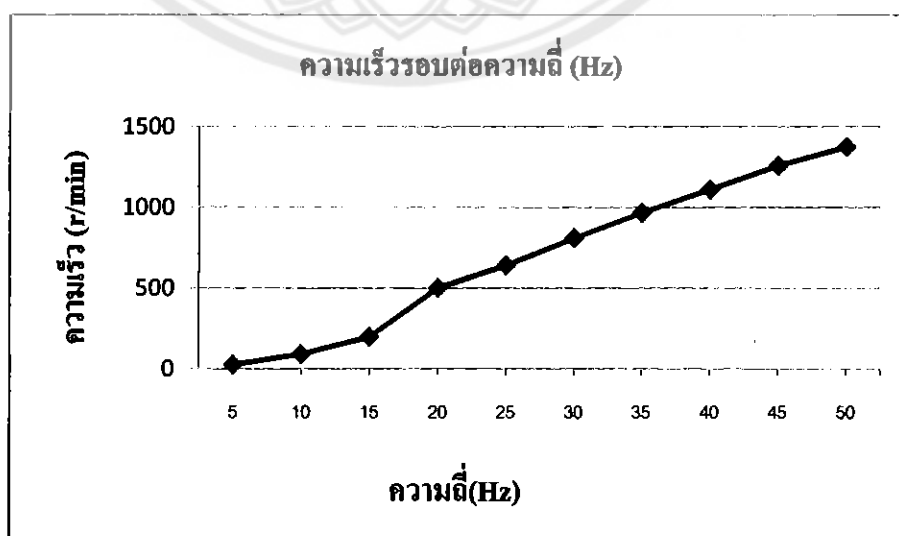


รูปที่ 4.64 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.64 เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ

กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{P}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจะค่อยเพิ่มขึ้น

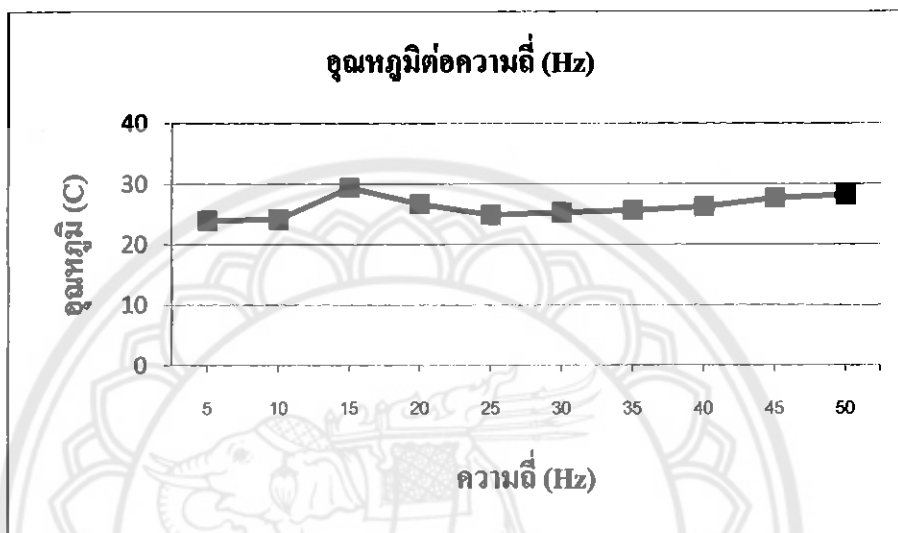
กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.65 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.65 เมื่อความถี่ลดลงความรอบจะลดลงเป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือ ความถี่

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.66 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เมื่อความถี่ (Hz) เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.66 เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่ใช้อินเวอร์เตอร์ทดสอบ

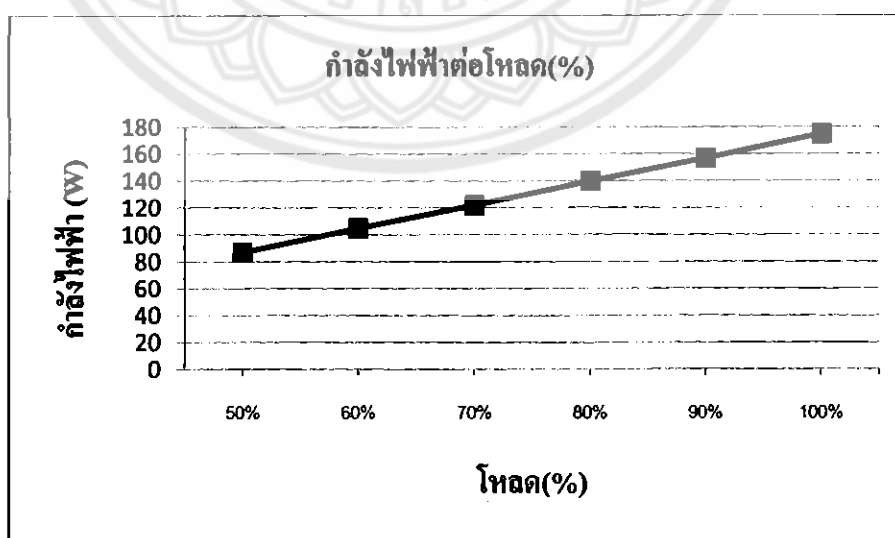
มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์จี้วแม่เหล็ก 4 ขั้วกำลังไฟฟ้า 175 วัตต์(W), ความเร็วรอบ1240 รอบต่อนาที(rpm), แรงดัน 380 โวลต์ (V), กระแส 0.53แอมแปร์ (A), 3เฟส, ความถี่ 50 เฮิรตซ์

ตารางที่ 4.13 โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% โดยไม่ใช้อินเวอร์เตอร์

โหลด	กำลังไฟฟ้า (W)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	แรงบิด (N*m)	ความเร็ว (rpm)	อุณหภูมิ (°C)
50%	87	0.41	380	0.12	1440	28.1
60%	105	0.42	380	0.19	1435	28.3
70%	122	0.43	380	0.25	1430	28.4
80%	140	0.45	380	0.39	1418	29.5
90%	157	0.47	380	0.46	1391	31.1
100%	175	0.5	380	0.54	1384	33.4

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

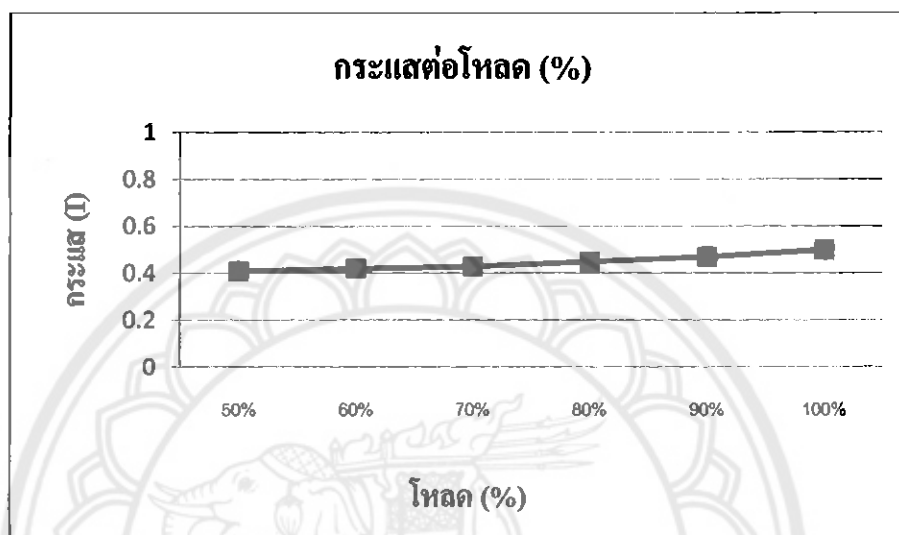
กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.67 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้า (W) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.67 เมื่อ โหลดเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะที่โหลด 100%หมายความว่ามอเตอร์ทำงานเต็มที่ 175 วัตต์ แล้วค่อยๆลดลงตามเปอร์เซ็นต์ของโหลด

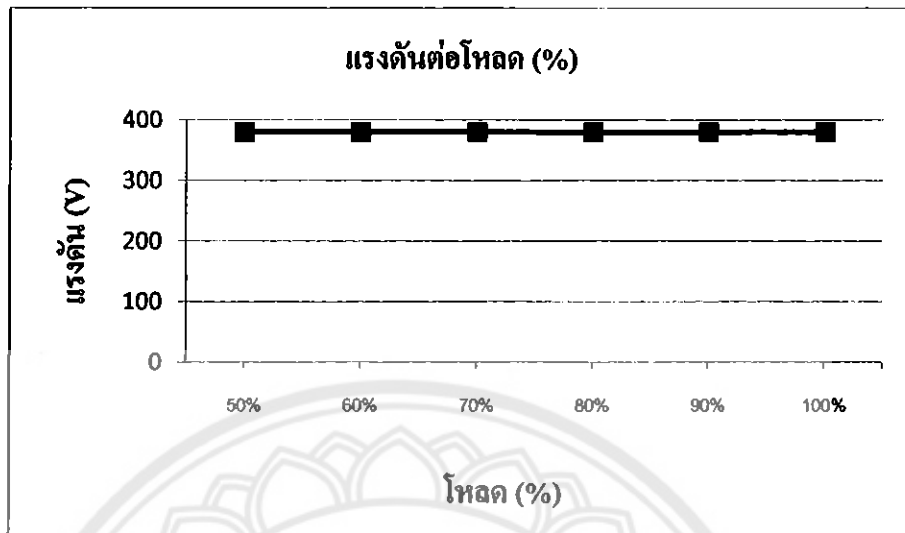
กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อ โหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.68 กราฟแสดงกระแส (A) เมื่อ โหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.68 เมื่อ โหลดเพิ่มขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับในกรณีของกำลังไฟฟ้า จาก $P=IV$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า I คือ กระแส และ V คือ แรงดัน ซึ่งในที่นี้คงที่

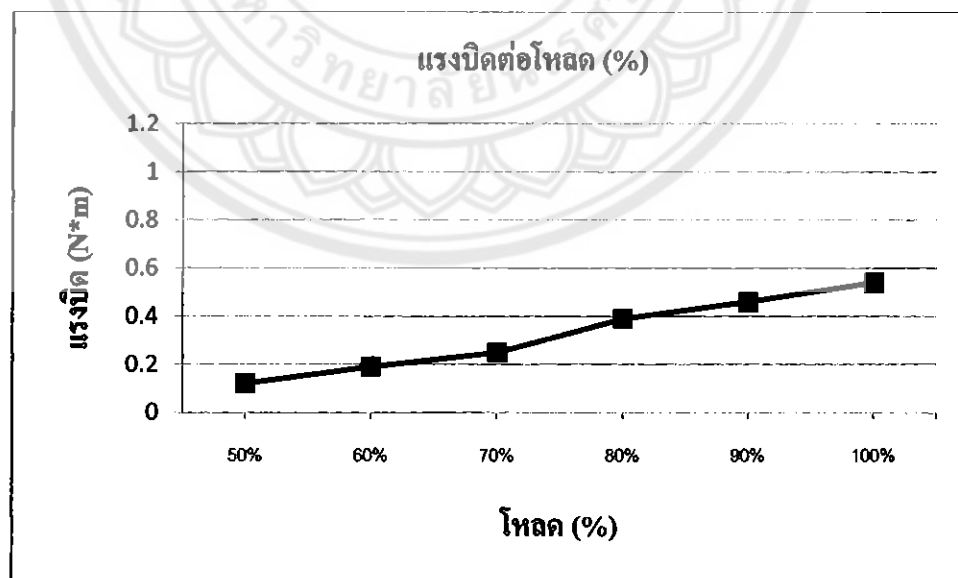
กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.69 กราฟแสดงแรงดัน (V) เมื่อ โหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.69 เมื่อ โหลดเพิ่มขึ้นแรงดันคงที่ เพราะแรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย

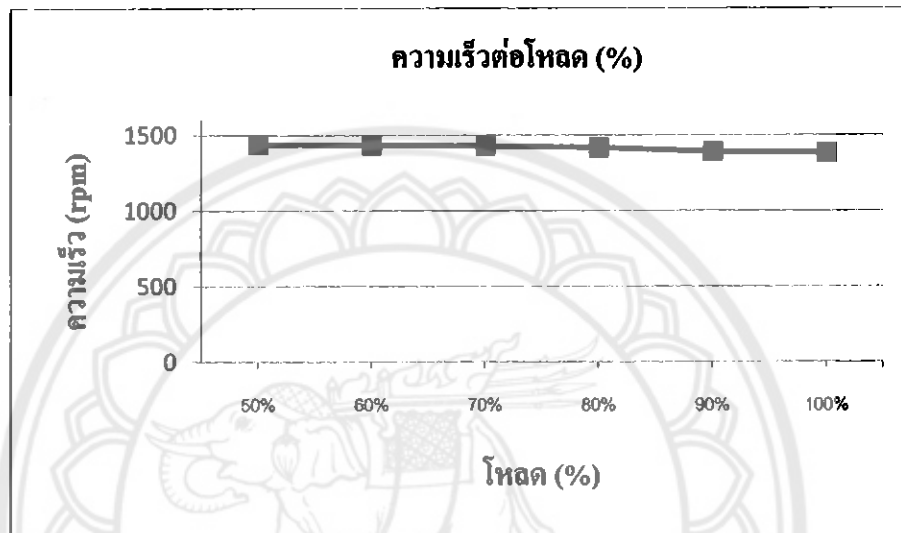
กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อ โหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.70 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) เมื่อ โหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.70 เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นแรงบิดเพิ่มขึ้น เป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า
 ω คือความเร็วรอบ ($\omega = \frac{120P}{f}$) ซึ่งในที่นี้คงที่

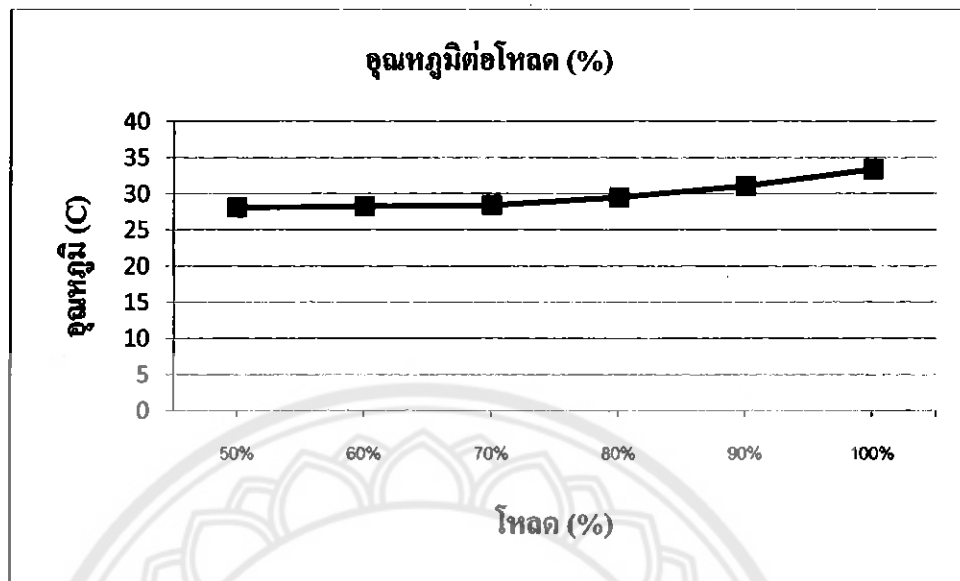
กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.71 กราฟแสดงความเร็ว (rpm) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.71 เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นความเร็วรอบจะลดลง เป็นไปตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือ
 กำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ ($\omega = \frac{120P}{f}$) แต่ในที่นี้ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นกำลังก็จะเพิ่มขึ้นด้วยทำให้
 ความเร็วรอบลดลงไม่มาก

กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.72 กราฟแสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) เมื่อโหลด (%) เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 6.72 เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อโหลดเพิ่มก็หมายความว่ากระแสก็เพิ่มขึ้นด้วย จากสูตร ความร้อน = $\frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

4.4 สรุปผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ทดสอบ

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วกำลังไฟฟ้า 175 วัตต์(W), ความเร็วรอบ 1240 รอบต่อนาที(rpm), แรงดัน 380 โวลต์ (V), กระแส 0.53 แอมแปร์ (A), 3 เฟส, ความถี่ 50 เฮิรท์ การทดลองแบบที่ 1 ปรับโหลด 100 %, 90 %, 80 %, 60 %, และ 50 % โดยให้กำลังไฟฟ้าแหล่งจ่าย (W) มีค่าคงที่

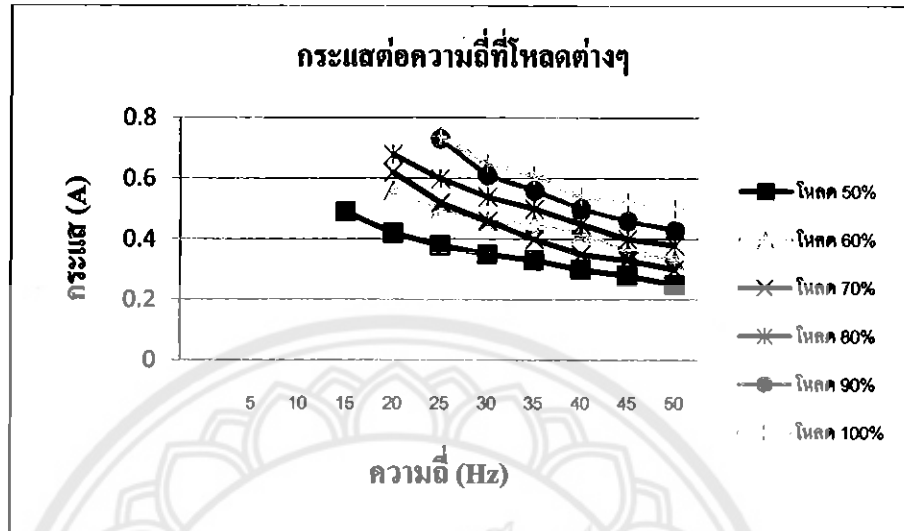
ตารางที่ 4.14 แสดงกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป

ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	0.49	-	-	-	-	-
20	0.42	0.56	0.62	0.68	-	-
25	0.38	0.5	0.52	0.6	0.73	0.74
30	0.35	0.46	0.46	0.54	0.61	0.65
35	0.33	0.45	0.4	0.5	0.56	0.61
40	0.3	0.42	0.35	0.45	0.5	0.54
45	0.28	0.36	0.33	0.4	0.46	0.52
50	0.25	0.33	0.3	0.38	0.43	0.5

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 6.73 กราฟแสดงกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

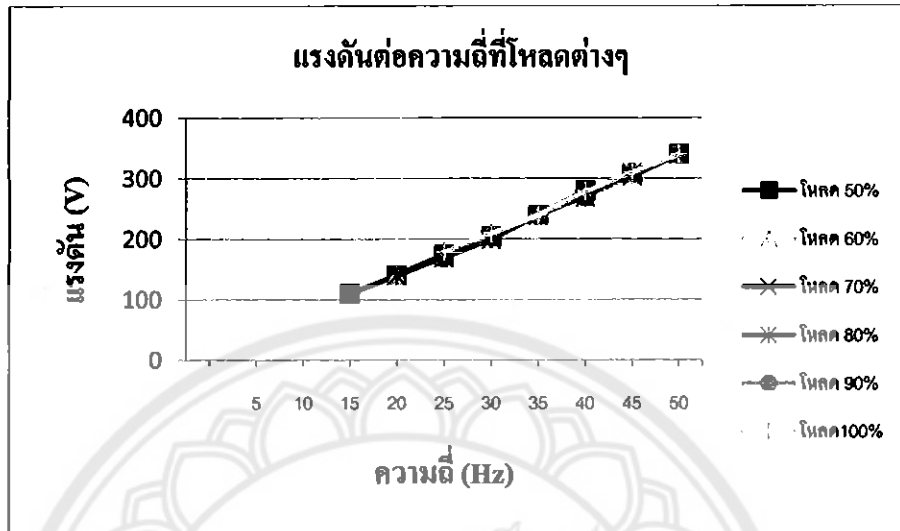
สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับ โหลดจะมี กระแสไฟฟ้า กระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.15 สรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	110	-	-	-	-	-
20	140	140	140	140	-	-
25	175	170	170	170	170	180
30	205	200	200	200	205	210
35	240	240	240	240	240	240
40	280	270	280	270	270	280
45	305	305	305	310	310	310
50	340	340	340	340	340	340

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 6.74 กราฟแสดงแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

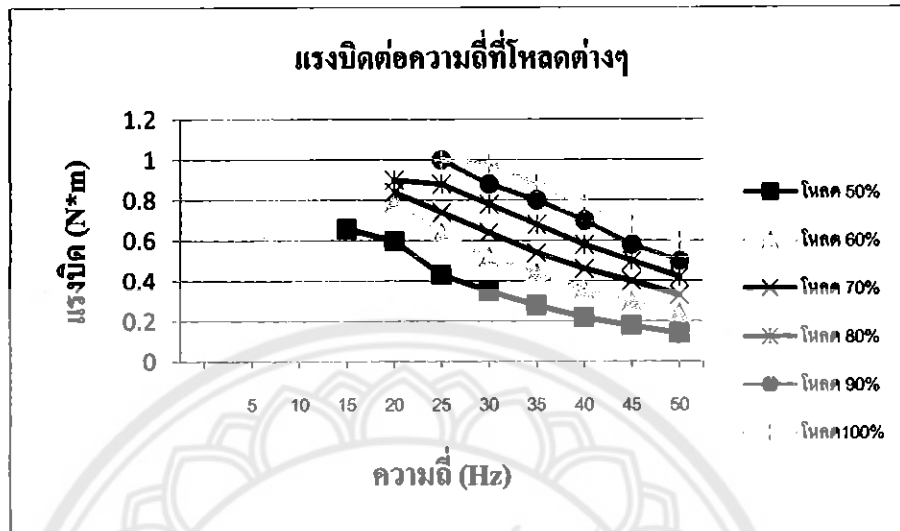
สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะ จากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

ตารางที่ 4.16 สรूपแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	0.66	-	-	-	-	-
20	0.6	0.79	0.84	0.9	-	-
25	0.43	0.64	0.74	0.88	1	1
30	0.35	0.52	0.64	0.78	0.88	0.98
35	0.28	0.44	0.54	0.68	0.8	0.88
40	0.22	0.36	0.46	0.58	0.7	0.78
45	0.18	0.3	0.4	0.5	0.58	0.68
50	0.14	0.24	0.33	0.42	0.5	0.6

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟแสดงแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 6.75 กราฟแสดงแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไปตาม

สมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบ จาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลด แรงบิดจึง

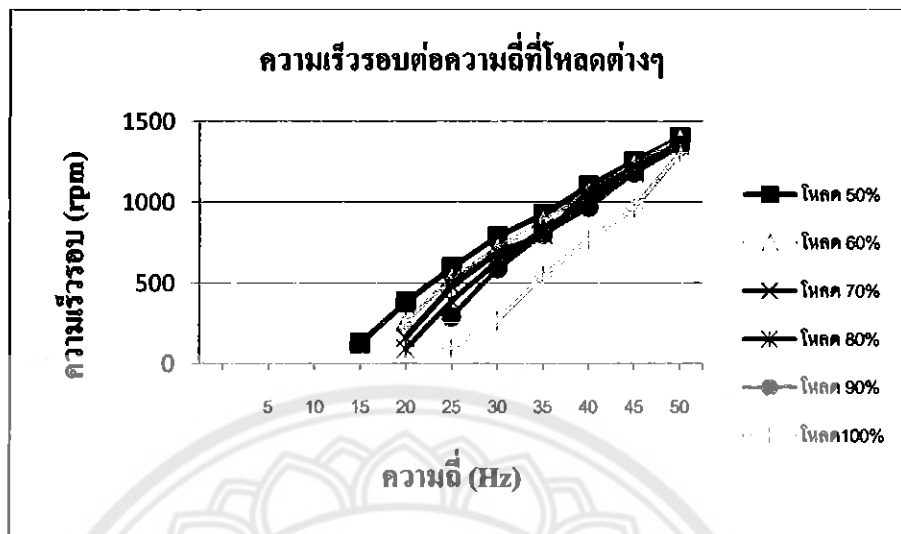
เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.17 สรุปความเร็วรอบ (r/min) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	130	-	-	-	-	-
20	384	261	164	94	-	-
25	598	530	483	390	291	97
30	791	716	690	636	590	268
35	926	885	801	835	804	545
40	1103	1065	1057	1012	971	770
45	1256	1233	1203	1187	1184	964
50	1402	1388	1363	1350	1348	1306

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่า ไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 6.76 กราฟสรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลง

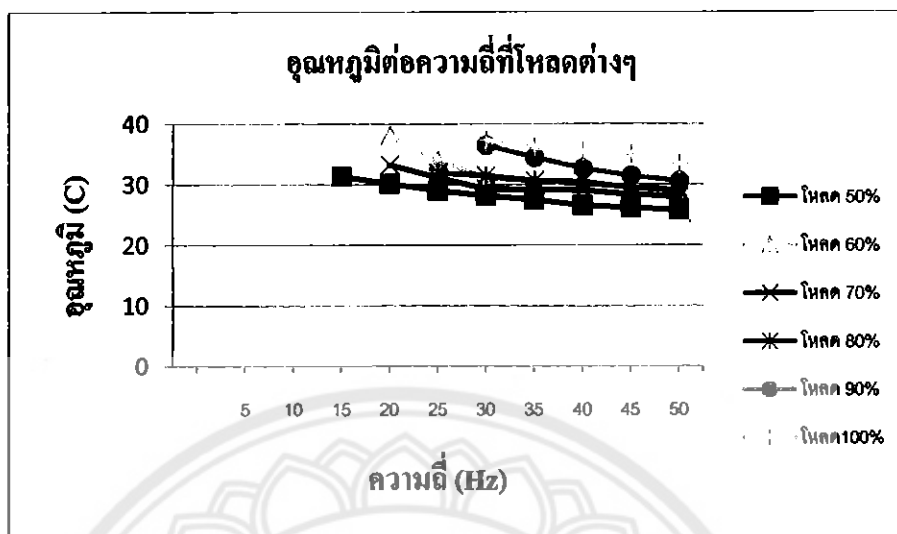
เป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือความถี่

ตารางที่ 4.18 สรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ Hz	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	31.4	-	-	-	-	-
20	30.2	38.1	33.3	-	-	-
25	29.0	34.0	31.2	32.0	-	-
30	28.2	31.2	29.3	31.5	36.5	37.3
35	27.5	30.6	29.2	30.7	34.5	36.2
40	26.6	30.1	29.1	30.5	32.7	35.5
45	26.2	29.7	28.4	29.5	31.5	35.1
50	25.8	29.1	28.0	29.0	30.6	33.4

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 6.77 กราฟกราฟสรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงกระแสมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน m^3 คือปริมาตร

การทดลองแบบที่ 2

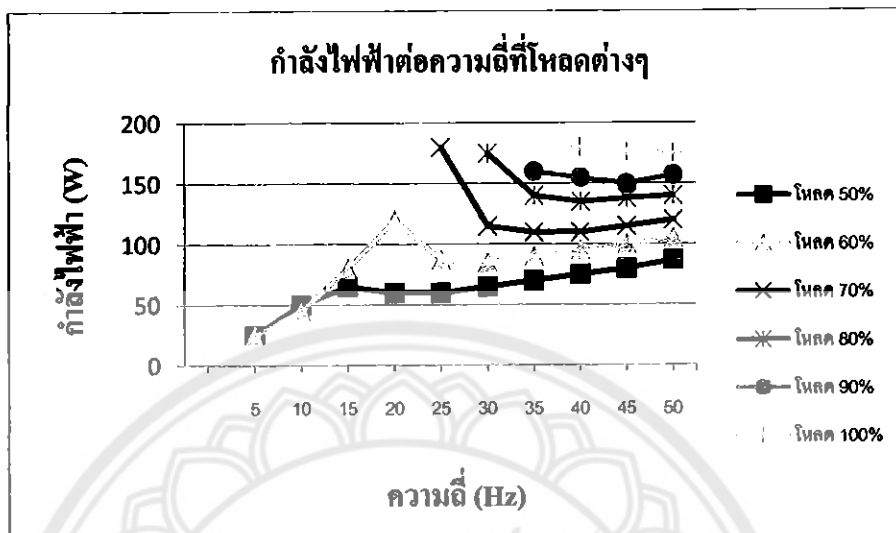
ปรับโหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% แล้วปรับความถี่ โดยปล่อยให้กำลังเปลี่ยนไปตามความถี่

ตารางที่ 4.19 สรุปกำลังไฟฟ้า (W) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	25	25	-	-	-	-
10	50	45	-	-	-	-
15	65	80	-	-	-	-
20	60	120	-	-	-	-
25	60	87	180	-	-	-
30	65	85	115	175	-	-
35	70	90	110	140	160	-
40	75	95	110	135	155	180
45	80	100	115	138	150	176
50	87	105	120	140	157	175

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปกำลังไฟฟ้า (W) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.78 กราฟสรุปกำลังไฟฟ้า (W) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงกำลังไฟฟ้าจะลดลง จาก

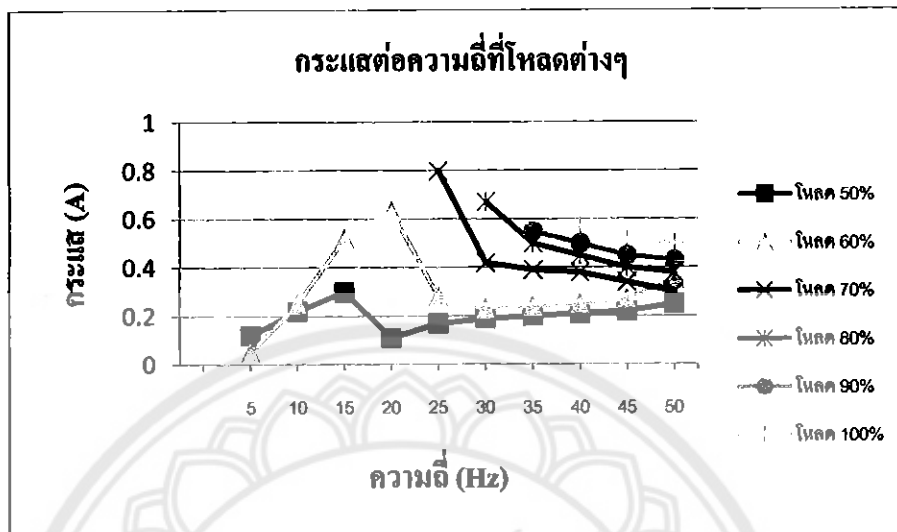
สมการ $\tau = P\omega$ เมื่อ $\omega = \frac{120f}{p}$ และจะมีบางช่วงที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆเข้าสู่สภาวะปกติ

ตารางที่ 4.20 สรุปลักษณะ (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	0.12	0.05	-	-	-	-
10	0.22	0.25	-	-	-	-
15	0.3	0.52	-	-	-	-
20	0.11	0.63	-	-	-	-
25	0.17	0.28	0.8	-	-	-
30	0.19	0.23	0.42	0.67	-	-
35	0.2	0.24	0.39	0.5	0.55	-
40	0.21	0.25	0.38	0.45	0.5	0.57
45	0.22	0.27	0.34	0.4	0.45	0.51
50	0.25	0.35	0.3	0.38	0.43	0.5

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.79 กราฟสรุปกระแส (A) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

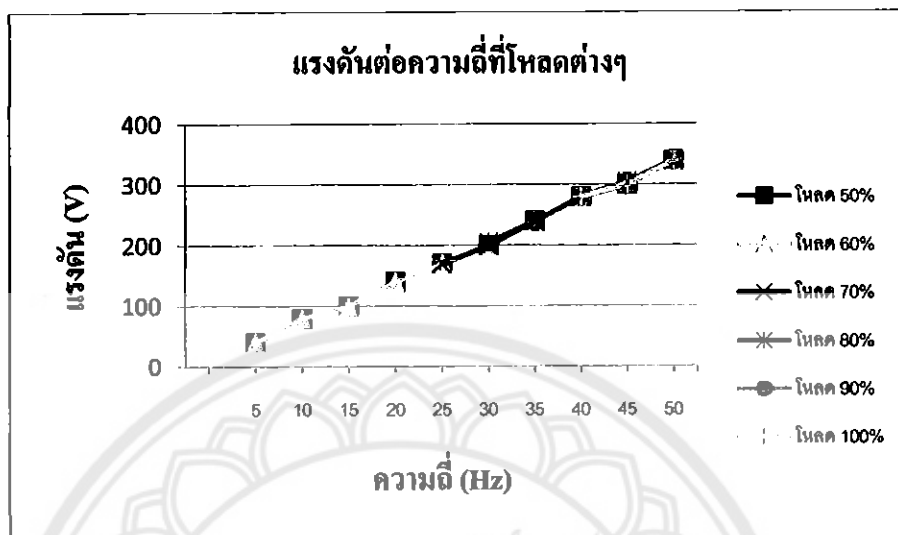
สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้า กระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่กระแสจะมีค่าสูงแล้วตกลงแล้วค่อยๆเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.21 สรุปรองค้ัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่นเปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	40	40	-	-	-	-
10	80	80	-	-	-	-
15	100	100	-	-	-	-
20	140	140	-	-	-	-
25	170	170	170	-	-	-
30	200	200	200	205	-	-
35	240	240	240	240	240	-
40	280	280	280	280	280	280
45	300	305	305	305	305	300
50	340	340	340	340	340	340

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.80 กราฟสรุปแรงดัน (V) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

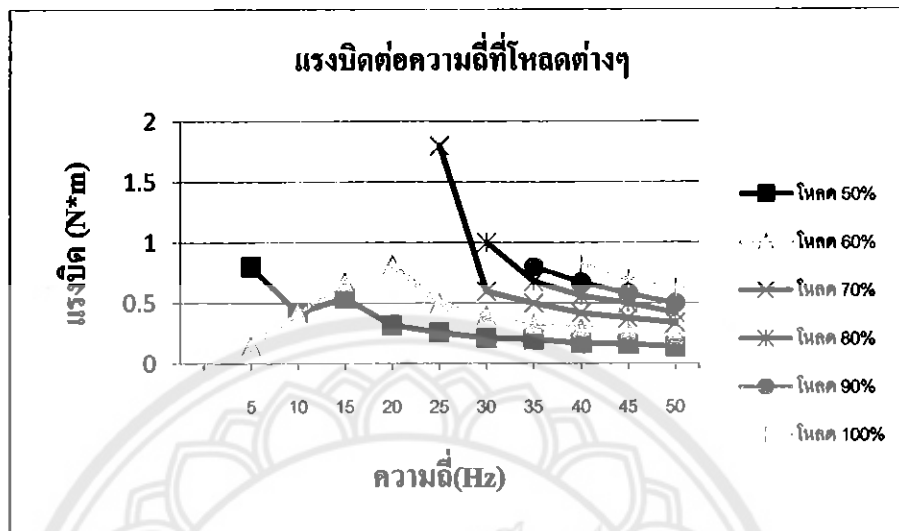
สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงแรงดันจะลดลงเพราะจากสมการ $V = v \sin(\omega t)$ เมื่อ V คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าขณะใดๆ v คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f ลดลงแรงดันจึงลดลง

ตารางที่ 4.22 สรूपแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	0.8	0.15	-	-	-	-
10	0.42	0.42	-	-	-	-
15	0.54	0.68	-	-	-	-
20	0.32	0.82	-	-	-	-
25	0.26	0.5	1.8	-	-	-
30	0.21	0.4	0.6	1	-	-
35	0.2	0.33	0.5	0.68	0.8	-
40	0.17	0.3	0.42	0.56	0.67	0.82
45	0.16	0.27	0.38	0.5	0.58	0.7
50	0.14	0.24	0.34	0.42	0.5	0.63

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.81 กราฟสรุปแรงบิด (N*m) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นไป

ตามสมการ $\tau = \frac{P}{\omega}$ เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้า ω คือความเร็วรอบจาก $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อความถี่ลดลงแรงบิด

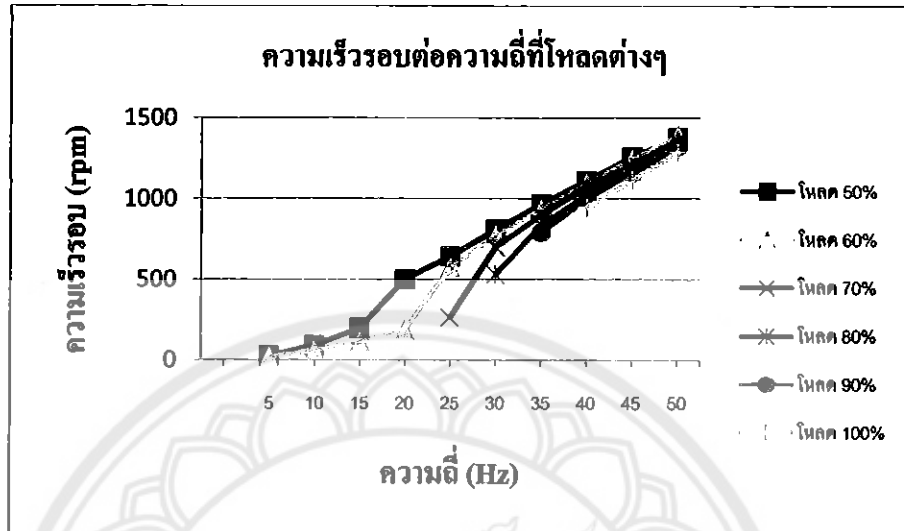
จึงเพิ่มขึ้นและในบางช่วงความถี่แรงบิดจะเพิ่มขึ้นและค่อยๆลดลง

ตารางที่ 4.23 สรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	26	19	-	-	-	-
10	91	64	-	-	-	-
15	199	116	-	-	-	-
20	502	187	-	-	-	-
25	643	574	267	-	-	-
30	812	776	702	532	-	-
35	968	935	900	840	792	-
40	1112	1095	1074	1024	998	946
45	1261	1245	1204	1195	1164	1118
50	1378	1391	1359	1356	1327	1290

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.82 กราฟสรุปความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบจะลดลง

เป็นไปตามสมการ $\omega = \frac{120f}{p}$ เมื่อ f คือความถี่

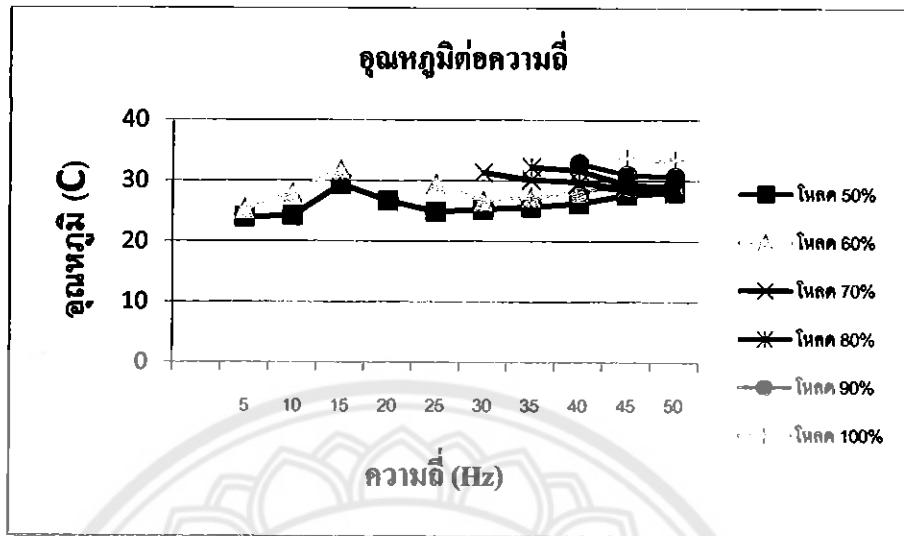
ตารางที่ 4.24 สรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไป

ที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

ความถี่ (Hz)	โหลด 50%	โหลด 60%	โหลด 70%	โหลด 80%	โหลด 90%	โหลด 100%
5	24.0	25.4	-	-	-	-
10	24.2	28.0	-	-	-	-
15	29.4	31.8	-	-	-	-
20	26.7	-	-	-	-	-
25	24.9	29.5	-	-	-	-
30	25.3	26.7	31.4	-	-	-
35	25.7	27.3	30.2	32.3	-	-
40	26.3	28.2	29.8	31.7	32.9	-
45	27.7	29.0	28.6	29.4	31.0	33.7
50	28.2	29.4	28.3	28.9	30.7	33.5

หมายเหตุ ในช่องที่มีเครื่องหมาย "-" หมายความว่าไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้
เพราะถ้าทำการทดลองอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายเพราะบางช่วงมีกระแสหรือกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด

กราฟสรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%



รูปที่ 4.83 กราฟสรุปอุณหภูมิต่อความถี่ (Hz) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50%

สรุปที่โหลด 100%, 90%, 80%, 70%, 60% และ 50% เมื่อความถี่ลดลงอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะ
 เมื่อความถี่ลดลงกระแสจะมากจากสมการความร้อน $= \frac{I^2 R}{m^3}$ เมื่อ I คือกระแส R คือความต้านทาน
 m^3 คือปริมาตร

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา ทดลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ เป็นระยะเวลาดำเนิน โครงการ 2 ภาคการศึกษาทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงการ พร้อมเสนอแนะแนวทางในการนำโครงการนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ จาก 50 Hz – 5 Hz โดยลดลงทีละ 5 Hz โดยโหลดคงที่ จะทำให้ กระแสไฟฟ้า , แรงบิด และ อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนแรงดันและความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง

จากการทดลองที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ จาก 50 Hz – 5 Hz โดยลดลงทีละ 5 Hz โดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะทำให้ กระแสไฟฟ้า , แรงบิด และ อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนแรงดัน และ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าจะลดลงแล้วจะสูงในช่วงหนึ่งแล้วก็จะค่อยๆลดลง

จากการทดลองทั้ง 2 การทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความถี่ลดลง จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่ต่ออยู่กับโหลดจะมี กระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าสูงขึ้นด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าโดยรวมของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น และถ้าความถี่มีค่าต่ำมากก็อาจจะเกิดสาเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวได้เช่นกัน และก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระตุ้นมีค่าพุ่งสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ก็จะทำให้ขดลวดของมอเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติและอาจทำให้มอเตอร์เสียหายได้

5.2 ปัญหาและการแก้ไข

1. ในการเริ่มเดินมอเตอร์ในบ้างช่วงความความถี่ ต่ำที่มีโหลดสูง จะทำให้มีกระแสและกำลังไฟฟ้าสูงเกินพิกัดจึงทำให้ไม่สามารถเดินมอเตอร์เป็นเวลานานได้จึงทำให้ไม่ได้สามารถวัดอุณหภูมิได้ เพราะการวัดอุณหภูมิต้องใช้เวลาในการเดินมอเตอร์เป็นเวลานานและ ถ้าเดินมอเตอร์ที่กระแสและกำลังไฟฟ้าสูงเกินพิกัดอาจทำให้มอเตอร์เสียหายได้

2. ในการเริ่มเดินมอเตอร์ใหม่ทุกครั้งจะต้องทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากันทำให้ใช้เวลา

3. ในการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นแบบหมุนทำให้ได้ความถี่ในแต่ละช่วงต่างกันเล็กน้อย

5.3 ข้อเสนอนแนะ

1. ควรใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่เป็นแบบดิจิทัลเพื่อที่จะได้ความถี่ที่เท่ากันทุกตาราง
2. ความหาตัวช่วยในการระบายความร้อนของมอเตอร์ เช่น พัดลม มาช่วยในการระบายความร้อน เพื่อให้ใช้เวลาได้น้อยลง
3. ก่อนเริ่มเดินมอเตอร์ต้องตรวจสอบอุณหภูมิของมอเตอร์ให้เท่ากันทุกครั้ง
4. ควรใช้มอเตอร์ 2 ตัวที่ของขนาดพิกัดเท่ากัน ทำงานเพื่อนช่วยให้ทดลองได้เร็วขึ้น
5. ควรใช้เครื่องมือที่เป็นแบบดิจิทัลเพื่อให้การจดค่าต่างๆ ไม่คาดเคลื่อน
6. จากความรู้ที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานเพื่อประยุกต์ใช้ในงานให้เหมาะสม



เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชา Electrical Machines สืบค้นเมื่อ วันที่ 20 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.kmitl.ac.th
- [2] มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส Electrical Engineering Department, Chulalongkorn University สืบค้นเมื่อ วันที่ 22 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.e-learning.e-tech.ac.th
- [3] มอเตอร์ไฟฟ้า (Electrical Motor) สืบค้นเมื่อ วันที่ 25 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.webserv.kmitl.ac.th
- [4] ความรู้พื้นฐานเรื่องอินเวอร์เตอร์ (e-Industrial Technology Center) สืบค้นเมื่อ วันที่ 20 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.9engineer.com
- [5] หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ สืบค้นเมื่อ วันที่ 20 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.archive.wunjun.com
- [6] P.P. Engineering & Service สืบค้นเมื่อ วันที่ 27 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.ppeinter.com
- [7] Electric Shop.com สืบค้นเมื่อ วันที่ 27 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.ei-center.tarad.com
- [8] SELTEC Automation & Control Distributors สืบค้นเมื่อ วันที่ 28 มิถุนายน พุทธศักราช 2556 จาก www.seltec.co.uk