

การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ
สามเฟสที่ออกแบบและสร้างขึ้นเมื่อใช้ประกอบ SPWM Inverter

THE EFFICIENCY STUDYING OF THE DESIGNED AND CONSTRUCTED THREE
PHASE MOTOR-DRIVEN RECIPROCATING COMPRESSOR
WITH SPWM INVERTER



มานพ มาสีกุก
MANOP MASEEKUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 31533
วัน, เดือน, ปี 11 พ.ค. 2541

ISBN 974-622-293-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE EFFICIENCY STUDYING OF THE DESIGNED AND CONSTRUCTED THREE
PHASE MOTOR-DRIVEN RECIPROCATING COMPRESSOR
WITH SPWM INVERTER**



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

1998

ISBN 974-622-293-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1998

SCHOOL OF GRADUATE STUDIEDS

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์
แบบลูกสูบสามเฟสที่ออกแบบและสร้างขึ้นเมื่อใช้ประกอบ
SPWM Inverter

นักศึกษา

นาย มานพ มาสีกุล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ. อิทธิชัย อรุณศรีแสงไชย

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2541

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการพัฒนาออกแบบและสร้าง ตลอดจนศึกษาประสิทธิภาพการทำงาน
ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบสามเฟส เพื่อใช้ทดแทนมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ 1 เฟส
ที่ใช้อยู่เดิม การออกแบบใหม่นี้ยังคงรักษารูปร่างแผ่นลามีเนชันของสเตเตอร์และโรเตอร์ให้เหมือน
กับมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ 1 เฟสแบบเดิมไว้ เพื่อศึกษาข้อดีทางด้านประสิทธิภาพและให้มี
คุณสมบัติตามที่ต้องการ การออกแบบเริ่มต้นโดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง(Cross-field
theory) คำนวณค่าสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟสใหม่ จากนั้นทำการสร้างมอเตอร์ต้นแบบและนำ
เข้าทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบมอเตอร์ (Dynamometer Test) ค่าสมรรถนะต่างๆที่ตรวจสอบ
ได้ จะถูกตรวจเช็คว่าคุณต้องหรือไม่กับค่าที่ได้จากการจำลองออกแบบโดยใช้โปรแกรมบน
คอมพิวเตอร์ ขั้นตอนต่อมานำมอเตอร์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานกับระบบ Inverter Speed Control
เพื่อศึกษาข้อดี ทางด้านการประหยัดพลังงานและวิธีควบคุมการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพ
สูงขึ้น การทดลองได้เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ กับแบบอินพุท
Line Voltage ของทั้งชนิด 1 เฟส(220V50Hz) และ 3 เฟส(220V50Hz)

Thesis title	The Efficiency Studying of The Designed and Constructed Three Phases Motor-Driven Reciprocating Compressor with SPWM Inverter
Student	Mr. Manop Maseekuk
Thesis Advisor	Assist. Prof. Itthichai Arungsrisangchai
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1998

Abstract

This thesis presents the design development and construction of new three phase motor-driven reciprocating compressor to replace of conventional single phase motor. The Cross-Field Theory was applied to calculate the efficiency and higher performance of new three phase motor, which still remain the structure of stator and rotor the same as single phase motor. The physical electrical and mechanical performance test results from the prototype were compared and evaluated with the simulation value to confirm the propose characteristics. The inverter speed control system was also applied to gain more higher performance of the compressor which can be confirmed by compared it values to the experimental values of the type of line voltage input with both single phase (220/50Hz) and three phase (220V50Hz).

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ อิทธิชัย อรุณศรีแสงไชย และ อาจารย์ พิชิต ถ้ายอง ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ทำให้งานวิจัยผ่านอุปสรรคต่างๆ ได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คุณสุรพร สิมะกุลธร ประธานกรรมการผู้จัดการบริษัท กุลธรเคอร์บี้ จำกัด ที่ได้กรุณา อนุญาตให้ดำเนินการทดสอบงานวิจัย และยังสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ คุณพ่อและคุณแม่ที่รักและเคารพอย่างสูง พี่ๆ และ เพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา

มานพ มาสีกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 คอมเพรสเซอร์แบบปิดสนิท.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน	5
2.3 การคำนวณสำหรับการออกแบบมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ทดสอบ	11
2.4 ชนิดของคอมเพรสเซอร์แบบปิดสนิท	13
2.5 มอเตอร์คอมเพรสเซอร์และระบบไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ที่ใช้ควบคุมในปัจจุบัน	16
2.6 การใช้งานมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ประเภทต่างๆ	19
2.7 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ	21
2.8 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์	22
2.9 สรุป	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีสานามแม่เหล็กตัดขวาง	24
3.1 กล่าวนำ	24
3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	24
3.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน	24
3.2.1.1 การพิจารณาขณะมีการต่อเพียงขดลวดเดียว	25
3.2.1.2 การพิจารณาขณะมีการต่อหลายขดลวด	35
3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส	43
3.3.1 ทฤษฎีพื้นฐาน	43
3.3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์หลายเฟส	44
3.3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวงจรสมมูลของมอเตอร์หลายเฟส	45
3.3.4 วิธีการหาค่าคงที่และขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์	46
3.4 สรุป	49
บทที่ 4 การออกแบบมอเตอร์และระบบควบคุมของคอมเพรสเซอร์.....	50
4.1 กล่าวนำ	50
4.2 การออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส	51
4.2.1 การออกแบบแผ่นลามิเนต	51
4.2.2 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	53
4.2.3 การคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส.....	55
4.2.4 การออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์	58
4.2.5 ขั้นตอนในการสร้างมอเตอร์ 1 เฟส	61
4.3 การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส	62
4.3.1 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	63
4.3.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส.....	65
4.3.3 การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์	66
4.3.4 ขั้นตอนในการสร้างมอเตอร์ 3 เฟส	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์.....	69
4.4.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของ SPWM Inverter	69
4.4.2 อินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งาน	74
4.4.3 การทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ	74
4.4.4 การทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์	75
4.5 สรุป	76
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	77
5.1 กล่าวนำ	77
5.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและสมรรถนะทางกลของมอเตอร์	78
5.3 ผลการทดสอบกับเครื่องทดสอบเครื่องอัด	79
5.4 ผลการทดสอบกับระบบเครื่องปรับอากาศที่พัฒนาขึ้น	85
5.5 กราฟที่ได้จากการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศที่พัฒนาขึ้น	96
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	
ก. การคำนวณในการออกแบบลามีเนทและค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์	105
ข. ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ	114
ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว	123
ประวัติผู้เขียน	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของการใช้งานคอมเพรสเซอร์แบบ LBP โดยแบ่งตามชนิดของน้ำยา.....	20
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของการใช้งานคอมเพรสเซอร์แบบ MBP โดยแบ่งตามชนิดของน้ำยา.....	20
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของการใช้งานคอมเพรสเซอร์แบบ HBP โดยแบ่งตามชนิดของน้ำยา.....	21
3.1 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อตัวเก็บประจุถาวร	46
3.2 ค่าคงที่ A และค่าคงที่ F สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส.....	51
3.3 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์หลายเฟส	52
4.1 รายละเอียดของมอเตอร์เครื่องอัด 1 เฟส แบบ PSC ที่ต้องการออกแบบขณะทำงาน ณ สภาวะโหลดเต็ม	51
4.2 ค่าคุณลักษณะที่คำนวณได้ของสเตเตอร์ลามีเนตและของโรเตอร์ลามีเนต	52
4.3 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 220V/50Hz	53
4.4 ค่าของวงจรแม่เหล็กที่คำนวณได้.....	54
4.5 การหาค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 220V/50Hz	54
4.6 ขั้นตอนการคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz	57
4.7 การเปรียบเทียบผลการออกแบบของมอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz ทั้ง 2 วิธี	61
4.8 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 220V/50Hz	63
4.9 การหาค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 220V/50Hz	64
4.10 ค่าของวงจรแม่เหล็กที่คำนวณได้ของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz	64
4.11 ขั้นตอนการคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz	65
4.12 การเปรียบเทียบผลการออกแบบของมอเตอร์ 3 เฟส ทั้ง 2 วิธี ณ สภาวะโหลดเต็ม	67
5.1 ค่าที่ทดสอบได้จากเครื่องทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz, 3 เฟส 220V/50Hz	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.2 ค่าต่างๆวัดได้จากเครื่องทดสอบเครื่องอัดแบบ 1 เฟส 220V/50Hz , 3 เฟส 220V/50Hz.....	83
5.3 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศ แบบตัดต่อการทำงาน ด้วยเทอร์โมสแตทโดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz	89
5.4 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศ แบบตัดต่อการทำงาน ด้วยเทอร์โมสแตทโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz	90
5.5 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz	93
5.7 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส 220V/50Hz	94
5.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบปรับอากาศทั้งหมด	95

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของ P-H ไดอะแกรมกับระบบทำความเย็น	5
2.2 ผลทำความเย็นสุทธิ(NRE) จาก P-H Diagram ของระบบทำความเย็น โดยวิธีกล.....	6
2.3 งานของช่วงอัด.....	8
2.4 P-H ไดอะแกรมของคอนเดนเซอร์ D-E.....	11
2.5 P-H ไดอะแกรมของระบบน้ำยาเครื่องทำความเย็นใช้น้ำยา R-12 อุณหภูมิที่อีวาพอเรเตอร์ -5°C และอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ที่ 40°C	12
2.6 P-H ไดอะแกรมของระบบน้ำยาเครื่องทำความเย็นใช้น้ำยา R-22 อุณหภูมิที่อีวาพอเรเตอร์ 45°F และอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ที่ 131°F	12
2.7 โครงสร้างของเครื่องอัดแบบลูกสูบ	15
2.8 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ RSIR	17
2.9 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ CSIR	17
2.10 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ PSC	18
2.11 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ CSCR	19
3.1 ขดลวดสเตเตอร์ขณะได้รับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและ โรเตอร์หยุดนิ่ง	25
3.2 โรเตอร์ขณะที่เคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เกิด ϕ_c ขึ้นมา.....	29
3.3 แผนภาพเวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำจาก ϕ_m	27
3.4 แผนภาพเวกเตอร์ของ ϕ_c เกิดขึ้น	27
3.5 แสดงแผนภาพเวกเตอร์ของ E_{TCx} และ E_{SMx}	28
3.6 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและฟลักแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา	28
3.7 แผนภาพเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของ E_{SCy} และ E_{TMy}	30
3.8 แผนภาพเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของ I_y และ I_y	30
3.9 แผนภาพเวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ทั้งหมดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและฟลักแม่เหล็ก	33
3.10 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กขณะต่อเพียงขดลวดเดียวโดยใช้ ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง.....	34
3.11 แผนภาพเวกเตอร์สมการความสัมพันธ์ของขดลวดหลักและขดลวดช่วย.....	38
3.12 แผนภาพเวกเตอร์ค่ากระแสต่างๆของขดลวดหลักและขดลวดช่วย.....	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กลักษณะต่อหลายขดลวดเดียวโดยใช้ ทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง.....	40
3.14 วงจรสมมูลย์เฟสเดียวของมอเตอร์หลายเฟส.....	45
3.15 วงจรสมมูลย์ที่อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์.....	46
4.1 รูปร่างของสเตเตอร์ลามีเนตและโรเตอร์ลามีเนต	52
4.2 การลงขดลวดในสลิตของสเตเตอร์ แบบศูนย์กลางร่วม (Concentric Windings)	53
4.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ 1 เฟส ที่ออกแบบขึ้น	55
4.4 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะโหลดเต็ม โดยใช้โปรแกรม MATHCAD วิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง	56
4.5 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะแรงบิดสูงสุดโดยใช้โปรแกรม MATHCAD วิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง	56
4.6 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะหยุดนิ่ง โดยใช้โปรแกรม MATHCAD วิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง	57
4.7 การป้อนค่าอินพุตในโปรแกรม	59
4.8 การป้อนค่าอินพุตและการคำนวณของขดลวด	59
4.9 การแสดงผลทางสมรรถนะของการออกแบบมอเตอร์โดยคอมพิวเตอร์	60
4.10 ขดลวดที่เตรียมไว้สำหรับการพันแบบ Concentric winding	61
4.11 รูปร่างของ สเตเตอร์และโรเตอร์	61
4.12 รูปร่างของมอเตอร์ 1 เฟส ที่พันแล้วและเตรียมเชื่อมต่อ	62
4.13 รูปร่างของมอเตอร์ 1 เฟส ที่ทำเสร็จสมบูรณ์แล้ว	62
4.14 การลงขดลวดในสลิตของสเตเตอร์ 24 ช่อง 2 ขั้ว 3 เฟส 220V/50Hz	63
4.15 วงจรสมมูลย์เฟสเดียวของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz ณ สภาวะโหลดเต็ม	64
4.16 หน้าต่างการป้อนอินพุตของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz	66
4.17 หน้าต่างการป้อนรายละเอียดของขดลวดและจุดใช้งานของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz ...	66
4.18 หน้าต่างผลการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 ขดลวดที่เตรียมไว้สำหรับการพันมอเตอร์ 3 เฟส แบบ Concentric winding	68
4.20 รูปร่างของมอเตอร์ 3 เฟส ที่พันแล้วและเตรียมเชื่อมต่อ	68
4.21 รูปร่างของมอเตอร์ 3 เฟส ที่ทำเสร็จสมบูรณ์แล้ว	68
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจ-ความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	71
4.23 วงจรการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ	71
4.24 การสร้างสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างคลื่นที่จุ่มอดูเท่ากับคลื่นอ้างอิง	72
4.25 การมอดูเลทรูปคลื่นสำหรับคลื่นอ้างอิง Pulse เท่ากับ 6	73
4.26 รูปคลื่นของ Sinusoidal Pulse Width Modulation	73
4.27 โครงสร้างของเทอร์โมสตัท	74
4.28 โครงสร้างของชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID	75
4.29 การเชื่อมต่อต่ออุปกรณ์ทั้งหมดของระบบอินเวอร์เตอร์	76
5.1 ไคอะแกรมของขั้นตอนในการทดสอบต่างๆ	77
5.2 โครงสร้างเครื่องทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์หรือ Dynamometer Test.....	78
5.3 เครื่องทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์.....	79
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพและความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์.....	81
5.10 โครงสร้างของเครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องอัด	82
5.11 เครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องอัด	82
5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าในการทำความเย็น ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์ คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V	84
5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตเพาเวอร์ ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์ คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ EER(Energy Efficiency Ratio) ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V	85
5.15 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบห้องปรับอากาศ	86
5.16 วงจรควบคุมของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โทสตัด โดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz	87
5.17 วงจรควบคุมของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โทสตัด โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz	88
5.18 วงจรควบคุมระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz	92
5.19 วงจรควบคุมระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส 220V/50Hz	92
5.20 ตัวอย่างกราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 20V/50Hz.....	97
5.21 กราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โทสตัด โดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz.....	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่า เครื่องปรับอากาศที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ตามบ้านพักอาศัย จะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก (Small induction motor) เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ถ้าพิจารณาการใช้พลังงานของมอเตอร์เหล่านี้ จะพบว่ามีการใช้พลังงานที่มากเกินสมควร เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกใช้งานเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของผู้บริโภค นอกจากนี้ระบบเครื่องปรับอากาศในปัจจุบันมีข้อด้อยในเรื่องการไม่ประหยัดพลังงาน เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ 1 เฟส ทำให้ระบบควบคุมไม่มีความยืดหยุ่น ระบบที่ใช้ในปัจจุบันมีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง คอมเพรสเซอร์จะหยุดทำงานและออกตัวทำงานใหม่โดยอาศัยเทอร์โมสตัทควบคุม Duty Cycle ของตัวมันเอง ซึ่งมีข้อเสียคือ การออกตัว ในแต่ละครั้งจะใช้กระแสสูง จากปัญหาดังกล่าวมาข้างต้น ได้มีหน่วยงานของรัฐบาล ทำการรณรงค์ให้มีการประหยัดพลังงาน ตัวอย่างเช่น การกำหนดฉลากประหยัดไฟ รณรงค์เรื่องเทคนิคในการใช้ ฯลฯ ซึ่งก็เป็นการแก้ปัญหาในระดับหนึ่ง ทางด้านของผู้ผลิตเองก็พยายามพัฒนาสินค้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ดังจะเห็นว่ามีคนนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาประยุกต์เข้ากับระบบเดิม แต่ทำให้ราคาของสินค้ายังคงแพงมาก แต่ผู้ผลิตก็ได้เน้นข้อดีทางการประหยัดพลังงานทดแทนข้อเสียทางด้านราคา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ลุล่วงไป เพื่อลดต้นทุนในการผลิต แต่ยังคงข้อดีทางด้านประสิทธิภาพ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษามุ่งเน้นกับมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบที่ใช้กับระบบเครื่องปรับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็กตามบ้านพักอาศัยทั่วไป โครงสร้างใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ขึ้นใหม่เพื่อทดแทน 1 เฟส ที่มีใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพื่อให้ผลที่ดีกว่าและสามารถใช้งานในบ้านหรือสถานที่ๆไม่มีแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสได้ คือสามารถป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยไฟเฟสเดียว(220V/50Hz) แต่เอาท์พุทที่ได้เป็นไฟสามเฟส (220-230V/50-60Hz) และนำมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับระบบเครื่องปรับอากาศ ทั้งแบบควบคุมด้วยเทอร์โมสแตทและแบบอินเวอร์เตอร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและตรวจสอบว่าระบบควบคุมแบบใด ที่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สมมุติฐานของการศึกษาดังอยู่บนพื้นฐานความเป็นไปได้ทางทฤษฎี และการสร้างต้นแบบมอเตอร์ตามที่ต้องการ มอเตอร์ 3 เฟสที่สร้างขึ้นต้องมีประสิทธิภาพที่สูงกว่ามอเตอร์ 1 เฟส ที่ใช้อยู่เดิม ในขณะที่ต้องยังคงรักษาค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ให้เหมือนเดิม เพื่อให้การประยุกต์ใช้งานกับแบบเดิมได้ด้วย อีกทั้งมอเตอร์ 3 เฟส ให้ข้อดีคือ สามารถควบคุมแบบ Inverter speed control ได้ดีและให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่ามอเตอร์ 1 เฟส

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบเริ่มต้นโดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง (Cross-field Theory) คำนวณค่าสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส โดยอ้างอิงคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟสเดิมที่ออกแบบไว้แล้ว เพื่อให้ได้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามต้องการ แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถควบคุมความถี่ให้กับมอเตอร์ได้ทำให้ได้ข้อดีคือ ลดจำนวนกระแสในขณะออกตัว อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความเร็วรอบเพื่อให้อุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้นได้ และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดช่วงใช้งาน การทำงานของระบบประกอบด้วย ชุดควบคุมอุณหภูมิ PID(Proportional plus Integral plus Derivative) ทำหน้าที่ตรวจสอบอุณหภูมิจากชุดเซนเซอร์ และส่งสัญญาณควบคุม 4-20 mA ไปยังอินพุตของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นตัวควบคุมหลัก ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องอัด ตามที่ได้ออกแบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ได้กล่าวถึง การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กทั้งแบบ 1 เฟส ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบ PSC (Permanent Split Capacitor) และ แบบ 3 เฟส ต่อแบบสตาร์ สำหรับคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ 15,000 บีทียู นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมของระบบเครื่องปรับอากาศดังกล่าว โดยป้อนอินพุตให้กับทั้ง 2 แบบดังนี้ แบบแรกคือ ระบบควบคุมแบบตัดต่อการทำงาน (Duty cycle) โดยใช้กับมอเตอร์เครื่องอัดทั้งแบบ 1 เฟส 220V/50Hz และ มอเตอร์เครื่องอัด 3 เฟส 220V/50Hz แบบที่สองคือระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์โดยใช้กับมอเตอร์เครื่องอัด 3 เฟส 220V/50Hz

1.6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

เริ่มต้นด้วยการศึกษาทฤษฎีในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก ทำการคำนวณคุณลักษณะและสมรรถนะมอเตอร์ 1 เฟส แบบเดิม เพื่อนำผลไปใช้ในการเปรียบเทียบกับการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ใหม่ ทำการปรับปรุงสมรรถนะในการขับโหลดของมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยนำผลทดสอบมอเตอร์จากเครื่องทดสอบมอเตอร์หรือ Dynamometer Test มาเปรียบเทียบกับผลจากการออกแบบ เพื่อให้ได้มอเตอร์ต้นแบบตามที่ต้องการ แล้วนำมอเตอร์ดังกล่าวประกอบเป็นมอเตอร์เครื่องอัด จากนั้นทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบคุณสมบัติและสมรรถนะในการทำความร้อนหรือ Calorimeter Test และเปรียบเทียบที่ได้ระหว่างมอเตอร์ 1 เฟสเดิม กับมอเตอร์ 3 เฟสที่พัฒนาขึ้น เมื่อได้มอเตอร์เครื่องอัดต้นแบบที่สมบูรณ์แล้ว นำเข้าระบบเครื่องปรับอากาศ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมระบบการปรับอากาศ โดยการป้อนอินพุตด้วยระบบไฟในแบบต่างๆ ทั้งแบบตัดต่อ การทำงานของระบบ หรือ on-off control และ แบบระบบทำงานต่อเนื่องหรือ Inverter speed control บันทึกผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลที่ได้

บทที่ 2

เครื่องอัดแบบปิดสนิท (Hermetic Compressor)

2.1 กล่าวนำ

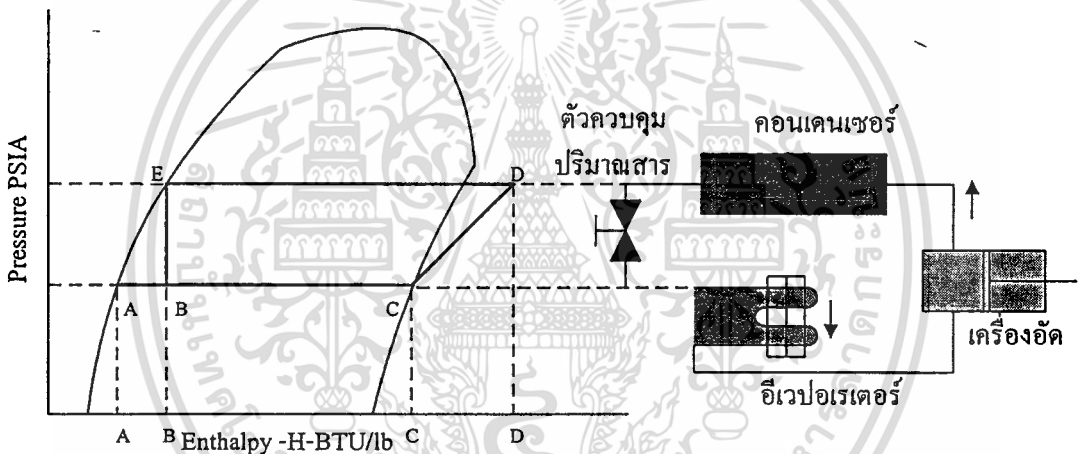
เครื่องอัด(Compressor) เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญของระบบเครื่องทำความเย็น ซึ่งทำหน้าที่ในการดูดและอัดน้ำยาในสถานะแก๊ส วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้ให้ความหมายของคำศัพท์ทางวิชาการของเครื่องอัดไว้ว่า “เครื่องอัดคือ อุปกรณ์ที่เพิ่มความดันของสารความเย็นที่อยู่ในสถานะที่เป็นไอ” เครื่องอัดจะดูดน้ำยาที่เป็นซูเปอร์ฮีตแก๊สความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจากอีวาพอเรเตอร์ผ่านเข้ามาทางท่อชักชั้น เข้ายังท่อทางดูดของเครื่องอัด แล้วอัดแก๊สนี้ให้มีความดันสูงขึ้นและมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ส่งเข้ายังคอนเดนเซอร์ โดยผ่านเข้าทางดิสชาร์จเพื่อไปกลั่นตัวเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์ด้วยการระบายความร้อนออกจากระบบน้ำยาอีกทีหนึ่ง จะเห็นได้ว่าในวงจรเครื่องทำความเย็น เครื่องอัดเป็นอุปกรณ์ที่แบ่งความดันในระบบระหว่างด้านความดันสูงและความดันต่ำ

ในบทนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกได้นำเสนอหลักการทำงานของระบบเครื่องทำความเย็น โดยอาศัย P-H ไดอะแกรม (Pressure-enthalpy diagram) ช่วยในการอธิบายขั้นตอนการทำงานต่างๆ เช่น กรรมวิธีของอีวาพอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ และกล่าวถึงคุณสมบัติทางกล พร้อมตัวอย่างการคำนวณระบบเครื่องทำความเย็น ส่วนที่สอง กล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องอัดโดยเฉพาะแบบลูกสูบ ส่วนที่สาม กล่าวถึงระบบควบคุมเครื่องอัดที่ใช้ในปัจจุบัน และการประยุกต์กับการใช้งานในประเภทต่างๆโดยพิจารณาตามอุณหภูมิในการใช้งาน ส่วนสุดท้ายได้แสดงแนวคิดการควบคุมเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์

2.2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน [1],[2]

ในการศึกษาวงจรเครื่องทำความเย็นระบบเครื่องอัดแบบอัดไอของน้ำยา สามารถอธิบายเป็นไดอะแกรมหรือแผนภูมิให้เห็นการทำงานทุกช่วงการทำงานได้อย่างละเอียด และเรียกไดอะแกรมนี้ว่า P-H ไดอะแกรม การใช้ P-H ไดอะแกรมสำหรับการออกแบบสร้างเครื่องทำความเย็น จะช่วยให้ทราบถึงภาระของอุปกรณ์แต่ละชิ้นในระบบ รวมถึงแรงดันและอุณหภูมิที่แต่ละจุดของระบบควรมี

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของ P-H ไดอะแกรมกับระบบทำความเย็น



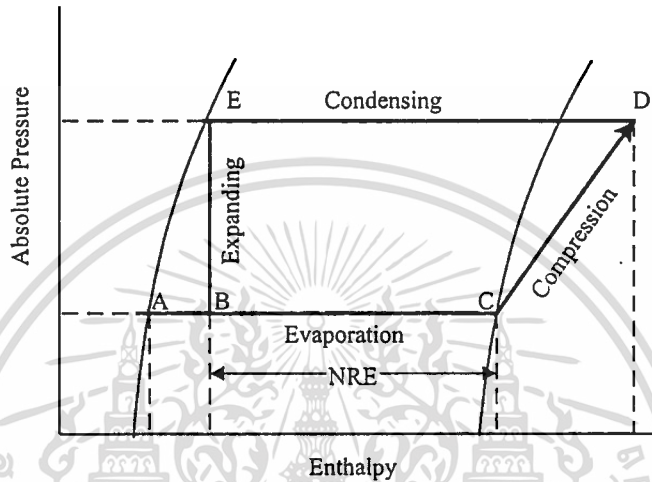
จากรูปที่ 2.1 แสดง P-H ไดอะแกรมด้านซ้ายมือ เปรียบเทียบกับวงจรระบบทำความเย็นด้านขวามือ จากเส้นที่ลากไว้ตามจุดต่างๆจะได้รูปสี่เหลี่ยมคางหมู BCDE โดยที่เส้น ED จะแสดงอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และ เส้น ABC แสดงอุณหภูมิของอีวโปเรเตอร์ เส้น EB แสดงการทำงานของตัวควบคุมปริมาณสารทำความเย็น เส้น CD แสดงการทำงานของเครื่องอัด จากจุด B C D ลากเส้นตรงลงมาพบเส้นแสดงความร้อนใช้งาน(Enthalpy line) เพื่อหาจำนวนความร้อนในส่วนต่างๆ ของระบบมีหน่วยวัดเป็น BTU/lb ของสารทำความเย็นที่เส้นความร้อนใช้งาน จะได้ข้อมูลแสดงค่าความร้อนใช้งานในแต่ละส่วนของเครื่องทำความเย็นดังนี้

C - B คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารความเย็น จากของเหลวเป็นไอ

D - C คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอัดไอของสารความเย็น

D - E คือ ปริมาณความร้อนที่จะต้องถ่ายออกเพื่อเปลี่ยนสถานะของสารความเย็นจากไอเป็นของเหลว

รูปที่ 2.2 ผลทำความเย็นสุทธิ(NRE) จาก P-H Diagram ของระบบทำความเย็นโดยวัฏจักร



การวิเคราะห์ระบบทำความเย็นโดยวัฏจักร จากรูปที่ 2.2 สามารถทำวิเคราะห์ส่วนต่างๆ ของระบบได้ดังนี้

2.2.1 อีเวพอเรเตอร์ (Evaporator)

การวิเคราะห์เริ่มที่ทางสารความเย็นเหลวเข้าอีเวพอเรเตอร์ ณ ความร้อนระดับหนึ่ง ที่สัมพันธ์กับแรงดัน ต้องการความร้อนจำนวนหนึ่งมาทำให้สารทำความเย็นเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นไอ มีหน่วยเป็นบีทียู/ปอนด์ ความร้อนจำนวนนี้นับเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ตามรูปที่ 2.2 ค่าความร้อนใช้งาน (Enthalpy) เปลี่ยนจาก A ไป C. ถ้าช่วง A ถึง B มีสารทำความเย็นในระบบ แต่เนื่องจากในสามเหลี่ยม ABE เป็นช่วงที่มีไอสารความเย็นเกิดขึ้น ขณะสารความเย็นผ่านตัวควบคุมปริมาณสารทำความเย็น “E-B” ฉะนั้น ค่าความร้อนใช้งานจึงคิดคำนวณที่จุด B กับ C

ค่าความร้อนใช้งานของไอสารทำความเย็นที่ออกจากอีเวพอเรเตอร์สู่เครื่องอัด เขียนเป็นสูตร 2.1 ได้ดังนี้

$$NRE = h_c - h_e \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย h_e คือ ความร้อนใช้งาน (Enthalpy) ของสารทำความเย็นที่เข้าตัวควบคุมปริมาณสารทำความเย็น (liquid control device)

2.2.2 หน่วยวัดสมรรถนะของการทำความเย็น

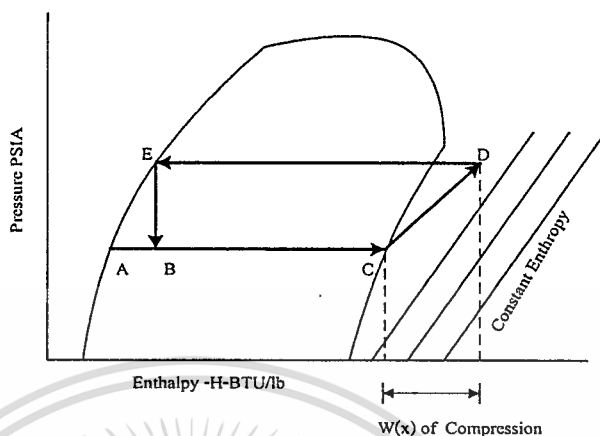
หน่วยวัดสมรรถนะของการทำความเย็น เป็น บีทียู (BTU) กล่าวคือ น้ำแข็ง 1 ปอนด์ (500 กรัม) อุณหภูมิ 32°F (0°C) หากต้องการให้น้ำแข็งละลายกลายเป็นน้ำ 32°F จะต้องใช้ความร้อนแฝง (latent heat) ของการหลอมละลาย 144 บีทียู หากต้องการละลายน้ำแข็ง 1 ตัน (2000 ปอนด์) ใน 24 ชั่วโมง ต้องใช้ความร้อนแฝง $2000 \times 144 = 288,000$ บีทียู หรือเท่ากับ $288,000 \div 24 = 12,000$ บีทียูใน 1 ชั่วโมง

2.2.3 จังหวะอัด

ไอของสารทำความเย็นที่ผ่านการใช้งานที่อีวโปเรเตอร์จะเข้าสู่เครื่องอัด ในสภาพสารที่มีความเย็นที่มีแรงดันต่ำและอุณหภูมิต่ำหรือบางครั้งเป็นไออิ่มตัวที่มีความร้อนยิ่งยวด (Super heated vapor) อยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อไอเข้าสู่เครื่องอัดก็จะถูกอัดจนมีแรงดันสูงและอุณหภูมิสูงเนื่องจากโมเลกุลของสารถูกบีบตัวเข้าหากัน กระบวนการอัดจะมีค่าความร้อนบางส่วนสูญเสียไปอันเนื่องจากการนำความร้อนในตัวเครื่องอัด เส้นของงาน (vector) ในช่วงนี้จึงขนานไปกับเส้นแสดงความร้อนสูญเสีย (Entropy) ดังรูป 2.3 ซึ่งอยู่ระหว่างจุด C และ D การเขียนกราฟแสดง P-H Diagram ครั้งต่อไปจะตัดส่วนที่มีได้ใช้งานออก จากจุด C และ D ฉายเส้นลงมาหาเส้นความร้อนใช้งาน (Enthalpy) ดังรูป 2.3 จะทราบค่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับสารทำความเย็นขณะสารนั้นผ่านกระบวนการอัดจากสูตร 2.2

$$\text{ความร้อนจากกระบวนการอัด} = h_b - h_c \text{ บีทียู/ปอนด์} \quad (2.2)$$

ค่าความร้อนที่คำนวณได้จากสูตรนี้เป็นความร้อนที่สูญเสียไป เนื่องจากกระบวนการอัด โดยคิดจากสารทำความเย็น 1 ปอนด์ หากระบบความเย็นที่ใช้งานอยู่ใช้สารทำความเย็นหลายปอนด์ การหาจำนวนการสูญเสียของระบบสามารถใช้สมการ 2.2 นี้ คูณกับอัตราการไหลเวียนของสารทำความเย็นจากสมการ 2.3 ได้



ความร้อนทั้งหมดจากงานอัด(บีบอัด/นาทิต) = ความร้อนจากกระบวนการอัด x อัตราการไหล

$$= (h_D - h_C) \times \frac{200 \times \text{Tons Load}}{\text{NRE}} \quad (2.3)$$

2.2.4 ปริมาตรคูดของเครื่องอัด

ปริมาตรดูดของเครื่องอัดเป็นปริมาตรที่แท้จริงที่เครื่องอัดดูดไอสารความเย็นเข้าไปในเสื้อสูบ มีหน่วยวัดเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที แต่สมรรถนะของเครื่องอัดนับที่ปริมาณไอของสารความเย็นที่ ถูกดูดเข้าเครื่องอัดมีหน่วยเป็นปอนด์ โดยจำนวนน้ำหนักของไอสารความเย็นที่เครื่องดูดอัดเข้าไป ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น คือ อุณหภูมิและแรงดันของสารความเย็นนั้น ขนาดของเครื่องอัดที่ต้อง การหรือปริมาตรดูด สามารถคำนวณได้จากการคูณกันของอัตราไหลของสารความเย็น เป็น ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที (cubic foot per minute-cfm) ด้ปริมาตรจำเพาะของสารความเย็นที่ทางเข้า ของเครื่องอัด

$$\text{ปริมาตรดูด (cfm)} = \frac{\text{อัตราการไหล} \times \text{ปริมาตรจำเพาะของสารความเย็น}}{\text{ที่ทางเข้าของเครื่องอัด}} \quad (2.4)$$

ความจุของลูกสูบหรือปริมาตรจริงของลูกสูบของเครื่องอัด คือ พื้นที่บนลูกสูบ คูณกับระยะชักของลูกสูบคูณกับจำนวนลูกสูบคูณกับความเร็วในการชัก หรือรอบต่อนาที มีหน่วยวัดเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีดังสูตร

$$\text{ปริมาตรจริง (CFM)} = \frac{D^2 \times \pi}{4} \times S \times N \times \text{RPM}$$

โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ-นิ้ว = นิ้ว/12 ฟุต

S คือ ระยะชักของลูกสูบ-นิ้ว = นิ้ว/12 ฟุต

N คือ จำนวนลูกสูบ

RPM คือ ความเร็วรอบ/นาที

$$\text{ปริมาตรจริง (CFM)} = \frac{D^2 \times 3.1416}{12 \times 12 \times 4} \times \frac{S}{12} \times N \times \text{RPM}$$

$$\text{CFM} = \frac{D^2 \times 3.1416 \times S \times N \times \text{RPM}}{4 \times 1728} \quad (2.5)$$

ขนาดของเครื่องอัดแบบลูกสูบบักกล่าวโดยบอกขนาดของลูกสูบและระยะชักเป็นนิ้ว รวมถึงจำนวนของลูกสูบสำหรับเครื่องอัดที่ใช้กับเครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรดูดต่อปริมาตรจริงของเครื่องอัด ประสิทธิภาพของเครื่องมืออัด (Volumetric Efficient - VE) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร 2.6

$$\% \text{VE} = \frac{\text{ปริมาตรดูด}}{\text{ปริมาตรจริง}} \times 100 \quad (2.6)$$

2.2.5 กำลังขับเครื่องอัด

หน่วยวัดปริมาณความร้อน 1 บีทียู มีค่าเท่ากับ 778 ฟุต-ปอนด์ และกำลังงานหมายถึงความสามารถในการทำงานในหนึ่งหน่วยเวลา จึงมีหน่วยวัดเป็น ฟุต-ปอนด์/เวลา

กำลังงาน 1 แรงม้ามีค่าเท่ากับ 33,000 ฟุต-ปอนด์/นาที

และ ปริมาณความร้อน 1 บีทียู มีค่าเท่ากับ 778 ฟุต-ปอนด์

ดังนั้น 1 กำลังแรงม้าจึงมีค่าเท่ากับ $\frac{33000 \text{ ฟุต-ปอนด์/นาที}}{778 \text{ ฟุต-ปอนด์}} = 42.44$ บีทียู/นาที

เอกสาร 2.2.6 อัตราส่วนกำลังอัด สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนกำลังอัดเป็นอัตราส่วนของแรงดันที่คอนเดนเซอร์เปรียบเทียบกับแรงดันที่อีแวปอเรเตอร์

$$\text{อัตราส่วนกำลังอัด} = \frac{P_{\text{dis.}}}{P_{\text{suc.}}} \quad (2.7)$$

โดย $P_{\text{dis.}}$ คือ แรงดันทางออกของเครื่องอัด PSIA

$P_{\text{suc.}}$ คือ แรงดันทางเข้าของเครื่องอัด PSIA

2.2.7 กรรมวิธีของคอนเดนเซอร์

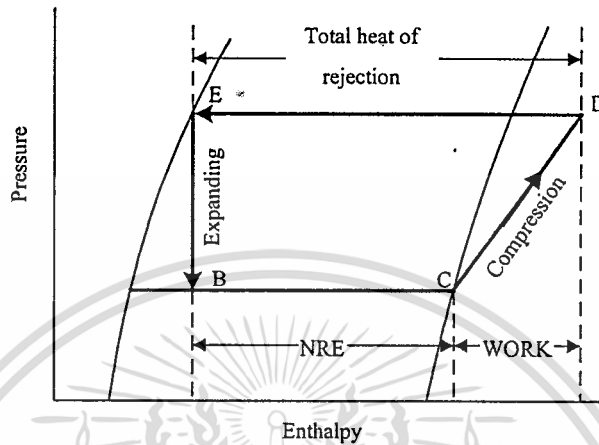
เมื่อไออุณหภูมิสูงแรงดันสูงออกจากเครื่องอัดจะเข้าคอนเดนเซอร์ซึ่งทำหน้าที่เหมือนตัวถ่ายความร้อน (heat exchange) จากสารความเย็นที่ได้รับความร้อนเพิ่มที่อีแวปอเรเตอร์ และในกระบวนการอัด การถ่ายเทความร้อนในสารความเย็นจะถ่ายไอสารความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอีก กระบวนการเหล่านี้พิจารณาได้จากรูป 2.4 จาก D ถึง E กรรมวิธีของระบบเป็นดังนี้

สารความเย็นที่ใช้งานแล้วจากอีแวปอเรเตอร์จะอยู่ในสภาพของไอสารความเย็น แล้วเครื่องอัดจาก C ถึง D ตามรูป 2.4 จึงดูดและอัดให้ไอสารความเย็นมีแรงดันสูง อุณหภูมิ และเป็นไอที่มีความร้อนยิ่งยวด โดยสังเกตได้จาก P-H ไดอะแกรม จะเห็นว่าเส้นจาก C ถึง D ซึ่งวิ่งขนานกับเส้นความร้อนสูญเสีย (Entropy) เข้าไปใน Superheated Vapor Zone จากจุด D จะมีการลดความร้อนยิ่งยวดลงเป็นไออิ่มตัว และถูกถ่ายเทความร้อนออกอีกจนเป็นสารเหลวอิ่มตัวที่ E ค่าความร้อนที่ถ่ายเทออกที่คอนเดนเซอร์จากช่วง D ถึง E ตาม P-H เป็นผลรวมของจำนวนความร้อนที่สารความเย็นรับมาจากภาระ และจากเครื่องอัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อนที่ถ่ายเทออกที่คอนเดนเซอร์} &= \text{NRE} + \text{Work} \\ (\text{บีทียู/ปอนด์}) \text{ หรือ} &= h_D - h_E \end{aligned} \quad (2.8)$$

ตามรูป 2.4 เป็นแผนภูมิการถ่ายเทความร้อนออกจากสารความเย็นที่คอนเดนเซอร์จำนวนหนึ่ง ปอนด์ หากต้องการความสามารถในการถ่ายเทความร้อนออกจากสารความเย็นในหนึ่งหน่วยเวลา ทำได้โดยการคูณค่าความร้อนที่ถ่ายเทออกที่คอนเดนเซอร์ (Total of rejection - BTU/lb) กับจำนวนปอนด์ของสารความเย็นที่จำเป็นต้องไหลวนเวียนในระบบได้จากสูตร

รูปที่ 2.4 P-H ไดอะแกรม ของ คอนเดนเซอร์ D-E



ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน = ค่าความร้อนที่ถ่ายออกที่คอนเดนเซอร์
ของคอนเดนเซอร์ (บีทียู/นาทีก) (บีทียู/ปอนด์) X Q (ปอนด์/นาทีก)

$$\text{หรือ } h_{\text{reject}} (\text{BTU/min}) = h_D - h_E (\text{BTU/lb}) \times Q (\text{lb/min}) \quad (2.9)$$

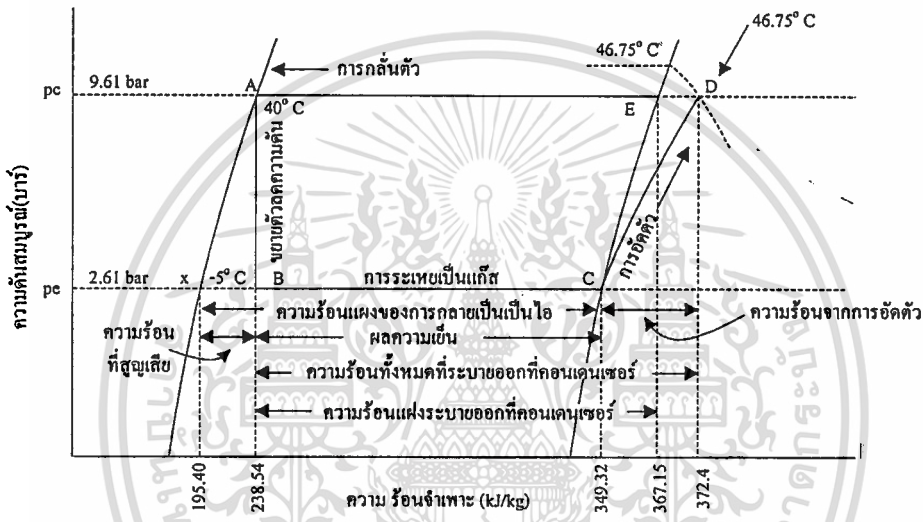
ถึงแม้ว่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนต่อตันในทางทฤษฎีที่อีแวพอเรเตอร์เป็น 200 บีทียูต่อนาทีก แต่ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากคอนเดนเซอร์จะผันแปรไปกับอุณหภูมิและแรงดันใช้งานของ อีแวพอเรเตอร์ และคอนเดนเซอร์ และกับชนิดของสารความเย็น ในทางปฏิบัติมักกำหนดการถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์ให้เป็น 250 บีทียู/นาทีก/ตัน สำหรับสารความเย็นที่ใช้กับเครื่องปรับอากาศเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น จะแสดงตัวอย่างของวงจรน้ำยาของเครื่องทำความเย็นที่ใช้ น้ำยา R-12 อุณหภูมิที่อีวาพอเรเตอร์ -5°C และอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ที่ 40°C ดังรูปที่ 2.5

2.3 การคำนวณสำหรับการออกแบบมอเตอร์เครื่องอัดที่ใช้ทดสอบ

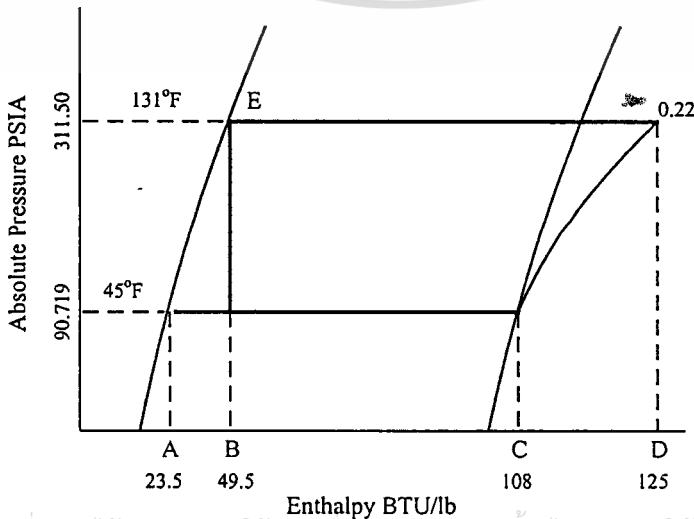
การหาสมรรถนะของมอเตอร์ทำได้โดยการอ่านค่าของ P-H ไดอะแกรม ซึ่งต้องกำหนดอุณหภูมิที่ใช้งานทั้งของ อีแวพอเรเตอร์ และ คอนเดนเซอร์ เพื่อหาค่า แรงดัน ความร้อนจำเพาะ และแรงอัดของมอเตอร์ รายละเอียดขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้

ระบบเครื่องปรับอากาศที่พัฒนาใช้น้ำยา R22 อุณหภูมิใช้งานที่ อีวเปอร์เตอร์ คือ 45°F อุณหภูมิใช้งานที่ คอนเดนเซอร์ คือ 131°F เมื่อนำค่าของอุณหภูมิดังกล่าวไปเปิดดูใน P-H ไดอะแกรม จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

รูปที่ 2.5 P-H ไดอะแกรมของระบบน้ำยาเครื่องทำความเย็นใช้น้ำยา R-12 อุณหภูมิที่ อีวเปอร์เตอร์ -5°C และอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ที่ 40°C



รูปที่ 2.6 P-H ไดอะแกรมของวงจรน้ำยาเครื่องทำความเย็นใช้น้ำยา R-22 อุณหภูมิที่ อีวเปอร์เตอร์ 45°F และอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ที่ 131°F



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก P-H Diagram ของ น้ำยา R22 ในรูปที่ 2.6 ได้ค่าตัวเลขต่างๆดังนี้

แรงดันที่อีวาพอเรเตอร์ ที่ อุณหภูมิ 45°F 90.719 PSIA, 76.023 PSIG

แรงดันที่คอนเดนเซอร์ ที่ อุณหภูมิ 131°F 311.50 PSIA, 296.80 PSIG

ความร้อนใช้งาน (Enthalpy) ณ จุดต่างๆ โดยดูจาก Thermo-dynamic Properties of freon-22 ในภาคผนวก

ที่ 45°F จุด A = 23.5 BTU/lb จุด C = 108 BTU/lb

ที่ 131°F จุด B = 49.5 BTU/lb จุด D = 125 BTU/lb

จากสมการที่ 2.2

$$\begin{aligned} \text{NRE} &= h_c - h_b \\ &= 108 - 49.5 \quad \text{BTU/lb} \\ &= 58.5 \quad \text{BTU/lb} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.2

$$\begin{aligned} \text{ความร้อนจากกระบวนการอัด} &= h_d - h_c \\ &= 125 - 108 \quad \text{BTU/lb} \\ &= 17 \quad \text{BTU/lb} \end{aligned}$$

ค่าในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศที่ใช้ทดสอบ กำหนดที่ 1.33 ตัน (tons load) หรือ 16,000 BTU จากสมการที่ 2.3

$$\begin{aligned} \text{ความร้อนทั้งหมดจากการอัด} &= (h_d - h_c) \times \frac{200 \times \text{Tons Load}}{\text{NRE}} \quad \text{BTU/min} \\ &= 17 \times 4.547 \quad \text{BTU/min} \\ &= 77.299 \quad \text{BTU/min} \end{aligned}$$

ดังนั้น กำลังแรงม้าที่ต้องการ คือ

$$\begin{aligned} \text{กำลังแรงม้า} &= (1/42.44) \times 77.299 \quad \text{Hp} \\ &= 1.82 \quad \text{Hp} \end{aligned}$$

จากการออกแบบระบบเครื่องปรับอากาศด้วยวิธีดังกล่าว จะทำให้การออกแบบมอเตอร์ได้ตรงตามต้องการมากขึ้น และสามารถตรวจสอบจุดการทำงานของระบบได้ง่ายขึ้นเช่นกัน

2.4 ชนิดของเครื่องอัดแบบปิดสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของเครื่องอัดที่มีใช้กันมากมี 3 ชนิดคือ

1. เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor)
2. เครื่องอัดแบบแรงหมุน (Rotary Compressor)
3. เครื่องอัดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Compressor)

2.4.1 เครื่องอัดแบบลูกสูบ

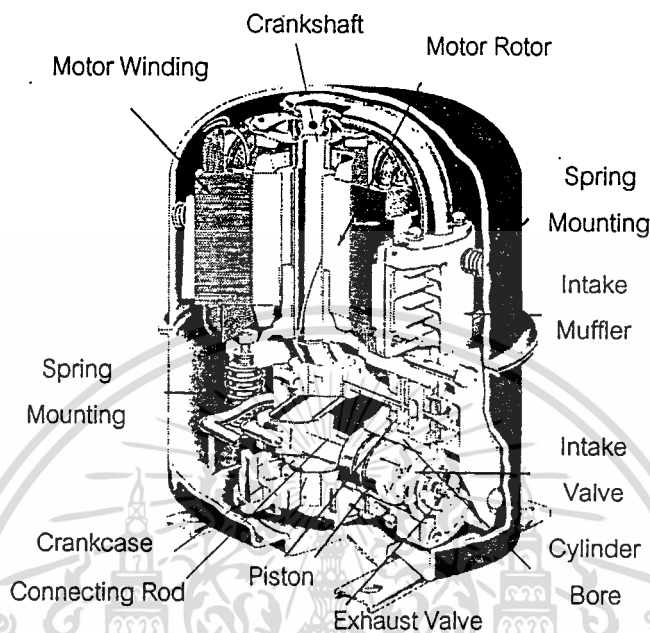
หน้าที่และการทำงานของเครื่องอัดแบบลูกสูบคือ จะดูดและอัดน้ำยาในสถานะที่เป็นแก๊ส โดยดูดน้ำยาในสถานะแก๊สที่มีแรงดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจากอีเวปอเรเตอร์ เข้ามาอัดตัวให้เป็นแก๊สที่มีแรงดันสูงและอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วส่งไปยังคอนเดนเซอร์ หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบลูกสูบลักษณะนี้คือ ในแต่ละกระบอกสูบจะประกอบด้วยชุดของลิ้นทางดูดและลิ้นทางอัด ซึ่งติดอยู่กับวาล์วเพลท ขณะที่ลูกสูบหนึ่งเคลื่อนที่ลงในจังหวะดูด อีกลูกสูบหนึ่งจะเคลื่อนที่ขึ้นในจังหวะอัด

ขณะที่ลูกสูบหนึ่งเคลื่อนที่ลงในจังหวะดูด แรงดันของน้ำยาในกระบอกสูบลดลงมาก ลิ้นทางอัดจะถูกปิดโดยแรงอัดของน้ำยาที่อยู่ทางด้านแรงดันสูง และลิ้นทางดูดจะถูกเปิด ดูดเอาน้ำยาจากทางด้านแรงดันต่ำผ่านเข้ามาในกระบอกสูบ ขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นหรือจังหวะอัด แรงดันของน้ำยาในกระบอกสูบจะถูกอัดตัวสูงขึ้น ลิ้นทางดูดจะถูกปิดด้วยแรงอัดที่สูงขึ้นภายในกระบอกสูบนี้ และลิ้นทางอัดจะถูกเปิดอัดน้ำยาส่งออกไปทางด้านแรงดันสูงของระบบ

โครงสร้างของเครื่องอัดแบบลูกสูบ

เครื่องอัดแบบลูกสูบลักษณะนี้ เป็นแบบที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง การถอดซ่อมสามารถทำได้เช่นเดียวกับการถอดซ่อมเครื่องยนต์ กระบอกสูบ ลูกสูบ และฝาสูบจะทำได้ด้วยเหล็กเนื้อแข็งอย่างดี บางส่วนอาจทำจากอลูมิเนียมเช่น ฝาปิดท่อพักของน้ำยา (Suction or Discharge Cavity muffler) อย่างไรก็ตามการใช้งานต้องคำนึงถึงว่าอลูมิเนียมอาจจะทำปฏิกิริยากับน้ำยาทำความเย็นบางชนิดได้ โครงสร้างของเครื่องอัดแบบลูกสูบลักษณะที่ 2.7 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ อาทิเช่น แกนสูบ(Crankshaft) ฝาสูบ(Crankcase) ลูกสูบ(Piston) สเตเตอร์(Stator) โรเตอร์(Rotor) ชุดวาล์ว(Valves) เป็นต้น

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องอัดแบบลูกสูบ



2.4.2 เครื่องอัดแบบโรตารี

เครื่องอัดแบบโรตารีทำหน้าที่ดูดและอัดน้ำยาในสถานะแก๊ส โดยอาศัยการกวาดตัวตามแกนโรเตอร์(Rotor) เนื่องจากเครื่องอัดโรตารี มีข้อจำกัดในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง กินไฟน้อย กับระบบเครื่องทำความเย็นขนาดเล็กจนถึงไม่เกิน 1-2 ตัน แต่ถ้าระบบใหญ่เกินกว่านี้แล้ว คอมเพรสเซอร์โรตารีจะใช้งานไม่ค่อยดีนัก จะต้องมีการลวักกันกลับซึ่งเป็นสิ่งที่ยอมรับให้น้ำยาไหลผ่านทางเดียว เพื่อป้องกันมิให้น้ำยาในสถานะแก๊สซึ่งถูกอัดให้มีแรงดันสูง ไหลย้อนกลับเข้าอีเวปอเรเตอร์

2.4.3 เครื่องอัดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

เครื่องอัดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้ใช้ได้กับระบบเครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ๆ โดยทั่วไปพบใช้ตั้งแต่ 50 ตันขึ้นไป เครื่องอัดแบบนี้มีโครงสร้างเป็นใบพัด มีการดูดและอัดน้ำยาในสถานะที่เป็นแก๊สให้มีแรงดันสูงขึ้นโดยไม่ต้องใช้กระบอกสูบ ลูกสูบและวาล์วทางดูด-ทางอัดเลยแต่น้ำยาในสถานะ แก๊สซึ่งแรงดันต่ำจะถูกดูดเข้ามาใกล้กับแกนกลางของเครื่องอัด และถูกเหวี่ยงตัวด้วยใบพัดทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง น้ำยาจึงเกิดการอัดตัวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำยานี้ ความแตกต่างแรงดันของน้ำยาที่ถูกดูดเข้ามาและถูกอัดส่งออกจะไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้นจึงต้องเกิดที่ลูกเหวี่ยงตัวแล้วเข้าไปเหวี่ยงอัดตัวเข้าต่อไป

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการทำงานของเครื่องอัดแบบนี้ ไม่ต้องอาศัยขวาล์ว ลูกสูบ และกระบอกสูบแต่การเพิ่มแรงดันของน้ำยา ทำได้โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งการทำงานต้องอาศัยความเร็วรอบที่สูงๆ เพื่อให้ได้แรงเหวี่ยงตัวของน้ำยาเกิดแรงดันสูงขึ้น

2.5 มอเตอร์เครื่องอัดและระบบไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ที่ใช้ควบคุมในปัจจุบัน [3]

ความต้องการในการใช้งานของมอเตอร์เครื่องอัดจะแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกชนิดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงาน จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และมีความปลอดภัยด้วยชนิดของมอเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน แบ่งเป็น 4 ชนิดใหญ่ๆดังนี้

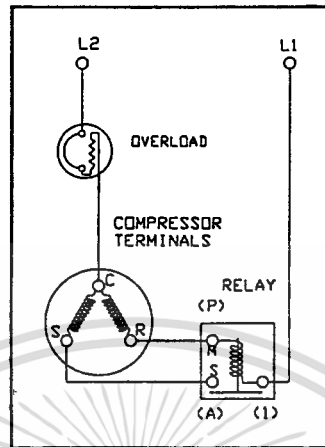
2.5.1 Resistance Start Induction Run (RSIR)

มอเตอร์ชนิดนี้ใช้สำหรับเครื่องอัดแบบปิดสนิทขนาด $1/20$ แรงม้า ถึง $1/3$ แรงม้า มอเตอร์มีแรงบิดในการออกตัวต่ำและมีท้อแคปทีวที่เหมาะสมกับระบบนั้น อาทิเช่น ตู้เย็น ตู้แช่เย็น ตู้ทำน้ำเย็นขนาดเล็ก และตัวดูดความชื้น วงจรในรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของ RSIR เมื่อจ่ายไฟเข้าระบบแล้ว เครื่องอัดจะทำความเร็วจนถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วสูงสุด รีเลย์จะตัดขดสตาร์ทออก และทำงานด้วยขดลวดหลักเท่านั้น ส่วนโอเวอร์โหลด จะทำหน้าที่ตัดวงจรในกรณีที่กระแสสูงหรืออุณหภูมิของมอเตอร์สูงเกินกว่าที่กำหนดไว้

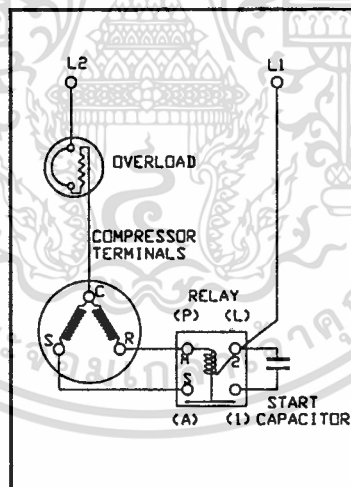
2.5.2 Capacity Start Induction Run (CSIR)

มีลักษณะคล้ายกับ RSIR ยกเว้นตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมอยู่กับขดสตาร์ท ดังวงจรในรูปที่ 2.9 เพื่อที่จะสร้างแรงบิดในการออกตัวให้สูงยิ่งขึ้น และลดกระแสไฟเข้า (starting current) เมื่อเริ่มหมุน เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วรอบสูงสุดของขณะใช้งาน ประกติ สวิตช์หนีศูนย์กลาง (Centrifugal switch) จะตัดวงจรกระแสไฟเข้าขดลวดช่วยหมุน และมอเตอร์จะทำงานโดยใช้ขดลวดหลักเหมือนกับ RSIR มอเตอร์ชนิดนี้จะนิยมใช้ในตู้แช่เย็นขนาดเล็กจนถึง $3/4$ แรงม้า

รูปที่ 2.8 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ RSIR



รูปที่ 2.9 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ CSIR



2.5.3 Permanent Split Capacitor (PSC)

มอเตอร์ชนิดนี้มีคาปาซิเตอร์ต่อรวมในวงจรตลอดเวลาเป็นที่นิยมสำหรับเครื่องทำความเย็น การใช้งานมีทั้งพัดลมเป่าอากาศ พัดลมดูดอากาศ หรือเครื่องอัด เป็นต้น การทำงานของมอเตอร์ที่ต้องวงจรแบบ PSC ตามรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ามีคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยหมุนอยู่ตลอดเวลาโดยไม่ต้องใช้สวิตช์หนีสัญญ์คอยตัดวงจรกระแสไฟเข้าขดลวดช่วยหมุน ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับคือ นอกจากคาปาซิเตอร์ตัวนี้นอกจากในการช่วยหมุน ตามวงจรคาปาซิเตอร์มีส่วนช่วยเสริมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

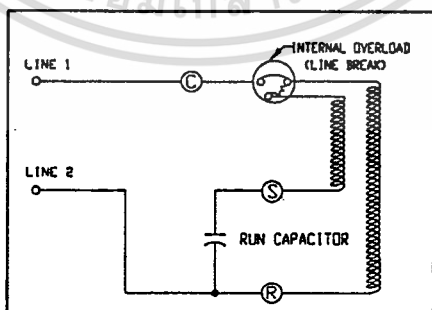
ประสิทธิภาพของขดลวดใช้งานอีกด้วย ปกติขดลวดช่วยหมุนสร้างจากลวดทองแดงที่มีขนาดเล็กกว่าขดลวดใช้งานมาก แต่จะมีจำนวนรอบมากกว่าซึ่งมีผลให้ค่าความต้านทานขดลวด (inductance reactive -L) มีค่ามากกว่า และด้วยเหตุที่ขนาดของขดลวดทองแดงที่พันของขดลวดช่วยมีขนาดเล็ก กระแสไฟฟ้าผ่านมากไม่ได้ ขนาดของคาปาซิเตอร์จึงมีส่วนในการจำกัดกระแสที่จะไหลผ่านตัวเอง และผ่านขดลวดช่วยหมุนโดยค่า mfd ของคาปาซิเตอร์จะต้องไม่มาก ด้วยเหตุที่ขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าน้อย มีผลต่อขดลวดใช้งานคือมอเตอร์จะให้กำลังบิดไม่มากนัก

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส แบบ PSC นี้ แต่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นมาเล็กน้อย เมื่อทำการออกแบบแล้ว จะนำผลที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ที่จะสร้างขึ้นทดแทน

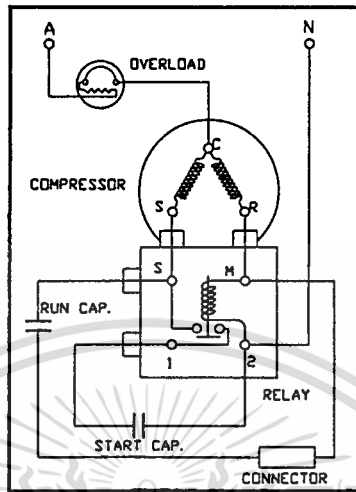
2.5.4. Capacitor Start Capacitor Run (CSCR)

มอเตอร์แบบนี้ใช้ข้อดีจากคุณสมบัติที่ดีของมอเตอร์แบบ PSC และของมอเตอร์แบบ CSIR มารวมกันคือ แบบ PSC มีประสิทธิภาพการทำงาน แต่มีแรงบิดเมื่อเริ่มหมุนค่อนข้างต่ำ ขณะที่มอเตอร์แบบ CSIR มีแรงบิดเริ่มต้นสูง แต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่ามอเตอร์แบบ PSC จากวงจรในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่า มีคาปาซิเตอร์ 2 ตัว ต่อ กับขดลวดทั้งสอง แต่เมื่อมอเตอร์ทำความเร็วรอบจนถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วสูงสุด รีเลย์ยังคงตัดขดลวดช่วยและคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ

รูปที่ 2.10 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ PSC



รูปที่ 2.11 วงจรของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ CSCR



2.6 การใช้งานมอเตอร์เครื่องอัดในแบบต่างๆ

การใช้งานของเครื่องอัด ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขข้อกำหนดของสมรรถนะเครื่องอัดให้เหมาะสม เนื่องจากถ้ามีการนำไปใช้งานผิดประเภท จะทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องอัดและระบบทำความเย็นได้ ข้อกำหนดของการประยุกต์ใช้งานสามารถจำแนกจากค่าแรงดันเข้าและออก อุณหภูมิใช้งาน เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

2.6.1 การประยุกต์ใช้งานแบบแรงดันย้อนกลับมีค่าต่ำ (Low Back Pressure Application, LBP)

เป็นการใช้งานกับงานที่ต้องการอุณหภูมิใช้งานมีค่าต่ำ คือ จุดพิกต์ที่อุณหภูมิ -10°F (-23.3°C) ของอีวโปเรเตอร์ และ จุดทำงานที่อุณหภูมิ 131°F (55°C) ของคอนเดนเซอร์ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ อาทิเช่น แรงดัน จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาทำความเย็น ในตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าน้ำยาต่างชนิดกัน แรงดันทั้งขาเข้าและขาออกจะแตกต่างกัน ดังนั้นในการใช้งานแบบนี้ ก็ต้องควบคุมแรงดันทั้งสองนี้ให้ได้ดังตัวเลขในตาราง ตัวอย่างของการใช้งานในระบบนี้ อาทิเช่น ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของการใช้งานเครื่องอัดแบบ LBP โดยแบ่งตามชนิดของน้ำยา

ชนิดของน้ำยา	R-12	R-22	R-502	R-134a	R-404
อุณหภูมิที่ไอเวปอเรเตอร์ (°F)	-10	-10	-10	-10	-10
อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ (°F)	131	131	131	131	131
แรงดันขาเข้า (PSIG)	19.2	31.3	37.46	16.8	38.63
แรงดันขาออก (PSIG)	183	302	322	200.5	357.6
อุณหภูมิห้อง (°F)	90	90	90	90	90

2.6.2 การประยุกต์ใช้งานแบบแรงดันย้อนกลับมีปานกลาง (Medium Back Pressure Application, MBP)

เป็นการใช้งานกับงานที่ต้องการอุณหภูมิใช้งานมีค่าต่ำ คือ จุดพิกัดที่อุณหภูมิ 20 °F (-6.7 °C) ของอีเวปอเรเตอร์ และจุดทำงานที่อุณหภูมิ 131°F(55°C) ของคอนเดนเซอร์ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ อาทิเช่น แรงดัน จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาทำความเย็น ในตารางที่ 2.2 ไม่ว่าจะเป็นน้ำยาประเภทใดก็ตาม ถ้าพิจารณาแรงดันทางด้านขาเข้าพบว่า มีค่ามากกว่า แบบ LBP ทำให้อุณหภูมิที่ใช้งานสูงกว่าด้วย ส่วนแรงดันทางด้านออกยังคงมีค่าเท่าเดิม ตัวอย่างของการใช้งานในระบบนี้ อาทิเช่น ตู้แช่ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของการใช้งานเครื่องอัดแบบ MBP แบ่งตามชนิดของน้ำยา

ชนิดของน้ำยา	R-12	R-22	R-502	R-134a	R-404
อุณหภูมิที่ไอเวปอเรเตอร์ (°F)	20	20	20	20	20
อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ (°F)	131	131	131	131	131
แรงดันขาเข้า (PSIG)	21.04	43.0	52.5	18.35	55.47
แรงดันขาออก (PSIG)	183	302	322	200.5	357.6
อุณหภูมิห้อง (°F)	95	95	95	95	95

2.6.3 การประยุกต์ใช้งานแบบแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก (High Back Pressure Application, HBP)

เป็นการใช้งานกับงานที่ต้องการอุณหภูมิใช้งานมีค่าต่ำ คือ จุดพิกัดที่อุณหภูมิ 45 °F(-7.2 °C) ของอีเวปอเรเตอร์ และ จุดทำงานที่อุณหภูมิ 131 °F ของคอนเดนเซอร์ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ อาทิเช่น แรงดัน จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาทำความเย็น ในตารางที่ 2.3 ไม่ว่าจะเป็นน้ำยาประเภทใดก็ตาม ถ้าพิจารณาแรงดันทางด้านขาเข้าพบว่า มีค่ามากกว่า แบบ MBP ทำให้อุณหภูมิที่ใช้งานสูงกว่าด้วย ส่วนแรงดันทางด้านออกยังคงมีค่าเท่าเดิม ตัวอย่างของการใช้งานในระบบนี้ อาทิเช่น เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของการใช้งานเครื่องอัดแบบ HBP โดยแบ่งตามชนิดของน้ำยา

ชนิดของน้ำยา	R-12	R-22	R-502	R-134a	R-404
อุณหภูมิที่อีเวปอเรเตอร์ (°F)	45	45	45	45	45
อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ (°F)	131	131	131	131	131
แรงดันขาเข้า (PSIG)	41.7	76.03	88.3	39.92	94.27
แรงดันขาออก (PSIG)	183	302	322	200.5	357.6
อุณหภูมิห้อง (°F)	95	95	95	95	95

2.7 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ

เครื่องปรับอากาศขนาดเล็กที่มีใช้ในประเทศไทย ทั้งแบบชนิดแยกส่วนและแบบติดหน้าต่าง จะมีตัวตรวจสอบอุณหภูมิห้องแล้วจึงส่งสัญญาณไปควบคุมการเดินหยุดของเครื่องอัดเหมือนกันซึ่งเรียกว่า เทอร์โมสตัท (Thermostat) ตัวตรวจสอบดังกล่าวมีลักษณะเป็นกระเปาะต่ออยู่กับท่อสัญญาณและตัวปรับตั้งย่านการทำงาน การติดตั้งเทอร์โมสตัทแบบนี้ จะติดตั้งตัวกระเปาะบริเวณทางลมกลับของชุดอีเวปอเรเตอร์ เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้อง ส่วนตัวปรับตั้งย่านการ

ทำงานส่วนใหญ่จะติดตั้งบริเวณหน้ากากของอีเวปอเรเตอร์ มีสวิทช์ปรับตั้งอุณหภูมิให้ผู้เลือกใช้ปรับตั้งได้

2.8 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์

มอเตอร์เครื่องอัดปกติจะถูกออกแบบให้ทำงานที่จุดใช้งาน(Rating Point) เท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการดูดและอัดน้ำยาจะคงที่ในปริมาณหนึ่ง ความร้อนภายในห้องจะถูกดูดออกไปในปริมาณคงที่ทุกครั้งที่เครื่องอัดทำงาน เนื่องจากความเร็วรอบมีค่าคงที่นั่นเอง ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องอัดได้ ผลการดูดความร้อนภายในห้องของเครื่องปรับอากาศก็จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยเมื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้นกว่าปกติจะทำให้เครื่องอัดสามารถอัดน้ำยาให้มีปริมาณมากขึ้นหรือแรงดันทางด้านออกมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณในการดูดความร้อนสูงขึ้นด้วย แต่ก็ทำให้ความแตกต่างของแรงดันด้านเข้าและออกต่างกันมากด้วย ซึ่งจะทำให้เครื่องอัดทำงานหนักมากกว่าปกติและใช้พลังงานสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นถ้าเราปรับเปลี่ยนความถี่ให้สูงขึ้นเท่ากับ 70 เฮิรตซ์ จะทำให้เครื่องปรับอากาศทำความเย็นได้สูงขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 25 % แต่ถ้าเพิ่มความถี่มากกว่านี้อาจทำให้มอเตอร์ร้อนเนื่องจากการเสียดสีของส่วนต่างของชุดปั๊ม และอาจเกิดอันตรายได้ เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ให้ลดลงเหลือเท่ากับ 15 เฮิรตซ์ ทำให้เครื่องอัดสามารถอัดน้ำยาได้น้อยลงหรือแรงดันด้านอัดลดลงแต่ว่าแรงดันด้านดูดมากขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้เครื่องอัดทำงานลดลง และไม่ร้อนมาก การใช้พลังงานอินพุทจึงลดลง แต่ถ้าลดความถี่มากกว่านี้ จะทำให้เครื่องอัดไม่สามารถอัดน้ำยาเข้าไปในระบบได้ และตัวเครื่องอัดก็ไม่สามารถสเปย์น้ำมันหล่อลื่นเพื่อไปเลี้ยงชุดปั๊มได้ จากเหตุดังกล่าวจะทำให้เครื่องอัดร้อนและเกิดการลัดได้

2.9 สรุป

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานและการประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์เครื่องอัดแบบ 1 เฟส การศึกษาดังกล่าวก่อให้เกิดความคิดที่จะพัฒนามอเตอร์เครื่องอัดเพื่อให้มี

ประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น โดยอาศัยจำกัดของเครื่องอัดแบบ 1 เฟส และปรับปรุงข้อจำกัดดังกล่าวในการออกแบบของเครื่องอัดแบบ 3 เฟส

การออกแบบใหม่ที่จะกล่าวในบทต่อไป จะแสดงให้เห็นถึงข้อดีทางด้านต่างที่ได้จากการพัฒนามอเตอร์ 3 เฟสขึ้นใหม่



บทที่ 3

ทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง

3.1 กล่าวนำ

การพิจารณาการทำงานของมอเตอร์แบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟส สามารถอธิบายและวิเคราะห์โดยใช้ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง (The cross-field theory) และทฤษฎีสถานแม่เหล็กหมุน (The revolving-field theory) ซึ่งทั้งสองทฤษฎีให้ผลลัพธ์เหมือนกัน แต่ทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวางจะมีข้อดีกว่าคือ ขั้นตอนการคำนวณและทำความเข้าใจได้ง่ายกว่า ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอหลักการและขั้นตอนการคำนวณทางตัวเลขของทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง เพื่อออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบทั้งชนิดเฟสเดียวและชนิดสามเฟส

3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single Phase Induction Motor)

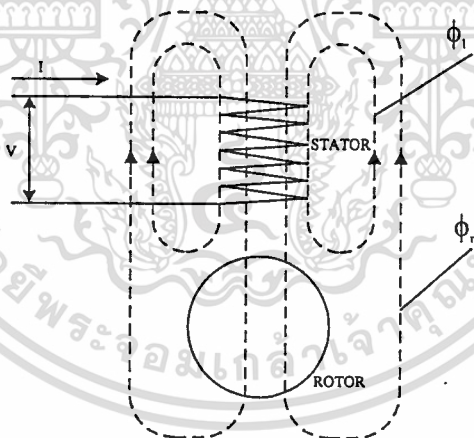
3.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน [4]-[7]

ทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวางเป็นทฤษฎีที่อ้างอิงถึงฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจริงในมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก ซึ่งจะมีสองส่วนหลักคือ ฟลักแม่เหล็กหลัก(Main Flux, ϕ_m) และ ฟลักแม่เหล็กขวาง(Cross-field, ϕ_c) โดยหลักการของทฤษฎีสามารถกล่าวอย่างย่อได้ดังนี้ คือจากรูปที่ 3.1 แสดงโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า จะเกิดฟลักแม่เหล็กที่มีขนาดและทิศทางขึ้นลงตามคลื่นไซน์ของแรงดันซึ่งฟลักแม่เหล็กนี้จะมี 2 ส่วนคือ

ฟลักแม่เหล็กหลัก (Main Flux , ϕ_m) และ ฟลักแม่เหล็กรั่วซึม (Leakage Flux , ϕ_l) แต่จะมีเพียง ϕ_m เท่านั้นที่สอดคล้องผ่านทั้งสเตเตอร์ และโรเตอร์ จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ โดยมีทิศทางที่จะสร้างฟลักต่อต้าน ϕ_m ส่วนรูปที่ 3.2 แสดงโรเตอร์ขณะหมุนไปตัดผ่าน ϕ_m ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในโรเตอร์เช่นเดียวกัน โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น(ตัวนำในโรเตอร์ถูกลัดวงจร) ซึ่งกระแสนี้เองที่ไปสร้างฟลักแม่เหล็กขึ้นมาในทิศทางดังรูปที่ 3.2 โดยเรียกว่า ฟลักแม่เหล็กขวาง (Cross-field, ϕ_c) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ϕ_m จะเกิดขึ้นตลอดเวลาที่มอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้า แต่ ϕ_c นั้นจะมีค่าเกิดขึ้นในขณะที่โรเตอร์หมุนเท่านั้น ถ้าเมื่อใดที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ϕ_c จะหมดไป

ในการนำเอาทฤษฎีนี้ไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กนั้น จะต้องนำเอาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อน กระแส อิมพีแดนซ์และฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาทำการหาสมการพื้นฐาน

รูปที่ 3.1 ขดลวดสเตเตอร์ขณะได้รับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและโรเตอร์หยุดนิ่ง



3.2.1.1 การพิจารณาขณะมีการต่อเพียงขดลวดเดียว (Single winding)

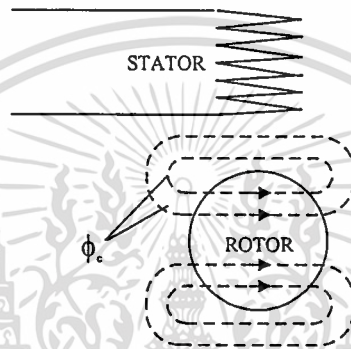
ผลของ ϕ_m และ ϕ_c จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมา 4 ค่า ดังนี้คือ

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_{TM} เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำในลักษณะของ Transformer Action และเกิดขึ้นในโรเตอร์ โดย ϕ_m และมีผลทำให้เกิดกระแสในขดลวดแนวแกน y หรือแกนหลัก
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_{SMx} เกิดขึ้นเนื่องจากการที่ตัวนำโรเตอร์วิ่งไปตัดผ่าน ϕ_m จึงเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในลักษณะ Speed Action ทำให้เกิดกระแสและแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นบนขดลวดในแนวแกน x หรือแกนขวาง

3. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_{TCx} เกิดขึ้นเนื่องจากการแกว่งตัวของ ϕ_c ไปตัดตัวนำในโรเตอร์ (Transformer Action) และ เกิดกระแสในแนวแกน x หรือแกนขวาง

4. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_{SCy} เกิดขึ้นเนื่องจากการที่ตัวนำโรเตอร์วิ่งไปตัดผ่าน ϕ_c (Speed Action) และเกิดกระแสในแนวแกน y หรือแกนหลัก

รูปที่ 3.2 โรเตอร์ขณะเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เกิด ϕ_c ขึ้นมา



E_{TM_y} เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาจาก ϕ_m และตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว E_{TM_y} จะเกิดทีหลัง (lag) ϕ_m เป็นมุม 90 องศา E_{TM_y} มีขนาดค่าเท่ากับแรงเคลื่อนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในสเตเตอร์ ($-E_{TM_y}$) แต่มีทิศทางตรงข้าม ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.3 ขั้นตอนต่อมาพิจารณาในกรณีที่โรเตอร์หมุนตัดผ่าน ϕ_m ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิด E_{SMx} ดังรูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{TM_y} กับ E_{SMx} ในกรณีที่ตัวนำในโรเตอร์วิ่งตัดผ่าน ด้วยความเร็ว S เท่าของความเร็วซิงโครนัส จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_{SMx} เป็น S เท่าของ E_{TM_y} ดังนั้น จะได้ว่า

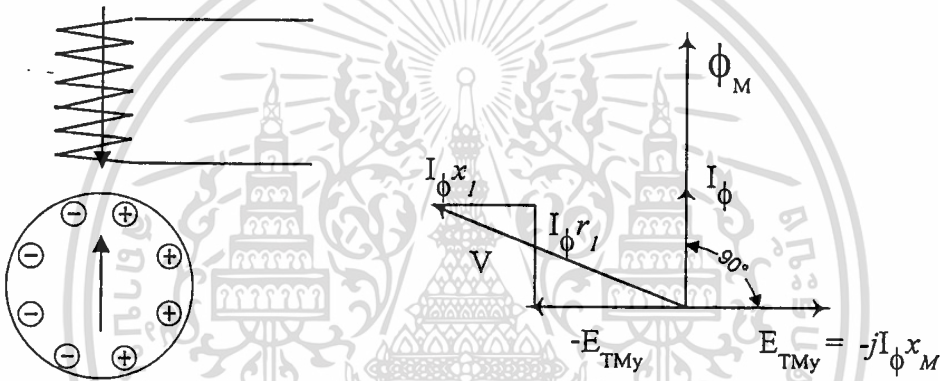
$$E_{SMx} = S E_{TM_y} \quad (3.1)$$

$$\text{โดย } S = N/N_s = \text{ความเร็วจริง} / \text{ความเร็วซิงโครนัส} \quad (3.2)$$

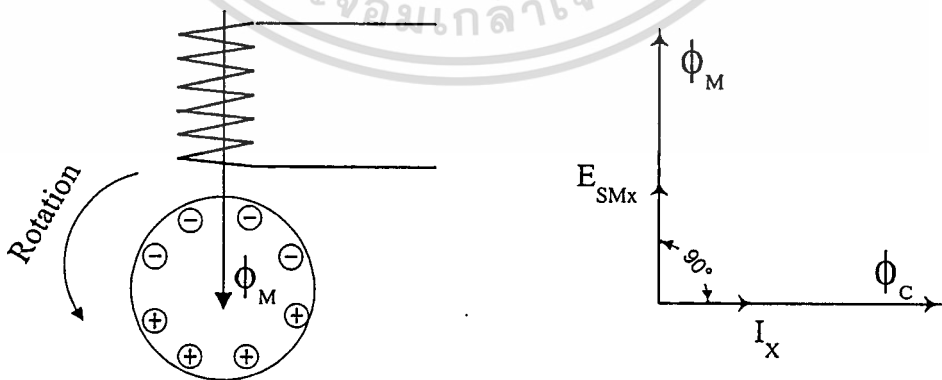
ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 ค่าที่เหลือคือ E_{TCx} และ E_{SCy} สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนทั้งสองนี้ กับกระแสและอิมพีแดนซ์ได้ โดยที่ ϕ_c จะวิ่งผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap) สองครั้งและผ่านสเตเตอร์ ดังนั้นความนำแม่เหล็กของทางเดิน ϕ_c นี้จะเท่ากับ ϕ_m และเนื่องจากโรเตอร์มีความสมมาตรทั้งแกน x และ y ทำให้รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ในแต่ละแกนมีค่าเท่ากันและพลีกร่วมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ ϕ_c นี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $I_x x_m$ หรือ E_{TCx} ซึ่งจะเห็นว่ากระแสทั้งหมดในแกน x หรือแกนขวาง คือ I_x เป็นกระแสกระตุ้น (Magnetizing Current) กระแส I_x นี้จะผ่าน Z_2 ทำให้เกิดแรงดันตกคล่อมขึ้น ทั้งหมดที่กล่าวนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ขนาดของเวกเตอร์ทุกค่าในภาพได้มาจากความเร็ว และจะเปลี่ยนแปลงขนาดตามความเร็วของโรเตอร์ ดังนั้นโรเตอร์หยุดนิ่ง เวกเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย

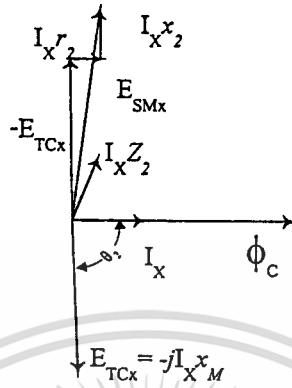
รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำจาก ϕ_m



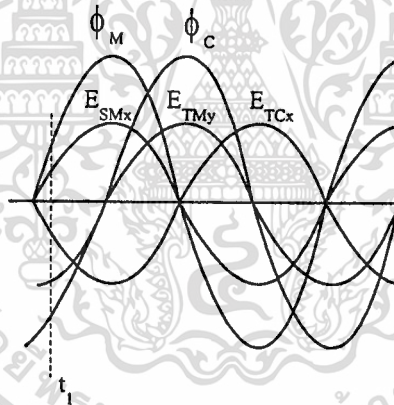
รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์ของ ϕ_c ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.5 แผนภาพเวกเตอร์ของ E_{TCx} และ E_{SMx}



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและฟลักแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา



จากรูปที่ 3.6 ณ เวลา t_1 นั้น Φ_C กำลังลดลง ดังนั้น Φ_C จึงมีทิศทางจากซ้ายมาขวา ทำให้ตัวนำในโรเตอร์หมุนไปตัดผ่านจนเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_{SCy} ขึ้น ทิศทางของ E_{SCy} ที่เกิดขึ้นจะตรงข้ามกับ E_{TMx} ดังนั้นเมื่อนำไปเขียนแผนภาพเวกเตอร์เปรียบเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอื่นๆ E_{SCy} จะมีค่าต่างกับ Φ_C 180 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.7

จาก ความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.1 และ 3.2 จะได้ E_{SCy} มีขนาดเป็น S เท่า ของ E_{TCx}

$$E_{SCy} = S E_{TCx} \quad (3.3)$$

ส่วนทิศทาง E_{sc_y} จะมีทิศทางไปทางเดียวกับ E_{TM_y} แล้วทำให้เกิดกระแส (I_Y) ขึ้นในแนวแกนหลักของโรเตอร์ โดยแสดงเป็นเวกเตอร์ ดังรูปที่ 3.8 และสมการที่ 3.4 โดยที่ Z_2 เป็นอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์

$$-E_{sc_y} + I_Y Z_2 = E_{TM_y} \tag{3.4}$$

ค่ากระแส I_Y จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหมือนกับที่ขดลวดทุติยภูมิสร้างขึ้นในหม้อแปลง โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้มีทิศทางตรงข้ามกับที่สร้างโดยขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้น I_Y สร้าง ฟลักแม่เหล็กสวนทางกับ ϕ_m ซึ่งก็เป็นทิศทางลบนั่นเอง และค่า I_Y นี้ต้องเกิดมีกระแสทางด้านปฐมภูมิ(สเตเตอร์) เพื่อสร้างความสมดุลด้วย โดยกระแส นี้มีค่าเท่ากับ I_Y แต่มีทิศทางตรงข้าม ดังพิจารณาได้จากสมการ 3.5 และรูปที่ 3.9

$$I_Y = - I_Y' \tag{3.5}$$

และเมื่อนำ I_Y นี้ไปรวมกับกระแสกระตุ้น จะได้กระแสทั้งหมดของมอเตอร์ขนาดเล็ก ดังสมการ 3.6

$$I_1 = I_Y + I_{\phi} \tag{3.6}$$

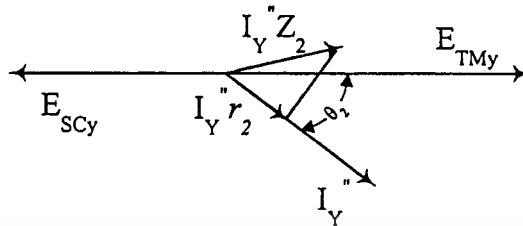
ในขณะที่เราได้ทราบถึงความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนและกระแสทั้งหมดแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการพิจารณาให้อยู่ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆ และเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่สามารถหาค่าคำตอบได้ดังนี้ สมการแรกหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจาก Transformer Action มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสกระตุ้นกับรีแอกแตนซ์(Magnetizing Reactance) ดังนั้น

$$E_{TM_y} = I_{\phi} x_m \tag{3.7}$$

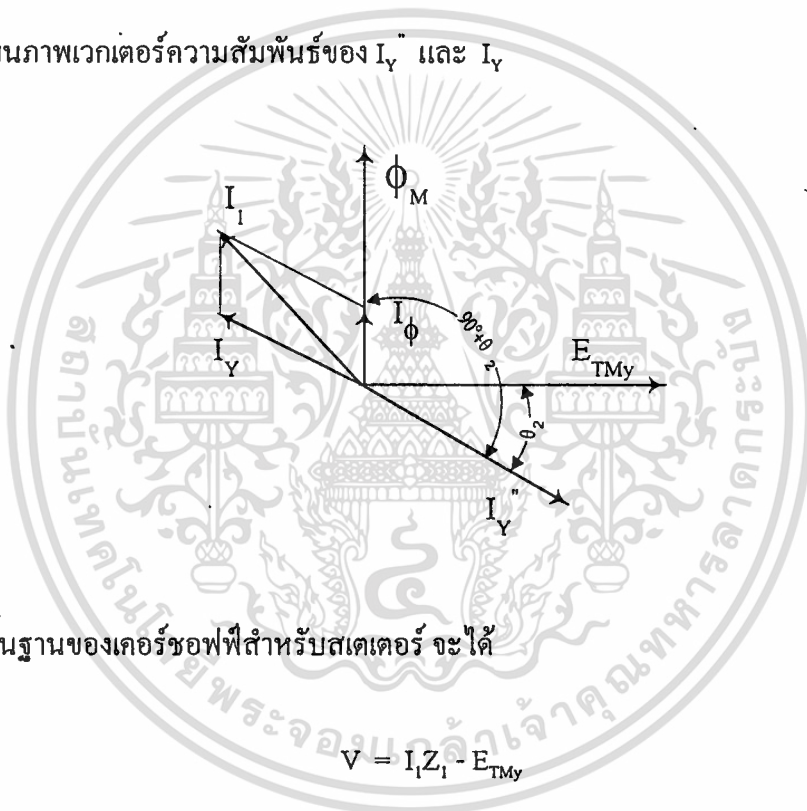
และในรูปเวกเตอร์จะได้

$$E_{TM_y} = -j x_m (I_1 - I_Y) \tag{3.8}$$

รูปที่ 3.7 แผนภาพเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของ E_{SCy} และ E_{TM_y}



รูปที่ 3.8 แผนภาพเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของ I_Y'' และ I_Y



จากทฤษฎีพื้นฐานของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับสเตเตอร์ จะได้

$$V = I_1 Z_1 - E_{TM_y} \quad (3.9)$$

$$V = I_1 Z_1 + jx_m(I_1 - I_Y) \quad (3.10)$$

โดยที่สมการที่ 3.10 เป็นสมการที่นำไปใช้ในการหาคำตอบหรือหาค่ากระแสต่างๆ คือ I_1 , I_Y และ I_x ส่วนสมการถัดมา ที่ต้องหานั้น หาได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแนวแกน x หรือแกนขวาง ดังนี้

$$E_{SMx} = SE_{TM_y} \quad (3.11)$$

เมื่ออยู่ในรูปเวกเตอร์ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{SMx} = Sx_m(I_1 - I_Y) \quad (3.12)$$

$$E_{TCx} = -jx_m I_X \quad (3.13)$$

และจากรูปที่ 3.5 จะได้

$$E_{SMx} + E_{TCx} = I_X Z_2 \quad (3.14)$$

$$Sx_m(I_1 - I_Y) - jx_m I_X = I_X Z_2 \quad (3.15)$$

จากสมการที่ 3.15 จะต้องคำนึงถึงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Speed Action ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากการที่โรเตอร์ไปตัดผ่านฟลักซ์ร่วมเท่านั้น แต่โรเตอร์ยังไปตัดผ่านฟลักซ์รั่วซึมด้วย ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับ S เท่าของแรงดันตกคล่อมรีแอคแตนซ์รั่วที่ทำให้เกิดฟลักซ์รั่วนี้ขึ้นมา โดยมีทิศทางเหมือนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์ร่วม ดังนั้นสมการ 3.15 จะเป็น

$$Sx_m(I_1 - I_Y) - jx_m I_X - SI_Y x_2 = I_X Z_2 \quad (3.16)$$

และอีกสมการ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแนวแกน y หรือแกนหลัก แสดงได้ดังนี้

$$E_{TMy} = -jx_m(I_1 - I_Y) \quad (3.17)$$

$$E_{SCy} = -Sx_m I_X \quad (3.18)$$

จากรูปที่ 3.7 จะได้

$$E_{TMy} + E_{SCy} = I_Y'' Z_2 \quad (3.19)$$

$$-jx_m(I_1 - I_Y) - Sx_m I_X = I_Y'' Z_2 \quad (3.20)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-jx_m(I_1 - I_Y) - Sx_m I_X = -I_Y Z_2 \quad (3.21)$$

เมื่อคำนึงถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Speed Action โดยโรเตอร์ตัดผ่านฟลักซ์รั่วซึม จะได้

$$-jx_m(I_1 - I_Y) - SI_X(x_m + x_2) = -I_Y Z_2 \quad (3.22)$$

จากความสัมพันธ์ ของสมการ 3.10 , 3.16 และ 3.22 สามารถนำมาเขียนแผนภาพเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.9 การพิจารณาหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแส และอิมพีแดนซ์ที่ผ่านมานั้นยังไม่มี การพิจารณาถึงผลการสูญเสียของแกนเหล็ก ซึ่งแทนด้วยความต้านทาน (R_{fe}) ต่อขนานอยู่กับ x_m และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะรวม 2 ค่าที่ขนานกันนี้ ให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ Z_0 ซึ่งเมื่อแทน Z_0 ลงในสมการ ที่ 3.10 , 3.16 และ 3.22 จะได้สมการความสัมพันธ์ใหม่ที่พิจารณาถึงผลของความสูญเสียในแกนเหล็กด้วย ดังนี้คือ

สำหรับส่วนของสเตเตอร์

$$I_1(Z_1 + Z_0) + I_Y(-Z_0) = V \quad (3.23)$$

สำหรับส่วนของแกนหลัก

$$I_1(-Z_0) + I_Y(Z_0 + Z_2) + I_X[S(jZ_0 - x_2)] = 0 \quad (3.24)$$

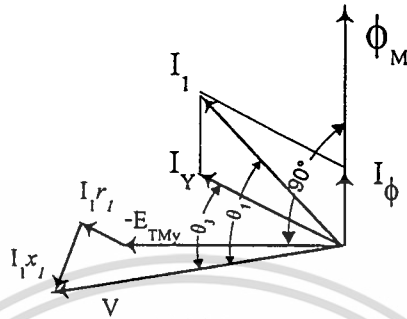
สำหรับส่วนของแกนขวาง

$$I_1(-jZ_0) + I_Y[S(jZ_0 - x_2)] = 0 \quad (3.25)$$

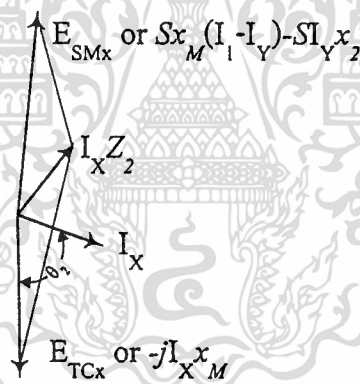
$$\text{โดย } Z_0 = r_0 + jx_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{fe}}\right) + \left(\frac{1}{jx_m}\right)}$$

รูปที่ 3.9 แผนภาพเวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ทั้งหมดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและฟลักแม่เหล็ก

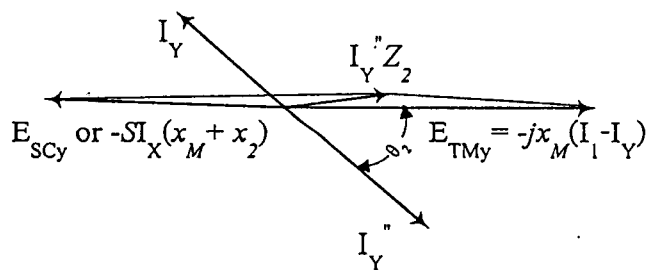
a) สมการ 3.10



b) สมการ 3.16



c) สมการ 3.22



และกำหนดให้ V_{SM} เป็นผลรวมทั้งหมดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Speed Action ในแกนหลัก และ V_{sc} เป็นผลรวมทั้งหมดของแรงเคลื่อนจาก Speed Action ในแกนขวางจะได้

$$V_{SM} = I_x[S(jZ_0 - x_2)] \quad (3.26)$$

$$V_{sc} = I_1(-jSZ_0) + I_y[S(jZ_0 - x_2)] \quad (3.27)$$

แทนค่าลงในสมการ 3.23 ถึง 3.25 จะได้

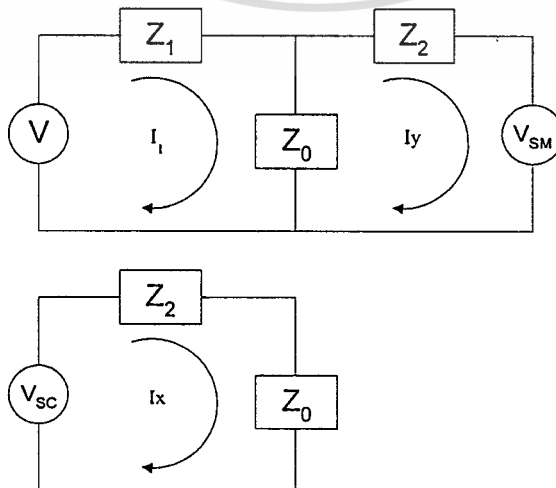
$$I_1(Z_1 + Z_0) + I_y(-Z_0) = V \quad (3.28)$$

$$I_1(-Z_0) + I_y(Z_0 + Z_2) + V_{SM} = 0 \quad (3.29)$$

$$I_x[(-Z_0 + Z_2)] + V_{sc} = 0 \quad (3.30)$$

และเมื่อนำสมการความสัมพันธ์ทั้งสามสมการข้างต้นมาเขียนวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) จะได้ภาพดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กน้อยต่อเพียงขดลวดเดียว โดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กคัตขวาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 เมื่อทำการแทนค่าแรงดัน กระแส และ อิมพีแดนซ์ต่างๆ ด้วยส่วนที่เป็นค่าจำนวนจริงและส่วนที่เป็นค่าจินตภาพ จากนั้นจัดรูปใหม่โดยแบ่งส่วนค่าจำนวนจริงและส่วนค่าจินตภาพออกจากกัน ทำให้ได้เมตริกซ์ขนาด $[6 \times 6] [6 \times 1] = [6 \times 1]$ ดังสมการที่ 3.32 โดยที่

$$I_1 = I_{IRE} + jI_{IIM} \quad \text{กระแสของขดลวดหลักของสเตเตอร์}$$

$$I_Y = I_{YRE} + jI_{YIM} \quad \text{กระแสในแนวแกนฟลักซ์แม่เหล็กหลักของโรเตอร์}$$

$$I_X = I_{XRE} + jI_{XIM} \quad \text{กระแสในแนวแกนฟลักซ์แม่เหล็กขวางของโรเตอร์}$$

$$Z_0 = r_0 + jx_0 \quad \text{อิมพีแดนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก}$$

$$Z_1 = r_1 + jx_1 \quad \text{อิมพีแดนซ์รั่วของขดลวดหลัก}$$

$$Z_2 = r_2 + jx_2 \quad \text{อิมพีแดนซ์รั่วของโรเตอร์}$$

$$[Z][I]=[V]$$

(3.31)

$$\begin{bmatrix} r_1 + r_0 & -r_0 & 0 & x_1 + x_0 & -x_0 & 0 \\ -r_0 & r_2 + r_0 & -s(x_2 + x_0) & -x_0 & x_2 + x_0 & r_0 \\ sx_0 & -s(x_2 + x_0) & -(r_2 + r_0) & -sr_0 & sr_0 & -(x_2 + x_0) \\ -(x_1 + x_0) & x_0 & 0 & r_1 + r_0 & -r_0 & 0 \\ x_0 & -(x_2 + x_0) & -r_0 & -r_0 & r_2 + r_0 & -s(x_2 + x_0) \\ sr_0 & -sr_0 & x_2 + x_0 & sx_0 & -s(x_2 + x_0) & -(r_2 + r_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{IRE} \\ I_{YRE} \\ I_{XRE} \\ I_{IIM} \\ I_{YRE} \\ I_{XRE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{RE} \\ 0 \\ 0 \\ V_{IM} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

.....(3.32)

ในการหาคำตอบของสมการเมตริกซ์ 3.32 นั้นสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เช่น Gauss Elimination Method หรือ Cramer's Rule เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมี โปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถหาค่ากระแสได้ทันที เช่น โปรแกรม MATHCAD, MATHEMATICA และ MATLAB เป็นต้น

3.2.1.2 การพิจารณาขณะมีการต่อหลายขดลวด (Combined winding)

การนำทฤษฎีสานแม่เหล็กตัดขวางมาศึกษาสมการความสัมพันธ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขนาดเล็กขณะต่อหลายขดลวด สามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาสมการความสัมพันธ์แรกนั้น จะหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดหลัก มีค่าเท่ากับ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของขดลวดหลักรวมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาจากฟลักซ์ร่วมของฟลักซ์ในแกนหลัก ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้นำมาเป็นเวกเตอร์อ้างอิงและมีค่าเท่ากับ

$$E_M = I_{\phi M} Z_{OM} \quad (3.33)$$

โดย $I_{\phi M}$ คือ กระแสกระตุ้นของขดลวดหลัก
 Z_{OM} คือ อิมพีแดนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก
 เท่ากับ $1/[(1/R_{fe}) + (1/jX_{mM})]$ (3.34)
 r_{fe} คือ ความต้านทานซึ่งแทนความสูญเสียแกนหลัก
 x_{mM} คือ รีแอกแตนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก

ซึ่ง Z_{OM} นี้เป็นอิมพีแดนซ์ซึ่งแปลงมาจากอิมพีแดนซ์กระตุ้นเดิมที่มี r_{fe} และ x_{mM} ขนานกันอยู่ โดย Z_{OM} จะแปลงส่วนที่ขนานกันอยู่ให้อยู่ในรูปความต้านทานและรีแอกแตนซ์ที่อนุกรมกันอยู่เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา

กระแสซึ่งไหลเข้าขดลวดหลักจะได้มาจาก ผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์กระตุ้น (Exiting Branch Current, $I_{\phi M}$) กับกระแสในแกนหลักของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงกับสเตเตอร์ (I_Y) ซึ่งสามารถพิจารณาได้เป็นสมการ 3.35 และพิจารณาจากภาพเวกเตอร์รูปที่ 3.12

$$I_M = I_Y + I_{\phi M} \quad (3.35)$$

ซึ่งจะได้เป็น

$$I_{\phi M} = I_M - I_Y \quad (3.36)$$

นำสมการ 3.36 มาแทนในสมการที่ 3.33 จะได้

$$E_M = (I_M - I_Y) Z_{OM} \quad (3.37)$$

สุดท้ายจะได้สมการ

$$V = Z_{OM}(I_M - I_Y) + I_M Z_{IM} \quad (3.38)$$

ซึ่ง Z_{IM} คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดหลัก เท่ากับ $r_{IM} + jx_{IM}$ (3.39)

ค่าเวกเตอร์ของสมการที่ 3.38 สามารถพิจารณาได้เป็นดังรูปที่ 3.11

การหาสมการความสัมพันธ์ที่สอง หาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดช่วยมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันตกคล่อมอิมพีแดนซ์ของขดลวดช่วย แรงดันตกคล่อมอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาจากฟลักซ์ร่วมของฟลักซ์ในแนวแกนขวางหรือแกนสตาร์ท โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$E_s = I_{\phi s} Z_{os} \quad (3.40)$$

ซึ่ง $I_{\phi s}$ = กระแสกระตุ้นของขดลวดช่วย

$$Z_{os} = \text{อิมพีแดนซ์กระตุ้นของขดลวดช่วย} = a^2 Z_{OM}$$

กระแสทั้งหมดของขดลวดช่วย สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสกระตุ้นของขดลวดช่วยกับกระแสในแกนสตาร์ทของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงกับสเตเตอร์ (I_x)

$$I_s = I_x + I_{\phi s} \quad (3.41)$$

$$I_{\phi s} = I_s - I_x \quad (3.42)$$

นำสมการ 3.42 มาแทนในสมการที่ 3.40 จะได้

$$E_s = (I_s - I_x) Z_{os} \quad (3.43)$$

สุดท้ายจะได้สมการ

$$V = Z_{os}(I_s - I_x) + I_s(Z_{is} + Z_c) \quad (3.44)$$

ซึ่ง Z_{is} คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดช่วย เท่ากับ $r_{is} + jx_{is}$ (3.45)

และ Z_c คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ เท่ากับ $r_c + jx_c$ (3.46)

กระแสที่ไหลในแกน y หรือแกนหลักของโรเตอร์เป็นผลมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 ค่าด้วยกันคือ

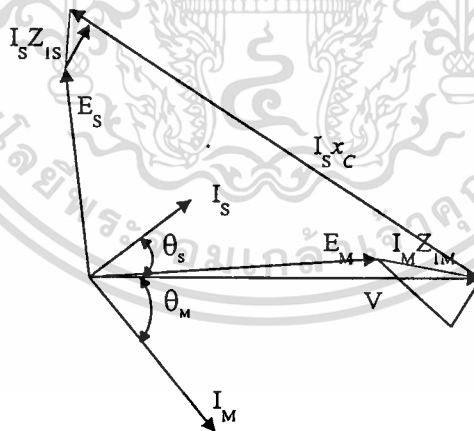
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Transformer Action อันเนื่องมาจากฟลักแม่เหล็กแกนหลัก

$$Z_{OM}(I_M - I_Y) \quad (3.47)$$

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Speed Action (V_{SM}) ซึ่งได้จากตัวนำในโรเตอร์หมุนไปตัดผ่านฟลักแม่เหล็กในแกนสตาร์ต

$$jSZ_{OS}(I_S - I_X) + SI_X x_2 \quad (3.48)$$

รูปที่ 3.11 แผนภาพเวกเตอร์สมการความสัมพันธ์ของขดลวดหลักและขดลวดช่วย



เปลี่ยนสมการ 3.48 มาอ้างอิงแกน y หรือแกนหลัก

$$jS(Z_{OS}/a^2)(I_S - I_X)a + SaI_X x_2 \quad (3.49)$$

สุดท้ายจะได้ V_{SM} เท่ากับ

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก Speed Action (V_{SM}) ซึ่งได้จากตัวนำในโรเตอร์หมุนไปตัดผ่านฟลักแม่เหล็กในแกนสตาร์ท

$$jSZ_{OM}(I_M - I_Y) - SI_Yx_2 \quad (3.55)$$

$$S[-jZ_{OM}(I_M - I_Y) - I_Yx_2] \quad (3.56)$$

และจากทฤษฎีของเคอร์ชอฟฟ์ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในสมการที่ 3.53 และสมการที่ 3.54 กับแรงดันตกคร่อม อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ในแกนหลัก จะมีค่าเท่ากับศูนย์

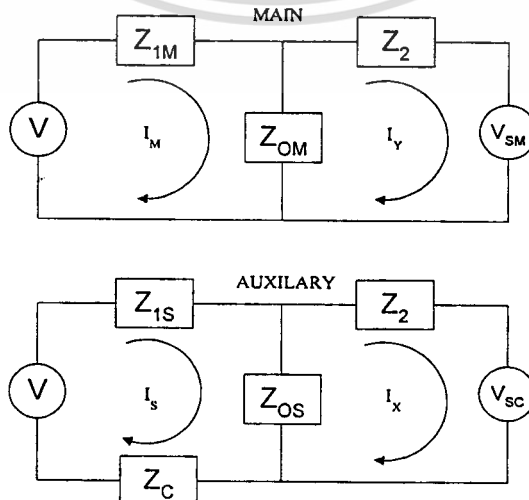
$$(Z_{OS}/a)(I_S - I_X) + S[-jZ_{OM}(I_M - I_Y) - I_Yx_2] + I_Y^*Z_2 = 0 \quad (3.57)$$

หรือ

$$(Z_{OS}/a)(I_S - I_X) + V_{SC} + aI_XZ_2 = 0 \quad (3.58)$$

ถึงตอนนี้จะได้สมการความสัมพันธ์ 4 สมการ คือ สมการ 3.38, 3.44, 3.52, 3.58 ซึ่งมีตัวแปรค่ากระแสมอยู่ 4 ค่า คือ I_M , I_S , I_Y , I_X ส่วนภาพวงจรสมมูลของมอเตอร์ขนาดเล็กเมื่อทำการพิจารณาขณะต่อหลายขดลวด แสดงได้ดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์ขนาดเล็กขณะต่อหลายขดลวดโดยใช้ทฤษฎีสานแม่เหล็กตัดขวาง



จากรูปที่ 3.13 เมื่อทำการแทนค่าแรงดัน กระแส และ อิมพีแดนซ์ต่างๆ ด้วยส่วนที่เป็นค่าจำนวนจริงและส่วนค่าจินตภาพ และจัดรูปใหม่โดยแบ่งส่วนค่าจำนวนจริงและส่วนค่าจินตภาพออกจากกัน ทำให้ได้เมตริกซ์ขนาด $[6 \times 6] [6 \times 1] = [6 \times 1]$ ดังสมการที่ 3.60 โดยที่

$I_M = I_{MRE} + jI_{MIM}$	กระแสของขดลวดหลักของสเตเตอร์
$I_Y = I_{YRE} + jI_{YIM}$	กระแสในแนวแกนฟลักซ์แม่เหล็กหลักของโรเตอร์
$I_S = I_{SRE} + jI_{SIM}$	กระแสของขดลวดหลักของสเตเตอร์
$I_X = I_{XRE} + jI_{XIM}$	กระแสในแนวแกนฟลักซ์แม่เหล็กขวางของโรเตอร์
$Z_{OM} = r_{OM} + jx_{OM}$	อิมพีแดนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก
$Z_{OS} = r_{OS} + jx_{OS}$	อิมพีแดนซ์กระตุ้นของขดลวดช่วย
$Z_M = r_M + jx_M$	อิมพีแดนซ์รั่วของขดลวดหลัก
$Z_S = r_S + jx_S$	อิมพีแดนซ์รั่วของโรเตอร์
$Z_2 = r_2 + jx_2$	อิมพีแดนซ์รั่วของโรเตอร์ เมื่ออ้างอิงขดลวดหลัก
$Z_{2S} = r_{2S} + jx_{2S}$	อิมพีแดนซ์รั่วของโรเตอร์ เมื่ออ้างอิงขดลวดหลัก
$Z_C = r_C + jx_C$	อิมพีแดนซ์รั่วของคาปาซิเตอร์

$$[Z][I]=[V]$$

(3.59)

$$\begin{bmatrix}
 r_{Im} + r_{Om} & -r_{Om} & 0 & 0 & x_{Im} + x_{Om} & -x_{Om} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & r_{Ia} + r_c + a^2 r_{Om} & -a^2 r_{Om} & 0 & 0 & x_{Ia} - x_c + a^2 x_{Om} & -a^2 x_{Om} \\
 r_{Om} & -(r_{Om} + r_2) & -sax_{Om} & sa(x_{Om} + x_2) & x_{Om} & -(x_{Om} + x_2) & srx_{Om} & -srx_{Om} \\
 sx_{Om} & -s(x_{Om} + x_2) & ax_{Om} & -a(r_{Om} + r_2) & -sr_{Om} & sr_{Om} & ax_{Om} & -a(x_{Om} + x_2) \\
 -(x_{Im} + x_m) & x_{Om} & 0 & 0 & r_{Im} + r_{Om} & -r_{Om} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -x_{Ia} + x_c - a^2 x_{Om} & a^2 x_{Om} & 0 & 0 & r_{Ia} + r_c + a^2 r_{Om} & -a^2 r_{Om} \\
 -x_{Om} & x_{Om} + x_2 & -sax_{Om} & sa(x_{Om} + x_2) & r_{Om} & -(r_{Om} + r_2) & -srx_{Om} & sa(x_{Om} + x_2) \\
 sr_{Om} & -sr_{Om} & -ax_{Om} & a(x_{Om} + x_2) & sx_{Om} & -s(x_{Om} + x_2) & ax_{Om} & -a(r_{Om} + r_2)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_{MRE} \\
 I_{SRE} \\
 I_{SRE} \\
 I_{SRE} \\
 I_{MIM} \\
 I_{YIM} \\
 I_{SIM} \\
 I_{XIM}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 V_{RE} \\
 V_{RE} \\
 0 \\
 0 \\
 V_{IM} \\
 V_{IM} \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

.....(3.60)

ในการหาคำตอบของสมการเมตริกซ์ (3.60) นั้นสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เช่น Gauss Elimination Method หรือ Cramer's Rule เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถหาค่ากระแสได้ทันทีเช่น โปรแกรม MATHCAD, MATHEMATICA และ MATLAB เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม MATHCAD ซึ่งเมื่อหาค่ากระแสได้

แล้วก็นำไปคำนวณหาคุณลักษณะและค่าสมรรถนะ (Characteristic and performance) ของมอเตอร์ ขนาดเล็กขณะต่อหลายขดลวด ณ ที่ ความเร็วของโรเตอร์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อตัวเก็บประจุถาวร

		Full Load	Break Down	Locked Rotor
1	อัตราส่วนความเร็วต่อความเร็วซิงโครนัส	.958	.8	0
2	I_M			
3	I_s			
4	I_y			
5	I_x			
6	กระแสอินพุทหรือกระแสไลน์ = (2) + (3)			
7	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ = $(3)^2 * Z_c$			
8	กำลังไฟฟ้าอินพุท = $V * (6)$			
9	ความสูญเสียในขดลวดหลัก = $(2)^2 * r_{IM}$			
10	ความสูญเสียในขดลวดช่วย = $(3)^2 * (r_{is} + r_c)$			
11	ความสูญเสียของตัวนำในโรเตอร์ = $[(4)^2 + a^2 (5)^2] * r_2$			
12	แรงเสียดทานและแรงลม (F&W)			
13	ความสูญเสียรวม = $(9) + (10) + (11) + (12) + \text{CORELOSS}$			
14	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุท = $(8) - (13)$			
15	แรงบิด = $9.55 * (14) / (S * N_s)$ N-m			
16	ประสิทธิภาพ. = $(14) / (8)$			
17	$P.F = (8) / (V * (6))$			

3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Polyphase Induction Motor)

3.3.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

ในการพิจารณาการทำงานของมอเตอร์หลายเฟส สามารถกระทำได้โดย การแปลงให้อยู่ในรูปของเครื่องจักรเบื้องต้นเพื่อการเทียบเคียง ซึ่งจะต้องทำ 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 ค่าโวลเตจและกระแสทั้ง 3 เฟส จะถูกแปลงค่าให้อยู่ในรูปของ 2 เฟส ความถี่ในวงจรโรเตอร์ (ค่าความถี่ที่สลิป) และในวงจรสเตเตอร์ (ความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ) จะไม่มีการเปลี่ยนค่า

ขั้นที่ 2 ไม่ต้องแปลงรูป ปริมาณของวงจรสเตเตอร์ แต่สำหรับวงจรในโรเตอร์จะต้องแปลงค่าจากแกนอ้างอิง 2 เฟสของโรเตอร์ ให้เป็นแกนอ้างอิง 2 เฟส ของสเตเตอร์

รายละเอียดในการหาสมการเฟสเซอร์สามารถศึกษาได้จาก [8] ในบทนี้จะนำเสนอสมการเฟสเซอร์โดยทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มาแสดงได้ดังสมการที่ 3.61

$$\begin{bmatrix} V_A \\ jV_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_D & 0 & j\omega M & 0 \\ 0 & r_1 + j\omega L_D & 0 & j\omega M \\ j\omega M & -(1-s)\omega M & r_2 + j\omega L_d & -(1-s)\omega L_d \\ (1-s)\omega M & j\omega M & (1-s)\omega L_d & r_2 + j\omega L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ jI_A \\ I_a \\ jI_a \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

จากข้างต้น จัดรูปให้เป็น 2 สมการ และคูณสมการโวลเตจของโรเตอร์ด้วย $1/s$ จะได้

$$V_A = (r_1 + j\omega L_D)I_A + j\omega MI_a \quad (3.62)$$

$$0 = (r_2/s + j\omega L_d)I_a + j\omega MI_A \quad (3.63)$$

โดยที่ r_1 คือ ค่าความต้านทานแต่ละเฟสของสเตเตอร์
 r_2 คือ ค่าความต้านทานแต่ละเฟสของโรเตอร์
 L_D คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์
 L_d คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์
 M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม

V_A คือ แรงดันเฟสที่สเตเตอร์

3.3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์หลายเฟส

สมการที่ 3.63 นั้นสามารถนำมาแสดงวงจรสมมูลได้ ดังรูปที่ 3.14 (ก) จะคล้ายกับสมการของหม้อแปลงเฟสเดียว จากรูปที่ 3.14(ก) สามารถแสดงวงจรสมมูล ได้ดังสมการ 3.64 และสมการ 3.65

$$V_A = [r_1 + j\omega(L_D - M)]I_A + j\omega M(I_A + I_a) \tag{3.64}$$

$$0 = [r_2/s + j\omega(L_d - M)]I_a + j\omega M(I_A + I_a) \tag{3.65}$$

ในวงจรสมมูลทั่วไป ค่าความสูญเสียในสเตเตอร์นั้นจะรวมอยู่ในวงจรสมมูลด้วย ดังรูปที่ 3.14(ค) ซึ่งมีความต้านทาน R_{fe} ที่ขนานอยู่กับ X_m ค่าของทางวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์จะมีอักษรย่อ 1, 2 ค่าทางโรเตอร์ถ้าย้ายมาทางสเตเตอร์จะมีลักษณะ ดังนี้ เช่น r'_2 เป็นต้น

- r'_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
- x'_2 คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วซึมที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
- I'_2 คือ ค่ากระแสโรเตอร์ที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
- x'_{m1} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ในส่วนสนามกระตุ้นที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
- r_1 คือ ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์
- x_1 คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วซึมของสเตเตอร์

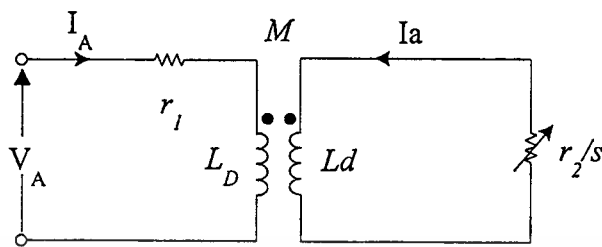
ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ย้ายไปมาจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์อัตราส่วนจำนวนรอบระหว่างสเตเตอร์ต่อโรเตอร์ คือ n

$$r'_2 = n^2 r_d = n^2 r_2$$
$$x'_{m1} = n\omega M = \omega L_{m1}$$
$$x_1 = \omega L_D - x_{m1}$$
$$x'_2 = n^2 \omega L_d - x_{m1}$$

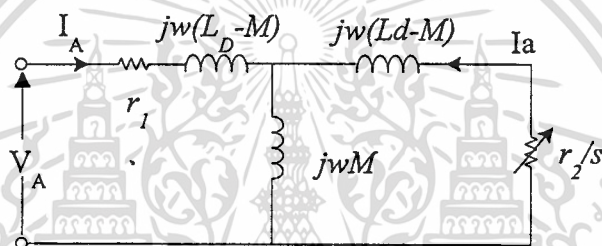
$$I_1 = I_A$$
$$I'_2 = -I_a/n$$
$$V_1 = V_A$$

(3.66)

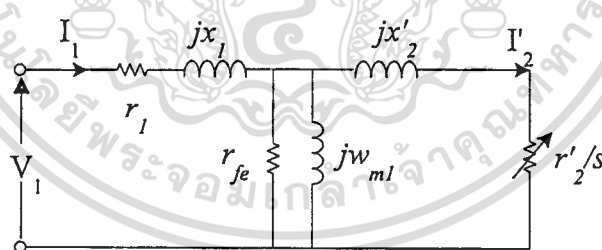
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูล เฟสเดียวของมอเตอร์หลายเฟส



(ก) วงจรสมมูล



(ข) วงจรสมมูล แบบ T



(ค) วงจรสมมูล ที่ย้ายค่าทั้งหมดไปด้านสเตเตอร์

3.3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวงจรสมมูลของมอเตอร์หลายเฟส

วงจรสมมูล ในรูปที่ 3.14(ค) สามารถใช้เป็นวงจรเพื่อวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่น เราสามารถพิจารณาคุณลักษณะของโหลดได้ทั้ง แบบ Full Load แบบ Break Down และแบบ Locked Rotor ได้โดยใช้ค่าสลิปของมอเตอร์ (S) ในการวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้

พิจารณาที่	Full-load	$s = (n_s - n)/n_s$
พิจารณาที่	Breaks down	$s = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + X^2}}$
พิจารณาที่	Locked rotor	$s = 1$

3.3.4 วิธีการหาค่าคงที่และขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์

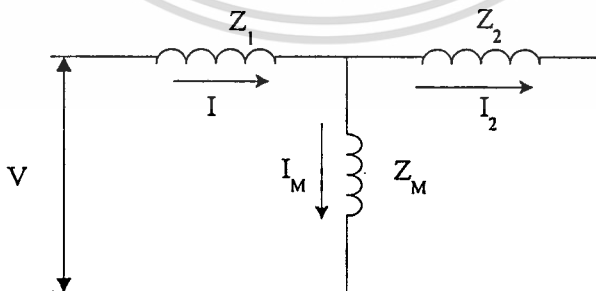
ในรูปที่ 3.15 แสดงวงจรสมมูลย์ที่รวมค่า Resistance กับ Reactance ให้อยู่ในรูปของค่า Impedance พบว่ากระแสสามารถเขียนในรูปอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$I = \frac{V(Z_M + Z_2)}{Z_1 Z_M + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_M} \quad (3.67)$$

$$I_2 = \frac{V Z_M}{Z_1 Z_M + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_M} \quad (3.68)$$

$$I_M = \frac{V Z_2}{Z_1 Z_M + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_M} \quad (3.69)$$

รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลย์ที่อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์



จากสมการที่ 3.67 ถึงสมการที่ 3.69 จะทำให้การแทนค่าความต้านทานและ รีแอกแตนซ์ ได้ง่ายขึ้น ในการคำนวณทางตัวเลข ได้กำหนดตัวแปรและค่าคงที่ [9] สมการดังนี้ เพื่อช่วยให้การคำนวณสะดวกยิ่งขึ้น ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ง่ายขึ้น ในการคำนวณทางตัวเลข ได้กำหนดตัวแปรและค่าคงที่ [9] สมการดังนี้ เพื่อช่วยให้การคำนวณสะดวกยิ่งขึ้น ดังนี้

$$I = \frac{A_5 + A_6/s + jA_7}{U + jW} = \frac{F_5 + F_6/s + jV}{U + jW} \tag{3.66}$$

$$I_2 = \frac{A_5 + jA_6}{U + jW} = \frac{F_7}{\sqrt{U^2 + W^2}} \tag{3.67}$$

$$I_M = \frac{A_6/s + jA_{10}}{U + jW} \tag{3.68}$$

โดยที่ $U = A_1 + \frac{A_2}{s} = \frac{F_8}{s} - F_1$ (3.69)

$$W = A_3 + \frac{A_4}{s} = F_4 + \frac{F_2}{s} \tag{3.70}$$

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ A และค่าคงที่ F สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส

F-constant	A-constant	Expression for constant
F_1	$-A_1$	$X - \frac{r_M}{X_0} r_1$
F_2	A_4	I_2
F_3	A_2	$r_2(r_1 + r_M)/X_0$
F_4	A_3	$r_1 + \frac{2}{1 + Kp} \frac{r_M X}{X_0}$
F_5	A_5	$I_M r_M$
F_6	A_6	$I_M r_2$
F_7	A_9	$V \sqrt{Kp^2 + (r_M + X_0)^2}$
	A_7	V
	A_8	$V Kp$
	A_{10}	$\frac{I_M X}{1 + Kp}$

วิธีการใช้ตารางการคำนวณสามารถเข้าใจและทำตามขั้นตอนต่างๆได้ ส่วนค่าสลิปกำหนดได้ดังข้อที่ 1

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์หลายเฟส

Constant of Motor	Item		Full Load	Break Down	Lock Rotor
$V =$	1	Slip = S (assume)			
$m =$	2	1/s			
$X =$	3	1-s			
$X_0 =$	4	F_1			
$K_p = \sqrt{(X_s - X)/X_s} =$	5	$F_3 \times (2)$			
F&W (watts) =	6	$U = (5) - (4)$			
$I_0 = V/X_0 =$	7	F_4			
ค่าสูญเสียแกนเหล็ก =	8	$F_2 \times (2)$			
$r_M = \text{core loss}/m I_0^2 =$	9	$W = (7) + (8)$			
$r_1 =$	10	$\sqrt{U^2 + W^2}$			
$F_1 = r_1 =$	11	F_5			
$F_3 = r_2(r_1 + r_M)/X_0 =$	12	$F_6 \times (2)$			
$F_1 = X - (r_M R_1)/X_0 =$	13	$(11) + (12)$			
$F_4 = r_1 - (r_M X)/X_0 =$	14	$\sqrt{(13)^2 + V^2}$			
$F_5 = I_0 r_M =$	15	$I = (14) + (10)$			
$F_6 = I_0 r_2 =$	16	$I_2 = F_7 + (10)$			
$F_7 = VK_p =$	17	Pri. Loss = $I^2 r_1 m$			
แรงบิดสตาร์ท = $112.7(18)_{\text{oz-ft}} / \text{syn rpm (oz-ft)}$	18	Sec. Loss = $I_2^2 r_2 m$			
Slip at BD = $s_m = r_2 / \sqrt{r_1^2 + X^2}$	19	ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก			
	20	Sec. Output = $(18) \times (2) \times (3)$			
	21	อินพุต = $(17) + (18) + (19) + (20)$			
	22	แรงเสียดทานและแรงลม			
	23	เอาท์พุต = $(20) - (22)$			
	24	Rpm = $(3) \times \text{syn. Rpm}$			
	25	แรงบิด = $28.65 \times (23) / (24)$ N-M			
	26	ประสิทธิภาพ = $(23) / (21) \times 100$			
	27	P.F = $(21) \times 100 / V I_m$			

3.4 สรุป

เนื้อหาส่วนใหญ่ได้แสดงหลักการในการคำนวณมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส โดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง การพิจารณาได้แบ่งตามขดลวดที่ลงในสลิตของสเตเตอร์ คือ ขมดต่อขดลวดเพียงขดเดียว และ ขมดต่อขดลวดหลายขด ส่วนการพิจารณารูปแบบของมอเตอร์หลายเฟส สามารถนำการพิจารณาของการต่อเพียงขดเดียวมาใช้ได้เลย แต่ขั้นตอนในการคำนวณสมรรถนะจะแตกต่างกัน ในการคำนวณต่างๆที่ผ่านมาแล้วนั้น ก็เพื่อที่จะหาค่าคงที่ต่างๆ เพื่อนำไปแทนค่าในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แล้วนำค่าต่างๆ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าสมรรถนะดังตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 การคำนวณจริงตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4



บทที่ 4

การออกแบบมอเตอร์และระบบควบคุมของเครื่องอัด

4.1 กล่าวนำ

มอเตอร์เครื่องอัดแบบ 3 เฟส โดยทั่วไป มักจะมีขนาดใหญ่และแรงม้าสูง ทำให้ไม่เหมาะกับงานประเภทเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก ซึ่งมักใช้มอเตอร์เครื่องอัดแบบ 1 เฟส ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนามอเตอร์เครื่องอัด จาก 1 เฟส ที่ใช้กันทั่วไป มาเป็นมอเตอร์เครื่องอัด 3 เฟส โดยคงรูปร่างเท่าของเดิม จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น เพราะว่ามีข้อดีทางการควบคุม คือสามารถนำมอเตอร์ดังกล่าวไปใช้งานกับระบบควบคุมเป็นแบบ Inverter speed control ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นที่ยอมรับว่า สามารถประหยัดพลังงาน และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ตลอดช่วงใช้งาน นอกจากนี้ยังทำให้การผลิตเป็นไปอย่างง่ายดาย เนื่องจากสามารถผลิตจากไลน์การผลิตเดิมได้ เพียงแต่ปรับเปลี่ยนการออกแบบทางด้านขดลวดเท่านั้น

ในบทนี้ได้แบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก เป็นการออกแบบมอเตอร์ทั้งแบบ 1 เฟส ชนิด PSC และ แบบ 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz โดยได้แสดงค่าต่างๆที่ได้จากคำนวณอย่างละเอียด อาทิเช่น ค่าคงที่ของสเตเตอร์และโรเตอร์ลามีเนต ค่าคงที่ขดลวด ค่าของวงจรแม่เหล็ก ค่ารีแอคแตนซ์ และ สมรรถนะต่างๆของมอเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้แสดงการออกแบบมอเตอร์โดยคอมพิวเตอร์ และนำผลการออกแบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นทำการสร้างมอเตอร์ต้นแบบขึ้น ส่วนที่สอง ได้แสดงรายละเอียดของระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ อาทิเช่น หลักการทำงานของ SPWM Inverter ข้อกำหนดของ อินเวอร์เตอร์และตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ที่เลือกใช้งาน และการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดของระบบเข้าด้วยกัน

4.2 การออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส

การคำนวณเพื่อการออกแบบที่จะแสดงต่อไปนี้ ได้แสดงเป็นรายละเอียดพร้อมสมการต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งเป็นสมการในการหาค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก โดยการออกแบบนี้จะได้เป็นมอเตอร์ของเครื่องอัด 1 เฟส แบบ PSC ซึ่งใช้กับเครื่องปรับอากาศขนาดเล็กขนาด 1.5 แรงม้า ใช้น้ำยา R22 ส่วนการประยุกต์ใช้งานเป็นแบบ HBP มีขนาดของการทำความเย็นเท่ากับ 4200 watts หรือ 14330 Btu-hr ณ สภาวะโหลดเต็ม ค่ากำลังงานทางไฟฟ้าที่ใช้กำหนดเท่ากับ 1493 watts กระแสที่ใช้เป็น 7.2 แอมแปร์ ทางด้านอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้คือ ตัวเก็บประจุขนาด 25 ไมโครฟารัด ต่อเชื่อมอยู่ระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วย พิจารณารายละเอียดต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของมอเตอร์เครื่องอัด 1 เฟส แบบ PSC ที่ต้องการออกแบบขณะทำงาน ณ สภาวะโหลดเต็ม

ลำดับที่	คุณลักษณะและสมรรถนะ	ค่าที่ต้องการ	หน่วย
1	ค่าทำความเย็น	4200	Watt
2	พลังงานไฟฟ้า	1493	Watt
3	กระแส	7.2	Amp
4	แรงม้า	1.5	Hp
5	แรงบิด	4.1	N-m
6	ประสิทธิภาพ	95	%
7	เพาเวอร์แฟกเตอร์	80	%
8	ความเร็วรอบ	2875	RPM

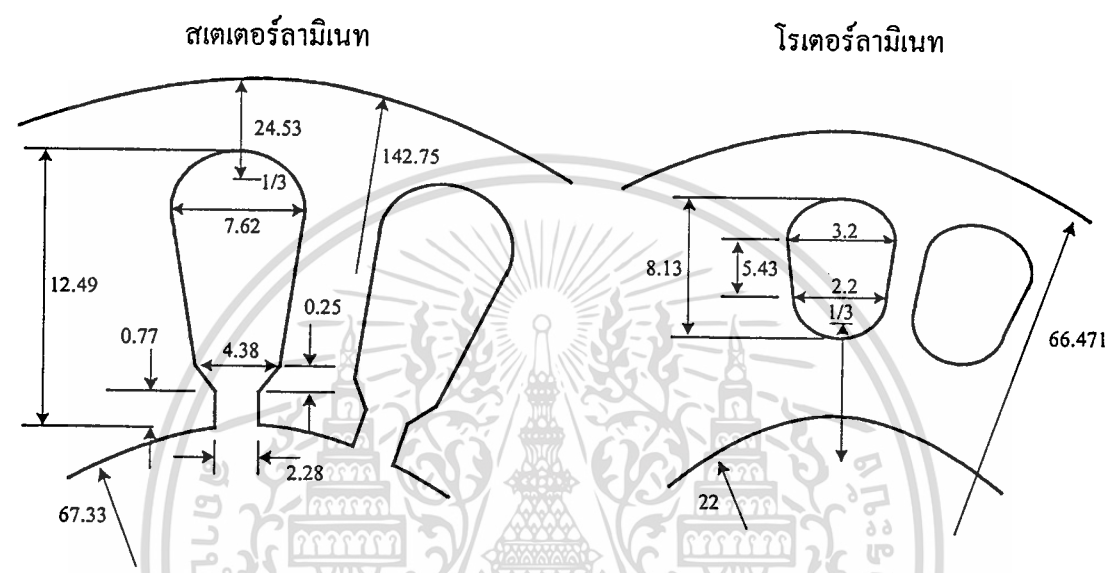
4.2.1 การออกแบบแผ่นลามิเนท (Laminate Designing) [10]

แผ่นลามิเนทเป็นแผ่นเหล็กบาง ความหนา 0.50 มม. เกรด H60 ที่นำมาซ้อนกันเป็นแกนเหล็กของทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ แผ่นลามิเนทมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นทั้งทางเดินของฟลักแม่เหล็ก และเป็นส่วนรองรับขดลวดในการพันเป็นมอเตอร์ ดังนั้นในขั้นตอนของการออกแบบจึงต้องทำการคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของแผ่นลามิเนททั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ เพื่อนำค่าไปใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าคงที่ในส่วนอื่นๆ ต่อไป ค่าเริ่มต้นที่ต้องทราบ เพื่อนำมาหาค่าค่าคุณลักษณะ ของ สเตเตอร์และของโรเตอร์ มีค่าดังในรูปที่ 4.1 (ทุกค่ามีหน่วยเป็น มม)

รูปที่ 4.1 รูปร่างของสเตเตอร์ลามีเนทและโรเตอร์ลามีเนท



จากสมการที่ 1 ถึงสมการที่14 ในภาคผนวก ก สามารถหาค่าคุณลักษณะของสเตเตอร์ลามีเนทและของโรเตอร์ลามีเนทได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคุณลักษณะที่คำนวณได้ของสเตเตอร์ลามีเนทและของโรเตอร์ลามีเนท

ค่าคุณลักษณะ	สเตเตอร์(mm)	โรเตอร์(mm)
เส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดกึ่งกลางช่องสลีต	85.67	57.81
ความยาวของซี่สลีต	15.42	7.059
ความลึกส่วนโครง	24.53	14.33
พื้นที่หน้าตัดของช่องสลีต	84.83	20.25
ค่าคงที่ช่องสลีตของส่วนที่เป็นอากาศ	0.429	1
ค่าคงที่ช่องสลีตของส่วนที่เป็นขดลวด	1.097	1.628

4.2.2 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในขั้นตอนต่อไป จะทำการกำหนดรูปแบบการพันขลวดขดลวดลงในสเตเตอร์ (Stator winding layout) โดยแบ่งเป็น ขดลวดหลักและขดลวดช่วย ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นมอเตอร์ 1 เฟส 2 ขั้ว สเตเตอร์ มี 24 ช่องสล็อต

รูปที่ 4.2 การลงขลวดในสล็อตของสเตเตอร์ แบบศูนย์กลางร่วม (Concentric Windings)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Main	x	x	x	x	x				o	o	o	o	o	37	36	31	24	16		16	24	31	36	37
1.218 mm	37	36	31	24	16			16	24	31	36	37	x	x	x	x	x			o	o	o	o	o
Aux			51	49	36	16	x	x	x	x					o	o	o	o	16	36	49	51		
.683 mm			x	x	x	x	51	49	36	16					16	36	49	51	o	o	o	o		

เครื่องหมาย X ในรูปที่ 4.2 แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า เครื่องหมาย O แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กพุ่งออก และค่าของ ตัวเลขในตาราง คือ จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละช่องสล็อต เมื่อได้รูปแบบการพันมอเตอร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคำนวณหาค่าคงที่ของขดลวดและค่าคงที่ในวงจรโรเตอร์ โดยใช้สมการที่ 15 ถึงสมการที่ 30 ในภาคผนวก ก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 220V/50Hz

การคำนวณของวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์	ขดลวดหลัก	ขดลวดช่วย
ระยะห่างเฉลี่ยในแต่ละด้านของขดลวดย่อย	7.75	8.78
ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ	410.68	392.2
ตัวประกอบความยาวการคำนวณความต้านทาน	1.579×10^{-2}	1.59×10^{-2}
ความต้านทานของขดลวดที่ 25 องศาเซลเซียส (โอห์ม)	1.37	5.46
ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิใดๆ (โอห์ม)	1.88	7.45
ความต้านทานของโรเตอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส(โอห์ม)	3.33	3.33

ทำการคำนวณหาค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก จากสมการที่ 31 ถึงสมการที่ 58 ในภาคผนวก ก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าของวงจรแม่เหล็กที่คำนวณได้

ส่วนของฟลักแม่เหล็ก	พื้นที่หน้าตัด (ตารางนิ้ว)	ความยาว (นิ้ว)	ความหนาแน่น (Tesla)	แอมแปร์- รอบ
แกนเหล็กสเตเตอร์	5.78	3.629	1.116	8
ซี่ลลิตสเตเตอร์	6.64	0.607	1.53	9
แกนเหล็กโรเตอร์	3.38	0.2	1.75	26
ซี่ลลิตโรเตอร์	4.345	0.028	2.15	24
ช่องว่างอากาศ	13.02	0.195	0.73	287

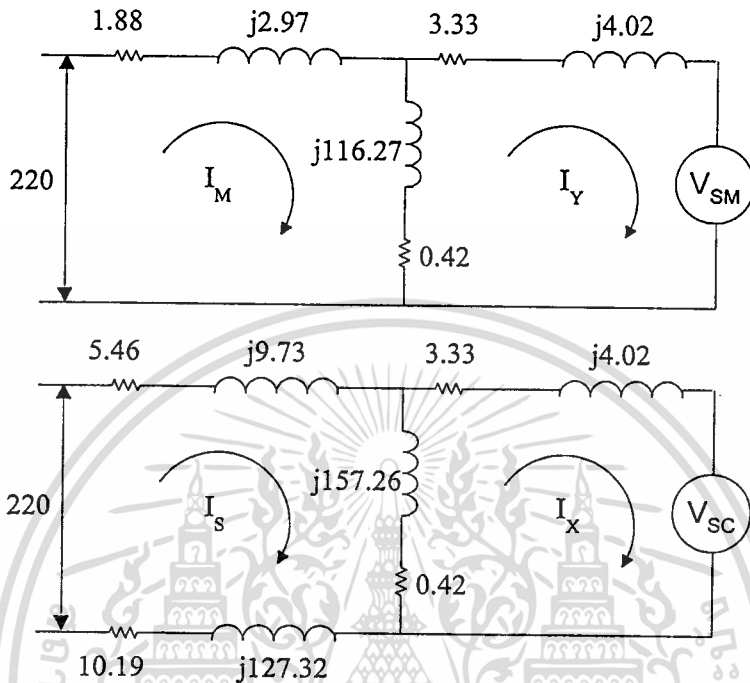
จากนั้น คำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ จากสมการที่ 59 ถึงสมการที่ 84 ในภาคผนวก ก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การหาค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 220V/50Hz

ค่ารีแอกแตนซ์	ค่าที่ได้	ค่ารีแอกแตนซ์	ค่าที่ได้
ช่องสลิตของสเตเตอร์	1.287	ส่วนปลาย	2.283
ช่องสลิตของโรเตอร์	2.075	ขดลวดหลัก	2.97
สลิตเฉียง	2.713	ขดลวดช่วย	9.73
ซิกแซก	0.086	โรเตอร์เมื่ออ้างอิงขดลวดหลัก	4.02
สายพาน	1.099	รีแอกแตนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก	116.2

นำค่าต่างๆ ที่ได้จากทุกขั้นตอน แทนค่าลงในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กแบบ 1 เฟส แสดงดังในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ 1 เฟส ที่ออกแบบขึ้น

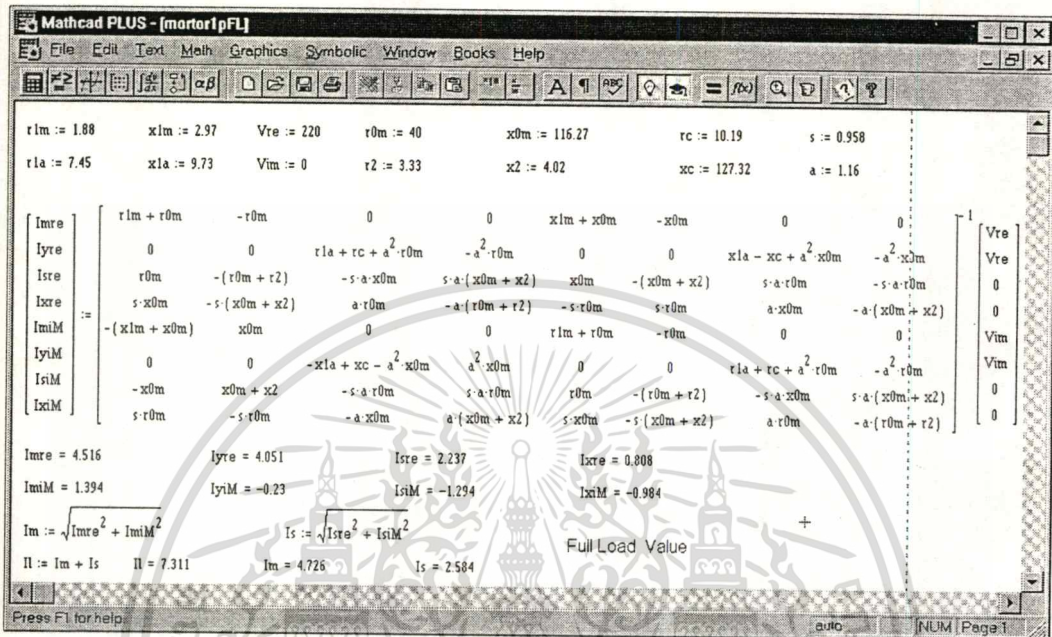


เมื่อได้วงจรสมมูลของมอเตอร์ 1 เฟส แบบ PSC เรียบร้อยแล้ว นำค่าต่างๆ จากวงจรแทนค่าลงในสมการเมตริกซ์ ที่ 3. 60 เพื่อหาค่ากระแส ทั้ง 4 ค่าตามทฤษฎีสถานแม่เหล็กตัดขวาง ดังนี้ คือ I_M , I_s , I_Y และ I_X กระแสดังกล่าวหาได้โดยใช้โปรแกรม MATHCAD 5.0 แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสมรรถนะต่างๆ ที่สภาวะทำงาน 3 แบบ คือ สภาวะโหลดเต็ม (Full Load), สภาวะแรงบิดสูงสุด (Breakdown) และ สภาวะหยุดนิ่ง (Locked Rotor)

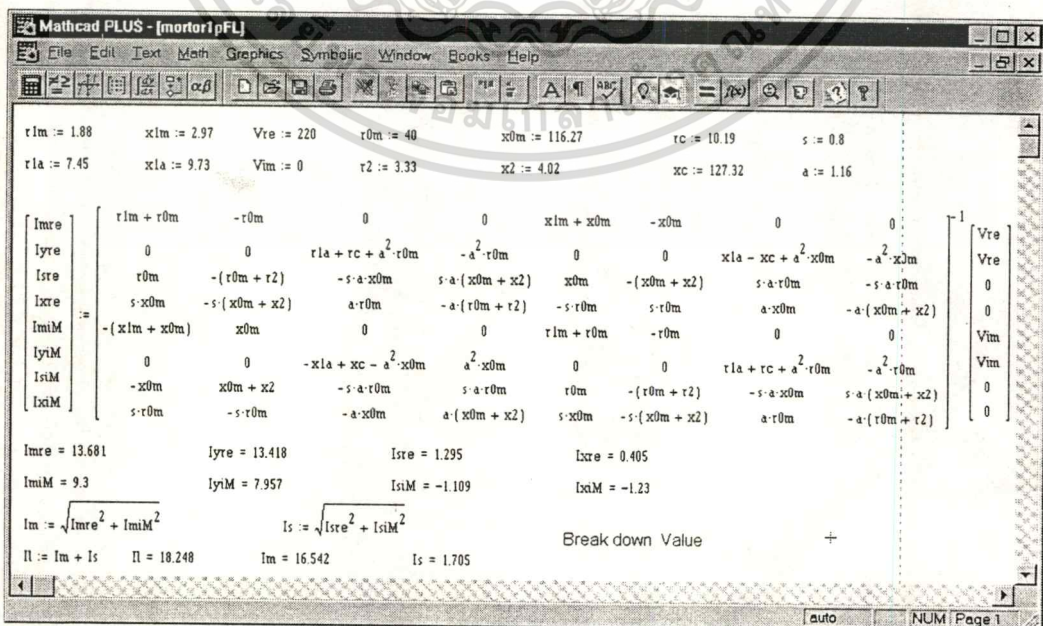
4.2.3 การคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส

เมื่อทราบค่าคงที่และค่ากระแสต่างๆแล้ว นำค่ามาแทนในขั้นตอนตามตารางที่ 4.6 เพื่อหาค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส แบบ PSC จะพบว่าค่าสมรรถนะต่างๆที่ได้ เช่น ค่ากระแส ค่าอินพุต แรงบิด เป็นไปตามที่ต้องการ แต่เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในการออกแบบ จึงได้แสดงการออกแบบมอเตอร์แบบเดียวกัน โดยใช้โปรแกรมออกแบบบนคอมพิวเตอร์ ดังหัวข้อที่ 4.3

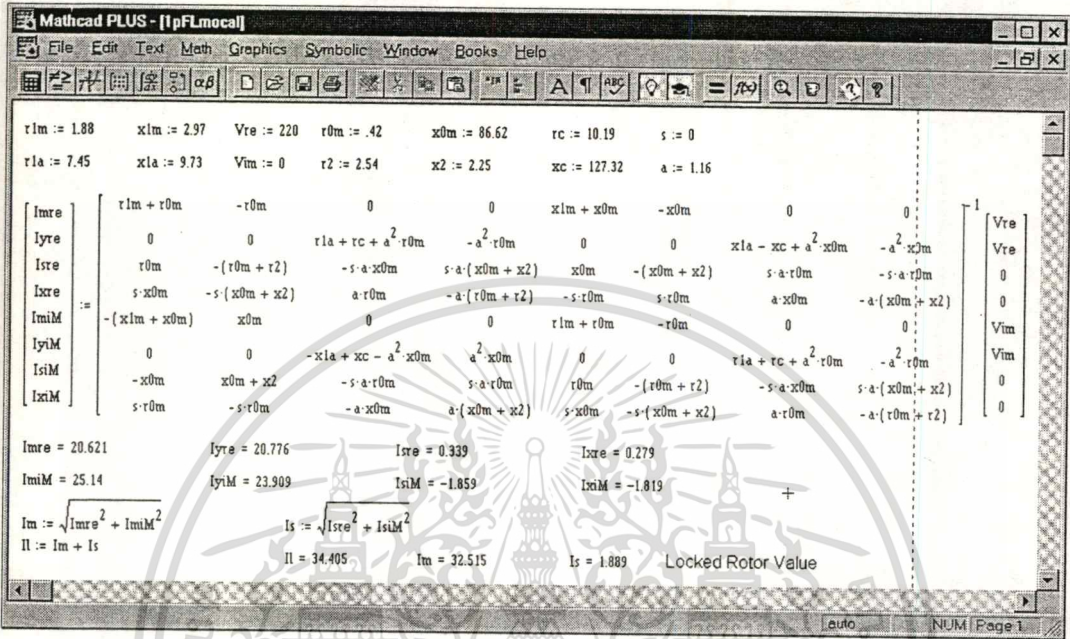
รูปที่ 4.4 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะโหลดเต็ม โดยใช้โปรแกรม MATHCAD
วิเคราะห์ ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง



รูปที่ 4.5 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะแรงบิดสูงสุด โดยใช้โปรแกรม
MATHCAD วิเคราะห์ ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง



รูปที่ 4.6 การหาค่ากระแสของมอเตอร์ 1 เฟส ณ สภาวะหยุดนิ่ง โดยใช้โปรแกรม MATHCAD
วิเคราะห์ ความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ ที่ได้จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กัดขวาง



ตารางที่ 4.6 ขั้นตอนการคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz

		Full Load	Break Down	Locked Rotor
1	อัตราส่วนความเร็วต่อความเร็วซิงโครนัส	.958	.8	0
2	I_M	4.726	16.54	32.51
3	I_S	2.584	1.705	1.889
4	I_Y	4.057	15.59	31.67
5	I_X	1.273	1.294	3.386
6	กระแสอินพุทหรือกระแสไลน์ = (2) + (3)	7.311	18.247	34.40
7	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ = $(3)^2 * Z_c$	330.4	371.28	455.74
8	กำลังไฟฟ้าอินพุท = $V * [RE(I_M) + RE(I_S)]$	1485	3294	4611
9	ความสูญเสียในขดลวดหลัก = $(2)^2 * R_{IM}$	41.98	514.44	1987.5
10	ความสูญเสียในขดลวดช่วย = $(3)^2 * (R_{IS} + R_C)$	117.78	51.28	62.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

11	ความสูญเสียของตัวนำในโรเตอร์ = $[(4)^2+a^2(5)^2]*R_2$	62.07	623.77	2586.7
12	แรงเสียดทานและแรงลม (F&W)	10	10	0
13	ความสูญเสียรวม = $(9)+(10)+(11)+(12)+CORELOSS$	233.83	1199.49	4647.2
14	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต = $(8)-(13)$	1251.17	2095.2	0
15	แรงบิด = $28.65*(14)/(S*N_s)$	4.15	8.38	0.69
16	ประสิทธิภาพ. = $(14)/(8)$	0.84	0.64	0
17	P.F = $(8)/(V*(6))$	0.92	0.82	0.60

4.2.4 การออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

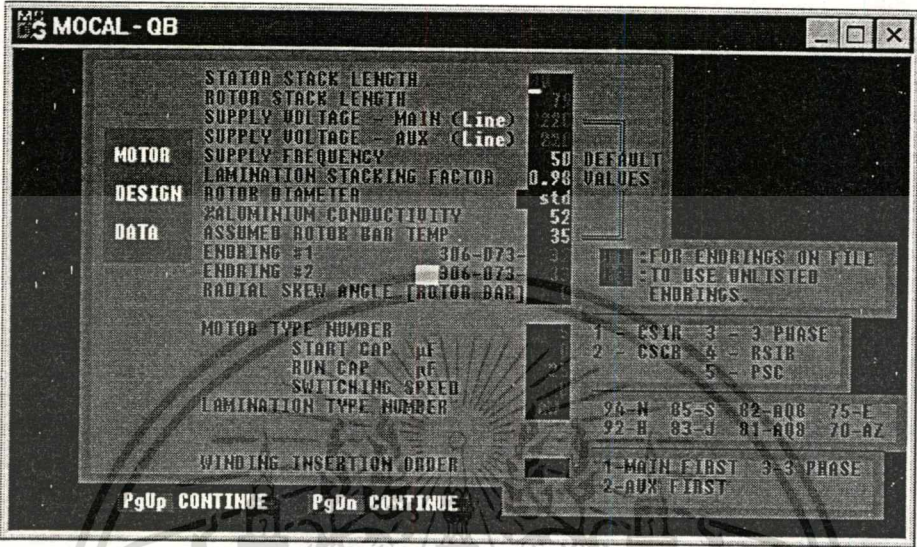
ในปัจจุบันการออกแบบมอเตอร์ของบริษัทที่ทำการผลิตเพื่อส่งขายแก่ลูกค้า บางบริษัทจะซื้อโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้เพื่อประหยัดเวลาในการวิเคราะห์และออกแบบมอเตอร์ แต่เนื่องจากโปรแกรกดังกล่าวเป็นลิขสิทธิ์ทางการค้านั้นผู้ใช้ไม่สามารถทราบได้เลยว่า ทางผู้ผลิตโปรแกรมใช้หลักการหรือทฤษฎีอะไร เพื่อที่จะนำมาเป็นแนวทางในการปรับแต่งหรือประยุกต์ให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ

ตัวอย่างการใช้โปรแกรมออกแบบมอเตอร์ 1 เฟสแบบ PSC ซึ่งมีคุณลักษณะและสมรรถนะดังตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกับการออกแบบที่ได้แสดงมาข้างต้น มีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

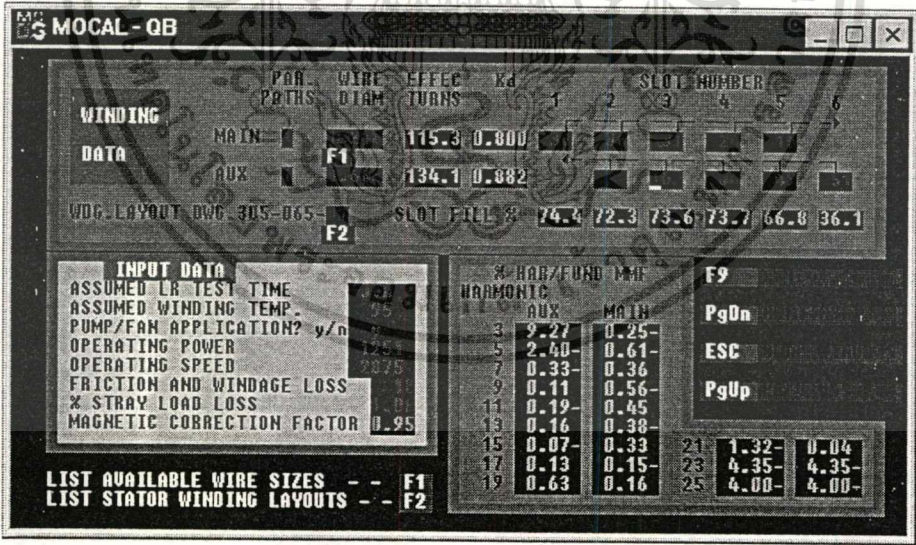
4.2.4.1 ค่าเริ่มต้นที่ต้องให้กับโปรแกรม เพื่อนำไปใช้หาค่าคงที่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ความหนาของแกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator stack length) เท่ากับ 80 มิลลิเมตร
- ความหนาของแกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor stack length) เท่ากับ 79 มิลลิเมตร
- แรงดัน (Voltage) เท่ากับ 220 Volts
- ความถี่ (Frequency) เท่ากับ 50 Hz
- ชนิดของวงแหวนลัดวงจร (End Ring) ในที่นี้คือ 306-073-32 และ 306-073-33
- มอเตอร์เป็นแบบ PSC ใช้ ค่าคาปาซิเตอร์ (Capacity) เท่ากับ 25 ไมโครฟารัด
- ชนิดของเหล็กที่ใช้ทำแกนหลัก (Lamination steel type) เป็นแบบ AW

รูปที่ 4.7 การป้อนค่าอินพุตในโปรแกรม



รูปที่ 4.8 การป้อนค่าอินพุตและการคำนวณของขดลวด



4.2.4.2 การป้อนค่าอินพุตและการคำนวณของขดลวด ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการลงขดลวดบนสลิตของสเตเตอร์ ซึ่งเป็นแบบ Concentric Winding และผลของฮาร์โมนิกที่คำนวณได้ พิจารณาจากในรูปที่ 4.8 จะพบว่า ส่วนบนของหน้าต่าง เป็นการป้อนขนาดของขดลวดและจำนวนรอบที่ใช้ สามารถพิจารณารายละเอียดในการ

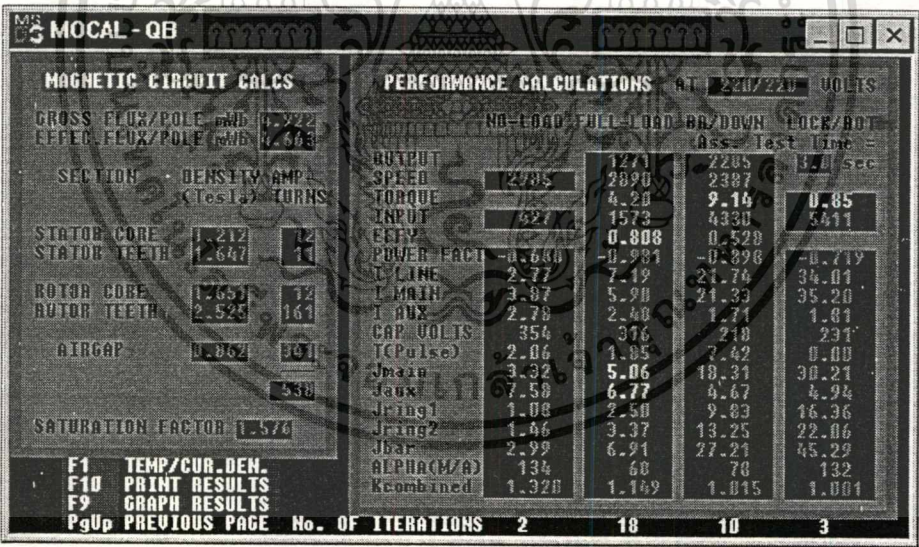
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันได้จากรูปที่ 4.2 ส่วนทางซ้ายมือด้านล่างของหน้าต่าง เป็นส่วนที่ต้องป้อนค่ากำลังงานและค่าสูญเสียเริ่มต้นให้กับโปรแกรม ส่วนทางขวามือด้านล่างของหน้าต่างแสดงผลการคำนวณค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

4.2.4.3 การแสดงผลของการออกแบบมอเตอร์ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในรูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างของผลการคำนวณสมรรถนะต่างๆ ของการออกแบบ พิจารณาจากในรูปจะพบว่า ส่วนทางซ้ายมือของหน้าต่าง แสดงค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก ส่วนทางขวามือแสดงค่าสมรรถนะต่างๆ โดยแบ่งตามสถานะในการทำงานเป็น 4 สถานะเรียงจากซ้ายไปขวา ดังนี้ คือ สถานะไร้โหลด (No load) สถานะโหลดเต็ม(Full load) สถานะแรงบิดสูงสุด(Break down) และ สถานะหยุดนิ่ง (Locked Rotor)

รูปที่ 4.9 การแสดงผลทางสมรรถนะของการออกแบบมอเตอร์โดยคอมพิวเตอร์



จากขั้นตอนในการออกแบบทั้ง 2 วิธี คือการออกแบบด้วยการคำนวณโดยตรง และการออกแบบโดยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ สามารถสรุปเปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 จะพบว่า ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยการคำนวณโดยตรง จะมีค่าน้อยกว่าการออกแบบโดยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์เล็กน้อย เนื่องจากในโปรแกรมใช้วิธีการประมาณค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

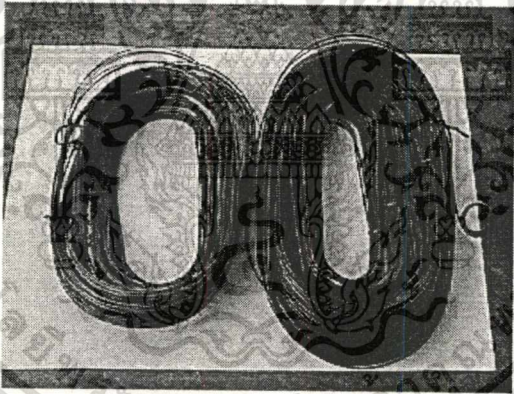
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการออกแบบของมอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz ทั้ง 2 วิธี

	Output (Watt)	Speed (RPM)	Torque (N-m)	Input (Watt)	Eff (%)	PF. (%)	I (Amp.)
Designed by Theory	1215	2875	4.15	1485	84	92	7.311
Designed by Program	1271	2890	4.20	1573	80.8	98.1	7.19

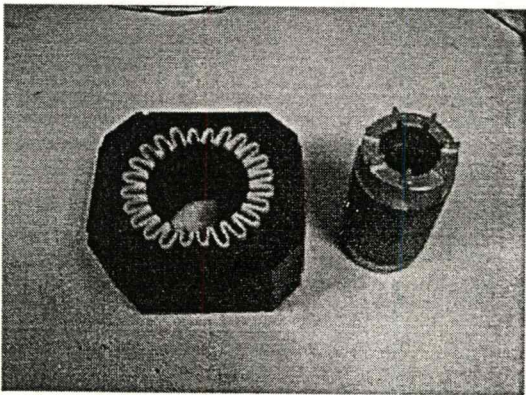
4.2.5 ขั้นตอนในการสร้างมอเตอร์ 1 เฟส

หลังจากได้ทำการออกแบบมอเตอร์ขนาดเล็ก 1 เฟส เสร็จแล้ว นำค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณมาสร้างมอเตอร์ต้นแบบ พิจารณาขั้นตอนในการเตรียม ได้ดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13

รูปที่ 4.10 ขดลวดที่เตรียมไว้สำหรับการพันแบบ Concentric winding

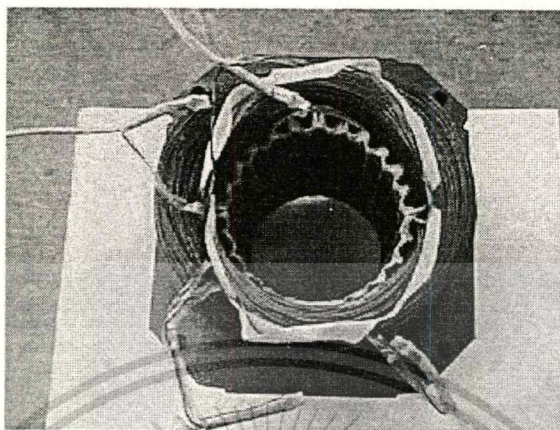


รูปที่ 4.11 รูปร่างของ สเตเตอร์และโรเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 รูปร่างของมอเตอร์ 1 เฟส ที่พันแล้วและเตรียมเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.13 รูปร่างของมอเตอร์ 1 เฟส ที่ทำเสร็จสมบูรณ์แล้ว



4.3 การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส

การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz ในการออกแบบใหม่นี้ จะใช้ข้อมูลอ้างอิงจาก มอเตอร์ 1 เฟส คือ ค่าความเร็วรอบ และค่าแรงบิดที่สภาวะโหลดเต็ม ส่วนขั้นตอนการออกแบบสามารถพิจารณาได้ตาม ขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การคำนวณที่ขอมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

รูปที่ 4.14 การลงขดลวดในสล็อตของสเตเตอร์ 24 ช่อง 2 ขั้ว 3 เฟส 220V/50Hz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	x	x	x							o	o	o	33	23	13							13	23	33
1.218 mm	33	23	13							13	23	33	x	x	x							o	o	o
B		13	23	33	x	x	x							o	o	o	33	23	13					
1.218 mm		o	o	o	33	23	13							13	23	33	x	x	x					
C					13	23	33	x	x	x							o	o	o	33	23	13		
1.218 mm					o	o	o	33	23	13							13	23	33	x	x	x		

รูปแบบการพันขดลวดเป็นแบบ Concentric Winding ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นมอเตอร์ 3 เฟส แบบ 220V/50Hz ต่อเชื่อมแบบ STAR จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ของขดลวด ค่าคงที่ในวงจรโรเตอร์ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก และค่ารีแอกแตนซ์ จากสมการที่ 15 ถึงสมการที่ 84 ในภาคผนวก ก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.8 การหาค่าคงที่ขอมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 220V/50Hz

การคำนวณของวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์	220V/50Hz
ระยะห่างเฉลี่ยในแต่ละด้านของขดลวดย่อย	9.69
ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ	473.7
ตัวประกอบความยาวการคำนวณความต้านทาน	8.36×10^{-3}
ความต้านทานของขดลวดที่ 25 องศาเซลเซียส (โอห์ม)	1.04
ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิใดๆ (โอห์ม)	1.44
ความต้านทานของโรเตอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส(โอห์ม)	1.42

ตารางที่ 4.9 การหาค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 220V/50Hz

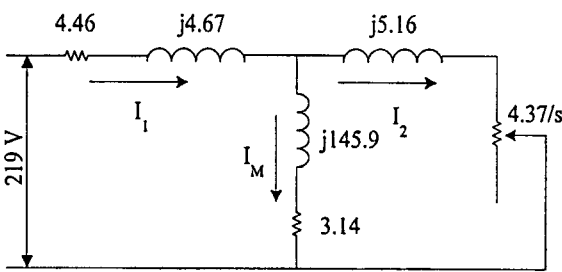
การรีแอกแตนซ์	220V/50Hz
ช่องสล็อตของสเตเตอร์	1.678
ช่องสล็อตของโรเตอร์	0.898
สล๊อคเฉียง	1.130
ซิกแซก	0.03
สายพาน	0.45
ส่วนปลาย	1.235
ขดลวดหลัก	1.52
โรเตอร์เมื่ออ้างอิงขดลวดหลัก	1.71
รีแอกแตนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก	96.93

ตารางที่ 4.10 ค่าของวงจรแม่เหล็กที่คำนวณได้ของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz

ส่วนของฟลักแม่เหล็ก	พื้นที่หน้าตัด (ตารางนิ้ว)	ความยาว (นิ้ว)	ความหนาแน่น (Tesla)	แอมแปร์-รอบ
แกนเหล็กสเตเตอร์	5.78	3.629	1.2	9.5
ซี่สล็อตสเตเตอร์	6.64	0.607	1.64	10.9
แกนเหล็กโรเตอร์	3.38	0.2	1.88	37.6
ซี่สล็อตโรเตอร์	4.345	0.028	2.31	30
ช่องว่างอากาศ	13.02	0.195	0.77	309

นำค่าต่างๆแทนลงในวงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 4.15

รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลย์เฟสเดียวของมอเตอร์ 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz ณ สภาวะโหลดเต็ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส

เมื่อทราบค่าคงที่และตัวแปรต่างๆแล้ว นำค่ามาแทนในขั้นตอนตามตารางที่ 3.2 ดังนั้นจะได้ค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ขั้นตอนการคำนวณค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz

V = 127	Item		Full Load	Break Down	Lock Rotor
m = 3	1	Slip = s (assume)	0.042	.422	1
X = 3.2	2	1/s	23.81	2.37	1
X ₀ = 98.45	3	1-s	0.958	0.578	0
K _p = $\sqrt{(X_0 - X)/X_0} = .984$	4	F ₁	3.142	3.142	3.142
แรงเสียดทานและแรงลม (watts) = 10	5	F ₂ x (2)	1.949	0.194	0.082
I ₀ = V/X ₀ = 1.27	6	U=(5)-(4)	-1.193	-2.948	-3.06
ค่าสูญเสียแกนเหล็ก = 10	7	F ₄	1.57	1.57	1.57
r _m = coreloss/ml ₀ ² = 4.005	8	F ₂ x (2)	35.238	3.507	1.48
r ₁ = 1.44	9	W=(7)+(8)	36.808	5.077	3.05
F ₁ = r ₂ = 1.48	10	$\sqrt{U^2 + W^2}$	36.828	5.871	4.321
F ₃ = r ₂ (r ₁ +r _m)/X ₀ = 0.082	11	F ₅	5.167	5.167	5.167
F ₁ = X-(r _m r ₁)/X ₀ = 3.142	12	F ₄ x (2)	45.464	4.525	1.909
F ₄ = r ₁ -(r _m X)/X ₀ = 1.57	13	(11)+(12)	50.631	9.692	7.077
F ₅ = I ₀ r _m = 5.167	14	$\sqrt{(13)^2 + V^2}$	136.739	127.389	127.217
F ₆ = I ₀ r ₂ = 1.909	15	I = (14)+(10)	3.713	21.698	29.445
F ₇ = VK _p = 124.938	16	I ₂ = F ₇ + (10)	3.393	21.281	28.918
แรงบิดสตาร์ท = 112.7(18) /syn rpm (oz-ft)	17	Pri. Loss = I ₁ ² r ₁ m	59.556	2034	3745
Slip at BD = s _m = r ₂ / $\sqrt{r_1^2 + X^2}$ = .24	18	Sec. Loss = I ₂ ² r ₂ m	51.101	2011	3713
	19	ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก	10	10	0
	20	Sec. Output =(18)x(2)x(3)	1166	2754	0
	21	อินพุต = (17)+(18)+(19)+(20)	1286	6809	7468
	22	แรงเสียดทานและแรงลม	10	10	0
	23	เอาต์พุต = (20)-(22)	1156	2744	0
	24	Rpm = (3)x syn. Rpm	2874	1734	0
	25	แรงบิด = 28.65x(23) / (24) N-M	3.84	15.113	11.819
	26	ประสิทธิภาพ. = (23)/(21)x100	89.84	40.302	0
	27	P.F = (21) x100/Vim	90.91	82.34	66.56

4.3.3 การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

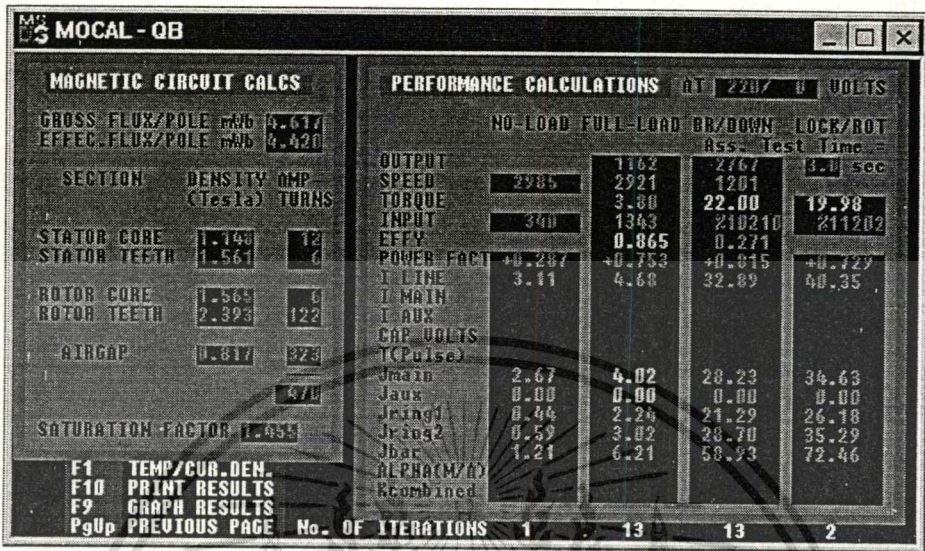
ส่วนหลักของโปรแกรมจะเหมือนกับการออกแบบมอเตอร์ 1 เฟส แต่จะแตกต่างกันเพียงการลงขดลวดบนสเตเตอร์สล็อต ซึ่งสามารถรายละเอียดในการพันได้จากรูปที่ 4.14 ในรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 จะแสดงหน้าต่างของโปรแกรมในการออกแบบ มอเตอร์สามเฟส 220V/50Hz

รูปที่ 4.16 หน้าต่างการป้อนอินพุตของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz

รูปที่ 4.17 หน้าต่างการป้อนรายละเอียดของขดลวดและจุดใช้งานของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 หน้าต่างผลการคำนวณสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz



จากขั้นตอนในการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz สามารถสรุปเปรียบเทียบผล ณ สภาวะโหลดเต็มของการออกแบบทั้ง 2 วิธี ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการออกแบบของมอเตอร์ 3 เฟส ทั้ง 2 วิธี ณ สภาวะโหลดเต็ม

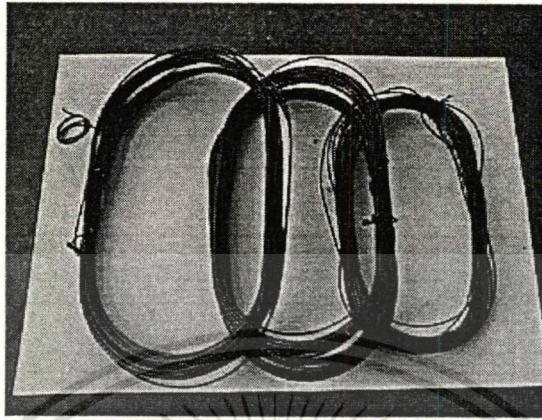
	Output (Watt)	Speed (RPM)	Torque (N-m)	Input (Watt)	Eff (%)	PF. (%)	I (Amp.)
3 เฟส 220V/50Hz							
Designed by Theory	1156	2874	3.84	1286	89.84	90.91	3.713
Designed by Program	1162	2921	3.80	1343	86.5	75.3	4.68

4.3.4 ขั้นตอนในการสร้างมอเตอร์ 3 เฟส

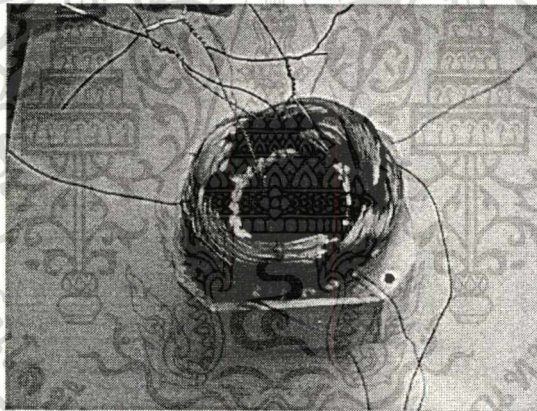
หลังจากได้ทำการออกแบบมอเตอร์ขนาดเล็ก 3 เฟส เสร็จแล้ว นำค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณมากำหนดรูปร่างของขดลวด และนำสเตเตอร์ที่เตรียมไว้ มาพันเป็นแบบ Concentric winding โดยแบ่งเป็นขดลวด 6 ชุด ชุดละ 3 ขด พิจารณาได้ดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

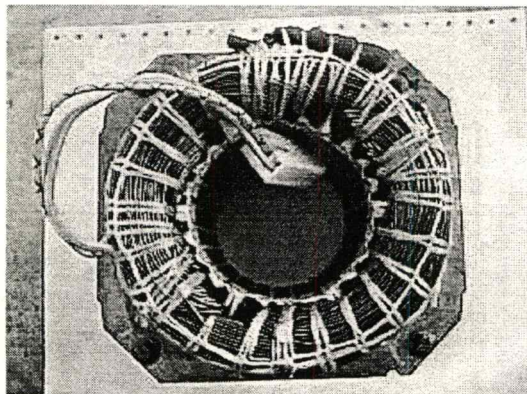
รูปที่ 4.19 ขดลวดที่เตรียมไว้สำหรับการพันมอเตอร์ 3 เฟส แบบ Concentric winding



รูปที่ 4.20 รูปร่างของมอเตอร์ 3 เฟส ที่พันและเตรียมเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.21 รูปร่างของมอเตอร์ 3 เฟส ที่ทำสมบูรณ์แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์

4.4.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของ SPWM Inverter [11]

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำได้หลายวิธีซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

4.4.1.1 การควบคุมโวลต์เตจของสเตเตอร์

4.4.1.2 การควบคุมสลิปเฟาเวอร์

4.4.1.3 การควบคุมโดยไซโคลคอนเวอร์เตอร์

4.4.1.4 การควบคุมอัตราส่วนระหว่างโวลต์เตจต่อความถี่ (V/F)

ในบทนี้จะขออธิบายเพียงการควบคุมอัตราส่วนระหว่างโวลต์เตจต่อความถี่ (V/F) เท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์วิธีนี้จะควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ การเปลี่ยนแปลงความถี่ดังกล่าว จะมีผลทำให้ฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลง และถ้าการเปลี่ยนแปลงของฟลักแม่เหล็กเป็นไปแบบไม่คงที่แล้ว จะมีผลทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ดังนั้นการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของฟลักแม่เหล็กให้คงที่ตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนระหว่างโวลต์เตจต่อความถี่โดยความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจที่ป้อนเข้ามอเตอร์ ความถี่และฟลักแม่เหล็กที่เกิดจะเป็นไปตามสมการที่ 4.1

$$V = K\phi f \quad (4.1)$$

หรือจะได้ว่า

$$\phi = V/Kf \quad (4.2)$$

โดยที่ V คือ โวลต์เตจที่ป้อนเข้ามอเตอร์

ϕ คือ ฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศ

K คือ ค่าคงที่

โดยปรกติมอเตอร์จะถูกออกแบบให้ฟลักแม่เหล็กมีค่าอยู่ตรงส่วนโค้งของเส้นโค้งลักษณะสมบัติของการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization curve) ซึ่งถ้ามีการลดความถี่โดยไม่ลดระดับโวลต์เตจลงด้วยแล้ว จะทำให้ฟลักแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้นตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.2 และจะมีค่าเข้าไปในบริเวณย่านอิ่มตัว (Saturation region) ทำให้ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นเกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก(iron loss) เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องทำการลดอัตราการเพิ่มของฟลักในมอเตอร์ลง โดยลดระดับโวลต์เตจให้เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอัตราการลดลงของความถี่ เพื่อที่จะรักษาฟลักแม่เหล็กให้มีค่าอยู่ตรงส่วนเข้าโค้งของเส้นโค้งการทำให้เป็นแม่เหล็ก ในทางตรงข้ามถ้ามีการเพิ่มความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้สูงขึ้น โดยไม่เพิ่มระดับโวลต์เตจแล้วก็จะทำให้ฟลักแม่เหล็กลดลง ซึ่งมีผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงถึงความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.3 ซึ่งทำให้อมอเตอร์ไม่สามารถทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดได้

$$T = K\phi I_r \cos\theta$$

(4.3)

โดยที่ T คือ เอาท์พุททอร์คของมอเตอร์

ϕ คือ ฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศ

I_r คือ กระแสในโรเตอร์

θ คือ มุมแตกต่างระหว่างเฟสของโวลต์เตจและกระแสในโรเตอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความถี่ที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโวลต์เตจ(V) แรงบิด(T) และกระแสเตเตอร์(I_r) เมื่อเปลี่ยนความถี่ไป โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงแรงบิดคงที่ (Constant torque region) เมื่อความถี่ต่ำกว่า 1 pu และช่วงกำลังงาน(P_m)คงที่ (Constant power region) เมื่อความถี่สูงกว่า 1 pu รวมถึงมีการชดเชยผลของอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ต่ำด้วย

การพิจารณาวงจรการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่

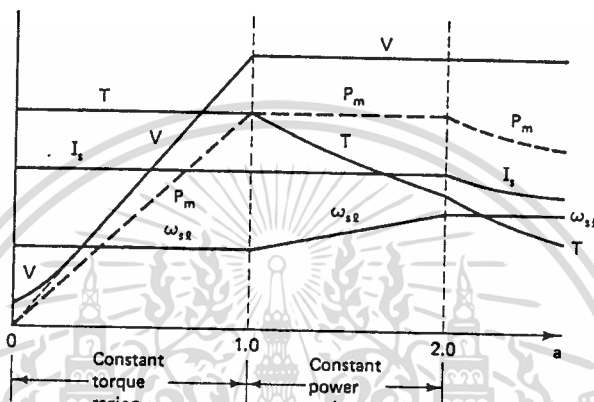
1. ส่วนเรกติไฟ์ (Rectifier) ใช้ไดโอด 4 ตัวต่อแบบบริดจ์ มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายพลังงานแบบเฟสเดียวเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

2. ส่วนกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) ทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรกติไฟ์เรียบขึ้น

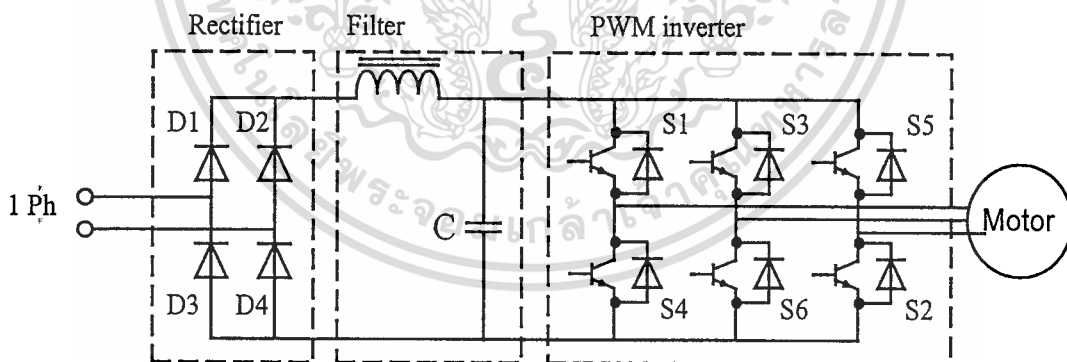
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วน PWM อินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) 6 ตัวต่อกันแบบบริดจ์ ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์สองทาง 3 ชุด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ในแต่ละเฟส ง่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจ-ความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.23 วงจรการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ในการสร้างรูปคลื่น PWM ให้แก่ส่วนอินเวอร์เตอร์นั้น มีหลายวิธี ซึ่งจะมีการสร้างรูปคลื่นและผลของฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกัน ในที่นี้จะอธิบายการสร้างรูปคลื่นแบบ Sinusoidal Pulse Width Modulation ดังนี้คือ

แรงดัน 3 ค่า คือ V_a V_b และ V_c ของตัวแปร A จะถูกนำมาเปรียบเทียบับ สัญญาณสามเหลี่ยมหน้าจั่ว V_T ที่มีแอมพลิจูด A_m ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบตัวที่ 1, 2 และ 3 ที่ได้จากส่วน Inverter ซึ่งถูกกำหนดโดยสวิตช์ (S_1, S_4), (S_3, S_6) และ (S_5, S_2) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการทำงานของสวิตช์ (S_1, S_4) ซึ่งควบคุมแรงดันของเฟส A กับจุดกึ่งกลางของแหล่งจ่าย dc

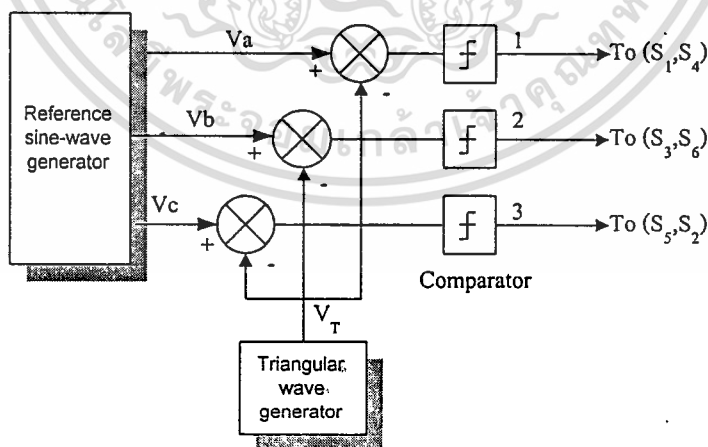
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ จุด O จะได้ดังรูป 4.25 เฉพาะส่วนบนของรูป คลื่นอ้างอิง V_a และคลื่นพาห์ V_T ถูกเขียนให้อยู่บนแกนเดียวกัน โดยแสดงเฉพาะช่วงบวกของ V_a เท่านั้น สวิตช์ S1 จะทำงานโดยได้รับสัญญาณควบคุมเมื่อ V_a มีค่ามากกว่า V_T และสวิตช์ S4 จะทำงานโดยได้รับสัญญาณควบคุมเมื่อ V_a มีค่าน้อยกว่า V_T สุดท้ายจะได้รูปคลื่นของ V_{AO} แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 เฉพาะส่วนล่างของรูป

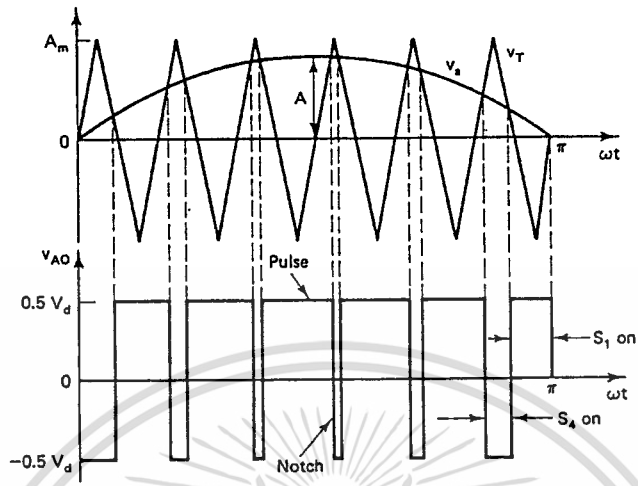
เพื่อให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น พิจารณาที่แรงดัน V_{AO} และ V_{BO} ที่ประกอบด้วยคลื่นสามเหลี่ยม 6 พัลส์/ไซเคิล ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งพิจารณาการทำงานได้เหมือนกับ V_{AO} ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยที่แรงดัน V_{AB} ได้มาจาก $V_{BO} - V_{AO}$ การมอดูเลทแบบนี้ เรียกว่า Sinusoidal PWM เพราะว่า ความกว้างของพัลส์เป็นฟังก์ชันของ Sinusoidal ของตำแหน่งเชิงมุมในไซเคิล การมอดูเลทแบบนี้เป็นที่รู้จักกันดี อาจจะเรียกได้หลายแบบเช่น Triangulating หรือ PWM แบบ Natural sampling

ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความถี่มอเตอร์ สามารถอธิบายได้คือ ความถี่มูลฐานของมอเตอร์จะเหมือนกับของแรงดันอ้างอิงของคลื่นไซน์ ดังนั้น ความถี่ของแรงดันมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย การเปลี่ยนความถี่ของแรงดันอ้างอิง อัตราส่วนของค่าแอมพลิจูด ของคลื่นอ้างอิงต่อคลื่นพาห์ m เรียกว่า คำนีการมอดูเลท เท่ากับ A/A_m ดังนั้นแรงดันมูลฐานที่เพิ่มค่าอย่างเชิงเส้นด้วยค่า m จนกระทั่ง $m = 1$ (หมายถึงค่าแอมพลิจูดของคลื่นอ้างอิงเท่ากับคลื่นพาห์) สำหรับ $m > 1$ จำนวนพัลส์ใน V_{AO} จะมีค่าน้อยและหยุดการมอดูเลท ที่จะเป็น Sinusoidal PWM

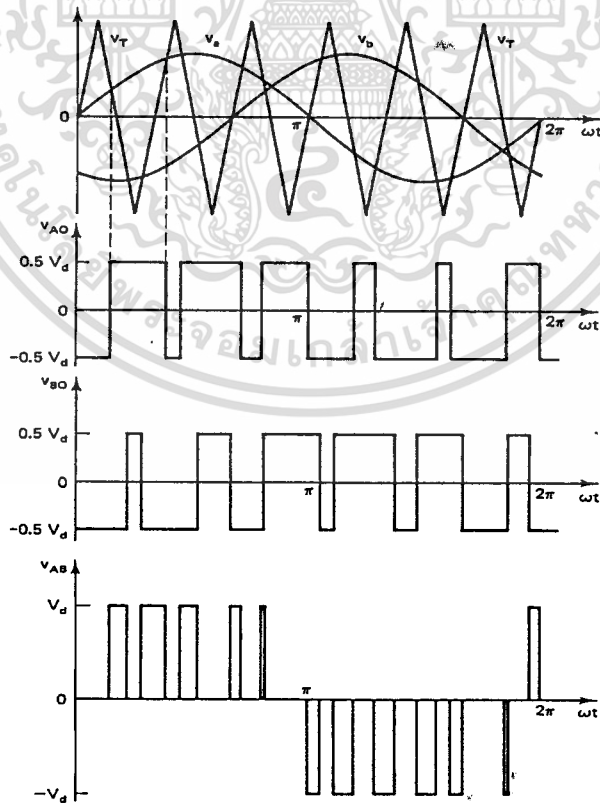
รูปที่ 4.24 การสร้างสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างคลื่นที่จะมอดูเลทกับคลื่นอ้างอิง



รูปที่ 4.25 การมอดูเลตรูปคลื่นสำหรับคลื่นอ้างอิง Pulse เท่ากับ 6



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของ Sinusoidal Pulse Width Modulation



4.4.2 อินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งาน

อินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งานจะมีขนาด 3 แรงม้า ซึ่งมีคุณสมบัติพอสังเขปได้ดังนี้

4.4.2.1 สามารถป้อนอินพุตได้ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส 220V/50Hz

4.4.2.2 ความถี่ด้านออกปรับได้ 0-240 Hz

4.4.2.3 ระบบควบคุมเป็นแบบ SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)

4.4.2.4 มีระบบป้องกันหลายชนิดภายในตัว อาทิ เช่น ระบบป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร

ระบบป้องกันการใช้กำลังเกิน ระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน เป็นต้น

4.4.2.5 เวลาเร่งหรือเวลาหน่วงของความเร็วมอเตอร์ จากค่าศูนย์ไปถึงความเร็วสูงสุด

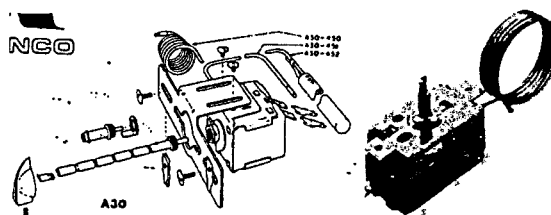
สามารถปรับได้อิสระจากกัน

สำหรับการใช้งานอินเวอร์เตอร์โดยใช้สัญญาณควบคุมจากภายนอก สามารถทำได้ทั้งการใช้กระแสควบคุม และการใช้แรงดันควบคุม โดยมีย่านการทำงานการควบคุมตั้งแต่ 4-20 mA และ 0-10 V

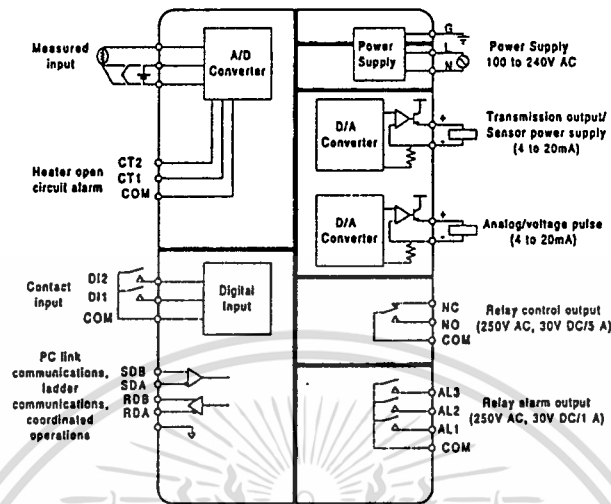
4.4.3 การทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ในการออกแบบระบบห้องปรับอากาศที่ใช้ในการทดสอบนี้ ชุดอีเวอเรเตอร์จะควบคุมด้วยมือ เช่นการปรับความเร็วของพัดลม หรือการเปิดปิดระบบ ดังนั้นการทดสอบแบบตัดต่อจะใช้เทอร์โมสตัทควบคุมการซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.27 สำหรับการควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.28 หลักการทำงานโดยสังเขปคือ เมื่อปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว PID Controller จะตรวจสอบอุณหภูมิผ่าน Thermocouple ชนิด T เข้าสู่ส่วนของ A/D แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ส่งให้หน่วยประมวลผลกลางคำนวณ เพื่อส่งสัญญาณกระแสที่มีค่า 4-20 mA ไปยังอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.27 โครงสร้างของเทอร์โมสตัท



รูปที่ 4.28 โครงสร้างของชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID

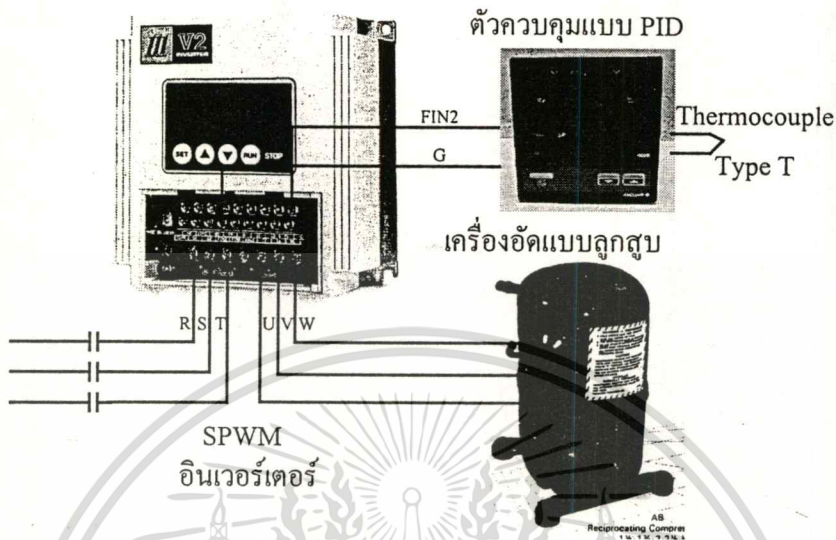


4.4.4 การทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์

เมื่อเริ่มเปิดระบบ จะใช้ไทมเมอร์หน่วงเวลาไว้ 3 นาที เพื่อป้องกันการลัดของเครื่องอัด ในกรณีที่เกิดไฟฟ้าดับ แล้วระบบเริ่มทำงานใหม่ทันทีทันใด ขณะที่น้ำยาในระบบยังไม่สมดุลกัน จากนั้นทำการปรับอุณหภูมิที่ต้องการที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดที่ 25 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID จะคอยตรวจสอบอุณหภูมิของห้อง ถ้าอุณหภูมิห้องมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส ตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำการคำนวณเวลาสำหรับการปรับตัวอุณหภูมิขึ้นหรือลง และส่งสัญญาณกระแส 4-20 mA ให้อินเวอร์เตอร์ โดยผ่านสายสัญญาณ FIN2 และ G เพื่อสั่งให้มอเตอร์ทำงานที่ความถี่ตามสัญญาณกระแสที่ดังกล่าวไว้แล้ว โดยผ่านสายสัญญาณ U, V และ W ดังรูปที่ 4.29 ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งย่านค่าความถี่เท่ากับ 15-70 Hz

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแล้วว่า ที่ความถี่ 15-70 Hz ระบบเครื่องปรับอากาศที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดี เนื่องจากได้เปลี่ยนตัวควบคุมปริมาณสารทำความเย็นจาก ท่อแคพิลลารี มาเป็นเทอร์โมสแตติกแอกเพนชันวาล์ว ทำให้น้ำยาสามารถไหลได้ดีตลอดย่านความถี่ของเครื่องอัด และพบอีกว่า ถ้ากำหนดเวลา PID ของค่าตัวควบคุมอุณหภูมิ ให้มีค่ามาก นั้นหมายถึง เวลาในการปรับอุณหภูมิเข้าสู่จุดใช้งาน จะทำได้ช้ากว่าการกำหนดเวลา PID ให้มีค่าต่ำ ซึ่งทำให้อุณหภูมิแกว่งขึ้นลงและไม่คงที่ตามที่ต้องการ

รูปที่ 4.29 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดของระบบอินเวอร์เตอร์



4.5 สรุป

เนื้อหาส่วนแรกได้กล่าวถึง การออกแบบมอเตอร์และได้แสดงขั้นตอนการหาค่าคงที่ของ สเตเตอร์และโรเตอร์ เพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของขดลวดและวงจรแม่เหล็ก แล้วทำการคำนวณ สมรรถนะของมอเตอร์ 1 เฟส แบบ PSC เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส แบบ 220V/50Hz ต่อไป เมื่อออกแบบเสร็จแล้วทำการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟสกับมอเตอร์ 1 เฟสเดิม เพื่อสร้างมอเตอร์ต้นแบบขึ้นตามที่ต้องการ ส่วนที่สองได้อธิบายถึง หลักการทำงานและการออกแบบ ระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ และกล่าวถึงขั้นตอนในการทำงาน รวมทั้งรายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในระบบ

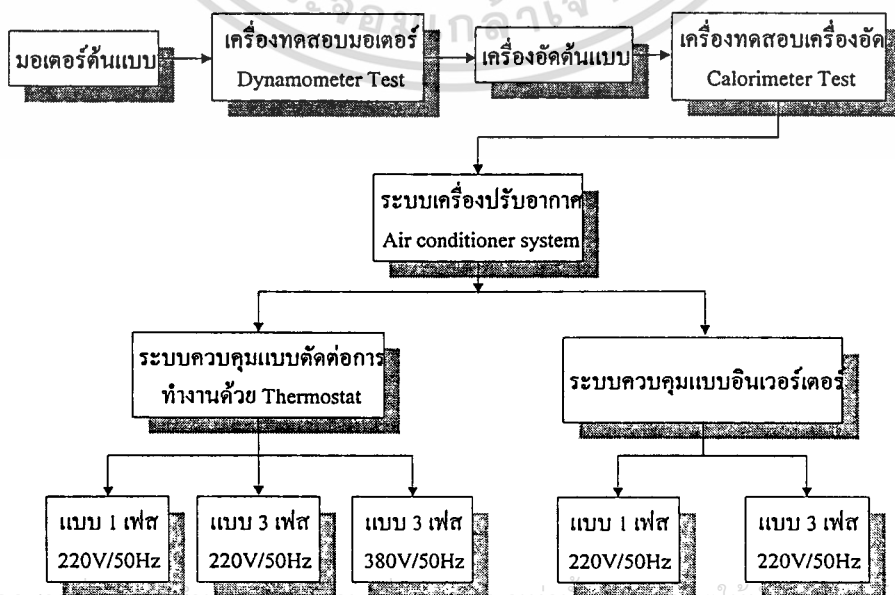
บทที่ 5

การทดสอบและผล

5.1 กล่าวนำ

เมื่อออกแบบและสร้างมอเตอร์ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ได้แล้ว ตามขั้นตอนการผลิตจะต้องตรวจสอบว่าการออกแบบมีความถูกต้องหรือไม่ ในรูปที่ 5.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบต่างๆ โดยเริ่มต้นด้วยการนำมอเตอร์ต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้มาทดสอบหาค่าคุณลักษณะและสมรรถนะกับเครื่องทดสอบมอเตอร์โดยเฉพาะ จากนั้นนำมอเตอร์ดังกล่าวไปประกอบเป็นเครื่องอัดและนำเข้าทดสอบความสามารถในการทำความเย็นกับเครื่องทดสอบเครื่องอัด เมื่อได้เครื่องอัดต้นแบบแล้ว จะนำเข้าทดสอบกับระบบเครื่องปรับอากาศ ด้วยค่าไฟฟ้าอินพุตในแบบต่างๆ

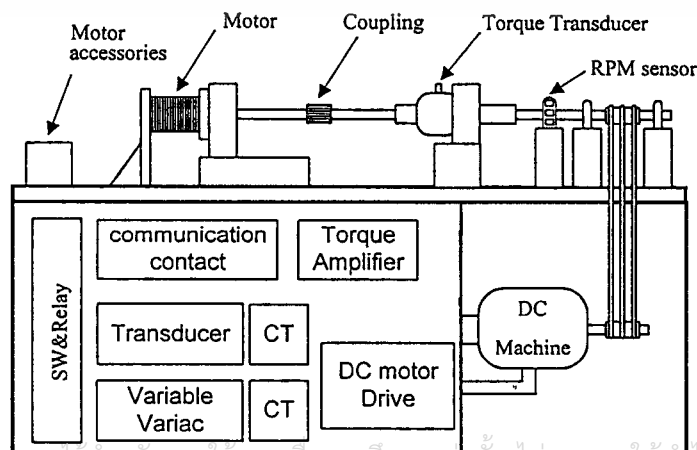
รูปที่ 5.1 ไคอะแกรมของขั้นตอนในการทดสอบต่างๆ



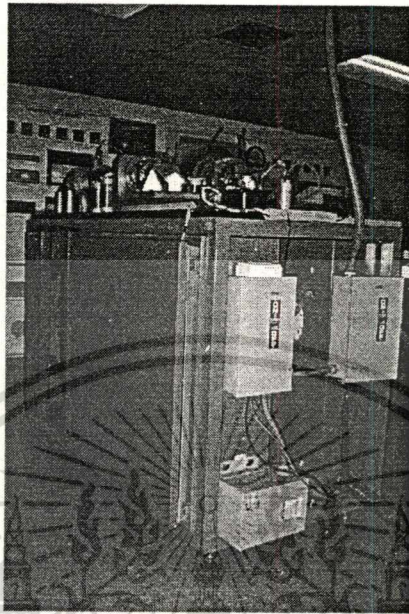
5.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและสมรรถนะทางกลของมอเตอร์

ในการทดสอบหาค่าต่างๆของวงจรสมมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณหาค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าและสมรรถนะทางกล โดยทั่วไปจะทำการทดสอบมอเตอร์ในแบบต่างๆ[13] ดังนี้คือ ทดสอบที่สภาวะไร้โหลด และ ทดสอบแบบล๊อคโรเตอร์ แต่ในการทดสอบต่างๆ ที่กล่าวมามีความยุ่งยาก ทั้งในด้านการติดตั้งอุปกรณ์ และวิธีการคำนวณ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะทดสอบมอเตอร์ด้วย เครื่องทดสอบมอเตอร์ หรือ Dynamometer Test ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบค่าทางไฟฟ้าและค่าทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก โดยอาศัยการจำลองโหลดที่สภาวะการทำงานต่างๆ ของมอเตอร์ อาทิเช่น สภาวะไร้โหลด สภาวะแรงบิดสูงสุด สภาวะหยุดนิ่ง และสภาวะโหลดเต็ม(สภาวะที่ใช้งาน) นอกจากนี้เครื่องมือนี้ยังสามารถ เก็บข้อมูลและแสดงผลของการทดสอบ บนจอคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ทำให้มีความสะดวกและประหยัดเวลาเป็นอย่างมาก โครงสร้างของเครื่องทดสอบมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งในรูปประกอบด้วย ชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ที่มีอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ดีซี เป็นอุปกรณ์หลัก มีส่วนของคอมพิวเตอร์อินเตอร์เฟส ส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง และส่วนจับยึดมอเตอร์ จากที่กล่าวทั้งหมดสามารถดูเครื่องทดสอบมอเตอร์จริงที่ใช้ทดสอบได้ในรูปที่ 5.3 ส่วนในตารางที่ 5.1 เป็นผลการทดสอบมอเตอร์ทั้งแบบ 1 เฟส และแบบ 3 เฟส กับเครื่องทดสอบมอเตอร์ จะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากมอเตอร์ 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz มีค่าสูงกว่า มอเตอร์ 1 เฟส ในขณะที่สภาวะโหลดเต็ม

รูปที่ 5.2 โครงสร้างเครื่องทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์



รูปที่ 5.3 เครื่องทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์



5.3 ผลการทดสอบกับเครื่องทดสอบเครื่องอัด

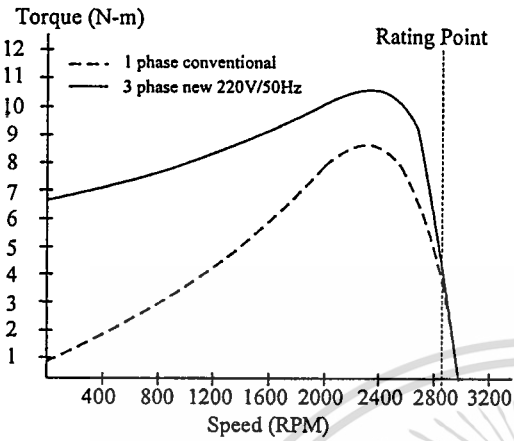
เมื่อทดสอบมอเตอร์จนได้ค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าและค่าสมรรถนะทางกลของมอเตอร์ตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นนำมอเตอร์ต้นแบบดังกล่าวมาประกอบเป็นเครื่องอัด และนำมาทดสอบกับโหลดจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานที่ สภาวะโหลดเต็ม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยค่าต่างๆ ดังนี้คือ ในการทำความเย็น ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ ค่าทางไฟฟ้า และ ค่าประสิทธิภาพ เป็นต้น ในรูปที่ 5.10 แสดงโครงสร้างของเครื่องทดสอบเครื่องอัด หรือ Calorimeter Test ซึ่งมีหลักการทำงานคือ ทำการควบคุมความดัน อุณหภูมิ ทั้งขาเข้าและขาออก ให้ได้ตามเงื่อนไขการประยุกต์ใช้งานแบบ HBP ดังในตารางที่ 2.3 จะทำให้ได้ค่าในการทำความเย็น(Cooling capacity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่ากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์(อยู่ใน Calorimeter tank) ที่ใช้ไป ตามหลักการการแลกเปลี่ยนความร้อนนั่นเอง ในรูปที่ 5.11 แสดงเครื่องทดสอบเครื่องอัดจริงที่ใช้ทดสอบ ส่วนในตารางที่ 5.2 ได้แสดงผลการทดสอบของเครื่องอัดทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส และจะใช้ ค่า EER(Energy Efficiency Ratio) ซึ่งหาได้โดยนำค่าทำความเย็น($W \times 3.412$)หารด้วยค่าอินพุต(W) พิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องอัด ถ้า EER มีค่ามากแสดงว่า ประสิทธิภาพของเครื่องอัดก็จะมีค่าสูง

ตาราง 5.1 ค่าที่ทดสอบได้จากเครื่องทดสอบมอเตอร์ ของ มอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz และ 3 เฟส 220V/50Hz

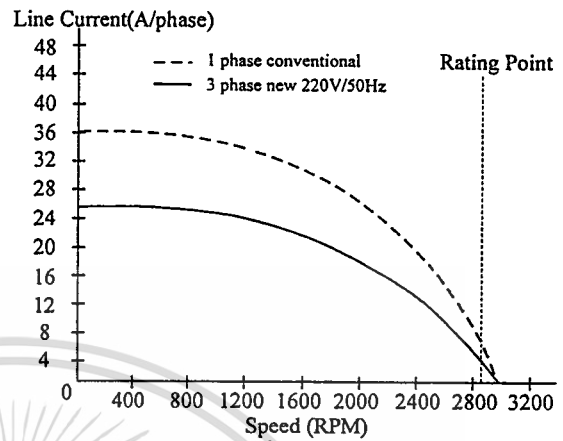
	No Load	Full Load	Break Down	Locked Rotor	Motor Type
Speed (RPM)	2995	2875	2505	0	ทั้ง 2 แบบ
Torque (N-m)	0	4.08	9.52	0.92	1 เฟส 220V/50Hz
	0	3.96	10.2	6.94	3 เฟส 220V/50Hz
Line Amp. (A)	2.56	7.25	22.05	36.16	1 เฟส 220V/50Hz
	2.84	4.97	25.46	27.35	3 เฟส 220V/50Hz
Main Amp. (A)	5.37	5.42	21.8	35.85	1 เฟส 220V/50Hz
Aux. Amp. (A)	1.73	1.54	0.80	0.80	1 เฟส 220V/50Hz
Input (kWatt)	.250	1.478	4.877	6.712	1 เฟส 220V/50Hz
	.393	1.340	4.183	5.202	3 เฟส 220V/50Hz
Output (kWatt)	0	1.133	2.500	0	1 เฟส 220V/50Hz
	0	1.158	2.342	0	3 เฟส 220V/50Hz
Efficiency	0	0.78	0.51	0	1 เฟส 220V/50Hz
	0	0.86	0.56	0	3 เฟส 220V/50Hz
Power Factor	0.38	0.91	0.88	0.73	1 เฟส 220V/50Hz
	0.43	0.87	0.79	0.68	3 เฟส 220V/50Hz

เนื่องจากผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 เป็นค่าที่ได้จากการวัด ณ 4 สถานะของมอเตอร์ คือ ณ สถานะไร้โหลด(No load) สถานะโหลดเต็ม(Full load) สถานะแรงบิดสูงสุด(Break down) และ สถานะหยุดนิ่ง(Locked rotor) ส่วนค่าคุณลักษณะและสมรรถนะที่วัดได้ ณ ความเร็วรอบต่างๆ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.9 ซึ่งสรุปได้ว่ามอเตอร์ 3 เฟส 220V/50Hz ที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่มีข้อดีกว่ามอเตอร์ 1 เฟส 220V/50Hz ดังนี้คือ มีค่าแรงบิดขณะออกตัวและแรงบิดสูงสุดสูงขึ้นพิจารณาในรูปที่ 5.4 และปริมาณกระแสและกำลังอินพุตที่ใช้มีค่าต่ำกว่า พิจารณาในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 โดยที่มอเตอร์สามารถให้เอาต์พุตใกล้เคียงกันพิจารณาในรูปที่ 5.7 นอกจากนี้พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่ามากขึ้นซึ่งพิจารณาได้ในรูปที่ 5.8 ส่วนค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ 1 เฟส จะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีคาปาซิเตอร์ต่อรวมอยู่ด้วยพิจารณาได้จากรูปที่ 5.9

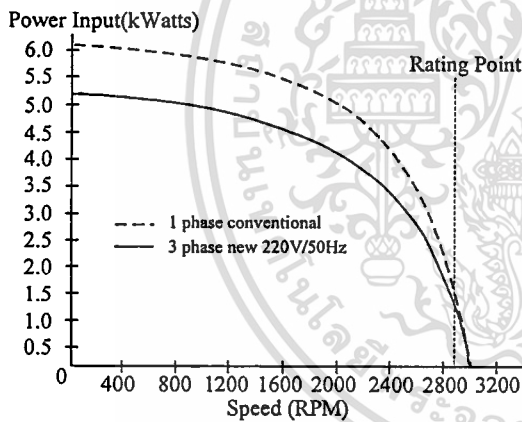
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและ
ความเร็วรอบของมอเตอร์



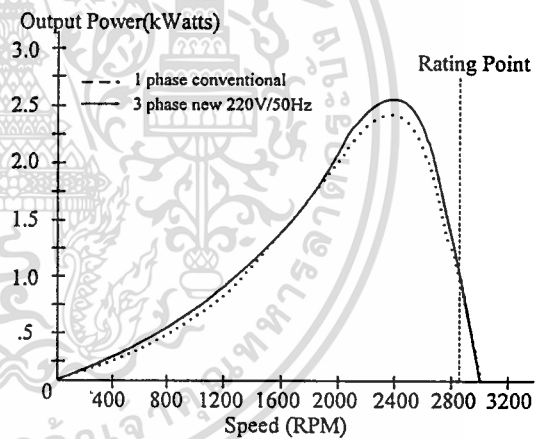
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์
และความเร็วรอบของมอเตอร์



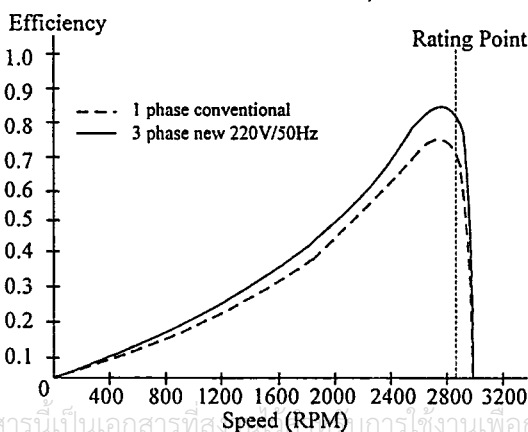
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต
ความเร็วรอบของมอเตอร์



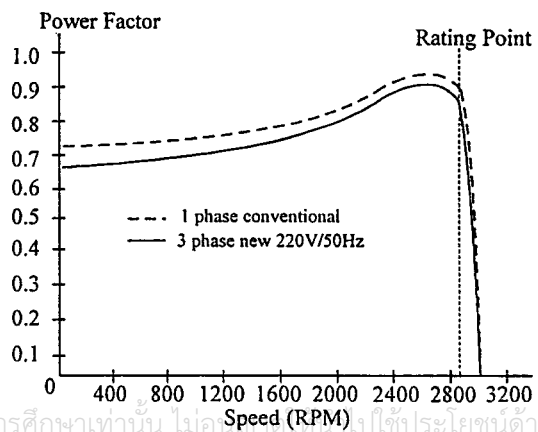
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต
และความเร็วรอบของมอเตอร์



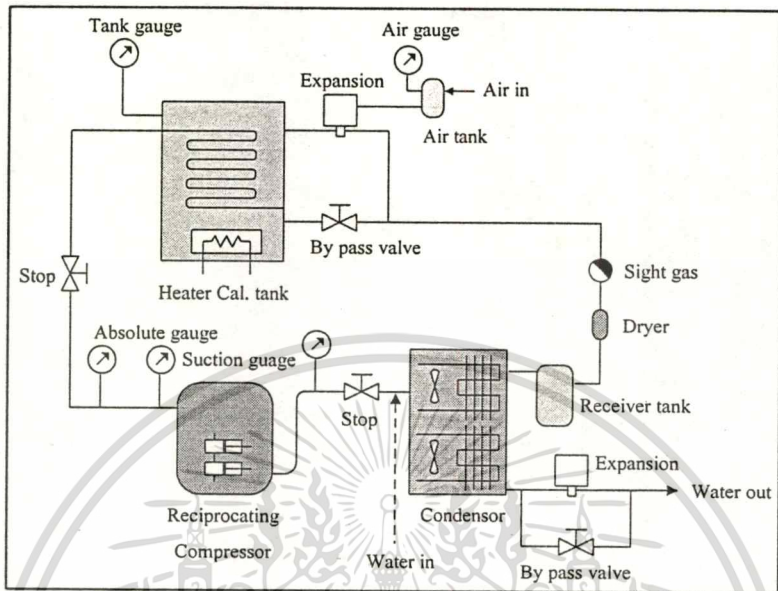
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ
และความเร็วรอบของมอเตอร์



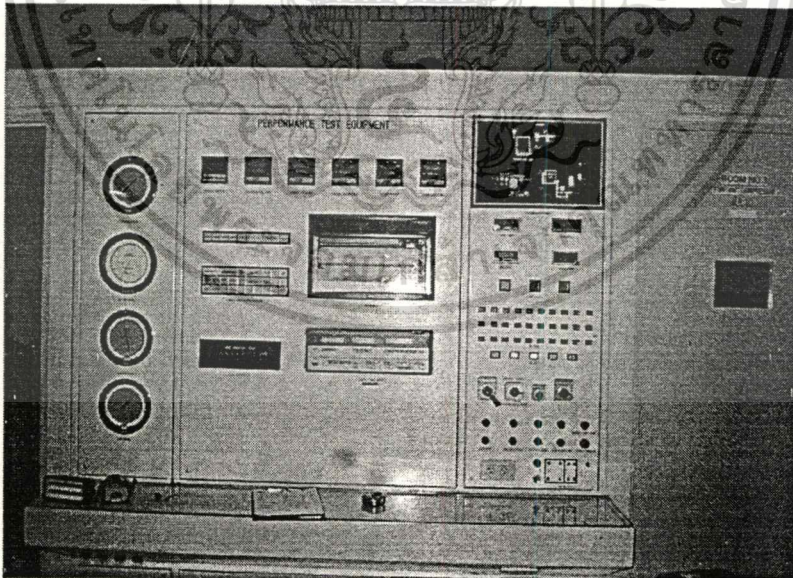
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์
และความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 5.10 โครงสร้างของเครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องอัด



รูปที่ 5.11 เครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องอัด



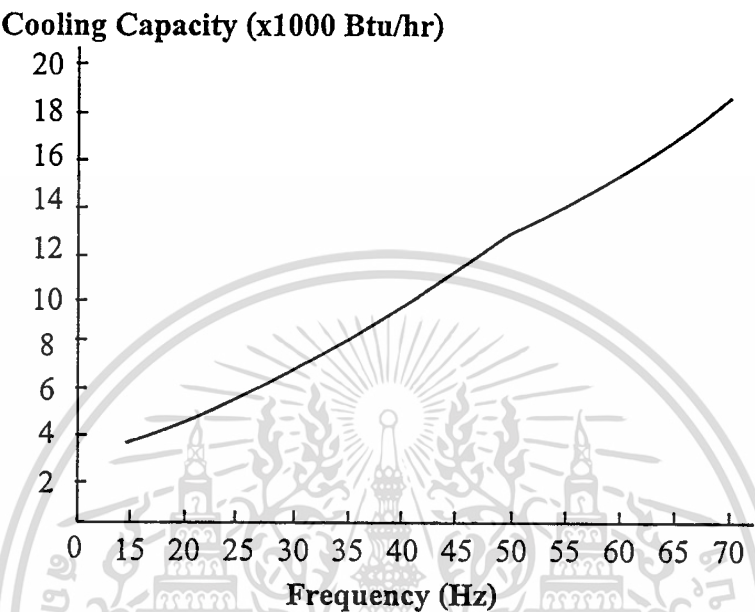
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ค่าต่างๆวัดได้จากเครื่องทดสอบเครื่องอัดแบบ 1 เฟส 220V/50Hz และ 3 เฟส 220V/50Hz

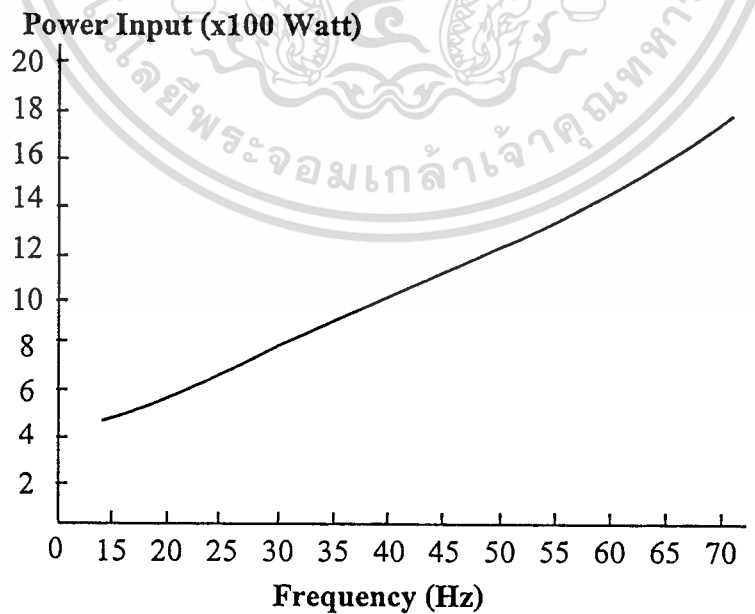
ค่าต่างๆที่วัดได้	1 เฟส 220V/50Hz	3 เฟส 220V/50Hz	หน่วย
อุณหภูมิห้อง	95.88	95.71	°F
อุณหภูมิก่อนเข้าแท้งค์	120.90	123.43	°F
อุณหภูมิของแก๊สที่ไหลกลับ	95.34	94.13	°F
อุณหภูมิออกจากแท้งค์	96.42	95.71	°F
อุณหภูมิด้านบนของเครื่องอัด	113.56	120.97	°F
อุณหภูมิด้านล่างของเครื่องอัด	152.69	150.40	°F
อุณหภูมิบริเวณโอเวอร์โวลต์	131.18	120.97	°F
แรงดันไลน์	220	210	V
กระแสต่อเฟส	7.17	4.8	A
อินพุท	1567	1420	W
ความถี่	50	50	Hz
ความดันทางดูด	90.72	90.63	PSIG
ความดันทางออก	297.31	297.22	PSIG
อุณหภูมิของอีวาพอเรเตอร์	45	44.94	°F
ค่าทำความเย็น	4192	4102	W
อัตราการไหล	189.87	181.90	LBS./Hr
EER	9.12	9.85	BTU-Hr/W

เนื่องจาก ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.2 เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เครื่องอัด ณ ความถี่เท่ากับ 50 Hz (สำหรับการพิจารณา จุดใช้งานของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อด้วยเทอร์โมสแตท) แต่งานวิจัยได้ศึกษาการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ ณ ที่ความถี่ต่างๆ โดยกำหนดความถี่ใช้งานตั้งแต่ 15-70 Hz ซึ่งสามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าในการทำ ความเย็น ค่าอินพุท และ ค่าประสิทธิภาพ(EER) ณ ที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ แบบลูกสูบ สามเฟส 220V ดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.14 ตามลำดับ

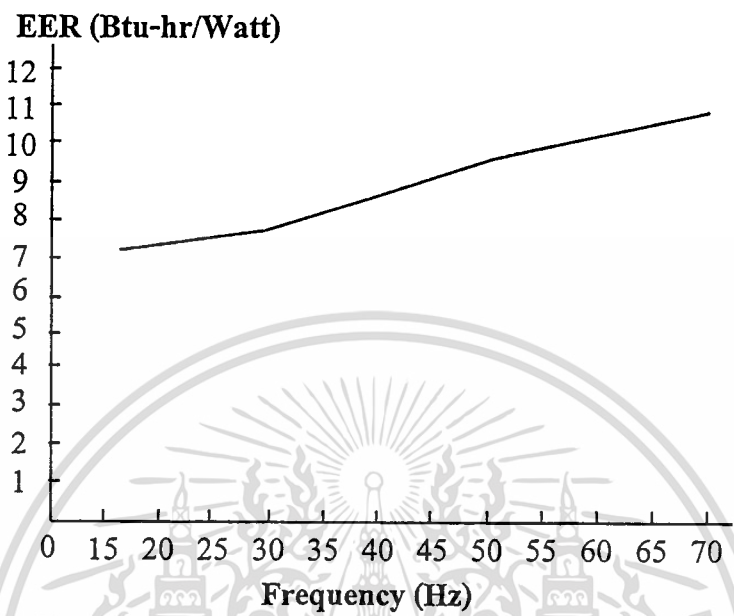
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าในการทำความเย็น ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์
คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V/50Hz



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุตเพาเวอร์ ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์
คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V/50Hz



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ EER(Energy Efficiency Ratio) ณ ที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 3 เฟส 220V/50Hz

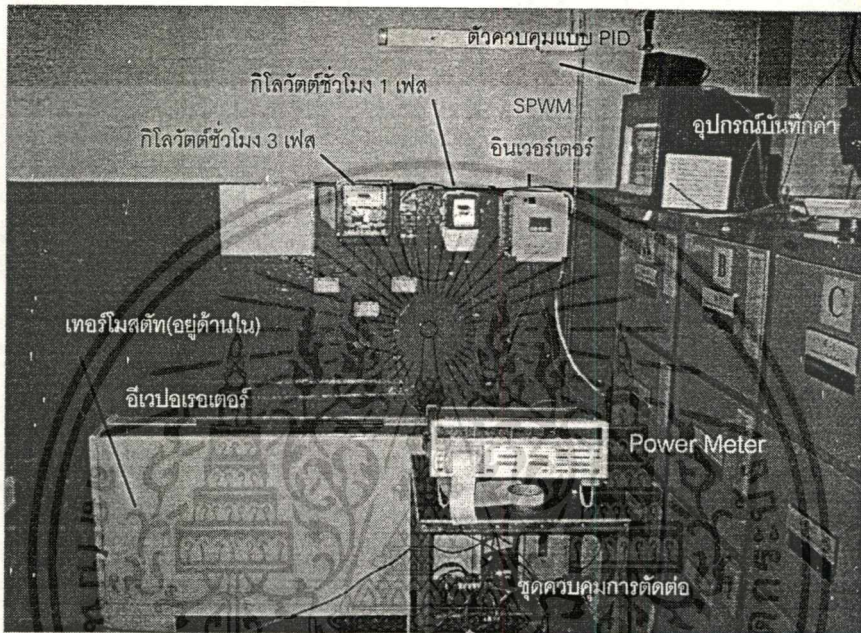


5.4 ผลการทดสอบกับระบบเครื่องปรับอากาศที่พัฒนาขึ้น

ระบบเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในการทดสอบได้แบ่งการควบคุมเป็น 2 แบบ คือ แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท และแบบอินเวอร์เตอร์ พิจารณาระบบทั้งสองแบบได้ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งประกอบด้วยชุด อิเวปอเรเตอร์ ที่มีพัดลมใช้มอเตอร์แบบ PSC และสามารถเลือกความเร็วโดยสวิตช์ ปรับระดับความเร็วได้ 3 ระดับคือ ระดับความเร็วสูง ระดับปานกลาง และระดับต่ำ ส่วนอุปกรณ์ควบคุมการทำงานสามารถเลือกใช้ตามประเภทของการทดสอบได้คือ ประเภทของการทดสอบแบบตัดต่อการทำงาน จะใช้เทอร์โมสแตทควบคุมอุณหภูมิ ส่วนประเภทของการทดสอบแบบอินเวอร์เตอร์ จะใช้ SPWM Inverter และตัวควบคุมแบบ PID ทำหน้าที่ควบคุมเครื่องอัดและอุณหภูมิตามลำดับ ส่วนด้านนอกห้องทดสอบติดตั้งชุดของคอนเดนเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยชุดแมกเนติกที่ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายและป้องกันระบบไฟฟ้าของ มอเตอร์ของเครื่องอัดและมอเตอร์พัดลม เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเวดคัมหรือการทำสุญญากาศของระบบโดยดูดอากาศออกด้วยเครื่องทำแวคคัมขนาดประมาณ 2 ซม. และชาร์จน้ำยา R-22 เข้าระบบเครื่องปรับอากาศ จนกระทั่งความดันทางด้านเข้าให้มีความเท่ากับ 76 PSIG และความ

คันทงด้านขออกให้มค่าเท่ากับ 302 PSIG ซึ่งตัวเลขดังกล่าวเป็นข้อกำหนดของการทดสอบแบบ HBP ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ในตารางที่ 2.3 ในห้องของน้ำยา R-22

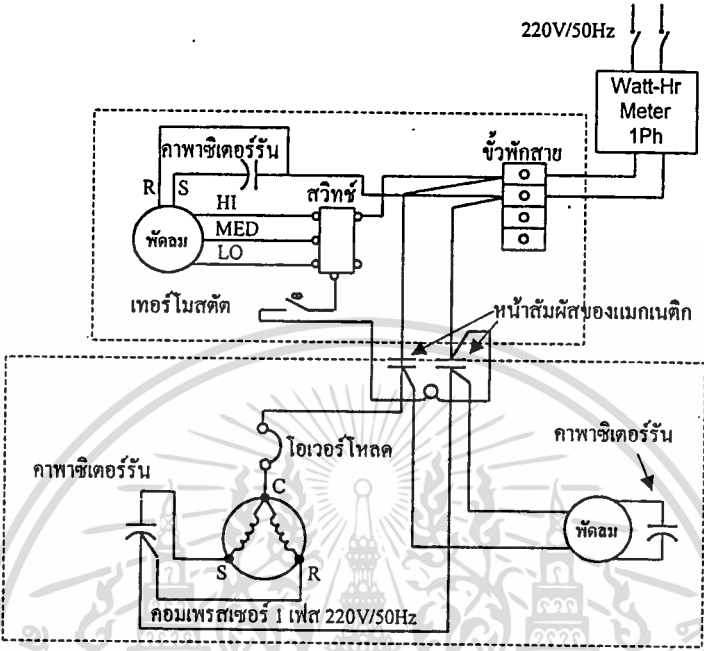
รูปที่ 5.15 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบห้องปรับอากาศ



5.4.1 ผลการทดสอบของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสตัท โดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส 220V/50Hz

ในรูปที่ 5.16 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ในกรอบเส้นประใหญ่ เป็นการเชื่อมต่อของชุดคอนเดนเซอร์ ที่มีเครื่องอัด และพัดลมแบบ PSC ต่ออยู่กับหน้าสัมผัสของ แมกเนติกส์ ส่วนในกรอบเส้นประเล็กเป็นการเชื่อมต่อของชุดอีเวปเรเตอร์ ซึ่งมีพัดลมแบบ PSC สวิตช์เลือกความเร็วพัดลม และเทอร์โมสตัท ทางด้านเครื่องมีวัดจะใช้มิเตอร์วัดชั่วโมงแบบ 1 เฟส เพื่อวัดค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบของระบบสามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งจะพบว่าค่ากระแส ค่าแรงดัน และค่าอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ ของเครื่องอัด นอกจากนี้ยังทราบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อใช้เป็นข้อมูล อ้างอิงสำหรับการทดสอบในลำดับต่อไป

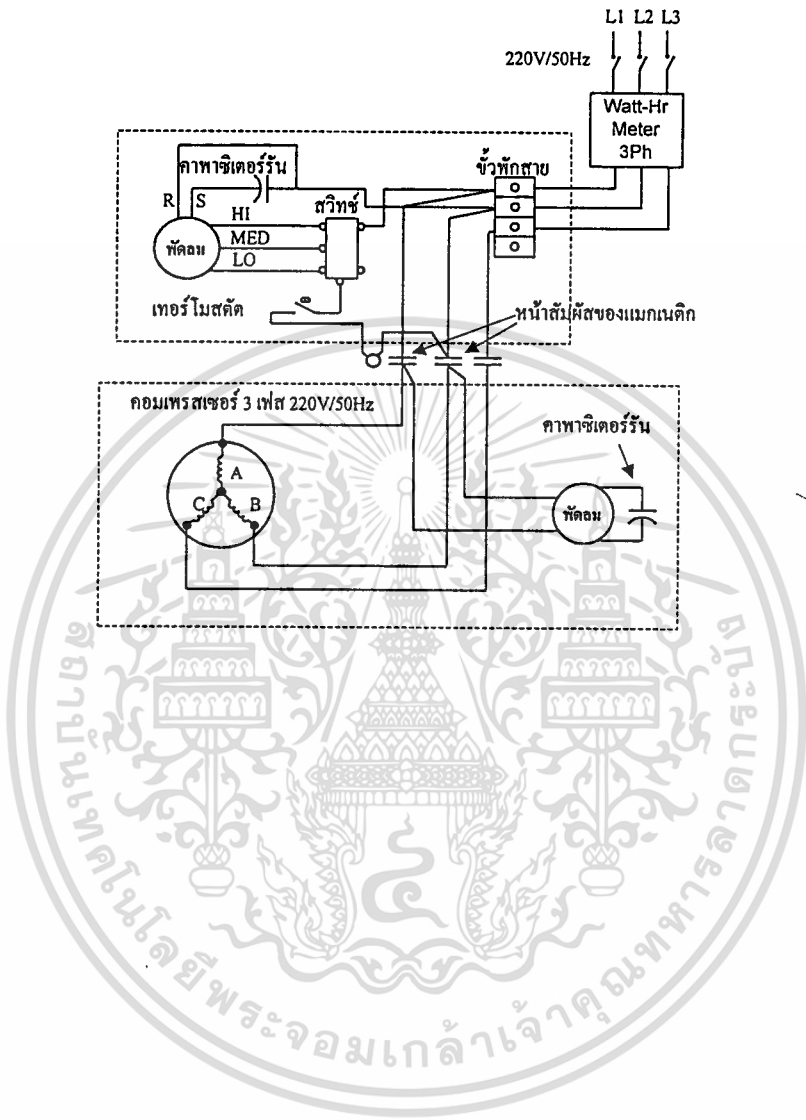
รูปที่ 5.16 วงจรควบคุมของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท โดยใช้
เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz



5.4.2 ผลการทดสอบของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท โดยใช้
ใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz

ในการทดสอบกับระบบนี้อุปกรณ์หลักที่ใช้ ยังคงเหมือนกับระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้
เครื่องอัด 1 เฟส 220V/50Hz แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท ยกเว้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าและ
เครื่องอัดจะเป็นแบบ 3 เฟส นอกจากนี้จะใช้มอเตอร์วัดชั่วโมงแบบ 3 เฟส วัดค่าไฟฟ้าที่ใช้ และ
เพิ่มชุดแมกเนติกส์แบบ 3 เฟส สำหรับควบคุมในการตัดต่อการทำงาน รายละเอียดของวงจรควบ
คุมของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตทโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด
220V/50Hz แสดงดังรูปที่ 5.17 และ ค่าที่ได้จากการทดสอบพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.4

รูปที่ 5.17 วงจรควบคุมของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสตัท โดยใช้
เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสตัทโดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส
ชนิด 220V/50Hz

ลำดับ	ค่าเทอร์โมไดนามิกส์และค่าไฟฟ้า	7/5/98			8/5/98			9/5/98		
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)	26	23	24.5	25.5	22.5	24	26	23	24.5
2	อุณหภูมิลมเป่าออกจากอีเวอเรเตอร์ (°C)	21.5	9	15.25	22	9	15.5	22	9	15.5
3	อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ (°C)	37	29.5	33.25	34	25	29.5	34.5	27	30.75
4	อุณหภูมิเพื่อติดสวาร์จที่ออกจากเครื่องอัด (°C)	28	24	26	26	24	25	26	23	24.5
5	อุณหภูมิเพื่อชักชั้นที่เข้าเครื่องอัด (°C)	38	30	34	38	28	33	40	29	34.5
6	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)	58	42	50	55	39	47	55	39	47
7	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)	73	61	67	70	58	64	68	56	62
8	ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)	67	55	59	68	52	58	65	55	58
9	ความดันทางดันทันเข้า (PSIG)	67	63	65	67	63	65	67	63	65
10	ความดันทางออก (PSIG)	290	270	280	290	270	280	290	270	280
11	ความดันสถณีย์ขณะหยุดทำงาน (PSIG)	120	110	115	120	110	115	120	110	115
12	แรงดันไลน์ (V)	224	220	222	224	220	222	224	220	222
13	กระแสไลน์ (A)	7.2	6.6	6.9	7.2	6.6	6.9	7.2	6.6	6.9
14	กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kWatt/Hr) ที่ใช้	25.6	-	-	23.8	-	-	25.3	-	-

ตารางที่ 5.4 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบติดต่อการทำงานด้วย เทอร์โพสตัทโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส
 ชนิด 220V/50Hz

ลำดับ	ค่าเทอร์โมไดนามิกส์และค่าไฟฟ้า	28/4/98			29/4/98			30/4/98		
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)	26.5	24.5	25.2	27	24	25.5	26	24	25
2	อุณหภูมิลมเป่าออกจากอีวอเตอร์ (°C)	24	9	16.5	23	9.5	16.25	24	9.5	16.75
3	อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ (°C)	37	29	33	36	29.5	32.75	37.5	30	33.75
4	อุณหภูมิท่อคิซซาร์ที่ออกจากเครื่องอัด (°C)	36	30	33	39	30	34.5	37	29	33
5	อุณหภูมิท่อชักขึ้นที่เข้าเครื่องอัด (°C)	27	24	25.5	53	42	27	31	24	27.5
6	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)	52	40	46	30	39	34.5	54	40	47
7	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)	55	42	48.5	50	42	46	50	42	46
8	ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)	66	55	57	65	52	55	68	54	56
9	ความดันทางดันทันเข้า (PSIG)	72	61	66	72	61	66.5	72	61	64.5
10	ความดันทางออก (PSIG)	300	290	295	300	290	287	300	290	290
11	ความดันสมดุลขณะหยุดทำงาน (PSIG)	120	110	115	120	110	115	120	110	115
12	แรงดันโวลต์ (V)	222	215	220	222	215	220	222	215	220
13	กระแสโวลต์ (A)	5.5	4.8	5.15	5.5	4.8	5.15	5.5	4.8	5.15
14	กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (k-Watt/Hr) ที่ใช้	23	-	-	21.7	-	-	22.4	-	-

5.4.3 ผลการทดสอบของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz

การทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ป้อนอินพุทชนิด 1 เฟส 220V/50Hz และแบบที่ป้อนอินพุทชนิด 3 เฟส 220V/50Hz โดยที่ทั้ง 2 แบบ ใช้มอเตอร์ของเครื่องอัดชนิด 220V/50Hz เหมือนกัน วงจรควบคุมระบบแบบนี้ก็จะแตกต่างกับการควบคุมแบบตัดต่อการทำงาน ทั้งทางด้านชุดควบคุมอุณหภูมิและตัวควบคุมมอเตอร์ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ควบคุมปริมาณสารความเย็น จากท่อแคปทิวเดิมมาเป็น เทอร์โมสแตติกเอกเพนชันวาล์ว(Thermostatic Expansion Valve) เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณสารทำความเย็นตลอดช่วงในการควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแคปทิวไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้

5.4.3.1 ผลการทดสอบของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz

วงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.18 ใช้ไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 220V/50Hz 3 เส้น เพื่อจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีอินพุทแบบ 3 เฟส 220V/50Hz ขั้นตอนการทำงานเกิดขึ้นโดย อินเวอร์เตอร์จะรับค่าอุณหภูมิจากตัวควบคุม PID และทำการคำนวณเอาต์พุทของแรงดันที่สัมพันธ์กับความถี่ เพื่อควบคุมมอเตอร์ของเครื่องอัด โดยมีรายละเอียดของวงจรควบคุมของระบบ แสดงดังรูปที่ 5.18 และค่าที่ได้จากการทดสอบของระบบนี้ สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.5

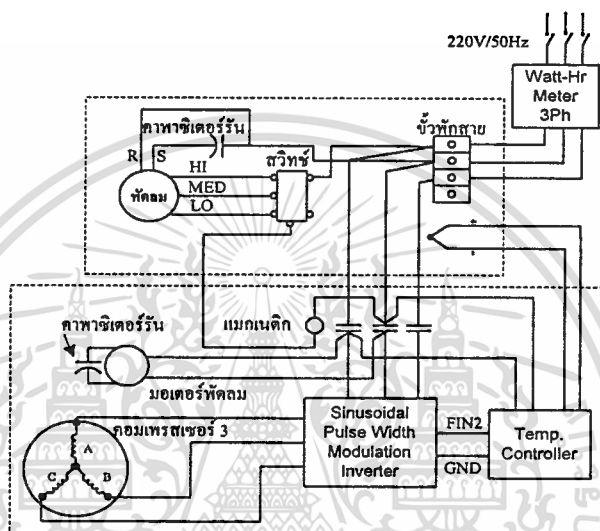
5.4.3.2 ผลการทดสอบของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส 220V/50Hz

วงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.19 มีลักษณะเหมือนกับในหัวข้อ 5.4.3.1 จะแตกต่างเพียงการป้อนอินพุท 1 เฟส 220V/50Hz ให้แก่อินเวอร์เตอร์ แต่อินเวอร์เตอร์ยังคงให้เอาต์พุทเหมือนเดิม ทำให้ได้ข้อดี ในกรณีไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส 220V/50Hz ได้ รายละเอียดของวงจรควบคุมของระบบ แสดงดังรูปที่ 5.19 ส่วนค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.6

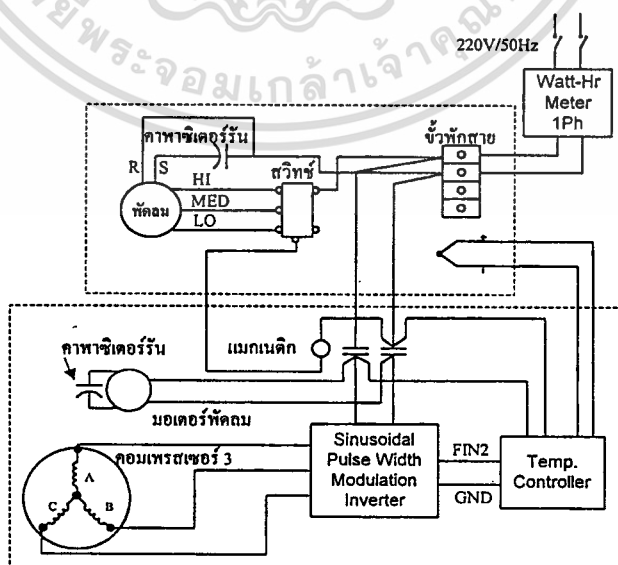
เพื่อให้เห็นความแตกต่างของระบบต่างๆ ที่ทำการทดสอบได้อย่างชัดเจน จึงได้สร้างตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังตารางที่ 5.7 จะพบว่าระบบเครื่องปรับอากาศ

แบบอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่, ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า และสามารถทำความเย็นให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการได้เร็วกว่าแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท

รูปที่ 5.18 แสดงวงจรควบคุมระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz



รูปที่ 5.19 แสดงวงจรควบคุมระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส 220V/50Hz



ตารางที่ 5.5 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz

ลำดับ	ค่าเทอร์โมไดนามิกส์และค่าไฟฟ้า	1/5/98		2/5/98		3/5/98	
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)	25.5	24.9	25	24.35	25.5	25.1
2	อุณหภูมิบนเป่าออกจากรีเวอร์เตอร์ (°C)	17	9.5	13.25	9	17	13
3	อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ (°C)	37.5	29	33.25	30	36	31.8
4	อุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องอัด (°C)	39	32	35.5	30	37	34.5
5	อุณหภูมิที่อุณหภูมิที่เข้าเครื่องอัด (°C)	26	24	25	24	25	24.5
6	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)	61	59.5	60.25	49	58	54
7	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)	59.5	58	58.75	40	52	51
8	ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)	62	52	56	53	66	55
9	ความดันทางดันทันเข้า (PSIG)	70	59	64.5	58	70	64.5
10	ความดันทางออก (PSIG)	300	250	275	250	300	275
11	ความดันสมดุลขณะหยุดทำงาน (PSIG)	-	-	-	-	-	-
12	แรงดัน โวลต์ (V)	222	215	220	215	222	220
13	กระแส โวลต์ (A)	6.310	1.928	-	1.928	6.310	1.928
14	กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kWatt/Hr) ที่ใช้	18.35	-	-	-	20.59	-

ตารางที่ 5.6 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และค่าทางไฟฟ้าของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส 220V/50Hz

ลำดับ	ค่าเทอร์โมไดนามิกส์ และค่าไฟฟ้า	4/5/98		5/5/98		6/5/98	
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)	25.5	24	25	24.5	25	24.25
2	อุณหภูมิลมเป่าออกจากอีเวปอเรเตอร์ (°C)	18	12	18	15	17	12.5
3	อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ (°C)	37.8	26	39	32.5	36	31
4	อุณหภูมิท่อคิศาจที่ออกจากเครื่องอัด (°C)	38	29	38	33.75	38	33
5	อุณหภูมิท่อชักชั้นที่เข้าเครื่องอัด (°C)	27	24	27	25	27	25
6	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)	50	39	50	45	60	50
7	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)	50	39	50	45	50	44.5
8	ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)	67	52	69	54	66	57
9	ความดันทางดันทันเข้า (PSIG)	76	55	76	64.5	76	64
10	ความดันทางออก (PSIG)	300	250	300	280	300	275
11	ความดันสัมบูรณ์ขณะหยุดทำงาน (PSIG)	-	-	-	-	-	-
12	แรงดันโวลต์ (V)	224	220	224	222	224	222
13	กระแสโวลต์ (A)	14.855	5.822	14.855	5.822	14.855	5.822
14	กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kWatt/Hr) ที่ใช้	16.5	-	18.4	-	16.7	-

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบปรับอากาศทั้งหมด

ลำดับ	ค่าเทอร์โม ไดนามิกส์ และค่าไฟฟ้า	แบบ TC 1 เฟส 220V/50Hz	แบบ TC 3 เฟส 220V/50Hz	แบบอินเวอร์เตอร์ อินพุท 1 เฟส 220V/50Hz	แบบอินเวอร์เตอร์ อินพุท 3 เฟส 220V/50Hz
1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)	23-26	24 - 27	24.5 - 25.5	24.5 - 25.5
2	อุณหภูมิลมเป่าออกจากอีเวปเรเตอร์ (°C)	9-25	9-24	12-18	9-17
4	อุณหภูมิท่อคิซซาร์ที่ออกจากเครื่องอัด (°C)	30-38	30-39	28-38	32-37
5	อุณหภูมิท่อซัทชั่นที่เข้าเครื่องอัด (°C)	20-26	24-30	23-27	24-25
6	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)	44-58	42-50	38-50	50-52
7	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)	65-78	42-53	39-50	50-58
8	ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดสอบ (เปอร์เซ็นต์)	58	57	55	56
9	ความดันทางดันทันเข้า (PSIG)	63-70	61-72	53-76	58-70
10	ความดันทางออก (PSIG)	290-300	290-300	250-300	250-300
11	ความดันสมดุลย์ขณะหยุดทำงาน (PSIG)	110-120	-	-	-
12	แรงดัน ไลน์มอเตอร์ (V)	220	220	135.4 - 229.8	123.9 - 218.5
13	กระแสมอเตอร์ (A)	7.2	5.52	5.822-14.855	1.928-6.310
14	กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kWatt/Hr) ที่ใช้	25	22	17	18
15	เวลาที่ใช้ในการทำความเย็นถึงอุณหภูมิที่ต้องการ(นาที)	12	10	6	7

-: แบบ TC คือ แบบตัดการทำงานด้วยเทอร์โมสตัด

5.5 กราฟที่ได้จากการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศที่พัฒนาขึ้น

จากการนำเสนอผลการทดสอบด้วยตารางที่ 5.3 ถึงตารางที่ 5.7 อาจจะไม่เห็นความแตกต่างในการทำงานของระบบต่างๆมากนัก ดังนั้นให้พิจารณาจากกราฟบันทึกผลการทดสอบประกอบในการเปรียบเทียบกับ ก็จะเห็นความแตกต่างในการทำงานได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งกราฟบันทึกผลการทดสอบจะอยู่ในภาคผนวก ข โดยจะนำเสนอเฉพาะบางส่วนเท่านั้น ในที่นี้ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างกราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz ณ วันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2541 ตั้งแต่เวลา 10.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. ดังรูปที่ 5.20 และตัวอย่างกราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท โดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz ณ วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2541 ตั้งแต่เวลา 01.00 น. ถึงเวลา 13.00 น. ดังรูปที่ 5.21 ซึ่งในการพิจารณากราฟบันทึกผลการทดสอบมีตัวเลขต่างๆที่แทนความหมายต่างๆ ได้ดังนี้

ทางด้านซ้ายมือของกราฟ จะมีกลุ่มตัวเลขดังนี้

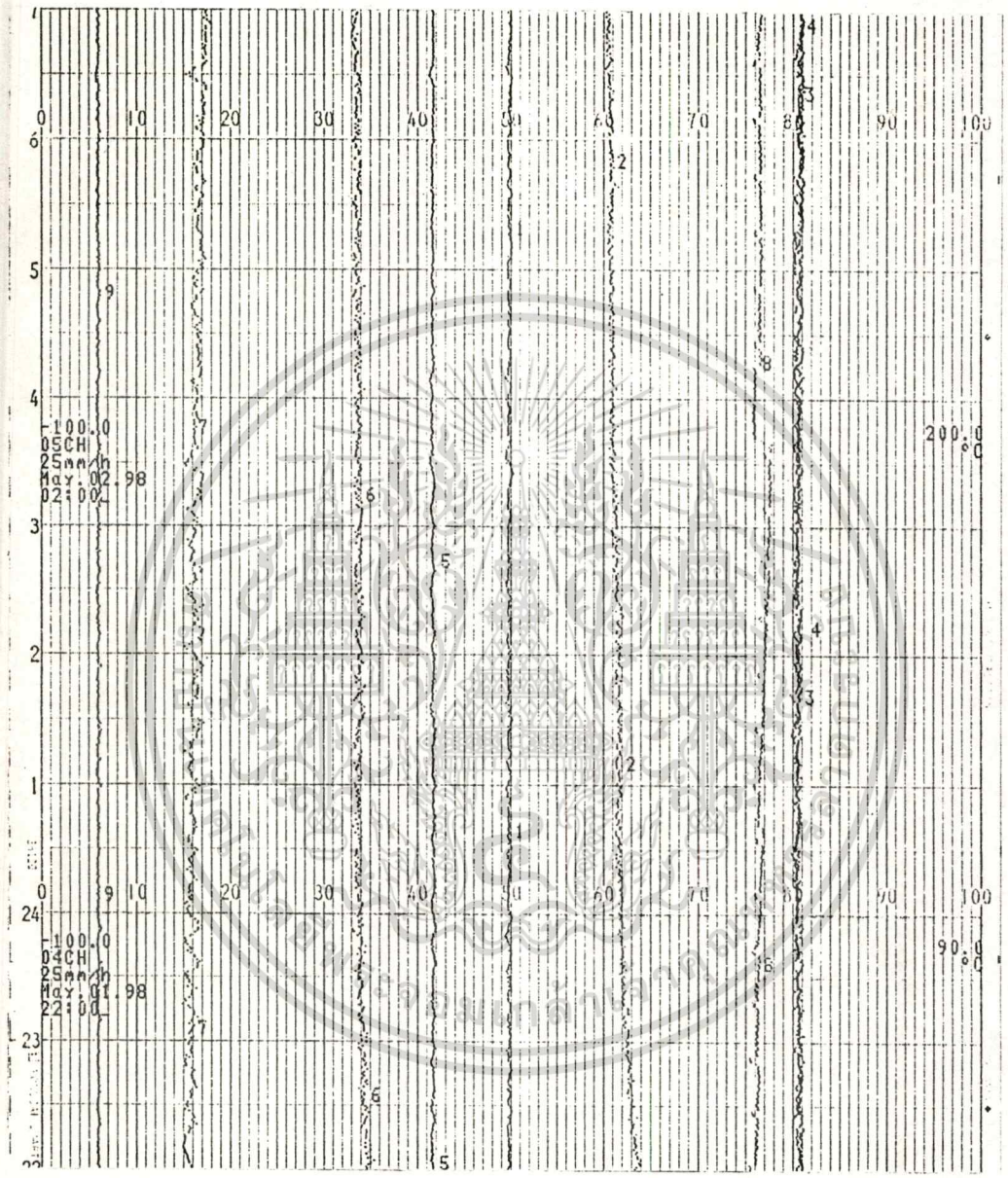
-100	→	ค่าต่ำสุดของข้อมูล (ค่าสูงสุดจะอยู่ทางด้านขวามือบรรทัดเดียวกัน)
05CH	→	ข้อมูลตัวที่ 5
25mm/h	→	ระยะห่างในการพิมพ์ 25 มิลลิเมตร ต่อ 1 ชั่วโมง
May.16.98	→	วันที่ 16 พฤษภาคม 2541
07:00_	→	เวลา 7.00 น.

ตัวเลขของเส้นกราฟ มีความหมายดังนี้

กราฟหมายเลข 1	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ (°C)
กราฟหมายเลข 2	อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ (°C)
กราฟหมายเลข 3	อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเครื่องอัด (°C)
กราฟหมายเลข 4	อุณหภูมิบริเวณด้านบนของเครื่องอัด (°C)
กราฟหมายเลข 5	อุณหภูมิท่อคิซซาร์จที่ออกจากเครื่องอัด (°C)
กราฟหมายเลข 6	อุณหภูมิท่อชักชั้นที่เข้าเครื่องอัด (°C)
กราฟหมายเลข 7	อุณหภูมิบริเวณลมเป่าออกของอีเวปอเรเตอร์ (°C)
กราฟหมายเลข 8	แรงดันไลน์ (V)
กราฟหมายเลข 9	กระแสไลน์ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.20 แสดงกราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่อง
อัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz. และป้อนอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 220V/50Hz



กระแส(9)

อุณหภูมิที่โอเวอร์เตอร์(7)

อุณหภูมิที่ท่อด้านดูด(6)

อุณหภูมิที่ท่อด้านออก(5)

อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ(1)

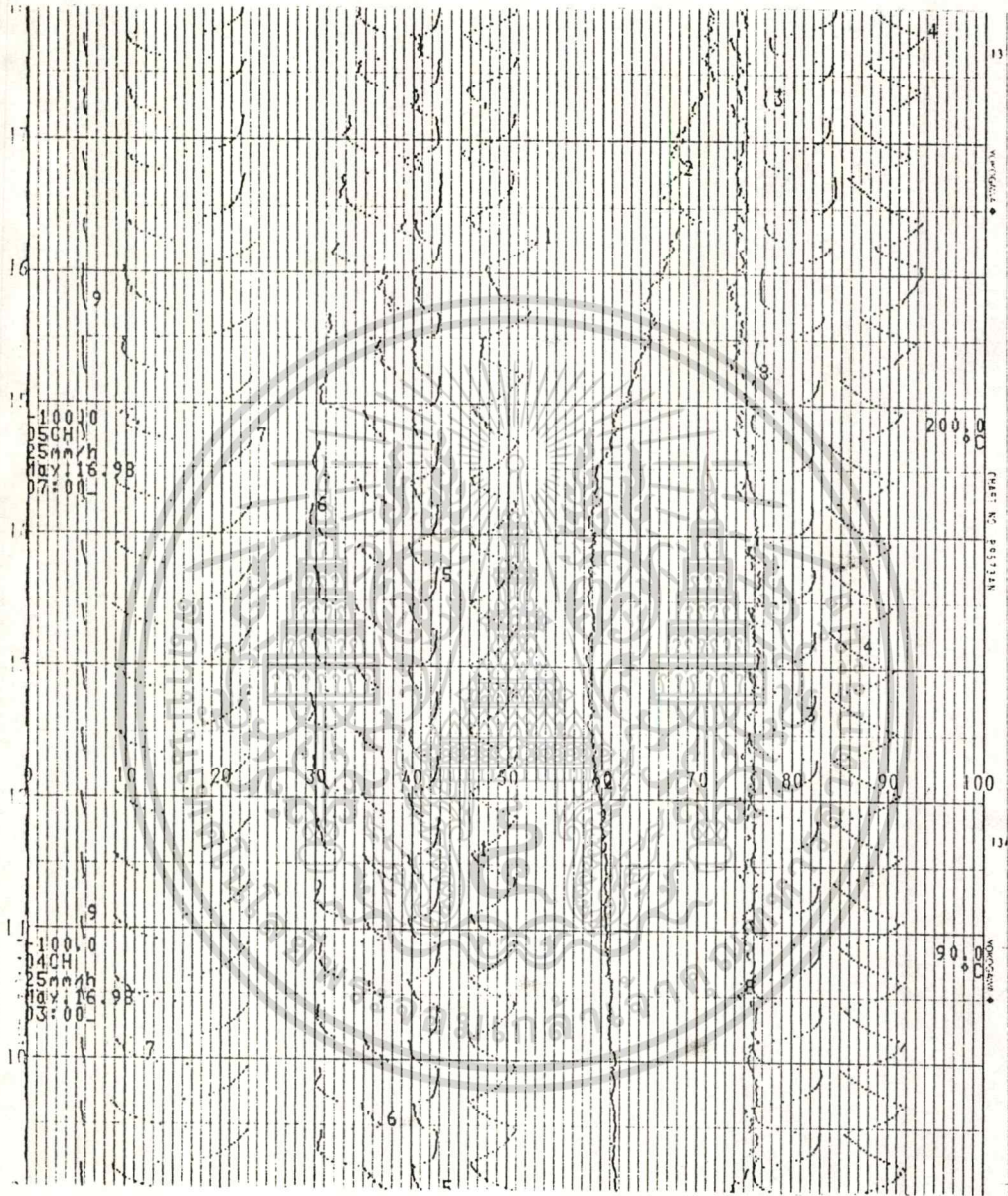
อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ(2)

แรงดัน(8)

คอมเพรสเซอร์เครื่องตัด(3)

อุณหภูมิที่บานบนของเครื่องอัด(4)

รูปที่ 5.21 แสดงกราฟบันทึกผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบตัดต่อการทำงานด้วย
เทอร์โมสตัท โดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz



กระแส(9)

อุณหภูมิที่โอเวอร์เตอร์(7)

อุณหภูมิที่ท่อด้านดูด(6)

อุณหภูมิที่ท่อด้านออก(5)

อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ(1)

อุณหภูมิภายนอกห้องทดสอบ(2)

แรงดัน(8)

อุณหภูมิด้านข้างของเครื่องอัด(3)

อุณหภูมิด้านบนของเครื่องอัด(4)

จากกราฟบันทึกผลการทดสอบในรูปที่ 5.20 และ รูปที่ 5.21 ทำให้วิเคราะห์การทำงานของระบบที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน จะพบว่ากราฟหมายเลข 1 ของระบบปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์จะค่อนข้างคงที่ ณ อุณหภูมิที่ตั้งไว้ (25°C ซึ่งตรงกับคอลัมน์ที่ 50) ไม่ว่าอุณหภูมิภายนอก(กราฟหมายเลข 2) จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ส่วนกราฟหมายเลข 3 ถึง กราฟหมายเลข 6 จะมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน จากกราฟหมายเลข 7 ถึงกราฟหมายเลข 9 จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการทำความเย็นและจังหวะในการทำงาน



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทำวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเพียงแนวทางหนึ่งในการศึกษาระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก ซึ่งในปัจจุบันจะมีราคาสูงมาก เนื่องจากจะต้องนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาจากต่างประเทศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางในการพัฒนาระบบเครื่องปรับอากาศจากแบบเดิมคือแบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท ให้เป็นแบบอินเวอร์เตอร์ โดยที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่ต่ำกว่า แต่ให้ความสามารถและคุณสมบัติที่ดีทัดเทียมกับต่างประเทศได้ การนำเสนอในการวิจัยนี้ จะทำให้ทราบตั้งแต่ ขั้นตอนการออกแบบมอเตอร์ของเครื่องอัดจนถึงแนวทางหรือหลักการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์อย่างละเอียด และยังได้นำผลการทดสอบทั้งสองแบบคือ ระบบเครื่องปรับอากาศแบบธรรมดาและ ระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ มาเปรียบเทียบความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ การทำความเย็นเริ่มต้น และการประหยัดพลังงาน โดยทำการทดสอบ ณ สถานที่เดียวกัน ที่อุณหภูมิเท่ากัน และในช่วงเวลาเท่ากัน

6.1 การออกแบบ

การออกแบบส่วนใหญ่ผู้วิจัยได้เน้นไปในทางการออกแบบมอเตอร์ของเครื่องอัดแบบลูกสูบ ซึ่งได้เสนอการออกแบบมอเตอร์ทั้ง แบบ 1 เฟส และ 3 เฟส จุดประสงค์คือการออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ทดแทน มอเตอร์ 1 เฟส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและมีความยืดหยุ่นในการควบคุมมอเตอร์ โดยคงรูปร่างของลามิเนตเตอร์และโรเตอร์ไว้ แทนที่จะต้องสร้างแผ่นลามิเนตขึ้นใหม่ ซึ่งค่าใช้จ่ายจะสูงมาก ส่วนทฤษฎีที่นำมาใช้ในการออกแบบคือ ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง ซึ่งสามารถออกแบบมอเตอร์ได้ทั้งแบบเฟสเดียวและหลายเฟส จากนั้นนำมอเตอร์ที่ออกแบบมาทดสอบกับเครื่องทดสอบมอเตอร์ และเครื่องทดสอบเครื่องอัด จากการทดสอบทั้งสองวิธีที่

กล่าวมา ก็สามารถที่จะเลือกมอเตอร์ตามที่ต้องการได้

ทางด้านการออกแบบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ ได้เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์บางตัว อาทิเช่น เปลี่ยนตัวควบคุมปริมาณสารทำความเย็นจากท่อ แคพิลลารีทิว เป็น เทอร์โมสตติก แยกแพนชันวาล์ว เพื่อให้ปริมาณของสารทำความเย็นสามารถปรับเปลี่ยนตามโหลดและทำงานได้ตลอดย่านความถี่ของเครื่องอัด เปลี่ยนตัวควบคุมการตัดต่อการทำงานจากเทอร์โมสตัทให้เป็นอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความถี่ของมอเตอร์ของเครื่องอัด และเพิ่มตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ทำหน้าที่ตรวจสอบอุณหภูมิภายในห้องและส่งสัญญาณกระแสควบคุมให้กับอินเวอร์เตอร์

6.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศของงานวิจัยนี้ ได้แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ระบบที่มีการตัดต่อการทำงาน และระบบอินเวอร์เตอร์ พบว่าระบบอินเวอร์เตอร์ สามารถทำความเย็นได้เร็วกว่า และควบคุมอุณหภูมิได้คงที่กว่า อีกทั้งยังสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบที่มีการตัดต่อการทำงานที่ใช้ในปัจจุบัน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้

6.2.1 ระบบอินเวอร์เตอร์ทำความเย็นได้เร็วกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

6.2.2 ระบบอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ระหว่าง $\pm 0.5-1.0$ องศาเซลเซียส

6.2.3 ระบบอินเวอร์เตอร์ ที่มีอินพุตแบบ 3 เฟส ประหยัดค่าไฟกว่า 28 เปอร์เซ็นต์

6.2.4 ระบบอินเวอร์เตอร์ ที่มีอินพุตแบบ 1 เฟส ประหยัดค่าไฟกว่า 32 เปอร์เซ็นต์

6.3 อุปสรรค

ส่วนของอุปสรรคในการทำวิจัย คือในขั้นตอนของการออกแบบมอเตอร์ ค่าที่ได้จากการออกแบบบางค่าไม่ตรงกับการคำนวณโดยโปรแกรมจากต่างประเทศ จึงต้องเสียเวลาในการหาสาเหตุว่าเป็นเพราะแฟกเตอร์ตัวไหน อย่างไรก็ตามเราสามารถหาคำตอบได้ด้วยการวิเคราะห์ผลจากเครื่องทดสอบมอเตอร์ได้ และแก้ไขการออกแบบจนได้มอเตอร์ตามที่ต้องการ พบว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กตัดขวาง ให้ผลการออกแบบที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าการออกแบบด้วยโปรแกรม เนื่องจากสามารถปรับค่าคงที่ต่างๆให้เหมาะสมกับงานได้ นอกจากนี้ในการทดสอบระบบเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ ต้องใช้เวลาในการหาเงื่อนไขของการทำงานที่จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด นั่นหมายถึงระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่และประหยัดพลังงานมากที่สุด พบว่าย่านความถี่ที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้คือ 15-70 Hz โดยที่ความถี่ระหว่างค่าความถี่นี้ ตัวควบคุม PID จะทำการคำนวณความถี่ที่เหมาะสมกับภาระโหลดของห้องได้โดยอัตโนมัติ

6.4 ต้นทุน

ต้นทุนการผลิตในการวิจัยมีดังนี้

6.4.1 เครื่องอินเวอร์เตอร์ ขนาด 3 แรงม้า 24,000 บาท สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกใช้ เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานมาก เหมาะสมกับงานวิจัย ในขณะที่มีรุ่นอื่นซึ่งเป็ยี่ห้อเดียวกัน และมีขนาดแรงม้าใกล้เคียงกัน ราคาเพียง 9,000 บาทเท่านั้น

6.4.2 ชุดแผ่นคอยล์ยูนิตและคอนเดนซิงยูนิต ราคา 5,100 บาท

6.4.3 เทอร์โมสแตติกเอกแพนชันวาล์ว ราคา 1,200 บาท

6.4.4 มอเตอร์ของเครื่องอัดสร้างชิ้นเอง ราคา 3,500 บาท

6.4.5 ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ราคา 5,000 บาท

ดังนั้นราคารวมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดสอบประมาณ 38,800 บาท แต่ถ้าใช้อินเวอร์เตอร์ราคา 5,000 บาท ราคารวมเหลือประมาณ 24,800 บาท จะเห็นว่าราคาแตกต่างกันมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับระบบที่จะติดตั้งด้วย

6.5 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้ สามารถแนะแนวทางได้ดังนี้

6.5.1 ทางด้านการควบคุมปริมาณสารทำความเย็น ควรเลือกใช้ เทอร์โมอิเล็กทริกเอกแพนชันวาล์ว ทดแทนการใช้เทอร์โมสแตติกเอกแพนชันวาล์ว เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกเอกแพนชันวาล์วสามารถตรวจสอบอุณหภูมิที่อีเวปอเรเตอร์ได้หลายจุด ทำให้การควบคุมถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.2 ทางด้านอุปกรณ์ความเร็วรอบและตัวควบคุม PID ควรมีการวิจัยและสร้างขึ้นมาเองเพื่อกำหนดให้ทำงานเฉพาะฟังก์ชันที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อลดต้นทุนเพราะราคาปัจจุบันยังคงสูงอยู่มาก

6.5.3 การเพิ่มฟังก์ชันในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ของชุดเฟ้นคอยล์ยูนิต และคอนเดนซิงยูนิต จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้อีก แต่ในการปรับจะต้องศึกษาหาจุดที่เหมาะสมกับย่านของเครื่องอัดและห้องใช้งาน (ผู้วิจัยได้ทดลองปรับความเร็วรอบให้เท่ากับเครื่องอัด(1:1) ปรากฏว่าผลที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ)

6.5.4 พัฒนามอเตอร์ของเครื่องอัดให้เป็นแบบ Brushless DC motor ซึ่งจะทำให้ได้ข้อดีทางด้านการควบคุมและความประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นอีก^{๕๖}



บรรณานุกรม

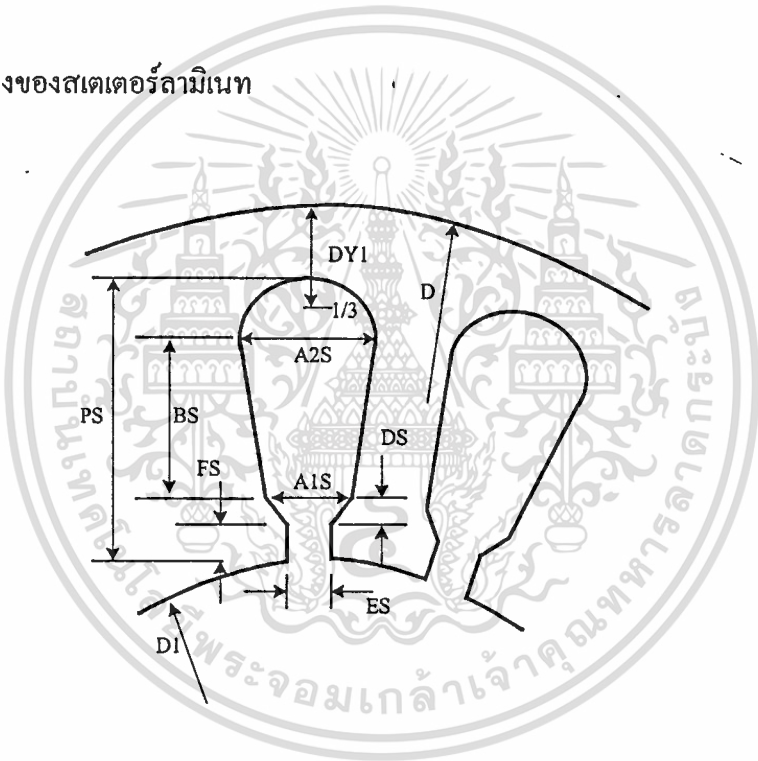
1. วิจิตร บุญยธรโรกุล, “ระบบทำความเย็น ตู้เย็น-ห้องเย็น”, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2533
2. Andrew D. Althouse, Garl H. Turnquist and Alfred F. Bracciano, “Modern Refrigeration and Air-conditioning”, Illinois : The goodheart-Willcox Company, 1975.
3. Tecumseh Instruction Manual, Tecumseh Co. Ltd., USA
4. Langsdorf Alexander S., “Theory of Alternating - current Machinery”, New York : John Wiley & Sons, 1954.
5. Puchstein A.F., T.C. Loyd and A.G. Conrad, “Alternating - current Machines”, New York : John Wiley & Sons, 1954.
6. วัลลภ เรืองด้วยธรรม, “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก”, วิทยานิพนธ์ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2539
7. วัลลภ เรืองด้วยธรรม และคนอื่นๆ, “การคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก โดยใช้ทฤษฎีสถิตแม่เหล็กตัดขวาง”, วารสารวิศวกรรมสารลาดกระบัง ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 (กรกฎาคม 2539) : 19-26
8. พิรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และ ณรงค์เดช ศรีอัสวอมร, “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2531
9. Veinott Cyril G., “Theory and Design of Small Induction Motors”, Second Edition. Sarasota. FL : Published by Author, 1986.
10. Veinott Cyril G., “How to Design a Single - phase Motor on a Personal Computer. Second Edition”, Sarasota. FL , Published by Author, 1989.
11. Gopal K. Dubey, “Power Semiconductor Controlled Drives”, New Jersey, Prentice Hall ,1986
12. Yokogawa Instruction Manual, “UT 15 Manual”, Yokogawa Co. Ltd., Thailand
13. George McPherson and Robert D. Laramore, “Electrical Machines and Transformers”, pp. 276-284, New York : John Wiley & Sons, 1990.

ภาคผนวก ก

การคำนวณออกแบบแผ่นลามิเนต

ในรูปที่ 1 แสดงรูปร่างของสเตเตอร์ลามิเนตแบบก้นสล็อตกลม (Round-bottom Slots) โดยมีข้อมูลบังคับที่ต้องการทราบเพื่อใช้ในการคำนวณการออกแบบ มีดังนี้

รูปที่ 1 แสดงรูปร่างของสเตเตอร์ลามิเนต



- S1 จำนวนช่องสล็อตของสเตเตอร์
- D เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (stator punching OD.)
- D1 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (stator bore)
- ES ช่องสล็อตเปิด (stator slot opening)
- A1S ความกว้างช่องสล็อตของสเตเตอร์ด้านบน(stator slot width at top)
- A2S ความกว้างช่องสล็อตของสเตเตอร์ด้านล่าง(stator slot width at bottom)
- BS ความลึกของช่องสล็อต(Depth of main trapezoidal part)
- DS ความลึกปากช่องสล็อต(Depth of slot mouth)
- FS ความลึกช่วงปลายของซี่สล็อต(Depth of tooth tip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PS ความลึกของช่องสลิตทั้งหมด(Total depth of stator slot)

CELL ความหนาของฉนวนรองช่องสลิต(Thickness of stator slot liner)

TMS ความหนาของฉนวนกันแยกระหว่างขดลวด

ค่าอินพุตทั้งหมดนี้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบสำหรับร่องสลิตแบบกลม ดังนี้

DE ; เส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดกึ่งกลางช่องสลิต

$$DE = D1 + FS + DS + PS \quad (1)$$

TL1 ; ความยาวของซี่สลิต

$$TL1 = PS - A2S/4 \quad (2)$$

DY1 ; ความลึกส่วนโครง

$$DY1 = (D - D1)/2 - PS + 0.1 * A2S \quad (3)$$

SWA; พื้นที่หน้าตัดของช่องสลิต

$$GSWA(\text{Gross area}) = [BS * (A1S + A2S)/2] + \pi A2S^2/8 \quad (4)$$

$$SWA = GSWA - \{[(2 * BS) + (\pi * 0.5 * A2S)] * CELL\} - (A2S * TMS) \quad (5)$$

FKSIA; ค่าคงที่ช่องสลิตของส่วนที่เป็นอากาศ

$$FKSIA = (FS/ES) + \{(4 * DS)/[(3 * ES) + A1S]\} \quad (6)$$

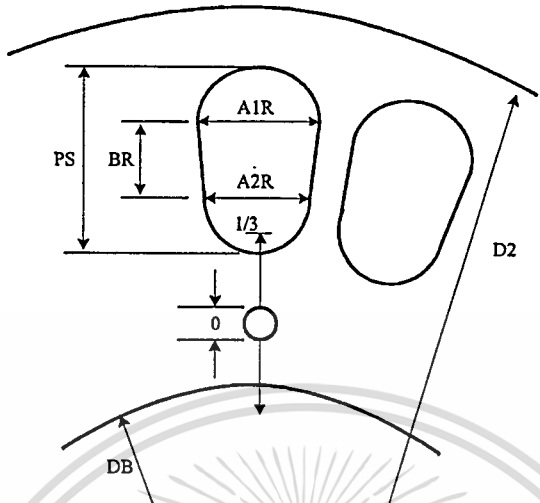
FKSIW; ค่าคงที่ช่องสลิตของส่วนที่เป็นขดลวด

$$FKSIW = 0.284 - 0.143 * X + (BS/A2S)/(2.87 * X + 0.18) \quad (7)$$

การออกแบบโรเตอร์ลามีเนท

แผ่นโรเตอร์ลามีเนทมีลักษณะเป็นแผ่นบางเช่นเดียวกับสเตเตอร์ลามีเนท แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า และมีตัวนำในช่องสลิตเป็นอลูมิเนียม ซึ่งถูกหลอมละลายและหล่อ เข้ากับแกนเหล็กของโรเตอร์ ในรูปที่ 2 แสดงรูปร่างของโรเตอร์ลามีเนทแบบช่องสลิต ปิด(Close-Slots) โดยมีข้อมูลบังคับที่ต้องการทราบเพื่อใช้ในการคำนวณการออกแบบ มีดังนี้

รูปที่ 2 รูปร่างของโรเตอร์ลามิเนต



S2	จำนวนช่องสลีตของโรเตอร์	D2	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก
A1R	ความกว้างช่องสลีตด้านบน	A2R	ความกว้างช่องสลีตด้านล่าง
BR	ความลึกของส่วนที่เหลื่อมคางหมู	DR	ความลึกปากช่วงสลีต
ER	ความกว้างของปากช่องสลีต	FR	ความลึกช่วงปลายของซี่สลีต
PR	ความลึกของช่องสลีตทั้งหมด	T2	ความกว้างของซี่สลีต

ค่าอินพุตทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบสำหรับร่องสลีตแบบกลม ดังต่อไปนี้

DOR; เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของโรเตอร์ ณ จุดกึ่งกลางของตัวนำในช่องสลีต

$$DOR = D2 - PR - FR \tag{8}$$

BDP; ความลึกของตัวนำในช่องสลีต

$$BDP = PR - FR \tag{9}$$

TL2; ความยาวของซี่สลีต

$$TL2 = BDP - [0.1 * (A1R + A2R)] \tag{10}$$

DY2; ความลึกของส่วนโค้ง

$$DY2 = \{0.5 * [D2 - DB - (2 * PR)]\} + (0.1 * A2R) \tag{11}$$

RSA; พื้นที่หน้าตัดของช่องสลีต

$$RSA = \{[A1R + A2R] * BR\} + [\pi * (A1R^2 + A2R^2) / 4] / 2 \tag{12}$$

FKS2A; ค่าคงที่ช่องสลีตของส่วนที่เป็นอากาศ

$$FKS2A = 1 \quad (13)$$

FKS2W; ค่าคงที่ช่องสล็อตของส่วนที่เป็นขดลวด

$$FKS2W = 0.284 - (0.143 * XX) + \{(BR/A2R)/[(2.87 * XX) + 0.18]\} + 0.78 \quad (14)$$

การคำนวณหาค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อทำการคำนวณค่าคงที่ของสเตเตอร์และโรเตอร์ลามิเนตแล้ว ลำดับต่อไปทำการหาค่าคงที่ของขดลวด วงจรโรเตอร์ วงจรแม่เหล็ก ค่ารีแอคแตนซ์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสมรรถนะ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็ก

การคำนวณหาค่าคงที่ของขดลวด

ACTM ; ระยะห่างเฉลี่ยในแต่ละด้านของขดลวดข้อย (Average Coils Throw)

$$ACTM = \frac{C1T1 + C2T2 + C3T3}{C1 + C2 + C3} \quad (15)$$

A77 ; ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ (Length Means Coils)

$$A77 = L1 + \frac{\pi De ACTM y}{S1} + EXM \quad (16)$$

CM ; จำนวนลวดตัวนำทั้งหมดของขดลวด (Total number of series conductors)

$$CM = \frac{2 * P * (C1 + C2 + C3 + \dots)}{QM} \quad (17)$$

W ; ตัวประกอบความยาวสำหรับการคำนวณความต้านทาน

$$W = \frac{(0.8832 \times 10^{-4}) * CM * A77}{PCM} \quad (18)$$

CM1, CM2; ตัวประกอบพื้นที่สำหรับขดลวด 2 ชุด

$$CM1 = \frac{A25 * A26^2 * QM}{SECTS} \quad (19)$$

$$CM2 = \frac{A28 * A29^2 * QM}{SECTS} \quad (20)$$

A79; ความต้านทานของขดลวดที่ 25 องศาเซลเซียส (Cold Resistance)

$$A79 = \frac{W}{(CM1 + CM2)} \quad \text{โอห์ม} \quad (21)$$

A82, A83; น้ำหนักของขดลวดชุดที่ 1 และชุดที่ 2

$$A82 = 0.265 * CM * A77 * CM1 \quad (22)$$

$$A83 = 0.265 * CM * A77 * CM2 \quad (23)$$

R1; ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิใดๆ

$$R1 = A79 \cdot (259.5 + TR) / 259.5 \quad (24)$$

CKWM ; จำนวนตัวนำประสิทธิภาพของขดลวด

$$CKWM = CM \cdot A84 \quad (25)$$

SF; เปอร์เซนต์ลวดตัวนำในช่องสลีต

$$SF = 100 \cdot AW / SWA \quad \% \quad (26)$$

การคำนวณค่าคงที่ในวงจรโรเตอร์

1. BAR R; ความต้านทานตัวนำในโรเตอร์

$$BAR R = 100 \cdot K_{R2} \frac{\sqrt{GI^2 + SK^2}}{S2 \cdot AB \cdot PCD} \quad \text{โอห์ม} \quad (27)$$

2. RING R; ความต้านทานของวงแหวนลัดวงจร

$$RING R = \frac{63.7 \cdot DOR \cdot K_{R2} \cdot K_{RING}}{AR \cdot P^2 \cdot PCD} \quad \text{โอห์ม} \quad (28)$$

3. COLD R2; ความต้านทานของโรเตอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส

$$COLD R2 = BAR R + RING R \quad (29)$$

4. R2; ความต้านทานของโรเตอร์ที่ อุณหภูมิใดๆ

$$R2 = COLD R2 \cdot (250 + TR) / 250 \quad (30)$$

การคำนวณค่าคงที่ในวงจรแม่เหล็ก

ทางเดินของฟลักแม่เหล็กจะถูกแบ่งเป็น 5 ส่วนคือ แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core), ซี่สลีตสเตเตอร์ (Stator Teeth), แกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor Core), ซี่สลีตโรเตอร์ (Rotor Teeth) และช่องว่างอากาศ (Air Gap) การคำนวณจะทำที่ละส่วนดังนี้

พื้นที่หน้าตัดของทางเดินฟลักแม่เหล็ก

แกนเหล็กสเตเตอร์

$$A106 = 2 \cdot A105 \cdot GI \cdot DY1 \quad (31)$$

ซี่สลีตสเตเตอร์

$$A107 = A105 \cdot GI \cdot S1 \cdot T1 / P \quad (32)$$

แกนเหล็กโรเตอร์

$$A108 = 2 \cdot A105 \cdot GI \cdot DY2 \quad (33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซี่สล็อตโรเตอร์

$$A109 = A105 * GI * S2 * T2 / P \quad (34)$$

ช่องว่างอากาศ(A111)

$$G = \text{ความยาวของช่องอากาศ} = (D1 - D2) / 2 \quad (35)$$

$$A110 = \text{Pole pith} = \pi(D2 + G) / P \quad (36)$$

$$A111 = GI * A110 \quad (37)$$

ความยาวของทางเดินฟลักแม่เหล็ก

แกนเหล็กสเตเตอร์

$$A112 = \pi(D - DY1) / (2 * P) \quad (38)$$

ซี่สล็อตสเตเตอร์

$$A113 = TL1 \quad (39)$$

แกนเหล็กโรเตอร์

$$A114 = \pi(D2 - (2 * TL2) - DY2) / (2 * P) \quad (40)$$

ซี่สล็อตโรเตอร์

$$A115 = TL2 \quad (41)$$

ช่องว่างอากาศ(A111)

$$TP1 = \text{พิตช์ของซี่สล็อตสเตเตอร์} = \pi * D1 / S1 \quad (42)$$

$$TP2 = \text{พิตช์ของซี่สล็อตโรเตอร์} = \pi * D2 / S2 \quad (43)$$

AK1 ; ตัวประกอบช่องว่างอากาศของสเตเตอร์

$$AK1 = \{TP1 * [(5 * G) + ES]\} / \{[TP1 * ((5 * G) + ES)] - ES^2\} \quad (44)$$

AK2 ; ตัวประกอบช่องว่างอากาศของโรเตอร์

$$AK2 = \{TP2 * [(5 * G) + ER]\} / \{[TP2 * ((5 * G) + ER)] - ER^2\} \quad (45)$$

$$GE = G * AK1 * AK2 \quad (46)$$

ความหนาแน่นฟลักแม่เหล็ก

แกนเหล็กสเตเตอร์

$$BY1 = FLUX / A106 \quad (47)$$

ซี่สล็อตสเตเตอร์

$$BT1 = FLUX * \pi / (2 * A107) \quad (48)$$

แกนเหล็กโรเตอร์

$$BY2 = FLUX * AKV / A108 \quad (49)$$

ซี่สล็อตโรเตอร์

$$BT2 = FLUX * AKV * \pi / (2 * A109) \quad (50)$$

ช่องว่างอากาศ(A111)

$$BG = FLUX * AKV * \pi / (2 * A111) \quad (51)$$

แอมแปร์-รอบ

แกนเหล็กสเตเตอร์

$$ATY1 = HY1 * 2 * A112 / \pi \quad (52)$$

ซี่สล็อตสเตเตอร์

$$ATT1 = HT1 * TL1 \quad (53)$$

แกนเหล็กโรเตอร์

$$AY2 = HY2 * 2 * A114 / \pi \quad (54)$$

ซี่สล็อตโรเตอร์

$$ATT2 = HT2 * TL2 \quad (55)$$

ช่องว่างอากาศ(A111)

$$ATG = 313 * GE * BG \quad (56)$$

แอมแปร์-รอบรวมของวงจรมแม่เหล็ก

$$AT = ATY1 + ATT1 + ATY2 + ATT2 + ATG \quad (57)$$

ตัวประกอบกำอิมตัว

$$SFM = AT / ATG \quad (58)$$

การคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์

โดยคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ร่วม(Mutual Reactance) และรีแอกแตนซ์รั่ว(Leakage Reactance) ของมอเตอร์ ซึ่งรีแอกแตนซ์แบ่งออกเป็น 5 ส่วนประกอบ คือ รีแอกแตนซ์รั่วช่องสล็อต (Slot Leakage Reactance), รีแอกแตนซ์รั่วซิกแซก(Zig-zag Leakage Reactance), รีแอกแตนซ์รั่ว

ส่วนปลาย(End Leakage Reactance), รีแอเจนซ์รั้วสายพาน(Belt Leakage Reactance) และรีแอเจนซ์รั้วสลิต(Skew Leakage Reactance) โดยมีขั้นตอนดังนี้

AKZZ; ค่าคงที่ซิกแซก

T10; ระยะตามแนวเส้นรอบวงของซี่สลิตสเตเตอร์

$$T10 = TP1 - ES \quad (59)$$

T20; ระยะตามแนวเส้นรอบวงของซี่สลิตโรเตอร์

$$T20 = TP2 - ER \quad (60)$$

$$AKZZ = \frac{(T10 + T20)^2}{4 * (TP1 + TP2)} \quad (61)$$

AKB; ค่าคงที่สายพาน

$$AKB = 0.6 + \frac{20 * P}{S1 + S2} \quad (62)$$

SKANG; มุมสลิตเฉียง

$$SKANG = \frac{SK * P * 180}{\pi * D2} \quad (63)$$

CXM; ตัวประกอบสำหรับการกระจายของขดลวดหลัก

$$CXM = \frac{(C1^2 + C2^2 + C3^2) S1}{(C1 + C2 + C3)^2 K W^2 4P} \quad (64)$$

CSK; ตัวประกอบสำหรับการคำนวณหารีแอเจนซ์รั้วสลิตเฉียง

$$CSK = \frac{\sin(SKANG * \pi / 360) * 360}{\pi * SKANG * 4.72} \quad (65)$$

AKM; ตัวประกอบสำหรับความนำแม่เหล็ก

$$AKM = A11 / GE * SFM * P \quad (66)$$

AKX; ตัวประกอบจำนวนรอบ

$$AKX = \frac{2\pi f CKWM^2}{10^8} \quad (67)$$

PSLOT; ความนำแม่เหล็กรั้วช่องสลิตของสเตเตอร์

$$PSLOT = 6.38 * GI * CXM * (FKS1A + FKS1W) / S1 \quad (68)$$

SSLOT; ความนำแม่เหล็กรั้วช่องสลิตของโรเตอร์

$$SSLOT = 6.38 * GI * (FKS2W + FKS2A) / S2 \quad (69)$$

ZIGZAG; ความนำแม่เหล็กรั้วซิกแซก

$$ZIGZAG = 2.13 * GI * AKZZ / (S1 * G) \quad (70)$$

END; ความนำแม่เหล็กรั้วส่วนปลาย

$$\text{END} = \text{DE} * \text{ACTM} / (\text{S1} * \text{P}) \quad (71)$$

BELT; ความนำแม่เหล็กหัวสายพาน

$$\text{BELT} = 0.00236 * \text{AKM} * \text{AKB} \quad (72)$$

SKEW; ความนำแม่เหล็กหัวสลิตเฉียง

$$\text{SKEW} = 1.2936 * \text{AKM} * (1 - \text{CSK}) \quad (73)$$

XPS; รีแอกแตนซ์หัวช่องสลิตของสเตเตอร์

$$\text{XPS} = \text{AKX} * \text{PSLOT} \quad (74)$$

XSS; รีแอกแตนซ์หัวช่องสลิตของโรเตอร์

$$\text{XSS} = \text{AKX} * \text{SSLOT} \quad (75)$$

XND; รีแอกแตนซ์หัวส่วนปลาย

$$\text{XND} = \text{AKX} * \text{ENP} \quad (76)$$

XSK; รีแอกแตนซ์หัวสลิตเฉียง

$$\text{XSK} = \text{AKX} * \text{SKEW} \quad (77)$$

XZZ; รีแอกแตนซ์หัวซิกแซก

$$\text{XZZ} = \text{AKX} * \text{ZIGZAG} \quad (78)$$

XBL; รีแอกแตนซ์หัวสายพาน

$$\text{XBL} = \text{AKX} * \text{BELT} \quad (79)$$

GAPL; ตัวประกอบรีแอกแตนซ์หัวช่องอากาศ

$$\text{GAPL} = (\text{BELT} + \text{ZIGZAG} + \text{SKEW}) / 2 \quad (80)$$

X1; รีแอกแตนซ์หัวของขดลวดหลัก

$$\text{X1} = \text{AKX} * (\text{PSLOT} + \text{ENP} + \text{GAPL}) \quad (81)$$

X2 ; รีแอกแตนซ์หัวของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงขดลวดหลัก

$$\text{X2} = \text{AKX} * (\text{SSLOT} + \text{GAPL}) \quad (82)$$

XM ; รีแอกแตนซ์กระตุ้นของขดลวดหลัก

$$\text{XM} = \text{AKX} * 0.6468 * \text{AKM} * \text{CSK} \quad (83)$$

X1A; รีแอกแตนซ์หัวของขดลวดช่วย

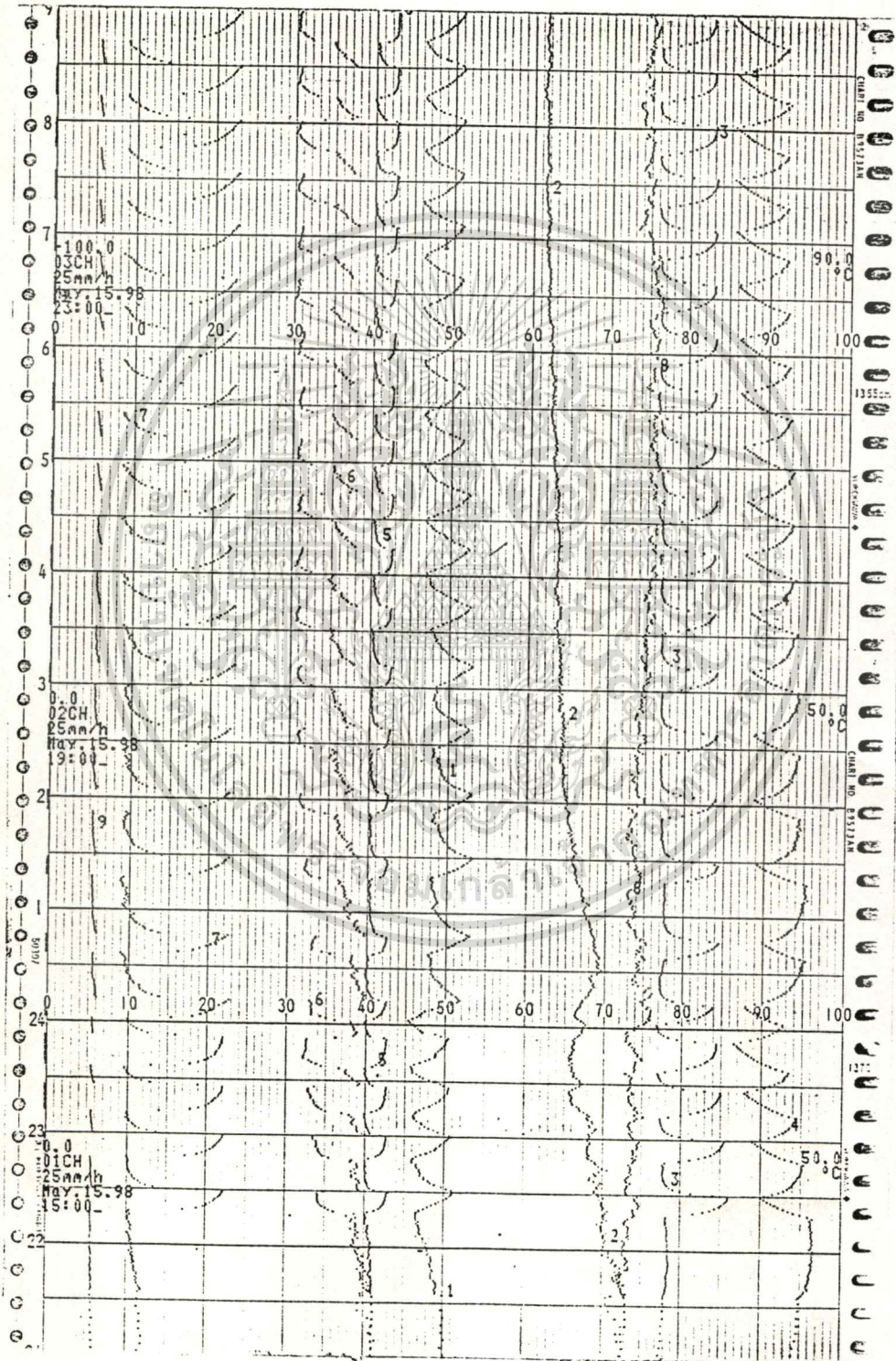
$$\text{X1A} = (\text{อัตราส่วน } a)^2 * \text{X1} * (\text{KWA} / \text{KWM})^2 \quad (84)$$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ

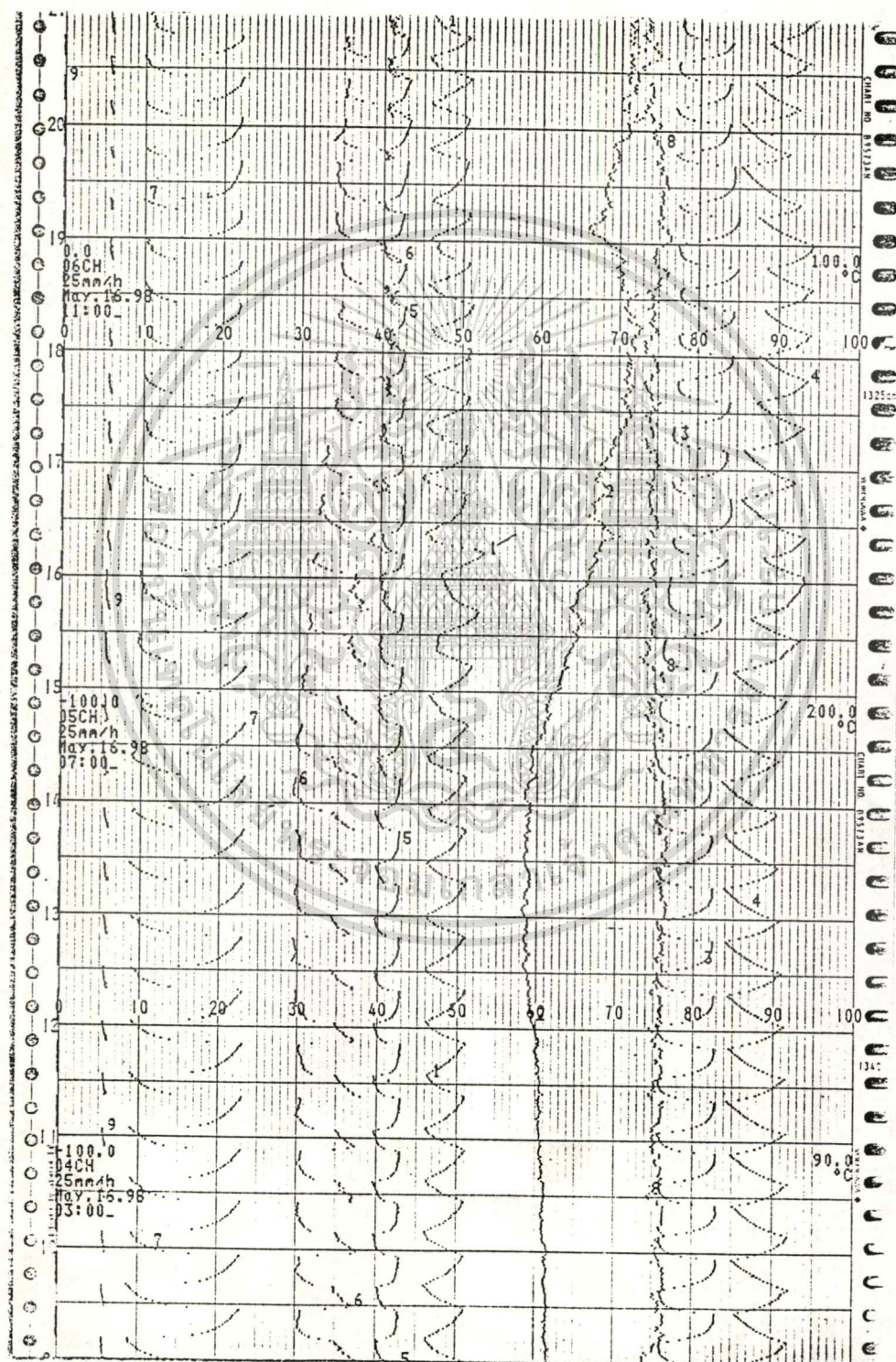


กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท ตั้งแต่วันที่ 15/5/98 เวลา 13:55 น ถึงวันที่ 16/5/98 เวลา 13:55 น



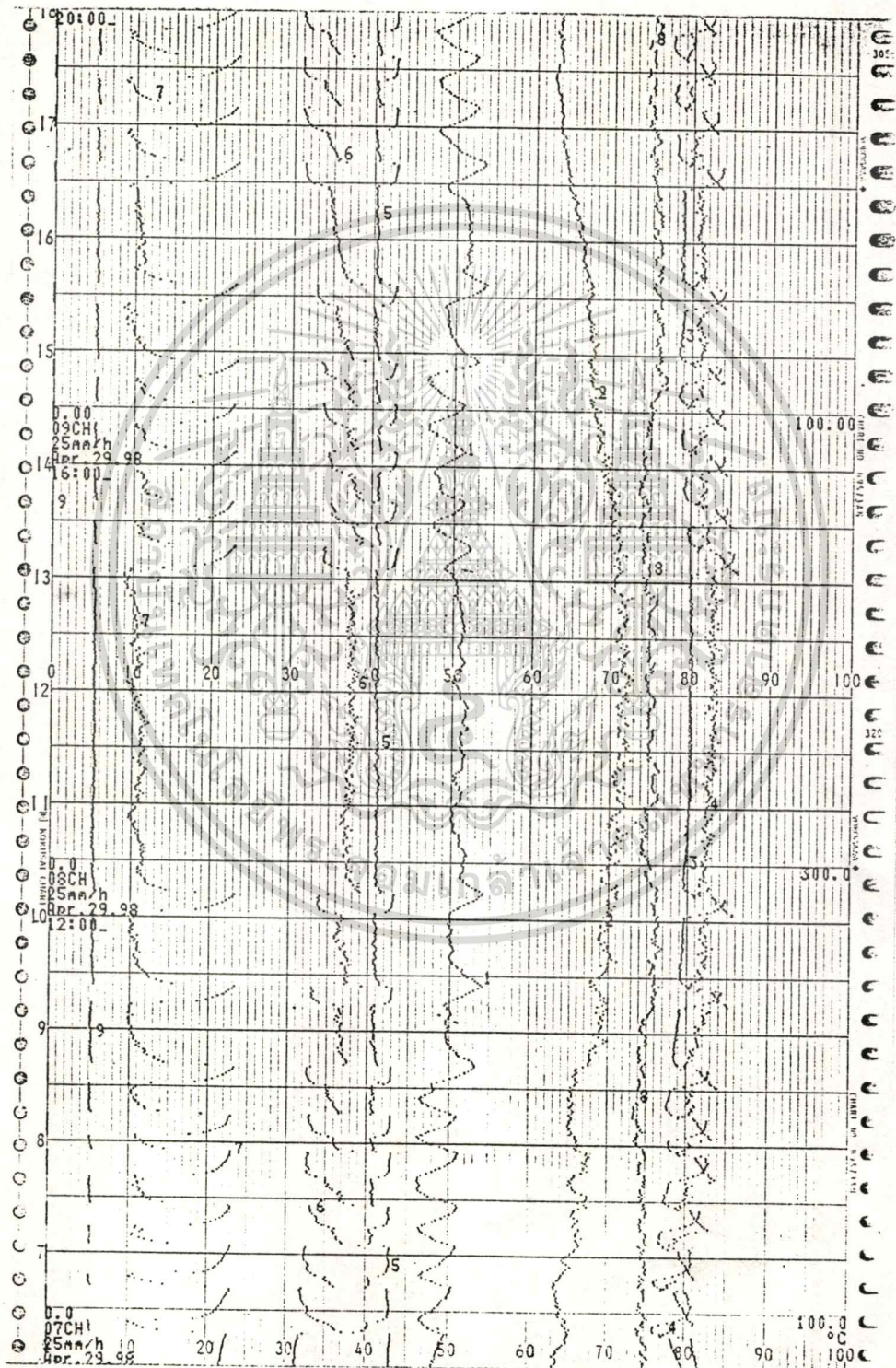
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 1 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสแตท ตั้งแต่วันที่ 15/5/98 เวลา 13:55 น ถึงวันที่ 16/5/98 เวลา 13:55 น (ต่อ)



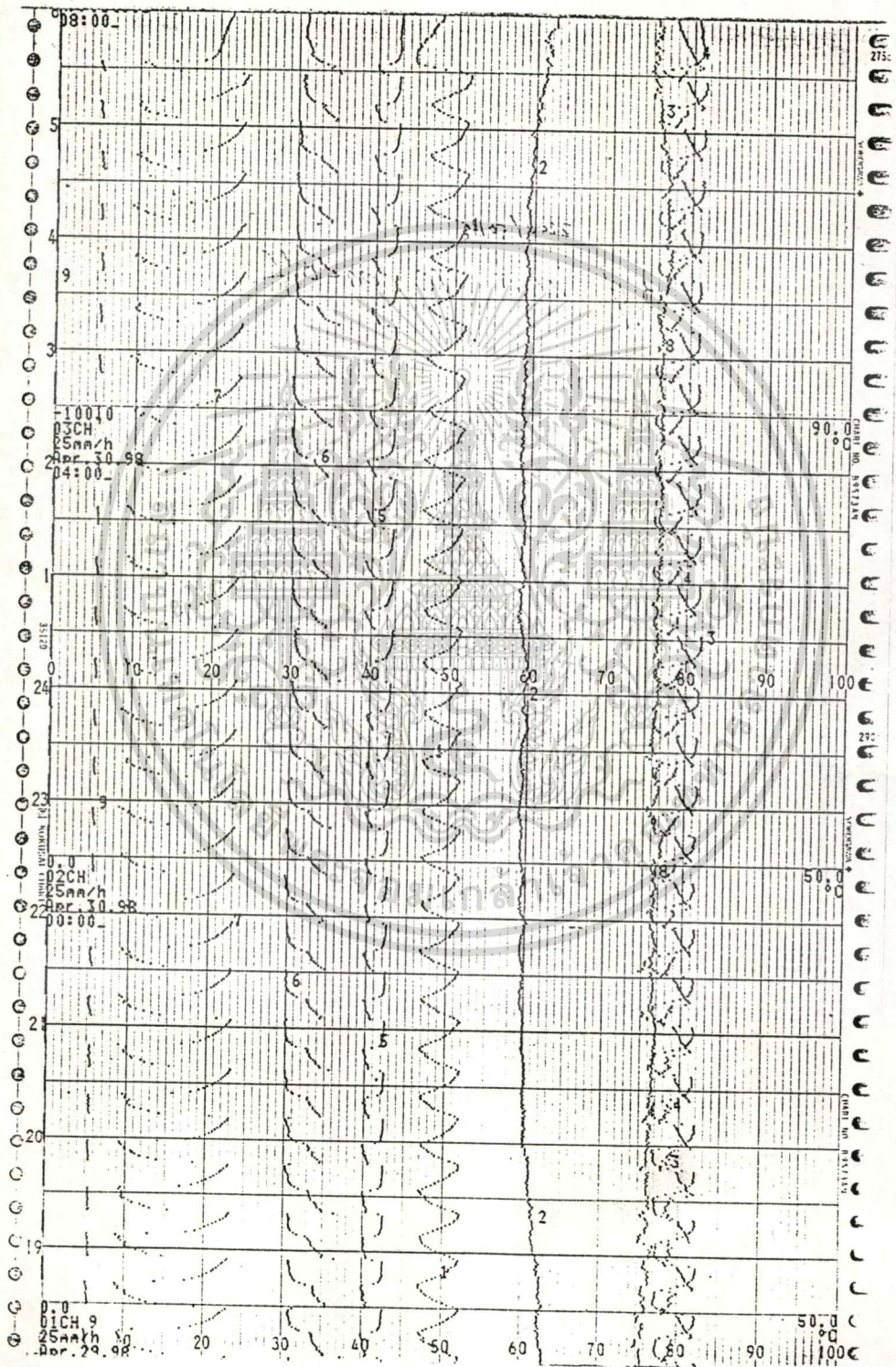
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสตัท ตั้งแต่วันที่ 29/4/98 เวลา 8:00 น. ถึงวันที่ 30/4/98 เวลา 8:00 น.



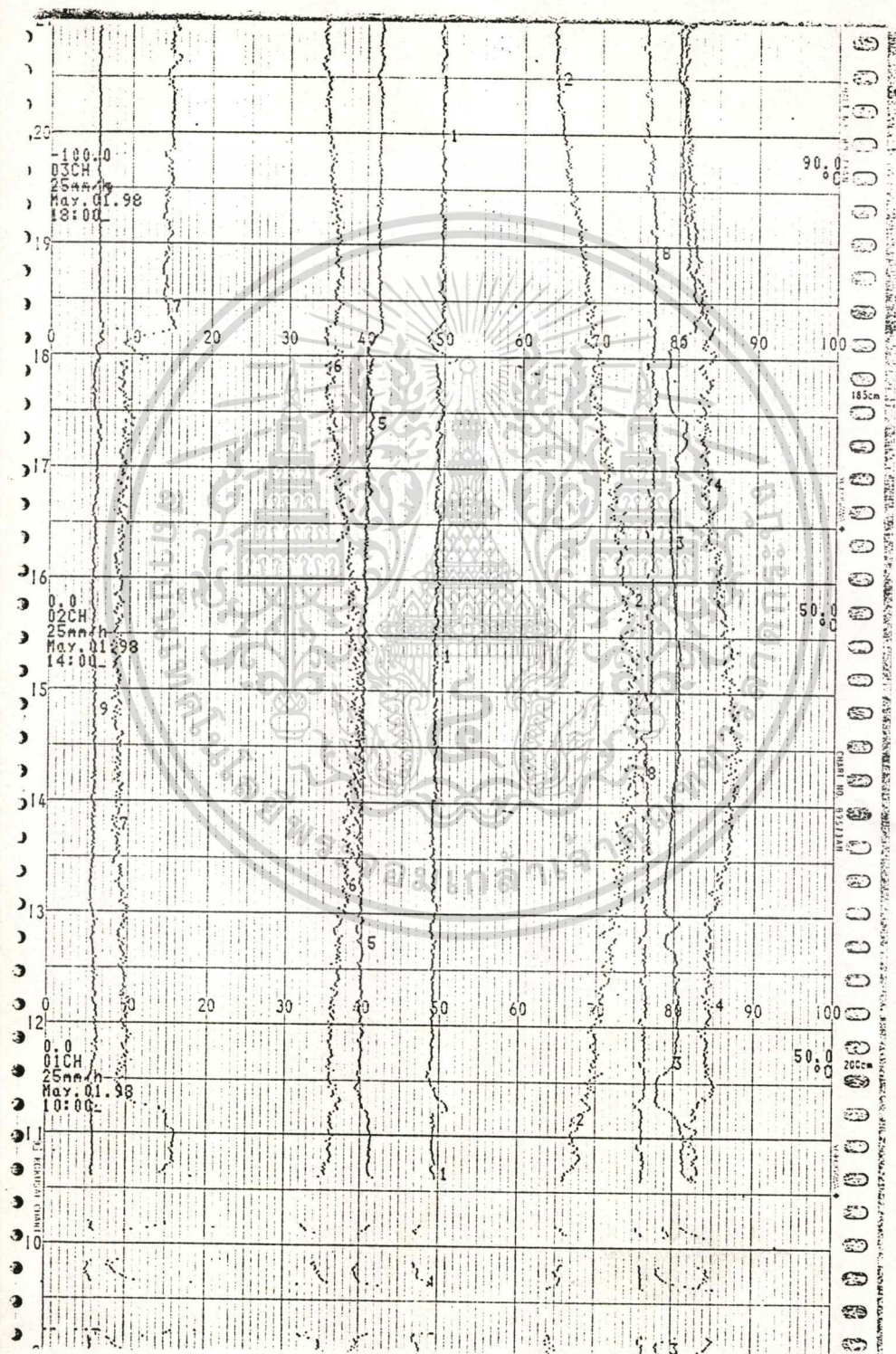
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบตัดต่อการทำงานด้วยเทอร์โมสตัท ตั้งแต่ วันที่ 29/4/98 เวลา 8:00 น. ถึงวันที่ 30/4/98 เวลา 8:00 น. (ต่อ)



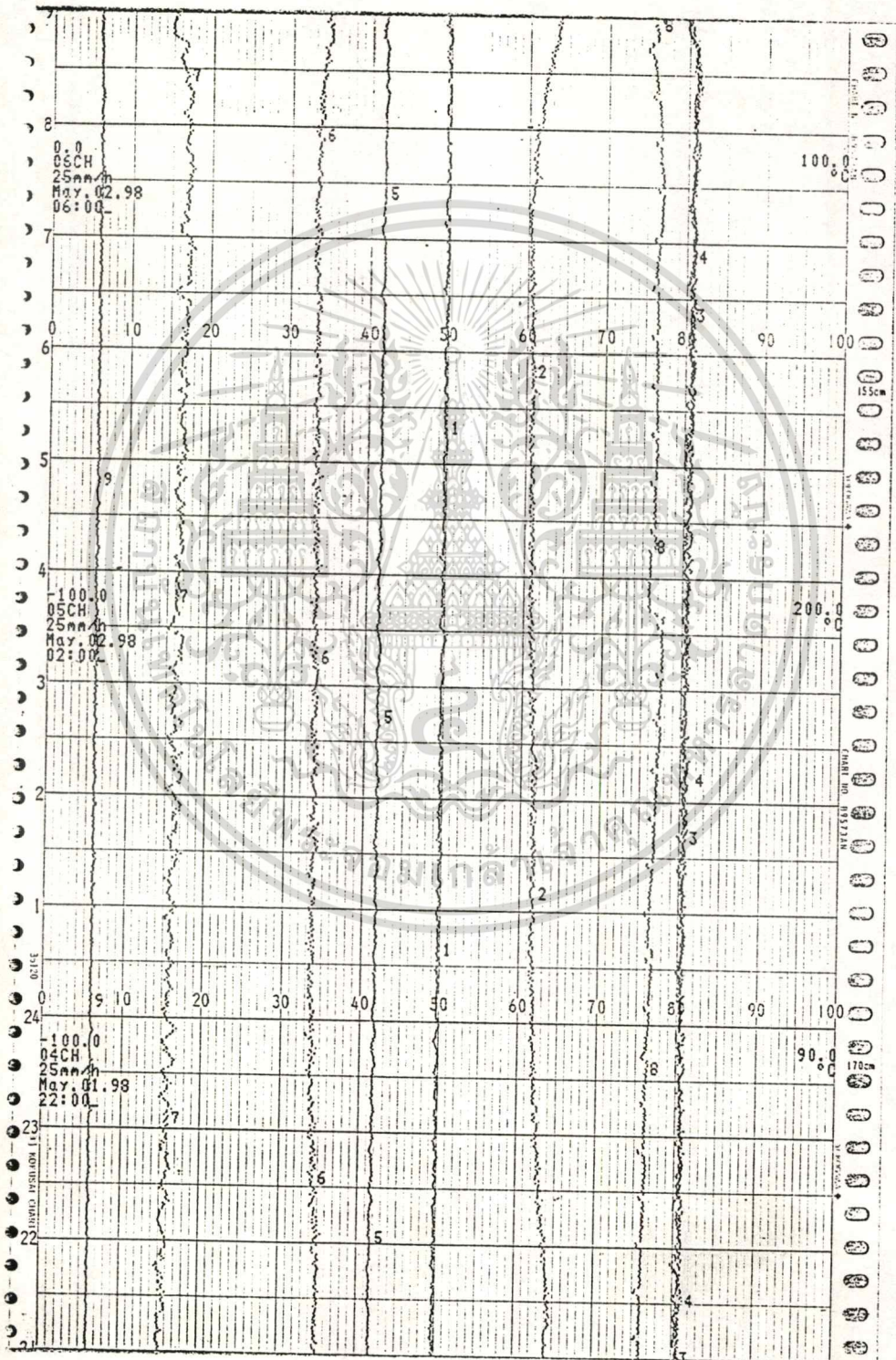
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนอินพุต แบบ 3 เฟส 220V/50Hz ตั้งแต่วันที่ 01/5/98 เวลา 9:00 น. ถึงวันที่ 02/5/98 เวลา 9:00 น.



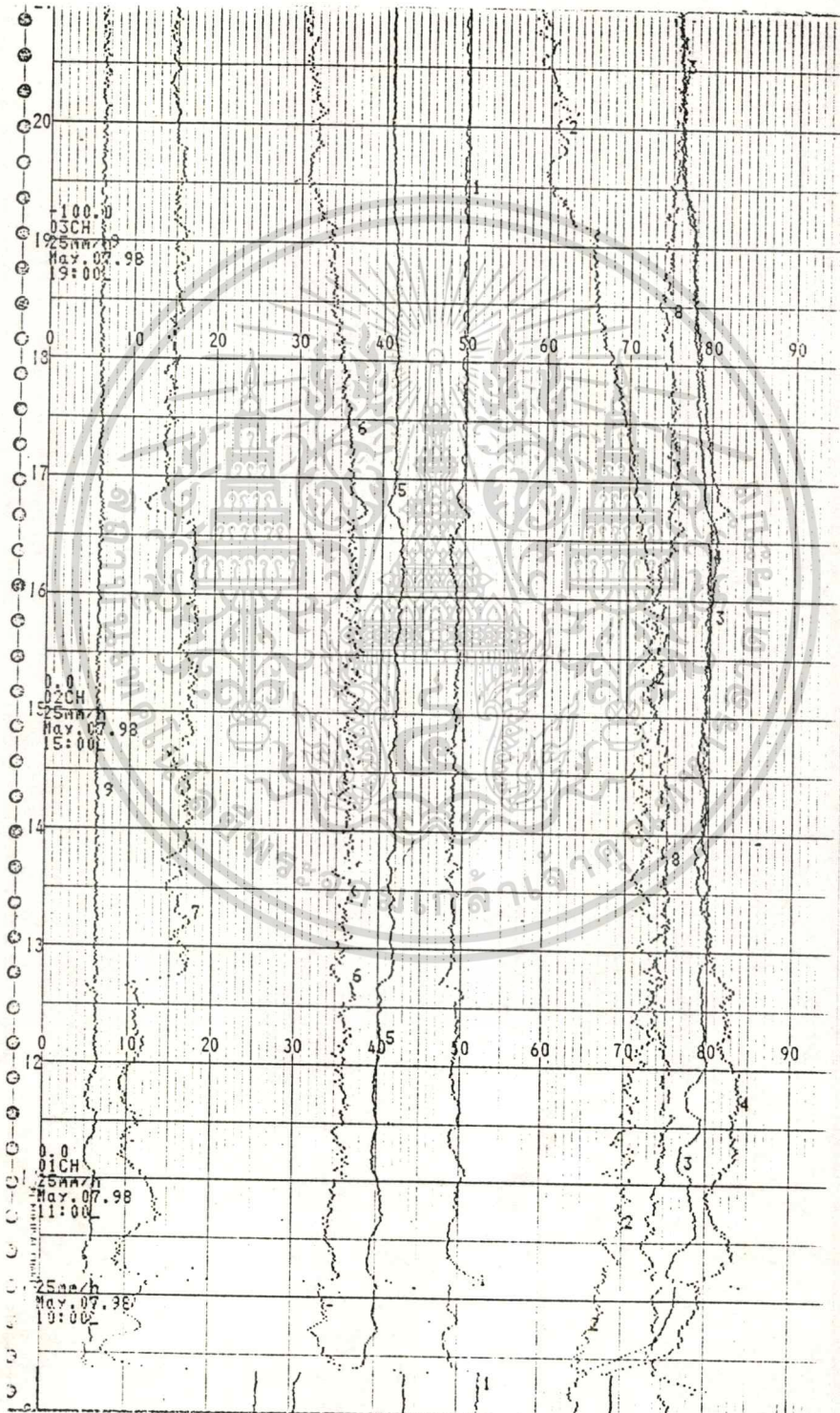
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนอินพุต แบบ 3 เฟส 220V/50Hz ตั้งแต่วันที่ 01/5/98 เวลา 9:00 น. ถึงวันที่ 02/5/98 เวลา 9:00 น. (ต่อ)



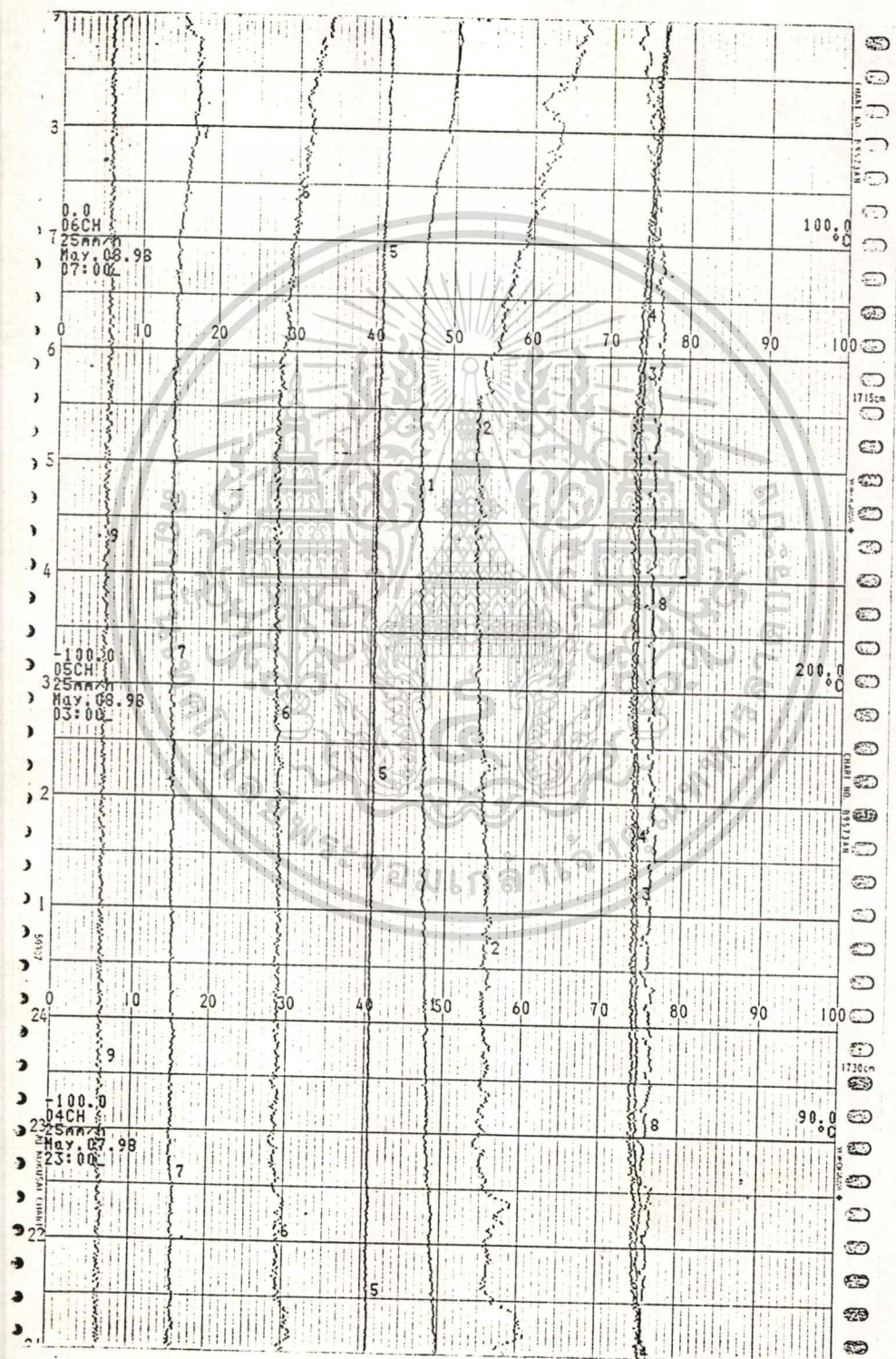
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส ชนิด 220V/50Hz แบบอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนอินพุต แบบ 1 เฟส 220V/50Hz ตั้งแต่วันที่ 07/5/98 เวลา 9:00 น. ถึงวันที่ 08/5/98 เวลา 9:00 น.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอุณหภูมิ กระแส และแรงดันของของระบบเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องอัด 3 เฟส
ชนิด 220V/50Hz แบบอินเวอร์เตอร์ โดยป้อนอินพุต แบบ 1 เฟส 220V/50Hz ตั้งแต่วันที่ 07/5/98
เวลา 9:00 น. ถึงวันที่ 08/5/98 เวลา 9:00 น. (ต่อ)

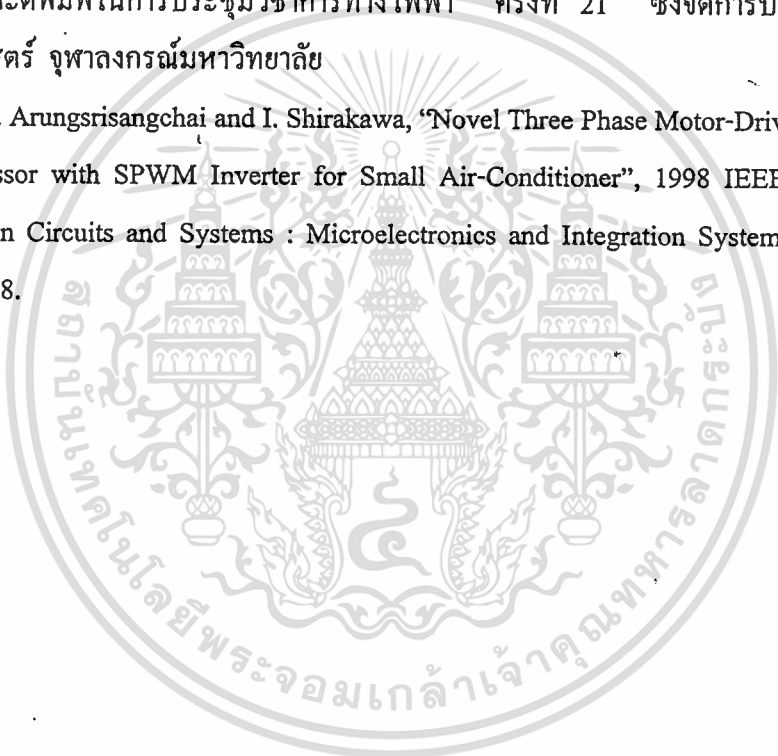


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

1. ผลงานวิจัยเรื่อง “ ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบสามเฟสโดยใช้ SPWM Inverter ” ได้นำเสนอและตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 21 ซึ่งจัดการประชุมโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. M. Manop, I. Arungsrisangchai and I. Shirakawa, “Novel Three Phase Motor-Driven Reciprocating Compressor with SPWM Inverter for Small Air-Conditioner”, 1998 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems : Microelectronics and Integration Systems, Chiangmai, Thailand, 1998.



ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบสามเฟสโดยใช้ SPWM Inverter

The Efficiency of Three Phase Motor-Driven Reciprocating Compressor with SPWM Inverter

มานพ มาสีถูก^{†‡} สุรเชษฐ์ รัชตวรคุณ[†] ผศ. อธิชัย อรุณศรีแสงไชย[‡]

[†] บริษัท กุลธรคอร์ปี้ มหาชน จำกัด นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง

[‡] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

3-2 ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. (662) 739-0961 E-Mail : s8061235@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบสามเฟส ที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการ ใช้ SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation) Inverter โครงสร้างใหม่ดังกล่าวนี้สามารถควบคุมความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ทำให้ได้ข้อดีคือ ลดจำนวนกระแสทั้งในขณะออกตัวและขณะทำงานเต็มพิกัดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก่าที่เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟส 220V/50-60Hz ซึ่งต้องใช้อินพุตเป็น Line Voltage เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังสามารถใช้ข้อดีดังกล่าว ทำออกแบบเครื่องทำความเย็นเฉพาะ ยานความเย็นที่ต้องการได้อย่างง่ายดาย การทดลองเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ ได้กระทำ 3 แบบ คือ แบบอินพุต Line Voltage ของทั้งชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส และแบบควบคุมโดย Inverter 3 เฟส

Abstract

This paper presents the efficiency operation of three phase motor-driven reciprocating compressor with SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) inverter controller. The system which the input frequencies can be controlled reduces the

current both during the starting and full load when compares with the conventional one phase motor-driven reciprocating compressor. Due to controllable input frequency, the design for any demand cooling capacity can be done easily. The experiments to confirm the efficiency of the proposed system have been done with three types, that are Line Voltage input with both one phase and three phase motors and SPWM Inverter control with three phase motor. The results show the practicality of the system.

1. คำนำ

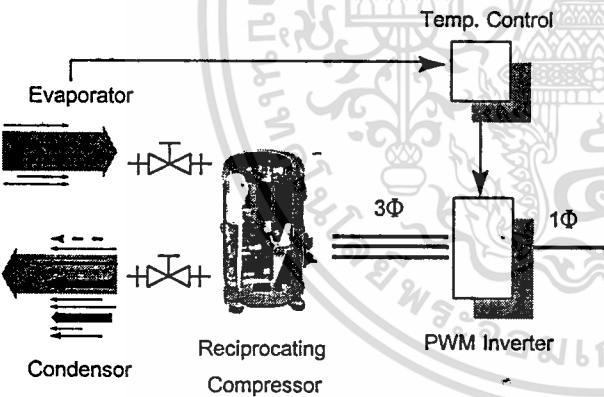
ปัจจุบันอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ได้เติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการเครื่องทำความเย็นของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้น ทำให้แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะเป็นคอมเพรสเซอร์ที่ใช้กันมากที่สุดในเครื่องทำความเย็นมีตั้งแต่ 1/20 แรงม้าขึ้นไป [1] ระบบที่ใช้ในปัจจุบันนี้ การทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง คอมเพรสเซอร์จะหยุดทำงานและออกตัวโดยอาศัยเทอร์โมสตัทควบคุม Duty Cycle ของตัวมันเอง ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียคือ การออกตัว (Starting Torque) ในแต่ละครั้ง จะใช้กระแสสูง และใช้กระแสเต็มพิกัด(Full Load Amp.) ในอัตราคงที่ในช่วงทำงานปกติ โดยไม่คำนึงถึงสถานะโหลด

การนำ SPWM Inverter มาใช้สามารถลดกระแสออกตัวและกระแสทำงานเต็มพิกัด ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่หรือ เพิ่มความเร็วรอบเพื่อให้อุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ เร็วขึ้นได้ ในบทความนี้ได้ออกแบบการทดสอบเป็น 3 ระดับ คือ ระดับความเร็วต่ำเพื่อให้มอเตอร์ออกตัวได้นุ่มนวล (Soft Starting) ระดับความเร็วปานกลาง เพื่อลด Power Consumption ในขณะที่โหลดมีการปรับขึ้นลง ระดับความเร็วสูงเพื่อให้ระบบเย็นเร็วหรือถึงจุดความเย็นที่ต้องการเร็วยิ่งขึ้น

2. หลักการและการออกแบบ



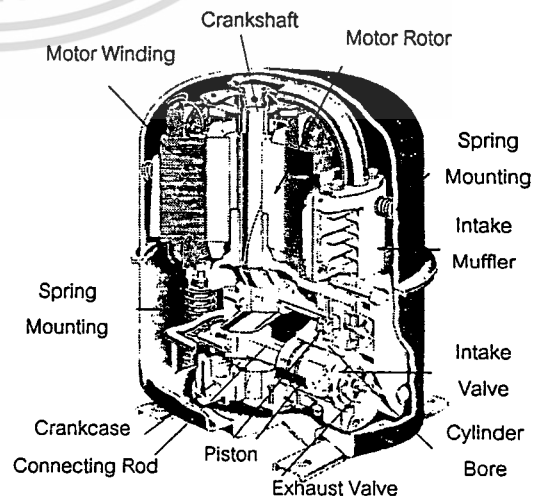
รูปที่ 1 ระบบควบคุมมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ด้วย Inverter

โครงสร้างใหม่นี้ได้ออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส ขึ้นใหม่เพื่อทดแทน 1 เฟส ที่มีใช้กันทั่วไป เพื่อให้ผลที่ดีกว่าและสามารถใช้งานในบ้านหรือสถานที่ที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสได้ เพราะสามารถป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์ด้วยไฟฟสดียว(220V/50Hz) แต่เอาท์พุทที่ได้เป็นไฟสามเฟส(220-230V/50-60Hz) ดัง

แสดงในรูปที่ 1 การทดสอบระบบเริ่มด้วยการป้อนไฟพิกัด จนกระทั่งถึง Steady State ตามเงื่อนไขของ Low Back Application (LBP) ซึ่งมีเงื่อนไขว่าอุณหภูมิที่ Evaporator ต้องเท่ากับ -23.3 °C โดยมีชุด Temp. Control (TC) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้ตัวเก็บข้อมูล (Recorder) ทำงานเมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการ เมื่อจบการทดสอบ จะปรับความเร็วรอบของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ ไปตามค่าต่างๆที่กำหนดไว้คือ 30, 40, 50, 60 และ 70 Hz แล้วบันทึกข้อมูลเพื่อศึกษาวิเคราะห์ต่อไป

2.1 คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor Type)

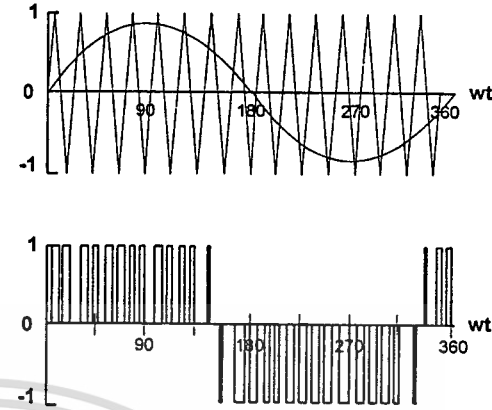
การทำงานเริ่มจากป้อนไฟเข้าสวิตเตอร์ เกิดแรงเหนี่ยวนำให้โรเตอร์ซึ่งยึดติดกับด้านบนของเพลาคrank shaft หมุน ส่วนด้านล่างของเพลาคrank shaft จะสวมกับคานสูบ (Connecting Rod) ซึ่งยึดติดกับลูกสูบ (Piston) ตามลำดับ ลูกสูบเคลื่อนที่เข้าออกใน Cylinder Bore ของเสื้อสูบ(Crank Case) จะทำหน้าที่ดูดน้ำยาความดันต่ำจากคอยล์เย็นผ่าน Intake Valve เข้ากระบอกสูบ และอัดน้ำยาให้มีความดันสูงผ่าน Exhaust Valve ออกไปยังคอยล์ร้อนตามลำดับ[2] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ

2.2 SPWM Inverter

SPWM Inverter เป็นเทคนิคที่เลือกนำมาใช้ โดยนำสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณมอดูเลทรูปไซน์ จุดตัดกันของรูปไซน์กับสามเหลี่ยมจะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นพัลส์ที่มีความกว้างต่างกัน[3] ดังแสดงในรูปที่ 3 นำสัญญาณนี้ป้อนเข้ามอเตอร์เพื่อช่วยลดกระแสออกตัว ซึ่งปกติจะมีค่าประมาณ 5-7 เท่าของกระแสเต็มพิกัดเมื่อต่อแรงดันเต็มพิกัด [4] ในรูปที่ 4 แสดงเส้นกราฟของทอร์กและกระแสสเตเตอร์ที่เกิดจากการปรับแรงดันและความถี่ มีรายละเอียดดังนี้ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของอินดิคชั่น มอเตอร์ ทำได้โดยการเพิ่มความถี่แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่อย่างเดียวจะทำให้แอร์แก๊ปฟลักซ์(Air gap flux) ของมอเตอร์ลดลง เพื่อที่จะรักษาฟลักซ์ในแอร์แก๊ป ฟลักซ์และทอร์กให้คงที่ จำเป็นต้องรักษาสัดส่วนของแรงดันขาออก(v) ต่อความถี่ (f) หรือ v/f ให้คงที่ จะทำให้มอเตอร์มีค่าทอร์กสูงสุดที่จะทำได้ในย่านความถี่ต่ำกว่า Base frequency (1 p.u) เรียกย่านการทำงานนี้ว่า Constant torque mode ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า Base frequency ไม่สามารถรักษาทอร์กให้คงที่ได้เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์ Overload และเสียหายได้ ดังนั้นจึงรักษาแรงดันให้คงที่ที่ที่กำหนดซึ่งจะทำให้ทอร์กที่มีค่าสูงสุดลดลง เป็นการทำงานให้ Constant power mode [5] ดังนั้นคอมเพรสเซอร์สามารถทำงานที่ความเร็วสูงเพื่อเพิ่ม Cooling capacity ได้โดยใช้กำลังงานในอัตราคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็รักษากระแสสเตเตอร์ให้คงที่ตลอดการทำงาน ทำให้ลดกระแสออกตัวได้

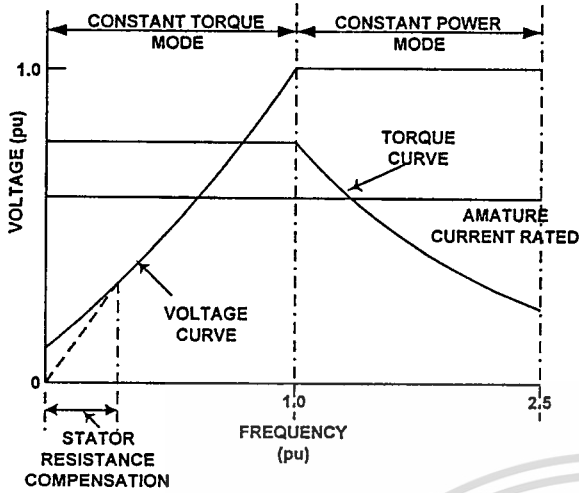


รูปที่ 3 การสร้าง SPWM Inverter และ รูปคลื่นแรงดัน line to line

สเตเตอร์และโรเตอร์ให้เท่ากับ มอเตอร์ 1 เฟสแบบเดิม ทั้งนี้เพื่อศึกษาข้อดีข้อเสียต่างๆที่จะเกิดขึ้น หรือมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมากเท่าไรเมื่อถูกควบคุมด้วย Inverter มอเตอร์ 1 เฟสที่ใช้ในปัจจุบัน สเตเตอร์ที่ใช้มีจำนวน Slot เท่ากับ 24 Type B Stack Length 80 mm มอเตอร์เป็นแบบ PSC(Permanent Split Capacitor) ใช้คาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกับขดลวดหลัก(Main winding)ซึ่งมีขดลวด 2 กรู๊ป, 5 ขดต่อกรู๊ป ส่วนขดลวดช่วย(Auxiliary winding) มี 2 กรู๊ป, 4 ขดต่อกรู๊ป พันห่างกันอยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า และโรเตอร์ มีจำนวน Slot เท่ากับ 34 Type A ในรูปที่แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในคอกซ์ลูป ทั้งขดลวดหลักและขดลวดช่วย สัญลักษณ์ X คือทิศพุ่งเข้า และ สัญลักษณ์ O คือทิศพุ่งออกของสนามแม่เหล็ก การพันขดลวดเป็นแบบ Chain winding โดยพันเข้าหาศูนย์กลางของคอกซ์ลูปลักษณะคล้ายกันหอย

2.3 การออกแบบมอเตอร์ 3 เฟส จากมอเตอร์ 1 เฟส เพื่อใช้กับ Inverter

ในการพัฒนามอเตอร์ 3 เฟส มีข้อจำกัดทางการผลิตคือต้องรักษาให้ขนาดและรูปร่างของ Slot



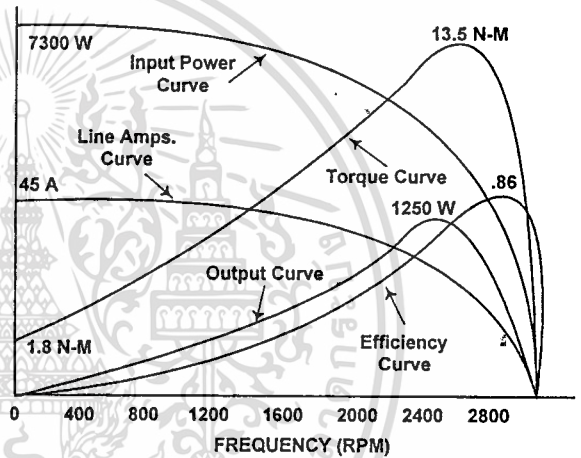
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์ที่เตจ-ความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการปรับแรงดันและความถี่

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Main	x	x	x	x	x																			
Aux																								

รูปที่ 5 ทิศทางสนามแม่เหล็กและการลงขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ 1 เฟส 2 ขั้ว

เมื่อนำมอเตอร์ 1 เฟส ดังกล่าวมาทดสอบด้วยเครื่อง Dynamo- meter Test และเก็บข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ จะได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลดังรูปที่ 6 ส่วนมอเตอร์ 3 เฟส ที่พัฒนาขึ้น จะไม่มีคาปาซิเตอร์ของขดหลัก และ ขดลวดช่วย ในการพันขดลวดลง Slot เป็นแบบ Chain Winding และเชื่อมต่อ เฟส A เฟส B และเฟส C ด้วยรูปแบบ Star connection [6] รูปแบบการพันเหมือน 1 เฟส ในรูปที่ 7 แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กและการลงขดลวดสเตเตอร์ ทั้ง

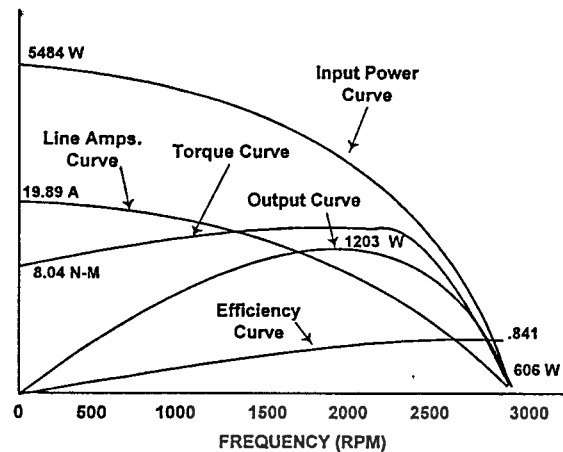
หมคมี่ 6 กรุป, 3 กรุปต่อ 1 ขั้ว และ 3 ขดต่อ 1 กรุป โดยสัญลักษณ์ X และ O แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับมอเตอร์ 1 เฟส ที่กล่าวข้างต้น เมื่อนำมอเตอร์ 3 เฟส ดังกล่าวมาทดสอบด้วยเครื่อง Dynamo- meter Test จะได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลดังรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่ากระแส Locked Rotor และค่า Input Power ลดลง ในขณะที่ ได้ แรงบิดที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 2 ขั้ว ที่ใช้ทดลอง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	x	x	x																					
B																								
C																								

รูปที่ 7 ทิศทางสนามแม่เหล็กและการลงขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขั้ว ที่ใช้ทดลอง

3. ผลการทดสอบ

นำมอเตอร์ทั้ง 3 แบบคือ แบบ Line Voltage ชนิด 1 เฟส และ ชนิด 3 เฟส และแบบควบคุมโดย Inverter ชนิด 3 เฟส ใช้งานที่ Low Back Application น้ำยา R-404A Suction Pressure 38.6 PSIG, Discharge Pressure 357.6 PSIA [7] ทดสอบกับเครื่อง Calorimeter Test ซึ่งทำหน้าที่วัด Performance ของ Compressor ออกมาเป็น ค่าในการทำความเย็น (Cooling Capacity) กระแสอินพุท(Line Current) ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Speed) กำลังไฟฟ้าที่ใช้(Power Input) ผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบ แสดงตามตารางที่ 1 โดยชนิด 3 เฟส SPWM Inverter ยังสามารถปรับความถี่ได้หลายค่าดังแสดงในตาราง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ 50 Hz มอเตอร์ 3 เฟส ที่ควบคุมโดย Inverter ใช้พลังงานน้อยกว่าแต่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า แบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ที่ใช้ อินพุท Line Voltage นำผลการทดสอบของ คอมเพรสเซอร์ที่ควบคุมด้วย SPWM อินเวอร์เตอร์ ทุกๆความถี่มาพล็อตกราฟ ซึ่งค่าต่างๆวัดที่เอาท์พุท

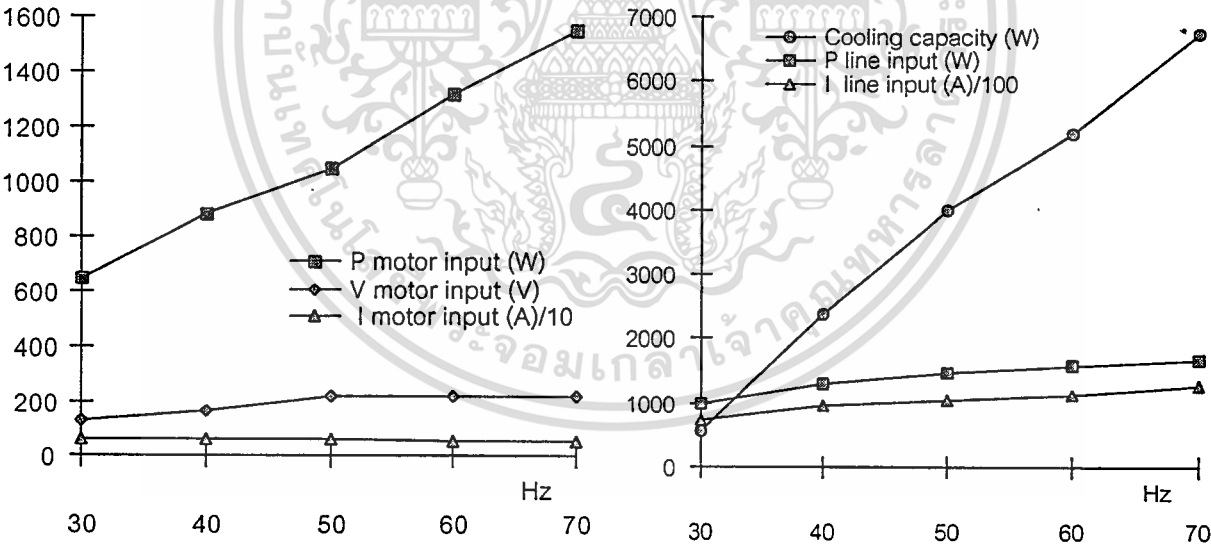
ของอินเวอร์เตอร์(3 เฟส) โดยคร่อมระหว่างไลน์-ไลน์ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันความถี่และ กระแสไฟฟ้า เป็นไปตามหลักการในข้อ 2.2 และ แสดงผลด้วยกราฟดังรูปที่ 9 ส่วนการวัดค่าทางไฟฟ้า ที่อินพุทอินเวอร์เตอร์ (1 เฟส) และ ค่าทำความเย็นที่ได้ จะเห็นว่าค่าทำความเย็นมีค่าต่างกันมากในแต่ละความถี่ เนื่องจากระบบเป็น LBP application ซึ่งมี ปริมาณน้ำยาไหลกลับน้อย และอุณหภูมิใช้งานที่ค่าต่ำ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้สูงขึ้นแทนที่จะมีค่าคงที่ในย่าน ความถี่ที่สูงกว่า 50 Hz แสดงผลด้วยกราฟดังรูปที่ 10

4. ผลการเปรียบเทียบระหว่างระบบ Line Voltage กับระบบ SPWM Inverter

จากผลการทดสอบโดยกำหนดเวลาในการทำงานระบบให้มีระยะเวลาเท่ากัน เป็นเวลา 8 ชม. โดยแยกการทดสอบเป็น 3 แบบคือ 2 แบบแรกเป็น ระบบ 1 เฟสและ 3 เฟส ป้อนไฟฟักัดและใช้ TC(Temperature Control) ควบคุมการติดต่อของระบบตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากันทั้ง 2 แบบ แบบสุดท้ายควบคุมระบบด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยไม่มีการติดต่อการทำงานของระบบแต่จะปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ตามที่ออกแบบไว้คือปรับ 3 speed คือ เมื่อระบบเริ่มทำงาน จะปรับ speed เท่ากับ 70 Hz ช่วง Steady State ปรับ speed เท่ากับ 50 Hz ช่วงหลังจากระบบเข้าสู่ Steady ปรับ speed เท่ากับ 30 Hz ผลการทดสอบปรากฏว่าการควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส โดยใช้ Inverter ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าที่ค่า 8.2 Watt-Hr แต่ให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงกว่าที่ค่า 9.18 BTU- Hr เมื่อเปรียบเทียบกับ ทั้ง 2 แบบแรก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าที่วัดได้จากการทดสอบขณะ Steady State Performance ของการควบคุมทั้ง 3 แบบ

Measurement	1 เฟส	3 เฟส	3 เฟส ควบคุมโดย SPWM INVERTER					Units
Voltage	220	220	128	166	220	220	220	V rms
Frequency	50	50	30	40	50	60	70	Hz
Speed	2925	2950	1760	2390	2970	3590	4197	RPM
Cooling Capacity	3900	3954	562	2389	4000	5186	6741	W
Power Input	1753	1515	1000	1300	1486	1600	1680	W
Line Current	7.3	5.51	5.4	5.3	5.4	5.4	5.3	A/ Phase
EER (Energy Efficiency Ratio)	7.59	8.9	1.47	6.27	9.18	11.06	12.85	BTU-HR



รูปที่9 ค่าทางไฟฟ้าวัดที่อินพุต 3 เฟส ของมอเตอร์ (เอาต์พุตของ อินเวอร์เตอร์)

รูปที่10 ค่าทางไฟฟ้าวัดที่ Line Input 1 เฟส ของ อินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงาน
ไฟฟ้าของทั้ง 3 วิธี

ชนิดของมอเตอร์	Duty Cycle	Watt- Hr	EER
1 เฟส ไฟฟักัด	TC ตัดต่อ	11.1	7.59
3 เฟส ไฟฟักัด	TC ตัดต่อ	9.4	8.9
3 เฟส INVERTER	ปรับ Speed	8.2	9.18

5. สรุปผลและวิจารณ์

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพัฒนามอเตอร์ 3 เฟสและนำ PWM Inverter มาควบคุมกับคอมเพรสเซอร์ ที่ใช้งานที่ระดับ Low Back Pressure application (Evaporator -23.3 °C) ตามที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางไฟฟ้าที่ใช้แล้วปรากฏว่า ระบบที่ควบคุมด้วย Inverter ประหยัดไฟฟ้ากว่าระบบไฟฟักัดเดิมประมาณ 23 % ผลคืออีกอย่างคือระบบสามารถเปลี่ยนจุดการทำงานหรือค่าทำความเย็นได้ตามที่ผู้ออกแบบต้องการ ด้วยวิธีการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ สำหรับระบบปรับอากาศ ที่ระดับ HBP (High Back Pressure, Evaporator 7.2 °C) และ MBP (Medium Back Pressure, Evaporator -6.7 °C) ยังอยู่ในขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งคาดว่าผลที่ได้จาก 2 ระบบดังกล่าว (HBP&MBP) จะมีรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ออกแบบระบบทำได้ง่ายกว่า LBP Application ประกอบกับมีปริมาณน้ำยามากกว่าและอุณหภูมิที่ใช้งานสูงกว่า ทำให้การควบคุมอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทำได้ง่ายขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณสุพร สิมะกุลธร และคุณกมล อุปลานนท์ จาก บริษัทกุลธรเคอร์บี มหาชน

จำกัด ที่กรุณาแนะนำและอนุญาตให้ทำการทดลองจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ สุโมตยกุล , “ เครื่องทำความเย็นและเครื่อง ปรับอากาศ” , บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด 2521 หน้า 66
- [2] Andrew D. Althouse, Garl H. Turnquist and Alfred F. Bracciano, “Modern Refrigeration and Air Conditioning ”, pp. 117-126,
- [3] Peter Vas, “ Electrical Machines and Drives “, Oxford Science Publications, 1992 ,pp. 572-573
- [4] Thomas F. Lowery and David W. Petro, “Application Consideration for PWM Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors,”, IEEE Trans. Industry Applications, vol.30, no.2, pp. 286-293, March/April 1994.
- [5] ชำรงศักดิ์ สุกใส , “ การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี PWM โดยไมโครโปรเซสเซอร์ ” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2534 หน้า 10-11
- [6] Samuel Heller, “Multispeed and Standard Squirrel Cage Motors”, Vol. 1-Standard (Single Speed) Motors only, Data Publishing Company, INC., USA 1976
- [7] Tecumseh Product Engineering, “Tecumseh Hermetic Compressor Service Data”, Tecumseh Product Company, USA, pp. 117-126

ประวัติผู้เขียน

นายมานพ มาสีถูก เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน 2515 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม พ.ศ. 2532 และสำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2536 เริ่มทำงานตำแหน่งวิศวกรวิจัยและพัฒนา ที่บริษัท กุลธรเคอร์บี มหาชน จำกัด นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง ตั้งแต่ปี 2537 จนถึงปัจจุบัน

