

การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสในสถานะ
ที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ANALYSIS UNBALANCED VOLTAGE OPERATIONS OF
A SYNCHRONOUS MOTOR 3 PHASE

นายคทาวิฑูรย์ คำมา รหัส 48364272
นายพัชรพล ตาลตา รหัส 49381018

| |
|------------------------------|
| ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| วันที่รับ..... 19 ส.ค. 2555 |
| เลขทะเบียน..... 15237990 |
| เลขเรียกหนังสือ..... นร |
| มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๑1117 |

2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ผู้ดำเนินโครงการ นายคชาวุธ ก้ามา รหัส 48364272
นายพัชรพล ตาลตา รหัส 49381018

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

.....กรรมการ
(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

.....กรรมการ
(ดร.พรพิศุทธิ์ วรจรรย์คน)

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ผู้ดำเนินโครงการ นายคทาวัช กำมา รหัส 48364272
นายพัชรพล ตาลตา รหัส 49381018

ที่ปรึกษาโครงการ ~~ดร.สมพร เรืองสินชัชวานิช~~

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2552

.....

บทคัดย่อ

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นประจำ โดยมีสาเหตุหลายประการ ขณะมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากระบบ มอเตอร์จะมีพารามิเตอร์ในการทำงานแตกต่างออกไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์น้อยลง และอาจจะทำความเสียหายกับมอเตอร์ได้ เมื่อเทียบกับการทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุล โครงการนี้เป็นการศึกษาการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยทดสอบมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเงื่อนไขแตกต่างกันแล้วบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นนำวงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสมาวิเคราะห์สถานะการทำงานและหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่มีต่อมอเตอร์เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

Project title Analysis Unbalanced Voltage Operations of a Synchronous Motor
3 Phase

Name Mr. Katawut Kumma ID. 48364272
Mr. Pacharapon Talta ID. 49381018

~~**Project advisor** Mr. Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D~~

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2009

.....

Abstract

The unbalanced voltage conditions in a distribution system can regularly occur due to various causes. When a Synchronous motor is supplied by the unbalanced voltages from the system, the parameters of the motor are different from their parameters in a balanced voltage condition and affect to the efficiency of motor will be dropped and way be damage to motor when compare to its balanced voltage conditions. This project aims to study the operations of Synchronous motor in several conditions. For example, different unbalanced voltage conditions and records the values of parameters. The equivalent circuits of three-phase Synchronous motor are used to analyses the unbalanced operating conditions of the motors.

กิติกรรมประกาศ

การที่ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงการเรื่อง การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่ ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552 ถึง เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2553 ส่งผลให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ และประสบการณ์ต่างๆ ที่มีค่ามากมาย สำหรับโครงการชิ้นนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความร่วมมือและสนับสนุนหลายฝ่ายดังนี้

1. ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
2. นายกฤษดา สมจิตชอบ ครูช่าง
3. นายณัฐภัทร มัทย์พงษ์ถาวร ครูช่าง
4. นายมนทนต์ ฝึกเอม ครูช่าง
5. นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ นิติบัญญัติโท

และบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวสกุลทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำรายงานฉบับนี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล เป็นที่ปรึกษาในการทำโครงการนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำโครงการ

ผู้จัดทำรายงาน

นายคชาวุธ กำมา

นายพัชรพล ตาลตา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| ใบรับรองปริญญาโท..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| <hr/> | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการ..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของ โครงการ..... | 1 |
| 1.4 แผนการดำเนินงาน..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| 1.6 งบประมาณ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ภายใน โครงการ | |
| 2.1 ทฤษฎีของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส..... | 3 |
| 2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 3 |
| 2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 4 |
| 2.1.3 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 6 |
| 2.1.4 มอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด..... | 10 |
| 2.1.5 การปรับแต่งค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 12 |
| 2.1.6 กำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดในมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 14 |
| 2.1.7 เฟสเซอร์โคออร์เดตของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 16 |
| 2.2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 23 |
| 2.3 ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์..... | 24 |

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การทดสอบและวิธีการทดสอบ

| | |
|---|----|
| 3.1 การทดสอบหาวงจรมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 26 |
| 3.1.1 วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์..... | 27 |
| 3.1.2 วิธีทดสอบแบบเปิดวงจร..... | 28 |
| 3.1.3 วิธีทดสอบแบบลัดวงจร..... | 29 |
| 3.2 การทดสอบในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะไว้ภาระทางกลและขณะขับภาระทางกล..... | 30 |
| 3.2.1 การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 31 |
| 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ..... | 32 |

บทที่ 4 ผลที่ได้จากการทำการทดลอง

| | |
|---|----|
| 4.1 ผลการทดสอบหาวงจรมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 33 |
| 4.1.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์..... | 33 |
| 4.1.2 การทดสอบภาวะเปิดวงจร (Open Circuit Test)..... | 33 |
| 4.1.3 การทดสอบภาวะลัดวงจร (Short Circuit Test)..... | 34 |
| 4.1.4 วงจรมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสที่ได้จากการทดสอบ..... | 35 |
| 4.2 ค่าปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล..... | 36 |
| 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไว้ภาระทางกล..... | 38 |
| 4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะขับภาระทางกล..... | 39 |
| 4.5 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะขับภาระทางกล..... | 43 |
| 4.6 กราฟตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในสถานะโหลดพิกัด..... | 47 |
| 4.7 กำลังสูญเสียในขดลวด..... | 49 |
| 4.8 ประสิทธิภาพ..... | 51 |

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์โครงการ

| | |
|---|----|
| 5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ..... | 53 |
| 5.1.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ ในสถานะไร้ภาระทางกล..... | 53 |
| 5.1.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ ในสถานะขับภาระทางกล..... | 53 |
| 5.1.3 อภิปรายผลการวิจัย..... | 53 |
| 5.2 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่าง No_Load กับ Full_Load..... | 54 |
| 5.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ No_Load กับ Full_Load..... | 56 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ..... | 56 |
| 5.5 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงการ..... | 56 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 57 |
| ภาคผนวก..... | 58 |
| ประวัติผู้เขียนโครงการ..... | 61 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตรอร์..... | 33 |
| 4.1.2 ตารางแสดงแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบภาวะเปิดวงจร..... | 33 |
| 4.2 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุลจากนิยามของ PVUR (%)..... | 37 |
| 4.3 ตารางค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขณะไร้ภาระทางกล..... | 38 |
| 4.4 ตารางค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขณะขับภาระทางกล..... | 39 |
| 4.5 ตารางค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าขณะขับภาระทางกล..... | 43 |
| 4.7 ตารางกำลังสูญเสียในขดลวด..... | 49 |
| 4.8 ตารางประสิทธิภาพ..... | 51 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 มอเตอร์มอเตอร์ซิงโครนัส..... | 3 |
| 2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 4 |
| 2.3 โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส | 4 |
| 2.4 แสดงตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์..... | 5 |
| 2.5 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์..... | 6 |
| 2.6 ขดลวดแควมเปอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 7 |
| 2.7 โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์..... | 8 |
| 2.8 การต่อต้านกำลังเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 9 |
| 2.9 ปฏิริยาสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ซิงโครนัสทำงาน..... | 10 |
| 2.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซิงโครนัสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ..... | 11 |
| 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 11 |
| 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด..... | 13 |
| 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อขับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า..... | 14 |
| 2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์มีค่าเป็นหนึ่ง | 17 |
| 2.15 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลดและมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เป็นหนึ่ง เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง..... | 17 |
| 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง..... | 18 |
| 2.17 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง..... | 19 |
| 2.18 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ล่าหลังเขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง..... | 19 |
| 2.19 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ล่าหลังเขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง..... | 20 |
| 2.20 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและไม่คิดค่า R_a | 21 |
| 2.21 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า และไม่คิดค่า R_a | 22 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.22 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังต่ำหลังและไม่คิดค่า R_s | 22 |
| 2.23 ผังการไหลของพลังงานอินพุตและเอาต์พุตของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 23 |
| 2.24 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีและไม่มีโหลด..... | 25 |
| 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 26 |
| 3.2 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์..... | 27 |
| 3.3 วงจรทดสอบแบบเปิดวงจร..... | 28 |
| 3.4 กราฟแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแบบเปิดวงจรและวิธีการทดสอบแบบลัดวงจร..... | 28 |
| 3.5 วงจรทดสอบแบบลัดวงจร..... | 29 |
| 3.6 วงจรการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล..... | 31 |
| 3.7 การทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัส..... | 32 |
| 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับค่ากระแสไฟตรง..... | 34 |
| 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรในสภาวะคงตัวกับค่ากระแสไฟตรง..... | 34 |
| 4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสที่ได้จากการทดสอบ..... | 35 |
| 4.4 ตัวประกอบกำลังที่สภาวะ Under Voltage 1 Phase..... | 47 |
| 4.5 ตัวประกอบกำลังที่สภาวะ Over Voltage 2 Phase..... | 47 |
| 4.6 ตัวประกอบกำลังที่สภาวะ Over Voltage 1 Phase..... | 48 |
| 4.7 ตัวประกอบกำลังที่สภาวะ Under Voltage 2 Phase..... | 48 |
| 5.1 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Under Voltage 1 Phase..... | 54 |
| 5.2 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Under Voltage 2 Phase..... | 54 |
| 5.3 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Over Voltage 1 Phase..... | 55 |
| 5.4 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Over Voltage 1 Phase..... | 55 |
| 5.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ..... | 56 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการนำเอามอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสมาใช้อย่างแพร่หลาย มอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส โดยปกติจะมีช่วงอายุการใช้งานของมอเตอร์นั้นๆ อยู่ อายุการใช้งานอาจจะขึ้นอยู่กับวัสดุหรือวิธีการผลิตและการใช้งาน และยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสสั้นลง อาทิ เช่น แรงดันไฟฟ้าตกและมอเตอร์ทำงานเกินพิกัดกำลัง เป็นต้น โครงการนี้จึงช่วยบอกสาเหตุของความผิดปกติของมอเตอร์ซิงโครนัสและสามารถเตือนว่ามอเตอร์กำลังจะมีปัญหาเพื่อจะได้ป้องกันหรือแก้ไขปัญหาได้ทันการ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทำงานภายใต้สภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัส รวมทั้งสังเกตว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อพิจารณาควบคู่กันไปกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบกันเพื่อหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาสภาวะการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล การศึกษาโครงการจะแบ่งสภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 สภาวะคือ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (Over Voltage Unbalance) และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (Under Voltage Unbalance) โดยกำหนดให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าระดับปกติมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ (V_{ac}) นอกจากนี้ยังแบ่งกรณีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละสภาวะข้างต้นทั้ง 2 สภาวะออกเป็น 2 กรณีคือ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส และความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส

การศึกษาของโครงการเลือกจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5 ระดับ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ให้กับมอเตอร์ซิงโครนัสทั้งในขณะไว้ภาระทางกลและขณะขับภาระทางกล

1.4 แผนการดำเนินงาน

| รายละเอียด | | | | | | |
|---|------|------|-------|-------|------|-------|
| | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. |
| 1. รวบรวมข้อมูล | | | | | | |
| 2. ศึกษาเรื่องของ แรงดันตกแรงดันเกิน | | | | | | |
| 3. ทดสอบมอเตอร์ในสถานะที่แรงดันไม่สมดุล | | | | | | |
| 4. สรุปผลการทดลองและทำรูปเล่มรายงาน | | | | | | |

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ซึ่ง โครนัส 3 เฟสได้
2. สามารถนำความรู้ที่ได้มาหาวิธีป้องกันมอเตอร์ซึ่ง โครนัส 3 เฟสเสียหายได้
3. สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่เพื่อให้เกิดประโยชน์

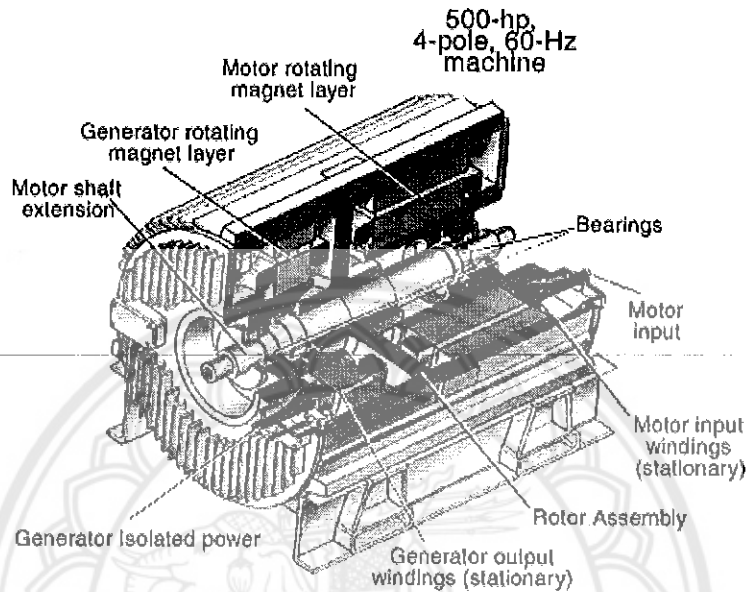
1.6 งบประมาณ

| | | |
|-------------------------------|-------|-----|
| ค่าอุปกรณ์ | 2,000 | บาท |
| ค่าจัดทำรายงาน | 1,000 | บาท |
| รวมเป็นเงิน (สามพันบาทถ้วน) | 3,000 | บาท |
| หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ | | |

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ภายในโรงงาน

2.1 มอเตอร์ซิงโครนัส



รูปที่ 2.1 มอเตอร์ซิงโครนัส [1]

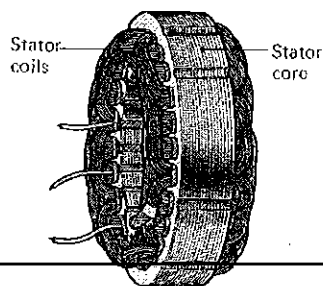
มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motor) เป็นมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส มีขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่และมีขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่หมุน คุณสมบัติเด่น หมุนด้วยความเร็วที่คงที่ โดยมีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัสไม่ว่าจะมีโหลดขนาดเท่าใดก็ตาม และหากการเปลี่ยนแปลงของโหลดไม่เกินค่าพิกัดมอเตอร์ซิงโครนัสแล้ว ความเร็วของมอเตอร์ซิงโครนัสจะยังคงที่เสมอ โดยขึ้นอยู่กับ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟสและจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

▪ สเตเตอร์ (Stator)

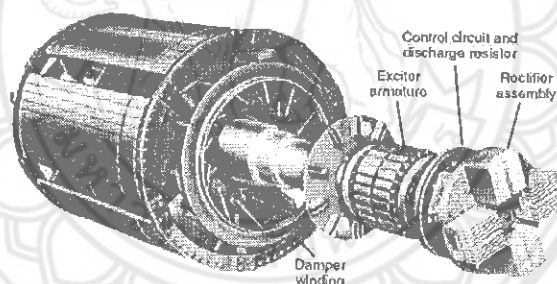
เป็นส่วนที่สำคัญของมอเตอร์ที่ใช้สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยมีแกนเหล็กที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ วางอัดซ้อนกันเรียกว่าแผ่นลามิเนต (Laminate Sheet) เพื่อลดการสูญเสียด้านกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) และแกนเหล็กสเตเตอร์จะป้อนเป็นช่องสล็อตเพื่อใช้สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส [2]

■ โรเตอร์ (Rotor)

เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์ และทำหน้าที่เป็นสนามแม่เหล็กให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกัน โดยจะพันขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมสลับกันไปมา และปลายทั้งสองข้างของขดลวดสนามแม่เหล็กต่อเข้ากับสลิปริงเพื่อเป็นทางเดินทางกระแสไฟฟ้า และตัวโรเตอร์จะสร้างจากแผ่นเหล็กลามิเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็น โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Pole) โดยค่านบนของโรเตอร์สามารถฝังขดลวดช่วยสตาร์ทมอเตอร์ที่เรียกว่า ขดลวดแดมเปอร์ (Dampers Winding)



รูปที่ 2.3 โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส [3]

2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส

เนื่องจากมอเตอร์ซิงโครนัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส คือเครื่องกลไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเหมือนกัน ถ้าต่อไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนอยู่รอบๆ สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เท่ากับความเร็วซิงโครนัส สำหรับโรเตอร์จะเป็นขดลวดสนามแม่เหล็กเมื่อจ่ายไฟตรงให้ขดลวดสนามแม่เหล็กจะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กนี้จะหมุนเกาะติดไปกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ทำให้เพลของมอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัสหาได้ดังนี้

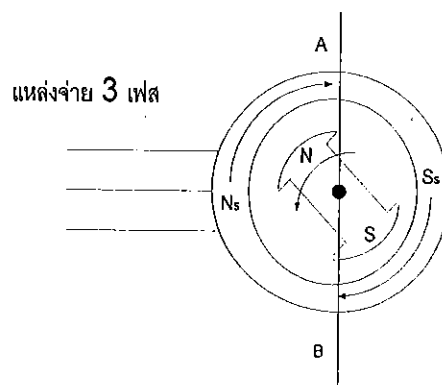
$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

เมื่อ

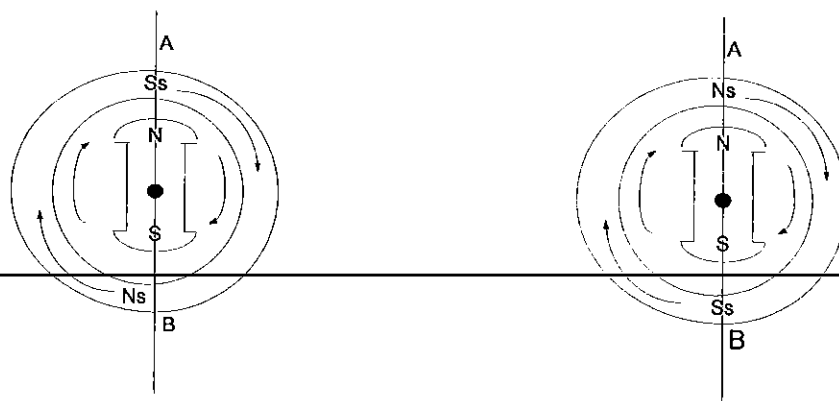
 N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm) f = ความถี่ของแรงดันไฟสลัที่จ่ายให้สเตเตอร์ (Hz) p = จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์

■ สนามแม่เหล็กหมุน

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ของซิงโครมอเตอร์ (สมมุติให้เป็นมอเตอร์ชนิด 2 ขั้ว) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์เป็น 2 ขั้ว คือเหนือและใต้ ซึ่งแทนด้วย N_s และ S_s และสนามแม่เหล็กนี้จะเกิดการหมุนที่ความเร็วซิงโครนัส โดยให้มีทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาและมีตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และถ้าสมมุติให้ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นชั่วขณะนั้นอยู่ที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B โดยให้ N_s อยู่ที่ตำแหน่ง A และ S_s อยู่ที่ตำแหน่ง B จะเห็นได้ว่ามีขั้วที่เหมือนกันอยู่ 2 คู่ขั้ว คือขั้ว N ของโรเตอร์กับ N_s ของสเตเตอร์ และขั้ว S ของโรเตอร์กับ S_s ของสเตเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากขั้วแม่เหล็กทั้ง 4 นี้ คือการเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน โดยแรงผลักนี้จะทำให้โรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ แต่ในช่วงครึ่งไซเคิลหลังของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์นั้น จะเห็นว่าขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะหมุนเคลื่อนที่ไป 180 องศาไฟฟ้า นั่นคือตำแหน่ง A บนสเตเตอร์จะกลายเป็นขั้ว S_s ส่วนตำแหน่ง B จะกลายเป็นขั้ว N_s เมื่อเป็นเช่นนี้ก็จะเกิดแรงดูดกันขึ้นระหว่างขั้วแม่เหล็ก N_s กับขั้ว S ของโรเตอร์ และขั้ว S_s จะดูดกับขั้ว N ของโรเตอร์ ดังนั้นจึงทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับครั้งแรก) ดังนั้นจากเหตุผลดังที่กล่าวมาจึงทำให้โรเตอร์ไม่สามารถรับการเปลี่ยนแปลงของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ซึ่งหมุนไปอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะว่าตัวโรเตอร์เองมีความเฉื่อยจึงไม่อาจทำให้โรเตอร์หมุนไปในทางใดทางหนึ่งได้ นั่นคือโรเตอร์จะหยุดอยู่กับที่



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์

(ก) ขั้ว N_s ไปเป็นขั้ว S_s (ข) ขั้ว S_s ไปเป็นขั้ว N_s

รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์

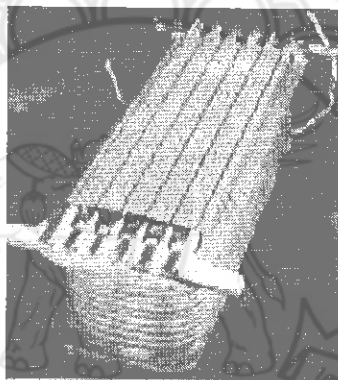
ในขณะเดียวกันถ้าพิจารณาในสภาวะของรูปที่ 2.5 (ก) ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ จะเกิดการดูดซึ่งกันและกัน โดยสมมติให้โรเตอร์ไม่หยุดอยู่กับที่ แต่มีการหมุนไปในทิศทางตาม เข็มนาฬิกา คือ หมุนผ่านไปเป็นระยะหนึ่งขั้วแม่เหล็ก (Pole-Pitch) โดยในเวลาเดียวกันนี้ ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะเปลี่ยนจากขั้ว N_s ไปเป็นขั้ว S_s และจาก S_s ไปเป็น N_s ดังแสดงในรูป 2.5 (ข) ที่ตำแหน่งนี้จะเห็นได้ว่าขั้วแม่เหล็กระหว่างสเตเตอร์กับ โรเตอร์จะเกิดการดูดซึ่งกันและกัน อีก ซึ่งก็หมายความว่า ขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปตามการเปลี่ยนตำแหน่งของ ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ดังนั้นจึงมีผลทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กที่หมุน ที่สเตเตอร์ และเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นั่นคือโรเตอร์ก็จะหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดง ในรูปที่ 2.5

2.1.3 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส

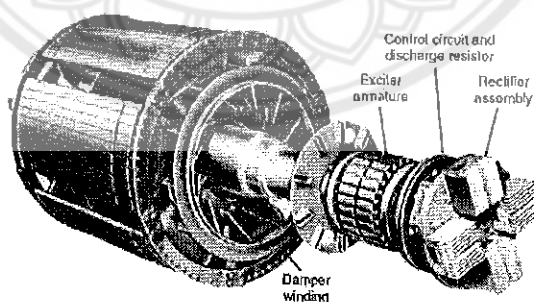
เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้นกับสเตเตอร์ เมื่อจ่ายแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟสและความเร็ว ของสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับความเร็วซิงโครนัสโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะถูกวางใน สนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นเมื่อกระตุ้นกระแสสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ จะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นรอบๆ โรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กนี้จะดึงดูดกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ผล คือจะเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนเกาะไปกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ความเร็วซิงโครนัส แต่ในทางปฏิบัติ การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขนาดใหญ่จะต้องมีวิธีการ เฉพาะ ซึ่งที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

(A) วิธีการเหนี่ยวนำ

การเริ่มเดินด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ (Induction Starting) ใช้หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยฝั่งขดลวดแคมเปอร์ไว้บนผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ทุก ๆ ขั้วเมื่อจ่ายไฟสลับ 3 เฟสเข้าไปที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดแคมเปอร์ ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นบริเวณผิวหน้าของโรเตอร์ โรเตอร์จะหมุนไปตามสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์จนกระทั่งโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อยจึงเริ่มจ่ายกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จึงเกิดอย่างถาวร และดึงดูดกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ และหมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ลักษณะของขดลวดแคมเปอร์และการติดตั้งขดลวดแคมเปอร์ที่ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข)



(ก) ขดลวดแคมเปอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส[4]

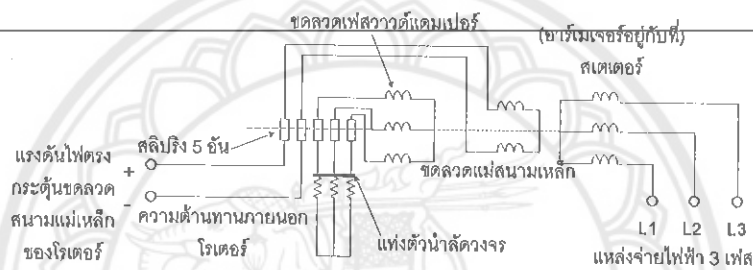


(ข) โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส มี 6 ขั้วแม่เหล็ก 1200 rpm จะเห็นขดลวดแคมเปอร์ที่ด้านหน้าขั้วแม่เหล็ก[5]

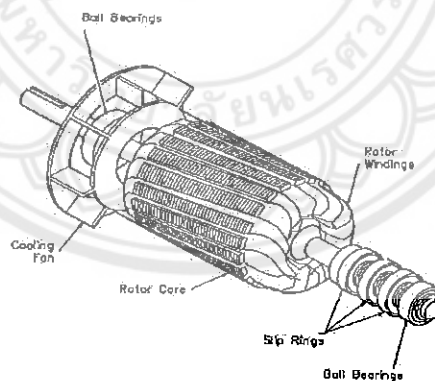
รูปที่ 2.6 ขดลวดแคมเปอร์และการติดตั้งขดลวดแคมเปอร์

(B) วิธีใช้โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์

วิธีใช้โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์(Simplex Rotor) คือวิธีการเพิ่มขดลวดที่โรเตอร์ โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์จะมีขดลวดอีกชุดหนึ่งพันอยู่บนผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กแทนขดลวดแคมเปอร์ มีชื่อว่า เฟสววด์แคมเปอร์ (Phase Wound Damper) โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์จะมีสลีปรัง 5 อัน โดย 3 อันแรกสำหรับขดลวดที่โรเตอร์ และอีก 2 อันสำหรับขดลวดสนามแม่เหล็ก การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสแบบโรเตอร์ซิมเพลกซ์จึงใช้หลักการเดียวกันกับการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด (Wound Rotor Induction Motor) วงจรของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์แสดงในรูปที่ 2.7 (ก) และลักษณะภายนอกและสลีปรังของโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์แสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



(ก) วงจรของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์เพื่อใช้ในการเริ่มเดิน



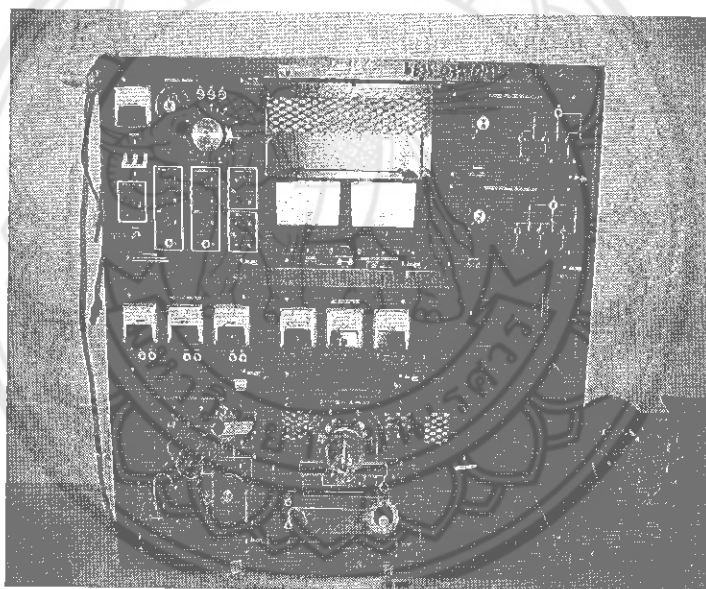
(ข) ลักษณะภายนอกของโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์[6]

รูปที่ 2.7 โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์

มอเตอร์ซิงโครนัสที่เริ่มเดินด้วยโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์นี้จะให้แรงบิดตอนเริ่มหมุนสูงมากกว่า 3 เท่าของแรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัด บางครั้งจึงเรียкмอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์ว่า มอเตอร์ซิงโครนัสที่มีแรงบิดเริ่มหมุนสูง (High-Starting-Torque Synchronous Motor)

(C) วิธีขับด้วยต้นกำลัง

วิธีขับโดยใช้ต้นกำลัง (Prime Mover) ต่อกับเพลลาของมอเตอร์ซิงโครนัส นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวขับ โดยให้มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพิ่มความเร็วของตัวขับเพื่อให้มอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปที่ความเร็วพิกัด และป้อนกระแสกระตุ้น ขดลวดสนามแม่เหล็กให้มอเตอร์ซิงโครนัส ตรวจสอบลำดับเฟสให้ถูกต้อง วัดแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสเท่าแรงดันพิกัด และให้ใช้สวิตช์ 3 เฟสขนานมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งขณะนี้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสของระบบจำหน่าย เมื่อขนานได้แล้วให้ตัดแหล่งจ่ายมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นต้นกำลังออก ขณะนี้มอเตอร์ซิงโครนัสซึ่งเคยทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสอย่างสมบูรณ์ สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นต้นกำลังจะทำหน้าที่เป็นโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส ลักษณะของการต่อมอเตอร์มอเตอร์กระแสตรงเป็นต้นกำลังเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส แสดงในรูปที่ 2.8

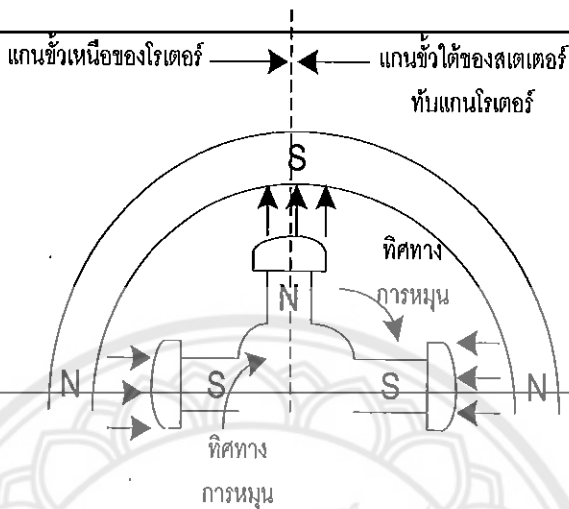


รูปที่ 2.8 การต่อต้นกำลังเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส

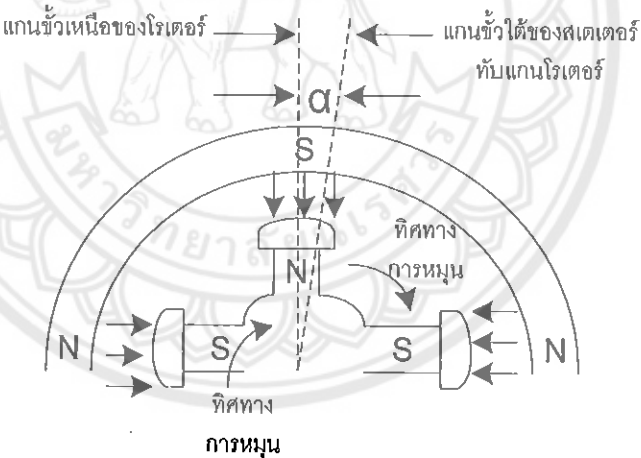
2.1.4 มอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด

มอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อทำงานโดยไม่มีโหลด ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จะถูกยึดติดหรือเกาะติดกับขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) โดยที่แกนของขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือของโรเตอร์จะทับกันพอดีกับแกนขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ของสเตเตอร์ และจะเกาะติดอย่างนี้ตลอดเวลาเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสหมุน แต่เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสมีโหลดต่ออยู่ที่เพลลาของมอเตอร์ โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเลื่อนถอยหลังออกไปเป็นมุมมูมนึง โดยที่ความเร็วของมันไม่ลดลง ดัง

แสดงในรูป 2.9 (ข) เรียกว่ามุมแอลฟา (α) หรือเรียกว่ามุมของโหลด (Load Angle) หรือมุมของแรงบิด (Torque Angle) ถ้าโหลดมีค่ามาก มุม α จะกว้างมากขึ้น ถ้าโหลดมีค่าน้อย มุม α จะมีค่าลดลง มุม α คือมุมที่เกิดจากระยะห่างของแกนเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์กับแกนเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์



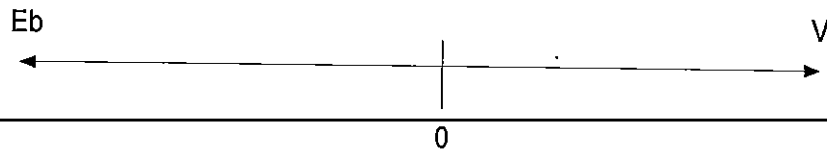
(ก) การยัดเกะกันระหว่างขั้วแม่เหล็กของ โรเตอร์กับสเตเตอร์ ขณะไม่มีโหลด



(ข) มุมโหลด (α) (Load Angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแม่เหล็กของ โรเตอร์กับสเตเตอร์ ขณะมีโหลด

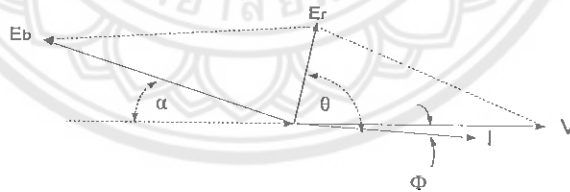
รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ซิงโครนัสทำงาน

ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ซึ่ง โครนัสทำงานในสถานะไม่มีโหลดและไม่คิดกำลังสูญเสียในมอเตอร์ เฟสเซอร์ของแรงดันที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

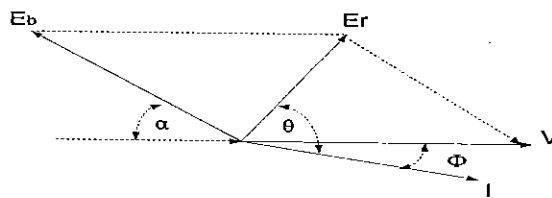


รูปที่ 2.10 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่ง โครนัสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ด้านกลับ

จากรูปที่ 2.10 เมื่อกำหนดให้ E_b คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ (Back emf) โดยจะแปรผันตรงกับเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์ เพราะมอเตอร์ซึ่ง โครนัสมีความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วซึ่ง โครนัส V คือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ซึ่ง โครนัส แรงดัน V และ E_b คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ (Back emf) จะมีเฟสตรงกันข้ามเป็นมุม 180 องศาและมีผลต่างของแรงดันเป็นศูนย์ ($E_R = 0$) เมื่อมอเตอร์ทำงานขณะไม่มีโหลด การสูญเสียในมอเตอร์ เฟสเซอร์ของ E_b จะถอยหลังไปเป็นมุม α จะทำให้เกิดผลต่างของแรงดัน (E_R) ขึ้น ทำให้เกิดกระแส (I) ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อสร้างแรงบิดให้เอาชนะการสูญเสีย มอเตอร์จึงหมุนไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) เมื่อมอเตอร์ไม่มีโหลด เฟสเซอร์ของแรงดัน E_b จะถอยกว้างออกไปอีกทำให้มุม α กว้างขึ้น จะทำให้แรงดัน E_R เพิ่มมากขึ้น และค่ากระแสในอาร์เมเจอร์ (I) สูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงเฟสเซอร์ขณะมีโหลดในรูปที่ 2.11 (ข)



(ก) ขณะไม่มีโหลด



(ข) ขณะมีโหลด

รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของมอเตอร์ซึ่ง โครนัส

เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสมีโหลดเพิ่มขึ้น มุม α จะกว้างขึ้น และ E_R จะมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อสร้างกระแสอาร์เมเจอร์ให้มากขึ้น และจะทำให้แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมากตามไปด้วย ถ้าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมากกว่าแรงบิดของโหลด แน่ใจว่ามอเตอร์ยังคงหมุนไปได้ตามความเร็วซิงโครนัส อย่างไรก็ตามหากโหลดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งโรเตอร์หลุดออกจากความเร็วซิงโครนัส นั้นแสดงว่าแรงบิดของโหลดมีค่ามากกว่าแรงบิดเต็มพิกัดของมอเตอร์ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นจนกระทั่งโรเตอร์หลุดออกจากความเร็วซิงโครนัสเรียกว่า Pull-Out Torque จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.11 (ข) หาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ได้ว่า

$$I = \frac{\vec{E}_R}{Z_S} \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\vec{E}_R = \vec{V} - \vec{E}_b$$

และ

$$Z_S = R_a + jX_S$$

เมื่อ

$$R_a = \text{ความต้านทานอาร์เมเจอร์ต่อเฟส}$$

$$X_S = \text{รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสต่อเฟส}$$

$$\theta = \text{มุมต่างเฟสของ } I \text{ กับ } E_R \cong 90^\circ$$

ค่า θ หาได้จาก

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_S}{R_a}$$

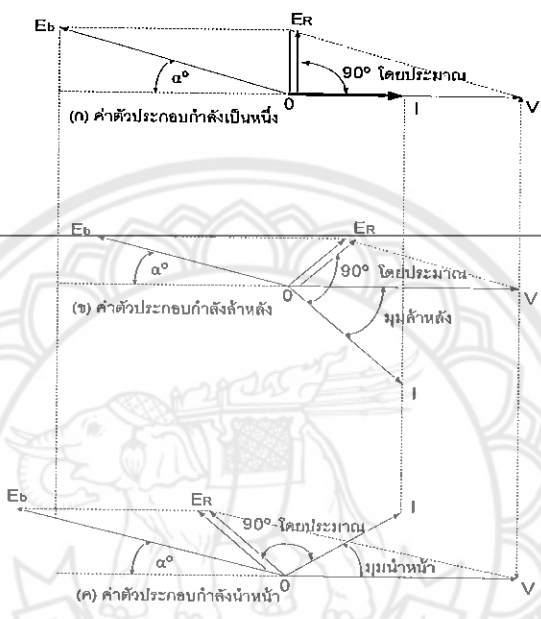
$$\phi = \text{มุมเฟสของมอเตอร์หรือมุมต่างเฟสระหว่าง } I \text{ กับ } V$$

$$\alpha = \text{มุมโหลด}$$

2.1.5 การปรับแต่งค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัส สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ด้วยการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ เพราะมอเตอร์ซิงโครนัสมีความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส จากสมการ (2.1) จะสามารถทำงานได้เมื่อมีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า (Leading) หรือล่าช้า (Lagging) โดยความเร็วขณะทำงานไม่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) ถ้าควบคุมให้มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานและขับโหลดที่ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง และทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ ผลคือกำลังอินพุตของมอเตอร์ซิงโครนัสจะไม่

เปลี่ยนแปลง แต่ค่าตัวประกอบกำลังและกระแสอินพุตเปลี่ยนแปลงไป พิจารณาจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูป 2.12 (ก) เมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กจนกระทั่งกระแสอาร์เมเจอร์ (I) อินเฟสกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ซึ่งโครนัส (V) จะเห็นว่ากระแส (I) ล้าหลัง E_R เป็นมุมประมาณ 90 องศา ในสภาวะนี้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดจะมีค่าเป็น 1 เพราะมุมเฟสเป็นศูนย์ การกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่า การกระตุ้นปกติ (Normal Excitation)



รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด

จากรูปที่ 2.12 (ข) เป็นการกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้ลดลงต่ำกว่าปกติ (Under Excitation) เป็นผลให้ค่าแรงดัน E_b ลดลง และ E_R เปลี่ยนแปลงไป ค่ากระแส I เพิ่มขึ้น แต่ยังล้าหลัง V เป็นมุม ϕ จะได้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดล้าหลัง สังเกตจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.12 (ข) จะพบว่ากระแส I ยังคงล้าหลัง E_R อยู่เป็นมุมประมาณ 90 องศาเช่นเดิม

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.12 (ค) เป็นการกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้มีกระแสมากกว่ากระแสปกติ การกระตุ้นแบบนี้จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่านำหน้า เพราะว่าเมื่อกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้มากกว่าปกติ จะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ (I) นำหน้าแรงดันที่ขั้ว (V) เป็นมุม ϕ แต่กระแส I ยังคงล้าหลังแรงดัน E_R อยู่ประมาณ 90 องศาเช่นเดิม จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ของมัน

2.1.6 กำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดในมอเตอร์ซิงโครนัส

กำลังกล (Mechanical Power : P_m) คือ กำลังที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ สามารถหาได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (E_b) คูณด้วยกระแสอาร์เมเจอร์ (I) และค่ามุมที่แตกต่างระหว่าง E_b กับ I ดังสมการต่อไปนี้

$$P_m = E_b I \cos(\alpha \pm \phi) \tag{2.3}$$

ถ้าค่าของมุม ϕ เป็นบวก กรณีค่าตัวประกอบกำลังจะนำหน้า และถ้าค่าของมุม ϕ เป็นลบ ผลคือค่าตัวประกอบกำลังจะนำหลัง เมื่อกำลังกลที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ต่อเฟสคือสมการที่ (2.3) ดังนั้นสมการของกำลังกลกรณี 3 เฟส คือ

$$P_m = 3E_b I \cos(\alpha \pm \phi) \tag{2.4}$$

อย่างไรก็ตามแล้ว กำลังงานกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าทางด้านอินพุต (P_{in}) ของมอเตอร์ซิงโครนัส ลบด้วยกำลังที่สูญเสียในสเตเตอร์ (กำลังที่สูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ $P_{js} = 3I^2 R_a$) ถ้าพิจารณากรณี 3 เฟส จะได้

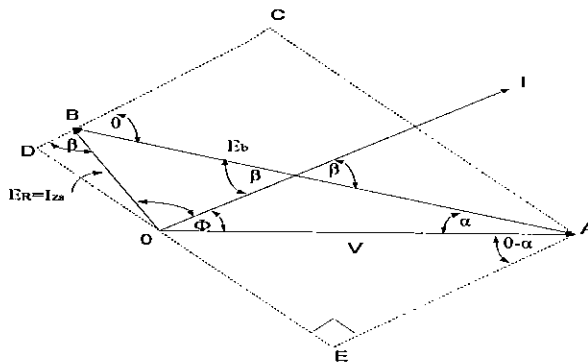
$$P_m = 3VI \cos \phi$$

$$P_{js} = 3I^2 R_a$$

นั่นคือ

$$P_m = P_{in} - P_{js} \tag{2.5}$$

เมื่อพิจารณาสมการของ P_m ในเทอมของ E_b และ X_s ให้พิจารณาจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.13 เป็นเฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส เมื่อขับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า จะได้ว่ามุม $OAE = \theta - \alpha$ และมุม $OBD = \beta$



รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อขับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า

จากรูปที่ 2.13 สมการกำลังกลต่อเฟสคือ

$$P_m = E_b I \cos \beta \quad (2.6)$$

เพราะว่า

$$BD = CD - BC$$

แต่

$$BD = IZ_s \cos \beta$$

และ

$$CD = V \cos(\theta - \alpha)$$

และ

$$BC = E_b \cos \theta$$

ดังนั้นสมการ BD คือ

$$IZ_s \cos \beta = V \cos(\theta - \alpha) - E_b \cos \theta$$

$$I \cos \beta = \frac{V}{Z_s} \cos(\theta - \alpha) - \frac{E_b}{Z_s} \cos \theta \quad (2.7)$$

แทนค่าสมการ (2.7) ลงในสมการ (2.6) ได้ว่า

$$P_m = E_b \left(\frac{V}{Z_s} \cos(\theta - \alpha) - \frac{E_b}{Z_s} \cos \theta \right)$$

$$\therefore P_m = \frac{E_b \times V}{Z_s} \cos(\theta - \alpha) - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \theta \quad (2.8)$$

เนื่องจาก R_a มีค่าน้อยมาก สามารถละทิ้ง หรือไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ ดังนั้น $Z_s \cong X_s$ และ $\theta \cong 90^\circ$ นั่นคือ สมการ (2.8) จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ $R_a = 0$ และ $Z_s = X_s$ และ $\theta = 90^\circ$ ได้ดังนี้

$$P_m = \frac{E_b V}{X_s} \cos(90^\circ - \alpha)$$

นั่นคือ

$$P_m = \frac{E_b V}{X_s} \sin \alpha \quad (2.9)$$

กำลังทางกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) ที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส หรือ $P_{m(\max)}$ จะเกิดขึ้นได้เมื่อมุม θ เท่ากับมุม α เป็นผลให้ค่า $\cos(\theta - \alpha)$ มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการของ P_m สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \alpha$$

$$= \frac{E_b V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \theta$$

เมื่อกำหนดให้ $Z_s \cong X_s$ และ $\theta \cong 90^\circ$ ดังนั้น

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b V}{Z_s} = \frac{E_b V}{X_s} \quad (2.10)$$

ในการทำงานเดียวกัน แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่เพลของมอเตอร์ซิงโครนัส คือแรงบิดที่เรียกว่า Pull Out Torque หรือ T_{\max}

$$T_{\max} = \frac{9.55 P_{m(\max)}}{n_s} \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้

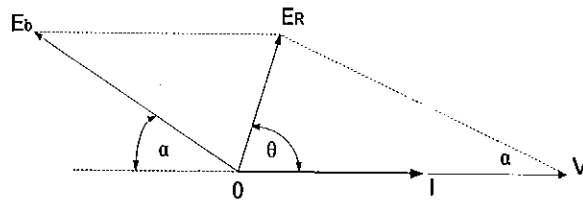
- T_{\max} = แรงบิดสูงสุด (N-m)
- $P_{m(\max)}$ = กำลังกลสูงสุด
- n_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

2.1.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส

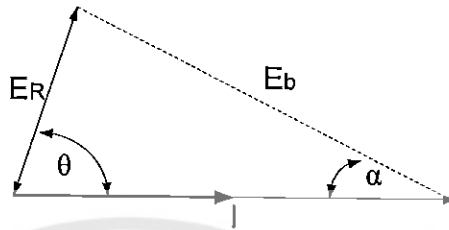
เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส จะใช้ในการคำนวณหาค่ามุมโหลด (α) และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ (E_b) ที่มอเตอร์ ซึ่งจะมีรูปแบบของเฟสเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวประกอบกำลังของโหลด ซึ่งมี 3 กรณี คือ เมื่อโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง และเมื่อโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าและล้าหลัง

A เมื่อค่าตัวประกอบกำลังหนึ่ง

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสมีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้แกนแรงดันเป็นแกนอ้างอิง ได้ตามรูป 2.14 (ก) หรือ 2.14 (ข)



(ก)



(ข)

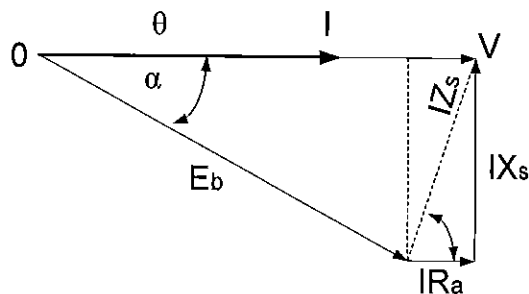
รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์มีค่าเป็นหนึ่ง เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง

จากรูป 2.14 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = \sqrt{V^2 + E_R^2 - 2VE_R \cos \theta} \tag{2.12}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_R \sin \theta}{E_b} \right) \tag{2.13}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง สามารถใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิงได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลดและมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เป็นหนึ่ง เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง

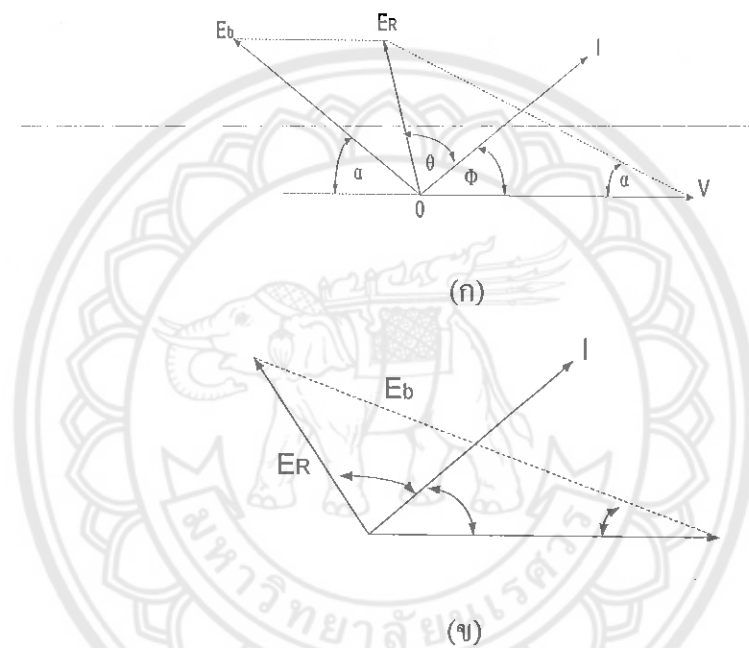
จากรูป 2.15 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = (V - IR_a) + j(IX_s) \quad (2.14)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{IX_s}{V - IR_a} \right) \quad (2.15)$$

B เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสมีค่านำหน้า สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม โดยใช้แกนแรงดันเป็นแกนอ้างอิงได้ดังรูปที่ 2.16 (ก) หรือ 2.16 (ข)



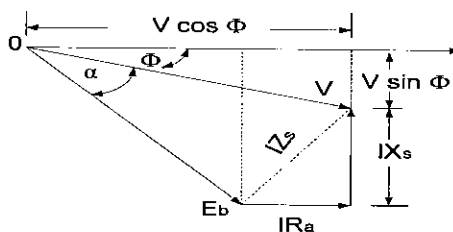
รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของ มอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.16 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = \sqrt{V^2 + E_R^2 - 2VE_R \cos(\theta + \phi)} \quad (2.16)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_R \sin(\theta + \phi)}{E_b} \right) \quad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง จะได้ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง

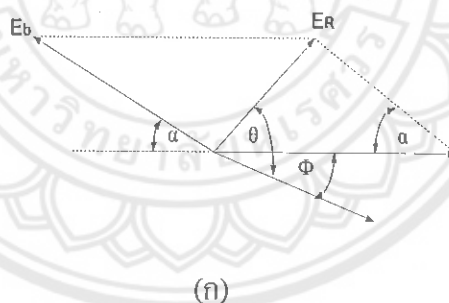
จากรูป 2.17 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = (V \cos \phi - IR_a) + j(V \sin \phi + IX_s) \quad (2.18)$$

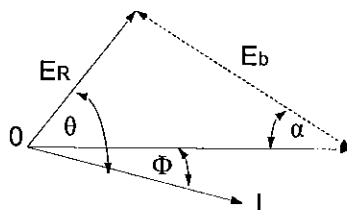
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V \sin \phi + IX_s}{V \cos \phi - IR_a} \right) - \phi \quad (2.19)$$

C เมื่อค่าตัวประกอบกำลังต่ำลง

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังต่ำลง จะเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้แกนของแรงดันเป็นแกนอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) หรือ 2.18 (ข)



(ก)



(ข)

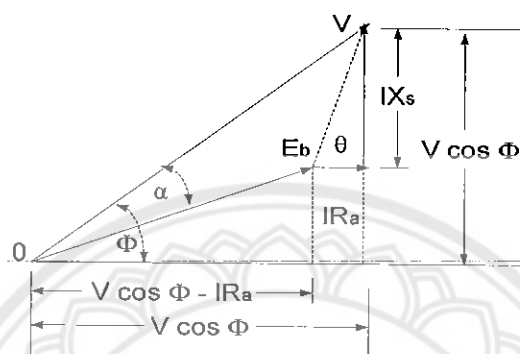
รูปที่ 2.18 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ต่ำลง เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.18 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = \sqrt{V^2 + E_R^2 - 2VE_R \cos(\theta - \varphi)} \quad (2.20)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_R \sin(\theta - \varphi)}{E_b} \right) \quad (2.21)$$

ในการทำงานเดียวกัน เมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง จะได้ดังรูป 2.19



รูปที่ 2.19 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ต่ำลง เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.19 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = (V \cos \varphi - IR_a) + j(V \sin \varphi - IX_s) \quad (2.22)$$

$$\alpha = \varphi - \tan^{-1} \left(\frac{V \sin \varphi - IX_s}{V \cos \varphi - IR_a} \right) \quad (2.23)$$

เนื่องจากสมการของ E_b ในมอเตอร์ซิงโครนัส และสมการของ E ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นสมการเดียวกัน ดังนั้นสรุปได้ว่ากรณีมอเตอร์ซิงโครนัส สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ คือ

$$E_b = (V \cos \varphi - IR_a) + j(V \sin \varphi \pm IX_s) \quad (2.24)$$

$$E_b = \sqrt{(V \cos \varphi - IR_a)^2 + (V \sin \varphi \pm IX_s)^2} \quad (2.25)$$

โดยกำหนดให้ ใช้เครื่องหมาย + เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง *นำหน้า*
 ใช้เครื่องหมาย - เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง *ส้าหลัง*
 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$E = (V \cos \varphi + IR_a) + j(V \sin \varphi \pm IX_s) \quad (2.26)$$

หรือ
$$E = \sqrt{(V \cos \varphi + IR_a)^2 + (V \sin \varphi \pm IX_s)^2} \quad (2.27)$$

โดยกำหนดให้ ใช้เครื่องหมาย + เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง *ส้าหลัง*
 ใช้เครื่องหมาย - เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง *นำหน้า*

สำหรับค่ามุมโหลด (α) ที่ค่าตัวประกอบกำลังใดๆ สามารถหาได้จากสมการ (2.28)

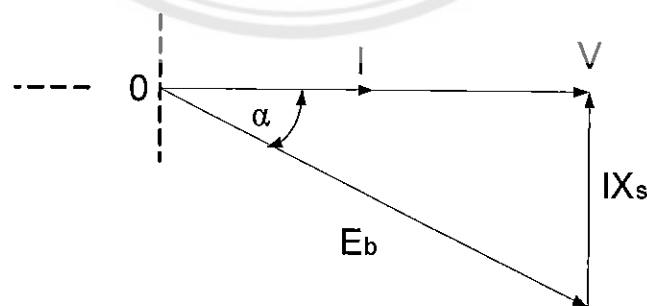
$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{E_b^2 + V^2 - E_R^2}{2E_b V} \right) \quad (2.28)$$

D เฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อไม่คิดค่า R_a

เนื่องจากค่าความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่า X_s และเนื่องจากค่า $Z_s \cong X_s$ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสขั้วโหลดที่ค่าตัวประกอบกำลังแตกต่างกัน สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อละทิ้งค่า (R_a) ได้ 3 กรณี ดังต่อไปนี้

■ กรณี ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เป็นหนึ่ง

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เป็นหนึ่งและ $Z_s \cong X_s$ เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและไม่คิดค่า R_a

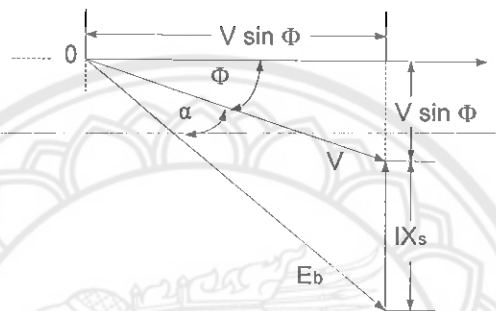
จากรูปที่ 2.20 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = V + j(I X_s) \quad (2.29)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{I X_s}{V} \right) \quad (2.30)$$

■ กรณี ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้า

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้าและค่า $Z_s \cong X_s$ จะเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า และไม่คิดค่า R_a

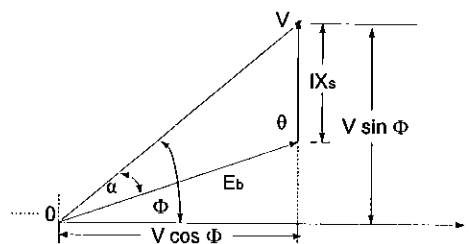
จากรูปที่ 2.21 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = (V \cos \phi) + j(V \sin \phi + I X_s) \quad (2.31)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V \sin \phi + I X_s}{V \cos \phi} \right) - \phi. \quad (2.32)$$

■ กรณี ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ล่าหลัง

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ล่าหลัง และค่า $Z_s \cong X_s$ จะเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังล่าหลังและไม่คิดค่า R_a

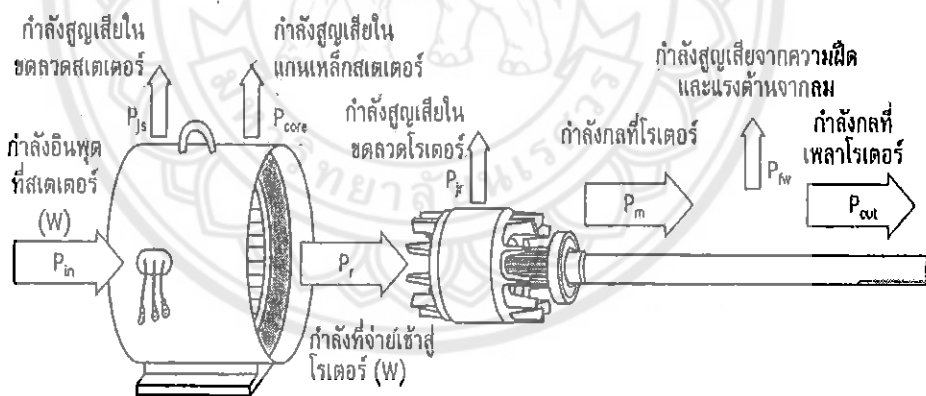
จากรูปที่ 2.22 เขียนสมการ E_b และ α ได้ว่า

$$E_b = (V \cos \phi) + j(\sin \phi - IX_s) \quad (2.33)$$

$$\alpha = \phi - \tan^{-1} \left(\frac{V \sin \phi + IX_s}{V \cos \phi} \right) \quad (2.34)$$

2.2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส หาได้จากกำลังเอาต์พุต (P_{out}) หารด้วยกำลังอินพุต (P_m) ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.23 สามารถแสดงลำดับของพลังงานไฟฟ้าทางอินพุต (P_{in}) ที่จ่ายเข้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส พลังงานไฟฟ้าส่วนนี้จะเกิดการสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{js}) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ (P_{core}) กำลังงานส่วนที่เหลือบนสเตเตอร์จะส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (P_r) กำลังส่วนนี้จะสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (P_{jr}) แปลงเป็นพลังงานกล (P_m) ที่ตัวโรเตอร์ จากนั้นจะเกิดกำลังสูญเสียจาก Stray load ซึ่งมีค่าประมาณ 9% ของกำลังกลทางเอาต์พุต และกำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม (P_{fw}) ก่อนที่จะส่งกำลังกลที่เหลือไปยังเพลลาของมอเตอร์กลายเป็นกำลังกลเอาต์พุต (P_{out}) ดังแสดงผังการไหลของพลังงานในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ผังการไหลของพลังงานอินพุตและเอาต์พุตของมอเตอร์ซิงโครนัส

โดยหลักการเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กำลังสูญเสียในแกนเหล็กของโรเตอร์จะไม่เกิดขึ้นเพราะไม่มีกระแสไหลวนในแกนเหล็กของโรเตอร์ ด้วยสาเหตุที่ว่าโรเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์นั่นเอง

ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ซึ่งโครนัส คือ (η) ค่าเป็นร้อยละหาได้จากสมการ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.35)$$

และ

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses}$$

เมื่อ

P_{losses} = กำลังสูญเสียรวมทั้งหมดในมอเตอร์ซึ่งโครนัส

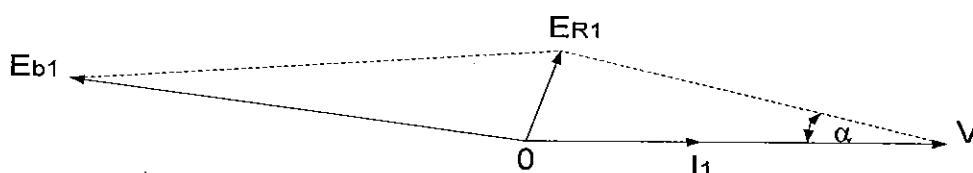
ดังนั้น

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \times 100\% \quad (2.36)$$

2.3 ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์

ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ หมายถึงสภาวะการทำงานของมอเตอร์ซึ่งโครนัสในขณะที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า ทำให้สามารถนำมอเตอร์ซึ่งโครนัสไปใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าได้ โดยที่ตัวของมอเตอร์ไม่ต้องขับโหลดทางกล โดยทั่วไปการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเพื่อให้มีค่าเข้าใกล้ค่าหนึ่ง คือประมาณ 0.9-0.95 ถ้าหลังจากขณะที่มอเตอร์ซึ่งโครนัสทำงานโดยไม่ขับโหลดทางกล กำลังทางอินพุตทั้งหมดจะถูกใช้เพื่อเอาชนะการสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ การสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียทางกลที่เกิดจากความฝืดและแรงต้านจากลม ผลคือ I จะอินเฟสกับ V ดังเฟสเซอร์ในรูปที่ 2.24 (ก) ซึ่งเป็นเฟสเซอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสเมื่อไม่มีโหลดและมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งแต่ถ้าเพิ่มกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นจะทำให้กระแส I_1 เปลี่ยนเป็นกระแส I_2 ซึ่งนำหน้าแรงดันไฟฟ้า (V) เป็นมุมประมาณ 90 องศาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข)

คุณลักษณะของมอเตอร์ซึ่งโครนัสในขณะที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าจะเหมือนกับคอนเดนเซอร์นั่นเอง ดังนั้นเมื่อต่อซิงโครนัสมอเตอร์ที่มีคุณลักษณะเป็นคอนเดนเซอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้านั้นดีขึ้น จึงเรียกซิงโครนัสมอเตอร์ในลักษณะนี้ว่า ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์

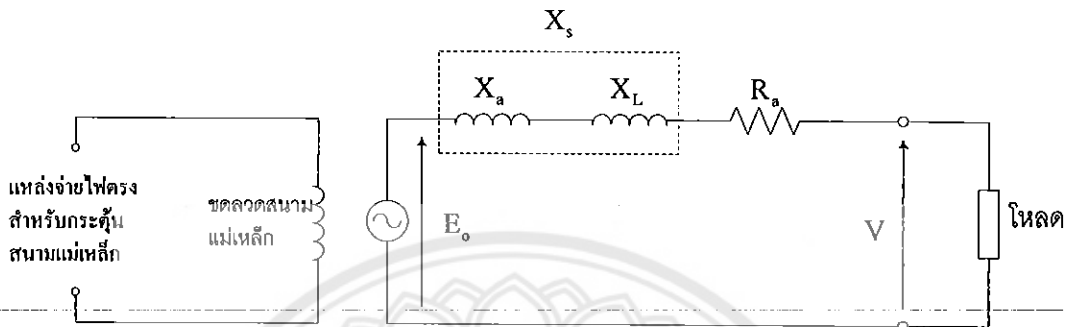


(ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซึ่งโครนัสไม่มีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

บทที่ 3

การทดสอบและวิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

| | | | |
|-------|--|-------|----------------------|
| X_s | : Stator Leakage Reactance | R_a | : Stator Resistance |
| X_L | : Rotor Leakage Reactance Transfer to Stator | E_0 | : Voltage on No Load |
| X_a | : Magnetizing Reactance | V | : Voltage Per Phase |

ในทางปฏิบัติการหาค่ารีกูลแลนซ์ของแรงดันเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดนั้นจะหาจากวงจรสมมูล

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \quad (3.1)$$

R_a = ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

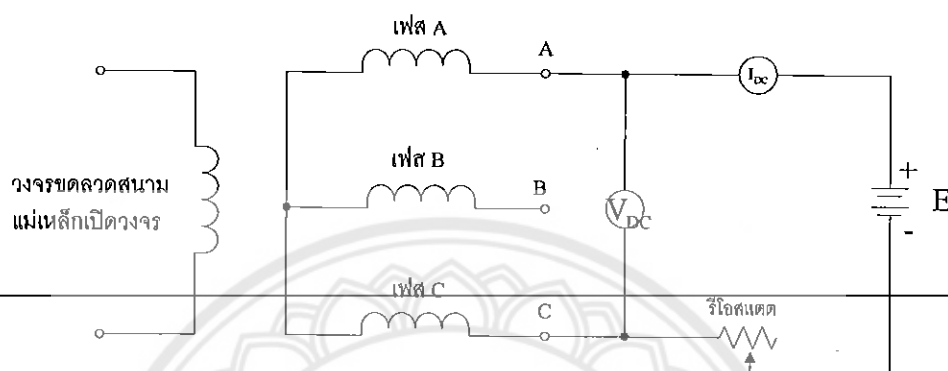
X_s = รีแอกแตนซ์ซิงโครนัส

ค่าของ R_a และ X_s วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าดังกล่าวนี้มี 3 วิธีคือ

1. วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance Test)
2. วิธีทดสอบแบบเปิดวงจร (Open-Circuit Test)
3. วิธีทดสอบแบบลัดวงจร (Short-Circuit Test)

3.1.1 วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

การหาความต้านทานอาร์เมเจอร์ R_a ของมอเตอร์เชิงโครนัส 3 เฟส จะใช้วิธีการทดสอบ โดยทดสอบขณะที่มอเตอร์ไม่ทำงานและไม่มีการกระตุ้นที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยการต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้าไปที่ขั้วคู่ใดคู่หนึ่งของมอเตอร์ และวัดหาค่า I_{DC} และ E_{DC} ของขดลวดเพื่อนำมาหาค่า R_{DC} ใช้ทดสอบได้ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัสต่อแบบสตาร์ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

ในทางปฏิบัติการทดสอบดังรูปที่ 3.2 นี้ต้องใช้รีโอสแตตที่ทนกระแสได้สูงๆ ต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ เพราะหาค่า R_a มีค่าต่ำมากจากรูปที่ 3.2 ค่า R_{DC} ที่หาได้คือ

$$R_{DC} = \frac{E_{DC}}{I_{DC}} \quad (3.2)$$

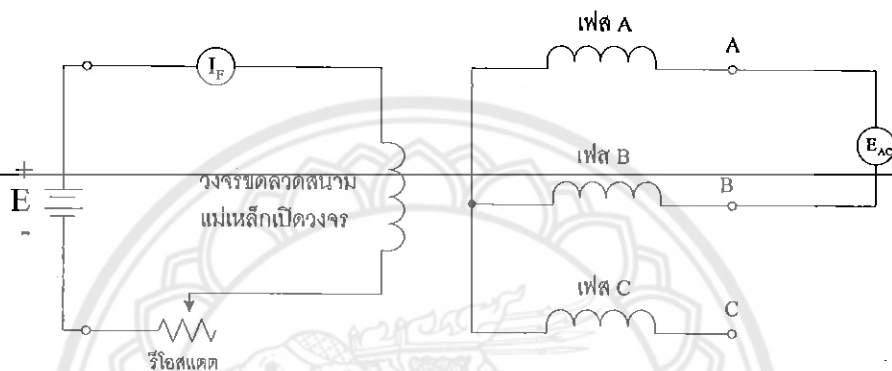
ซึ่งค่า R_{DC} มีค่าเป็นสองเท่าของค่า R_a เพราะค่า E_{DC} เท่ากับค่า R_a รวมกันสองเฟส ดังนั้นค่า R_a หาได้จากสมการ

$$R_a = \frac{R_{DC}}{2} \quad (3.3)$$

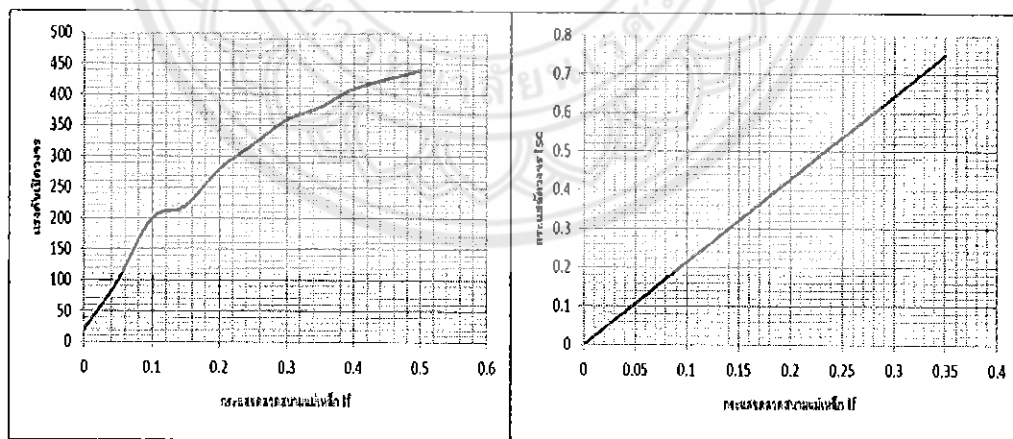
เนื่องจากค่า R_a ของอาร์เมเจอร์ในวงจรไฟสลับจะค่าใช้งาน (Effective) ดังนั้นค่า R_a ที่ได้จากการทดสอบดังสมการ (1.18) จะต้องคูณกับแฟกเตอร์คือ $R_{a(eff)}$ ที่เป็นค่าคงที่ตั้งแต่ 1.25 ถึง 1.75 ซึ่งเกิดมาจากโครงสร้างของการพันขดลวด รูปร่างลักษณะของสล็อต จึงจะได้ค่า $R_{a(eff)}$

3.1.2 วิธีทดสอบแบบเปิดวงจร

คือการทดสอบหาค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งโครนัสขณะเปิดวงจรไม่ต่อโหลด โดยต้องทำการขั้มมอเตอร์ให้หมุนไปที่ความเร็วซึ่งโครนัสตามพิกัดกำหนด และต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับขดลวดสนามแม่เหล็ก และค่อยๆปรับค่ากระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) ตั้งแต่ค่าศูนย์จนถึงค่าที่เป็นผลให้สนามแม่เหล็กเริ่มอิ่มตัว และทดลองวัดค่าแรงดันที่ขั้ว (E_{AC}) จากค่าศูนย์จนถึงค่าสูงสุดและนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตที่ขั้วกับกระแสสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.4 สำหรับวงจรการทดสอบแบบเปิดวงจรแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบแบบเปิดวงจร



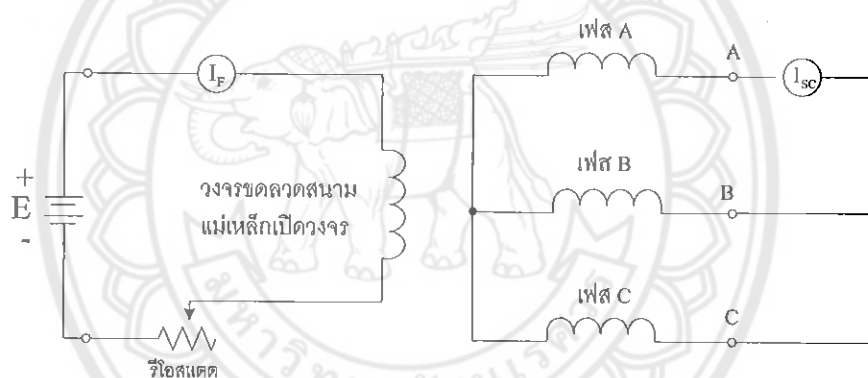
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแบบเปิดวงจร และวิธีการทดสอบแบบลัดวงจร

อย่างไรก็ตามแรงดัน E_{AC} ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรเป็นแรงดันระหว่างสาย ในการนำไปคำนวณจะต้องเปลี่ยนเป็นแรงดันระหว่างเฟส เนื่องจากเครื่องอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าเชิงโครมันต์ที่ใช้ทดสอบในรูปแบบที่ ต่อแบบสตาร์ ดังนั้น $E_{oc} = \frac{E_{AC}}{\sqrt{3}}$ เส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร จากรูปที่ 3.3 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{E_{AC}}{\sqrt{3}}$ และ I_f

3.1.3 วิธีทดสอบแบบลัดวงจร

วิธีการทดสอบแบบลัดวงจรมีจุดประสงค์เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครมันต์ 3 เฟส การทดสอบนี้ต้องให้ความระมัดระวังมากที่สุด โดยเฉพาะที่วงจรขอลวดสนามแม่เหล็กต้องต่อรีโอสแตตที่มีค่าสูงๆ เพื่อรักษากระแสขลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) ให้เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ การทดสอบทำได้โดยขับมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วเชิงโครมันต์ และค่อยๆ เพิ่มค่ากระแส (I_f) จากค่าศูนย์จนถึงค่าสูงสุดอย่างช้าๆ ทดสอบวัดค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ที่วัดได้จากวงจรอาร์เมเจอร์ แล้วจึงนำค่ากระแส (I_f) และกระแส (I_{sc}) มาพลอตลงในกราฟรูปเดียวกับ การทดสอบแบบเปิดวงจรดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 วงจรทดสอบแบบลัดวงจร

เนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจรเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรในอาร์เมเจอร์ (I_{sc}) ที่ความเร็วเชิงโครมันต์และกระแสขลวดตามพิกัด จากกราฟในรูป ถ้ากระแสขลวดสนามตามพิกัดของเครื่องกำเนิดคือ 46 A ค่ากระแสลัดวงจรคือ $I_{sc} = 204$ A ค่าอิมพีแดนซ์เชิงโครมันต์ Z_s หาได้จากสมการ

$$Z_s = \frac{E_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.4)$$

จากรูปที่ 3.3 ที่ $I_f = 47$ A จะได้ค่า $I_{sc} = 204$ A และจะได้ค่า $E_{oc} = 1330$ V ดังนั้น Z_s ต่อเฟสคือ

$$Z_s = \frac{1330 \text{ V}}{204 \text{ A}} = 6.52 \text{ } \Omega$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทราบค่า Z_s จากการทดสอบแบบเปิดวงจร และจากการทดสอบแบบลัดวงจรและทราบ R_s จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์เชิงอินดักทีฟ (X_s) จึงเท่ากับ

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (3.5)$$

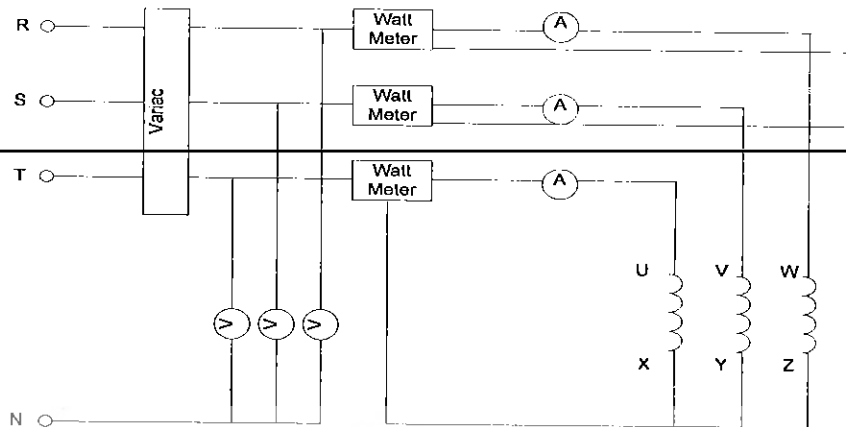
3.2 การทดสอบในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะไร้ภาระทางกลและขณะขับภาระทางกล

รูปแบบการทดสอบตามเหตุการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ

- 1) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (1 \emptyset - Under Voltage Unbalance)
- 2) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (2 \emptyset - Under Voltage Unbalance)
- 3) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1 \emptyset - Over Voltage Unbalance)
- 4) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส (2 \emptyset - Over Voltage Unbalance)

ในแต่ละกรณีจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5 ระดับ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตามเปอร์เซ็นต์ไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส ได้ทำแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟสไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งอยู่ในบทที่ 4 แล้ว

3.2.1 การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบมอเตอร์เชิงโครนัสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

วงจรการทดสอบรูปที่ 3.6 การทดสอบขณะไร้ภาระทางกลจะใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 3 ตัว ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส แอมมิเตอร์กระแสสลับ 3 ตัวมีหน้าที่วัดกระแสเฟสถูกต่อเข้ากับปลายขดลวดสเตเตอร์ด้านเข้าคือ ปลาย U , V และ W มอเตอร์ต่อแบบ Star Isolated Neutral ดังนั้นปลายขดลวดสเตเตอร์ด้านออกได้แก่ ปลาย X , Y และ Z จึงต่อเข้าด้วยกัน ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าแต่ละเฟสโดยปรับ Variac ตามสถานะไม่สมดุลทั้ง 4 กรณี และ 5 ระดับ เพอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล ค่าความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์อ่านค่าได้จาก Tachometer

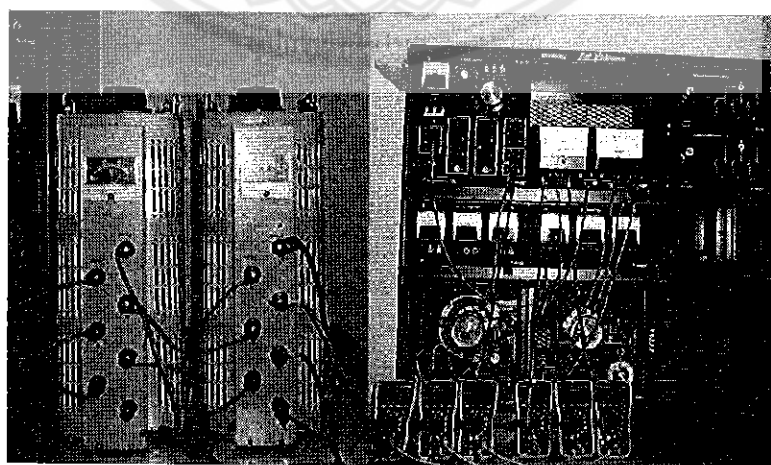
สำหรับการทดสอบขณะขับภาระทางกลจะติดตั้งชุดขับภาระทางกลเข้ากับเพลลาของโรเตอร์ ทำการทดสอบโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่เป็นโหลด ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบ แล้วทำการปรับ โหลดตามต้องการโดยปรับแรงดันขาเข้าของมอเตอร์กระแสตรงตามต้องการที่ระดับจนครบ 5 ระดับ บันทึกค่ากระแสเฟสกำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส ความเร็วทางกลที่เพลลาของ โรเตอร์ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือจึงนำทฤษฎีส่วนประกอบสมมาตรมาเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ทดสอบ

- หมายเหตุ - มอเตอร์ที่ทำการทดสอบเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า
- ขนาดแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า 380 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส)
 - ความถี่ระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์
 - มอเตอร์ต่อแบบ Star Isolated Neutral
 - มอเตอร์มีลำดับเฟส ABC (มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองเข้าไปทางด้านเฟลา)
 - สถานที่ทำการทดสอบไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิของสถานที่ทำการทดสอบและขณะทำการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส

3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

| | | |
|--|----|---------|
| 1) มอเตอร์ซิงโครนัส | 1 | ตัว |
| 2) มอเตอร์กระแสตรง | 1 | ตัว |
| 3) โวลต์มิเตอร์กระแสสลับ | 3 | ตัว |
| 4) (Variac) จ่ายกระแสไฟฟ้า | 2 | ตัว |
| 5) สายไฟฟ้าต่อวงจร | 60 | เส้น |
| 6) ทาโคมิเตอร์ (Tachometer) | 1 | เครื่อง |
| 7) เครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer | 1 | ตัว |
| 8) แท่นวางมอเตอร์ขณะทดสอบการขับภาระทางกล | 2 | แท่น |



รูปที่ 3.7 การทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัส

บทที่ 4

ผลที่ได้จากการทำการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบหาจรรยาสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

4.1.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

ตารางที่ 4.1.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

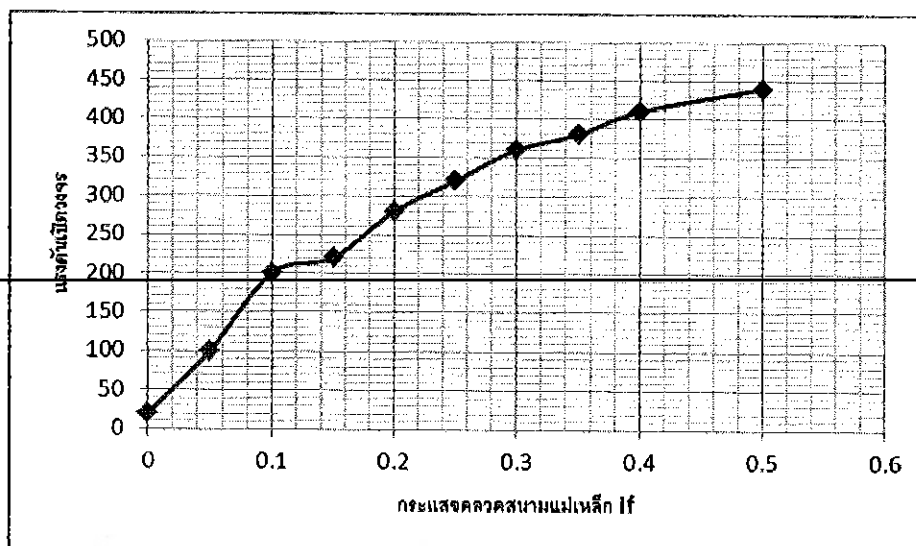
| | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| V_{dc} (V) | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| I_{dc} (A) | 0.27 | 0.32 | 0.36 | 0.41 | 0.45 |
| R_a (Ω) | 43.7 | 43.7 | 43.7 | 43.7 | 43.7 |

จาก $R_a = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ $R_a = 43.7 \Omega$

4.1.2 การทดสอบภาวะเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.1.2 แรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบภาวะเปิดวงจร

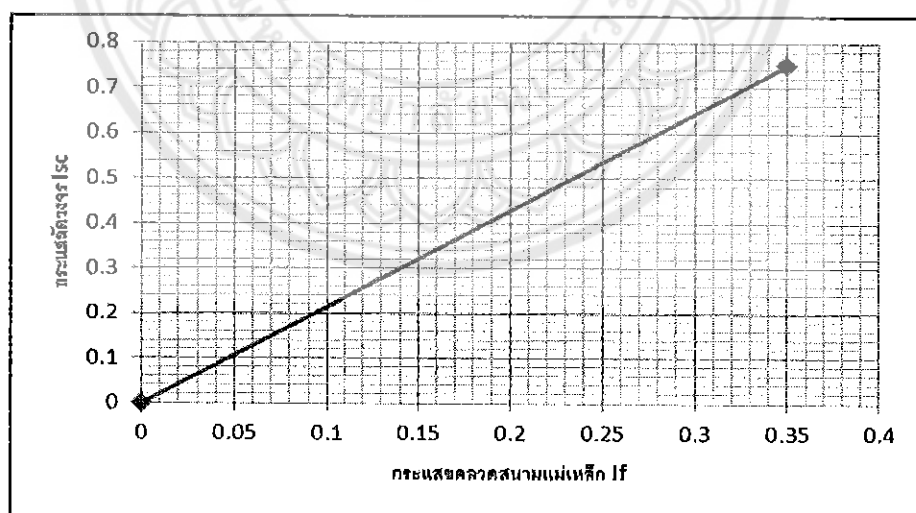
| I_1 (A) | E_1 (V) | E_2 (V) | E_3 (V) | E_{av} (V) |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 0 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 0.05 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0.1 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 0.15 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 0.2 | 280 | 280 | 280 | 280 |
| 0.25 | 320 | 320 | 320 | 320 |
| 0.3 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 0.35 | 380 | 380 | 380 | 380 |
| 0.4 | 410 | 410 | 410 | 410 |
| 0.5 | 440 | 440 | 440 | 440 |



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับค่ากระแสไฟตรง

4.1.3 การทดสอบภาวะลัดวงจร (Short Circuit Test)

DC Excitation Current (I_1) =0.35..... A_{dc} ลัดวงจรทางด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการเปิดสวิตช์ของซิงโครไนซิงค์สวิตช์ (Synchronizing Switch) ค่ากระแส I_2 ที่ช่วงสูงสุดโดยประมาณ ในขณะที่เปิดสวิตช์ซิงโครไนซิงค์ $I_2 = \dots\dots\dots 0.75\dots\dots A_{ac}$



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรในสถานะคงตัวกับค่ากระแสไฟตรง

4.1.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสที่ได้จากการทดสอบ

ทดสอบแบบเปิดวงจร

$$E_{oc} = \frac{E_{sc}}{\sqrt{3}}$$

$$E_{oc} = \frac{370}{\sqrt{3}} = 213.61 \text{ V}$$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแบบเปิดวงจร และวิธีการทดสอบแบบลัดวงจร

$$I_{sc} = 0.75 \text{ A}$$

ทดสอบแบบลัดวงจร

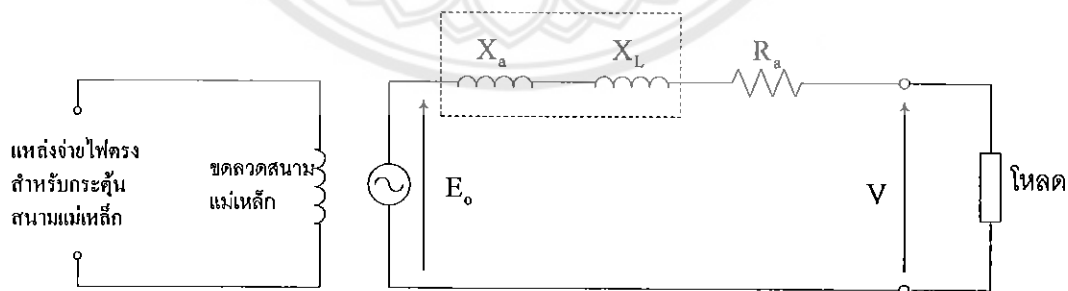
$$Z_s = \frac{E_{oc}}{I_{sc}}$$

$$Z_s = \frac{213.61}{0.75} = 284.8 \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

$$X_s = \sqrt{(284.8)^2 - (47.3)^2} = 1952.49 \Omega$$

X_s



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสที่ได้จากการทดสอบ

4.2 ค่าปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล

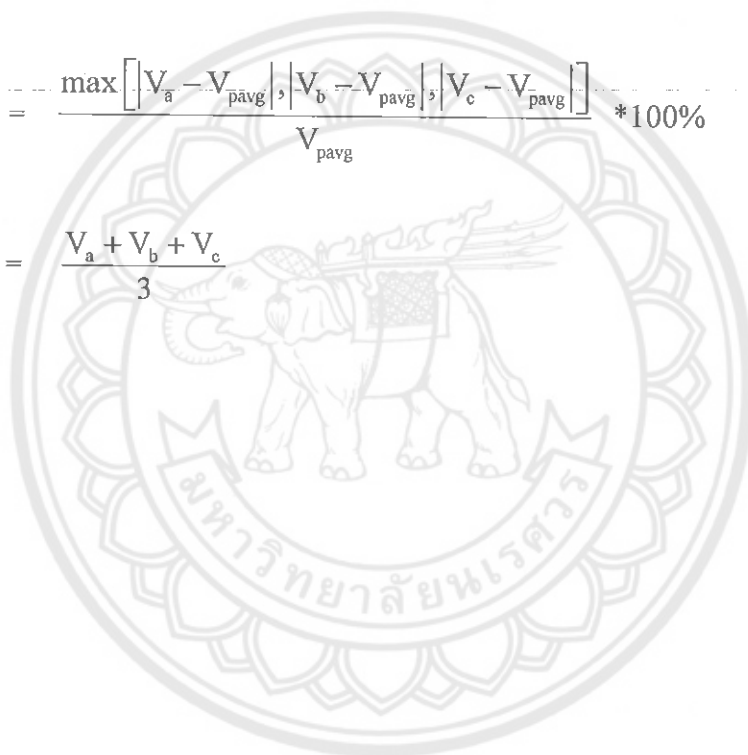
การทดสอบมอเตอร์เชิงโรตัส 3 เฟสในสถานะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าได้จากนิยามที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ตามมาตรฐานของ IEEE Std 141 ได้ให้นิยามของเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage Unbalance in Percent) หรือ PVUR (%) ไว้ดังนี้ และแสดงดังตารางที่ 4.2

$$\text{PVUR (\%)} = \frac{\text{maximum voltage deviation from average phase voltage magnitude}}{\text{average phase voltage magnitude}} * 100$$

$$= \frac{\max \left[\left| V_a - V_{\text{pavg}} \right|, \left| V_b - V_{\text{pavg}} \right|, \left| V_c - V_{\text{pavg}} \right| \right]}{V_{\text{pavg}}} * 100\%$$

$$\text{เมื่อ } V_{\text{pavg}} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$



ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุลจากนิยามของ PVUR (%)

| สถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า | แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟส (V) | | |
|---|-------------------------|-------|-----|
| | Va | Vb | Vc |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 1% | 216.7 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 2% | 213.4 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 3% | 210.2 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 4% | 207 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% | 203.9 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 1% | 216.7 | 216.7 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 2% | 213.5 | 213.5 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 3% | 210.4 | 210.4 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 4% | 207.3 | 207.3 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% | 204.3 | 204.3 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 1% | 223.3 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 2% | 226.7 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 3% | 230.1 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 4% | 233.5 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% | 236.9 | 220 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 1% | 223.3 | 223.3 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 2% | 226.7 | 226.7 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 3% | 230.2 | 230.2 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 4% | 233.8 | 233.8 | 220 |
| แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% | 237.4 | 237.4 | 220 |

4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไร้ภาระทางกล

4.3.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์ซิงโครนัส

ตารางที่ 4.3.1 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัส ขณะไร้ภาระทางกล

| กรณี | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|----------------|
| | Ia | Ib | Ic | Pa+ Pb+ Pc | |
| Balance Voltage | 0.051 | 0.059 | 0.059 | 1 | 1503 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 0.040 | 0.059 | 0.067 | 1 | 1499 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 0.038 | 0.072 | 0.086 | 2 | 1496 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 0.030 | 0.075 | 0.090 | 2 | 1496 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 0.025 | 0.081 | 0.095 | 2 | 1494 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 0.029 | 0.088 | 0.101 | 2 | 1493 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 0.055 | 0.057 | 0.079 | 2 | 1496 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 0.049 | 0.046 | 0.080 | 2 | 1496 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 0.046 | 0.044 | 0.081 | 2 | 1495 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 0.047 | 0.049 | 0.084 | 2 | 1496 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 0.049 | 0.056 | 0.086 | 2 | 1499 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 0.079 | 0.076 | 0.073 | 1 | 1500 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 0.095 | 0.083 | 0.068 | 1 | 1499 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 0.109 | 0.090 | 0.065 | 2 | 1501 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 0.123 | 0.097 | 0.061 | 1 | 1497 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 0.137 | 0.106 | 0.059 | 2 | 1497 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 0.077 | 0.090 | 0.079 | 1 | 1499 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 0.087 | 0.107 | 0.080 | 2 | 1499 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 0.100 | 0.128 | 0.081 | 2 | 1496 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 0.113 | 0.148 | 0.083 | 3 | 1497 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 0.127 | 0.173 | 0.088 | 4 | 1499 |

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะไร้ภาระทางกล พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตามสถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ส่วนกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะขับภาระทางกล

4.4.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์ซิงโครนัส

ตารางที่ 4.4.1 สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (1 ϕ - Under Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| | | Ia | Ib | Ic | Pa+Pb+Pc | |
| 1% | 20% | 0.061 | 0.093 | 0.089 | 3 | 1500 |
| | 60% | 0.134 | 0.165 | 0.146 | 23 | 1500 |
| | 100% | 0.357 | 0.383 | 0.366 | 80 | 1500 |
| 2% | 20% | 0.053 | 0.101 | 0.096 | 5 | 1498 |
| | 60% | 0.128 | 0.175 | 0.150 | 25 | 1497 |
| | 100% | 0.349 | 0.394 | 0.370 | 82 | 1494 |
| 3% | 20% | 0.040 | 0.107 | 0.102 | 2 | 1501 |
| | 60% | 0.119 | 0.185 | 0.153 | 22 | 1508 |
| | 100% | 0.341 | 0.405 | 0.374 | 79 | 1505 |
| 4% | 20% | 0.032 | 0.112 | 0.107 | 3 | 1499 |
| | 60% | 0.112 | 0.192 | 0.153 | 24 | 1501 |
| | 100% | 0.332 | 0.414 | 0.375 | 79 | 1510 |
| 5% | 20% | 0.024 | 0.119 | 0.109 | 3 | 1503 |
| | 60% | 0.106 | 0.193 | 0.154 | 25 | 1498 |
| | 100% | 0.327 | 0.419 | 0.373 | 80 | 1507 |

ตารางที่ 4.4.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (2Ø - Under Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| | | Ia | Ib | Ic | Pa+Pb+Pc | |
| 1% | 20% | 0.057 | 0.079 | 0.086 | 2 | 1500 |
| | 60% | 0.135 | 0.161 | 0.157 | 10 | 1501 |
| | 100% | 0.375 | 0.395 | 0.394 | 70 | 1501 |
| 2% | 20% | 0.051 | 0.079 | 0.094 | 3 | 1500 |
| | 60% | 0.127 | 0.164 | 0.165 | 10 | 1500 |
| | 100% | 0.370 | 0.398 | 0.404 | 67 | 1500 |
| 3% | 20% | 0.041 | 0.080 | 0.100 | 3 | 1500 |
| | 60% | 0.120 | 0.170 | 0.173 | 10 | 1500 |
| | 100% | 0.362 | 0.401 | 0.414 | 63 | 1501 |
| 4% | 20% | 0.032 | 0.085 | 0.105 | 4 | 1501 |
| | 60% | 0.107 | 0.173 | 0.179 | 13 | 1500 |
| | 100% | 0.356 | 0.403 | 0.426 | 54 | 1500 |
| 5% | 20% | 0.027 | 0.091 | 0.111 | 3 | 1500 |
| | 60% | 0.104 | 0.184 | 0.189 | 9 | 1500 |
| | 100% | 0.350 | 0.417 | 0.436 | 52 | 1500 |

ตารางที่ 4.4.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1 ϕ - Over Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| | | Ia | Ib | Ic | Pa+Pb+Pc | |
| 1% | 20% | 0.078 | 0.075 | 0.074 | 2 | 1497 |
| | 60% | 0.155 | 0.149 | 0.147 | 12 | 1500 |
| | 100% | 0.399 | 0.386 | 0.387 | 72 | 1505 |
| 2% | 20% | 0.100 | 0.083 | 0.081 | 2 | 1501 |
| | 60% | 0.173 | 0.149 | 0.154 | 12 | 1501 |
| | 100% | 0.406 | 0.375 | 0.385 | 71 | 1500 |
| 3% | 20% | 0.118 | 0.085 | 0.082 | 2 | 1500 |
| | 60% | 0.182 | 0.138 | 0.154 | 11 | 1500 |
| | 100% | 0.416 | 0.365 | 0.385 | 68 | 1500 |
| 4% | 20% | 0.132 | 0.088 | 0.081 | 2 | 1500 |
| | 60% | 0.194 | 0.133 | 0.157 | 15 | 1500 |
| | 100% | 0.423 | 0.353 | 0.384 | 68 | 1500 |
| 5% | 20% | 0.146 | 0.052 | 0.081 | 2 | 1501 |
| | 60% | 0.205 | 0.129 | 0.158 | 12 | 1500 |
| | 100% | 0.431 | 0.345 | 0.384 | 70 | 1500 |

ตารางที่ 4.4.4 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส (2Ø - Over Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| | | Ia | Ib | Ic | Pa+Pb+Pc | |
| 1% | 20% | 0.086 | 0.096 | 0.081 | 3 | 1500 |
| | 60% | 0.156 | 0.161 | 0.143 | 14 | 1500 |
| | 100% | 0.383 | 0.380 | 0.363 | 75 | 1500 |
| 2% | 20% | 0.100 | 0.116 | 0.082 | 5 | 1500 |
| | 60% | 0.171 | 0.167 | 0.137 | 12 | 1499 |
| | 100% | 0.390 | 0.378 | 0.351 | 79 | 1499 |
| 3% | 20% | 0.115 | 0.131 | 0.078 | 4 | 1499 |
| | 60% | 0.184 | 0.176 | 0.127 | 19 | 1500 |
| | 100% | 0.396 | 0.375 | 0.334 | 84 | 1500 |
| 4% | 20% | 0.127 | 0.148 | 0.078 | 5 | 1500 |
| | 60% | 0.193 | 0.185 | 0.119 | 24 | 1500 |
| | 100% | 0.401 | 0.374 | 0.319 | 90 | 1500 |
| 5% | 20% | 0.141 | 0.167 | 0.078 | 11 | 1500 |
| | 60% | 0.203 | 0.195 | 0.112 | 48 | 1500 |
| | 100% | 0.407 | 0.374 | 0.306 | 94 | 1500 |

ตารางที่ 4.4.5 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล

| Load (%) | I (A) | | | P (W) | Speed (rpm) |
|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| | Ia | Ib | Ic | Pa+Pb+Pc | |
| 20% | 0.078 | 0.085 | 0.085 | 3 | 1501 |
| 60% | 0.143 | 0.156 | 0.149 | 12 | 1499 |
| 100% | 0.360 | 0.370 | 0.360 | 75 | 1499 |

จากผลการทดลองค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัส ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะับภาระทางกลที่สถานะโหลดต่างกัน พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในแต่เฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตามสถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระทางกลที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตามสถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระทางกลที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่ากระแส

4.5 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะับภาระทางกล

4.5.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์ซิงโครนัส

ตารางที่ 4.5.1 สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (1 ϕ - Under Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | Cos θ | | |
|----------|----------|--------------|---------|---------|
| | | Phase A | Phase B | Phase C |
| 1% | 20% | 0.08 | 0.20 | 0.14 |
| | 60% | 0.64 | 0.88 | 0.67 |
| | 100% | 0.93 | 0.92 | 0.93 |
| 2% | 20% | 0.11 | 0.56 | 0.48 |
| | 60% | 0.27 | 0.90 | 0.64 |
| | 100% | 0.94 | 0.94 | 0.92 |
| 3% | 20% | 0.18 | 0.47 | 0.35 |
| | 60% | 0.47 | 0.93 | 0.71 |
| | 100% | 0.93 | 0.94 | 0.89 |
| 4% | 20% | 0.05 | 0.50 | 0.11 |
| | 60% | 0.30 | 0.91 | 0.70 |
| | 100% | 0.94 | 0.95 | 0.91 |
| 5% | 20% | 0.09 | 0.78 | 0.20 |
| | 60% | 0.38 | 0.93 | 0.50 |
| | 100% | 0.95 | 0.95 | 0.89 |

ตารางที่ 4.5.2 สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (2 ϕ - Under Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | Cos θ | | |
|-------------|-------------|--------------|---------|---------|
| | | Phase A | Phase B | Phase C |
| 1% | 20% | 0.06 | 20 | 0.1 |
| | 60% | 0.65 | 0.77 | 0.65 |
| | 100% | 0.90 | 0.92 | 0.94 |
| 2% | 20% | 0.08 | 0.11 | 0.05 |
| | 60% | 0.61 | 0.81 | 0.59 |
| | 100% | 0.91 | 0.92 | 0.95 |
| 3% | 20% | 0.18 | 0.12 | 0.20 |
| | 60% | 0.70 | 0.72 | 0.65 |
| | 100% | 0.90 | 0.92 | 0.95 |
| 4% | 20% | 0.29 | 0.11 | 0.05 |
| | 60% | 0.81 | 0.64 | 0.47 |
| | 100% | 0.89 | 0.90 | 0.95 |
| 5% | 20% | 0.33 | 0.10 | 0.45 |
| | 60% | 0.76 | 0.63 | 0.84 |
| | 100% | 0.88 | 0.87 | 0.97 |

ตารางที่ 4.5.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1 ϕ - Over Voltage)

| PVUR (%) | Load (%) | Cos θ | | |
|-------------|-------------|--------------|---------|---------|
| | | Phase A | Phase B | Phase C |
| 1% | 20% | 0.17 | 0.41 | 0.38 |
| | 60% | 0.37 | 0.90 | 0.78 |
| | 100% | 0.92 | 0.96 | 0.94 |
| 2% | 20% | 0.08 | 0.25 | 0.16 |
| | 60% | 0.47 | 0.90 | 0.85 |
| | 100% | 0.92 | 0.96 | 0.94 |
| 3% | 20% | 0.19 | 0.46 | 0.30 |
| | 60% | 0.25 | 0.92 | 0.70 |
| | 100% | 0.92 | 0.96 | 0.93 |
| 4% | 20% | 0.11 | 0.50 | 0.28 |
| | 60% | 0.24 | 0.93 | 0.72 |
| | 100% | 0.91 | 0.97 | 0.94 |
| 5% | 20% | 0.12 | 0.33 | 0.27 |
| | 60% | 0.42 | 0.92 | 0.73 |
| | 100% | 0.91 | 0.97 | 0.94 |

ตารางที่ 4.5.4 สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส (2 ϕ - Over Voltage)

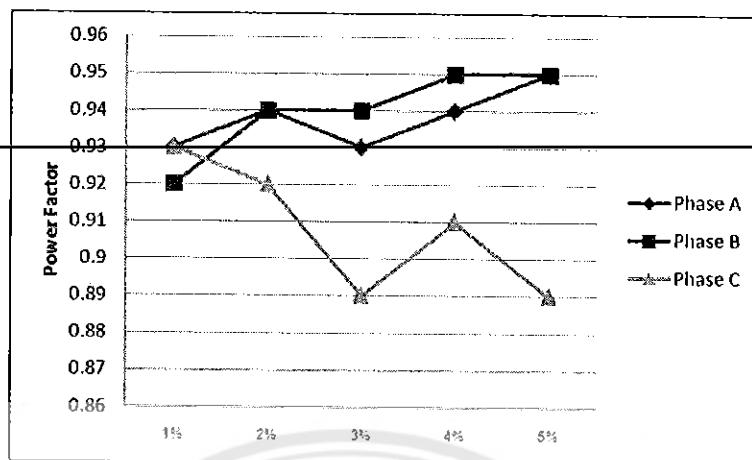
| PVUR (%) | Load (%) | Cos θ | | |
|-------------|-------------|--------------|---------|---------|
| | | Phase A | Phase B | Phase C |
| 1% | 20% | 0.16 | 0.23 | 0.16 |
| | 60% | 0.58 | 0.78 | 0.59 |
| | 100% | 0.93 | 0.92 | 0.95 |
| 2% | 20% | 0.20 | 0.34 | 0.15 |
| | 60% | 0.73 | 0.78 | 0.56 |
| | 100% | 0.93 | 0.90 | 0.93 |
| 3% | 20% | 0.18 | 0.32 | 0.19 |
| | 60% | 0.74 | 0.75 | 0.78 |
| | 100% | 0.93 | 0.88 | 0.94 |
| 4% | 20% | 0.10 | 0.29 | 0.05 |
| | 60% | 0.75 | 0.72 | 0.30 |
| | 100% | 0.94 | 0.86 | 0.93 |
| 5% | 20% | 0.46 | 0.30 | 0.35 |
| | 60% | 0.84 | 0.60 | 0.76 |
| | 100% | 0.94 | 0.85 | 0.93 |

ตารางที่ 4.5.5 สถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุล

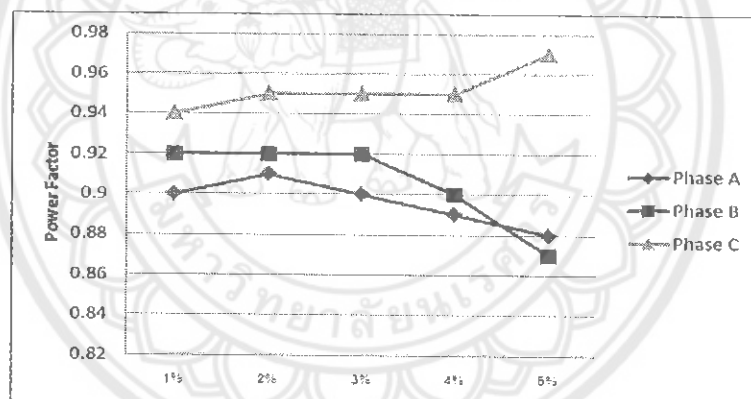
| Load (%) | Cos θ | | |
|-------------|--------------|---------|---------|
| | Phase A | Phase B | Phase C |
| 20% | 0.35 | 0.38 | 0.38 |
| 60% | 0.77 | 0.79 | 0.78 |
| 100% | 0.94 | 0.96 | 0.94 |

จากตารางตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในขณะที่ขั้วภาระทางกล พบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้หนึ่งตามภาระทางกลที่เพิ่มขึ้นในทุกๆระดับสถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

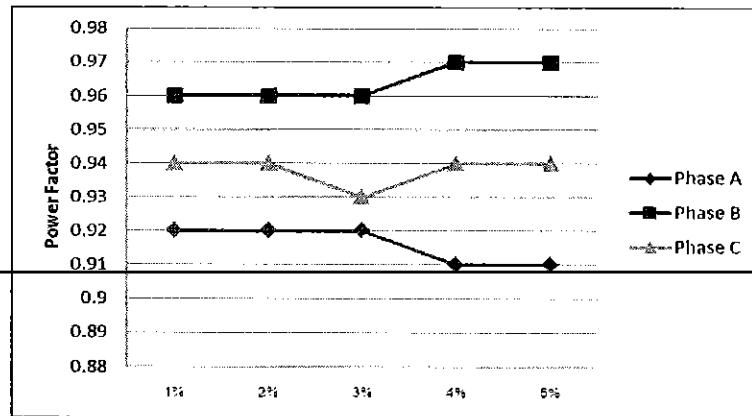
4.6 กราฟตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในสถานะโหลดพิกัด



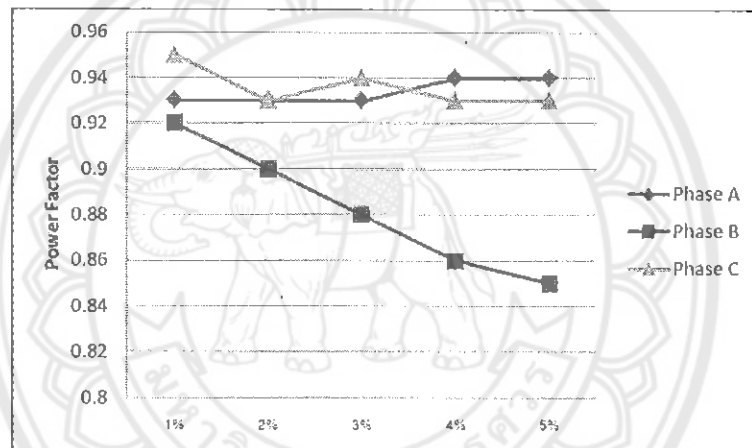
รูปที่ 4.4 Under Voltage 1 Phase



รูปที่ 4.5 Over Voltage 1 Phase



รูปที่ 4.6 Over Voltage 2 Phase



รูปที่ 4.7 Under Voltage 2 Phase

จากกราฟตัวประกอบกำลังไฟฟ้าขณะขั้วภาระทางกลที่พิกัด (โหลด 100%) พบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามักใกล้เคียงกัน โดยจะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.7 กำลังสูญเสียในขดลวด

4.7.1 สภาวะไร้ภาระทางกล

ตารางที่ 4.7.1 กำลังสูญเสียในขดลวดสภาวะไร้ภาระทางกล

| กรณี | Copper Loss (W) |
|-----------------------------------|--------------------|
| Balance Voltage | 0.417903 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 0.418209 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 0.612849 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 0.639113 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 0.708421 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 0.820948 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 0.546906 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 0.477073 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 0.463788 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 0.509804 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 0.565172 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 0.75802 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 0.897511 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 1.057802 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 1.234918 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 1.463338 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 0.885799 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 1.110767 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 1.439697 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 1.816259 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 2.351147 |

จากตารางค่ากำลังสูญเสียในขดลวดสภาวะไร้ภาระทางกล พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาวะแรงไฟฟ้าไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น

4.7.2 สภาวะโหลดพิกัด

ตารางที่ 4.7.2 กำลังสูญเสียในขดลวดสภาวะโหลดพิกัด

| กรณี | Copper Loss (W) |
|----------------------------------|--------------------|
| Balance Voltage | 17.30957 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 17.83371 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 18.08905 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 18.36195 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 18.45211 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 18.42475 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 19.74742 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 20.03732 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 20.24363 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 20.56614 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 21.25939 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 20.01311 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 19.82608 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 19.86191 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 19.70844 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 19.76298 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 18.47889 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 18.27468 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 17.87317 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 17.58654 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 17.44334 |

จากตารางค่ากำลังสูญเสียในขดลวดสภาวะขั้วภาระทางกล พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาวะแรงไฟฟ้าไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากกว่าในสภาวะไร้อภาระทางกล

4.8 ประสิทธิภาพของมอเตอร์

กำหนดให้กำลังสูญเสียอื่นๆ นอกจากกำลังสูญเสียในขดลวดมีค่าคงที่

4.8.1 สถานะไร้ภาระทางกล

ตารางที่ 4.8.1 ประสิทธิภาพสถานะไร้ภาระทางกล

| กรณี | Efficiency (%) |
|-----------------------------------|----------------|
| Balance Voltage | 79.10485 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 79.08955 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 69.35755 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 68.04435 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 64.57895 |
| 1 Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 58.9526 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 72.6547 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 76.14635 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 76.8106 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 74.5098 |
| 2 Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 71.7414 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 74.73267 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 70.08297 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 64.73993 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 58.83607 |
| 1 Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 51.22207 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 77.85503 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 72.23083 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 64.00758 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 54.59353 |
| 2 Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 41.22133 |

จากตารางค่าประสิทธิภาพสถานะไร้ภาระทางกล พบว่ามีค่าลดลงตามสถานะแรงไฟฟ้าไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น

4.8.2 สภาวะโหลดพิกัด

ตารางที่ 4.8.2 ประสิทธิภาพสภาวะโหลดพิกัด

| กรณี | Efficiency |
|----------------------------------|------------|
| | (%) |
| Balance Voltage | 76.92057 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 77.70786 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 77.94018 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 76.75703 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 76.6429 |
| 1Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 76.96906 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 1 % | 71.7894 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 2 % | 70.09355 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 3 % | 67.86725 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 4 % | 61.91456 |
| 2Ø - Under Voltage Unbalance 5 % | 59.11656 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 72.20401 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 72.07594 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 70.79131 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 71.017 |
| 1Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 71.76717 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 1 % | 75.36148 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 2 % | 76.86749 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 3 % | 78.72242 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 4 % | 80.4594 |
| 2Ø - Over Voltage Unbalance 5 % | 81.44326 |

จากตารางค่าประสิทธิภาพในสภาวะจักระทางกลที่โหลดพิกัด(โหลด 100%) พบว่ามีค่าลดลงตามสภาวะแรงไฟฟ้าไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น โดยมีบางค่ามีแนวโน้มที่ผิ่กเพิ่มไป ทั้งนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องวัด หรือผู้วัดเอง

บทที่ 5

บทสรุปและวิจารณ์โครงการ

5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

5.1.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระทางกล

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสถานะต่าง ๆ ให้มอเตอร์ตัวเดียว สังเกตแนวโน้มค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้นได้ดังนี้

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส กระแสในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ (เฟส A) มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าในเฟสอื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับกำลังไฟฟ้ารวม มีแนวโน้มลดลง ตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส กระแสในเฟส A และ B มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่กระแสในเฟส C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังไฟฟ้ารวม มีแนวโน้มลดลง ตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส กระแสในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ (เฟส A) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสในเฟส B มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสในเฟส C มีแนวโน้มลดลง สำหรับกำลังไฟฟ้ารวม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส กระแสเข้ามอเตอร์ในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ (เฟส A และ B) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่กำลังไฟฟ้ารวม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล

5.1.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะขับภาระทางกล

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสถานะต่างๆ ให้กับมอเตอร์ พบว่าค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โหลดคล้ายกับขณะไร้ภาระทางกล

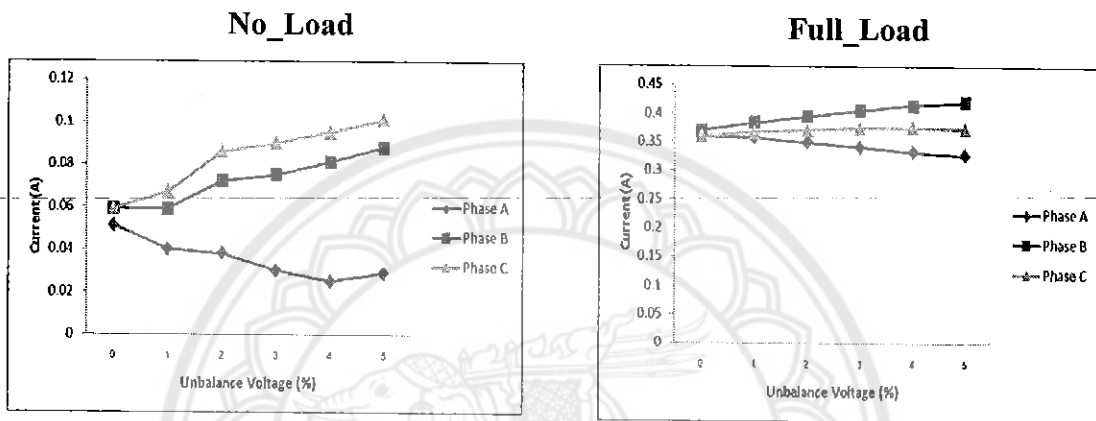
5.1.3 อภิปรายผลการวิจัย

เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติจะเกิดสภาวะ Under Excite เนื่องจากได้รับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าที่ถูกออกแบบไว้ จะทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงเมื่อจ่ายภาระทางกล และจะใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อมาสร้างแรงบิดต้านกับภาระทางกล ทำให้กำลังสูญเสียที่ขดลวดสูงขึ้น และในอีกกรณีมอเตอร์อยู่ในสภาวะ Over Excite จะทำให้กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กสูงกว่าปกติ ซึ่งไม่ว่ามอเตอร์จะรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแบบใดก็ตาม จะทำให้กำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์สูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสมดุล

จากผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัสในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานโดยไม่มีภาระทางกลต่ออยู่(NO_Load) และในสภาวะที่มีภาระทางกลต่ออยู่ในระดับที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด(Full_Load) ต่อไปนี้

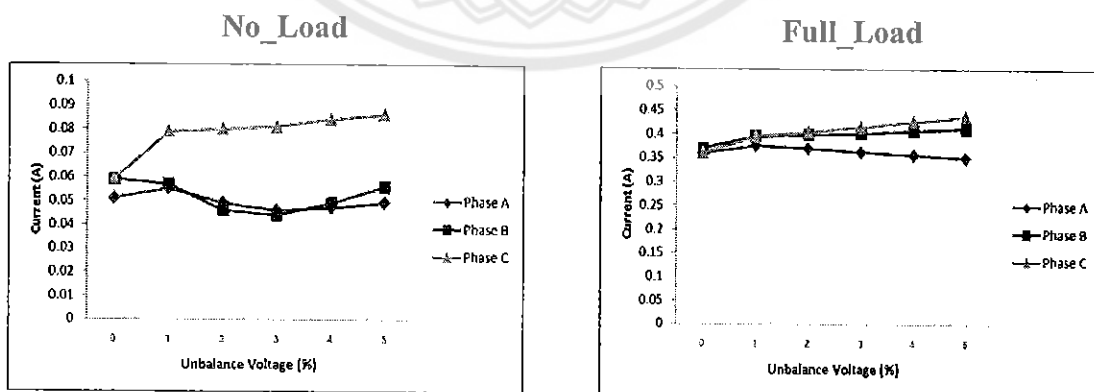
5.2 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่าง No_Load กับ Full_Load

Under Voltage 1 Phase



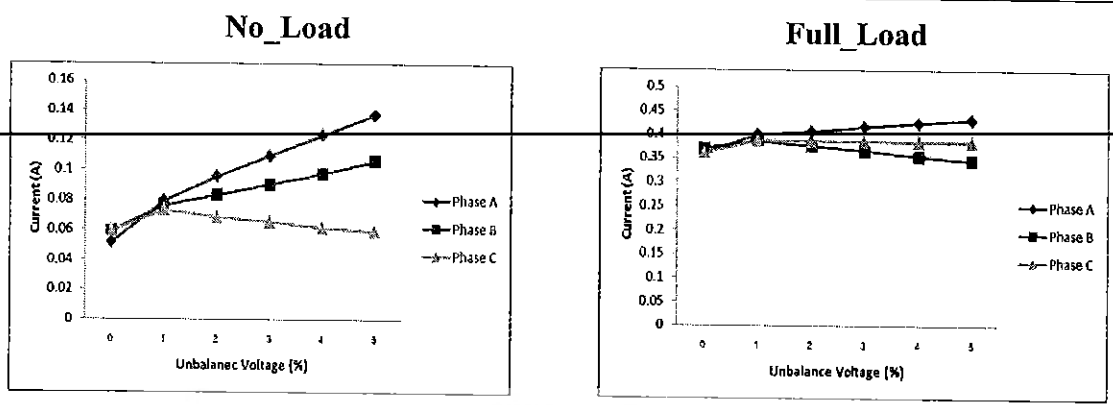
รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Under Voltage 1 Phase

Under Voltage 2 Phase



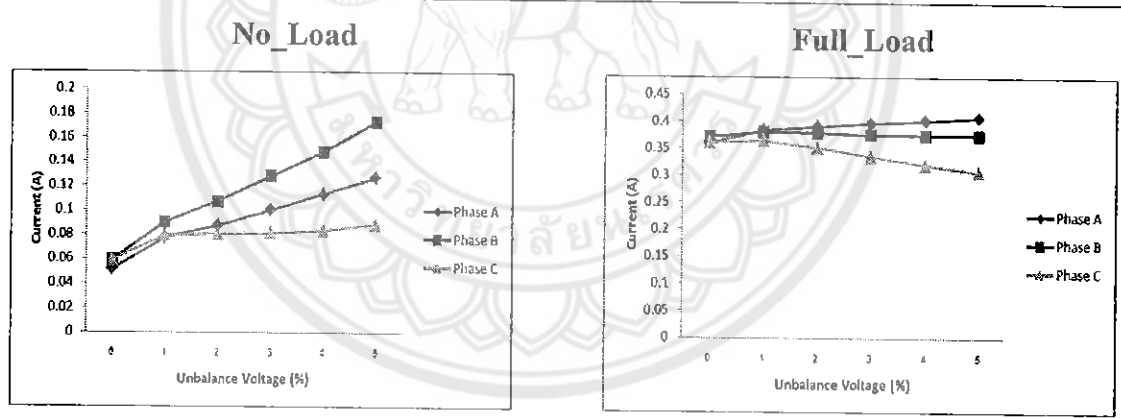
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Under Voltage 2 Phase

Over Voltage 1 Phase



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Over Voltage 1 Phase

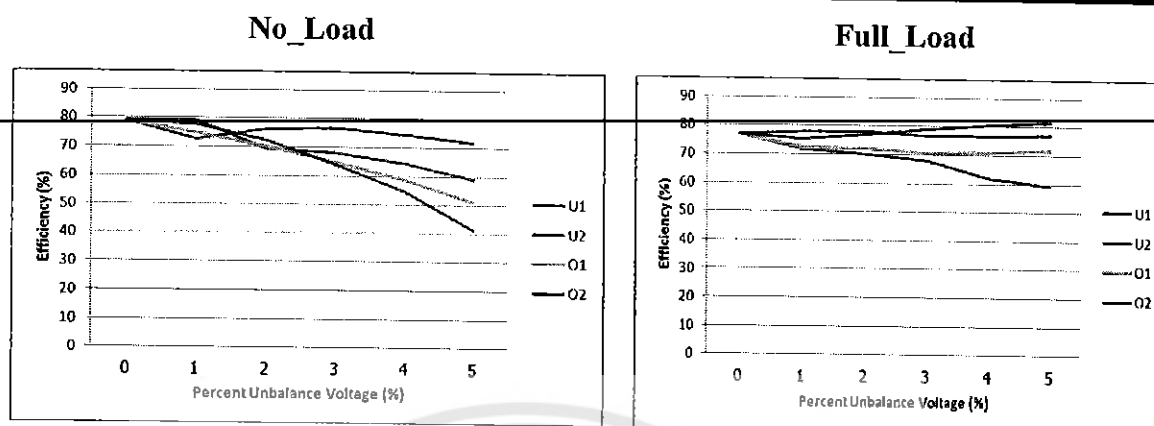
Over Voltage 2 Phase



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า Over Voltage 2 Phase

จากกราฟเปรียบเทียบกระแสในสภาวะไร้ภาระทางกลและับภาระทางกลที่โหลดพิกัด (โหลด 100%) แสดงให้เห็นว่าทิศทางการเพิ่มขึ้นของกระแสมีทิศทางเพิ่มขึ้นตามสภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเดียวกัน แต่ค่ากระแสับภาระทางกลที่โหลดพิกัดจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสในสภาวะไร้ภาระทางกล

5.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ No_Load กับ Full_Load



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

จากกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในสถานะไร้ภาระทางกลและขับภาระทางกลที่โหลดพิกัด(โหลด 100%) แสดงให้เห็นว่ามีทิศทางลดลงตามสถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

ผลจากการศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่อมอเตอร์ซิงโครนัสสามารถนำผลไปประยุกต์ปรับใช้กับรีเลย์ที่ใช้ป้องกันการเสียหายที่จะเกิดในมอเตอร์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ โดยเลือกตั้งค่าให้เหมาะสมตามความต้องการ เช่นการยอมรับให้มอเตอร์ทำงานที่โหลดพิกัด(โหลด100%)ได้โดยประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 71% ถ้าต่ำกว่า71% ให้รีเลย์ตัดการทำงานของมอเตอร์ เป็นต้น

หมายเหตุ : รีเลย์คือเครื่องเปรียบเทียบแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์ คือถ้าแรงดันไม่ตกหรือไม่เกินตามที่ตั้งไว้ก็จะทำงานปกติ แต่ถ้าตกหรือเกินก็จะตัดการทำงานของมอเตอร์

5.5 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงการ

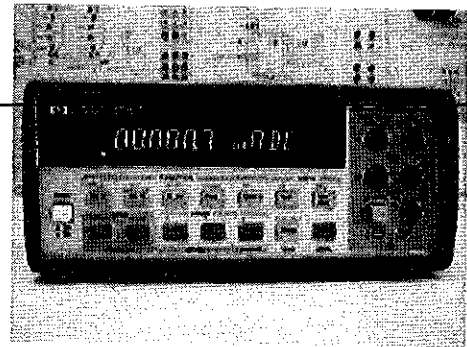
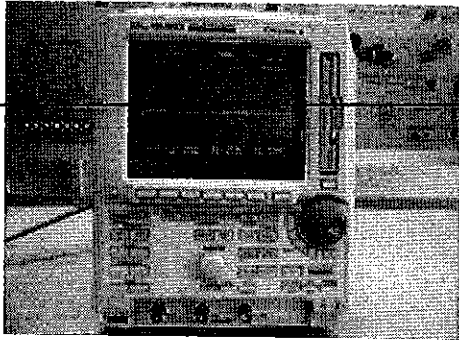
- 1) ปัญหาจากอุปกรณ์ในการทดสอบ ได้แก่ อุปกรณ์ในการทดสอบและเครื่องมือวัดที่ชำรุดส่งผลให้ผลการทดสอบผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนได้
- 2) ปัญหาแรงดันในแต่ละเฟสที่ป้อนเข้าเครื่อง Variac ไม่คงที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stephen J. Chapman. **Electric Machines Fundamentals**, 4th Ed., Singapore : McGraw-Hill, 2005.
-
- [2] Eastern Asia University. “**ELECTRO MECHANICAL ENERGY CONVERSION II.**”
[Online]: เข้าถึงจาก/: <http://course.eau.ac.th>. พ.ศ. 2551
- [3] G. PRECISION ENGINEERING LTD.,PART. “**มอเตอร์ไฟฟ้า (INDUCTION MOTOR).**”
[Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.gprecision.net/induction-motor.html>. พ.ศ. 2551
- [4] Machine design. “**No-power-no-problem.**”
[Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.machinedesign.com/article/no-power-no-problem-0518>.
พ.ศ. 2551
- [5] Dictionary. “**Motor era.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.motorera.com/dictionary/st.htm>
พ.ศ. 2550
- [6] Jag-lovers. “**Induction Motor.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.jag-lovers.org/xj-s/book/83F...ump.html>.พ.ศ. 2551
- [7] Global spec. “**Generator.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.globalspec.com/reference/597...nerators> .พ.ศ. 2551
- [8] Global spec. “**Motor.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.globalspec.com/reference/953...f-Motors>.พ.ศ. 2551
- [9] tpub. “**Unbalance Voltage**” [Online]: เข้าถึงจาก/:http://www.tpub.com/content/doe/h1011v4...4_32.htm.พ.ศ. 2551
- [10] Engineer.spu.ac.th. “**Content.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.engineer.spu.ac.th/ee/content/0/1204.php>. พ.ศ. 2550

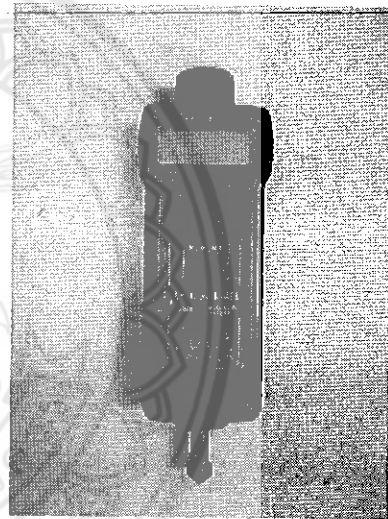
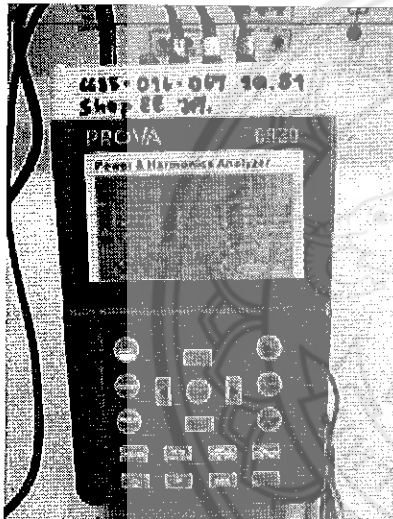


อุปกรณ์การทดลอง



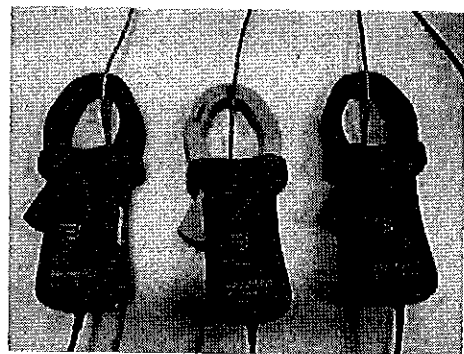
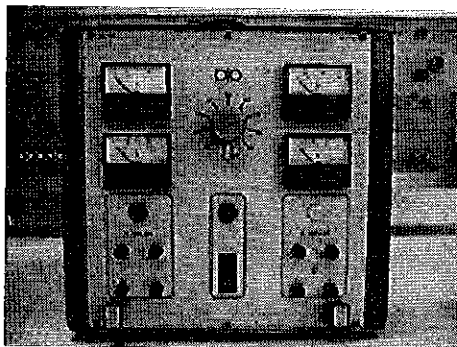
ออสซิลโลสโคป

Multimeter



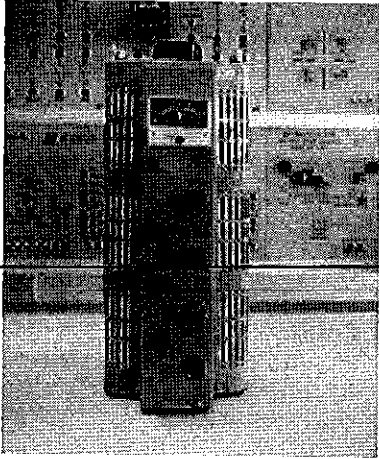
เครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer

ทาโคมิเตอร์



Power Supply

แอมป์วัดกระแส



Variac



ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายคฑาวุธ ก้ามา
 ภูมิลำเนา 148 ม.1 ต.วัดป่า อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ 67110
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนหล่มสักวิทยาคม
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 6
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : unplug2321@hotmail.com



ชื่อ นายพัชรพล ตาลตา
 ภูมิลำเนา 155 ม.2 ต.ปัว อ.ปัว จ.น่าน 55120
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนปัว
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : popdreamteam@hotmail.com