

การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะ  
ที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ANALYSIS UNBALANCED VOLTAGE OPERATIONS OF A INDUCTION  
MOTOR 3 PHASE

นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ รหัส 48362063  
นายเสรี จำลองเพลง รหัส 48364593

15078660 e.2  
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่รับ...../...../.....  
เลขทะเบียน..... 5200024  
เลขเรียกหนังสือ..... ๗๕  
มหาวิทยาลัยนเรศวร กวส.๓๐  
๒๕๕๗

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2551



## ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ผู้ดำเนินโครงการ นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์ รหัส 48362063  
นายเสรี จำลองเพลง รหัส 48364593

อาจารย์ที่ปรึกษา คร.สมพร เรื่องสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะกรรมการสอบ โครงการวิศวกรรม

ประธานกรรมการ

(ดร. สมพร เรื่องสินชัยวานิช)

กรรมการ

(อาจารย์สรายุทธ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

กรรมการ

(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

หัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์	รหัส	48362063
	นายเสรี ช่างทองเพ็ญ	รหัส	48364593
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร เรืองสินธุ์วานิช		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

### บทคัดย่อ

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นประจำ โดยมีสาเหตุหลายประการ ขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากระบบ มอเตอร์จะมีพารามิเตอร์ในการทำงานแตกต่างออกไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์น้อยลง และอาจจะทำให้ความเสียหายกับมอเตอร์ได้ เมื่อเทียบกับการทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุล โครงการนี้เป็นการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โดยทดสอบมอเตอร์และกลุ่มของมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเงื่อนไขแตกต่างกันแล้ว บันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นนำวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตรมาวิเคราะห์สถานะการทำงานและหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่มีต่อมอเตอร์และกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

<b>Project Title</b>	Analysis Unbalanced Voltage Operations of a Induction Motor 3 Phase		
<b>Name</b>	Kreangsuk	Kraikitrat	ID. 48362063
	Seree	Chamlongpheng	ID. 48364593
<b>Project Advisor</b>	Somporn	Ruangsinchaiwanich, Ph.D	
<b>Major</b>	Electrical Engineering.		
<b>Department</b>	Electrical and Computer Engineering.		
<b>Academic Year</b>	2008		

---

.....

### ABSTRACT

The unbalanced voltage conditions in a distribution system can regularly occur due to various causes. When an induction 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 induction motor in several conditions. For example, different unbalanced voltage conditions and records the values of parameters. The equivalent circuits of three-phase induction motor and symmetrical components are used to analyse the unbalanced operating conditions of the motors.

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

การที่ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงการเรื่อง การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่ ตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 ส่งผลให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้และประสบการณ์ต่าง ๆ ที่มีค่ามากมาย สำหรับโครงการชิ้นนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความร่วมมือและสนับสนุนหลายฝ่ายดังนี้

1. คร.สมพร เรืองสินชัยวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
2. นายกฤษดา สมจิตชอบ ครูช่าง
3. นายณัฐภัทร มัทย์พงษ์दार ครูช่าง
4. นายমনทนต์ ฟ้ากอม ครูช่าง

และบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวสกลทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำรายงานฉบับนี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล เป็นที่ปรึกษาในการทำโครงการนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำโครงการ

ผู้จัดทำรายงาน

นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์  
นายเสรี จำลองเพลง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
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
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ภายในโครงการ</b>	
2.1 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	3
2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.1.2 ความเร็วซิงโครนัส ความเร็วโรเตอร์และสลลิป.....	5
2.1.3 การส่งผ่านกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	6
2.1.4 เส้นความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิด.....	7
2.1.5 ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก.....	8
2.2 ทฤษฎีของระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	9
2.2.1 ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุล.....	9
2.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสของประเทศไทย.....	11
2.2.3 การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Star Isolated Neutral.....	12
2.3 ทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตร.....	13
2.3.1 การสังเคราะห์เฟสเซอร์ไม่สมมาตรจากองค์ประกอบสมมาตร.....	14

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมมาตร.....	15
2.3.3 กำลังไฟฟ้าในรูปขององค์ประกอบสมมาตร.....	18
2.4 การวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของ มอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีองค์ประกอบสมมาตร.....	19
2.5 การกำหนดปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล.....	23
<b>บทที่ 3 การทดสอบและวิธีการทดสอบ</b>	
3.1 การทดสอบทางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.1.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์.....	27
3.1.2 การทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการยึด โรเตอร์อยู่กับที่.....	29
3.1.3 การทดสอบหาค่าสลิป.....	30
3.2 การทดสอบในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะไร้ภาระทางกลและขณะขับภาระ ทางกล.....	30
3.2.1 การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	31
3.2.2 การทดสอบกับกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	32
3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
<b>บทที่ 4 ผลที่ได้จากการทำการทดลอง</b>	
4.1-ผลการทดสอบทางจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	35
4.1.1 มอเตอร์ตัวที่ 1.....	35
4.1.2 มอเตอร์ตัวที่ 2.....	38
4.1.3 มอเตอร์ตัวที่ 3.....	41
4.2 ค่าปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล.....	44
4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไร้ภาระทางกล.....	45
4.3.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1.....	45
4.3.2 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 2.....	46

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน สถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไร้ภาระทางกล.....	47
4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะขับภาระทางกล.....	50
4.5.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1.....	50
<b>บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์โครงการ</b>	
5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ.....	55
5.1.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ ในสถานะไร้ภาระทางกล.....	55
5.1.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ ในสถานะขับภาระทางกล.....	59
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงการ.....	61
เอกสารอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ภาคผนวก ข.....	67
ประวัติผู้เขียนโครงการ.....	73



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสแตเตอร์.....	35
4.1.2 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสแตเตอร์.....	38
4.1.3 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสแตเตอร์.....	41
4.2 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุลจากนิยามของ PVUR (%).....	44
4.3.1 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1 ขณะไร้ภาระทางกล.....	45
4.3.2 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระทางกล.....	46
4.4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่ากระแสของกุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางกล.....	47
4.4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่ากำลังของกุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางกล.....	48
4.4.3 ตารางแสดงค่าความเร็วของกุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางกล.....	49
4.5.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (1 Ø - Under Voltage).....	50
4.5.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (2 Ø - Under Voltage).....	51
4.5.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1 Ø - Over Voltage).....	52
4.5.4 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส (2 Ø - Over Voltage).....	53
4.5.5 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล.....	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	3
2.2 สเตเตอร์.....	4
2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	4
2.4 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	6
2.5 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด.....	8
2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ สตาร์.....	10
2.7 ลำดับเฟสทั้ง 2 แบบของระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	11
2.8 การต่อขดลวดสเตเตอร์ค้ำนอกแบบ Star Isolated Neutral.....	12
2.9 เฟสเซอร์ขององค์ประกอบสมมาตร.....	14
2.10 วงจรสมมูลลำดับบวกและลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	20
2.11 ลำดับเฟส abc และกฎของโคไซน์.....	21
3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.2 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์.....	28
3.3 วงจรการทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการยึด โรเตอร์อยู่กับที่.....	29
3.4 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	31
3.5 วงจรการทดสอบกับกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	32
3.6 การทดสอบมอเตอร์.....	34
4.1.1.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 1.....	35
4.1.1.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะลัด โรเตอร์ตัวที่ 1.....	36
4.1.1.3 มอเตอร์ตัวที่ 1.....	36
4.1.1.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 1.....	37
4.1.2.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 2.....	38
4.1.2.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะลัด โรเตอร์ตัวที่ 2.....	39
4.1.2.3 มอเตอร์ตัวที่ 2.....	39
4.1.2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 2.....	40
4.1.3.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 3.....	41
4.1.3.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะลัด โรเตอร์ตัวที่ 3.....	42
4.1.3.3 มอเตอร์ตัวที่ 3.....	42

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1.3.4	วงจรมุมลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 3.....43
5.1	กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระ ทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส.....56
5.2	กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระ ทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส.....56
5.3	กราฟเปรียบเทียบความเร็วระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระ ทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส.....57
5.4	กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนาน กัน ขณะไร้ภาระทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส.....57
5.5	กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนาน กัน ขณะไร้ภาระทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส.....58
5.6	กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนาน กัน ขณะไร้ภาระทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส.....58
5.7	กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างการคำนวณกับค่าจากการทดลองของมอเตอร์.....60
5.8	กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างการคำนวณกับค่าจากการทดลองของมอเตอร์.....60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้กันอย่างแพร่หลาย มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยปกติจะมีช่วงอายุการใช้งานของมอเตอร์นั้นๆ อยู่ อายุการใช้งานอาจจะขึ้นอยู่กับวัสดุ หรือวิธีการผลิตและการใช้งาน แต่ก็จะมีสาเหตุที่ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสั้นลง อาทิ เช่น แรงดันไฟฟ้าตกและมอเตอร์ทำงานเกินพิกัดกำลัง เป็นต้น โครงการนี้จึงน่าจะช่วยบอกสาเหตุของความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำและสามารถเตือนว่ามอเตอร์กำลังจะมีปัญหา เพื่อจะได้ป้องกันหรือแก้ไขปัญหาได้ทันการ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทำงานภายใต้สภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำว่าแตกต่างกันหรือไม่
2. ตั้งเกตุว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
3. ศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบกันเพื่อหาข้อสรุปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. แบ่งสภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 สภาวะคือ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ (Over Voltage Unbalance) และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ (Under Voltage Unbalance)
3. กำหนดให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าระดับปกติมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ (Vac)
4. แบ่งกรณีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละสภาวะข้างต้นทั้ง 2 สภาวะออกเป็น 2 กรณีคือ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส และความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส

5. เลือกจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5 ระดับ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งในขณะที่ไร้ภาระทางกลและขณะขับภาระทางกล

6. ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเดียวกัน 2 ตัว เพื่อดูแนวทางการความถูกต้องของมูลสำหรับการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำโดยการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเดียวกัน 2 ตัวต่อขนานกัน

#### 1.4 แผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2551						ปี 2552	
	ก.ค.	ค.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. รวบรวมข้อมูล								
2. ศึกษาเรื่องของ แรงดันตกแรงดันเกิน								
3. ทดสอบมอเตอร์ในสภาวะที่แรงดันไม่สมดุล								
4. สรุปผลการทดลองและทำรูปเล่มรายงาน								

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้
2. สามารถนำความรู้ที่ได้มาหาวิธีป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเสียหายได้
3. สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่เพื่อให้เกิดประโยชน์

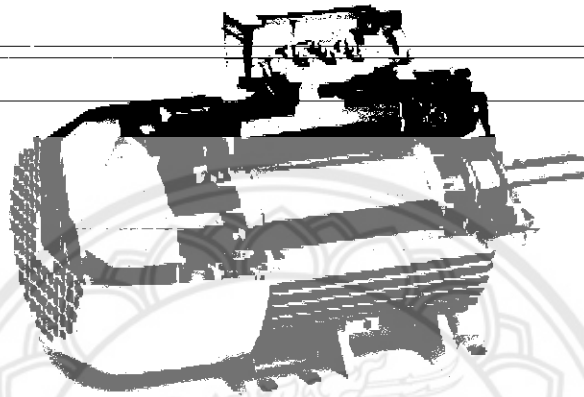
#### 1.6 งบประมาณ

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

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ภายในโรงงาน

### 2.1 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [7]

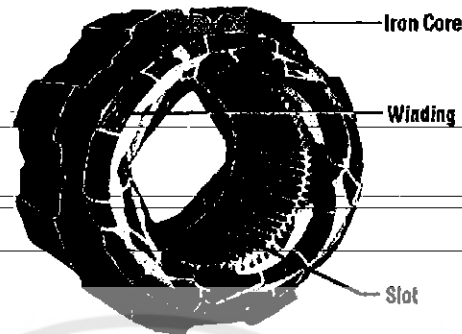
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor) นิยมใช้แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะว่าแข็งแรงทนทาน ราคาถูก ความเร็วค่อนข้างคงที่ สะดวกในการบำรุงรักษา เพราะโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ด้วยข้อดีเหล่านี้จึงนิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนทางกลมากกว่ามอเตอร์ซิงโครนัส อย่างไรก็ตามมีข้อเสียตรงที่ค่าตัวประกอบกำลังต่ำและต่ำหลัง โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมอเตอร์เป็นจำนวนมากจึงควรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเพื่อไม่ให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากเกินไป ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น

#### 2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีโครงสร้างเรียบง่ายโดยมีส่วนประกอบหลักคือ ส่วนอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ส่วนหมุนหรือโรเตอร์ และฝาปิดหัวท้ายมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ยึดเพลา ปกติแล้วระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จะถูกฉนวนด้วยช่องอากาศขนาดเล็กที่มีค่าระหว่าง 0.4 - 4 มิลลิเมตรขึ้นอยู่กับขนาดกำลังมอเตอร์ รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีดังนี้

## 1) สเตเตอร์

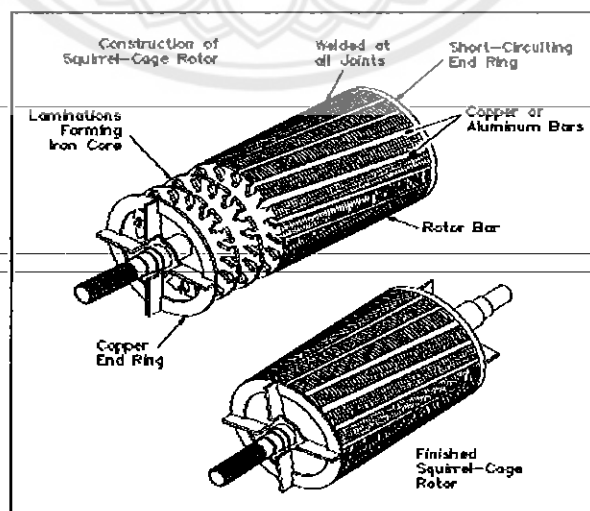
เป็นส่วนที่อยู่กับที่และมีโครงสร้างเหมือนกับสเตเตอร์ของมอเตอร์ชนิดอื่นๆคือ ทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนกันและอัดเป็นแท่งรูปทรงกระบอกเพื่อทำหน้าที่เป็นร่องวางขดลวด 3 เฟส



รูปที่ 2.2 สเตเตอร์[6]

## 2) โรเตอร์

ส่วนหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบ่งออกตามโครงสร้างได้ 2 ชนิดคือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-Cage Rotor) และโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound - Rotor Motor) โครงการที่ศึกษาเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก ซึ่งเป็นโรเตอร์รูปทรงกระบอก ผิวเรียบๆโรเตอร์เรียบ ผิวด้านนอกฝังแท่งตัวนำที่ทำจากทองแดงตลอดแนวความยาวของโรเตอร์ ที่ปลายแต่ละด้านของแท่งตัวนำบนโรเตอร์ต่อลัดวงจรด้วยวงแหวนทองแดง สำหรับโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กและกลางจะใช้แท่งตัวนำอลูมิเนียมอัดเข้าไปในโรเตอร์ ลักษณะของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงได้ตามรูป



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก[5]

## 2.1.2 ความเร็วซิงโครนัส ความเร็วโรเตอร์และสลลิป

### 1) ความเร็วซิงโครนัส

เป็นความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส หาได้ดังนี้

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

เมื่อ  $n_s$  = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Hz)

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กต่อเฟส

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนเพิ่มตามความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแต่จะลดตามจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ต้องต่ำกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนเสมอเพราะว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นกับตัวนำแต่ละตัวของโรเตอร์จะเกิดหลังจากสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่ผ่านตัวนำนั้นไปแล้ว

### 2) ความเร็วโรเตอร์และสลลิป

จากการที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ผลต่างของค่าความเร็วทั้งสองเรียกว่า สลลิป (Slip) ปกติค่าสลลิปจะบอกในรูปของร้อยละเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นสมการของสลลิปคือ

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $S$  = สลลิป

$n_s$  = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

$n_r$  = ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

ขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำไร้ภาระทางกลสลลิปจะมีค่าเท่ากับศูนย์และเมื่อใดก็ตามที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกยึดอยู่กับที่ค่าสลลิปจะเท่ากับ 1 นั่นคือความเร็วของโรเตอร์เป็นศูนย์ ดังนั้นความเร็วโรเตอร์จะเป็นไปตามสมการ

$$n_r = (1-S) n_s \quad (2.3)$$

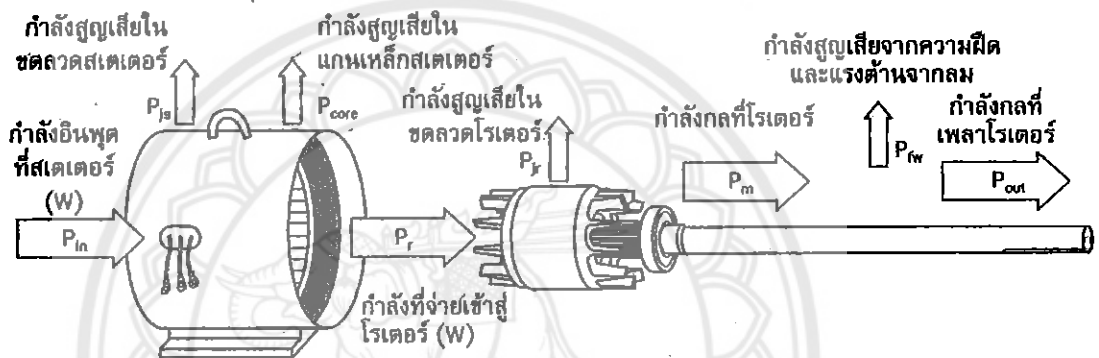


ในขณะที่ความถี่โรเตอร์ ( $f_r$ ) จะมีค่าเท่ากับสลิปคูณกับความถี่ของแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์

$$f_r = S f_s \quad (2.4)$$

### 2.1.3 การส่งผ่านกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังเพลลาของมอเตอร์เป็นไปตามลำดับการไหลของพลังงานดังนี้



รูปที่ 2.4 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส[3]

กำลังงานอินพุตเป็นพลังงานไฟฟ้าอินพุต ( $P_{in}$ ) ที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ผ่านขดลวดสเตเตอร์ ที่สเตเตอร์จะมีการสูญเสีย 2 ส่วน ได้แก่กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ ( $P_s$ ) มีค่าเท่ากับ  $I^2R$  และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ ( $P_{core}$ ) กำลังที่เหลือออกมาคือกำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ ( $P_r$ ) อย่างไรก็ตามพลังงานที่ส่งผ่านมายังโรเตอร์มีการสูญเสียจากขดลวดของโรเตอร์ ( $P_r$ ) เท่ากับ  $I^2R$  นั่นคือพลังงานกลที่ออกมาจากโรเตอร์ ( $P_m$ ) คือผลต่างของ  $P_r - P_r$  ซึ่งพลังงานกลนี้จะต้องเอาชนะการสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม ซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่เพลลาของโรเตอร์ ( $P_{fw}$ ) จึงจะได้กำลังงานกลที่เพลลาของโรเตอร์ ( $P_{out}$ ) ที่สามารถส่งให้กับโหลดได้ จากแผนผังดังกล่าวคำนวณหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ดังนี้

กำลังอินพุต คือ  $P_{in} = \sqrt{3} V_{LL} \cos \Phi$

กำลังที่โรเตอร์ คือ  $P_r = P_{in} - (P_{js} + P_{core})$

เมื่อกำหนดให้  $P_{core}$  คือ กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์

$P_{js}$  คือ กำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์

กำลังกลที่ออกจากโรเตอร์ คือ  $P_m = P_r - P_{js}$

เมื่อ  $P_{js}$  คือ กำลังสูญเสียที่ขดลวดของโรเตอร์

กำลังที่เพลลาของโรเตอร์ คือ  $P_{out} = P_m - P_{fw}$

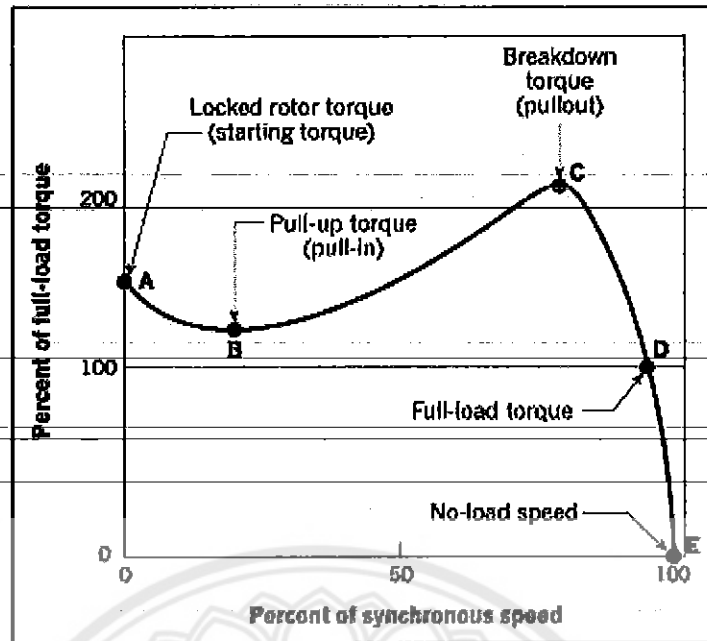
เมื่อ  $P_{fw}$  คือ กำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม

ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ  $\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$

#### 2.1.4 เส้นความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสถานะที่ขั้วภาระทางกลเต็มพิกัดแสดงได้รูปของเส้นโค้งความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าแรงบิดในสถานะปกติที่ภาระทางกลเต็มพิกัดคือ  $T$  และแรงบิดในสถานะที่โรเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่มีค่าเท่ากับ 1.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัดสำหรับแรงบิดเบรกควานจะมีค่าประมาณ 2.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด

ที่ภาระทางกลเต็มพิกัดความเร็วของมอเตอร์จะเท่ากับ  $n_r$  แต่ถ้าแรงบิดของภาระทางกลเพิ่มขึ้นความเร็วจะตกลงจนกระทั่งมอเตอร์สร้างแรงบิดได้เท่ากับแรงบิดของภาระทางกล สถานะดังกล่าวมอเตอร์ยังคงหมุนไปได้ แต่ถ้าแรงบิดของภาระทางกลเกินกว่า 2.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัดที่เรียกว่า แรงบิดเบรกควาน มอเตอร์จะหยุดหมุนอย่างรวดเร็วเพราะว่ามอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดขึ้นเท่ากับแรงบิดของภาระทางกลได้ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีขนาดเล็กกว่า 10 kw ความเร็วที่แรงบิดเบรกควานจะมีค่าประมาณ 80% ของความเร็วซิงโครนัส แต่ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีพิกัดกำลังมากกว่า 1000 kw ความเร็วที่แรงบิดเบรกควานมีค่าประมาณ 98% ของความเร็วซิงโครนัส



รูปที่ 2.5 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด[8]

### 2.1.5 ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก

#### 1) ขณะไร้ภาระทางกล

เมื่อมอเตอร์เดินเครื่องที่สภาวะไร้ภาระทางกล ค่ากระแสไฟฟ้าในสเตเตอร์จะมีค่าประมาณ 0.5 และ 0.3 เปรอ์ยูนิตของกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัด ค่ากระแสไฟฟ้าขณะไร้ภาระทางกลเหมือนกับค่ากระแสกระตุ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของแม่เหล็กที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหมุน ( $\Phi_m$ ) และองค์ประกอบจริงขนาดเล็กๆซึ่งจ่ายค่าการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลมในโรเตอร์รวมกับค่าการสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ โดยที่เส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi_m$ ) เชื่อมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์มีลักษณะเหมือนกับเส้นแรงเคลื่อนที่แม่เหล็ก (Mutual) ในหม้อแปลงไฟฟ้า

เพื่อให้ค่าของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จำเป็นในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จะต้องมีช่องอากาศขนาดสั้นประมาณค่าความคลาดเคลื่อนทางกล ค่าตัวประกอบกำลังขณะไร้ภาระทางกลมีค่าประมาณ 0.2 หรือ 20 % ในมอเตอร์ขนาดเล็กจนถึง 0.05 ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพมีค่าเป็นศูนย์จากการที่ไม่มีกำลังเอาต์พุตออกมา

#### 2) ขณะรับภาระทางกล

เมื่อมอเตอร์รับภาระทางกลค่ากระแสไฟฟ้าในโรเตอร์จะสร้าง เส้นแรงเคลื่อนที่แม่เหล็ก (Mutual) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงเคลื่อนที่แม่เหล็ก (Mutual) สภาวะนี้ทำให้กระแสไฟฟ้าในสเตเตอร์ไหลกลับทิศ เส้นแรงเคลื่อนที่แม่เหล็ก (Mutual) กลับทิศของโรเตอร์และสเตเตอร์จะเหมือนกับ เส้นแรงเคลื่อนที่แม่เหล็ก (Mutual) กลับทิศในขดลวดปฐมภูมิ (Secondary)

และ ขดลวดทุติยภูมิ (Primary) ในหม้อแปลงไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (kw) ที่มอเตอร์ใช้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของภาระทางกลซึ่งเป็นการแปรตามค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ถูกปรับอย่างรวดเร็วขณะที่ภาระทางกลเพิ่มขึ้น ขณะภาระทางกลเต็มพิกัดค่าตัวประกอบกำลังมีค่าตั้งแต่ 0.8 ในมอเตอร์ขนาดเล็กถึง 0.9 ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพขณะใช้ภาระทางกลเต็มพิกัดมีค่าสูงถึง 98 % ในมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่หลายๆ

### 3) ลักษณะเฉพาะขณะยึดโรเตอร์อยู่กับที่

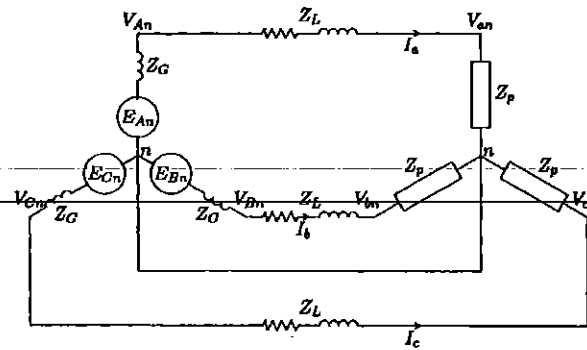
กระแสไฟฟ้าขณะยึดโรเตอร์อยู่กับที่มีค่า 5-6 เท่าเทียบกับขณะภาระทางกลเต็มพิกัด ค่าการสูญเสียในรูป  $I^2R$  มีค่า 25 – 26 เท่าเทียบกับขณะปกติ ดังนั้นการยึดโรเตอร์อยู่กับที่จะกระทำได้นานไม่กัวินาทีเท่านั้น แม้ว่ากำลังกลขณะหยุดนิ่งมีค่าเป็นศูนย์แต่มอเตอร์จะมีแรงบิดขนาดใหญ่ ค่าตัวประกอบกำลังต่ำจากผลของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็กไว้มากกว่าในขดลวดสเตเตอร์และ โรเตอร์ไม่ได้ต่อกันอย่างแน่น

## 2.2 ทฤษฎีของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

### 2.2.1 ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุล

การผลิตไฟฟ้า การส่งและการแจกจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังกระทำได้โดยการใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่โรงไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 3 เฟสจะถูกผลิตขึ้นให้มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากันแต่มีมุมเฟสห่างกัน 120 องศา เรียกว่า “แหล่งจ่ายสมดุล” ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดเท่าค่าที่พิกัดและอยู่ในลำดับเฟส ABC จะเรียกสภาวะนี้ว่า Positive – Phase Sequence ในทางตรงกันข้ามถ้าลำดับเฟสเป็น CBA จะเรียกสภาวะดังกล่าวว่า Negative – Phase Sequence

ในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส กำลังไฟฟ้าถูกจ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าภายนอกที่มีค่าค่อนข้างจะคงที่ เช่น วงจรไฟฟ้า 1 เฟส อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสซึ่งมีค่าแรงบิดคงที่จะสตาร์ทและเดินเครื่องได้ดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ลักษณะเด่นของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้า 1 เฟสคือที่ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากันจะมีประสิทธิภาพในการส่งจ่ายไฟฟ้าในสายส่งที่ดีกว่าแม้ว่าจะใช้จำนวนสายส่งมากกว่าก็ตาม นั่นคือเหตุผลที่ทำให้ระบบไฟฟ้า 3 เฟสเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป



รูปที่ 2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้าที่ต่อแบบสตาร์

ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สตาร์ ปกติจะใช้กับการต่อภาระทางไฟฟ้าทั้งแบบ เกล็ด้าและ สตาร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่นิยมต่อแบบ เกล็ด้า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจะไม่สมดุลอย่างสมบูรณ์เนื่องจากมี Net Voltage รวมทั้งเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบ เกล็ด้า ต่างก็เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าเฟสต่ำกว่าการต่อแบบ สตาร์ ที่มีประโยชน์กว่าตรงที่สามารถลดคณวนไฟฟ้าลงได้ จากรูป 2.5 แสดงการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สตาร์ ที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ สตาร์ ผ่านระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟส สมมติว่าลำดับเฟสเป็น ABC (Positive – Phase Sequence) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้คือ

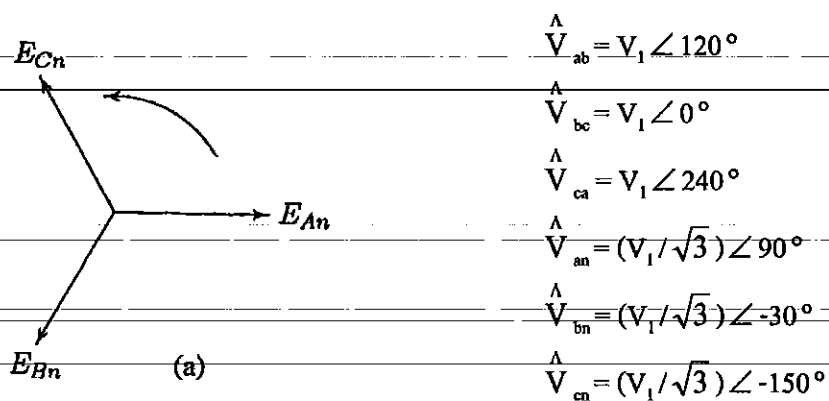
$$E_{an} = |E_p| \angle 0^\circ$$

$$E_{bn} = |E_p| \angle -120^\circ$$

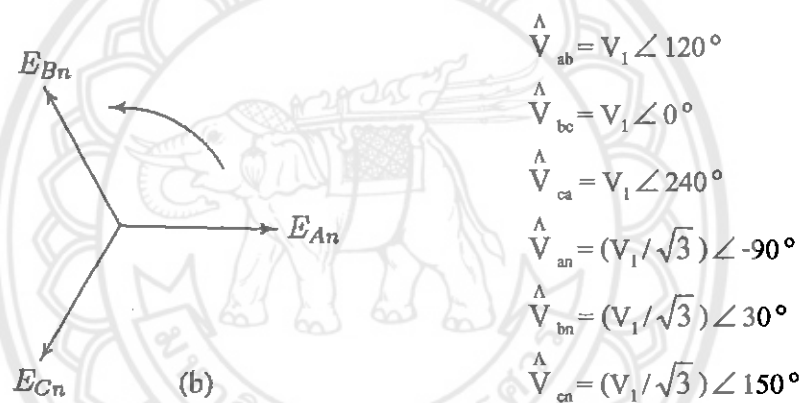
$$E_{cn} = |E_p| \angle -240^\circ$$

ในระบบไฟฟ้ากำลังภาระทางไฟฟ้าของสายส่งที่สมดุลเป็นเรื่องที่ต้องใส่ใจอย่างมากสำหรับภาระทางไฟฟ้าที่สมดุล แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเฟสที่จุดต่อภาระทางไฟฟ้าจะสมดุล

### 2.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสของประเทศไทย



(a) Positive phase Sequence (abc)



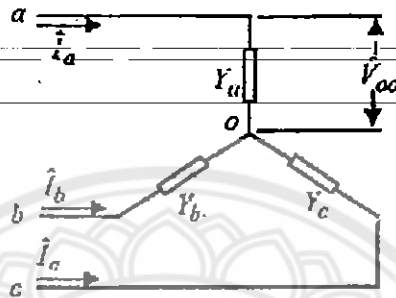
(b) Negative Phase Sequence (cba)

รูปที่ 2.7 ลำดับเฟสทั้ง 2 แบบของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย 380 V ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ในระบบไฟฟ้าที่สมดุลจะมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมุมต่างกันระหว่างเฟส 120° และ 240° องศาทางไฟฟ้าตามลำดับ ซึ่งจะมีลำดับเฟส 2 ลำดับที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการต่อ แรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ลำดับสามารถแสดงรายละเอียดในรูปของเฟสเซอร์ดังรูปที่ 2.7

### 2.2.3 การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Star Isolated Neutral

ปกติมอเตอร์จะมีการต่อขดลวดสเตเตอร์ด้านนอกได้ 2 ลักษณะคือ แบบ สตาร์ และแบบ เดลต้า ตามลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ สำหรับการทดสอบในโครงการนี้จะทำการต่อขดลวดสเตเตอร์ด้านนอกของมอเตอร์แบบ Star Isolated Neutral หรือนิยมเรียกกันว่า สตาร์ 3 สาย แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การต่อขดลวดสเตเตอร์ด้านนอกแบบ Star Isolated Neutral

เมื่อเกิดสภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าขึ้นในระบบจะทำให้กระแสไฟฟ้าเฟสในแต่ละเฟสไม่เท่ากันอีกทั้งแรงดันไฟฟ้าคร่อมโพลในแต่ละเฟสก็ไม่เท่ากันด้วย ดังนั้นจุดต่อรวมของการต่อขดลวดสเตเตอร์ด้านนอกแบบ สตาร์ จะเกิดความต่างศักย์กับจุด นิวตรอน ของระบบ เนื่องจากจุดทั้งสองจุดไม่ได้ต่ออยู่ด้วยกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าคร่อมโพลต่อเฟสเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันในแต่ละเฟสทำให้มีแรงดันระหว่าง นิวตรอนกับจุด Star Point ของโพลเรียกว่า Displacement Neutral Voltage

ในการทดสอบมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์วัดที่ขด นิวตรอน ของระบบ แต่ในการคำนวณจะใช้แรงดันคร่อมโพลดังนั้นจึงต้องหาแรงดันคร่อมโพลจากแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของระบบ

สามารถหาแรงดันไฟฟ้าคร่อมโพลได้จากสมการ

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no}$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no}$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no}$$

เมื่อ  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  และ  $V_{cn}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบโดยวัดระหว่างสายไฟกับจุด neutral ของระบบและ  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  และ  $V_{co}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดวัดเทียบระหว่างสายไฟกับจุดต่อร่วมของโหลดหรือจุด Star Point โดยที่  $V_{on}$  คือ Displacement Neutral Voltage

$$V_{on} = \frac{V_{an}Y_a + V_{bn}Y_b + V_{cn}Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad (2.5)$$

เนื่องจาก Admittance ภายในมอเตอร์เท่ากันทั้ง 3 เฟสดังนั้นกำหนดได้ว่า  $Y_a = Y_b = Y_c$

$$V_{on} = \frac{1}{3} * (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (2.6)$$

สามารถหาแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดได้จากสมการข้างต้นทั้ง 5 สมการร่วมกัน

### 2.3 ทฤษฎีขององค์ประกอบสมมาตร

หนึ่งในวิธีการที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการจัดการกับปัญหาสถานะความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า n เฟส คือวิธีองค์ประกอบสมมาตร วิธีดังกล่าวถูกเสนอแนะขึ้นโดย C.L Fortescue ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ว่าระบบ n เฟสที่ไม่สมดุลสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบ n เฟสที่สมดุลด้วยการใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ดั้งเดิม เฟสเซอร์ n เฟสจะมีองค์ประกอบที่เท่ากันทั้งขนาดและมุมระหว่างเฟสเซอร์ที่อยู่ติดกัน แม้ว่าวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบหลายเฟสที่ไม่สมดุลก็ตาม โดยทั่วไปมักจำกัดการใช้งานเพื่อพิจารณาระบบไฟฟ้า 3 เฟสเป็นหลัก

ปกติแล้วในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของระบบจะเป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าเฟสไม่สมดุล กรณีที่กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ค่าคงที่ ระบบจะเรียกว่า “ระบบเชิงเส้น” ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้หลักการทับซ้อน (Superposition) ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าในระบบเชิงเส้นที่มีต่อกระแสไฟฟ้าไม่สมดุลสามารถพิจารณาได้โดยการคำนึงถึงผลตอบสนองที่แบ่งแยกออกเป็นแต่ละส่วนประกอบในองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้า ส่วนประกอบในระบบไฟฟ้าที่จำเป็นต้องพิจารณาคือ เครื่องจักรกลไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่ง และภาระทางไฟฟ้าที่มีการต่อแบบ เดลต้า หรือ สตาร์

วิธีองค์ประกอบสมมาตรแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของส่วนประกอบในระบบขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อและองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้า วงจรสมมูลที่เรียกว่า “Sequence Circuit” ถูกพัฒนาให้ตอบสนองกับผลตอบสนองแต่ละส่วนขององค์ประกอบกระแส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีวงจรสมมูล 3 เฟสวงจรของแต่ละองค์ประกอบ โดยการผสมวงจรสมมูลแต่ละวงจรเข้ากับโครงข่ายที่มีการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละองค์ประกอบ เราจะใช้แนวคิดของ Sequence Network

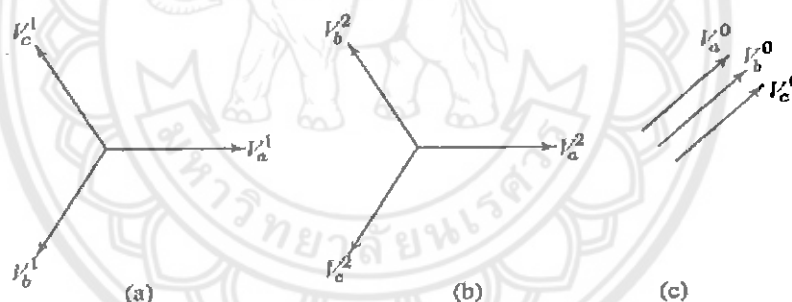


ทั้ง 3 วงจรการแก้ปัญหาในสภาวะผิดปกติซึ่งจะให้องค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สามารถใช้ร่วมกันเพื่อตอบสนองผลกระทบจากสภาวะความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบทั้งหมด การวิเคราะห์โดยวิธีองค์ประกอบสมมาตรเป็นวิธีที่มีประโยชน์ โดยสามารถคำนวณพอลต์ไม่สมมาตรได้อย่างง่ายดายเช่นเดียวกับการคำนวณพอลต์ 3 เฟส

### 2.3.1 การสังเคราะห์เฟสเซอร์ไม่สมมาตรจากองค์ประกอบสมมาตร

จากทฤษฎีของ Fortescue เฟสเซอร์ไม่สมดุล 3 เฟสเซอร์ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสามารถเปลี่ยนเป็นระบบที่สมดุลของเฟสเซอร์ทั้ง 3 เฟสเซอร์ โดยมีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

- 1) Positive – Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน วางห่างกัน 120 องศา โดยมีลำดับเฟสเหมือนกับระบบเดิม
- 2) Negative – Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน วางห่างกัน 120 องศา โดยมีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับระบบเดิม
- 3) Zero – Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน วางห่างกัน 0 องศา



รูปที่ 2.9 เฟสเซอร์ขององค์ประกอบสมมาตร[9]

โดยทั่วไปการแก้ปัญหาด้วยวิธีองค์ประกอบสมมาตรจะกำหนดชื่อให้กับเฟสทั้ง 3 เฟสของระบบเป็น a b และ c เพื่อใช้บอกถึงลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบให้เป็น abc ดังนั้นลำดับเฟสของ Positive – Sequence Components ในระบบไม่สมดุลจึงเป็น abc โดยที่ลำดับเฟสของ Negative – Sequence Components เป็น cba ถ้าเฟสเซอร์ดั้งเดิมเป็นแรงดันไฟฟ้า เราจะกำหนดเป็น  $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$

องค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 องค์ประกอบจะถูกระบุเพิ่มเติมโดยการใช้เครื่องหมายดังนี้

- 1 สำหรับ Positive – Sequence Components
- 2 สำหรับ Negative – Sequence Components
- 0 สำหรับ Zero – Sequence Components

ดังนั้น Positive – Sequence Components ของ  $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$  จึงเป็น  $V_a^{(1)}$ ,  $V_b^{(1)}$  และ  $V_c^{(1)}$  เช่นเดียวกับ Negative – Sequence Components ที่เป็น  $V_a^{(2)}$ ,  $V_b^{(2)}$  และ  $V_c^{(2)}$  โดยที่ Zero – Sequence Components จะเป็น  $V_a^{(0)}$ ,  $V_b^{(0)}$  และ  $V_c^{(0)}$  ตามลำดับ จากการที่แต่ละเฟสไม่สมดุล ดังเดิมเป็นการรวมแต่ละองค์ประกอบเข้าด้วยกัน ดังนั้นเฟสเซอร์ดั้งเดิมสามารถแสดงได้ในรูป องค์ประกอบสมมาตรดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\ V_b &= V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \\ V_c &= V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \end{aligned}$$

ข้อได้เปรียบมากมายของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีองค์ประกอบสมมาตรจะเห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการศึกษาฟอลต์ไม่สมมาตรหรือระบบที่สมมาตร อาจกล่าวได้ว่าวิธีการประกอบได้ด้วยขั้นตอนคร่าวๆคือการหาองค์ประกอบสมมาตรของกระแสฟอลต์ จากนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆในระบบหาได้จากค่ากึ่งกลางของเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและสามารถทำนายพฤติกรรมของระบบได้อย่างแม่นยำ

### 2.3.2 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมมาตร

การสังเคราะห์เฟสเซอร์ไม่สมมาตรทั้ง 3 เฟสเซอร์จากเฟสเซอร์สมมาตรถูกทำให้สอดคล้องกันกับสมการ ดังนั้นจึงควรตรวจสอบสมการดังกล่าวเพื่อหาวิธีเปลี่ยนเฟสเซอร์ไม่สมมาตร 3 เฟสเซอร์ด้วยวิธีการขององค์ประกอบสมมาตร เริ่มจากลดจำนวนของปริมาณที่ไม่ทราบค่าลงด้วยการลดองค์ประกอบ  $V_b$  และ  $V_c$  โดยทำเป็นองค์ประกอบในรูปของ  $V_a$  ซึ่งจะทำให้การแปลงตัวแปรผ่าน  $a$  – operator ( $a = \angle 120^\circ$ ) เพื่อให้อยู่ในรูปของตัวแปรเพียงตัวเดียวคือ  $V_a$  ได้ดังนี้

$$V_b^{(0)} = V_a^{(0)}$$

$$V_c^{(0)} = V_a^{(0)}$$

$$V_b^{(1)} = a^2 V_a^{(1)}$$

$$V_c^{(1)} = a V_a^{(1)}$$

$$V_b^{(2)} = a V_a^{(2)}$$

$$V_c^{(2)} = a^2 V_a^{(2)}$$

นำกลับไปแทนในสมการ 3 สมการข้างต้นได้ว่า

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (2.7)$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \quad (2.8)$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \quad (2.9)$$

จัดทำอยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\text{เมื่อ } A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการ Invert A

$$A^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

แล้วนำ  $A^{-1}$  คูณทั้ง 2 ข้างของสมการเพื่อหา  $V_a^{(0)}$ ,  $V_a^{(1)}$  และ  $V_a^{(2)}$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

จะเป็นการเปลี่ยนเฟสเซอร์ไม่สมมาตร 3 เฟสเซอร์ให้เป็นองค์ประกอบสมมาตร ความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญต่อการแยกสมการในรูปขยาย จากเมตริกซ์ข้างต้นจะได้สมการดังนี้

$$V_a^{(0)} = 1/3*(V_a + V_b + V_c) \quad (2.12)$$

$$V_a^{(1)} = 1/3*(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.13)$$

$$V_a^{(2)} = 1/3*(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.14)$$

จากนั้นหาองค์ประกอบ  $V_b^{(0)}, V_b^{(1)}, V_b^{(2)}, V_c^{(0)}, V_c^{(1)}$  และ  $V_c^{(2)}$  เพื่อย้อนกลับไปหา  $V_a, V_b$  และ  $V_c$  ภายหลังการคำนวณสถานะไม่สมดุลในรูปองค์ประกอบสมมาตร แล้วจึงเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส คือ เปลี่ยนจาก  $V_a, V_b$  และ  $V_c$  ไปเป็น  $V_{ab}, V_{bc}$  และ  $V_{ca}$  ตามลำดับ

จะเห็นว่าถ้าผลบวกของเฟสเซอร์ไม่สมดุลมีค่าเป็นศูนย์จะทำให้ Zero - Sequence Components ไม่มีปฏิกิริยาของค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสในระบบ 3 เฟสก็มีค่าเป็นศูนย์ Zero - Sequence Components จึงไม่เคยปรากฏในแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสไม่ว่าระดับของความไม่สมดุลจะมีค่าเท่าใดก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามผลบวกของเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าเฟสไม่จำเป็นต้องเป็นศูนย์ดังนั้นจึงอาจมีองค์ประกอบลำดับศูนย์ในแรงดันไฟฟ้าเฟสก็ได้

สมการดังกล่าวสามารถเขียนได้หลายรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับเฟสเซอร์ จึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าแทนที่จะเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งหาคำตอบได้ทั้งเชิงวิเคราะห์และเชิงการเขียน เพราะว่สมการดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐาน สมการขององค์ประกอบสมมาตรในรูปของกระแสไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} \quad (2.15)$$

$$I_b = I_a^{(0)} + a^2 I_a^{(1)} + a I_a^{(2)} \quad (2.16)$$

$$I_c = I_a^{(0)} + a I_a^{(1)} + a^2 I_a^{(2)} \quad (2.17)$$

$$I_a^{(0)} = 1/3(I_a + I_b + I_c) \quad (2.18)$$

$$I_a^{(1)} = 1/3(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (2.19)$$

$$I_a^{(2)} = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.20)$$

ท้ายที่สุดผลลัพธ์ที่ได้สามารถแปลงให้เป็นกระแสเฟสของวงจรที่มีการต่อแบบ Delta โดยการแปลง  $I_a, I_b$  และ  $I_c$  ไปเป็น  $I_{ab}, I_{bc}$  และ  $I_{ca}$  ตามลำดับ

### 2.3.3 กำลังไฟฟ้าในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

เมื่อทราบองค์ประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร 3 เฟสสามารถคำนวณได้โดยตรงจากองค์ประกอบสมมาตรนั้น เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน จะยกตัวอย่างเป็นเมตริกซ์ขององค์ประกอบสมมาตร

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Total Complex Power) ที่ไหลในเฟส a, b และ c ของวงจร 3 เฟสมีค่า

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.21)$$

เมื่อ  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  เป็นแรงดันไฟฟ้าวัดเทียบจุดต่อจุด นิวตรอน และ  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรทั้ง 3 เฟส การต่อ นิวตรอน อาจแสดงไว้หรือไม่ก็ได้ สมการข้างต้นเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (2.22)$$

เมตริกซ์สังยุค (Conjugate Matrix) เป็นการเรียงเรียงสมาชิกซึ่งเป็นค่าสังยุคที่ตรงตามแต่ละตำแหน่งของแต่ละสมาชิกจากเมตริกซ์เดิม สามารถเขียนสมการรูปเมตริกซ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

$$S = [AV]^T [AI]^* \quad (2.23)$$

จากกฎ Reversal Rule ของพีชคณิตของเมตริกซ์ซึ่งกำหนดการ Transpose ผลของเมตริกซ์ทั้ง 2 เมตริกซ์ให้มีค่าเท่ากับผลการ Transpose ในรูปที่กลับกัน จากกฎดังกล่าวจะได้ว่า

$$[AV]^T = V^T A^T \quad (2.24)$$

ดังนั้น

$$S = V^T A^T [AI]^* = V^T A^T A^* I^* \quad (2.25)$$

แต่  $A^T = A$  และ  $a$  กับ  $a^2$  เป็นสังยุคซึ่งกันและกันจึงได้ว่า

$$S = [V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

โดยที่  $A^T A^*$  มีค่าเท่ากับ

$$3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จะได้

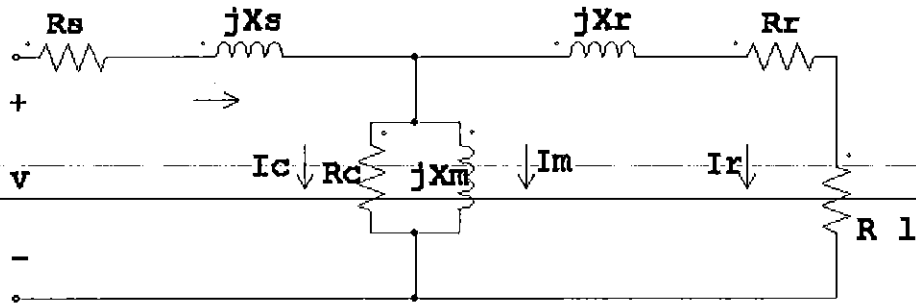
$$S = 3 [V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ดังนั้น Complex Power มีค่าเท่ากับ  $V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^*$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Complex Power สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจร 3 เฟสที่ไม่สมดุลได้นั่นเอง

## 2.4 การวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีองค์ประกอบสมมาตร

การวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรโดยคำนวณค่าแรงดัน Sequence Line – To – Neutral จากวงจรสมมูลลำดับบวก (Positive Sequence Equivalent Circuit) และวงจรสมมูลลำดับลบ (Negative – Sequence Equivalent Circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วคำนวณค่ากระแสลำดับ (Sequence Currents) จากค่าแรงดัน Sequence Line – To – Neutral สำหรับการหาค่าเน็ทเวิร์ลลำดับศูนย์ (Zero – Sequence) ไม่จำเป็นเพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อแบบ Star Isolated Neutral ทำให้กระแสและแรงดันลำดับศูนย์มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นกระแสเฟสคำนวณได้จากการแปลงกระแสลำดับกลับไปเป็นกระแสเฟสในแต่ละสาย แล้วจึงคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสได้ในที่สุด



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลลำดับบวกและลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

รูปที่ 2.9 ใช้ได้ทั้งเน็ทเวิร์คลำดับบวกและลบซึ่งมีค่าแตกต่างที่ค่าของ "Load Resistance" RL

$$RL_1 = \frac{1 - S_1}{S_1} * Rr_1 \tag{2.28}$$

สลิปของลำดับบวก (Positive Sequence Slip) :  $S_1 = \frac{n_s - n_r}{n_s}$  (2.29)

เมื่อ  $n_s$  เป็นความเร็วซิง โคน์สและ  $n_r$  เป็นความเร็วของโรเตอร์

สลิปของลำดับลบ (Negative Sequence Slip):  $S_2 = 2 - S_1$

Load Resistance ลำดับลบ ( $RL_2$ ) เป็นค่าลบทำให้กำลังที่เพลาในลำดับลบมีค่าเป็นลบ

ถ้ารู้ค่าสลิปลำดับบวก ( $S_1$ ) ของเน็ทเวิร์คลำดับบวกและลบคือ

$$ZM_1 = Rs_1 + jXs_1 + \frac{((Rc * jXm_1) / (Rc + jXm_1))(Rr_1 + RL_1 + jXr_1)}{Rr_1 + RL_1 + j(Xm_1 + Xr_1)} \tag{2.30}$$

เมื่อ I = 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลลำดับบวก

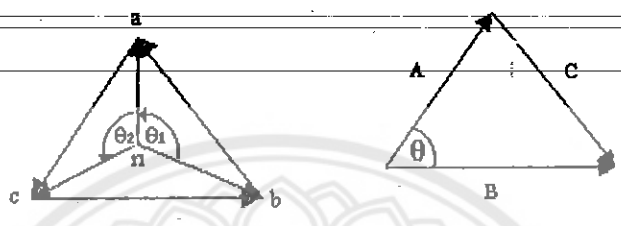
เมื่อ I = 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลลำดับลบ

สำหรับวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่  $R_s, R_r, R_c, X_s, X_r, X_m$  และ  $S_1$  ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยค่า  $X_s$  และ  $X_r$  สามารถแยกค่าทั้ง 2 ค่าได้จากผลการทดสอบมาตรฐาน IEEE Std 112 ได้ว่า  $X_s$  มีค่าเท่ากับ  $X_r$

เมื่อรู้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ การวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงค่าแรงดัน Line – To – Neutral ไปเป็นค่าแรงดัน Sequence Line – To – Neutral ซึ่งจะต้องทราบมุมของแรงดัน Line – To – Neutral ทั้ง 3 เฟสก่อน โดยหามุมจากค่าแรงดัน Line – To – Line ร่วมกับกฎของโคไซน์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไม่สมดุล จึงทำให้มุมระหว่างเฟสไม่เท่ากับ 120° ทางไฟฟ้า

การหามุมเฟสของแรงดันแต่ละเฟส เมื่อกำหนดให้เฟส a เป็นเฟสอ้างอิง ต้องวัดขนาดแรงดันระหว่างเฟสแล้วใช้กฎของโคไซน์ที่ว่า  $C^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos\theta$  หามุมเฟสแสดงได้ตามรูป



รูปที่ 2.11 ลำดับเฟส abc และกฎของโคไซน์

ในที่นี้กำหนดให้แรงดันป้อนเข้าขดลวดมีลำดับเฟส abc ดังนั้นเมื่อทราบค่าแรงดันระหว่างเฟส  $V_{ab}$  และ  $V_{ca}$  จะสามารถนำมาหาหามุมเฟสของแรงดัน  $V_{bn}$  และ  $V_{cn}$  โดยใช้กฎของโคไซน์ดังนี้

$$V^2_{ab} = V^2_{an} + V^2_{bn} - 2V_{an}V_{bn}\cos\theta_1 \tag{2.31}$$

$$V^2_{ac} = V^2_{an} + V^2_{cn} - 2V_{an}V_{cn}\cos\theta_2 \tag{2.32}$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้นจะได้มุมเฟส ดังนี้

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left[ \frac{V^2_{an} + V^2_{bn} - V^2_{ab}}{2V_{an}V_{bn}} \right] \tag{2.33}$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left[ \frac{V^2_{an} + V^2_{cn} - V^2_{ac}}{2V_{an}V_{cn}} \right] \tag{2.34}$$

เมื่อคำนวณหาหามุมเฟสของแรงดันเฟสทั้ง 3 เฟสได้แล้วจึงแปลงค่าแรงดัน Line – To – Neutral ไปเป็นค่าแรงดัน Sequence Line – To – Neutral



$$\begin{bmatrix} Van_0 \\ Van_1 \\ Van_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ } a = 1 \angle 120^\circ \quad (2.35)$$

กำหนดให้มุมเฟสของ  $Van$  เป็นมุมเฟสอ้างอิง จึงมีค่าเท่ากับ 0 องศา

ค่าของ  $Van_0$  และ  $Ia_0$  มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการต่อแบบ Star Isolated Neutral

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่ากระแส Sequence Line ที่เข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$Ia_0 = 0 \quad (2.36)$$

$$Ia_1 = \frac{Van_1}{ZM_1} \quad (2.37)$$

$$Ia_2 = \frac{Van_2}{ZM_2} \quad (2.38)$$

ขั้นตอนที่ 3 แปลงค่ากระแส Sequence Line ไปเป็นค่ากระแสเฟส

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

เมื่อรู้ค่ากระแสเฟส , ค่าแรงดัน Line – To – Neutral และค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดัน แล้ว สามารถคำนวณ Input-Phase-Power และ Total three-Phase Input Power ได้ดังนี้

$$Pa = Van \cdot Ia \cdot \cos \phi \quad \text{เมื่อ } \phi \text{ เป็นมุมระหว่าง } Van \text{ กับ } Ia \quad (2.40)$$

$$Pb = Vbn \cdot Ib \cdot \cos \phi \quad \text{เมื่อ } \phi \text{ เป็นมุมระหว่าง } Vbn \text{ กับ } Ib \quad (2.41)$$

$$Pc = Vcn \cdot Ic \cdot \cos \phi \quad \text{เมื่อ } \phi \text{ เป็นมุมระหว่าง } Vcn \text{ กับ } Ic \quad (2.42)$$

$$P_{3\phi} = Pa + Pb + Pc \quad (2.43)$$

สำหรับการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะทำการคำนวณเพื่อหาค่ากระแสเฟสแต่ละเฟส ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสและค่ากำลังไฟฟ้า 3 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1 และมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 2 จากนั้นการหาค่ากระแสเฟสรวมแต่ละเฟส ค่ากำลังไฟฟารวมในแต่ละเฟสและค่ากำลังไฟฟ้า 3 เฟสรวม ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระทำได้โดย

1) การคำนวณกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางกล

เนื่องจากความเร็วทางกลที่เพลารอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวเท่ากัน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งค่ากระแสเฟสแต่ละเฟส ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสและค่ากำลังไฟฟ้า 3 เฟส จึงมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวมารวมกัน

2) การคำนวณกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะขับเคลื่อนทางกล

เนื่องจากความเร็วทางกลที่เพลารอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวเท่ากัน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งค่ากระแสเฟสแต่ละเฟส ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสและค่ากำลังไฟฟ้า 3 เฟส จึงมีค่าเท่ากับการนำเอาค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวมารวมกัน

## 2.5 การกำหนดปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะไม่สมดุล

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าได้จากนิยามที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

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

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

$$= \frac{\max \left[ \left| \frac{V_a - V_{pavg}}{V_{pavg}} \right|, \left| \frac{V_b - V_{pavg}}{V_{pavg}} \right|, \left| \frac{V_c - V_{pavg}}{V_{pavg}} \right| \right]}{V_{pavg}} * 100\% \quad (2.44)$$

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

ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 1 เฟส  
- แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$V_b, V_c = 220 \text{ Volt} \quad \% \text{PVUR} = 5$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{V_a + 440}{3}$$

ตั้งสมมุติฐาน

กรณีที่ 1  $|V_{\text{avg}} - V_a| \Rightarrow \text{MAX}$

$$5 = \frac{\left[ \frac{V_a + 440}{3} - V_a \right] * 100}{\frac{V_a + 440}{3}}$$

$$5 = \frac{100V_a + 44000 - 300V_a}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 44000 - 200V_a$$

$$205V_a = 41800$$

$$V_a = 203.9$$

กรณีที่ 2  $|200 - V_{\text{avg}}| \Rightarrow \text{MAX}$

$$5 = \frac{\left[ 200 - \frac{V_a + 440}{3} \right] * 100}{\frac{V_a + 440}{3}}$$

$$5 = \frac{66000 - 100V_a - 44000}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 22000 - 100V_a$$

$$105V_a = 19300$$

$$V_a = 188.57$$

5078660 c.2

ค่าตอบที่ถูกต้อง  $V_a$  จะต้องน้อยกว่า  $V_{avg}$  ไม่เกิน 5%

$$V_{avg1} = [203+440]/3$$

$$= 214.33$$

$$V_{avg2} = [188.57+440]/3$$

$$= 209.52$$

น.ร.

17860

2571.

$$PVUR (\%) = [214.33-203.9]/214.33$$

$$= 0.048 \Rightarrow 5\%$$

$$PVUR (\%) = [209.52-188.57]/209.52$$

$$= 0.099 \Rightarrow 10\%$$

เห็นได้ว่ากรณีที่ 2 นั้นไม่เป็นจริงเนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5

เปอร์เซ็นต์

$$\therefore V_a = 203.9 \quad V_b = 220 \quad V_c = 220$$

5200024

ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะไม่สมดุล 2 เฟส

- แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$V_c = 220 \text{ Volt} \quad \% PVUR = 5$ $V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{2V_a + 220}{3}$
---

ตั้งสมมติฐาน

กรณีที่ 1

$$|V_{avg} - V_a| \Rightarrow \text{MAX}$$

$$5 = \frac{\left[ \frac{2V_a + 220}{3} - V_a \right] * 100}{\frac{2V_a + 220}{3}}$$

$$5 = \frac{200V_a + 22000 - 300V_a}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 22000 - 100V_a$$

$$110V_a = 20900$$

$$V_a = 190$$

$$\text{กรณีที่ 2} \quad |200 - V_{\text{avg}}| \Rightarrow \text{MAX}$$

$$5 = \frac{\left[200 - \frac{2V_a + 220}{3}\right] * 100}{\frac{2V_a + 220}{3}}$$

$$5 = \frac{66000 - 200V_a + 22000}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 44000 - 200V_a$$

$$210V_a = 42900$$

$$V_a = 204.3$$

คำตอบที่ถูกต้อง  $V_a$  จะต้องน้อยกว่า  $V_{\text{avg}}$  ไม่เกิน 5 %

$$V_{\text{avg1}} = [2*190+220]/3 \quad V_{\text{avg2}} = [2*204.3+220]/3$$

$$= 200 \quad = 209.53$$

$$\text{PVUR (\%)} = [200-190]/200 \quad \text{PVUR (\%)} = [209.53-204.3]/209.53$$

$$= 0.05 \Rightarrow 5\% \quad = 0.025 \Rightarrow 2.5\%$$

และ  $V_c$  (220 V) ก็จะต้องมากกว่า  $V_{\text{avg}}$  ไม่เกิน 5% ด้วยเช่นกัน

$$\text{PVUR (\%)} = [220-200]/200 \quad \text{PVUR (\%)} = [220-209.53]/209.53$$

$$= 0.01 \Rightarrow 10\% \quad = 0.049 \Rightarrow 5\%$$

เห็นได้ว่ากรณีที่ 1 ไม่เป็นจริงเนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

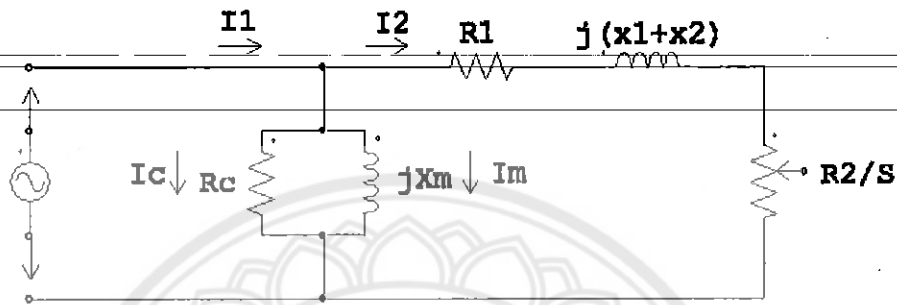
$$\therefore V_a = 204.3 \quad V_b = 204.3 \quad V_c = 220$$

หมายเหตุ สภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส จะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าใน 2 เฟสที่เกิดความผิดปกติมีค่าเท่ากัน เพื่อให้ง่ายกับการพิจารณา

### บทที่ 3

## การทดสอบและวิธีการทดสอบ

### 3.1 การทดสอบหาวงจรมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 วงจรมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$X_1$ : Stator Leakage Reactance	$R_1$ : Stator Resistance	S: Slip
$X_2$ : Rotor Leakage Reactance Transfer to Stator	$R_2$ : Rotor Resistance Transfer to Stator	
$X_m$ : Magnetizing Reactance	$R_c$ : Fix - Loss Resistance	

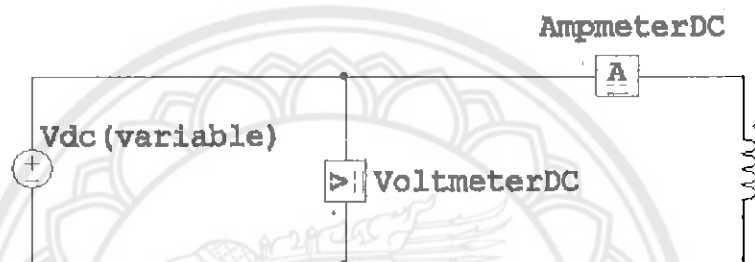
การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟต มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรมุมโดยประมาณ ได้แก่  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_m$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_c$ , และ S เนื่องจากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าทอร์ก กำลังกลกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะปฏิบัติงานจริงเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราควรทำความเข้าใจในหลักการทดสอบอันได้แก่ การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์ การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No - Load Test) การทดสอบด้วยการยึด โรเตอร์อยู่กับที่ (Blocked - Rotor Test) และการทดสอบหาค่าสลลิป

#### 3.1.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

ค่าความต้านทานโรเตอร์ ( $R_2$ ) มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่น ๆ  $R_2$  เป็นตัวกำหนดรูปร่างของ Torque - Speed Curve รวมทั้งกำหนดความเร็วในขณะที่เกิดการจุดประกายของแรงบิด การทดสอบมอเตอร์ตามมาตรฐานเรียกว่า "การทดสอบด้วยการยึด โรเตอร์อยู่กับที่" สามารถใช้พิจารณาค่าความต้านทานรวมของวงจรมอเตอร์ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้สามารถหาได้เพียงค่าความต้านทานรวม ในการหาค่าความ

ด้านทานโรเตอร์หรือ  $R_1$  โดยเฉพาะ จำเป็นที่จะต้องทราบค่า  $R_1$  ซึ่งสามารถหักออกจากค่าความต้านทานรวมได้

การทดสอบหาค่า  $R_1$  เฉพาะส่วนที่แยกออกจาก  $R_1$ ,  $X_1$  และ  $X_2$  เรียกว่า "DC Test" ซึ่งทำได้โดยใช้วิธีโวลต์แอมป์ โดยพื้นฐานค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากเป็นการกระแสตรงจึงไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันให้เกิดในวงจรของโรเตอร์ รวมทั้งไม่มีผลต่อการไหลของกระแสโรเตอร์ จึงทำให้ค่า Reactance ของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์เมื่อมีการจ่ายกระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่จำกัดขนาดการไหลของกระแสในมอเตอร์โดยเฉพาะคือ ความต้านทานสเตเตอร์ นั่นเอง



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

วงจรพื้นฐานของการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ทำการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับปลายของขดลวดขดใดขดหนึ่งจากขดลวดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ในที่นี้เลือกขด  $u-x$ ) ในการทำการทดสอบกระแสในขดสเตเตอร์จะถูกปรับให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระดับที่กำหนด ค่าแรงดันระหว่างขั้วในระดับต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับขนาดกระแสจะถูกปรับให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระดับที่กำหนด ค่าแรงดันระหว่างขั้วในระดับต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับขนาดกระแสจะถูกวัดไปตามลำดับ ค่ากระแสในขดสเตเตอร์จะถูกปรับจนถึงค่าพิกัดที่จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในขดลวดจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิระหว่างการใช้งานปกติ (ถ้าความต้านทานขดลวดเป็นฟังก์ชันแปรตามอุณหภูมิ) จากค่าแรงดันกระแสตรง และค่ากระแสตรง ที่วัดได้สามารถนำมาหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ของขดลวดสเตเตอร์และ  $R_2$  ของขดลวดโรเตอร์ได้ตามลำดับ

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}, \quad R_2 = R_b - R_1 \quad (3.1), (3.2)$$

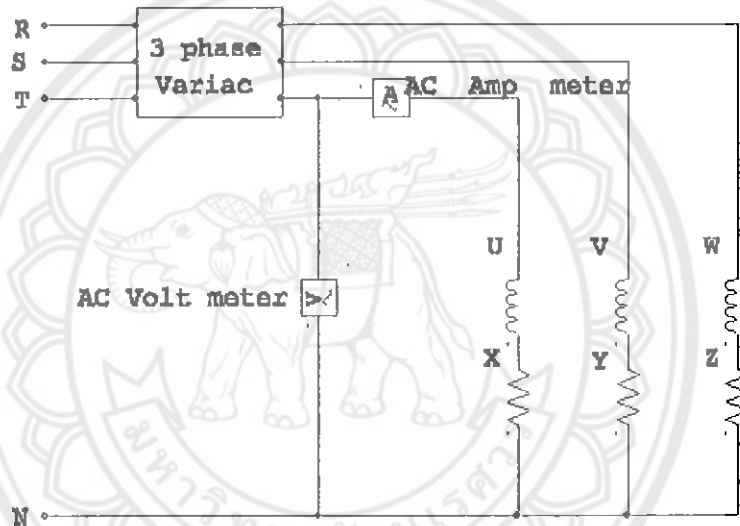
เมื่อ  $R_b$  คือ ความต้านทานรวมที่ได้จากวิธีทดสอบด้วยการบิด โรเตอร์อยู่กับที่

ที่ค่า นี้เอง ค่า Stator Copper Loss ขณะไม่มีโหลด สามารถหาได้ ซึ่งค่าความสูญเสียจากการหมุนคำนวณได้จากความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าเข้าขณะไม่มีโหลดกับค่า Stator Copper Loss นั้นเอง

ค่า  $R_1$  ที่คำนวณได้ยังไม่ถูกต้องโดยแน่นอนอย่างสมบูรณ์ ตั้งแต่การพิจารณา Skin effect ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่แรงดันกระแสสลับถูกจ่ายให้กับขดลวด รายละเอียดเพิ่มเติมที่ถูกต้องสำหรับอุณหภูมิและ Skin effect สามารถหาได้จาก IEEE Standard 112

### 3.1.2 การทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการชดโรเตอร์อยู่กับที่

จากวงจรการทดสอบทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการชดโรเตอร์อยู่กับที่

การทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆอัน ได้แก่  $X_1, X_2, X_m, R_1, R_2$  และ  $R_c$  เพื่อหา วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

#### 1) การทดสอบขณะไม่มีโหลด( No-Load Test)

จะทำการทดสอบที่พิกัดคักคาไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วบันทึกค่า  $V_0, I_0$  และ  $\phi_0$  (เป็นค่าต่อเฟส) คำนวณหาค่า  $R_c$  (Fix - Loss Resistance) และค่า  $X_m$  (Magnetizing Reactance) ได้โดย

$$R_c = \frac{V_0}{I_0 \cos \phi_0} \quad , \quad X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \phi_0} \quad (3.3), (3.4)$$



## 2) การทดสอบด้วยการขีดยึดโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

จะทำการทดสอบด้วยการขีดยึดตัวหมุนให้หยุดนิ่ง แล้วค่อยๆ ปรับสัดค่าไฟฟ้าจนกระทั่งกระแสป้อนเข้าเป็นค่าที่พิกัดกระแส แล้วบันทึกค่า  $V_b$ ,  $I_b$  และ  $\phi_b$  (เป็นค่าต่อเฟส) คำนวณหาค่าความต้านทานรวม  $R_b$  (Total Resistance) และค่ารีแอกแตนซ์รวม  $X_b$  (Total Reactance) ได้โดย

$$Z_b = \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\phi_b} = R_b + jX_b, \quad R_b = R_1 + R_2, \quad X_b = X_1 + X_2 \quad (3.5), (3.6), (3.7)$$

### 3.1.3 การทดสอบหาค่าสลลิป

เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำของโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ของโรเตอร์เทียบกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน จึงมีการกำหนดเทอมที่ใช้บอกอัตราความเร็วสัมพัทธ์ของโรเตอร์เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุน มีชื่อเรียกว่า สลลิป (Slip) ซึ่งนิยามบอกค่าสลลิปนี้ให้อยู่ในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์

การทดสอบหาค่าสลลิปทำได้โดยการติดแถบสะท้อนแสงไว้ที่เพลลาของโรเตอร์ Tachometer จะวัดค่าความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์ด้วยหลักการของการสะท้อนแสง สามารถคำนวณหาค่าสลลิปได้จาก

$$S = \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $n_{sync}$  คือความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน และ  $n_r$  คือความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์

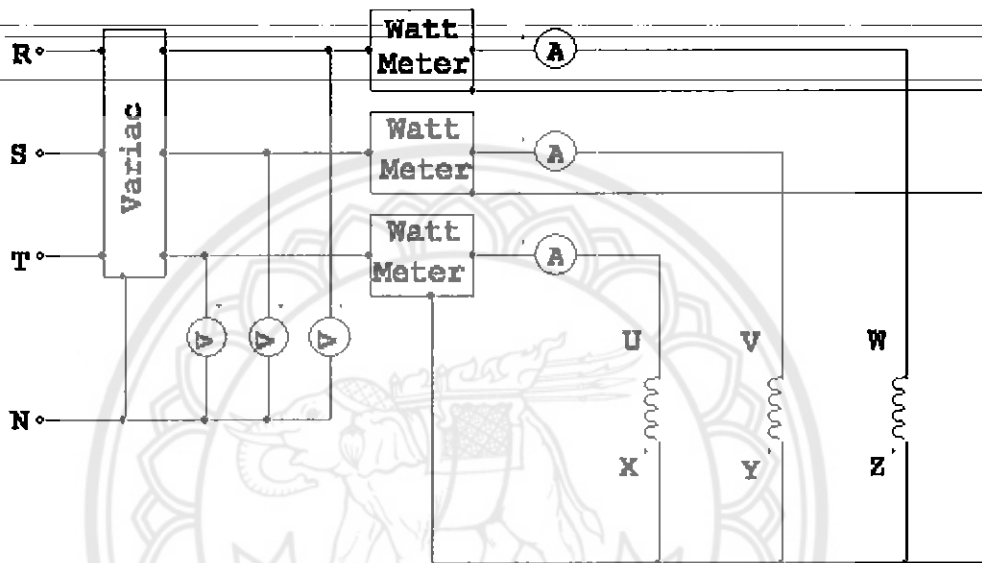
## 3.2 การทดสอบในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลขณะไ้ภาระทางกลและขณะขับภาระทางกล

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 ได้กล่าววิธีการหาและยกตัวอย่างการคำนวณไว้ในบทที่ 2 พร้อมทั้งได้ทำแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟสไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งอยู่ในบทที่ 4 แล้ว

### 3.2.1 การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

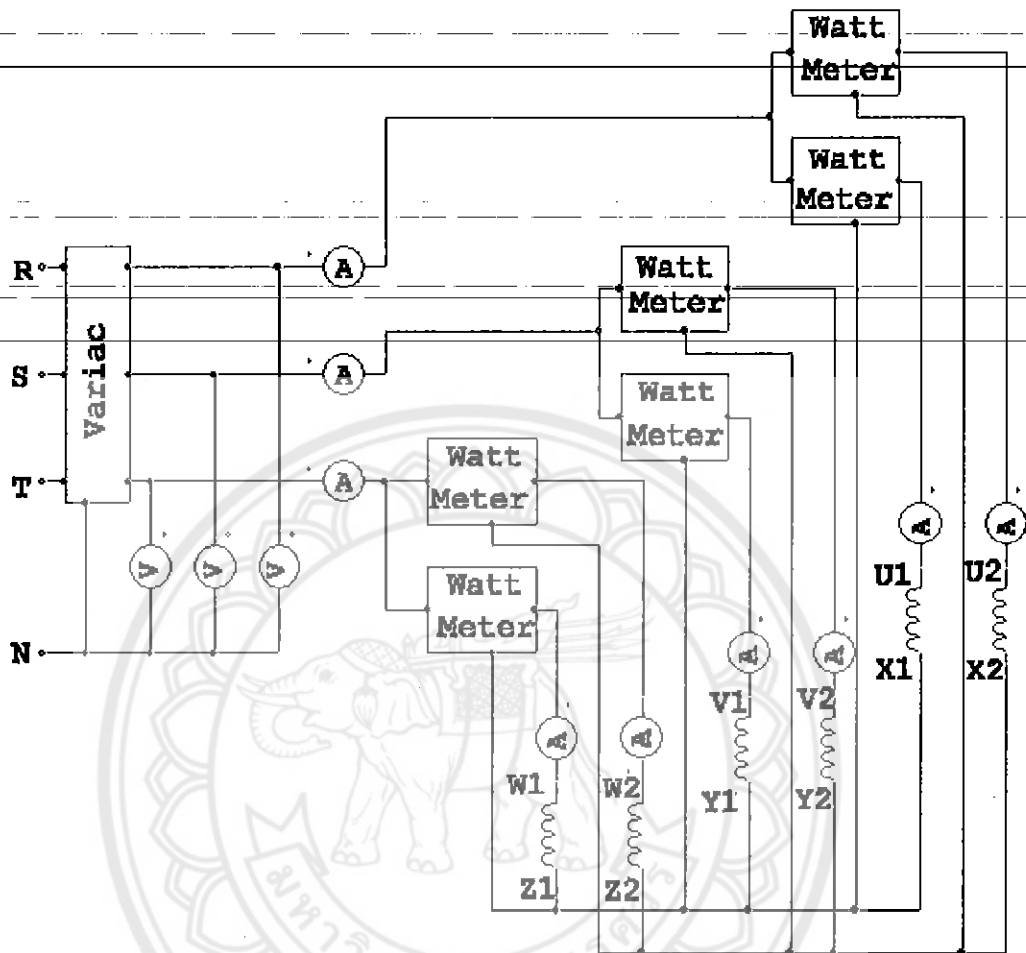


รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

วงจรการทดสอบรูปที่ 3.4 การทดสอบขณะใช้ภาระทางกลจะใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 3 ตัว ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส แอมมิเตอร์กระแสสลับ 3 ตัวมีหน้าที่วัดกระแสเฟสถูกต้องเข้ากับปลายขดลวดเตอร์ด้านเข้าคือ ปลาย U, V และ W มอเตอร์ต่อแบบ Star-Isolated-Neutral ดังนั้นปลายขดลวดเตอร์ด้านออกได้แก่ ปลาย X, Y และ Z จึงต่อเข้าด้วยกัน ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าแต่ละเฟสโดยปรับ Variac ตามสถานะไม่สมดุลทั้ง 4 กรณี และ 5 ระดับเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล ค่าความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์อ่านค่าได้จาก Tachometer

สำหรับการทดสอบขณะใช้ภาระทางกลจะติดตั้งชุดขับภาระทางกลเข้ากับเพลลาของโรเตอร์ ทำการทดสอบโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่เป็นโหลด ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบ แล้วทำการปรับโหลดตามต้องการ โดยปรับแรงดันขาเข้าของมอเตอร์กระแสตรงตามต้องการที่ระดับจนครบ 5 ระดับ บันทึกค่ากระแสกำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส ความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือจึงนำทฤษฎีส่วนประกอบสมมาตรมาเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ทดสอบ

### 3.2.2 การทดสอบกับกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบกับกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

วงจรการทดสอบรูปที่ 3.5 ทำการขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเดียวกัน 2 ตัว การทดสอบขณะไร้ภาระทางกลใช้วัดคีมเตอร์ 1 เฟส 6 ตัว วัดค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสและแอมป์มิเตอร์กระแสสลับ 6 ตัว มีหน้าที่วัดกระแสเฟสถูกต้องเข้ากับปลายขดลวดเตอร์ด้านเข้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว ได้แก่ ปลาย  $U_1, U_2, V_1, V_2, W_1$  และ  $W_2$  เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวต่อแบบ Star Isolated Neutral ดังนั้นขดลวดสเตอร์ด้านนอกได้แก่ปลาย  $X_1, Y_1$  และ  $Z_1$  จึงต่อเข้าด้วยกันเช่นเดียวกับปลาย  $X_2, Y_2$  และ  $Z_2$  (จุดต่อรวม สตาร์ คั่นจุดกัน)

เพื่อที่จะวัดค่ากระแสรวมของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในแต่ละเฟสจึงต่อแอมป์มิเตอร์กระแสสลับอีก 3 ตัวไว้ที่แต่ละเฟสก่อนถึงจุดต่อขนาครหว่างปลายขดลวดเตอร์ด้านเข้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าแต่ละเฟสโดยปรับ Variac ตาม

สภาวะความไม่สมดุลทั้ง 3 กรณีและ 5 ระดับเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล ค่าความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัวอ่านค่าได้จาก Tachometer

สำหรับการทดสอบขณะขับภาระทางกลจะติดตั้งชุดขับภาระทางกลเข้ากับเพลลาของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 ตัว ทำการทดสอบโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่เป็นโหลด ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบ แล้วทำการปรับโหลดตามต้องการโดยปรับแรงดันขาเข้าของมอเตอร์กระแสตรงทีละระดับจนครบ 5 ระดับ บันทึกค่ากระแสเฟสรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำในแต่ละเฟส ค่ากระแสเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ ค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1 ค่าความเร็วทางกลที่เพลลาของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- หมายเหตุ**
- มอเตอร์ที่ทำการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด  $\frac{1}{2}$  แรงม้า
  - ขนาดแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า 380 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส)
  - ความถี่ระบบไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์
  - โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก
  - มอเตอร์ต่อแบบ Star Isolated Neutral
  - มอเตอร์มีลำดับเฟส ABC (มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองเข้าไปทางด้านเพลลา)
  - สถานที่ทำการทดสอบไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิของสถานที่ทำการทดสอบและขณะทำการทดสอบมอเตอร์มีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส

### 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า	3	ตัว
2) มอเตอร์กระแสตรง	1	ตัว
3) วัดคีมเตอร์ 1 เฟส	6	ตัว
4) แอมป์มิเตอร์กระแสสลับ	9	ตัว
5) โวลต์มิเตอร์กระแสสลับ	3	ตัว
6) (Variac) จ่ายกระแสไฟฟ้า	2	ตัว
7) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) พร้อม โพรบ(Probe) 2 เส้น	1	ชุด
8) สายไฟฟ้าต่อวงจร	60	เส้น
9) แผงตัวต้านทานสำหรับวัดกระแส	1	ชุด
10) ทาโคมิเตอร์ (Tachometer)	1	เครื่อง
11) เครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer	1	ตัว
12) แท่นวางมอเตอร์ขณะทดสอบการขับภาระทางกล	2	แท่น

#### รูปการทดลอง



รูปที่ 3.6 การทดสอบมอเตอร์

## บทที่ 4

### ผลที่ได้จากการทำการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบหาจรรยาสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

##### 4.1.1 มอเตอร์ตัวที่ 1

##### ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

ตารางที่ 4.1.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

V <sub>dc</sub> (V)	12	14	16	18	20
I <sub>dc</sub> (A)	0.186	0.217	0.248	0.279	0.309
R <sub>1</sub> (Ω)	64.51	64.51	64.51	64.74	64.72

จาก  $R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ  $R_1 = 64.61 \Omega$

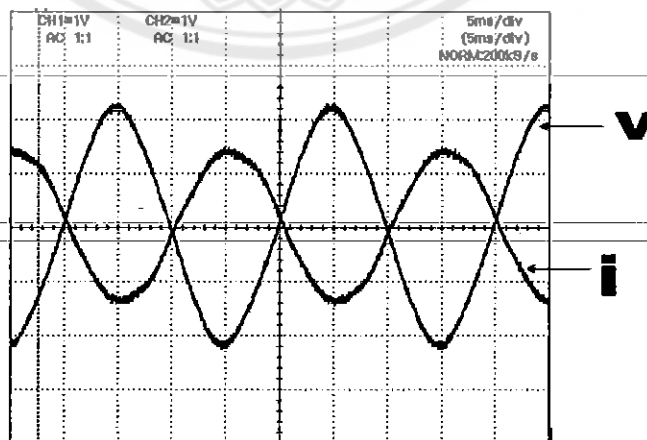
การทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

1) ผลการทดสอบขณะไม่มีโหลด

$V_0 = 220 \text{ V}$  (พิกัดคิกคาไฟฟ้ามอเตอร์)  $I_0 = 0.174 \text{ A}$

$\phi_0 = 84.89^\circ$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \Omega$



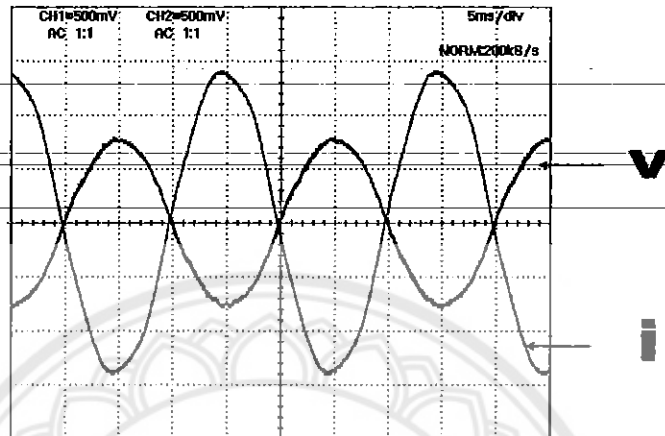
รูปที่ 4.1.1.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 1

2) ผลการทดสอบ โดยการยึด โรเตอร์อยู่กับที่

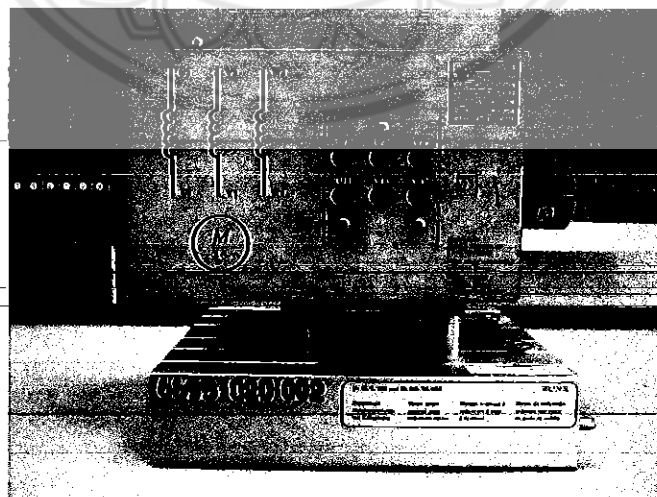
$$V_b = 206 \text{ V}$$

$$I_b = 1.1 \text{ A (พิกัดกระแสมอเตอร์)} \quad \phi_b = 49.45^\circ$$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \ \Omega$



รูปที่ 4.1.1.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะล๊อคโรเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ 4.1.1.3 มอเตอร์ที่ใช่ทดสอบตัวที่ 1

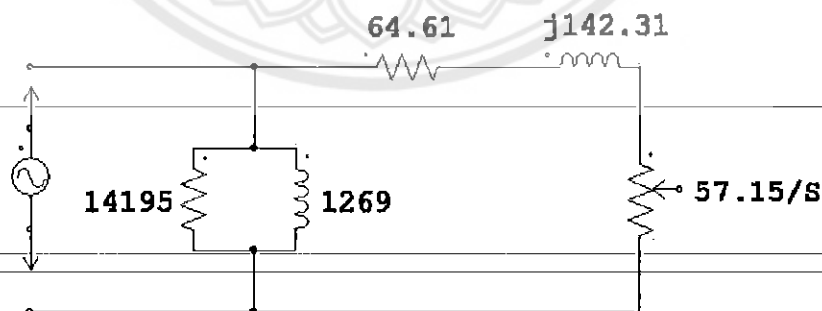
วงจรมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ

No - load test

	$V_0 = 220 \text{ V}$	$I_0 = 0.174 \text{ A}$	$\phi_0 = 84.89^\circ$
จะได้	$R_c = \frac{V_0}{I_0 \cos \phi_0}$	$= \frac{220}{0.174 \cos 84.89}$	$= 14195 \ \Omega$
	$X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \phi_0}$	$= \frac{220}{0.174 \sin 84.89}$	$= 1269 \ \Omega$

Blocked - rotor test

	$V_b = 206 \text{ V}$	$I_b = 1.1 \text{ A}$	$\phi_b = 49.45^\circ$
จะได้	$Z_b = \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\phi_b}$	$= \frac{206 \angle 0^\circ}{1.1 \angle -49.45}$	$= 187.3 \angle 49.45^\circ$
	$Z_b = R_b + jX_b$	$= 187.3 \angle 49.45^\circ$	$= 121.76 + j142.31 \ \Omega$
	$R_b = R_1 + R_2$	$= 121.76 \ \Omega$	$X_b = X_1 + X_2 = 142.31 \ \Omega$
และจะได้	$R_2 = R_b - R_1$	$= 121.76 - 64.61$	$= 57.15 \ \Omega$



รูปที่ 4.1.1.4 วงจรมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 1



## 4.1.2 มอเตอร์ตัวที่ 2

## ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

ตารางที่ 4.1.2 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

V <sub>dc</sub> (V)	12	14	16	18	20
I <sub>dc</sub> (A)	0.097	0.11	0.13	0.14	0.16
R <sub>1</sub> (Ω)	123.71	127.27	123.07	128.57	125

จาก  $R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ  $R_1 = 125.52 \Omega$

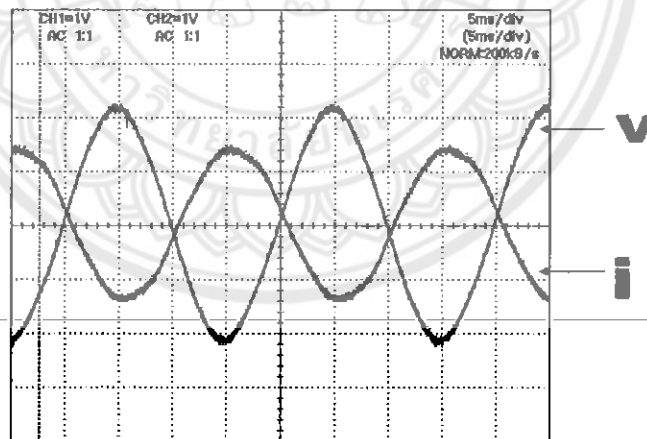
การทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

1) ผลการทดสอบขณะไม่มีโหลด

$V_0 = 220 \text{ V}$  (พิกัดศักดาไฟฟ้ามอเตอร์)  $I_0 = 0.171 \text{ A}$

$\varphi_0 = 75.52^\circ$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \Omega$



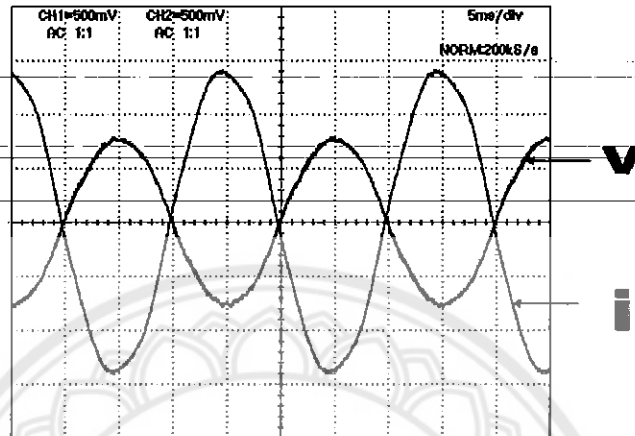
รูปที่ 4.1.2.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 2

2) ผลการทดสอบ โดยการชด โครเตอร์อยู่กับที่

$$V_b = 216 \text{ V}$$

$$I_0 = 1.15 \text{ A (พิกัดกระแสมอเตอร์)} \quad \phi_b = 41.40^\circ$$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \ \Omega$



รูปที่ 4.1.2.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะล๊อคโรเตอร์ตัวที่ 2



รูปที่ 4.1.2.3 มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบตัวที่ 2

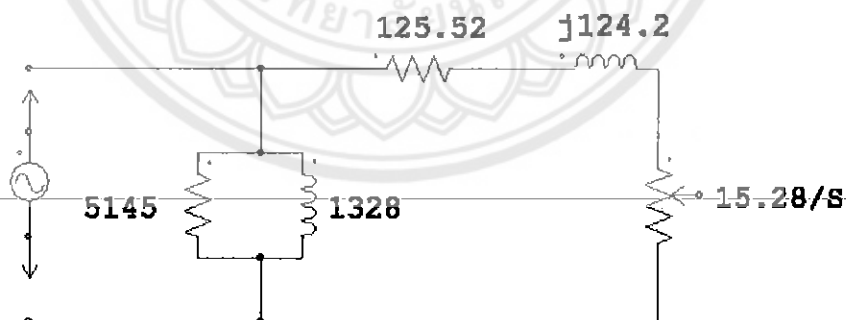
วงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ

No – load test

	$V_0 = 220 \text{ V}$	$I_0 = 0.171 \text{ A}$	$\phi_0 = 75.52^\circ$
จะได้	$R_c = \frac{V_0}{I_0 \cos \phi_0}$	$= \frac{220}{0.171 \cos 75.52}$	$= 5145 \ \Omega$
	$X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \phi_0}$	$= \frac{220}{0.171 \sin 75.52}$	$= 1328 \ \Omega$

Blocked – rotor test

	$V_b = 216 \text{ V}$	$I_b = 1.15 \text{ A}$	$\phi_b = 41.40^\circ$
จะได้	$Z_b = \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\phi_b}$	$= \frac{216 \angle 0^\circ}{1.15 \angle -41.40^\circ}$	$= 187.82 \angle 41.40^\circ$
	$Z_b = R_b + jX_b$	$= 187.82 \angle 41.40^\circ$	$= 140.8 + j124.20 \ \Omega$
	$R_b = R_1 + R_2$	$= 140.8 \ \Omega$	$X_b = X_1 + X_2 = 124.20 \ \Omega$
และจะได้	$R_2 = R_b - R_1$	$= 140.8 - 125.52 = 15.28 \ \Omega$	



รูปที่ 4.1.2.4 วงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 2

### 4.1.3 มอเตอร์ตัวที่ 3

#### ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

ตารางที่ 4.1.3 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

Vdc (V)	12	14	16	18	20
Idc (A)	0.22	0.25	0.29	0.33	0.36
R1(Ω)	54.54	54.6	54.6	54.6	55.5

จาก  $R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ  $R_1 = 54.6 \Omega$

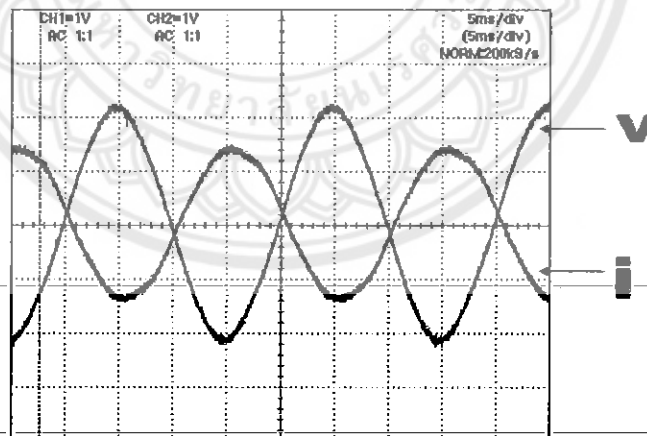
การทดสอบขณะไม่มีโหลดและการทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

1) ผลการทดสอบขณะไม่มีโหลด

$V_0 = 220 \text{ V}$  (พิกัดสัปดาห์ไฟฟ้ามอเตอร์)  $I_0 = 0.189 \text{ A}$

$\varphi_0 = 87.07^\circ$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \Omega$



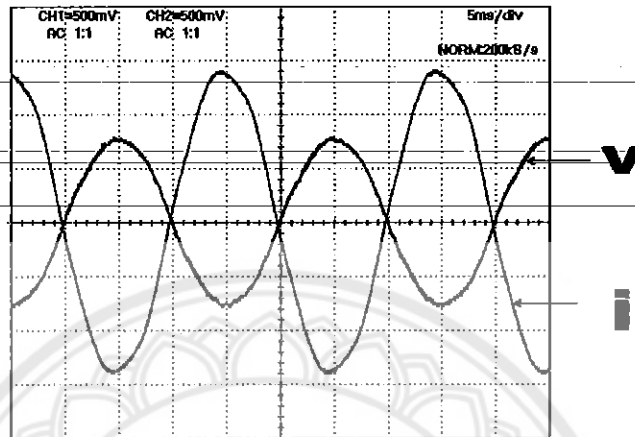
รูปที่ 4.1.3.1 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดตัวที่ 3

2) ผลการทดสอบ โดยการชดโรเตอร์อยู่กับที่

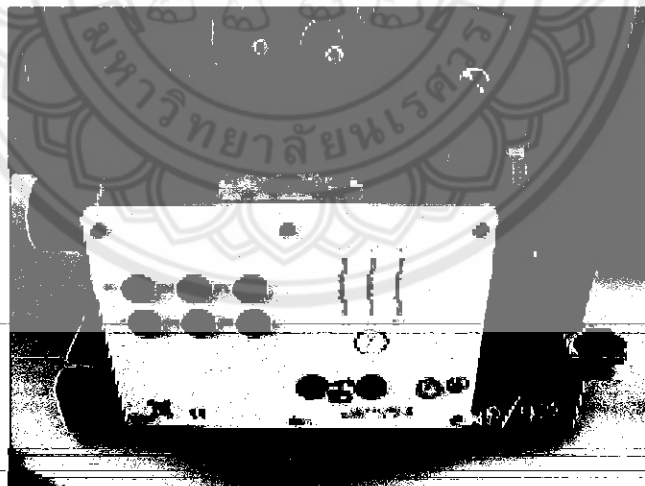
$$V_b = 181 \text{ V}$$

$$I_0 = 1.05 \text{ A (พิกัดกระแสมอเตอร์)} \quad \phi_b = 50.20^\circ$$

ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อวัดกระแส =  $10 \ \Omega$



รูปที่ 4.1.3.2 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะล๊อคโรเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ 4.1.3.3 มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบตัวที่ 3

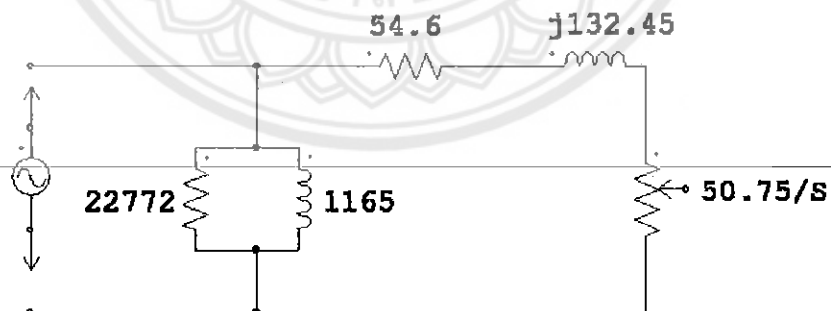
วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ

No - load test

	$V_0 = 220 \text{ V}$	$I_0 = 0.189 \text{ A}$	$\phi_0 = 87.07^\circ$
จะได้	$R_c = \frac{V_0}{I_0 \cos \phi_0}$	$= \frac{220}{0.189 \cos 87.07}$	$= 22772 \ \Omega$
	$X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \phi_0}$	$= \frac{220}{0.189 \sin 87.07}$	$= 1165 \ \Omega$

Blocked - rotor test

	$V_b = 181 \text{ V}$	$I_b = 1.05 \text{ A}$	$\phi_b = 50.20^\circ$
จะได้	$Z_b = \frac{V_b \angle 0^\circ}{I_b \angle -\phi_b}$	$= \frac{181 \angle 0^\circ}{1.05 \angle -50.20^\circ}$	$= 172.4 \angle 50.20^\circ$
	$Z_b = R_b + jX_b$	$= 172.4 \angle 50.20^\circ$	$= 110.35 + j132.45 \ \Omega$
	$R_b = R_1 + R_2$	$= 110.35 \ \Omega$	$X_b = X_1 + X_2 = 132.45 \ \Omega$
และจะได้	$R_2 = R_b - R_1$	$= 110.35 - 54.6 = 50.75 \ \Omega$	



รูปที่ 4.1.3.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตัวที่ 3

## 4.2 ค่าปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล

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 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไร้ภาระทางกล

#### 4.3.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1

ตารางที่ 4.3.1 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1 ขณะไร้ภาระทางกล

กรณี	I (A)			P (W)			Speed
	Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc	(rpm)
Balance Voltage	0.183	0.178	0.184	5	5.4	6	1499
1Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	0.168	0.183	0.197	4	9.8	4.2	1503
1Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	0.160	0.184	0.200	3	11	3.8	1500
1Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	0.154	0.184	0.207	2	12	3	1492
1Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	0.146	0.185	0.212	1	13.8	2.2	1460
1Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	0.141	0.186	0.217	0.2	14	1.8	1458
2Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	0.178	0.169	0.195	2.2	8	7	1500
2Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	0.176	0.163	0.199	1.8	8.2	7.8	1498
2Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	0.174	0.155	0.204	0	8.4	8.4	1498
2Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	0.172	0.148	0.207	0	9.6	9.8	1492
2Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	0.171	0.144	0.210	0	9.8	10	1484
1Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	0.182	0.184	0.189	5	6.2	5.6	1498
1Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	0.190	0.185	0.185	6	5	6.2	1501
1Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	0.198	0.186	0.180	7.6	3.6	7	1499
1Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	0.205	0.187	0.174	8.4	1.8	8	1496
1Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	0.213	0.189	0.169	10	0.2	8.2	1498
2Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	0.184	0.182	0.188	5.6	6	6	1499
2Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	0.186	0.191	0.184	7	5.6	5.2	1500
2Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	0.190	0.199	0.179	9.8	4.2	4	1498
2Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	0.195	0.207	0.175	10.4	3.8	3.8	1492
2Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	0.198	0.216	0.171	12.4	3	3	1499



### 4.3.2 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 2

ตารางที่ 4.3.2 ตารางแสดงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 2 ขณะไว้ภาระทางกล

กรณี	I (A)			P (W)			Speed (rpm)
	Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc	
Balance Voltage	0.198	0.190	0.198	6	6	7	1496
1Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	0.181	0.194	0.213	4	11.6	6	1499
1Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	0.175	0.193	0.219	3.6	12	6	1497
1Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	0.169	0.193	0.223	2.2	14	5.6	1497
1Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	0.162	0.193	0.229	1	15	4.4	1495
1Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	0.153	0.194	0.236	0	17	4	1495
2Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	0.197	0.177	0.211	2.2	8.4	10	1503
2Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	0.193	0.171	0.213	2	8.8	10.2	1500
2Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	0.192	0.163	0.217	0.2	9	11.6	1497
2Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	0.190	0.157	0.220	0	10	12	1497
2Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	0.190	0.150	0.225	0	10	13	1497
1Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	0.198	0.195	0.201	6.4	7	8	1497
1Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	0.206	0.196	0.196	8	6	8.2	1499
1Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	0.214	0.199	0.190	10	4	9	1497
1Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	0.223	0.201	0.184	10.4	2	10	1498
1Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	0.232	0.204	0.179	12	1	10.2	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	0.200	0.196	0.199	7	7.6	8	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	0.203	0.204	0.195	9	6.2	7	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	0.206	0.214	0.192	10.2	6	6	1492
2Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	0.207	0.223	0.187	13.6	6	5	1494
2Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	0.212	0.234	0.182	16	4.4	4	1500

#### 4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน สถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะไร้ภาระทางกล

ตารางที่ 4.4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไร้ภาระ  
ทางกล

กรณี	I รวม (A)			II (A)			I2 (A)		
	Ia	Ib	Ic	Ia	Ib	Ic	Ia	Ib	Ic
Balance Voltage	0.378	0.360	0.387	0.181	0.175	0.187	0.197	0.185	0.200
1ØUV1%	0.362	0.369	0.392	0.173	0.179	0.189	0.189	0.190	0.203
1ØUV2%	0.348	0.368	0.403	0.166	0.179	0.194	0.182	0.189	0.209
1ØUV3%	0.332	0.368	0.413	0.159	0.179	0.198	0.173	0.181	0.215
1ØUV4%	0.379	0.369	0.421	0.152	0.180	0.202	0.167	0.189	0.219
1ØUV5%	0.305	0.370	0.433	0.145	0.181	0.208	0.160	0.189	0.225
2ØUV1%	0.373	0.343	0.394	0.178	0.167	0.190	0.195	0.176	0.204
2ØUV2%	0.372	0.324	0.406	0.177	0.158	0.196	0.195	0.166	0.210
2ØUV3%	0.368	0.313	0.411	0.175	0.153	0.198	0.193	0.160	0.213
2ØUV4%	0.366	0.300	0.416	0.174	0.146	0.201	0.192	0.154	0.215
2ØUV5%	0.364	0.283	0.423	0.172	0.138	0.204	0.192	0.145	0.219
1ØOV1%	0.392	0.374	0.371	0.188	0.181	0.179	0.204	0.193	0.192
1ØOV2%	0.408	0.375	0.360	0.196	0.181	0.174	0.212	0.194	0.186
1ØOV3%	0.424	0.379	0.350	0.204	0.182	0.170	0.220	0.197	0.180
1ØOV4%	0.493	0.384	0.341	0.211	0.184	0.166	0.228	0.200	0.175
1ØOV5%	0.455	0.391	0.330	0.219	0.187	0.169	0.236	0.204	0.169
2ØOV1%	0.384	0.378	0.184	0.184	0.183	0.182	0.200	0.195	0.195
2ØOV2%	0.390	0.379	0.188	0.188	0.192	0.178	0.202	0.205	0.191
2ØOV3%	0.396	0.419	0.199	0.191	0.202	0.173	0.205	0.217	0.186
2ØOV4%	0.403	0.443	0.195	0.195	0.213	0.168	0.208	0.230	0.180
2ØOV5%	0.413	0.460	0.200	0.200	0.221	0.163	0.213	0.239	0.176

ตารางที่ 4.4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าตั้งของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้ภาระทางกล

กรณี	P รวม (W)			P1 (W)			P2 (W)		
	Pa	Pb	Pc	Pa	Pb	Pc	pa	Pb	Pc
Balance Voltage	11	20	15	4	6	7	7	4	8
1ØUV1%	11	13	12.5	4	7	6	7	6	6.5
1ØUV2%	9	15	11	3	8	5	6	7	6
1ØUV3%	7	19	9	2	10	4	5	9	4.5
1ØUV4%	5.8	22	8.1	1.8	12	3.6	4	10	4
1ØUV5%	4	25	6	1	13	2	3	12	
2ØUV1%	8	10	16	2	6	8	6	4	8
2ØUV2%	5	11	19	1	7	9	4	4	10
2ØUV3%	3	12	20	0	7	10	3	5	10
2ØUV4%	2	12	22	0	7	10	2	5	12
2ØUV5%	0	13	24	0	8	12	0	5	12
1ØOV1%	16	7	14.5	6	5	7	10	2	7.5
1ØOV2%	18	4	16	7	3	8	11	1	8
1ØOV3%	20	2	18	8	2	9	12	0	9
1ØOV4%	24	0	19.5	10	0	10	14	0	9.5
1ØOV5%	27	0	21	11	0	11	16	0	10
2ØOV1%	16	9	12	6	6	6	10	3	7
2ØOV2%	20	7	10.5	8	5	6	12	2	4.5
2ØOV3%	24	6	8	10	4	4	14	2	4
2ØOV4%	28	6	7	12	4	4	16	2	3
2ØOV5%	33	5	5	14	3	3	19	2	2

ตารางที่ 4.4.3 ตารางแสดงค่าความเร็วของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้ภาระทางกล

กรณี	Speed (rpm)	
	M1	M2
Balance Voltage	1500	1497
1Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	1499	1496
1Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	1499	1497
1Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	1497	1496
1Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	1498	1496
1Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	1499	1495
2Ø - Under Voltage Unbalance 1 %	1498	1495
2Ø - Under Voltage Unbalance 2 %	1496	1495
2Ø - Under Voltage Unbalance 3 %	1499	1497
2Ø - Under Voltage Unbalance 4 %	1500	1497
2Ø - Under Voltage Unbalance 5 %	1500	1498
1Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	1499	1497
1Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	1499	1497
1Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	1500	1498
1Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	1497	1495
1Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	1499	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 1 %	1499	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 2 %	1498	1495
2Ø - Over Voltage Unbalance 3 %	1499	1497
2Ø - Over Voltage Unbalance 4 %	1498	1496
2Ø - Over Voltage Unbalance 5 %	1498	1497

## 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขณะขับภาระทางกล

### 4.5.1 ผลของการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ 1

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

PVUR (%)	Load (%)	I (A)			P (W)			Speed (rpm)	Torque (N-m)
		Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc		
	20%	0.181	0.226	0.202	13	16	17	1477	0.1631
	40%	0.218	0.247	0.229	26	30	27	1452	0.3847
1%	60%	0.287	0.314	0.299	46	48	48	1402	0.7321
	80%	0.383	0.414	0.383	66	70	67	1347	1.0365
	100%	1.143	1.191	1.147	159	169	163	0	Inf
	20%	0.194	0.218	0.193	13	18	16	1475	0.1743
	40%	0.219	0.251	0.223	26	30	26	1449	0.3825
2%	60%	0.278	0.314	0.294	43	48	47	1404	0.7011
	80%	0.411	0.447	0.422	70	77	72	1314	1.1122
	100%	1.122	1.140	0.354	154	165	32	0	Inf
	20%	0.182	0.226	0.210	15	20	15	1475	0.1712
	40%	0.218	0.252	0.229	27	32	28	1447	0.3948
3%	60%	0.281	0.319	0.291	44	51	46	1399	0.6976
	80%	0.396	0.448	0.417	67	78	71	1321	1.0577
	100%	1.112	1.165	1.147	153	168	163	0	Inf
	20%	0.176	0.225	0.198	13	22	13	1476	0.1672
	40%	0.203	0.255	0.235	23	32	26	1453	0.3617
4%	60%	0.260	0.310	0.284	39	50	42	1407	0.6481
	80%	0.364	0.425	0.386	60	74	65	1330	0.9997
	100%	1.112	1.170	1.148	148	170	160	0	Inf
	20%	0.166	0.227	0.248	10	22	15	1477	0.1592
	40%	0.196	0.244	0.232	21	32	24	1452	0.3384
5%	60%	0.256	0.323	0.302	38	52	43	1407	0.6539
	80%	0.373	0.443	0.410	61	79	67	1327	1.0347
	100%	1.084	1.155	1.131	143	168	156	0	Inf

ตารางที่ 4.5.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 2 เฟส (2 $\phi$  - Under Voltage)

PVUR	Load	I (A)			P (W)			Speed	Torque
		Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc		
(%)	(%)							(rpm)	(N-m)
	20%	0.813	0.783	0.808	108	97	113	1479	0.1462
	40%	0.209	0.213	0.226	22	25	26	1458	0.3120
1%	60%	0.269	0.256	0.281	41	40	45	1416	0.6198
	80%	0.360	0.368	0.373	60	64	65	1355	0.9517
	100%	1.150	1.144	1.144	158	160	165	0	Inf
2%	20%	0.188	0.182	0.209	11	16	19	1475	0.1571
	40%	0.212	0.202	0.222	24	24	28	1452	0.3387
	60%	0.261	0.273	0.295	39	44	48	1406	0.6529
	80%	0.382	0.385	0.399	64	67	69	1334	1.0091
	100%	1.119	1.114	1.140	153	157	163	0	Inf
3%	20%	0.191	0.163	0.215	12	15	19	1474	0.1438
	40%	0.209	0.210	0.245	23	29	33	1447	0.3768
	60%	0.269	0.284	0.291	39	46	48	1403	0.6465
	80%	0.367	0.400	0.412	60	70	72	1322	1.0007
	100%	1.099	1.096	1.105	145	154	159	0	Inf
4%	20%	0.190	0.173	0.215	1	16	21	1475	0.1752
	40%	0.202	0.202	0.241	21	27	32	1449	0.3679
	60%	0.265	0.279	0.309	38	46	47	1399	0.6533
	80%	0.381	0.403	0.422	62	70	73	1317	1.0344
	100%	1.063	1.081	1.108	136	150	160	0	Inf
	20%	0.168	0.156	0.222	8	14	20	1477	0.1504
5%	40%	0.193	0.197	0.242	15	25	30	1452	0.3159
	60%	0.244	0.253	0.300	32	40	45	1409	0.5853
	80%	0.359	0.385	0.410	55	66	70	1333	0.9712
	100%	1.056	1.063	1.106	130	144	155	0	Inf

ตารางที่ 4.5.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1 $\emptyset$  - Over Voltage)

PVUR	Load	I (A)			P (W)			Speed	Torque
		Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc		
(%)	(%)						(rpm)	(N-m)	
1%	20%	0.213	0.226	0.191	19	15	16	1478	0.1856
	40%	0.236	0.239	0.222	28	26	26	1453	0.3650
	60%	0.278	0.296	0.268	44	42	42	1414	0.6424
	80%	0.392	0.405	0.376	69	67	66	1342	1.0315
	100%	1.181	1.117	0.267	174	165	32	0	Inf
2%	20%	0.215	0.219	0.186	18	12	17	1479	0.1649
	40%	0.244	0.235	0.212	31	23	26	1456	0.3565
	60%	0.284	0.283	0.267	45	39	43	1418	0.6346
	80%	0.408	0.403	0.386	72	67	68	1344	1.0535
	100%	1.193	1.164	0.583	78	166	86	0	Inf
3%	20%	0.223	0.215	0.190	17	11	18	1480	0.1653
	40%	0.237	0.226	0.214	29	22	28	1458	0.3669
	60%	0.281	0.280	0.269	43	39	46	1420	0.6501
	80%	0.372	0.354	0.365	67	58	65	1364	0.9834
	100%	1.197	1.075	0.226	181	159	29	0	Inf
4%	20%	0.227	0.215	0.191	20	12	19	1479	0.1798
	40%	0.236	0.234	0.214	26	21	29	1458	0.3300
	60%	0.287	0.272	0.269	45	38	47	1419	0.6460
5%	80%	0.393	0.382	0.368	71	64	67	1359	1.0281
	100%	1.224	1.204	1.169	188	170	172	0	Inf
5%	20%	0.221	0.218	0.158	19	10	20	1474	0.1666
	40%	0.246	0.220	0.214	30	22	31	1453	0.3733
	60%	0.292	0.277	0.265	46	39	45	1418	0.6432
	80%	0.400	0.372	0.563	72	60	66	1355	1.0027
	100%	1.213	1.049	0.180	187	151	16	0	Inf

ตารางที่ 4.5.4 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 2 เฟส (2 $\phi$  - Over Voltage)

PVUR	Load	I (A)			P (W)			Speed	Torque
		Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc		
(%)	(%)							(rpm)	(N-m)
	20%	0.203	0.198	0.202	18	16	17	1475	0.1870
	40%	0.220	0.208	0.220	27	24	26	1453	0.3446
1%	60%	0.280	0.279	0.272	45	45	44	1412	0.6735
	80%	0.382	0.382	0.377	69	66	65	1345	1.0181
	100%	1.153	1.166	1.160	172	172	167	0	Inf
2%	20%	0.209	0.194	0.201	19	13	15	1477	0.1653
	40%	0.230	0.221	0.217	30	25	25	1453	0.3645
	60%	0.280	0.271	0.265	46	41	40	1414	0.6358
	80%	0.358	0.356	0.344	64	62	58	1359	0.9069
	100%	1.162	1.172	1.166	177	173	169	0	Inf
3%	20%	0.219	0.209	0.181	18	14	11	1480	0.1532
	40%	0.237	0.218	0.208	29	21	22	1461	0.3291
	60%	0.280	0.261	0.244	43	38	35	1430	0.5871
	80%	0.359	0.328	0.323	63	55	56	1382	0.9069
	100%	1.230	0.999	0.180	189	144	8	0	Inf
4%	20%	0.230	0.213	0.184	22	13	16	1477	0.1878
	40%	0.248	0.220	0.200	33	23	22	1456	0.3523
	60%	0.296	0.275	0.256	48	40	38	1423	0.6284
	80%	0.377	0.358	0.341	70	62	59	1370	0.9839
	100%	1.235	1.229	1.189	194	185	174	0	Inf
	20%	0.215	0.218	0.185	22	14	13	1477	0.1710
5%	40%	0.255	0.235	0.200	34	24	24	1458	0.3687
	60%	0.299	0.278	0.245	50	39	37	1423	0.6235
	80%	0.387	0.359	0.327	74	61	57	1369	0.9846
	100%	0.260	1.247	1.192	206	191	174	0	Inf



ตารางที่ 4.5.5 สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล

Load (%)	I (A)			P (W)			Speed (rpm)	Torque (N-m)
	Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc		
20%	0.218	0.207	0.187	17	16	17	1477	0.1734
40%	0.224	0.228	0.217	25	26	27	1454	0.3418
60%	0.281	0.273	0.263	42	42	42	1416	0.6192
80%	0.371	0.373	0.359	63	65	63	1355	0.9648
100%	1.146	1.165	1.151	167	167	166	0	Inf



## บทที่ 5

# บทสรุปและวิจารณ์โครงการ

### 5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

#### 5.1.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะใช้ภาระทางกล

เมื่อจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าไม่สมดุลสภาวะต่าง ๆ ให้มอเตอร์ตัวเดียว สังเกตแนวโน้มน้ำค่ากระแส และกำลังไฟฟ้าตามเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้นได้ดังนี้

สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส กระแสในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ (เฟส A) มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าในเฟสอื่นมีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับกำลังไฟฟ้าในเฟส B มีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังไฟฟ้าในเฟส C มีแนวโน้มน้ำลดลงเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าในเฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส กระแสในเฟส A และ B มีแนวโน้มน้ำลดลง ในขณะที่กระแสในเฟส C มีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังไฟฟ้าในเฟส A มีค่าลดลงแต่กำลังไฟฟ้าในเฟส B และ C มีค่าเพิ่มขึ้น

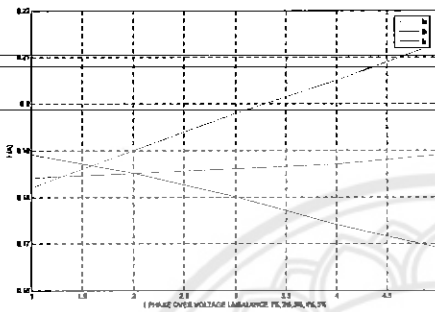
สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส กระแสและแรงดันไฟฟ้าในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ (เฟส A) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสในเฟส B มีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนกระแสในเฟส C มีแนวโน้มน้ำลดลง สำหรับกำลังไฟฟ้าในเฟส A และ C มีค่าเพิ่มขึ้นแต่กำลังไฟฟ้าในเฟส B มีค่าลดลง

สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส กระแสเข้ามอเตอร์ในเฟสที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ (เฟส A และ B) มีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงในเฟส B และ C

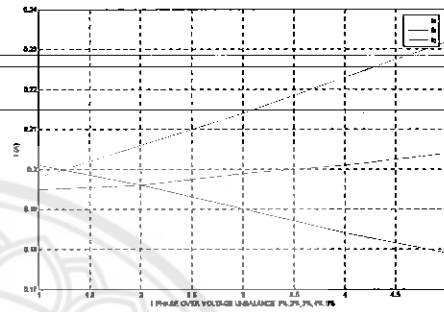
ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าในแต่ละเฟสของมอเตอร์ที่นำมาต่อขนานกัน และกระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ารวมในแต่ละเฟส ในสภาวะแรงไฟฟ้าไม่สมดุลต่างๆ มีแนวโน้มน้ำเช่นเดียวกับค่ากระแส และกำลังไฟฟ้าจากการทดสอบมอเตอร์ตัวเดียวในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสภาวะเดียวกัน และมีค่าเป็นสองเท่าของค่ากระแส และกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าจากการทดสอบมอเตอร์ตัวเดียวเนื่องจาก มอเตอร์ที่นำมาขนานกันนั้นเป็นมอเตอร์ขนาดเดียวกันกับมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกรณีที่ไม่ได้ต่อขนาน

ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2  
สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส (1Ø - Over Voltage)

กระแส (A)



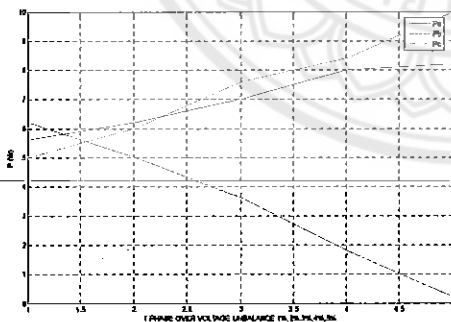
มอเตอร์ตัวที่ 1



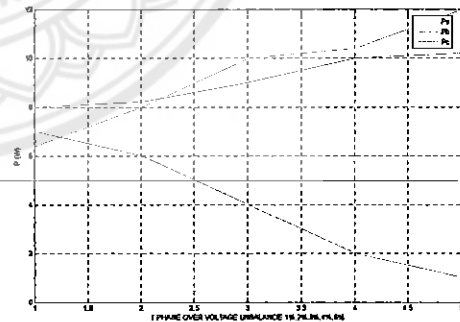
มอเตอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้  
ภาระ ทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส

กำลังไฟฟ้า (W)



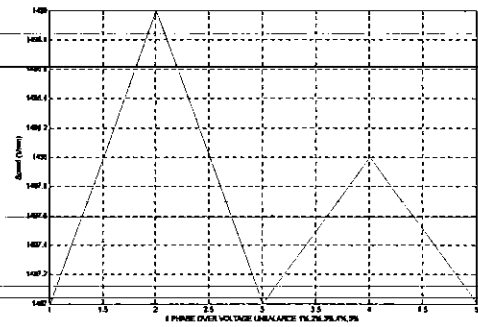
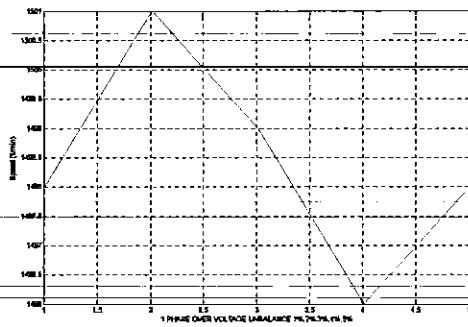
มอเตอร์ตัวที่ 1



มอเตอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระ  
ทางกลที่สถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส

ความเร็ว (1/Min)



มอเตอร์ตัวที่ 1

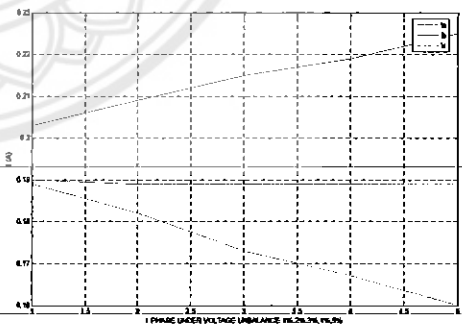
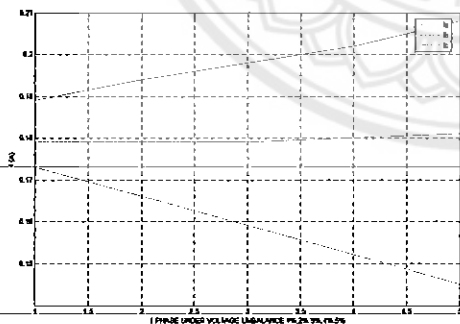
มอเตอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไร้ภาระทางกลที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 1 เฟส

ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะต่อขนานกัน

สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส (1Ø - Under Voltage)

กระแส (A)

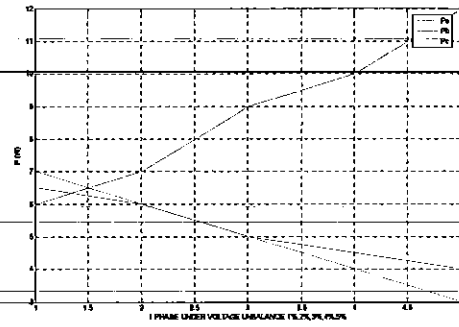
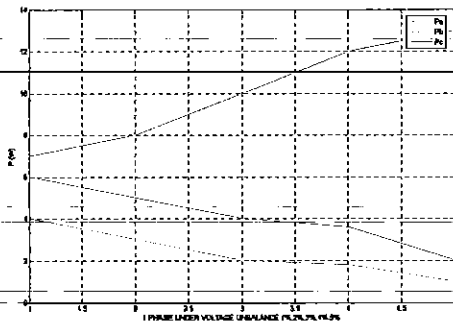


มอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนานกัน ขณะไร้ภาระทางกลที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

กำลังไฟฟ้า (W)

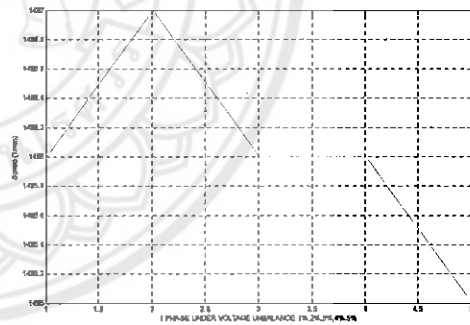
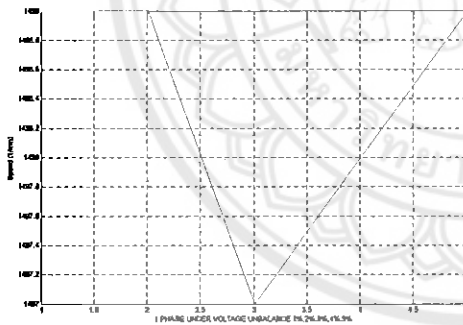


มอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนานกัน ขณะไว้ภาระทางกลที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

ความเร็ว (1/min)



มอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2

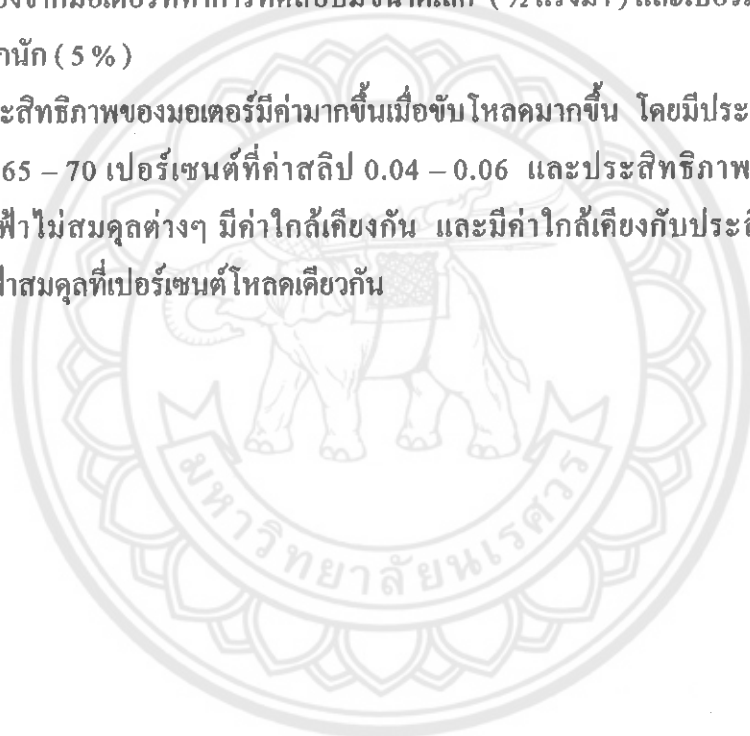
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ต่อขนานกัน ขณะไว้ภาระทางกลที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

### 5.1.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการทดสอบมอเตอร์ในสถานะขับภาระทางกล

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสถานะต่างๆ ให้กับมอเตอร์ พบว่าค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โหลดคล้ายกับขณะไร้ภาระทางกล สำหรับการคำนวณค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่างๆ จากวิธีองค์ประกอบสมมาตรมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าจากการทดสอบ

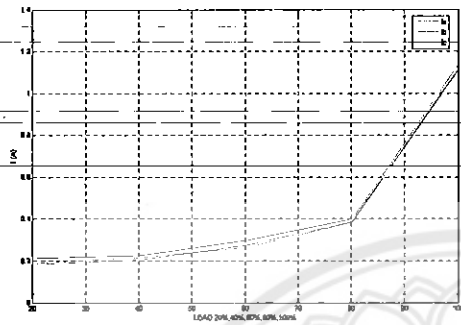
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ของมอเตอร์ตัวที่ 1 และค่าที่ได้จากการคำนวณ เปรียบเทียบระหว่างกรณีแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ และ สูงกว่าปกติที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลค่าเดียวกัน เมื่อทดสอบมอเตอร์ พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และแตกต่างจากการทดสอบในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุลปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมอเตอร์ที่ทำการทดสอบมีขนาดเล็ก ( $\frac{1}{2}$  แรงม้า) และเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลยังไม่สูงมากนัก (5%)

ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่ามากขึ้นเมื่อขับโหลดมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 65 – 70 เปอร์เซ็นต์ที่ค่าสลิป 0.04 – 0.06 และประสิทธิภาพมอเตอร์ในสถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในสถานะแรงดันไฟฟ้าสมดุลที่เปอร์เซ็นต์โหลดเดียวกัน

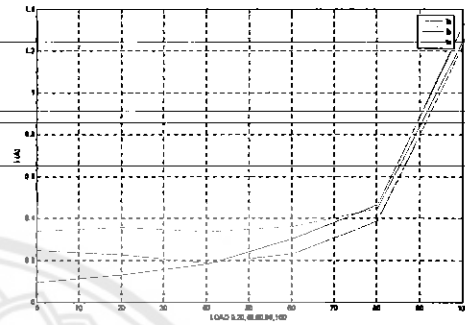


ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าต่างๆระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณของมอเตอร์ตัวที่ 3

กระแส (A)



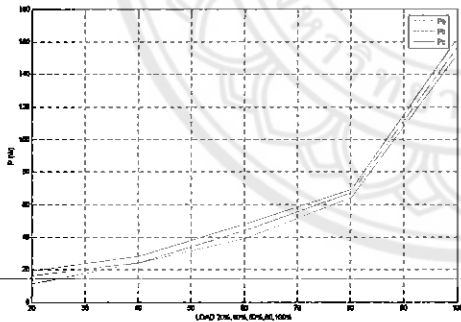
จากการทดลอง



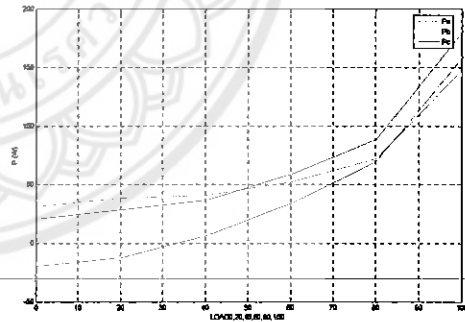
จากการคำนวณ

รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างการคำนวณกับค่าจากการทดลองของมอเตอร์

กำลังไฟฟ้า (W)



จากการทดลอง



จากการคำนวณ

รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างการคำนวณกับค่าจากการทดลองของมอเตอร์

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงการ

- 1) ปัญหาจากอุปกรณ์ในการทดสอบ ได้แก่ อุปกรณ์ในการทดสอบและเครื่องมือวัดที่ชำรุด ส่งผลให้ผลการทดสอบผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนได้
- 2) ปัญหาแรงคั้นในแต่ละเฟสที่ป้อนเข้าเครื่อง Vareaac ไม่คงที่





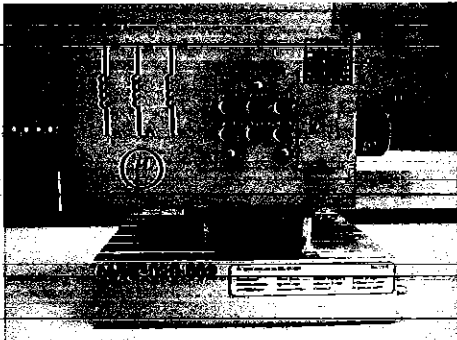
## เอกสารอ้างอิง

- [1] Stephen J. Chapman. **Electric Machines Fundamentals**. 4<sup>th</sup> 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] ชนบูรณ์ ศติภาณุเวช. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง.กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน ).2535
- [5] Engineer Edge. “**Engineering & Drafting Store.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:[http://www.engineersedge.com/.../induction\\_ac\\_motor.htm](http://www.engineersedge.com/.../induction_ac_motor.htm).พ.ศ.2552
- [6] Charlottetown,Prince Edward Island ,Canada “**The Pros and Cons of Having a Motor Rewound.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.wisdompage.com/SEUhtmDOCS/SEU18.htm>. พ.ศ.2544
- [7] Livelypictures. “**Induction Motor.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://livelypictures.blogspot.com/2008/05/induction>.พ.ศ.2551
- [8] EC&M. “**Electrical Design Firms.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:<http://www.ecmweb.com/mag/405ecm08fig1>.พ.ศ.2550
- [9] Kovacs, P.K. Transient Phenomena in Electrical Machines, Elsevier.  
“**Spiral Vector Theory of AC Circuits and Machines.**” [Online]: เข้าถึงจาก/:[http://www.geocities.jp/ps\\_dictionary/yamamura/book2.htm](http://www.geocities.jp/ps_dictionary/yamamura/book2.htm).พ.ศ.2527

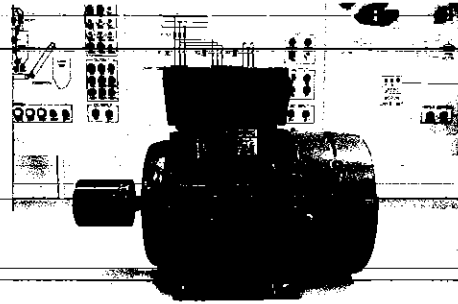




### อุปกรณ์การทดลอง



มอเตอร์เหนี่ยวนำ 373 W (ตัวที่ 1)



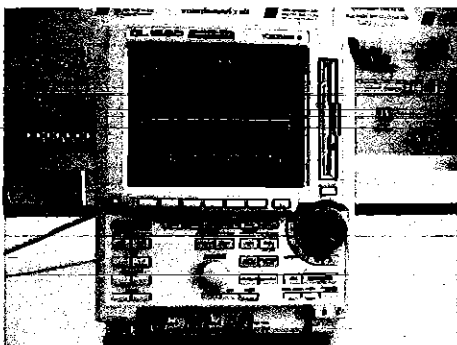
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 373 W (ตัวที่ 2)



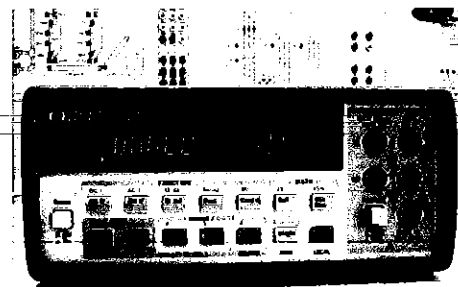
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 373 W (ตัวที่ 2)



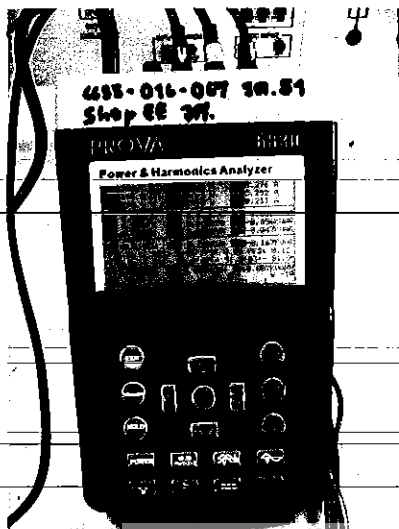
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 373 W  
และมอเตอร์กระแสตรง(โหลด)



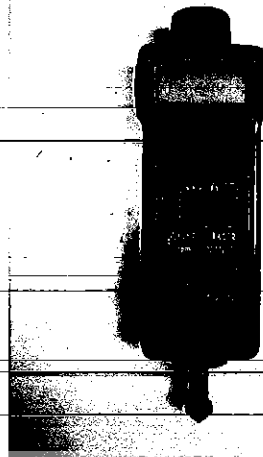
ออสซิลโลสโคป



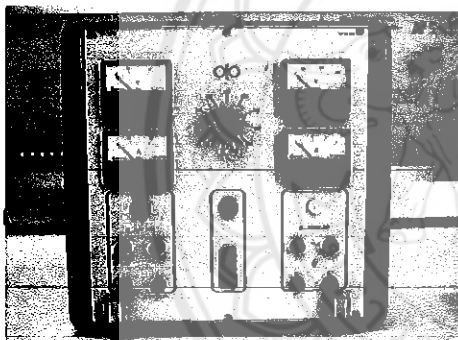
Multimeter



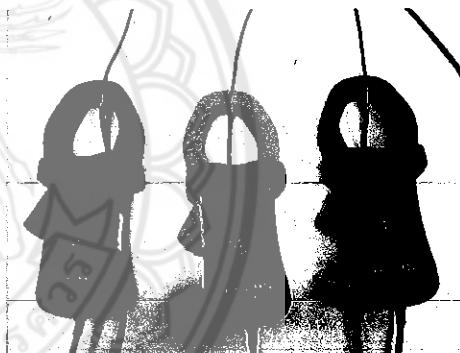
เครื่องวัด Power & Harmonics Analyzer



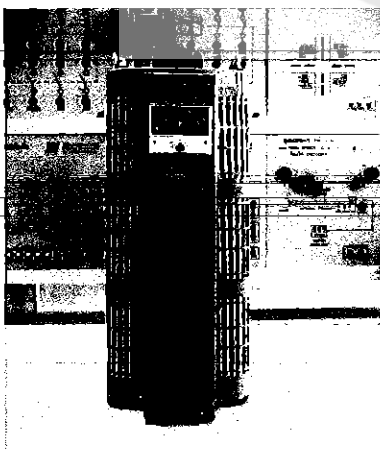
ทาโอมิเตอร์



Power Supply



แอมป์วัดกระแส



Variac



**ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MATLAB****1.) การเขียนกราฟกระแสไฟฟ้า**

```
ia=[0.181 0.218 0.287 0.383 1.143];
```

```
ib=[0.226 0.247 0.314 0.414 1.191];
```

```
ic=[0.202 0.229 0.229 0.383 1.147];
```

```
a=[20 40 60 80 100];
```

```
plot(a,ia,a,ib,a,ic)
```

```
ylabel('I (A)')
```

```
xlabel('LOAD 20%,40%,60%,80%,100%')
```

```
grid on
```

**2.) การเขียนกราฟกำลังไฟฟ้า**

```
pa=[13 26 46 66 159];
```

```
pb=[16 30 48 70 169];
```

```
pc=[17 27 48 67 163];
```

```
a=[20 40 60 80 100];
```

```
plot(a,pa,a,pb,a,pc)
```

```
ylabel('P (W)')
```

```
xlabel('LOAD 20%,40%,60%,80%,100%')
```

```
grid on
```

**3.) การเขียนกราฟความเร็วมอเตอร์**

```
Speed=[1477 1452 1402 1347 0];
```

```
a=[20 40 60 80 100];
```

```
plot(a,Speed)
```

```
ylabel('Speed (1/min)')
```

```
xlabel('LOAD 20%,40%,60%,80%,100%')
```

```
grid on
```

## 4.) การเขียนกราฟ Torque

```
Torque=[0.1631 0.3847 0.7321 1.0365 Inf];
```

```
a=[20 40 60 80 100];
```

```
plot(a,Torque)
```

```
ylabel('Torque (N-m)')
```

```
xlabel('LOAD 20%,40%,60%,80%,100%')
```

```
grid on
```

## 5.) การเขียนกราฟกระแสไฟฟ้าจากสมการส่วนประกอบสมมาตร

```
n=6;
```

```
a=-0.5+0.866i;
```

```
aa=a*a;
```

```
invmeta=1/3*[1 1 1;1 a aa;1 aa a];
```

```
meta=[1 1 1;1 aa a;1 a aa];
```

```
Rc=22772;
```

```
Xm=1165i;
```

```
z1=54.6+66.22i;
```

```
Zmid=(Rc*Xm)/(Rc+Xm);
```

```
slip=[1490 1477 1454 1416 1355 0];
```

```
for k=1:n
```

```
    slip2(1,k)=(1500-slip(1,k))/1500;
```

```
    z2(1,k)=(50.75/slip2(1,k))+66.22i;
```

```
    zm1(1,k)=z1+(Zmid*z2(1,k))/(Zmid+z2(1,k));
```

```
    z2negative(1,k)=13.3/(2-slip2(1,k))+17.75;
```

```
    zm2(1,k)=z1+(Zmid*z2negative(1,k))/(Zmid+z2negative(1,k));
```

```
end
```

```
svan=[220 220 220 220 220];
```

```
svbn=[220 220 220 220 220];
```

```
svcn=[220 220 220 220 220];
```

```
Van=svan;
```

```
Vab=[381 381 381 381 381];
```

```
Vbc=[381 381 381 381 381];
```



```

Vca=[381 381 381 381 381 381];
for k=1:n
    setaAB(1,k)=acos((svan(1,5)^2+svbn(1,5)^2-Vab(1,k)^2)/(2*svan(1,5)*svbn(1,5)));
    setaCA(1,k)=acos((svan(1,5)^2+svcn(1,5)^2-Vca(1,k)^2)/(2*svan(1,5)*svcn(1,5)));
    setaB=-setaAB(1,k)/pi*180;
    setaC=setaCA(1,k)/pi*180;
    Vbn(1,k)=svbn(1,5)*(cos(-setaAB(1,k))+sin(-setaAB(1,k))*i);
    Vcn(1,k)=svcn(1,5)*(cos(setaCA(1,k))+sin(setaCA(1,k))*i);
    Van012=invmeta*[Van(1,5);Vbn(1,k);Vcn(1,k)];
    Ia012=[0;Van012(2,1)/zm1(1,k);Van012(3,1)/zm2(1,k)];
    Iabc=meta*Ia012;
    Ia(1,k)=abs(Iabc(1,1));
    Ib(1,k)=abs(Iabc(2,1));
    Ic(1,k)=abs(Iabc(3,1));
end
weight=[0 20 40 60 80 100];
plot(weight,Ia,weight,Ib,weight,Ic);
ylabel('I (A)')
xlabel('LOAD 0,20,40,60,80,100')
grid on

```

6.) การเขียนกราฟกำลังไฟฟ้าจากสมการส่วนประกอบสมมาตร

n=6;

a=-0.5+0.866i;

aa=a\*a;

invmeta=1/3\*[1 1 1;1 a aa;1 aa a];

meta=[1 1 1;1 aa a;1 a aa];

Rc=22772;

Xm=1165i;

z1=54.6+66.22i;

Zmid=(Rc\*Xm)/(Rc+Xm);

slip=[1490 1477 1454 1416 1355 0];

for k=1:n

slip2(1,k)=(1500-slip(1,k))/1500;

z2(1,k)=(50.75/slip2(1,k))+66.22i;

zm1(1,k)=z1+(Zmid\*z2(1,k))/(Zmid+z2(1,k));

z2negative(1,k)=13.3/(2-slip2(1,k))+17.75;

zm2(1,k)=z1+(Zmid\*z2negative(1,k))/(Zmid+z2negative(1,k));

end

svan=[220 220 220 220 220];

svbn=[220 220 220 220 220];

svcn=[220 220 220 220 220];

Van=svan;

Vab=[381 381 381 381 381 381];

Vbc=[381 381 381 381 381 381];

Vca=[381 381 381 381 381 381];

for k=1:n

setaAB(1,k)=acos((svan(1,5)^2+svbn(1,5)^2-Vab(1,k)^2)/(2\*svan(1,5)\*svbn(1,5)));

setaCA(1,k)=acos((svan(1,5)^2+svcn(1,5)^2-Vca(1,k)^2)/(2\*svan(1,5)\*svcn(1,5)));

setaB=-setaAB(1,k)/pi\*180;

setaC=setaCA(1,k)/pi\*180;

Vbn(1,k)=svbn(1,5)\*(cos(-setaAB(1,k))+sin(-setaAB(1,k))\*i);

Vcn(1,k)=svcn(1,5)\*(cos(setaCA(1,k))+sin(setaCA(1,k))\*i);

```

Van012=invmeta*[Van(1,5);Vbn(1,k);Vcn(1,k)];
Ia012=[0;Van012(2,1)/zm1(1,k);Van012(3,1)/zm2(1,k)];
Iabc=meta*Ia012;
Ia(1,k)=abs(Iabc(1,1));
Ib(1,k)=abs(Iabc(2,1));
Ic(1,k)=abs(Iabc(3,1));
PowerA(1,k)=Van(1,5)*abs(Iabc(1,1))*cos(angle(Iabc(1,1)));
PowerB(1,k)=abs(Vbn(1,k))*abs(Iabc(2,1))*cos(angle(Vbn(1,k))-angle(Iabc(2,1)));
PowerC(1,k)=abs(Vcn(1,k))*abs(Iabc(3,1))*cos(angle(Vcn(1,k))-angle(Iabc(3,1)));
end
PowerA
PowerB
PowerC
Ia
Ib
Ic
weight=[0 20 40 60 80 100];
plot(weight,PowerA,weight,PowerB,weight,PowerC)
grid
xlabel('LOAD0,20,40,60,80,100')
ylabel('P (W)')

```

## ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ นายเกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์  
ภูมิลำเนา 178 ม.15 ต.ไกรโน อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย  
64170

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนไกรโน  
วิทยาคม รังมั่งคดลาภิเษก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail : yai\_2063@hotmail.com



ชื่อ นายเสรี จำลองเพลง  
ภูมิลำเนา 817 ม.1 ต.วัดพริก อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65230  
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนพิษณุโลก  
พิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail : stelectri@hotmail.com