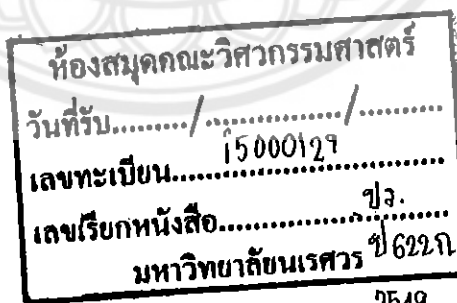




การขับมอเตอร์สามเฟสด้วยแหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว

3 Phase Induction Motor using single phase supply

นายปิยะพันธ์ จันทรแจ้ง รหัส 46361671
นายสุรเชษฐ บุญมาสอน รหัส 44361804



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

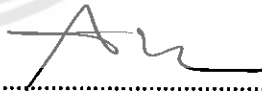
ปีการศึกษา 2549




ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ	การขับเคลื่อนมอเตอร์สามเฟสด้วยแหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายปิยะพันธ์	จันทร์แจ่ม	รหัส 46361671
	นายสุรเชษฐ	บุญมาสอน	รหัส 46361804
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2549		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม


.....ประธานกรรมการ
(ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)


.....กรรมการ
(ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)


.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยคณีย์ ภาชนะพรณ์)

หัวข้อโครงการ	การขับมอเตอร์สามเฟสด้วยแหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายปิยะพันธ์	จันทร์แจ้ง	รหัส 46361671
	นายสุรเชษฐ	บุญมาสอน	รหัส 46361804
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้จะกล่าวถึง มอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส โดยใช้แหล่งจ่ายไฟเฟสเดียวกับ ตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดเฟสไม่สมดุลน้อยที่สุด ที่สภาวะโหลดต่างๆ โดยไม่ใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับเครื่องจักร โดยพื้นฐานแล้วเราจะพิจารณาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และจากผลการทดลองแล้ว จะเปรียบเทียบผลของตัวเก็บประจุที่จะแสดงให้เห็นในโครงการนี้ ค่าความเก็บประจุที่เหมาะสมสามารถเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

Project title 3 Phase Induction Motor using single phase supply
Name Mr. Piyapan Janjang ID. 46361671
 Mr. Surachet Boonmason ID. 46361804
Project advisor Dr. Somyot Kiattivanichvilai
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2006

.....

Abstract

In this project the performance of a three-phase induction motor operating from single-phase supply with a new electronically controlled capacitor using an electronic switch in series with a fixed capacitor to achieve a minimum unbalance of the motor phase voltages at all loading conditions is proposed. No mechanical is used here. Basic system operation, theoretical analysis, simulated and experimental results in comparison with conventional operation using a fixed capacitors are presented in this project. The optimum effective capacitor value can be on-line adjusted at any operating speed by periodically changing the duty cycle of the controlled switch to achieve minimum unbalance in phase voltages to improve the motor performance at different speeds.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่านด้วยกัน
ผู้จัดทำขอถือโอกาสนี้ขอกราบขอบพระคุณ

ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไลซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการสอบทุกๆ ท่านที่ได้
ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในการทำ
โครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยสนับสนุนในด้านการเงิน
และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นายปิยะพันธ์ จันทรแจ่ม
นายสุรเชษฐ บุญมาสอน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่ออังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 งบประมาณของโครงการ	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานการทดลอง	
2.1 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ (3 Phase Induction Motor).....	5
2.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)	27
บทที่ 3 วิธีขมอมอเตอร์สามเฟสด้วยแหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว	
3.1 การต่อคาปาซิเตอร์เข้ามอเตอร์สามเฟส.....	32
3.2 การทดสอบและวัดค่า.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้าโดยใช้ไฟสามเฟส	37
4.2 ผลการทดลองโดยการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร โดยการต่อแบบเดลต้า.....	37
4.3 ผลการทดลองการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบวายโดยใช้ไฟสามเฟส	39
4.4 ผลการทดลองโดยการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร โดยการต่อแบบวาย.....	39
บทที่ 5 สรุปผล	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	44
ประวัติผู้เขียนโครงการ	45



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบเคลด้า.....	38
4.2 ตารางแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบมาย.....	40



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ	5
2.2 ส่วนประกอบมอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ	6
2.3 สเตเตอร์(Stator)ของมอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ	6
2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage Rotor)	7
2.5 ภาพลักษณะแท่งตัวนำที่ฝังอยู่ใน โรเตอร์แบบกรงกระรอก	7
2.6 แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์ (wound rotor)	8
2.7 วงจรเทียบเคียงของ โรเตอร์	11
2.8 วงจรเทียบเคียงจากสมการ 2.16	12
2.9 วงจรเทียบเคียงสเตเตอร์	13
2.10 วงจรเทียบเคียงหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ	14
2.11 วงจรเทียบเคียงที่สอดคล้องกับรูปที่ 2.7a และรูปที่ 2.8b	14
2.12 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินคักชัน	15
2.13 ค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์อินคักชัน	16
2.14 กราฟแสดงคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วในมอเตอร์อินคักชัน 3 เฟส	17
2.15 การทดสอบขณะไม่มีโหลด	20
2.16 วงจรเทียบเคียงของอินคักชันมอเตอร์ในการทดสอบขณะไม่มีโหลด	21
2.17 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินคักชัน โดยไม่ถึครีแอกแทนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	22
2.18 การต่อวงจรเพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุน	24
2.19 การเริ่มหมุนมอเตอร์ โดยการต่อแบบ วาย - เกลด้า	25
2.20 ตัวเก็บประจุ	27
2.21 สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบมีขั้ว(ก) และแบบไม่มีขั้ว(ข)	27
2.22 โครงสร้างตัวเก็บประจุ	28
2.23 ขั้นตอนการประจุ ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	29
2.24 ขั้นตอนการคายประจุ ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	29
2.25 กราฟขนาดของคาปาซิเตอร์ ที่เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์	29
3.1 ลักษณะการต่อที่จุดต่อสายของมอเตอร์สามเฟสแบบวาย และเกลด้า	32
3.2 ลักษณะมอเตอร์สามเฟสและจุดต่อสาย	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	การต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับจุดต่อสายของมอเตอร์แบบวาย 33
3.4	การต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับจุดต่อสายของมอเตอร์แบบเคลด้า 33
3.5	คาปาซิทีปโฮลด์ ที่ใช้ในการทดลอง..... 33
3.6	แหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว 34
3.7	การต่อตัวเก็บประจุ แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์..... 34
3.8	มอเตอร์สามารถหมุนได้เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุที่ได้ค่าที่เหมาะสม 35
3.9	มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกแบบ 4 ขั้ว..... 35
3.10	เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์(Electrodynamometer) 36
3.11	การสอบมอเตอร์ขณะมีโฮลด์ และวัดแรงบิด 36
4.1	ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเคลด้า..... 37
4.2	ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเคลด้า โดยมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมกับวงจร 37
4.3	ภาพแสดงการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเคลด้าที่ขั้วของมอเตอร์..... 37
4.4	กราฟแสดงการทดสอบมอเตอร์ โดยการต่อแบบเคลด้า 39
4.5	ลักษณะการต่อมอเตอร์แบบวาย 39
4.6	ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบวาย โดยมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมกับวงจร 40
4.7	ภาพแสดงการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเคลด้าที่ขั้วของมอเตอร์..... 40
4.8	กราฟแสดงการทดสอบมอเตอร์ โดยการต่อแบบวาย 41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาใช้กับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวก็คือ มอเตอร์จะไม่สามารถเริ่มหมุนออกจากสภาวะหยุดนิ่งโดยใช้ไฟเฟสเดียวได้ แต่วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ เนื่องจากความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีที่จะนำมอเตอร์สามเฟสมาใช้กับงานในระบบไฟเฟสเดียวได้ โดยมีตัวคาปาซิเตอร์เป็นตัวปรับสมดุลของเฟส และพิจารณาถึงผลของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ต่อสมรรถนะของมอเตอร์ เพื่อที่จะได้เงื่อนไขในการเลือกค่าของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของมอเตอร์มากที่สุด

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นและถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากถ้าเราสามารถคัดแปลงเพื่อนำมอเตอร์สามเฟสมาใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสให้ได้ โดยมีความสำคัญ ดังนี้

1. ในชนบทส่วนใหญ่เป็นระบบไฟเฟสเดียว แต่มอเตอร์ที่เราใช้อยู่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งไม่สามารถใช้ร่วมกันได้
2. มอเตอร์สามเฟสมีราคาถูกกว่า และมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์เฟสเดียวในขณะที่แรงม้าเท่ากัน
3. ในกรณีที่เราต้องการใช้มอเตอร์ที่มีแรงม้าสูงๆ มอเตอร์ชนิดเฟสเดียวจะหายากกว่ามอเตอร์สามเฟส

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการของมอเตอร์สามเฟสเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับไฟเฟสเดียว

1.2.2 เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาเวลาไม่มีแหล่งจ่ายไฟชนิดสามเฟส

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำค่าความเก็บประจุต่างๆ มาใช้จะทำให้เกิดผลต่างๆทำหน้าที่เป็นตัวแปลงผันเฟสแบบสถิตหรือตัวทำให้เฟสสมดุลด้วย ค่าความจุเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดชุดสแตเตอร์เกิดการล่าหน้า และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสหรือเปลี่ยนค่าได้

1.2.4 เพื่อศึกษาผลการทำงานของคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์สามเฟส แล้วนำมาคำนวณหาสูตรที่ใช้คำนวณหาค่าคาปาซิเตอร์ ที่จะนำมาต่อเข้ากับมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบข่ายของโครงการ

1.3.1 การต่อพ่วงคาลาปาศิเตอร์เข้าไปในขณะที่มอเตอร์ยังไม่จุกโหดแล้วเปลี่ยนค่าความจุไปเรื่อยๆ จนกระทั่งวัคกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ได้ประมาณ 90% - 95% ของกระแสบนแผ่นป้าย (name plate) ของมอเตอร์นั้นเป็นการใช้ได้

1.3.2 การเลือกค่าความเก็บประจุของคาลาปาศิเตอร์ที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์สามเฟสเพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุด แฟกเตอร์กำลังสูงสุด ประสิทธิภาพสูงสุด เกิด Negative Sequence Voltage (V_p/V_n) น้อยที่สุด

1.3.3 ทดสอบมอเตอร์เพื่อคำนวณหาสูตร ที่นำมาใช้หาค่าคาลาปาศิเตอร์ที่เหมาะสมกับมอเตอร์

1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับระบบการทำงานของมอเตอร์เฟสเดียว และมอเตอร์สามเฟส

1.4.2 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการต่อคาลาปาศิเตอร์เข้าไปที่มอเตอร์สามเฟสแบบสตาร์และเดลต้า

1.4.3 ทดสอบการทำงาน โดยนำคาลาปาศิเตอร์ต่อเข้ากับมอเตอร์สามเฟสแล้วสามารถทำให้มอเตอร์เริ่มหมุน และจุกโหดได้มากที่สุด

1.4.4 ศึกษาและค้นคว้าผลการทดลองของการนำคาลาปาศิเตอร์เข้าไปต่อกับมอเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณหาสูตรหาค่าคาลาปาศิเตอร์ที่ใช้ต่อเข้ากับมอเตอร์ แล้วทำให้มอเตอร์ทำงานได้ดีที่สุด

1.4.5 ทดสอบการทำงาน โดยใช้สูตรหาค่าคาลาปาศิเตอร์

1.4.6 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงการ

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถเข้าใจหลักการของคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์สามเฟส แล้วทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้โดยใช้ไฟเฟสเดียว

1.6.2 สามารถใช้คาปาซิเตอร์ต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟสามเฟส นำไปต่อเข้ากับไฟเฟสเดียว แล้วทำให้มอเตอร์หมุนได้ตามปกติ โดยที่มอเตอร์ไม่เกิดความเสียหาย

1.6.3 สามารถคำนวณหาสูตรที่ใช้หาค่าคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์สามเฟส แล้วสามารถทำให้มอเตอร์หมุนได้โดยเกิดแรงบิดสูงสุด แพลกเตอร์กำลังสูงสุด ประสิทธิภาพสูงสุด ให้เกิด Negative Sequence Voltage (V_p/V_n) น้อยที่สุด

1.7 งบประมาณของโครงการ

1.7.1 ค่าคาปาซิเตอร์	850 บาท
1.7.2 ค่าหนังสือข้อมูลเกี่ยวกับมอเตอร์กระแสสลับ และคาปาซิเตอร์	450 บาท
1.7.3 ค่าถ่ายเอกสารและค่าเช่าเล่มโครงการ	700 บาท
รวมเป็นเงิน 2,000 บาท(สองพันบาทถ้วน)	



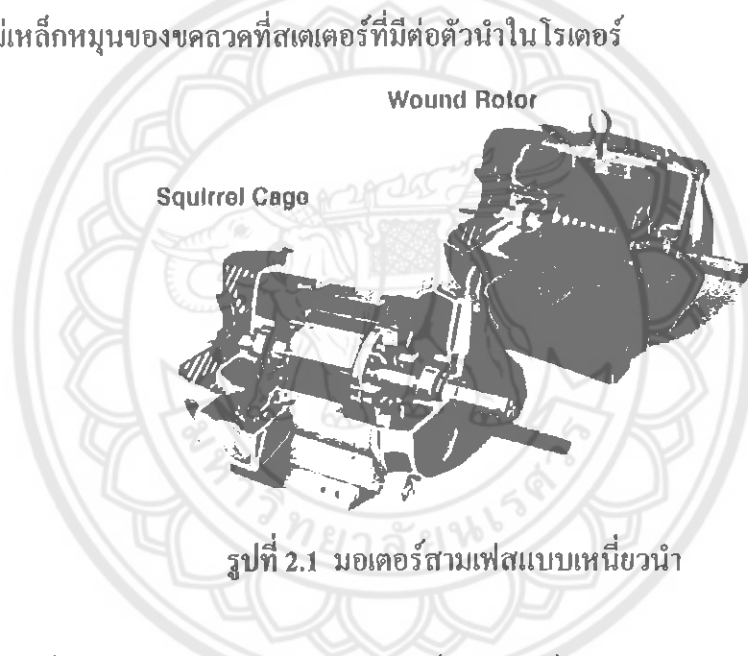
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานการทดลอง

2.1 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ(3 Phase Induction Motor)

ปกติเครื่องกลอินดักชันเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิด แต่ถ้านำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดจะมีข้อเสียมากจึงไม่ค่อยนิยมใช้กัน ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงเครื่องกลอินดักชัน (รูปที่ 2.1) จึงมักหมายถึงมอเตอร์อินดักชัน

คำว่า “อินดักชัน” (induction) หมายถึง การเหนี่ยวนำ บางครั้งเรียกมอเตอร์อินดักชันว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์



รูปที่ 2.1 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ

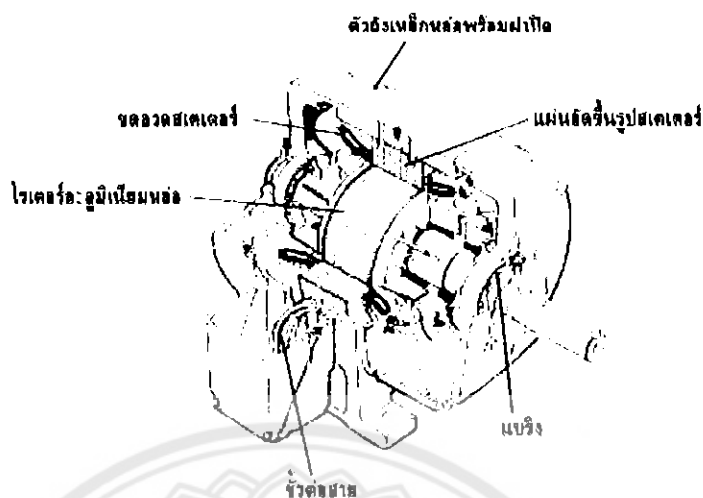
มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส เพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือ ความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ power factor ต่ำและถ้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน มักจะเป็น 5 เท่า หรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะขับโหลดเต็มที่ (หรือกระแสไฟฟ้าที่พิกัด)

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส (Induction Motor Construction)

องค์ประกอบสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แก่ สเตเตอร์ และ โรเตอร์ สเตเตอร์นั้นปกติจะติดอยู่กับกรอบตัวถังมอเตอร์เป็นแหล่งรวมเส้นแรงแม่เหล็กให้มีความเข้มสูง ส่วนท่อนโรเตอร์เป็นแกนท่อนหมุน แกนแม่เหล็กในท่อนจะต้องช่วยสร้างทางวงจรแม่เหล็กให้ครบวงจร ท่อนโรเตอร์จะต้อง

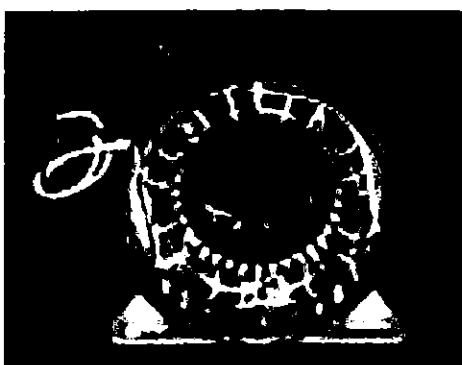
หมุนอยู่เพียงภายในขดสเตเตอร์ โดยให้มีระยะแกปอากาศห่างกันแคบมาก อย่าให้หุ่นโรเตอร์และสเตเตอร์ต้องสัมผัสกันเป็นอันขาด



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบมอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ

สเตเตอร์(Stator) หรือเรียกว่า โครงสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆแต่มีร่องสำเร็จไว้ใส่ขดลวดเรียกว่าช่องสลอต(slot) อัดเป็นปีกแผ่น อยู่ภายในกรอบโครง(Frame) ซึ่งเฟรมนั้น จะทำมาจากเหล็กหล่อ(Cast iron) หรือเหล็กเหนียว(Steel) ที่สเตเตอร์ของสปลิทเฟสมอเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่ 2 ชุด คือขดรันหรือขดเมน (Running Winding หรือ Main Winding) พันด้วยลวดเส้นใหญ่จำนวนรอบมาก

ขดลวดรันนี้จะมีไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลาไม่ว่าจะเป็นการเริ่มสตาร์ท หรือทำงานปกติ ขดลวดชุดที่สองสำหรับเริ่มหมุน หรือขดสตาร์ท(Starting winding) พันด้วยลวดเส้นเล็กและจำนวนรอบน้อยกว่าขดรันขดลวดสตาร์ท จะต่ออนุกรมอยู่กับสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแล้วจึงนำไปต่อขนานกับขดรัน



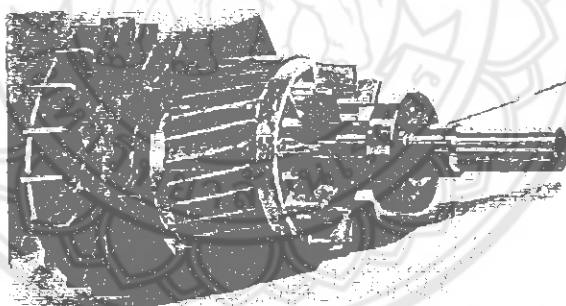
รูปที่ 2.3 สเตเตอร์(Stator)ของมอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ

ลวดตัวนำที่สอดอยู่ในร่องสเตเตอร์จะต้องออกแบบไว้เรียบร้อย และจะต้องแน่นแข็งแรง สันไม้ได้เลย เพราะในขณะที่สตาร์ทมอเตอร์หากเป็นการสตาร์ทด้วยแรงดันไฟฟ้าเต็มตามระบบไฟ กระแสที่ไหลผ่านสเตเตอร์จะมีปริมาณมาก ยิ่งถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ด้วยแล้วจำนวนกระแสจะยิ่งขึ้นเป็นทวีคูณ กระแสสตาร์ทเช่นนี้เป็นกระแสกระแทก ถ้าลวดที่สเตเตอร์ไม่แน่นลวดสั้นผลคือ วาขที่หุ้มลวดตัวนำอยู่อาจแตกหรือมีรอยปริในเนื้อ หากทิ้งไว้อาจเกิดการลัดวงจรได้

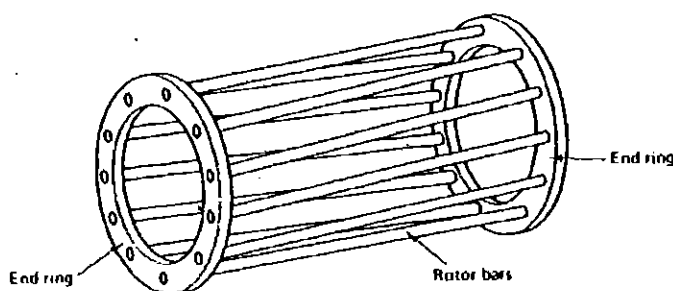
- โรเตอร์(Rotor) หรือส่วนหมุน

โรเตอร์สร้างจากแผ่นเหล็กไฟฟ้าบางๆ หลายแผ่นที่ตัดเจาะขึ้นรูปสำเร็จไว้แล้วนำมาอัดขึ้นรูปเป็น แท่งบนเพลลาหมุนของโรเตอร์นั้นๆ บนตัวโรเตอร์เองจะมีขดลวดทุกขดขึงอยู่ในร่องสลอตในตัว แกนใกล้กับช่องแคบอากาศ กระแสที่ไหลอยู่ในขดสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำกระแสในโรเตอร์ ให้ไหล ในขดทุกขดขึงด้านกัน ทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาต่อกันระหว่างสนามแม่เหล็กจากกระแสเหนี่ยวนำใน โรเตอร์กับสนามแม่เหล็ก จากกระแสในขดสเตเตอร์ทำให้เกิดทอร์คมอเตอร์ ลักษณะการเกิดของ กระแสเหนี่ยวนำในขดทุกขดขึงในโรเตอร์นี้เองทำให้เรียกให้มอเตอร์นี้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบกรงกระรอก(squirrel Cage) มีแท่งตัวนำ(rotor bar)คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายใน โรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกลัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน(End ring)



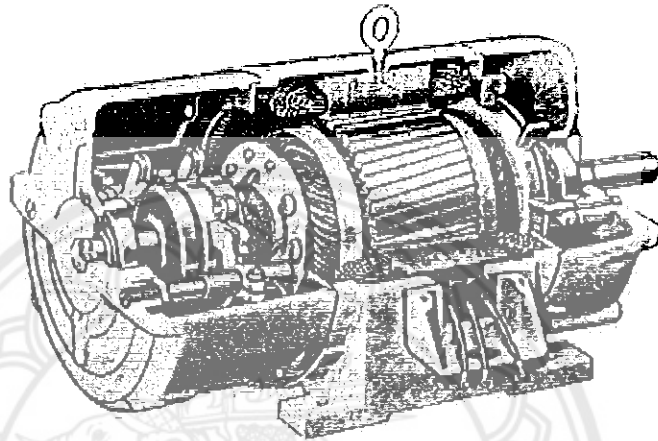
รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage Rotor)



รูปที่ 2.5 ภาพลักษณะแท่งตัวนำที่ฝังอยู่ใน โรเตอร์แบบกรงกระรอก

แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียง เพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก (magnetic hum)

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอก คือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลิปริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ดังรูปที่ 2.6 และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์



รูปที่ 2.6 แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor)

2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ จะเกิดการเหนี่ยวนำ และเนื่องจากโรเตอร์ถูกกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดเป็นผลให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน กล่าวคือ สนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (n_s) ซึ่งหาค่าได้จาก

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

เมื่อ

f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

P = จำนวนขั้วของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวนำโรเตอร์ (e_{ind}) หาได้ดังนี้

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_s) \cdot \mathbf{l} \quad (2.2)$$

เมื่อ

v = ความเร็วของโรเตอร์

B_s = ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l = ความยาวของโรเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์ (B_R) และเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กของสเตเตอร์จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T_{dr}) ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

$$T_{dr} = k B_R \times B_s \quad (2.3)$$

แรงบิด T_{dr} จะทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ค่า e_{ind} และ T_{dr} จะเท่ากับศูนย์โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์อินดักชันจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วของซิงโครนัสได้

การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์อินดักชันทำได้ง่ายเพียงแค่สลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่งที่ย้ายให้ขดลวดที่สเตเตอร์เท่านั้นก็จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทางได้นับว่าเป็นข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้

2.1.3 ความเร็วสลลิปและความเร็วโรเตอร์ (Slip and Rotor Speed)

เราทราบว่าโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันจะหมุนไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ แต่ไม่ได้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (n_s) กับความเร็วของโรเตอร์ (n_r) เรียกว่า ความเร็วสลลิป (slip speed ; n_{slip}) หาค่าได้จาก

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (2.4)$$

อัตราส่วนระหว่าง n_{slip} ต่อ n_s เรียกว่า สลิป (slip, s) เขียนสมการได้ดังนี้ คือ

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2.6)$$

จากสมการ 4-6 จัดให้อยู่ในรูปความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (ω_s) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r) ได้ดังนี้ คือ

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \times 100\% \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ความเร็วของโรเตอร์ในเทอมของสลลิปและความเร็วซิงโครนัสหาค่าได้จาก

$$n_r = (1-s)n_s \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\omega_r = (1-s)\omega_s \quad (2.9)$$

สมการทั้งหมดที่กล่าวมานี้ มีประโยชน์อย่างมากในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์อินดักชัน ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

2.1.4 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์ (Rotor-Induced Voltage and Frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์ และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นย่อมมีค่าสูงสุดและขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับ หม้อแปลง ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($n_r=0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (ความถี่ของโรเตอร์) จะเท่ากับความถี่ของสาย กรณีนี้อัตราสลิปเท่ากับ 1 หรือ 100% (พิจารณาจากสมการ 2.6) และเมื่อโรเตอร์หมุน อัตราที่ฟลักแม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลงค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป เขียนสมการ ได้ดังนี้

$$E_R = s \times E_{BR} \quad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของสลิป ดังนี้

$$f_r = s \times f \quad (2.11)$$

เมื่อ

E_R = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงาน

E_{BR} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่ (blocked rotor-induced voltage)

f_r = ความถี่ของโรเตอร์

f_s = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

2.1.5 วงจรเทียบเคียงโรเตอร์ (Equivalent Circuit of Rotor)

เราทราบแล้วว่ามอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส มีหลักการคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการลัดวงจรที่ขดลวดทุติยภูมิ (ขดลวดที่โรเตอร์) และมีอิสระจะเคลื่อนที่หรือหมุนได้อย่างต่อเนื่องตามขั้วแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดที่สเตเตอร์) ดังนั้นวงจรเทียบเคียงจึงคล้ายกับวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากหัวข้อ 2.1.4 เราทราบว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (E_R) คือ sE_{BR} แรงดันไฟฟ้านี้สร้างกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ที่ถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ประกอบด้วย

- ความต้านทานของโรเตอร์ (R_R)

- รีแอกแตนซ์รั่วไหล (leakage reactance; sX_{BR})

เมื่อ sX_{BR} = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่

สาเหตุที่รีแอกแตนซ์รั่วไหลมีค่าเท่ากับ sX_{BR} (เพราะค่ารีแอกแตนซ์เป็นฟังก์ชันของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์นั้นคือ $X_{BR} = 2\pi f_e L_R$) ดังนั้นคือ

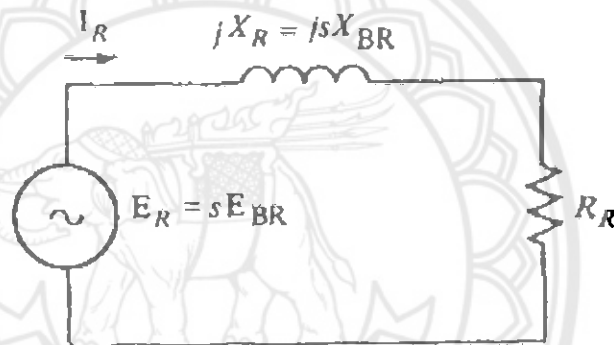
$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_e L_R \quad (2.13)$$

แทนสมการ 2.11 ลงในสมการ 2.12

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \end{aligned}$$

$$X_R = sX_{BR}$$

เมื่อนำองค์ประกอบต่าง ๆ ของโรเตอร์มาเขียนวงจรเทียบเคียงจะได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรเทียบเคียงของโรเตอร์

จากรูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ (I_R) จึงมีค่าเป็น

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (2.14)$$

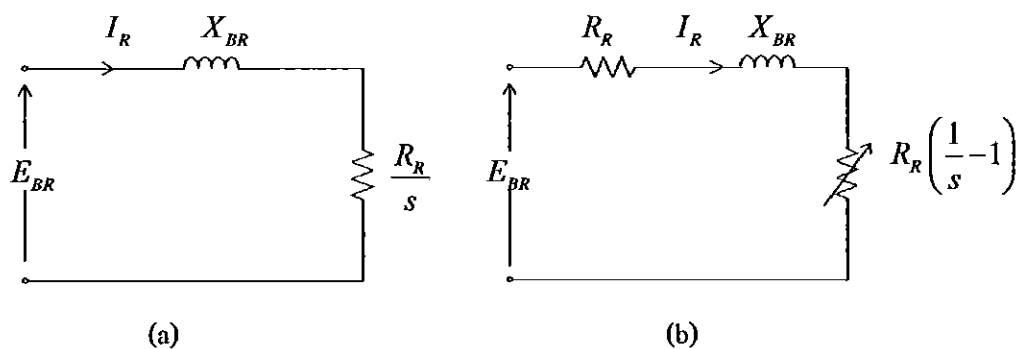
หรือ

$$I_R = \frac{sE_{BR}}{\sqrt{R_R^2 + (sX_{BR})^2}} \quad (2.15)$$

หารทั้งเศษและส่วนของสมการ 2.15 ด้วยสลิป

$$I_R = \frac{E_{BR}}{\sqrt{(R_R/s)^2 + X_{BR}^2}} \quad (2.16)$$

จากสมการ 2.16 เขียนวงจรเทียบเคียง ได้ดังรูปที่ 2.8a



รูปที่ 2.8 วงจรเทียบเคียงจากสมการ 2.16

เนื่องจากการใช้ค่าความต้านทานที่แท้จริงของ โรเตอร์ (R_R) นั้นง่ายกว่าเทอม R_R/s (รูปที่ 2.8a) ดังนั้น จึงแบ่ง R_R/s ออกเป็น 2 ส่วน ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \frac{R_R}{s} &= \frac{R_R}{s} + R_R - R_R \\ &= R_R + R_R \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ \frac{R_R}{s} &= R_R + R_R \frac{1-s}{s} \end{aligned} \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.17 เขียนวงจรเทียบเคียงใหม่ดังรูป 2.8b และถ้าคูณสมการนี้ตลอดด้วย I_R^2 จะได้สมการในเทอมกำลังไฟฟ้า

$$I_R^2 \frac{R_R}{s} = I_R^2 R_R + I_R^2 R_R \frac{1-s}{s} \quad (2.18)$$

ค่า $I_R^2 R/s$ แทน input power ของวงจร โรเตอร์ (P_{IR}) ซึ่งประกอบด้วย

- $I_R^2 R$ แทนกำลังสูญเสียในลวดทองแดงของโรเตอร์ (P_{CUR})

- $I_R^2 R [(1-s)/s]$ แทนกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นกำลังทางกลหรือกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใน

โรเตอร์ (developed power ; P_{DR})

จากความหมายดังกล่าวจึงเขียนสมการ 2.18 ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$P_{IR} = P_{CUR} + P_{DR} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$P_{IR} = I_R^2 \frac{R_R}{s} \quad (2.20)$$

$$P_{CUR} = I_R^2 R_R = s P_{IR} \quad (2.21)$$

$$P_{DR} = I_R^2 R_R \frac{1-s}{s} = P_{IR} (1-s) \quad (2.22)$$

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าที่เกิดในมอเตอร์เป็นผลคูณของแรงบิด (T) และความเร็วเชิงมุม (angular velocity ; ω) ดังนั้น จึงเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$P_{dR} = \omega_r T_{dR} \tag{2.23}$$

ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (developed torquen ; T_{dR})

$$T_{dR} = \frac{P_{dR}}{\omega_r} \tag{2.24}$$

เมื่อ

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \tag{2.25}$$

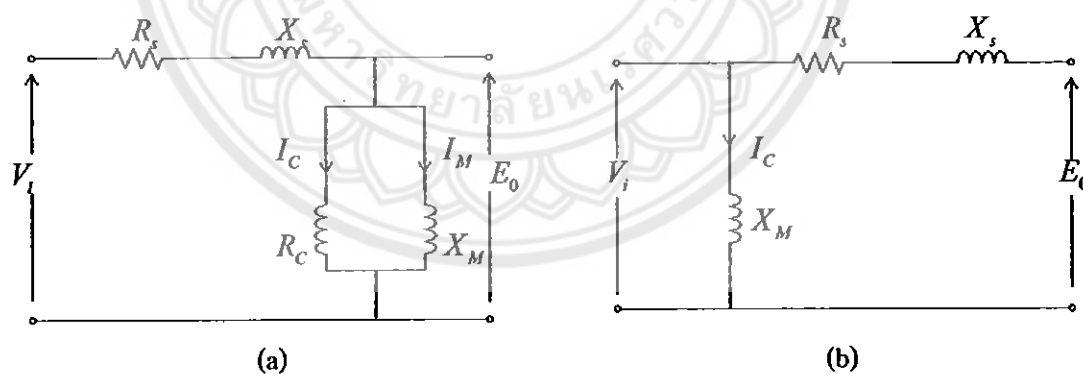
เมื่อ

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

n_r = ความเร็วของโรเตอร์

2.1.6 วงจรเทียบเคียงของสเตเตอร์ (Equivalent Circuit of Stator)

วงจรเทียบเคียงของสเตเตอร์ก็เหมือนกับวงจรเทียบเคียงด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ประกอบด้วยความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s) รีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ (X_s) และค่าต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสาขาที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (magnetizing branch) ได้แก่ R_C (ความต้านทานของแกนเหล็ก), X_M (รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก, (กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก), I_M (กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก) เขียนวงจรเทียบเคียงของสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรเทียบเคียงสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.9a ถ้าไม่คิดค่าความต้านทาน R_C และย้ายตำแหน่ง X_M มาไว้ทางขั้ว input ของวงจรเทียบเคียงดังรูปที่ 2.8b จะทำให้วิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวกับมอเตอร์อินดักชันง่ายขึ้น โดยมีเหตุผลดังนี้คือ

1. การย้ายตำแหน่ง X_M นี้จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย เพราะ R_s และ X_s มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ X_M แต่จะได้ วงจรเทียบเคียงที่พิจารณาได้ง่าย

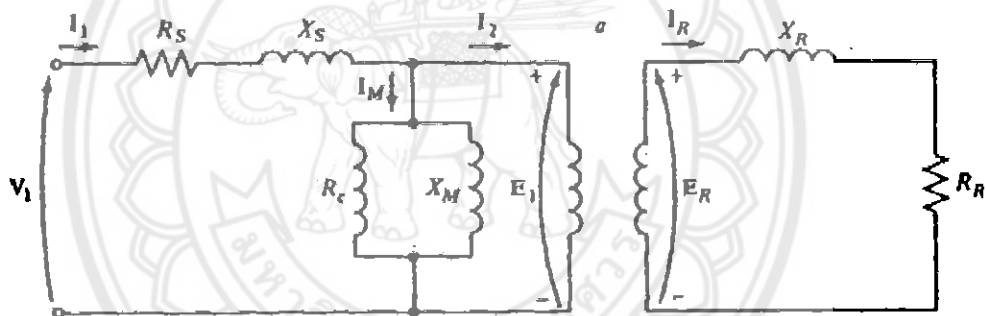
2. วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะไม่คิดค่า I_M ซึ่งเป็นส่วนประกอบเล็ก ๆ เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด แต่ในกรณีของมอเตอร์อินดักชันทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะค่า I_M มีค่าถึง 30%-50% ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม X_M เป็นจำนวนมาก จึงต้องคงค่า X_M ไว้ในวงจรเทียบเคียง

3. ค่ากระแสไฟฟ้า I_C มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ I_M ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ข้อมมีอิทธิพลต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าในวงจรเทียบเคียงน้อยด้วย จึงตัดค่า R_C ออกจากวงจรเทียบเคียงของสเตเตอร์ได้

แต่อย่างไรก็ตามการที่เราไม่คิดค่าความต้านทาน R_C นั้นไม่ได้หมายความว่าเราไม่สนใจกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) แต่จะถือว่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่ ซึ่งจะต้องนำมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วย

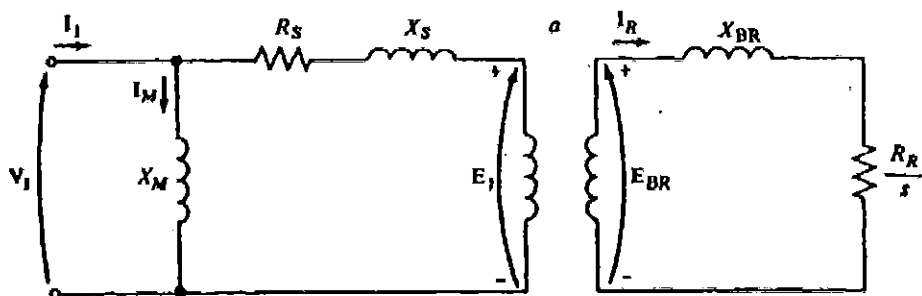
2.1.7 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชัน (Equivalent Circuit of an Induction Motor)

เมื่อนำวงจรเทียบเคียงของสเตเตอร์และ โรเตอร์ (ขณะอยู่กับที่) มาเขียนรวมกัน โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกันกับวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ จะได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรเทียบเคียงหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

เพื่อให้สอดคล้องกับรูปที่ 2.8a และรูปที่ 2.9b จึงเขียนวงจรเทียบเคียงใหม่ได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรเทียบเคียงที่สอดคล้องกับรูปที่ 2.8a และรูปที่ 2.9b

เราทราบว่าวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถย้ายด้านรวมกันได้ ถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ในทำนองเดียวกันถ้าทราบ

อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (turn ratio ; a) ก็จะย้ายค่าในวงจรเทียบเคียงของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นกัน

ในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงโรเตอร์มายังวงจรเทียบเคียงสเตเตอร์ซึ่งหาค่าต่างๆ ของวงจรเทียบเคียงได้ดังนี้ คือ

$$E'_{BR} = aE_{BR} = E_1 \quad (2.26)$$

เมื่อ

E'_{BR} = แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$I'_R = \frac{I_R}{a} \quad (2.27)$$

เมื่อ

I'_R = กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R'_R = a^2 R_R \quad (2.28)$$

$$X'_R = a^2 X_{BR} \quad (2.29)$$

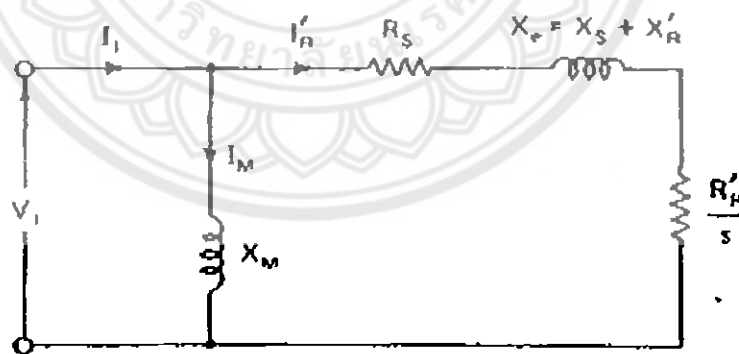
เมื่อ

R'_R = ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

X'_R = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

นำค่าที่ได้จากสมการ 2.26 ถึงสมการ 2.29 เขียนวงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชันได้ดัง

รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชัน

จากรูป 2.11 ค่ากระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์จึงเป็น

$$I'_R = \frac{V_1}{(R_s + R'_R/s) + j(X_s + X'_R)} \quad (2.30)$$

นอกจากนี้

$$I'_R = \frac{V_1}{(R_s + R'_r/s) + j(X_s + X'_r)} \quad (2.31)$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าที่สายที่จ่ายให้มอเตอร์ (I_1)

$$I_1 = I_M + I'_R \quad (2.32)$$

หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{CUS})

$$P_{CUS} = 3 + I_1^2 R_s \quad (2.33)$$

ผลรวมของรีแอกแตนซ์ X_s และ X'_r เราเรียกว่ารีแอกแตนซ์เทียบเคียงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X_e = X_s + X'_r \quad (2.34)$$

เมื่อ

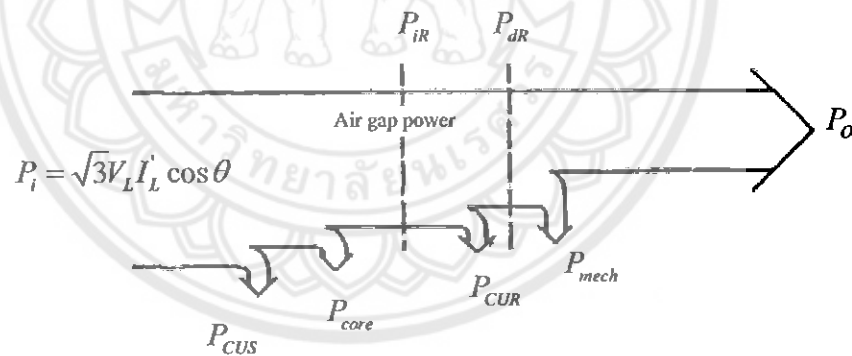
V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

I_1 = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

I_M = กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

X_e = รีแอกแตนซ์เทียบเคียง

2.1.8 ประสิทธิภาพ (Efficiency)



รูปที่ 2.13 ค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์อินดักชัน

จากรูปที่ 2.13 เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า (input power ; P_i) ให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรวมทั้งเกิดกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (P_{CUS}) และกำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก (P_{core}) ของสเตเตอร์ เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนที่อยู่ในช่องอากาศ (air gap power) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ตัดผ่านตัวนำในโรเตอร์ จะเกิดกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์ (P_{CUR}) กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากสามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศ เรียกว่า กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap power) ซึ่งเป็น input power ที่จ่ายให้โรเตอร์ (P_{iR}) เมื่อหักค่ากำลังสูญเสียที่กล่าวมาแล้วจะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (P_{dR}) หรือกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล

และเมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม ซึ่งเรียกว่า กำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) ภายหลังจากหักค่า P_{mech} แล้วก็จะ ได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา (output power ; P_o) เป็นพลังงานกลอยู่ในรูปของแรงบิดที่จ่ายออกมาหรือแรงบิดที่แกนของโรเตอร์ (T_{shaft}) คูณกับความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_o = T_{shaft} \times \omega_r \tag{2.35a}$$

สมการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์อินดักชันก็เหมือนกับเครื่องกลไฟฟ้าทั่วไป นั่นคือ

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{losses}} \times 100\% \tag{2.35b}$$

จากรูปที่ 2.12

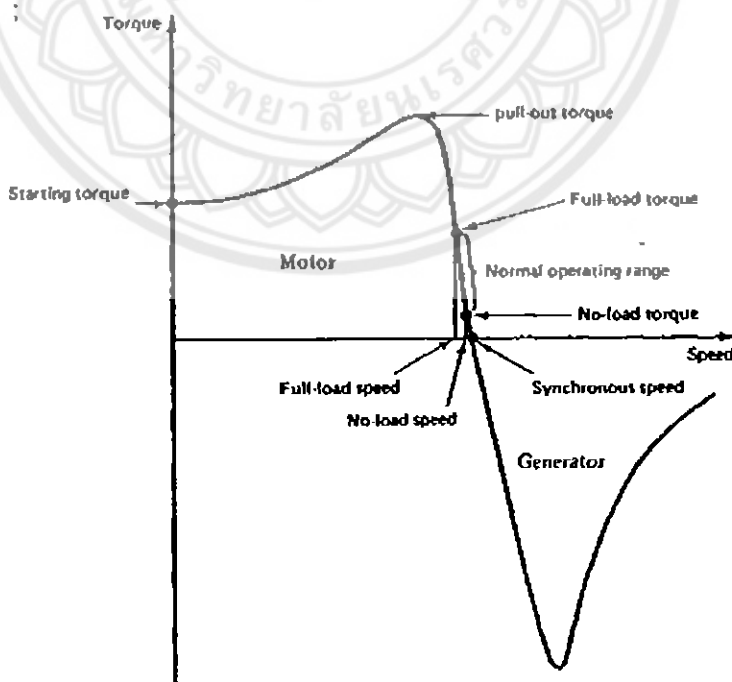
$$P_o = P_{dR} - P_{mech} \tag{2.36}$$

หาแรงบิดที่จ่ายออกมา (output torque) หรือแรงบิดที่แกนของโรเตอร์ (shaft torque ; T_{shaft}) ได้โดยแทนสมการ 2.36 ลงในสมการ 2.35 a

$$T_{shaft} = \frac{P_{dR} - P_{mech}}{\omega_r} = \frac{P_o}{\omega_r} \tag{2.37}$$

2.1.9 คุณสมบัติ (Induction Motor Characteristics)

มอเตอร์อินดักชันแบบ wound rotor ที่ปรับความเร็วจะใช้ความต้านทานที่ปรับค่าจากภายนอกได้ต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์เพื่อปรับความเร็ว หรือเพิ่มแรงบิดเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนี้นำไปใช้กับโหลดที่ต้องเริ่มต้นหมุนบ่อย ๆ เช่น ปั่นจั่น เป็นต้น



รูปที่ 2.14 curve แสดงคุณสมบัติแรงบิด – ความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส

ส่วนงานที่ต้องการกำลังกลก่อนข้างคงที่และเริ่มต้นหมุนไม่บ่อยนัก เช่น มอเตอร์ที่ใช้ขับปั๊มเครื่องเป่าอากาศ พัดลม เป็นต้น จะใช้มอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

จากรูปที่ 2.14 เป็น curve แสดงคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส ทำให้ทราบข้อมูลในการทำงานของมอเตอร์อินดักชันดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (developed torque) เป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. curve แรงบิด – ความเร็วเกือบเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีโหลด (no load torque) กับแรงบิดขณะจ่ายโหลดเต็มที่ (full load torque) เราเรียกช่วงนี้ว่า ย่านทำงานปกติ (normal operating range) ของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด (maximum torque ; T_{max} ซึ่งบางครั้งเรียกว่า pull-out torque) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่ายโหลดเต็มที่
4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุน (starting torque) มากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดหรือต่อกับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็วซึ่งเราเรียกว่า plugging ซึ่งนำไปสู่หลักการควบคุมมอเตอร์แบบหนึ่ง
6. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทาง และมอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนกำลังกลเป็นกำลัง ไฟฟ้า

2.1.10 แรงบิดเริ่มต้นหมุน (Starting Torque)

จากรูปที่ 2.14 แรงบิดเริ่มต้นหมุนเกิดขึ้นขณะ โรเตอร์ยังไม่เคลื่อนที่ ทำให้ค่าสลิป (s) เท่ากับ 1 จึงเขียนสมการ 2.16 ใหม่ได้ดังนี้

$$I'_{R(st)} = \frac{V_i}{\sqrt{(R_R + R'_R)^2 + (X_s + X'_R)^2}} \quad (2.38)$$

ถ้าต้องการทราบค่าแรงบิดเริ่มต้นหมุนจะต้องหาค่า input power ของโรเตอร์ขณะเริ่มต้นหมุน ($P'_{iR(st)}$) เสียก่อน โดยใช้สมการ 2.21 มาพิจารณา

$$P'_{iR(st)} = 3I'^2_{R(st)} R'_R \quad (2.39)$$

ขณะเริ่มต้นหมุนฟลักแม่เหล็กที่สเตเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและสร้างแรงบิดเริ่มต้นหมุน (T_{st}) ที่โรเตอร์ ดังนั้นความเร็วเชิงมุมทางกลที่ทำให้เกิด T_{st} จะเป็นความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (ω_s) เขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{st} = \frac{P'_{iR(st)}}{\omega_s} \quad (2.40)$$

โดย

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (2.41)$$

2.1.11 แรงบิดสูงสุด (Maximum Torque)

โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของโหลดจะมีขนาดต่ำกว่าค่าพิคคของมอเตอร์เล็กน้อย แต่ถ้าโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์ไม่อาจสร้างแรงบิดเพิ่มขึ้นได้อีก เรียกว่า มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด ถ้าโหลดเพิ่มขึ้นเกินกว่านี้มอเตอร์จะหยุดหมุน (พิจารณารูปที่ 2.14)

จากหลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ทำให้ทราบว่าเมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลด (R_R/s) มีค่าเหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ของโหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับการหาค่าสลิปขณะแรงบิดสูงสุด (s_{mt}) ที่หาได้จาก

$$s_{mt} = \frac{R'_R}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_R)^2}} \quad (2.42)$$

ตามปกติความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์เทียบเคียง ($X_e = X_s + X'_R$) จึงเขียนสมการ 2.42 ได้ใหม่ดังนี้

$$s_{mt} = \frac{R'_R}{X_e} \quad (2.43)$$

เมื่อ

X_e = รีแอกแตนซ์เทียบเคียง

ถ้าใช้ค่า s_{mt} นี้หาค่ากระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ขณะแรงบิดสูงสุด [$I'_{R(mt)}$] กับสมการ 2.30 จะได้

$$I'_{R(mt)} = \frac{V_i}{\sqrt{2X_e}} \quad (2.44)$$

และ

$$P'_{R(mt)} = 3I'^2_{R(mt)} \frac{R'_R}{s_{mt}} = \frac{3V_i^2}{2X_e} \quad (2.45)$$

หาค่าแรงบิดสูงสุดของโรเตอร์

$$T_{mt} = \frac{P_{O(mt)}}{\omega_{r(mt)}} \quad (2.46)$$

จากรูปที่ 2.12

$$P_{O(mt)} = P_{dR(mt)} - P_{mech} \quad (2.47)$$

จากสมการ 2.22

$$P_{dR(mt)} = P_{iR(mt)}(1 - s_{mt}) \quad (2.48)$$

2.1.12 มอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบ Wound-Rotor (Wound-Rotor Motor)

เราทราบว่า มอเตอร์อินดักชัน แบบ wound rotor กับแบบกรงกระรอกมีโครงสร้างของโตร์ต่างกัน แต่มีโครงสร้างของสเตเตอร์เหมือนกัน

มอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกมีข้อจำกัดคือ ขณะทำงานสภาพปกติความต้านทานของโรเตอร์คงที่ ถ้าต้องการให้มอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นต้องออกแบบให้โรเตอร์มีความต้านทานต่ำ (เพื่อลดค่า P_{CUR}) แต่จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนสูง จึงส่งผลให้แรงบิดเริ่มต้นหมุนของโรเตอร์ชนิดนี้ต่ำ

ในทางตรงกันข้าม โรเตอร์ของมอเตอร์แบบ wound rotor จะต่ออยู่กับสลิงริงซึ่งติดอยู่กับแปรงถ่าน ดังนั้นจึงต่อความต้านทานจากภายนอกอนุกรมกับโรเตอร์ได้ และถ้าเราเพิ่มความต้านทานขณะมอเตอร์เริ่มต้นหมุน กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นจะลดลงส่งผลให้แรงบิดเริ่มต้นหมุนเพิ่มขึ้น

จากสมการ 2.43 จะพบว่าค่า s_{mt} เป็นสัดส่วนกับความต้านทานของโรเตอร์ (R_R) โดยตรง ดังนั้น ถ้าปรับค่าความต้านทานของวงจรรโรเตอร์ให้เหมาะสม แรงบิดเริ่มต้นหมุนจะมีค่าเท่ากับแรงบิดสูงสุดได้

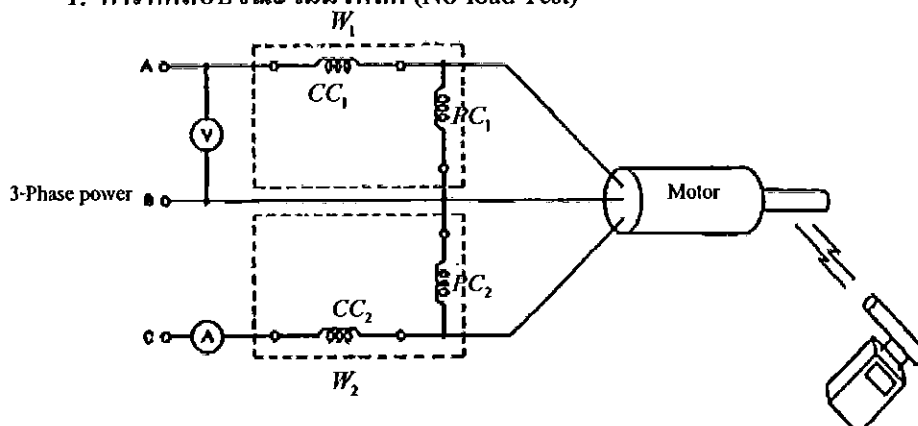
เมื่อมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้น สามารถปรับความต้านทานจากภายนอกลดลงได้เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุดตลอดช่วงที่มีการเร่ง และถ้าความเร็วของมอเตอร์เหมาะสมกับการทำงานแล้ว จึงปลดความต้านทานจากภายนอกออกจากวงจรด้วยการลัดวงจรที่แปรงถ่าน

เนื่องจากมอเตอร์แบบ wound rotor ที่สามารถคงแรงบิดสูงสุดไว้ได้ตลอดช่วงที่มีการเร่ง จึงนิยมใช้กับ โหลดที่มีความเฉื่อยขณะเริ่มต้นหมุนสูง

2.1.13 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเทียบเคียง (Determination of Equivalent Circuit Parameters)

การคำนวณคุณลักษณะของมอเตอร์อินดักชันจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์อินดักชันลงในวงจรเทียบเคียง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้หาได้จากการทดสอบขณะไม่มีโหลด และการทดสอบยึดโรเตอร์ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการทดสอบเปิดวงจรและการทดสอบลัดวงจร ในหม้อแปลงไฟฟ้า

1. การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No-load Test)



รูปที่ 2.15 การทดสอบขณะไม่มีโหลด

การทดสอบนี้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ขณะไม่มีโหลดต่อที่แกนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.15 ค่าที่ต้องการทราบคือ

V_{NL} = แรงดันไฟฟ้าที่สายของสเตเตอร์ (อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์ ; V)

I_{NL} = กระแสไฟฟ้าที่สาย (อ่านได้จากแอมมิเตอร์ ; A)

P_{NL} = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขณะไม่มีโหลดทั้ง 3 เฟส (อ่านได้จากผลรวมของวัตต์มิเตอร์ทั้ง 2 ตัว หรือ $P_{NL} = W_1 + W_2$)

การทดสอบนี้ไม่มีโหลดต่ออยู่ที่แกน ดังนั้นความเร็วของแกนโรเตอร์ (n_r) จึงสูง (วัดได้จาก Tachometer) ส่งผลให้ค่าสลิปต่ำ (จากสมการ 2.6 กล่าวว่ $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$) นอกจากนี้กระแส

ไฟฟ้าของโรเตอร์มีค่าต่ำทำให้กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์ (P_{CUR}) มีค่าต่ำมาก (จากสมการ 2.21 กล่าวว่ $P_{CUR} = I_R^2 R_R$) เราจึงไม่คิดค่ากำลังสูญเสียในส่วนนี้ ดังนั้น P_{NL} จึงประกอบด้วยกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}), กำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) และกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ ทั้ง 3 เฟสเขียนสมการได้ดังนี้คือ

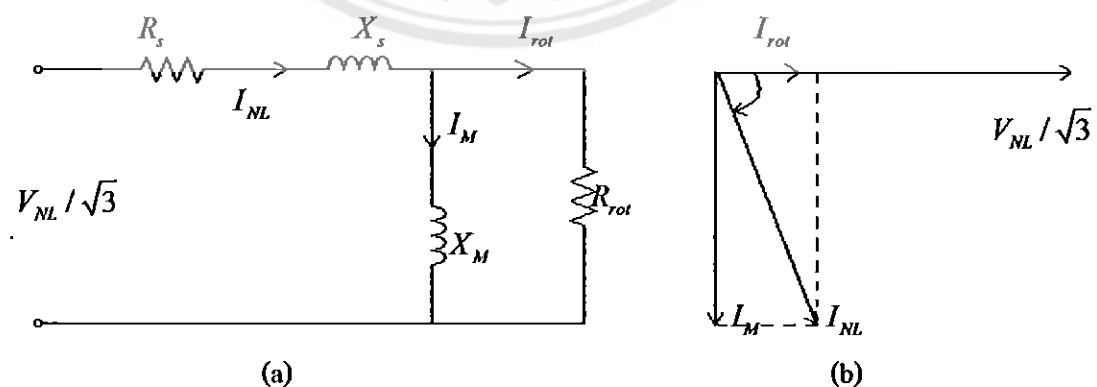
$$P_{CUR} = 3I_{NL}^2 R_s \quad (2.49)$$

$$P_{NL} = P_{core} + P_{mech} + 3I_{NL}^2 R_s \quad (2.50)$$

ผลรวมของ P_{mech} และ P_{core} เราเรียกว่กำลังสูญเสียในแกนหมุน (rotational losses; P_{rot}) ซึ่งเป็นค่าคงที่หาได้จาก

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I_{NL}^2 R_s \quad (2.51)$$

ความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s) หาได้จากการวัดความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ (Resistance Test) สำหรับวงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลดเป็นดังรูปที่ 2.16a



รูปที่ 2.16 วงจรเทียบเคียงของอินดักชันมอเตอร์ในการทดสอบขณะไม่มีโหลด

ขณะไม่มีโหลด มอเตอร์ชนิดนี้มีค่า power factor ต่ำแสดงว่าองค์ประกอบของวงจรเทียบเคียงส่วนใหญ่เป็นรีแอกแตนซ์ ซึ่งข้อมหมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (X_M) เพราะค่า R_s และ X_s มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ X_M [ถ้าเป็นมอเตอร์แบบดั้งเดิม (conventional motor) ค่า $X_M \gg X_s$] ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{NL} จะต้องล่าหลังแรงดันไฟฟ้า V_{NL} เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูป 2.16a

แต่ถ้ารับความต้านทานที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ R_{rot}) จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ X_M ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ I_{rot}) มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ I_M ซึ่งแสดงว่าภายใต้ข้อสมมตินี้จะได้ว่า

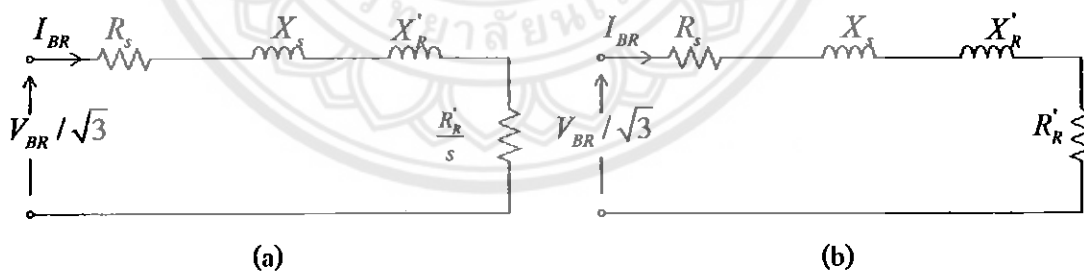
$$X_M = \frac{V_{NL}}{\sqrt{3}I_{NL}} \tag{2.52}$$

เมื่อ

X_M = รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

2. การทดสอบการยึดโรเตอร์ (Blocked-rotor Test)

ขณะทำการทดสอบจะต้องปรับแรงดันไฟฟ้าจนได้กระแสไฟฟ้าที่พิกัดของสเตเตอร์ (เช่นเดียวกับกรณีทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า) สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้การทดสอบมีค่า 10-20% ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ air gap มีค่าน้อยแสดงว่า X_M มีปริมาณมากกว่าปกติ ดังนั้นเราจึงไม่สนใจค่า X_M ทำให้เขียนวงจรเทียบเคียงในรูปที่ 2.11 ได้ใหม่ดังรูปที่ 2.17a



รูปที่ 2.17 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชัน โดยไม่คิดรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

การทดสอบนี้ทำเพื่อหาค่าต่อไปนี้

- V_{BR} = แรงดันไฟฟ้าที่สายขณะยึดโรเตอร์
- I_{BR} = กระแสไฟฟ้าที่สายขณะยึดโรเตอร์
- P_{BR} = กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสขณะยึดโรเตอร์

เมื่อทราบค่าดังกล่าวประกอบกับการพิจารณารูป 2.17b ทำให้หาค่าเทียบเคียงของมอเตอร์
ดังนี้คือ

$$Z_e = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3}I_{BR}} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r) \quad (2.53)$$

$$R_e = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} = R_s + R'_r \quad (2.54)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = X_s + X'_r \quad (2.55)$$

เมื่อ

Z_e = อิมพีแดนซ์เทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

R_e = ความต้านทานเทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

X_e = รีแอกแตนซ์เทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

Z_s = อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

R_s = ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

X_s = รีแอกแตนซ์ต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

การวัดค่า R_s จะแยกต่างหากทำให้ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

(R'_r) มีค่าเป็น

$$R'_r = R_e - R_s \quad (2.56)$$

มีข้อสมมติเกี่ยวกับมอเตอร์แบบ wound rotor ที่ยอมรับกันทั่วไปว่า

$$X_s = X'_r = 0.5X_e \quad (2.57)$$

การหาค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานที่แท้จริงของโรเตอร์ (X_r และ R_r) จะต้องทราบ
ค่า X'_r และ R'_r รวมทั้งค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหรืออัตราส่วนของการย้ายค่า (turn ratio
or transformation ratio ; a) เสียก่อน

การหาค่า a ทำได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่
สายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (V_L) กับแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากสลิปริง (V_{sr})
หรือหาได้จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a = \frac{V_L}{V_{sr}} = \frac{N_s}{N_r} \quad (2.58)$$

เมื่อ

N_s = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในสเตเตอร์

N_r = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในโรเตอร์

เมื่อนำหลักการย้ายค่าของหรือแปลงไฟฟ้ามายใช้ ค่ารีแอกแตนซ์ที่แท้จริงของโรเตอร์

(X_r) จึงมีค่าเป็น

$$X_R = \frac{X'_R}{a^2} \quad (2.59)$$

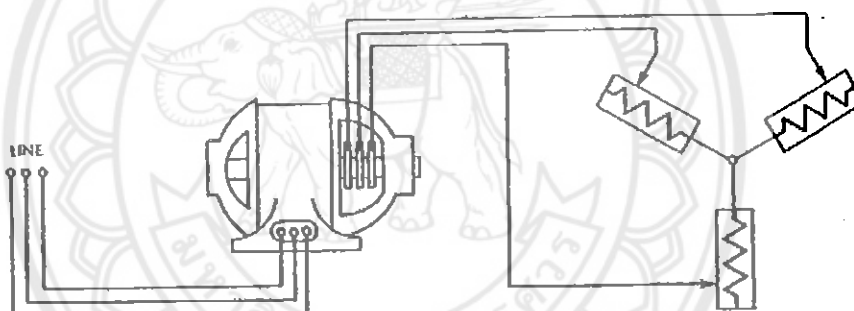
ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานแท้จริงของโรเตอร์ (R_R) จึงมีค่าเป็น

$$R_R = \frac{R'_R}{a^2} \quad (2.60)$$

2.1.14 เทคนิคการเริ่มต้นหมุน (Induction Motor Starting Technique)

มอเตอร์อินดักชันมีโรเตอร์ 2 ชนิด คือ แบบwound rotor และแบบกรงกระรอก โดยมอเตอร์แบบ wound rotor มีสลิบริงและแปรงถ่าน ส่วนอีกแบบหนึ่งจะไม่มี ในการอธิบายเกี่ยวกับเทคนิคการเริ่มต้นหมุนนั้นจะกล่าวถึงมอเตอร์ที่มีสลิบริงแยกกันเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

1. เทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชันที่มีสลิบริง ทำได้โดยต่อความต้านทานที่ปรับค่าได้จากภายนอกอนุกรมกับขดลวดที่โรเตอร์ (โดยผ่านสลิบริง) ทั้ง 3 เฟส แล้วลัดวงจรที่จุดต่อรวมดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การต่อวงจรเพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุน

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดให้ขดลวดที่สเตเตอร์ กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนจะถูกจำกัดให้มีค่าต่ำลงเนื่องจากความต้านทานคั้งกล่าว ถ้าปรับค่าความต้านทานลดลงเรื่อยๆ ความเร็วของมอเตอร์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและเมื่อปรับความต้านทานให้มีค่าเท่ากับศูนย์ มอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วที่พิกัด

2. เทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชันที่ไม่มีสลิบริงทำได้ 3 วิธี คือ

- ต่อมอเตอร์โดยตรงกับสาย
- ควบคุมแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุน
- ต่อขดลวดแบบ Y- Δ

ต่อมอเตอร์โดยตรงกับสาย (across the line starting)

เทคนิคนี้จะมีปัญหาเกี่ยวกับค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนเพราะมอเตอร์ขณะเริ่มต้นหมุนจะใช้กระแสไฟฟ้า 5-10 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะขับโหลดเต็มที่ เช่น มอเตอร์มีขนาด 220 V และกระแสไฟฟ้าขณะขับโหลดเต็มที่ 10 A ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน 50-100 A ถ้ากระแสไฟฟ้าขณะขับโหลดเต็มที่ที่มีขนาด 50 A ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน 250-500 A ทั้งนี้ ลักษณะเช่นนี้ จะทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น การมีคสตัวชั่วขณะของแสงสว่างและการตัดอัตโนมัติของอุปกรณ์ป้องกัน

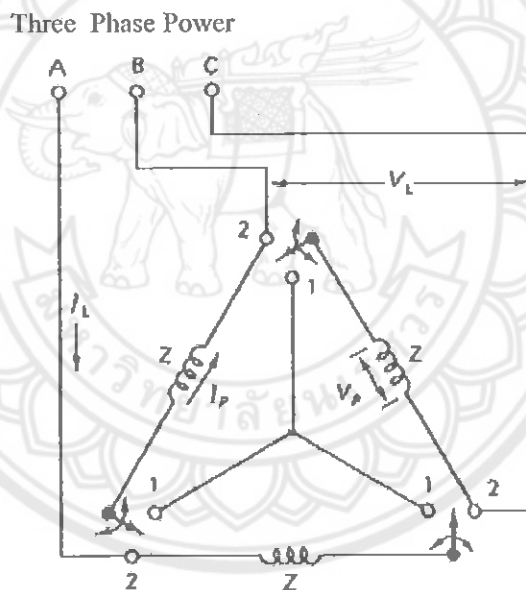
ดังนั้นการเริ่มต้นหมุนแบบนี้จึงใช้ได้กับมอเตอร์ขนาดเล็กที่มีพิกัดไม่เกิน 5 hp หรือ 3.5 kW เท่านั้น

จ/ร.
ป/622ก
2649

ควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุน

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้ในห้องทดลอง คือ การใช้ variac 3 เฟส ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า หรือ การใช้ autotransformer 3 เฟสที่ปรับค่าได้ด้วยมือ

ต่อขลวดแบบ Y-Δ (wye-delta starting)



รูปที่ 2.19 การเริ่มต้นหมุนมอเตอร์โดยการต่อแบบ วาย - เดลต้า

วิธีการคือ ขณะเริ่มต้นหมุน ขลวดที่สเตเตอร์จะต่อแบบ Y เมื่อความเร็วของมอเตอร์เป็น 75% ของความเร็วซิงโครนัสจึงเปลี่ยนมาต่อแบบ Δ ด้วยสวิตช์ที่อยู่ใน relay (รูป 4-19 ; เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 ขลวดที่สเตเตอร์จะต่อแบบ Y และเมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง 2 ขลวดที่สเตเตอร์จะต่อแบบ Δ) วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง

ขณะเริ่มต้นหมุนเหตุผลที่ต่อขลวดแบบ Y ก็เพราะจะทำให้กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมีค่าต่ำกว่าการต่อขลวดแบบ Δ

เมื่อ

V_L = แรงดันไฟฟ้าที่สาย

V_p = แรงดันไฟฟ้าที่เฟส

Z = อิมพีแดนซ์ต่อเฟส

I_L = กระแสไฟฟ้าที่สาย

I_p = กระแสไฟฟ้าที่เฟส

การเริ่มต้นหมุนที่ต่อขดลวดแบบ Δ

$$I_p = \frac{V_L}{Z}$$

$$I_{L\Delta} = \sqrt{3}I_p = \frac{\sqrt{3}V_L}{Z}$$

การเริ่มต้นหมุนที่ต่อขดลวดแบบ Y

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}Z}$$

$$I_{LY} = I_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}Z}$$

หารกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนขณะที่ต่อขดลวดแบบ Y ด้วยกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน ขณะที่ต่อขดลวดแบบ Δ

$$\frac{I_{LY}}{I_{L\Delta}} = \frac{V_L / (\sqrt{3}Z)}{\sqrt{3}V_L / Z}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

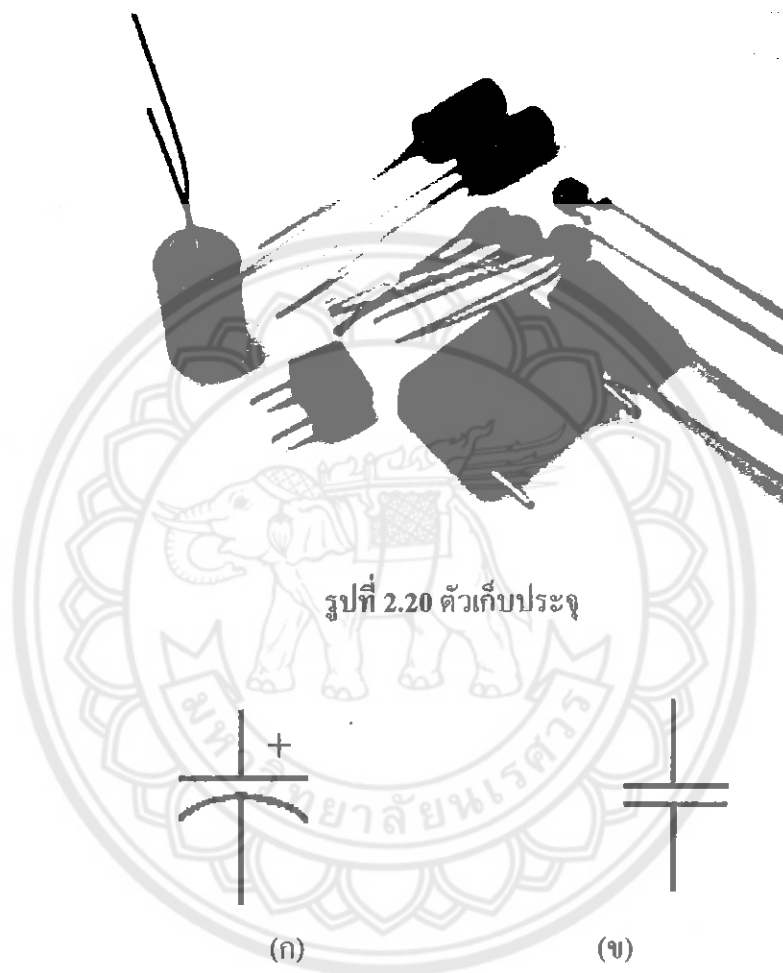
$$I_{LY} = \frac{1}{3}I_{L\Delta}$$

จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนของการต่อขดลวดแบบ Y เป็น 1/3 ของการต่อขดลวดแบบ Δ

แต่อย่างไรก็ตามการต่อขดลวดแบบ Y จะมีแรงบิดเริ่มต้นหมุนต่ำกว่าแรงบิดที่พิกัด 1/3 เท่า ทั้งนี้เพราะแรงบิดเริ่มต้นหมุนจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าที่สายยกกำลังสอง (พิจารณาจากสมการ 4-38 ถึงสมการ 4-40) นอกจากนี้การต่อขดลวดแบบ Y นั้นมีแรงดันไฟฟ้าตกรวมขดลวดที่สเตเตอร์เท่ากับ $V_L / \sqrt{3}$

2.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

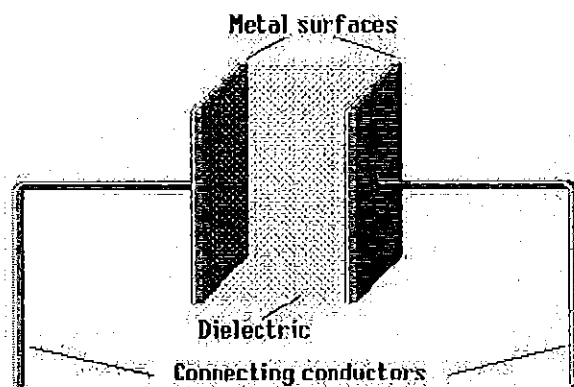
หรือ ตัว C เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าไว้ที่ตัวมัน และคายประจุไฟฟ้าออกมา ตัวเก็บประจุ จะมีหน่วยเป็น F (ฟารัด) ซึ่งตัวเก็บประจุเองจะแบ่งชนิด ออกเป็น ตัวเก็บประจุแบบมีขั้ว และ ตัวเก็บประจุแบบไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบมีขั้ว(ก) และแบบไม่มีขั้ว(ข)

2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุ

พื้นฐาน โครงสร้างของตัวเก็บประจุประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นซึ่งเรียกมันว่า "แผ่น 1 เพลต" และกันด้วย "แผ่นไดอิเล็กตริก" ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ , ไม้ก้ำ , เซรามิก หรือ อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 เรามักเรียกชื่อของตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ ตามสารที่ใช้ทำแผ่น ไดอิเล็กตริก เช่น ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ก็จะมีแผ่น ไดอิเล็กตริกเป็นเซรามิกนั่นเอง



รูปที่ 2.22 โครงสร้างตัวเก็บประจุ

ตัวแปรที่ให้ค่าของตัวเก็บประจุมากหรือน้อยมีอยู่ 3 ประการ คือ

-พื้นที่แผ่นเพลตที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลตมากก็ยังมีค่าความจุมาก

-ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต ยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลตมากขึ้นค่าความจุก็ยิ่งลดลง

-ชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้

ทำแผ่นไดอิเล็กตริกหน่วยของตัวเก็บประจุคือ "ฟารัด" (Farad) เขียนสัญลักษณ์ย่อว่า "F" ในทางปฏิบัติถือว่า หนึ่งฟารัดมีค่ามาก ..ส่วนใหญ่ค่าที่ใช้จะอยู่ในช่วง ไมโครฟารัดกับพิโกฟารัด

หนึ่งไมโครฟารัดมีค่าเท่ากับหนึ่งในล้านของฟารัด (1 ไมโครฟารัดเท่ากับ 0.000,001 ฟารัด)

ใช้สัญลักษณ์ "uF" (microfarad) และ หนึ่งพิโกฟารัดมีค่าเท่ากับหนึ่งในพันล้านของหน่วยไมโครฟารัด (1 พิโกฟารัด เท่ากับ 0.000,001 ไมโครฟารัด) ใช้สัญลักษณ์ว่า "pF" (picofarad)

$$1\mu\text{F} = 1/1,000,000 \text{ F} = 0.000,001 \text{ F}$$

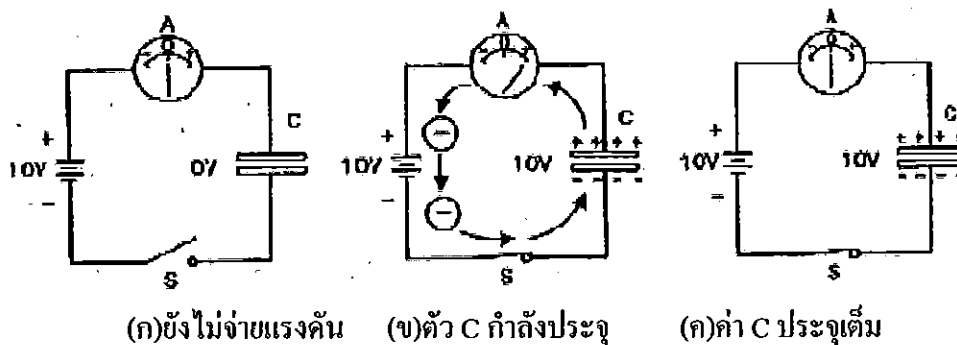
$$1\text{pF} = 1/1,000,000 \mu\text{F} = 0.000,001 \mu\text{F}$$

2.2.2 การทำงานของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุมีสถานะการทำงานอยู่ 2 สถานะคือ ประจุ (Charge) และ คายประจุ (Discharge)

1. การประจุ

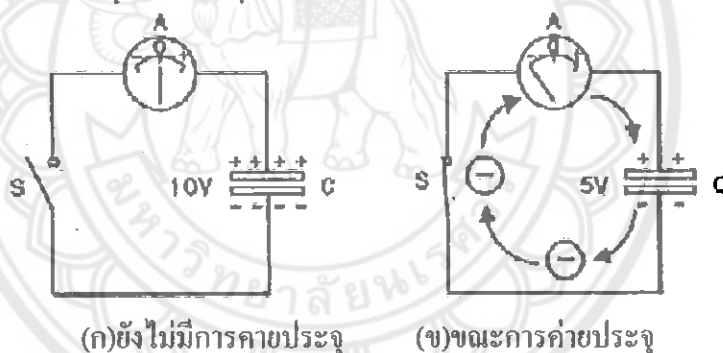
การเก็บประจุก็คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุนั้นเอง ซึ่งอธิบายโดยละเอียดดังในรูป ก. เมื่อนำแบตเตอรี่อื่นๆ ต่อกับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปออกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไป ผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้ว เหมือนกันมาใกล้กันมันก็จะผลักรัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมี ประจุเป็น + และ - ปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูก ผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น (เมื่อเทียบกับอีกด้าน)



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

2. การคายประจุ

ตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้ว ถ้าเรายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน (รูป ก) อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจร ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบ ไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า "การคายประจุ"



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

2.2.3 ค่าความจุ

ค่าความจุ(Capacitance) คือ อัตราส่วนของขนาดประจุบนตัวนำกับความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำ

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.61}$$

โดย C= ค่าความจุ มีหน่วยเป็น คูลอมป์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟาราด (Farad หรือ F)

Q= ขนาดของประจุ มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (C)

V= ความแตกต่างศักย์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

A= พื้นที่ของเพลต โลหะเป็นตารางนิ้ว

d = ค่าความห่างระหว่างเพลต โลหะทั้งสองเป็นนิ้ว

ϵ = ค่า permittivity ของฉนวนที่อยู่ระหว่างเพลตทั้งสอง

2.2.4 ชนิดของตัวเก็บประจุตามการใช้งาน

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของประจุไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่หลายชนิดตามการใช้งาน

1. ตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำขนาน

ให้ความหนาแน่นประจุ $\sigma = \frac{Q}{A}$

จากสนามไฟฟ้า $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$

และ $V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$

ดังนั้น $C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$ (2.62)

2. ตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอก

ตัวอย่างตัวเก็บประจุแบบนี้ได้แก่ สายโคแอกเชียล

สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำทรงกระบอก

$$E = 2k\lambda/r \text{ โดย } \lambda = \frac{Q}{l}$$

ดังนั้น $C = \frac{Q}{V} = \frac{l}{2k \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$ (2.63)

2.2.5 การต่อตัวเก็บประจุ

1. แบบขนาน

$$Q = Q_1 + Q_2$$

จาก $Q = CV$ โดย $Q_1 = C_1V$ และ $Q_2 = C_2V$

$$Q = C_{eq}V = C_1V + C_2V = (C_1 + C_2)V$$

ดังนั้น $C_{eq} = C_1 + C_2$ (2.64)

2. การต่อแบบอนุกรม

$$V = \frac{Q}{C_{eq}} \text{ โดย } V = V_1 + V_2$$

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \text{ และ } V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.65)$$

2.2.6 ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

เป็นสารที่ไม่นำไฟฟ้าหรือฉนวนเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความจุ เมื่อนำสารไดอิเล็กทริกใส่ระหว่างแผ่นตัวนำจะทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นเป็น κ เท่า โดยค่า κ นี้เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) พิจารณาแผ่นตัวนำแบบขนานซึ่งมีสูญญากาศกั้นระหว่างตัวนำ

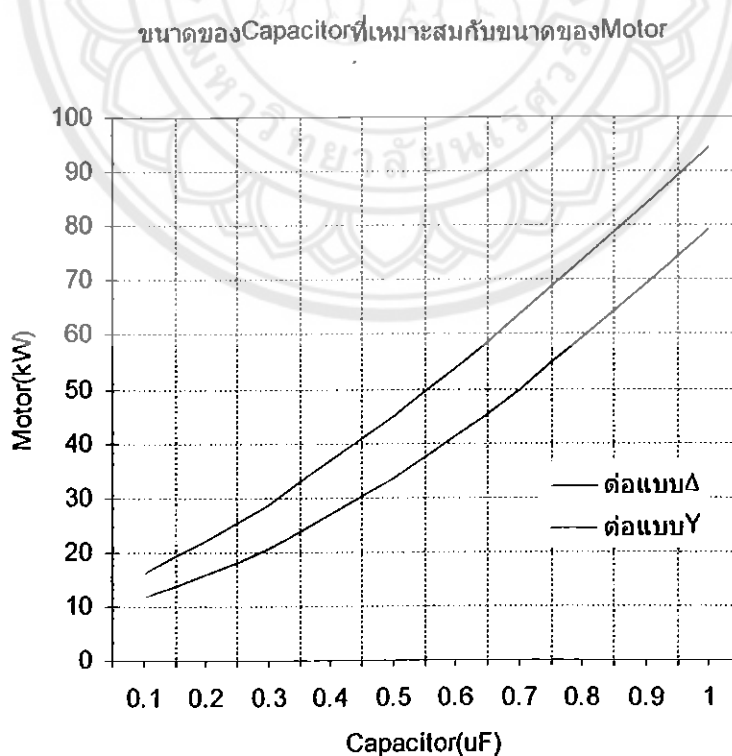
$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.66)$$

กรณีใส่สารไดอิเล็กทริกค่าความจุจะเปลี่ยนเป็น

$$C = \kappa C_0 = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.67)$$

2.3 กราฟขนาดของคาปาซิเตอร์ ที่เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์

จากการทดสอบมอเตอร์แต่ละขนาด สามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับมอเตอร์แต่ละขนาดได้ดังกราฟ



รูปที่ 2.25 กราฟขนาดของคาปาซิเตอร์ ที่เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์

บทที่ 3

วิธีการขั้วมอเตอร์สามเฟสด้วยแหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว

3.1 การต่อตัวเก็บประจุเข้ากับมอเตอร์ 3 เฟส

มอเตอร์ 3 เฟส จะมีลักษณะการต่อที่จุดต่อสายของมอเตอร์ 3 เฟส แบ่งออกเป็น แบบวาร์ย์ และแบบเคลด้า ดังรูปที่ 3.1 และในแต่ละจุดต่อจะแบ่งสัญญาณลักษณะออกเป็นจุด u_1, u_2, v_1, v_2, w_1 และ w_2 ดังรูปที่ 3.2

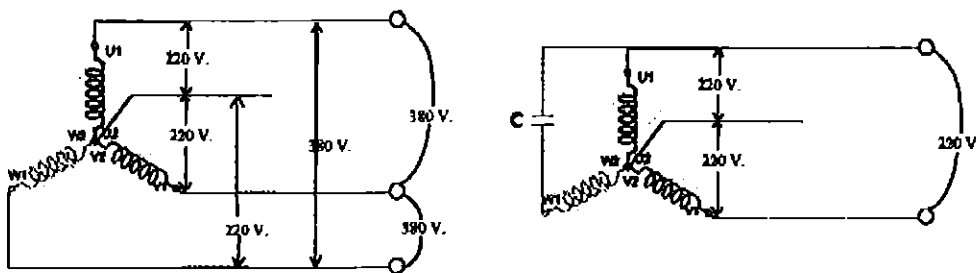


รูปที่ 3.1 ลักษณะการต่อที่จุดต่อสายของมอเตอร์สามเฟสแบบวาร์ย์ และเคลด้า

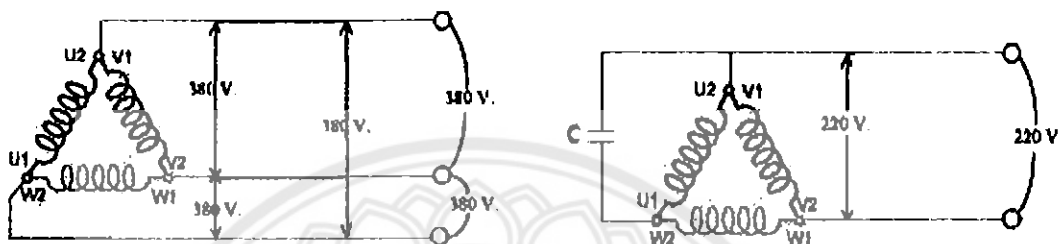


รูปที่ 3.2 ลักษณะมอเตอร์สามเฟสและจุดต่อสาย

จากรูปลักษณะการต่อที่จุดต่อสายของมอเตอร์ 3 เฟส แบบวาร์ย์ และเคลด้า สามารถแสดงการต่อคาปาซิเตอร์เข้ากันระหว่างจุด 2 จุด คือ จุด u_1 และ w_1 ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นการแสดงการต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส ในแบบวาร์ย์ และแบบเคลด้า



รูปที่ 3.3 การต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับจุดต่อสายของมอเตอร์แบบวาย

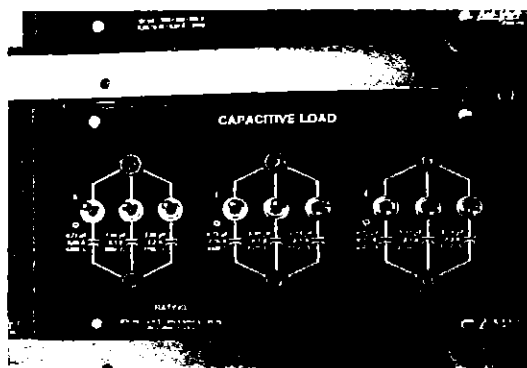


รูปที่ 3.4 การต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับจุดต่อสายของมอเตอร์แบบเดลต้า

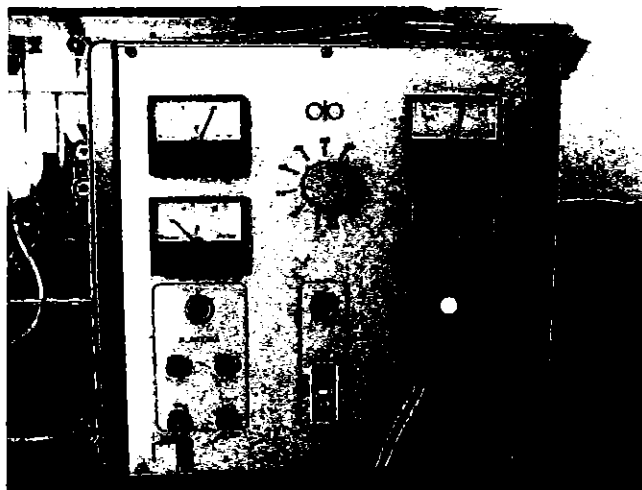
ในการทดลองต้องระวังในเรื่องของกระแส เพื่อไม่ให้กระแสเกินกระแสพิกัดพิกัดของมอเตอร์ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ได้ และคาปาซิเตอร์ที่ต่อเข้าไปควรทดแรงดันได้ประมาณ 400 โวลต์ ไม่เช่นนั้น อาจทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้

3.2 การทดสอบและวัดค่า

วิธีการเลือกค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์ขนาดต่างๆ โดยใช้วิธีลองผิดลองถูก ซึ่งจะทำการต่อพวงตัวเก็บประจุเข้าไปในจุดต่อสาย ขณะที่มอเตอร์ยังไม่จุดไหลดแล้ว เปลี่ยนค่าความจุของตัวเก็บประจุไปเรื่อยๆ โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าเพิ่มค่าได้ ดังรูปที่ 3.5 จนกระทั่งใช้แอมมิเตอร์วัดกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ขณะนั้นได้ประมาณ 90- 95% ของกระแสบนแผ่นป้าย (name plate) ของมอเตอร์ตัวนั้น



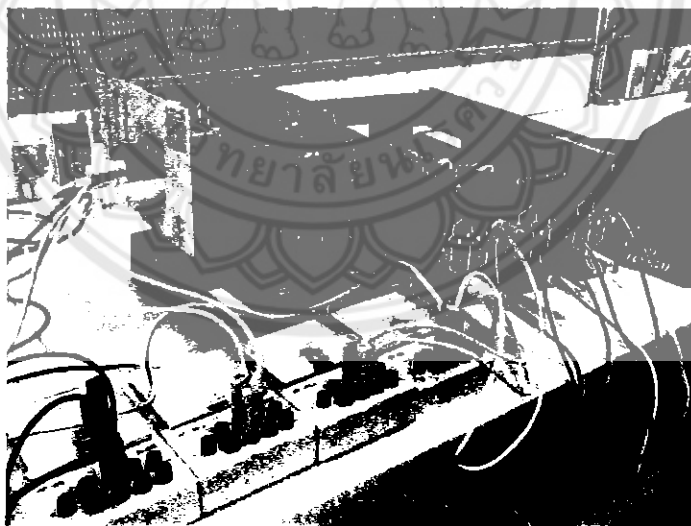
รูปที่ 3.5 คาปาซิทีปโหลด ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟเฟสเดียว

3.2.1 การทดสอบแบบ No Load

ในการทดสอบในตอนแรกได้ทำการทดสอบแบบ No Load โดยใช้กับมอเตอร์ที่มี Name plate 220/380[V] 1.9/1.1[A] 0.37[kw] 1390 [RPM] 50[Hz] แล้วต่อแอมมิเตอร์วัดกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์โดยตัดตั้งรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การต่อตัวเก็บประจุ แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์

จากรูปที่ 3.7 แสดงถึงการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับวงจรของมอเตอร์ โดยการต่อโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์เข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดแรงดันและกระแสเกินพิกัดที่กำหนดไว้ที่แผ่นป้ายของมอเตอร์



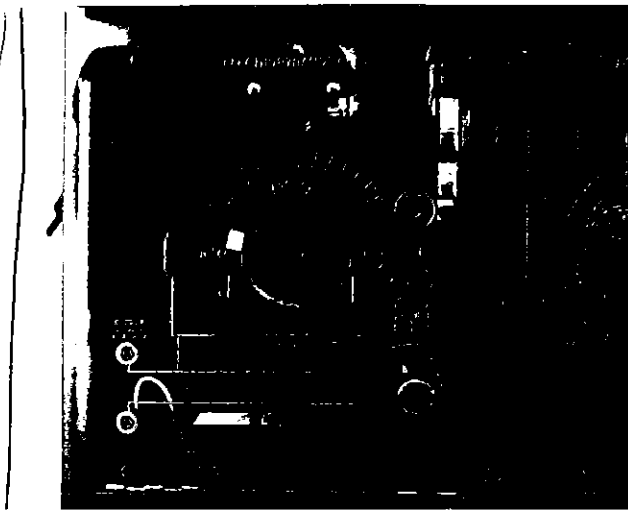
รูปที่ 3.8 มอเตอร์สามารถหมุนได้เมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุที่ได้ค่าที่เหมาะสม

3.2.2 การทดสอบขณะมี Load และหาแรงบิดของมอเตอร์

ในการทดสอบแบบ No Load เราไม่สามารถทราบได้ว่าเมื่อนำไปใช้งานจริงมอเตอร์จะสามารถจุดโหลดได้หรือไม่ หรือมอเตอร์จะสามารถเริ่มหมุนได้หรือไม่เมื่อต่อเข้ากับโหลด เราจึงทำการต่อมอเตอร์เข้ากับโหลด ในที่นี้เราใช้ Electrodynamometer เพื่อเป็นการวัดแรงบิด(torque)ของมอเตอร์ไปด้วย มอเตอร์ที่นำมาใช้คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกแบบ 4 ขั้ว(Four-pole Squirrel cage Induction Motor)



รูปที่ 3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกแบบ 4 ขั้ว



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์(Electrodynamometer)

จากรูปที่ 3.10 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงบิดของมอเตอร์(torque) ที่ได้จากการทดลอง โดยการต่อ ตัวเก็บประจุที่ค่าต่างๆ กันเข้าไปในวงจร เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปพอร์ตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบแรงบิดที่มีค่ามากที่สุดและมีประสิทธิภาพที่ดีด้วย



รูปที่ 3.11 การสอบมอเตอร์ขณะมีโหลด และวัดแรงบิด

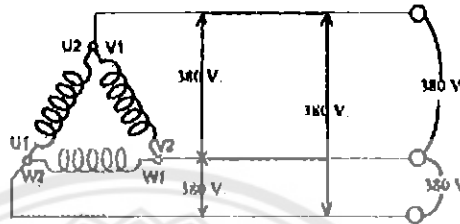
จากรูปที่ 3.11 เป็นการวัดค่าที่ความเร็วคงที่ประมาณ 1,360 รอบ/นาที ค่าที่ได้จากเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์จะเป็นค่าแรงบิด ($N \cdot M$) ของมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้าโดยใช้ไฟสามเฟส

ลักษณะในการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้า จะมีลักษณะดังนี้

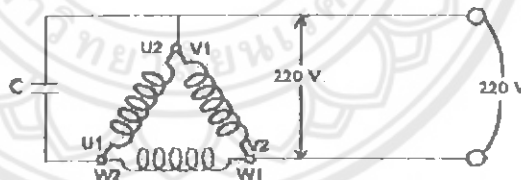


รูปที่ 4.1 ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้า

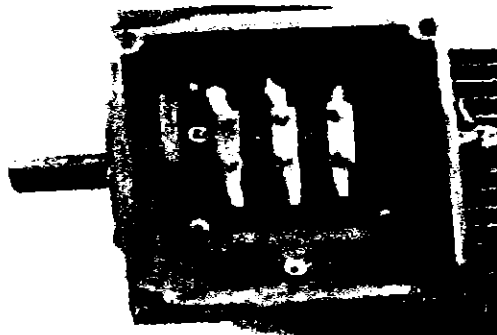
จากการทดลองโดยการรัน มอเตอร์สามเฟสที่ต่อแบบเดลต้า แล้วพบว่ามอเตอร์สามเฟสที่ความเร็ว 1360 rpm จะได้ค่าแรงบิดประมาณ 2.5 N*M

4.2 ผลการทดลองโดยการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรโดยการต่อแบบเดลต้า

เราสามารถนำมาใช้กับไฟเฟสเดียวโดยการนำ ตัวเก็บประจุมาต่อคร่อมเข้าไปในวงจร ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้า โดยมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมกับวงจร



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้าที่ขั้วของมอเตอร์

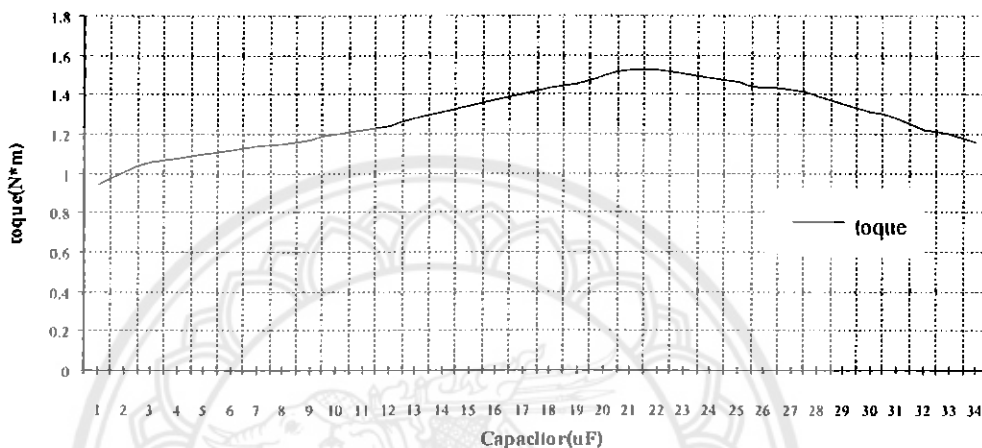
จากการทดลองโดยการนำเอาไฟ 1 เฟสมาใช้กับมอเตอร์ 3 เฟส ต่อแบบ เคลด้า และมอเตอร์มี พิกัดกำลังดังนี้ 175W 0.53A 1360 rpm ค่าแรงบิด 2.5 N*M ได้ผลการทดลองตามตารางดังนี้

Capacitor(μ F)	I_{stator} (A)	V_{stator} (V)	$I_{capacitor}$ (A)	$V_{capacitor}$ (V)	แรงบิด(Nm)
6.51	1	220	0.56	190	0.95
7.23	1.04	220	0.60	190	1.03
7.95	1	220	0.65	200	1.06
8.67	0.99	220	0.71	200	1.09
9.4	1	220	0.77	200	1.17
10.12	1	220	0.81	200	1.19
10.84	0.91	220	0.86	200	1.12
11.57	0.9	220	0.91	200	1.15
12.29	0.9	220	0.97	200	1.15
13.01	0.9	220	1.04	200	1.23
13.73	0.85	220	1.1	200	1.2
14.46	0.88	220	1.17	200	1.22
15.18	0.89	220	1.21	200	1.29
15.9	0.86	220	1.29	200	1.3
16.63	0.81	220	1.4	210	1.31
17.35	0.9	220	1.45	210	1.4
18.07	0.88	220	1.5	210	1.4
18.79	0.85	220	1.6	210	1.41
19.52	0.86	220	1.65	210	1.4
20.24	0.89	220	1.75	210	1.49
20.96	0.9	220	1.80	210	1.49
21.69	0.92	220	1.85	210	1.51
22.41	0.83	220	2.1	210	1.41
23.13	0.94	220	2	220	1.48
23.85	0.93	220	2.1	220	1.46
24.58	0.95	220	2.15	220	1.46
25.3	0.97	220	2.25	220	1.45
26.02	1	220	2.3	220	1.43
26.75	0.98	220	2.4	220	1.35
27.47	1.03	220	2.4	220	1.34
28.19	1.05	220	2.45	220	1.31
28.91	1.08	220	2.5	220	1.28
29.64	1.1	220	2.55	220	1.28
30.36	1.13	220	2.6	220	1.24

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบเคลด้า

จากตารางที่ได้จะได้ค่าแรงบิดสูงสุดที่ 1.51 N*M ที่ค่าคาปาซิเตอร์ 21.69 ไมโครฟารัด และที่ค่าคาปาซิเตอร์ที่มากหรือน้อยกว่านี้จะมีลักษณะของแรงบิดที่ลดลงเรื่อยๆ ประสิทธิภาพที่ได้จะได้ประมาณ 60.4% ของการ Run มอเตอร์ด้วยไฟสามเฟสและจะได้กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับค่าคาปาซิเตอร์ดังนี้

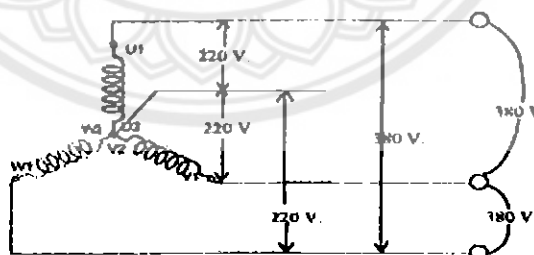
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับคาปาซิเตอร์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบเคลด้า

4.3 ผลการทดลองการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบวายโดยใช้ไฟสามเฟส

ลักษณะในการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบวาย จะมีลักษณะดังนี้

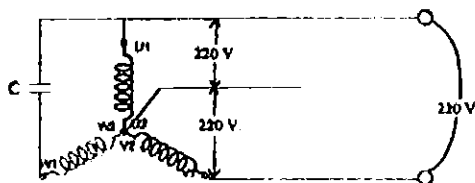


รูปที่ 4.5 ลักษณะการต่อมอเตอร์แบบวาย

จากการทดลองโดยการรัน มอเตอร์สามเฟสที่ต่อแบบวาย แล้วพบว่ามอเตอร์สามเฟสที่ความเร็ว 1360 rpm จะได้ค่าแรงบิดประมาณ 0.74 N*M

4.4 ผลการทดลองโดยการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรโดยการต่อแบบวาย

เราสามารถนำมาใช้กับไฟเฟสเดียวโดยการนำ ตัวเก็บประจุมาต่อคร่อมเข้าไปในวงจร ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 ลักษณะการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบวาย โดยมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมกับวงจร



รูปที่ 4.7 ภาพแสดงการต่อมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้าที่ขั้วของมอเตอร์

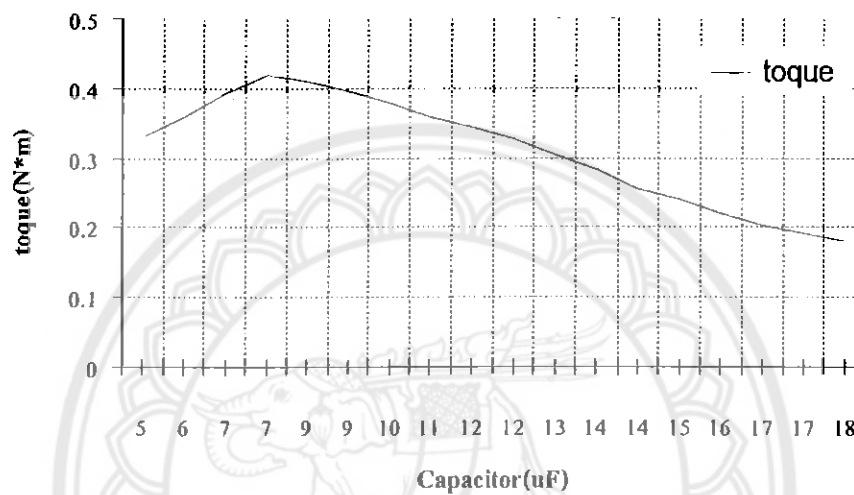
จากการทดลองโดยการนำเอาไฟ 1 เฟสมาใช้กับมอเตอร์ 3 เฟส ต่อแบบ สตาร์ และมอเตอร์ มีพิกัดกำลังดังนี้ 175 W 0.53 A 1360 rpm จะได้ค่าแรงบิดประมาณ 0.74 N*M

Capacitor(μ F)	I_{stator} (A)	V_{stator} (V)	$I_{\text{capacitor}}$ (A)	$V_{\text{capacitor}}$ (V)	ทอร์ก(N*m)
5.06	0.56	230	0.35	200	0.34
5.78	0.63	250	0.4	220	0.36
6.51	0.7	280	0.45	220	0.38
7.23	0.8	300	0.5	210	0.42
8.67	0.97	330	0.6	210	0.41
9.4	1.05	340	0.65	210	0.4
10.12	1.07	345	0.7	210	0.38
10.84	1.15	360	0.72	205	0.36
11.57	1.2	365	0.74	205	0.35
12.29	1.0	370	0.75	205	0.33
13.01	0.9	375	0.77	200	0.30
13.73	0.85	380	0.80	200	0.29
14.46	0.80	390	0.90	200	0.25
15.18	0.78	400	1	200	0.24
15.9	0.75	410	1.1	190	0.22
16.63	0.72	415	1.4	185	0.20
17.35	0.7	420	1.45	180	0.20
18.07	0.65	430	1.5	175	0.18

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบวาย

จะเห็นว่าที่ค่าแรงบิดที่สูงสุดคือ 0.42 NM และจะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 7.23 μF และจะได้ประสิทธิภาพประมาณ 56.8% ของการ Run มอเตอร์ด้วยไฟสามเฟส และที่ค่าคาปาซิเตอร์ที่มากหรือน้อยกว่านี้จะมีลักษณะของแรงบิดที่ลดลงเรื่อยๆ แล้วนำค่าจากตารางมาพล็อตกราฟ จะได้กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับค่าคาปาซิเตอร์ดังนี้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับคาปาซิเตอร์



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการทดสอบมอเตอร์โดยการต่อแบบวาย

จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดกับคาปาซิเตอร์โดยการต่อแบบเคลด้าจะใช้คาปาซิเตอร์ 21.69 ไมโครฟารัด ซึ่งจะสูงกว่าการต่อแบบสตาร์ที่ใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 7.23 ไมโครฟารัด แต่แรงบิดที่ได้แบบเคลด้าจะสูงกว่า สตาร์

จากการทดลองทั้งแบบสตาร์ และ เคลด้า พบว่า การต่อแบบเคลด้ามีแรงบิดที่มากกว่าการต่อแบบสตาร์ถึง 72.2 % แต่การต่อแบบเคลด้า นั้น ควรวัด แรงดัน และกระแสไม่ให้เกินพิกัดที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายมอเตอร์

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัญหาของการนำเอามอเตอร์สามเฟสมาใช้กับไฟ เฟสเดียว คือ มอเตอร์ไม่สามารถเริ่มหมุนโดยใช้ไฟเฟสเดียวได้ เพราะแรงบิดล่อกรอเตอร์ หรือแรงบิดเริ่มหมุนจะมีค่าต่ำมาก และลักษณะคุณสมบัติขดลวดสตาร์ทจะไม่ค่อยคึก ทำให้อัตราการหมุนแบบนี้เหมาะสำหรับขับโหลดแบบพัลลัม และใช้ร่วมกับเครื่องจักรที่เริ่มหมุนแบบตัวเปล่า หรือไม่มีโหลดต่อกับมอเตอร์ โดยพลังงานของมอเตอร์ชนิด 3 เฟสที่จะ ได้จากการจ่ายไฟเฟสเดียวนั้นจะเหลือประมาณ 60 % ของค่าแรงบิด ที่กำหนดไว้บนแผ่นป้าย และจะต้องเช็คค่ากระแสที่มอเตอร์ใช้ไม่ควรเกินค่ากระแสที่ระบุไว้บนแผ่นป้าย เพราะจะทำให้ชุดขดลวดของมอเตอร์มีอุณหภูมิสูงเกินกว่าพิกัดกระแสที่กำหนดไว้บนแผ่นป้าย

คาปาซิเตอร์จะต้องมีพิกัดแรงดันทำงาน $1.15 \times$ แรงดันไลน์ (มากกว่า 250 V ในระบบไฟ 220V) และการนำมอเตอร์ 3 เฟส ต่อเป็น 1 เฟส แบบ Capacitor – Run ไม่ควรนำไปใช้งานกับมอเตอร์กำลังสูงเกิน 2 kW เพราะที่กำลังสูงราคาของคาปาซิเตอร์จะสูงมาก ซึ่งขนาดของ Capacitor จะแปรผันตรงข้ามกับส่วนกลับของแรงดัน ไลน์ยกกำลังสอง ($C = 1/U^2$) อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปใช้งาน จำเป็นจะต้องตรวจวัดกระแสที่มอเตอร์ใช้จะต้องไม่สูงเกินกว่า ค่ากระแสพิกัด ที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายมอเตอร์

จากการทดลอง Run มอเตอร์ที่ ค่าคาปาซิเตอร์ต่างๆ พบว่าแรงบิดที่สูงที่สุดจะเกิดที่ค่าค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์ขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ มอเตอร์หมุนช้าลง และแรงบิดได้จะมีค่าน้อยลงด้วย และส่งผลให้เกิดกระแสไหลเกินพิกัดกระแส และถ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ อาจส่งผลให้มอเตอร์ไหม้ได้

จากการทดลองการต่อแบบสตาร์ท และ แบบเคลด้า นั้น พบว่าการต่อแบบสตาร์ทได้กระแสขณะสตาร์ทน้อยกว่าแบบเคลด้ามาก และการต่อแบบเคลด้าจะมีแรงดันที่สูงกว่าแรงดันพิกัดที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายมอเตอร์จึงไม่นิยมต่อ แบบเคลด้า ในขณะที่ การต่อแบบสตาร์ทนั้น สามารถรับพิกัดแรงดันได้มากกว่าจึงนิยมการต่อแบบสตาร์ทมากกว่าการต่อแบบเคลด้า

5.2 ประเมินผลการทดลอง

จากการดำเนินงานโครงการ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์แล้ว ได้ผลดังนี้

5.2.1 สามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟส

5.2.2 สามารถเข้าใจถึงหลักการของการทำให้เฟสสมดุลโดยการใส่คาปาซิเตอร์เป็นตัวช่วยให้เฟสสมดุลได้

5.2.3 สามารถนำเอาไปใช้ขับมอเตอร์สามเฟสในที่ที่มีไฟเฟสเดียวได้

5.3 ปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข

5.3.1 ปัญหาเกิดจากการต่อวงจรซึ่งในครั้งแรกนั้นยังไม่ค่อยมีความชำนาญในการต่อวงจรมากนักจึงทำให้เกิดการ ทิปในวงจรขึ้นบ่อยครั้งเนื่องจากการต่อวงจรผิดพลาด

5.3.2 ปัญหาเกิดจากมอเตอร์ที่เรานำมาทดลองนั้นมีเพียงแต่ตัวเดียวที่สามารถวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบได้ จึงทำให้สามารถทดลองมอเตอร์ได้เพียงพิกัดเดียว

5.3.3 ปัญหาเกิดจากในการทดลองต้องระวังไม่ให้เกิดกระแสเกินพิกัดของมอเตอร์ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ได้

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ผลที่ได้จากการทดลองในโครงการนี้ สามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ในที่ชนบทที่มีไฟฟ้าเฟสเดียวแต่มีมอเตอร์สามเฟส ซึ่งจะให้ค่าแรงบิดประมาณ 60% ของไฟสามเฟส และเหมาะที่จะพัฒนาต่อเพื่อที่จะทำให้ได้ค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่สูงขึ้นต่อไปได้



เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทวัส วงศ์พฤกษ์พนากุล. 70 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น . 2546
- [2] มงคล ทองสงคราม. เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพมหานคร : บริษัท รามาการพิมพ์ . 2535
- [3] “ การควบคุมมอเตอร์.” [Online]. Available :
http://www.st.kmutt.ac.th/~s5400211/home_thai.html
- [4] “ ตัวเก็บประจุ.” [Online]. Available :
<http://www.chontech.ac.th/~electric/html/capacitor.htm>



ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ นายปิยะพันธ์ จันทรแจ่ม
 ภูมิลำเนา 517 หมู่ 9 ต.อรัญญิก อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : p_janjang@hotmail.com



ชื่อ นายสุรเชษฐ บุญมาสอน
 ภูมิลำเนา 300 หมู่ 10 ต.พรานกระต่าย อ.พรานกระต่าย
 จ.กำแพงเพชร 62110
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : teedet_new@hotmail.com