

การศึกษาเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส
THE STUDY OF STARTING INDUCTION MOTOR 3 PHASE

นายกำพล หน่อแก้ว รหัส 48361356

นายณัฐพล สิทธิศรีจันทร์ รหัส 48361486

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ. 2.5. พ.ศ. 2553 /.....
เลขทะเบียน..... 590 7768
เลขเรียกหนังสือ..... 4/1
..... 11581 ก.
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2551



ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ การศึกษาเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส
ผู้ดำเนินโครงการ นายกำพล หน่อแก้ว รหัส 48361356
นายณัฐพล สิทธิศรีจันทร์ รหัส 48361486
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบรบือ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....
.....ประธานกรรมการ
(ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ
(อาจารย์สราวดี วัฒนวงศ์พิทักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

หัวข้อโครงการ	การศึกษาเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกำพล	หน่อแก้ว	รหัส 48361356
	นายณัฐพล	สิทธิศรีจันทร์	รหัส 48361486
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร	เรืองสินชัยวานิช	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและทดลองเทคนิคการเริ่มหมุนมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส แบบ Direct On Line และแบบ Star-Delta โหลด 35%, 65%, 90% วิเคราะห์เปรียบเทียบกระแสขดลวดและหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบมอเตอร์ เพื่อนำค่าที่ได้ใส่ในโปรแกรม PSIM แล้ว Simulate เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างกระแสขดลวดต่อกระแสทำงานปกติมีค่าประมาณ 5 เท่า ในกรณีต่อมอเตอร์อินดักชันต่อแบบ Y- Δ อัตราส่วนกระแสขดลวดต่อกระแสทำงานปกติมีค่าประมาณ 1.5 เท่า ของกระแสทำงานปกติ การสตาร์ทมอเตอร์แบบ Direct On Line จะมีค่ากระแส I_{peak} สูงกว่า การสตาร์ทมอเตอร์ต่อแบบ Y- Δ กระแสขดลวดต่อมอเตอร์ที่ต่อแบบ Y- Δ กระแสขดลวดจะลดลงประมาณ 3 เท่า เมื่อต่อโหลดเปอร์เซ็นต์สูงขึ้นค่ากระแสขดลวดจะสูงขึ้นและเวลาเข้าสู่สภาวะปกติจะมีเวลานาน ผลการทดลองระหว่างโปรแกรม PSIM กับการทดลองจริง พบว่า ค่าความผิดพลาดและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแตกต่างกันและบางกรณีมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สูง เนื่องจาก ค่าที่ใส่ในโปรแกรม PSIM ได้จากการทดลองทำให้ผลที่ได้จากการ Simulate ผิดพลาด

Project Title	The Study of Starting Induction Motor 3 Phase.		
Name	Mr.Kumpon	Norgeaw	ID.48361356
	Mr. Nataphon	Sittisrijan	ID.48361486
Project Advisor	Sompom	Ruangsinchaiwanich, Ph.D.	
Major	Electrical Engineering.		
Department	Electrical and Computer Engineering.		
Academic Year	2008		

ABSTRACT

This project is a study and a test of starting spinning technique of induction 3 phase motor: Direct on Line and Star-Delta which load 35%, 65%, and 90% to analyze current comparison during starting and to find parameter values from the motor test. The resulted values will be filled in the PSIM program and be simulated to compare with the real test. The results are found that a ratio value between starting current and normal current is about 5 times in case Y- Δ induction motor is joined. The ration value between starting current and normal current is about 1.5 times. The *I_{peak}* current value of Direct on Line starting motor is higher than that of Y- Δ starting motor. The starting current of Y- Δ joint motor will decrease about 3 times. When it joins a higher percent of loading, the value of starting current will be higher and the time to become in the normal condition is long. The results of testing between PSIM program and the real test are found that the error value and the error percent are different and in some cases the percent of error is high because the resulted values which are filled in PSIM program make the result from simulation wrong.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญาบัตรในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลือและให้คำแนะนำจาก ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรในครั้งนี้และขอขอบคุณ อาจารย์ สรวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์ และอาจารย์แสงชัย มังกรทอง ที่ให้ความกรุณาเป็นผู้ตรวจสอบปริญญาบัตรและคอยให้คำแนะนำในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวกับปริญญาบัตรในครั้งนี้ และขอขอบคุณนายกฤษดา สมจิตชอบ และนายณัฐภัทร มัทย์พงษ์ถาวร ที่ให้คำปรึกษาและดูแลในช่วงของการทดลอง

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล คอยเป็นกำลังใจและเป็นผู้สนับสนุนในด้านต่างๆมาโดยตลอดและขอขอบคุณบุคคลต่างๆที่ไม่ได้กล่าวถึงรวมถึงแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องการทำปริญญาบัตรในครั้งนี้

นายกำพล หน่อแก้ว
นายณัฐพล สิริศรีจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบข่ายโครงการงาน.....	2
1.4 กิจกรรมการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 มอเตอร์อินดักชัน.....	4
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส.....	5
2.3 หลักการทำงาน.....	7
2.4 ความเร็วสลิบและความเร็วโรเตอร์.....	7
2.5 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์.....	8
2.6 วงจรสมมูลโรเตอร์.....	9
2.7 วงจรสมมูลของสเตเตอร์.....	12
2.8 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชัน.....	12
2.9 คุณลักษณะของมอเตอร์อินดักชัน.....	15
2.10 หลักการทำงานของมอเตอร์อินดักชัน.....	16
2.11 มอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบ Wound-Rotor.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 การทดสอบขณะไม่มีโหลด	17
2.13 การทดสอบการช็อคโรเตอร์	19
2.14 เทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินคักชัน	21
2.15 ออสซิลโลสโคป	28
2.16 Electric Transients In Induction Machine	31
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	
3.1 การออกแบบการทดลอง	32
3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	39
3.3 โปรแกรม PSIM	42
3.4 การใช้ PSIM ในการวิเคราะห์ห้วงจร	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลจากการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาจางจรสมมูล	52
4.2 ผลจากการทดลองเพื่อหา T_{load}	57
4.3 ผลจากการทดลองต่อวงจรจริง	67
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.2 ประเมินผล	100
5.3 ปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข	101
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	101
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก	103
ประวัติผู้เขียน โครงการงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การแสดงผล No load test.....	54
4.2 การแสดงผล Locked-rotor test	54
4.3 แสดงกระแสมอเตอร์ขณะจับโหลดต่างๆ	57
4.4 แสดงผลเพื่อนำไปหา T_{load}	58
4.5 แสดงกระแสมอเตอร์ขณะจับโหลดต่างๆ	62
4.6 แสดงผลเพื่อนำไปหา T_{load}	63
4.7 เปรียบเทียบกระแสขณะสตาร์ท	71
4.8 เปรียบเทียบกระแสขณะสตาร์ทกับกระแสทำงานปกติ มอเตอร์ทำงานปกติต่อแบบ Δ	72
4.9 ตารางการเปรียบเทียบค่าจากการ Simulate กับค่าการทดลอง มอเตอร์ต่อแบบ Δ	79
4.10 ตารางการคิดค่า error ของ โหลดต่างๆ ระหว่างการทดลองกับ Simulate มอเตอร์ต่อแบบ Δ	79
4.11 ตารางการเปรียบเทียบค่าจากการ Simulate กับค่าการทดลอง มอเตอร์ต่อแบบ Y	80
4.12 ตารางการคิดค่า error ของ โหลดต่างๆ ระหว่างการทดลองกับ Simulate มอเตอร์ต่อแบบ Y	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์อินดักชัน	4
2.2 โครงสร้างภายในของมอเตอร์อินดักชัน.....	5
2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก	5
2.4 ลักษณะแ่งตัวนำของโรเตอร์.....	6
2.5 แบบวาถ้วโรเตอร์.....	6
2.6 วงจรสมมูลของโรเตอร์.....	9
2.7 วงจรสมมูลจากสมการ 2-14	10
2.8 วงจรสมมูลของสเตเตอร์.....	12
2.9 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ามอเตอร์เหนี่ยวนำใหม่.....	13
2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชัน.....	14
2.12 curve แสดงคุณลักษณะแรงบิด – ความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส.....	15
2.13 การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No – load Test)	17
2.14 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลด	18
2.15 วงจรเทียบเคียงการทดสอบการยึดโรเตอร์.....	19
2.16 Schematic Diagram ของวงจรกำลังและวงจรควบคุม.....	22
2.17 ขณะมอเตอร์ต่อแบบเคลด้า.....	24
2.18 ขณะมอเตอร์ต่อแบบสตาร์.....	25
2.19 วงจรกำลังของการสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เคลด้า.....	26
2.20 วงจรควบคุมมอเตอร์ สตาร์-เคลด้า.....	27
2.21 แสดงขนาดแรงดันรูปคลื่นไซน์.....	28
2.22 เมื่อค้อแหล่งจ่ายไฟกระแสลับในวงจร.....	29
2.23 การวัดค่า V_{p-p}	30
2.24 วงจรสมมูลอินดักชันมอเตอร์อย่างง่ายสภาวะชั่วครู่.....	31
3.1 การต่อตัวต้านทาน 10Ω $10W$	33
3.2 ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10Ω	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การวัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10Ω	34
3.4 การวัดค่ากระแสที่ต่อเข้ากับมอเตอร์.....	35
3.5 การวัดค่ากระแสมอเตอร์ต่อแบบ Y	36
3.6 การวัดค่ากระแสมอเตอร์ต่อแบบ Δ	37
3.7 มอเตอร์อินดักชัน	40
3.8 DC มอเตอร์.....	40
3.9 เครื่องวัดความเร็วรอบ	40
3.10 แคลปมิเตอร์.....	40
3.11 แมกเนติกคอนแทคเตอร์	41
3.12 วัดตั้งมิเตอร์.....	41
3.12 ออสซิลโลสโคป	41
3.13 สวิตช์ปุ่มกดสีเขียวปกติปิด	41
3.14 สวิตช์ปุ่มกดสีแดงปกติปิด	41
3.15 AC Supply 24 V	41
3.16 ตัวต้านทาน $10\text{ w } 10\ \Omega$	42
3.17 โอเวอร์โวลต์ครีเลย์.....	42
3.18 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PSIM Schematic.....	43
3.19 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม SimView	43
3.20 วงจรการวิเคราะห์ห่มอเตอร์ต่อแบบ Y	45
3.21 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม SimView	49
3.22 กราฟแสดงค่ากระแสมอเตอร์ต่อ load 35%	49
3.23 กราฟแสดงค่า กระแส ความเร็วรอบและทอร์คของมอเตอร์.....	50
3.24 วงจรการวิเคราะห์ห่มอเตอร์ต่อแบบ Δ	50
4.1 การวัดค่าเพื่อหาค่า $R_{(stator)}$	53
4.2 ค่าที่ได้จากการวัด $R_{(stator)}$	53
4.3 วงจรสมมูลมอเตอร์.....	56
4.4 กราฟกระแสขณะสตาร์ทเฟส A	67
4.5 กราฟกระแสขณะสตาร์ทเฟส B.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟกระแสขณะสตาร์ทเฟส C.....	68
4.7 กราฟกระแสขณะสตาร์ท	68
4.8 กราฟกระแสขณะสตาร์ท	69
4.9 กราฟกระแสขณะสตาร์ท.....	69
4.10 กราฟกระแสขณะสตาร์ท.....	70
4.11 กราฟกระแสขณะสตาร์ท.....	70
4.12 กราฟ Simulate จาก PSIM	73
4.13 กราฟจากการทดลองจริง.....	73
4.14 กราฟ Simulate จาก PSIM	74
4.15 กราฟจากการทดลองจริง.....	74
4.16 กราฟ Simulate จาก PSIM	75
4.17 กราฟจากการทดลองจริง.....	75
4.18 กราฟ Simulate จาก PSIM	76
4.19 กราฟจากการทดลองจริง.....	76
4.20 กราฟ Simulate จาก PSIM	77
4.21 กราฟจากการทดลองจริง.....	77
4.22 กราฟ Simulate จาก PSIM	78
4.23 กราฟจากการทดลองจริง.....	78
4.24 วงจรสมมูลสภาวะ Transient	81
4.25 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 35%	83
4.26 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 35%	83
4.27 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 65%	86
4.28 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 65%.....	86
4.29 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 90%	89
4.30 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 90%.....	89
4.31 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 35%	92
4.32 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 35%.....	92
4.33 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 65%	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 65%.....	95
4.35 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 90%	98
4.36 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 90%.....	98



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเครื่องจักรกลต่างๆที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทมักจะใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์อินดักชัน (Induction Motor) เพราะมีความคงทนเป็นเยี่ยมและราคาถูกกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นในขณะที่การบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำแต่มีข้อเสียคือ จะมีกระแสขณะสตาร์ทที่สูงประมาณ 7 เท่าของกระแสปกติซึ่งจะทำให้มีผลข้างเคียงต่อระบบไฟฟ้าภายในโรงงานเช่น ระดับแรงดันไฟฟ้าตกและการตัดอัตโนมัติของอุปกรณ์ป้องกัน

เทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชันวิธีนิยมใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น

- การสตาร์ทแบบ ต่อโดยตรงจากไลน์ (Direct on – Line Starting, DOL)
- การสตาร์ทแบบ สตาร์-เดลต้า (Star – Delta Starting)

ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสได้แก่ Direct On Line และ Star – Delta เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปวิเคราะห์และปฏิบัติให้เกิดประโยชน์ในการทำงานได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและทดลองเทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส แบบต่อมอเตอร์โดยตรงจากไลน์ (Direct On Line)

1.2.2 เพื่อศึกษาและทดลองเทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสแบบ Star – Delta

1.2.3 เพื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ กับโปรแกรม PSIM โดยการนำค่าผลการทดสอบมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสมาใส่ใน โปรแกรม PSIM แล้ว Simulate

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสทั้ง 2 แบบ ในกรณีที่มีค่าโหลดต่างๆ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถเข้าใจหลักการการทำงานและการสตาร์ทของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสได้
- 1.5.2 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบการสตาร์ทมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสได้
- 1.5.3 สามารถวิเคราะห์ผลจากการใช้โปรแกรม PSIM ได้
- 1.5.4 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทดลองมาใช้ในชีวิตประจำวันได้
- 1.5.5 สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่เพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

1.6 งบประมาณ

1.6.1 ค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	1,000	บาท
1.6.2 ค่ากระดาษและถ่ายเอกสาร	200	บาท
1.6.3 ค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์	300	บาท
1.6.4 ค่าจัดทำรูปเล่ม	500	บาท
<u>รวมเป็นเงิน</u>	<u>2,000</u>	บาท (สองพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ ขออนุมัติด้วยเกล้าทุกราชการ



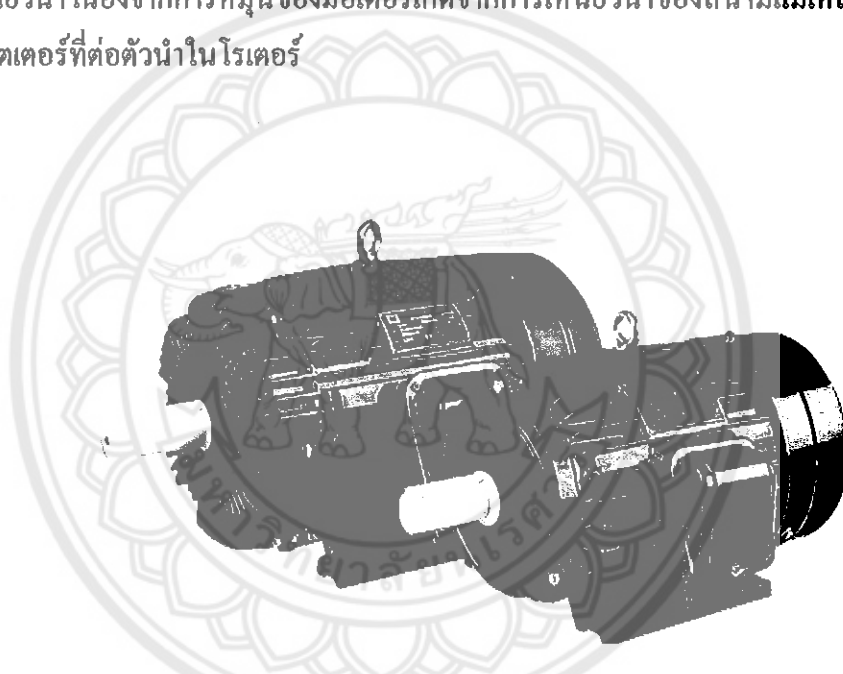
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์อินดักชัน (Induction Motors)

มอเตอร์อินดักชันเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ถ้านำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีข้อเสียมากจึงไม่ค่อยนิยมเท่าที่ควร ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงอินดักชันจึงมักหมายถึงมอเตอร์อินดักชัน

คำว่า “อินดักชัน” (Induction) หมายถึง การเหนี่ยวนำบางครั้งเรียกมอเตอร์อินดักชันว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่ต่อตัวนำในโรเตอร์



รูป 2.1 มอเตอร์อินดักชัน [10]

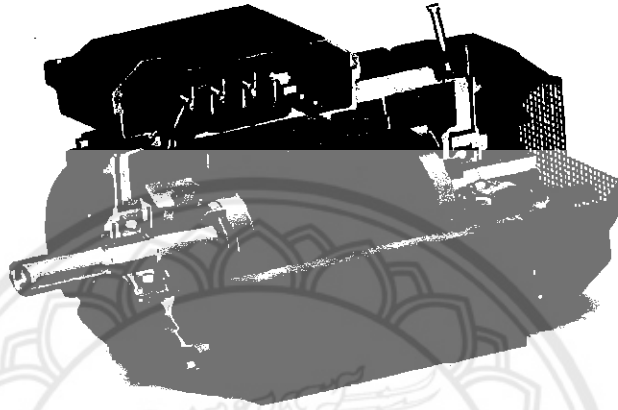
โรงงานอุตสาหกรรมโดยมากเป็นมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสเนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขั้ว โหลดเต็มที่ข้อเสียมีดังนี้

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ Power Factor ต่ำและถ้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมักจะเป็น 5 เท่า หรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะขั้ว โหลด

เต็มที

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส (Induction Motor Construction)

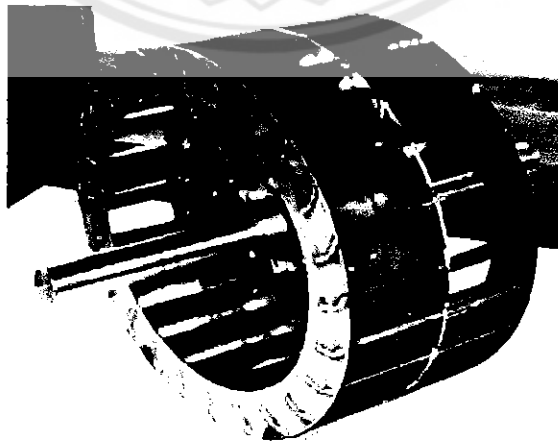
มอเตอร์อินดักชันมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนอยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor) โดยสเตเตอร์มีหน้าที่ขี้ดขลวคอรเมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในร่องสลีตทำด้วยแผ่นลามิเนทบางๆอัดเป็นรูปทรงดังรูป 2.2



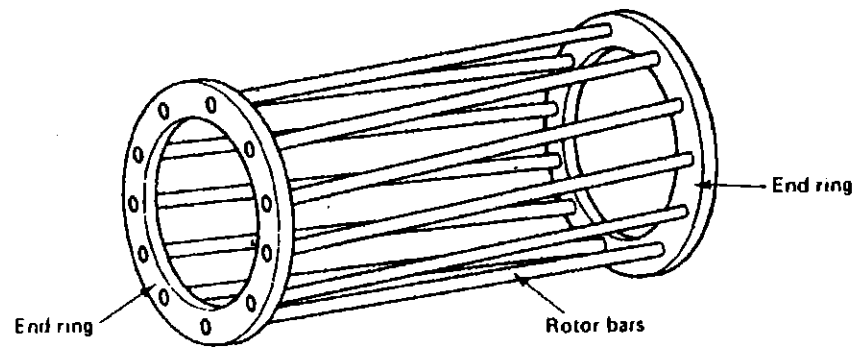
รูป 2.2 โครงสร้างภายในของมอเตอร์อินดักชัน [11]

โรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) มีแท่งตัวนำ (Rotor Bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายในโรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกฉลวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน (end Ring) ดังรูป 2.3



รูป 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก [12]



(b)

รูปที่ 2.4 ลักษณะแท่งตัวนำของโรเตอร์ [9]

แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียง (Acoustic Noise) ของแม่เหล็ก

2. แบบขดลวดโรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลิปริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ ดังรูป 2-4



รูป 2.5 แบบขดลวดโรเตอร์ [13]

2.3 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดผ่านตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำและเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด มีผลทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2-1)$$

N_s = ความเร็วซิงโครนัส

f = ความถี่หลักมูลของไฟฟ้ากระแสสลับ

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์อินดักชันทำได้ง่ายเพียงแค่สลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่งที่จ่ายให้ขดลวดที่สเตเตอร์ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ จึงเป็นข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้

2.4 ความเร็วสลิบและความเร็วโรเตอร์ (Slip and Rotor Speed)

กล่าวคือโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันจะหมุนไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์แต่ไม่ได้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสจึงเกิดความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วของโรเตอร์เรียกว่า ความเร็วสลิบ (slip speeds ; S) หาค่าได้จากสมการ

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (2-4)$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2-5)$$

จากสมการข้างล่างนี้จัดให้อยู่ในรูปความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ได้ดังนี้

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \times 100\% \quad (2-6)$$

นอกจากนี้ความเร็วของโรเตอร์ในเทอมของสลิบและความเร็วซิงโครนัสหาค่าได้จาก

$$n_r = (1 - s)n_s \quad (2-7)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\omega_r = (1-s)\omega_s \quad (2-8)$$

สมการทั้งหมดที่กล่าวมามีประโยชน์อย่างมากในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์อินดักชัน

2.5 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์ (Rotor-Induced Voltage and Frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นย่อมมีค่าสูงสุดและขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 2 ส่วนจึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิโดยจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ จะมีค่าความถี่ของสายกรณีนี้อ่าสลิป เท่ากับ 1 หรือ 100% (พิจารณาจากสมการ 2-6) เมื่อโรเตอร์หมุนอัตราที่ฟลักแม่เหล็กผ่านตัวนำก็จะช้าลงจึงทำให้ค่าสลิปลดลงไปด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ก็จะลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_R = s \times E_{BR} \quad (2-9)$$

ทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของสลิป ดังนี้

$$f_r = s \times f_e \quad (2-10)$$

เมื่อ

f_r = ความถี่ของโรเตอร์

E_{BR} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่

f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

E_R = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงาน

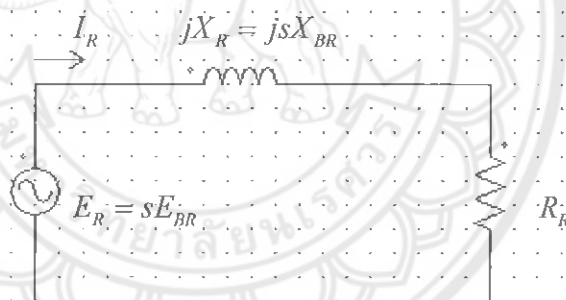
2.6 วงจรสมมูลโรเตอร์ (Equivalent Circuit of Rotor)

มอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสมีหลักการคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการลัดวงจรที่ขดลวดทุติยภูมิ (ขดลวดที่โรเตอร์) และมีอิสระในการเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องตามขั้วแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดที่สเตเตอร์) ดังนั้นวงจรสมมูลจึงคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้านี้จะสร้างกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ที่ถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้ประกอบด้วย

- ความต้านทานของโรเตอร์ (R_R)
- รีแอกแตนซ์รั่วไหล (leakage reactance; sX_{BR}) เมื่อ X_{BR} = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ความถี่ของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในโรเตอร์

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (2-11)$$

เมื่อนำองค์ประกอบต่าง ๆ ของโรเตอร์มาเขียนวงจรสมมูลจะได้ดังรูป 2.6



รูป 2.6 วงจรสมมูลของโรเตอร์

จากรูป 2.6 กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์หาได้จาก

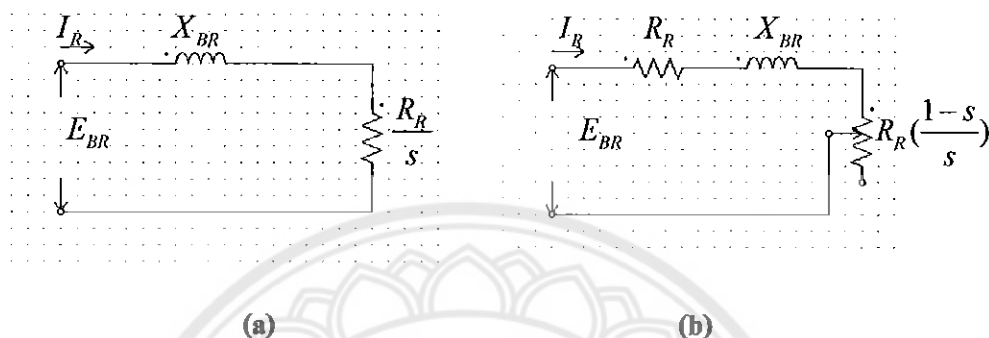
$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (2-12)$$

$$I_R = \frac{sE_{BR}}{\sqrt{R_R^2 + (sX_{BR})^2}} \quad (2-13)$$

หารทั้งเศษและส่วนของสมการ 2-13 ด้วยสลิป

$$I_R = \frac{E_{BR}}{\sqrt{(R_R/s)^2 + X_{BR}^2}} \quad (2-14)$$

จากสมการ 2-14 เขียนวงจรสมมูลจากสมการ 2-14 ได้ดังรูป



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลจากสมการ 2-14

เนื่องจากการใช้ค่าความต้านทานที่แท้จริงของโรเตอร์ดังรูป 2.7 (a) ได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{R_R}{s} &= \frac{R_R}{s} + R_R - R_R \\ &= R_R + R_R \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ \frac{R_R}{s} &= R_R + R_R \frac{1-s}{s} \end{aligned} \quad (2-15)$$

จากสมการ 2-16 นี้เขียนวงจรสมมูลใหม่ดังรูป 2.7 (b) และถ้าคูณสมการนี้ตลอด จะได้สมการในเทอมกำลังไฟฟ้าดังนี้

$$I_R^2 \frac{R_R}{s} = I_R^2 R_R + I_R^2 R_R \frac{1-s}{s} \quad (2-16)$$

$I_R^2 R_R$ = กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์

$I_R^2 R_R \frac{1-s}{s}$ = เป็นกำลังทางกลหรือกำลังไฟฟ้าของโรเตอร์

จากความหมายดังกล่าวจึงเขียนสมการ 2-16 ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$P_{AG} = P_{RCL} + P_{conv} \quad (2-17)$$

$$P_{AG} = I_R^2 \frac{R_R}{s} \quad (2-18)$$

$$P_{conv} = I_R^2 R_R \frac{1-s}{s} = P_{AG} (1-s) \quad (2-19)$$

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าที่เกิดในมอเตอร์เป็นผลคูณของแรงบิด (T) กับความเร็วเชิงมุม ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$P_{conv} = \omega_r T_{conv} \quad (2-20)$$

ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ (developed torque ; T)

$$T_{conv} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} \quad (2-21)$$

เมื่อ

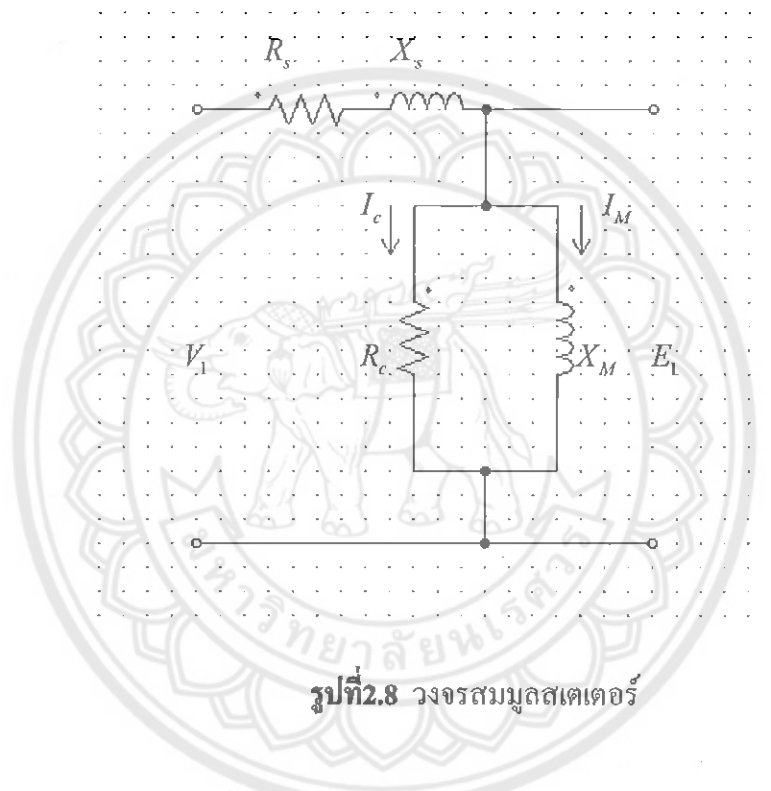
$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (2-22)$$

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์

n_r = ความเร็วของ โรเตอร์

2.7 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ (Equivalent Circuit of Stator)

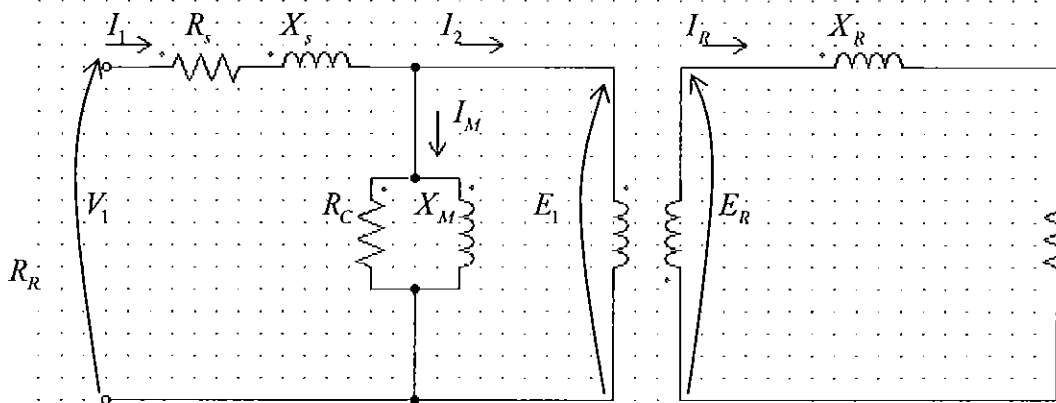
วงจรสมมูลของสเตเตอร์ก็เหมือนกับวงจรสมมูลด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ประกอบด้วยความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s) รีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ (X_s) และค่าต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสาขาที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (magnetizing branch) ได้แก่ R_c (ความต้านทานของแกนเหล็ก), X_M (รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก), I_c (กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก), I_M (กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก) เขียนวงจรสมมูลของสเตเตอร์ได้ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสเตเตอร์

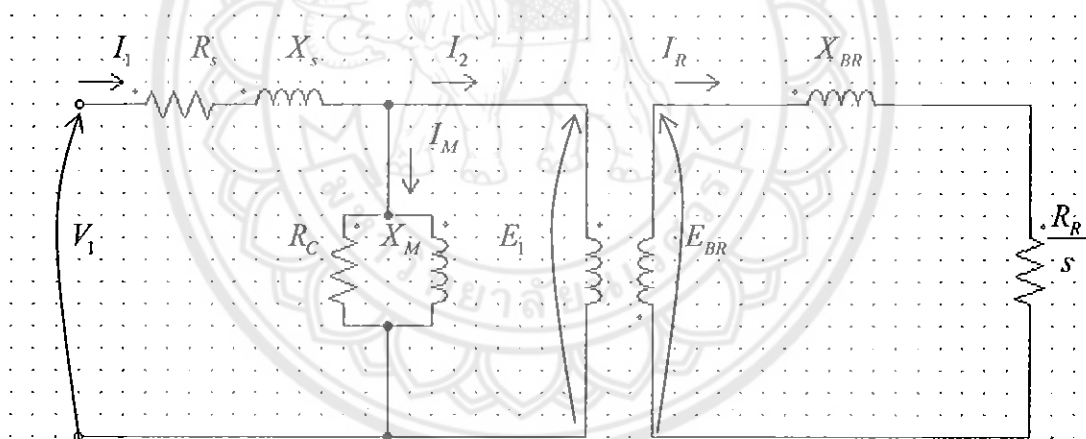
2.8 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชัน (Equivalent Circuit an Induction Motor)

มอเตอร์อินดักชันอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของแรงดันและกระแสที่วงจรของ โรเตอร์จาก วงจรของสเตเตอร์ ซึ่งมีหลักการเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชัน จึงคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ามอเตอร์อินดักชัน

เพื่อให้สอดคล้องกับรูป 2.9 จึงเขียนวงจรสมมูลใหม่ได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเท่ามอเตอร์อินดักชันใหม่

เป็นทราบกันว่าวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถย้ายด้านรวมกันได้ ถ้ารู้ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ในทำนองเดียวกันถ้ารู้ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ ก็จะย้ายค่าในวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้ในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรสมมูลโรเตอร์ไปยังวงจรสมมูลสเตเตอร์ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$E'_{BR} = aE_{BR} = E_1 \tag{2-23}$$

เมื่อ

E'_{BR} = แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่ที่ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$I'_R = \frac{I_R}{a} \tag{2-24}$$

เมื่อ

I'_R = กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R'_R = a^2 R_R \tag{2-25}$$

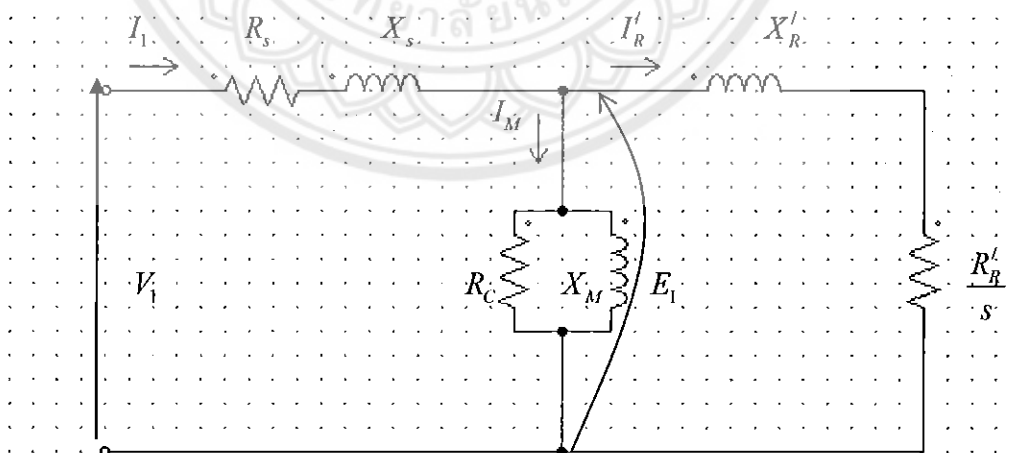
$$X'_R = a^2 X_{BR} \tag{2-26}$$

เมื่อ

R'_R = ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

X'_R = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

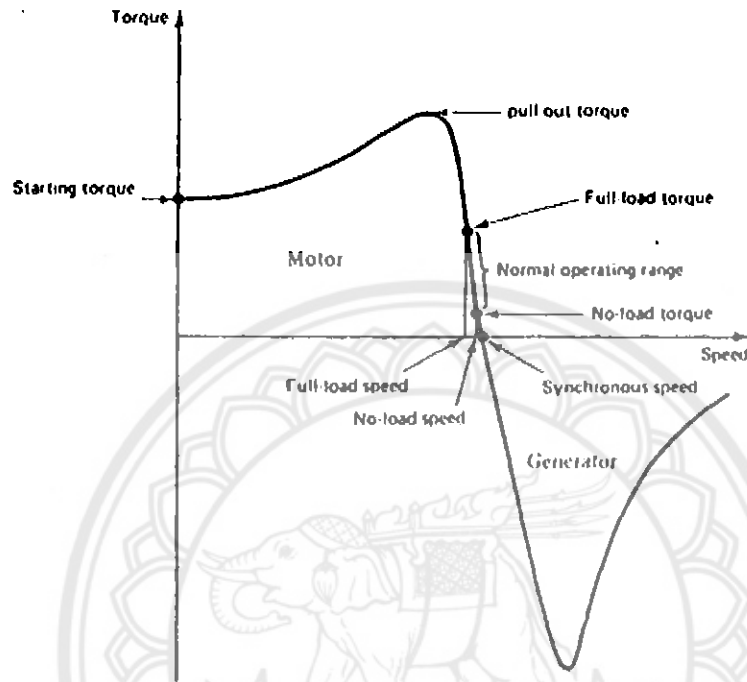
นำค่าที่ได้จากสมการ 2-23 ถึงสมการ 2-26 เขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันได้ ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชัน

2.9 คุณลักษณะมอเตอร์อินดักชัน (Induction Motor Characteristics)

มอเตอร์อินดักชันแบบวาล์วโรเตอร์ที่ปรับความเร็วได้จะใช้ความต้านทานที่ปรับค่าจากภายนอกได้โดยต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์เพื่อปรับความเร็วหรือเพิ่มแรงบิดตอนเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ลักษณะแบบนี้นำไปใช้กับโหลดที่ต้องการเริ่มต้นหมุนบ่อย ๆ เช่น ปั่นจั่น เป็นต้น



รูปที่ 2.12 คุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส [9]

ส่วนงานที่ต้องการกำลังทางกลค่อนข้างคงที่และเริ่มต้นหมุนไม่บ่อยนัก เช่น มอเตอร์ที่ใช้ขับปั๊ม เครื่องเป่าอากาศ พัดลม จะใช้มอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

2.10 หลักการทำงานของมอเตอร์อินดักชันมีดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. เส้นโค้งแรงบิด – ความเร็วเกือบเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีโหลดกับแรงบิดขณะจ่ายโหลดเต็มที่ ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ย่านทำงานปกติของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Pull-Out Torque) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่ายโหลดเต็มที่
4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนมากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดหรือต่อกับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทางมอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็วซึ่งเราเรียกว่า Plugging ซึ่งนำไปสู่หลักการควบคุมมอเตอร์
6. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัสแรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนกำลังกลเป็นกำลังไฟฟ้า

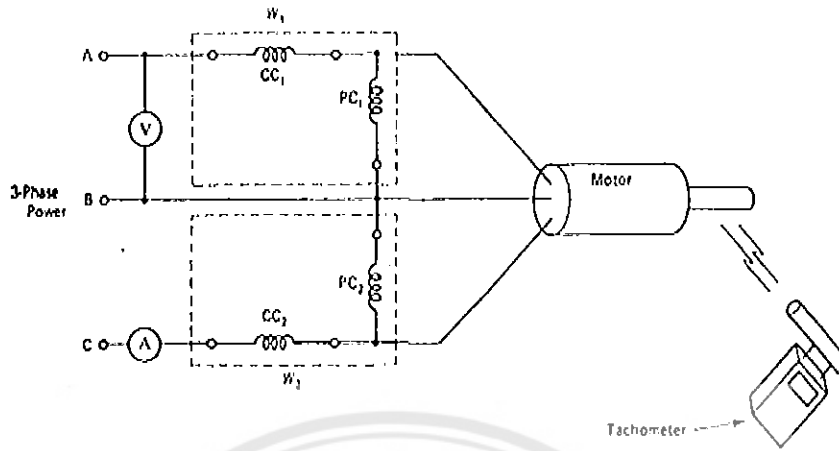
2.11 มอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ (Wound-Rotor Motor)

มอเตอร์อินดักชันแบบวาล์วโรเตอร์กับแบบกรงกระรอกมีโครงสร้างของโรเตอร์ต่างกัน แต่มีโครงสร้างของสเตเตอร์เหมือนกันมอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกมีข้อจำกัดคือ ขณะทำงานสภาพปกติความต้านทานของโรเตอร์คงที่ ถ้าต้องการให้มอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นต้องออกแบบให้โรเตอร์มีความต้านทานต่ำ แต่จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนสูงจึงส่งผลให้แรงบิดเริ่มต้นหมุนของโรเตอร์ชนิดนี้ต่ำ

ในทางกลับกัน โรเตอร์ของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์จะต่ออยู่กับสลิปริงซึ่งติดอยู่กับแปรงถ่าน ดังนั้นจึงต่อความต้านทานจากภายนอกนุกรมกับโรเตอร์ได้และถ้าเราเพิ่มความต้านทานขณะมอเตอร์เริ่มต้นหมุนกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นจะลดลงส่งผลให้แรงบิดเริ่มต้นหมุนเพิ่มขึ้น เมื่อมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้น สามารถปรับความต้านทานจากภายนอกลดลงได้เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุดตลอดช่วงที่มีการเร่งและถ้าความเร็วของมอเตอร์เหมาะสมกับการทำงานแล้ว จึงปลดความต้านทานจากภายนอกออกจากวงจรด้วยการลัดวงจรที่แปรงถ่าน

เนื่องจากมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ที่สามารถคงแรงบิดสูงสุดไว้ได้ตลอดช่วงที่มีการเร่งจึงนิยมใช้กับโหลดที่มีความเฉื่อยขณะเริ่มต้นหมุนสูง

2.12 การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No – load Test)



รูปที่ 2.13 การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No – load Test) [9]

การทดสอบนี้ต้องจ่ายค่าแรงดัน ไฟฟ้าที่พิกัดให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ขณะที่ไม่มีโหลดต่อที่แกนของมอเตอร์ ดังรูป 2.13 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 ดังนั้นความเร็วของแกน โรเตอร์ (n_r) จึงสูง (วัดได้จาก Tachometer) ส่งผลให้ค่าสลิปต่ำ (จากสมการ 2-6 กล่าวไว้ว่า $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$) นอกจากนี้ กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์มีค่าต่ำทำให้กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์ (P_{RCL}) มีค่าต่ำมาก (จากสมการ 2-19 กล่าวไว้ว่า $P_{RCL} = I_R^2 R_R$) เราจึงไม่คิดค่ากำลังสูญเสียในส่วนนี้ ดังนั้น (P_{NL}) จึงประกอบด้วยกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}), กำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) และกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ ทั้ง 3 เฟส เขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{SCL} = 3I_{NL}^2 R_S \tag{2-27}$$

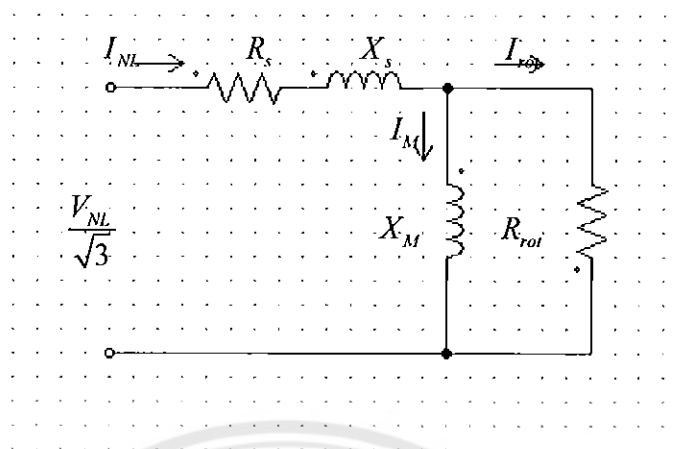
$$P_{NL} = P_{core} + P_{mech} + 3I_{NL}^2 R_S \tag{2-28}$$

ผลรวมของ P_{mech} และ P_{core} เราเรียกว่ากำลังสูญเสียในแกหมุน (Rotation Losses ; P_{rot}) ซึ่งเป็นค่าคงที่หาได้จาก

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I_{NL}^2 R_S \tag{2-29}$$

ความต้านทานของสเตเตอร์ (R_S) หาค่าได้จากการวัดความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์

สำหรับวงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลดเป็นดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลด

ขณะไม่มีโหลดมอเตอร์ชนิดนี้มีค่า Power Factor ต่ำ แสดงว่าองค์ประกอบของวงจรสมมูลส่วนใหญ่เป็นรีแอกแตนซ์ ซึ่งย่อหมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (X_M) เพราะค่า R_s และ X_s มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ X_M ถ้าเป็นมอเตอร์แบบดั้งเดิม (conventional motor) ค่า $X_M \gg X_s$) ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{NL} จะต้องล้าหลังแรงดันไฟฟ้า V_{NL} แต่สำหรับความต้านทานที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ R_{rot}) จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ X_M ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ I_{rot}) มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ I_M ซึ่งแสดงว่าภายใต้ข้อสมมตินี้จะได้ว่า

$$X_M = \frac{V_{NL}}{\sqrt{3}I_{NL}} \quad (2-30)$$

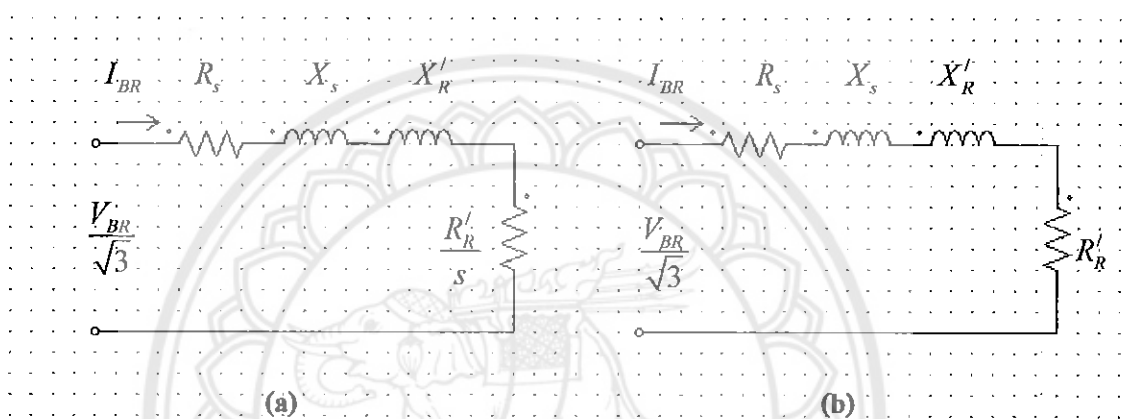
เมื่อ

$X_M =$ รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

2.13 การทดสอบการยึดโรเตอร์ (Locked – rotor Test)

การทดสอบจะต้องปรับแรงดันไฟฟ้าจนได้กระแสไฟฟ้าที่พิกัดของสเตเตอร์ (เช่นเดียวกับกรณีทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า) สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้การทดสอบ มีค่า 10-20% ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ Air Gap มีค่าน้อยแสดงว่า X_M มีปริมาณมากกว่าปกติ ดังนั้นเราจึงไม่สนใจค่า X_M ทำให้เขียนวงจรสมมูลใหม่ดังรูป 2.15(a)

และเนื่องจากการทดสอบนี้โรเตอร์ถูกยึดไม่ให้หมุน ($n_r = 0$) ทำให้ค่าสลิป = 1 หรือ 100% ส่งผลให้ $\frac{R'_R}{s} = R'_R$ จึงเขียนวงจรสมมูลใหม่ดังรูป 2.15(b)



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลการทดสอบการยึดโรเตอร์

การทดสอบนี้เพื่อหาค่าต่อไปนี้

V_{BR} = แรงดันไฟฟ้าที่สายขนะยึดโรเตอร์

I_{BR} = กระแสไฟฟ้าที่สายขนะยึดโรเตอร์

P_{BR} = กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสขนะยึดโรเตอร์

เมื่อทราบค่าดังกล่าวประกอบกับการพิจารณารูป 2.15(b) ทำให้หาค่าสมมูลของมอเตอร์ ได้ดังนี้

$$Z_e = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3}I_{BR}} = (R_S + R_R) + j(X_S + X_R) \quad (2-31)$$

$$R_e = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} = R_S + R'_R \quad (2-32)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = X_S + X_R \quad (2-33)$$

เมื่อ

Z_e = อิมพีแดนซ์เทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

R_e = ความต้านทานเทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

X_e = รีแอกแตนซ์เทียบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

Z_s = อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

R_s = ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

X_s = รีแอกแตนซ์ต่อเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

การวัดค่า R_s จะแตกต่างหากทำให้ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์ (R_R) มีค่าเป็น

$$R_R = R_e - R_s \quad (2-34)$$

มีข้อสมมติเกี่ยวกับมอเตอร์แบบขดลวดโรเตอร์ที่เป็นที่ยอมรับว่า

$$X_s = X_R = 0.5X_e \quad (2-35)$$

การหาค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานที่แท้จริงของโรเตอร์ (X_R และ R_R) จะต้องทราบค่า X'_R และ R'_R รวมทั้งค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหรืออัตราส่วนของการย้ายค่า (Turn Ratio or Transformation Ratio ; a) เสียก่อน การหาค่า a ทำได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าคือ ใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่สายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (V_L) กับแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากสลิปริง (V_{sr}) หรือหาค่าได้จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a = \frac{V_L}{V_{sr}} = \frac{N_s}{N_r} \quad (2-36)$$

เมื่อ

N_s = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในสเตเตอร์

N_r = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในโรเตอร์

เมื่อนำหลักการย้ายค่าของหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้ ค่ารีแอกแตนซ์ที่แท้จริงของโรเตอร์ (X_R) จึงมีค่าเป็น

$$X_R = \frac{X'_R}{a^2} \quad (2-37)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานแท้จริงของโรเตอร์ (R_R) จึงมีค่าเป็น

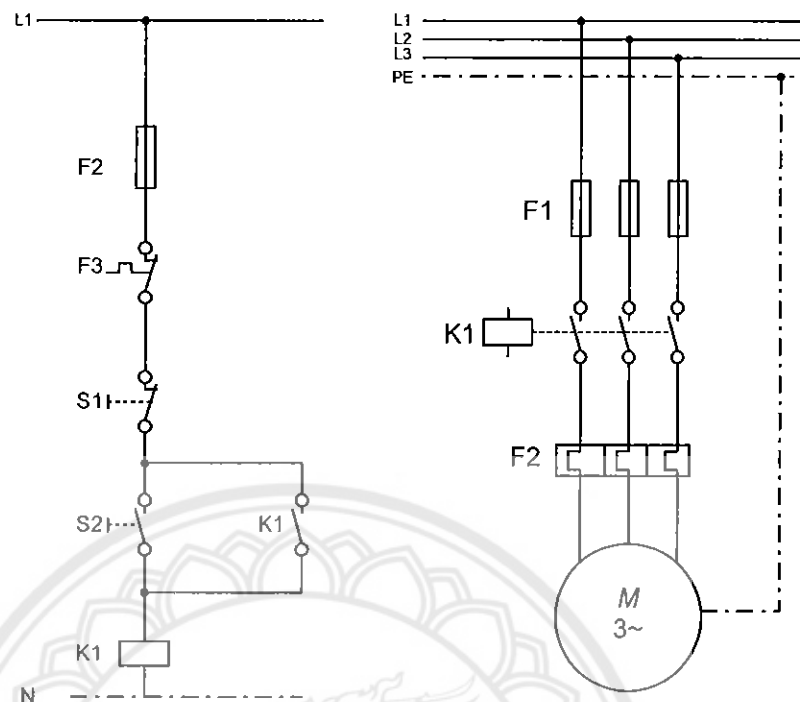
$$R_R = \frac{R'_R}{a^2} \quad (2-38)$$

2.14 เทคนิคในการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์อินดักชัน

2.14.1 การสตาร์ทแบบ Full Voltage Starting

Full Voltage Starting หรืออีกชื่อคือ "การสตาร์ทแบบต่อโดยตรงจากไลน์" (Direct on – Line Starting, DOL) โดยทั่วไปวิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กจนถึง 7.5 kW ลักษณะการต่อใช้งานขดลวดมอเตอร์จะได้รับแรงดันเต็มพิกัดเช่น ถ้าแผ่นป้ายมอเตอร์บอกพิกัดแรงดันเป็น 220/380 V. ก็จะต่อเป็นแบบสตาร์ท (เนื่องจากระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมในบ้านเราเป็นแบบ 3 phase 380 volt 50 Hz.) หรือถ้าแผ่นป้ายบอกพิกัดแรงดันเป็น 400/690 V. ก็จะต่อเป็นแบบเคลด้าการสตาร์ทด้วยวิธีนี้มอเตอร์จะมีกระแสขณะสตาร์ทสูงถึง 4-8 เท่าของกระแสพิกัด ส่วนทอร์กจะมีค่า 0.5-1.5 เท่าของแรงบิดพิกัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านทอร์กของมอเตอร์แต่ละตัว

การสตาร์ทด้วยวิธีนี้หากใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดน้อยๆ จะทำให้อัตราเร่งของโรเตอร์สูงเกินไป เนื่องจากมอเตอร์มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงทำให้เกิดการกระชากเกิดการแกว่ง(Oscillations) ของทอร์กที่เพลลา ซึ่งจะนำไปสู่การสึกหรอของชุดส่งกำลังชุดเกียร์และชุดขับเคลื่อน หากใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดหนักๆก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาอื่นๆได้เหมือนกัน เช่น อาจส่งผลทำให้สายพานและมูเลย์เกิดการลื่นไถลทำให้เกิดการชำรุดและสึกหรออย่างรวดเร็ว หากใช้กับปั๊มมักจะทำให้ปั๊มเกิดการคลอนตัว เกิดการกระแทกของท่อในขณะที่มอเตอร์ทำงานและหยุดทำงานการสตาร์ทแบบ DOL โดยทั่วไปเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวงจรสตาร์ทที่ทำได้ง่ายๆ มีค่าใช้จ่ายต่ำความผิดพลาดในการสตาร์ทก็น้อยจึงทำให้มีเสน่ห์ และมีแรงดึงดูดจนทำให้ลืมคิดถึงค่าใช้จ่ายแฝงที่จะส่งผลกระทบในระยะยาว เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้นอายุการใช้งานอุปกรณ์ส่งกำลังและอื่นๆ ลดลงนอกจากนั้น ยังอาจเกิดความเสียหายต่อความเสียหายของมอเตอร์ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการใช้งานที่มีการสตาร์ทและหยุดบ่อยๆ



รูปที่ 2.16 Schematic Diagram ของวงจรกำลังและวงจรควบคุม [6]

ขั้นตอนการทำงาน

1. กดสวิตช์ S2 คอนแทกเตอร์ K1 ทำงานปล่อยสวิตช์ S2 คอนแทกเตอร์ K1 ยังทำงานอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากหน้าสัมผัสช่วยปกติเปิด K1 ในแถวที่ 2 ทำงานหน้าสัมผัสจะปิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในขดลวดของแมกเนตตลอดเวลา
2. เมื่อเกิดสถานะโอเวอร์โหลดหน้าสัมผัสของโอเวอร์โหลดปกติปิด (F3) จะตัดวงจรไม่มีกระแสไหลเข้าขดลวดคอนแทกเตอร์ K1 จะหยุดทำงาน
3. ในการหยุดการทำงานของวงจรให้กดสวิตช์ S1
4. ถ้าฟิวส์ F2 ขาดวงจรก็จะหยุดทำงาน
5. เมื่อเกิดสถานะโอเวอร์โหลดให้วงจรทำงานใหม่ให้กดปุ่มรีเซ็ตโอเวอร์โหลดหน้าสัมผัสกลับสู่สภาพเดิมแล้วทำการกด S2 ใหม่มอเตอร์จะกลับมาทำงานตามเดิม

ข้อดี (Advantages) อุปกรณ์ไม่สลับซับซ้อน, ง่ายแก่การติดตั้ง, ง่ายแก่การบำรุงรักษา ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่ำเพราะมีเพียงสวิตช์ตัดตอนทางไฟฟ้า (Switch Gear)

ข้อเสีย (Disadvantages) กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนสูงประมาณ 4 ถึง 6.5 เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัด, แรงดันไฟฟ้าตกขณะสับสวิตช์เริ่มหมุนทั้งนี้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกจะขึ้นอยู่กับขนาดของ Short Circuit Power ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

2.14.2 การสตาร์ทโดยการลดแรงดัน (Reduce Voltage Starting)

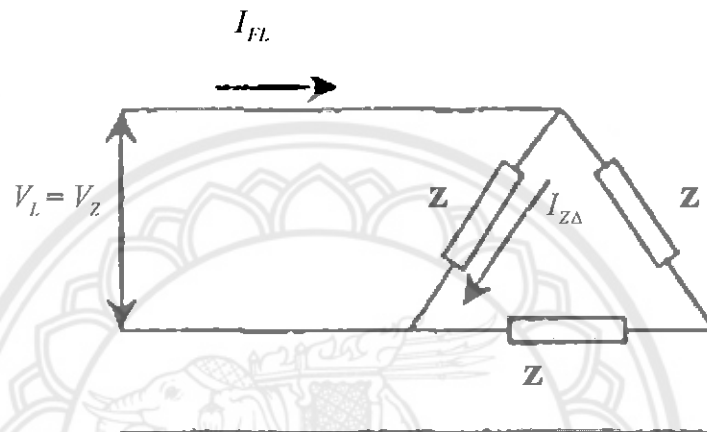
เทคนิคการลดแรงดันช่วงสตาร์ทโดยทั่วไปจะมีหลายวิธีเช่น Auto-Transformer Starting หรือ Primary Resistance Starting และอื่นๆแต่ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้งานมากที่สุด ในอุตสาหกรรมคือการสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้า (Star - Delta Starting) องค์ประกอบของวงจรแบบสตาร์-เดลต้าจะประกอบด้วยคอนแทกเตอร์ 3 ชุด และไทม์เมอร์ วิธีนี้เหมาะสำหรับใช้งานกับมอเตอร์ขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ที่ขดลวดสเตเตอร์ถูกออกแบบมาใช้งานที่พิกัดเมื่อต่อแบบเดลต้า (400/690 V.) ลักษณะการทำงานของวงจรสตาร์ทแบบนี้เมื่อเริ่มสตาร์ทขดลวดของมอเตอร์จะถูกต่อวงจรให้เป็นแบบสตาร์โดยคอนแทกเตอร์ (แรงดันที่จ่ายเข้าขดลวดจะต่ำกว่าพิกัด 42% และเหลือเพียง 58 %) หลังจากนั้น เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นถึง 80% ขดลวดก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแบบเดลต้าโดยใช้ไทม์เมอร์เป็นตัวตั้งเวลา ผลของการสตาร์ทด้วยวิธีนี้จะทำให้แรงบิดมอเตอร์ลดลงเหลือ 1 ใน 3 (ประมาณ 34 %) ของแรงบิดขณะถูกล็อกโรเตอร์ (Locked Rotor Torque, LTR) ซึ่งก็ทำให้กระแสขณะสตาร์ทและอัตราเร่งเครื่องลดลงด้วยแต่อย่างไรก็ตามในช่วงที่มีการปลดวงจรเพื่อเปลี่ยนจากสตาร์ไปเป็นเดลต้าอย่างรวดเร็ว จะมีสนามแม่เหล็กตกค้างและมีกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันในขดลวดสเตเตอร์ เนื่องจากความถี่โรเตอร์ และในขณะที่ต่อแบบเดลต้า เข้าไปอีกครั้ง ในขณะที่ความเร็วของโรเตอร์ต่ำกว่า 80% จะทำให้เกิดกระแสสูงและเกิดการแกว่ง (Oscillation) ของกระแสและแรงบิดซึ่งทำให้มีค่าสูงสุดถึง 15 เท่า ของระดับโหลดสูงสุด

ตัวอย่าง พิสูจน์ให้เห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดของมอเตอร์ในจังหวะการต่อแบบสตาร์ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{3}$ เท่าของกระแสไหลเต็มที่ของวงจรควบคุมมอเตอร์แบบสตาร์-เคลด้า

วิธีทำ

กระแสไหลเต็มที่ของมอเตอร์(ต่อแบบเคลด้า) = I_{FL} A.

จังหวะการต่อแบบเคลด้า



รูปที่ 2.17 ขณะมอเตอร์ต่อแบบเคลด้า [6]

แรงดันตกคร่อมขดลวดขณะต่อแบบเคลด้า $V_Z = V_L$ V.

กระแสผ่านขดลวดขณะต่อแบบเคลด้า $I_{Z\Delta} = \frac{I_{FL}}{\sqrt{3}}$ A.

แต่ $I_{Z\Delta} = \frac{V_L}{Z}$ A.

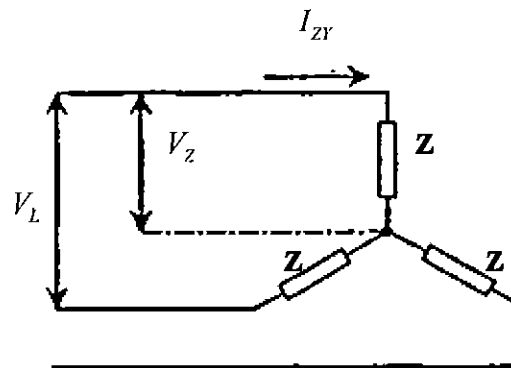
ดังนั้น $\frac{V_L}{Z} = \frac{I_{FL}}{\sqrt{3}}$ A.

$\therefore Z = \frac{\sqrt{3} \times V_L}{I_{FL}}$ Ω

๑๕๐๗๖๘

จังหวัดการต่อแบบสตาร์

ปช.
กย๘๑ก
๒๕๕๑.



รูปที่ 2.18 ขณะมอเตอร์ต่อแบบสตาร์ [6]

แรงดันตกคร่อมขดลวดขณะต่อแบบสตาร์ $V_Z = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ V.

กระแสผ่านขดลวดขณะต่อแบบสตาร์ $I_{ZY} = \frac{V_Z}{Z}$ A.

ดังนั้น $I_{ZY} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z}$ A.

แต่ $Z = \frac{\sqrt{3} \times V_L}{I_{FL}}$ Ω

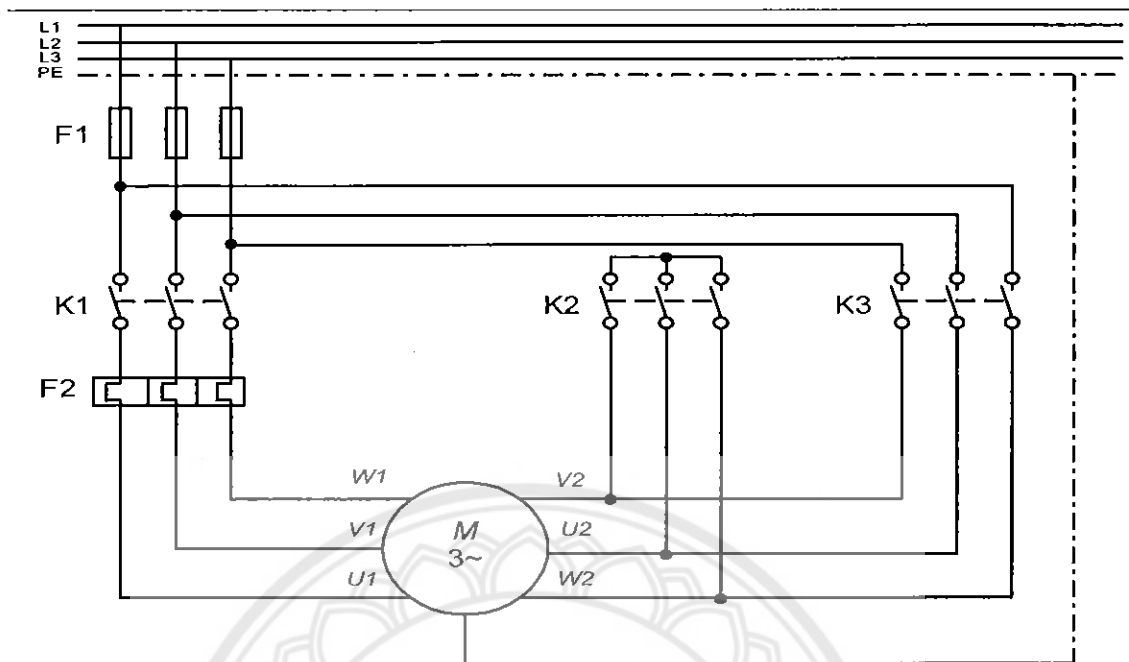
ดังนั้น $I_{ZY} = \frac{\sqrt{3} \times I_{FL}}{\sqrt{3} \times \sqrt{3} \times V_L}$ A.

$\therefore I_{ZY} = \frac{I_{FL}}{3}$ A.

สรุปได้ว่า

กระแสผ่านขดลวดขณะต่อแบบเดลต้า $I_{Z\Delta} = \frac{I_{FL}}{\sqrt{3}}$ A.

กระแสผ่านขดลวดขณะต่อแบบสตาร์ $I_{ZY} = \frac{I_{FL}}{3}$ A.

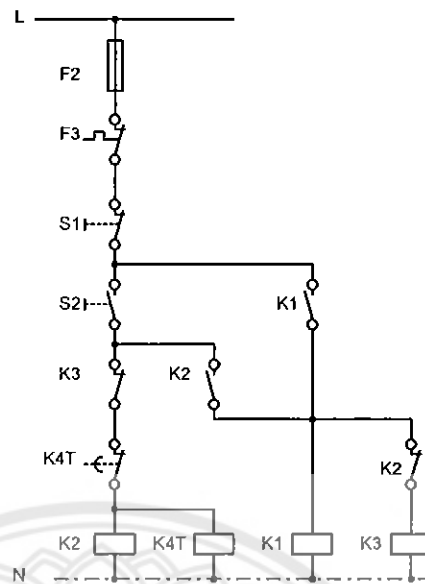


รูปที่ 2.19 วงจรกำลังของการสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้า [6]

วงจรกำลัง(Power Circuit)

วงจรกำลังของการสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลตานั้นการสตาร์ทจะต้องเรียงกันไปจากสตาร์ไปเดลต้าและ คอนแทคเตอร์สตาร์กับคอนแทคเตอร์เดลต้าจะต้องมี Interlock ซึ่งกันและกัน การควบคุมมี 2 อย่างคือ เปลี่ยนจากสตาร์ไปเดลต้าโดยการกด Push button กับเปลี่ยนโดยอัตโนมัติด้วยการใช้รีเลย์ตั้งเวลาการควบคุมแบบอัตโนมัติมี 2 วิธี

1. ต่อจุดสตาร์ด้วย K2 ก่อนจ่ายไฟเข้า K1
2. จ่ายไฟด้วย K1 ก่อนต่อจุดสตาร์ด้วย K2



รูปที่ 2.20 วงจรควบคุมมอเตอร์ สตาร์-เดลต้า [6]

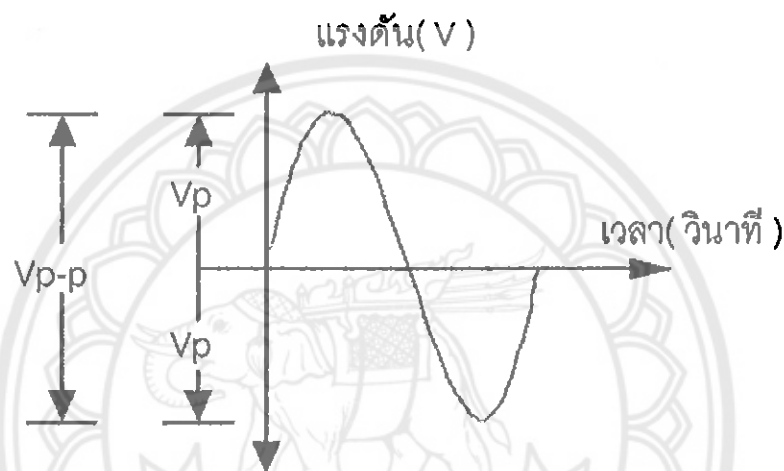
วงจรควบคุม (Control Circuit)

ลำดับขั้นตอนการทำงาน

1. กด S2 ทำให้คอนแทค K2 ทำงานต่อแบบสตาร์และรีเลย์ตั้งเวลา K4T ทำงานคอนแทคปิดของ K2 ในแถวที่ 4 ตัดวงจร K3 และคอนแทคปกติปิดในแถวที่ 2 ต่่วงจรให้เมนคอนแทค K1
2. หลังจากที่ K1 ทำงานและปล่อย S2 ไปแล้วหน้าสัมผัสปกติเปิด (N.O.) ของ K1 ในแถวที่ 3 ต่่วงจรที่คอนแทคเตอร์ K2 และตัวตั้งเวลา K4T จะทำงานตลอดเวลาขณะนี้มอเตอร์หมุนแบบสตาร์
3. รีเลย์ตั้งเวลา K4T ทำงานหลังจากเวลาที่ตั้งไว้คอนแทคเตอร์ K2 จะถูกตัดออกจากวงจรด้วยหน้าสัมผัสปกติปิด (N.C.) ของ รีเลย์ตั้งเวลา K4T ในแถวที่ 2 และหน้าสัมผัสปกติปิด (N.C.) ของ K2 ในแถวที่ 4 กลับสู่สถานะเดิมต่่วงจรให้กันคอนแทคเตอร์ K3 ทำงานและหน้าสัมผัสปกติปิด (N.C.) ของ K3 ในแถวที่ 1 จะตัดคอนแทคเตอร์ K2 และรีเลย์ตั้งเวลา K4T ออกจากวงจรจะคงเหลือคอนแทคเตอร์ K1 และ K3 ทำงานร่วมกันมอเตอร์หมุนแบบเดลต้า (Delta)
4. เมื่อต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์ให้กดสวิทช์ S1 (Stop)

2.15 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปหรือเรียกสั้น ๆ ว่า สโคป (Scope) มีชื่อเต็มมาจากแคโทดเรย์ ออสซิลโลสโคป (Cathode Ray Oscilloscope : CRO) หมายถึง ออสซิลโลสโคปใช้หลอดรังสีแคโทด สโคปเป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดงรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ ออกมาเป็นภาพปรากฏบนจอหลอดภาพให้เห็นได้ ซึ่งการวัดแอมพลิจูดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะวัดเป็น V_{pp} ซึ่งจะแตกต่างกันการวัดจากมิเตอร์ทั่วไปที่จะได้ค่าออกมาเป็น V_{rms}



รูปที่ 2.21 แสดงขนาดแรงดันรูปคลื่นไซน์ [14]

V_{p-p} คือ แรงดันไฟฟ้าพีก-ทูปีก (ยอดถึงยอด)

V_p คือ แรงดันไฟฟ้าพีก (คิดเพียงยอดคลื่นเดียว)

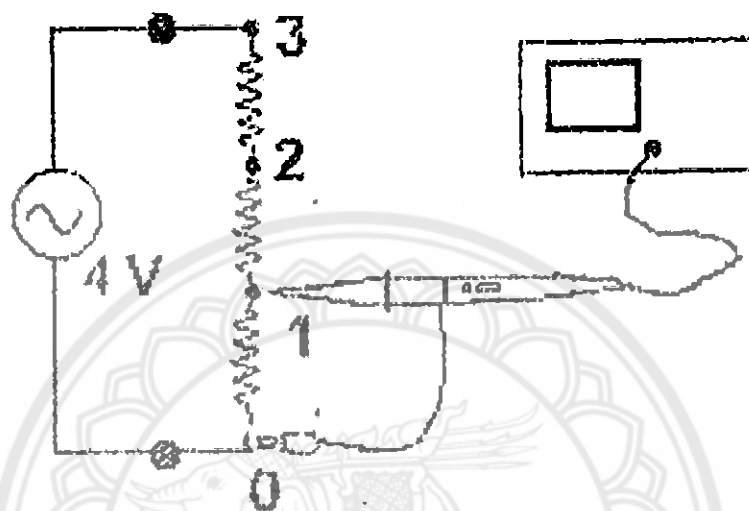
$$V_{p-p} = 2V_p$$

$$V_{rms} = 0.707V_p$$

เราสามารถใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และกระแสไฟฟ้าของสัญญาณวัดค่าเวลา คาบเวลา และความถี่ของสัญญาณ วัดผลต่างทางเฟสของสัญญาณ และเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณ ความกว้างของพัลส์ ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) ใช้วัดตรวจสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับความถี่ และรูปคลื่นสัญญาณที่ถูกต้องเช่น การปรับจูนเครื่องรับ-ส่งวิทยุ เครื่องรับโทรทัศน์ วิดีโอ และเครื่องเสียง เป็นต้น

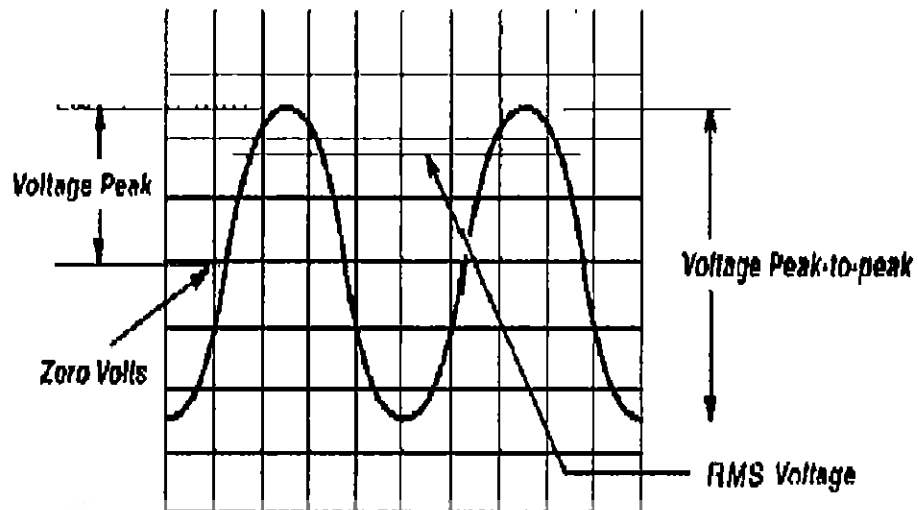
วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ตัวอย่างต่อไปนี้จะใช้เฉพาะช่อง CH1 กดปุ่ม CH1 ที่ Vertical Mode กดปุ่ม GND เหนือช่อง CH1 ถ้าเส้นสัญญาณไม่ทับเส้นกลางจอ ต้องปรับปุ่ม Position เสียก่อน การวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้



รูปที่ 2.22 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับในวงจร [14]

1. จากรูปมีแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับขนาด 4 โวลต์ 50 Hz ต่อกับความต้านทานอนุกรมกัน 3 ตัว
2. กดปุ่ม AC-GND-DC อยู่ที่ DC หรือ AC นำ Probe ไปแตะที่จุด 1 ปลายคิ๊บแตะที่ตำแหน่ง 0 ปรับปุ่ม Volt/Div จนได้ขนาดของคลื่นเหมาะสมกับจอภาพ
3. ปรับปุ่ม Trigger Level จนรูปคลื่นนิ่ง
4. ปรับ Sec/Div จนเกิดรูปคลื่นบนจอ 1 ถึง 2 ลูกคลื่น
5. ปรับตำแหน่ง Positive ในแนวตั้ง จนท้องคลื่นบรรจบที่เส้นในแนวระดับ ดังรูป 2.24 จุด A
6. ปรับตำแหน่ง Position ในแนวระดับจนยอดคลื่นอยู่ตรงกลางของเส้นในแนวตั้งที่จุด B
7. นับจำนวนช่องในแนวตั้ง จากจุด A ถึง B บันทึกค่านี้ไว้
8. คำนวณ Peak -To-Peak Voltage (V_{p-p}) ได้จาก V_{p-p} คือ จำนวนช่องในแนวตั้งที่นับได้ x Volt/Div x Probe Setting
9. จากนั้นย้าย Probe ไปวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุด 2 เทียบกับจุด 0 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 7 วาดภาพที่ปรากฏบนจอ จดค่า Volt/Div จำนวนช่องในแนวตั้ง ลงไปในบันทึกผลการทดลอง
10. นำโวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด 1,2 และ 3 แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากออสซิลโลสโคป



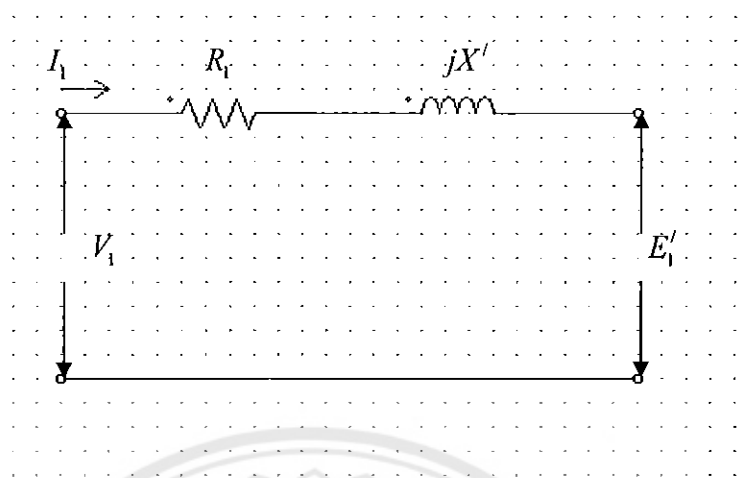
รูปที่ 2.23 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [15]

ตัวอย่าง จากรูป 2.23 ใช้ Probe ที่ปรับค่าลดทอนสัญญาณไว้ที่ $\times 10$ ตั้งค่า Volt/Div ไว้ที่ 0.5 V จำนวนช่องที่นับได้ คือ 4.5 ช่อง

$$V_{p-p} = 4.5 \text{ Div} \times 0.5 \text{ V/Div} \times 10 = 22.5 \text{ โวลต์}$$

$$V_{\text{rms}} \text{ หาได้จาก } V_{\text{rms}} = \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{2}} = \frac{22.5}{2\sqrt{2}} = 7.955 \text{ โวลต์}$$

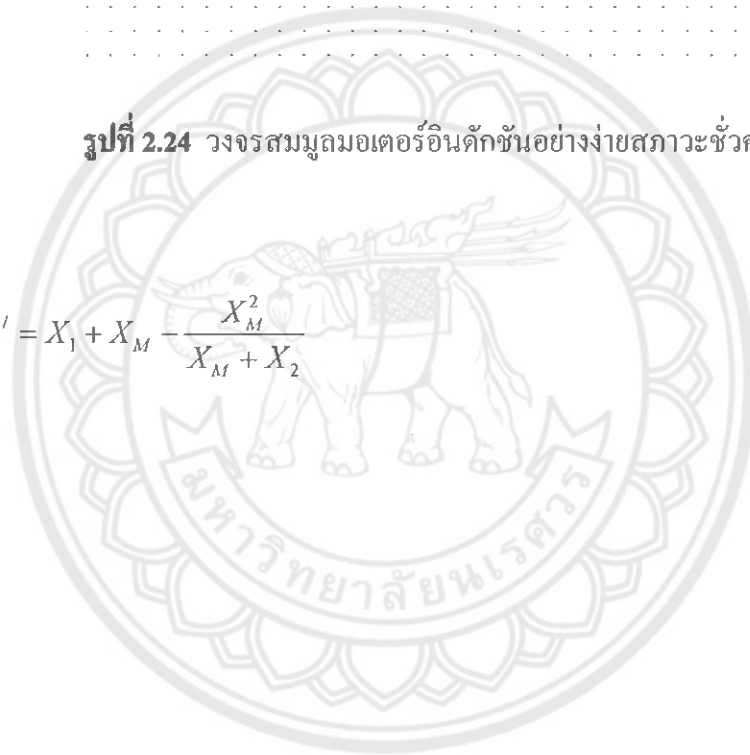
2.16 Electric Transients In Induction Machine



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลมอเตอร์อินดักชันอย่างง่ายสภาวะชั่วคราว

โดยที่

$$X' = X_1 + X_M - \frac{X_M^2}{X_M + X_2}$$



บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

3.1.1 การออกแบบการทดลองการวัดค่ากระแสโดยออสซิลโลสโคป

การวัดกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์อินดักชันใช้วิธีวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทาน โดยการต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรส่วนที่ต้องการวัดกระแส จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานตามวิธีการวัดแรงดันรูปคลื่นที่ปรากฏบนจอภาพของออสซิลโลสโคปจะเป็นรูปคลื่นของกระแส และสามารถคำนวณขนาดของกระแสได้จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{V}{R} [A]$$

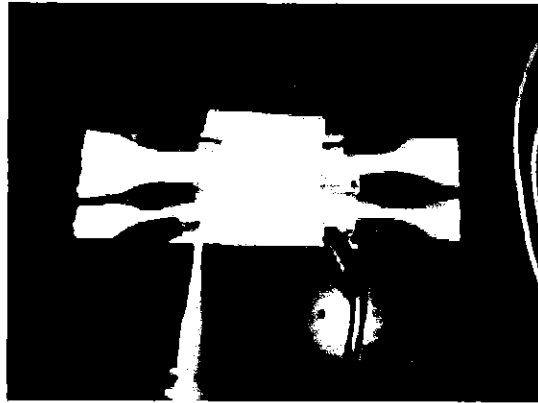
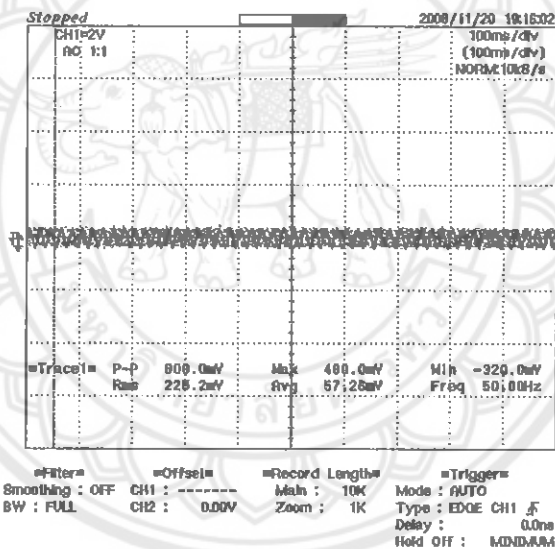
การออกแบบหาค่าความต้านทานทำได้ดังนี้

1. จาก name plate มอเตอร์ พิกัดมอเตอร์ Δ / Y 1.05/0.61 [A] แสดงว่า Full load ต่อแบบ Δ มอเตอร์มีพิกัดกระแส 1.05 A เช่นเดียวกับต่อแบบ Y มอเตอร์จะมีพิกัดกระแส 0.61 [A] ที่พิกัด Full load
2. จากสมการ $P = I^2 R$ โดยที่ $P =$ กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน
 $I =$ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน
3. ถ้าเลือกค่า $R = 10\Omega$

$$P = (1.05)^2 \times 10 \text{ W}$$

$$P = 11.025W$$

เลือกใช้ $R = 10\Omega$ 10W เนื่องจากทำการทดลองที่พิกัดสูงสุด load 90%

รูปที่ 3.1 การต่อตัวต้านทาน 10Ω $10W$ 4. การหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10Ω รูปที่ 3.2 ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10Ω

จากสมการ V_{p-p} = ระยะห่างจากเส้นอ้างอิง(ช่อง) \times อัตราขยายแกนตั้ง (Volts / Div) \times อัตราลดของโพรบ

$$V_p = \frac{V_{p-p}}{2}$$

$$V_{rms} = 0.707 \times V_p$$

จากรูปออสซิลโลสโคปคำนวณหาค่า V_{rms} แต่เนื่องจากปรับอัตราลดของโพรบเป็น $\times 10$ ทำให้ค่า

$$V_{rms} = 0.225 \times 10$$

$$V_{rms} = 2.25[V]$$



รูปที่ 3.3 การวัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10Ω

จากรูปเป็นการวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทาน 10Ω แกลมปีมิเตอร์ มีค่า $2.14[V]$ จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป

5. การหาค่ากระแสโดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดคร่อมความต้านทาน

จากสมการ

$$I = \frac{V}{R} [A]$$

จากรูปที่ 3.2 จะได้

$$I = \frac{0.225 \times 10}{10} [A]$$

$$I = 0.225 [A]$$



รูปที่ 3.4 การวัดค่ากระแสที่ต่อเข้ากับมอเตอร์

จากรูปเห็นว่าค่ากระแสที่วัดกับค่ากระแสที่คำนวณจากการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปมีค่าใกล้เคียงกัน

∴ สรุปได้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปนั้นก็คือค่ากระแสที่ไหลสู่มอเตอร์เนื่องจากการปรับอัตราลดของโพรบ $\times 10$ ทำให้ ค่าตัวต้านทาน 10Ω กับค่า อัตราลดของโพรบ $\times 10$ ตัดกันพอดี ทำให้ค่ากระแสที่ไหลสู่มอเตอร์มีค่าเท่ากับค่าที่ออสซิลโลสโคปวัดได้

3.1.2 การออกแบบการทดลองของฟิสิกส์มอเตอร์

ฟิสิกส์ของมอเตอร์ ต่อ load 35%, 65%, 90% จะใช้คีมมอเตอร์ทำเป็น โหลดโดยการต่อคีมมอเตอร์เข้ากับ มอเตอร์อันดับชั้น ให้มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ทิศทางการหมุนตรงข้ามของคีมมอเตอร์จะเป็นการต้านการหมุนของ มอเตอร์อันดับชั้นเหมือนกับการต่อโหลดให้ มอเตอร์อันดับชั้น การคำนวณหาค่ากระแสขณะต่อ โหลด load 35%, 65%, 90% ดังนี้

พิจารณามอเตอร์ต่อแบบ Y

1. วัดค่ากระแสของมอเตอร์ no load



รูปที่ 3.5 การวัดค่ากระแสของมอเตอร์ต่อแบบ Y

จากรูปทำให้ทราบว่ามอเตอร์อินดักชัน ต่อแบบ Y กระแส 0.23 [A] จาก Nameplate มอเตอร์ต่อแบบ Y พิกัดกระแส Full load 0.61 [A]

2. การคำนวณค่าผลต่าง กระแส Full load กับ No load และแบ่งผลต่างกระแสเป็น 100 ส่วน

กระแส no load	0.23[A]
กระแส Full load	0.61[A]
ผลต่างของกระแส Full load กับ no load	0.38[A]
แบ่งผลต่างกระแสเป็น 100 ส่วน	$\frac{0.38}{100} = 3.8 \times 10^{-3}$

3. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 35%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.8×10^{-3}
Load 35%	$35 \times (3.8 \times 10^{-3}) = 0.133$
กระแสขณะต่อ load 35%	$0.23 + 0.133 = 0.363[A]$

4. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 65%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.8×10^{-3}
Load 65%	$65 \times (3.8 \times 10^{-3}) = 0.247$
กระแสขณะต่อ load 65%	$0.23 + 0.27 = 0.477[A]$

5. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 90%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.8×10^{-3}
Load 90%	$90 \times (3.8 \times 10^{-3}) = 0.342$
กระแสขณะต่อ load 90%	$0.23 + 0.342 = 0.572[A]$

พิจารณามอเตอร์ต่อแบบ Δ

1. วัดค่ากระแสของมอเตอร์ขณะ No load



รูปที่ 3.6 การวัดค่ากระแสมอเตอร์ต่อแบบ Δ

จากรูปเห็นว่า มอเตอร์อินดักชัน ต่อแบบ Δ กระแส 0.73 [A] จาก Nameplate มอเตอร์ต่อแบบ Δ พิกัดกระแส Full load 1.05 [A]

2. การคำนวณค่าผลต่างของกระแส Full load กับ No load และแบ่งผลต่างกระแสเป็น 100 ส่วน

กระแส No load	$0.73[A]$
กระแส Full load	$1.05[A]$
ผลต่างของกระแส Full load กับ No load	$0.32[A]$
แบ่งผลต่างกระแสเป็น 100 ส่วน	$\frac{0.32}{100} = 3.2 \times 10^{-3}$

3. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 35%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.2×10^{-3}
Load 35%	$35 \times (3.2 \times 10^{-3}) = 0.112$
กระแสขณะต่อ load 35%	$0.73 + 0.112 = 0.842[A]$

4. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 65%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.2×10^{-3}
Load 65%	$65 \times (3.2 \times 10^{-3}) = 0.208$
กระแสขณะต่อ load 65%	$0.73 + 0.208 = 0.938[A]$

5. การคำนวณค่ากระแสขณะต่อ load 90%

ผลต่างของกระแส Full load กับ no load แบ่งเป็น 100 ส่วน	3.2×10^{-3}
Load 90%	$90 \times (3.2 \times 10^{-3}) = 0.288$
กระแสขณะต่อ load 90%	$0.73 + 0.288 = 1.018[A]$

เมื่อคำนวณค่ากระแสขณะต่อโหลดต่างๆแล้วในการทดลองจริงจะทำการค่อยๆปรับแรงดันดีซีมอเตอร์ทำการวัดค่ากระแสของ มอเตอร์อินดักชัน ให้มีค่ากระแสตามโหลดต่างๆขึ้นอยู่กับ การต่อขดลวดสเตเตอร์ แบบ Δ หรือ Y เมื่อได้กระแสตามค่า load แล้วทำการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์แล้วทำการสตาร์ทมอเตอร์ใหม่อีกครั้งแล้วบันทึกค่ากระแสสตาร์ท

3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. ศึกษาการทดสอบมอเตอร์ No load test และ Lock rotor test โดยการรวบรวมข้อมูลและศึกษาเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์
2. ต่อวงจรมอเตอร์ทำการทดสอบมอเตอร์ No load test และ Lock rotor test แล้วนำผลจากการทดลองนำมาหาค่าวงจรสมมูลมอเตอร์
3. ศึกษาสมการหาค่า T_{load} โดยการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือต่างๆเพื่อทำการหาค่า T_{load} ของมอเตอร์ที่ต่อโหลดต่างๆ
4. ต่อวงจรมอเตอร์ทำการวัดค่าต่างๆแล้วนำค่าไปคำนวณหาค่า T_{load} ของมอเตอร์ที่ต่อโหลดต่างๆ
5. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม PSIM โดยการรวบรวมข้อมูลการทำงานและการแสดงผลของโปรแกรมในส่วนของความรู้เบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองแบบของอุปกรณ์หรือวงจร
6. ออกแบบวงจรในโปรแกรม PSIM โดยใช้วงจรพื้นฐานเป็นหลักแล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ในโปรแกรมให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่หามาได้จากที่กล่าวมา
7. Simulate หา I_{start} , T_{load} , T_{motor} และ ความเร็วรอบของมอเตอร์
8. ต่อขดลวดสเตเตอร์แบบ Δ ทำการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Direct On Line การสตาร์ทขณะต่อ load 35%, 65%, 90% ทำการบันทึกค่าโดยใช้ออสซิลโลสโคปบันทึกกราฟขณะสตาร์ท
9. ต่อขดลวดสเตเตอร์แบบ Y- Δ ทำการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y- Δ ทำการสตาร์ทขณะต่อ load 35%, 65%, 90% ทำการบันทึกค่าโดยใช้ออสซิลโลสโคปบันทึกกราฟขณะสตาร์ทและบันทึกกราฟช่วงขดลวด สเตเตอร์เปลี่ยน Y- Δ
10. นำผลทดลองจากการ Simulation การต่อวงจรของแต่ละวงจรมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

ในการ Simulation จะใช้โปรแกรม PSIM ในการสร้างแบบจำลองวงจรและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร ส่วนการต่อวงจรจริงจะมีอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการต่อวงจรทดลอง ดังนี้

1. แหล่งจ่ายการแสดตรง (DC Supply)
2. แหล่งจ่ายกระแสสลับ (AC Supply)
3. ชุดสายไฟ
4. มอเตอร์อินดักชัน (Induction motor) แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) จำนวน 1 ตัว
ขนาดพิกัด 0.37 kw
5. ดีซีมอเตอร์

6. สวิตช์ปุ่มกดสปีดเปิด 1 ตัว (Push Button switch N.C.)
7. สวิตช์ปุ่มกดสปีดเปิด 1 ตัว (Push Button switch N.O.)
8. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ 2N.O. 2N.C. 4 ตัว (Magnetic contactor 3 phase ,2N.O. 2N.C.)
9. รีเลย์หน่วงเวลา (Timer Delay Relay) 1 ตัว
10. ตัวต้านทาน 10 w 10 Ω
11. ออสซิลโลสโคป
12. แคลมป์มิเตอร์
13. วัดดีมิเตอร์

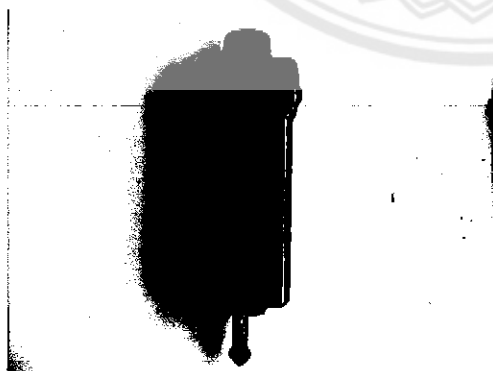
อุปกรณ์



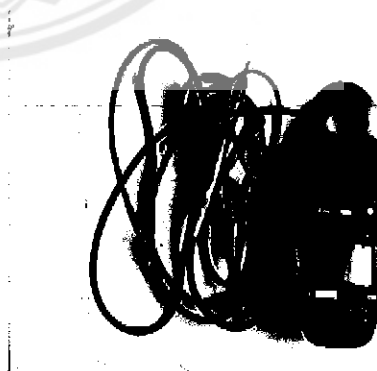
รูปที่ 3.7 มอเตอรือินดักชัน



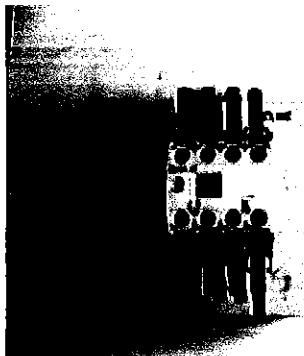
รูปที่ 3.8 DC มอเตอรื



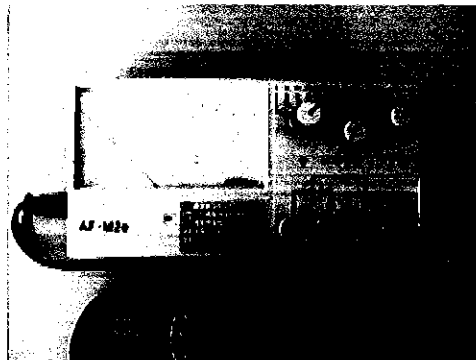
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความเร็วรอบ



รูปที่ 3.10 แคลมป์มิเตอร์



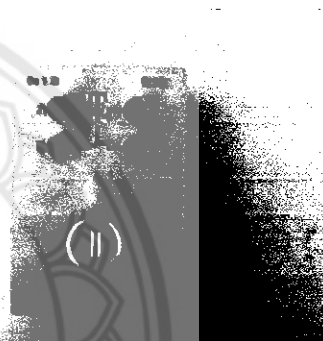
รูปที่ 3.11 แมกเนติกคอนแทคเตอร์



รูปที่ 3.12 วัดดีมิเตอร์



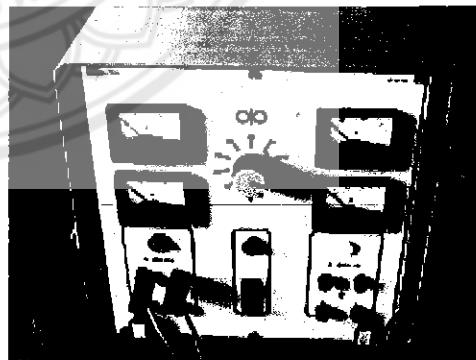
รูปที่ 3.12 ออสซิลโลสโคป



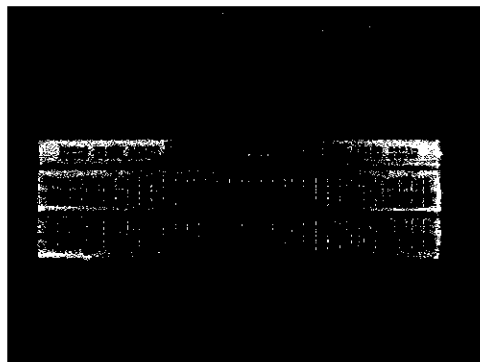
รูปที่ 3.13 สวิตช์ปุ่มกดสี่เหลี่ยมปกติปิด



รูปที่ 3.14 สวิตช์ปุ่มกดสี่เหลี่ยมปกติเปิด



รูปที่ 3.15 AC Supply 24 V



รูปที่ 3.16 ตัวต้านทาน 10 w 10 Ω



รูปที่ 3.17 โอเวอร์โพลครีเลย์

3.3 โปรแกรม PSIM

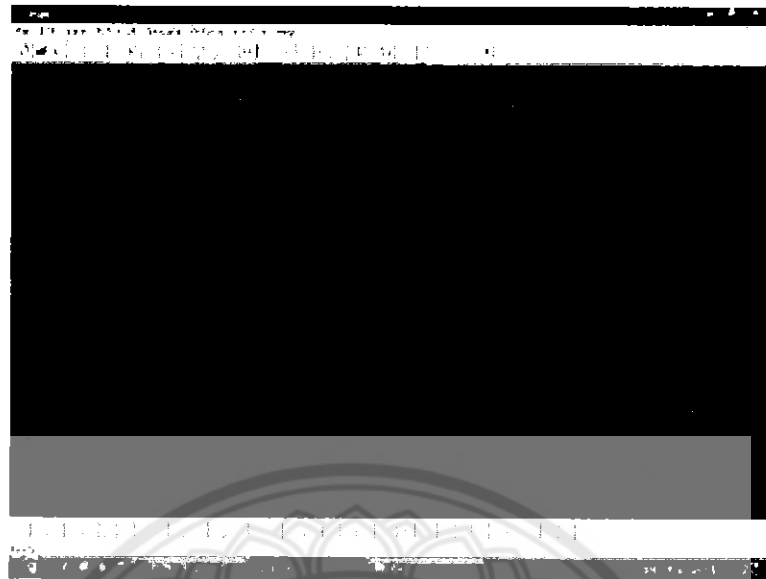
การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM จะช่วยในการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจร และยังสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรได้ง่าย นอกจากนี้ยังเป็นการประหยัด สะดวก ปลอดภัยและช่วยลดการเสียหายของอุปกรณ์ได้อีกด้วย กระบวนการจำลองเหตุการณ์ของโปรแกรม PSIM ประกอบด้วยโดยโปรแกรมหลักๆ 2 โปรแกรม

1. โปรแกรม Schematics ทำหน้าที่เป็นส่วนกราฟฟิกของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการจะวิเคราะห์ผล เมื่อบันทึกแบบภาพกราฟฟิกวงจรไฟฟ้าที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมนี้ ไฟล์ที่ได้จะเป็นนามสกุล .sch

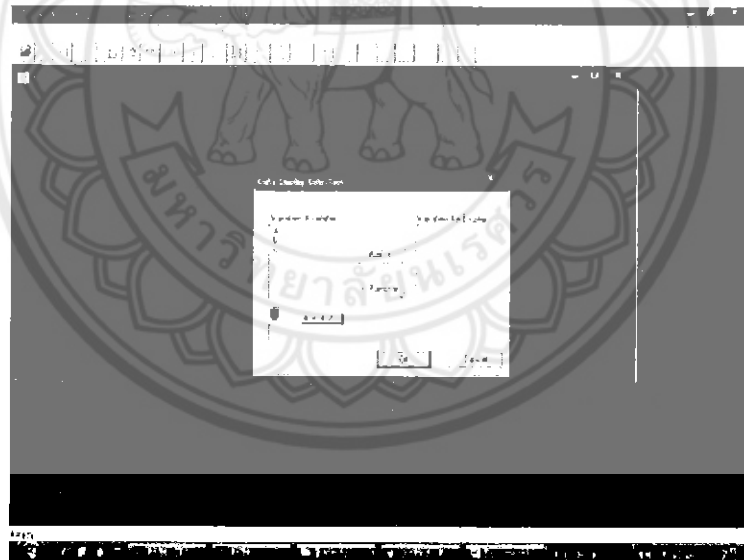
2. โปรแกรม Simview ทำหน้าที่วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่เขียนจากโปรแกรม Schematics และทำหน้าที่แสดงผลการวิเคราะห์วงจรในรูปแบบของกราฟ

หลังจากเขียนวงจรเสร็จแล้วทำการบันทึกจะได้ไฟล์นามสกุล .sch และเมื่อทำการ Run Simulate ซอฟต์แวร์จะสร้างไฟล์ที่จำเป็นขึ้นมา 1 ชนิด คือ

1. ไฟล์แสดงผลการวิเคราะห์วงจรในรูปแบบของกราฟ (Files of type: Data(*.TXT)) จากที่กล่าวมา สรุปได้ว่า กระบวนการจำลองสถานการณ์ของโปรแกรม PSIM จะมีไฟล์หลัก คือ ไฟล์ .sch จากนั้นจะแตกออกเป็นไฟล์ 1 ไฟล์เมื่อทำการ Run Simulate เพื่อใช้ในการแสดงผล



รูปที่ 3.18 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PSIM Schematic




รูปที่ 3.19 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม SimView

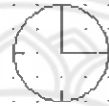
3.4 การใช้ PSIM ในการวิเคราะห์ห้วงจร

การใช้โปรแกรม PSIM เพื่อวิเคราะห์ห้วงจรจะใช้โปรแกรม PSIM Schematic ในการเขียนวงจรและใช้โปรแกรม SimView ในการดูรูปคลื่นสัญญาณกระแสและนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ทดลองจริง

3.4.1 การวิเคราะห์หม้อเตอร์ต่อแบบ Y

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างวงจรด้วย Schematic

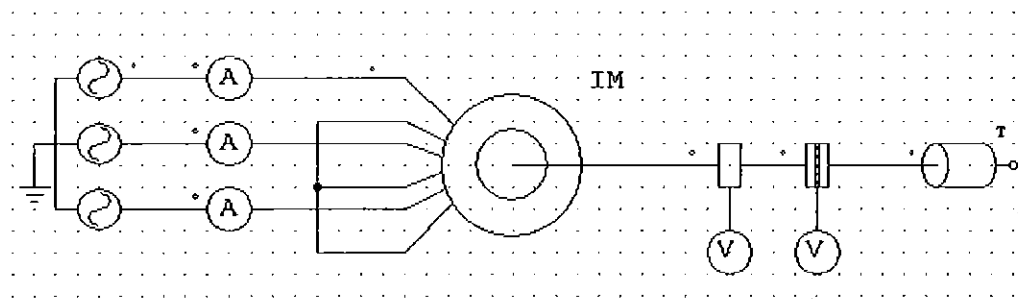
1. เปิดโปรแกรม PSIM Schematic คลิกที่ไอคอน  และเขียนวงจรดังรูป เลือกอุปกรณ์ต่างๆ โดยการเลือกเมนู Simulate / Simulate Control



Simulate Control

2. เขียนวงจรโดยเลือกอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ โดยเลือกเมนู
 - 2.1 Elements / Sources / Voltage / 3-Ph Sine
 - 2.2 Elements / Other / Probes / Current Probe
 - 2.3 Elements / Power / Motor Drive Module / Squirrel-cage Ind. Machine (linear)
 - 2.4 Elements / Power / Motor Drive Module / Speed Sensor
 - 2.5 Elements / Power / Motor Drive Module / Torque Sensor
 - 2.6 Elements / Other / Probes / Voltage Probe
 - 2.7 Elements / Power / Motor Drive Module / Mechanical Load (Constant torque)
 - 2.8 Elements / Other / Ground

เขียนวงจรตามดังรูป

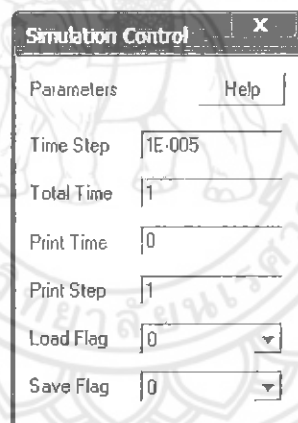


รูปที่ 3.20 วงจรการวิเคราะห์หม้อเตอร์ต่อแบบ Y

3. ลากจุดเชื่อมต่อโดยการคลิกที่ไอคอน

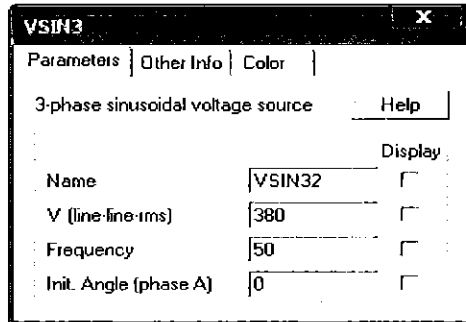
ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดค่าของอุปกรณ์ต่างๆ

1. ดับเบิ้ลคลิกที่รูป Simulate Control แล้วใส่ค่าดังรูป



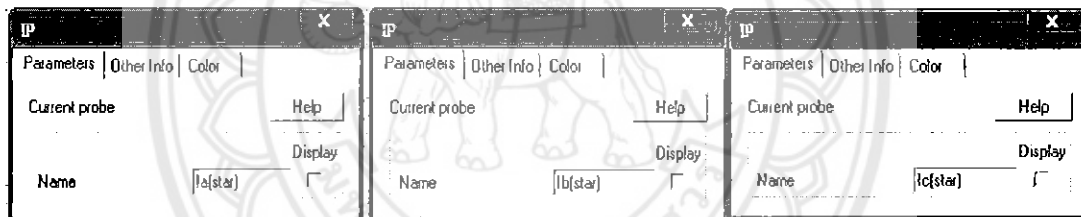
การตั้งค่า Simulate Control

2. ดับเบิลคลิกที่รูป 3-Ph Sine แล้วใส่ค่าดังรูป



การตั้งค่า 3-Ph Sine

3. ดับเบิลคลิกที่รูป Current Probe ด้านบน กลาง และด้านล่าง แล้วใส่ค่าดังรูป



บน

กลาง

ล่าง

การตั้งค่า Current Probe

4. ดับเบิลคลิกที่รูป Squirrel-cage Ind. Machine (linear) แล้วใส่ค่าดังรูป หามาได้จากการทดสอบมอเตอร์

INDM3 S LTN		
Parameters Other Info Color		
Squirrel-cage induction machine		Help
Display		
Name	IM2	<input type="checkbox"/>
Rs (stator)	54.6	<input type="checkbox"/>
Ls (stator)	0.127	<input type="checkbox"/>
Rr (rotor)	70.81	<input type="checkbox"/>
Lr (rotor)	0.2887	<input type="checkbox"/>
Lm (magnetizing)	2.922	<input type="checkbox"/>
No. of Poles P	4	<input type="checkbox"/>
Moment of Inertia	0.001	<input type="checkbox"/>
Torque Flag	1	<input type="checkbox"/>
Master/Slave Flag	1	<input type="checkbox"/>

การตั้งค่า Squirrel-cage Ind. Machine (linear)

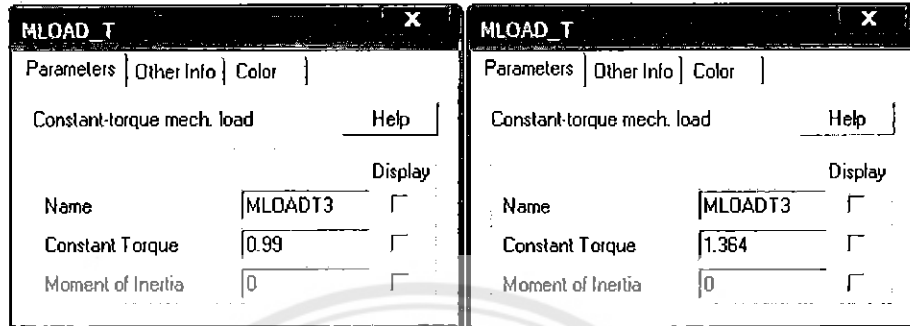
5. ดับเบิลคลิกที่รูป Voltage Probe แล้วใส่ค่าดังรูป จากซ้ายไปขวา

VP		
Parameters Other Info Color		
Voltage probe (node to ground)		Help
Display		
Name	torque	<input type="checkbox"/>

VP		
Parameters Other Info Color		
Voltage probe (node to ground)		Help
Display		
Name	Speed	<input type="checkbox"/>

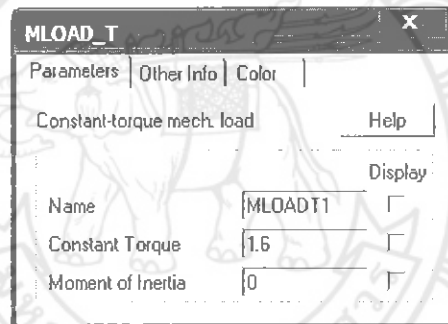
การตั้งค่า Voltage Probe

6. ดับเบิลคลิกที่รูป Mechanical Load (Constant torque) แล้วใส่ค่าดังรูป ขึ้นอยู่กับต่อ load 35%, 65%, 90% ที่ได้จากการทดลองและคำนวณ ใส่ค่าได้เพียงค่าเดียวขึ้นอยู่กับจะ Simulate คู่มอเตอร์ต่อโหลดกี่เปอร์เซ็นต์




Load 35%

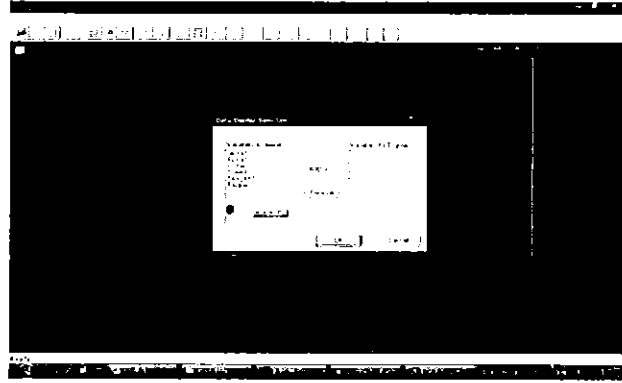
Load 65%



Load 90%

ขั้นตอนที่ 3 การ Simulate และหาค่าต่างๆของมอเตอร์

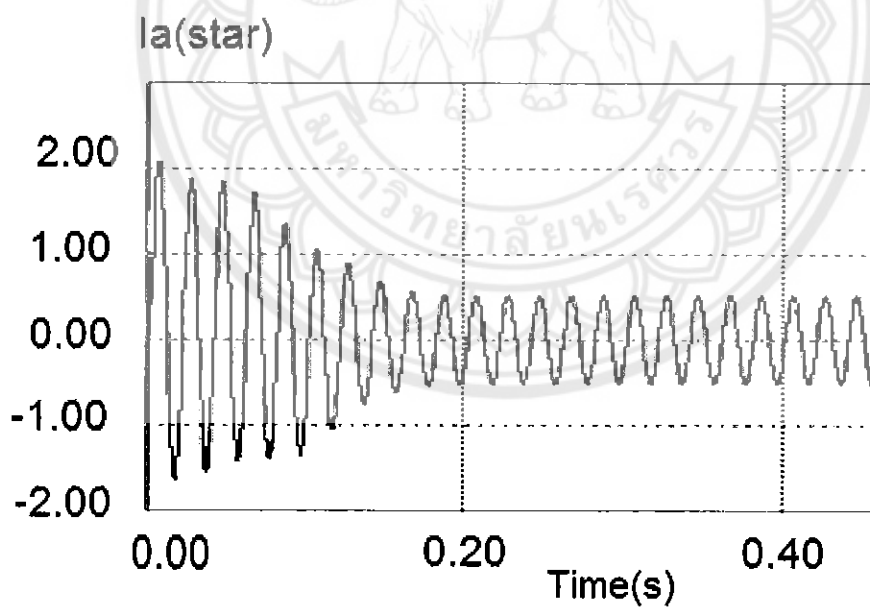
1. คลิกที่ไอคอน  เพื่อทำการ Simulate
2. เมื่อโปรแกรม Simulate เสร็จจะปรากฏหน้าต่างโปรแกรม SimView ดังรูป



รูปที่ 3.21 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม SimView

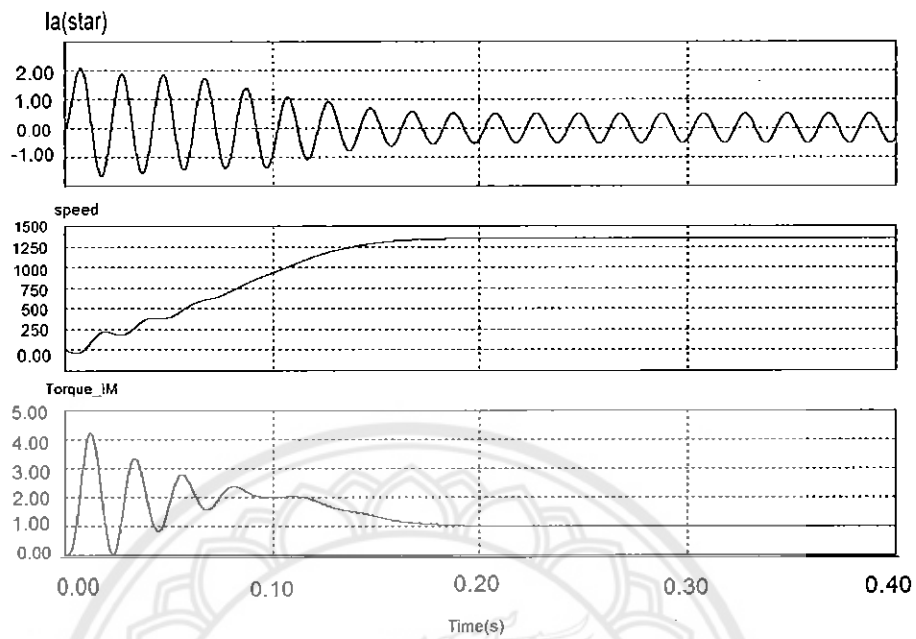
3. เมื่อต้องการทราบค่า กระแส ความเร็วรอบ หรือ ทอร์ก หรือค่าต่างๆ ให้คลิกส่วนที่ต้องการแสดงค่าเสร็จแล้วให้คลิกที่ไอคอน Add และถ้าต้องการยกเลิกให้คลิก Remove ถ้าตกลงแล้วคลิก Ok จะปรากฏกราฟแสดงค่า

ตัวอย่าง ถ้าต้องการดูค่ากระแสมอเตอร์ต่อ load 35% ดังรูป



รูปที่ 3.22 กระแสมอเตอร์ต่อ load 35%

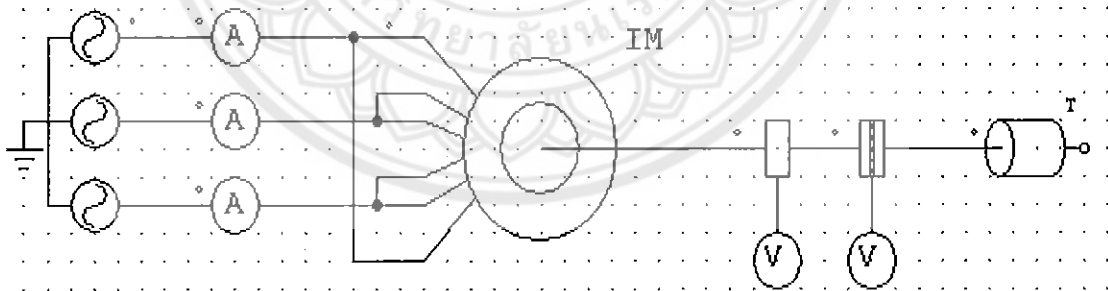
4. เมื่อต้องการทราบค่าอื่นให้คลิกไอคอน  แล้วทำการ Add เพิ่มส่วนที่ต้องการดั่งรูป



รูปที่ 3.23 ค่า กระแส ความเร็วรอบ และทอร์คของมอเตอร์

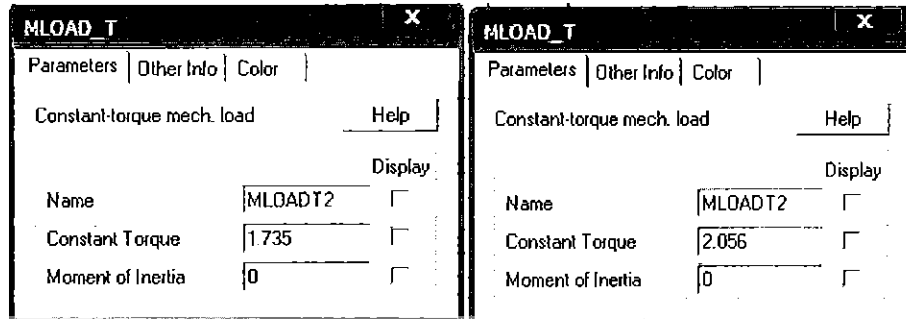
3.4.1 การวิเคราะห์หม้อเตอร์ต่อแบบ Δ

1. เขียนวงจรดังรูป ส่วนอุปกรณ์ต่างๆเหมือนการต่อมอเตอร์แบบ Y



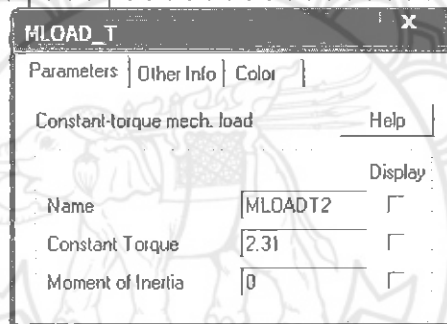
รูปที่ 3.24 วงจรการวิเคราะห์หม้อเตอร์ต่อแบบ Δ

2. การตั้งค่าของอุปกรณ์เหมือนการต่อแบบ Y ยกเว้นการตั้งค่าของ Mechanical Load (Constant torque) ดังรูป



Load 35%

Load 65%



Load 90%

3. การ Simulate และหาค่าต่างๆเหมือนการต่อแบบ Y

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดสอบมอเตอร์อินดักชันจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องนำมาประกอบในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม PSIM คือการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลมอเตอร์และ τ_{load} ต่างๆนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSIM หาค่ากระแสขณะสแตร์ทของมอเตอร์ต่อแบบ Y และ Δ ขณะต่อ load ต่างๆและจะมีการนำผลที่ได้จากการ Simulate จากการต่อวงจรและหาค่าสมการสถานะ Transient ช่วงขณะสแตร์ทต่อ load ต่างๆมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

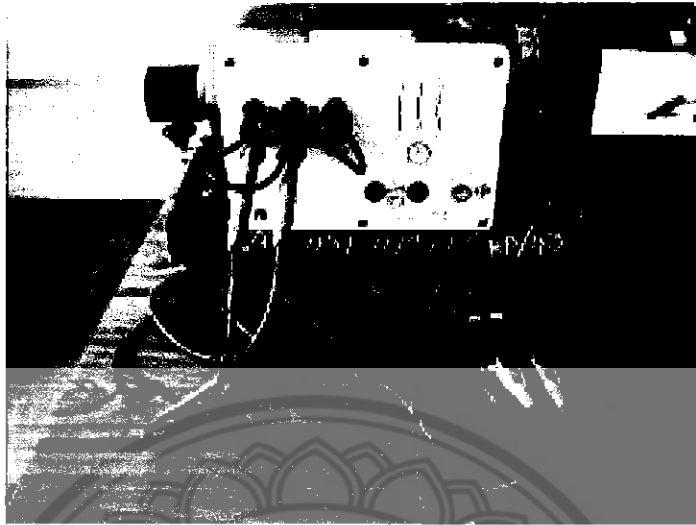
ผลการทดลองที่ได้จากการทำโครงการนี้จะแบ่งออกเป็น ส่วน คือ

- 4.1 ผลจากการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาวงจรสมมูล
- 4.2 ผลจากการทดลองเพื่อหา τ_{load}
- 4.3 ผลจากการทดลองต่อวงจรจริง
- 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลจากการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาวงจรสมมูล

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSIM จำเป็นที่ต้องหาวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ทำการทดลองเนื่องจากต้องนำค่าที่ได้จากวงจรสมมูลมอเตอร์ไปใส่ในอุปกรณ์ Squirrel-cage Ind. Machine (linear) ของโปรแกรม PSIM

4.1.1 D.C. Test มอเตอร์ต่อแบบ Y เพื่อหาค่า $R_{(stator)}$



รูปที่ 4.1 การวัดค่าเพื่อหาค่า $R_{(stator)}$



รูปที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการวัด $R_{(stator)}$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการทดสอบมอเตอร์อินดักชันแบบ D.C. Test มอเตอร์ต่อแบบ Y เพื่อหาค่า $R_{(stator)}$ ค่าที่วัดได้ 109.2Ω ค่าความต้านทานสเตเตอร์ต่อเฟสจะมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้หารสองเนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบ Y

4.1.2 No load test

ตารางที่ 4.1 การแสดงผล No load test

No load test					
V_T (V)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	$P_m = W_1 + W_2$	f (Hz)
380	0.23	0.23	0.23	$-25W + 50W$	50

4.1.3 Locked-rotor test

ตารางที่ 4.2 การแสดงผล Locked-rotor test

Locked-rotor test					
V_T (V)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	$P_m = W_1 + W_2$	f (Hz)
190.5	0.61	0.61	0.61	$25W + 115W$	50

4.1.4 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาวงจรมอเตอร์

จาก DC Test ต่อแบบ Y

$$\text{วัดได้ } R_Y = 109.2\Omega$$

เนื่องจากมอเตอร์ต่อแบบ Y การหาค่า $R_{(stator)}$ ต่อเฟสจึงต้องนำค่าที่ได้จากการวัดนั้นมาหารด้วยสอง

$$R_{(stator)} \text{ ต่อเฟส} = \text{ค่าที่วัดได้} / 2$$

$$R_{(stator)} \text{ ต่อเฟส} = \frac{109.2}{2}$$

$$R_{(stator)} \text{ ต่อเฟส} = 54.6\Omega / \text{Phase}$$

จาก No load test

$$V_{\phi, nl} = \frac{V_T}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\phi, nl} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

$$|Z_{nl}| = \frac{V_{\phi, nl}}{I_{nl}} \Omega$$

$$|Z_{nl}| = \frac{220}{0.23} = 956.52 \Omega = X_1 + X_m$$

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

$$P_{SCL} = 3 \times (0.23)^2 \times 54.6 = 8.665W$$

$$P_{rot} = P_{core} + P_{F \& W} + P_{misc}$$

$$P_{rot} = P_{in, nl} - P_{SCL, nl}$$

$$P_{rot} = 25 - 8.665 = 16.335W$$

อิมพีแดนซ์ขณะยึดโรเตอร์ (locked-rotor impedance)

$$|Z_{LR}| = \frac{V_{\phi}}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3} \times I_A} \Omega$$

$$|Z_{LR}| = \frac{190.5}{\sqrt{3} \times 0.61} = 180.30 \Omega$$

มุมเฟสของอิมพีแดนซ์ (impedance angle θ)

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_m}{\sqrt{3} \times V_T \times I_L}$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{140}{\sqrt{3} \times 190.5 \times 0.61} = \cos^{-1} 0.6955$$

$$\theta = 45.92^\circ$$

$$R_{LR} = |Z_{LR}| \cos \theta$$

$$R_{LR} = 180.30 \cos 45.92^\circ$$

$$R_{LR} = 125.41 \Omega = R_1 + R_2$$

$$R_1 = 54.6 \Omega$$

$$R_2 = 125.41 - R_1$$

$$R_2 = 125.41 - 54.6 = 70.81 \Omega$$

$$X_{LR} = |Z_{LR}| \sin \theta$$

$$X_{LR} = 180.30 \sin 45.92^\circ = 129.52 \Omega$$

มอเตอร์ Class C

$$X_1 = 0.3 X_{LR}$$

$$X_2 = 0.7 X_{LR}$$

$$X_1 = 0.3 \times 129.52 \Omega$$

$$X_2 = 0.7 \times 129.52 \Omega$$

$$X_1 = 38.856 \Omega$$

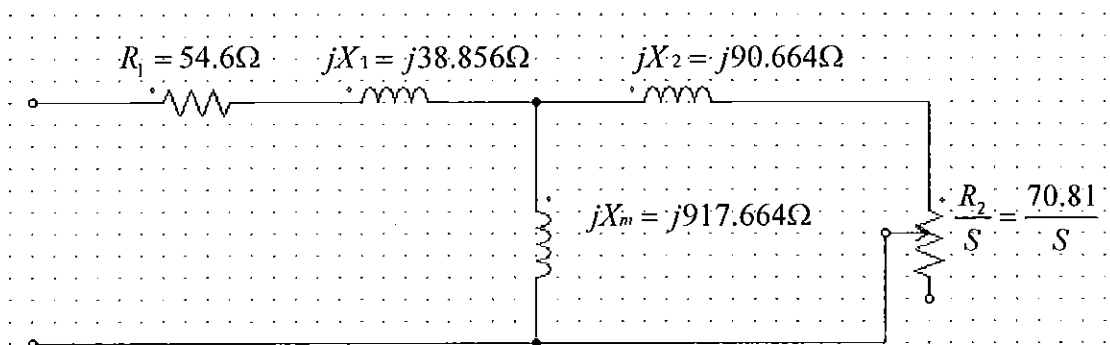
$$X_2 = 90.664 \Omega$$

$$X_m = |Z_m| - X_1$$

$$X_m = 956.52 - 38.856$$

$$X_m = 917.664 \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลดังรูป



รูปที่ 4.3. วงจรสมมูลมอเตอร์

หาค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลมอเตอร์

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f}$$

$$L_m = \frac{917.664}{2 \times 3.14 \times 50} = 2.992H$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f}$$

$$L_1 = \frac{38.856}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.1237H$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f}$$

$$L_2 = \frac{90.664}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.2887H$$

4.2 ผลจากการทดลองเพื่อหา τ_{load}

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSIM จำเป็นที่จะต้องหา τ_{load} ที่จะทำการทดลองเพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปใส่ในอุปกรณ์ Mechanical Load (Constant torque) ของโปรแกรม PSIM

4.2.1 พิจารณามอเตอร์ต่อแบบ Y

ตารางที่ 4.3 แสดงกระแสมอเตอร์ขณะขับโหลดต่างๆ

Load	กระแสมอเตอร์		
	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)
%			
35	0.363	0.363	0.363
65	0.477	0.477	0.477
90	0.572	0.572	0.572

ตารางที่ 4.4 แสดงผลเพื่อนำไปหา T_{load}

Load %	$P_m = W_1 + W_2$ (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)
35	60+135	1388	0.36	0.36	0.36
65	90+180	1320	0.47	0.47	0.47
90	115+220	1251	0.57	0.57	0.57

หา T_{load} ต่อแบบ Y 35%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 35%

มอเตอร์ 4 ขั้ว

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500$$

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1388}{1500}$$

$$S = 0.0747$$

หา Pout

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

$$= 3 \times (0.363)^2 \times 54.6$$

$$P_{SCL} = 21.58W$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$P_{AG} = P_m - P_{SCL}$$

$$= 195 - 21.58$$

$$P_{AG} = 173.42W$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG}$$

$$= (1 - 0.0747)173.42$$

$$P_{conv} = 160.47W$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 160.47 - 16.335$$

$$P_{out} = 144.135W$$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

$$= \frac{144.135}{2 \times 3.14 \times \frac{1388}{60}}$$

$$\tau_{load} = 0.99N.m$$

หา T_{load} ต่อแบบ Y 65%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 65%

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1320}{1500}$$

$$S = 0.12$$

หา P_{out}

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

$$= 3 \times (0.477)^2 \times 54.6$$

$$P_{SCL} = 37.27W$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$P_{AG} = P_m - P_{SCL}$$

$$= 270 - 37.27$$

$$P_{AG} = 232.73W$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG}$$

$$= (1 - 0.12)232.73$$

$$P_{conv} = 204.8W$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 204.8 - 16.335$$

$$P_{out} = 188.465W$$

$$\begin{aligned} \tau_{load} &= \frac{P_{out}}{\omega_m} \\ &= \frac{188.465}{2 \times 3.14 \times \frac{1320}{60}} \\ \tau_{load} &= 1.364 \text{ N.m} \end{aligned}$$

หา τ_{load} ต่อแบบ Y 90%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 90%

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1251}{1500}$$

$$S = 0.166$$

หา P_{out}

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$\begin{aligned} P_{SCL} &= 3I_1^2 R_1 \\ &= 3 \times (0.572)^2 \times 54.6 \end{aligned}$$

$$P_{SCL} = 53.59 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$P_{AG} = P_m - P_{SCL}$$

$$= 325 - 53.59$$

$$P_{AG} = 271.41 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG}$$

$$= (1 - 0.166)271.41$$

$$P_{conv} = 226.36W$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 226.36 - 16.335$$

$$P_{out} = 210.025W$$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

$$= \frac{210.025}{2 \times 3.14 \times \frac{1251}{60}}$$

$$\tau_{load} = 1.60 N.m$$

4.2.2 พิจารณามอเตอร์ต่อแบบ Δ

ตารางที่ 4.5 กระแสมอเตอร์ขณะขับโหลดต่างๆ

Load %	กระแสมอเตอร์		
	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)
35	0.84	0.84	0.84
65	0.938	0.938	0.938
90	1.02	1.02	1.02

ตารางที่ 4.6 ผลเพื่อนำไปหา τ_{load}

Load	$P_m = W_1 + W_2$	ความเร็วรอบ	I_A	I_B	I_C
%	(W)	(rpm)	(A)	(A)	(A)
35	40 + 320	1406	0.84	0.84	0.84
65	60 + 360	1390	0.94	0.94	0.94
90	90 + 380	1372	1.02	1.02	1.02

หา τ_{load} ต่อแบบ Δ 35%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 35%

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1406}{1500}$$

$$S = 0.063$$

หา P_{out}

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

$$= 3 \times (0.485)^2 \times 54.6$$

$$P_{SCL} = 38.53W$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$P_{AG} = P_m - P_{SCL}$$

$$= 360 - 38.53$$

$$P_{AG} = 321.47W$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG}$$

$$= (1 - 0.063)321.47$$

$$P_{conv} = 301.217W$$

$$P_{SCL(NL)} = 3 \frac{I_1^2}{\sqrt{3}} R_1 = 3(0.423)^2 54.6 = 29.1$$

$$P_{rot} = P_{in(NL, \Delta)} - P_{SCL(NL)} = 75 - 29.1 = 45.9$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 301.217 - 45.9$$

$$P_{out} = 255.3W$$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

$$= \frac{255.3}{2 \times 3.14 \times \frac{1406}{60}}$$

$$\tau_{load} = 1.735 N.m$$

หา τ_{load} ต่อแบบ Δ 65%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 65%

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1390}{1500}$$

$$S = 0.073$$

หา P_{out}

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$\begin{aligned} P_{SCL} &= 3I_1^2 R_1 \\ &= 3 \times (0.54)^2 \times 54.6 \end{aligned}$$

$$P_{SCL} = 47.76W$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$\begin{aligned} P_{AG} &= P_m - P_{SCL} \\ &= 420 - 47.76 \end{aligned}$$

$$P_{AG} = 372.24W$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$\begin{aligned} P_{conv} &= (1 - S)P_{AG} \\ &= (1 - 0.073)372.24 \end{aligned}$$

$$P_{conv} = 345.07W$$

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{conv} - P_{rot} \\ &= 345.07 - 45.9 \end{aligned}$$

$$P_{out} = 299.17W$$

$$\begin{aligned} \tau_{load} &= \frac{P_{out}}{\omega_m} \\ &= \frac{299.17}{2 \times 3.14 \times \frac{1390}{60}} \end{aligned}$$

$$\tau_{load} = 2.056N.m$$

หา T_{load} ต่อแบบ Δ 90%

หาค่า Slip ที่ทำงาน load 90%

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1372}{1500}$$

$$S = 0.085$$

หา P_{out}

กำลังสูญเสียขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper losses)

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

$$= 3 \times (0.59)^2 \times 54.6$$

$$P_{SCL} = 57.02W$$

กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap Power)

$$P_{AG} = P_m - P_{SCL}$$

$$= 470 - 57.02$$

$$P_{AG} = 412.98W$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล (power convert)

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG}$$

$$= (1 - 0.085)412.98$$

$$P_{conv} = 377.79W$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 377.79 - 45.9$$

$$P_{out} = 331.89W$$

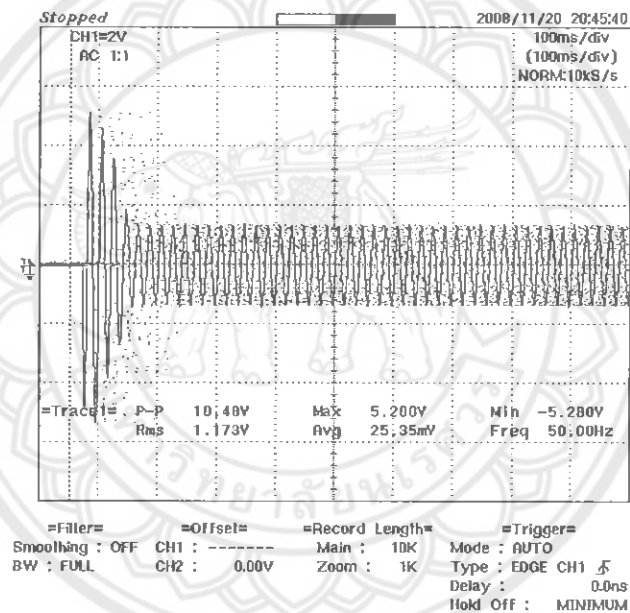
$$\begin{aligned} \tau_{load} &= \frac{P_{out}}{\omega_m} \\ &= \frac{331.89}{2 \times 3.14 \times \frac{1372}{60}} \end{aligned}$$

$$\tau_{load} = 2.31 N.m$$

4.3 ผลจากการทดลองต่อวงจรจริง

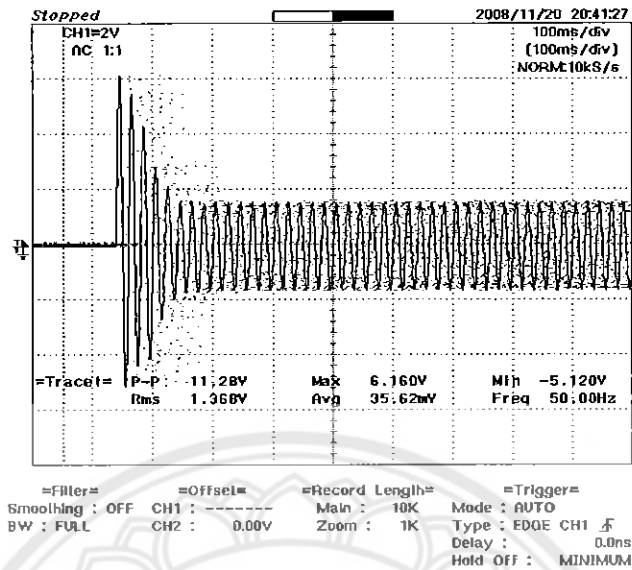
4.3.1 การสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง (Direct On Line)

ขณะต่อ โหลด 35%



รูปที่ 4.4 กราฟกระแสขณะสตาร์ทเฟส A

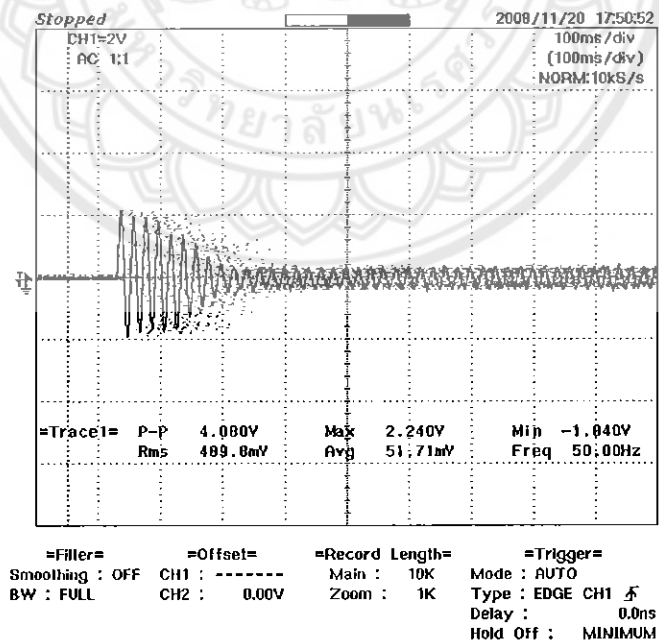
ขณะต่อโหลด 90%



รูปที่ 4.8 กราฟกระแสขณะสตาร์ท

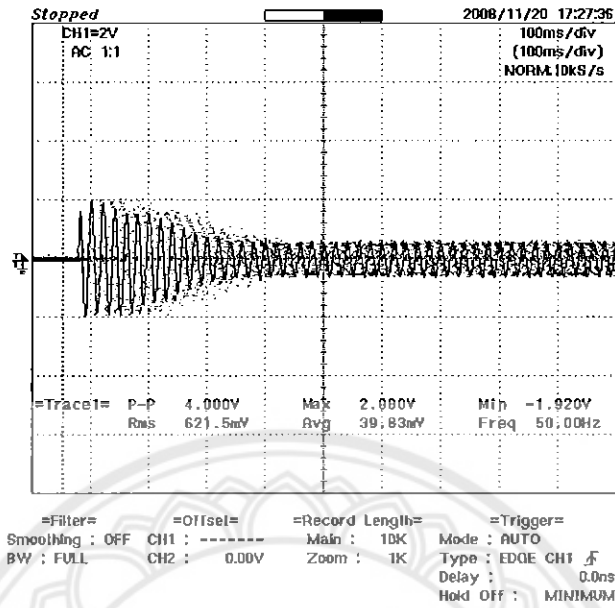
4.3.2 การสตาร์ทมอเตอร์โดย สตาร์-เดลต้า (Star-Delta)

ขณะต่อโหลด 35%



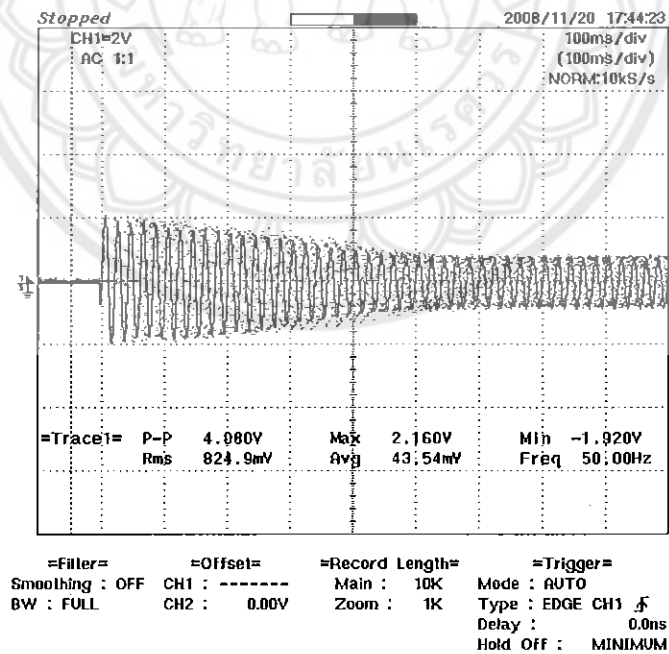
รูปที่ 4.9 กราฟกระแสขณะสตาร์ท

ขณะต่อโหลด 65%



รูปที่ 4.10 กราฟกระแสขณะสตาร์ท

ขณะต่อโหลด 90%



รูปที่ 4.11 กราฟกระแสขณะสตาร์ท

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.4.1 การสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y- Δ และการสตาร์ทแบบ Direct On Line

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกระแสขณะสตาร์ท

Load %	Y- Δ				Direct On Line				$\frac{I_{(peak)DOL}}{I_{(peak)Y-\Delta}}$
	I_{peak} (A)	I_{P-P} (A)	จำนวน ลูก คลื่น	เวลา เข้าสู่ ภาวะ ปกติ	I_{peak} (A)	I_{P-P} (A)	จำนวน ลูก คลื่น	เวลาเข้า สู่ภาวะ ปกติ	
35	2.24	4.080	9	0.18	5.68	10.88	4	0.08	2.536
65	2.080	4.00	11	0.22	6.16	11.20	4	0.08	2.96
90	2.16	4.080	22	0.44	6.16	11.28	5	0.10	2.85

จากตารางเห็นว่าการสตาร์ทมอเตอร์ต่อแบบ Direct On Line จะมีค่ากระแส I_{peak} ที่สูงกว่าการสตาร์ทมอเตอร์ต่อแบบ Y- Δ กระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ต่อแบบ Y- Δ กระแสสตาร์ทจะลดลงจากอัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดต่อแบบ Direct On Line กับกระแสสูงสุดต่อแบบ Y- Δ

สภาวะ โหลด 35% มีค่าเท่ากับ 2.536

สภาวะ โหลด 65% มีค่าเท่ากับ 2.960

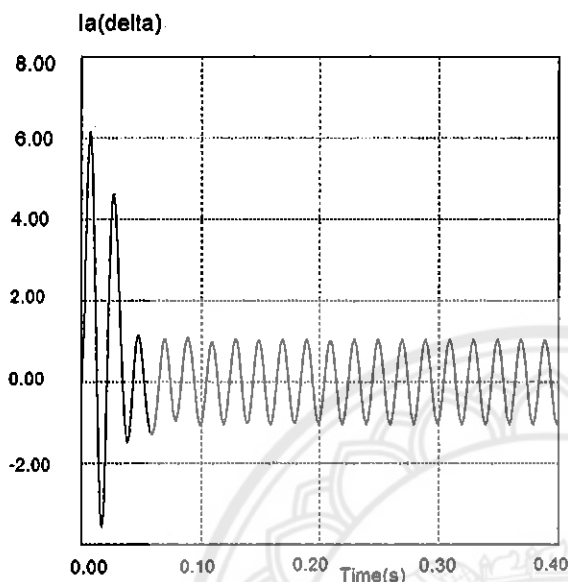
สภาวะ โหลด 90% มีค่าเท่ากับ 2.850

ค่ากระแสขณะสตาร์ทจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของ load ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์เมื่อต่อ โหลดเปอร์เซ็นต์สูงจะทำให้กระแสสูงขึ้นและจำนวนลูกคลื่นที่จะเข้าสู่สภาวะปกติเป็นเวลานานขึ้น

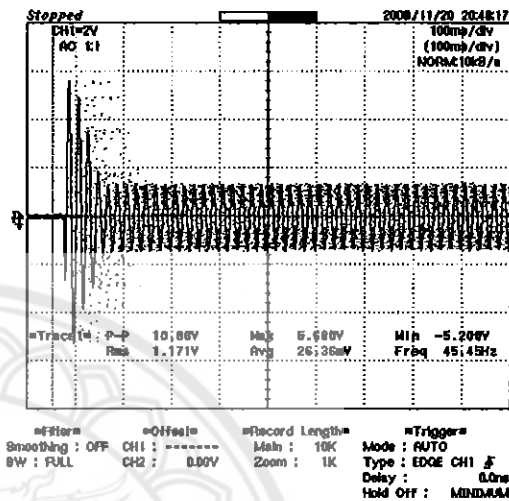
4.4.3 การเปรียบเทียบค่า Simulate กับ การทดลองจริง

การสตาร์ท Direct On Line

Load 35%

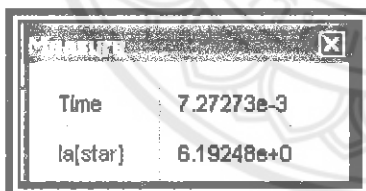


รูปที่ 4.12 กราฟ Simulate จาก PSIM

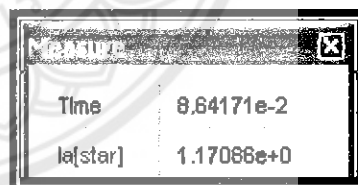


รูปที่ 4.13 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate



ค่าเวลาและกระแสสูงสุด



ค่าเวลาและกระแสทำงานปกติ

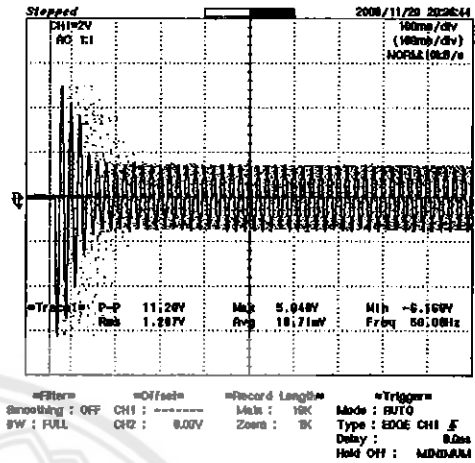
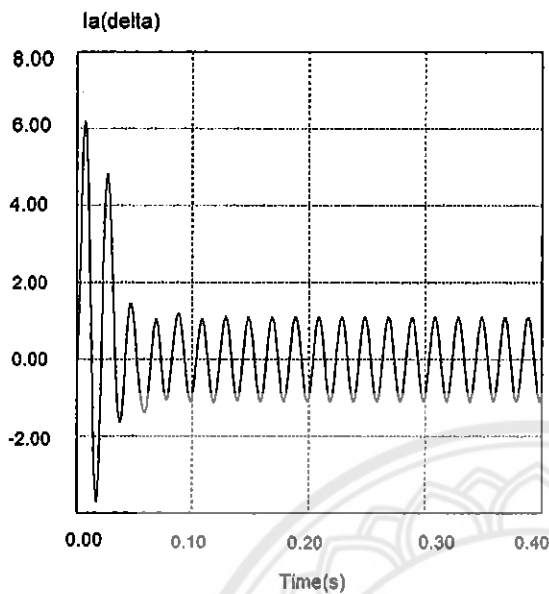
ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ 5.68A

กระแสทำงานปกติ เท่ากับ $0.84 \times \sqrt{2} = 1.1879A$

เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา = $4 \times 0.02 = 0.08s$

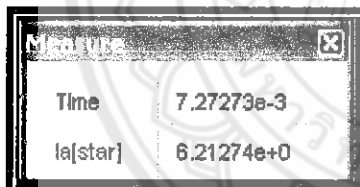
Load 65%



รูปที่ 4.14 กราฟ Simulate จาก PSIM

รูปที่ 4.15 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate



ค่าเวลาและกระแสสูงสุด



ค่าเวลาและกระแสทำงานปกติ

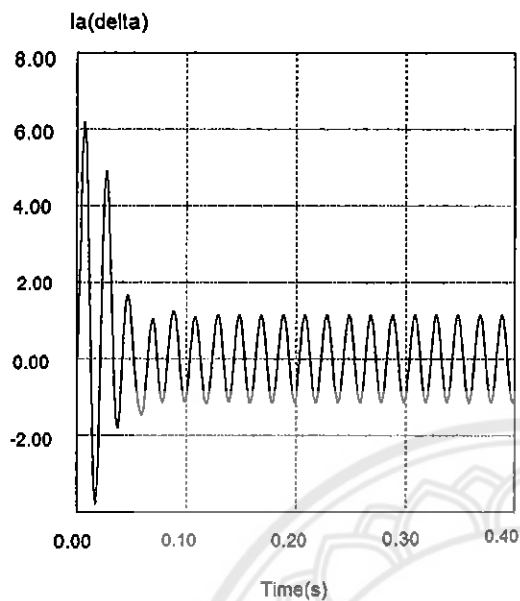
ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ 6.16A

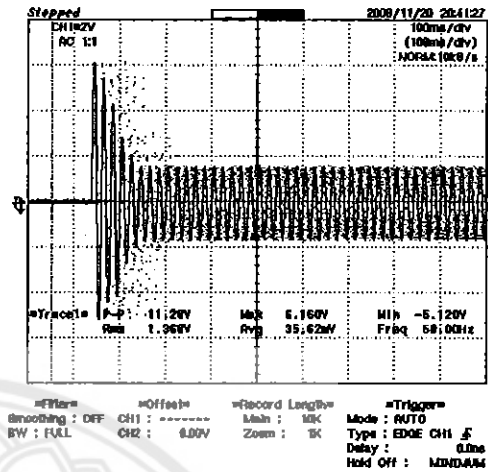
กระแสทำงานปกติ เท่ากับ $0.938 \times \sqrt{2} = 1.3265A$

เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา = $4 \times 0.02 = 0.08s$

Load 90%

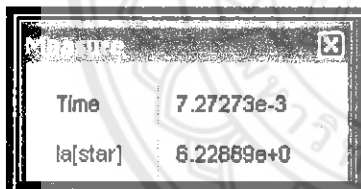


รูปที่ 4.16 กราฟ Simulate จาก PSIM

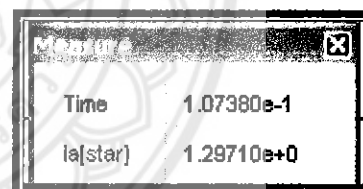


รูปที่ 4.17 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate



ค่าเวลาและกระแสสูงสุด



ค่าเวลาและกระแสทำงานปกติ

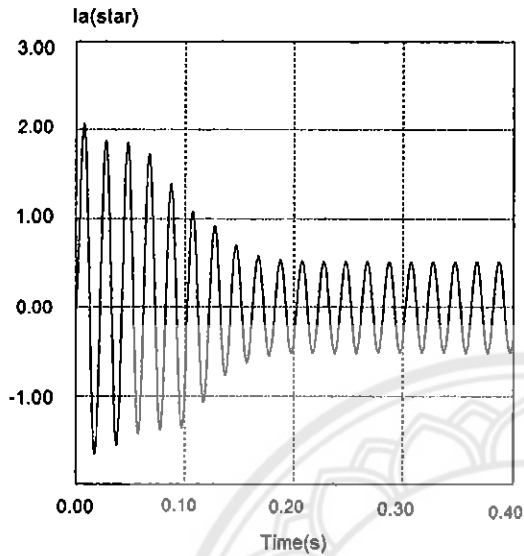
ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ 6.16A

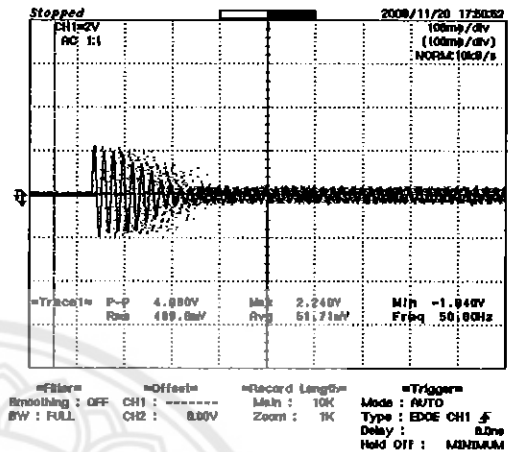
กระแสทำงานปกติ เท่ากับ $1.02 \times \sqrt{2} = 1.4425A$ เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา = $5 \times 0.02 = 0.10s$

การสตาร์ท Y- Δ

Load 35%

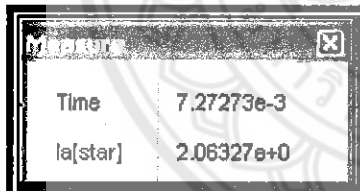


รูปที่ 4.18 กราฟ Simulate จาก PSIM

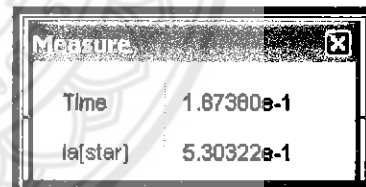


รูปที่ 4.19 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate



ค่าเวลาและกระแสสูงสุด



ค่าเวลาและกระแสทำงานปกติ

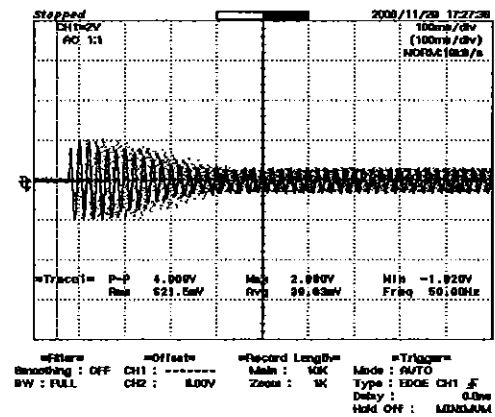
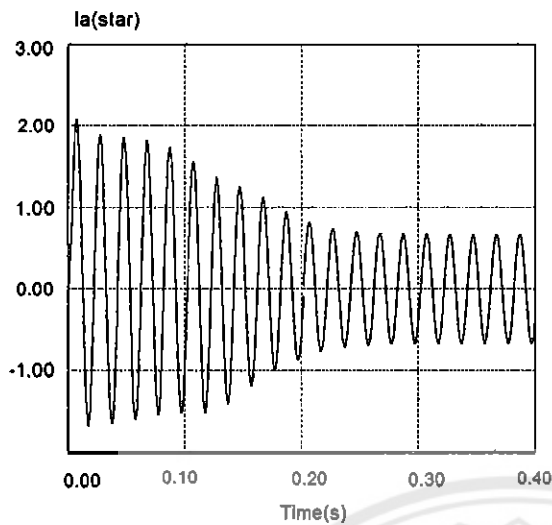
ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ $2.24A$

กระแสทำงานปกติ เท่ากับ $0.36 \times \sqrt{2} = 0.5091A$

เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา $= 9 \times 0.02 = 0.18s$

Load 65%



รูปที่ 4.20 กราฟ Simulate จาก PSIM

รูปที่ 4.21 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate



ค่าเวลาและกระแสสูงสุด

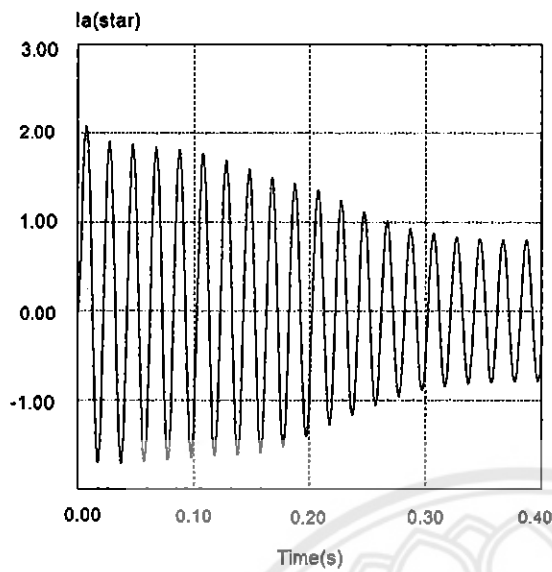


ค่าเวลาและกระแสทำงานปกติ

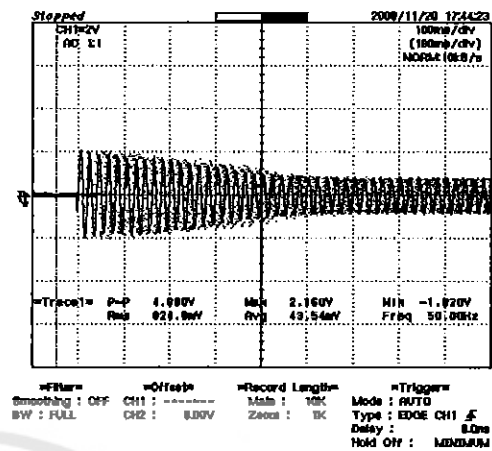
ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ $2.08A$ กระแสทำงานปกติ เท่ากับ $0.47 \times \sqrt{2} = 0.6647A$ เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา $= 11 \times 0.02 = 0.22s$

Load 90%



รูปที่ 4.22 กราฟ Simulate จาก PSIM



รูปที่ 4.23 กราฟจากการทดลองจริง

ค่าจากการ Simulate

Measure	
Time	7.27273e-3
Ia[star]	2.07649e+0

ค่าเวลาและกระแสสูงสุด

Measure	
Time	3.26845e-1
Ia[star]	8.27422e-1

ค่าเวลาและกระแสรงานปกติ

ค่าจากการทดลองจริง

กระแสสูงสุด เท่ากับ $2.16A$ กระแสรงานปกติ เท่ากับ $0.57 \times \sqrt{2} = 0.8061A$ เวลาเข้าสู่สภาวะปกติ เท่ากับ จำนวนลูกคลื่นคูณคาบเวลา $= 22 \times 0.02 = 0.44s$

ตารางที่ 4.9 ตารางการเปรียบเทียบค่าจากการ Simulate กับค่าการทดลอง มอเตอร์ต่อแบบ Δ

โหลด %	กระแสสูงสุด (A)		กระแสทำงานปกติ (A)		ผลต่างระหว่าง กระแสสูงสุดกับ กระแสทำงานปกติ		เวลาเข้าสู่สภาวะ ปกติ (s)	
	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate
35	5.680	6.193	1.188	1.171	4.492	5.022	0.080	0.086
65	6.160	6.213	1.326	1.364	4.834	4.849	0.080	0.088
90	6.160	6.223	1.443	1.297	4.717	4.926	0.100	0.107

ตารางที่ 4.10 ตารางการคิดค่า error ของโหลดต่างๆ ระหว่างการทดลองกับ Simulate มอเตอร์ต่อแบบ Δ

โหลด %	กระแสสูงสุด (A)		กระแสทำงานปกติ (A)		ผลต่างระหว่าง กระแสสูงสุดกับ กระแสทำงานปกติ		เวลาเข้าสู่สภาวะ ปกติ (s)	
	error	% error	error	% error	error	% error	error	% error
35	0.513	8.28%	0.017	1.45%	0.53	10.55%	0.006	6.98%
65	0.053	0.85%	0.038	2.79%	0.015	0.31%	0.008	9.10%
90	0.063	1.01%	0.146	11.26%	0.209	4.24%	0.007	6.54%

ตารางที่ 4.11 ตารางการเปรียบเทียบค่าจากการ Simulate กับค่าการทดลอง มอเตอร์ต่อแบบ Y

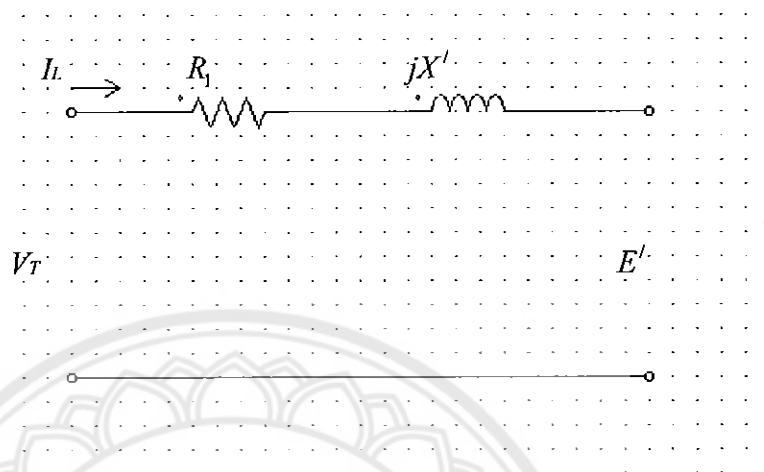
โหลด %	กระแสสูงสุด (A)		กระแสทำงานปกติ (A)		ผลต่างระหว่าง กระแสสูงสุดกับ กระแสทำงานปกติ		เวลาเข้าสู่สภาวะ ปกติ (s)	
	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate	ทดลอง	Simulate
35	2.240	2.063	0.509	0.530	1.731	1.533	0.180	0.187
65	2.080	2.071	0.665	0.734	1.415	1.337	0.220	0.227
90	2.160	2.076	0.806	0.827	1.354	1.249	0.440	0.327

ตารางที่ 4.12 ตารางการคิดค่า error ของ โหลดต่างๆ ระหว่างการทดลองกับ Simulate มอเตอร์ต่อแบบ Y

โหลด %	กระแสสูงสุด (A)		กระแสทำงานปกติ (A)		ผลต่างระหว่าง กระแสสูงสุดกับ กระแสทำงานปกติ		เวลาเข้าสู่สภาวะ ปกติ (s)	
	Error	% error	error	% error	error	% error	error	% error
35	0.177	8.58%	0.021	3.96%	0.198	12.92%	0.007	3.74%
65	0.009	0.43%	0.069	9.40%	0.078	5.83%	0.007	3.08%
90	0.084	4.05%	0.021	2.54%	0.105	8.41%	0.113	34.56%

4.4.4 การเปรียบเทียบวงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ กับวงจรสมมูลมอเตอร์ สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท

จากวงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient



รูปที่ 4.24 วงจรสมมูลสภาวะ Transient

โดยที่
$$X' = X_1 + X_M - \frac{X_M^2}{X_M + X_2}$$

สตาร์ท Direct On Line

Load 35%

$$I_{peak} = 5.68 A$$

$$I_{rms} = \frac{5.68}{\sqrt{2}} = 4 A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Δ

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_\phi = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2.31 A$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = 380 V$$

$$|R_1 + jX'^1| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{380}{2.31}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 164.5$$

$$X'^2 = (164.5)^2 - (54.6)^2$$

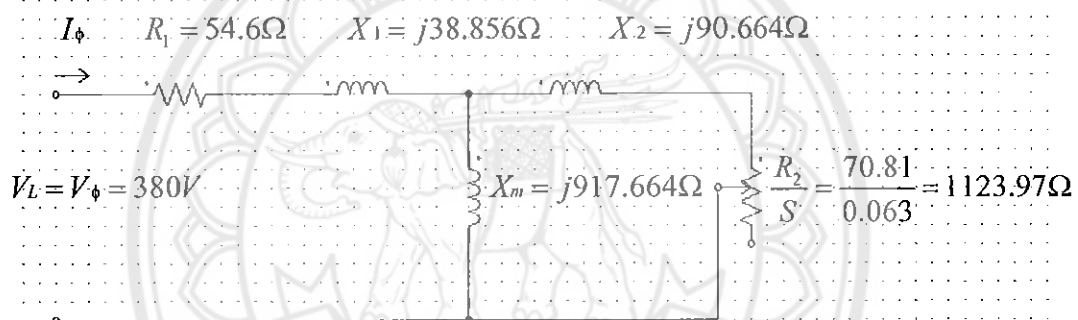
$$X'^2 = 24079.09$$

$$X'^1 = 155.174 j$$

$$I_\phi \rightarrow R_1 = 54.6\Omega \quad jX'_1 = j155.74\Omega$$

$$V_L = V_\phi = 380V$$

รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ทที่ load 35%



รูปที่ 4.26 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 35%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 35% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Δ

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1406}{1500}$$

$$S = 0.063$$

$$Z_f = \frac{(1123.97 + 90.664j)(917.664j)}{1123.97 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 415.13 + 545.25j$$

$$Z_T = 54.6 + 415.13 + (545.25 + 38.856j)$$

$$Z_T = 469.73 + 584.106j$$

$$Z_T = 749.55 \angle 51.2^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{380 \angle 0^\circ}{749.55 \angle 51.2^\circ}$$

$$I_\phi = 0.51 \angle -51.2^\circ \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_L = 0.88 \angle -51.2^\circ \text{ A}$$

Load 65%

$$I_{peak} = 6.16 A$$

$$I_{rms} = \frac{6.16}{\sqrt{2}} = 4.32 A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Δ

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_\phi = \frac{4.32}{\sqrt{3}} = 2.494 A$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = 380 V$$

$$|R_1 + jX'^2| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

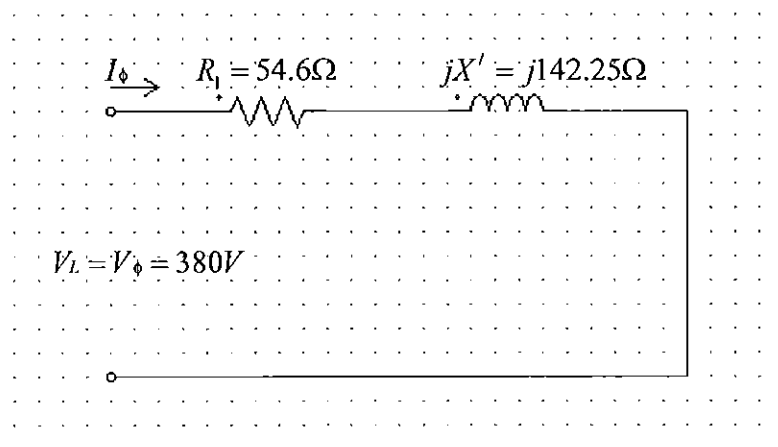
$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{380}{2.494}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 152.37$$

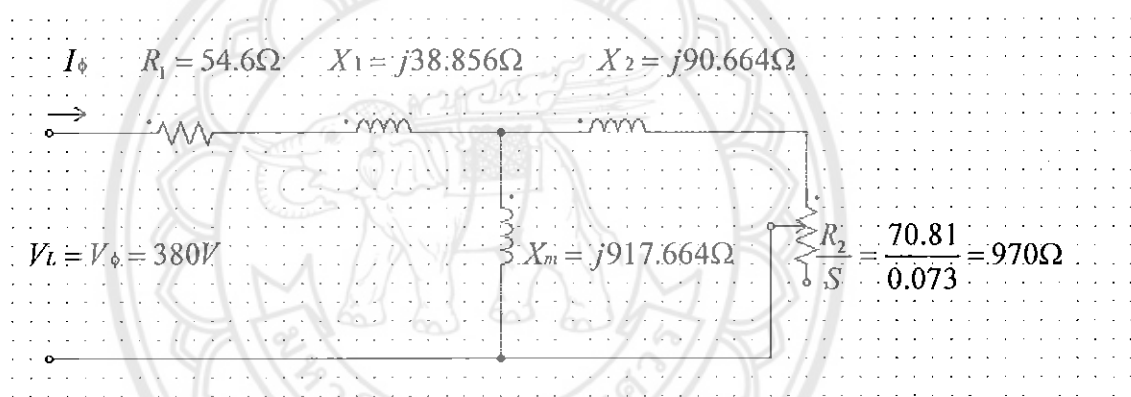
$$X'^2 = (152.37)^2 - (54.6)^2$$

$$X'^2 = 20235.4569$$

$$X' = 142.25 j$$



รูปที่ 4.27 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ทที่ load 65%



รูปที่ 4.28 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 65%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 65% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Δ

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1390}{1500}$$

$$S = 0.073$$

$$Z_f = \frac{(970 + 90.664j)(917.664j)}{970 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 417.26 + 483.9j$$

$$Z_T = 54.6 + 417.26 + (483.9 + 38.856j)$$

$$Z_T = 471.26 + 483.9j$$

$$Z_T = 704.22 \angle 47.93^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{380 \angle 0^\circ}{704.22 \angle 47.93^\circ}$$

$$I_\phi = 0.54 \angle -47.93^\circ A$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_L = 0.935 \angle -47.93^\circ A$$

Load 90%

$$I_{peak} = 6.16 A$$

$$I_{rms} = \frac{6.16}{\sqrt{2}} = 4.32 A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Δ

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_\phi = \frac{4.32}{\sqrt{3}} = 2.494 A$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = 380 V$$

$$|R_1 + jX'| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

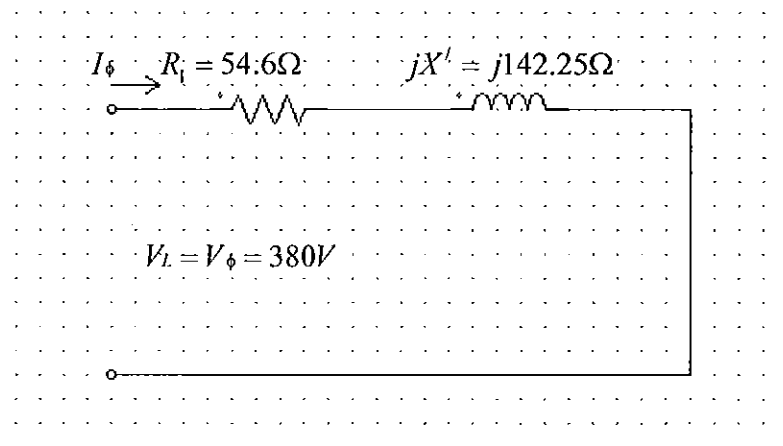
$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{380}{2.494}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 152.37$$

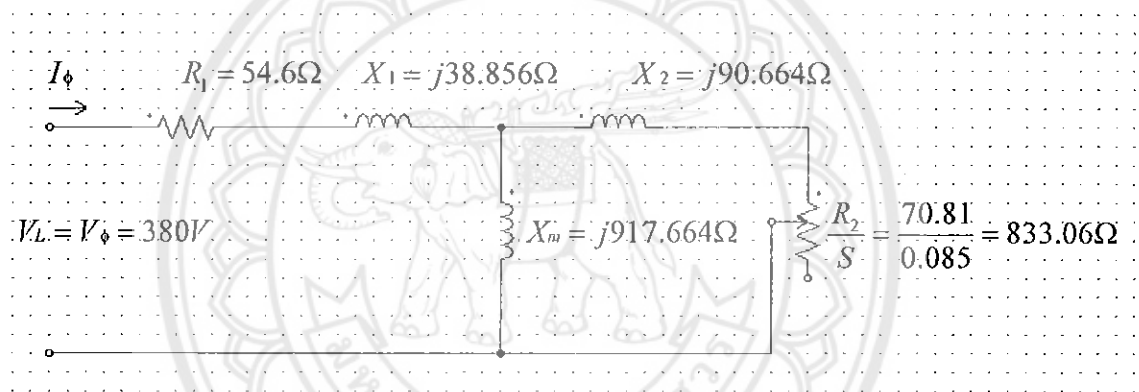
$$X'^2 = (152.37)^2 - (54.6)^2$$

$$X'^2 = 20235.4569$$

$$X' = 142.25 j$$



รูปที่ 4.29 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 90



รูปที่ 4.30 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 90%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 90% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Δ

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1372}{1500}$$

$$S = 0.085$$

$$Z_f = \frac{(833.06 + 90.664j)(917.664j)}{833.06 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 410.1 + 421.32j$$

$$Z_T = 54.6 + 410.1 + (421.32 + 38.856j)$$

$$Z_T = 464.7 + 460.176j$$

$$Z_T = 653.99 \angle 44.72^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{380 \angle 0^\circ}{653.99 \angle 44.72^\circ}$$

$$I_\phi = 0.58 \angle -44.72^\circ \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_L = 1.006 \angle -44.72^\circ \text{ A}$$

การสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y-Δ

Load 35%

$$I_{peak} = 2.24 A$$

$$I_{rms} = \frac{2.24}{\sqrt{2}} = 1.58 A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Y

$$I_L = I_\phi$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 V$$

$$|R_1 + jX'| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

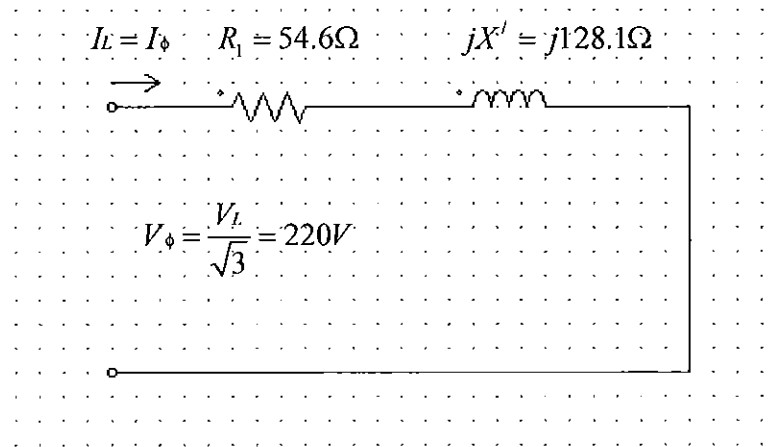
$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{220}{1.58}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 139.24$$

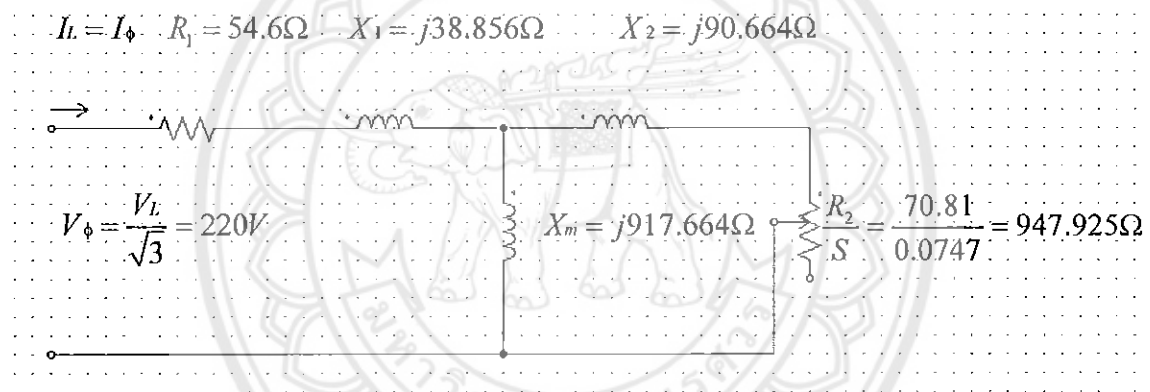
$$X'^2 = (139.24)^2 - (54.6)^2$$

$$X'^2 = 16406.617$$

$$X' = 128.1 j$$



รูปที่ 4.31 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ท load 35%



รูปที่ 4.32 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 35%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 35% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Y

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1388}{1500}$$

$$S = 0.0747$$

$$Z_f = \frac{(947.925 + 90.664j)(917.664j)}{947.925 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 416.78 + 474.325j$$

$$Z_T = 54.6 + 416.78 + (474.32 + 38.856j)$$

$$Z_T = 471.38 + 507.176j$$

$$Z_T = 692.4 \angle 47.09^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{220 \angle 0^\circ}{692.4 \angle 47.09^\circ}$$

$$I_\phi = 0.318 \angle -47.09^\circ \text{ A}$$

Load 65%

$$I_{peak} = 2.08 A$$

$$I_{rms} = \frac{2.08}{\sqrt{2}} = 1.47 A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Y

$$I_L = I_\phi$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

$$|R_1 + jX'| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{220}{1.47}$$

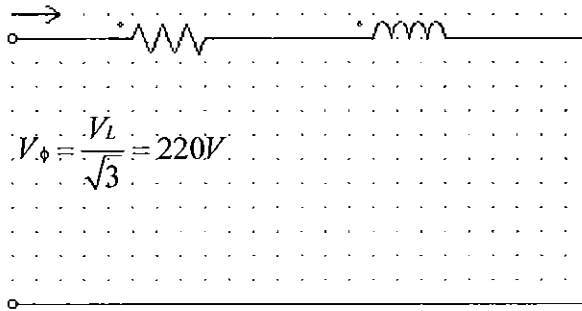
$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 149.659$$

$$X'^2 = (149.659)^2 - (54.6)^2$$

$$X'^2 = 19416.656$$

$$X' = 139.344 j$$

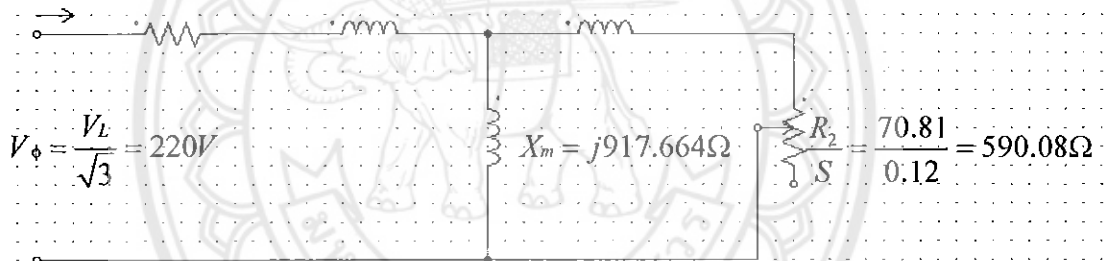
$$I_L = I_\phi \quad R_1 = 54.6\Omega \quad jX' = j139.344\Omega$$



$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 220V$$

รูปที่ 4.33 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ทที่ load 65%

$$I_L = I_\phi \quad R_1 = 54.6\Omega \quad X_1 = j38.856\Omega \quad X_2 = j90.664\Omega$$



$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 220V$$

$$R_2 = \frac{70.81}{0.12} = 590.08\Omega$$

รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 65%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 65% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Y

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1320}{1500}$$

$$S = 0.12$$

$$Z_f = \frac{(590.08 + 90.664j)(917.664j)}{500.08 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 364.0585 + 295.56j$$

$$Z_T = 54.6 + 364.0585 + (295.56 + 38.856j)$$

$$Z_T = 418.66 + 334.416j$$

$$Z_T = 535.827 \angle 38.62^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{220 \angle 0^\circ}{535.827 \angle 38.62^\circ}$$

$$I_\phi = 0.411 \angle -38.62^\circ \text{ A}$$

Load 90%

$$I_{peak} = 2.16A$$

$$I_{rms} = \frac{2.16}{\sqrt{2}} = 1.53A$$

เนื่องจากขดลวดต่อแบบ Y

$$I_L = I_\phi$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน $E' \approx 0$

$$R_1 = 54.6$$

$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

$$|R_1 + jX'| = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X'^2} = \frac{|V_\phi|}{|I_\phi|}$$

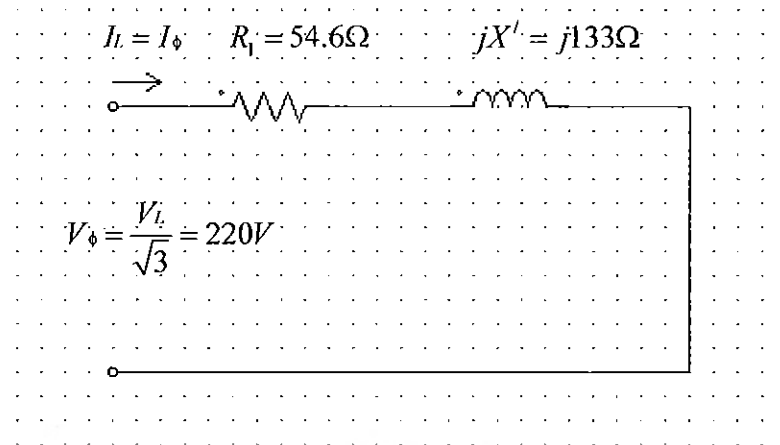
$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = \frac{220}{1.53}$$

$$\sqrt{(54.6)^2 + X'^2} = 143.79$$

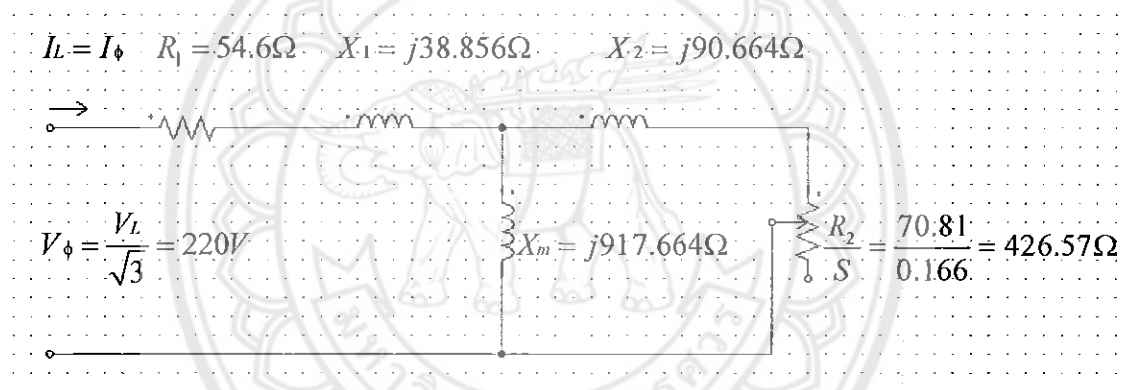
$$X'^2 = (143.79)^2 - (54.6)^2$$

$$X'^2 = 17694.4$$

$$X' = 133j$$



รูปที่ 4.35 วงจรสมมูลมอเตอร์สภาวะ Transient ขณะสตาร์ทที่ load 90%



รูปที่ 4.36 วงจรสมมูลมอเตอร์ขณะทำงานปกติ load 90%

หาค่ากระแสทำงานปกติ 90% จากวงจรสมมูล ต่อแบบ Y

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$S = \frac{1500 - 1267}{1500}$$

$$S = 0.166$$

$$Z_f = \frac{(426.57 + 90.664j)(917.664j)}{426.57 + 1008.328j}$$

$$Z_f = 299.68 + 209.29j$$

$$Z_T = 54.6 + 299.68 + (209.29 + 38.856)j$$

$$Z_T = 354.28 + 248.148j$$

$$Z_T = 432.54 \angle 35^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_\phi}{Z_\phi} = \frac{220 \angle 0^\circ}{432.54 \angle 35^\circ}$$

$$I_\phi = 0.51 \angle -35^\circ A$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและศึกษาการเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสแบบ Direct On Line และแบบ Star – Delta ในสภาวะโหลด 35%, 65%, 90% จากผลการทดลองพบว่า

การสตาร์ทมอเตอร์ต่อแบบ Direct On Line จะมีอัตราส่วนระหว่างกระแสขณะสตาร์ทกับกระแสทำงานปกติที่สูงกว่าการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y – Δ ส่งผลทำให้มีผลข้างเคียงต่อระบบไฟฟ้า เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้าตกและการตัดอัตโนมัติของอุปกรณ์ป้องกันหากสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y – Δ สามารถลดค่ากระแสขณะสตาร์ทตามสภาวะโหลดที่ทำการทดลองทำให้มีผลข้างเคียงต่อระบบไฟฟ้าน้อยลง

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองกับ โปรแกรม PSIM เนื่องจาก การทดลอง แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีแรงดันไม่คงที่ 380 V ทุกเฟส ซึ่งต่างจากโปรแกรม PSIM จะมีค่าคงที่ 380 V และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และค่าพารามิเตอร์ T_{load} ที่ใส่ให้กับโปรแกรม PSIM ค่าทั้ง 2 ได้จากการทดสอบมอเตอร์ และจากการทดลองซึ่งอาจเกิดจากการผิดพลาดของเครื่องวัด ส่งผลให้เกิดการผิดพลาดระหว่างการทดลองกับ โปรแกรม PSIM

5.2 ประเมินผล

จากการดำเนินงานโครงการเมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์ ได้ผลดังนี้

5.2.1 สามารถบันทึกผลและวัดค่ากระแสขณะสตาร์ทในสภาวะโหลด 35%, 65%, 90% แบบ Direct On Line

5.2.2 สามารถบันทึกผลและวัดค่ากระแสขณะสตาร์ทในสภาวะโหลด 35%, 65%, 90% แบบ Star – Delta

5.2.3 สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากระแสขณะสตาร์ทในสภาวะโหลด 35%, 65%, 90%

5.2.4 สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม PSIM

5.3 ปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข

5.3.1 ปัญหาเกิดจากมอเตอร์อินดักชันที่ใช้ในการทดลองใช้สตาร์ทนานไม่ได้เนื่องจากมอเตอร์ร้อนจึงต้องบันทึกค่าด้วยความรวดเร็วในช่วงขณะสตาร์ทมอเตอร์อินดักชันเพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหาย

5.3.2 ปัญหาเกิดจากการต่อวงจรผิดพลาดทำให้อุปกรณ์ในการทดลองเสียหาย เช่น แมคเนติกคอนแทคเตอร์ใหม่ดังนั้น จึงต้องระมัดระวังในช่วงการต่อวงจรให้มาก

5.3.3 ปัญหาเกิดจากอุปกรณ์ในการทดลองมีประสิทธิภาพไม่พอดีทำให้ได้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ผลที่ได้จากการศึกษาและทดลองในโครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านเทคนิคการเริ่มหมุนอินดักชันมอเตอร์ระหว่างการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Direct On Line หรือ $Y-\Delta$ ขึ้นอยู่กับการใช้งานมอเตอร์อินดักชัน งานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหมุนสูงจะเหมาะกับการสตาร์ท Direct On Line และจำเป็นต้องออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากกระแสสตาร์ทสูงอาจส่งผลให้เกิดการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน สำหรับงานที่ไม่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหมุนที่สูงมากนัก มอเตอร์มีขนาดใหญ่การสตาร์ทมอเตอร์พร้อมกันหลายตัว และโรงงานต้องการระบบไฟฟ้าดีไม่ต้องการให้เกิดไฟตก เหมาะกับการสตาร์ทแบบ $Y-\Delta$

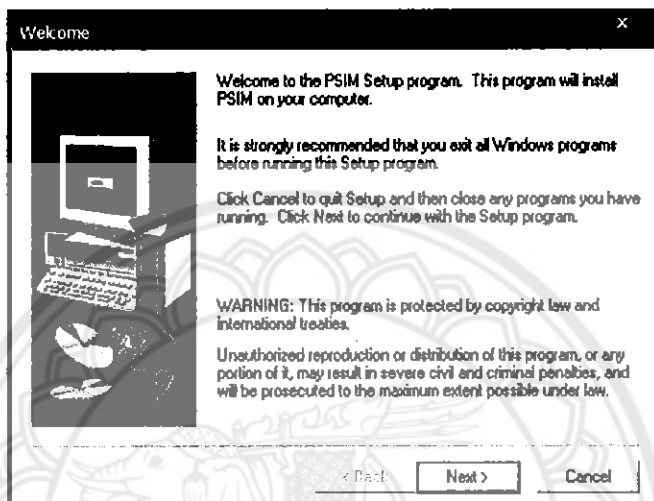
เอกสารอ้างอิง

- [1] Mulukutla S. Sarma. **Electric Machines. 2nd Ed.**, New York : West Publishing.1994.
- [2] A.E. Fitzgerald Charles Kingsley and Jr. Stephen D. Umans. **Electric Machines. 4th Ed.**, Singapore : McGraw-Hill.1983.
- [3] Stephen J. Chapman. **Electric Machines Fundamentals. 4th Ed.**, Singapore : McGraw-Hill. 2005.
- [4] นายกฤษฎา อ่อแสง และนางสาวอรรณ สุนันต์. “**การศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ ด้วยโปรแกรมPSpice**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2551
- [5] นายเฉลิมชัย ทิพนมิก และนายแสนเพชร มัคสัมพันธ์. “**เครื่องวัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2550
- [6] ชลชัย ธรรมวิวัฒน์กูร. **การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า**. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอ็มแอนด์ อี จำกัด. 2546
- [7] ลือชัย โพธิ์วิชัย. “**การควบคุมมอเตอร์.**”[Online]: เข้าถึงได้จาก/
http://www.lpc.rmutl.ac.th/elcen/elearning/motorcontrol/home_thai.html.พ.ศ.2551
- [8] The automotion Solution Company. “**ทำไมต้องใช้ Soft Starters.**”[Online]: เข้าถึงได้จาก/
<http://www.tti-eng.com>.พ.ศ.2551
- [9] Eastern Asia University. “**ELECTRO MECHANICAL ENERGY CONVERSION II.**”
[Online]: เข้าถึงจาก/: <http://course.eau.ac.th>. พ.ศ. 2551
- [10] www.usrmotors.com/english/product_aeef.asp , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52
- [11] livelypictures.blogspot.com/2008/05/induction... , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52
- [12] www.fairindustries.com/new.htm , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52
- [13] www.altoonahoist.com/AFD_Define.htm , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52
- [14] <http://www.rmutphysics.com/CHARUD/scibook/Labphysics2> , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52
- [15] <http://center.prd.go.th/engineer/ESDB/train01/images> , สืบค้นวันที่ 18 มี.ค. 52

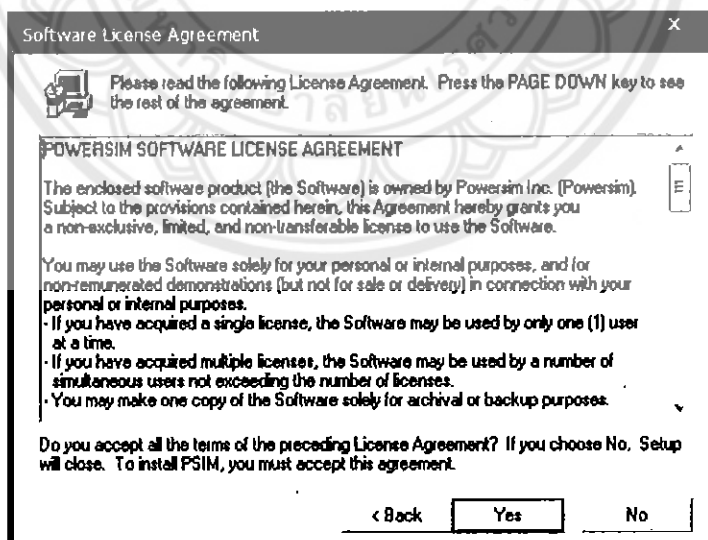


ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม PSIM

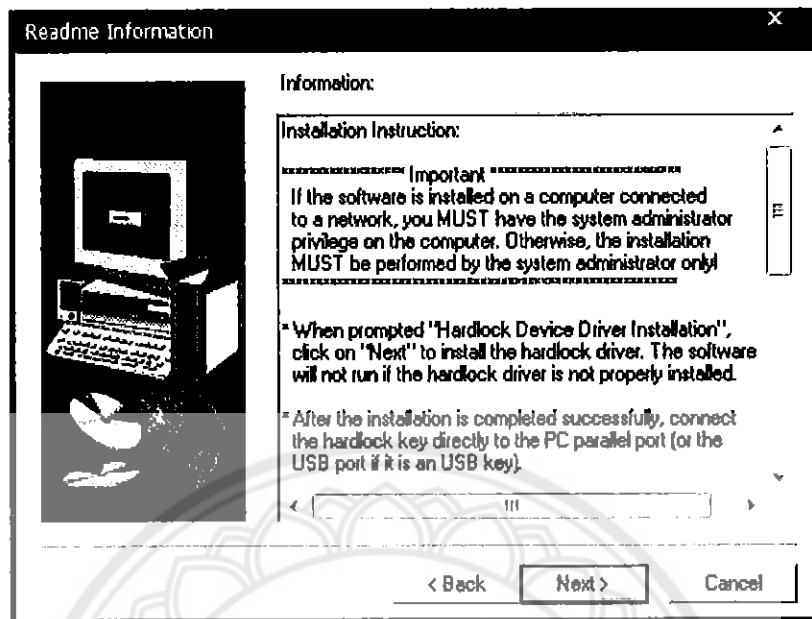
1. เตรียมแผ่น โปรแกรม PSIM 6.0
2. เปิดแผ่น โปรแกรม PSIM เพื่อทำการติดตั้ง โปรแกรม
3. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ให้คลิกปุ่ม Next >



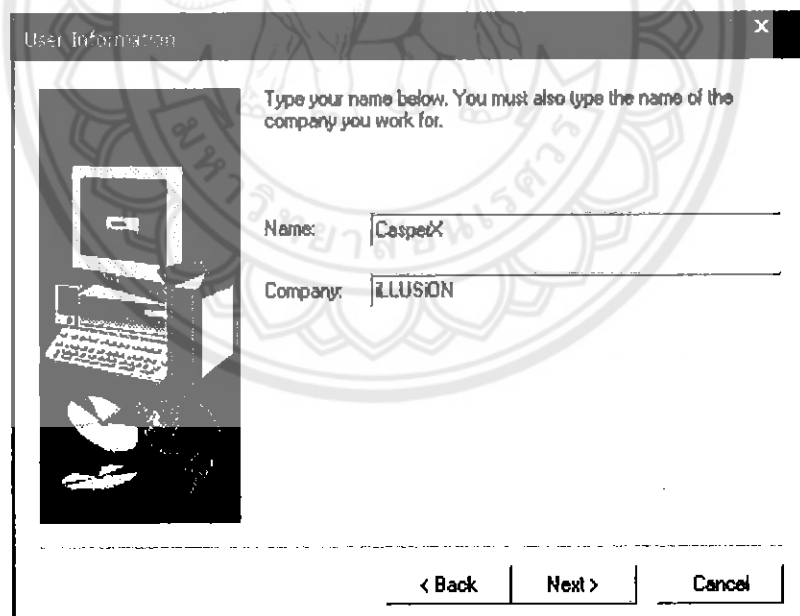
4. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิกปุ่ม Yes



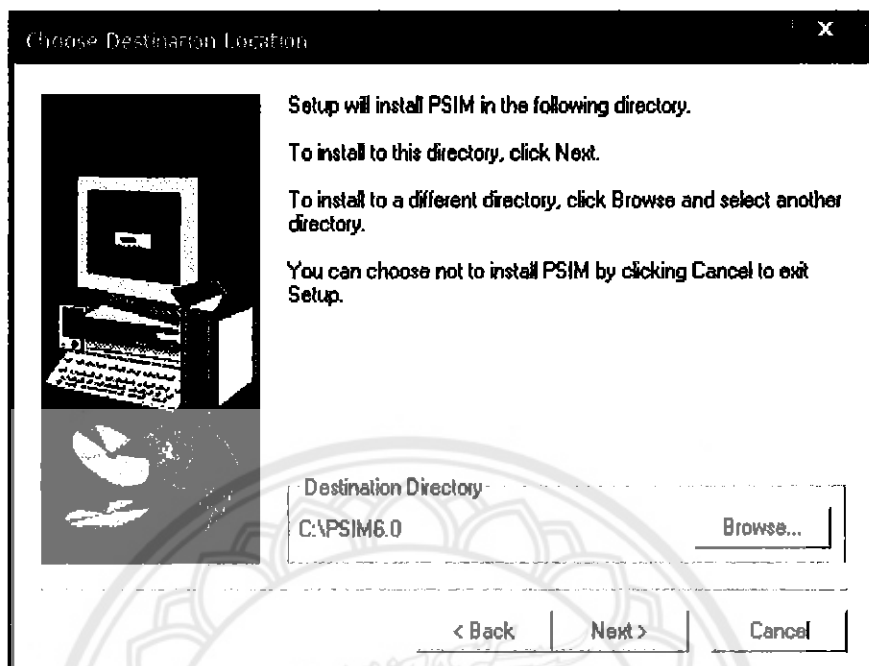
5. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิกปุ่ม Next >



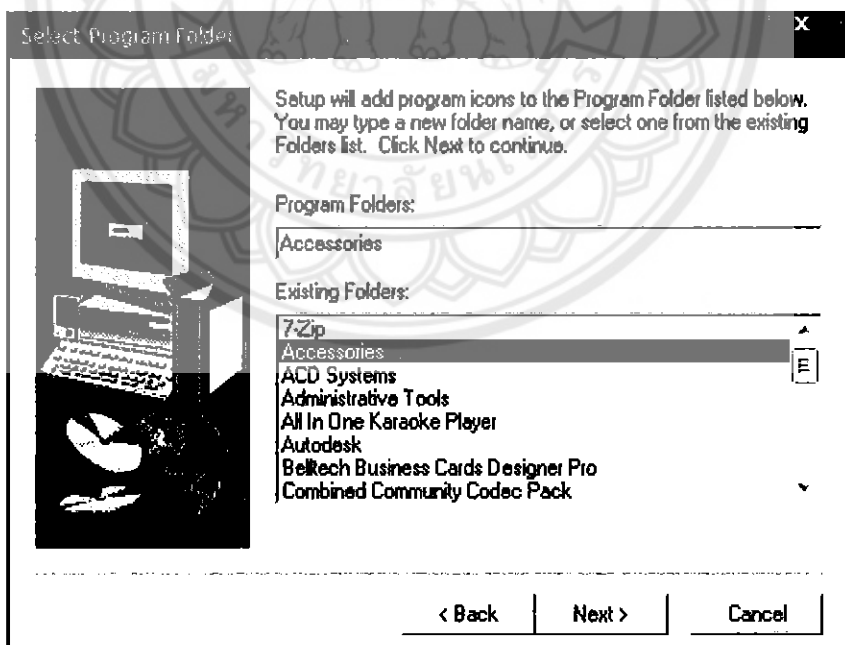
6. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิก Next >



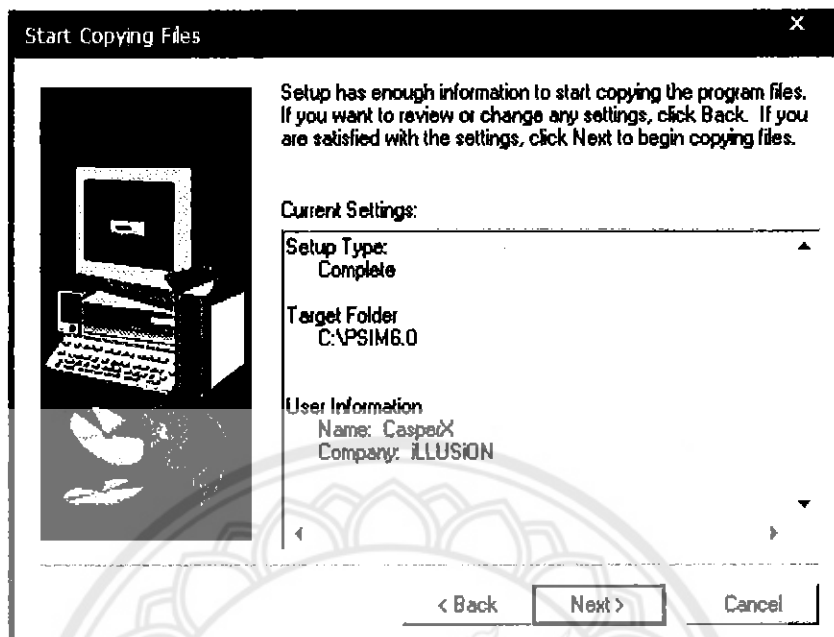
7. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิก Next >



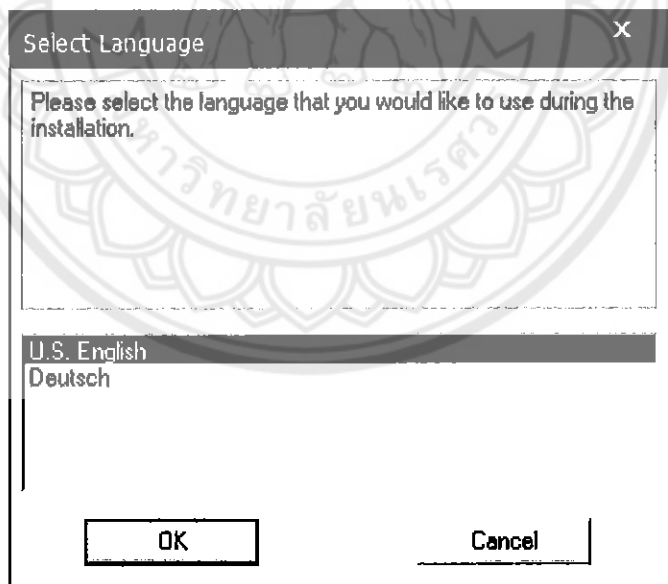
8. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้เลือก Accessories แล้วคลิกปุ่ม Next >



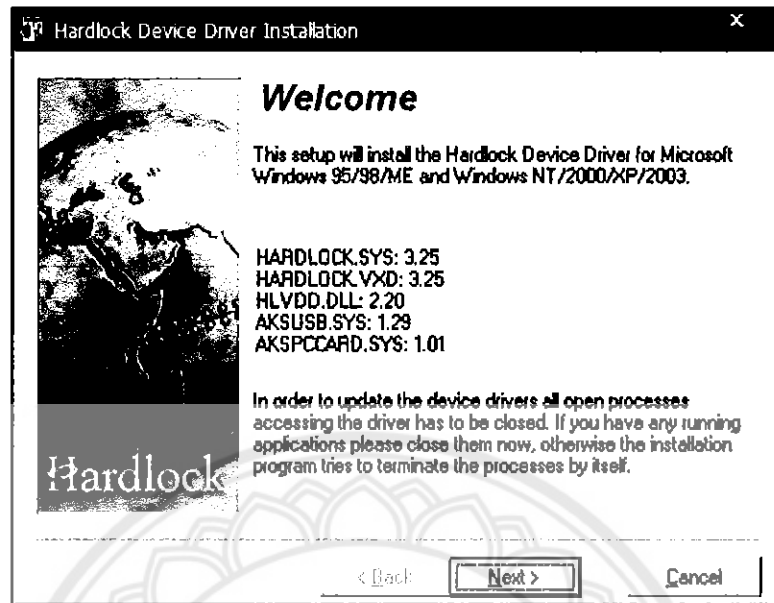
9. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิก Next >



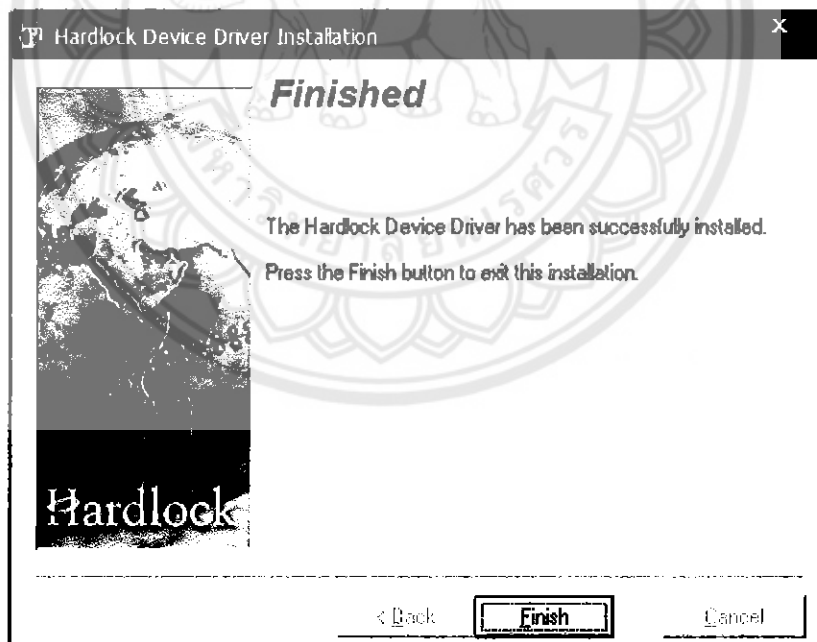
10. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ เลือก U.S.English จากนั้นคลิก OK



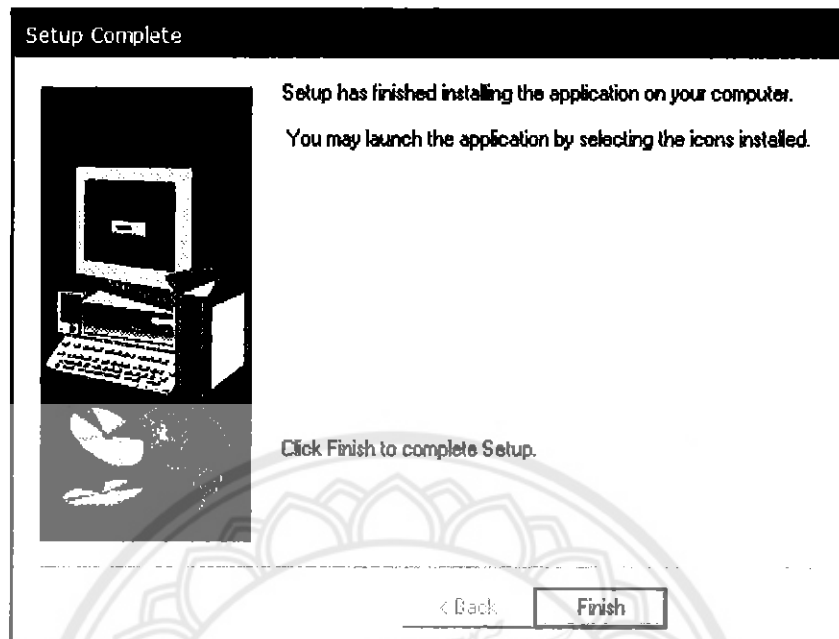
11. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ให้คลิก Next>



12. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ให้คลิก Finished

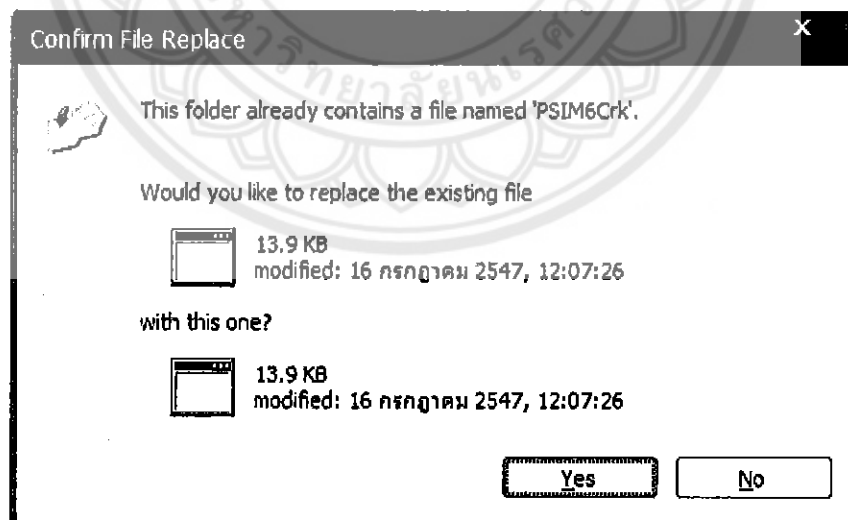


13. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้คลิก Finish



14. ดับเบิ้ลคลิกที่ Crack จะปรากฏไอคอน PSIM6Crk ทำการ Copy ไอคอน PSIM6Crk ไปที่ My Computer / C:\ / PSIM6.0 แล้ว Past

15. จะปรากฏหน้าต่างดังนี้ ให้คลิก Yes



16. ดับเบิ้ลคลิก PSIM6Crk

17. จะปรากฏหน้าจอดังนี้ ให้ Enter ที่คีย์บอร์ด

```
#####
PSIM: PSIM v1.00
#####
Patch: PSIM v1.00
01-01-08 v.1.0
21 June 2004
http://www.dn2yaku.com
#####
Cannot find file:
Please copy patch file into the PSIM.B directory.

OK!! Patching is successful!
Please any key to quit.
```

18. ทำการเปิด โปรแกรม PSIM ที่ Programs / Accessories / PSIM



ประวัติการเขียนโครงการ



ชื่อ นายกำพล หน่อแก้ว

ภูมิลำเนา 218/1 ม.11 ต. บ้านตุ่น อ. เมือง จ. พะเยา 56000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนฟากแก้ว
วิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : bird_engi48@hotmail.com



ชื่อ นายณัฐพล ลีทธิศรีจันทร์

ภูมิลำเนา 107/284 ม.10 ต. วัดไทร อ. เมือง จ.

นครสวรรค์ 60000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนนวมินทราชูทิศ
มัชฉิม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : golfy_en@hotmail.com