

การเริ่มต้นแบบนิ่มนวลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระแสเริ่มต้น  
คงที่

SOFT STARTING OF A 3 PHASE INDUCTION MOTOR WITH CONSTANT  
STARTING CURRENT

พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม  
PHONGPHAN PHONGPHOTJANATHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การเริ่มต้นแบบนิ่มนวลของมอเตอร์ชนิดหนึ่งยว่นำ 3 เฟสแบบกระแสเริ่มต้น  
คงที่

SOFT STARTING OF A 3 PHASE INDUCTION MOTOR WITH CONSTANT  
STARTING CURRENT



พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม

PHONGPHAN PHONGPHOTJANATHAM

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 74879  
วัน,เดือน,ปี..... 15 ต.ค. 2550

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**SOFT STARTING OF A 3 PHASE INDUCTION MOTOR WITH CONSTANT  
STARTING CURRENT**

**PHONGPHAN PHONGPHOTJANATHAM**

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

**2007**

---

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การเริ่มเดินแบบนุ่มนวลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระแสเริ่มเดินคงที่  
Soft Starting of a 3 Phase Induction Motor with Constant Starting Current

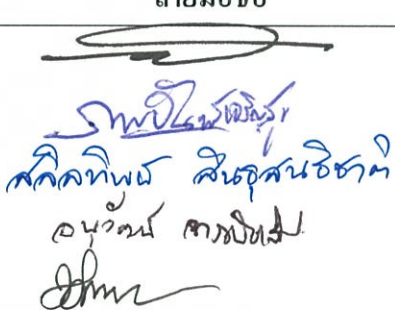
นักศึกษา                      นายพงษ์พรรณ      พงษ์พจนธรรม

รหัสประจำตัว              45060124

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                    วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.วิจิตร      กิณเรศ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.พิชิต	ถ้ายอง	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.สลิทธิพิย์	สินธุสนธิชาติ	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 29 พฤษภาคม 2550 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

  
บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
(รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๙.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเริ่มต้นแบบนิ่มนวลของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบ กระแสเริ่มต้นคงที่
นักศึกษา	นาย พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม
รหัสประจำตัว	45060124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวเกี่ยวกับวิธีการเริ่มต้นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบนิ่มนวลที่มีการควบคุมกระแสเริ่มต้นของมอเตอร์ให้คงที่ตามที่ต้องการไว้เพื่อลดปัญหาต่างๆในระบบที่เกิดจากการเริ่มต้นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ เช่น แรงดันตกในระบบ อุปกรณ์ตัดตอนเปิดวงจรขณะทำการเริ่มต้นมอเตอร์ เนื่องจากกระแสเกินพิกัด การเริ่มต้นแบบนิ่มนวลกระทำโดยปรับเปลี่ยนแรงดันขณะเริ่มต้นของมอเตอร์เพื่อให้กระแสเริ่มต้นคงที่โดยใช้เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์สวิตช์ควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 30F4011 เป็นตัวควบคุมและสร้างวงจรจุดชนวน และได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในแบบที่นำเสนอ และแบบไม่ควบคุมกระแสเริ่มต้น นอกจากนี้ยังได้มีการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB เพื่อทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 kW 380 V และให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

<b>Thesis Title</b>	Soft starting of a 3 phase induction motor with constant starting current
<b>Student</b>	Mr. Phongpan Phongphotjanatham
<b>Student ID.</b>	45060124
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

## **ABSTRACT**

This thesis describes soft starting of a 3 phase induction motor having current control with required constant starting current, in order to reduce various problems in the system occurred by starting of a 3 phase large induction motor such as voltage sags in the supply during starting, circuit breaker open circuit during starting due to over rate current. Soft starter operates with adjustable voltage in order to keep starting current constant by SCR as switching devices to control motor terminal voltage. Microcontroller 30f4011 is used for controlling firing angle. The performance comparison between the proposal method and the system without starting current control is given. In addition, simulation of operation with MATLAB is included. The proposal system has been tested with a 3 phase , 7.5 kW , 380 V , 50 Hz induction motor. The results appear satisfactory.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. พิชิต ถ้ายอง ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และดร. ภพ จันทรเจริญสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และดร. สลิลทิพย์ สิริสุนทรชาติ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณอาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ และเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ นาย สุพล พงษ์พจนธรรม บิดาของข้าพเจ้าที่ได้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างที่ดีและถูกต้องเหมาะสมจนข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จต่างๆ ได้ด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบุพการีที่เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	5
1.3 วิธีการวิจัย .....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับงานวิจัย .....	7
2.1 หลักการทำงานและคุณสมบัติของเอสซีอาร์ .....	7
2.1.1 หลักการทำงานของเอสซีอาร์ .....	7
2.1.2 การจุดชนวนเอสซีอาร์ .....	10
2.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ..	11
2.2.1 วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ..	11
2.2.2 วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ..	17
2.3 องค์ประกอบของฮาร์มอนิก .....	24
2.3.1 ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) .....	24
2.3.2 ค่าตัวประกอบกำลังคิสเพลสเมนต์ (Displacement power factor) .....	24
2.3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion) .....	25
2.4 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	25
2.4.1 การเกิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	26
2.4.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	30
2.4.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	35

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.4 ตัวอย่างและลักษณะของแรงบิด โหลด .....	39
2.4.5 ระบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	44
2.5 หลักการการทำงานของเครื่องเริ่มเดินแบบนิ่มนวล .....	49
2.5.1 การควบคุมแบบวงเปิด .....	50
2.5.2 การควบคุมแบบวงปิด .....	50
2.6 สรุป .....	50
<b>บทที่ 3 การออกแบบวงจรและอุปกรณ์ .....</b>	<b>51</b>
3.1 การเลือกใช้อุปกรณ์ในวงจรกำลัง .....	51
3.1.1 การเลือกไทรสเตอร์ .....	51
3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ตัดตอน .....	52
3.2 การออกแบบวงจรควบคุม .....	52
3.2.1 วงจรสร้างจังหวะการจุดชนวน .....	52
3.2.2 วงจรส่งสัญญาณแรงดัน .....	53
3.2.3 วงจรส่งสัญญาณกระแส .....	53
3.2.4 วงจรจุดชนวนเอสซีอาร์ .....	54
3.2.5 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	55
3.3 วิธีการควบคุมกระแสขณะเริ่มเดิน .....	55
3.4 สรุป .....	60
<b>บทที่ 4 การจำลองระบบและผลการทดสอบ .....</b>	<b>61</b>
4.1 การจำลองระบบ .....	61
4.1.1 การจำลองระบบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ....	61
4.1.2 การจำลองระบบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวล .....	62
4.2 การทดสอบระบบการทำงาน .....	64
4.2.1 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ..	64
4.2.2 การทดสอบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	64
4.2.3 ผลการจำลองและทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้า กระแสสลับ .....	65

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการจำลองวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของสัญญาณในวงจรแปลงผันกำลัง ...	72
4.2.5 ผลการจำลอง-ทดสอบการเริ่มเดินแบบมีมวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ....	74
4.3 สรุป .....	80
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ .....	81
5.1 วิจารณ์ผลการทดสอบ .....	81
5.2 สรุปผลการทดสอบ .....	81
5.3.ข้อเสนอแนะในการพัฒนา .....	82
เอกสารอ้างอิง .....	83
ภาคผนวก .....	84
ภาคผนวก ก. ....	84
ภาคผนวก ข. ....	118
ภาคผนวก ค. ....	121
ภาคผนวก ง. ....	127
ประวัติผู้เขียน .....	131

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างขนาดของกระแสเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	1
2.1 สลิปของฮาร์มอนิกที่อันดับหมุนทางฟอร์เวอร์ค์ .....	36
2.2 สลิปของฮาร์มอนิกที่อันดับหมุนทางแบคเวอร์ค์ .....	37
4.1 พลังงานที่ใช้ในการเริ่มต้นที่กระแสเริ่มต้นเทียบกับแรงบิด โหลดจากการจำลอง .....	80

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเริ่มเดินแบบสตาร์-เคลด้า .....	2
1.2 การใช้ Auto-transformer .....	2
1.3 การใช้วิธี Step R หรือ Step L .....	2
1.4 วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะเริ่มเดิน .....	3
1.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกระแสของการเริ่มเดินแบบสตาร์-เคลด้า .....	3
1.6 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเมื่อเปลี่ยนมุมจุกชนวน .....	4
2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์ .....	7
2.2 วงจรการนำกระแสของเอสซีอาร์ .....	8
2.3 คุณสมบัติของเอสซีอาร์ในสภาวะคงตัว .....	9
2.4 เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกท .....	11
2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โหลดความต้านทาน ...	12
2.6 ที่ค่าราคาของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อม โหลดเทียบกับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย กับมุมจุกชนวนเมื่อมีโหลดความต้านทาน .....	13
2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่อินดักทีฟโหลด .....	14
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha$ และ $\gamma$ ที่มุม $\phi$ ค่าต่างๆ .....	16
2.9 สัญลักษณ์กระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟ .....	16
2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อโหลดความต้านทานแบบ วาย .....	18
2.11 สัญลักษณ์แรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส .....	19
2.12 ลำดับสัญลักษณ์มุมจุกชนวนของเอสซีอาร์ที่มุม $\alpha = 60$ องศา .....	20
2.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อโหลดความต้านทานแบบ เคลด้า .....	22
2.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย, มุมจุกชนวนของไทรสเตอร์ และกระแสไฟฟ้าเมื่อต่อโหลด ความต้านทานแบบเคลด้า .....	23
2.15 มุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า .....	24
2.16 กระแสไฟฟ้าและเส้นทางเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	26

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์แบบกรงกระรอก .....	27
2.18 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์และโรเตอร์ .....	29
2.19 ชุดขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้าน โรเตอร์ .....	30
2.20 วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ที่มองจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	31
2.21 วงจรไฟฟ้าของสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	32
2.22 วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	33
2.23 เวกเตอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	33
2.24 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	34
2.25 วงจรสมมูลย์โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	34
2.26 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีมอดูล์ประกอบของฮาร์มอนิก .....	35
2.27 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงบิดฮาร์มอนิก .....	38
2.28 ลักษณะ โหลดที่แรงบิดแปรผันกำลังสองกับความเร็วรอบ .....	39
2.29 ลักษณะ โหลดที่กำลังแปรผันกำลังสามกับความเร็วรอบ .....	40
2.30 ลักษณะ โหลดแบบแปรผกผันกับความเร็วรอบ .....	41
2.31 ลักษณะกำลังที่โหลดแบบแปรผกผันกับความเร็วรอบ .....	41
2.32 ลักษณะ โหลดแบบแรงบิดคงที่ .....	42
2.33 ลักษณะกำลังที่มีโหลดแบบแรงบิดคงที่ .....	42
2.34 ลักษณะ โหลดแบบแปรผันตรงกับความเร็วรอบ .....	43
2.35 ลักษณะกำลังที่โหลดแบบแปรผันตรงกับความเร็วรอบ .....	43
2.36 การแปลงแกนจากระบบ 3 แกน ไปเป็นระบบ 2 แกน .....	44
2.37 การแปลงแกนแบบ โครงอ้างอิงแบบหุคหนึ่งไปเป็น โครงอ้างอิงแบบหมุน .....	45
2.38 วงจรสมมูลย์ คิว – ดี ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ โครงอ้างอิงแบบหมุน .....	47
2.39 วงจรสมมูลย์ คิว – ดี ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ โครงอ้างอิงแบบหุคหนึ่ง .....	48
2.40 แผนผังรูปแบบของระบบ .....	49
2.41 การเริ่มเดินแบบนิ่มนวลโดยการควบคุมแบบวงเปิด .....	50
3.1 โมดูลของเอสซีอาร์รุ่น SKKT 72 .....	51
3.2 เซอร์คิตเบรคเกอร์รุ่น SA63B .....	52
3.3 วงจรเปรียบเทียบหาค่าศูนย์ของสัญญาณชาชนี่ .....	53
3.4 วงจรส่งสัญญาณแรงคั้น .....	53

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจรส่งสัญญาณกระแส .....	54
3.6 วงจรจุดชนวนเอสซีอาร์ .....	54
3.7 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	55
3.8 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่ง .....	55
3.9 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คิดแบบเทวินิน .....	56
3.10 วิธีการควบคุมกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	58
3.11 วงรอบปิดการควบคุมกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	58
3.12 แผนผังวิธีการควบคุมกระแสเริ่มเดิน .....	59
3.13 วงจรรวมของระบบ .....	60
4.1 การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ .....	61
4.2 หลักการการสร้างสัญญาณจุดชนวน .....	62
4.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 7.5 kWที่ได้จากการทดสอบ .....	62
4.4 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 2.2 kWที่ได้จากการทดสอบ .....	63
4.5 ระบบจำลองของการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	63
4.6 เอสซีอาร์ที่ใช้ในวงจรกำลัง .....	64
4.7 โหลดชนิดโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ .....	65
4.8 มอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมแรงบิดคงที่แทนโหลดแบบแรงบิดคงที่ .....	65
4.9 บนแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์และค่าสัญญาณจุดชนวนที่ $\alpha=60$ องศาโหลด R .....	66
4.10 บน แรงดันระหว่างสาย A-B และ ค่า กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่ $\alpha=90$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	66
4.11 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและ ค่า กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่ $\alpha=60$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	67
4.12 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและ ค่า กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่ $\alpha=45$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	67
4.13 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและ ค่า กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่ $\alpha=30$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	67
4.14 บน ลักษณะการนำกระแสของเอสซีอาร์ ที่ $\alpha=90$ องศา จากการจำลองต่อโหลด RLแบบวาย ค่า สัญญาณจุดชนวนที่มุม $90$ องศา .....	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 90$ องศาโหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	68
4.16 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 60$ องศาโหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	69
4.17 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 45$ องศาโหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	69
4.18 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 30$ องศาโหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	69
4.19 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 60$ องศาโหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวายที่เป็นโหมคต่อเนื่อง .....	70
4.20 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 90$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	70
4.21 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 60$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	71
4.22 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 45$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	71
4.23 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟสA ที่ $\alpha = 30$ องศาโหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	71
4.24 บน กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟสA และ ล่าง แรงดันระหว่างไลน์ A-B ที่ $\alpha = 110$ องศาโหลด เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการทดสอบ .....	72
4.25 สเปคตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุมจุดชนวน 90 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	72
4.26 สเปคตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุมจุดชนวน 60 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	73
4.27 สเปคตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุมจุดชนวน 45 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	73
4.28 สเปคตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุมจุดชนวน 30 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ) .....	73

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสต่อมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ที่มีโหลดเป็น R	74
4.30 แรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่เริ่มเดิน โดยจ่ายแรงดันพิกัด โดยตรง (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	74
4.31 บน ความเร็วรอบและล่าง แรงบิดของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ที่เริ่มเดิน โดยจ่ายแรงดันพิกัด โดยตรง	74
4.32 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดที่แรงบิด โหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 0.5 วินาที (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	75
4.33 บน ความเร็วรอบและล่าง แรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดิน โดยจ่ายแบบมีแรงบิดที่แรงบิด โหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 0.5 วินาที	75
4.34 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดที่แรงบิด โหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 1 วินาที (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	76
4.35 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดแบบไม่มีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 30A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	76
4.36 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดแบบไม่มีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 30A	76
4.37 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดแบบไม่มีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 35A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	77
4.38 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดแบบไม่มีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 35A	77
4.39 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลดเป็นอัตราความเฉื่อยควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 40A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	78
4.40 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลด 3.5 Nm และควบคุมกระแสที่ 12A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	78
4.41 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลดคงที่ที่ 3.5 Nm ควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 12A	78
4.42 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลด 3.5 Nm และควบคุมกระแสที่ 15A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)	79

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 บน ความเร็วรอบและค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนี้มีนวลแบบแรงบิด โหลดคงที่ ที่ 3.5 Nm ควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 15A.....	79
4.44 กราฟพลังงานที่ใช้ไปในการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	80

# บทที่ 1

## บทนำ

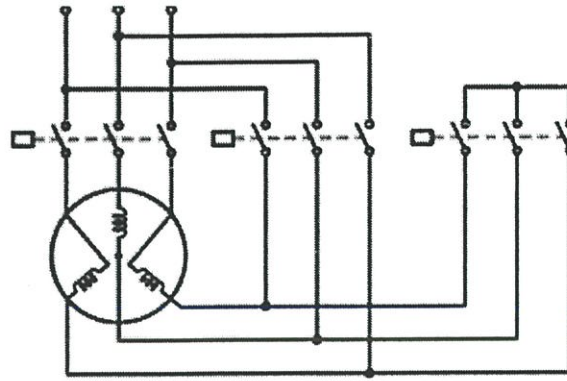
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนกำลัง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) เพราะมีขนาดเล็กและราคาถูกกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นอีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่การบำรุงรักษาก่อนข้างน้อย แต่ก็ยังมีข้อเสียที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรขนาดใหญ่ โดยเฉพาะขณะเริ่มเดินมอเตอร์ แรงบิดและกระแสจะสูงมากทำให้เครื่องจักรเริ่มเดินด้วยการกระชากอย่างแรง เป็นผลให้มอเตอร์และชุดส่งกำลังมีอายุสั้นลง ดังที่แสดงในตารางที่ 1.1 ขนาดของกระแสเริ่มเดินจะมีค่าประมาณ 4-7 เท่าของกระแสปกติตามขนาดของกำลังของมอเตอร์ นอกจากนี้การใช้กระแสเริ่มเดินสูง ยังเป็นผลข้างเคียงต่อระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอีก เช่น ระดับแรงดันตก [1] (voltage sags) เป็นต้น

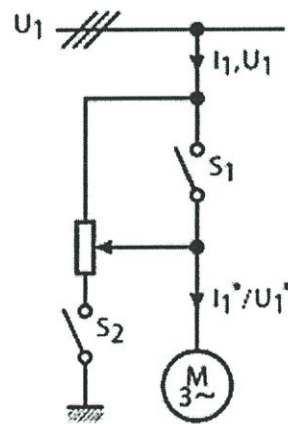
ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างขนาดของกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Technical Data QY2 Series											4 POLE	
OUTPUT HP / KW	TYPE DESIGNATION	FRAME SIZE	SPEED r / min	Efficiency %	Power Factor Cos φ	CURRENT		TORQUE			dB (A)	Weight (Kg)
						$I_n$ (A)	$\frac{I_s}{I_n}$	$T_n$ (N.m)	$\frac{T_s}{T_n}$	$\frac{T_{max}}{T_n}$		
0.18 / 0.12	QY2 - 831 - 4	83	1400	57.0	0.72	0.4	4.4	0.82	2.1	2.2	52	13
0.25 / 0.18	QY2 - 832 - 4	83	1400	60.0	0.73	0.6	4.4	1.23	2.1	2.2	52	13.5
0.37 / 0.25	QY2 - 711 - 4	71	1400	65.0	0.74	0.8	5.2	1.71	2.1	2.2	55	14
0.55 / 0.37	QY2 - 712 - 4	71	1400	67.0	0.75	1.1	5.2	2.54	2.1	2.2	55	14.5
0.75 / 0.55	QY2 - 801 - 4	80	1390	71.0	0.75	1.6	5.2	3.78	2.4	2.3	58	15
1 / 0.75	QY2 - 802 - 4	80	1390	73.0	0.77	2.0	6.0	5.15	2.4	2.3	58	16
1.5 / 1.1	QY2 - 90S - 4	90S	1400	75.0	0.77	2.9	6.0	7.50	2.3	2.3	61	23
2 / 1.5	QY2 - 90L - 4	90L	1400	78.0	0.79	3.7	6.0	10.23	2.3	2.3	61	25
3 / 2.2	QY2 - 100L1 - 4	100L	1420	80.0	0.81	5.2	7.0	14.90	2.3	2.3	64	33
4 / 3	QY2 - 100L2 - 4	100L	1420	82.0	0.82	6.6	7.0	20.18	2.3	2.3	64	35
5.5 / 4	QY2 - 112M - 4	112M	1440	84.0	0.82	8.8	7.0	28.53	2.3	2.3	65	41
7.5 / 5.5	QY2 - 132S - 4	132S	1440	85.0	0.83	11.8	7.0	38.48	2.3	2.3	71	65
10 / 7.5	QY2 - 132M - 4	132M	1440	87.0	0.84	16.8	7.0	49.74	2.3	2.3	71	78

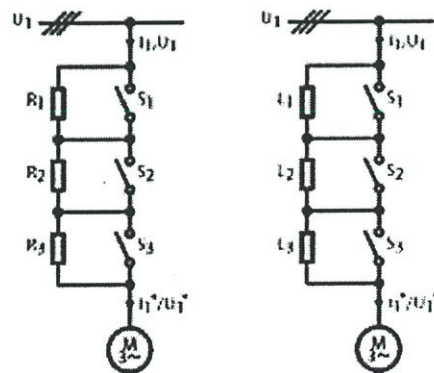
จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิธีต่างๆ เพื่อลดกระแสเริ่มเดินเช่นการเริ่มเดินแบบสตาร์-เดลต้า[5] ดังรูปที่ 1.1 การใช้วิธี Auto-transformer ดังรูปที่ 1.2 การใช้วิธี Step R หรือ Step L ดังรูปที่ 1.3 และการใช้วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะเริ่มเดิน ดังรูปที่ 1.4



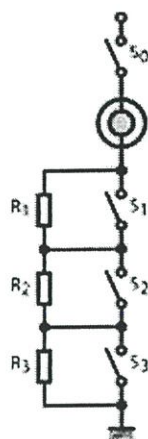
รูปที่ 1.1 การเริ่มเดินแบบสตาร์-เดลต้า



รูปที่ 1.2 การใช้ Auto-transformer

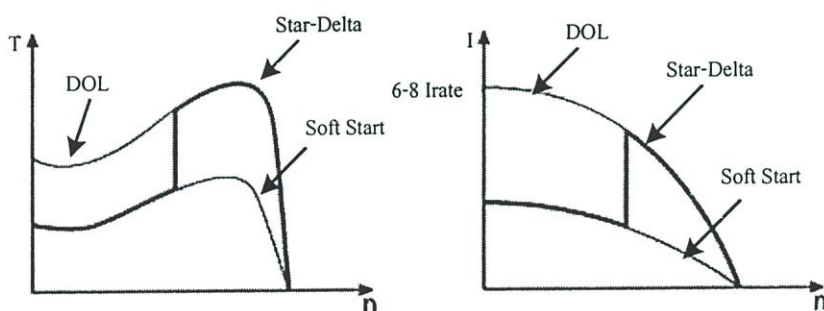


รูปที่ 1.3 การใช้วิธี Step R หรือ Step L



รูปที่ 1.4 วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะเริ่มเดิน

การเริ่มเดินแบบสตาร์-เดลต้า นั้น จะได้รับการนิยมมากที่สุด[5] เพราะค่าใช้จ่ายจะน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 3 รูปแบบที่เหลือ แต่การเริ่มเดินแบบสตาร์-เดลต้า นั้นก็ยังมีข้อเสีย กล่าวคือยังมีการกระชากของกระแสและแรงบิดขณะเปลี่ยนจากสตาร์เป็นเดลต้า ดังรูปที่ 1.5



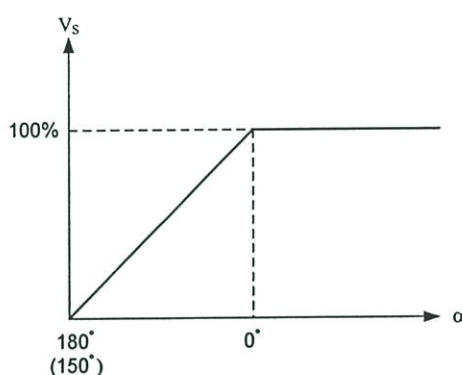
รูปที่ 1.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกระแสของการเริ่มเดินแบบสตาร์-เดลต้า

รูปแบบการเริ่มเดินที่น่าจะนิยมมากที่สุดสำหรับการเริ่มเดินในรูปที่ 1.2-1.4 ก็คือการเริ่มเดินโดยใช้ Auto-transformer แต่การเริ่มเดินแบบนี้มีข้อจำกัดคือต้นทุนสูงและไม่เหมาะกับมอเตอร์ขนาดใหญ่ๆ [7] ส่วนการเริ่มเดินแบบเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะเริ่มเดินเหมาะสำหรับกรณีโหลดที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหนักๆ และมีข้อจำกัดคือตัวมอเตอร์ต้องมีเตอร์เป็นแบบสลีปริง

ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้รับการพัฒนาขึ้น จึงเกิดแนวคิดนำเอาเอสซีอาร์มาใช้ในการควบคุมแรงดันขั้วการกำหนดมอดุลชันของเอสซีอาร์ ทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยตามการกำหนดมอดุลชันของเอสซีอาร์ซึ่งเป็นหลักการของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับ โดยทั่วไปจะเรียกวิธีการเริ่มเดินแบบนี้ว่าการเริ่มเดินแบบนุ่มนวลหรือซอฟท์สตาร์ท (Soft starting)

การเริ่มเดินแบบนุ่มนวลหรือซอฟท์สตาร์ท ที่อาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับควบคุมแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มเดิน โดยการเปลี่ยนมุมจุดชนวน โดยเริ่มจากมุม  $180^\circ$  แล้วลดลงจนถึงมุม  $0^\circ$  (หรือ  $150^\circ$  ถึง  $0^\circ$  ในกรณีไฟสามเฟส) ทำให้แรงดันเปลี่ยนจาก 0 % เป็น 100 % ตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเมื่อเปลี่ยนมุมจุดชนวน

การปรับแรงดันดังกล่าวนอกจากจะทำให้กระแสเริ่มเดินลดลงแล้วยังส่งผลต่อเนื่องไปถึงแรงบิดด้วยโดยขนาดของแรงบิดจะแปรตามขนาดของแรงดันยกกำลังสอง ซึ่งข้อดีและข้อเสียของการเริ่มเดินแบบนุ่มนวลสามารถแสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

ข้อดีของการเริ่มเดินแบบนุ่มนวลแบบเปลี่ยนแปลงแรงดันตามเวลา

1. สามารถลดกระแสขณะเริ่มเดินได้แน่นอน
2. ลดขนาดของสายป้อนและอุปกรณ์ตัดตอน
3. ไม่เกิดแรงดันตกของระบบขณะเริ่มเดินมอเตอร์
4. ลดการสีกหรือของระบบส่งกำลังเช่น เผลา และ แบรีง

ข้อเสียของการเริ่มเดินแบบนุ่มนวลแบบเปลี่ยนแปลงแรงดันตามเวลา

1. แรงบิดเริ่มเดินมีค่าต่ำอาจทำให้มอเตอร์เริ่มเดินช้าหรือไม่สามารถเริ่มเดินได้
2. ไม่สามารถกำหนดกระแสเริ่มเดินที่ต้องการ

ในวิทยานิพนธ์นี้ซอฟท์สตาร์ทได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกมาตรฐาน โดยควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การเริ่มเดินของมอเตอร์มีประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงสูงและในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการควบคุมการเริ่มใน

แบบกระแสคงที่ซึ่งสามารถจำกัดระดับกระแสไฟฟ้าขณะทำการเริ่มเดินมอเตอร์ให้อยู่ในค่าที่ตั้งไว้ให้คงที่ (2.5-5 เท่าของกระแสพิกัดมอเตอร์) และสามารถกำหนดแรงดันให้ผลของแรงบิดเริ่มเดินมีขนาดที่เหมาะสมกับโหลดและการควบคุมกระแสเริ่มเดินไม่ให้สูงเกินไปช่วยลดปัญหาการต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (Peak demand) แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage sags) ในระบบ ช่วยลดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า, สายตัวนำไฟฟ้า รวมถึงถนอมอายุการใช้งานของมอเตอร์อีกด้วย

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ต้องนำเสนอแนวทางการศึกษาและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับทดสอบการทำงาน, ศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในช่วงเริ่มเดิน, การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบ AC-AC Converter และ วงจรควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังโดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณทางดิจิทัล เพื่อควบคุมกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับการเริ่มเดินโดยการจ่ายแรงดัน โดยตรง และมีค่าคงที่ตามที่กำหนดซึ่งเหมาะสมกับขนาดและแรงบิดโหลดของมอเตอร์

## 1.3 วิธีการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ, เอกสารและตำราที่เกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมของมอเตอร์
2. จำลองการทำงานของระบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์และศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไข
3. ออกแบบวงจรการทำงานโดยใช้การจำลองวงจรจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาการทำงานของตัวประมวลสัญญาณทางดิจิทัล
5. สร้างและติดตั้งเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ
6. แก้ไขและปรับปรุงวงจรของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ
7. เก็บผลที่ได้และเปรียบเทียบกับผลการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์
8. สรุปและวิจารณ์ผล, พิมพ์วิทยานิพนธ์

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 7.5kW, 4 Pole 380 / 660v
2. วิเคราะห์และศึกษาหลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบ AC-AC Converter
3. วิเคราะห์และศึกษาการทำงานของมอเตอร์ที่แหล่งจ่ายไม่ใช่สัญญาณ Sinusoidal

#### 4. วิเคราะห์และศึกษาการทำงานของมอเตอร์ที่มีขนาดแรงบิด โหลดต่างๆกันขณะเริ่มเดิน

### 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา, วิจัยและวิเคราะห์ เพื่อออกแบบเครื่องต้นแบบใช้ในการทดสอบการเริ่มเดินแบบนุ่มนวล(Soft start) แบบกระแสเริ่มเดินคงที่ ซึ่งมีรายละเอียดกล่าวถึงแยกเป็นบทดังนี้

บทที่1 บทนำ ปัญหาในการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและวิธีการเริ่มเดินแบบต่างๆเพื่อช่วยลดกระแสขณะเริ่มเดิน, จุดมุ่งหมายและขอบเขตของงานวิจัย

บทที่2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับงานวิจัย ศึกษาหลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบAC-AC, หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, หลักการทำงานของ การเริ่มเดินแบบนุ่มนวล, การออกแบบระบบการควบคุม

บทที่3 การออกแบบวงจรและอุปกรณ์ รายละเอียดการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมและเทคนิคการควบคุม

บทที่4 การจำลองระบบและผลการทดสอบ ผลการจำลองและทดสอบการควบคุม กระแสกับแรงบิด โหลดที่ค่าต่างๆ

บทที่5 สรุปและวิจารณ์ผล

ภาคผนวก

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เป็นวิธีการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างของวงจรและการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน
2. ได้ทราบถึงวิธีการใช้งานและแก้ปัญหาต่างๆของตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล
3. ได้เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบและพัฒนาในส่วนการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสสลับเป็นกระแสสลับ
4. สามารถนำไปพัฒนาการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิธีการต่างๆต่อไปได้เนื่องจากโครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนและควบคุมทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

## บทที่ 2

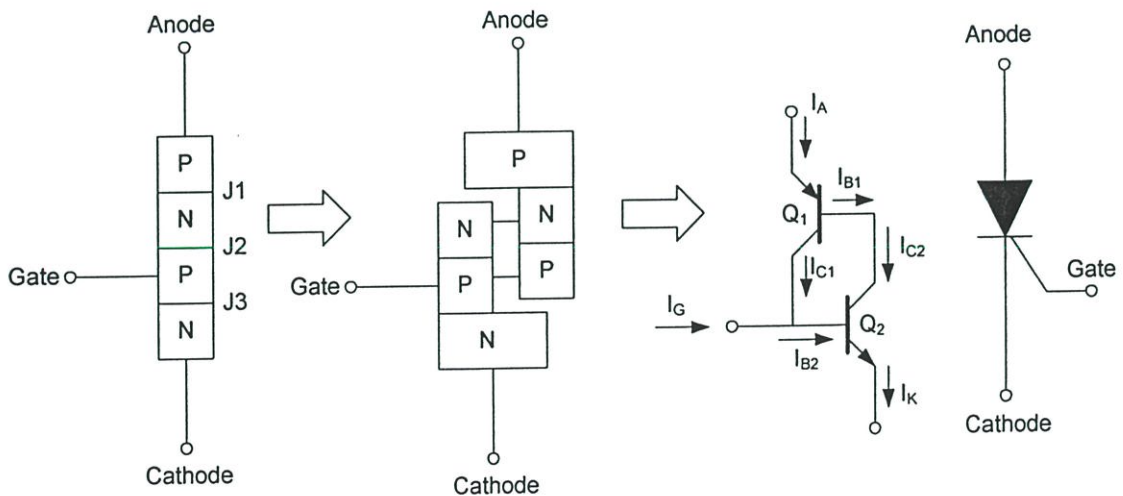
# ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับเป็นวงจรกำลังในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งในวงจรนี้ใช้อุปกรณ์สวิตช์เป็นไทรสเตอร์ชนิดให้กระแสไหลได้ทางเดียวแบบสามขั้วหรือเอสซีอาร์(SCR silicon controlled rectifier) เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำกระแสขนาดใหญ่จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในงานนี้เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้มีขนาดใหญ่และต้องการกระแสเริ่มเดินสูง [6]

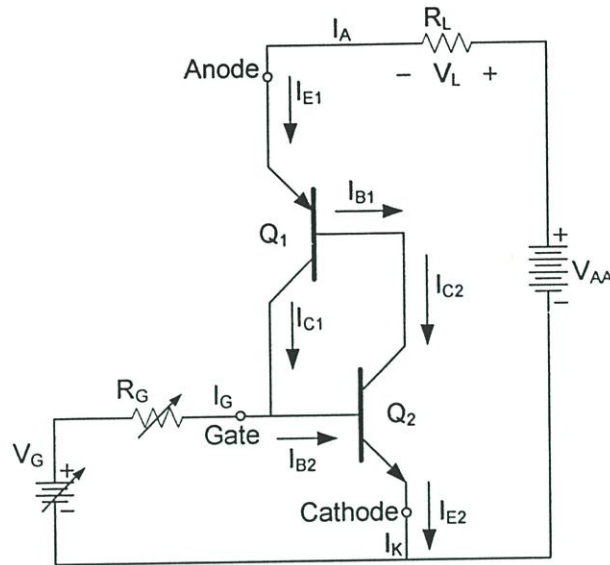
### 2.1 หลักการทำงานและคุณสมบัติของเอสซีอาร์

#### 2.1.1 หลักการทำงานของเอสซีอาร์

พิจารณาโครงสร้างของเอสซีอาร์เป็นทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ต่อกัน [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ขาอิมิตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1(PNP) จะเป็นขาแอนด, ขาอิมิตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q2(NPN) จะเป็นขาคาโทดและขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1(PNP) จะต่อร่วมกับขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q2(NPN) เป็นขากเกต



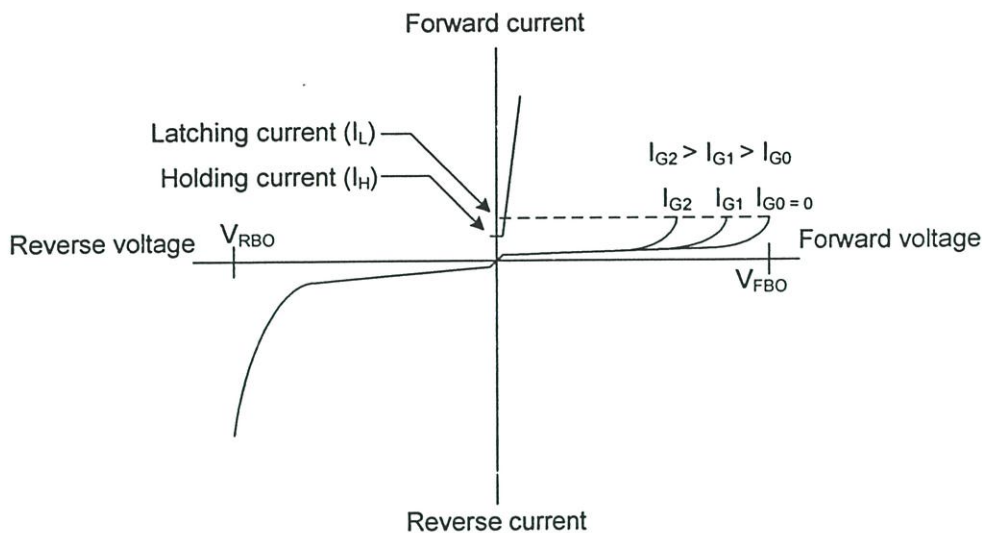
รูปที่ 2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์



รูปที่ 2.2 วงจรการนำกระแสของเอสซีอาร์

จากรูปที่ 2.2 เมื่อมีกระแส  $I_G$  ไหลเข้าขาเบสตัวอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q2 (NPN) หรือมีกระแสไหลเข้าเกตคู่ขาคาโทดของเอสซีอาร์และจะมีกระแส  $I_{C2}$  ไหลเข้าขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q2 (NPN) เท่ากับ  $\beta_2$  เท่าของ  $I_G$  (ถ้า  $\beta_2 = \frac{I_{C2}}{I_{B2}}$ ) กระแส  $I_{C2}$  จะเท่ากับกระแส  $I_{B1}$  ซึ่งทำให้มีกระแสไหลจากขั้วบวกของ  $V_{AA}$  ผ่าน  $R_L$  เข้าขั้วอิมิตเตอร์คู่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q1 เท่ากับ  $\beta_1$  เท่าของ  $I_{B1}$  กระแส  $I_{B2}$  จะเท่ากับ  $I_{C1}$  รวมกับ  $I_G$  จนทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำกระแสหรือก็คือเอสซีอาร์นำกระแส, ความต้านทานระหว่างขาอานอดและคาโทดของเอสซีอาร์จะมีค่าต่ำมาก แรงดันเกือบทั้งหมดจะไปคร่อมโหลด  $R_L$  โดยมีแรงดันคร่อมเอสซีอาร์น้อยมาก จะเห็นว่าสามารถใช้กระแสจ่ายเข้าขาเกตเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ และเมื่อจ่ายกระแสเข้าขาเกตเพียงชั่วคราวแล้วหยุดจ่ายกระแสเข้าขาเกต กระแส  $I_{B2}$  จะเท่ากับกระแส  $I_{C1}$  เอสซีอาร์ยังคงนำกระแสอยู่ สรุปได้ว่าเมื่อทำการจุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแสแล้ว เอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไป แม้จะหยุดจ่ายกระแสจุดชนวนแล้ว

ในรูปที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของเอสซีอาร์ในสถานะคงตัวระหว่างแรงดันคร่อมตัวเอสซีอาร์และกระแสที่ไหลผ่าน



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของเอสซีอาร์ในสถานะคงตัว

เมื่อจ่ายแรงดัน  $V_{AA}$  ในลักษณะฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward bias) คือขาอาโนดได้รับแรงดันบวกเมื่อเทียบกับคาโทด และไม่มีกระแสเกต ( $I_G$ ) ถ้ามีแรงดันน้อยๆ จะมีเพียงกระแสรั่วไหล (Leakage current) เพียงเล็กน้อยไหลผ่าน เมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_{AA}$  มากขึ้นจนถึงแรงดันพังทลายทางด้านฟอร์เวิร์ด (Forward breakover voltage,  $V_{FBO}$ ) และจะมีกระแสไหลเกินกระแสค้าง (Latching current,  $I_L$ ) เอสซีอาร์จะอยู่ในสถานะนำกระแส คือแรงดันที่คร่อมขาอาโนดและคาโทดของเอสซีอาร์จะตกลงสู่แรงดันคร่อมเอสซีอาร์ขณะฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward voltage drop,  $V_F$ ) มีค่าประมาณ 0.7-4 โวลต์ กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์จะเท่ากับ  $\frac{V_{AA} - V_F}{R_L}$  ถ้ากระแสที่ไหลผ่านนั้นเกินพิกัดของเอสซีอาร์ก็จะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้

โดยทั่วไปการนำเอสซีอาร์ไปใช้งานแรงดัน  $V_{AA}$  ที่จ่ายให้กับวงจรจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันพังทลายทางด้านฟอร์เวิร์ด และจะควบคุมการนำกระแสของเอสซีอาร์โดยใช้สัญญาณจุดชนวนที่มีแรงดันที่ขาเกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด เมื่อกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์มากกว่ากระแสค้างก็จะทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะนำกระแส แต่เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสอยู่แล้วจะทำให้หยุดนำกระแสจะต้องทำให้กระแสไหลผ่านตัวเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสยึด (Holding current,  $I_H$ ) คุณสมบัติโดยทั่วไปกระแสค้างจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของกระแสยึด[6]

เมื่อจ่ายแรงดัน  $V_{AA}$  ในลักษณะรีเวิร์ดไบอัส (Reverse bias) คือขาอาโนดได้รับแรงดันลบเมื่อเทียบกับคาโทด เอสซีอาร์จะไม่นำกระแสถึงแม้จะมีสัญญาณจุดชนวนขาเกตของเอสซีอาร์ เมื่อจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นถึงแรงดันพังทลายทางด้านรีเวิร์ด (Reverse breakover voltage,  $V_{RBO}$ ) จะทำให้สารกึ่งตัวนำเสียหายได้

### 2.1.2 การจุดชนวนเอสซีอาร์

จากหลักการการทำงานของเอสซีอาร์ที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.1.1 เอสซีอาร์สามารถเปลี่ยนสถานะจากสถานะไม่นำกระแสเข้าสู่สถานะนำกระแสได้โดยอาศัยกระบวนการป้อนกับค่าบวกที่เกิดขึ้นในเอสซีอาร์[2] ซึ่งสามารถจะทำให้เกิดกระบวนการนี้ขึ้นได้ด้วยการจ่ายแรงดันให้เอสซีอาร์ โดยให้รอยต่อระหว่างขาเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็นพีเอ็น (NPN) ทำให้กระแสอิมิตเตอร์มีค่าสูงขึ้นตามในรูปที่ 2.2 และวิธีการที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ได้แก่ [2]

1. ใช้ป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกท การป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเกทของเอสซีอาร์จะมีกระแสเกทพุ่งเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเป็นผลให้มีกระแสเกทเพิ่มค่าสูงขึ้นและขึ้นกระบวนการป้อนกลับค่าบวก เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสได้วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้จุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแส

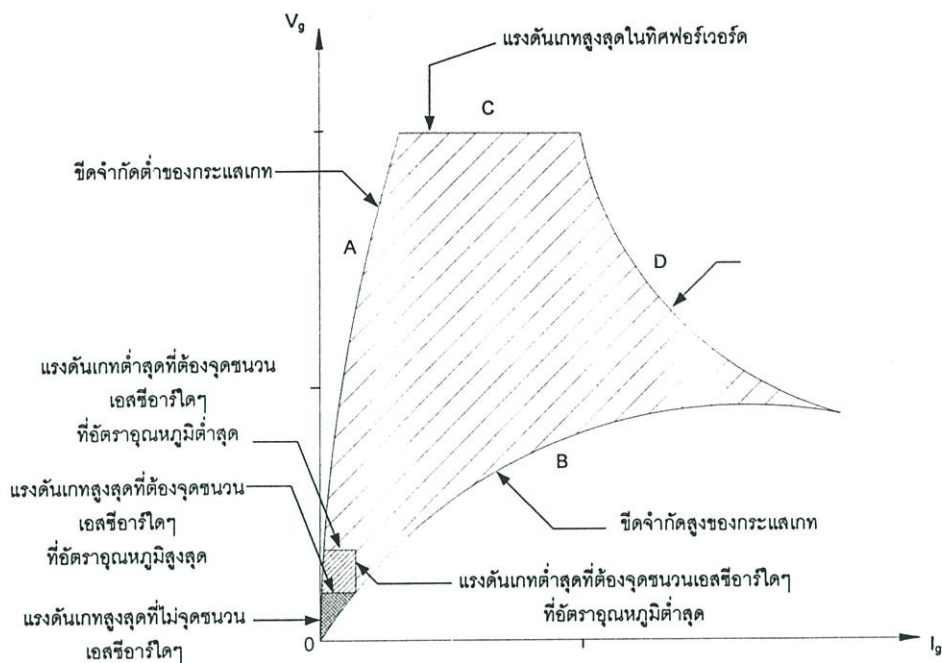
2. ใช้แรงดันพัลส์หลายทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแส โดยการจ่ายแรงดันสูงเข้าระหว่างขาอาโนดกับคาโทดของเอสซีอาร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ดจะทำให้ชั้นปลดพาหะที่รอยต่อ J2 กว้างออกและแรงดันจะทำให้พาหะข้างน้อยมีอัตราเร่งสูงขึ้นวิ่งข้ามรอยต่อ J2 เข้าชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำเป็นผลให้พาหะข้างน้อยหลุดเพิ่มออกมาเมื่อแรงดันอาโนดถึงค่าแรงดันพัลส์หลาย ( $V_{FBO}$ ) ก็จะทำให้รอยต่อ J2 พัลส์หลายทำให้รอยต่อ J2 กลายเป็นถูกฟอร์เวิร์ดไบอัส ทำให้กระแสอาโนดไหลผ่านเอสซีอาร์ได้มากมาย และเอสซีอาร์จึงเข้าสู่สถานะนำกระแส

3. ใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลาในอัตราสูง ( $dv/dt$ ) เข้าจุดชนวน เมื่อแรงดันที่ต่ออยู่ระหว่างขาอาโนดกับคาโทดของเอสซีอาร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ดเปลี่ยนแปลงค่าด้วยอัตราเร็วสูงจะทำให้เกิดกระแสเกทชั่วครู่ซึ่งกระแสนี้เกิดจากค่าประจุ C ระหว่างขาอาโนดกับเกทและระหว่างขาเกทกับคาโทดด้วยค่าตามสมการ

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.1)$$

กระแสนี้จะทำให้เกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวกขึ้นและเอสซีอาร์จะเข้าสู่สถานะนำกระแส

วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นวิธีใช้แรงดันบวกจ่ายเข้าขาเกทเป็นวิธีที่นิยมที่สุด [6] แรงดันบวกที่ป้อนให้กับขาเกทต้องให้กระแสเป็นพัลส์ที่มีส้นหน้าสูงชันและเนื่องจากเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสก็จะสามารถนำกระแสต่อไปได้โดยไม่ต้องการกระแสเกทอีก ดังนั้นกระแสเกทควรจะเป็นพัลส์ที่มีช่วงสั้นๆ แต่มีความสูงของพัลส์สูงขึ้นเมื่อช่วงของพัลส์สั้นลง ก็สามารถทำให้เอสซีอาร์เปิดนำกระแสได้ดีและทำงานได้น่าเชื่อถือ โดยลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสของขาเกทของเอสซีอาร์แต่ละตัวซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกท

## 2.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับเพื่อต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยังโหลด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่ตัดต่อกำลังไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดเป็นช่วงเวลาตามที่ต้องการซึ่งหลักการนี้เรียกว่าการควบคุมเฟสโดยใช้เอสซีอาร์ซึ่งจะกระทำที่ทุกๆคาบของแหล่งจ่าย การประยุกต์นำไปใช้งาน ได้แก่ งานควบคุมแสงสว่าง, ความร้อน, และการนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า[4]

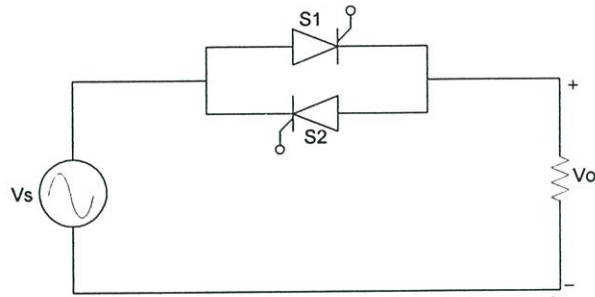
วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งออกเพื่อวิเคราะห์พิจารณาได้ตามชนิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและลักษณะการต่อวงจรได้ดังนี้

1. วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส
2. วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส
3. ไชโคลคอนเวอร์เตอร์

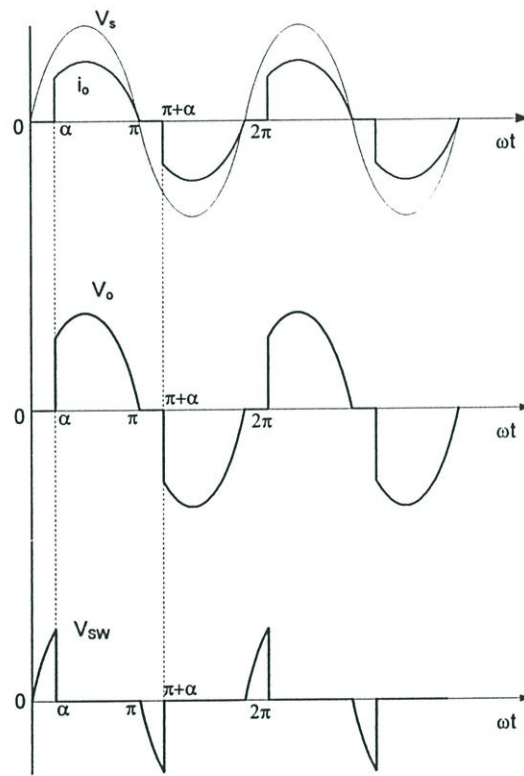
ในงานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสและ 3 เฟสซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้

### 2.2.1 วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมีวงจรการทำงานดังในรูปที่ 2.5 โดยใช้เอสซีอาร์ต่อขนานกลับทิศทางกันเพื่อให้กระแสไหลไปยังโหลดได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นกระแสสลับ



(a.) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดความต้านทาน



(b.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โหลดความต้านทาน

จากรูปที่ 2.5 เมื่อแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายเท่ากับ

$$v_s(\omega t) = V_m \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

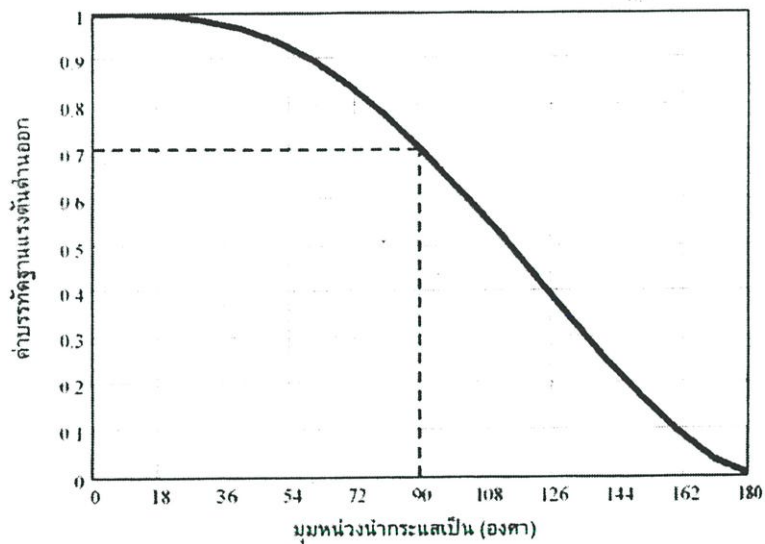
ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมโหลด สามารถหาได้เป็น

$$V_{o,rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2.3)$$

ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโวลจะเท่ากับกับค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสแหล่งจ่าย

$$I_{o,rms} = \frac{V_{o,rms}}{R} \quad (2.4)$$

ที่ค่าค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อม โวลที่มุมจุดชนวนเป็นศูนย์เทียบกับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย(Normalized rms load voltage) หรือค่าบรรทัดฐานของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะเป็นฟังก์ชันของมุมนำกระแสไฟฟ้าของสมการที่ 2.3 มีกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ที่ค่าค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อม โวลเทียบกับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายกับมุมจุดชนวนเมื่อมีโวลความต้านทาน

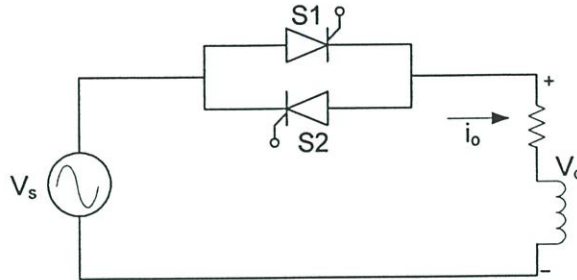
ค่าตัวประกอบกำลังของโวล หาได้จากกำลังไฟฟ้าจริงที่โวลหารด้วยค่าค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันคูณกับค่าค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่าย

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{s,rms} I_{s,rms}} = \frac{V_{o,rms}^2 / R}{V_{s,rms} (V_{o,rms} / R)} \quad (2.5)$$

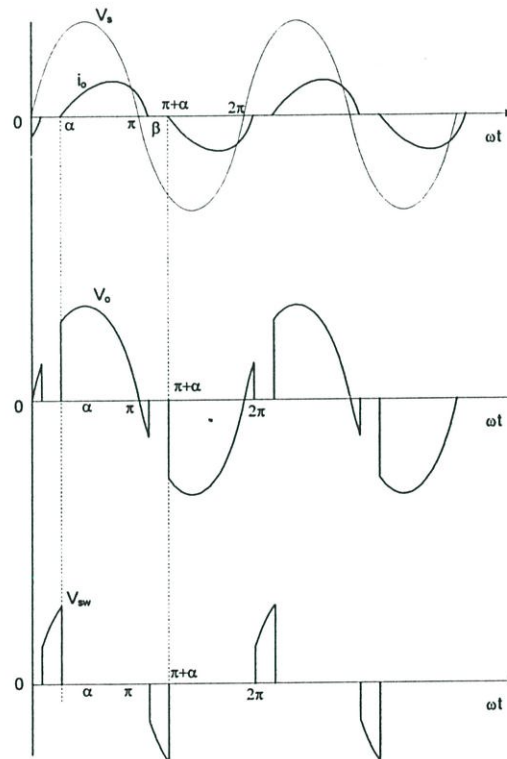
$$PF = \frac{V_{o,rms}}{V_{s,rms}} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2.6)$$

ในสมการที่ 2.6 เมื่อมุม  $\alpha = 0$  ค่าตัวประกอบกำลังจะเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุม  $\alpha$  มากขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.6

ในกรณีที่ป็นวงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสที่ โหลดแบบอินดักทีฟดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าแล้วทำการจุดชนวนจะได้สมการเป็น



(a.) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่อินดักทีฟโหลด



(b.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่อินดักทีฟโหลด

$$V_m \sin(\omega t) = R.i_o(t) + L \frac{di_o(t)}{dt} \quad (2.7)$$

และทำการแก้สมการจะได้กระแสเป็น

$$io(\omega t) = \left( \frac{V_m}{Z} \right) [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{(\alpha - \omega t)/\omega\tau}] \text{ เมื่อ } \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.8)$$

วงจรในรูปที่ 2.7 เอสซีอาร์แต่ละตัวจะนำกระแสในช่วงครึ่งไซเคิลทำให้จำนวนมุมที่เอสซีอาร์นำกระแส ( $\gamma$ ) ไม่สามารถเกิน 180 องศา ซึ่งรูปคลื่นของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 b จะเห็นว่าเมื่อมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) ลดลงจนกระทั่งจำนวนมุมที่เอสซีอาร์นำกระแส ( $\gamma$ ) เท่ากับ 180 องศา รูปคลื่นแรงดันและกระแสของค่านอกจะเป็นสัญญาณไซน์ (Sinusoidal) เมื่อ  $\alpha = \phi$  จากสมการที่ 2.9 ที่มุม  $\omega t = \beta$  กระแสจะมีค่าเท่ากับศูนย์เป็นจุดที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส จะสามารถหามุม  $\beta$  ได้โดยการแทนค่า  $\omega t = \beta, i = 0$  ลงในสมการ 2.8 จะได้

$$io(\beta) = 0 = \left( \frac{V_m}{Z} \right) [\sin(\beta - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{(\alpha - \beta)/\omega\tau}] \text{ เมื่อ } \omega t = \beta \quad (2.9)$$

$\alpha$  = มุมที่เอสซีอาร์เริ่มนำกระแส

$\beta$  = มุมที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส

$\gamma$  = จำนวนมุมที่เอสซีอาร์นำกระแส

โดยที่  $\gamma = \beta - \alpha$

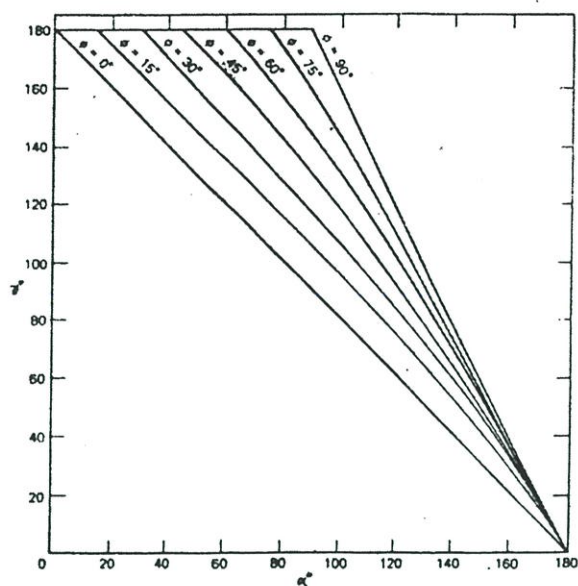
และถ้า  $\alpha = \phi =$  มุมพาวเวอร์ของโหลดแทนค่าลงในสมการที่ 2.9 จะได้

$$\sin(\beta - \phi) = 0$$

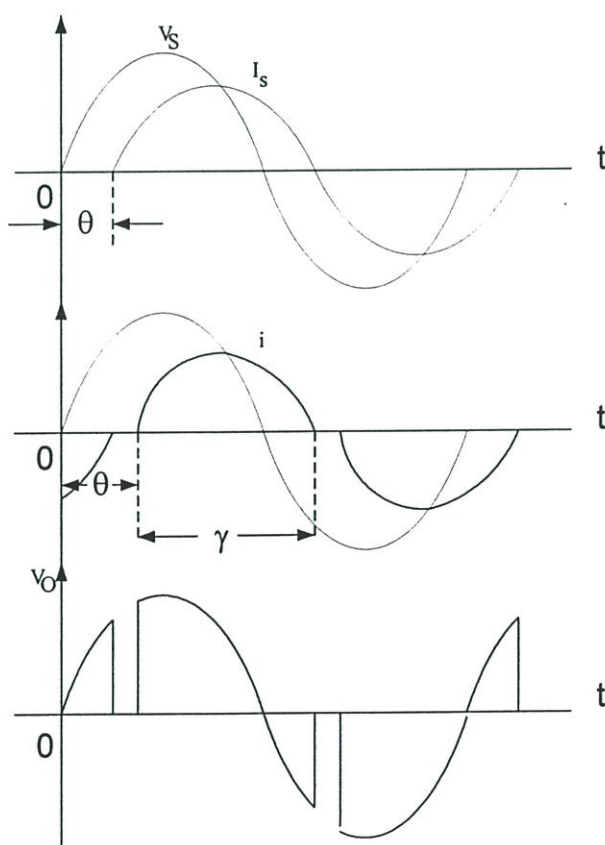
$$\beta - \phi = 180^\circ$$

$$\beta - \alpha = 180^\circ$$

จะเห็นว่าเมื่อ  $\alpha = \phi$  กระแสจะไหลอย่างต่อเนื่องทั้งไซเคิลจึงเกิดเป็นรูปไซน์และในรูปที่ 2.8 เป็นแสดงความสัมพันธ์ของ  $\alpha$  และ  $\gamma$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่างๆซึ่งได้จากผลของสมการ 2.9 โดยที่  $\alpha$  มีค่าไม่ต่ำกว่า  $\phi$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  และ  $\gamma$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่างๆ



รูปที่ 2.9 สัญญาณกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟ

ในกรณีของโหลดที่เป็นอินดักทีฟ โหลดจะมีผลของค่าตัวประกอบกำลังซึ่งเป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างกระแสกับแรงดันหรือมุมอิมพีแดนต์ ( $\phi$ ) ของวงจร

$$PF = \cos(\phi_v - \phi_i)$$

และจากผลของตัวเหนี่ยวนำที่มีการสะสมพลังงานซึ่งอธิบายผลของวงจรได้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแสดงได้จากรูปที่ 2.9

จะเห็นได้ว่าปริมาณที่ปรับได้ของแรงดันขาออกอยู่ในช่วงของมุม  $\alpha - \beta$  เท่านั้น เพราะเนื่องจากผลของการต่อโหลดที่เป็นอินดักทีฟแม้ว่า  $V_o$  จะเปลี่ยนชั่วไปแล้วกระแสยังคงไหลในทิศทางก่อนหน้าที่แรงดัน  $V_o$  จะเปลี่ยนชั่ว

จากลักษณะของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังแบบมีโหลดเป็นอินดักทีฟทำให้ความเป็นไปได้ในการควบคุมแรงดันในเงื่อนไขของมุมอิมพีแดนต์ต่างๆเป็นดังนี้

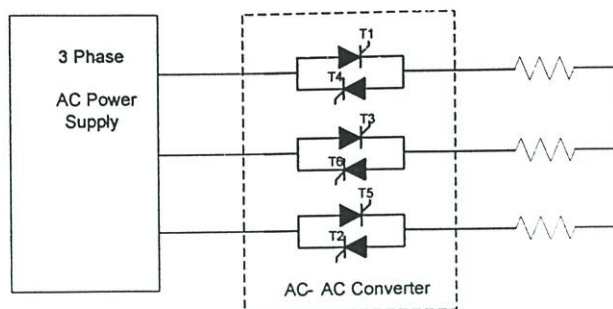
เมื่อ  $\alpha > \phi$  จะได้ว่ากระแส  $i$  มีลักษณะไม่ต่อเนื่องและมุม  $\beta$  ที่ได้จะอยู่ในเงื่อนไขของ  $\alpha > \phi > \beta$  ทำให้เกิดช่องว่าง  $\alpha - \beta$  ขึ้น โดยที่แรงดัน  $V_o$  ในช่วงนี้มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ เมื่อ  $\alpha > \phi$  จะสามารถควบคุมแรงดัน  $V_o$  ได้

เมื่อ  $\alpha = \phi$  จะได้ว่ากระแสเริ่มมีลักษณะต่อเนื่อง และมุม  $\beta$  อยู่ในเงื่อนไขของ  $\alpha = \phi = \beta$  ทำให้ช่วง  $\alpha - \beta$  เป็นศูนย์ทำให้  $V_o$  ช่วงนี้เริ่มไม่มีช่องว่าง นั่นคือ เมื่อ  $\alpha = \phi$  จะไม่สามารถควบคุมแรงดัน  $V_o$  ได้เปรียบเหมือนเอสซีอาร์ถูกตัดวงจรไว้ทำให้กระแส  $i$  ไหลเป็นคลื่นไซน์พอดี

เมื่อ  $\alpha < \phi$  จะได้ว่ากระแสมีลักษณะต่อเนื่องและไม่สามารถควบคุมแรงดันขาออกได้ ดังนั้นถ้ามุมอิมพีแดนต์มีค่า  $\phi = \frac{\pi}{3}$  ช่วงของมุมจุดชนวนจะมีค่าเป็น  $\pi - \frac{\pi}{3}$  ที่จะสามารถควบคุมแรงดันขาออกได้

### 2.2.2 วงจรแปลงผันกำลังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบเต็มคลื่น 3 เฟส ที่ควบคุมด้วยเอสซีอาร์ต่อแบบขนานในลักษณะกลับทิศทางเพื่อนำกระแสได้ทั้งสัญญาณด้านบวกและสัญญาณด้านลบ และสามารถควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กลับโพลที่ต่อแบบวายโดยการควบคุมมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์แต่ละตัวซึ่งจะทำงานเรียงกันไปตามหมายเลขที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อโหลดความต้านทานแบบ  
 วย

หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบ 3 เฟสแบบเต็มคลื่น (Three phase full wave controller) ต่อแบบวายที่แสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าจะมีกระแสไหลในโหลดเมื่อเอสซีอาร์อย่างน้อยที่สุด 2 ไลนจะต้องนำกระแส [4] แรงดันระหว่างไลนจะมีค่าเท่ากับ

$$v_{AB} = \sqrt{2}v \sin \omega t \quad \text{V}$$

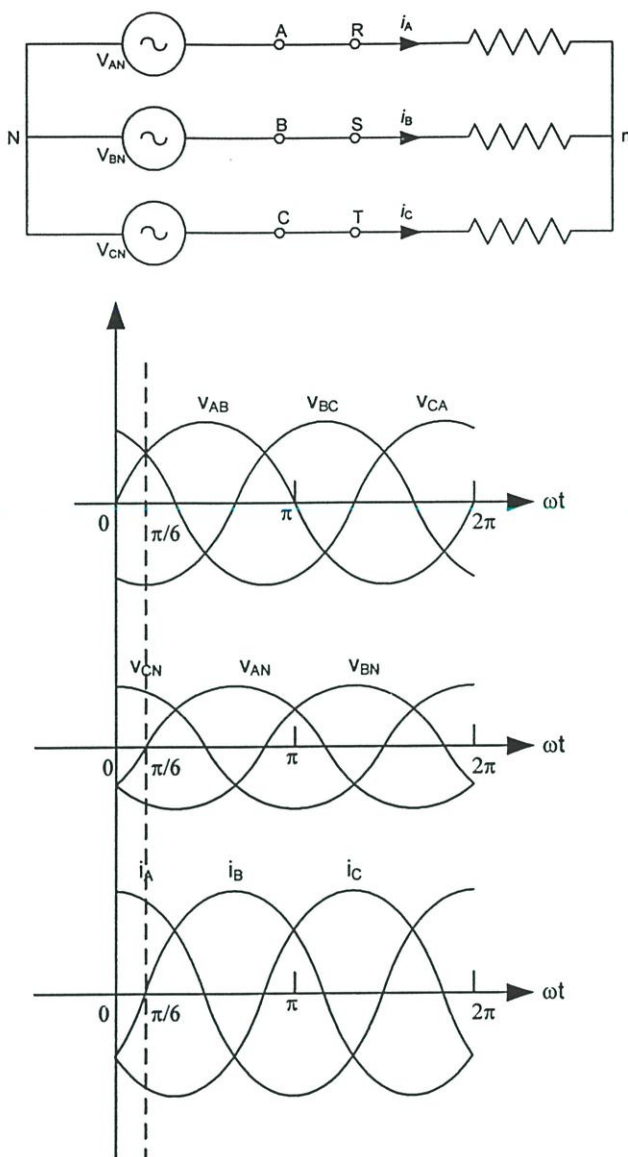
$$v_{BC} = \sqrt{2}v \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad \text{V}$$

$$v_{CA} = \sqrt{2}v \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad \text{V} \quad (2.10)$$

เพื่อสะดวกต่อการแสดงมุมจุดชนวนทั้งหมดของเอสซีอาร์ควรพิจารณาในสถานะที่ไม่มีการควบคุม โดยมีโหลดเป็นความต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.10 กระแสที่ไหลในโหลดจะตามแรงดันระหว่างไลนกับนิวตรอลตามสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$v_{AN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} v \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right) \quad \text{V} \quad (2.11)$$

$$i_A = \frac{\sqrt{2}v}{\sqrt{3}R} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right) \quad \text{A} \quad (2.12)$$



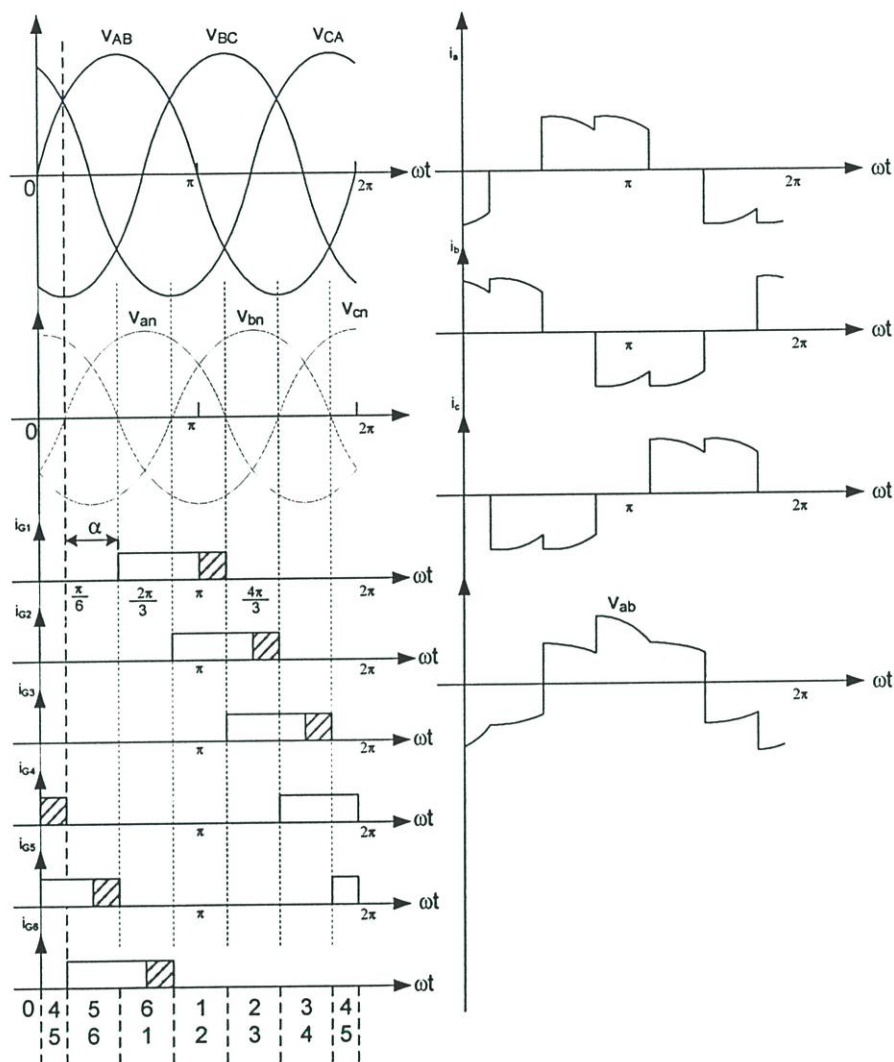
รูปที่ 2.11 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส

สำหรับมุมจุดชนวน ที่ทำให้เอสซีอาร์ตัวที่ 1 เริ่มนำกระแสที่มุม  $\omega t = \frac{\pi}{6}$  เป็นมุม  $\alpha = 0$  ดังนั้นมุมจุดชนวนที่สามารถทำให้เอสซีอาร์นำกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$\alpha = \omega t - \frac{\pi}{6}$$

สัญญาณจุดชนวนของเอสซีอาร์จะต้องมีลำดับสอดคล้องกับแหล่งจ่าย เมื่อสัญญาณจุดชนวนของเอสซีอาร์ T1 เป็นมุม  $\alpha$  แล้ว เอสซีอาร์ T3 จะต้องเป็นมุม  $\alpha + \frac{2\pi}{3}$  และเอสซีอาร์ T5

$\alpha + \frac{2\pi}{3} + \pi$  และเอสซีอาร์ T2 จะต้องเป็น  $\alpha + \frac{4\pi}{3} + \pi$  , ลำดับของสัญญาณจุดขนวนเอสซีอาร์  
ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.12 โดยที่เอสซีอาร์ T1 มีมุมจุดขนวนเท่ากับ 60 องศา



รูปที่ 2.12 ลำดับสัญญาณมุมจุดขนวนของเอสซีอาร์ที่มีมุม  $\alpha = 60$  องศา

จากสัญญาณในรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเอสซีอาร์นำกระแสครั้งละ 2 ตัว โดยที่  $\omega t = 0^+$  ,  $v_{CA}$  เป็นบวก มีสัญญาณจุดขนวนทำให้เอสซีอาร์ T4 , T5 นำกระแส จนกระทั่ง  $\omega t = \frac{\pi}{3}$  ,  $v_{CA}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้เอสซีอาร์ T4 หยุดนำกระแส และเริ่มมีสัญญาณจุดขนวนของเอสซีอาร์ T6 และเริ่มนำกระแส เป็นเช่นไปตามลำดับสัญญาณในรูปที่ 2.12 จุดเริ่มต้นของสัญญาณจุดขนวนจะเปลี่ยนไปตามมุม  $\alpha$  มุมจุดขนวนสูงสุดจะทำให้ไม่มีแรงดันขาออกหรือไม่มีเอสซีอาร์ตัวใคนำกระแสและสำหรับ โหลดที่เป็นความต้านทานมุมจุดขนวนสูงสุดของเอสซีอาร์จะมีค่าเท่ากับ

$$\alpha_{\max} = \pi - \frac{\pi}{6} = \frac{5\pi}{6}$$

ทำให้ช่วงมุมจุดชนวนมีค่าเป็น  $0 < \alpha < \frac{5\pi}{6}$

สำหรับมุมจุดชนวนที่  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$  จะมีเอสซีอาร์นำกระแสพร้อมกันในบางช่วง สำหรับมุมจุดชนวนที่  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$  จะมีเพียงเอสซีอาร์ 2 ตัวเท่านั้นที่นำกระแสและสำหรับมุมจุดชนวนที่  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$  จะมีเอสซีอาร์ 2 ตัวที่นำกระแสแต่จะมีบางช่วงที่เอสซีอาร์ตัวใดนำกระแสเลย และสำหรับมุมจุดชนวนที่  $\alpha \geq \frac{5\pi}{6}$  จะไม่มีเอสซีอาร์ตัวใดนำกระแสเลยตลอดไซเคิล และเมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขข้างต้นสามารถจะคำนวณหาค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าค่านอกที่เป็นโพลความต้านทานได้โดยแบ่งตามช่วงมุมจุดชนวนดังนี้

กรณีที่  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$

$$\begin{aligned} V_{o,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{an}^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{6V_s \left\{ \frac{2}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\sin^2(\omega t)}{3} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{\sin^2(\omega t)}{3} d(\omega t) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2(\omega t)}{3} d(\omega t) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{6V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin(2\alpha)}{8} \right)}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

กรณีที่  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$

$$V_{o,rms} = \sqrt{6V_s \sqrt{\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}-\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}-\frac{\pi}{3}+\alpha} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) \right\}}}$$

$$= \sqrt{6}V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{12} + \frac{3\sin 2\alpha}{16} + \frac{3\cos(2\alpha)}{16} \right)} \quad (2.14)$$

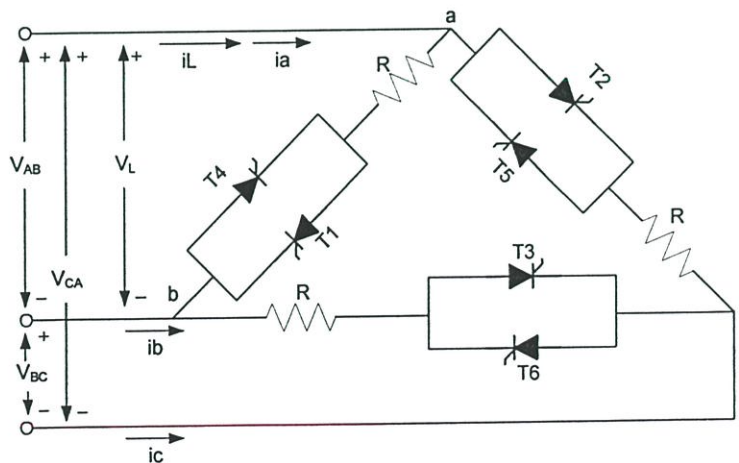
กรณีที่  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$

$$V_{o,rms} = \sqrt{6}V_s \sqrt{\frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2(\omega t)}{4} d(\omega t) \right\}}$$

$$= \sqrt{6}V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin(2\alpha)}{16} + \frac{\sqrt{3}\cos(2\alpha)}{16} \right)} \quad (2.15)$$

สำหรับลำดับในการป้อนมุมจุดชนวนเข้าจากเกทจะแสดงได้ดังนี้

1. สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีจุดตัดแกนศูนย์ (Positive zero crossing) ของแรงดันไฟฟ้าเฟส  $v_{an}$
2. หน่วงเวลาพัลส์ให้มีค่าเท่ากับ  $\alpha, \alpha + \frac{2\pi}{3}$  และ  $\alpha + \frac{4\pi}{3}$  ป้อนเข้าจากเกทของสวิตช์  $T_1, T_3$  และ  $T_5$  ตามลำดับโดยผ่านวงจรแยกสัญญาณเกทของเอสซีอาร์
3. ในทำนองเดียวกัน 2 โดยหน่วงเวลาพัลส์ให้มีค่าเท่ากับ  $\pi + \alpha, \alpha + \frac{5\pi}{3}$  และ  $\alpha + \frac{7\pi}{3}$  ป้อนเข้าจากเกทของสวิตช์  $T_2, T_4$  และ  $T_6$  ตามลำดับโดยผ่านวงจรแยกสัญญาณเกทของเอสซีอาร์



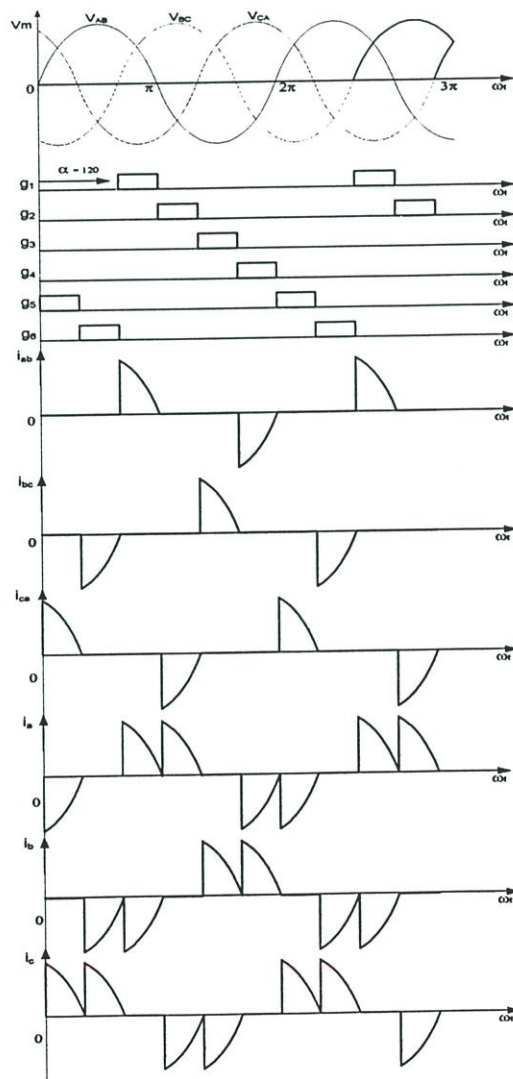
รูปที่ 2.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อโหลดความต้านทานแบบเคลด้า

รูปที่ 2.13 เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อโหลด ความต้านทานแบบเคลด้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าระหว่างสายจะเป็น  $\sqrt{3}$  เท่าของกระแสไฟฟ้าเฟสในระบบ 3 เฟส ซึ่งพิกัดกระแสไฟฟ้าของเอสซีอาร์จะต่ำกว่าการต่อแบบวาย

ในกรณีของโหลดความต้านทาน แรงดันเฟสด้านออกจะได้เป็นตามสมการที่ 2.16

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad (2.16)$$

แรงดันเฟสด้านออกในรูปที่ 2.14 จะมีค่าสูงสุดที่มุม  $\alpha = 0^\circ$  และสามารถปรับมุมจุดชนวนได้ในช่วงมุม  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย, มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ และกระแสไฟฟ้าเมื่อต่อ โหลดความต้านทานแบบเคลด้า

ในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟสที่ต่อกับโหลดแบบอินดักทีฟมีเงื่อนไขของการควบคุมแรงดันเหมือนกับวงจรแบบ 1 เฟสแต่จะมีความซับซ้อนในการคำนวณสูงจึงจะอธิบายด้วยการจำลองวงจรใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

## 2.3 องค์ประกอบของฮาร์มอนิก

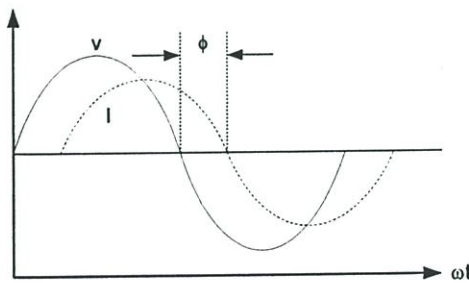
การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังที่กล่าวมาแล้วทำให้เห็นได้ว่าทำให้รูปร่างของแรงดันและกระแสในวงจรมีรูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งเป็นที่การทำงานของเอสซีอาร์มีผลให้ค่าตัวประกอบต่างในสัญญาณมีค่าผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณมูลฐาน (Fundamental) ซึ่งแยกออกเป็นค่าตัวประกอบต่างๆดังนี้

### 2.3.1 ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor)

ค่าตัวประกอบกำลังหมายถึง อัตราส่วนระหว่างกำลังจริง(real power)ต่อกำลังปรากฏ (apparent power) [5]

$$PF = \frac{W}{VA} = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \cos \phi \quad (2.17)$$

ค่ามุม  $\phi$  ในสมการ 2.17 ก็คือมุมระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ค่ามูลฐานดังนั้นในสมการที่ 2.17 ค่าตัวประกอบกำลังจะเท่ากับโคไซน์ของมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้รูปสัญญาณนั้นต้องเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์เท่านั้น



รูปที่ 2.15 มุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

### 2.3.2 ค่าตัวประกอบกำลังดิสเพลสเมนต์ (Displacement power factor)

ค่าตัวประกอบนี้มีความหมายใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบกำลังต่างกันที่ตัวประกอบกำลังดิสเพลสเมนต์เป็นระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ค่ามูลฐาน(Fundamental)

$$DPF = \cos \phi_1 \quad (2.18)$$

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} DPF \quad (2.19)$$

### 2.3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion)

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) เป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของสัญญาณ [5] ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างรากที่สองของผลรวมกำลังสองของฮาร์มอนิกที่สองถึงฮาร์มอนิกที่ N ต่อฮาร์มอนิกที่หนึ่ง (Fundamental)

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1}^N v_{n,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \quad (2.20)$$

## 2.4 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ใช้งานแพร่หลายที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม[8] ซึ่งมอเตอร์ 3 เฟสแบ่งออกเป็นสองแบบคือ

1. แบบ โรเตอร์กรงกระรอก (squirrel cage rotor)
2. แบบ โรเตอร์พันขดลวด (wound rotor) หรือ มอเตอร์แบบสลลิป ริง (slip ring motor)

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อได้เปรียบมอเตอร์ชนิดอื่นๆหลายประการทำให้เป็นที่นิยมใช้กัน[8] มากเช่น

1. มีโครงสร้างง่าย ไม่มีส่วนประกอบที่ยุ่งยาก
2. สะดวกในการใช้งาน
3. แข็งแรง ทนทาน
4. ซ่อมแซม บำรุงรักษาได้ง่าย
5. มีราคาถูก

โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะประกอบด้วยส่วนหลักๆคือ

1. ส่วนที่อยู่กับที่ หรือ สเตเตอร์ จะประกอบด้วยแกนเหล็กลามิเนตเซาะร่องด้านใน สำหรับพันขดลวดอัดยึดติดกับโครงตัวถังที่ทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว

2. ส่วนที่หมุน หรือ โรเตอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ แบบ กรงกระรอก (Squirrel cage rotor) จะทำด้วยแผ่นลามิเนต (Laminated sheet steel) เซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่อง โดยรอบแล้วนำตัวนำอัลลอยในร่องและลัดวงจรตัวนำด้วยวงแหวน (End ring) และอีกแบบคือแบบ พันขดลวดหรือแบบสลลิป ริงซึ่งไม่ได้กล่าวในงานวิจัยนี้

### 2.4.1 การเกิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการเบื้องต้นที่มอเตอร์สามารถทำงานได้คือการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยที่เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์กระแสของแต่ละเฟสจะเปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของแหล่งจ่าย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กคล้ายกับเกิดการหมุนของสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วคงที่เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

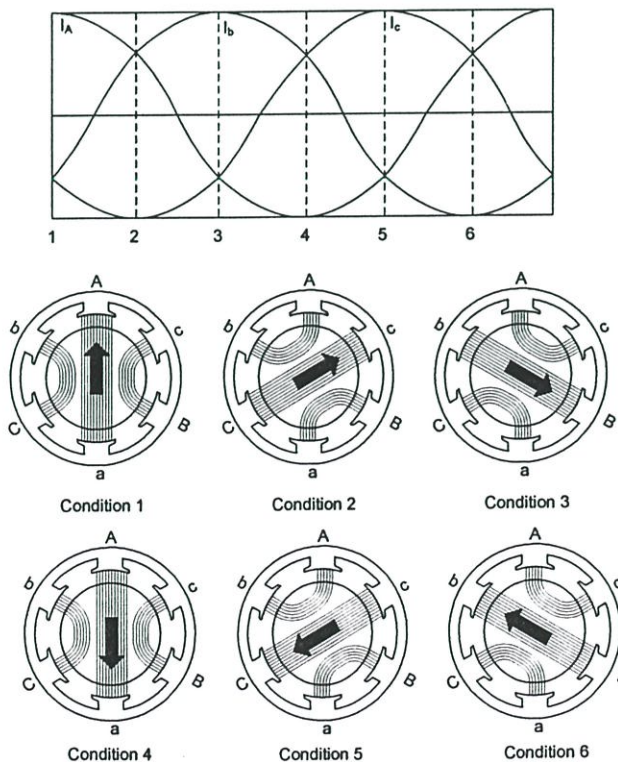
$$N_s = \frac{120f}{P} \text{ rpm} \tag{2.21}$$

$N_s$  ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

$f$  ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ มีหน่วยเป็น Hz

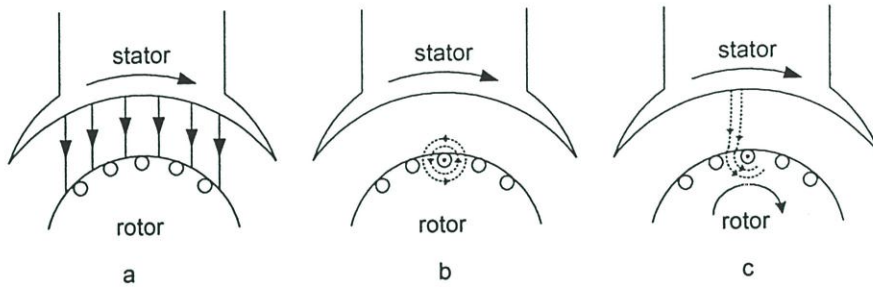
$P$  จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 เฟส เช่นในชุดขดลวดสเตเตอร์ ที่ภาวะที่ 1 กระแส  $I_a$  มีค่าเท่ากับ  $1.I_a$  โดยที่  $I_b$  มีค่าเท่ากับ  $-0.5.I_b$  และ  $I_c$  มีค่าเท่ากับ  $-0.5.I_c$  ทำให้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ของเฟส B และ C มีค่าเป็น 0.5 เท่าของเฟส A ซึ่งสามารถแบ่งภาวะต่างๆตามการเปลี่ยนแปลงกระแสได้เป็น 6 ภาวะ [9] ตามที่แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กระแสไฟฟ้าและเส้นทางเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเมื่อป้อนไฟฟ้าสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์เป็นความเร็วซิงโครนัสตามสมการที่ 2.21 สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ และเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์จะดึงดูดให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์หมุนตามไปด้วย ก็คือจะหมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ซึ่งจะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ



รูปที่ 2.17 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์แบบกรงกระรอก

จากรูปที่ 2.17-a เส้นแรงแม่เหล็กจากสเตเตอร์ตัดผ่านตัวนำบนโรเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์และทิศทางกระแสที่ไหลในตัวนำที่โรเตอร์หาได้จากกฎมือขวาของเฟลมมิ่งซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆตัวนำโดยทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กหาได้โดยใช้กฎของสกรูคั้งที่แสดงในรูปที่ 2.17-b และเมื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็กในรูปที่ 2.17-a และ 2.17-b ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่ตัวโรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กจากสเตเตอร์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17-c

จากหลักการนี้ถ้าหากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสจะทำให้ไม่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านตัวนำบนโรเตอร์จึงทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไหลเกิดขึ้นที่โรเตอร์และไม่มีแรงบิดเกิดขึ้นบนโรเตอร์ด้วย จึงสรุปได้ว่าความเร็วโรเตอร์จะต้องต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอและความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วโรเตอร์จะเรียกว่าความเร็วสลลิป (Slip speed) เมื่อแสดงเป็นรูปของ per unit จะเป็นตามสมการที่ 2.22

$$\text{ความเร็วสลลิป} = N_s - N_r \quad \text{rpm}$$

เมื่อ  $N_r$  เป็นความเร็วโรเตอร์

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s}$$

$$\text{หรือ } \%S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.22)$$

และจากสมการที่ 2.22 จะสามารถหาความเร็วโรเตอร์ที่ค่าสลลิปใดๆได้จาก

$$N_r = (1 - S)N_s \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 จะได้ความเร็วโรเตอร์คือ

$$\begin{array}{ll} \text{เมื่อ } S = 1 \text{ จะได้ } & N_r = 0 \\ \text{เมื่อ } S = 0 \text{ จะได้ } & N_r = N_s \end{array}$$

ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ( $N_r = N_s$ ) จะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสในโรเตอร์ ดังนั้นความถี่โรเตอร์จะเป็นศูนย์และสลลิปมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าโรเตอร์อยู่กับที่จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสในโรเตอร์ ดังนั้นความถี่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายที่ให้กับมอเตอร์และสลลิปมีค่าเป็นหนึ่ง ถ้าให้ความถี่ของโรเตอร์ที่ความเร็วสลลิปใดๆเป็น  $f_2$  จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$N_s - N_r = \frac{120f_2}{P}$$

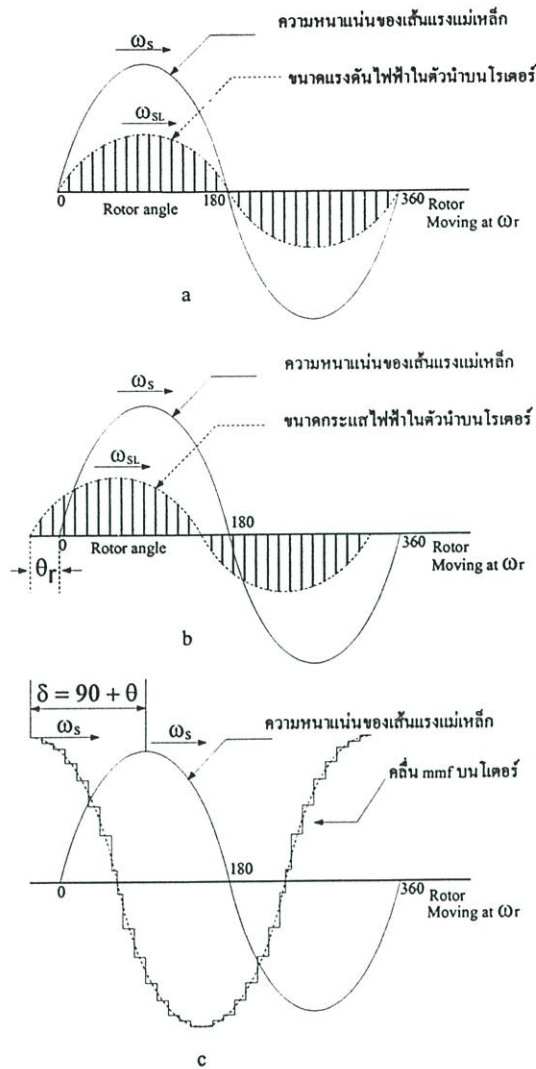
$$\text{โดยที่ } N_s = \frac{120f}{P}$$

$$\therefore S = \frac{f_2}{f}$$

$$\text{หรือ } f_2 = Sf \quad \text{Hz} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 ความถี่โรเตอร์จะเท่ากับค่าสลลิปคูณกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ในรูปที่ 2.18 แสดงการเกิดแรงบิดในโรเตอร์ซึ่งสามารถอธิบายตามรูปได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์และโรเตอร์

รูป 2.18a แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนด้วยความเร็ว  $\omega_s$  และโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว  $\omega_r$  ทำให้โรเตอร์มีสนามแม่เหล็กหมุนผ่านด้วยความเร็ว  $\omega_{sl}$  จึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่  $\omega_{sl}$  ขึ้นที่ตัวนำบนโรเตอร์

รูปที่ 2.18b แสดงกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งจะตามหลังแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมุม  $\theta_r$  และมีความถี่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.18c แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า  $i_r$  ที่ไหลผ่านตัวนำในโรเตอร์ในลักษณะเสริมกับสนามแม่เหล็ก เกิดเป็นสนามแม่เหล็กรวมในรูปขั้นบันได โดยที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะตามหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์อยู่  $90 + \theta_r$  โดยเรียกมุมนี้ว่ามุม  $\delta$  และมีความเร็ว  $\omega_{sl}$  ทำให้ได้ค่าแรงบิดดังนี้

$$T_e = \pi \left( \frac{P}{2} \right) l r B_p F_p \sin \delta \quad (2.25)$$

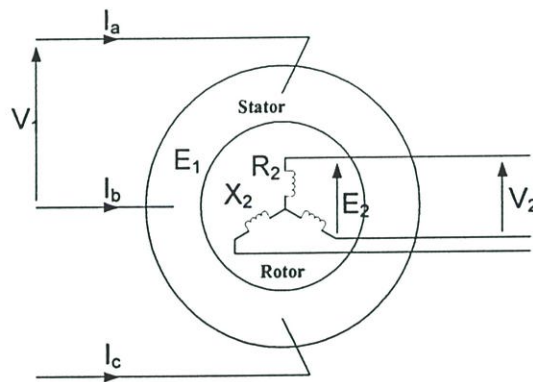
เมื่อ  $P$  เป็นจำนวนขั้วและ  $l$  เป็นความยาวของมอเตอร์  $r$  เป็นรัศมีของมอเตอร์  $B_p$  เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $F_p$  เป็นค่าสูงสุดของคลื่น mmf บนโรเตอร์ และ  $\delta$  มีค่าเป็น  $90+\theta$  สมการที่ 2.25 สามารถเขียนได้เป็น

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) |\hat{\psi}_m| |\hat{I}_r| \sin \delta \quad (2.26)$$

เมื่อ  $|\hat{\psi}_m|$  เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับช่องว่างอากาศต่อขั้วและ  $|\hat{I}_r|$  เป็นค่าสูงสุดของกระแสในโรเตอร์

#### 2.4.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแบ่งออก 2 ส่วนคือส่วนของสเตเตอร์และส่วนที่เป็นโรเตอร์ เมื่อพิจารณาทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเห็นว่าโรเตอร์มีขดลวดและมีค่าทางไฟฟ้าตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ชุดขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้านโรเตอร์

เมื่อ	$E_2$	เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สลิป
	$X_2$	เป็นค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่สลิป
	$SX_2$	เป็นค่ารีแอกแตนซ์ที่มองจากสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป
	$E_1$	เป็นแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (Back emf)
	$Z_2$	เป็นอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์
	$Z_{2s}$	เป็นอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่มองจากสเตเตอร์
	$E_{2s}$	เป็นแรงดันไฟฟ้า $E_2$ ที่มองจากสเตเตอร์
	$I_2$	เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์
	$I_{2s}$	เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ที่มองจากสเตเตอร์

$R'_2$  เป็นความต้านทานของโรเตอร์

$R_2$  เป็นความต้านทานของโรเตอร์ที่มองจากสเตเตอร์

หากด้านโรเตอร์ที่ตัวนำไม่ได้ลัดวงจรไว้ ( $V_2 \neq 0$ ) จะมองได้ว่าสภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิและมีอัตราส่วนเป็น

$$\frac{E_1}{E_2} = a \quad (2.27)$$

โดยแท้จริงแล้ว ตัวนำในโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะลัดวงจรไว้ ( $V_2 = 0$ ) ดังนั้น

$$E_{2S} = aE_2 \quad (2.28)$$

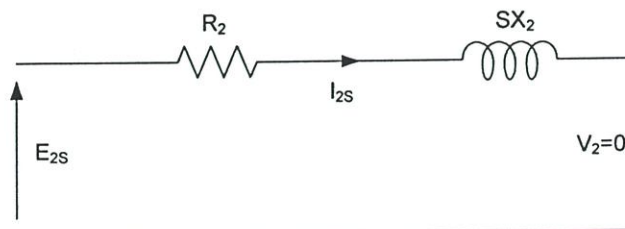
$$I_{2S} = \frac{I_2}{a} \quad (2.29)$$

$$Z_{2S} = \frac{E_{2S}}{I_{2S}} \quad (2.30)$$

$$Z_{2S} = a^2 \frac{E_2}{I_2} = a^2 Z_2 = a^2 (R'_2 + jX_2) \quad (2.31)$$

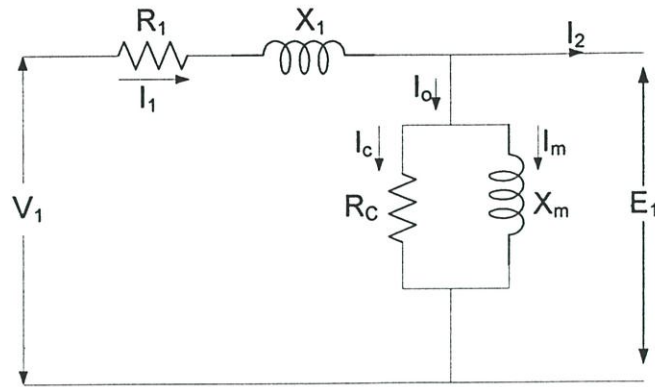
มองจากสเตเตอร์  $Z_{2S} = R_2 + jSX_2 \quad (2.32)$

ดังนั้นค่าทางด้านโรเตอร์สามารถนำมาเขียนเป็นความต้านทานที่มองจากสเตเตอร์ได้ตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ที่มองจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ส่วนทางด้านสเตเตอร์ สามารถเขียนเป็นวงจรไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 วงจรไฟฟ้าของสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- เมื่อ  $R_1$  เป็นความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์  
 $X_1$  เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของชุดขดลวดสเตเตอร์  
 $V_1$  เป็นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า  
 $E_1$  เป็นแรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ (Back emf)  
 $I_1$  เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์  
 $I_0$  เป็นกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current)

เมื่อนำวงจรของโรเตอร์จากรูปที่ 2.20 และวงจรของสเตเตอร์ 2.21 มาต่อเป็นวงจรสมมูลย์โดยตัดวงจรที่โรเตอร์ไว้เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปจะได้ว่า

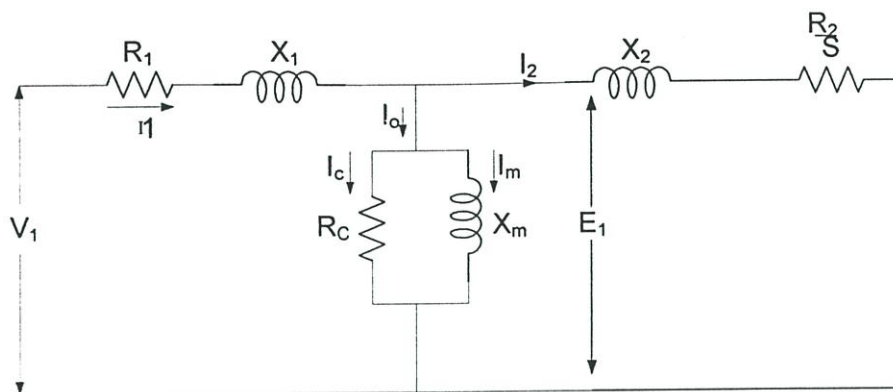
เนื่องจาก 
$$E_2 = SE_1 \quad (2.33)$$

$$I_{2s} = I_2 \quad (2.34)$$

ดังนั้น 
$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{SE_1}{I_2} = R_2 + jSX_2 \quad (2.35)$$

$$\frac{E_1}{I_2} = \frac{R_2}{S} + jX_2 \quad (2.36)$$

จากสมการที่ 2.36 เป็นสมการด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาด้านสเตเตอร์และนำมาเขียนวงจสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามรูปที่ 2.22

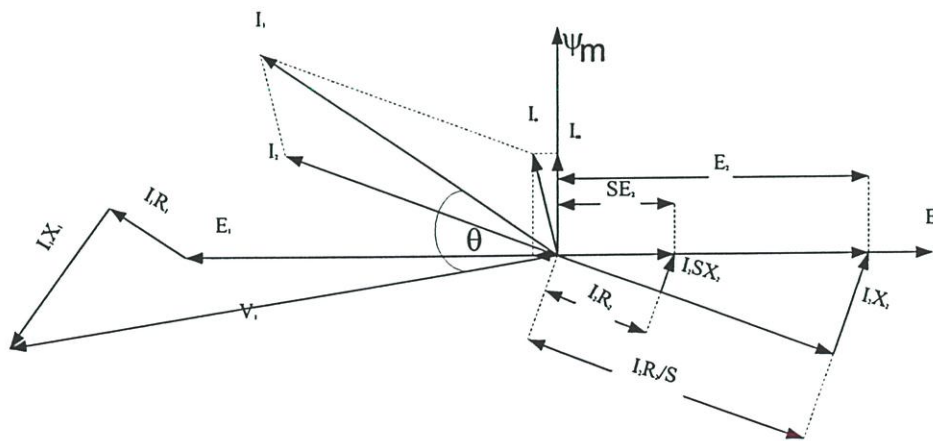


รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลของสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กระแส  $I_o$  เป็นกระแสกระตุ้นหรือกระแสแมกนีไทซ์ (Magnetizing current) เป็นกระแสทางค่านโรเตอร์ขณะไม่มีโหลด ประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนคือ  $I_c$  เป็นกระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และ  $I_m$  เป็นกระแสส่วนที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็กและช่องว่างอากาศ (Air gap) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

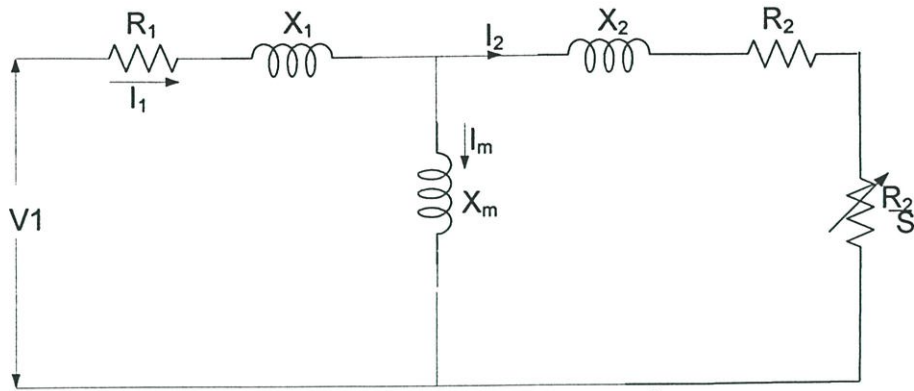
$$I_o^2 = I_c^2 + I_m^2 \tag{2.37}$$

ในสภาวะไม่มีโหลดกระแส  $I_o$  จะมีค่าประมาณ 40-50% ของกระแสเต็มพิกัดเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กต้องเดินผ่านช่องว่างอากาศซึ่งมีค่าความต้านทานแม่เหล็กสูง (High reluctance) จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.22 สามารถเขียนเวกเตอร์ไออะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูป



รูปที่ 2.23 เวกเตอร์ไออะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

และในวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.22 สามารถนำมาเขียนวงจรใหม่ที่นิยมใช้กันโดยไม่คิดค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะได้วงจรเป็นดังรูป 2.24.



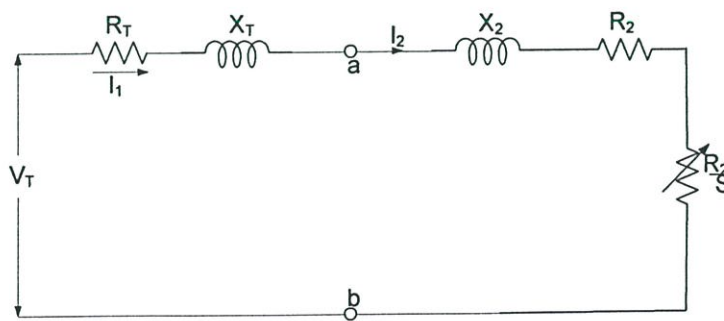
รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามรูป 2.22 ใช้วิธีเทวินินที่จุดหลัง  $X_m$  มาคำนวณ โดยให้แรงดันไฟฟ้าที่  $X_m$  มีค่าเป็น  $V_T$  และให้  $I_o$  เป็นกระแสกระตุ้นในภาวะที่โหลดเป็นศูนย์จะได้ [3]

$$V_T = \frac{V_1 X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \quad (2.38)$$

$$R_T + jX_T = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (2.39)$$

โดยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสเตเตอร์จากวิธีการเทวินินเป็น  $R_T + jX_T$  ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้ว a b จะได้วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นำมาคำนวณหาแรงบิดจะได้เป็น

$$T_e = \frac{3}{\omega_s} \left[ \frac{V_T^2 R_2 / S}{R_T + (R_2 / S)^2 + (X_T + X_2)^2} \right] \text{ Nm} \quad (2.40)$$

### 2.4.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

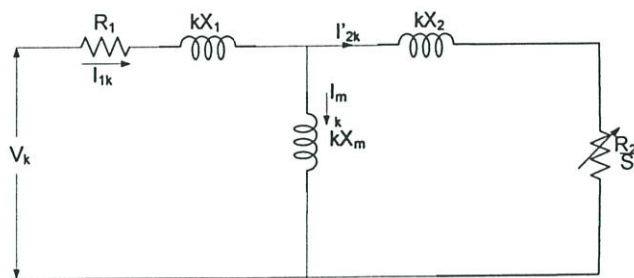
การใช้งานวงจรแปลงผันกำลังเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์หรือวงจรและอุปกรณ์ต่างๆนั้นจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าไปจากสัญญาณไซน์ เนื่องจากการทำงานของตัวเอสซีอาร์จึงทำให้ทั้งสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ามียอดประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ โดยปกติจากการต่อวงจรของขดลวดที่เป็นแบบเคลด้าหรือสตาร์ที่ปราศจากสายนิวทรัลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำให้มีฮาร์มอนิกในอันดับต่างๆ เป็นดังนี้

$$\text{Forward\_harmonics\_order} = 6k + 1 \quad (2.41)$$

$$\text{Backward\_harmonics\_order} = 6k - 1 \quad (2.42)$$

เมื่อ  $k = 1, 2, 3, \dots$

จากสมการที่ได้จะเห็นว่าไม่มีฮาร์มอนิกอันดับคู่และไม่มีฮาร์มอนิกอันดับที่สามหารได้ลงตัว เนื่องจากการต่อวงจรขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้กล่าวมาแล้ว ในสมการที่ 2.41 เป็นฟอร์เวอร์ด์ฮาร์มอนิกซึ่งเป็นอันดับที่หมุนไปในทิศทางเดียวกับความถี่มูลฐานและส่วนในสมการที่ 2.42 ซึ่งเป็นส่วนแบคเวอร์ด์ฮาร์มอนิกซึ่งเป็นอันดับที่หมุนไปในทิศตรงกันข้ามกับความถี่มูลฐาน



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิก

ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกอันดับ  $k^{\text{th}}$  เท่ากับ  $n_k$  ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวน  $k$  เท่าของความเร็วรอบที่ความถี่มูลฐาน

$$n_k = kn_1 \quad (2.43)$$

และค่าความถี่ของฮาร์มอนิกจะเป็น  $k$  เท่าของของความถี่มูลฐาน

$$f_k = kf_1 \quad (2.44)$$

ค่าสลิปของฮาร์มอนิกสำหรับฮาร์มอนิกที่หมุนไปในทิศทางฟอร์เวิร์ดจะหาได้จากสมการ

$$S_k = \frac{kn_1 - n}{kn_1} = \frac{kn_1 - (1 - S_1)n_1}{kn_1} = \frac{(k-1) + S_1}{k} \quad (2.45)$$

ค่าสลิปของฮาร์มอนิกสำหรับฮาร์มอนิกที่หมุนไปในทิศทางแบคเวิร์ดจะหาได้จากสมการ

$$S_k = \frac{kn_1 + n}{kn_1} = \frac{kn_1 + (1 - S_1)n_1}{kn_1} = \frac{(k+1) - S_1}{k} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.45 และ 2.46 เมื่อกำหนดค่า  $0 << S_1 << 1$  จะพบว่าค่าสลิปที่อันดับต่างๆ ของฮาร์มอนิกมีค่าใกล้เคียงหนึ่งซึ่งแสดงที่ตารางที่ 2.1 และ 2.2 จากวงจรรูปที่ 2.26 ค่า  $R_2/S_k$  ซึ่งเท่ากับโหลดของมอเตอร์ สลิปของฮาร์มอนิกจะมีค่าคงที่ ทำให้ค่ากระแสโดยประมาณของฮาร์มอนิกจะมีค่าคงที่เมื่อสลิปที่ความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลงจากหนึ่งไปถึงศูนย์ หรือจากมอเตอร์เริ่มเดินไปจนถึงความเร็วพิกัด

ตารางที่ 2.1 สลิปของฮาร์มอนิกที่อันดับหมุนทางฟอร์เวิร์ด

s1	Forward Time Harmonics			
	7	13	19	25
1	1	1	1	1
0.95	0.993	0.999	0.997	0.998
0.9	0.986	0.999	0.995	0.996
0.85	0.979	0.998	0.992	0.994
0.8	0.971	0.998	0.989	0.992
0.75	0.964	0.997	0.987	0.990
0.7	0.957	0.997	0.984	0.988
0.65	0.950	0.996	0.982	0.986
0.6	0.943	0.996	0.979	0.984
0.55	0.936	0.995	0.976	0.982
0.5	0.929	0.995	0.974	0.980
0.45	0.921	0.994	0.971	0.978
0.4	0.914	0.993	0.968	0.976
0.35	0.907	0.993	0.966	0.974
0.3	0.900	0.992	0.963	0.972
0.25	0.893	0.992	0.961	0.970
0.2	0.886	0.991	0.958	0.968
0.15	0.879	0.991	0.955	0.966
0.1	0.871	0.990	0.953	0.964
0.05	0.864	0.990	0.950	0.962
0	0.857	0.989	0.947	0.960

ตารางที่ 2.2 สลิปของฮาร์โมนิกที่อันดับหมุนทางแบคเวอร์ด์

s1	Backward Time Harmonics			
	5	11	17	23
1	1	1	1	1
0.95	1.01	1.00	1.00	1.00
0.9	1.02	1.01	1.01	1.00
0.85	1.03	1.01	1.01	1.01
0.8	1.04	1.02	1.01	1.01
0.75	1.05	1.02	1.01	1.01
0.7	1.06	1.03	1.02	1.01
0.65	1.07	1.03	1.02	1.02
0.6	1.08	1.04	1.02	1.02
0.55	1.09	1.04	1.03	1.02
0.5	1.10	1.05	1.03	1.02
0.45	1.11	1.05	1.03	1.02
0.4	1.12	1.05	1.04	1.03
0.35	1.13	1.06	1.04	1.03
0.3	1.14	1.06	1.04	1.03
0.25	1.15	1.07	1.04	1.03
0.2	1.16	1.07	1.05	1.03
0.15	1.17	1.08	1.05	1.04
0.1	1.18	1.08	1.05	1.04
0.05	1.19	1.09	1.06	1.04
0	1.20	1.09	1.06	1.04

ที่ค่าความถี่ฮาร์โมนิกค่า  $nX_1+nX_2 \gg R_1+R_2$  และค่า  $X_m = \infty$  ดังนั้นค่ากระแสฮาร์โมนิกจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับต่างๆตามสมการ

$$I_h = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots} \quad (2.47)$$

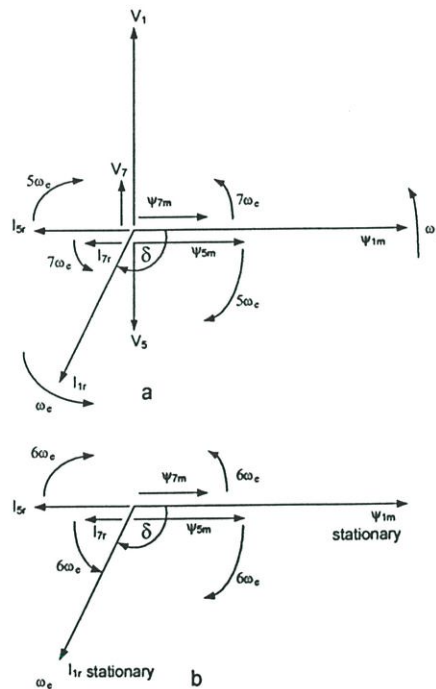
เมื่อ  $I_5, I_7, \dots$  เป็นองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแส และจากสมการที่ 2.47 จะทำให้ค่าสูญเสียของแกนเหล็ก(core loss)และขดลวด(copper loss)มากขึ้นทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ตามสมการ

$$P_s = 3(I_{sl}^2 + I_h^2)R_s \quad (2.48)$$

$$P_r = 3(I_{rl}^2 + I_h^2)R_r \quad (2.49)$$

เมื่อ  $I_{sl}, I_{rl}$  เป็นค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานของสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อกระแสฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าสูญเสียที่ขดลวดและค่าสูญเสียจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและผลจากความถี่ฮาร์โมนิกที่ทำให้กระแสไหลเฉพาะที่ผิวของแกนเหล็ก (Skin effect) โดยเฉพาะที่ความถี่ที่โรเตอร์

ในการเกิดฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำยังทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque pulsation) ขึ้นเนื่องจากการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสโรเตอร์ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ กัน แรงบิดจะถูกอธิบายด้วยเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ, กระแสที่โรเตอร์และมุมระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศกับกระแสที่โรเตอร์ซึ่งเขียนไว้ในสมการที่ 2.26 สำหรับที่ความถี่มูลฐานหรือที่ความถี่ฮาร์มอนิกใดๆค่ามุม  $\delta$  จะมีค่าคงที่ทำให้ค่าแรงบิดที่ได้มีเพียงทิศทางเดียว และองค์ประกอบฮาร์มอนิกของช่องว่างอากาศจะเหนี่ยวนำกระแสโรเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกเดียวกันทำให้แรงบิดหมุนไปในทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ โดยที่แรงบิดฮาร์มอนิกอันดับเจ็ดจะบวกกับแรงบิดมูลฐานแต่แรงบิดฮาร์มอนิกอันดับห้าจะตรงกันข้ามกับแรงบิดมูลฐานดังแสดงในรูปที่ 2.27a



รูปที่ 2.27 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงบิดฮาร์มอนิก

การกระเพื่อมของแรงบิดจะเกิดขึ้นเมื่อค่า  $\delta$  เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและเกิดการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่หนึ่งกับกระแสโรเตอร์ที่ความถี่ใดๆ, และค่า  $\delta$  ที่เปลี่ยนตามอัตราความแตกต่างของความเร็วในการหมุนของเฟสเซอร์ การกระเพื่อมของแรงบิดสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของซูเปอร์โพสิชันของเฟสเซอร์ เส้นแรงแม่เหล็กและกระแสโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปตามความถี่ในเฟสเซอร์ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.27a แรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสโรเตอร์ที่แต่ละอันดับ ที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะไม่นำค่าความต้านทานมาคิดในวงจรดังนั้นจึงทำให้กระแสโรเตอร์ล้าหลังออกไปเป็นมุม  $180^\circ$  ในรูปที่ 2.27b ถูกสร้างขึ้นจากรูป 2.27a โดยให้เฟสเซอร์ที่หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็ว  $\omega_c$  เป็นเฟสเซอร์ที่ความถี่มูลฐานแบบหยุด

นิ่ง (Stationary) จากไดอะแกรมสามารถเห็นแรงบิดฮาร์มอนิกอันดับหกที่ถูกสร้างขึ้นจากการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสโรเตอร์ที่ความถี่มูลฐานกับเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสโรเตอร์ที่ฮาร์มอนิกอันดับห้าและอันดับเจ็ดซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{e6} = K[\psi_{1m}I_{7r} \sin(\pi - 6\omega_e t) + \psi_{7m}I_{1r} \sin(\delta + 6\omega_e t) + \psi_{1m}I_{5r} \sin(\pi - 6\omega_e t) + \psi_{5m}I_{1r} \sin(\delta - 6\omega_e t)] \quad (2.50)$$

$$T_{e6} = K[\psi_{1m}(I_{7r} - I_{5r})\sin 6\omega_e t + I_{1r}(\psi_{7m} + \psi_{5m})\cos 6\omega_e t] \quad (2.51)$$

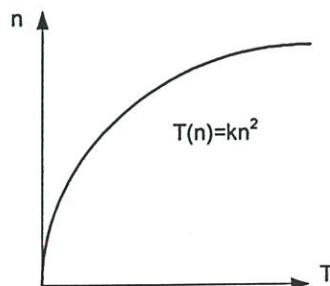
เมื่อ  $\delta = 90^\circ$  เนื่องจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าน้อยมากทำให้เทอมหลังของสมการที่ 2.51 สามารถตัดออกได้

การกระเพื่อมของแรงบิดจะเป็นผลให้เกิดการแปรปรวนของความเร็วรอบและการสั่นของเพลามอเตอร์ซึ่งทำให้เกิดการสึกหรอของระบบส่งกำลังได้

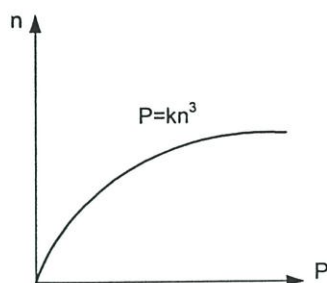
#### 2.4.4 ตัวอย่างและลักษณะของแรงบิดโหลด

การพิจารณาพฤติกรรมความต้องการของแรงบิดโหลดก็เพื่อใช้ในการเลือกและปรับตั้งค่าของอุปกรณ์ควบคุมและมอเตอร์เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับพฤติกรรมความต้องการของแรงบิดโหลด เพื่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยซึ่งแรงบิด โหลดสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆได้ ดังนี้[7]

1.แบบแรงบิด โหลดแปรผันกำลังสองกับความเร็ว แรงบิดโหลดประเภทนี้เป็นในกรณีของปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) เครื่องเป่าลม (Blowers) พัดลม (Fans) ซึ่งมีคุณลักษณะของแรงบิดและการใช้กำลังไฟฟ้าที่รอบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 ลักษณะ โหลดที่แรงบิดแปรผันกำลังสองกับความเร็วรอบ



รูปที่ 2.29 ลักษณะโหลดที่กำลังแปรผันกำลังสามกับความเร็วรอบ

จากรูปเราสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบได้ดังนี้

จากสมการ  $P = T\omega$

เนื่องจาก  $T = k\omega^2$  (2.52)

เพราะฉะนั้น  $P = (k\omega^2)\omega$

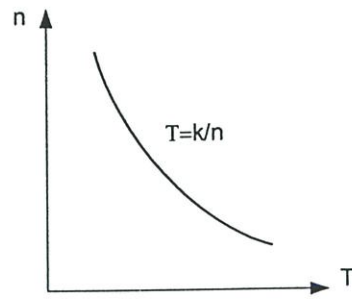
$$P = k\omega^3 \quad (2.53)$$

เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไปจะสามารถหาลำดับไฟฟ้าใหม่ได้ดังนี้

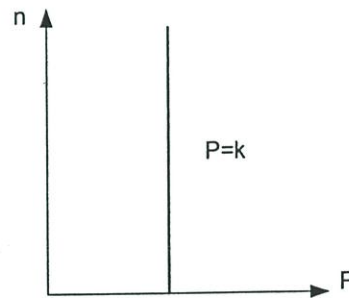
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (2.54)$$

จะเห็นได้ว่าโหลดที่แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบกำลังสองการเปลี่ยนของความเร็วจะทำให้แรงบิดและกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างมาก

2.แบบแรงบิดโหลดแปรผันกับความเร็วรอบ แรงบิดโหลดประเภทนี้ได้แก่เครื่องมือวน (Coiler drive) ต่างๆ เช่น แผ่นเหล็ก กระดาษ พลาสติก ซึ่งมีคุณลักษณะของแรงบิดและการใช้กำลังไฟฟ้าที่รอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และ 2.31



รูปที่ 2.30 ลักษณะโหนดแบบแปรผกผันกับความเร็วรอบ



รูปที่ 2.31 ลักษณะกำลังที่โหนดแบบแปรผกผันกับความเร็วรอบ

จากรูปเราสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบ ได้ดังนี้

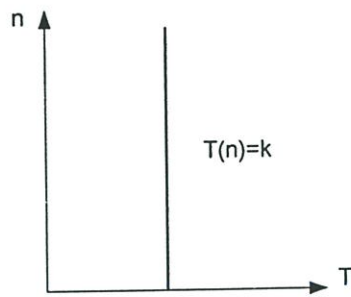
จากสมการ  $P = T\omega$

เนื่องจาก  $T = \frac{k}{\omega}$

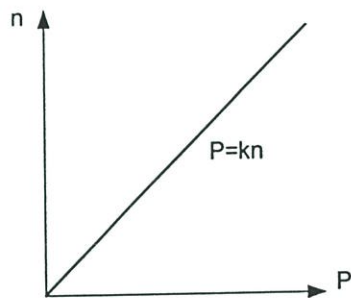
ดังนั้น  $P = k$  (2.55)

จากสมการที่ 2.55 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ขับเคลื่อนโหนดจะมีค่าคงที่ไม่ว่าจะทำงานที่ความเร็วรอบใดๆก็ตาม

3. โหนดที่มีแรงบิดคงที่ แรงบิดโหนดนี้เป็นโหนดจำพวกรอกและเครน (Crane-hoist) สายพานลำเลียงที่อัตราเร็วต่ำของรอกแรงบิดจะต้องรักษาไว้ให้ได้มากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งแรงบิดจะคงที่และเป็นอิสระจากความเร็ว



รูปที่ 2.32 ลักษณะโพลดแบบแรงบิดคงที่



รูปที่ 2.33 ลักษณะกำลังที่มีโพลดแบบแรงบิดคงที่

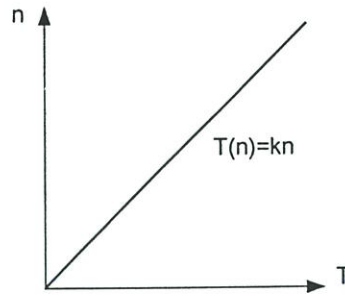
จากสมการ  $P = T\omega$

เนื่องจาก  $T = k$

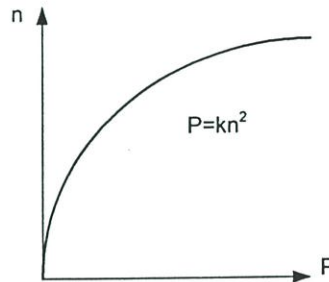
ดังนั้น  $P = k\omega$  (2.56)

จากสมการที่ 2.56 จะเห็นได้ว่าการที่ความเร็วรอบเปลี่ยนไปจะมีผลต่อการใช้กำลังไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกันซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $k$  ของระบบซึ่งก็คือค่าแรงบิดนั่นเอง

4.แบบแรงบิดโพลดแปรผันตรงกับความเร็วรอบ แรงบิดโพลดประเภทนี้ได้แก่รถไฟฟา เครื่องพ่น เครื่องกดเรียบซึ่งมีคุณลักษณะของแรงบิดและการใช้กำลังไฟฟ้าที่รอบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.34 และ 2.35



รูปที่ 2.34 ลักษณะโพลแบบแปรผันตรงกับความเร็วรอบ



รูปที่ 2.35 ลักษณะกำลังที่โพลแบบแปรผันตรงกับความเร็วรอบ

จากรูปเราสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบได้ดังนี้

จากสมการ  $P = T\omega$

เนื่องจาก  $T = k\omega$  (2.57)

เพราะฉะนั้น  $P = (k\omega)\omega$

$$P = k\omega^2 \quad (2.58)$$

เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไปจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ได้ดังนี้

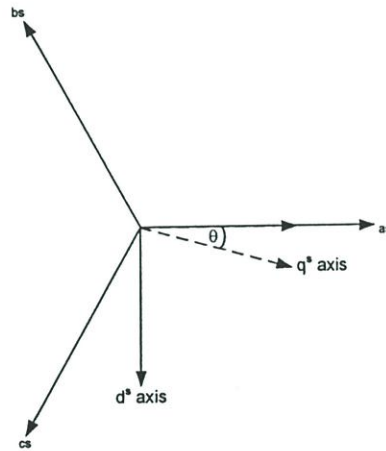
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2.59)$$

จะเห็นได้ว่าโพลที่แรงบิดแปรผันตรงตามความเร็วรอบการเปลี่ยนของความเร็วจะมีผลต่อการใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างชัดเจนเนื่องจากกำลังไฟฟ้าแปรผันตรงกับกำลังสองของความเร็วรอบ

### 2.4.5 ระบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรมุมูลย์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้องในสถานะคงตัวเท่านั้น ส่วนวิธีการวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ในสถานะเริ่มเดินนั้นจะใช้รูปแบบจำลองทางพลวัต (Dynamic model) ซึ่งอธิบายได้โดยใช้สมการอนุพันธ์กับตัวแปรที่เปลี่ยนไปตามเวลา

ถ้าให้แหล่งจ่าย 3 เฟสเป็นแบบสมมาตรซึ่งเป็นแบบทั่วไปที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทฤษฎี 2 แกนหรือ แกน คิว – ดี (d – q axis) ถูกนำมาใช้ในแบบจำลองทางพลวัต ในทฤษฎีนี้ ตัวแปรเวลาได้ถูกกำจัดและตัวแปรและค่าพารามิเตอร์อธิบายได้ในแกนหมุนฉากแกน คิว – ดี (d – q axis) ระบบจำลองทางพลวัตแบบดี-คิว สามารถอธิบายได้ทั้งในโครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) และโครงอ้างอิงแบบหมุน (Rotating reference frame) โดยการแปลงแกนแรงดันหรือกระแสในระบบไฟฟ้า 3 เฟสมาเป็นแบบระบบ 2 แกน ดังรูปที่ 2.36[3]



รูปที่ 2.36 การแปลงแกนจากระบบ 3 แกน ไปเป็นระบบ 2 แกน

ในรูปที่ 2.36 ถ้ากำหนดให้มุม  $\theta$  เท่ากับศูนย์จะสามารถหาค่าของแกน คิว – ดี แบบโครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) ได้ตามสมการนี้

$$v_{as} = v_{qs}^s \quad (2.60)$$

$$v_{bs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.61)$$

$$v_{cs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.62)$$

และ

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = v_{as} \quad (2.63)$$

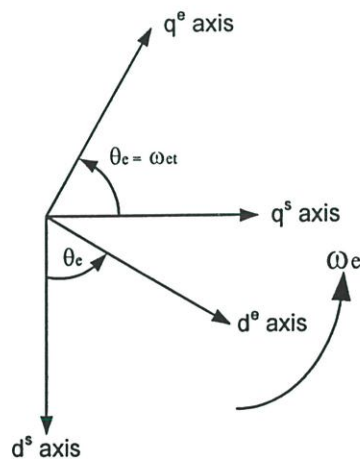
$$v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}v_{cs} \quad (2.64)$$

ในสมการ 2.63 และ 2.64 สามารถแปลงไปเป็นแบบโครงอ้างอิงแบบหมุน (Rotating reference frame) ได้เป็น

$$v_{qs}^e = v_{qs}^s \cos \omega_e t - v_{ds}^s \sin \omega_e t \quad (2.65)$$

$$v_{ds}^e = v_{qs}^s \sin \omega_e t + v_{ds}^s \cos \omega_e t \quad (2.66)$$

เมื่อ  $\omega_e$  เป็นความเร็วเชิงมุมเชิงโคจร



รูปที่ 2.37 การแปลงแกนแบบโครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่งไปเป็นโครงอ้างอิงแบบหมุน

จากแกนอ้างอิง 3 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะเขียนเป็นสมการทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เป็นเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \quad (2.67)$$

เมื่อ  $\vec{v}_s, \vec{i}_s, \vec{\psi}_s$  เป็นค่า แรงดัน, กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ ช่วงขณะ ของโครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่งและถ้าแกนตั้งฉากกันหมุนไปด้วยความเร็ว  $\omega_e$  จากสมการที่ 2.67 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s^s}{dt} + \bar{\omega}_e \times \bar{\psi}_s \quad (2.68)$$

ในส่วนของ  $\bar{\omega}_e \times \bar{\psi}_s$  ที่เพิ่มขึ้นมากำหนดเป็นแรงดันที่เกิดจากการหมุนของโครงอ้างอิง และเขียนในรูปของระบบ 2 แกนแบบโครงอ้างอิงแบบหมุนได้เป็น

$$\bar{v}_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \quad (2.69)$$

$$\bar{v}_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (2.70)$$

กำหนดให้มอเตอร์หยุดนิ่ง ( $\omega_r = 0$ ) จะได้สมการทางด้านโรเตอร์เป็นดังนี้

$$\bar{v}_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_e \psi_{dr} \quad (2.71)$$

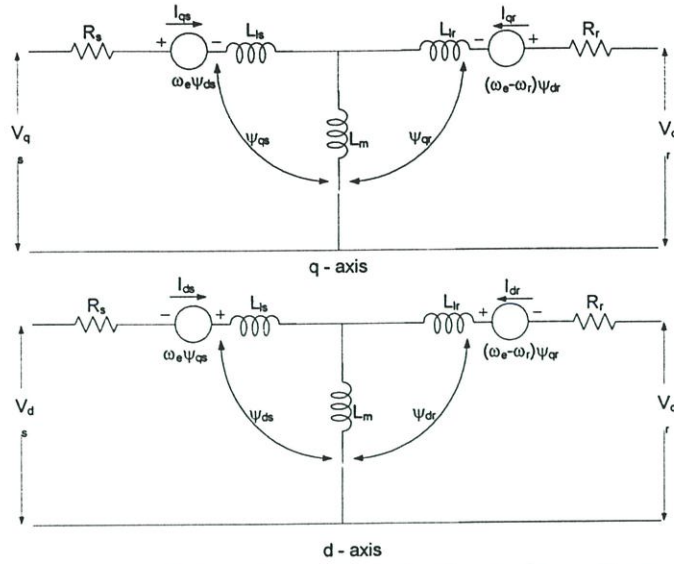
$$\bar{v}_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_e \psi_{qr} \quad (2.72)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว  $\omega_r$  แกน คิว - ดี จะหมุนด้วยความเร็ว  $\omega_e - \omega_r$  ดังนั้นสมการทางโรเตอร์จะได้เป็น

$$\bar{v}_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.73)$$

$$\bar{v}_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.74)$$

และนำสมการที่ 2.69, 2.70 และ 2.73, 2.74 มาเขียนเป็นวงจรมมูลย์ของมอเตอร์ที่วิเคราะห์ทางพลวัตได้เป็นตามรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 วงจรสมมูลย์ คิว – ดี ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โครงสร้างแบบหมุน

ในวงจรสมมูลย์ที่แสดงในรูปสามารถอธิบายค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อง (Flux linkage) ในรูปแบบของกระแสและสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\psi_{qs} = L_{ls}i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.75)$$

$$\psi_{qr} = L_{lr}i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.76)$$

$$\psi_{ds} = L_{ls}i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.77)$$

$$\psi_{dr} = L_{lr}i_{dr} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.78)$$

นำสมการของเส้นแรงแม่เหล็กและสมการวงจรสมมูลย์ทางด้านสแตเตอร์และโรเตอร์แบบโครงสร้างหมุนมาเขียนแบบจำลองพลวัตทางคณิตศาสตร์ในรูปของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็นตามสมการที่ 2.79

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & \omega_e L_s & SL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + SL_s & -\omega_e L_m & SL_m \\ SL_m & (\omega_e - \omega_r)L_m & R_r + SL_r & (\omega_e - \omega_r)L_r \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & SL_m & -(\omega_e - \omega_r)L_r & R_r + SL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

เมื่อ  $s$  เป็นตัวกระทำทางลาปลาซ ในมอเตอร์แบบกรงกระรอกค้ำ โรเตอร์จะถูกลัดวงจร ดังนั้นค่า  $v_{dr}$  และ  $v_{qr}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ในสมการที่ 2.79 ค่า  $\omega_r$  จะไม่เป็นค่าคงที่แต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของโรเตอร์โดยเขียนเป็นสมการของแรงบิดได้ดังนี้

$$T_e - T_L = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.80)$$

จากสมการที่ 2.26 เขียนในรูปขององค์ประกอบ คิว - ดี ได้เป็น

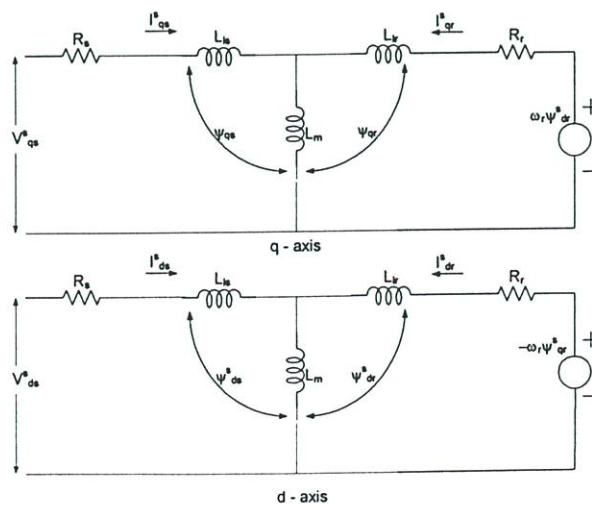
$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qr} - \psi_{qm} i_{dr}) \quad (2.81)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qs} - \psi_{qm} i_{ds}) \quad (2.82)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.83)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2.84)$$

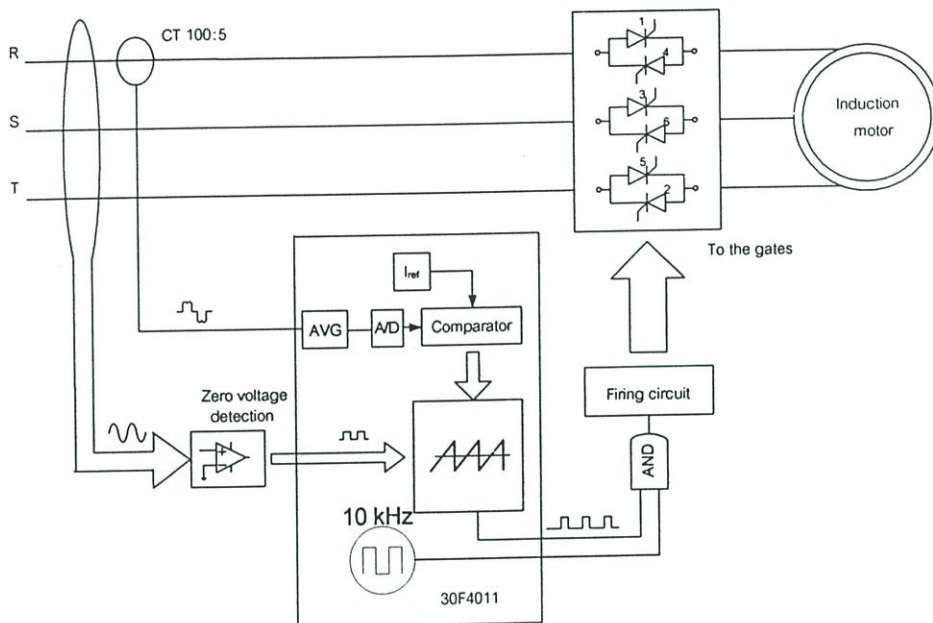
ในสมการที่ 2.79 ถ้ากำหนดให้  $\omega_e = 0$  จะได้สมการที่อยู่ในรูปของโครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 วงจรสมมูลย์ คิว - ดี ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โครงอ้างอิงแบบหยุดนิ่ง

## 2.5 หลักการทำงานของการทำงานของการเริ่มเดินแบบนิ่มนวล

การเริ่มเดินแบบนิ่มนวลทำงานด้วยการลดแรงดันที่จ่ายมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในที่นี้ใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันซึ่งจะคล้ายกับการใช้ตัวต้านทานปฐมภูมิหรือตัวเหนี่ยวนำปฐมภูมิต่ออนุกรมระหว่างแหล่งจ่ายกับมอเตอร์ หลักการทำงานจะเป็นเหมือนกับวงจรควบคุมกระแสลัดซึ่งแสดงแผนผังระบบในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 แผนผังรูปแบบของระบบ

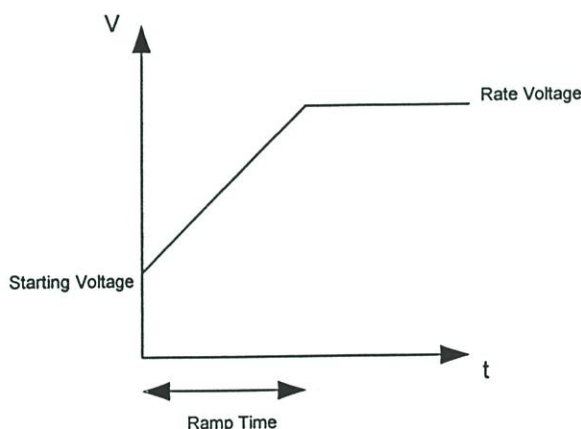
จากแผนผังของระบบมอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกควบคุมแรงดันที่จ่ายให้โดยใช้เอสซีอาร์ในลักษณะขนานแบบตรงกันข้ามกันเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสลัดเป็นไฟฟ้ากระแสลัดเพื่อใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลัดที่จ่ายให้กับมอเตอร์และควบคุมกระแสให้ได้ตามที่กำหนดไว้ก่อน โดยการป้อนสัญญาณกระแสผ่านหม้อแปลงกระแสนำมาควบคุมเปรียบเทียบเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์อย่างเหมาะสมและได้กระแสตามที่ได้กำหนดไว้ที่เหมาะสมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม

ข้อได้เปรียบของการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อเทียบการเริ่มเดินโดยวิธีอื่นๆเช่นการใช้ Step R คือพลังงานสูญเสียขณะเริ่มเดินเมื่อเทียบกับสวิตซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีค่าสูญเสียต่ำกว่า ข้อได้เปรียบอื่นๆของสวิตซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังคือการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินจะทำได้ง่ายและเหมาะสมกับเงื่อนไขของการเริ่มเดินมอเตอร์ โดยการปรับมุมจุดชนวนเพื่อเพิ่มและลดแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ การควบคุมสามารถกำหนดค่าไว้ก่อนเช่นเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าบนพื้นฐานของเวลาคือกำหนดระยะเวลาเริ่มเดินไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะ

เป็นวิธีการควบคุมแบบวงเปิด และการควบคุมทางพลวัตอย่างเช่นการควบคุมกระแสเริ่มเดินและการควบคุมแรงบิดซึ่งจะเป็นวิธีการควบคุมแบบวงปิด

### 2.5.1 การควบคุมแบบวงเปิด

การเริ่มเดินแบบนิ่มนวลโดยการควบคุมแบบวงเปิดเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอิสระไม่ขึ้นกับค่าของกระแสหรือความเร็วรอบ การควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมบนพื้นฐานของเวลาคือเวลาการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า (Time Voltage Ramp TVR) โดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มเดินไว้ก่อนและเพิ่มแรงดันขึ้นจนถึงแรงดันพิกัดตามเวลาที่กำหนด



รูปที่ 2.41 การเริ่มเดินแบบนิ่มนวลโดยการควบคุมแบบวงเปิด

### 2.5.2 การควบคุมแบบวงปิด

การควบคุมแบบวงปิดเป็นควบคุมที่แสดงถึงผลที่ได้มาจากการควบคุมและชดเชยแรงดันไฟฟ้าทางพลวัตเพื่อผลตอบสนองที่ต้องการ การควบคุมแบบวงปิด โดยมากจะควบคุมกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดิน , การควบคุมอัตราเร่งคงที่หรือการเพิ่มความเร็วแบบเชิงเส้น

การควบคุมกระแสเริ่มเดินเป็นวิธีการควบคุมแบบวงปิดที่พัฒนามาจากวิธีแบบเวลาการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า (Time Voltage Ramp TVR) โดยการเปลี่ยนการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเมื่อเทียบกับเวลาเป็นแบบไม่เชิงเส้นและไม่ขึ้นกับเวลาแต่จะเป็นผลตอบสนองจากการควบคุมกระแสตามที่กำหนดและค่าแรงบิดโหลด

## 2.6 สรุป

การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมาใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการลดกระแสขณะเริ่มเดินสามารถกระทำโดยหลักการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรภายในของมอเตอร์เมื่อมีการปรับและควบคุมค่าพารามเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมและได้นำวงจรไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 3

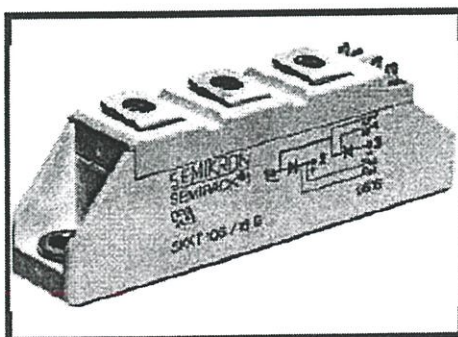
# การออกแบบวงจรและอุปกรณ์

จากทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2 นำมาทำการออกแบบวงจรและรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้เริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบนิ่มนวลให้เหมาะสมกับพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาออกแบบเป็นส่วนของอุปกรณ์ สวิตซ์ในวงจรกำลังและส่วนของวงจรควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 7.5 kW ในการทดสอบ จึงนำมาพิจารณาเพื่อหาพิกัดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับและการเลือกใช้อุปกรณ์

### 3.1 การเลือกใช้อุปกรณ์ในวงจรกำลัง

#### 3.1.1 การเลือกไทรสเตอร์

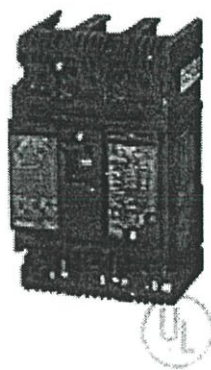
ในการเลือกใช้ใช้งานสวิตซ์นั้นจะต้องสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เพื่อที่จะให้มีความน่าเชื่อถือสูงอุปกรณ์ควรจะทนได้ไม่น้อยกว่า 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ใช้งาน จากที่กล่าวไว้ข้างต้นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้มีขนาด 7.5kw 3 เฟส จากข้อมูลทางผู้ผลิตมอเตอร์ที่เลือกใช้นั้นต้องการแรงดันไฟฟ้าขนาด 380/660 v,  $\Delta/Y$  กินกระแสพิกัดที่ 15.6/8.2 แอมป์ และมีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสเริ่มเดินและกระแสปกติที่พิกัดเท่ากับ 7 เท่า ซึ่งจะได้กระแสเริ่มเดินที่พิกัดเป็น 109 แอมป์ จึงเลือกใช้ ไทรสเตอร์แบบเอสซีอาร์รุ่น SKKT 72 ซึ่งสามารถรับกระแสสูงสุดต่อเนื่องได้ 125 A และทนแรงดันไฟฟ้าได้ 1200 V ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 3.1 โมดูลของเอสซีอาร์รุ่น SKKT 72

### 3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ตัดตอน

อุปกรณ์ตัดตอนที่ใช้ในวงจรเพื่อเปิดปิดวงจรและใช้ป้องกันมอเตอร์และวงจรกำลังอื่นเนื่องมาจากกระแสเกินพิกัดและเกิดการลัดวงจรซึ่งสามารถออกแบบไปตามหลักการออกแบบไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม การใช้งานมอเตอร์ทั่วไปแบบไม่ต่อเนื่องเพราะในการทำงานวิจัยจะต่างจากการใช้งานจริงเนื่องจากการเริ่มเดินมอเตอร์บ่อยครั้งจากการทดสอบซึ่งอุปกรณ์ตัดตอนควรจะมีพิกัดของอุปกรณ์ตัดตอนที่ร้อยละ 115-250 ของพิกัดกระแสเต็มที่ของมอเตอร์ [10] จากมอเตอร์ที่กล่าวในหัวข้อที่แล้วจึงเลือกใช้อุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ (Circuit breaker) แบบตัดทันทีของ FUJI รุ่น SA63B ขนาด 60 AT , 100AF



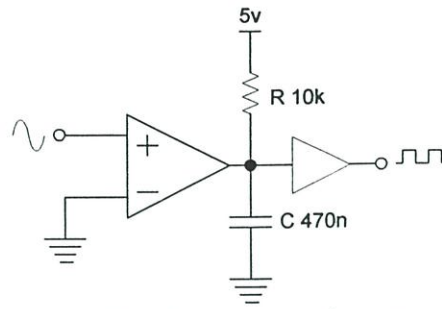
รูปที่ 3.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์รุ่น SA63B

## 3.2 การออกแบบวงจรควบคุม

จากวงจรของการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.40 จะเห็นว่าในส่วนของวงจรควบคุมจะประกอบด้วยวงจรต่างๆเช่น วงจรตรวจจับค่าศูนย์หรือวงจรสร้างจังหวะการจุดชนวน วงจรส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า, วงจรส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้า, วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนซึ่งอธิบายได้เป็นหัวข้อดังนี้

### 3.2.1 วงจรสร้างจังหวะการจุดชนวน

วงจรสร้างจังหวะการจุดชนวนใช้สำหรับตรวจหาค่าศูนย์ที่สัญญาณชาน (Zero voltage detection) เพื่อหาจังหวะเริ่มนับมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) ของไทรสเตอร์ทั้งด้านบวกและด้านลบในแต่ละเฟสเพื่อให้ได้ค่ามุมของแรงดันที่ตรงกับมุมจุดชนวนที่ต้องการในแต่ละไซเคิล

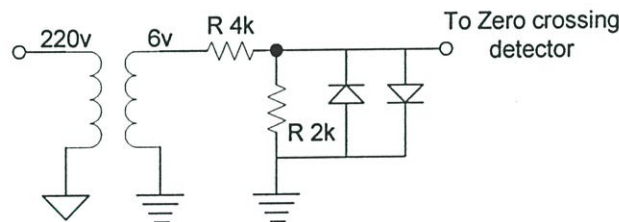


รูปที่ 3.3 วงจรเปรียบเทียบหาค่าศูนย์กลางของสัญญาณซายน์

ในรูปที่ 3.3 เป็นวงจรเปรียบเทียบหาค่าศูนย์กลางของสัญญาณซายน์ที่ใช้ออฟแอมป์หาจังหวะเริ่มนับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์โดยให้สัญญาณขาออกเป็นรหัส โดยให้ด้านบวกของสัญญาณซายน์เท่ากับ 1 (5v) และด้านลบของสัญญาณซายน์เท่ากับ 0 (0v) ซึ่งจะส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อไปสร้างสัญญาณจุดชนวนต่อไป

### 3.2.2 วงจรส่งสัญญาณแรงดัน

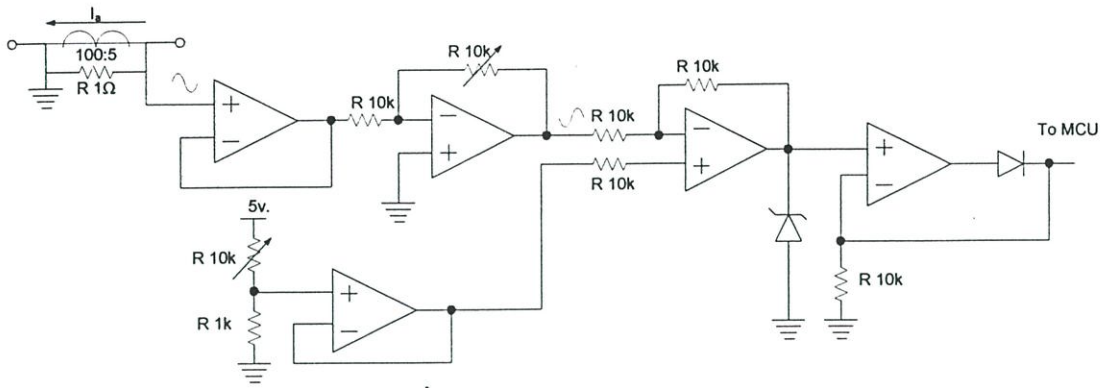
วงจรส่งสัญญาณแรงดันใช้สำหรับส่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสนำไปผ่านวงจรตรวจจับค่าศูนย์กลางโดยลดขนาดแรงดันด้วยหม้อแปลงและแบ่งแรงดันด้วยตัวความต้านทาน (Voltage divider) และจำกัดขนาดแรงดันที่จะนำไปเปรียบเทียบด้วยไดโอดเพื่อป้องกันการเสียหายของวงจร



รูปที่ 3.4 วงจรส่งสัญญาณแรงดัน

### 3.2.3 วงจรส่งสัญญาณกระแส

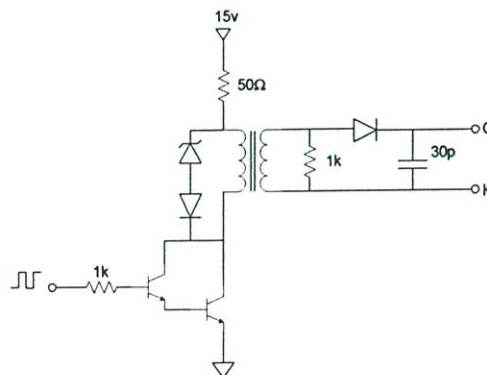
ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำป้อนกลับมาเพื่อทำการเปรียบเทียบและควบคุมเพื่อรักษาระดับกระแสให้ได้ค่าตามที่กำหนดไว้ โดยใช้หม้อแปลงกระแส (Current transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ลดขนาดของกระแสผ่านวงจรขยายเพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณกระแสที่ต้องการนำไปเข้ารวมกับวงจรบวกเพื่อยกระดับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นเป็นสัญญาณไฟตรงแล้วจึงส่งสัญญาณที่ได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการควบคุม



รูปที่ 3.5 วงจรส่งสัญญาณกระแส

### 3.2.4 วงจรจุดชนวนเอสซีอาร์

จากหลักการการทำงานของเอสซีอาร์เมื่อมีสัญญาณจุดชนวนในระดับกระแสและช่วงเวลาที่เพียงพอจะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ตลอดจนกระทั่งไทรสเตอร์ถูกไบอัสกลับแต่ในบางเหตุการณ์ที่เอสซีอาร์ไม่สามารถนำกระแสในมุมที่เกิดสัญญาณจุดชนวนได้จึงมีการสร้างสัญญาณจุดชนวนออกเป็นชุดตลอดช่วงการไบอัสตามของเอสซีอาร์และสัญญาณจุดชนวนที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ในวงจรควบคุมจะมีระดับแรงดันและมีศักดาณินเปรียบเทียบที่จุดเดียวกันและสัญญาณจุดชนวนเอสซีอาร์จะต้องเป็นสัญญาณที่เทียบระหว่างขา เกท (G) และขาคาโทด (K) จึงออกแบบให้ใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อแยกสัญญาณจุดชนวนที่ได้ออกจากวงจรควบคุมและขยายสัญญาณเพื่อนำไปขับเอสซีอาร์

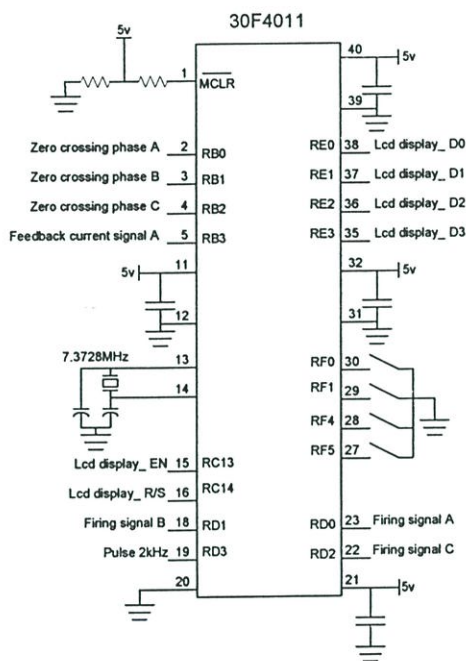


รูปที่ 3.6 วงจรจุดชนวนเอสซีอาร์

จากข้อมูลของเอสซีอาร์ที่แสดงในภาคผนวกค่ากระแส  $I_L$  ที่เอสซีอาร์ต้องการอยู่ที่ประมาณ 300mA และออกแบบแรงดันเกตอยู่ที่ 15v จึงออกแบบให้ความต้านทานจำกัดกระแสอยู่ที่ 50  $\Omega$  5w เพื่อให้ได้กระแสและแรงดันที่เอสซีอาร์ต้องการ

### 3.2.5 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

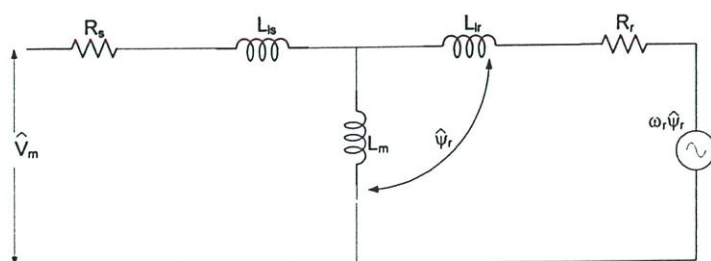
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPICs 30F4011 เป็นตัวควบคุมระบบการทำงานซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC ชนิด 16 บิต และในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 7.3728 MHz มีโมดูลไทมเมอร์ทำงานได้ทั้งแบบ 16 บิตและ 32 บิต มีชุดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต และมีคำสั่งและโมดูลอื่นๆที่เหมาะสมกับงานควบคุมมอเตอร์อีกมาก



รูปที่ 3.7 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.3 วิธีการควบคุมกระแสขณะเริ่มเดิน

จากทฤษฎีและหลักการต่างๆที่ได้กล่าวมานำมาหาวิธีควบคุมกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มเดินให้คงที่ตามค่าที่กำหนดไว้โดยการปรับค่ามุมจุดชนวนของเอสซีอาร์ให้แรงดันเพิ่มจนถึงแรงดันพิกัด จากวงจรสมมูลย์ทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 2.34 สามารถรวมวงจรเข้าด้วยกันได้เป็นตามวงจรรูปที่ 3.8[3]



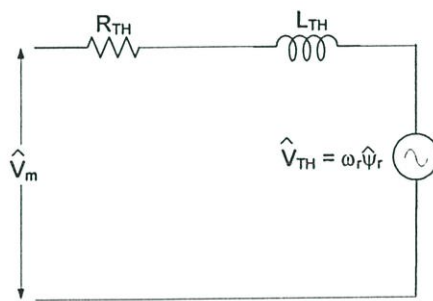
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โครงอ้างอิงแบบหุคหนึ่ง

ในวงจรรูปที่ 3.8 ค่า  $|\hat{V}_m|$  และ  $|\hat{\psi}_r|$  เป็นค่าสูงสุดของเฟสเซอร์ซึ่งหาได้จากการรวมเฟสเซอร์

$$\text{เมื่อ} \quad |\hat{V}_m| = \sqrt{v_{qs}^2 + v_{ds}^2}$$

$$|\hat{\psi}_r| = \sqrt{\psi_{qr}^2 + \psi_{dr}^2}$$

และจากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้เมื่อนำมาแปลงรูปวงจร โดยวิธีของเทวินินจะได้วงจรตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คิดแบบเทวินิน

โดยที่  $R_{TH} \approx R_s + R_r$  และ  $L_{TH} \approx L_{ls} + L_{lr}$  และ  $\hat{V}_{TH} \approx \omega_r \hat{\psi}_r$  สมมุติให้  $L_m$  มีค่ามากในขณะเริ่มเดิน ส่วนค่า  $\omega_r$  เป็นความเร็วที่โรเตอร์ซึ่งจะมีค่าเพิ่มจากศูนย์ที่ขณะหยุดนิ่งและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการแรงบิดที่ 2.80 จากสมการนี้ผลต่างระหว่างค่าแรงบิดเริ่มเดิน (Starting torque) และแรงบิดโหลด (Load torque) จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นการกำหนดมุมจุดชนวนเริ่มต้นให้กับเอสซีอาร์จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์มากพอที่จะสร้างแรงบิดให้เหมาะสมกับแรงบิดโหลดและค่าความฝืดของมอเตอร์เพื่อให้โรเตอร์เริ่มหมุนได้ซึ่งจากสมการที่ 2.40 จะเห็นได้ได้ว่าแรงบิดจะมีค่าเป็นยกกำลังเท่าของแรงดัน

$$T_e = kV^2 \quad (3.1)$$

โดยที่ค่า  $k$  เป็นค่าคงที่ขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง ( $s = 1$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$k = \frac{3PR_2}{2\omega_s \left\{ (R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right\}} \quad (3.2)$$

โดยที่	$P$	=	จำนวนขั้วของมอเตอร์
	$\omega_s$	=	ความเร็วเชิงมุมเชิง โครนัส (rad/s)
	$R_1$	=	ค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์
	$R_2$	=	ค่าความต้านทานของขดลวดที่โรเตอร์
	$X_1$	=	ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดที่สเตเตอร์
	$X_2$	=	ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดที่โรเตอร์

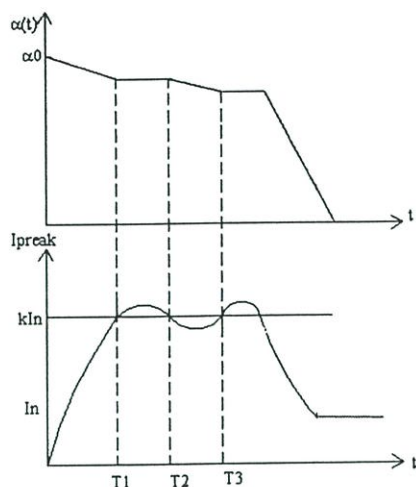
จากวิธีการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการลดค่าแรงดันจากการปรับมุมจุกชนวนของ เอสซีอาร์ซึ่งเป็นผลให้ค่ากระแสเริ่มเดินลดลงจึงทำให้แรงบิดเริ่มเดินมีค่าลดลงด้วยจากสมการ แรงบิดในสมการ 3.1 ทำให้เห็นว่าเมื่อแรงบิดเริ่มเดินมีค่าลดลงทำให้เวลาช่วงเวลาเริ่มเดินมีค่ามากขึ้นซึ่งแสดงในสมการที่ 3.3

$$\Delta t = \left( \frac{2}{P} \right) \frac{J}{T_e - T_L} \int d\omega_r \quad (3.3)$$

จากความสัมพันธ์ของวงจรในรูปที่ 3.9 และสมการที่ 3.3 เมื่อแรงดัน  $\hat{V}_m$  คงที่จะทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าลดลงซึ่งจะแปรผกผันกับความเร็วของโรเตอร์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 3.4

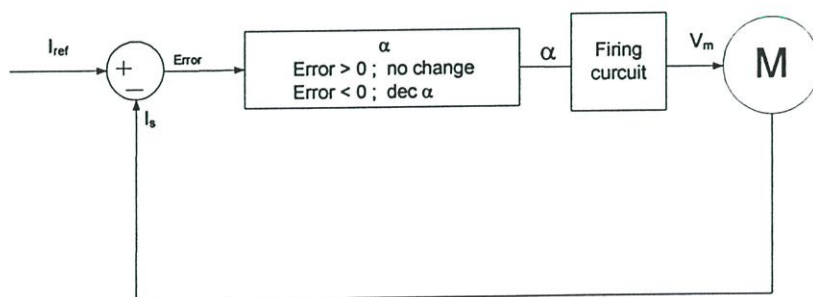
$$\hat{I}_m = \frac{\hat{V}_m - (\omega_r \hat{\psi}_r)}{R_{TH} + j\omega_e L_{TH}} \quad (3.4)$$

จากหลักการข้างต้นเพื่อที่จะทำการควบคุมกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่ โดยการควบคุมแรงดันช่วงเริ่มเดินให้เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์โดยการทำการเปรียบเทียบกระแสและกำหนดแรงดันเริ่มเดินให้เกิดมีแรงบิดเริ่มเดินมากพอเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซึ่งสามารถนำมาออกแบบเป็นวิธีการควบคุมกระแสซึ่งอธิบายได้เป็นตามรูปที่ 3.10

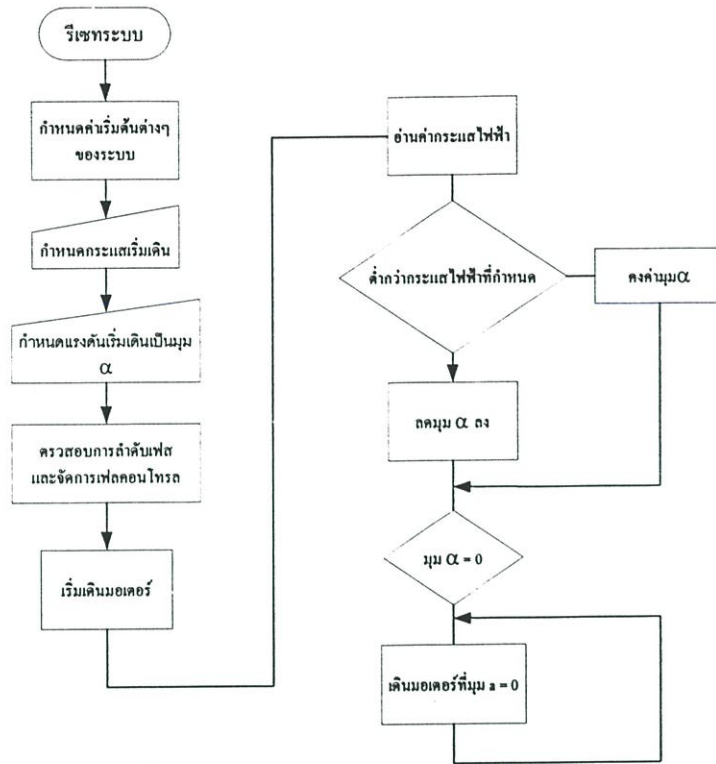


รูปที่ 3.10 วิธีการควบคุมกระแสเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 3.10 มุมจุดชนวน  $\alpha_0$  จะถูกกำหนดให้มีค่าเหมาะสมกับแรงดันซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.1 และทำการป้อนกระแสกลับเพื่อเปรียบเทียบกระแสเริ่มต้นกับกระแสที่กำหนดถ้ามีค่าน้อยกว่าชุดควบคุมจะทำการลดมุมจุดชนวนลงจนถึงที่เวลา  $t = T1$  สัญญาณกระแสที่ป้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้ชุดควบคุมจะคงที่ค่ามุมจุดชนวนไว้จนกระทั่งที่เวลา  $t = T2$  สัญญาณกระแสที่ป้อนกลับมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ชุดควบคุมจะลดค่ามุมจุดชนวนลงอีก จนกระแสเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัวชุดควบคุมจึงหยุดทำงานซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.4 และจากวิธีการควบคุมกระแสที่กล่าวมา ความชันของการลดค่ามุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ในแต่ละไซเคิลก็จะมีผลกับช่วงเวลาเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยตามสมการที่ 3.4 นั่นคือเราสามารถที่จะปรับเวลาเริ่มต้นหรืออัตราเร่งของมอเตอร์ได้โดยการปรับความชันของมุมจุดชนวนได้

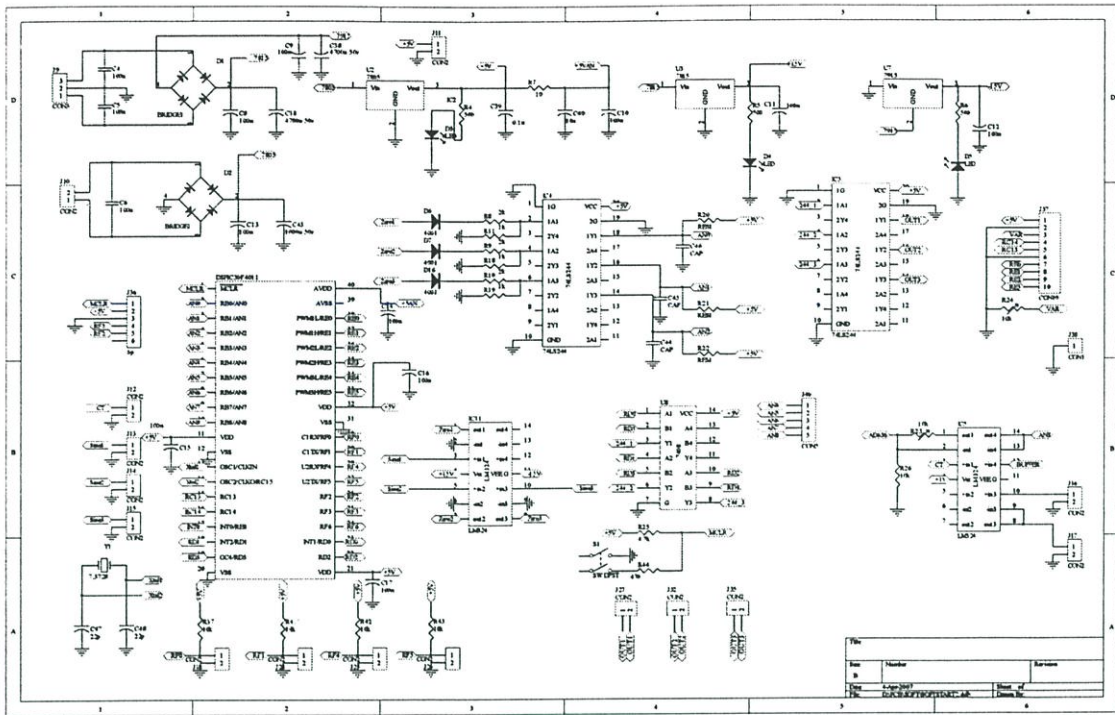


รูปที่ 3.11 วงจรปิดการควบคุมกระแสเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.12 แผนผังวิธีการควบคุมกระแสเริ่มเดิน

ในรูปที่ 3.12 เป็นแผนผังวิธีการควบคุมกระแสให้คงที่โดยเริ่มจากจัดการลบและกำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรมและทำการกำหนดกระแสไฟฟ้าเริ่มเดินตรงจุดนี้การกำหนดกระแสที่ต้องการต้องสอดคล้องกับขนาดของโหลดซึ่งถ้ากำหนดกระแสต่ำเกินไปจะทำให้มอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดมากพอที่จะขับมอเตอร์, ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ไม่ถึงความเร็วพิกัดหรือไม่สามารถเริ่มเดินได้เลย ในขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เริ่มเดินมอเตอร์เพื่อให้เกิดแรงบิดเริ่มเดินมากพอที่จะขับมอเตอร์ตามหลักการที่กล่าวมาข้างต้นต่อไปต้องทำการตรวจสอบลำดับของเฟสที่จ่ายให้กับระบบเนื่องจากเครื่องต้นแบบในการทดสอบไม่ได้ทำวงจรสำหรับกลับทางหมุนของมอเตอร์จึงต้องมีขั้นตอนในส่วนของงานเขียนโปรแกรมเพื่อป้องกันการกลับลำดับของเฟสที่จ่ายเข้ามา เมื่อเริ่มเดินมอเตอร์ในไซเคิลที่สองจะทำการอ่านค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์และนำมาทำการเปรียบเทียบและกระทำตามขั้นตอนการควบคุมกระแสในมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวจึงทำการคงค่ามุมจุกชนวนให้เท่ากับศูนย์ไว้เพื่อให้มอเตอร์ได้รับแรงดันพิกัด



รูปที่ 3.13 วงจรรวมของระบบ

### 3.4 สรุป

การออกแบบวงจรกำลังจะออกแบบตามพิกัดกระแสที่กำหนดเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์แบบ น้มนวลซึ่งเอสซีอาร์ที่นำมาใช้ทนกระแสอาร์เอ็มเอสได้ที่ 125 A หรือทนกระแสสูงสุดที่ 170A เพื่อ ความปลอดภัยไม่ควรออกแบบให้กระแสสูงสุดเกิน 75% ของกระแสพิกัดของเอสซีอาร์จึงควร ระวังไม่ควรทำการเริ่มเดินมอเตอร์แบบจ่ายแรงดันพิกัดโดยตรงเนื่องจากมอเตอร์มีกระแสสูงสุด เริ่มเดินที่ประมาณ 130-140A คือที่ประมาณ 75-80 %ของกระแสพิกัดของเอสซีอาร์

## บทที่ 4

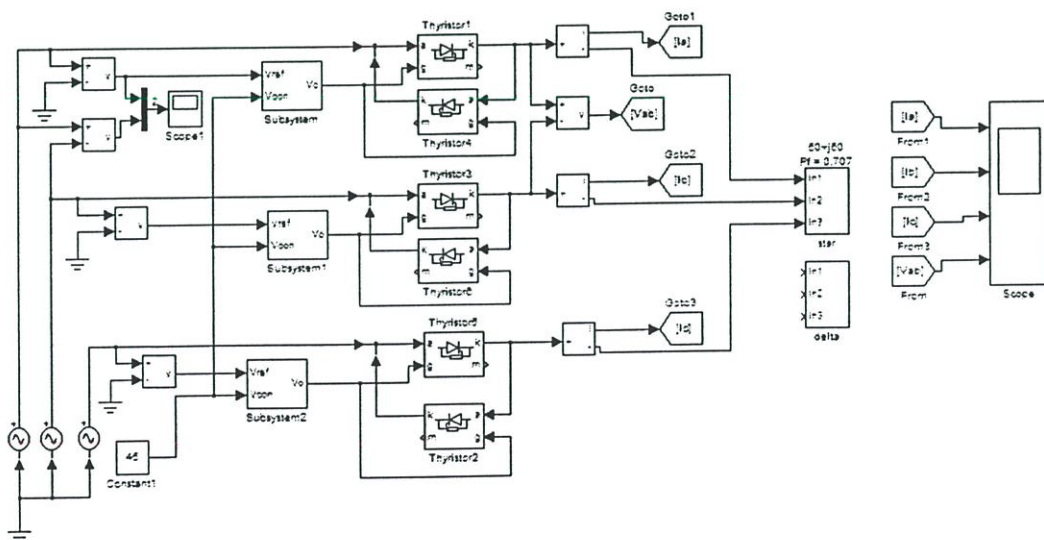
### การจำลองระบบและผลการทดสอบ

#### 4.1 การจำลองระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งสามารถจำลองระบบของวงจรควบคุมและวงจรกำลังซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้สร้างขึ้นจริงได้อย่างใกล้เคียงและแม่นยำ การจำลองระบบแบ่งออกเป็นส่วนของวงจรแปลงผันกำลังทั้งแบบโหลดความต้านทานและโหลดแบบอินดักทีฟซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงการทำงานของวงจรและผลกระทบต่างๆของวงจรซึ่งมีผลต่อการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำและส่วนของการเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลดค่าต่างๆและทราบถึงปฏิกิริยาของมอเตอร์ซึ่งเป็นผลมาจากวงจรแปลงผันกำลังเช่นฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสและการปรับค่าต่างๆในการเริ่มเดินให้เหมาะสมกับสภาพและขนาดของโหลด

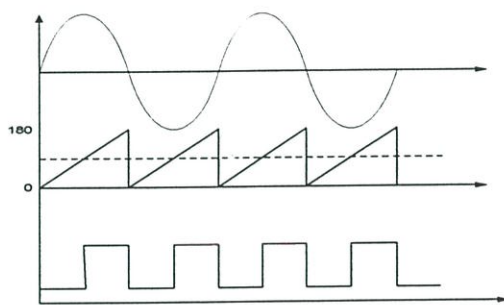
#### 4.1.1 การจำลองระบบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในงานวิจัยนี้จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink โดยทำการทดสอบวงจรที่โหลดชนิดต่างๆทั้งโหลดความต้านทานและโหลดแบบอินดักทีฟเพื่อทำความเข้าใจในการทำงานของวงจรที่มีค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ต่างๆกันซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมมุมจุดชนวนและกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

ในการจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจะใช้ตัวเอสซีอาร์จากไลบรารีของโปรแกรม Simulink ซึ่งทำการกำหนดค่าของวงจร snubber (Snubber) ให้มีค่าความต้านทานสูงๆ เพื่อเปิดวงจรเนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังในงานวิจัยนี้ไม่ต้องการวงจร snubber เนื่องจากไม่ได้อาศัยงานเอสซีอาร์ที่ความถี่สูง จากรูปที่ 4.1 กล้องระบบย่อย (Subsystem) เป็นระบบจำลองของวงจรจุดชนวนที่จ่ายให้กับขาเกทของไทรสเตอร์ซึ่งใช้หลักการของการตัดกันของสัญญาณฟันเลื่อย (Saw tooth wave) ที่ซิงโครไนซ์กับสัญญาณชานันท์ที่แหล่งจ่ายและสัญญาณค่าคงที่เพื่อปรับค่าควิตี้ไซเคิลของสัญญาณดังรูปที่ 4.2

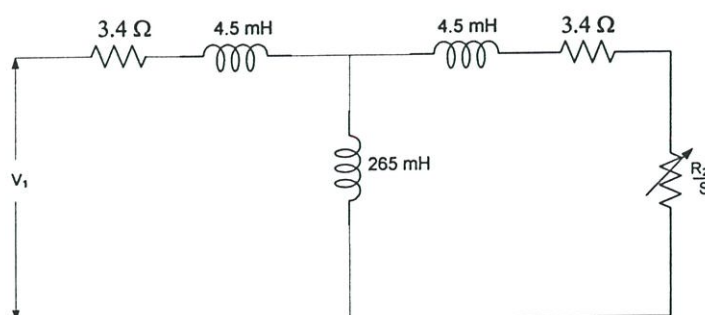


รูปที่ 4.2 หลักการการสร้างสัญญาณจุดชนวน

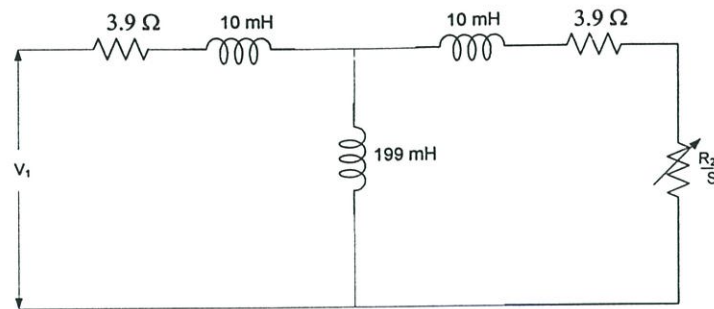
#### 4.1.2 การจำลองระบบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งสามารถจำลองระบบของวงจรควบคุมและวงจรกำลังซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้สร้างขึ้นจริงได้อย่างใกล้เคียงและแม่นยำ ซึ่งจะทำความเข้าใจถึงการทำงานของวงจรและผลกระทบต่างๆของวงจรซึ่งมีผลต่อการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำและส่วนของการเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โหลดค่าต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำไปใช้ในการจำลองได้มาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขนาดที่ได้ทำการทดสอบมีขนาดพิกัด 7.5 kW, 380/660 v, 15.6/8.0 A, 4 pole, 50 Hz ,1,440 rpm และขนาด 2.2 kW , 220/380 v 8.7/5.0 A 4 pole ,50 Hz ,1420 rpm ซึ่งจากการทดสอบได้รับค่าพารามิเตอร์ดังนี้

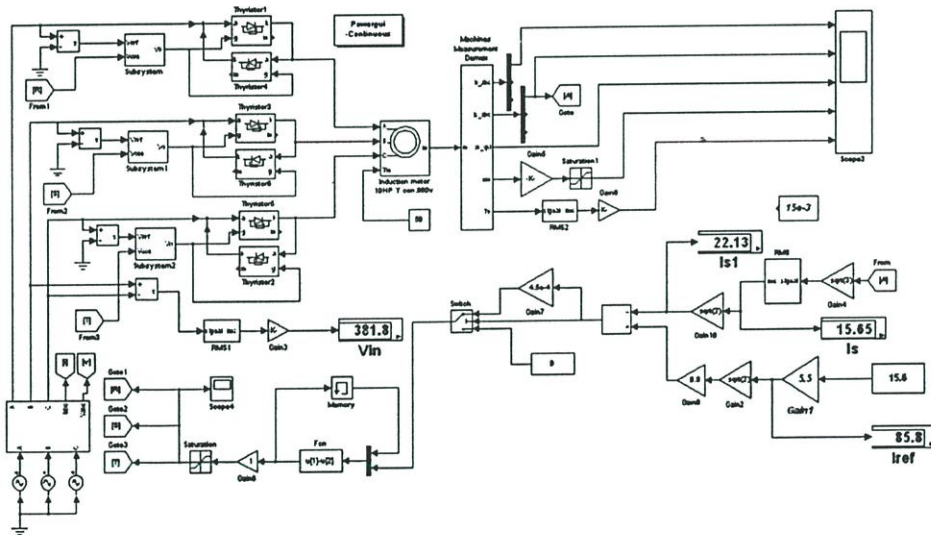


รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่ได้จากการทดสอบ

ในการจำลองระบบ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเรียกใช้ได้จากกล่องเครื่องมือที่มีอยู่ในโปรแกรมซึ่งสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์และพิกัดกำลังของมอเตอร์ได้ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีในโปรแกรมนั้นจะถือเป็นแบบสแตร์แต่ในการทดสอบจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 7.5 kW ที่นำมาใช้ต่อแบบเดลต้าเพื่อรับแรงดันไฟฟ้าที่ 380  $v_{rms}$  ในการจำลองจึงต้องมีการเปลี่ยนค่ากระแสและแรงดันที่ได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องตามการต่อขดลวดของมอเตอร์



รูปที่ 4.5 ระบบจำลองของการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ

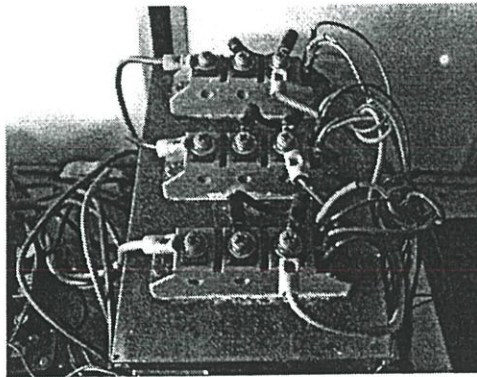
ในส่วนของวงจรควบคุมทำการจำลองตามลักษณะการควบคุมกระแสตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 โดยจะกำหนดกระแสควบคุมเป็นจำนวนเท่าของกระแสพิกัดและทำการเปลี่ยนขนาดของโหนดต่างๆกันที่กล่าวมาในข้างต้นเช่นแบบแรงบิด โหนดแบบคงที่และแบบแรงบิด โหนดแบบโมเมนต์ความเฉื่อยโดยมีขนาดของโหนดสูงสุดที่ 49.76 Nm โดยที่ทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ที่ไม่มีแรงบิด โหนดและแบบแรงบิด โหนดแบบ โมเมนต์ความเฉื่อยและทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ที่แรงบิด โหนดคงที่ โดยทำการปรับค่ากระแสเริ่มเดินให้เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์และและขนาดของโหนดที่ลักษณะของโหนดแบบต่างๆเพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบ

## 4.2 การทดสอบระบบการทำงาน

ในการทดสอบระบบการทำงานจะกระทำไปตามการจำลองเพื่อให้ได้ผลเปรียบเทียบกับ การจำลอง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกับการจำลองคือส่วนของวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้าและส่วนของการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 4.2.1 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบใช้โหลดความต้านทานขนาด 450  $\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำที่ขนาด 80mH และต่อโหลดแบบวายและแบบเคลด้าซึ่งได้ผลการทดสอบและนำไปวิเคราะห์หาผลของฮาร์มอนิก ที่เกิดขึ้นในวงจรซึ่งเกิดจากการทำงานของเอสซีอาร์ในวงจรกำลัง



รูปที่ 4.6 เอสซีอาร์ที่ใช้ในวงจรกำลัง

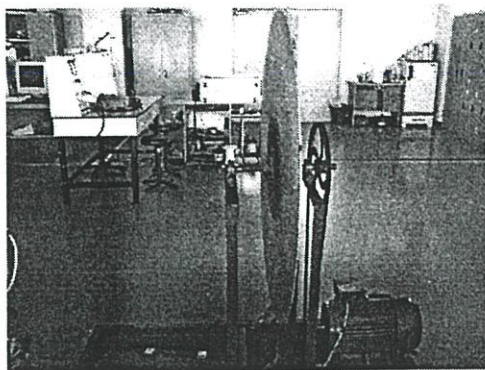
### 4.2.2 การทดสอบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ขนาดคือที่ขนาด 7.5 kW และ ขนาด 2.2 kW ซึ่งทำการทดสอบที่โหลดชนิดต่างๆโดยมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ทำการทดสอบที่ มอเตอร์ไม่มีโหลดและทดสอบกับโหลดแบบอัตราโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งถูกสร้างขึ้นจากจานโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 106 cm.มีน้ำหนัก 10 kg. ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะหาได้จากสมการ ดังนี้

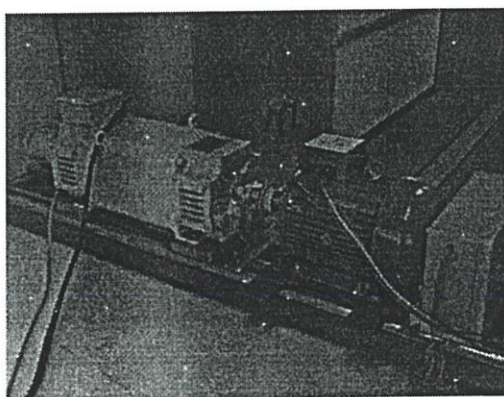
$$J = \frac{1}{2} mr^2 \quad \text{kg.m}^2 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีค่าเท่ากับ 1.25  $\text{kg.m}^2$  ซึ่งจะคูณกับอัตราความเร็วรอบของ มอเตอร์ซึ่งในการทดสอบได้ทดสอบความเร็วรอบลงด้วยมุ่เลขขนาด 4 นิ้วต่อ 14 นิ้วหรือมีอัตราทดลดที่ 0.28 เท่าคือความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ 420 รอบ / นาที

จากการทดสอบได้นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ค่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของวงจรและค่าพลังงานที่ใช้กันในการเริ่มเดินมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบหาค่ากระแสที่เหมาะสมในการเริ่มเดินมอเตอร์



รูปที่ 4.7 โหลดชนิดโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.8 มอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมแรงบิดคงที่แทนโหลดแบบแรงบิดคงที่

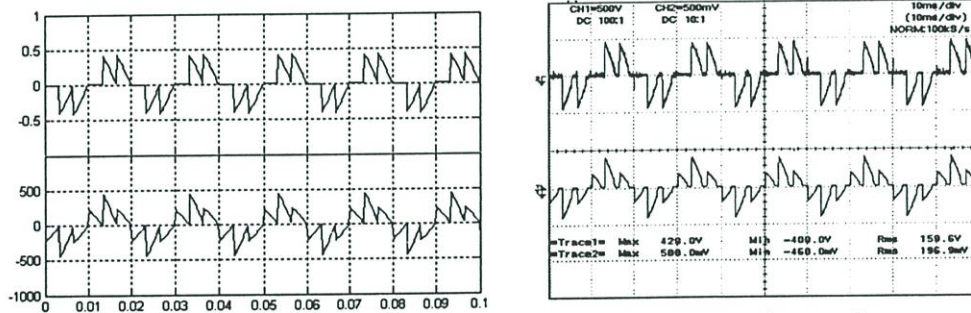
#### 4.2.3 ผลการจำลองและทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

จากการทำการจำลองและทำการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถทำให้เห็นความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นและได้ทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณและเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองและการทดสอบซึ่งได้ผลใกล้เคียงกันดังนี้



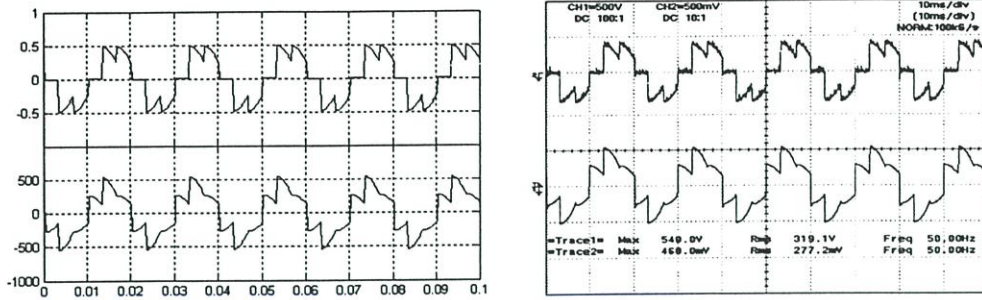
รูปที่ 4.9 บนแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์และล่างสัญญาณจุดชนวนที่  $\alpha = 60$  องศาโวลต์ R

จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.9 เป็นการจำลองวงจรแปลงผันกำลังที่ต่อโหลดแบบวายโดยใช้โหลดความต้านทานและกำหนดมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์เท่ากับ 60 องศาจะเห็นได้ว่าในทางอุดมคติในช่วงที่เอสซีอาร์นำกระแสโดยการทริกจากสัญญาณจุดชนวนจะไม่มีแรงดันตกคร่อมไดโอดเลย



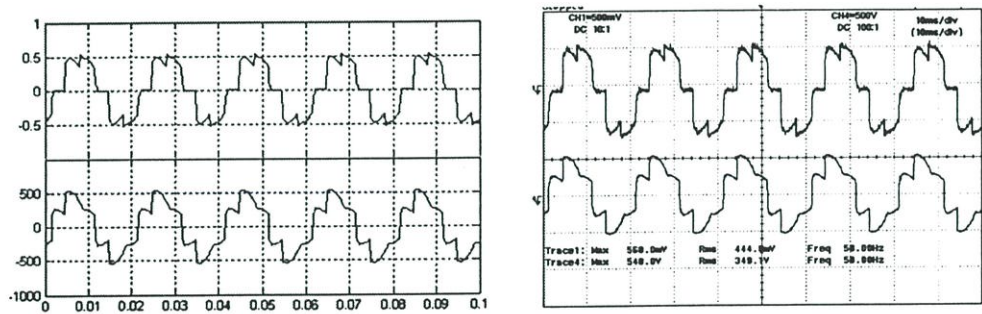
รูปที่ 4.10 บน แรงดันระหว่างสาย A-B และ ล่าง กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 90$  องศา โวลต์ R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย, การจำลอง ขวา, การทดสอบ)

จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.10 เป็นแรงดันที่ตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะเห็นได้ว่าลักษณะของรูปสัญญาณกระแสจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดจากผลของโหลดความต้านทานที่มีค่าความต้านทานเป็น  $550 \Omega$  มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งหรือเท่ากับมุมโหลดเป็นศูนย์และค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ได้เท่ากับ  $195 \text{ V}_{\text{rms}}$  จากทฤษฎีของการทำงานของเอสซีอาร์ที่กล่าวมาในบทที่ 2 การต่อโหลดความต้านทานแบบวายจะสามารถควบคุมกระแสได้ตั้ง 0 องศาจนถึง 150 องศา

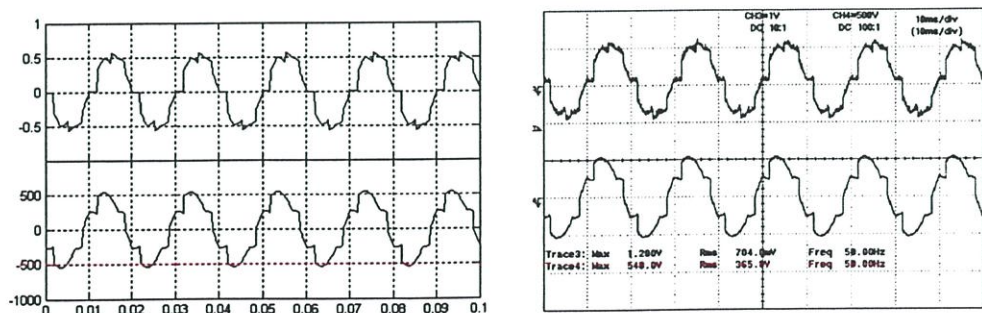


รูปที่ 4.11 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 60$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.11 ใช้มุมจุดชนวน  $60$  องศาสัญญาณที่ได้ยังคงเป็นแบบไม่ต่อเนื่องแต่มีค่าแรงดันมากขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ายังคงสามารถควบคุมแรงดันได้และได้ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเท่ากับ  $310 \text{ v}_{\text{rms}}$  ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ใช้มุมจุดชนวนที่  $45$  และ  $30$  องศา ค่าแรงดันมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเท่ากับ  $345$  และ  $365 \text{ v}_{\text{rms}}$  แต่กระแสนิ่งมีความไม่ต่อเนื่องอยู่ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าโหลดความต้านจะสามารถควบคุมได้ทุกค่าของมุมจุดชนวนในช่วง  $0 < \alpha < 150$  องศา

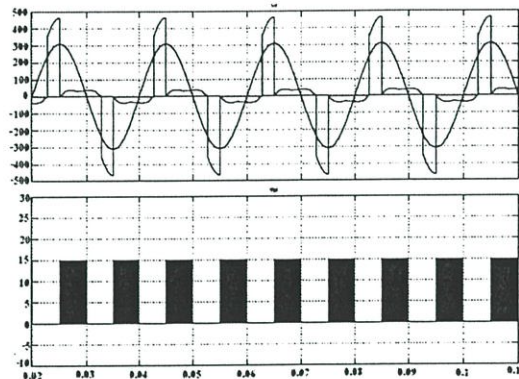


รูปที่ 4.12 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 45$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



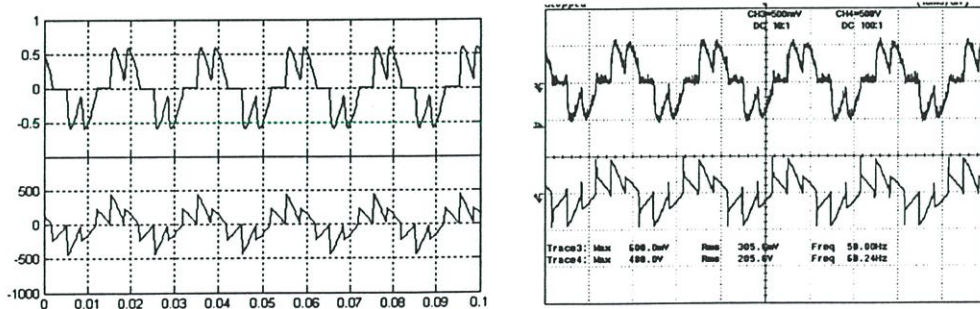
รูปที่ 4.13 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 30$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนมากจะเป็นโหลดชนิดอินดักทีฟซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวในบทที่ 2 โหลดชนิดนี้จะมีผลต่อการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นอย่างมากอันเนื่องมาจากค่าตัวประกอบกำลังของโหลดจึงได้ทำการจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่โหลดอินดักทีฟเปรียบเทียบระหว่างโหลดความต้านทานที่ได้แสดงไปแล้วดังแสดงในรูปต่อไปนี้



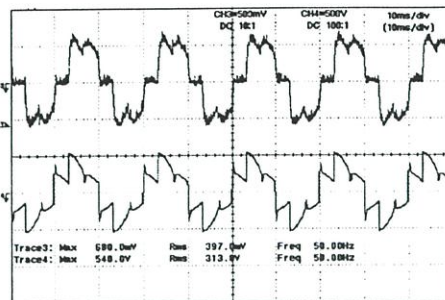
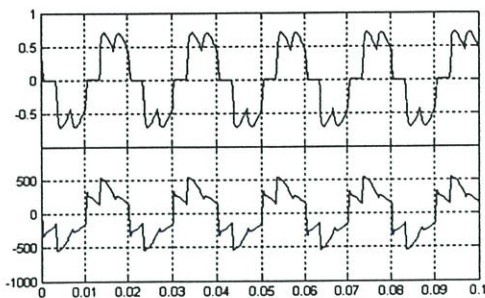
รูปที่ 4.14 บน ลักษณะการนำกระแสของเอสซีอาร์ ที่  $\alpha = 90$  องศา จากการจำลองต่อโหลด RL แบบวาย ล่าง สัญญาณจุดชนวนที่มุม 90 องศา

ในรูปที่ 4.14 ทำการจำลองการนำกระแสของเอสซีอาร์ที่โหลดแบบอินดักทีฟจะเห็นว่ากระแสล้าหลังแรงดันออกไปทำให้เมื่อสัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์เป็นศูนย์และ ไทรสเตอร์ถูกไบแอสกลับแล้วแต่ยังนำกระแสต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นช่วงเวลาที่จุดชนวนไทรสเตอร์ได้จะอยู่ในช่วง  $\theta < \alpha < 150$  ซึ่งต่างจากโหลดความต้านทาน

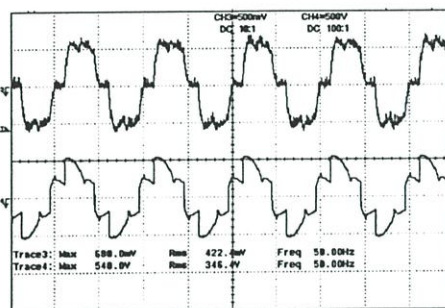
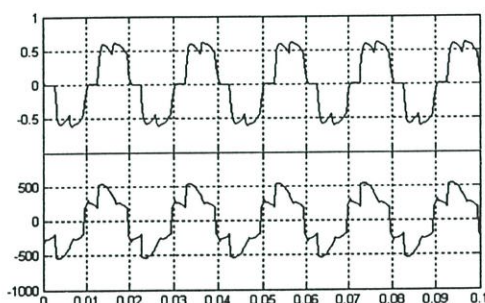


รูปที่ 4.15 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 90$  องศา โหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.15 ใช้โหลดแบบอินดักทีฟมีค่าความต้านทานเป็น  $350 \Omega$  และมีค่าความเหนี่ยวนำเป็น  $100\text{mH}$  และมีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 หรือมีมุมโหลดเป็น 5.6 องศาเมื่อกำหนดค่ามุมจุดชนวนในการทดสอบเป็นมุม 90, 60, 45, 30 องศาซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าในวงจรเนื่องจากค่ามุมโหลดมีค่าต่ำ

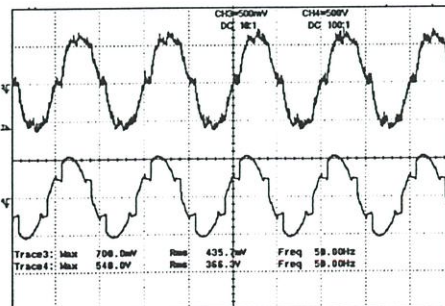
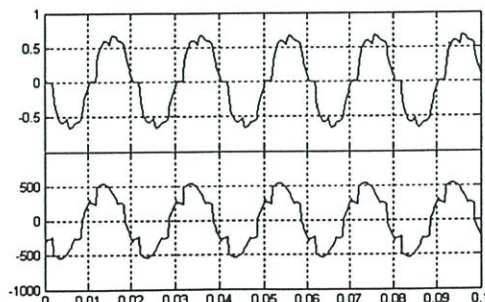


รูปที่ 4.16 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟสA ที่  $\alpha = 60$  องศา โหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



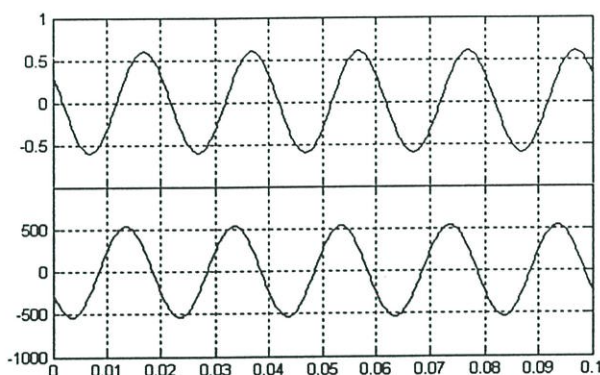
รูปที่ 4.17 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟสA ที่  $\alpha = 45$  องศา โหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.17 ใช้โหลดแบบอินดักทีฟค่าเดิมแต่เปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนเป็นมุม 45 องศาซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าในวงจรได้จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในรูปมีค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 315  $v_{rms}$  ซึ่งเป็นโหมดการทำงานต่างกับรูปที่ 4.9 คือมีไทริสเตอร์นำกระแสพร้อมกัน 2 ตัวและในบางจังหวะจะมีไทริสเตอร์นำกระแสพร้อมกัน 3 ตัว

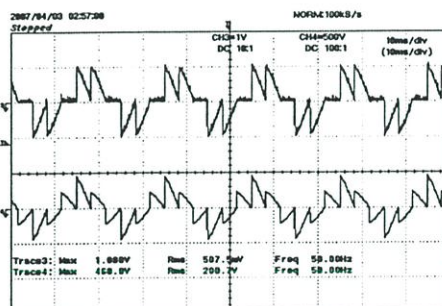
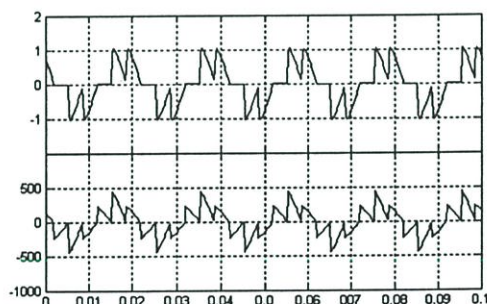


รูปที่ 4.18 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-Bและล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟสA ที่  $\alpha = 30$  องศา โหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.18 ใช้โหลดแบบอินดักทีฟค่าเดิมแต่เปลี่ยนค่ามุมจุดชนวนเป็นมุม 30 องศาจะเห็นได้ว่ารูปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียุคขยับไปข้างหน้าและมีค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเท่ากับ  $345.7v_{rms}$  ซึ่งใกล้เคียงแหล่งจ่ายแต่เนื่องมุมโหลดของวงจรเท่ากับ 3.2 องศาทำให้ยังสามารถควบคุมกระแสได้ และเมื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำเป็น 800mH และค่าความต้านทานเป็น  $45\Omega$  จะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $255\angle 79.8^\circ$  และทำการจุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแสที่มุม 60 องศาสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัญญาณไซน์เนื่องจากมุมจุดชนวนต่ำกว่ามุมโหลด

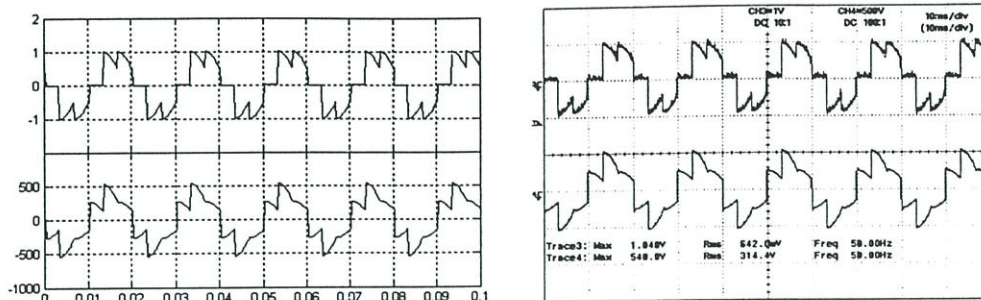


รูปที่ 4.19 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 60$  องศา โหลด RL จากการจำลองต่อโหลดแบบวายที่เป็นโหมคต่อเนื่อง

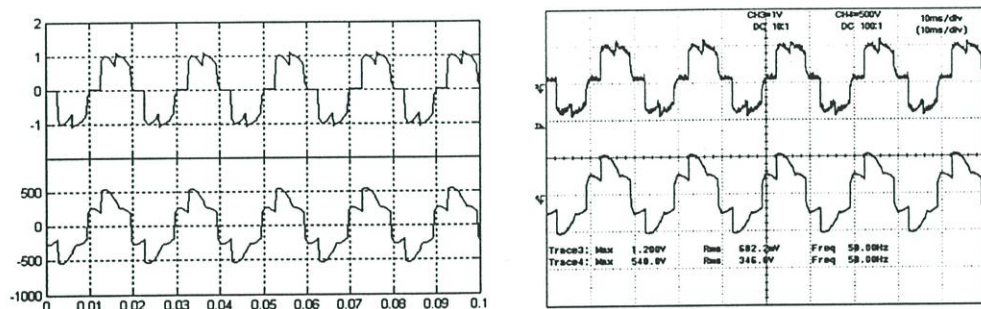


รูปที่ 4.20 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 90$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

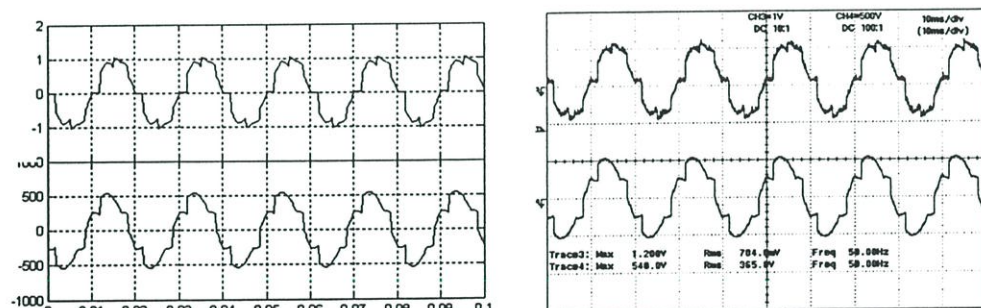
จากผลการทดสอบการต่อโหลดแบบเคลด้าซึ่งใช้ค่าความต้านทานเป็น  $900\Omega$  ทำให้กระแสในสายมีค่าสูงขึ้นและมีแรงดันตกคร่อมโหลดมากขึ้น และการต่อแบบนี้จะไม่มีผลใดๆต่อการทำงานของเอสซีอาร์เนื่องจากการต่อแบบเคลด้าภายนอกจึงมีรูปร่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเหมือนแต่ต่างกันที่ขนาดผลของฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.21 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 60$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

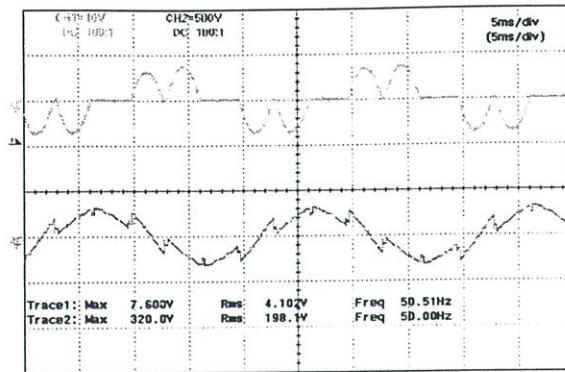


รูปที่ 4.22 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 45$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



รูปที่ 4.23 บน แรงดันระหว่างไลน์ A-B และ ล่าง กระแสผ่าน ไทริสเตอร์ที่เฟส A ที่  $\alpha = 30$  องศา โหลด R จากการจำลองต่อโหลดแบบเคลด้า (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

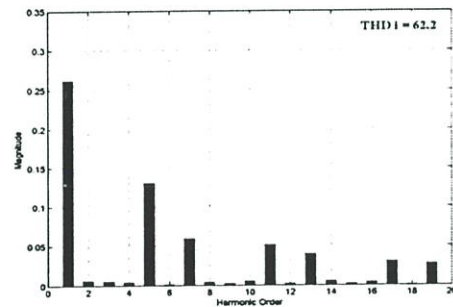
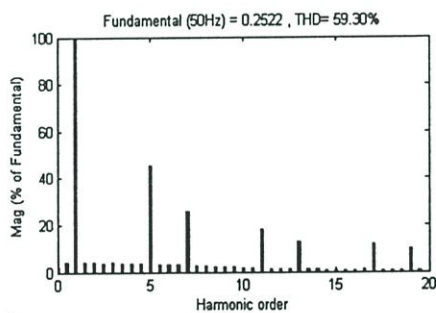
ในรูปที่ 4.24 การจำลองวงแปลงผันกำลังแบบกระแสลับเป็นกระแสลับที่มีโหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะให้ผลต่างๆจากโหลด RL เนื่องจากมอเตอร์มีผลของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้มีความต่อเนื่องมากกว่าโหลดแบบ RL ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากัน



รูปที่ 4.24 บน กระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เฟส A และ ล่าง แรงดันระหว่างไลน์ A-B ที่  $\alpha = 110$  องศา โหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการทดสอบ

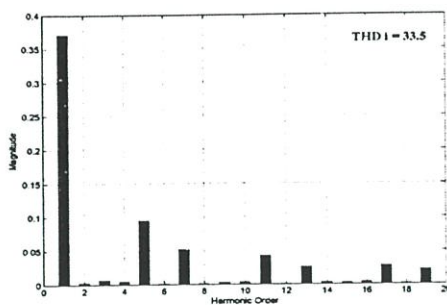
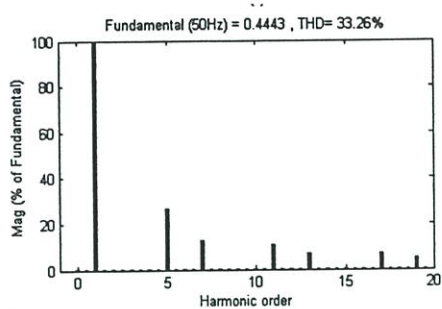
#### 4.2.4 ผลการจำลองวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณในวงจรแปลงผันกำลัง

ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาคุณภาพของสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์และหาค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวม (THD) และแยกฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์และแก้ไขในขั้นต่อไป

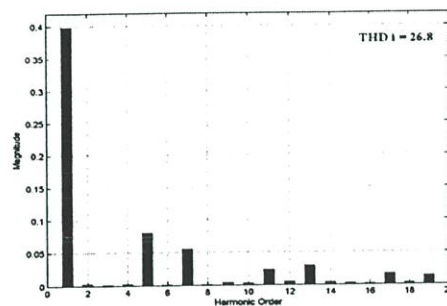
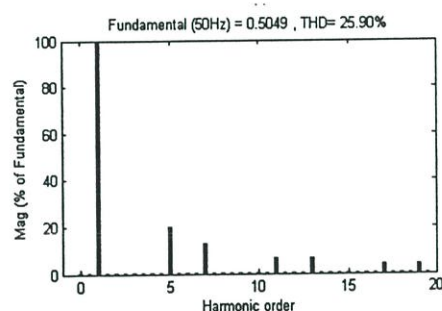


รูปที่ 4.25 สเปกตร้าของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุมจุดชนวน 90 องศา โหลด R ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

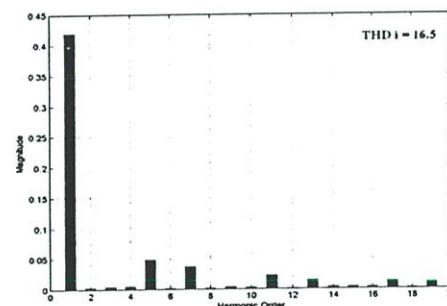
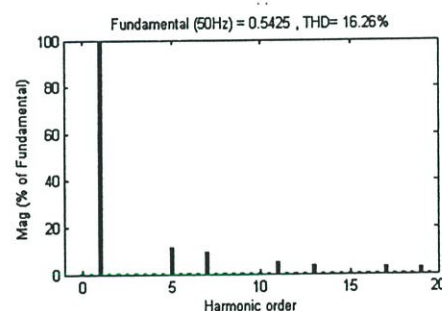
จากรูปที่ 4.25 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสจากการจำลองได้เท่ากับ 59.5% และจากการทดสอบได้เท่ากับ 62.2% ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบมีผลของสัญญาณรบกวนจึงทำให้มีค่าสูงกว่าการจำลองบ้าง ผลของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากรูปร่างของกระแสผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่ความถี่มูลฐานมากและทำให้มีฮาร์มอนิกที่ลำดับต่ำใกล้สัญญาณมูลฐานเช่นลำดับที่ 5, 7, 11 และเมื่อลดมุมจุดชนวนลงทำให้สัญญาณมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณซายน์มากขึ้นค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมก็จะลดลงได้ดังที่แสดงในรูปต่อไป



รูปที่ 4.26 สเปกตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุ่มจุดขนวน 60 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

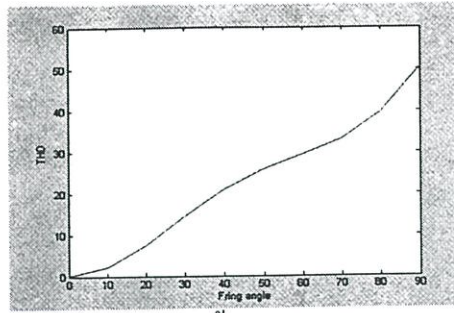


รูปที่ 4.27 สเปกตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุ่มจุดขนวน 45 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



รูปที่ 4.28 สเปกตราของกระแสในวงจรแปลงผันกำลังที่มุ่มจุดขนวน 30 องศา โหลดR ต่อแบบวาย (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

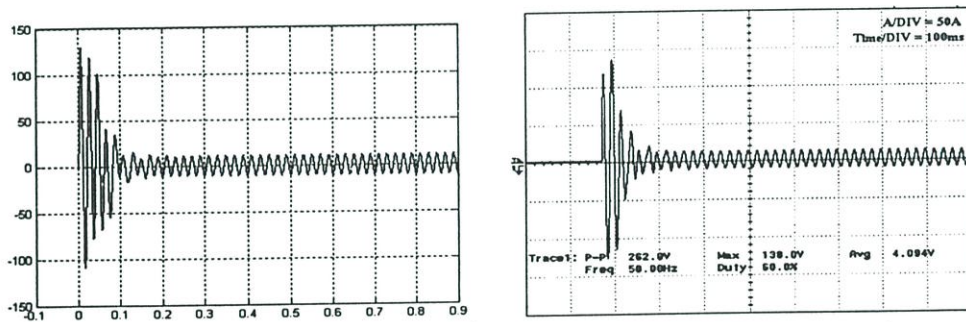
ในรูปที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสเทียบกับมุ่มจุดขนวนของเอสซีอาร์



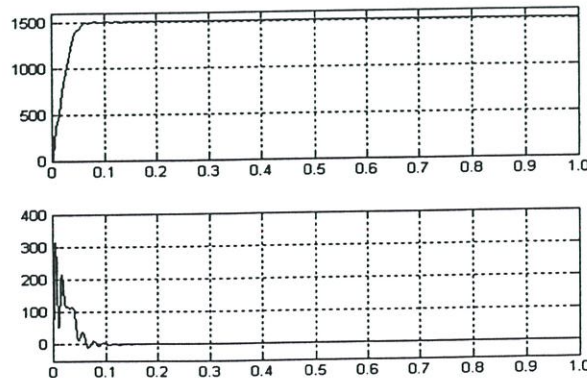
รูปที่ 4.29 กราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสต่อมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ที่มีโหลดเป็น R

ในรูปที่ 4.29 แสดงการลดลงของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าต่อค่ามุมจุดชนวนที่เกิดขึ้นในวงจรแบบ โหลดความต้านทานตามลำดับซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่อมุมจุดชนวนลดลงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนตามค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสก็จะลดลงด้วย

#### 4.2.5 ผลการจำลอง-ทดสอบการเริ่มเดินแบบมีมวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

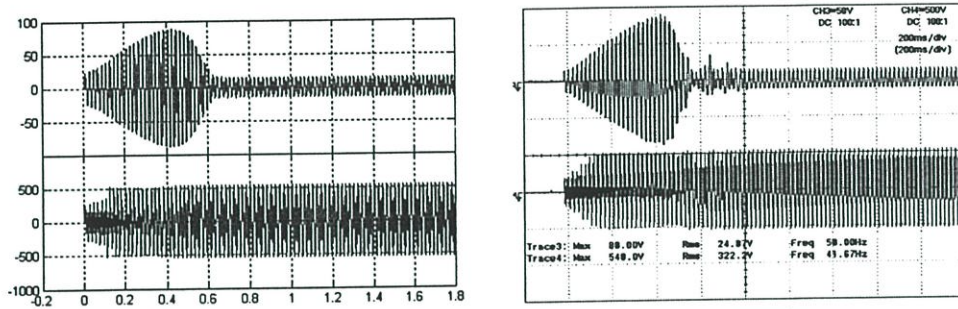


รูปที่ 4.30 แรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่เริ่มเดิน โดยจ่ายแรงดันพิกัดโดยตรง (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

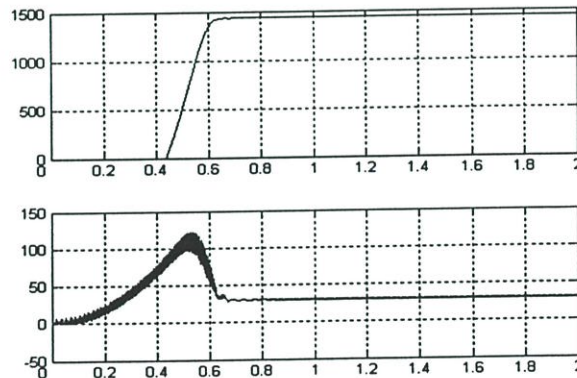


รูปที่ 4.31 บน ความเร็วรอบและค่าแรงบิดของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ที่เริ่มเดิน โดยจ่ายแรงดันพิกัดโดยตรง

จากรูปที่ 4.31 ในการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 7.5 kW แบบจ่ายแรงดันพิกัดโดยตรง กระแสเริ่มเดินที่แบบไม่มีแรงบิดโหลดได้ค่าสูงสุดที่ประมาณ 6 เท่าของกระแสพิกัดและแรงบิดที่สร้างมีค่าสูงและมีการแกว่งของแรงบิดและเมื่อทำการเริ่มเดินแบบนี้มีนวลแบบไม่มีการควบคุมกระแสหรือแบบควบคุมแบบวงเปิด หรือแบบควบคุมเวลาเริ่มเดิน โดยใช้แรงดันเป็น 40% ของแรงดันพิกัดและไม่มีแรงบิดโหลด จะได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสดังรูปที่ 4.32

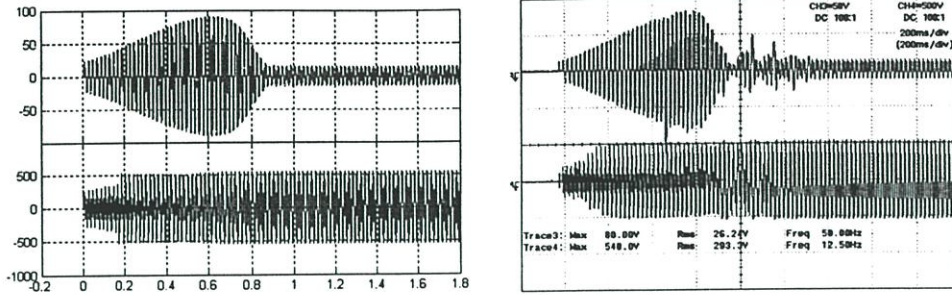


รูปที่ 4.32 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนี้มีนวลที่แรงบิดโหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 0.5 วินาที (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



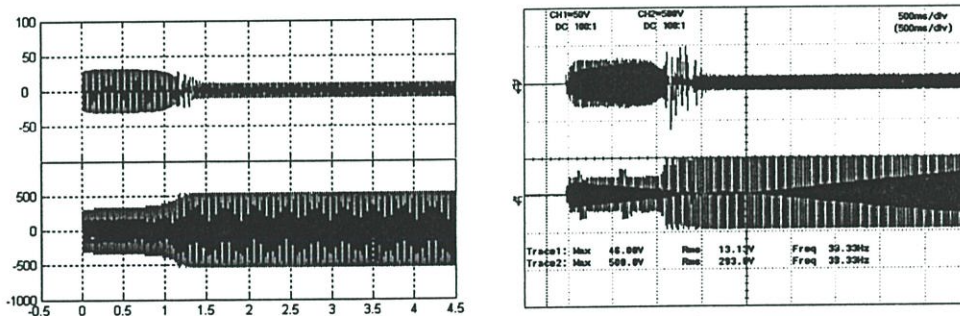
รูปที่ 4.33 บน ความเร็วรอบและล่าง แรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินโดยจ่ายแบบนี้มีนวลที่แรงบิดโหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 0.5 วินาที

ในรูปที่ 4.32 ทดสอบโดยลดมุมจุดชนวนจากการควบคุมแรงดันที่ 40%เพิ่มเป็น 100% ภายในเวลา 0.5 วินาที เมื่อเทียบกับการเริ่มเดินแบบจ่ายแรงดันพิกัดโดยตรงสามารถลดกระแสเริ่มเดินลงได้แต่จะทำให้เวลาในการเริ่มเดินจากหยุดนิ่งไปถึงความเร็วพิกัดใช้เวลานานขึ้นซึ่งจะใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้ควบคุมมุมจุดชนวนดังที่แสดงในรูปที่ 4.33

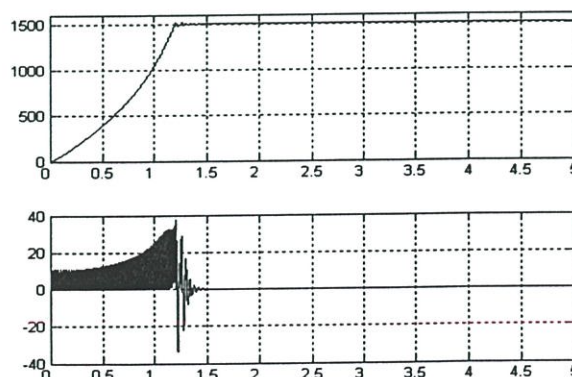


รูปที่ 4.34 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดที่แรงบิด โหลด 30 Nm และควบคุมเวลาเริ่มเดินที่ 1 วินาที (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.34 ทดสอบโดยลดมุมจุดชนวนจากการควบคุมแรงดันที่ 40% เป็น 100% ภายในเวลา 1 วินาที เมื่อเทียบกับการเริ่มเดินแบบควบคุมเวลาที่ 0.5 วินาทีที่มีแรงบิดโหลดเท่ากันยังสามารถลดกระแสเริ่มเดินลงได้อีกเล็กน้อยแต่มีข้อเสียในการใช้เวลาในการเริ่มเดินเพิ่มขึ้นเป็นการสูญเสียพลังงานในการเริ่มเดินมากซึ่งจะนำไปพิจารณาและสรุปในบทต่อไป

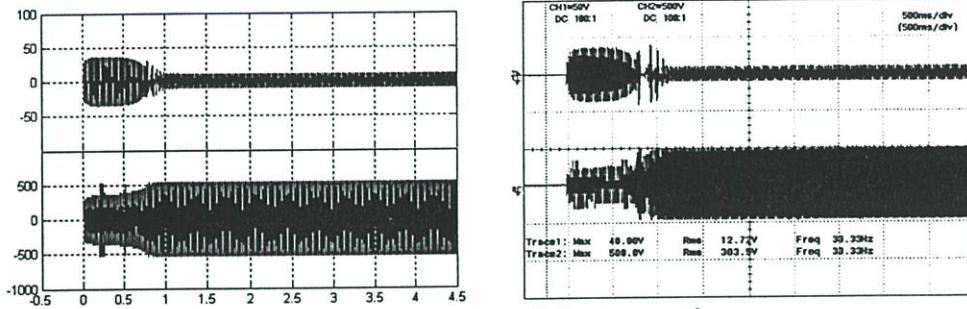


รูปที่ 4.35 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิดแบบ ไม่มีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 30A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

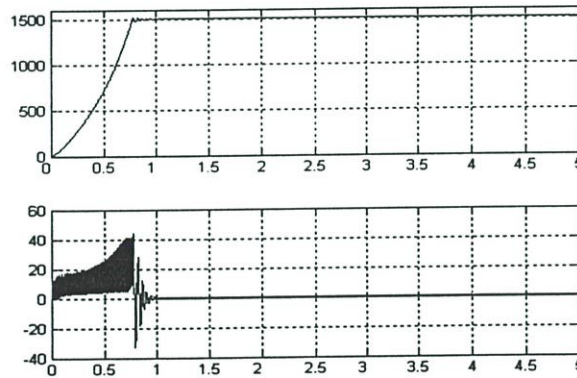


รูปที่ 4.36 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 30A

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นว่ากระแสเริ่มเดินมีค่าลดลงได้มากกว่าการควบคุมแบบวงเปิดและสามารถควบคุมให้คงที่ตามที่กำหนดได้แต่ทำให้ระยะเวลาของการเริ่มเดินมากขึ้นและทำให้มอเตอร์ใช้เวลาถึงความเร็วพิกัดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.36 ซึ่งเป็นไปตามหลักการการควบคุมกระแสที่กล่าวมาในบทที่ 2 แต่ได้เปรียบคือสามารถควบคุมกระแสเริ่มเดินได้ตามที่กำหนด

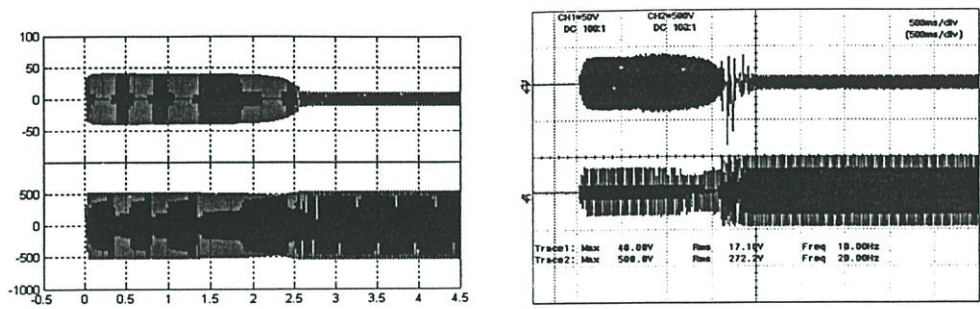


รูปที่ 4.37 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนี้มีแรงบิดโหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 35A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



รูปที่ 4.38 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนี้มีแรงบิดโหลดควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 35A

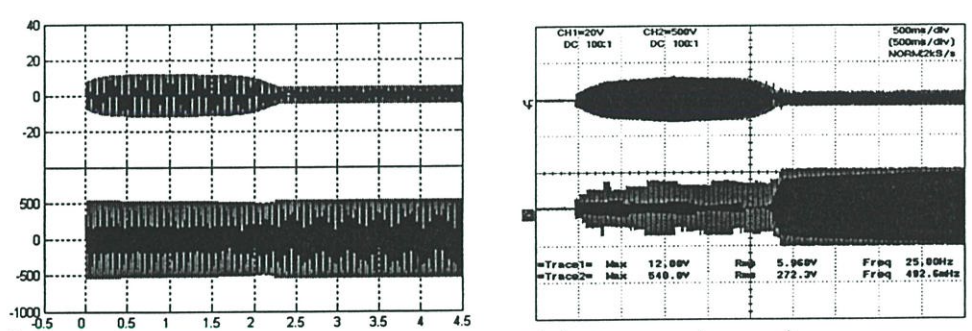
ในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ทำการเริ่มเดินแบบไม่มีแรงบิดโหลดใช้ค่าแรงดันที่ 40% ของแรงดันพิกัดและกำหนดกระแสไว้ที่ 35A จะเห็นว่าช่วงเวลาการเริ่มเดินของมอเตอร์มีระยะเวลาดลดลงและความเร็วรอบถึงความเร็วพิกัดได้เร็วขึ้นยังคงสามารถจำกัดค่ากระแสเริ่มเดินไว้ในค่าที่กำหนดได้



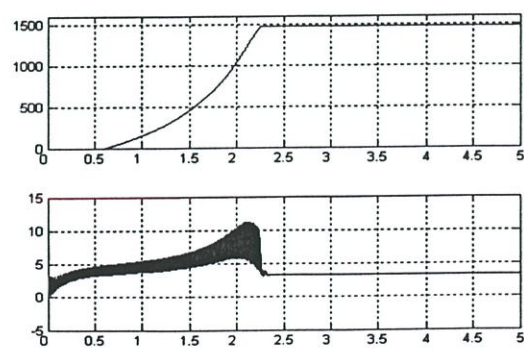
รูปที่ 4.39 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลดเป็น อัตราความเฉื่อยควบคุมกระแสเริ่มต้นที่ 40A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

ในรูปที่ 4.39 การเริ่มเดิน โดยการให้แรงบิด โหลดเป็นอัตราความเฉื่อยและใช้ค่าแรงดันที่ 40% ของ แรงดันพิกัดแต่กำหนดกระแสไว้ที่ 40A จะเห็นว่าช่วงเวลาการเริ่มเดินของมอเตอร์มีระยะเวลา มาก ขึ้นซึ่งเป็นลักษณะของแรงบิด โหลดประเภทนี้ จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างเนื่องจาก โหลดที่ไม่คงที่เนื่องจากการติดตั้งและสภาพของ โหลดมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากทำให้เกิดการ แกว่งของโหลดที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบการเริ่มเดินแบบมีแรงบิดที่มี โหลดแบบแรงบิดคงที่ได้ทำการทดสอบกับ มอเตอร์ขนาด 2.2 kW และได้ผลทดสอบดังนี้

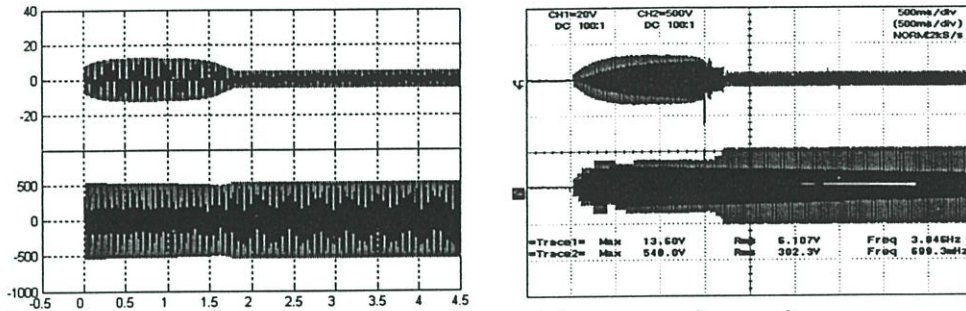


รูปที่ 4.40 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลด 3.5 Nm และควบคุมกระแสที่ 12A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)

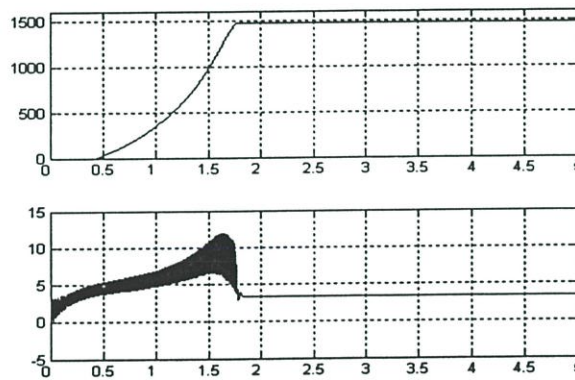


รูปที่ 4.41 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบมีแรงบิด โหลด คงที่ที่ 3.5 Nm ควบคุมกระแสเริ่มต้นที่ 12A

จากผลการทดสอบที่ได้ในรูปที่ 4.40 เป็นทดสอบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลโดยต่อเพลามอเตอร์ เหนี่ยวนำเข้ากับเพลาของมอเตอร์กระแสตรงที่ถูกควบคุมแรงบิดคงที่ 3.5 Nm จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ สามารถเริ่มเดินได้แต่จะใช้เวลาในการเริ่มเดินมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.41 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ค่าพารามิเตอร์ 2 ส่วนคือ แรงดันและกระแสเริ่มเดินและค่าแรงบิด โหลดที่มอเตอร์ได้รับ



รูปที่ 4.42 บน กระแสและล่างแรงดันของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนิ่มนวลที่แรงบิด โหลด 3.5 Nm และควบคุมกระแสที่ 15A (ซ้าย การจำลอง, ขวา การทดสอบ)



รูปที่ 4.43 บน ความเร็วรอบและล่างแรงบิดของมอเตอร์ที่เริ่มเดินแบบนิ่มนวลแบบแรงบิด โหลด คงที่ที่ 3.5 Nm ควบคุมกระแสเริ่มเดินที่ 15A

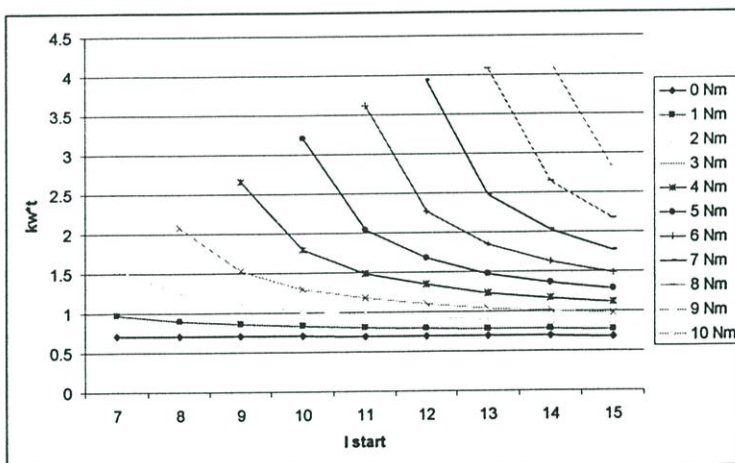
เมื่อเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.40 กับรูปที่ 4.42 ช่วงเวลาเริ่มเดินมี ระยะเวลาสั้นลงเนื่องจากการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มเดิน ทำให้มีแรงบิดเริ่มเดินเพิ่มขึ้น จากทฤษฎี ที่กล่าวมาแล้วทำให้ผลต่างของแรงบิดเพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นถึง ความเร็วพิกัดเร็วขึ้นดังรูปที่ 4.43 และทำให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานในการเริ่มเดินซึ่งเป็น พารามิเตอร์ที่ควรนำมาพิจารณาเพื่อเลือกขนาดของกระแสเริ่มเดิน

ในการทดสอบการเริ่มเดินแบบนิ่มนวลที่มีแรงบิด โหลดคงที่ในรูปที่ 4.35-4.38 และ 4.40 - 4.43 จะเห็นว่าเวลาในการเริ่มเดินมีค่าต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เช่นแรงบิด โหลด, กระแสเริ่มเดินซึ่งมีผลต่อพลังงานที่ใช้ไปในการเริ่มเดินมอเตอร์ในตารางที่ 4.1 เป็นการ

จำลองค่าการใช้พลังงานในการเริ่มเดินของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเริ่มเดิน

ตารางที่ 4.1 พลังงานที่ใช้ในการเริ่มเดินที่กระแสเริ่มเดินเทียบกับแรงบิดโหลดจากการจำลอง

load T.(Nm)	Iref (A)									
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0.71	0.7	0.7	0.7	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.69
1	0.97	0.9	0.86	0.83	0.81	0.8	0.78	0.78	0.77	0.76
2	1.55	1.24	1.1	1.02	0.97	0.93	0.9	0.88	0.87	0.85
3		2.08	1.52	1.3	1.18	1.1	1.04	1.01	0.97	0.95
4			2.65	1.8	1.49	1.34	1.23	1.17	1.11	1.07
5				3.2	2.04	1.68	1.48	1.36	1.28	1.21
6					3.62	2.27	1.85	1.63	1.49	1.39
7						3.93	2.47	2.02	1.77	1.61
8							4.08	2.64	2.17	1.9
9								4.15	2.8	2.32
10									4.24	2.98



รูปที่ 4.44 กราฟพลังงานที่ใช้ไปในการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.44 แสดงว่าการใช้ค่ากระแสเริ่มเดินที่มีค่าต่ำลงส่งผลให้เวลาการเริ่มเดินมากขึ้นและใช้พลังงานในการเริ่มเดินมากขึ้น

### 4.3 สรุป

จากการจำลองและทดสอบระบบทั้งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ผลเปรียบเทียบได้ใกล้เคียงซึ่งเห็นได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำมาใช้ทดสอบและอ้างอิงผลการทดสอบได้

## บทที่ 5

# สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

### 5.1 วิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการเริ่มเดินแบบน้มนวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจและได้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจากการทดสอบการควบคุมกระแสที่แรงบิดโหลดที่ค่าต่างๆสามารถควบคุมกระแสได้ตามที่กำหนดไว้ และสามารถลดแรงบิดเริ่มเดิน โดยการกำหนดค่าแรงดันที่เหมาะสมกับแรงบิดโหลด ในเครื่องต้นแบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 16 บิต มาใช้ในการควบคุมและสร้างสัญญาณจุดชนวนซึ่งมีความเที่ยงตรงและแม่นยำทำให้การทำงานของวงจรมีเสถียรภาพและรวดเร็ว

จากการทดสอบนี้ปัญหาที่พบโดยมากคือความคลาดเคลื่อนของโหลดที่นำมาใช้งานทำให้ค่าที่ได้ในการทดสอบมีการคลาดเคลื่อนไป ปัญหาที่พบในการสร้างและทดสอบคือในช่วงที่เอสซีอาร์ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องคือสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้และเปลี่ยนเป็นทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องทำให้มีการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะในสถานะที่มอเตอร์มีโหลดต่ำเป็นผลมาจากค่าตัวประกอบกำลังที่มุมโหลดมีค่าสูงกว่ามุมของสัญญาณจุดชนวนเอสซีอาร์และส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ที่มีผลกับมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์ทำให้แรงดันถูกควบคุมไม่เป็นเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องซึ่งต้องมีการคิดค้นและพัฒนาการควบคุมต่อไป

ในส่วนของเวลาที่เพิ่มขึ้นในการเริ่มเดินแบบน้มนวลซึ่งมีผลต่อค่าการใช้พลังงานของมอเตอร์ในการเริ่มเดินจากผลการทดสอบและการจำลองทำให้เห็นว่าการเริ่มเดินแบบน้มนวลที่มีการควบคุมกระแสเริ่มเดินจะใช้พลังงานมากขึ้นเมื่อมีการลดค่ากระแสควบคุมหรือเพิ่มแรงบิดโหลดให้กับมอเตอร์เนื่องจากเวลาการเริ่มเดินที่มากขึ้นซึ่งเป็นเสียเปรียบที่พบแต่เนื่องจากการใช้งานการเริ่มเดินแบบน้มนวลมีเป้าหมายเพื่อลดการสีกหรือของชุดเพลาและชุดส่งกำลังทางกลของมอเตอร์เป็นสำคัญและยังมีผลในการช่วยลดการเกิดแรงดันตกในระบบได้

ผลของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งจากการทดสอบและการจำลองมีค่าค่อนข้างสูงที่มุมจุดชนวนค่ามากๆแต่ก็จะมีค่าลดลงตามการควบคุมซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มิต่ำไม่มากจึงไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อการเริ่มเดินหรือใช้งานมอเตอร์มาก

### 5.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการจำลองและทดสอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นซึ่งสามารถทำงานได้ตามหลักการและทฤษฎีแต่ยังมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่บ้างจากปัจจัยต่างๆที่กล่าวมา แต่โดยการใช้งานการควบคุมกระแสที่ได้ตามที่กำหนดสามารถลดกระแสขณะเริ่มเดินและลดขนาดของอุปกรณ์ตัดคอนและ

ขนาดของสายตัวนำได้และสามารถลดการสีกหรือในชิ้นส่วนต่างๆในการส่งกำลังของระบบที่ถูกขับโดยมอเตอร์ แต่ในเรื่องของประหยัคพลังงานนั้นคงไม่สามารถที่จะทำได้เนื่องจากการเริ่มเดินแบบจ่ายแรงดันพิกัด โดยตรงนั้นมีช่วงเวลาเริ่มเดินเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อใช้การเริ่มเดินแบบนี้มวลดแล้วช่วงเวลาเริ่มเดินมีช่วงเวลานานขึ้นมากซึ่งถ้าคิดเป็นอัตราความสัมพันธ์ที่คิดตามมาตรฐานทางการไฟฟ้าแล้วอาจต้องเสียค่าอัตราความสัมพันธ์มากกว่าก็เป็นได้ดังนั้นการนำการเริ่มเดินมอเตอร์แบบนี้เพื่อจุดประสงค์ในการขนาดของอุปกรณ์และลดการสีกหรือของอุปกรณ์เป็นหลักมากกว่า

### 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

1. พัฒนาวิธีการควบคุมเพื่อให้เวลาในการเริ่มเดินมีค่าเร็วขึ้น โดยการเพิ่มแรงบิดในช่วงเริ่มเดิน
2. พัฒนาจากการควบคุมกระแสเป็นการควบคุมแรงบิดเพื่อสามารถกำหนดกระแสและแรงบิดในการเริ่มเดินได้แน่นอนและแม่นยำยิ่งขึ้น
3. เพิ่มเติมในส่วนของการผ่านตรงวงจรกำลังเมื่อมอเตอร์เริ่มเดินถึงความเร็วพิกัดหรือควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะคงตัวเมื่อมอเตอร์มีแรงบิดโหลดต่ำเพื่อให้มอเตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

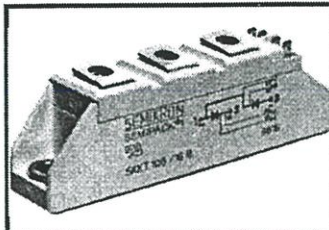
- [1] Gürkan Zenginobuz, IŞik çadirci, “Soft starting of induction motors at constant current with minimized starting torque pulsation,” IEEE Trans.Ind.Applicat., vol 37, pp. 1334-1347, Sept/Oct. 2001
- [2] วิชัย ศังขจันรานนท์, “ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2540
- [3] B.K. Bose, “POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES”, Prentice-Hall Englewood Cliffs New Jersey, 1986
- [4] วีระเชษฐ ชันเงิน, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [5] วีระเชษฐ ชันเงิน, “เอกสารประกอบการสอนวิชา Power Electronics PartII”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [6] อุดมศักดิ์ ชัยยืน, “Power electronics 1”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [7] ศิวะ หงษ์นภา, “การควบคุมและการประยุกต์ใช้งานเอซีไดรฟ์”, บริษัท กู๊ดวิลล์ไดเร็กชั่น จำกัด, 2547
- [8] ธวัชชัย อรรถวิบูลย์กุล, “เครื่องกลไฟฟ้า2”, แผนกวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน, 2527
- [9] ถาวร อมตกิตต์, “การส่งกำลังและการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ”, เอ็ม แอนด์อี, 2545
- [10] ศุภี บรรจงจิตร, “หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง”, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2539

ภาคผนวก ก

**ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์**

# ไทรสเตอร์ (เอสซีอาร์)

## SKKT 72, SKKH 72, SKKT 72B



### SEMIPACK® 1

### Thyristor / Diode Modules

SKKT 72

SKKH 72

SKKT 72B

#### Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

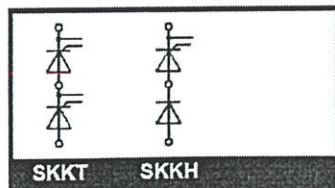
#### Typical Applications

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- AC motor soft starters
- Temperature control (e. g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

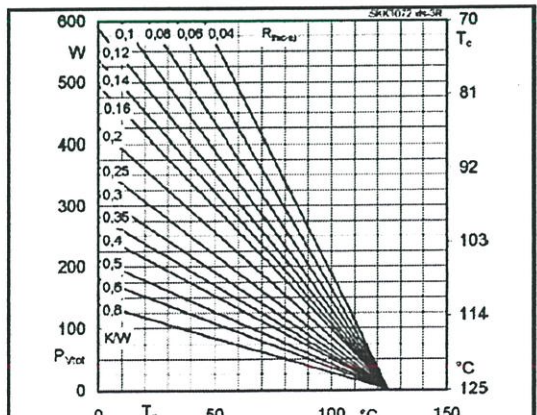
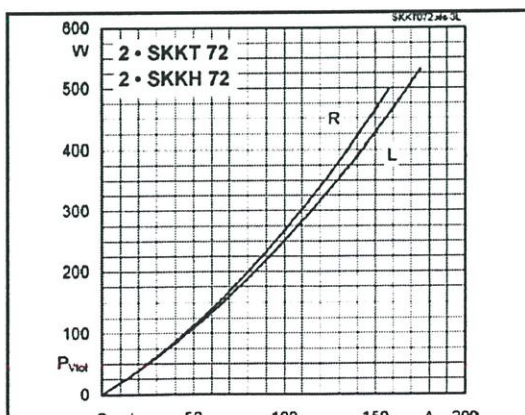
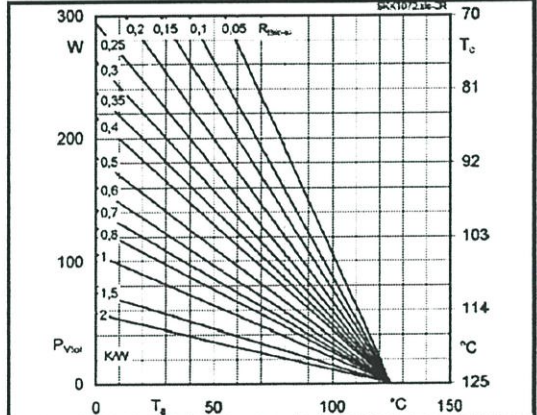
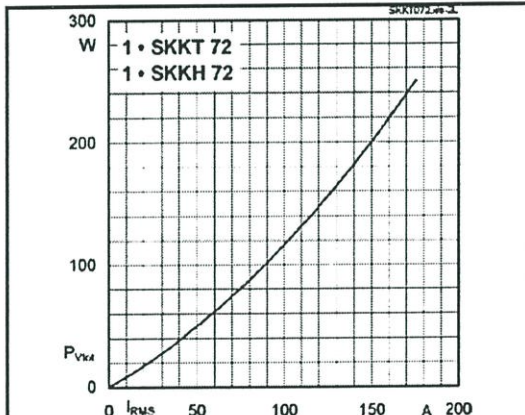
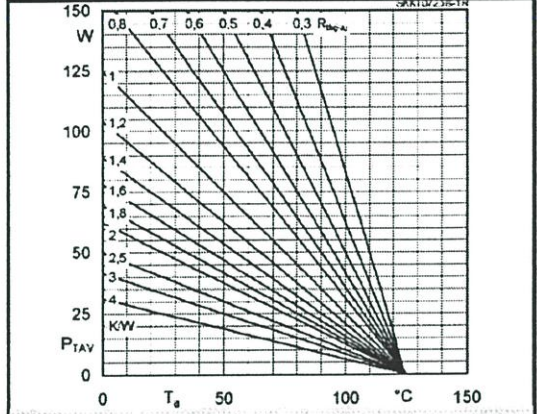
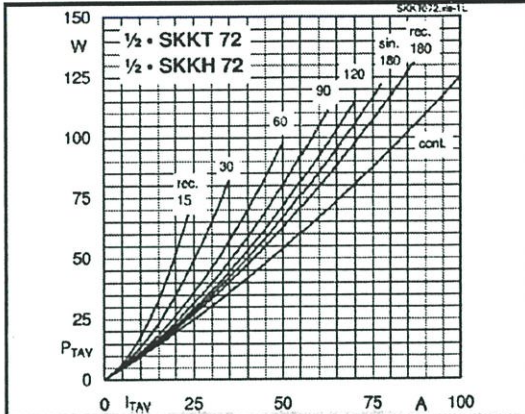
1) See the assembly instructions

$V_{RSM}$ V	$V_{RRM}$ / $V_{DRM}$ V	$I_{TRMS} = 125$ A (maximum value for continuous operation)		
		$I_{TAV} = 70$ A (sin. 180; $T_c = 85$ °C)		
900	800	SKKT 72/08E	SKKT 72B08E	SKKH 72/08E
1300	1200	SKKT 72/12E	SKKT 72B12E	SKKH 72/12E
1500	1400	SKKT 72/14E	SKKT 72B14E	SKKH 72/14E
1700	1600	SKKT 72/16E	SKKT 72B16E	SKKH 72/16E
1900	1800	SKKT 72/18E	SKKT 72B18E	SKKH 72/18E
2100	2000	SKKT 72/20EH4		SKKH 72/20EH4
2300	2200	SKKT 72/22EH4		SKKH 72/22EH4

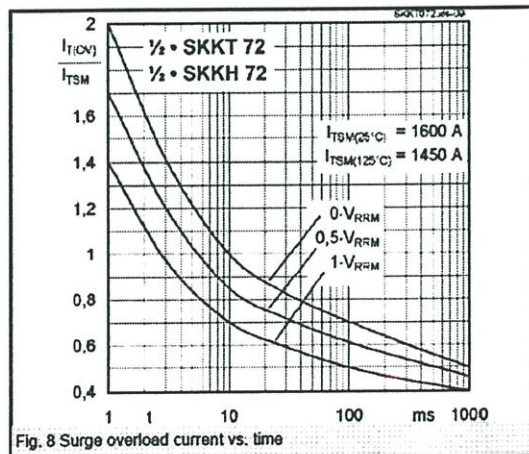
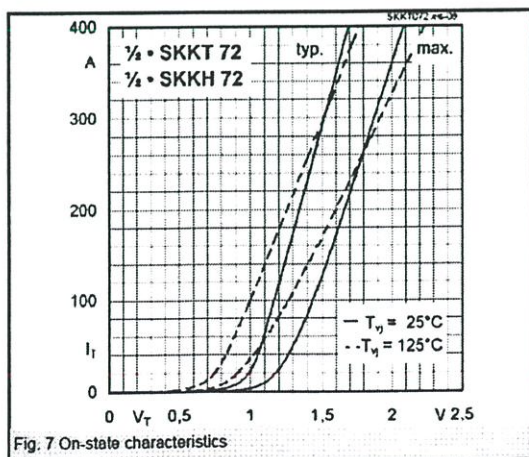
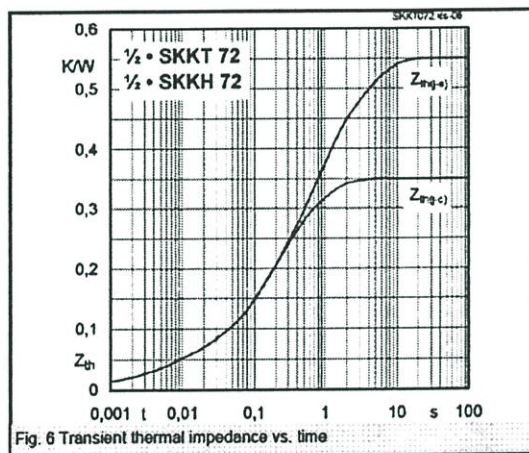
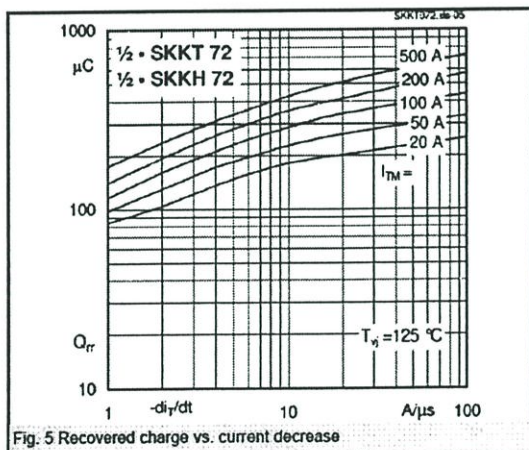
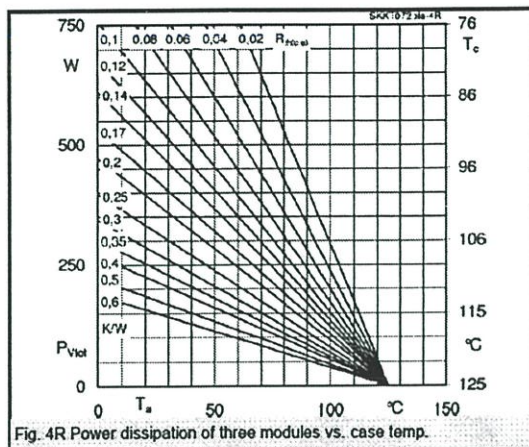
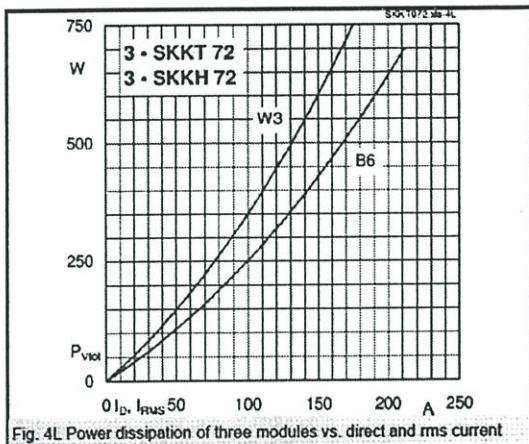
Symbol	Conditions	Values	Units
$I_{TAV}$	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C	70 (50)	A
$I_D$	P3/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	62 / 75	A
	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	115 / 145	A
$I_{RMS}$	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	155 / 3 * 115	A
$I_{TSM}$	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	1600	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	1450	A
$i^t$	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	13000	A*s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	10500	A*s
$V_T$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 300$ A	max. 1,9	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,9	V
$r_T$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 3,5	mΩ
$I_{DD}$ ; $I_{RD}$	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$ ; $V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20	mA
$I_{DD}$ ; $I_{RD}$	for SKK .../20E; SKK .../22E	max. 30	mA
$t_{vd}$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
$t_{br}$	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	1	μs
$(dI/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 150	A/μs
$(dV/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 1000	V/μs
$t_q$	$T_{vj} = 125$ °C	80	μs
$I_H$	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
$I_L$	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
$V_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
$I_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
$V_{GD}$	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
$I_{GD}$	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 6	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,35 / 0,18	K/W
$R_{th(c-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,37 / 0,19	K/W
$R_{th(c-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,39 / 0,2	K/W
$R_{th(c-a)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
$T_{vj}$		- 40 ... + 125	°C
$T_{stg}$		- 40 ... + 125	°C
$V_{isol}$	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
$V_{isol}$	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min. for SKK...H4	4800 / 4000	V~
$M_a$	to heatsink	5 ± 15 % <sup>1)</sup>	Nm
$M_t$	to terminals	3 ± 15 %	Nm
$a$		5 * 9,81	m/s <sup>2</sup>
$m$	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	



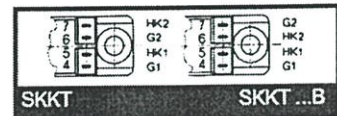
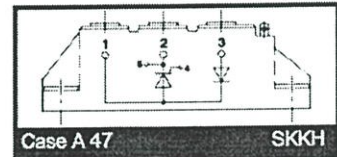
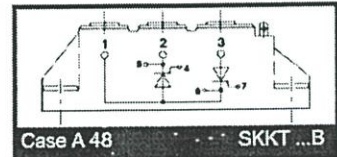
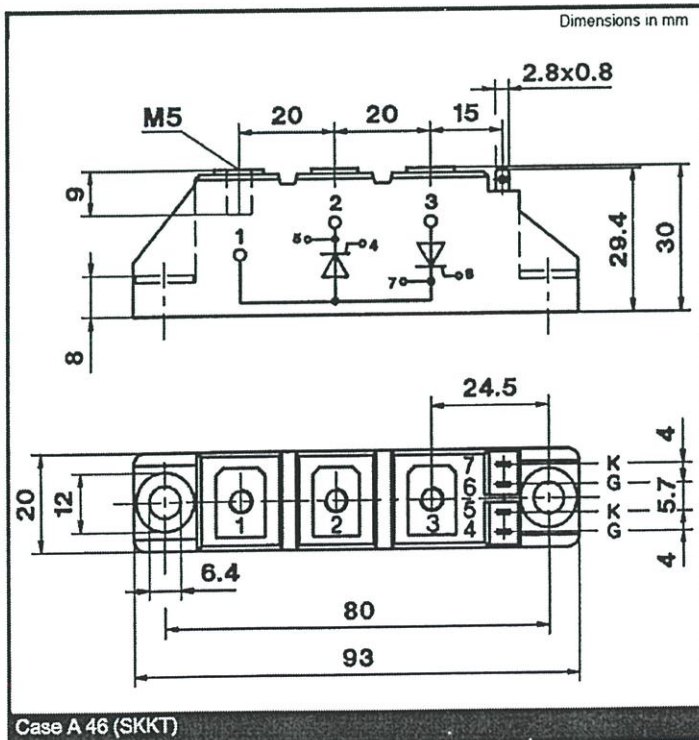
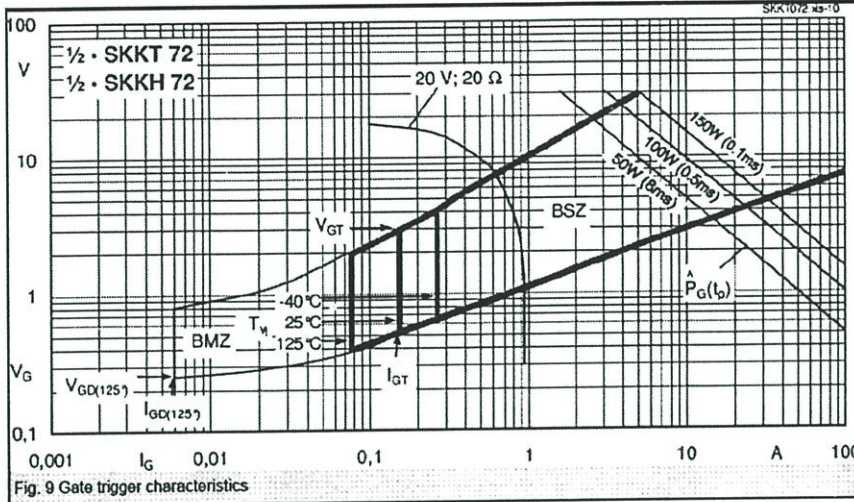
**SKKT 72, SKKH 72, SKKT 72B**



# SKKT 72, SKKH 72, SKKT 72B



**SKKT 72, SKKH 72, SKKT 72B**



This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

ไมโครคอนโทรลเลอร์



**dsPIC30F4011/4012**  
**Data Sheet**

High Performance  
Digital Signal Controllers



# dsPIC30F4011/4012

## dsPIC30F4011/4012 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

**Note:** This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

### High Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible addressing modes
- 84 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K Instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbytes of non-volatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
  - DC to 40 MHz external clock input
  - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources
  - 3 external interrupt sources
  - 8 user selectable priority levels for each interrupt source
  - 4 processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

### DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write back for DSP operations
- Module and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions single cycle
- $\pm$  16-bit single cycle shift

### Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
  - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I<sup>2</sup>C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- 2 UART modules with FIFO Buffers
- 1 CAN modules, 2.0B compliant

### Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
  - Complementary or Independent Output modes
  - Edge and Center Aligned modes
- 3 duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

### Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

## dsPIC30F4011/4012

### Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with 4 S/H Inputs:
  - 500 Ksps conversion rate
  - 9 input channels
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Detection and Reset generation

### Special Microcontroller Features:

- Enhanced Flash program memory:
  - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
  - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control

- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
  - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

### CMOS Technology:

- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

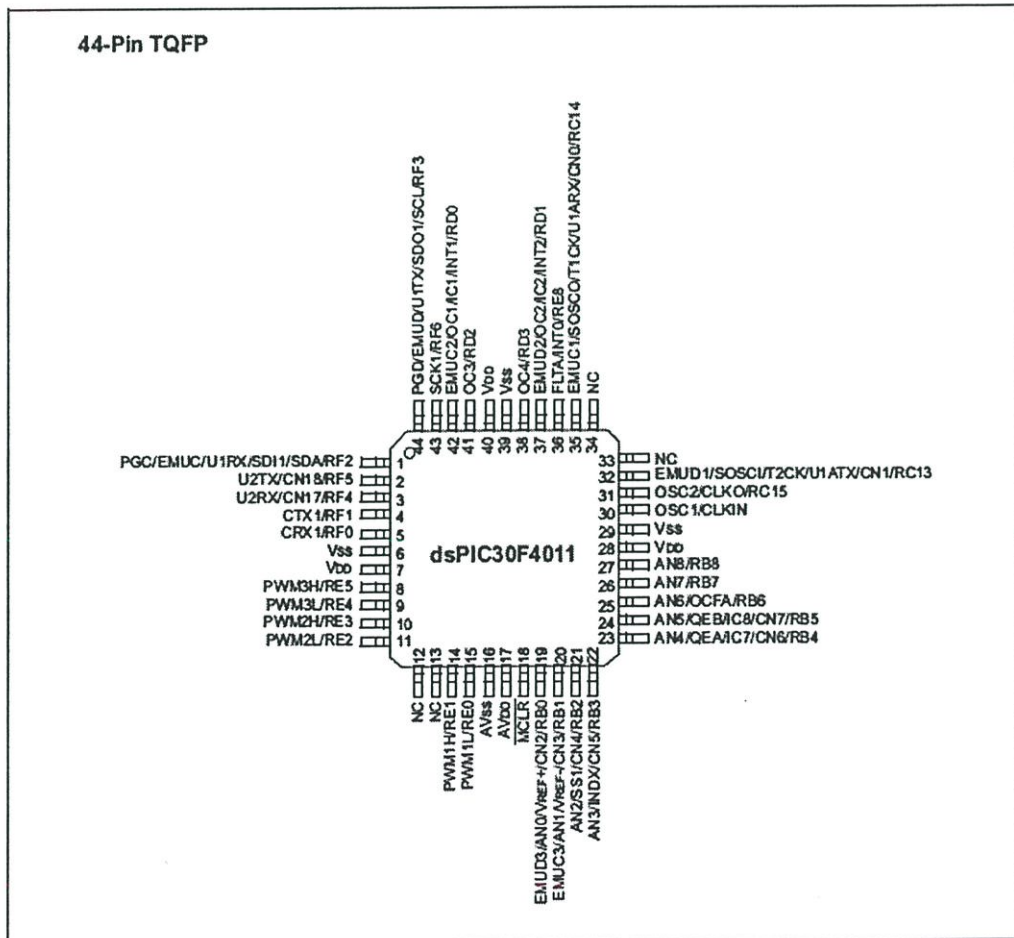
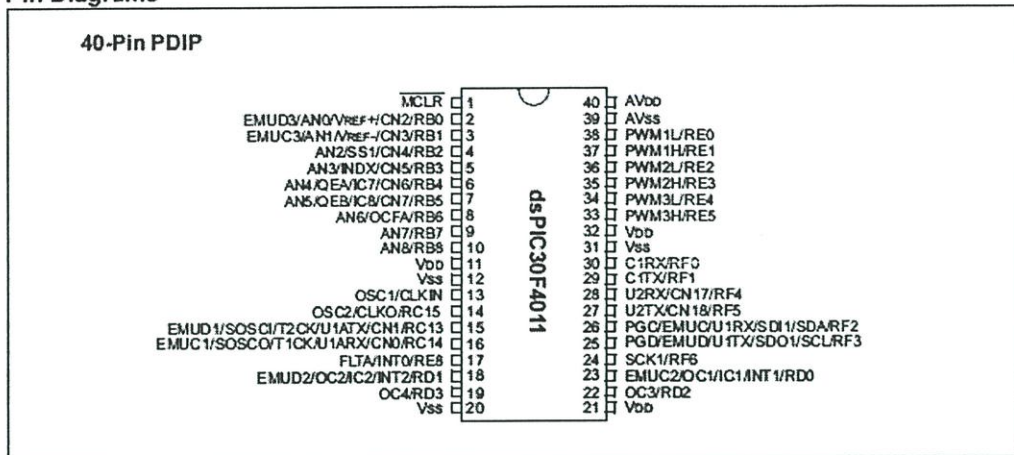
### dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family\*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Moto Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	I <sup>2</sup> C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

\* This table provides a summary of the dsPIC30F6010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

# dsPIC30F4011/4012

## Pin Diagrams



## รหัสแอสเซมบลีที่ใช้ในระบบ

```

.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"
;.....
;Configuration bits:
;.....

config __FOSC, CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16 ;Turn off clock switching and
;fail-safe clock monitoring and
;use the External Clock as the
;system clock

config __FWDT, WDT_OFF ;Turn off Watchdog Timer

config __FBORPOR, PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_16 & MCLR_DIS
;Set Brown-out Reset voltage and
;and set Power-up Timer to 16msecs

config __FGS, CODE_PROT_OFF ;Set Code Protection Off for the
;General Segment

;.....
;Program Specific Constants (literals used in code)
;.....

.equ SAMPLES, 64 ;Number of samples

;.....
;Global Declarations:
;.....

```

```
.global _wreg_init    ;Provide global scope to _wreg_init routine
                    ;In order to call this routine from a C file,
                    ;place "wreg_init" in an "extern" declaration
                    ;in the C file.
```

```
.global __reset      ;The label for the first line of code. If the
                    ;assembler encounters "_main", it invokes the
                    ;start-up code that initializes data sections
```

```
.global __T1Interrupt ;Declare Timer 1 ISR name global
```

```
.global __T2Interrupt ;Declare Timer 2 ISR name global
```

```
.global __T3Interrupt ;Declare Timer 3 ISR name global
```

```
.global __T4Interrupt ;Declare Timer 4 ISR name global
```

```
.global __T5Interrupt ;Declare Timer 5 ISR name global
```

```
.global __CNInterrupt ;Declare CN ISR name global
```

```
-----
```

```
;Define Register
```

```
-----
```

```
.equ I2C_DAC_CON,#0b01000000      ; CONTROL of PFC8591P
.equ I2C_ADD_ADC_2,#0b10010010    ; ADDRESS of PFC8591P #2
.equ T_2, #0X50
.equ Y_MAX,#0X9999
.equ Y_MIN,#0X0000
.equ KP,#0
.equ KI,#4
.bss REF_CERRENT,2
```

```
.bss REAL_CERRENT,2
.bss START_TORQUE,2
.bss PHASE,2
.bss ALPA,2
.bss ALPHA,2
.bss SALPA,2
.bss KEEP_VAL,2
.bss KEEP_SUM,2
.bss I2C_DATA,2
.bss B_I2C_ACK,2
.bss COUNT_INT,2
.bss COUNT_SUM,2
.bss X_Z1,2
.bss Y_Z1,2
.bss SUM,2
.bss SUM_1,2

.global REF_CERRENT
.global REAL_CERRENT
.global START_TORQUE
.global PHASE
.global ALPA
.global ALPHA
.global KEEP_VAL
.global KEEP_SUM
.global I2C_DAC_CON
.global I2C_ADD_ADC_2
.global B_I2C_ACK
.global I2C_DATA
.global COUNT_INT
.global COUNT_SUM
.global T_2
.global Y_MAX
```

```

.global Y_MIN
.global X_Z1
.global Y_Z1
.global SUM
.global KP
.global KI
.global SUM_1

;.....
;Code Section in Program Memory
;.....

.text                ;Start of Code section
__reset:
    MOV #__SP_init, W15    ;Initialze the Stack Pointer
    MOV #__SPLIM_init, W0    ;Initialize the Stack Pointer Limit Register
    MOV W0, SPLIM
    NOP                    ;Add NOP to follow SPLIM initialization
__wreg_init:
    CLR                    W0
    MOV                    W0, W14
    REPEAT                 #12
    MOV                    W0, [++W14]
    CLR                    W14

LINE1: .ascii "Induction Motor  "
LINE2: .ascii "Soft starter    "
LINE3: .ascii "In*k(A)=      "
LINE4: .ascii "Start vol.(%)=  "
LINE5: .ascii "RUN           "

```

```

CALL      Init_PORTS      ; Initialize the I/O ports
CALL      Init_VAR
CALL      INIT_LCD
CALL      Init_VAR
CALL      Init_interrupt
CALL      Init_ADC
CALL      Init_TMR

```

```

;-----

```

```

MAIN:

```

```

INT:  MOV      #0X0080,W1  ;W1 = LCD_ADDRESS
      CALL      LCD_COMMAND

```

```

; Set TBLPAG to the page that contains the LINE1 array.

```

```

MOV      #tblpage(LINE1), W4
MOV      W4, _TBLPAG

```

```

; Make a pointer to LINE1 for table instructions

```

```

MOV      #tbloffset(LINE1), W4
CALL      LCD_TEXT

```

```

;-----

```

```

MOV      #2000,W0
CALL      delay_ms

```

```

;-----

```

```

MOV      #0X00C0,W1      ;W1 = LCD_ADDRESS
CALL      LCD_COMMAND

```

```

; Set TBLPAG to the page that contains the LINE2 array.

```

```

MOV      #tblpage(LINE2), W4
MOV      W4, _TBLPAG

```

; Make a pointer to LINE2 for table instructions

```

MOV      #tbloffset(LINE2), W4
CALL     LCD_TEXT

```

-----

```

MOV      #2000,W0
CALL     delay_ms

```

-----

-----

```

MOV      #0X0001,W1          ;LCD CLR
CALL     LCD_COMMAND

```

-----

```

MOV      #0X0080,W1    ;W1 = LCD_ADDESS
CALL     LCD_COMMAND

```

; Set TBLPAG to the page that contains the LINE3 array.

```

MOV      #tblpage(LINE3), W4
MOV      W4, _TBLPAG

```

; Make a pointer to LINE3 for table instructions

```

MOV      #tbloffset(LINE3), W4
CALL     LCD_TEXT
MOV      #0X0089,W1    ;W1 = LCD_ADDESS HI
CALL     LCD_COMMAND

```

```

MOV      #0X0030,W5
CALL     WRITE_CHAR2
INC      W1,W1        ;W1 = LCD_ADDESS HI

```

```

CALL    LCD_COMMAND
MOV     #0X0030,W2
CALL    WRITE_CHAR

MOV     #0X0039,W3
MOV     #0X0000,W7
MOV     #0X0030,W8
MOV     #0X008A,W1
CALL    SCAN_KEY    ;147H
MOV     W0,REF_CERRENT    ;KEEP CURRENT = VALUE OF ADC

```

-----

;AFTER PRESS ENTER

```

MOV     #0X00C0,W1          ;W1 = LCD_ADDRESS
CALL    LCD_COMMAND

```

; Set TBLPAG to the page that contains the LINE2 array.

```

MOV     #tblpage(LINE4), W4
MOV     W4, _TBLPAG

```

; Make a pointer to LINE2 for table instructions

```

MOV     #tbloffset(LINE4), W4
CALL    LCD_TEXT
MOV     #0X00CD,W1          ;W1 = LCD_ADDRESS HI
CALL    LCD_COMMAND

MOV     #0X0030,W5
CALL    WRITE_CHAR2

INC     W1,W1              ;W1 = LCD_ADDRESS HI
CALL    LCD_COMMAND
MOV     #0X0030,W2

```

```

CALL        WRITE_CHAR

MOV         #0X0039,W3
MOV         #0X0000,W7
MOV         #0X0030,W8

CALL        SCAN_KEY1           ;10งศก = 204.8=cc

MOV         #0X9999,W1
MOV         W1,SALPA
MOV         #0X6000,W1
MOV         W1,ALPA

MOV         #0X0094,W1
CALL        LCD_COMMAND
MOV         #tblpage(LINE5), W4
MOV         W4, _TBLPAG
MOV         #tbloffset(LINE5), W4
CALL        LCD_TEXT

```

;------

```

CALL        Check_Phase
CLR         KEEP_VAL
CLR         COUNT_INT
CLR         KEEP_SUM
CLR         COUNT_SUM
CLR         SUM_1
CLR         SUM

CLR         Y_Z1
CLR         X_Z1
;CALL      ACC_TIME
CALL        CHANGE_NO

```

done:

```

;BTSS PORTF,#RF5
;CALL __reset
BRA done

```

;Place holder for last line of executed code

-----

;Timer 2 Interrupt Service Routine

;Example context save/restore in the ISR performed using PUSH.D/POP.D

;instruction. The instruction pushes two words W4 and W5 on to the stack on

;entry into ISR and pops the two words back into W4 and W5 on exit from the ISR

-----

\_\_T1Interrupt:

```

BCLR IFS0,#T1IF ;Clear the Timer1 Interrupt flag Statusbit
BSET LATD,#RD0
RETFIE ;Return from Interrupt Service routine

```

\_\_T2Interrupt:

```

BCLR IFS0,#T2IF ;Clear the Timer2 Interrupt flag Status bit.
BSET LATD,#RD1
RETFIE ;Return from Interrupt Service routine

```

\_\_T3Interrupt:

```

BCLR IFS0,#T3IF ;Clear the Timer3 Interrupt flag Status bit
BSET LATD,#RD2
RETFIE ;Return from Interrupt Service routine

```

\_\_T4Interrupt:

```

BCLR IFS1,#T4IF

```

```

        BTG          LATD,#RD3
END_T4:  RETFIE
__T5Interrupt:

        BCLR        IFS1, #T5IF ;Clear the Timer5 Interrupt flag Status
;BTG          LATD,#RD3
        INC         COUNT_INT
        MOV         COUNT_INT,W11
        CALL        GET_ADC
;MOV         ACC,W6
        MOV         KEEP_VAL,W7
        ADD         W6,W7,W4
        MOV         W4,KEEP_VAL
        MOV         #100,W0
        CPSGT       W11,W0
        BRA         END_INT_T5
        MOV         KEEP_VAL,W6
        MOV         W6,REAL_CERRENT
;CALL        WRITE_I2C
        CLR         KEEP_VAL
        CLR         COUNT_INT

END_INT_T5: RETFIE          ;Return from Interrupt Service routine

```

```

;-----

```

```

__CNInterrupt:
        MOV         #10,W0
        CALL        delay_us
        BCLR        IFS0,#CNIF
        MOV         PORTB,W4
        CALL        Start_motor
        MOV         #0X8CCC,W1

```

```

MOV      SUM,W2
SUB      W1,W2,W2
BTSS    SR,#C
BRA     RET_F
CALL    CAL_ALPA
        ; for closed loop
RET_F:
        RETFIE

OPEN:
MOV      ALPA,W0                ; for open loop
MOV      #30,W1

SUB      W0,W1,W0
BTSS    SR,#C
MOV      #10,W0
MOV      W0,ALPA
        RETFIE

;.....

        .equ __30F4011, 1
        .include "p30f4011.inc"

;-----
;INITIAL LCD DISPLAY
;-----

        .global INIT_LCD

INIT_LCD:
MOV      #500,W0
CALL    delay_ms
MOV      #0X0033,W1    ;COMMAND SET LCD 4 BIT

```

```

CALL LCD_COMMAND
MOV      #0X0032,W1  ;COMMAND SET LCD 4 BIT
CALL LCD_COMMAND
MOV      #0X0028,W1  ;2 LINE 5X7 DOT
CALL LCD_COMMAND
MOV      #0X000C,W1  ;DISPLAY ON
CALL LCD_COMMAND
MOV      #0X0001,W1  ;CLEAR SCREEN
CALL LCD_COMMAND

```

```

RETURN

```

```

;-----
;LCD_COMMAND (W1)
;-----

```

```

.global LCD_COMMAND

```

```

LCD_COMMAND:

```

```

BCLR LATC ,#RC13 ;CLR RS
BSET LATC ,#RC14 ;SET EN
SWAP.B    W1
MOV      W1,LATE
MOV      #1,W0
CALL delay_ms
BCLR LATC ,#RC14 ;CLR EN
MOV      #1,W0
CALL delay_ms

```

```

BCLR LATC,#RC13 ;CLR RS
BSET LATC,#RC14 ;SET EN
SWAP.B    W1
MOV      W1,LATE
MOV      #1,W0
CALL delay_ms

```

```
BCLR LATC ,#RC14 ;CLR EN
```

```
MOV      #1,W0
```

```
CALL delay_ms
```

```
RETURN
```

```
;-----
```

```
;LCD_TEXT (W1)
```

```
;-----
```

```
.global LCD_TEXT
```

```
LCD_TEXT:
```

```
MOV      #16,W10
```

```
TBL:      TBLRDL.B [W4++], W1          ; Load the first data value
```

```
SWAP.B    W1
```

```
BSET LATC ,#RC13 ;SET RS
```

```
BSET LATC ,#RC14 ;SET EN
```

```
MOV      W1,LATE
```

```
MOV      #1,W0
```

```
CALL delay_ms
```

```
BCLR LATC ,#RC14 ;CLR EN
```

```
MOV      #1,W0
```

```
CALL delay_ms
```

```
SWAP.B    W1
```

```
BSET LATC,#RC13 ;SET RS
```

```
BSET LATC,#RC14 ;SET EN
```

```
MOV      W1,LATE
```

```
MOV      #1,W0
```

```
CALL delay_ms
```

```

BCLR LATC ,#RC14 ;CLR EN
MOV      #1,W0
CALL delay_ms

```

```

MOV      #0X0000,W1
DEC      W10,W10
CP0      W10
BRA     NZ,TBL

```

```

RETURN

```

```

;-----
;WRITE CHAR LCD
;-----

```

```

.global WRITE_CHAR

```

```

WRITE_CHAR:

```

```

SWAP.B    W2
BSET  LATC ,#RC13 ;SET RS
BSET  LATC ,#RC14
MOV    W2,LATE
MOV    #1,W0
CALL  delay_ms
BCLR  LATC ,#RC14 ;CLR EN
MOV    #1,W0
CALL  delay_ms

```

```

SWAP.B    W2
BSET  LATC ,#RC13 ;SET RS
BSET  LATC ,#RC14
MOV    W2,LATE
MOV    #1,W0
CALL  delay_ms
BCLR  LATC ,#RC14 ;CLR EN

```

```

MOV      #1,W0
CALL    delay_ms

```

```

RETURN

```

```

;-----
;WRITE CHAR LCD
;-----

```

```

.global WRITE_CHAR2

```

```

WRITE_CHAR2:

```

```

SWAP.B   W5
BSET    LATC ,#RC13 ;SET RS
BSET    LATC ,#RC14
MOV      W5,LATE
MOV      #1,W0
CALL    delay_ms
BCLR    LATC ,#RC14 ;CLR EN
MOV      #1,W0
CALL    delay_ms

```

```

SWAP.B   W5
BSET    LATC ,#RC13 ;SET RS
BSET    LATC ,#RC14
MOV      W5,LATE
MOV      #1,W0
CALL    delay_ms
BCLR    LATC ,#RC14 ;CLR EN
MOV      #1,W0
CALL    delay_ms

```

```

RETURN

```

```

;-----

```

```

        .equ __30F4011, 1
        .include "p30f4011.inc"

;-----
;Subroutine:Init_PORTS
;-----

        .global Init_PORTS

Init_PORTS:

        ;Port B
        CLR        LATB            ; clear LATB
        MOV        #0x000F,W0      ; set is inputs
        MOV        W0,TRISB

        ;Port c
        CLR        LATC            ; clear LATC
        MOV        #0x0000,W0      ; set is outputs
        MOV        W0,TRISC

        ;Port D
        CLR        LATD            ; clear LATD
        MOV        #0x0000,W0      ; set is outputs
        MOV        W0,TRISD

        ;Port E
        CLR        LATE            ; clear LATE
        MOV        #0x0000,W0      ; set RE5 to RE0 as outputs
        MOV        W0,TRISE

        ;Port F
        CLR        LATF            ; clear LATF
        MOV        #0xFFFF,W0      ; set is inputs

```

```
MOV W0,TRISF
```

```
RETURN
```

```
.....
```

```
.equ __30F4011, 1
```

```
.include "p30f4011.inc"
```

```
-----
```

```
;Subroutine: Init TMR
```

```
-----
```

```
.global Init_TMR
```

```
Init_TMR:
```

```
CLR T1CON ; Stops the Timer1 and reset control reg.
```

```
CLR TMR1 ; Clear contents of the timer register
```

```
MOV #36864, W0 ; Load the Period register
```

```
MOV W0, PR1 ; with the value 0xFFFF
```

```
BSET IPC0, #T1IP0 ; Setup Timer1 interrupt for
```

```
BSET IPC0, #T1IP1 ; desired priority level
```

```
BCLR IPC0, #T1IP2 ; (this example assigns level 1 priority)
```

```
BCLR IFS0, #T1IF ; Clear the Timer1 interrupt status flag
```

```
BSET IEC0, #T1IE ; Enable Timer1 interrupts
```

```
MOV #0X0010, W0
```

```
MOV W0, T1CON
```

```
; BSET T1CON, #TON
```

```
CLR T2CON ; Stops the Timer1 and reset control reg.
```

```
CLR TMR2 ; Clear contents of the timer register
```

```
MOV #36864, W0 ; Load the Period register
```

```
MOV W0, PR2 ; with the value 0xFFFF
```

```
BSET IPC1, #T2IP0 ; Setup Timer2 interrupt for
```

```
BSET IPC1, #T2IP1 ; desired priority level
```

```
BCLR IPC1, #T2IP2 ; (this example assigns level 1 priority)
```

```
BCLR IFS0, #T2IF ; Clear the Timer2 interrupt status flag
```

```

BSET IEC0, #T2IE           ; Enable Timer2 interrupts
MOV  #0X0010, W0           ; Prescale = 1:8
MOV  W0, T2CON
; BSET T2CON, #TON

CLR T3CON                   ; Stops the Timer1 and reset control reg.
CLR TMR3                    ; Clear contents of the timer register
MOV  #36864, W0             ; Load the Period register
MOV  W0, PR3                ; with the value 0xFFFF
BSET IPC1, #T3IP0
BSET IPC1, #T3IP1           ; Setup Timer1 interrupt for
BCLR IPC1, #T3IP2          ; (this example assigns level 1 priority)
BCLR IFS0, #T3IF           ; Clear the Timer1 interrupt status flag
BSET IEC0, #T3IE           ; Enable Timer1 interrupts
MOV  #0X0010, W0
MOV  W0, T3CON
; BSET T3CON, #TON

CLR T4CON                   ; Stops the Timer4 and reset control reg.
CLR TMR4                    ; Clear contents of the timer register
MOV  #1475, W0              ; Load the Period register
MOV  W0, PR4                ; with the value 0xFFFF
BSET IPC5, #T4IP0           ; Setup Timer4 interrupt for
BCLR IPC5, #T4IP1           ; desired priority level
BCLR IPC5, #T4IP2          ; (this example assigns level 1 priority)
BCLR IFS1, #T4IF           ; Clear the Timer4 interrupt status flag
BSET IEC1, #T4IE           ; Enable Timer4 interrupts
MOV  #0X0000, W0
MOV  W0, T4CON
BSET T4CON, #TON

CLR T5CON                   ; Stops the Timer1 and reset control reg.
CLR TMR5                    ; Clear contents of the timer register
MOV  #2950, W0              ; Load the Period register

```

```

MOV W0, PR5                ; with the value 0xFFFF
BCLR IPC5, #T5IP0
BSET IPC5, #T5IP1          ; Setup Timer1 interrupt for
BCLR IPC5, #T5IP2          ; (this example assigns level 1 priority)
BCLR IFS1, #T5IF           ; Clear the Timer5 interrupt status flag
BSET IEC1, #T5IE          ; Enable Timer1 interrupts
MOV #0X0000, W0
MOV W0, T5CON
; BSET T5CON, #TON
RETURN

```

```

;.....

```

```

.equ __30F4011, 1

```

```

.include "p30f4011.inc"

```

```

;-----
;Check Phase
;-----

```

```

.global Check_Phase

```

```

Check_Phase:
MOV #0X0007, W0
MOV PORTB, W1
AND W1, W0, W1
MOV #0X0003, W0 ;011
CPSEQ W1, W0
BRA Check_Phase

```

```

Check_ABC:
MOV #0X0007, W0
MOV PORTB, W1
AND W1, W0, W1
MOV #0X0001, W0 ;010

```

```

                                CPSEQ      W1,W0
                                BRA         Check_ACB
                                BRA         ABC

Check_ACB:                      MOV         #0X0007,W0
                                MOV         PORTB,W1
                                AND         W1,W0,W1
                                MOV         #0X0002,W0 ;001
                                CPSEQ      W1,W0
                                BRA         Check_ABC
                                BRA         ACB

ABC:                             MOV         #0X0001,W0
                                MOV         W0,PHASE
                                BRA         RET

ACB:                             MOV         #0X0000,W0
                                MOV         W0,PHASE

RET:                             RETURN

;.....

                                .equ __30F4011, 1
                                .include "p30f4011.inc"

;-----
;Check Phase
;-----

                                .global Check_Phase

Check_Phase:                     MOV         #0X0007,W0
                                MOV         PORTB,W1
                                AND         W1,W0,W1

```

```

MOV          #0X0003,W0 ;011
CPSEQ W1,W0
BRA          Check_Phase

Check_ABC:
MOV          #0X0007,W0
MOV          PORTB,W1
AND         W1,W0,W1
MOV          #0X0001,W0 ;010
CPSEQ W1,W0
BRA          Check_ACB
BRA          ABC

Check_ACB:
MOV          #0X0007,W0
MOV          PORTB,W1
AND         W1,W0,W1
MOV          #0X0002,W0 ;001
CPSEQ W1,W0
BRA          Check_ABC
BRA          ACB

ABC:
MOV          #0X0001,W0
MOV          W0,PHASE
BRA          RET

ACB:
MOV          #0X0000,W0
MOV          W0,PHASE

RET:
RETURN

```

```

;.....

```

```

        .equ __30F4011, 1
        .include "p30f4011.inc"

;-----
;Subroutine:Init_ADC 10 BIT
;-----

        .global Init_ADC

Init_ADC:

        MOV        #0X0007,W0
        MOV        W0,ADPCFG

                ;0x5432109876543210
        MOV        #0B0000000011101110,W0                ;0x00E6
        MOV        W0,ADCON1

                ;0x5432109876543210
        MOV        #0B0000000100000000,W0                ;0x0300
        MOV        W0,ADCON2

                ;0x5432109876543210
        MOV        #0B0000000000000011,W0                ;0x1F81
        MOV        W0,ADCON3

                ;0x5432109876543210
        MOV        #0B0000000000000011,W0                ;0x0003
        MOV        W0,ADCHS

        MOV        #0x0000,W0                                ;0x000F
        MOV        W0,ADCSSL

;        BSET    ADCON1,#ADON                ; Turn on A/D
        RETURN
;-----

```

```

.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"

;-----
;Get adc value
;-----

.global GET_ADC

GET_ADC:      BSET  ADCON1,#ADON ; Turn on A/D
              BTSS  ADCON1,#DONE
              BRA   GET_ADC

              MOV   ADCBUF0,W4
              MOV   #0X20,W5
              MPY   W4*W5,A
              MOV   ACCAL,W4
              RRC   W4,W6

              ;    MOV   #0X7FFF,W4
              ;    XOR   W3,W6,W6
              ;    ASR   W6,W6
              ;    AND   W6,W4,W6
              ;    SL   W6,W6

              MOV   #0X3FFF,W0
              CP    W6,W0
              BRA   GT,GAIN

              ;    MOV   W0,W6
              SUB   W0,W6,W1
              ADD   W0,W1,W6

```

GAIN:

SUB W6,W0,W6

SL W6,W6

MOV #0X147,W5

MPY W5\*W6,A

MOV ACCAH,W6

RETURN

;.....

.equ \_\_30F4011, 1

.include "p30f4011.inc"

;-----

;Delay Time W0 ms

;-----

.global delay\_ms

delay\_ms:

DO #10000,END\_1ms

DO W0,END\_W0

NOP

NOP

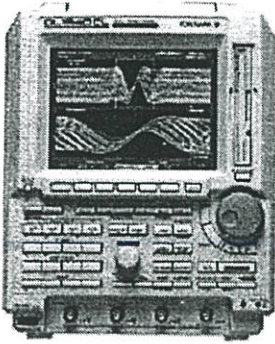


END\_W0: NOP

END\_1ms: NOP

RETURN

```
;.....  
    .equ __30F4011, 1  
    .include "p30f4011.inc"  
;-----  
;Delay Time W0 ms  
;-----  
    .global delay_us  
delay_us:  
        DO    #10,END_1us  
        DO    W0,END_W01  
        NOP  
        NOP  
END_W01:    NOP  
END_1us:    NOP  
        RETURN
```

ภาคผนวก ข  
เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น DL1520/L (4 Channel)</p> <p>รายละเอียด 150 MHz bandwidth 200 MS/s sampling rate on one channel or 100 MS/s on two channels (DL1520/L) 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V (DC + AC peak) 2% DC accuracy, Internal low pass filter</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN ARNOUX)</p> <p>รุ่น E3N</p> <p>รายละเอียด Current Probe 10 – 100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz. (@ 3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe</p> <p>รุ่น 700924</p> <p>รายละเอียด 100 MHz</p> <p>A probe lets you make wide-band differential input measurements</p>

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Clamp (YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น 2343 02</p> <p>รายละเอียด Amp 40A / 400A / 1000 A</p> <p>Volt 40V / 400V / 600 V</p> <p>Ohm 400 / 4k Ohm</p>
---	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Power Harmonics Analyzer (FLUKE)</p> <p>รุ่น FLUKE 41B</p> <p>รายละเอียด 5 to 600 Vrms, 1.00 to 1000 Arms</p> <p>up to 600 kw., 6 Hz to 99.9 Hz</p> <p>Indicates fundamental to 13 th harmonics.</p> <p>Measures crest factor, PF, DPF, K-factor</p> <p><b>%THD, %THD-R</b></p>
--	--

ภาคผนวก ค  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27  
 27<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

# Volume 1

สาขาค่าความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย  
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น



[Back to Content](#)
[Back to main](#)

## การเริ่มเดินแบบมีม้วนของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระแสเริ่มเดินคงที่

### Soft starting of a 3 phase induction motor with constant starting current

พงษ์พรรณ พงษ์ทองธรรม เถธิมราที มาท วิจิตร กิมมรต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

3 ม.2 อ.ฉลองกรุง แขวง บางปลาพิว เขต ลาดกระบัง กทม. 10520

โทรโทรสาร: 0-2737-3000 Email: kkwijit@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ให้คำกล่าวเกี่ยวกับวิธีการเริ่มเดินมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบมีม้วนที่มีการควบคุมกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์ให้คงที่ตามที่ต้องการไว้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมและทำการเปรียบเทียบการทำงานของระบบในแบบที่มีการควบคุมกระแสเริ่มเดินหรือแบบ วงปิด (closed loop) และแบบไม่มีควบคุมกระแสเริ่มเดินนอกแก๊นนี้ยังทำการทดสอบชุดควบคุมที่ได้ออกแบบโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 kW 380 V และให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

#### Abstract

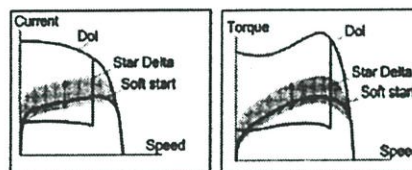
This paper describes softstarting of a 3 phase induction motor having current control with required constant starting current using a micro controller. An operating system comparison between closed loop starting current control and without starting current control is given. In addition designed soft starter is tested with 3  $\phi$ , 7.5kW, 380 V induction motor. The results appear satisfactory

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องจักร ในงานอุตสาหกรรมใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) เพราะมีขนาดเล็กและราคาถูกกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นอีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่การบำรุงรักษาที่ง่ายน้อย แต่ก็ยังมีข้อเสียที่เกี่ยวกับเครื่องจักรขนาดใหญ่ โดยเฉพาะขณะเริ่มเดินมอเตอร์ แรงบิดและกระแสสูงมากทำให้เครื่องจักรเริ่มเดินด้วยการกระชากอย่างแรง เป็นผลให้มอเตอร์และชุดส่งกำลังมีอายุสั้นลง นอกจากนี้การใช้กระแสขณะเริ่มเดินสูง ยังเป็นผลข้างเคียงต่อระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอีก เช่น ระดับแรงดันตก (voltage drop) เป็นต้น [1]

การเริ่มเดินแบบมีม้วน (Soft starting) เป็นเทคโนโลยีการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทดแทนวิธีเริ่มเดินแบบเดิมได้แก่ การเริ่มเดินข้อน

แรงดันพิกัดโดยตรง (direct-on-line start, Dol) และการเริ่มเดินแบบสตาร์เดลต้า (star-delta start) โดยอาศัยหลักการการควบคุมแรงดันไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์กำลังที่ทันสมัยทันสมัยที่สุด ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งดูได้จากกราฟเปรียบเทียบของกระแสและแรงบิดที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เปรียบเทียบกระแสและแรงบิดของการเริ่มเดินในแบบต่างๆ

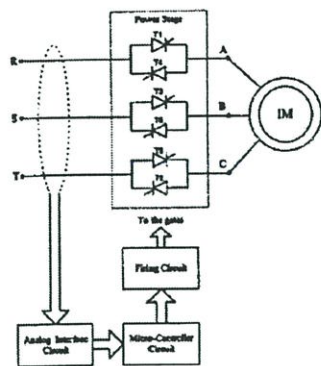
ในบทความนี้การเริ่มเดินแบบมีม้วน ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกมาตรฐาน โดยควบคุมการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การเริ่มเดินของมอเตอร์มีประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงสูงและในบทความนี้เป็นการศึกษาการเริ่มเดินแบบกระแสคงที่ซึ่งสามารถจำกัดระดับกระแสไฟฟ้าขณะทำการเริ่มเดินมอเตอร์ให้อยู่ในค่าที่คงไว้ไว้ทั้งที่ (2.5-5 เท่าของกระแสที่ขโมมอเตอร์) การควบคุมกระแสเริ่มเดินไม่ให้สูงเกินไปช่วยลดปัญหาการต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (Peak demand) แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage sags) ในระบบ ช่วยลดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า, สายไฟฟ้า รวมถึงถนนอมอายุการใช้งานของมอเตอร์อีกด้วย

#### 2. หลักการทำงานของระบบ

รูปแบบวงจรของการเริ่มเดินแบบมีม้วนทำได้โดยวิธีสร้างตัวนำเป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในบทความนี้ใช้ ทรินสเตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมโดยมีการวางจรงดังรูปที่ 2 [1]

Back to Content

Back to main



รูปที่ 2 แผนผังรูปแทนของระบบ

จากรูปวงจรที่ 2 จะเห็นว่าใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน โดยใช้ไทรสเตอร์ 3 คู่ต่อบนขานตรงข้ามกัน โดยทำงานเป็นสวิตช์ตัดเพื่อปรับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์โดยรับสัญญาณอนาล็อกเข้ามาทำการแปลงเป็นข้อมูลทางดิจิทัลนำมาทำการประมวลผลตามคำสั่งและเปรียบเทียบกับค่าของกระแสที่ต้องการเพื่อให้ได้กระแสตามที่ตามต้องการ และจ่ายสัญญาณอนาล็อกเข้าวงจรสร้างสัญญาณมุมจุดชนวนให้แก่ไทรสเตอร์เพื่อควบคุมระดับแรงดันเพื่อให้กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าคงที่ และตรงตามระดับที่ต้องการและจากการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ทำให้กระแสที่จ่ายให้มอเตอร์มีรูปร่างเปลี่ยนไปจากสัญญาณซายน์ซึ่งจะเป็นลักษณะสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงเป็นผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิดในช่วงเริ่มเดินบ้าง

จากหลักการทำงานของไทรสเตอร์การกำหนดมุมจุดชนวนเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ของวงจรในรูปที่ 1 จะต้องมีถึงมุม โหลดของมอเตอร์ที่วัดเนื่องจากมอเตอร์เป็น โหลดแบบ R-L[3] ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 1

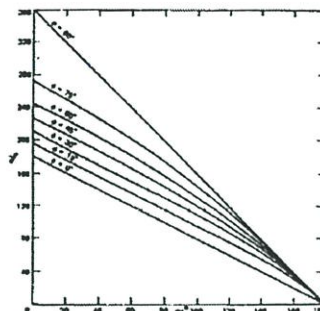
$$\sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L}(\frac{\alpha - \beta}{\omega})} = 0 \quad (1)$$

โดยที่

- α เป็น มุมจุดชนวน
- β เป็น มุมหยุดนำกระแส
- γ เป็น จำนวนมุนนำกระแสของไทรสเตอร์ (β - α)

$$\phi \text{ เป็น มุมโหลด } \left( \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \right)$$

และนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α และ γ ที่มุมโหลดค่าคงโดยที่

### 3. รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรสมมูลของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งแทนด้วยจรัศวัตต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรมซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้[2]

$$\begin{bmatrix} v_s^s \\ v_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pL_m \\ (p - j\omega_0)L_m & R_r + (p - j\omega_0)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^s \\ i_r^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 (2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแกน direct axis และ quadrature axis โดยให้สมการเปลี่ยนรูปและใช้การอินทิเกรตมาทริกในการแก้สมการซึ่งจะได้สมการกระแสดังสมการข้างล่างนี้

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_\sigma^2} \left( \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ v_{dr}^s \\ v_{qr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_0 L_m^2 & R_r L_m & \omega_0 L_r L_m \\ -\omega_0 L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_0 L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_0 L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_0 L_s L_m \\ \omega_0 L_s L_m & R_s L_m & \omega_0 L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

Back to Content

Back to main

โดยที่

$$L_{\sigma} = \sqrt{L_s L_r - L_m^2} \tag{4}$$

จากหลักการข้างต้นได้ทำการจำลองระบบลงในโปรแกรมจำลองระบบซึ่งในบทความนี้ใช้โปรแกรม Simulink เป็นเครื่องมือในการจำลอง

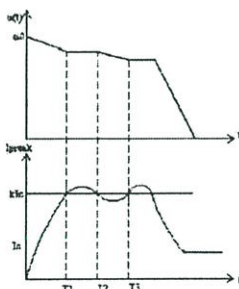
จากการจำลองระบบในโปรแกรมทดสอบพบว่าสามารถที่จะควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ให้คงที่ได้โดยสามารถเลือกได้หลายวิธี(1)เช่น

1. เริ่มเดินมอเตอร์ด้วยมุมจลจนวนสูงๆและใช้วิธีการป้อนกลับเพื่อควบคุมกระแส
2. เทียบค่าจากตาราง (Look up table)
3. กำหนดจากวงจรสมมูลค้อยเฟส โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการคำนวณ

ซึ่งในบทความนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมจึงเลือกใช้วิธีที่ 1 ในการควบคุมกระแส โดยทำการเขียนชุดคำสั่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ตามกลวิธีการควบคุมกระแสที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

4.วิธีการควบคุมกระแส

วิธีการควบคุมกระแสที่นำเสนอนี้กระทำเพื่อควบคุมกระแสขณะเริ่มเดินของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ตามค่าที่ตั้งไว้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม จากรูปสัญญาณในรูปที่ 4 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดค่ากระแสเริ่มเดินที่ต้องการ(kIn)เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ป้อนกลับมา

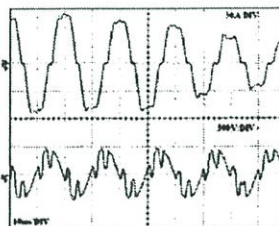


รูปที่4 วิธีจำกัดกระแสเริ่มเดินของมอเตอร์

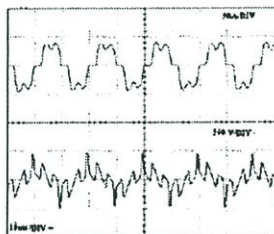
ในรูปที่ 4 มุมจลจนวน  $\alpha_s$  จะถูกกำหนดให้มีค่าสูงประมาณ  $110^\circ - 120^\circ$  ทำให้กระแสเริ่มเดินมีค่าที่มากกว่าจุดควบคุมจะทำการลดมุมจลจนวนลงจนถึงที่เวลา  $t = T1$  สัญญาณกระแสที่ป้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้จุดควบคุมจะคงที่ค่ามุมจลจนวนไว้จนกระทั่งที่เวลา  $t = T2$  สัญญาณกระแสที่ป้อนกลับมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้จุดควบคุมจะลดค่ามุมจลจนวนลงอีก จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัว

5.ผลการจำลองและทดลองระบบ

การจำลองระบบกระทำในโปรแกรม Simulink ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องทดลองโดยใช้มอเตอร์ขนาด 7.5 kW 380 v ซึ่งรูปที่5และรูปที่6 เป็นรูปร่างสัญญาณกระแสไลน์และแรงดันไลน์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่สภาวะคงตัวที่มุมจลจนวนค่าต่างๆกันที่ขณะ ไม่มีโหลด



รูปที่5 ผลการทดลองรูปบนกระแสไลน์และรูปล่างแรงดัน ไลน์ที่มุมจลจนวน 90 องศา



รูปที่6 ผลการทดลองรูปบนกระแสไลน์ และรูปล่างแรงดัน ไลน์ ที่มุมจลจนวน 120 องศา

จากรูปที่5และ6 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มมุมจลจนวนทำให้ค่าแรงดันและกระแสลดลงกระทำให้กระแสไม่ต่อเนื่องดังรูปที่5 ค่าแรงดันที่มุมจลจนวนที่ 90 องศากระแสมีลักษณะสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องและเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสในรูปที่ 6 ที่จ่ายแรงดันที่มุมจลจนวนที่ 120 องศาซึ่งมีลักษณะของสัญญาณ ไม่ต่อเนื่องมากกว่าแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำ

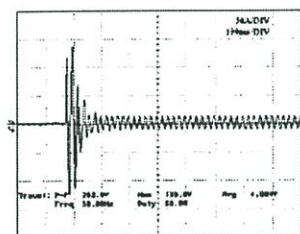
PE46

[Back to Content](#)

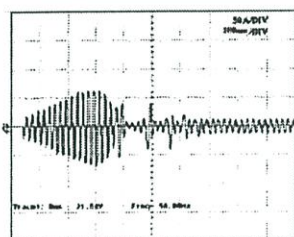
[Back to main](#)

การลดมุมจุดขนานลงจะทำให้กระแสมีความต่อเนื่องมากขึ้นซึ่งสอดคล้องตามกราฟในรูปที่ 3

ในรูปที่ 7 ทำการเริ่มเดินแบบป้อนแรงดันที่กักโดยตรงซึ่งมีกระแสเริ่มเดินประมาณ 6 เท่า และทำการเริ่มเดินโดยควบคุมแบบวงรอบเปิดโดยใช้เวลาตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันตั้งแต่มอเตอร์ที่กำหนดจนถึง 100 % ของแรงดันที่กักเท่ากับ 1.5 วินาที ได้รูปร่างสัญญาณของกระแสในรูปที่ 8 เห็นได้ว่ากระแสเริ่มเดินในแบบควบคุมวงเปิดมีขนาดลดลงทำให้การเริ่มเดินของมอเตอร์เป็นไปอย่างนุ่มนวล และถ้าเพิ่มแรงดันเริ่มต้นมากขึ้นจะได้รูปลักษณะกระแสคล้ายกันแต่ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวสั้นลง

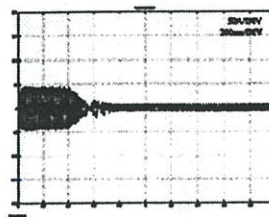


รูปที่ 7 กระแสเริ่มเดินแบบเริ่มเดินแบบป้อนแรงดันที่กักโดยตรง

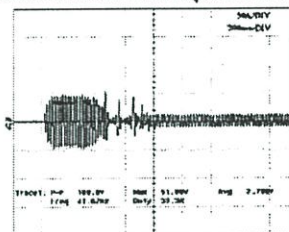


รูปที่ 8 กระแสเริ่มเดินโดยควบคุมแบบวงเปิดที่แรงดัน 10% ของที่กัก

จากการทดสอบที่ได้ทำให้ทราบว่ากรเริ่มเดิน โดยควบคุมแบบวงรอบเปิดมีขนาดของกระแสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรเริ่มเดินแบบป้อนแรงดันที่กัก โดยตรงและเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรควบคุมแบบวงเปิดและการควบคุมแบบวงรอบเปิด ได้ทำการจำลองระบบในโปรแกรม Simulink โดยมีการควบคุมกระแสเริ่มเดินให้มีค่าตามที่กำหนดและได้รูปร่างสัญญาณกระแสดังรูปที่ 9 ซึ่งสามารถลดกระแสเริ่มเดินได้และกำหนดขนาดกระแสหรือแรงบิดเริ่มเดินที่แน่นอนได้ ต่างจากการควบคุมแบบวงรอบเปิดที่ไม่สามารถกำหนดกระแสได้แน่นอน



รูปที่ 9 กระแสเริ่มเดินของมอเตอร์ที่ควบคุมแบบวงเปิดจากการจำลอง



รูปที่ 10 กระแสเริ่มเดินของมอเตอร์ที่ควบคุมแบบวงเปิดได้จากการทดลอง

จากการทดลองระบบแบบวงรอบเปิดได้รูปร่างสัญญาณกระแสในรูปที่ 10 เมื่อเทียบกับการจำลองในรูปที่ 9 จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเห็นว่าช่วงเวลารับเริ่มเดินจะต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการทดลองมีข้อจำกัดของชุดควบคุมซึ่งมีความละเอียดและความเร็วไม่เท่ากับการจำลอง

### บทสรุป

จากการจำลองและการทดลองจะพบว่าการทำงานเป็นไปตามทฤษฎีและใช้งานได้จริงและแบบควบคุมกระแสคงที่มีข้อได้เปรียบคือสามารถตั้งค่ากระแสหรือแรงบิดให้เหมาะสมกับโหลดได้ และสามารถลดขนาดของอุปกรณ์ดีคองและสายคั่นนำได้

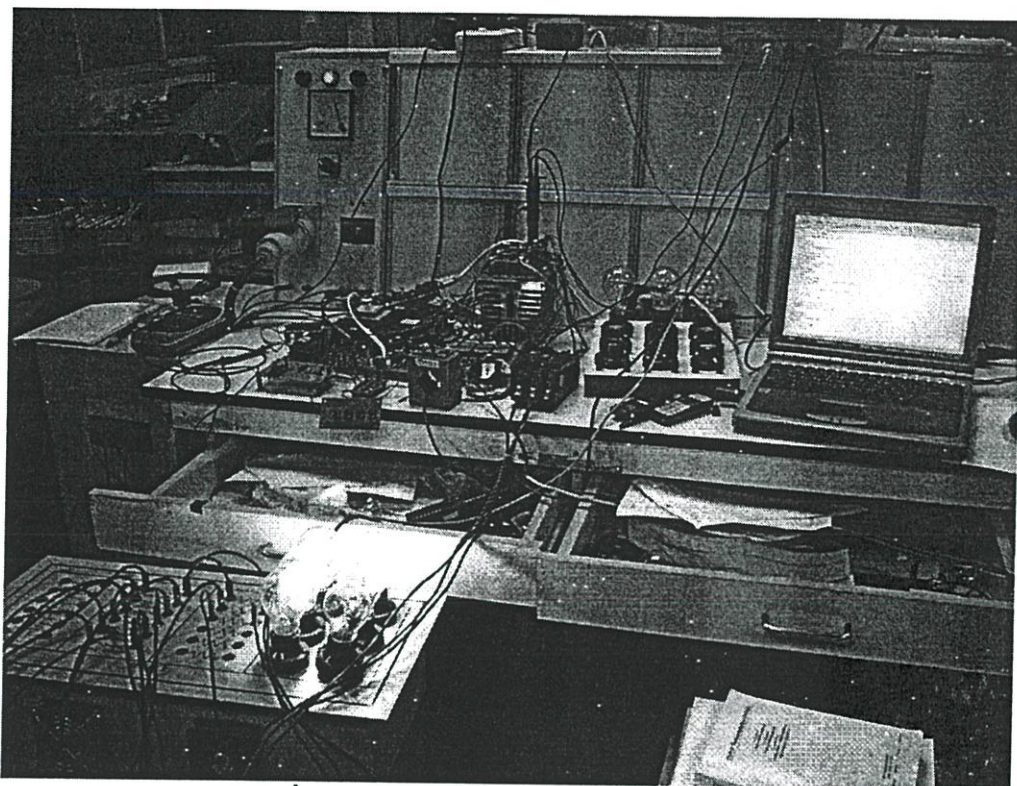
### เอกสารอ้างอิง

1. Gürkan Zenginobuz, İşık Çadırı, "Soft starting of induction motors at constant current with minimized starting torque pulsation." IEEE Trans. Ind. Appl., vol 37, pp. 1334-1347, Sept/Oct. 2001
2. Andrzej M. Trzynadlowski, "The Field Orientation Principle in Control of Induction Motor", Kluwer Academic Publishers, 1994.
3. จุฑมศักดิ์ อึ้งอิน, "Power electronics 1", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

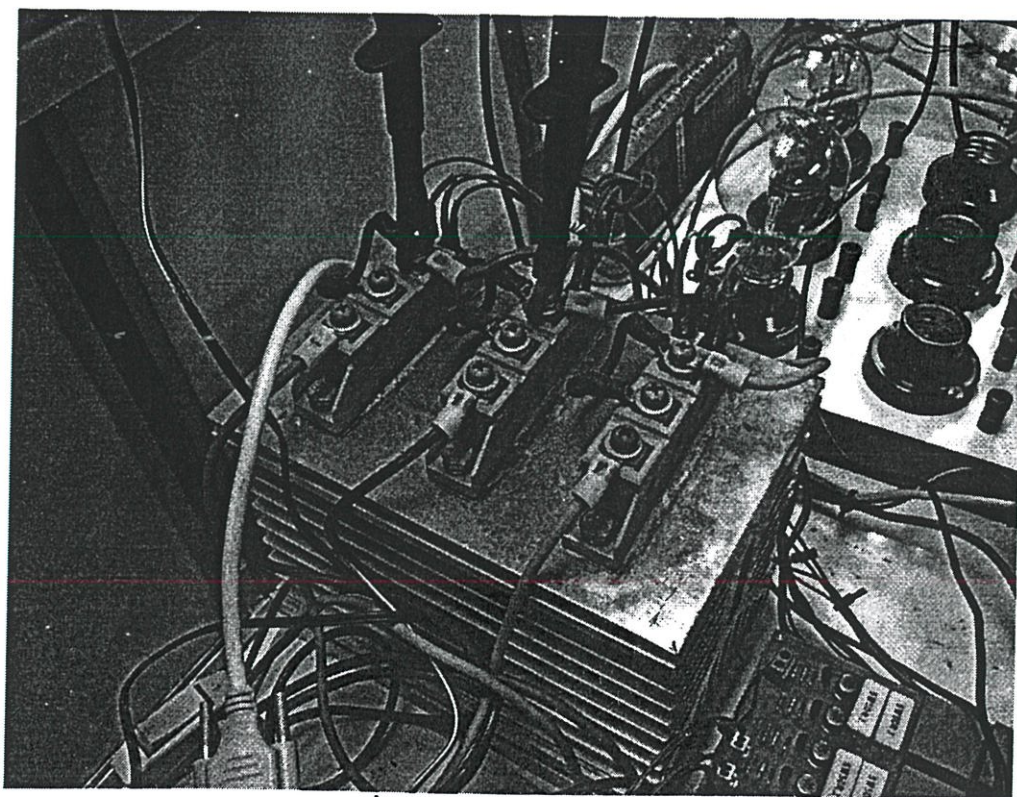
ภาคผนวก ง.

โครงการต้นแบบในงานวิจัย

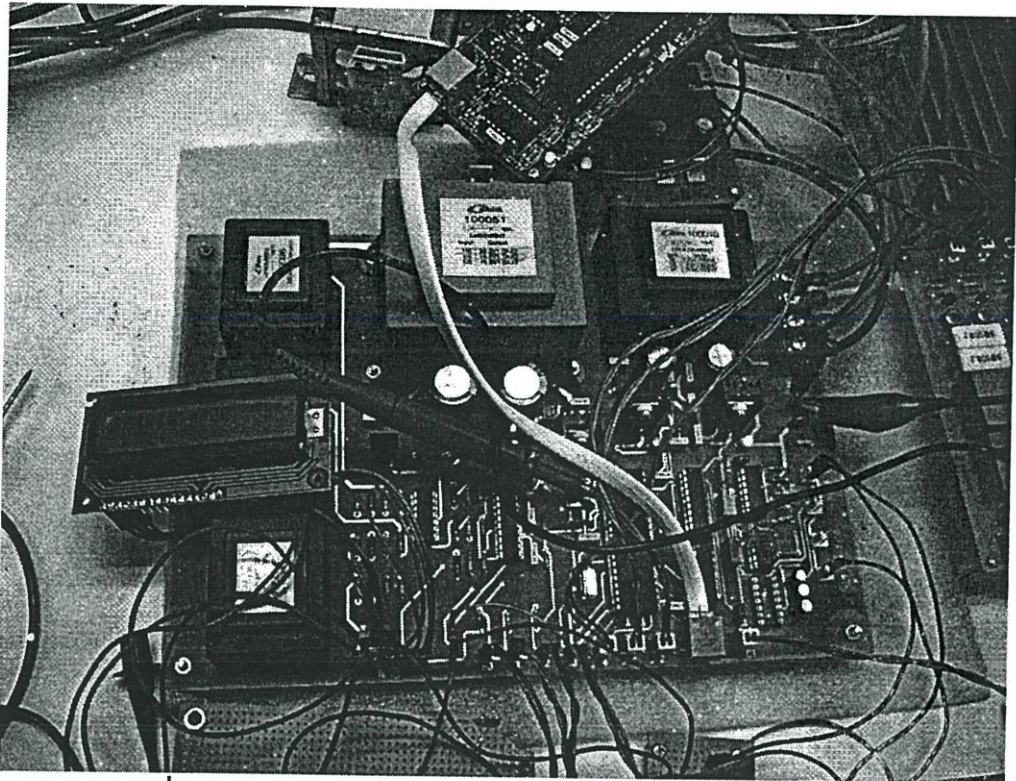
## โครงการต้นแบบในงานวิจัย



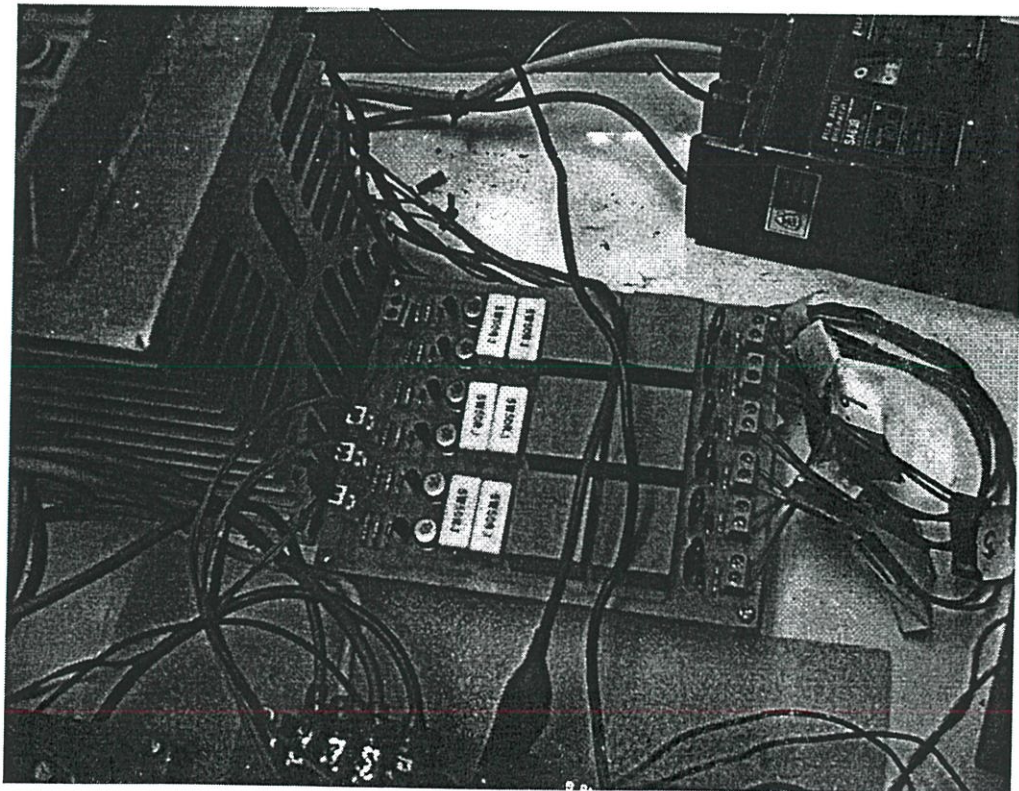
รูปที่ 1 แสดงระบบโดยรวมของเครื่องต้นแบบ



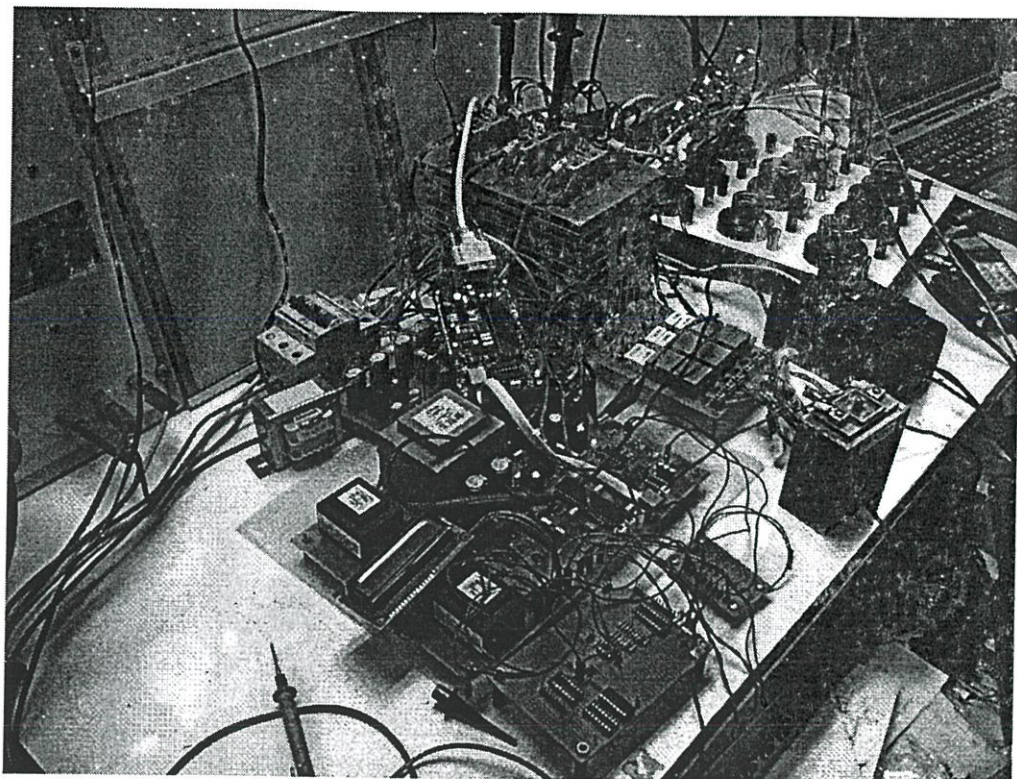
รูปที่ 2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง



รูปที่3 วงจรตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) เบอร์ dsPIC30F4011



รูปที่4 วงจรตรวจจับ



รูปที่ 5 วงจรทั้งหมดของโครงการ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	13 มกราคม 2514 ที่ กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	12/30 ม.10 ถ.เอกชัย แขวง บางขุนเทียน เขต จอมทองกรุงเทพฯ 10150 โทร.0-2417-1568
ประวัติการศึกษา	2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง