

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล  
ที่ใช้สำหรับหม้อป่น

STUDY AND DESIGN OF A CLAW POLE MOTOR DRIVE FOR  
THE CENTRIFUGAL APPLICATION



T110295



อภิวัฒน์ ทวยเจริญ

APIWAT THUAYCHAREON

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 110295  
วันเดือนปี..... - 1 ๗๓๘ 2553

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-EN-M-020-048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY AND DESIGN OF A CLAW POLE MOTOR DRIVE FOR  
THE CENTRIFUGAL APPLICATION**



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

**2010**

**KMITL-2010-EN-M-020-048**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**




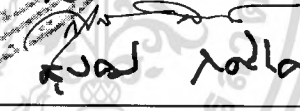
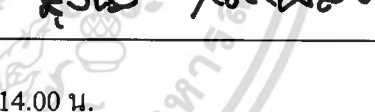
**FACULTY OF ENGINEERING**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพลที่ใช้สำหรับหม้อป่น  
Thesis Title Study and Design of a Claw Pole Motor Drive for the Centrifugal Application  
นักศึกษา นายอภิวัฒน์ ท่วยเจริญ  
รหัสประจำตัว 48060221  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์ สัจจา  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-020-048

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิจิตร	กิมเรศ	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
ดร.สุเมธ	เนติศักดิ์จันท	
รศ.ดร.สุวัฒน์	กิตติรัตน์ สัจจา	


วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2553 เวลา 12.00-14.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

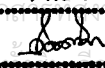
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 31 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2553

ลงชื่อ 

ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล ที่ใช้สำหรับหม้อป่น
ชื่อนักศึกษา	นาย อภิวัฒน์ ทวยเจริญ
รหัสประจำตัว	48060221
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและการออกแบบและปรับปรุงระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล ที่ใช้สำหรับงานหม้อป่นในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ หลักการทำงานของมอเตอร์ และหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกที่ใช้อยู่เดิม รวมไปถึงหลักการทำงานของหม้อป่น จึงจะสามารถนำไปการออกแบบและปรับปรุงระบบขับเคลื่อนให้เป็นระบบขับเคลื่อนระบบใหม่ ซึ่งเป็นระบบดิจิทัลต่อไปได้

มอเตอร์แบบคลอว์โพลจึงได้ถูกคิดค้นขึ้นมา โดยการใช้ไทรสเตอร์ 18 ตัวในการทำงาน เพื่อทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์เหมือนกับดีซี มอเตอร์ แต่ในการควบคุมการหมุนของคลอว์โพลจำเป็นต้องทราบถึงตำแหน่งของโรเตอร์จึงจะควบคุมการหมุนได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในวงจรควบคุมจึงจำเป็นต้องมีตัวตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลจะทำการเลียนแบบระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก โดยใช้หลักการทำงานที่เหมือนกันทุกประการ เพื่อนำไปใช้กับหม้อป่นได้อย่างสมบูรณ์แบบ

<b>Thesis Title</b>	Study and Design of a Claw Pole Motor Drive for the Centrifugal Application
<b>Student</b>	Mr. Apiwat Thuaychareon
<b>Student ID.</b>	48060221
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Supat Kittiratsatcha

## ABSTRACT

This thesis proposes the study, design and development of a claw pole motor drive for a centrifugal application in factory. Therefore necessary to understand the structure and composition of the motor, principal work of the motor and drive systems existing analog, including the work of the centrifugal. They can be designed and improved drive system for driving the system, a digital to her.

A claw pole motor law has been developed up, by using the thyristor 18 unit working to adjust the dc voltage to the armature winding as dc motor. But to control the rotation of a claw pole motor need to know position of the rotor, To take control the rotation correctly. Therefore, the control circuit is required to position sensor of the pole of the rotor.

Digital drive system will mimic analog drive systems in all respects. Using the same principle works in all respects, To be used with centrifugal completely

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ตลอดจนคำปรึกษาในด้านต่างๆเกี่ยวกับการดำเนินงาน จากท่านอาจารย์ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์ สัจจา ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณภูมิภัทร์ จำปีทอง ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการจัดทำ วิทยานิพนธ์ คุณพ่อและคุณแม่ผู้มีพระคุณทุกคน เพื่อนๆที่ๆน้องๆทุกคนที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ที่ได้ช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

คุณค่าประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบคุณค่าต่างๆเหล่านี้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษา เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ และสามารถพัฒนาประเทศชาติได้ต่อไป

อภิวัฒน์ ทวยเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	8
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	11
2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์.....	11
2.1.1 ขดลวดฟิลด์.....	11
2.1.2 ขดลวดอาร์เมเจอร์.....	12
2.1.3 คลอว์โพลโรเตอร์.....	13
2.1.4 ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์.....	13
2.2 ลักษณะการวางตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ การเกิดแรงบิดของมอเตอร์ การเกิด สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ และการวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์.....	15
2.2.1 ลักษณะการวางตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....	15
2.2.2 การเกิดแรงบิดของมอเตอร์.....	16
2.2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์.....	18
2.2.4 การวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 โครงสร้างและหลักการทํางานของระบบขับเคลื่อน.....	20
2.3.1 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....	20
2.3.2 การเลือกกลุ่มการทํางานของไทรสเตอร์.....	21
2.3.3 หลักการทํางานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....	27
2.3.4 การควบคุมการทํางานของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	33
2.4 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	34
2.5 หลักการทํางานของระบบหม้อป่นน้ำตาล.....	35
บทที่ 3 การออกระบบขับเคลื่อนจากระบบอนาล็อกเป็นระบบดิจิทัล.....	36
3.1 โครงสร้างและหลักการทํางานของ CPLD และตัวอย่างการเขียน โปรแกรม.....	37
3.1.1 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของ CPLD.....	40
3.1.2 โครงสร้างของ Function Block.....	41
3.1.3 โครงสร้างทาง Macrocell.....	41
3.1.4 โครงสร้างของ Fast CONNECT Switch Matrix.....	43
3.1.5 โครงสร้างของวงจรในส่วนของ I/O Block.....	43
3.1.6 ลักษณะการไหลคโปรแกรม.....	45
3.1.7 ตัวอย่างการเขียน โปรแกรม.....	46
3.2 การออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยใช้ CPLD.....	49
3.2.1 การใช้ CPLD แปลงสัญญาณของตัวตรวจจับแหน่งของโรเตอร์.....	50
3.2.2 กลุ่มการทํางานไทรสเตอร์ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	51
3.2.3 ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	62
3.2.4 การทํางานของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ.....	64
3.2.5 ไทรสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าและขณะลดความเร็ว.....	74
บทที่ 4 ค่ากราฟต่างๆ ผลการทดลอง.....	76
4.1 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสถานะต่างๆ.....	76
4.1.1 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....	76
4.1.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่ความเร็วต่างๆ ขณะมอเตอร์...80	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์การทำงานในขณะเร่งความเร็วและขณะลดความเร็ว.....	86
4.3 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำงานในสภาวะต่างๆ ที่ได้จากการวัดจริง.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....19
3.1	การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์.....51
4.1	ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำงานในสภาวะต่างๆ ที่ได้จากการวัดจริง.....87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	เปรียบเทียบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพลและดีซี มอเตอร์.....1
1.2	หม้อป่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม.....2
1.3	ตัวตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก.....4
1.4	โครงสร้างระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....4
1.5	ไทรสเตอร์จำนวน 18 ตัวของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....5
1.6	การทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....6
1.7	การทำงานของดีซี มอเตอร์.....6
1.8	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส .....7
1.9	ลักษณะรูปคลื่นในการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส .....7
1.10	ส่วนประกอบหลักของระบบระบบอนาล็อก.....8
1.11	ส่วนประกอบหลักของระบบดิจิทัล.....9
2.1	โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์.....11
2.2	ขดลวดฟิลด์.....12
2.3	ขดลวดอาร์เมเจอร์.....12
2.4	คลอว์โพลโรเตอร์.....13
2.5	ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์.....14
2.6	งานที่วัดตัดผ่านสวิทช์ของตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....14
2.7	การวางตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์สำหรับมอเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก.....15
2.8	สัญญาณเอาต์พุทของตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก.....16
2.9	มอเตอร์แบบคลอว์โพล โดยมีโรเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก.....16
2.10	การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....18
2.11	วงจรพื้นฐานระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....20
2.12	ไทรสเตอร์จำนวน 18 ตัว ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....21
2.13	สัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกล.22
2.14	กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกล.....22
2.15	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน.....23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน.....24
2.17	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน.....24
2.18	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน.....25
2.19	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน.....25
2.20	ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน.....26
2.21	วงจรพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงเฟสของไทรสเตอร์.....26
2.22	การทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....27
2.23	วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....28
2.24	ลักษณะแรงดันไฟฟ้าขณะที่ไทรสเตอร์ทำงาน.....28
2.25	วงจรพื้นฐานมอเตอร์แบบคลอว์โพลในการควบคุมมุมจุดชนวน( $\alpha$ ).....29
2.26	การควบคุมมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) ของระบบ.....29
2.27	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อไทรสเตอร์ทำงานที่มุมชนวน $0 < \alpha < 180^\circ$ .....30
2.28	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 1 (S1-S6).....31
2.29	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 2 (S1-S2).....31
2.30	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 3 (S2-S3).....31
2.31	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 4 (S3-S4).....32
2.32	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 5 (S4-S5).....32
2.33	การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 6 (S5-S6).....32
2.34	ลักษณะกระแสไฟฟ้าขณะที่ไทรสเตอร์ทำงานทั้ง 6 ช่วง.....33
2.35	การควบคุมการทำงานของ Close Loop Speed Control ระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....33
2.36	โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....34
2.37	ระบบการทำงานของหม้อป่น.....35
3.1	ส่วนประกอบหลักของระบบดิจิทัล.....36
3.2	CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILIN.....37
3.3	แสดงคุณสมบัติของ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX.....38
3.4	การเชื่อมต่อใช้งานด้านอินพุตและเอาต์พุต CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX .....39
3.5	โครงสร้างของชิพ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX .....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 โครงสร้างของ Function Block .....	41
3.7 โครงสร้างภายในของ Macrocell ของ CPLD ตระกูล XC 9500.....	42
3.8 สายสัญญาณ Global ที่ต่อตรงเข้าไปยัง Macrocell.....	42
3.9 การทำงานในของ Fast CONNECT Switch Matrix .....	43
3.10 แสดงวงจรในส่วนของ I/O Block และ Global Tri-Stat .....	44
3.11 การโปรแกรม CPLD ตระกูล XC9500.....	45
3.12 ชุดโปรแกรม Xilinx ISE WebPA.....	46
3.13 ชุด Schematic Capture Tool .....	47
3.14 ตัวอย่างการออกแบบชุด Schematic Capture Tool .....	47
3.15 ตัวอย่างการกำหนดค่า Input ของ Gate .....	48
3.16 ตัวอย่างการกำหนดค่า Output ของ Gate .....	48
3.17 วงจรพื้นฐานของระบบของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	49
3.18 บล็อกไอโอะแกรมของ CPLD (Complex Programmable Logic Device).....	50
3.19 การเขียนวงจร Schematic แปลงสัญญาณเพื่อเลือกกลุ่มการทำงานจาก CPLD.....	51
3.20 การเลือกกลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์จาก CPLD.....	52
3.21 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์.....	53
3.22 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q1.....	54
3.23 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q2.....	55
3.24 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q3.....	56
3.25 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q4.....	57
3.26 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q5.....	58
3.27 กลุ่มการทำงานของ ไทริสเตอร์ Q6.....	59
3.28 ลักษณะกระแสไฟฟ้าในการทำงานของ ไทริสเตอร์ในแต่ละกลุ่ม.....	61
3.29 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	62
3.30 ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	63
3.31 การควบคุมการทำงานของ Close Loop Speed Control ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	63
3.32 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ไฟฟ้าที่ความเร็ว 50 รอบ.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 50 รอบ.....	66
3.34 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 200 รอบ.....	67
3.35 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 200 รอบ.....	68
3.36 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 700 รอบ.....	69
3.37 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 700 รอบ.....	70
3.38 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 1200 รอบ.....	71
3.39 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 1200 รอบ.....	72
3.40 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	73
3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานไทรสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้า และขณะลดความเร็ว.....	74
4.1 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 1.....	76
4.2 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 2.....	77
4.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 3.....	77
4.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 4.....	78
4.5 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 5.....	78
4.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ในช่วงที่ 6.....	79
4.7 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ทั้ง 6 ช่วงการทำงาน.....	79
4.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 50 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	80
4.9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 50 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	80
4.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	81
4.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล.....	81
4.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 700 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 700 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล.....	82
4.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 1200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	83
4.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 1200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล.....	83
4.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟส ขณะมอเตอร์เร่ง ความเร็วของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	84
4.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟส ขณะมอเตอร์เร่ง ความเร็วของระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล.....	84
4.18 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟส ขณะมอเตอร์ลด ความเร็วของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก.....	85
4.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟส ขณะมอเตอร์ลด ความเร็วของระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล.....	85
4.20 ความสัมพันธ์การทำงานในขณะเร่งความเร็วและขณะลดความเร็ว.....	86
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้า.....	88
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า.....	88
5.1 เปรียบเทียบโครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกและระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล....	90
5.2 หลักการของ Close Loop Speed Control ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล.....	91
5.3 หลักการของ Close Loop Speed Control ของดีซี ไดรฟ์.....	91
5.4 ค่าความเหนี่ยวนำ L (Inductance) ของระบบ.....	92

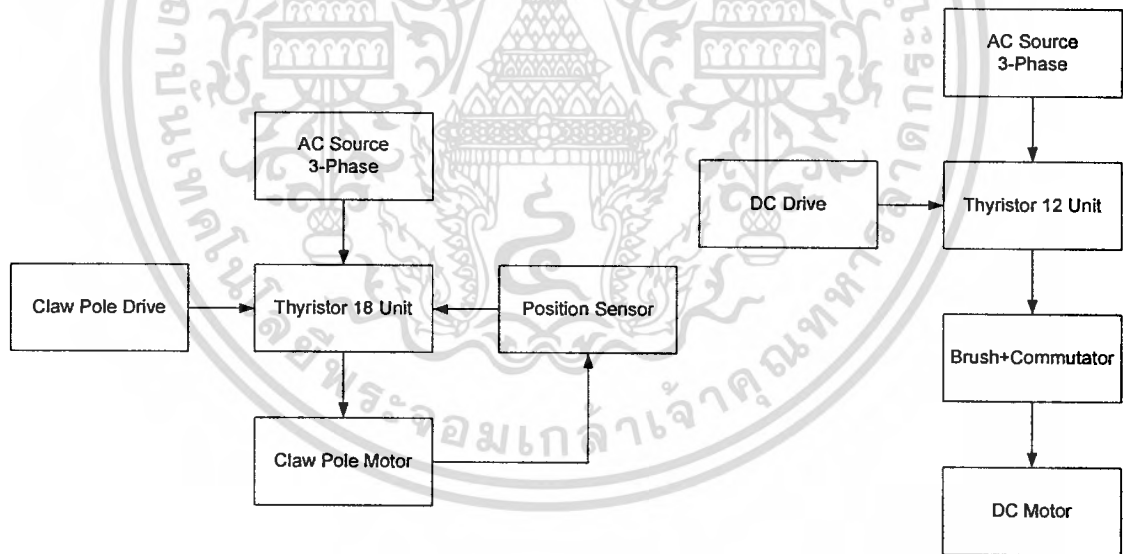
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) หรือ ดีซี มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของ ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาโดยบริษัท Toyo Denki ในปี ค.ศ. 1968 เพื่อใช้งานแทนดีซี มอเตอร์ (DC Motor) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีมากในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เนื่องจากดีซี มอเตอร์ (DC Motor) ในสมัยก่อนมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและขนาดของมอเตอร์ อีกทั้งคุณสมบัติทางกลของแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ดังนั้น ดีซี มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) จึงได้ถูกคิดค้นขึ้นมา โดยใช้ไทรสเตอร์ 18 ตัวในการทำงานแทนที่แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ แสดงดังรูปที่ 1.1

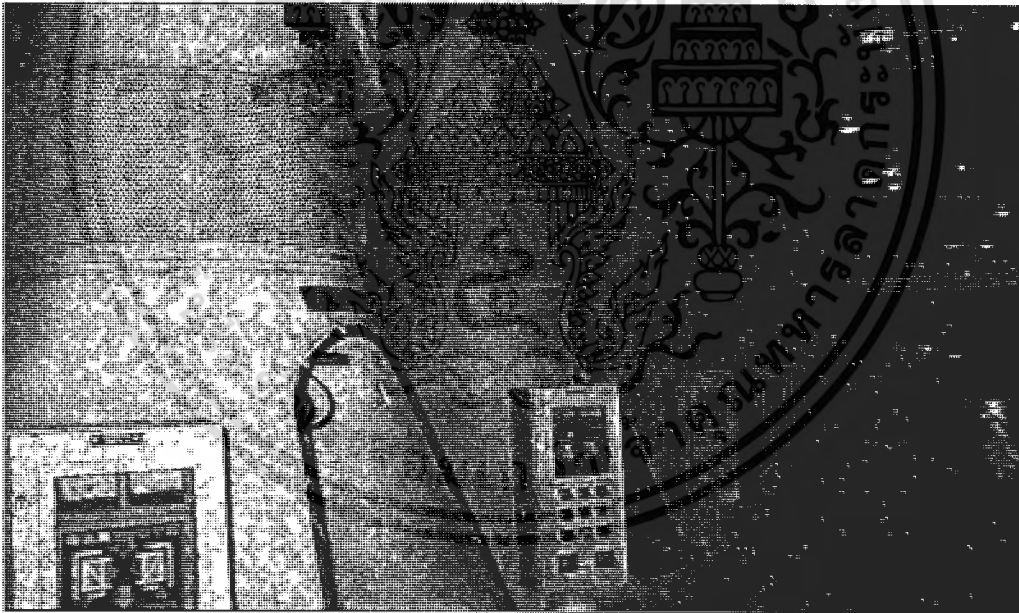


รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) และดีซี มอเตอร์ (DC Motor)

ข้อดีของ มอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) มีดังนี้ คือ

1. สามารถลดการบำรุงรักษาของมอเตอร์
2. มอเตอร์มีความสามารถในการทำงานในสภาพต่าง ๆ ได้ดีกว่าดีซี มอเตอร์ (DC Motor)
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดการสูญเสียเนื่องจากการเสียดสีหรือของแปร่งถ่านและคอมมิวเตเตอร์ในดีซี มอเตอร์ (DC Motor)

การศึกษาและออกแบบเพื่อปรับปรุงระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ที่ใช้สำหรับงานหม้อป่นในโรงงานอุตสาหกรรมแสดงดังรูปที่ 1.2 นั้น ปัญหาที่น่าสนใจเกิดจากการที่ระบบขับเคลื่อนระบบเดิมที่เป็นระบบอนาล็อก ชิ้นส่วนบางชิ้นได้เลิกผลิตไปแล้ว ส่งผลให้เกิดปัญหาโดยตรงกับผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบและปรับปรุงระบบขับเคลื่อนระบบใหม่ขึ้นมาทดแทนระบบขับเคลื่อนระบบเดิม เพื่อให้เป็นทางเลือกสำหรับผู้ใช้งาน โดยระบบขับเคลื่อนระบบใหม่จะเป็นระบบดิจิทัลทั้งหมด



รูปที่ 1.2 หม้อป่นที่ใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

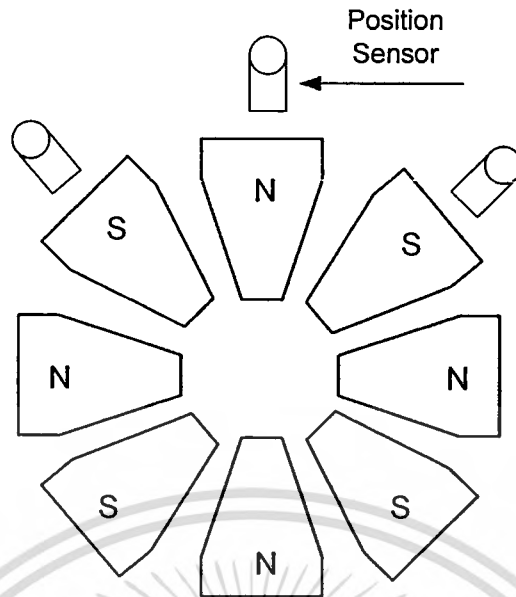
## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ จนสามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานและวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์ได้ เข้าใจหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนเดิมที่เป็นระบบอนาล็อก เพื่อนำไปออกแบบและปรับปรุงให้เป็นระบบการขับเคลื่อนระบบใหม่ที่เป็นระบบดิจิทัล เพื่อช่วยลดส่วนโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อน และเพิ่มความสะดวกสบายสำหรับผู้ใช้งาน อีกอย่างสิ่งที่จำเป็นต้องทราบ คือ หลักการทำงานของระบบหม้อป้อน เพื่อจะได้้นำระบบขับเคลื่อนระบบใหม่ไปใช้งานแทนที่ได้อย่างสมบูรณ์แบบ

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

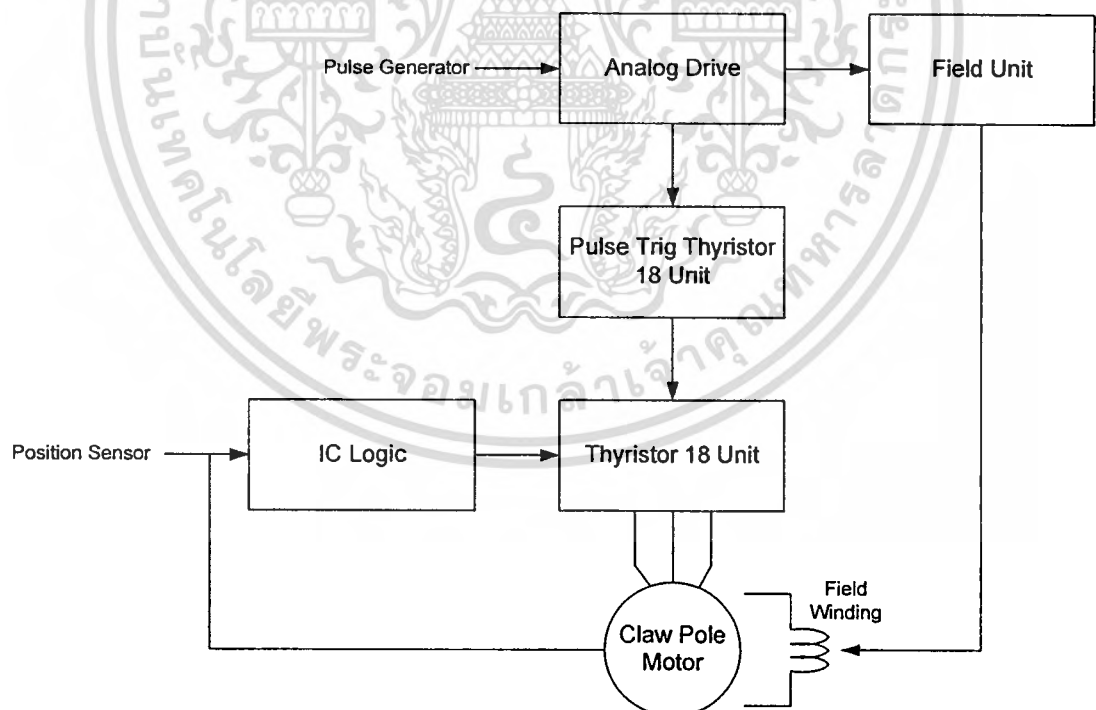
มอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) หรือ ดีซี มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของ ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) จะมีหลักการงานคล้ายกับดีซี มอเตอร์ (DC Motor) คือ การปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์

เช่นเดียวกันเมื่อเราต้องการปรับความเร็วรอบของซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) เราสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ได้โดยตรง แต่ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์เราจำเป็นต้องทราบถึงตำแหน่งของโรเตอร์จึงจะควบคุมการหมุนได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในวงจรควบคุมจึงจำเป็นต้องมีตัวตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก (Position Sensor) เป็นตัวบอกว่าขณะนี้ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งไหน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายสวิทช์ 3 ตัว เพื่อให้วงจรควบคุมการจุดชนวนทราบว่าจะให้ไทรสเตอร์ตัวไหนทำงาน แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ตัวตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก (Position Sensor)

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย



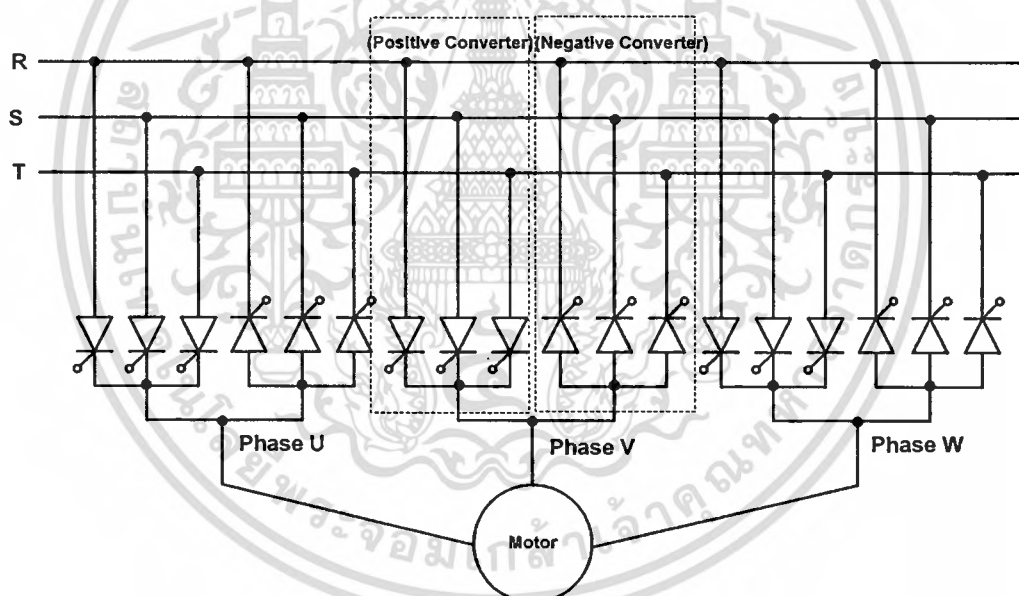
รูปที่ 1.4 โครงสร้างระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.4 โครงสร้างระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้คือ

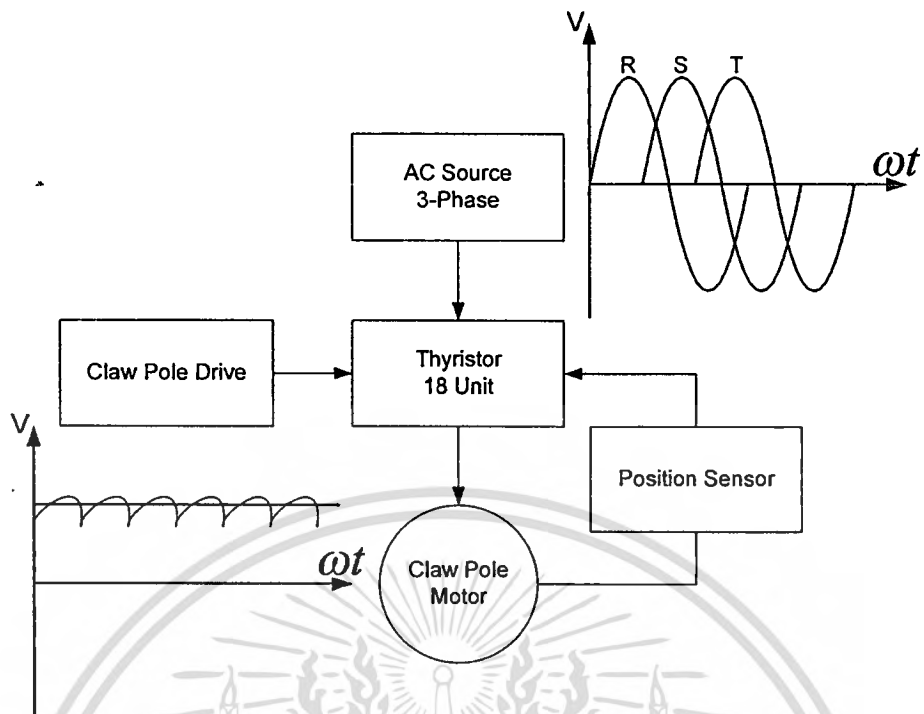
- ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ (Position Sensor)
- ตัววัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (Pulse Generator)
- ระบบขับเคลื่อน (Analog Drive) ซึ่งเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด
- ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของขดลวดฟิลด์ (Field Unit)
- ไทริสเตอร์ 18 ตัว

ไทริสเตอร์ทั้งหมด 18 ตัว แสดงดังรูปที่ 1.5 โดยการเลือกไทริสเตอร์ที่มีคุณสมบัติและขนาดที่เหมาะสมนำมาต่อขนานกัน โดยจะแบ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์ช่วงบวก (Positive Converter) และคอนเวอร์เตอร์ช่วงลบ (Negative Converter) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย โดยการปรับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ให้สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ความเร็วที่มอเตอร์ต้องการ โดยสามารถแบ่งเป็น 6 กลุ่มการทำงาน

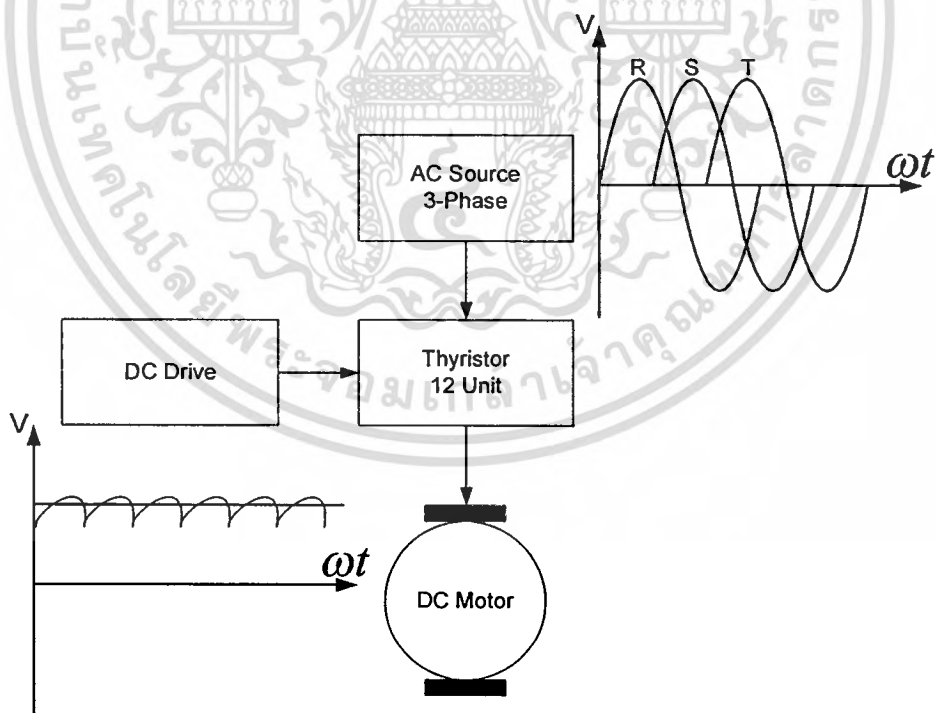


รูปที่ 1.5 ไทริสเตอร์จำนวน 18 ตัวของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

การใช้ไทริสเตอร์ 18 ตัว ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ด้วยการปรับมุมจุดชนวน เหมือนกับดีซี มอเตอร์ (DC Motor) ดังนั้นวงจรควบคุมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ ดีซี ไดรฟ์ (DC Drive) ทุกประการ แสดงดังรูปที่ 1.6 และ ดังรูปที่ 1.7



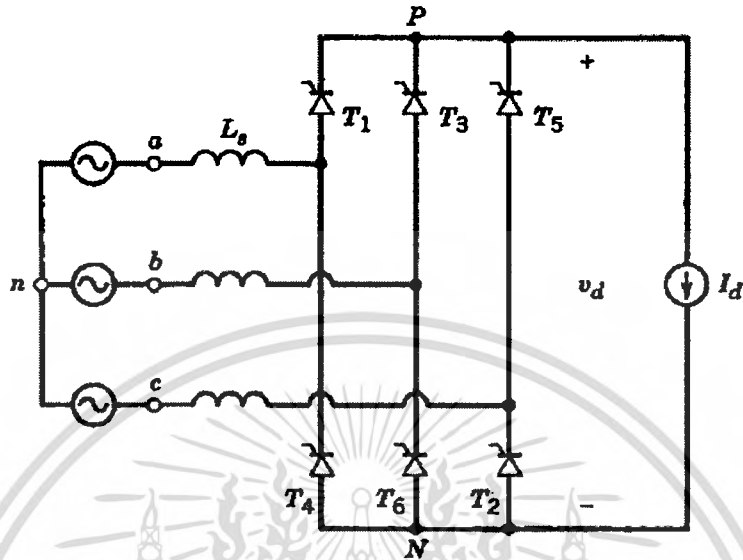
รูปที่ 1.6 การทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)



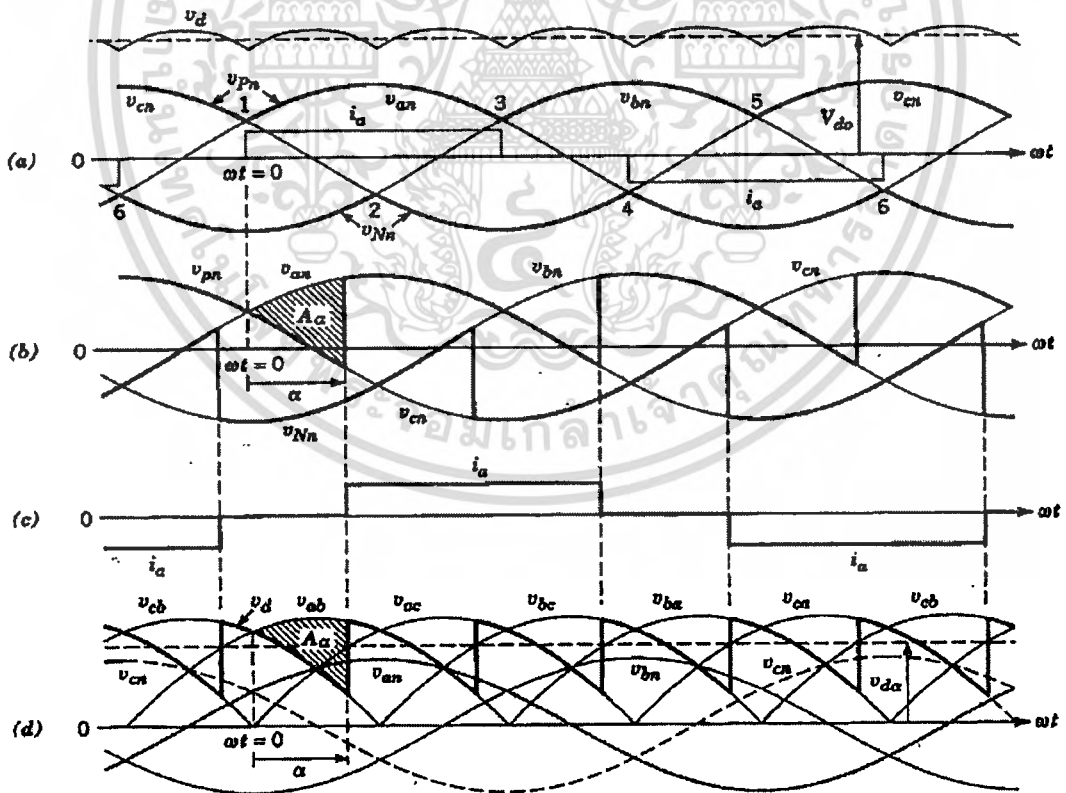
รูปที่ 1.7 การทำงานของดีซี มอเตอร์ (DC Motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การทำงานของไทรสเตอร์จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter) ดังรูปที่ 1.8 และลักษณะรูปคลื่นในการทำงานแสดงดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter)



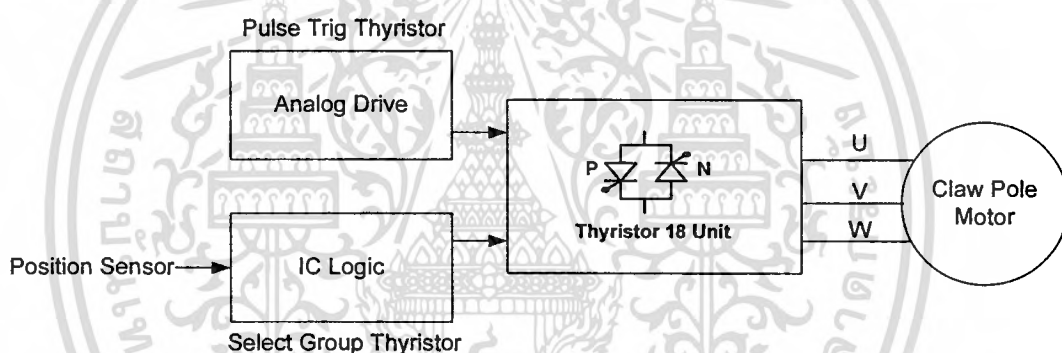
รูปที่ 1.9 ลักษณะรูปคลื่นในการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ สามารถทำได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวนหรือ  $\alpha$  (Alpha) เป็นตัวควบคุมมุมทริกเพื่อไปจุดชนวนให้ไทรสเตอร์ทำงาน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามที่มอเตอร์ต้องการ โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 2

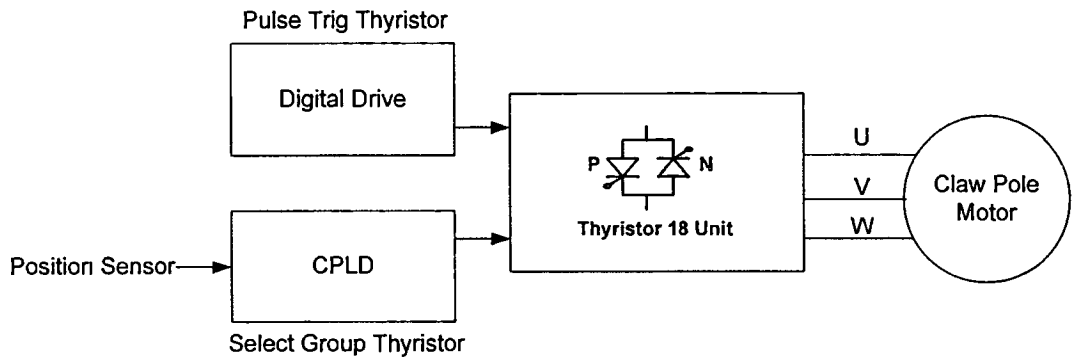
### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

หลักการงานที่ใช้ระหว่างระบบขับเคลื่อนระบบกับเดิมที่เป็นอนาล็อกกับระบบขับเคลื่อนระบบใหม่ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาเป็นระบบดิจิทัลนั้น จะใช้หลักการพื้นฐานทั้งหมดเหมือนกัน โดยระบบขับเคลื่อนระบบใหม่จะเป็นการเลียนแบบระบบขับเคลื่อนระบบกับเดิมทั้งหมด ต่างกันตรงที่ระบบขับเคลื่อนระบบเดิมเป็นเทคโนโลยีสมัยเก่าใช้ระบบอนาล็อกในการควบคุมแสดงดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ส่วนประกอบหลักของระบบระบบอนาล็อก

ส่วนระบบขับเคลื่อนระบบใหม่จะใช้ระบบขับเคลื่อนที่เป็นระบบดิจิทัลและใช้ CPLD (Complex Programmable Logic Device) ช่วยในการออกแบบ ตรวจสอบตำแหน่งการทำงานของโรเตอร์ เพื่อช่วยลดจำนวนโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ และสะดวกสบายมากยิ่งขึ้นสำหรับผู้ใช้งาน โดยระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลแสดงดังรูป 1.11 ที่จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 1.11 ส่วนประกอบหลักของระบบดิจิทัล

1. CPLD (Complex Programmable Logic Device) มีหน้าที่แปลงสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ (Position Sensor) เพื่อเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์
2. ระบบขับเคลื่อน ทำหน้าที่ควบคุมความแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์ จนได้ความเร็วที่มอเตอร์ต้องการ

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

สามารถเข้าใจเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ คือสามารถนำระบบขับเคลื่อนใหม่ที่เป็นระบบดิจิทัล ไปใช้แทนที่ระบบขับเคลื่อนเดิมได้อย่างสมบูรณ์แบบ โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ประเภทของมอเตอร์ การทำงานระบบขับเคลื่อนระบบกับเดิม หลักการทำงานของระบบหม้อป้อน

บทที่ 3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนจากระบบอนาล็อกเป็นระบบดิจิทัล

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับการทำงานที่ได้ทำอยู่ในปัจจุบัน จึงเป็นเรื่องง่ายในการศึกษาและวิจัย โดยขั้นตอนในการศึกษามีดังนี้ คือ

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ จนสามารถวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์ได้
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนเดิมที่เป็นระบบอนาล็อก
3. เข้าใจถึงหลักการทำงานของหม้อป่น
4. สามารถออกแบบและปรับปรุงระบบขับเคลื่อนให้เป็นระบบดิจิทัลโดยใช้ CPLD (Complex Programmable Logic Device) ช่วยในการออกแบบ
5. ทำการทดลองและวัดผล
6. สรุปหลักการทำงานของระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

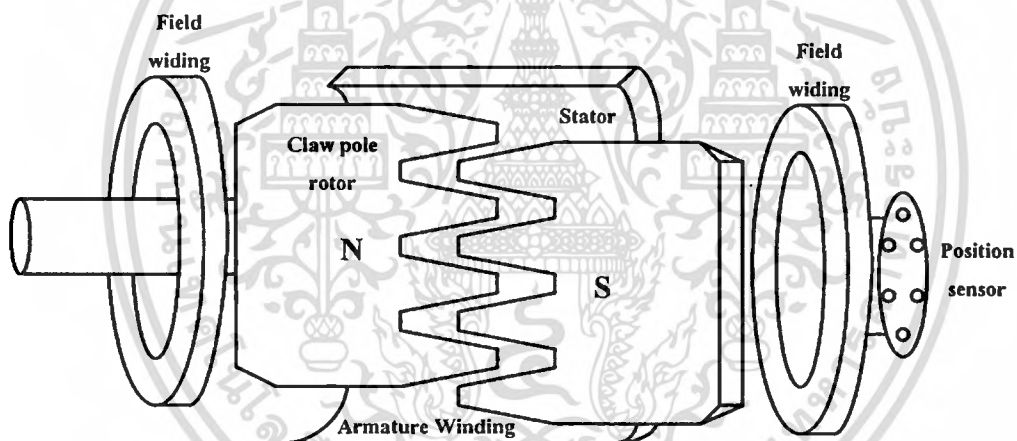
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ การทำงานของระบบขับเคลื่อนระบบเดิมที่เป็นระบบอนาล็อก และหลักการทำงานของระบบหม้อป้อน

### 2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์

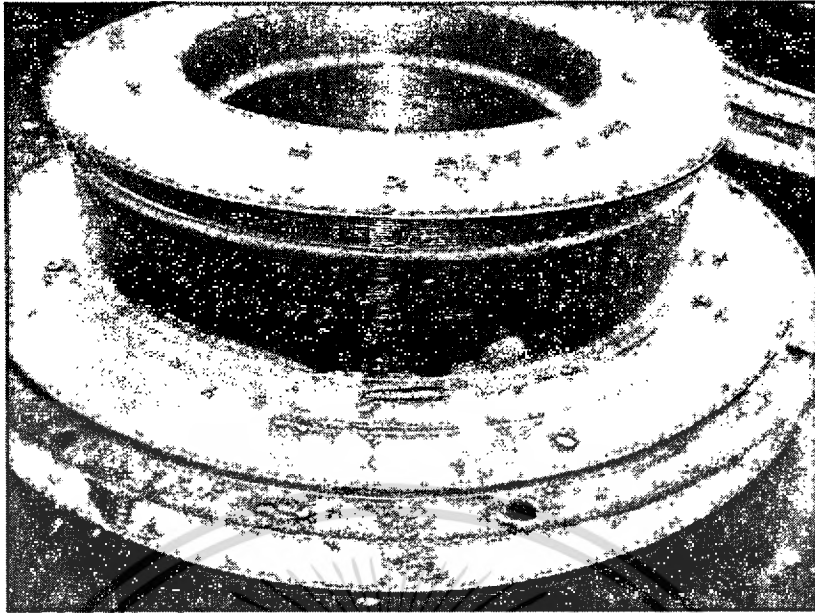
โครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) แสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์

#### 2.1.1 ขดลวดฟิลด์ (Field Winding)

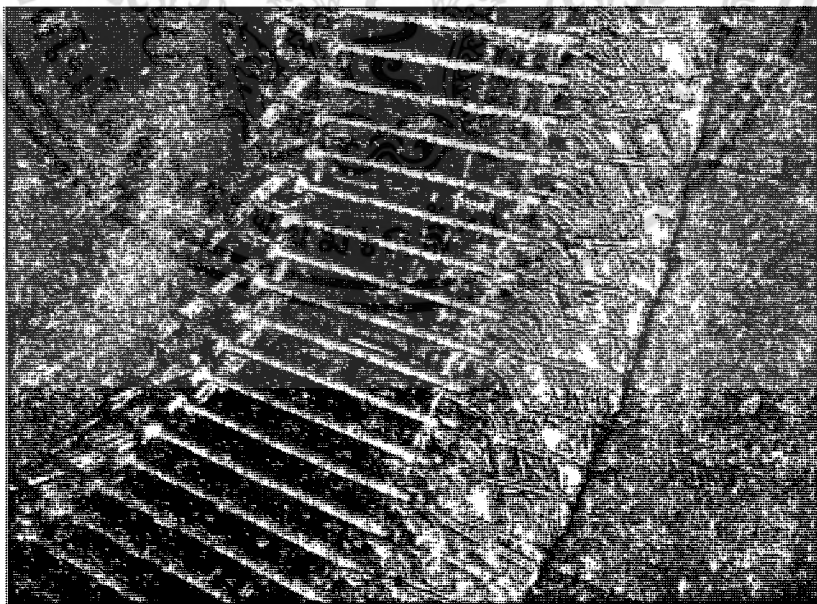
ขดลวดฟิลด์ เป็นขดลวดที่วางอยู่บริเวณหัวและท้ายของโรเตอร์โดยมีการต่อขนานกันอยู่ ซึ่งเป็นขดลวดที่ต้องการไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นบริเวณ โรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขดลวดฟิลด์ (Field Winding)

### 2.1.2 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding)

ขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็นขดลวดที่พันอยู่บริเวณแท่งสเตเตอร์ มีลักษณะคล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไป โดยจะใช้หลักการในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์เหมือนกัน ต่างกันตรงที่โรเตอร์ซึ่งจะใช้ขั้วแม่เหล็กแยกต่างหากอีกชุดหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 คลอว์โพลโรเตอร์ (Claw Pole Rotor)

คลอว์โพลโรเตอร์ (Claw Pole Rotor) มีลักษณะคล้ายกับนิ้วมือทั้งสองข้างวางซ้อนกัน ซึ่งทำมาจากเหล็กหล่อและไม่มีขดลวดใดๆพันอยู่บริเวณนี้เลย สามารถพบเห็นโรเตอร์แบบคลอว์โพลนี้ได้จากอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ซึ่งจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดโรเตอร์ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดใหญ่ถึง 220 กิโลวัตต์จึงทำให้โรเตอร์มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.4



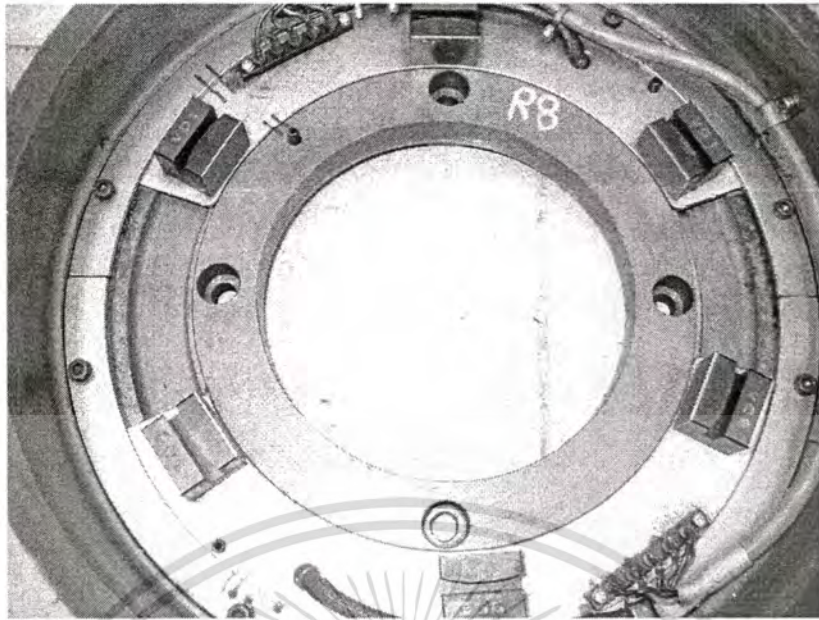
รูปที่ 2.4 คลอว์โพลโรเตอร์ (Claw Pole Rotor)

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าคลอว์โพลโรเตอร์จะง่ายต่อการบำรุงรักษาอย่างมากเนื่องจากไม่มีส่วนประกอบใดๆที่ซับซ้อนเลย การเกิดขั้วสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์สามารถเกิดได้จากขดลวดฟิลต์ที่วางประกบทั้งด้านหัวและด้านท้ายของมอเตอร์

### 2.1.4 ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor)

ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor) จะใช้หลักการเหมือนตัวเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายจานและมีตัวเซนเซอร์มีลักษณะเหมือนสวิทช์วางอยู่บริเวณส่วนท้ายของมอเตอร์ โดยเมื่อจานวิ่งผ่านตัวเซนเซอร์จะทำให้มีสัญญาณลจิกออกมาทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณลจิกนั้นเพื่อกำหนดกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์อีกที เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor)



รูปที่ 2.6 งานที่วิ่งตัดผ่านสวิทช์ของตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

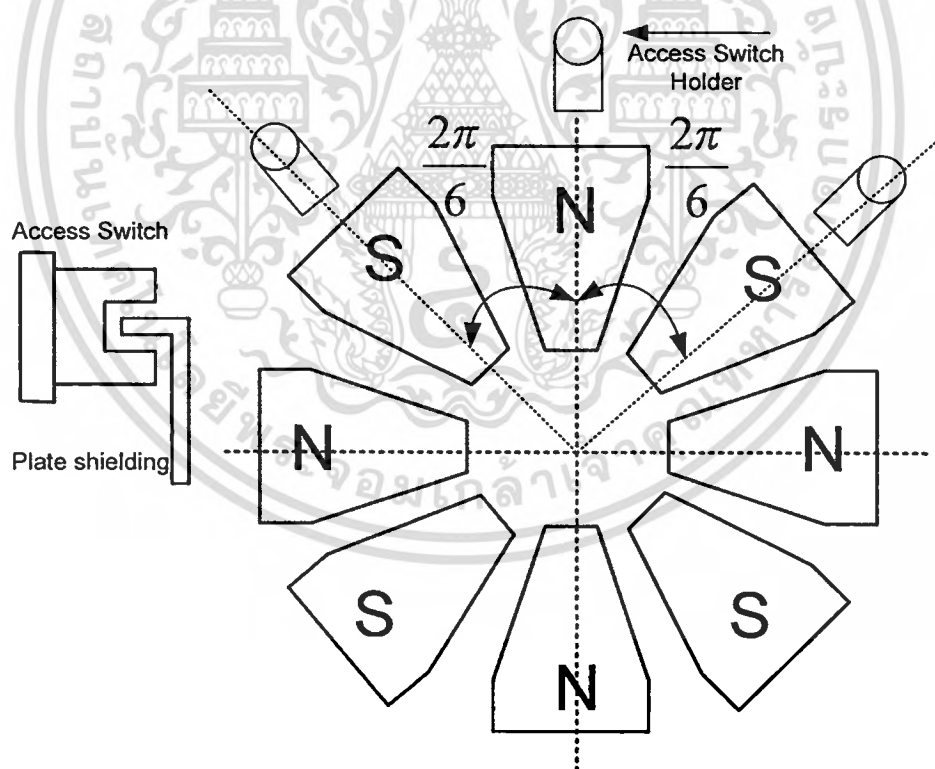
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยคำนวณการทำงานของขดลวดอาร์เมเจอร์ในแต่ละเฟส และส่งสัญญาณไปยังส่วนของไทรสเตอร์ 18 ตัว ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับแปรงถ่านของ ดีซีมอเตอร์ (DC-Motor)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์จะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก หากผู้ใช้ถอดออกมาแล้วประกอบกลับไปไม่เหมือนเดิม จะมีผลต่อการควบคุมการหมุนของมอเตอร์โดยตรง

## 2.2 ลักษณะการวางตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ การเกิดแรงบิดของมอเตอร์ การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ และการวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์

### 2.2.1 ลักษณะการวางตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์



รูปที่ 2.7 การวางตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์สำหรับมอเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

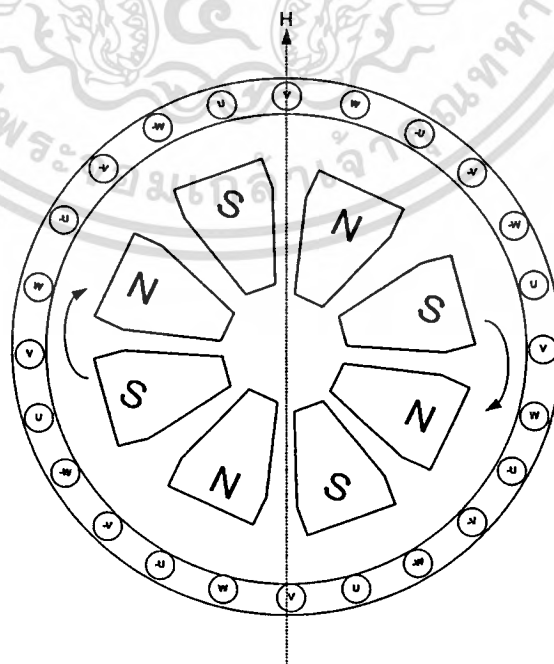
จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงโครงสร้างและการวางตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ สำหรับมอเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก โดยจะมีแผ่นจานโลหะวิ่งตัดผ่านสวิทช์ 3 ชุด ซึ่งวางอยู่ที่ท้ายมอเตอร์ ทำมุม 60 องศาทางไฟฟ้า โดยจานโลหะทำหน้าที่กำเนิดความถี่ จะมีลักษณะเป็นฟันอยู่ 4 ซี่ ดังนั้นในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ครบ 1 รอบ สวิทช์ 3 ชุดซึ่งเป็นชุดตรวจจับ จะสามารถจับความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ON-OFF ได้เป็น 4 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 2.8 หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ จะมีสัญญาณออกมาจากตัวตรวจจับเมื่อแผ่นจานหมุนผ่านตัดตัวตรวจจับ เนื่องจากการหมุนของโรเตอร์สัญญาณเอาต์พุตนี้จะเป็นสัญญาณการวัดรอบของมอเตอร์ด้วย หลังจากมีการเปลี่ยนความถี่ต่อแรงดันไฟฟ้า(F/V) โดยสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับรอบการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 2.8 สัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของ โรเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.8 สัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของ โรเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก โดยนำไปใช้เพื่อเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ต่อไป

### 2.2.2 การเกิดแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 2.9 มอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) โดยมีโรเตอร์ 8 ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.9 หลักการเกิดแรงบิด (T) ของมอเตอร์ โดยขั้ว N ขั้ว S บนโรเตอร์แสดงถึงขั้วของสนามแม่เหล็กที่หมุน และ H จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดย U, V, W จะแสดงเฟสของขดลวดอาร์เมเจอร์ แรงบิดของมอเตอร์เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับขั้ว N ขั้ว S บนโรเตอร์ การจะให้เกิดเช่นนี้ได้ต้องเลือกตำแหน่งของขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เหมาะสมกับการหมุนของขั้ว N และขั้ว S ให้เป็นไปตามตำแหน่งของขดลวดสนาม ซึ่งสามารถจะตรวจสอบได้โดยตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ซึ่งต่อโดยตรงกับขดลวดสนาม

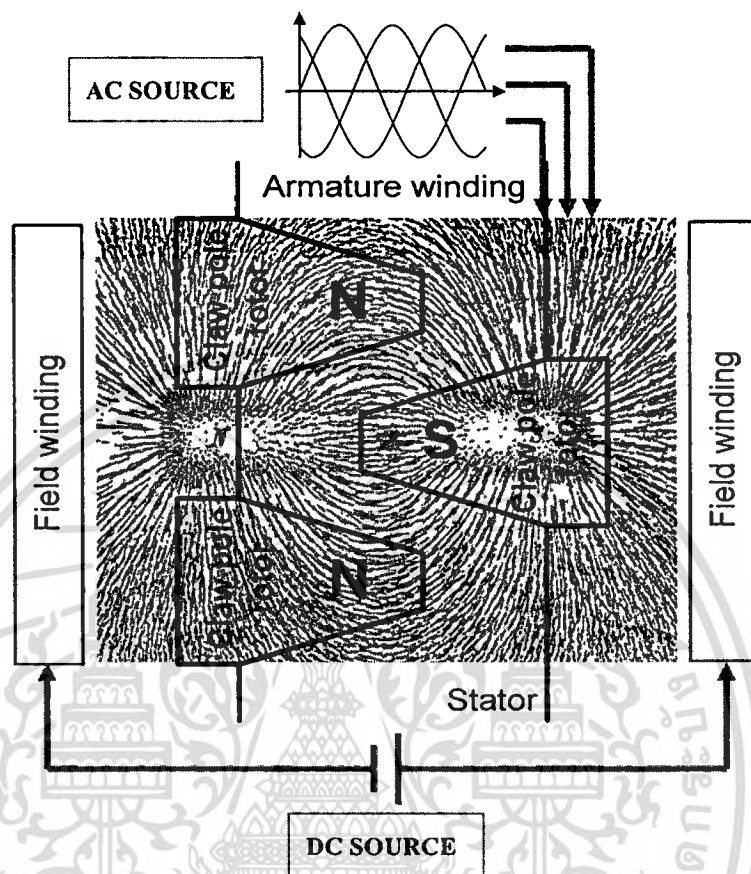
ค่าแรงบิด (T) ของมอเตอร์ จะเกิดขึ้นจากจำนวนความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $\phi_F$ ) และกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ )

$$T = k\phi_F I_a \sin\theta \quad (1)$$

จากสมการที่ (2) การเปลี่ยนแปลงแรงบิด (T) เป็นการเปลี่ยนแปลงขณะจำนวนความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $\phi_F$ ) มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ ) เป็นผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ตามไปด้วย การควบคุมในลักษณะจะใช้ไทรสเตอร์ควบคุมมุมจุดชนวน หรือค่า  $\alpha$  (Alpha) ซึ่งจะได้กล่าวในภายหลัง

สังเกตได้ว่าการควบคุมมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ของ ดีซี มอเตอร์ (DC-Motor) แต่ทำไมการควบคุมมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จึงมีคุณสมบัติดีกว่าการควบคุม ดีซี มอเตอร์ (DC-Motor) ส่วนที่แตกต่างกันคือมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะมีส่วนของไทรสเตอร์ทั้ง 18 ตัว ซึ่งเป็นตัวแปลงความถี่ให้สัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ของมอเตอร์ต้องการ โดยถูกสั่งงานจากตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ ขณะที่ความเร็วมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลทำให้เกิดแรงบิดดังในสมการที่ (1) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

### 2.2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์



รูปที่ 2.10 การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

จากรูปที่ 2.10 การเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) เกิดจากการที่มีการจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขดลวดฟิลด์เพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขั้วแม่เหล็กขั้ว N ขั้ว S บนโรเตอร์ หลังจากนั้นมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์จนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนบนแท่งสเตเตอร์ จนทำให้ขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์มาติดคู่กับขั้วแม่เหล็กที่อยู่บนสเตเตอร์ซึ่งเป็นผลทำให้ขั้วแม่เหล็กทั้งสองขูดหมุนไปพร้อมๆกัน โดยในสถานะที่มีความเร็วคงที่จะไม่มีการเกิดคลื่น เนื่องจากความเร็วโรเตอร์และความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์เท่ากันพอดี โดยขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานจะมีสนามแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากตัวโรเตอร์ของมอเตอร์จะเป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก

## 2.2.4 การวิเคราะห์ประเภทของมอเตอร์

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) อย่างละเอียดแล้ว มอเตอร์ดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มของซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ที่มีขดลวดพันรอบขั้วบนโรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (Wound Field Motor) หรือเรียกมอเตอร์ประเภทนี้อีกอย่างหนึ่งว่า ดีซี มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เนื่องจากมีลักษณะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์เหมือนกับดีซี มอเตอร์ (DC Motor)

โดย ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. มอเตอร์ซิงโครนัสรีลักแตนซ์ (Synchronous Reluctance Motor)
2. มอเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กถาวร (Synchronous Permanent Magnet Motor)
3. มอเตอร์ที่มีขดลวดพันรอบขั้วบนโรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (Wound Field Motor)

ส่วนข้อกำหนดที่ติดมากับตัวมอเตอร์จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

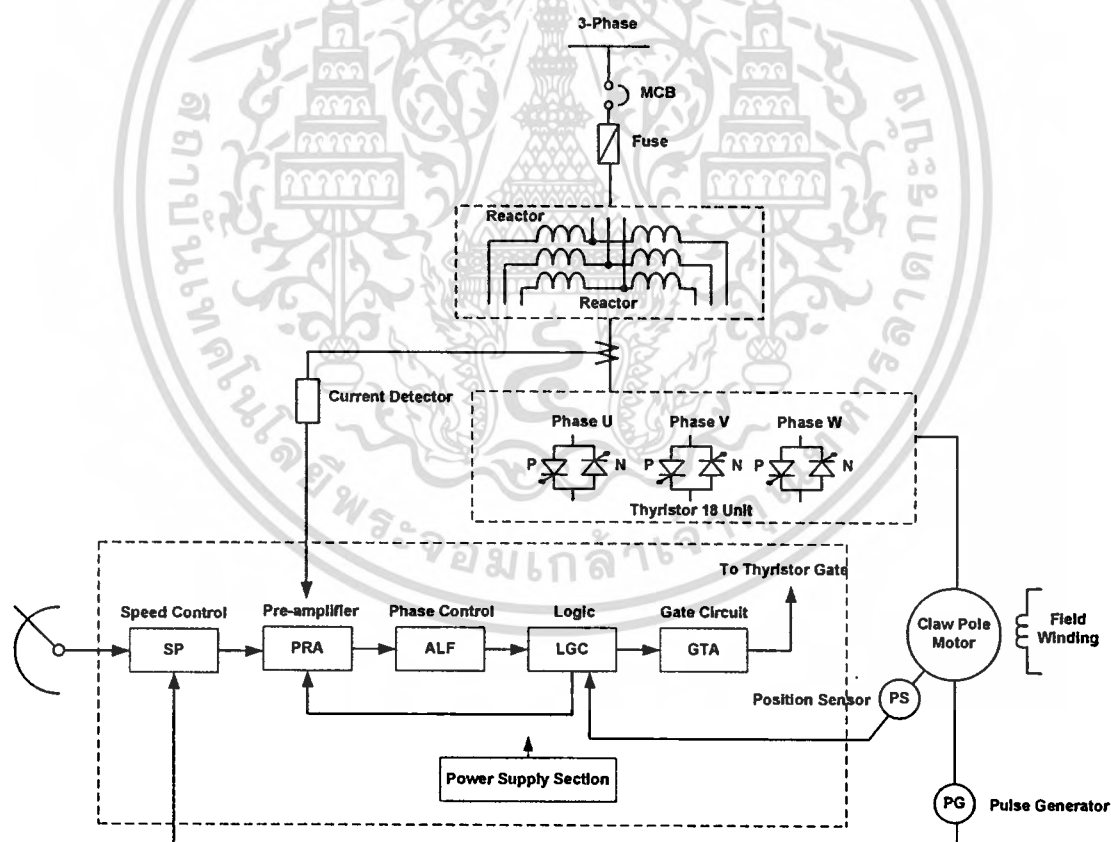
Output Power	220 kW
Input Voltage	400 V
Input Current	425 A
No. of Phase	3 phase
No. of poles	8 poles
Field voltage	249 V
Field current	15 A
Frequency	3.33-86.7 Hz
Speed	50-1300 rpm

## 2.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อน

### 2.3.1 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

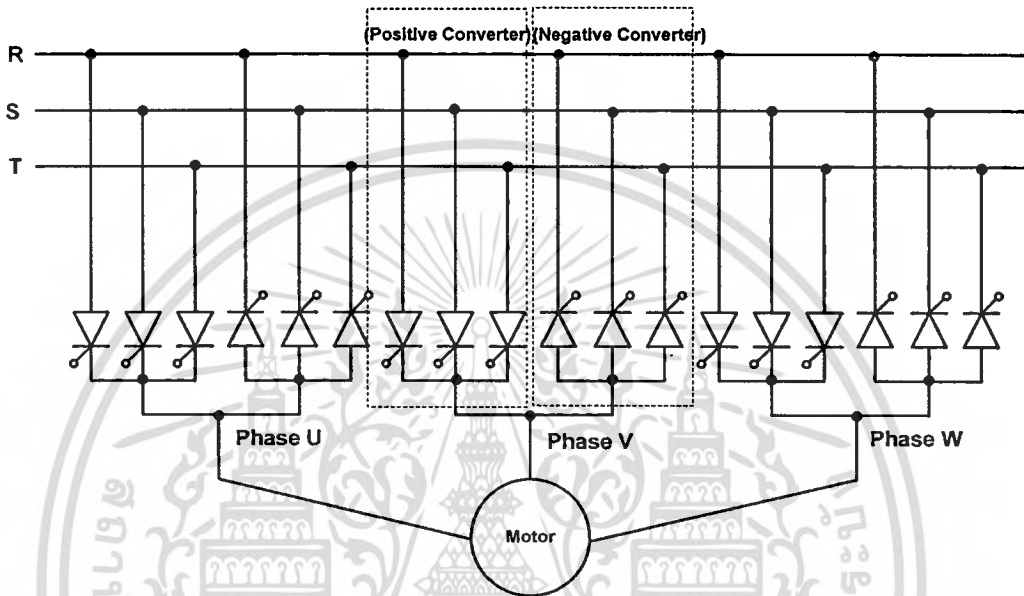
วงจรพื้นฐานระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้คือ

- ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของ โรเตอร์ (Position Sensor)
- ตัววัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (Pulse Generator)
- ระบบขับเคลื่อน ซึ่งเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด โดยมีกล่องควบคุมความเร็ว กล่องควบคุมกระแสไฟฟ้า กล่องที่เป็น Logic เพื่อทำการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์
- ไทรสเตอร์ 18 ตัว



รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

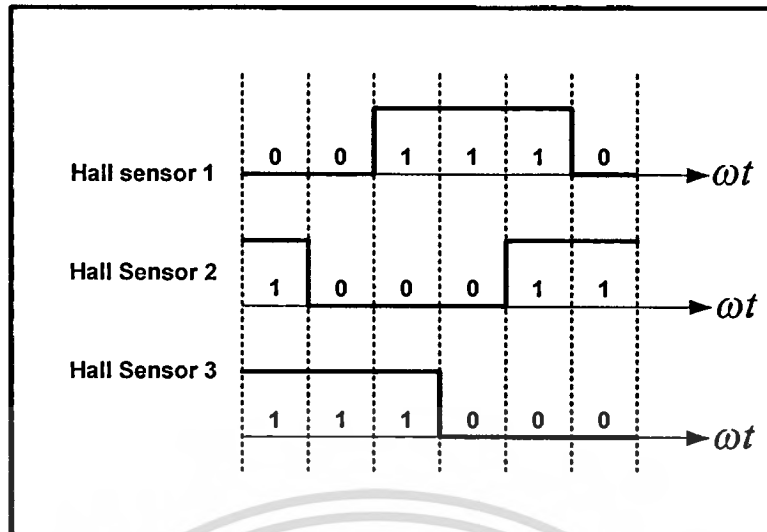
โดยไทรสเตอร์ทั้งหมด 18 ตัว ดังรูปที่ 2.12 โดยการเลือกไทรสเตอร์ที่มีคุณสมบัติและขนาดที่เหมาะสมนำมาต่อขนานกัน โดยจะแบ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์ช่วงบวก (Positive Converter) และคอนเวอร์เตอร์ช่วงลบ (Negative Converter) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย โดยการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ให้สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ความเร็วที่มอเตอร์ต้องการ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่มการทำงาน



รูปที่ 2.12 ไทรสเตอร์จำนวน 18 ตัว ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

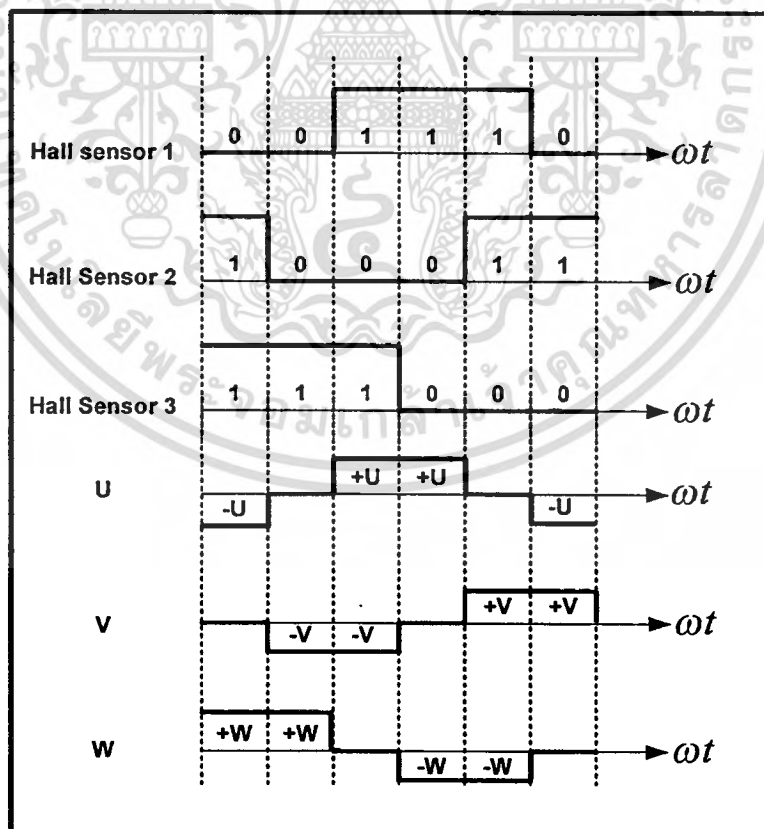
### 2.3.2 การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์

จากการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อมีแผ่นจานโลหะวิ่งตัดผ่านสวิทช์ 3 ชุด สามารถวัดสัญญาณที่ได้แบ่งออกเป็น 6 ช่วง มอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกลหรือ 1/4 ของ 1 รอบมอเตอร์ (มอเตอร์หมุน 1 รอบ เป็น 360 องศาทางกล) เนื่องจากจานมีฟันอยู่ 4 ซี่ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกล

เมื่อทำการวัดตำแหน่งโรเตอร์ได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว สัญญาณที่ได้จะไปทำการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ให้ทำงานดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์มอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

เมื่อ Hall 1 = 0 , Hall 2 = 1 , Hall 3 = 1 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.15

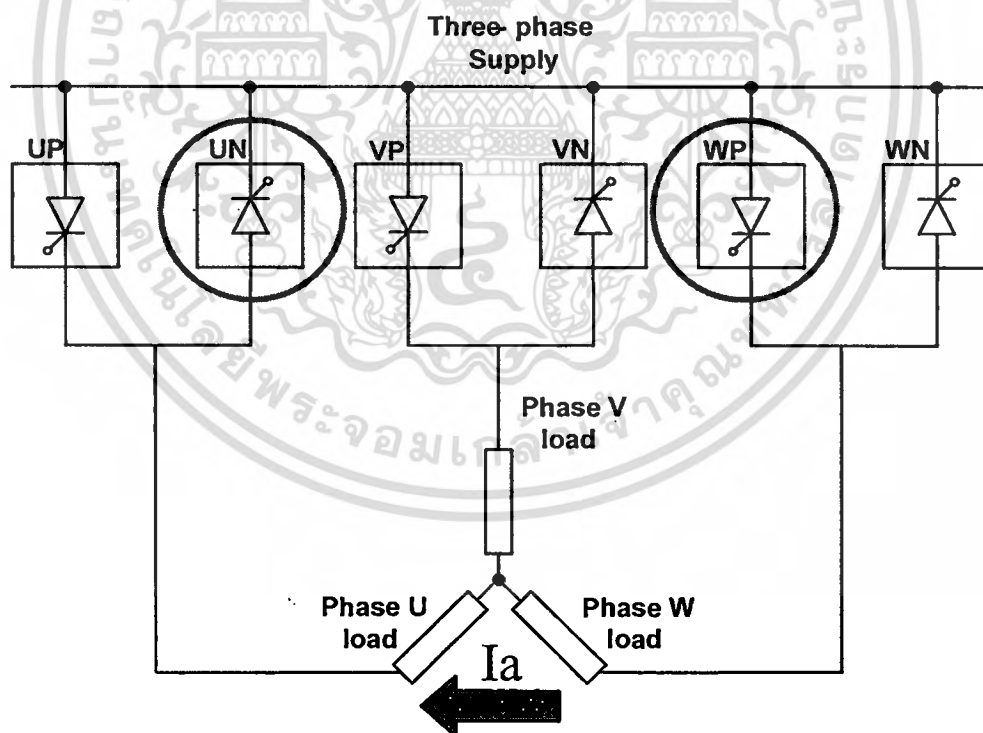
เมื่อ Hall 1 = 0 , Hall 2 = 0 , Hall 3 = 1 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.16

เมื่อ Hall 1 = 1 , Hall 2 = 0 , Hall 3 = 1 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.17

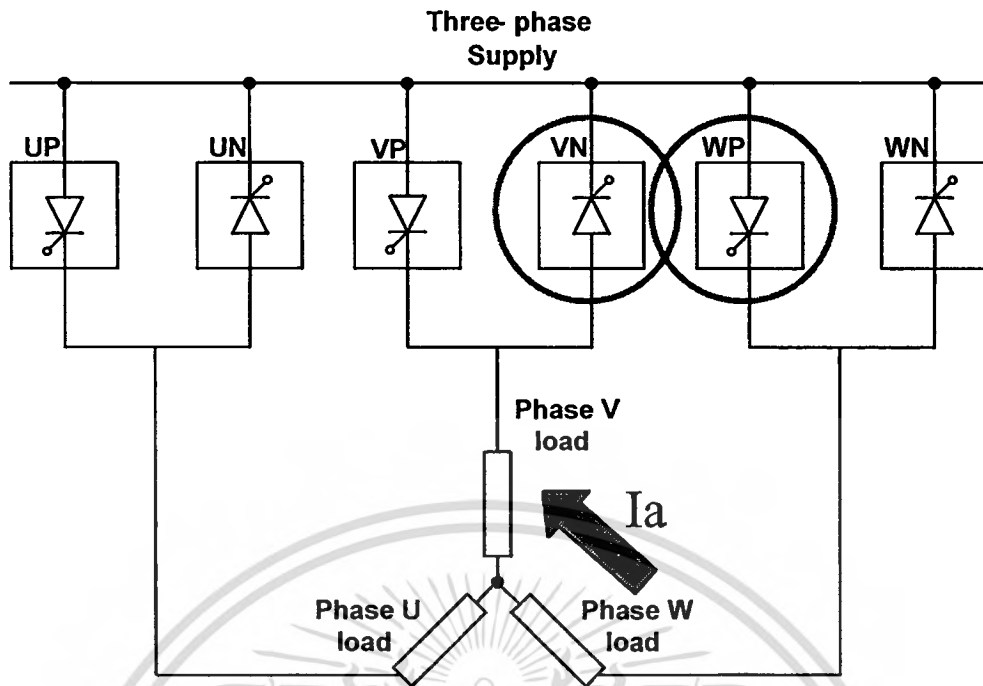
เมื่อ Hall 1 = 1 , Hall 2 = 0 , Hall 3 = 0 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.18

เมื่อ Hall 1 = 1 , Hall 2 = 1 , Hall 3 = 0 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.19

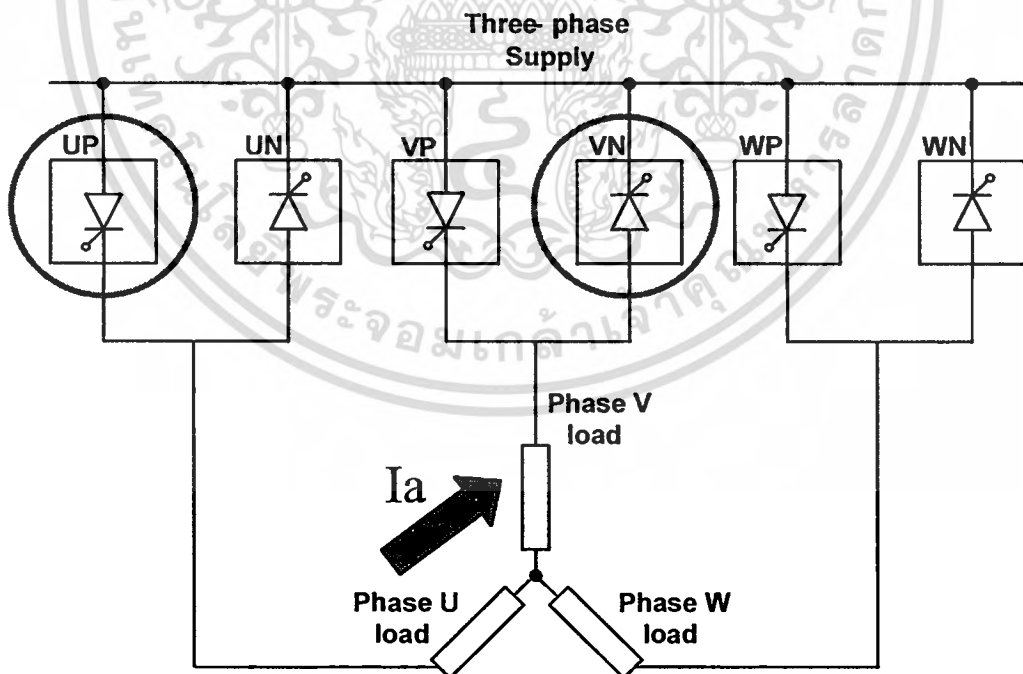
เมื่อ Hall 1 = 0 , Hall 2 = 1 , Hall 3 = 0 จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.15 ไทรสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน

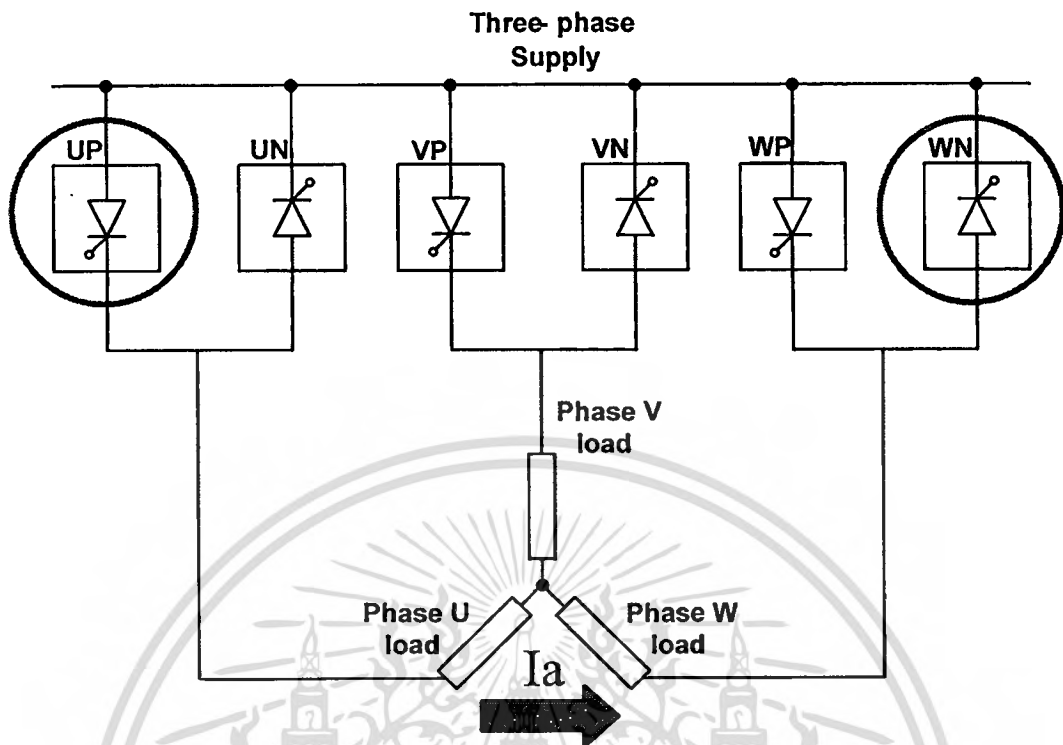


รูปที่ 2.16 ไทริสเตอร์กลุ่มเฟส W ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน

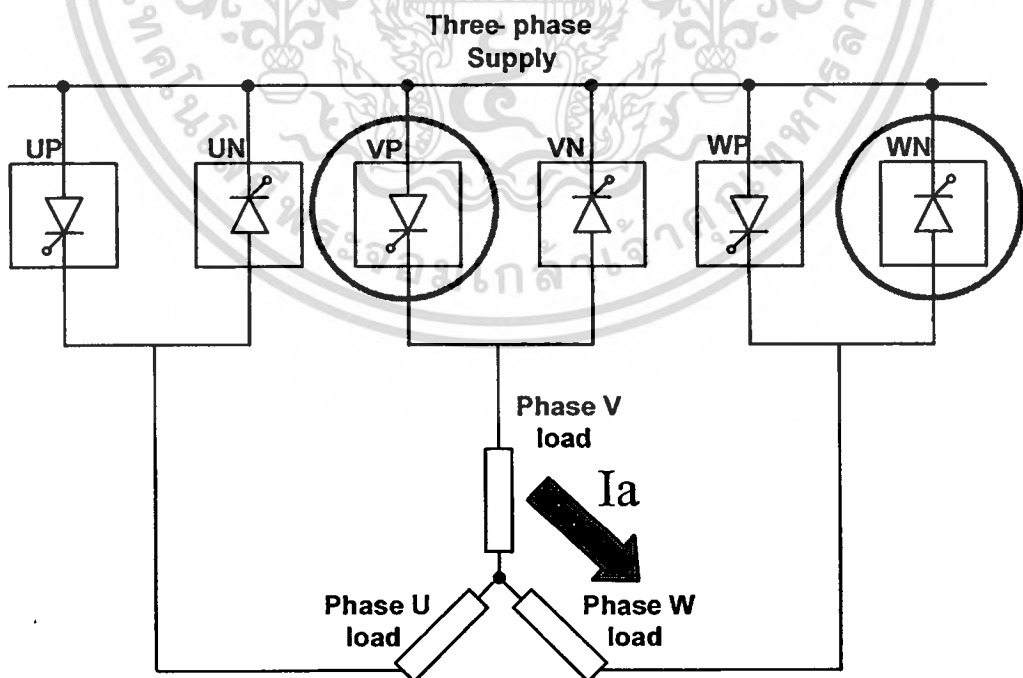


รูปที่ 2.17 ไทริสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส V ด้านลบ ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

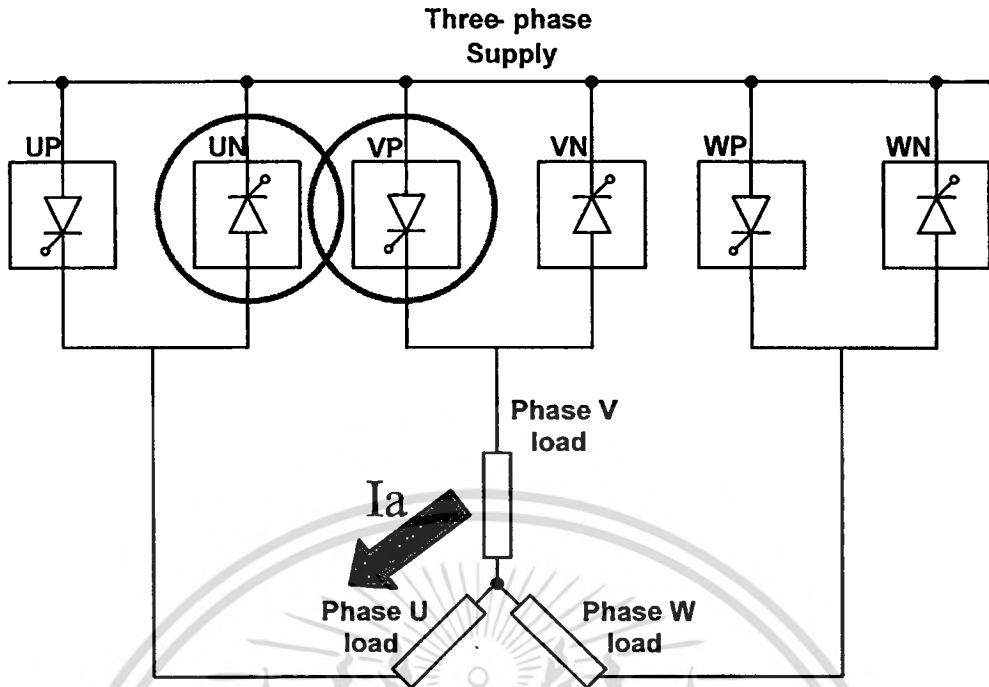


รูปที่ 2.18 ไทริสเตอร์กลุ่มเฟส U ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน



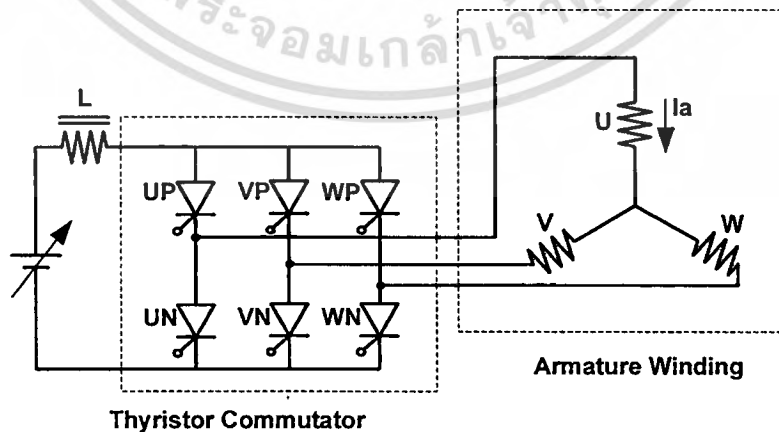
รูปที่ 2.19 ไทริสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส W ด้านลบ ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ไทริสเตอร์กลุ่มเฟส V ด้านบวก และกลุ่มเฟส U ด้านลบ ทำงาน

วงจรพื้นฐานในเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงานระหว่างเฟส U, V, W ของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.21 สมมติให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากเฟส U ไปเฟส V ไทริสเตอร์กลุ่ม UP และไทริสเตอร์กลุ่ม VN จะ ON เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจากเฟส V ไปเป็นเฟส W ซึ่งเฟส U ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นไทริสเตอร์กลุ่ม VN ควร OFF โดยการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ(Reverse Voltage) และในเวลาเดียวกันไทริสเตอร์กลุ่ม WN ควร ON การเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงานจึงจะครบสมบูรณ์แบบ



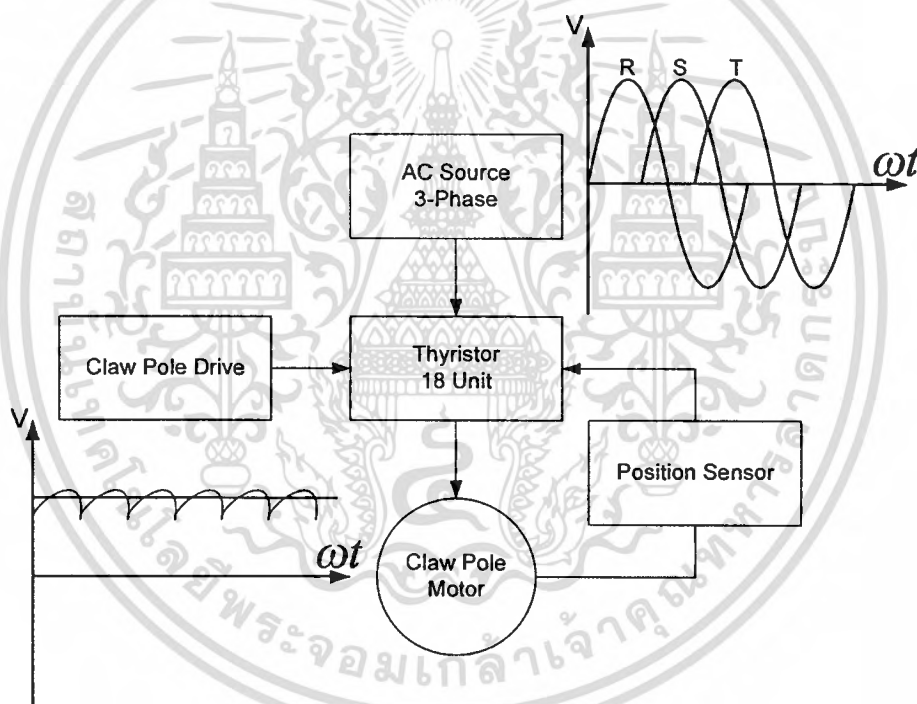
รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงเฟสของไทริสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยจนมอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ คิดเป็น 360 องศาทางกล การเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงานของไทรสเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวน 24 ครั้ง (มอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกลหรือ 1/4 รอบของมอเตอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงาน 6 ครั้ง) โดยการกำหนดการเปลี่ยนกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จะเป็นลักษณะอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วห้ามมีการเปลี่ยนแปลง

### 2.3.3 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

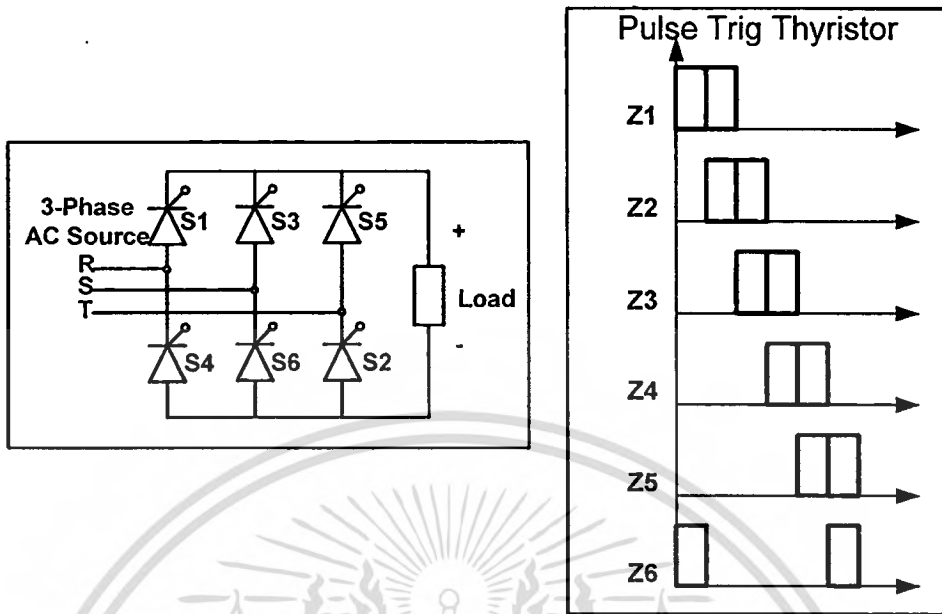
จากการที่ได้กล่าวมาในบทที่ 1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะใช้ไทรสเตอร์ 18 ตัว ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้ามอเตอร์ด้วยการปรับมุมจุดชนวนเหมือนกับดีซี มอเตอร์ (DC Motor) ดังนั้นวงจรควบคุมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ ดีซี ไดรฟ์ (DC Drive) ทุกประการ แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

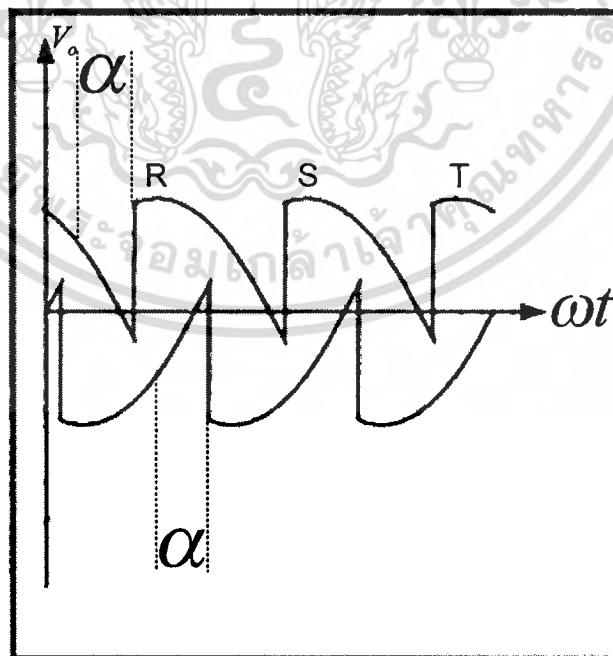
เมื่อทำการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การทำงานของไทรสเตอร์จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter) แสดงดังรูปที่ 2.23 และมีจำนวนสัญญาณทริกจำนวน 6 พัลส์ (Pulse) ในการทำงานของไทรสเตอร์ 1 กลุ่ม จะประกอบไปด้วย ไทรสเตอร์ 6 ตัว โดยมีกลุ่มที่เป็นบวก 3 ตัว และกลุ่มที่เป็นลบ 3 ตัว จนได้แรงดันไฟฟ้าเมื่อไทรสเตอร์ทำงานดังรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



S1-S6 S1-S2  
 S3-S2 S3-S4  
 S5-S4 S5-S6

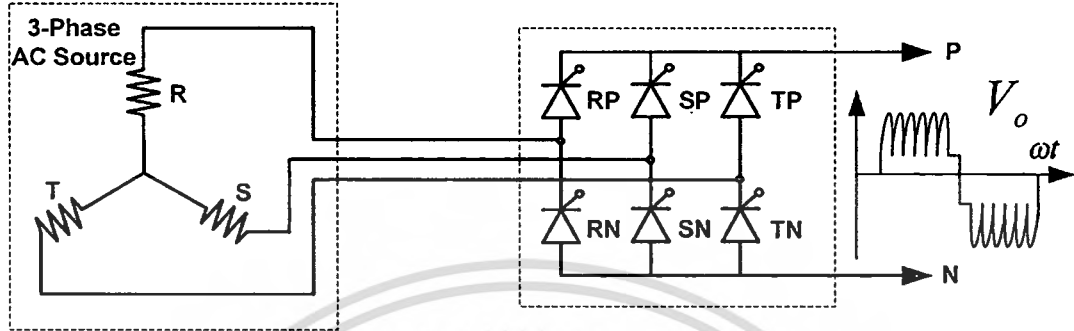
รูปที่ 2.23 วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter)



รูปที่ 2.24 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่ไทรสเตอร์ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

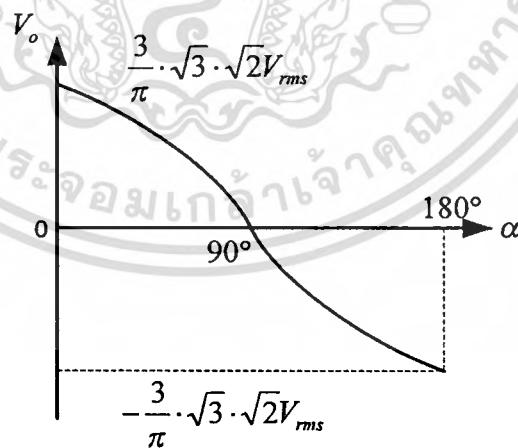
การควบคุมมุมจุดชนวนหรือ  $\alpha$  (Alpha) เป็นตัวควบคุมมุมทริกเพื่อไปจุดชนวนให้ทรินสเตอร์ทำงาน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามที่มอเตอร์ต้องการ โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรพื้นฐานมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ในการควบคุมมุมจุดชนวน( $\alpha$ )

เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก 
$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3-\alpha}^{2\pi/3-\alpha} \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} V_{rms} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t \quad (2)$$

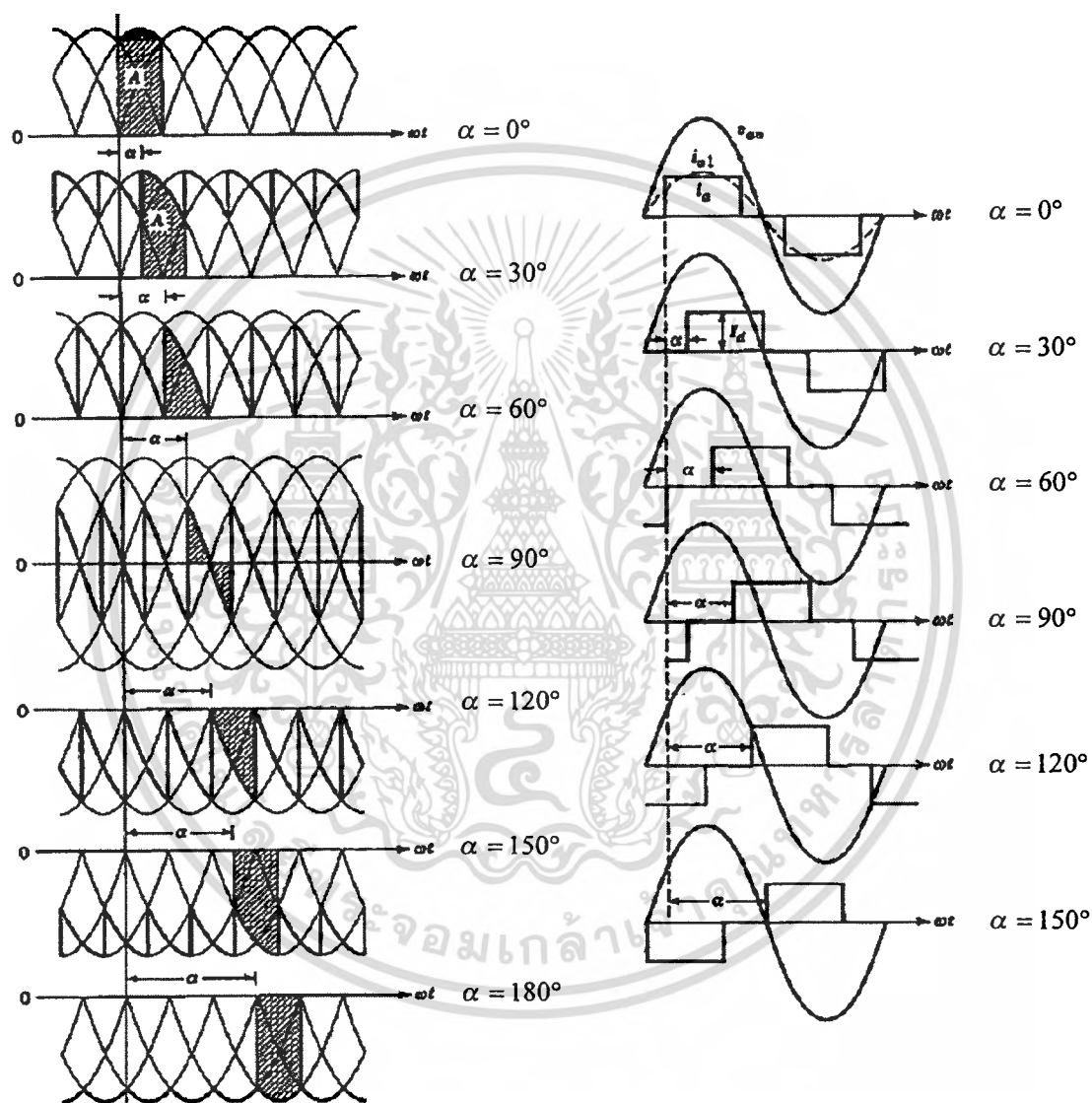
ดังนั้น 
$$V_o = \frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} V_{rms} \cdot \cos \alpha = 2.34 \cdot V_{rms} \cos \alpha \quad (3)$$



รูปที่ 2.26 การควบคุมมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) ของระบบ

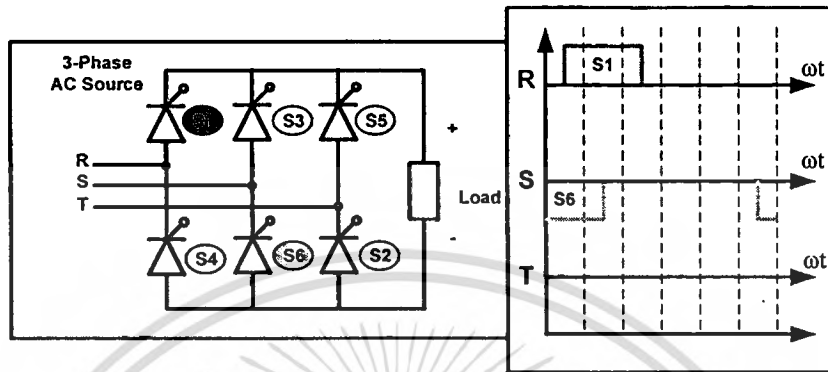
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.26 แสดงการควบคุมมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) ของระบบ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ โดยสมการที่ (2) , (3) เป็นความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านออก ( $V_o$ ) และมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) โดยเมื่อค่าของมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) อยู่ที่  $0 < \alpha < 90^\circ$  มอเตอร์จะทำงานในช่วงขับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นบวก และเมื่อค่าของมุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) อยู่ที่  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  ขณะที่มอเตอร์ทำงานในช่วงเบรกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นลบ แสดงดังรูปที่ 2.27

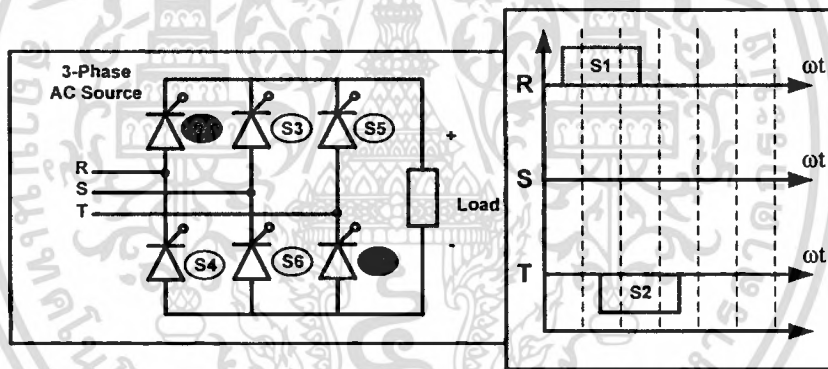


รูปที่ 2.27 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อไทรสเตอร์ทำงานที่มุมชนวน  $0 < \alpha < 180^\circ$

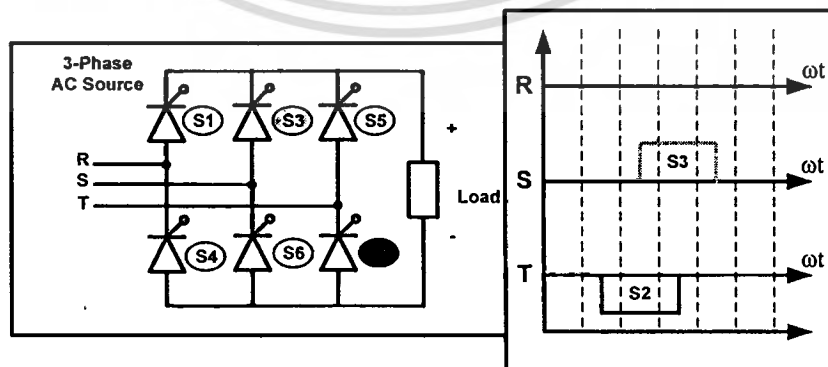
ลักษณะกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานของไทรสเตอร์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-Phase Full-Wave Fully Cotrolled Converter) ในการทำงานของไทรสเตอร์ 1 กลุ่มจะแบ่งการทำงานไทรสเตอร์เป็น 6 ช่วง โดยที่ไทรสเตอร์ในเฟสเดียวกันจะไม่สามารถทำงานพร้อมกัน แสดงในรูปที่ 2.28-2.34



รูปที่ 2.28 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 1 (S1-S6)

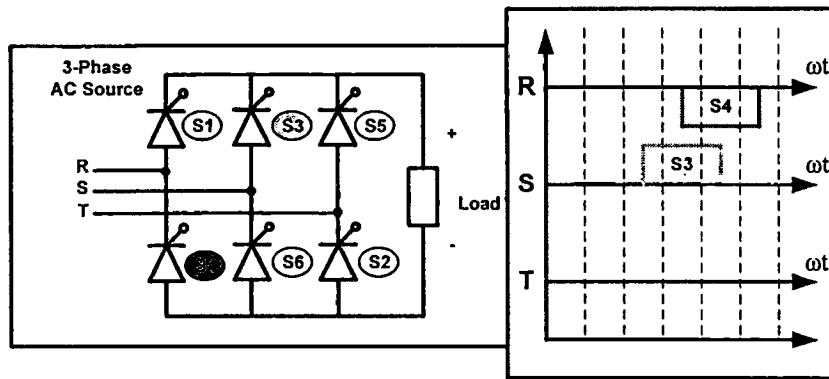


รูปที่ 2.29 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 2 (S1-S2)

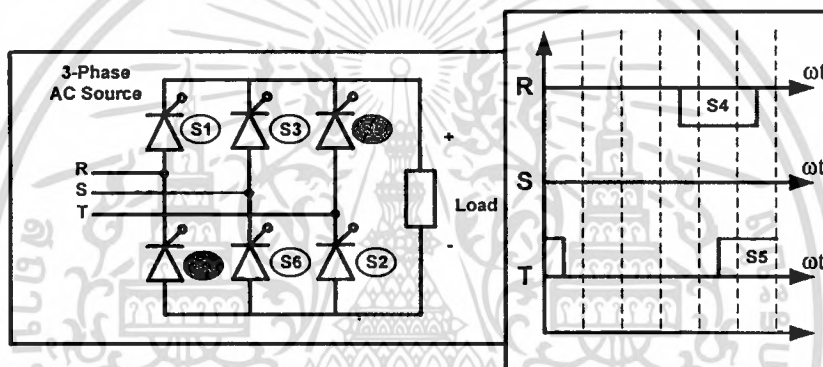


รูปที่ 2.30 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 3 (S2-S3)

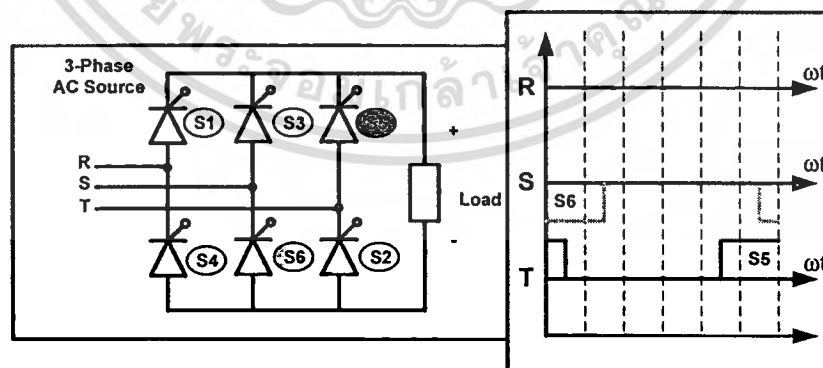
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 4 (S3-S4)

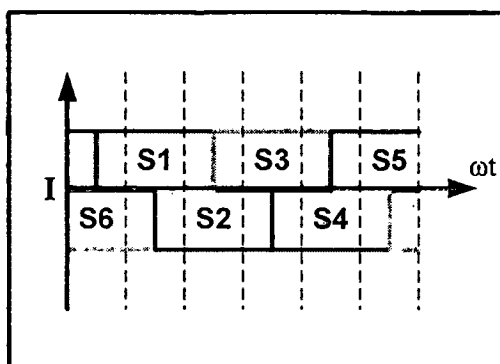


รูปที่ 2.32 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 5 (S4-S5)



รูปที่ 2.33 การทำงานของไทรสเตอร์ช่วงที่ 6 (S5-S6)

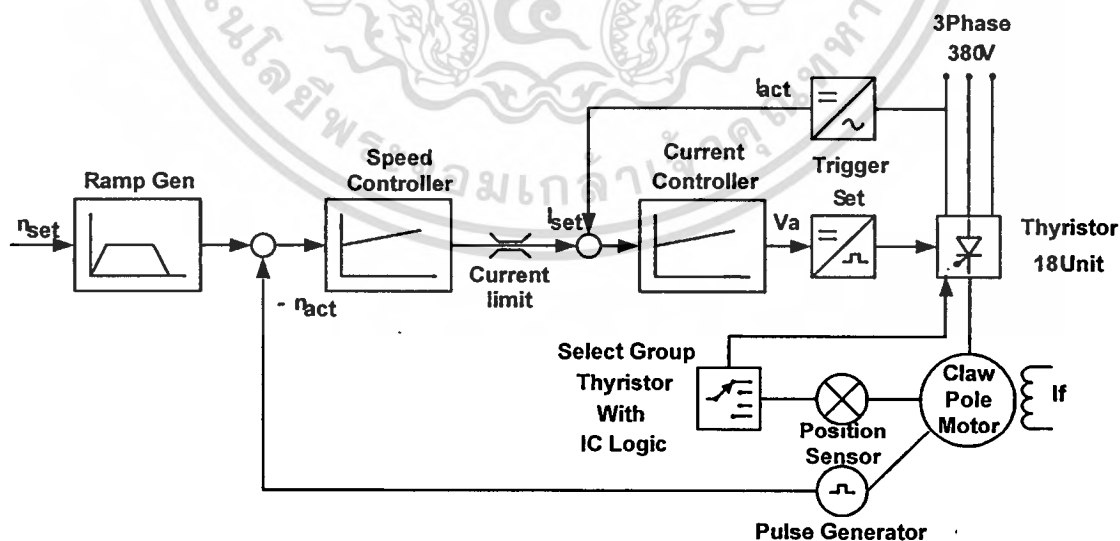
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ลักษณะกระแสไฟฟ้าขณะที่ไทรสเตอร์ทำงานทั้ง 6 ช่วง

#### 2.3.4 การควบคุมการทำงานระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การควบคุมระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะมีหลักการการทำงานเช่นเดียวกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ของ ดีซี มอเตอร์ (DC-Motor) ดังนั้นการปรับความเร็วของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) สามารถทำได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย และจะทำให้แรงบิดระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์มากขึ้น แรงบิดก็จะมากขึ้น ทำให้แรงบิดของมอเตอร์มากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ เกิดเป็นแรงบิดล้นเร่งให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นจนได้ความเร็วที่ต้องการ โดยใช้หลักการของ Close Loop Speed Control ดังรูปที่ 3.35



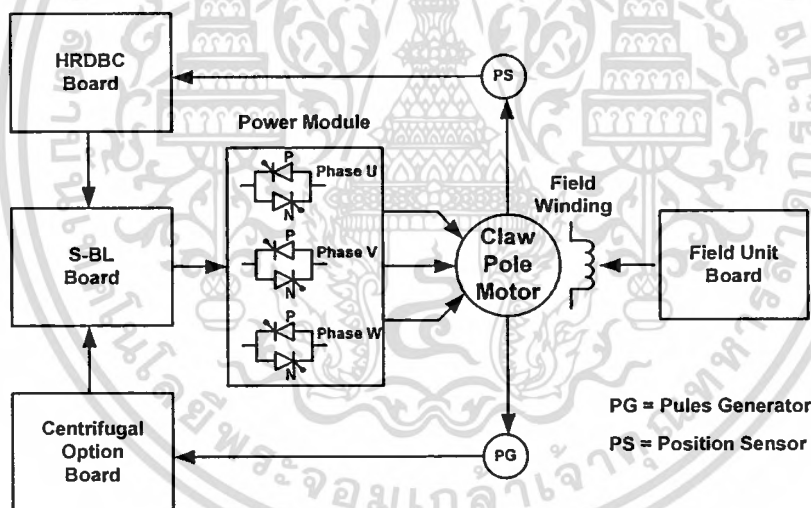
รูปที่ 2.35 การควบคุมการทำงานของ Close Loop Speed Control ระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.35 ทำการตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor) เพื่อนำไปเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ (Select Group Thyristor With IC Logic) จะให้เฟสไหนทำงาน ทำการวัดความเร็วจริงของมอเตอร์ (Pulse Generator) เพื่อนำไปเข้าตัวควบคุมความเร็ว (Speed Controller) แล้วนำไปบวกกลับกับความเร็วที่ต้องการ ออกจากตัวควบคุมความเร็ว (Speed Controller) จะได้กระแสไฟฟ้าออกมา นำไปเข้าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controller) แล้วนำไปบวกกลับกับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะมอเตอร์ทำงาน ออกจากตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controller) จะได้แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงมุมจุดชนวน เพื่อไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์

## 2.4 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

ระบบขับเคลื่อนที่ใช้กับมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะประกอบไปด้วยแผงอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2.36 ดังนี้



รูปที่ 2.36 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

- แผง Centrifugal option เป็นชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมรอบต่างๆ
- |                                       |      |     |
|---------------------------------------|------|-----|
| รอบลงน้ำตาล (Discharge Speed)         | 50   | รอบ |
| รอบต่ำ (Low Speed)                    | 200  | รอบ |
| รอบกลาง (Miduim Speed)                | 700  | รอบ |
| รอบสูง (High Speed or Top Spin Speed) | 1200 | รอบ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรับสัญญาณมาจาก Pulse Generator ที่ทำหน้าที่วัดรอบของมอเตอร์ โดยส่งสัญญาณที่ความถี่ 6500 Hz ที่ 1200 รอบ

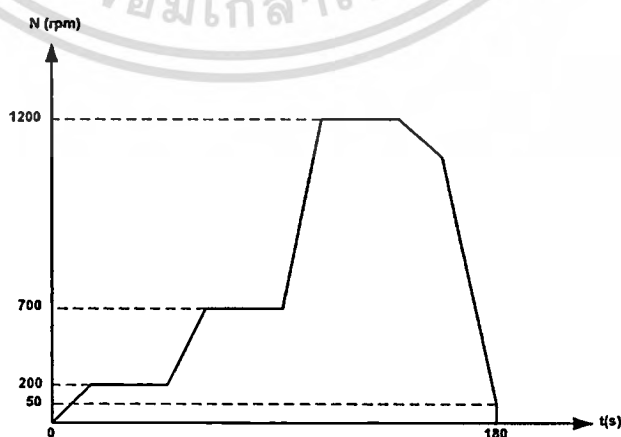
- แผง HRDBC เป็นแผงที่ใช้ควบคุมในการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ โดยรับสัญญาณมาจากตัวตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor)
- แผง FR UNIT เป็นชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า และกระแสของขดลวดฟิวส์ ซึ่งจะให้ค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นอัตราส่วนกับแรงดันไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าจะมีค่า 249 V และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสูงสุดไม่เกิน 15 A
- แผง S-BL AMP เป็นแผงใช้ส่งสัญญาณทริกไปให้ไทรสเตอร์ทั้ง 18 ตัว โดยจะควบคุมกระแสไว้ไม่เกิน 425A

## 2.5 หลักการทำงานของระบบหม้อป่นน้ำตาล

โดยหลักการทำงานของหม้อป่นจะทำหน้าที่หมุนเพื่อสลัดน้ำออกและทำให้น้ำตาลแห้งจนเป็นผลึกอย่างที่เราเห็นกันโดยได้ทั่วไป ในส่วนนี้จะเรียกกันว่าการสลัดน้ำเหลือง ซึ่งน้ำเหลืองจะได้ออกมาจากการที่นำอ้อยดิบไปผ่านกระบวนการเคี้ยวจนเป็นของเหลวจึงจะสามารถนำมาผ่านกระบวนการป่นเพื่อสลัดน้ำเหลืองได้ โดยหม้อป่นดังกล่าวจะมีรอบในการทำงานที่แน่นอนดังนี้

- รอบลงน้ำตาล มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 50 รอบ/นาที
- รอบตำ มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที
- รอบกลวง มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 700 รอบ/นาที
- รอบสูง มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 1200 รอบ/นาที

การทำงานจะเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ โดยการหมุนหนึ่งรอบจะใช้เวลาในการทำงานประมาณ 3 นาที แสดงดังรูปที่ 2.37



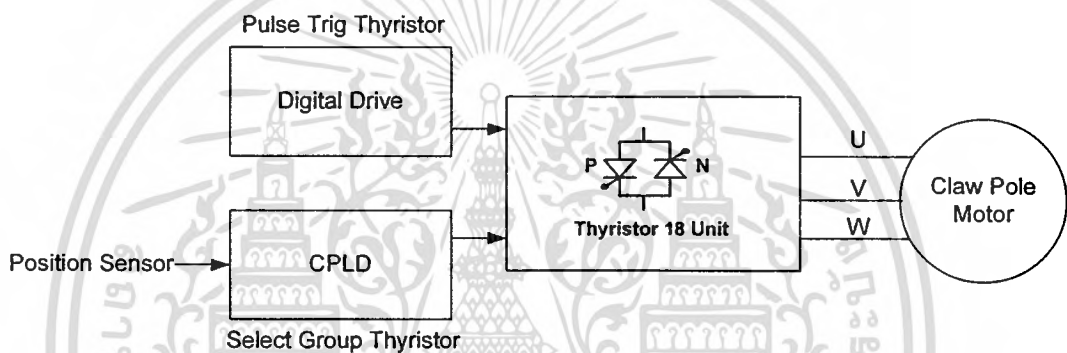
รูปที่ 2.37 ระบบการทำงานของหม้อป่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบขับเคลื่อนจากระบบอนาล็อกเป็นระบบดิจิทัล

การสร้างระบบขับเคลื่อนระบบใหม่เพื่อไปทดแทนระบบขับเคลื่อนเดิม โดยระบบขับเคลื่อนระบบเดิมเป็นเทคโนโลยีสมัยเก่าใช้แผงอิเล็กทรอนิกส์ระบบอนาล็อกในการควบคุม ส่วนระบบขับเคลื่อนระบบใหม่จะเป็นระบบดิจิทัลทั้งหมด การทำงานของระบบขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ CPLD (Complex Programmable Logic Device) และ ระบบขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 3.1



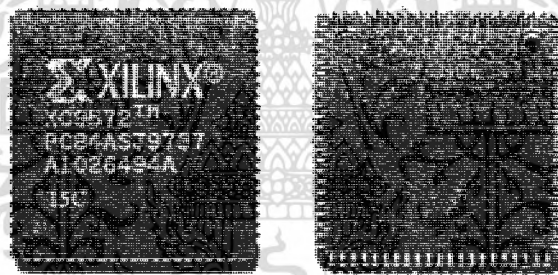
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของระบบดิจิทัล

1. CPLD (Complex Programmable Logic Device) มีหน้าที่แปลงสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ (Position Sensor) เพื่อเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์
2. ระบบขับเคลื่อน ทำหน้าที่ควบคุมความแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการควบคุมมุมทริกของไทรสเตอร์ จนได้ความเร็วที่มอเตอร์ต้องการ

### 3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของ CPLD และตัวอย่างการเขียนโปรแกรม

CPLD เป็นคำย่อมาจาก (Complex Programmable Logic Device) หมายถึง ชิพไอซีที่สามารถสร้างวงจรลอจิกทั้งแบบ Combination และ Sequential ได้ โดยการใช้คอมไพเลอร์และโปรแกรมสำเร็จรูป โปรแกรมลงไปบนตัวชิพโดยใช้มาตรฐานการโปรแกรมแบบ JTAG Programmer

CPLD เป็นชิพที่ใช้ออกแบบวงจรขนาดใหญ่ที่สามารถออกแบบโดยเขียนเป็นโปรแกรมภาษา HDL ได้ใช้เทคโนโลยีการเก็บรักษาวงจรแบบ Flash ที่สามารถคงสถานะของวงจรที่ฝังอยู่ประมาณ 20 – 40 ปี สามารถโปรแกรมซ้ำได้ประมาณมากกว่า 10000 ครั้ง ขา I/O เป็นแบบอเนกประสงค์ โดยสามารถกำหนดอินพุตและเอาต์พุตต่างๆได้ มีจำนวนลอจิกเกตที่สามารถกำหนดให้เป็นเกตอะไรก็ได้ เริ่มตั้งแต่ 800 ตัว และ Flip-flop 36 ตัว ไปจนถึงเป็นแสนๆ เกตและ Flip-flop หลายพันตัว ที่สามารถรองรับการออกแบบวงจรขนาดใหญ่และซับซ้อนมาก ๆ ได้ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILIN

## ตัวอย่าง รายละเอียดคุณสมบัติของ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX

XC9500 In-System Programmable  
CPLD Family

DS063 (v5.4) April 3, 2006

Product Specification

## Features

- High-performance
  - 5 ns pin-to-pin logic delays on all pins
  - $f_{CNT}$  to 125 MHz
- Large density range
  - 36 to 288 macrocells with 800 to 6,400 usable gates
- 5V in-system programmable
  - Endurance of 10,000 program/erase cycles
  - Program/erase over full commercial voltage and temperature range
- Enhanced pin-locking architecture
- Flexible 36V18 Function Block
  - 60 product terms drive any or all of 18 macrocells within Function Block
  - Global and product term clocks, output enables, set and reset signals
  - Extensive IEEE Std 1149.1 boundary-scan (JTAG) support
  - Programmable power reduction mode in each macrocell
  - Slew rate control on individual outputs
  - User programmable ground pin capability
  - Extended pattern security features for design protection
  - High-drive 24 mA outputs
  - 3.3V or 5V I/O capability

- Advanced CMOS 5V FastFLASH™ technology
- Supports parallel programming of multiple XC9500 devices

## Family Overview

The XC9500 CPLD family provides advanced in-system programming and test capabilities for high performance, general purpose logic integration. All devices are in-system programmable for a minimum of 10,000 program/erase cycles. Extensive IEEE 1149.1 (JTAG) boundary-scan support is also included on all family members.

As shown in Table 1, logic density of the XC9500 devices ranges from 800 to over 6,400 usable gates with 36 to 288 registers, respectively. Multiple package options and associated I/O capacity are shown in Table 2. The XC9500 family is fully pin-compatible allowing easy design migration across multiple density options in a given package footprint.

The XC9500 architectural features address the requirements of in-system programmability. Enhanced pin-locking capability avoids costly board rework. An expanded JTAG instruction set allows version control of programming patterns and in-system debugging. In-system programming throughout the full device operating range and a minimum of 10,000 program/erase cycles provide worry-free reconfigurations and system field upgrades.

Advanced system features include output slew rate control and user-programmable ground pins to help reduce system noise. I/Os may be configured for 3.3V or 5V operation. All outputs provide 24 mA drive.

Table 1: XC9500 Device Family

	XC9536	XC9572	XC95108	XC95144	XC95216	XC95288
Macrocells	36	72	108	144	216	288
Usable Gates	800	1,600	2,400	3,200	4,800	6,400
Registers	36	72	108	144	216	288
$T_{PD}$ (ns)	5	7.5	7.5	7.5	10	15
$T_{BU}$ (ns)	3.5	4.5	4.5	4.5	6.0	8.0
$T_{CO}$ (ns)	4.0	4.5	4.5	4.5	6.0	8.0
$f_{CNT}$ (MHz) <sup>(1)</sup>	100	125	125	125	111.1	82.2
$f_{SYSTEM}$ (MHz) <sup>(2)</sup>	100	83.3	83.3	83.3	66.7	56.6

1.  $f_{CNT}$  - Operating frequency for 16-bit counters.2.  $f_{SYSTEM}$  - Internal operating frequency for general purpose system designs spanning multiple FBS.

## XC9500 In-System Programmable CPLD Family



Table 2: Available Packages and Device I/O Pins (not including dedicated JTAG pins)

	XC9536	XC9572	XC95108	XC95144	XC95216	XC95288
44-Pin VQFP	34	-	-	-	-	-
44-Pin PLCC	34	34	-	-	-	-
48-Pin CSP	34	-	-	-	-	-
84-Pin PLCC	-	69	69	-	-	-
100-Pin TQFP	-	72	81	81	-	-
100-Pin PQFP	-	72	81	81	-	-
160-Pin PQFP	-	-	108	133	133	-
208-Pin HQFP	-	-	-	-	166	168
352-Pin BGA	-	-	-	-	166	192

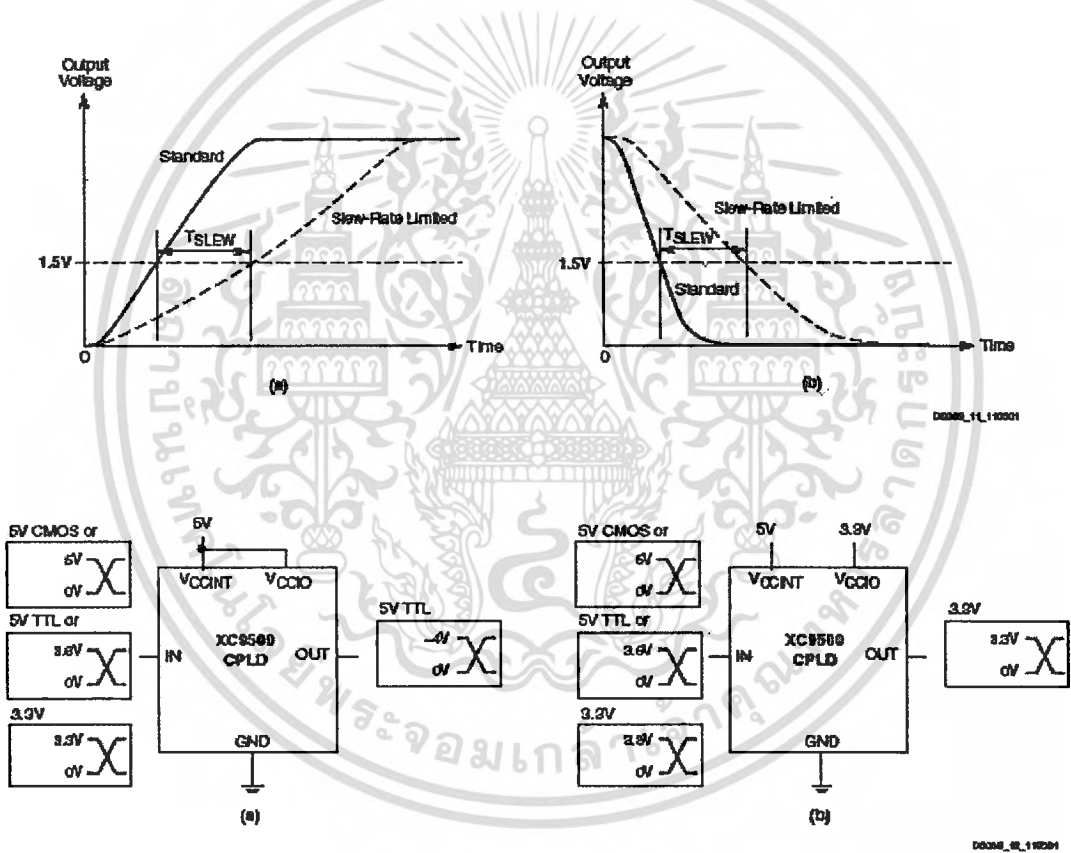
1. Most packages available in Pb-Free option. See individual data sheets for more details.

## รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผังรูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติ และตารางทั้งสอง ของ CPLD ส่วนที่เป็นสาระสำคัญ ที่ควรรู้เพื่อนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบได้แก่

1. CPLD สามารถใช้งานความถี่สูงถึง 125 MHz ใช้งานที่แรงเคลื่อน 5 V และ 3.3 V
2. ขา I/O สามารถขับกระแสได้ ถึง 24 mA ทั้ง Sink และ Source
3. CPLD แต่ละเบอร์สามารถเลือกจำนวน I/O ตาม Package ได้ ตามตารางใน Table 2
4. เราสามารถเลือกขนาดของ CPLD ได้ตามตารางใน Table 1 ซึ่งแต่ละเบอร์จะมีจำนวน ลอจิกเกตใช้งาน (Usable Gates) และจำนวน Register หรือจำนวน Flip-flop ที่แตกต่างกัน
5. การเชื่อมต่อใช้งานด้านอินพุตและเอาต์พุต ที่มีขนาดแรงเคลื่อน 5 V เท่ากันตามรูป (a) และที่มีแรงเคลื่อน 3.3 V ตามรูป (b) ดังรูปที่ 3.4



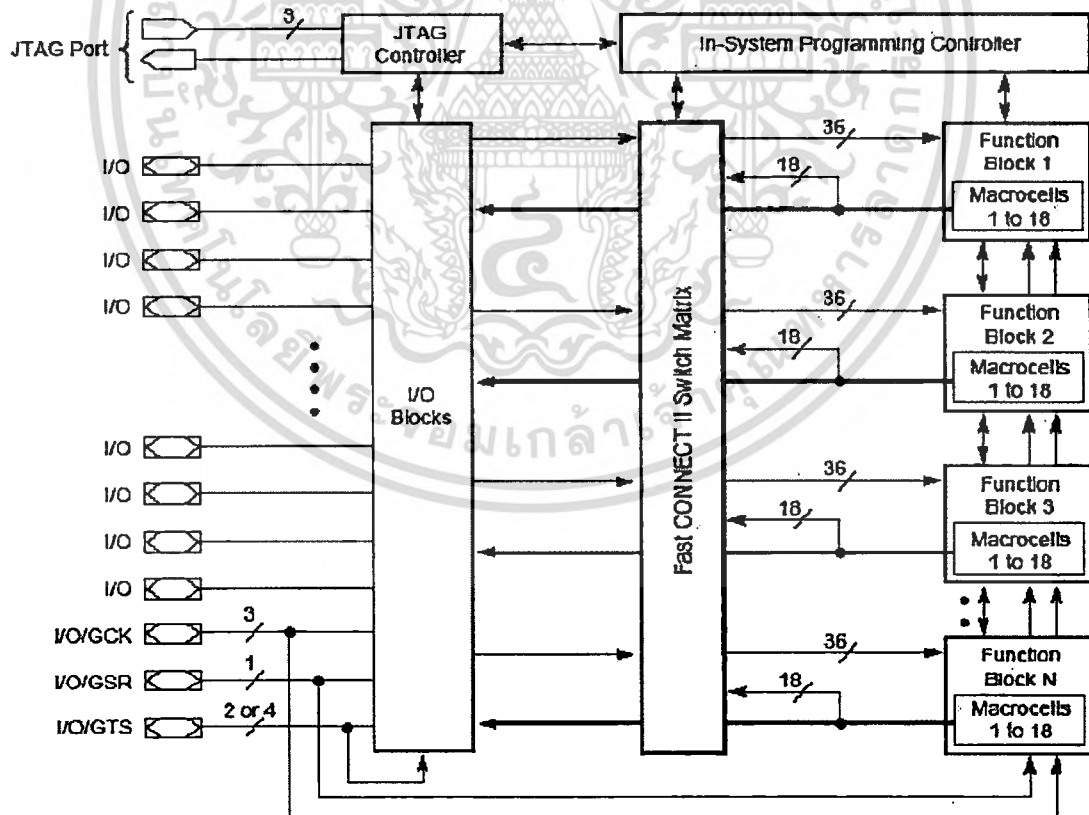
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อใช้งานด้านอินพุตและเอาต์พุตCPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของ CPLD

ในชิพ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX ทุกตัวประกอบด้วยวงจรที่เป็นส่วนการทำงาน ได้แก่ Function Blocks และ I/O Blocks ซึ่งทั้งสองส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันในโดยการทำงานในส่วนของวงจรที่เรียกว่า Fast CONNECT switch matrix ซึ่งวงจรส่วนนี้เป็นลิขสิทธิ์เฉพาะของผู้ผลิต วงจรส่วนนี้จะทำงานโดยข้อมูลโปรแกรมที่มาจากส่วนวงจร In-System Programming Controller วงจรส่วน Fast CONNECT switch matrix จะทำงานร่วมกับ Function Blocks ทำให้เกิดวงจรลอจิกตามที่ได้ออกแบบและโปรแกรมไว้ ในชิพ CPLD แต่ละตัวจะมี Function Block หลายชุด โดยแต่ละชุดจะมีสายสัญญาณการโปรแกรมลอจิกจาก Fast CONNECT switch matrix เป็นอินพุตจำนวน 36 เส้น และเอาต์พุตจำนวน 18 เส้นในแต่ละ Function Block ภายในจะประกอบด้วยวงจรที่เรียกว่า Macrocells จำนวน 18 ชุด ภายในวงจร Macrocell จะประกอบด้วยวงจรรีจิสเตอร์ หรือ ฟลิป-ฟล็อป ที่สามารถประกอบกันเป็นวงจรรีจิสเตอร์หรือเคาท์เตอร์ได้ ส่วนวงจรในส่วนที่เรียกว่า I/O Blocks จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับขา I/O ของตัวชิพโดยสามารถโปรแกรมให้แต่ละขาเป็น Input / Output หรือ Bi-direction และสามารถกำหนด Slew rate ได้ด้วย

ดังรูปที่ 3.5

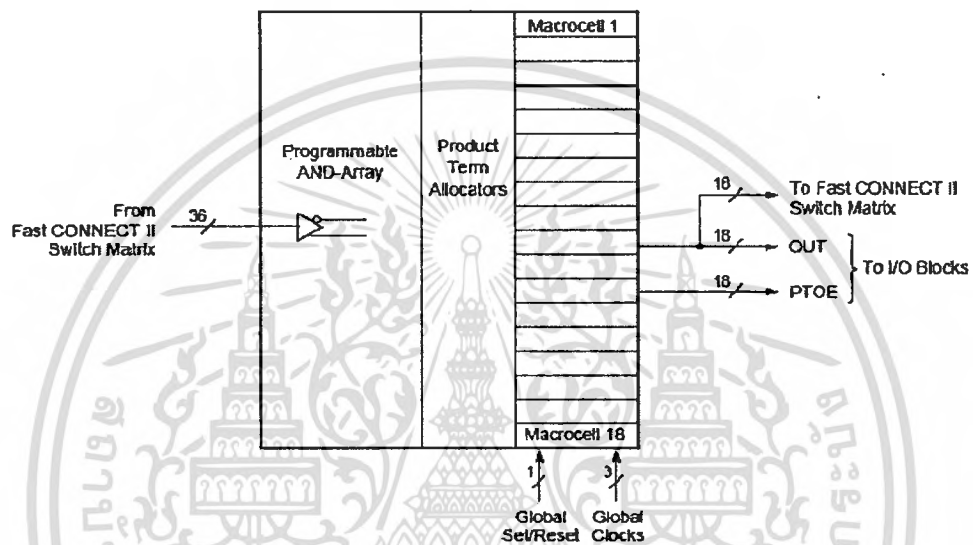


รูปที่ 3.5 โครงสร้างของชิพ CPLD ตระกูล XC9500 ของ XILINX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 โครงสร้างของ Function Block

Function Block ประกอบด้วย Macrocell จำนวน 18 ชุด โดยแต่ละชุดจะทำงานเป็นอิสระ ไม่ขึ้นต่อกัน วงจรส่วนนี้สามารถจะโปรแกรมให้สร้างได้ทั้ง Combination Logic หรือ Sequential Logic วงจร Programmable AND-Array ทำหน้าที่นำสายสัญญาณที่มาจาก Fast CONNECT switch matrix มาทำให้เป็นสัญญาณ True และ complement รวมเป็น 72 เส้นสัญญาณ ส่งไปยังวงจร Product Term Allocators และส่งต่อไปยัง Macrocell ทั้ง 18 ตัว ดังรูปที่ 3.6

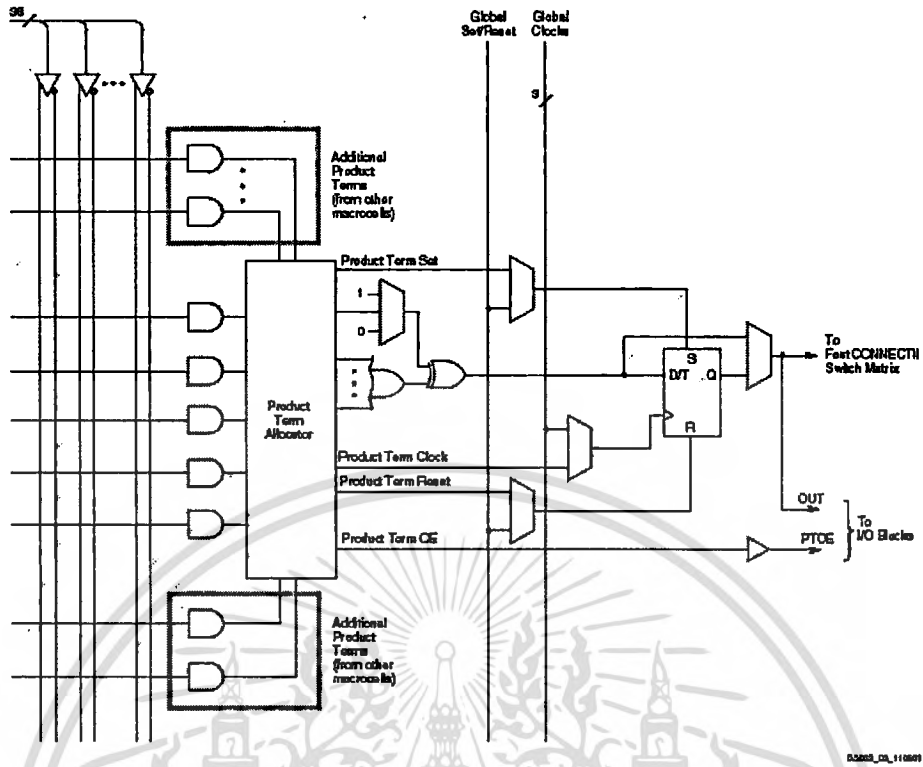


รูปที่ 3.6 โครงสร้างของ Function Block

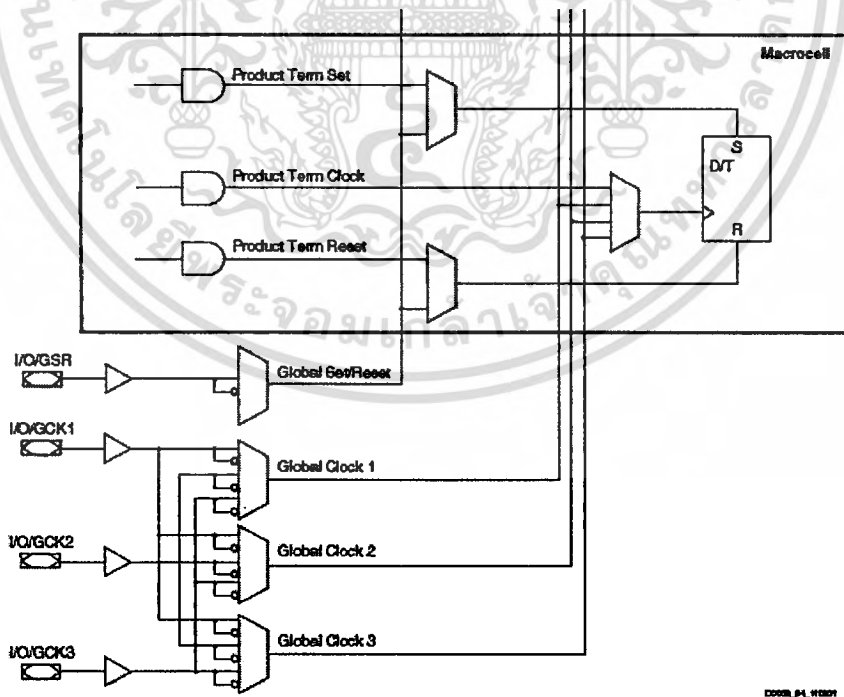
### 3.1.3 โครงสร้างทาง Macrocell

Macrocell ที่อยู่ภายใน Function Block จะประกอบด้วยส่วนการทำงานที่เรียกว่า Product Term จำนวน 5 ชุดที่ต่อสัญญาณมาจาก AND-Array สำหรับใช้เป็น ลอจิกปฐมนุญ (ได้แก่ OR และ XOR Gates) ที่จะนำมาสร้างเป็นวงจรลอจิกประเภท Combination หรือเป็นวงจรควบคุมทางของ วงจร Register รวมทั้งสัญญาณ Clock, Set / Reset และสัญญาณ Enable ต่างๆ ในส่วนของ Macrocell register โปรแกรมสามารถจะกำหนดให้เป็น ฟลิป-ฟล็อป แบบต่างๆ ได้ เช่น D-Flip-flop, T-Flip-flop หรืออาจกำหนดให้เป็นตัวผ่านกรณีที่เป็นวงจรประเภท Combination ในการ กำหนดสัญญาณ Set/Reset ให้ ฟลิป-ฟล็อป สามารถกำหนดให้เป็นทั้งแบบ Synchronous และ Asynchronous operation และเป็นได้ทั้ง Individual และ Global operation และการทำงานขณะ เริ่มเปิดไฟเข้าลิ้งวงจร ฟลิป-ฟล็อป จะถูกกำหนดให้ผู้ใช้พร้อมโหลดข้อมูลเข้าไปได้ ดังรูปที่ 3.7 และ โครงสร้างภายในของ Macrocell ของ CPLD ตระกูล XC 9500 ดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 โครงสร้างภายในของ Macrocell ของ CPLD ตระกูล XC 9500

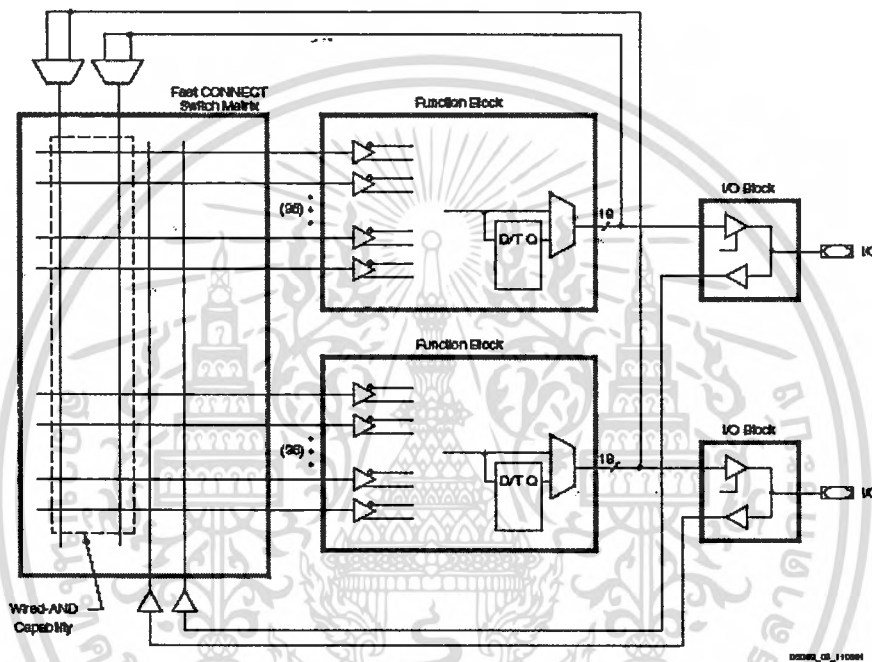


รูปที่ 3.8 สายสัญญาณ Global ที่ต่อตรงเข้าไปยัง Macrocell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 โครงสร้างของ Fast CONNECT Switch Matrix

วงจรของ Fast CONNECT Switch Matrix จะมีสายสัญญาณเชื่อมต่อไปยัง Function Block (FB) โดยใน Function Block หนึ่ง ๆ จะมีสายจาก Fast CONNECT Switch Matrix จำนวน 36 เส้น วงจร Fast CONNECT Switch Matrix จะมีลักษณะเป็นวงจร Wired-AND การทำงานของวงจรจะเป็นตัวป้อนกลับเข้าไปยังวงจรในส่วน Function Block เพื่อสร้างเป็นวงจรถอดจิกเมื่อถูกโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบวงจรไว้ ดังรูปที่ 3.9

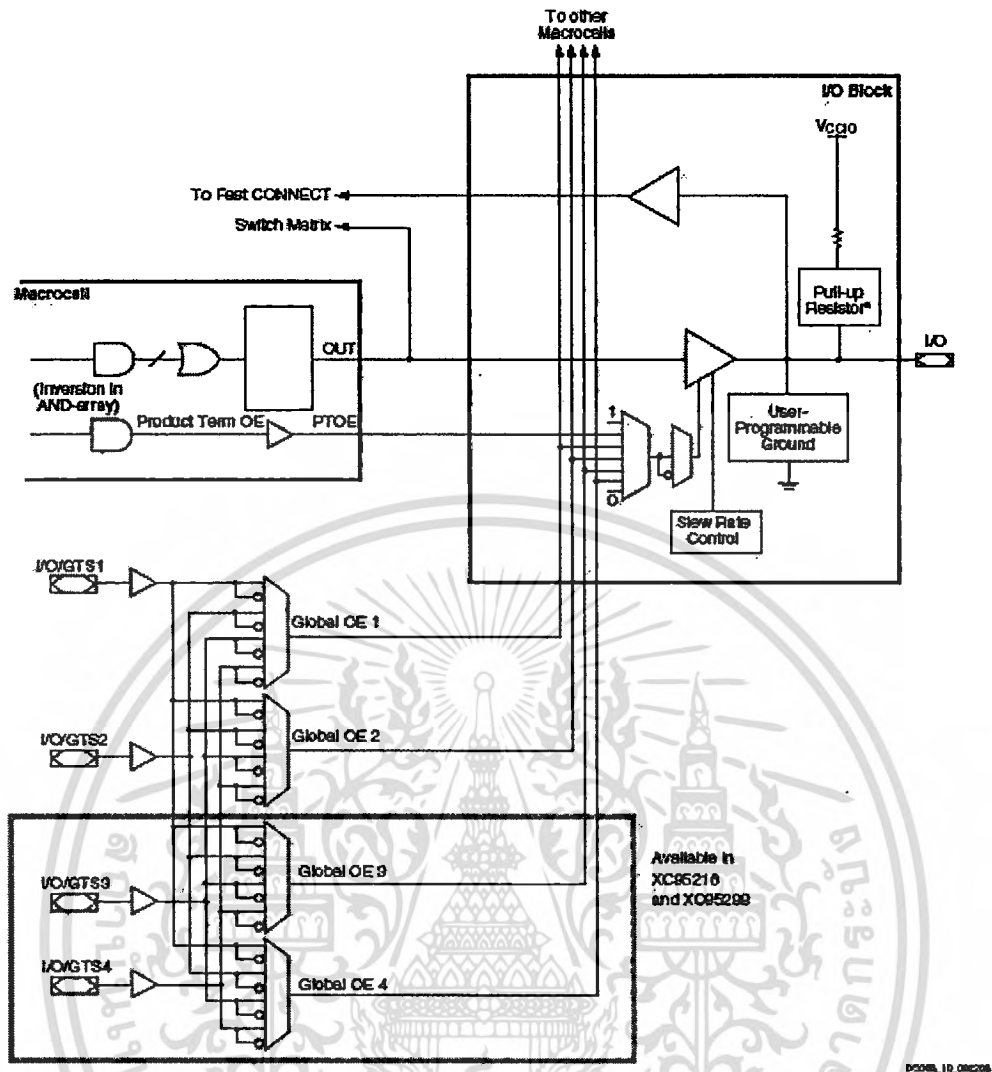


รูปที่ 3.9 การทำงานในของ Fast CONNECT Switch Matrix

### 3.1.5 โครงสร้างของวงจรในส่วนของ I/O Block

I/O Block (IOB) เป็นวงจรสุดท้ายที่ต่อเชื่อมจาก Macrocell ไปยังขา I/O ของตัวชิพ วงจรในส่วนของ I/O Block จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ Input Buffer ทำหน้าที่รับและปรับสภาพสัญญาณลอจิกป้อนเข้าที่ขา I/O ของ CPLD Output Buffer ทำหน้าที่ควบคุมการส่งค่าสัญญาณลอจิกออกทางขา I/O ของ CPLD วงจรส่วนนี้สามารถควบคุมค่า Slew Rate และ ค่า Global Tri-state (GTS) และ Output Enable (OE) ที่ต่อสัญญาณควบคุมมาจาก Product Term ได้โดยตรง ที่ขา I/O ยังมีวงจรควบคุม Pull-up Resistor ซึ่งต่ออยู่กับ VCCIO ทำหน้าที่กำหนดขา I/O เกิด Pull-up ให้เป็นลอจิก High เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนขณะที่มีการโปรแกรมตัวชิพ และ วงจร User- Programmable Ground มีไว้เพื่อให้ผู้ใช้งานโปรแกรมให้ลงกราวด์กรณีที่เขา I/O ไม่ได้ถูกใช้งาน ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

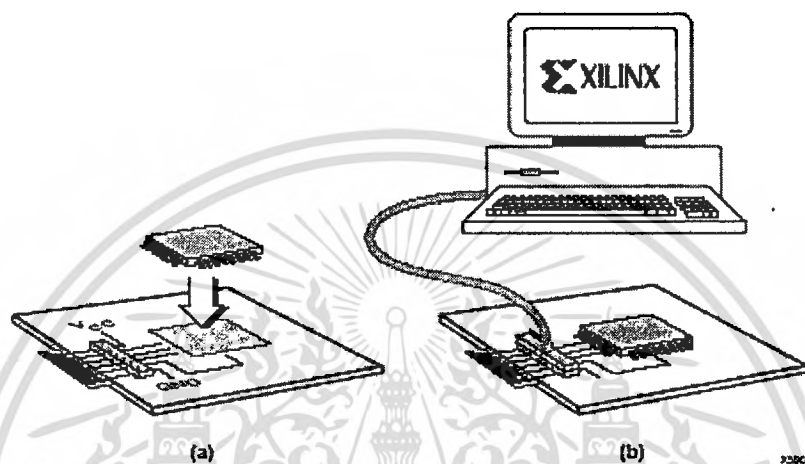


รูปที่ 3.10 แสดงวงจรในส่วนของ I/O Block และ Global Tri-Stat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 ลักษณะการโหลดโปรแกรม

ชิพ CPLD ตระกูล XC9500 สามารถทำการโปรแกรมได้ในขณะมีไฟเลี้ยงวงจร และวงจรทำงานอยู่ได้ ซึ่งเรียกว่า In – System Programming โดยใช้มาตรฐาน Protocol JTAG แบบ 4 ขั้ว เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 1149.1 Boundary-Scan (JTAG) โดยสามารถโปรแกรมซ้ำได้มากกว่า 10000 ครั้ง การโปรแกรมหาดังรูปที่ 3.11

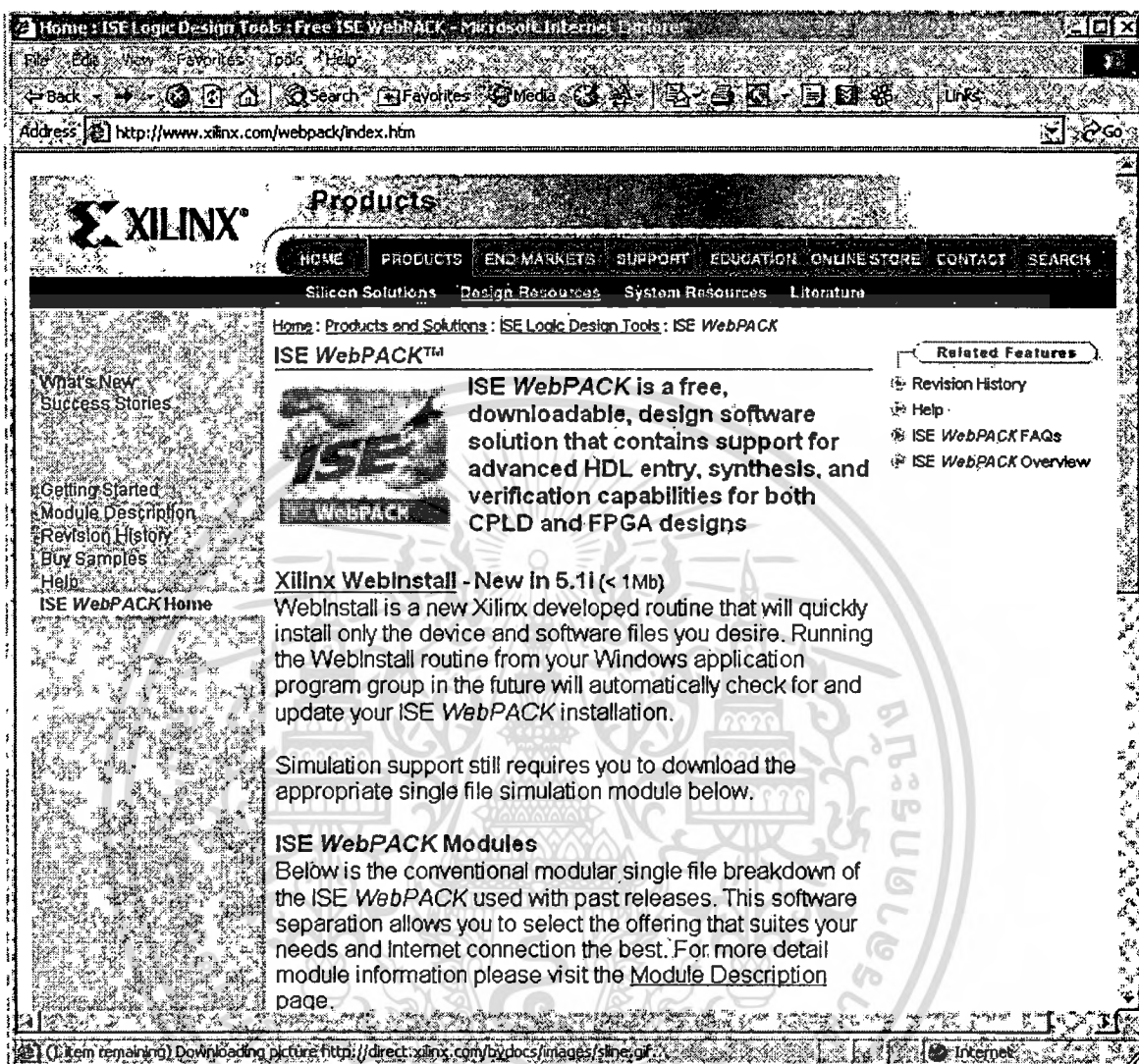


รูปที่ 3.11 การโปรแกรม CPLD ตระกูล XC9500

ในการพัฒนาและออกแบบวงจรลอจิกที่จะใช้โปรแกรมลงตัวชิพ CPLD ตระกูล XC9500 เราใช้โปรแกรม XILINX Foundation และ XILINX Web Pack ซึ่งจะรองรับการออกแบบได้ทั้งการเขียนเป็นวงจร Schematic และการใช้โปรแกรมภาษา ABEL-HDL และ VHDL นอกนั้นยังรองรับการใช้ภาษา Verilog และการเขียนเป็น State Diagram อีกด้วย สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเน้นการใช้ภาษา Schematic เป็นหลักเนื่องจากเป็นภาษาที่สามารถเขียนได้ง่าย

ชุดโปรแกรม Xilinx ISE WebPACK เป็นฟรีโปรแกรม (Free software) ของบริษัท Xilinx ที่สามารถ Download ได้ที่ <http://www.xilinx.com/webpack/index.htm> โปรแกรมนี้สามารถรองรับการออกแบบวงจรแบบ High Level Design ที่ใช้ภาษา ABEL หรือ HDL (VHDL, Verilog HDL) ในการออกแบบ และยังสามารถสังเคราะห์โมเดลวงจรจากภาษาดังกล่าวให้อยู่ในรูปของวงจรลอจิก รวมทั้งการโปรแกรมที่ในการโปรแกรมชิพได้ทั้งตระกูล CPLD และ FPGA ดังรูปที่ 3.12

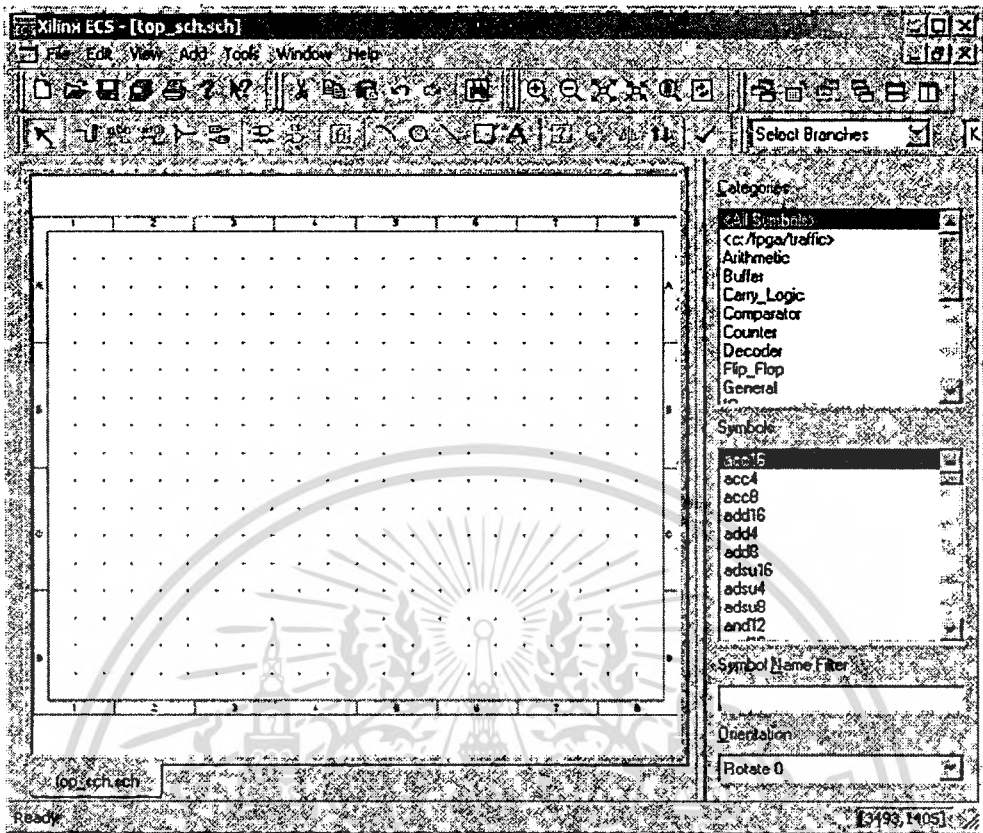
### 3.1.7 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม



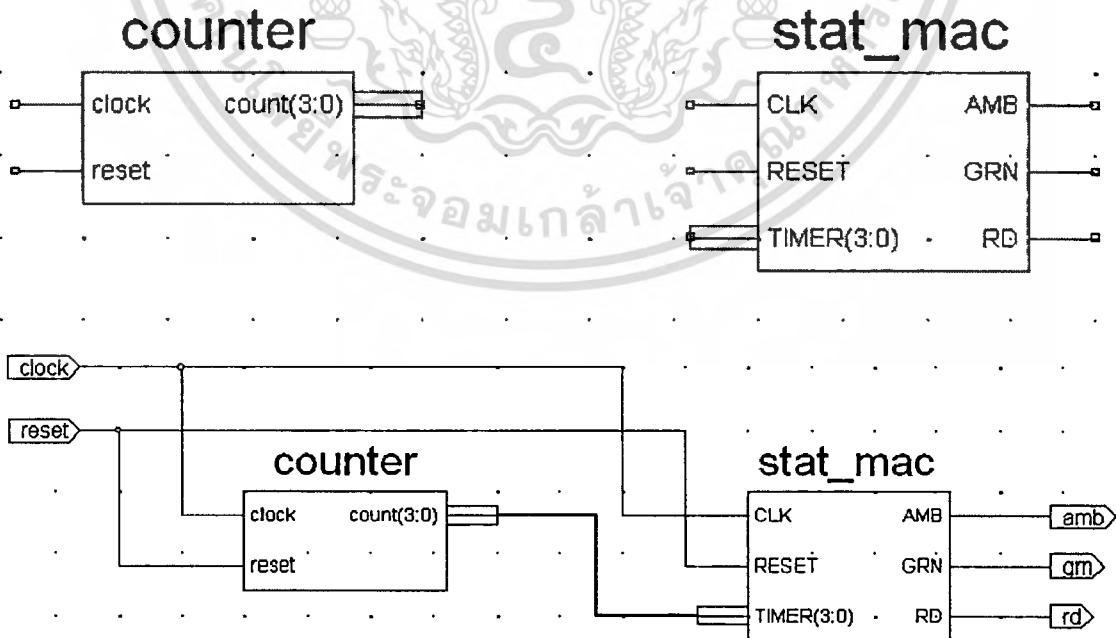
รูปที่ 3.12 ชุด โปรแกรม Xilinx ISE WebPA

สามารถออกแบบจาก Schematic Capture ได้อีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งจะเป็นเนื้อหาของหัวนี้ โดยให้การออกแบบวงจรบนสุด (Top Level) เพื่อทำการเชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้ต้องการให้เรียนรู้การใช้งาน ECS Schematic capture tool ดังรูปที่ 3.13-3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



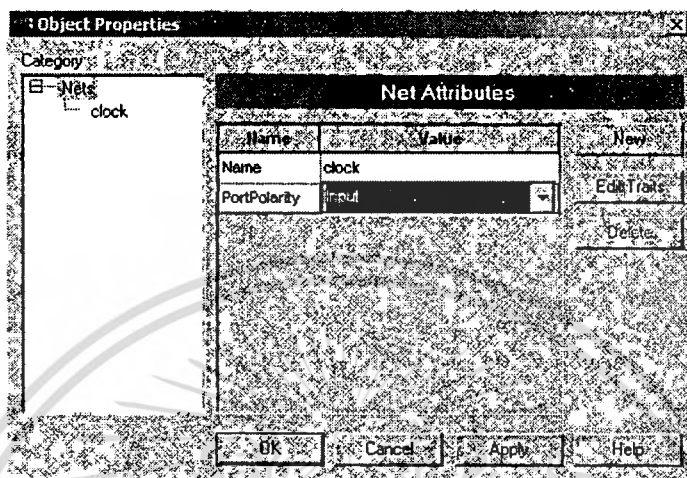
รูปที่ 3.13 ชุด Schematic Capture Tool



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการออกแบบชุด Schematic Capture Tool

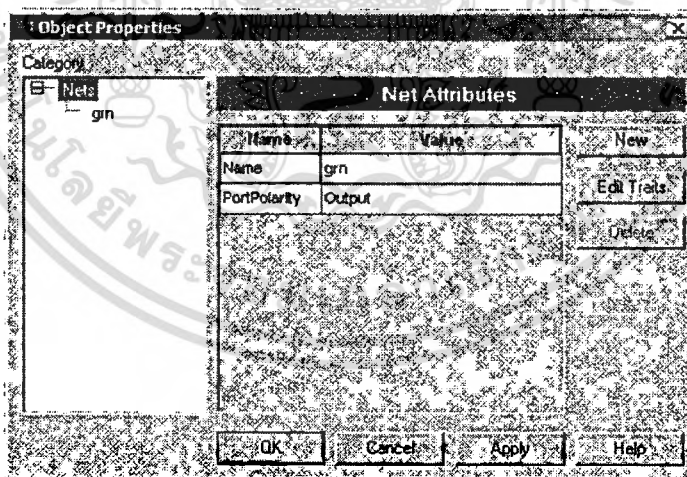
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการกำหนดค่าของขา I/O ต่างๆ ที่เพิ่มเข้า โดยให้ Double click ที่ ขา XLXN 3 จะปรากฏหน้าต่างของ Object Properties แล้วแก้ไขในส่วนชื่อ โดยแก้ไขเป็น Cock และส่วนของ Port Polarity เป็นชนิด Input ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการกำหนดขา Input ของ Gate

ส่วนของขาเอาต์พุต แก้ไขส่วนของ Object Properties ส่วนของ Port Polarity เป็น Output ด้วย ดังรูปที่ 3.16



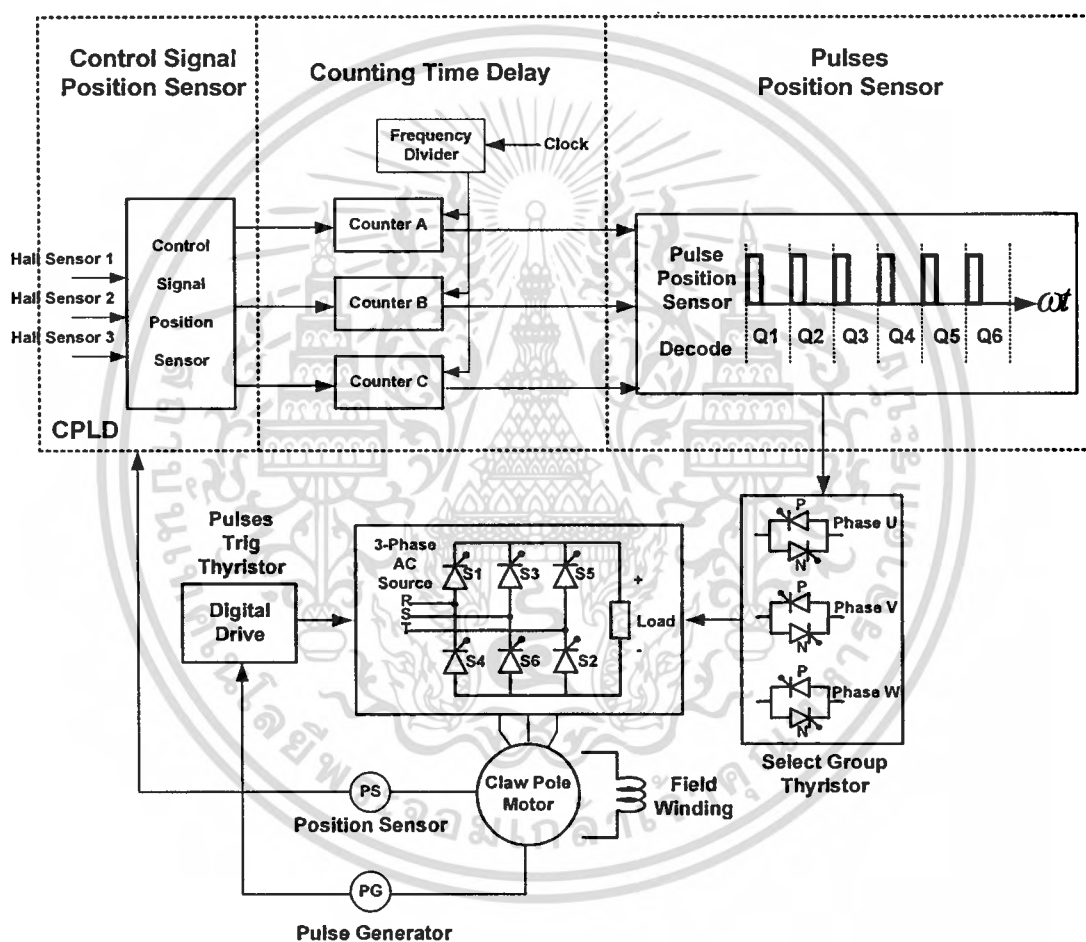
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการกำหนดขา Output ของ Gate

จากนั้นให้ทดสอบความถูกต้องของการวาดวงจร โดยให้ เลือก Menubar > Tool > Check Schematic ถ้าไม่พบ Error ในหน้าต่าง Schematic Check Errors ดังรูป แสดงว่า วาดวงจรถูกต้องให้ทำการ Save เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยใช้ CPLD

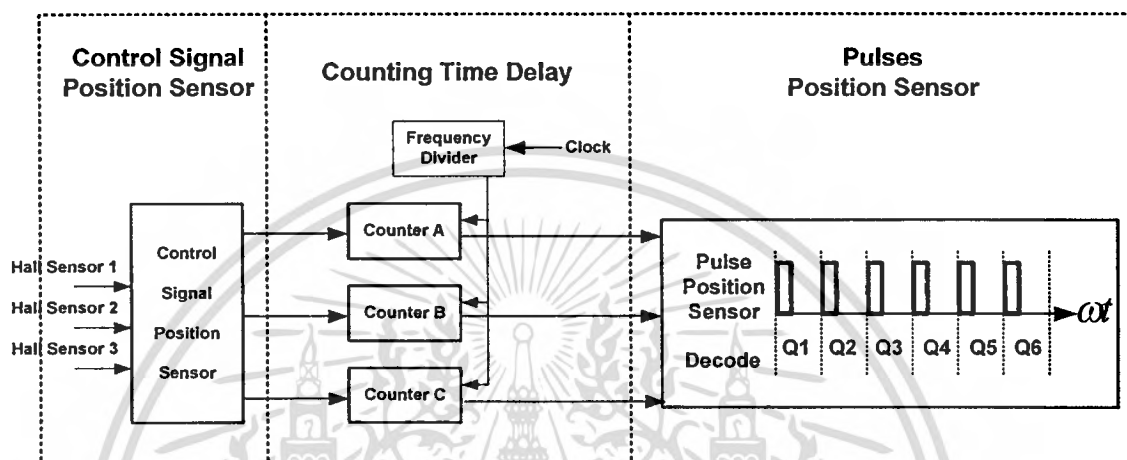
จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะใช้ ไทริสเตอร์ 18 ตัว ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้ามอเตอร์ด้วยการปรับมุมจุดชนวน เหมือนกับ ดิซี มอเตอร์ (DC Motor) ดังนั้นวงจรควบคุมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ ดิซี ไดรฟ์ (DC Drive) ทุกประการ โดยวงจรพื้นฐานของระบบของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลโดยใช้ CPLD ช่วยในการออกแบบ แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรพื้นฐานของระบบของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

### 3.2.1 การใช้ CPLD แปลงสัญญาณของตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

CPLD (Complex Programmable Logic Device) จะใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อนำไปใช้งานแทนที่ IC Logic ของระบบขับเคลื่อนเดิม ในการแปลงสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อนำไปเลือกกลุ่มการทำงานของทรินสเตอร์ โดยบล็อกไดอะแกรมของ CPLD แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมของ CPLD (Complex Programmable Logic Device)

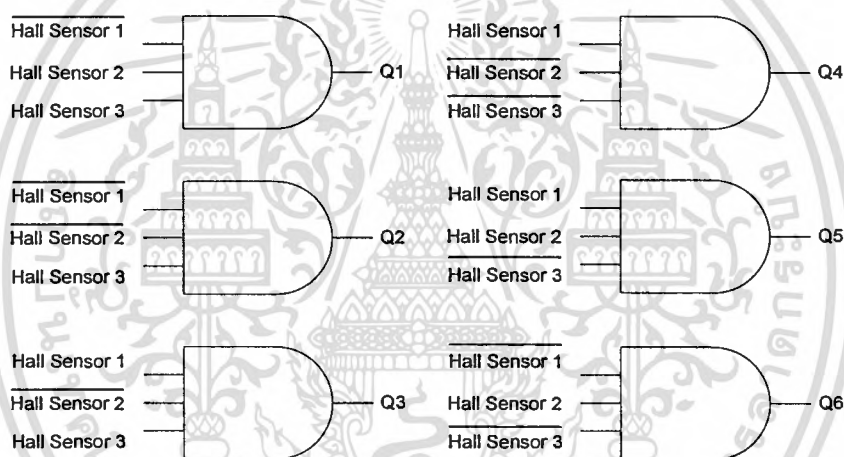
จากรูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมของ CPLD จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบสำคัญจะแบ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

- Control Signal Position Sensor รับสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (Position Sensor)
- Counting Time Delay เขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดความกว้างของสัญญาณ
- Pulses Position Sensor เป็นเอาต์พุตของระบบ เพื่อนำไปเลือกกลุ่มของทรินสเตอร์

การแปลงสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจตำแหน่งของการหมุน (Position Sensor) เอาต์พุตที่ออกมาได้กำหนดให้เป็นค่า Q โดยการทำงานของทรินสเตอร์จะเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จาก Q1-Q6 จนครบทั้ง 6 กลุ่มการทำงาน (มอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทุก) โดยเอาต์พุตออกมาในรูปแบบของพัลส์ เพื่อไปกำหนดให้ทรินสเตอร์ในแต่ละกลุ่มทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.1 และการเขียนวงจร Schematic ดังรูปที่ 3.19

ตารางที่ 3.1 การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์

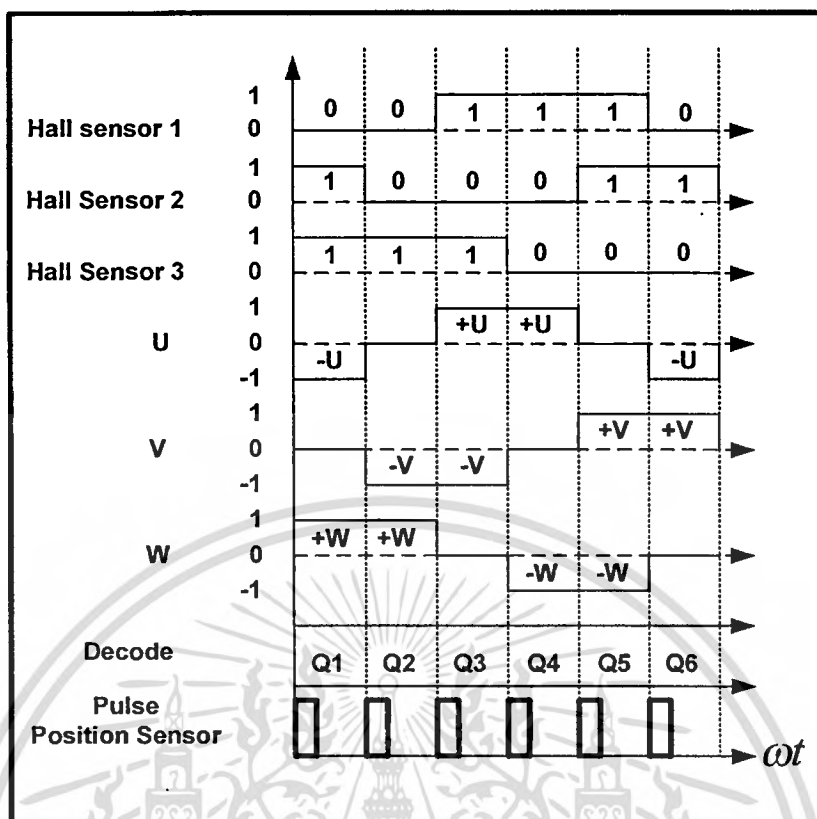
Select Group Thyristor						
Decode	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Hall Seneor1	0	0	1	1	1	0
Hall Seneor2	1	0	0	0	1	1
Hall Seneor3	1	1	1	0	0	0
U	N	0	P	P	0	N
V	0	N	N	0	P	P
W	P	P	0	N	N	0



รูปที่ 3.19 การเขียนวงจร Schematic แปลงสัญญาณเพื่อเลือกกลุ่มของไทรสเตอร์จาก CPLD

### 3.2.2 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับระบบขับเคลื่อนเดิม ต่างกันตรงที่ระบบขับเคลื่อนระบบใหม่จะใช้ CPLD เขียนโปรแกรมเพื่อไปเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ โดยกำหนดสัญญาณที่แปลงมาได้ให้เป็นค่า Q แสดงดังรูปที่ 3.20



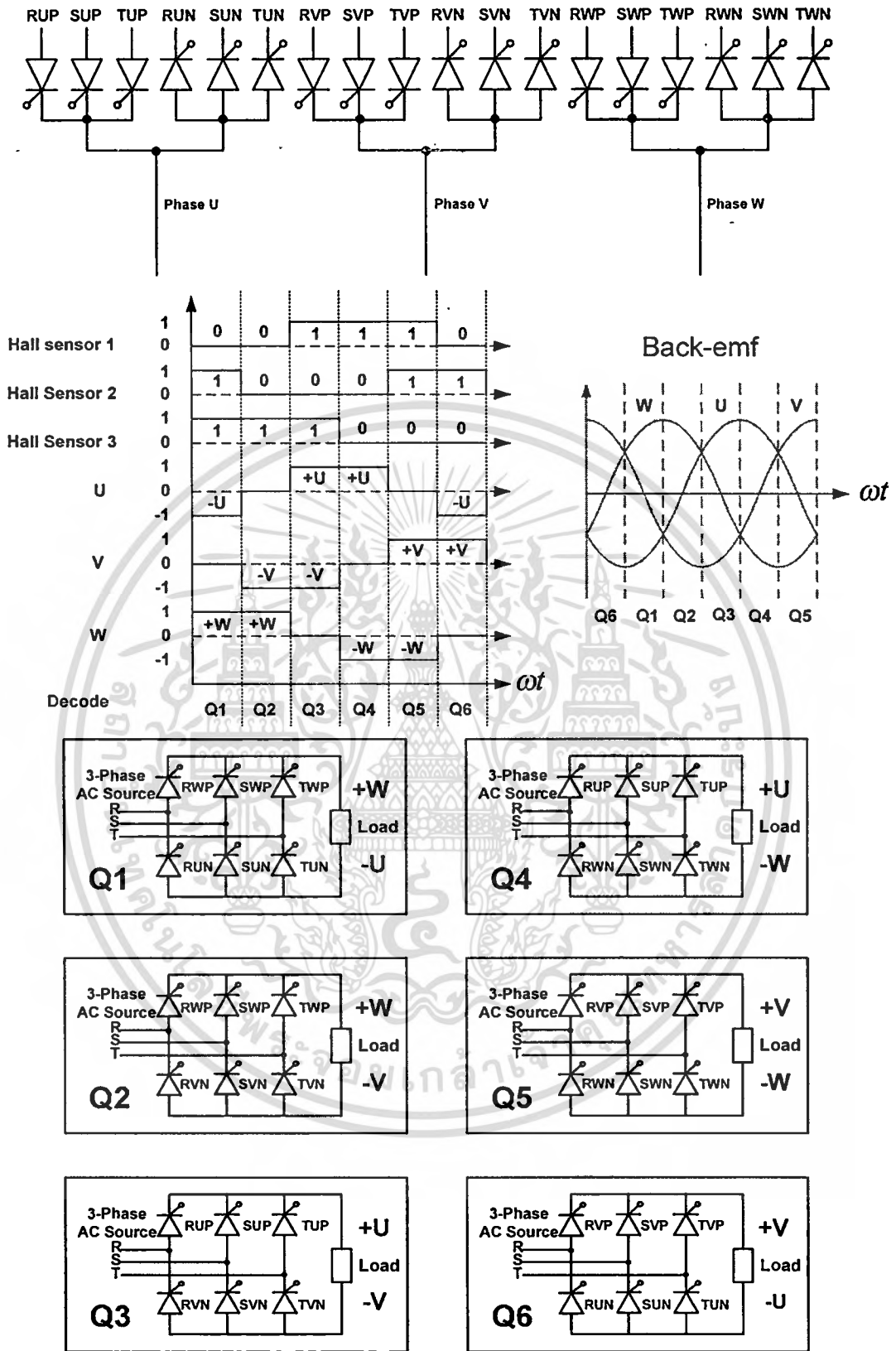
รูปที่ 3.20 การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จาก CPLD

จากรูปที่ 3.20 สามารถกำหนดกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q1-Q6 ได้ดังนี้

- เมื่อ
- Q1 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +W และ -U ทำงาน
  - Q2 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +W และ -V ทำงาน
  - Q3 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +U และ -V ทำงาน
  - Q4 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +U และ -W ทำงาน
  - Q5 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +V และ -W ทำงาน
  - Q6 = จะทำให้ไทรสเตอร์กลุ่ม +V และ -U ทำงาน

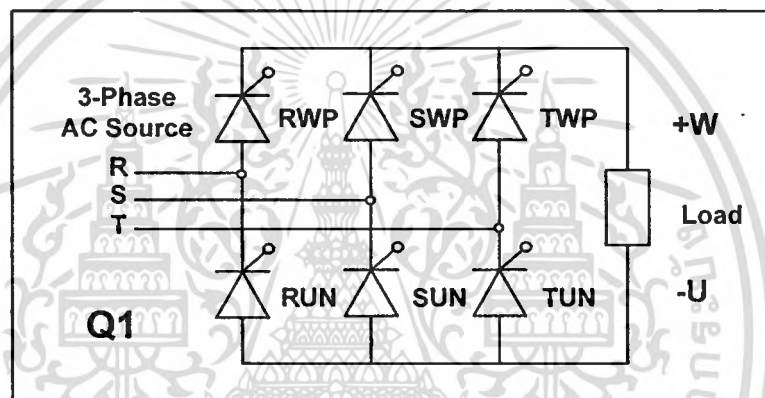
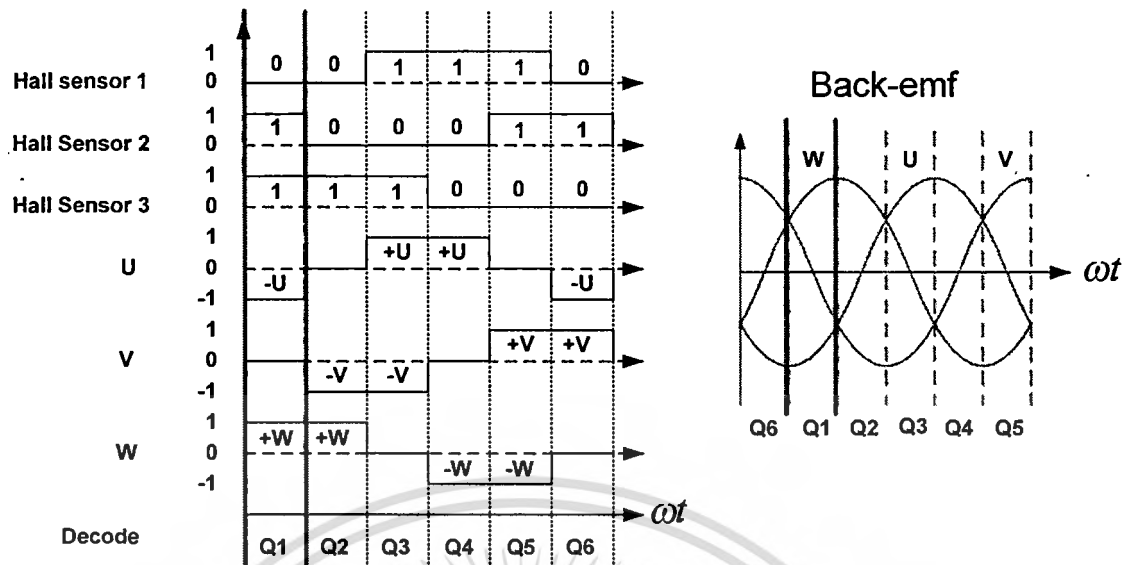
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยจนมอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ คิดเป็น 360 องศาทางกล การเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงานของไทรสเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวน 24 ครั้ง (มอเตอร์หมุนเป็น 90 องศาทางกลหรือ 1/4 รอบของมอเตอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสการทำงาน 6 ครั้ง) โดยการกำหนดการเปลี่ยนกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์จะเป็นลักษณะอย่างที่ได้อีกกล่าวมาแล้วห้ามมีการเปลี่ยนแปลง โดยกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ในแต่ละเฟส สามารถแสดงได้ดังรูป 3.21-3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์

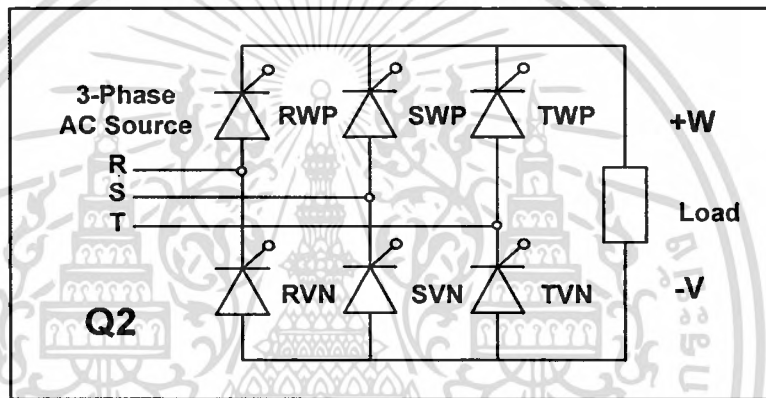
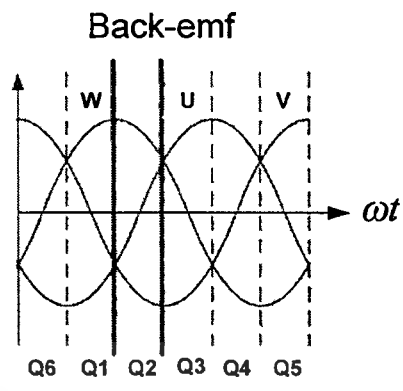
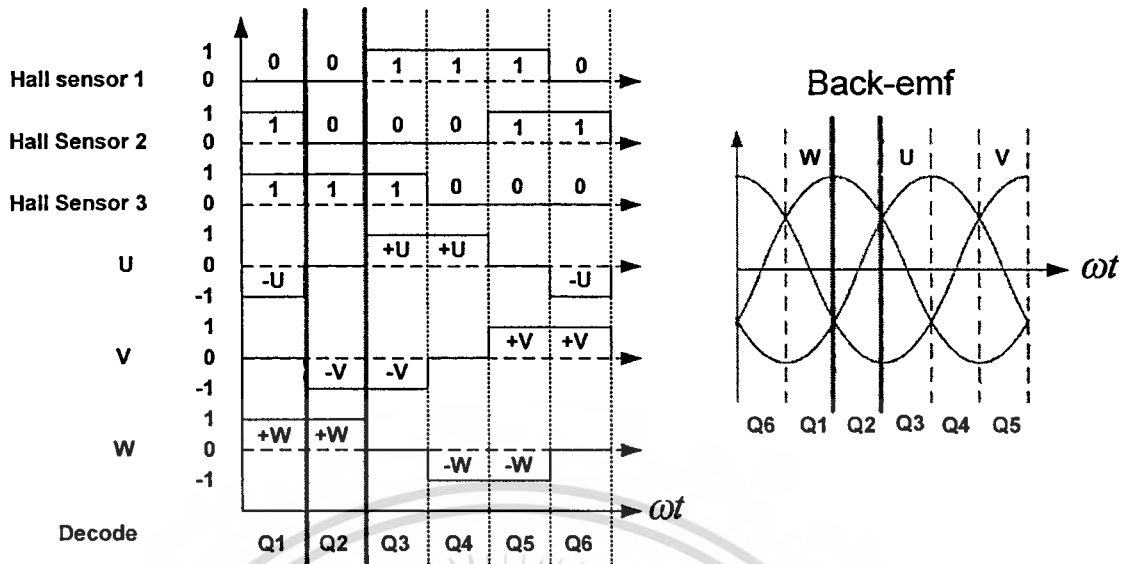
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- RWP-SUN
- RWP-TUN
- SWP-TUN
- SWP-RUN
- TWP-RUN
- TWP-SUN

รูปที่ 3.22 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q1

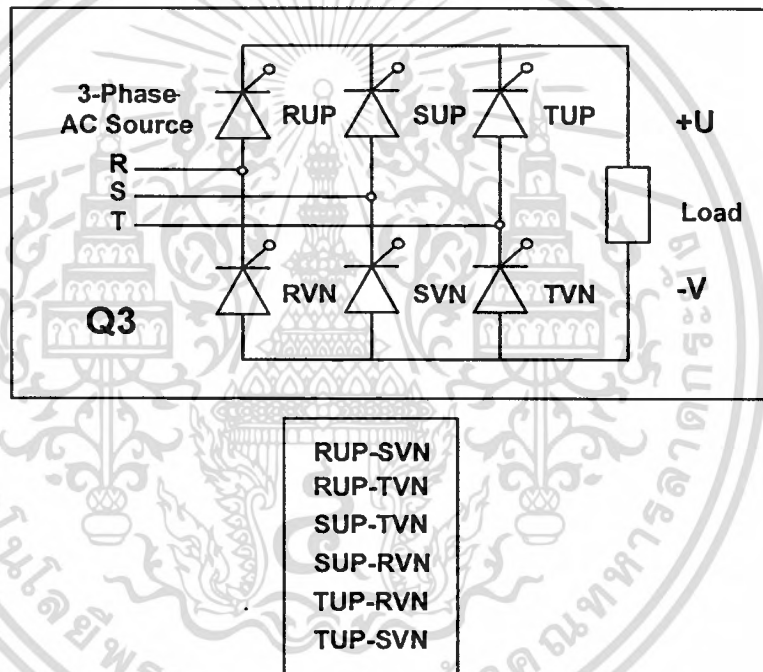
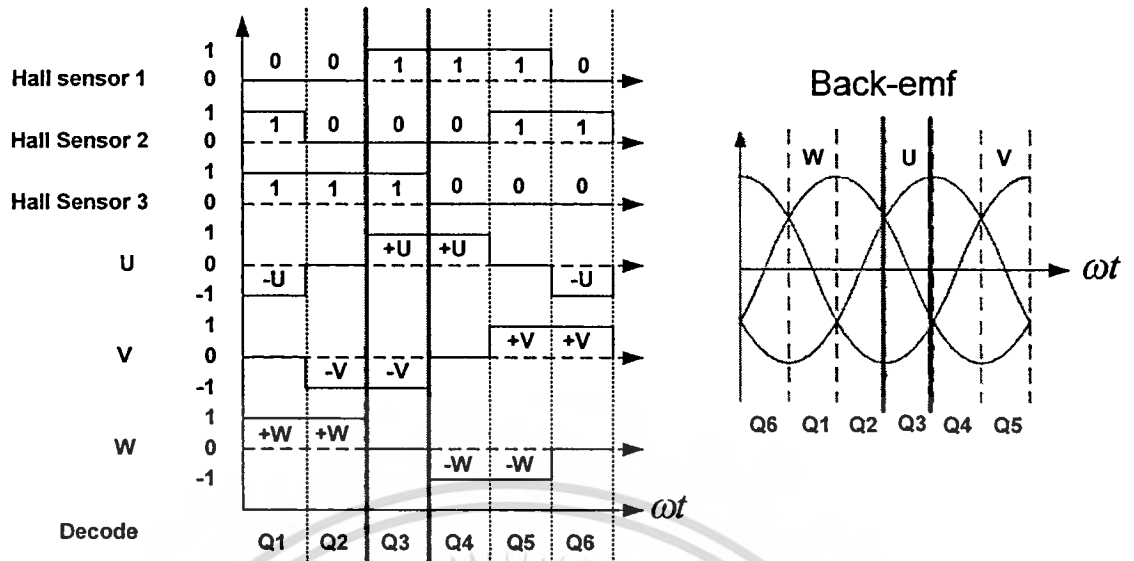
ดังรูปที่ 3.22 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q1 ไทรสเตอร์ที่เฟส W เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส U เป็นลบ



- RWP-SVN
- RWP-TVN
- SWP-TVN
- SWP-RVN
- TWP-RVN
- TWP-SVN

รูปที่ 3.23 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q2

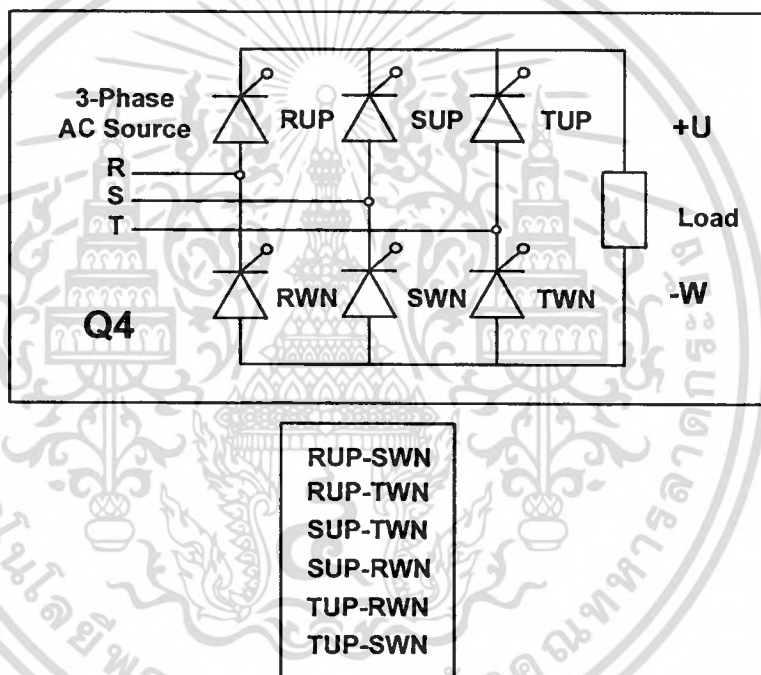
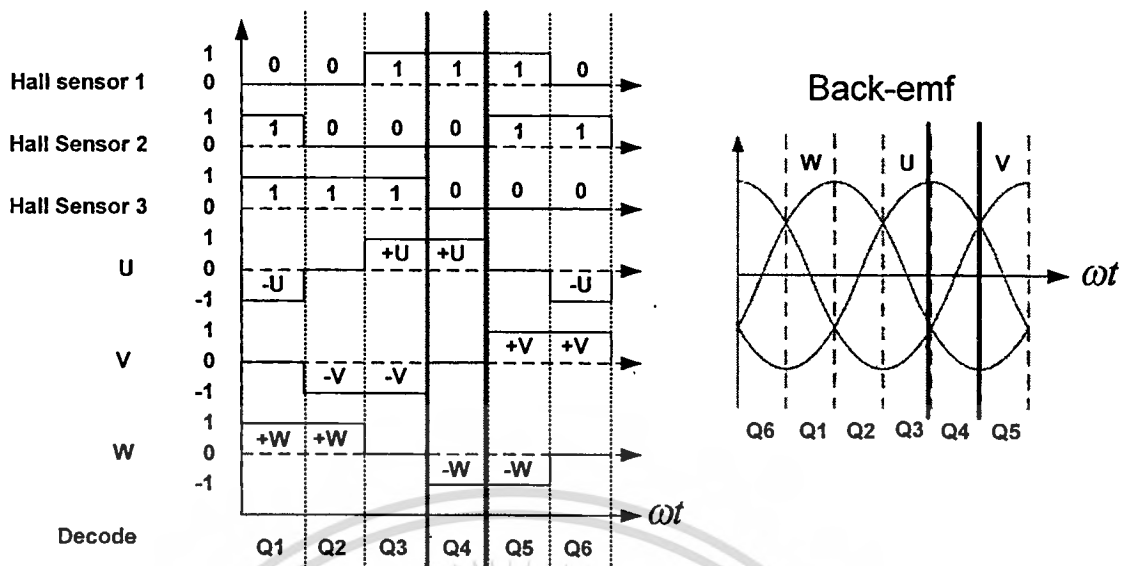
ดังรูปที่ 3.23 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q2 ไทรสเตอร์ที่เฟส W เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส V เป็นลบ



รูปที่ 3.24 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q3

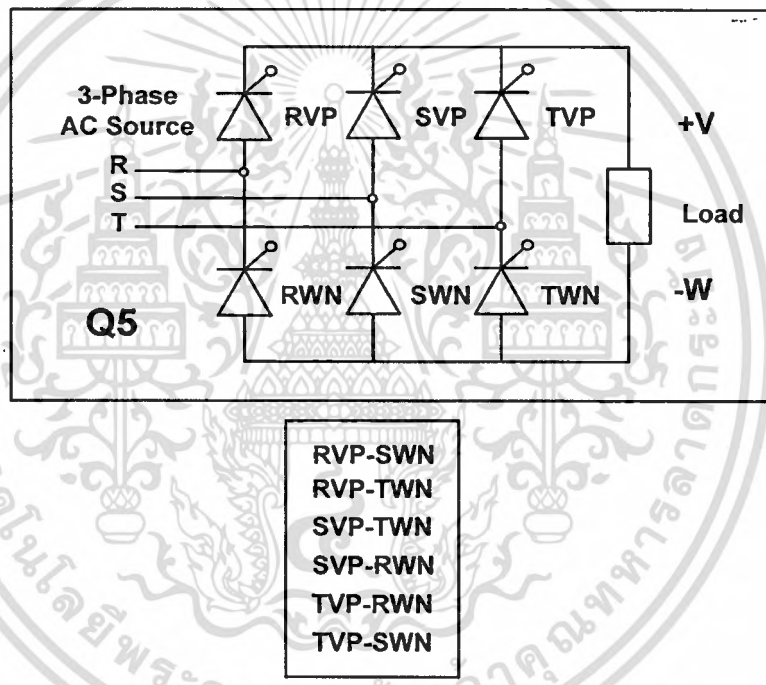
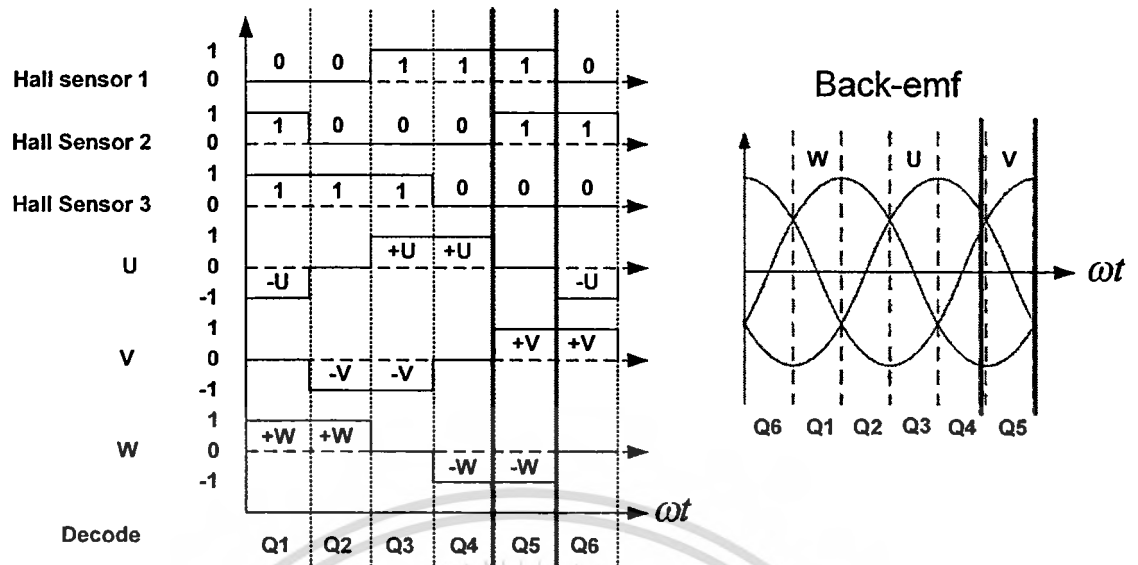
ดังรูปที่ 3.24 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q3 ไทรสเตอร์ที่เฟส U เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส V เป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



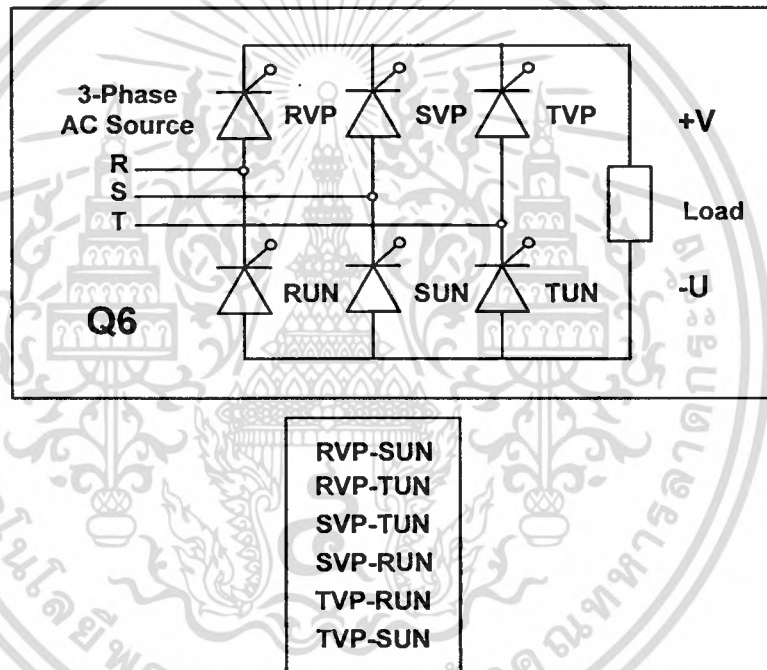
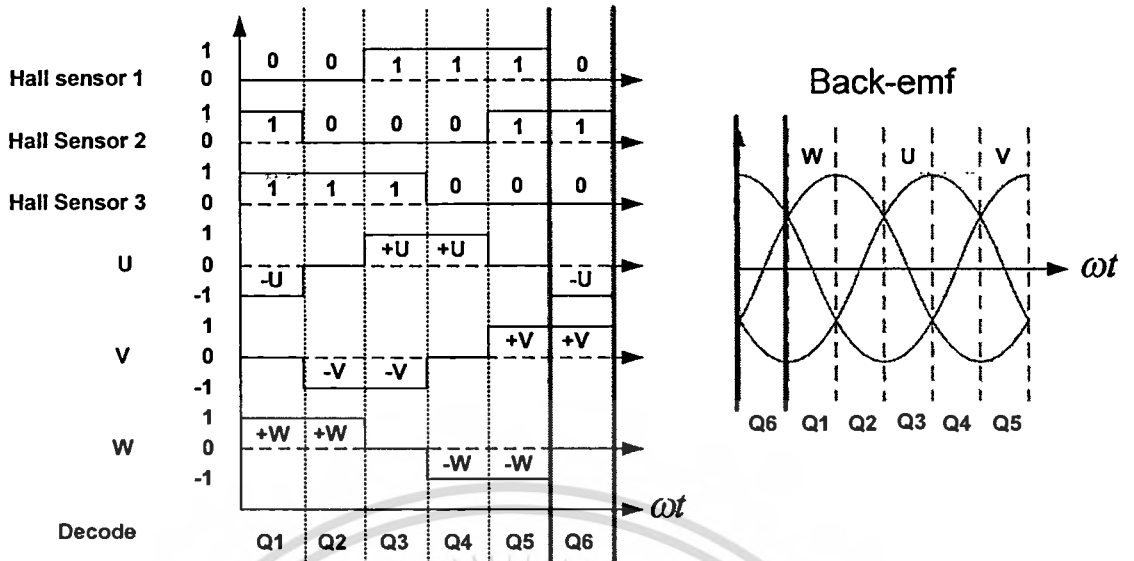
รูปที่ 3.25 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q4

ดังรูปที่ 3.25 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q4 ไทรสเตอร์ที่เฟส U เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส W เป็นลบ



รูปที่ 3.26 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q5

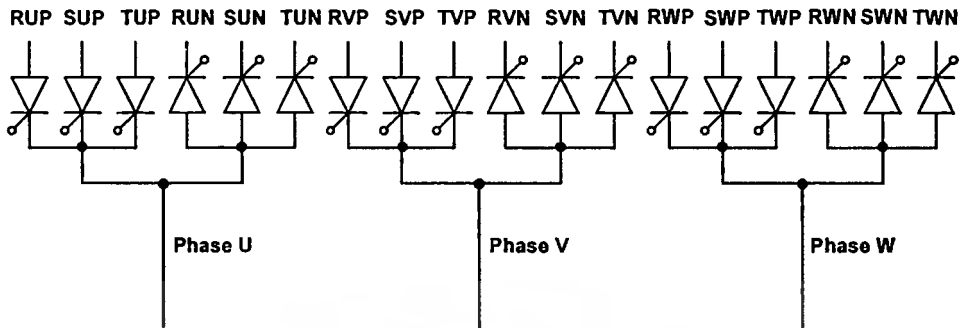
ดังรูปที่ 3.26 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q5 ไทรสเตอร์ที่เฟส V เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส W เป็นลบ



รูปที่ 3.27 กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q6

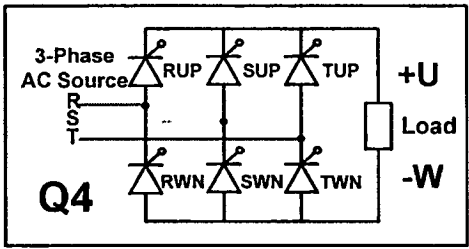
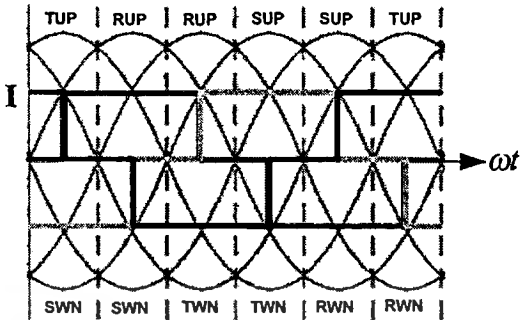
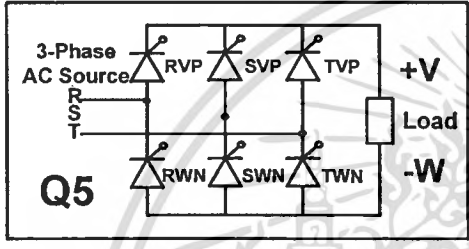
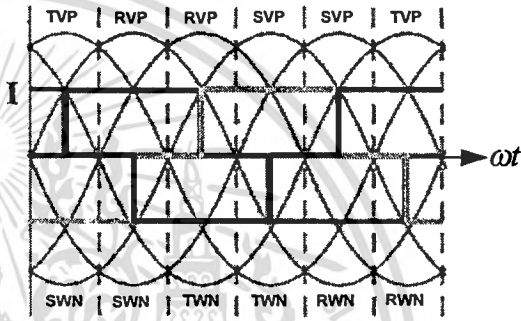
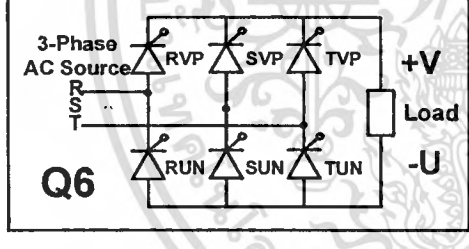
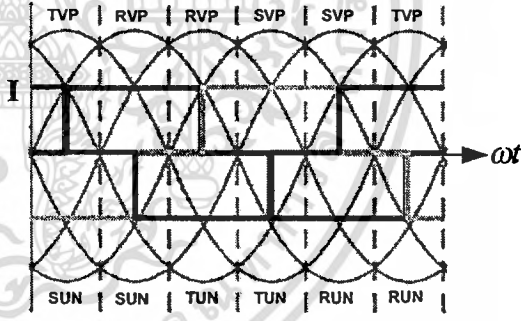
ดังรูปที่ 3.27 แสดงกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ Q6 ไทรสเตอร์ที่เฟส V เป็นบวก และ ไทรสเตอร์ที่เฟส U เป็นลบ

ลักษณะกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานของไทรสเตอร์ในแต่ละกลุ่ม แสดงดังรูปที่ 3.28



กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์(Thyristor)	ลักษณะกระแสไฟฟ้าในการทำงาน
<p><b>Q1</b></p>	
<p><b>Q2</b></p>	
<p><b>Q3</b></p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

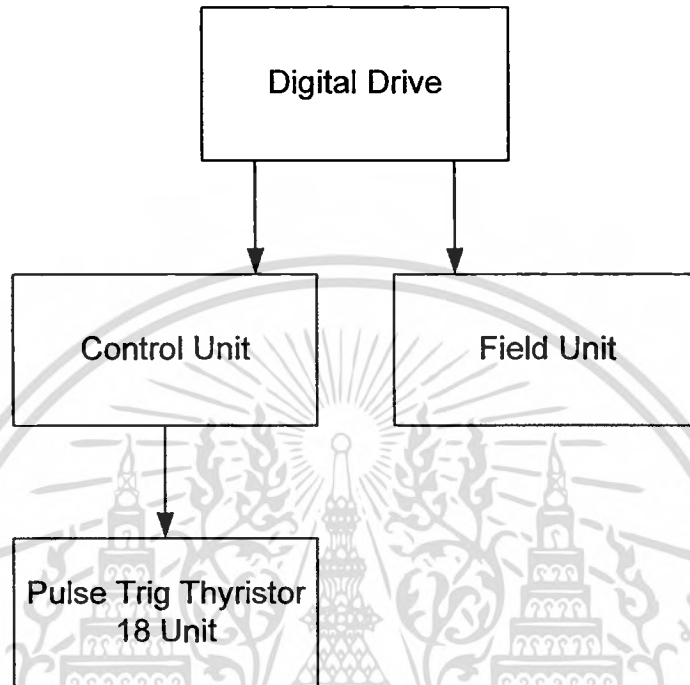
กลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์(Thyristor)	ลักษณะกระแสไฟฟ้าในการทำงาน
 <p>3-Phase AC Source RUP SUP TUP RWN SWN TWN +U Load -W Q4</p>	 <p>TUP RUP RUP SUP SUP TUP I <math>\omega t</math> SWN SWN TWN TWN RWN RWN</p>
 <p>3-Phase AC Source RVP SVP TVP RWN SWN TWN +V Load -W Q5</p>	 <p>TVP RVP RVP SVP SVP TVP I <math>\omega t</math> SWN SWN TWN TWN RWN RWN</p>
 <p>3-Phase AC Source RVP SVP TVP RUN SUN TUN +V Load -U Q6</p>	 <p>TVP RVP RVP SVP SVP TVP I <math>\omega t</math> SUN SUN TUN TUN RUN RUN</p>

รูปที่ 3.28 ลักษณะกระแสไฟฟ้าในการทำงานของไทรสเตอร์ในแต่ละกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลที่ใช้กับมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะเป็นคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป โครงสร้างแสดงดังรูป 3.29

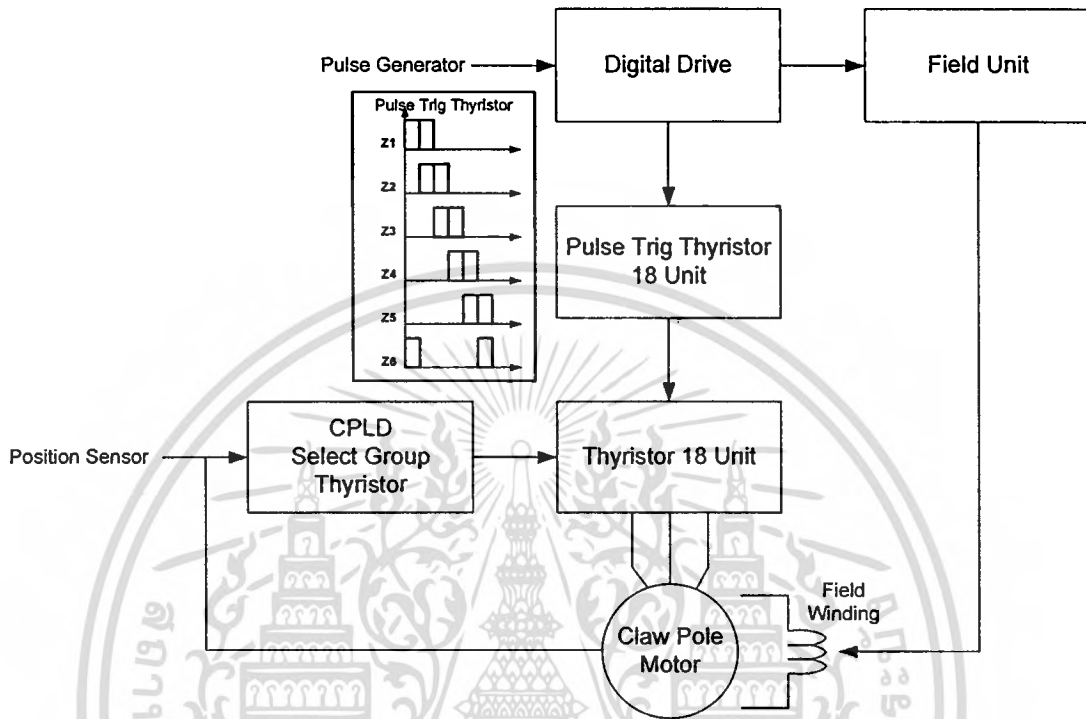


รูปที่ 3.29 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

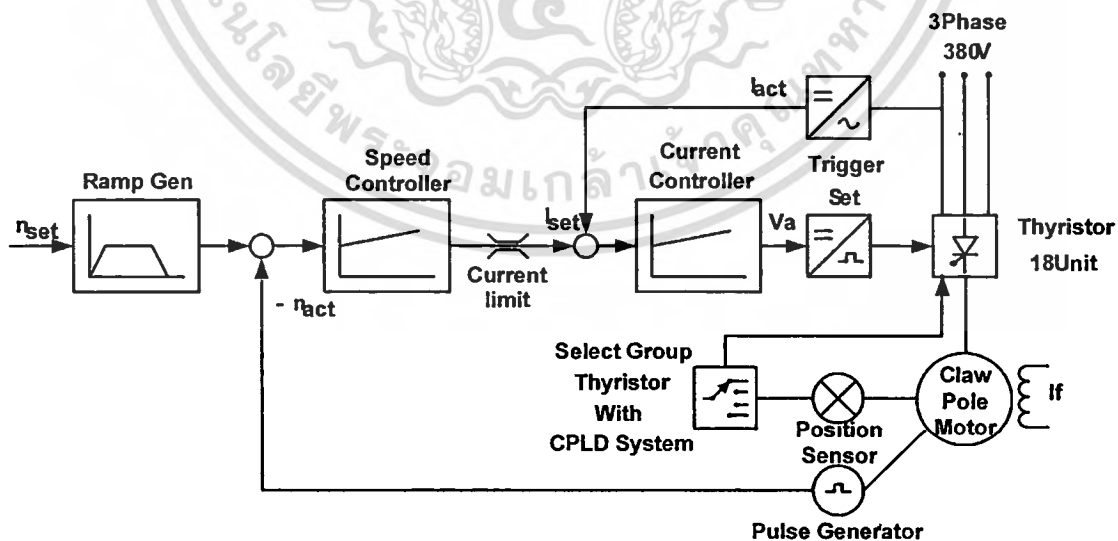
จากรูปที่ 3.29 จะประกอบไปด้วย

- Control Unit จะเป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ เพื่อควบคุมให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการ โดยการควบคุมมุมจุดชนวนเพื่อส่งไปยัง Pulse Trig Thyristor ทั้ง 18 ตัว
- Field Unit จะใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดฟิลด์ เพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์

เมื่อนำระบบการเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ที่เขียนด้วย CPLD เข้ามาทำงานรวมเข้าด้วยกัน จะได้ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 3.30 และ การควบคุมการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.30 ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล



รูปที่ 3.31 การควบคุมการทำงานของ Close Loop Speed Control ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.31 จะใช้หลักการเดียวกับระบบขับเคลื่อนเดิมทุกประการ ต่างกันตรงที่การใช้ CPLD เลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อทำการตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ (Position Sensor) เพื่อนำไปเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ (Select Group Thyristor With CPLD) จะให้เฟสไหนทำงาน ทำการวัดความเร็วจริงของมอเตอร์ (Pulse Generator) เพื่อนำไปเข้าตัวควบคุมความเร็ว (Speed Controller) แล้วนำไปบวกกลับกับความเร็วที่ต้องการ ออกจากตัวควบคุมความเร็ว (Speed Controller) จะได้กระแสไฟฟ้าออกมา นำไปเข้าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controller) แล้วนำไปบวกกลับกับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะมอเตอร์ทำงาน ออกจากตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controller) จะได้แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงมุมจุดชนวน เพื่อไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์

### 3.2.4 การทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ

เมื่อ 
$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (4)$$

และ 
$$T = \frac{1}{f} \quad (5)$$

เมื่อ 
$$\begin{aligned} N_s &= \text{ความเร็วซิงโครนัส (รอบ/นาที)} \\ f &= \text{ความถี่ (เฮิรตซ์)} \\ P &= \text{ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์} \\ T &= \text{เวลา} \end{aligned}$$

ความถี่ของการทำงานในรอบต่างๆ สามารถหาได้ดังนี้

โดยที่ความเร็ว 50 รอบ/นาที จากสมการที่ (4), (5)

$$f = \frac{50 \times 8}{120} = 3.33 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3.33} = 300 \text{ ms} \quad (7)$$

โดยที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที จากสมการที่ (4), (5)

$$f = \frac{200 \times 8}{120} = 13.33 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{13.33} = 75 \text{ ms} \quad (9)$$

โดยที่ความเร็ว 700 รอบ/นาที จากสมการที่ (4), (5)

$$f = \frac{700 \times 8}{120} = 46.67 \text{ Hz} \tag{10}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{46.67} = 21.43 \text{ ms} \tag{11}$$

โดยที่ความเร็ว 1200 รอบ/นาที จากสมการที่ (4), (5)

$$f = \frac{1200 \times 8}{120} = 80 \text{ Hz} \tag{12}$$

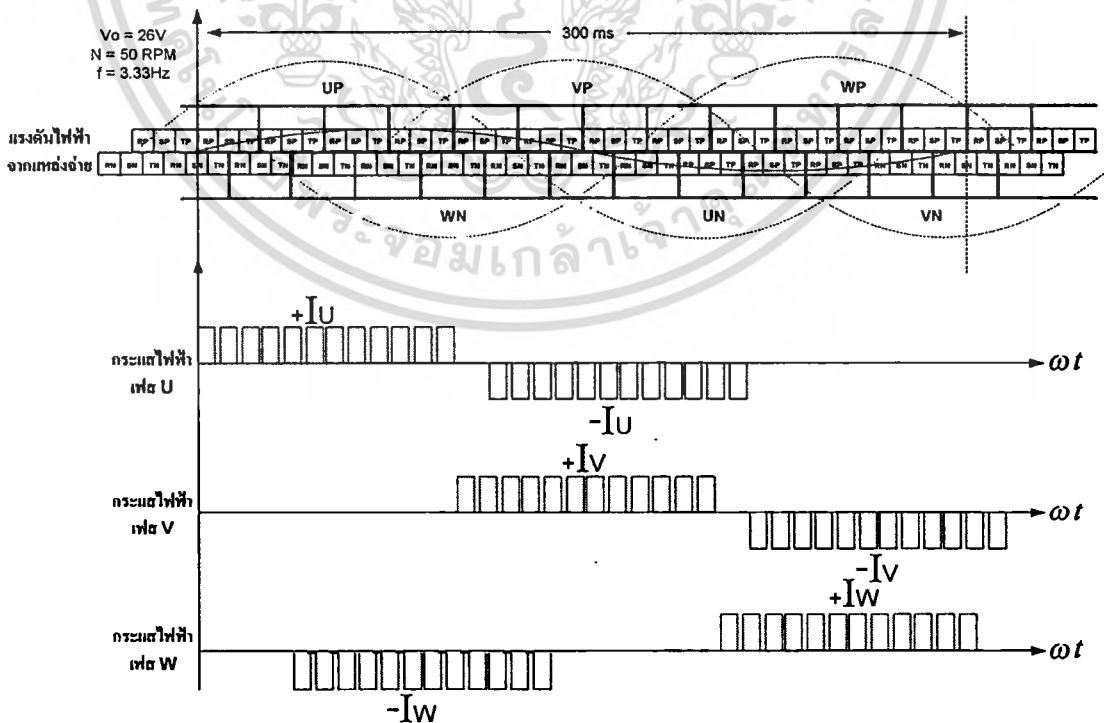
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{80} = 12.5 \text{ ms} \tag{13}$$

ที่ความเร็ว 50 รอบ/นาที จากสมการที่ (3)  $V_o = 2.34 \cdot V_{rms} \cdot \cos \alpha$

เมื่อ  $V_o = 26, V_{rms} = 460$   $26 = 2.34 \cdot 460 \cdot \cos \alpha$  (14)

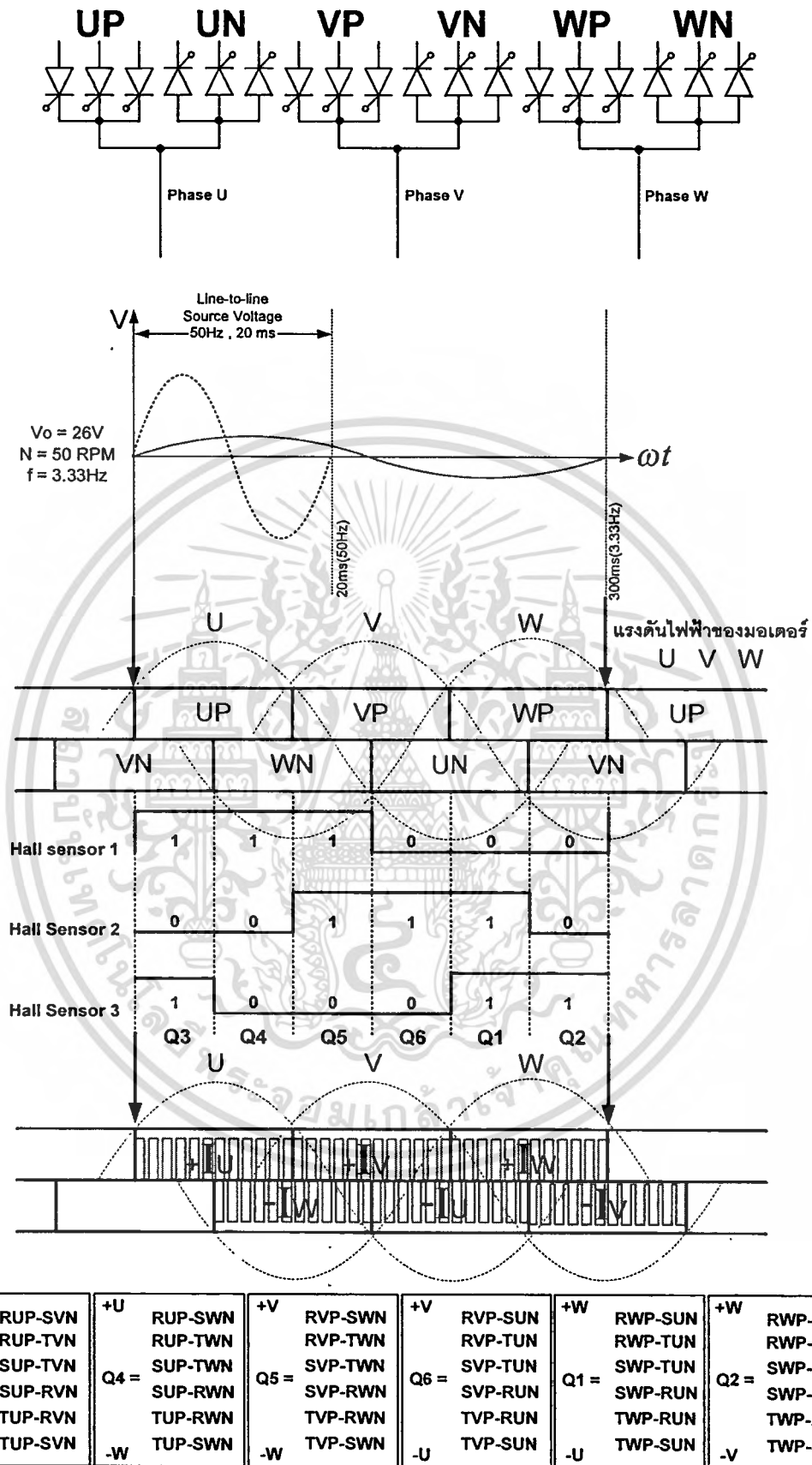
$$\cos \alpha = 0.0241$$

มุมจุดชนวนที่ใช้ในการทำงาน  $\alpha = \cos^{-1} 0.0241 = 88.62^\circ$  (15)



รูปที่ 3.32 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 50 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 50 รอบ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที จากสมการที่ (3)

$$V_o = 2.34 \cdot V_{rms} \cdot \cos \alpha$$

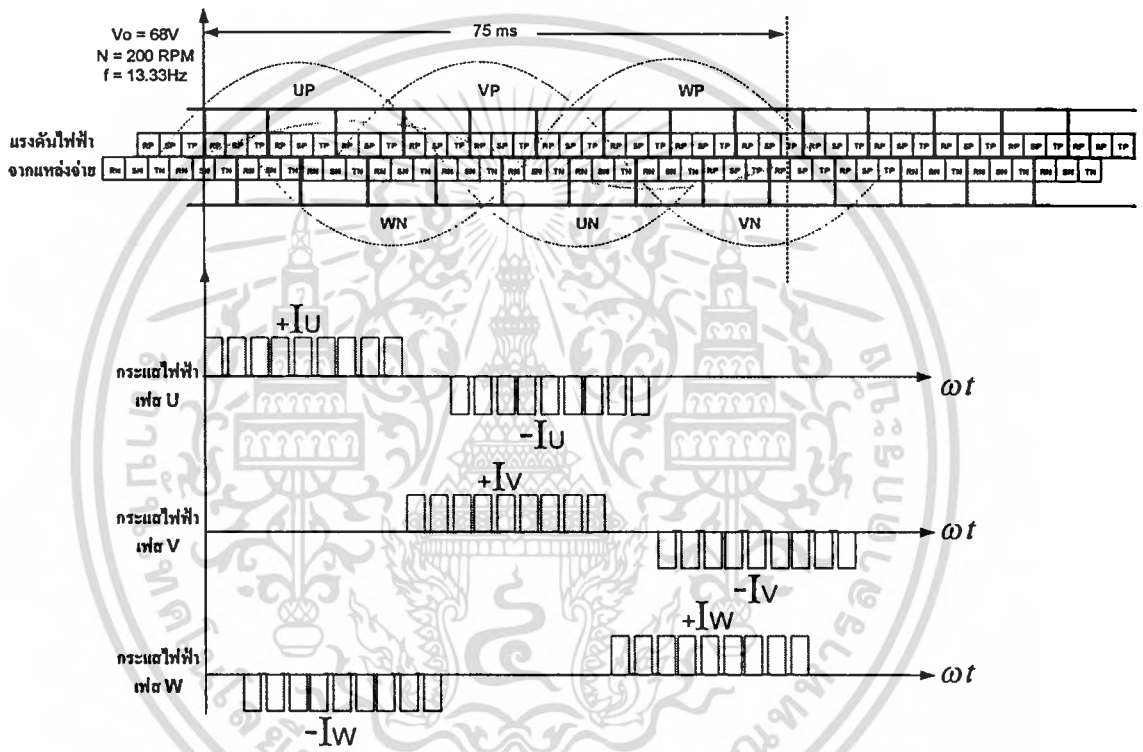
เมื่อ  $V_o = 68, V_{rms} = 460$

$$68 = 2.34 \cdot 460 \cdot \cos \alpha \tag{16}$$

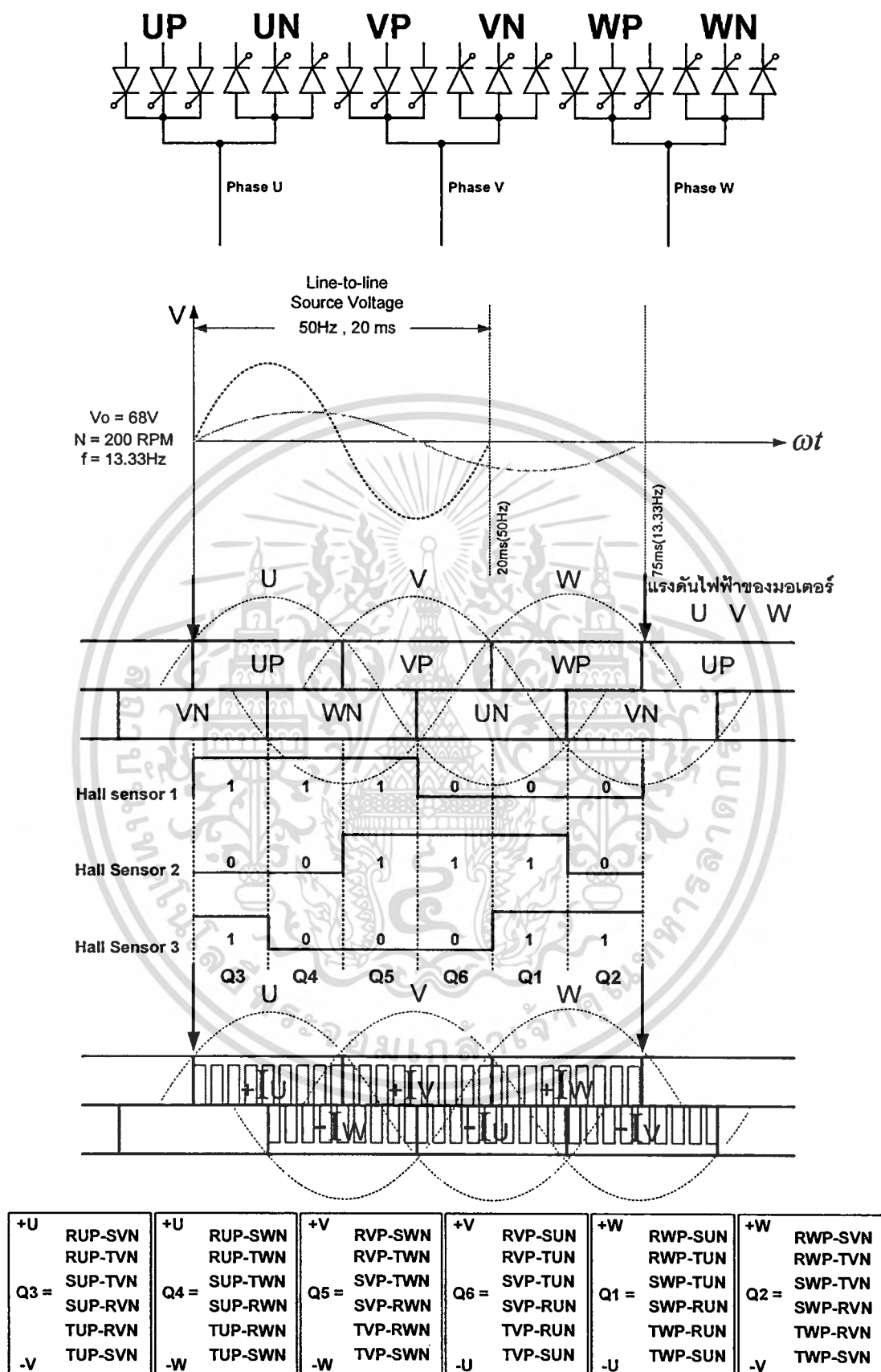
$$\cos \alpha = 0.0632$$

มุมจุดชนวนที่ใช้ในการทำงาน

$$\alpha = \cos^{-1} 0.0632 = 86.38^\circ \tag{17}$$



รูปที่ 3.34 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 200 รอบ



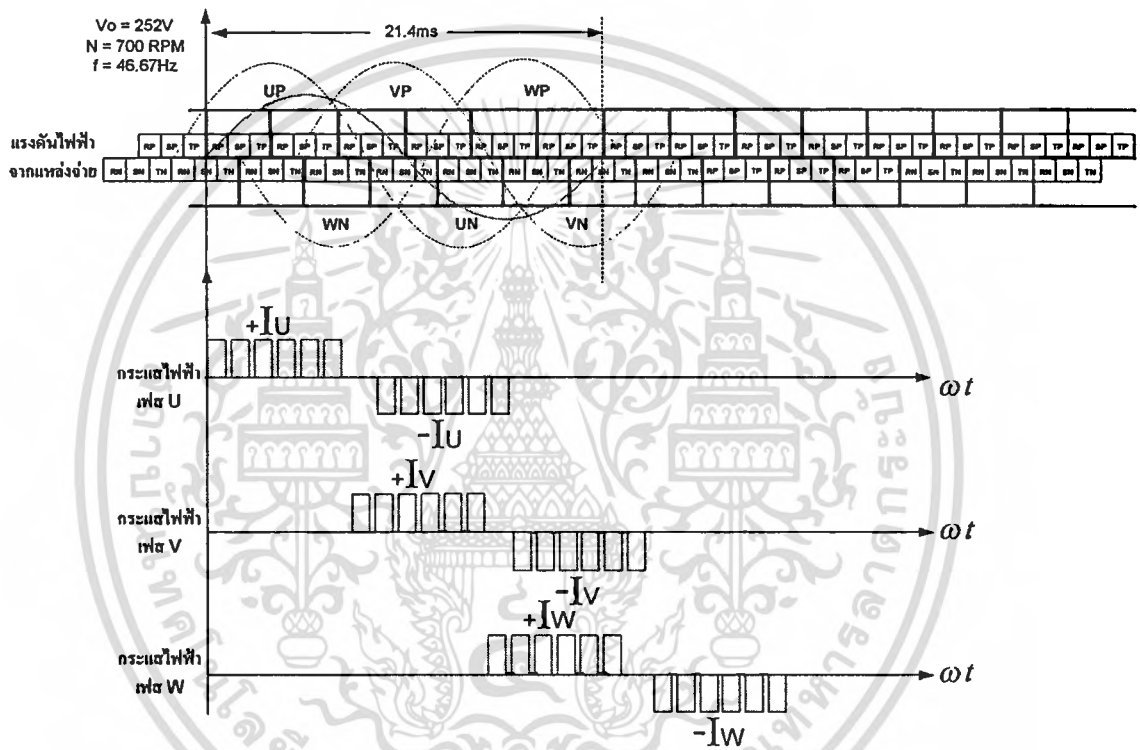
รูปที่ 3.35 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 200 รอบ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็ว 700 รอบ/นาที จากสมการที่ (3)  $V_o = 2.34 \cdot V_{rms} \cdot \cos \alpha$

เมื่อ  $V_o = 252, V_{rms} = 460$   $252 = 2.34 \cdot 460 \cdot \cos \alpha$  (18)

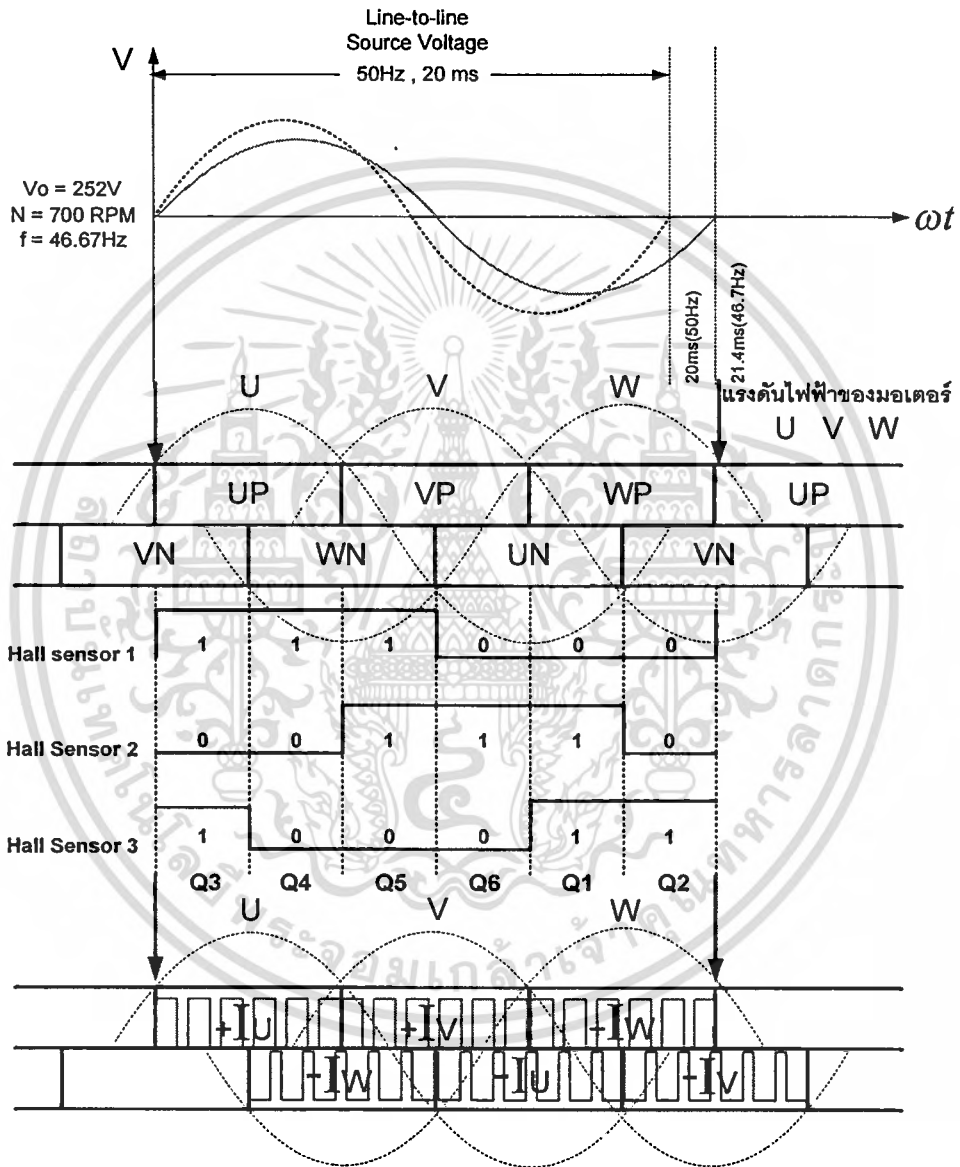
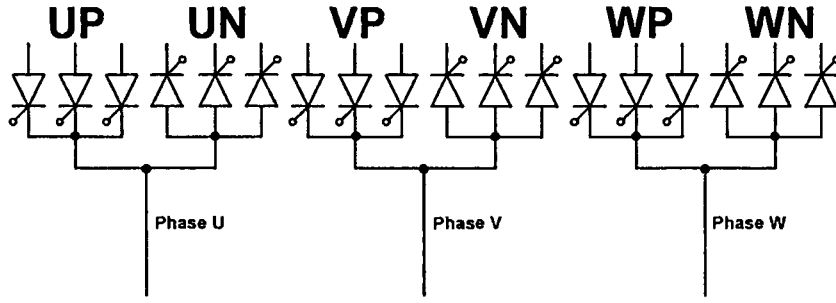
$$\cos \alpha = 0.2341$$

มุมจลชนวนที่ใช้ในการทำงาน  $\alpha = \cos^{-1} 0.2341 = 76.46^\circ$  (19)



รูปที่ 3.36 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 700 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



+U	RUP-SVN	+U	RUP-SWN	+V	RVP-SVN	+V	RVP-SUN	+W	RWP-SUN	+W	RWP-SVN
	RUP-TVN		RUP-TWN		RVP-TVN		RVP-TUN		RWP-TUN		RWP-TVN
Q3 =	SUP-TVN	Q4 =	SUP-TWN	Q5 =	SVP-TVN	Q6 =	SVP-TUN	Q1 =	SWP-TUN	Q2 =	SWP-TVN
	SUP-RVN		SUP-RWN		SVP-RVN		SVP-RUN		SWP-RUN		SWP-RVN
	TUP-RVN		TUP-RWN		TVP-RVN		TVP-RUN		TWP-RUN		TWP-RVN
-V	TUP-SVN	-W	TUP-SWN	-W	TVP-SWN	-U	TVP-SUN	-U	TWP-SUN	-V	TWP-SVN

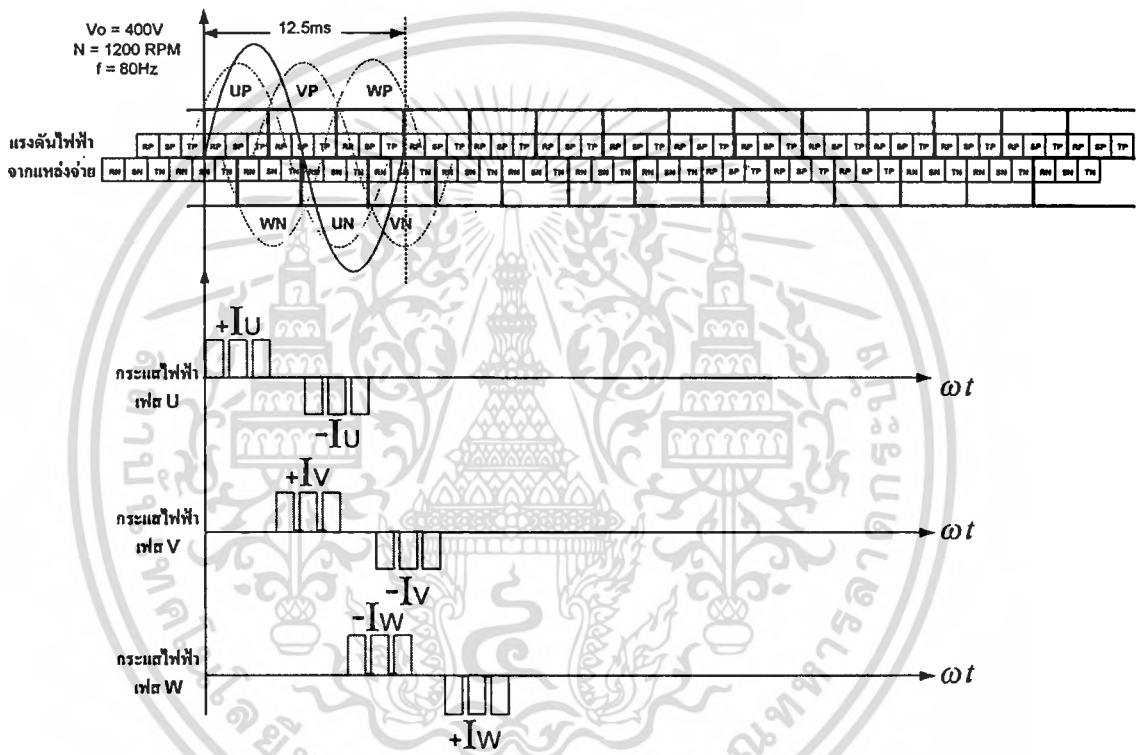
รูปที่ 3.37 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ทรินสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 700 รอบ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็ว 1200 รอบ/นาที จากสมการที่ (3)  $V_o = 2.34 \cdot V_{rms} \cdot \cos \alpha$

เมื่อ  $V_o = 400, V_{rms} = 460$   $400 = 2.34 \cdot 460 \cdot \cos \alpha$  (20)

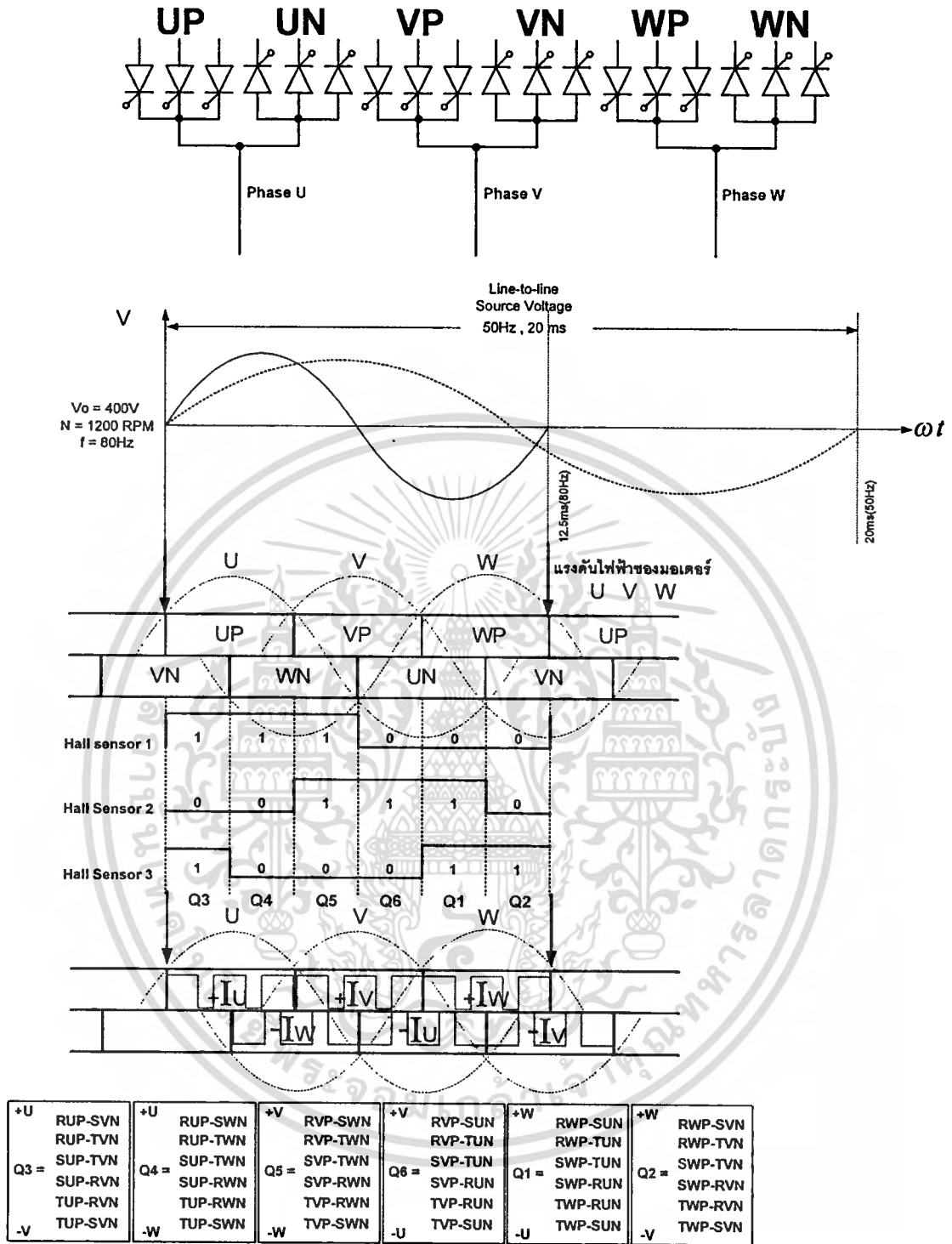
$\cos \alpha = 0.3716$

มุมจูดชนวนที่ใช้ในการทำงาน  $\alpha = \cos^{-1} 0.3716 = 68.16^\circ$  (21)



รูปที่ 3.38 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็ว 1200 รอบ

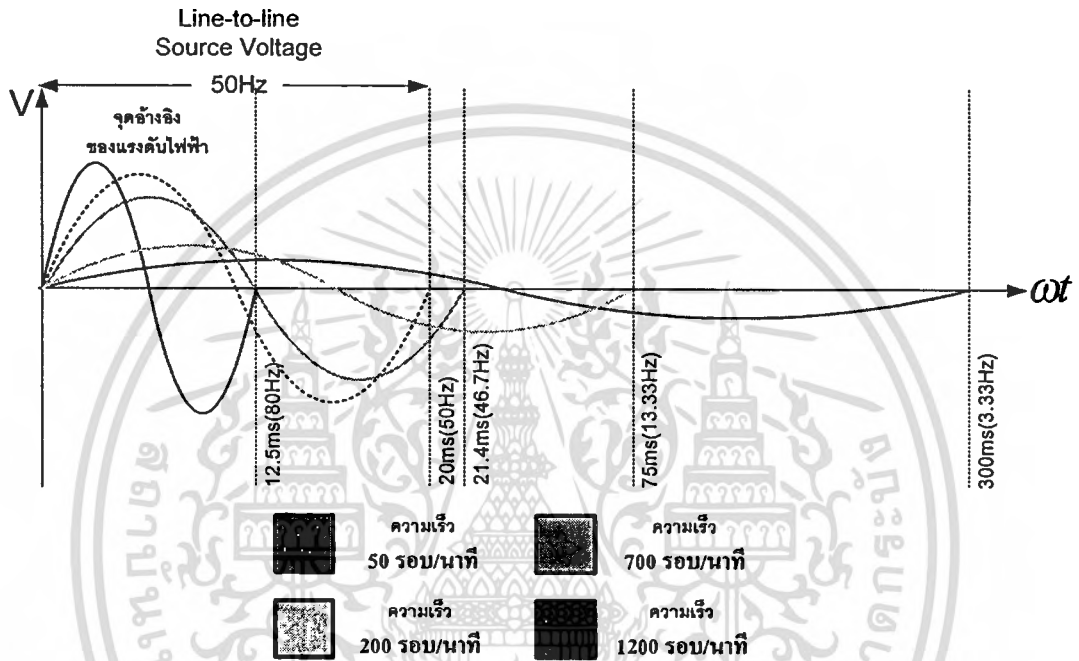
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 1200 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.32-3.39 เป็นลักษณะตัวอย่างของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่รีสเตอร์ทำงานในช่วงความเร็ว 50 รอบ , 200 รอบ , 700 รอบ , 1200 รอบ สามารถสรุปได้ว่ายิ่งความเร็วมากขึ้นความถี่ที่ใช้และแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนความกว้างของแรงดันไฟฟ้ายังความเร็วน้อยลงความกว้างของแรงดันไฟฟ้ายังมากขึ้นเท่านั้น เพราะความถี่ที่ใช้งานมีค่าน้อย ส่วนลักษณะของกระแสไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ายิ่งความเร็วมากขึ้นความถี่ของกระแสไฟฟ้าก็จะน้อยลงเช่นกัน และเมื่อนำค่าความเร็วต่างๆ มาเขียนรวมกันแสดงดังรูปที่ 3.40

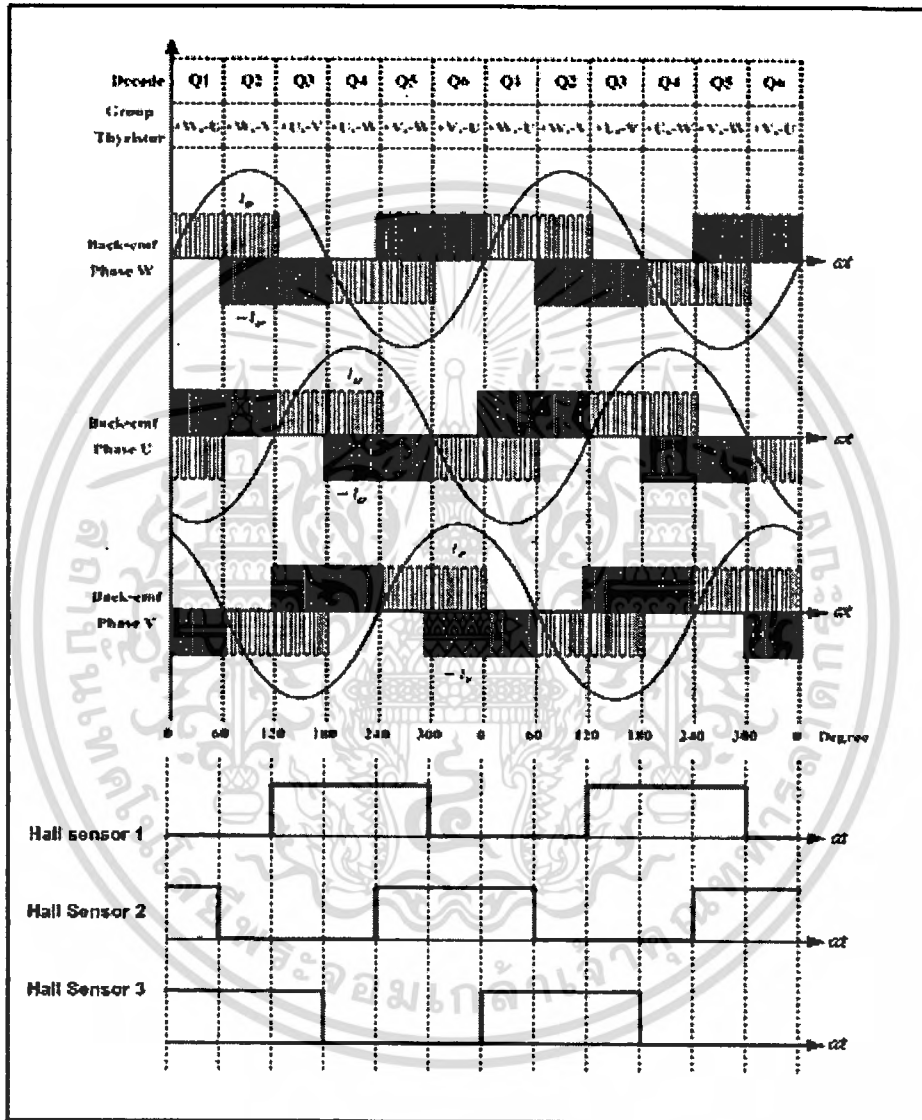


รูปที่ 3.40 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

จากรูปที่ 3.40 เป็นลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย จากรูปสามารถอธิบายได้ว่ายิ่งความเร็วมากขึ้นความถี่ที่ใช้และแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ความถี่น้อยลงความถี่ที่ใช้และแรงดันไฟฟ้าจะน้อยลงเช่นกัน

### 3.2.5 ไทริสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าและขณะลดความเร็ว

ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานไทริสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าและขณะลดความเร็วจะได้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์มีลักษณะดังรูปที่ 3.41 โดยมอเตอร์หมุนเป็น 180 องศาทางกล (ครึ่งรอบมอเตอร์)



รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานไทริสเตอร์ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าและขณะลดความเร็ว

ดังรูปที่ 3.41 การทำงานขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าไทรสเตอร์จะทำงานในช่วง 0-120 องศาทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสหน้าแรงดันไฟฟ้าอยู่หนึ่งลูก เนื่องจากถ้ามีทำงานที่ยอดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่รอบสูงๆนั้นแรงดันไฟฟ้าจะเกิน 400 โวลต์ ไปมาก ซึ่งมีผลทำให้ฟิวส์ของระบบขาดได้ โดยในขณะที่เร่งความเร็วนั้นมอเตอร์จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าเป็นบวก

การทำงานในขณะที่เบรกไทรสเตอร์จะทำงานในช่วง 60-180 องศาทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่กระแสไฟฟ้าจะกลับด้านกันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเป็นลบ โดยมอเตอร์ก็จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่ได้กำหนดไว้เช่นกัน



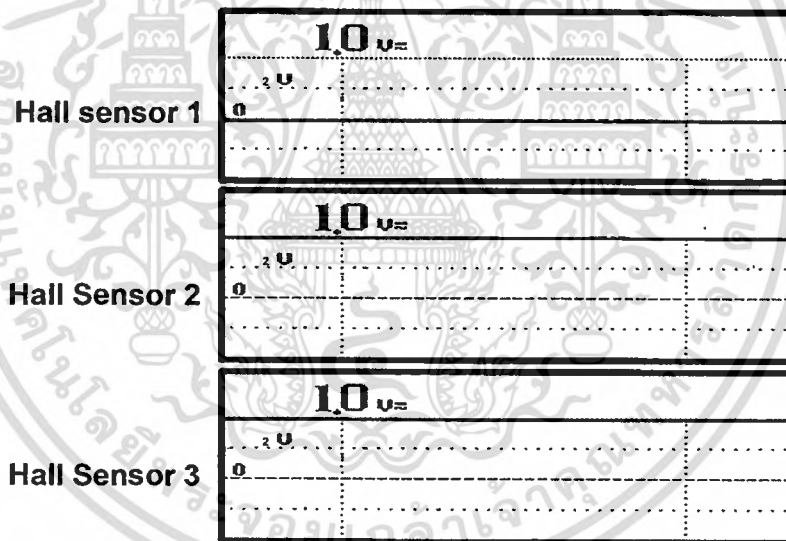
## บทที่ 4

### ค่ากราฟต่างๆ ผลการทดลอง

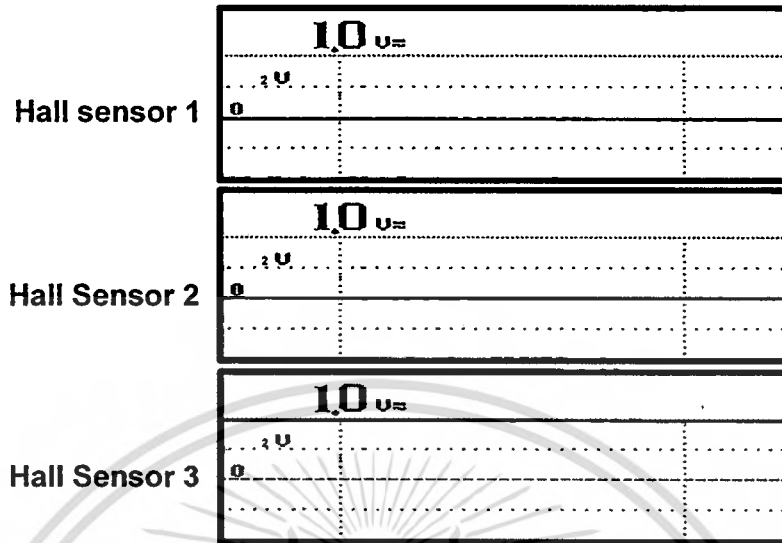
ในหัวข้อนี้จะได้ทราบถึงผลการทดลองต่างๆ แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ผลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ ขณะเร่งความเร็ว และขณะลดความเร็ว ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกและระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

#### 4.1 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสภาวะต่างๆ

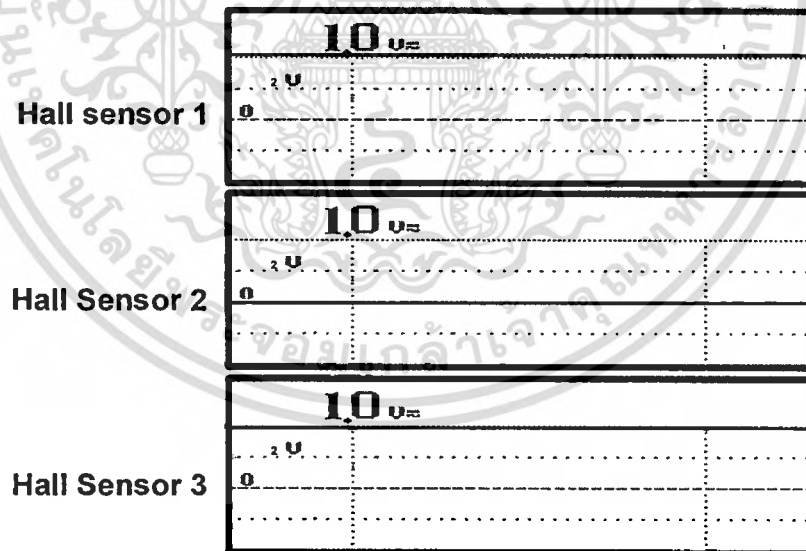
##### 4.1.1 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์



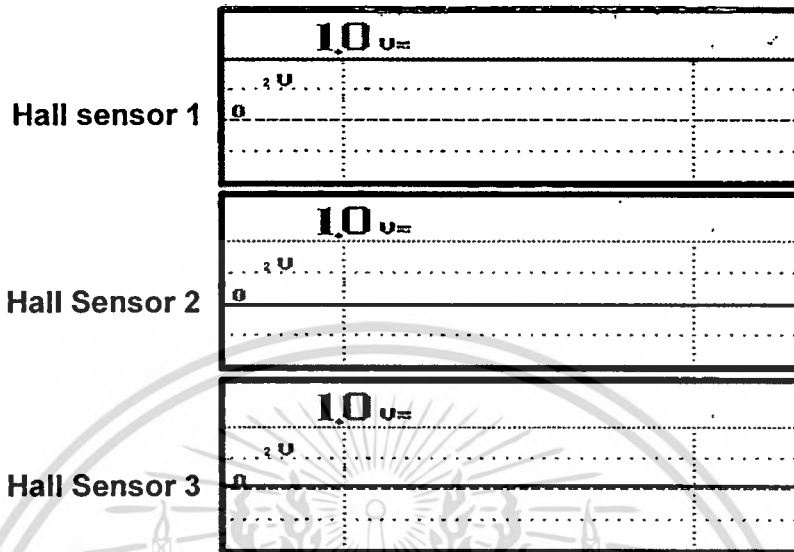
รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 1



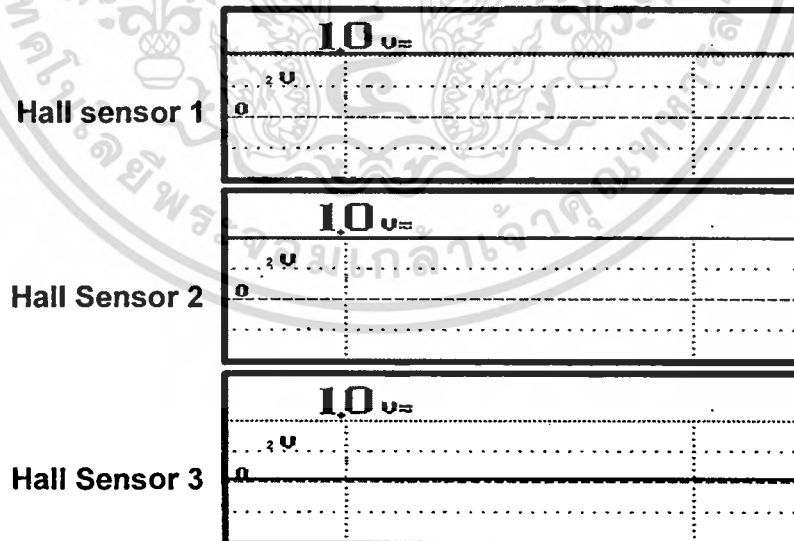
รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 2



รูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 3

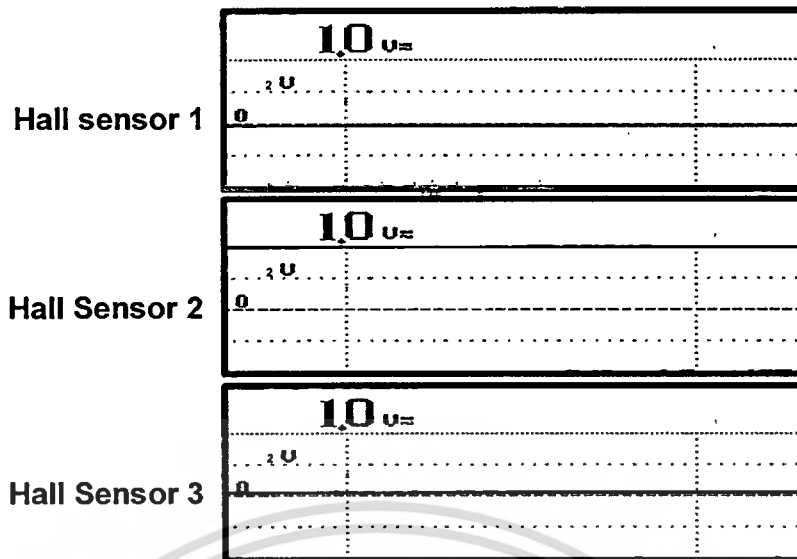


รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 4

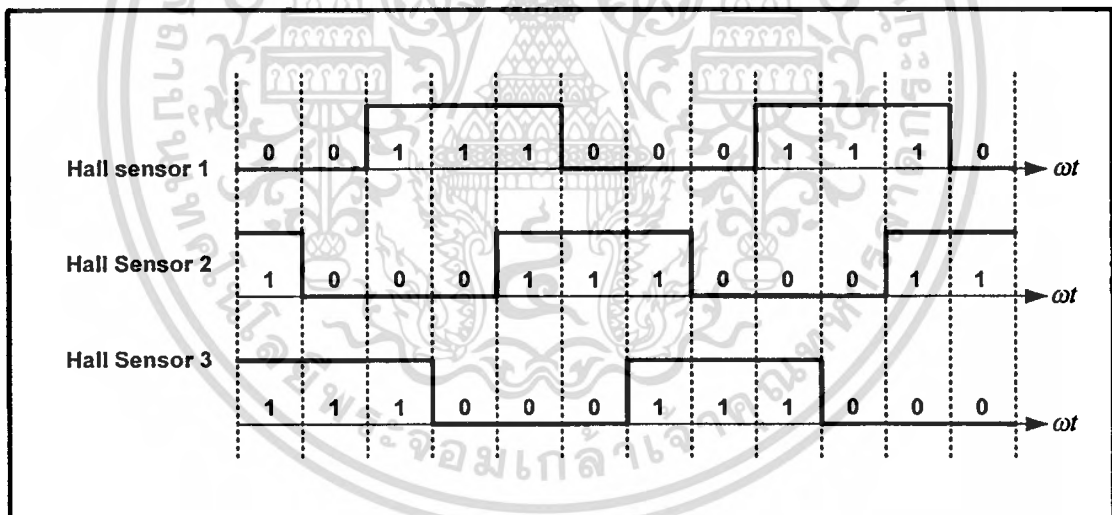


รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



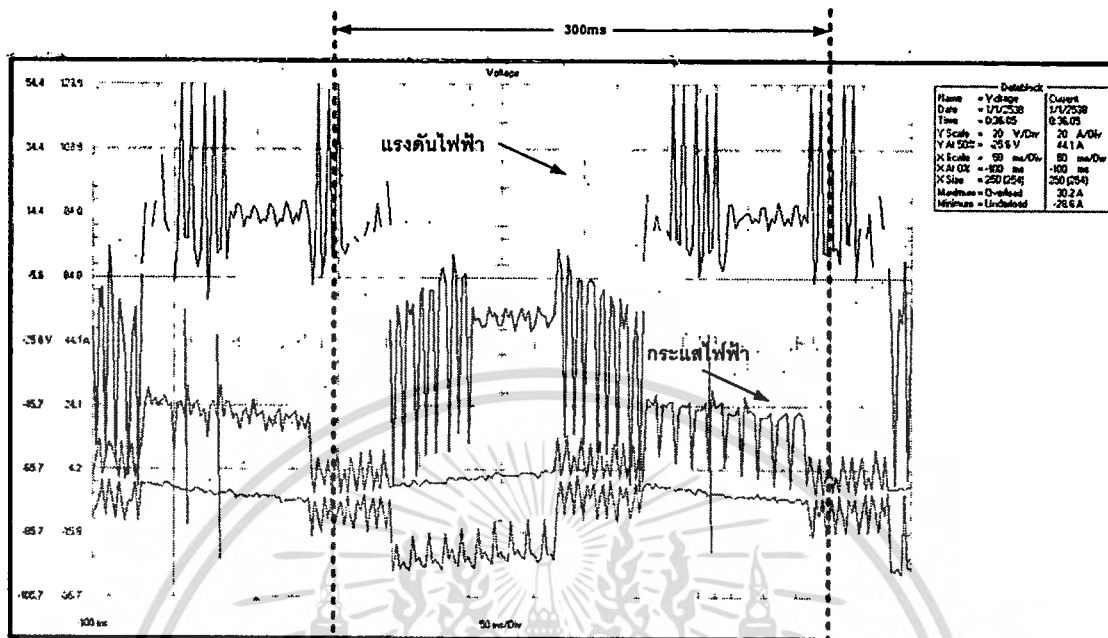
รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในช่วงที่ 6



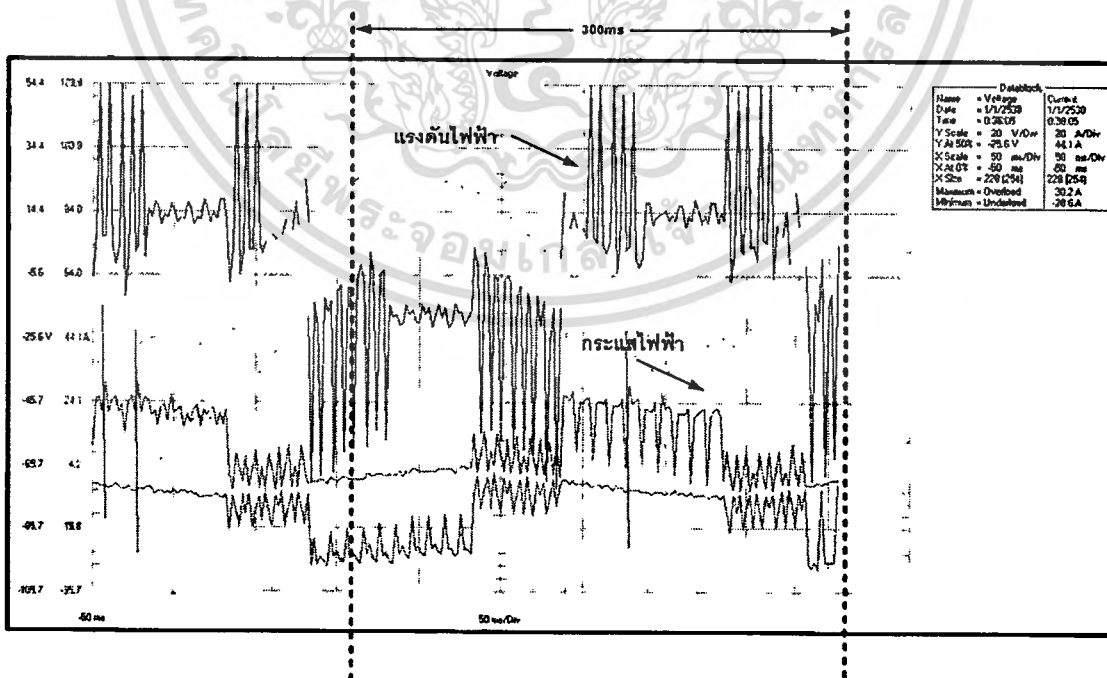
รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ทั้ง 6 ช่วงการทำงาน

ดังรูปที่ 4.1-4.7 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าประมาณ 1-2 Vdc โดยจะทำการวัดสัญญาณตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์อยู่ 3 ตัว เพื่อนำไปเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์

#### 4.1.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่ความเร็วต่างๆ ขณะมอเตอร์ทำงาน

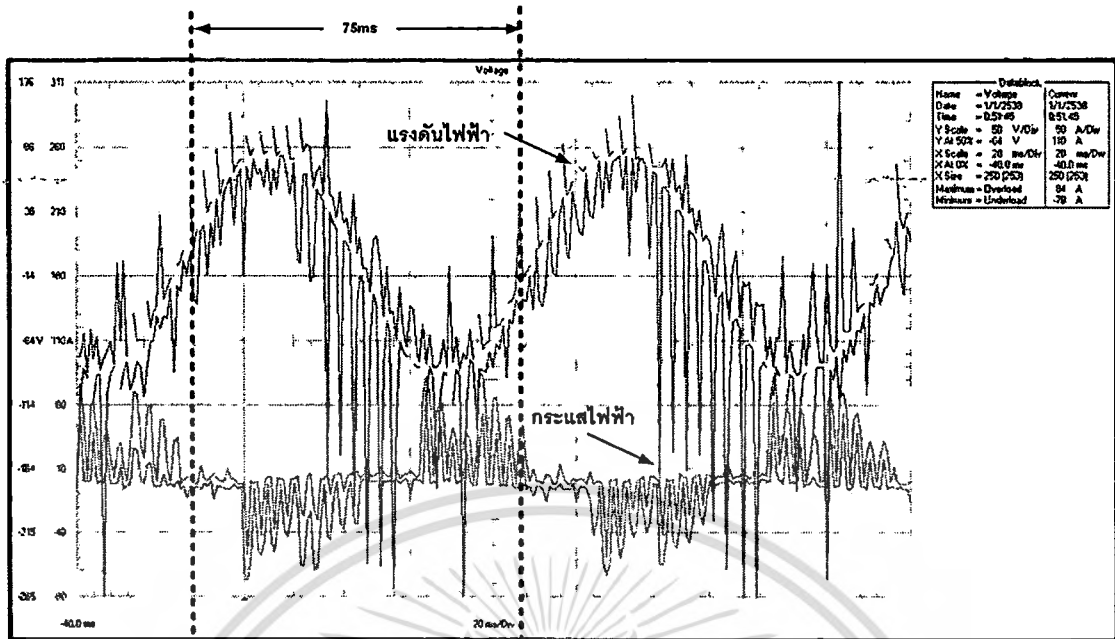


รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 50 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

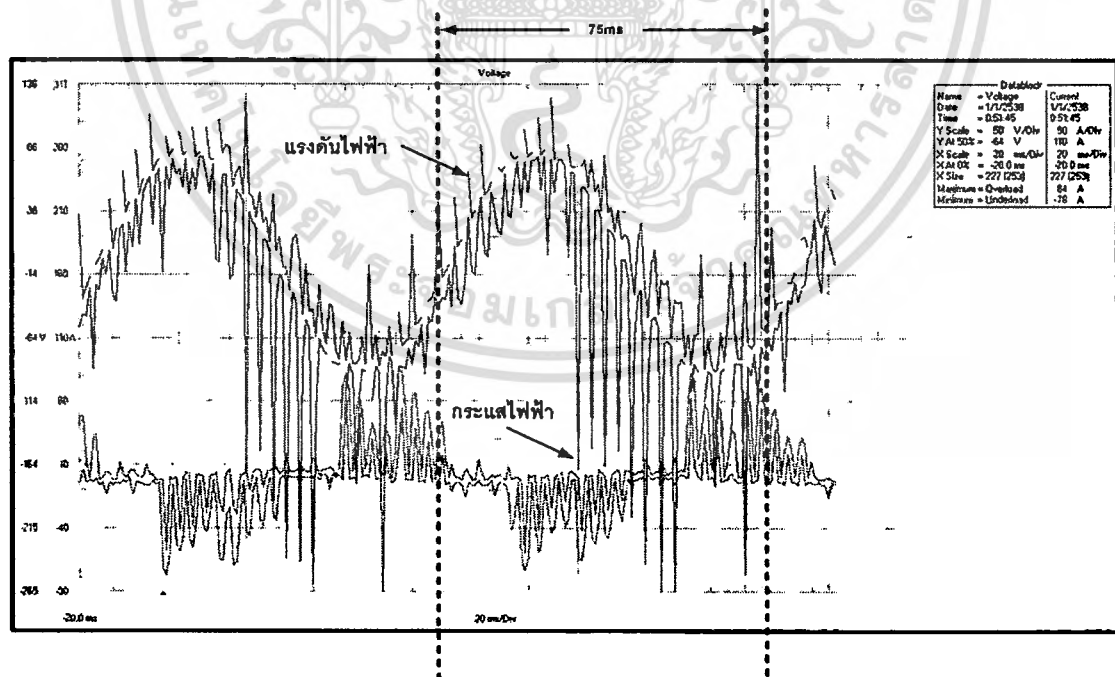


รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 50 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

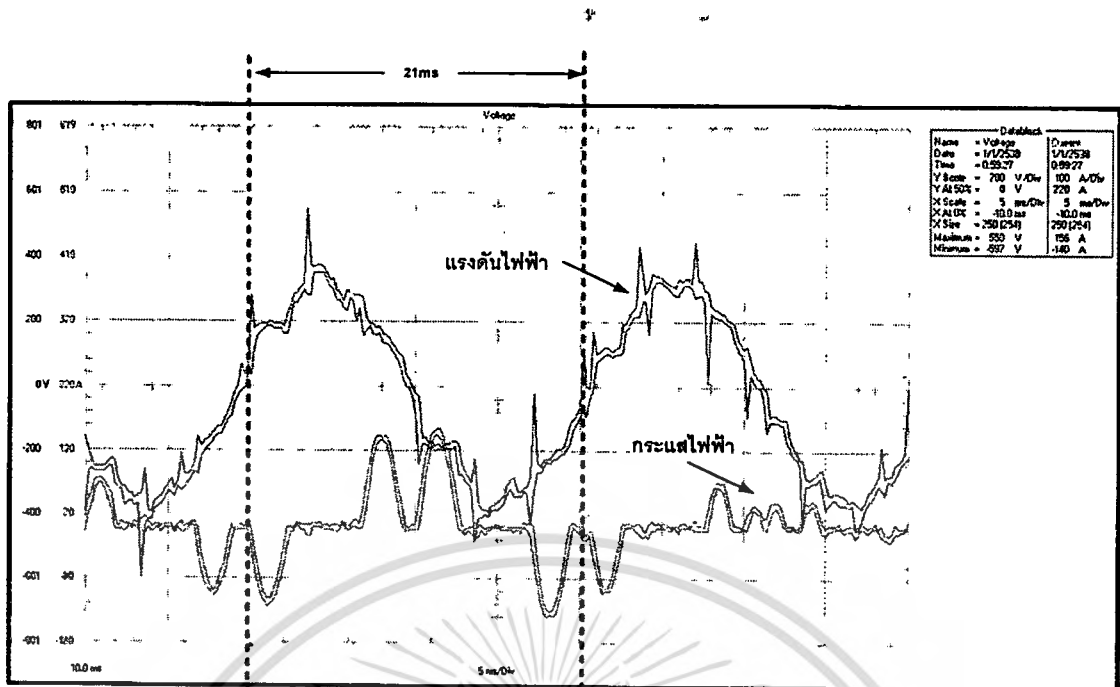


รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

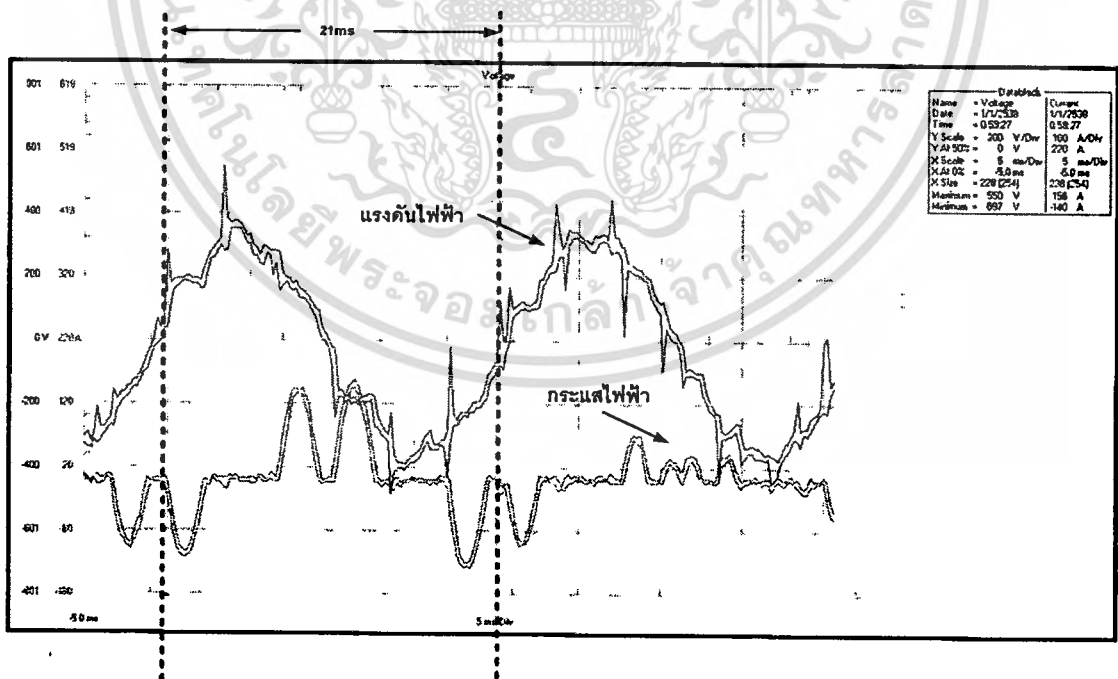


รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

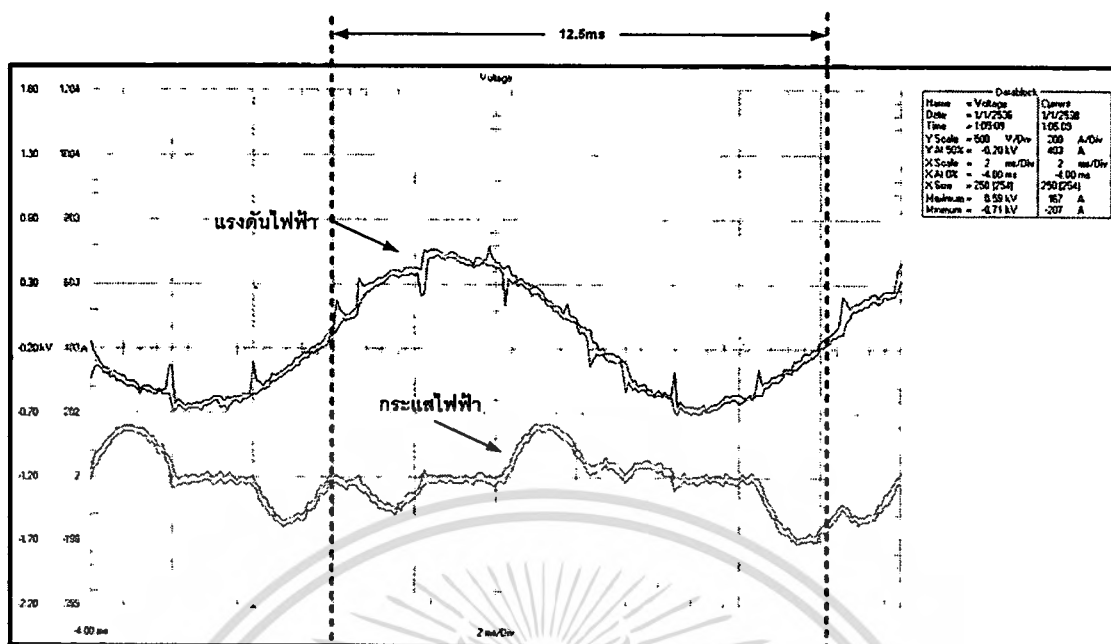


รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 700 รอบ/นาที ของระบบ  
ขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

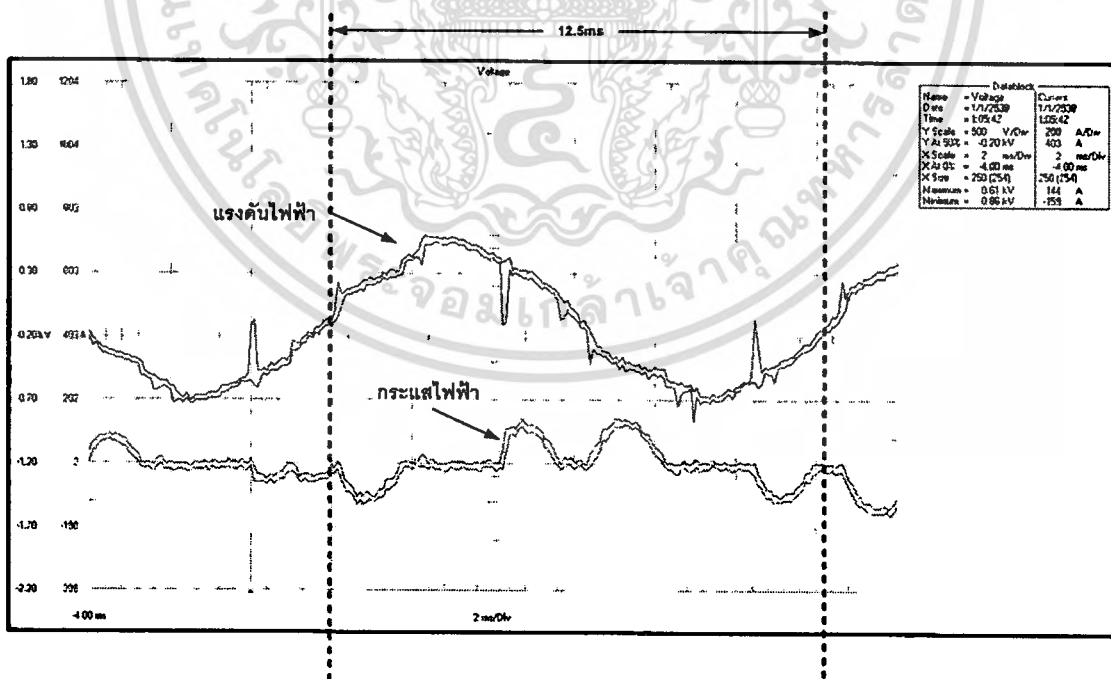


รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฟสต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 700 รอบ/นาที ของระบบ  
ขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

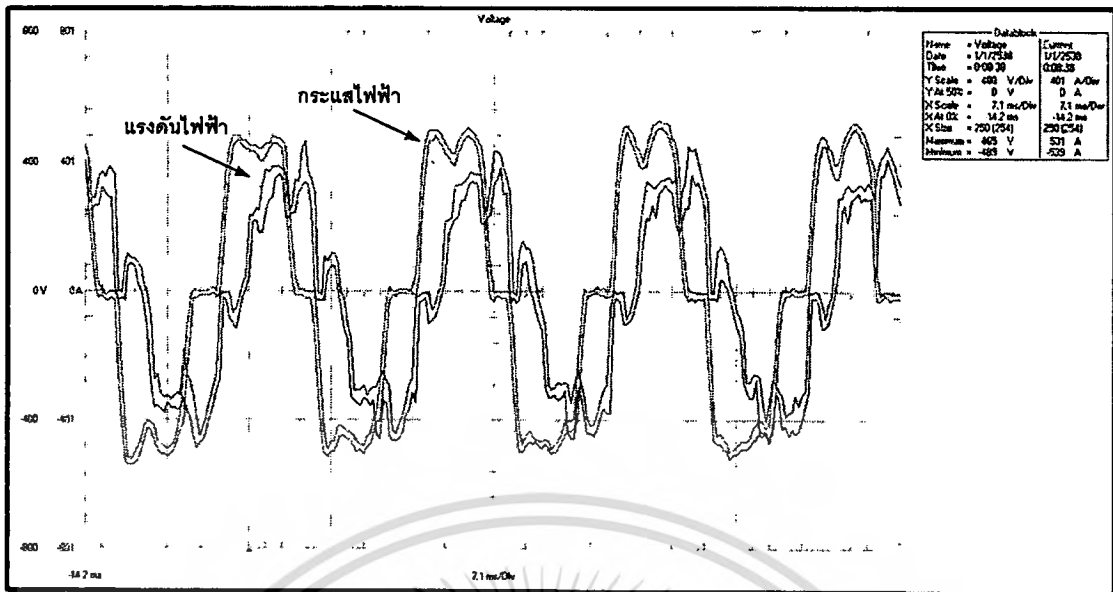


รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 1200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบบอลล็อก

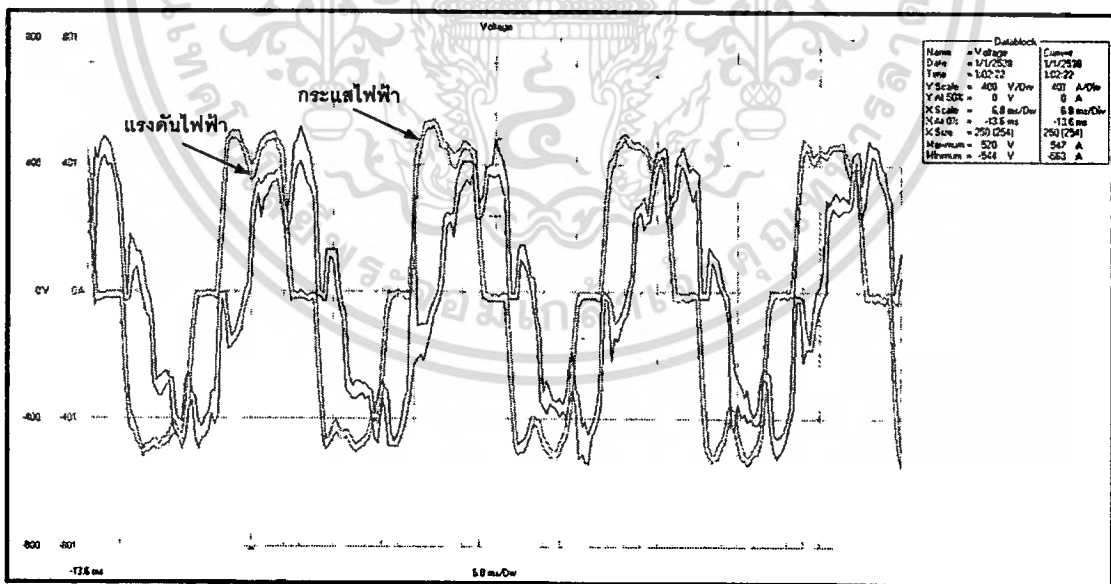


รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะความเร็วคงที่ 1200 รอบ/นาที ของระบบขับเคลื่อนระบบคิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

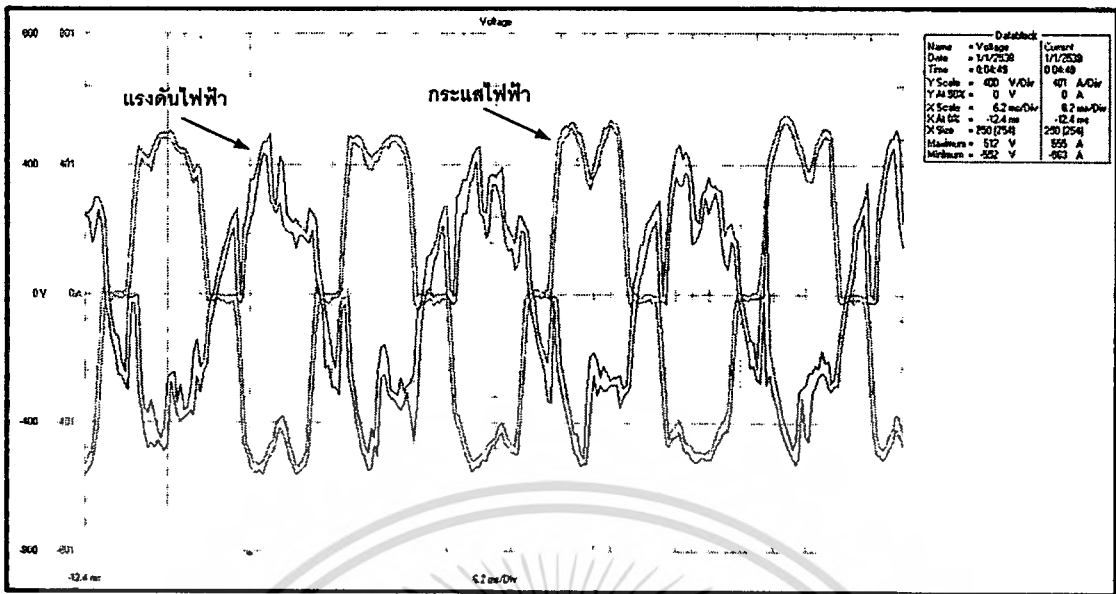


รูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะมอเตอร์เร่งความเร็ว ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

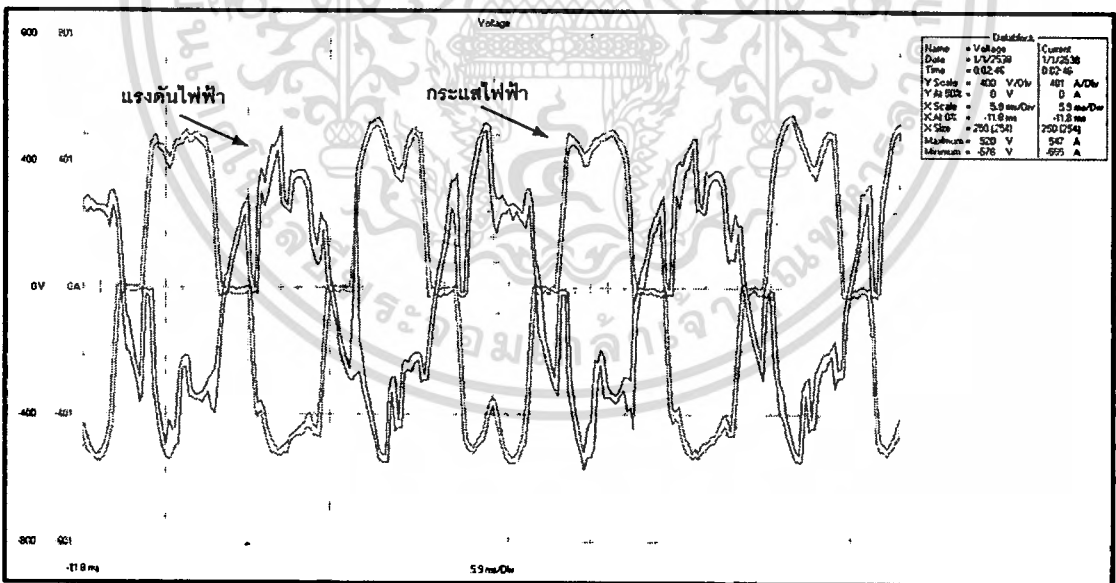


รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะมอเตอร์เร่งความเร็ว ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะมอเตอร์ลัดความเร็ว ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก

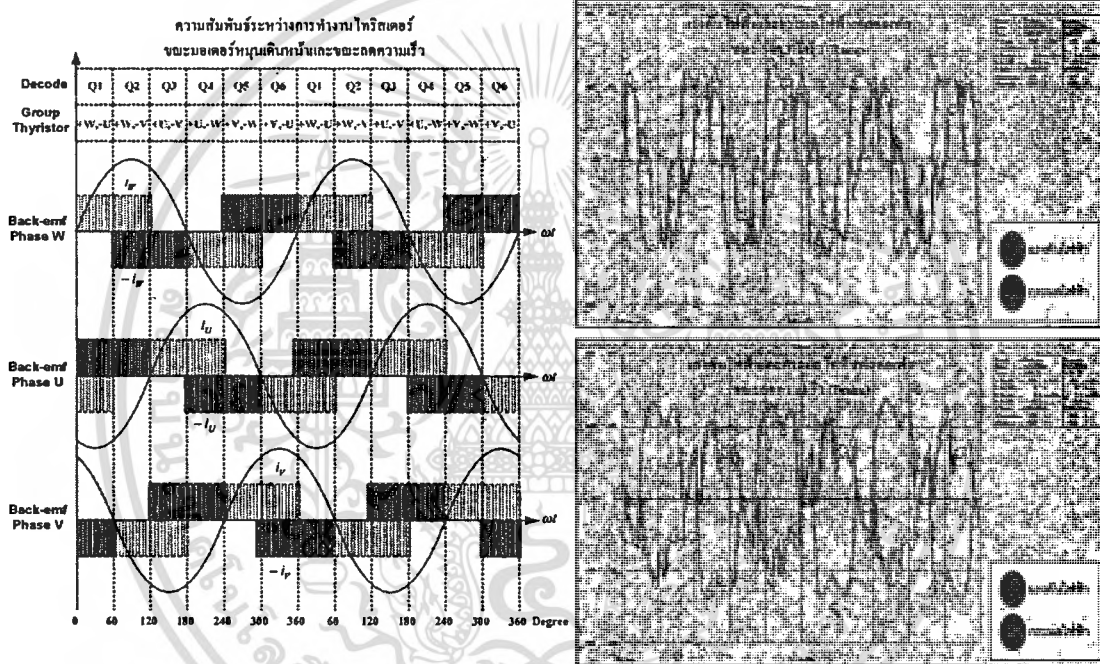


รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสขณะมอเตอร์ลัดความเร็ว ของระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8-4.19 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกและระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล ในขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะต่างๆจะเห็นได้ว่า ผลการทดลองที่ได้จะมีเหมือนกัน เนื่องจากระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลจะทำการเลียนแบบระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกทุกประการ โดยในการวัดแรงดันไฟฟ้าจะทำได้โดยการวัดคูล์ในคู่หนึ่งที่ขั้วมอเตอร์ (U-V, V-W, W-U) และกระแสไฟฟ้าจะทำการวัดโดยการวัดเฟสไดเฟสหนึ่งที่ขั้วมอเตอร์ (U, V, W)

## 4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์การทำงานในขณะเร่งความเร็วและขณะลดความเร็ว



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์การทำงานในขณะเร่งความเร็วและขณะลดความเร็ว

ดังรูปที่ 4.20 การที่ได้ทำการวัดผลการทดลองในสภาวะต่าง ๆ นั้นจะเห็นได้ว่า ได้เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานไทรสเตอร์ในแต่ละกลุ่ม ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าและขณะมอเตอร์ลดความเร็ว

จากการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 การทำงานขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้าไทรสเตอร์จะทำงานในช่วง 0-120 องศาทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าอยู่หนึ่งลูก เนื่องจากถ้ามีทำงานที่ยอดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่รอบสูงๆนั้นแรงดันไฟฟ้าจะเกิน 400 โวลต์ ไปมาก ซึ่งมีผลทำให้ฟิวส์ของระบบขาดได้ โดยในขณะ

เร่งความเร็วนั้นมอเตอร์จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าเป็นบวก

การทำงานในขณะเบรกไทรสเตอร์จะทำงานในช่วง 60-180 องศาทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่กระแสไฟฟ้าจะกลับด้านกันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเป็นลบ โดยมอเตอร์ก็จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่ได้กำหนดไว้เช่นกัน

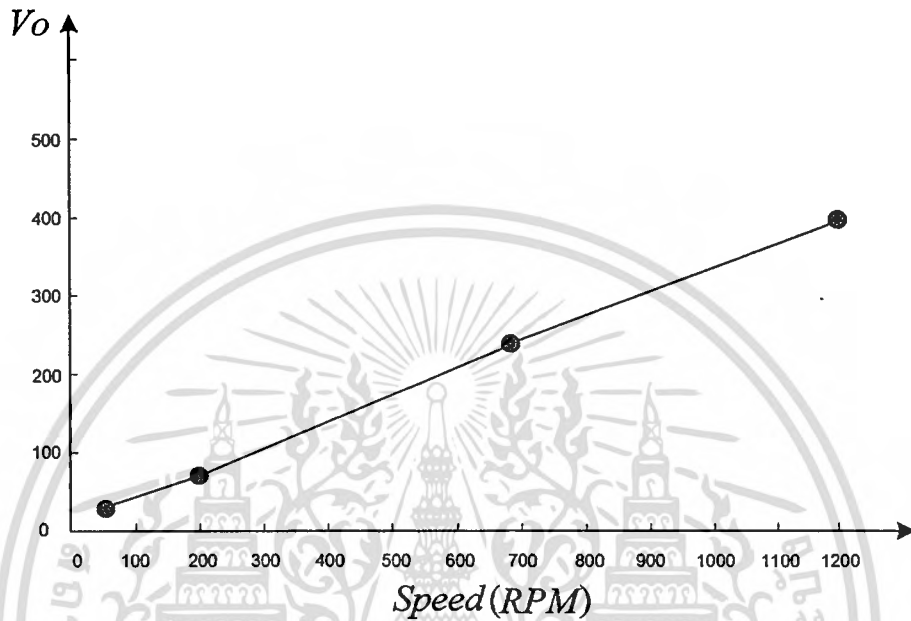
#### 4.3 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำงานในสถานะต่างๆ ที่ได้จากการวัดจริง

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำงานในสถานะต่างๆ ที่ได้จากการวัดจริง

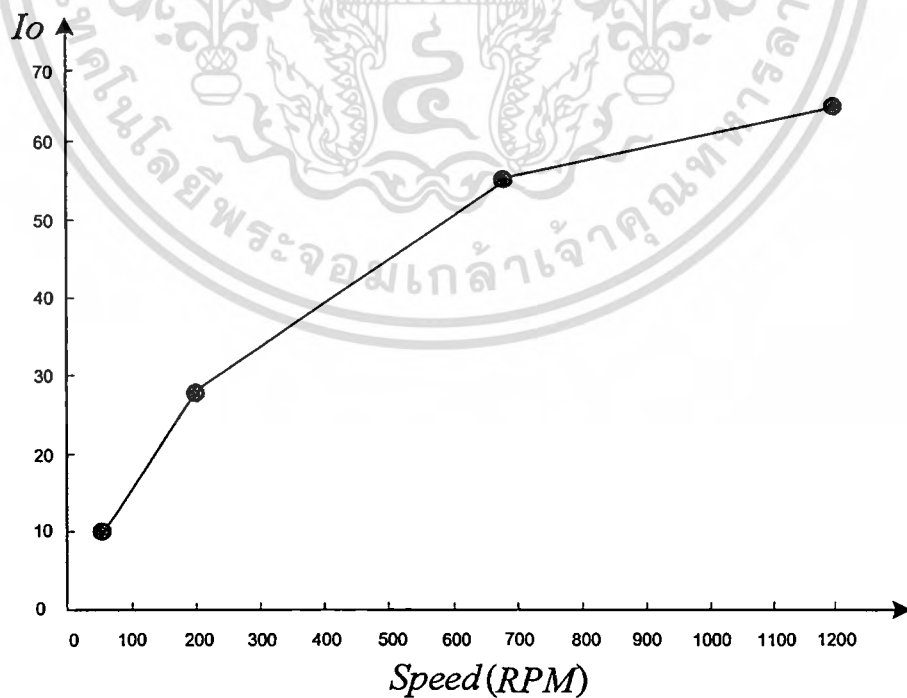
สถานะการทำงาน	แรงดันไฟฟ้า ที่ขั้วมอเตอร์ (V)	กระแสไฟฟ้า ที่ขั้วมอเตอร์ (A)
ขณะความเร็ว 50 รอบ/นาที	26	10
ขณะความเร็ว 200 รอบ/นาที	68	27
ขณะความเร็ว 700 รอบ/นาที	252	55
ขณะความเร็ว 1200 รอบ/นาที	400	65
ขณะเร่งความเร็ว (Ramp Up)	367	386
ขณะลดความเร็ว (Brake)	367	398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำงานในสภาวะต่างๆ จะเห็นได้ว่า ยิ่งความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 และในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วและลดความเร็วนั้นมอเตอร์จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ ระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก เพื่อนำไปออกแบบระบบการขับเคลื่อนระบบดิจิทัล เพื่อช่วยลดส่วนโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อน การควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อน และหลักการการทำงานของหม้อป่น

CPLD (Complex Programmable Logic Device) เป็นส่วนหนึ่งในการช่วยการออกแบบการทำงานของระบบ จะช่วยลดส่วนโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อน และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งาน โดยการเขียนคำสั่งเป็นลอจิกเกต (Logic gate) ซึ่งการใช้ลอจิกเกตพื้นฐานในการใช้งานสามารถเข้าใจได้ง่ายสำหรับการศึกษาสำหรับทุกระดับ

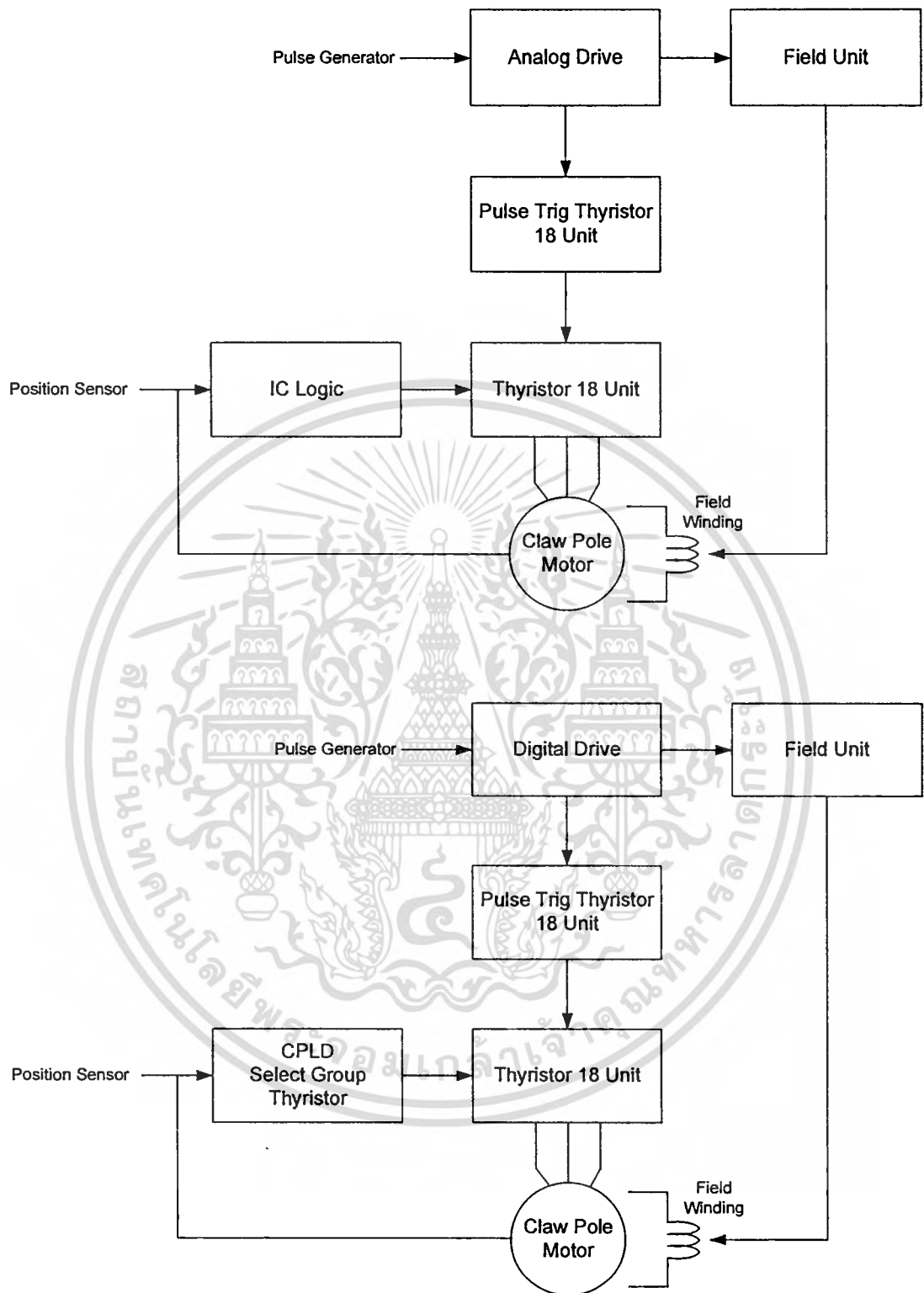
ปัจจุบันการออกแบบระบบดิจิทัลสมัยใหม่ ซึ่งเหมาะทั้งการออกแบบระบบดิจิทัลที่ไม่ซับซ้อนในระดับต่ำจนถึงระบบดิจิทัลที่ซับซ้อนในระดับสูง และเหมาะสมสำหรับการศึกษาและนำไปใช้งานจริงในระบบดิจิทัลต่างๆ ไปมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ และรูปแบบหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจสำหรับการออกแบบระบบดิจิทัล คือการออกแบบวงจรมอเตอร์แบบดิจิทัล เช่น CPLD, และ FPGA ซึ่งเป็นชิพ ที่ผู้ออกแบบสามารถโปรแกรมวงจรที่ออกแบบไว้ด้วยตัวเองลงไปในชิพได้อย่างง่ายดาย

การออกแบบก็ทำได้ง่ายโดยใช้ Schematic หรือ ภาษา HDL (Hardware Description Language) ใช้อธิบายลักษณะการทำงานของวงจรแทน โดยที่ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านโครงสร้างของฮาร์ดแวร์เลยก็สามารถทำได้ นอกจากนี้เทคโนโลยีวงจรรวมในปัจจุบัน ทำให้สามารถบรรจุลอจิกเกตได้หลาย ๆ ล้านตัวในชิพประเภทนี้

ระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัลที่ใช้กับมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) จะมีโครงสร้างของระบบที่เหมือนกันกับระบบขับเคลื่อนแบบอนาล็อก ต่างกันตรงที่ระบบดิจิทัลจะใช้ CPLD แปลงสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งในการหมุน (Position Sensor) แทน IC Logic ของระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก แสดงดังรูปที่ 5.1

อีกส่วนที่แตกต่างกัน คือ ระบบขับเคลื่อนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ จะใช้ Control Unit ที่เป็นระบบดิจิทัล ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบขับเคลื่อนที่มีใช้กันในปัจจุบัน ทำให้มีความสะดวกสบายมากขึ้นในการควบคุมการทำงานของระบบ ตัวอย่างเช่น การตั้งค่ากระแสไฟฟ้าในการทำงานสามารถตั้งด้วยโปรแกรมได้เลย มีแม่นยำสูง ซึ่งถ้าเป็นระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกจะตั้งโดยการปรับค่าความต้านทาน ทำให้มีความแม่นยำลดลง

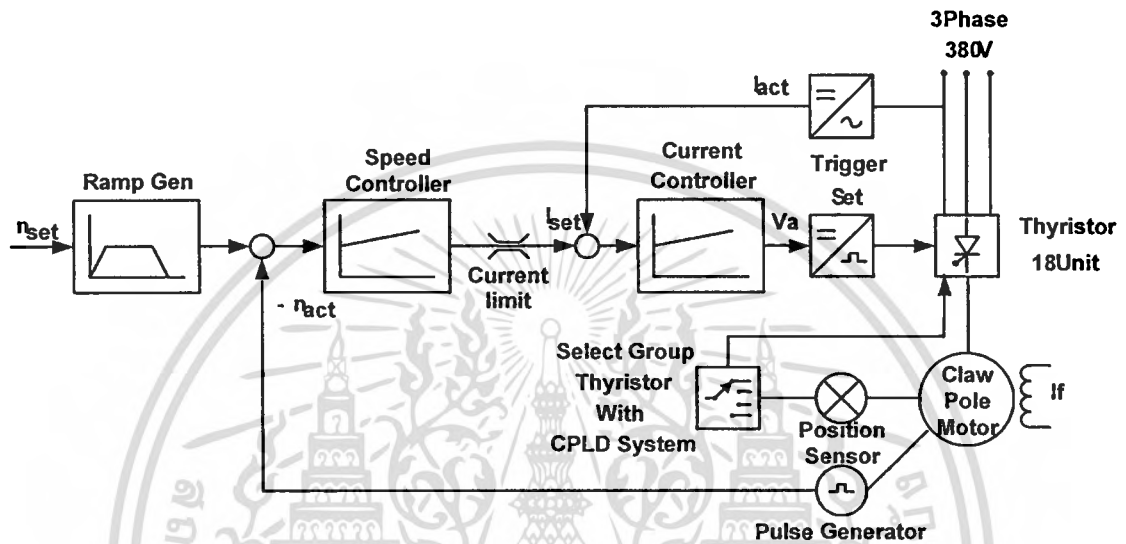
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



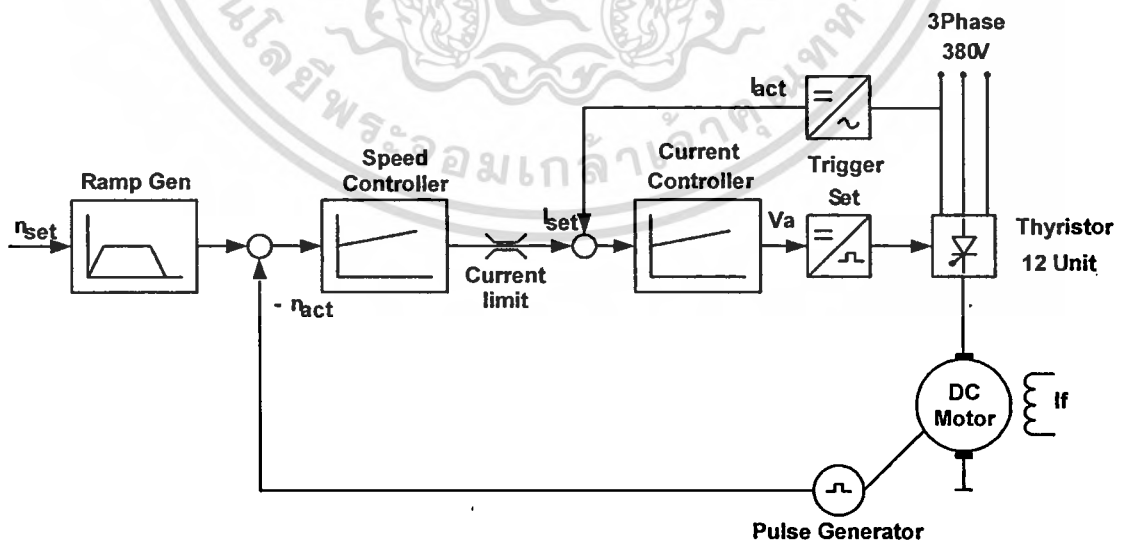
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบโครงสร้างระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกและระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมระบบการทำงานของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ดังรูปที่ 5.2 จะมีหลักการงานเช่นเดียวกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ของ ดีซี มอเตอร์ (DC-Motor) ดังนั้นการปรับความเร็วของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) สามารถทำได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นจนได้ความเร็วที่ต้องการ โดยใช้หลักการของ Close Loop Speed Control ของดีซี ไดรฟ์ (DC Drive) ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 หลักการของ Close Loop Speed Control ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)



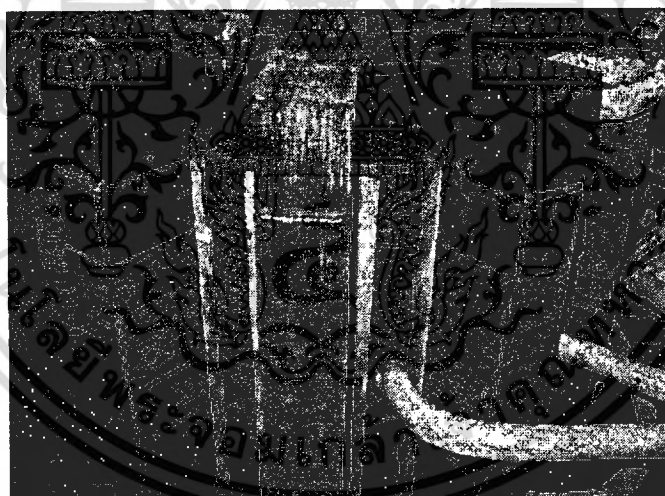
รูปที่ 5.3 หลักการของ Close Loop Speed Control ของดีซี ไดรฟ์ (DC Drive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากคุณสมบัติของค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  (Inductance) คือ การต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในการใช้งาน ทำให้ระบบการควบคุมมอเตอร์ประเภทนี้ไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางกลได้อย่างทันทีทันใด ทั้งนี้เนื่องจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างไม่เพียงพอที่จะขับโหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

แต่เนื่องจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กทั้งสนามแม่เหล็กบนอาร์เมเจอร์ซึ่งอยู่บนสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กของขดลวดฟิลด์ ดังนั้นแรงบิดจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด การควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดฟิลด์เพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กในส่วนนี้ และอาศัยหลักความจริงที่ว่าเมื่อมีโหลดทางกลเพิ่มขึ้นความเร็วของโรเตอร์ตกลงไป ทำให้แรงดันไฟฟ้า Back-emf ตกลงตามไปด้วย การควบคุมโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายขดลวดฟิลด์ให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กให้เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

อีกอย่างถ้าค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  (Inductance) ไม่มากพอ ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จะเข้าสู่ระบบการขับเคลื่อนไม่เรียบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานแย่ง และทำให้แกนเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างของค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  (Inductance) ร้อนตามไปด้วย จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  (Inductance) ขนาดใหญ่เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  (Inductance) ของระบบ

ส่วนประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนหวังว่าจะสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้กับงานประเภทต่างๆได้ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Mltgen, "Line commutated Thyristor Converters", Siemens Aktiengesellschaft, Berlin-Munich, Pitman Publishing, London, 1972.
- [2] G. Mltgen, "Converter Engineering, and Introduction to Operation and Theory", JohnWiley and Sons, 1984.
- [3] K. Thorborg, "Power Electronics", Prentice-Hall International (UK) Ltd., 1988.
- [4] M. H. Rashid, "Power Electronics, Circuits Devices and Applications", Prentice-Hall International Editions, 1992.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", John Wiley and Sons, 1989.
- [6] J. Arrillaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley andSons, 1989.
- [7] J. M. D. Murphy and F. G. Turnbull, "Power Electronic Control of AC Motors", PergamonPress, 1988.
- [8] M. E. Villablanca and J. Arrillaga, "Pulse Multiplication in Parallel Convertors by MultilapControl of Interphase Reactor", IEE Proceedings-B, Vol. 139, N 1; January 1992, pp. 13-20.
- [9] Edward C.Lee, "Brushless DC Amodern Approach to Variable Speed Drive", IEEE 1990.
- [10] He Bii Zhang Xiaofeng , Lin hoa Zhou Yunbin Ma Lei, "Design of 12 -Phase Cycloconverter Based DSP with CPLD", IEEE ,2006
- [11] Bimal K. Bose. Power Electronics and Drive. Englewood Cliffs : Prentice-Hall , 1986. Control Techniques
- [12] ศิวะ หงษ์นภา , การควบคุมและการประยุกต์ใช้งานเอซีไดรฟ์ , กรุงเทพฯ : บริษัท กู๊ดวิลล์-ไดเร็คชั่น จำกัด , 2547
- [13] ศิวะ หงษ์นภา , การควบคุมและการประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์ , กรุงเทพฯ : บริษัท กู๊ดวิลล์-ไดเร็คชั่น จำกัด , 2547
- [14] ศิวะ หงษ์นภา , ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับวงจรภาคกำลัง , กรุงเทพฯ : บริษัท สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

อภิวัฒน์ ทวยเจริญ และ สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา “ การศึกษาและออกแบบระบบ  
ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพลที่ใช้สำหรับหม้อบ่น ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

# 30<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่น่าสนใจในการประชุม เล่ม 1.

- ๑ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ๒ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ๓ ไฟโตนิกส์ (PH)
- ๔ คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

## Volume I



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

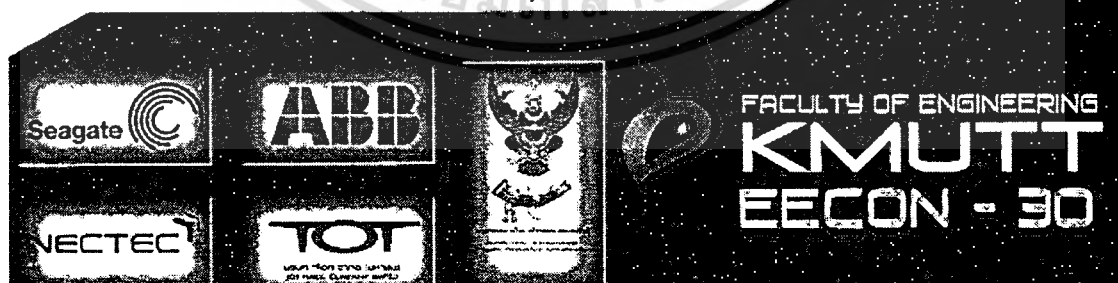
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม  
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพล็กซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ทฯ กาญจนบุรี

25 - 26 ตุลาคม 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพลท์ที่ใช้สำหรับหม้อป่น

## Study and Design a Claw Pole Motor Drive for the Centrifugal Application

อภิวัฒน์ ทวยเจริญ และ สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 0-2326-4550 E-mail:apiwat\_engineer@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและการออกแบบและปรับปรุงระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบคลอว์โพลท์ (Claw Pole Motor) ที่ใช้สำหรับงานหม้อป่นในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ดังนั้นเราจำเป็นต้องทราบถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ ระบบการขับเคลื่อน (Drive)เดิม และวิธีการทำงานของระบบที่ใช้สำหรับงานหม้อป่นเสียก่อน จึงจะสามารถนำไปออกแบบระบบการขับเคลื่อน (Drive)ระบบใหม่ต่อไปได้ โดยระบบการขับเคลื่อน (Drive)ระบบใหม่จะใช้ CPLD ช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะช่วยให้การดูแลรักษาง่ายและมีราคาที่ถูกลง เมื่อเทียบกับระบบแบบเดิม

ความสำคัญ : มอเตอร์แบบคลอว์โพลท์, ซีทีแอลดี

### Abstract

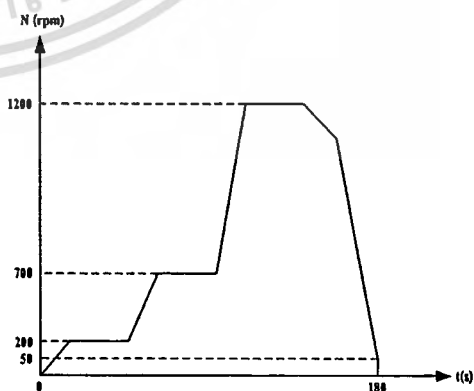
This paper proposes the study, design and development of a claw pole motor drive for a centrifugal application in the Sugar factory. The knowledge of motor structures, parts, original control and drive are required for the improvement. The proposed control is replaced by a Complex Programmable Logic Device (CPLD). The proposed system is simpler and lesser cast for maintenance compared to the original system.

Keyword : Claw Pole Motor, CPLD

### 1. คำนำ

หม้อป่นที่ได้กล่าวถึงในบทความนี้จะใช้ในงานอุตสาหกรรมน้ำตาล มอเตอร์ได้ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยใช้มอเตอร์แบบคลอว์โพลท์ (Claw Pole Motor) ในการทำงาน โดยหม้อป่นจะทำหน้าที่หมุนเพื่อสกัดน้ำออกและทำให้น้ำตาลแห้งจนเป็นผลึกอย่างที่เรเห็นกันโดยได้ทั่วไป ในส่วนนี้จะเรียกกันว่า การสกัดน้ำเหลือง ซึ่งน้ำเหลืองจะได้มาจากการที่นำอ้อยคีบไปผ่านกระบวนการเกี่ยวจนเป็นของเหลวจึงสามารถนำมาผ่านกระบวนการปั่นเพื่อสกัดน้ำเหลืองได้ โดยหม้อป่นดังกล่าวจะมีรอบในการทำงานที่แน่นอนดังนี้

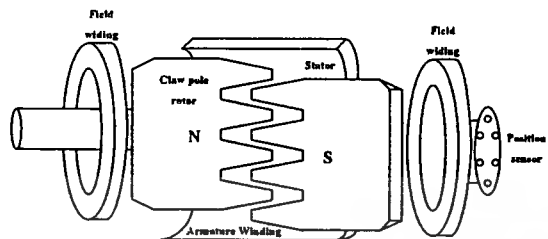
- รอบลงน้ำตาล มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็ว 50 รอบ/นาที่
  - รอบตำ มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที่
  - รอบกลาง มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็ว 700 รอบ/นาที่
  - รอบสูง มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็ว 1200 รอบ/นาที่
- การทำงานจะเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ โดยการหมุนหนึ่งรอบจะใช้เวลาในการทำงานประมาณ 3นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 (Sequence) ระบบการทำงานของหม้อป่น

## 2. โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์

โครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ดังแสดงในรูปที่ 2 จะประกอบไปด้วย

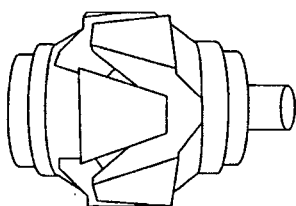


รูปที่ 2 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์

2.1 ขดลวดฟิลด์ (Field Winding) เป็นขดลวดที่วางอยู่บริเวณหัวและท้ายของโรเตอร์โดยมีการค่อขนานกันอยู่ ซึ่งเป็นขดลวดที่ต้องการไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นบริเวณโรเตอร์ และทำให้โรเตอร์เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้น

2.2 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) เป็นขดลวดที่พันอยู่บริเวณแท่งสเตเตอร์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) การควบคุมความเร็วรอบให้มากหรือน้อยนั้นเราสามารถควบคุมความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์

2.3 คลอว์โพลโรเตอร์ (Claw Pole Rotor) มีลักษณะคล้ายกับนิ้วมือทั้งสองข้างวางซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งทำมาจากเหล็กและไม่มีขดลวดใดๆพันอยู่บริเวณนี้เลย เราสามารถพบเห็นโรเตอร์แบบคลอว์โพลนี้ได้จากอัลเทอร์เนเตอร์ (Alternator) ในรถยนต์ซึ่งจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์ที่ได้นำเสนอในบทความฉบับนี้เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดใหญ่ถึง 220 กิโลวัตต์จึงทำให้โรเตอร์มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย



รูปที่ 3 คลอว์โพลโรเตอร์ (Claw Pole Rotor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวตรวจจับตำแหน่งของการหมุน (Position Sensor) โดยจะใช้หลักการของฮอลล์ (Hall) ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายจานและมีตัวเซนเซอร์วางอยู่บริเวณส่วนท้ายของมอเตอร์โดยเมื่อจานวิ่งผ่านตัวเซนเซอร์จะทำให้มีสัญญาณลจอกออกมาทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณลจอกนั้นไปเป็นตัวกำหนดกลุ่มให้กับไทรสเตอร์ (Thyristor) ของระบบขับเคลื่อน (Drive) ของมอเตอร์อีกที เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์

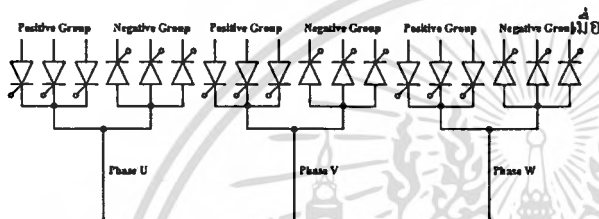
เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) อย่างละเอียดแล้ว มอเตอร์ดังกล่าวจัดอยู่ในซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) แบบมอเตอร์ที่มีขดลวดพันรอบขั้วบนโรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (Wound Field Motor) โดยที่มอเตอร์ประเภทนี้ต้องการไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้ขดลวดฟิลด์ (Field Winding) เพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์โดยมอเตอร์ประเภทนี้จะไม่มีวงแหวนและแปรงถ่านจึงทำให้ง่ายต่อการซ่อมบำรุง ส่วนข้อกำหนดที่ติดมากับตัวมอเตอร์จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดของมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

Output Power	220 kW
Input Voltage	380 V
Input Current	425 A
No. of Phase	3 phase
No. of poles	8 poles
Field voltage	249 V
Field current	15 A
Frequency	3.33-86.7 Hz
Speed	50-1300 rpm

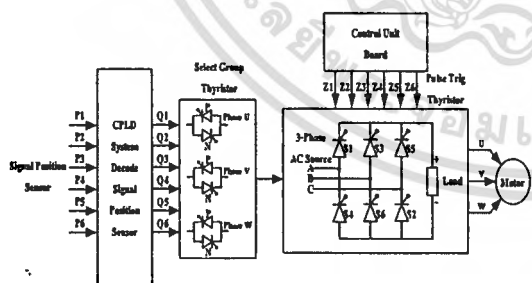
### 3. ระบบขับเคลื่อน (Drive) ของมอเตอร์

ระบบขับเคลื่อน(Drive)ที่ใช้กับมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ที่ได้กล่าวถึงในบทความนี้ซึ่งประกอบไปด้วยไทรสเตอร์(Thyristor) จำนวน 18 ตัว แบ่งเป็นเฟสละ 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกลุ่มของไทรสเตอร์ (Thyristor) จะแบ่งเป็น 6 กลุ่ม แบ่งเป็นกลุ่มบวก(Positive Group) 3 กลุ่มและกลุ่มลบ(Negative Group) 3กลุ่ม ของแต่ละเฟส เพื่อให้รูปคลื่นมีทั้งซิกบวกและซิกลบ แต่ระบบจะไม่สามารถทำงานได้เมื่อเป็นไทรสเตอร์ (Thyristor) ชุดบวกและชุดลบของเฟสเดียวกัน โดย Back-emf ที่ได้จะมีลักษณะเป็นไซน์ เวฟ (Sine wave)



รูปที่ 4 ระบบขับเคลื่อน (Drive) ที่ใช้กับมอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor)

หลักการงานของระบบจะใช้หลักการของฮอลล์ (Hall) โดยเมื่อจานวงฟันตัวเซนเซอร์จะทำให้มีสัญญาณออกมาทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ แล้วทำการเปลี่ยนแปลง(Decode)จากสัญญาณนั้นเขียนเป็นลอจิกในระบบ CPLD เพื่อเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์



รูปที่ 5 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อน (Drive)

การแปลงสัญญาณ (Decode) ที่ออกมาจากตัวตรวจตำแหน่งของการหมุน (Position sensor) ออกมาได้เป็นค่า Q ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเอาท์พุทที่ ออกมาในรูปแบบของพัลส์ (Pulse) เพื่อไปกำหนดให้ไทรสเตอร์(Thyristor) ในแต่ละกลุ่มทำงานดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเลือกกลุ่มการทำงานของไทรสเตอร์ (Thyristor)

Select Group Thyristor						
Decode	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Code0	0	0	1	1	1	0
Code1	1	0	0	0	1	1
Code2	1	1	1	0	0	0
U	N	0	P	P	0	N
V	0	N	N	0	P	P
W	P	P	0	N	N	0

Q1 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +W และ -U ทำงาน

Q2 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +W และ -V ทำงาน

Q3 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +U และ -V ทำงาน

Q4 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +U และ -W ทำงาน

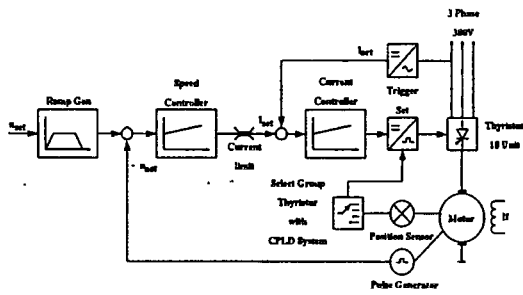
Q5 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +V และ -W ทำงาน

Q6 = จะทำให้ไทรสเตอร์(Thyristor)กลุ่ม +V และ -U ทำงาน

สัญญาณทริก (Pulse Trig) ที่ออกมาจากคอนโทรลบอร์ด (Control Unit Board) จะออกมาเป็น 6 พัลส์ โดยไทรสเตอร์(Thyristor) จะทำงานเป็นคู่อ้างอิงจากรูปที่ 5 ดังนี้

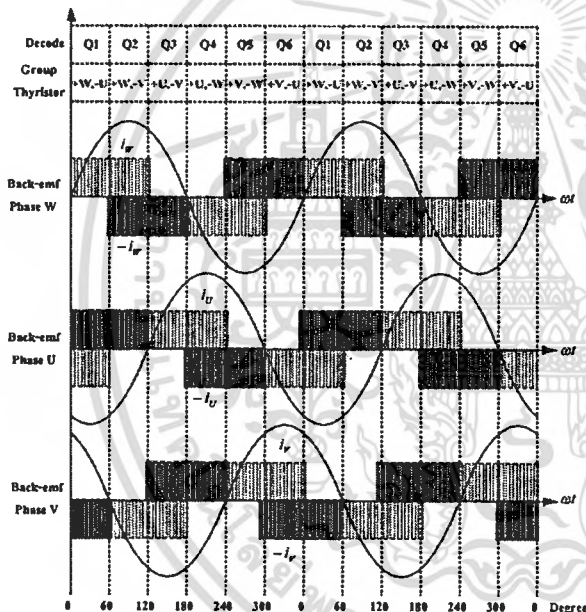
- S1-S6      S1-S2
- S3-S2      S3-S4
- S5-S4      S5-S6

การทำงานของไทรสเตอร์(Thyristor) จะเป็นอย่างไรไปเรื่อยๆจากQ1-Q6 จนครบทั้ง 6กลุ่ม โดยความเร็วรอบสามารถวัดได้จาก Pulse generator เป็น Feedback ให้กับระบบขับเคลื่อน(Drive) โดยใช้หลักการของ Close Loop Speed Control ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 Close Loop Speed Control

เมื่ออ้างอิงกับ Back-emf ของมอเตอร์ที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าการทริก(Trig) ของไทรสเตอร์(Thyristor)ขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้า(Forward) และขณะลดความเร็ว (Brake)จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7



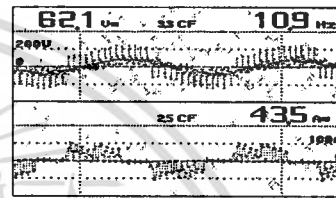
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทริกทำงานไทรสเตอร์(Thyristor) มอเตอร์หมุนเดินหน้า(Forward) และขณะลดความเร็ว(Brake)

การทำงานขณะมอเตอร์หมุนเดินหน้า(Forward) ไทรสเตอร์(Thyristor) จะทำงานในช่วง 0-120 องศาทางไฟฟ้า ในรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ของ Back-emf ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสหน้าแรงดันอยู่หนึ่งถูก เนื่องจากการวางตำแหน่งของตัวตรวจจับตำแหน่งของการหมุน (Position Sensor) และการที่มอเตอร์ต้องแรงบิดในการเร่งความเร็ว (Ramp Up) โดยในขณะที่เร่งความเร็ว(Ramp Up)นั้นมอเตอร์จะ

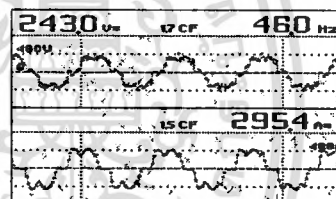
กินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าเป็นบวก

การทำงานในขณะที่เบรก (Brake) ไทรสเตอร์ (Thyristor) จะทำงานในช่วง 60-180 องศาทางไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ของ Back-emf ในแต่ละเฟส จึงทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่กระแสไฟฟ้าจะกลับด้านกันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเป็นลบ โดยมอเตอร์ก็จะกินกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่กำหนดไว้เช่นกัน

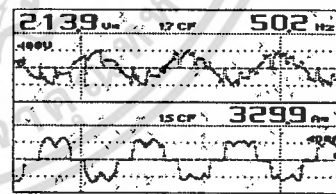
4. ผลการทดลอง



รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฟสต่อเฟส ขณะความเร็วคงที่ (Stable Speed)



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฟสต่อเฟส ขณะเร่งความเร็ว (Ramp Up)



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฟสต่อเฟส ขณะลดความเร็ว (Brake)

5. สรุป

มอเตอร์แบบคลอว์โพล (Claw Pole Motor) ที่ได้กล่าวถึงในบทความนี้จัดอยู่ในประเภทของซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) มีการออกแบบมาเป็นพิเศษโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของการหมุน (Position Sensor) ในการทำงาน การใช้ CPLD ช่วยในการออกแบบระบบขับเคลื่อน (Drive) นั้น จะช่วยให้ผู้ใช้สะดวกสบายในการตั้งค่าและการตรวจเช็ค

ส่วนประกอบต่างของระบบมากขึ้น ส่วนประโยชน์ที่ได้รับจากบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทต่างๆ ได้ต่อไป

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Padmaraja Yedaamald , “Microchip Technology”,DS00970A, 2005.
- [2] Edward C.Lee, “Brushless DC Amodern Approach to Variable Speed Drive”, IEEE 1990.
- [3] David Martinez-Munozard, Mars Alakula, “Comparison Between Anoval Claw-pole Electrically Magnetized Synchronous Machine Without Slip-rings and a Permanent Magnet”,IEEE 2003.
- [4] He Bii Zhang Xiaofeng , Lin hoa Zhou Yunbin Ma Lei, “Design of 12 -Phase Cycloconverter Based DSP with CPLD”, IEEE ,2006
- [5] Bimal K. Bose. Power Electronics and Drive. Englewood Cliffs : Prentice-Hall , 1986. Control Techniques

## ประวัติผู้จัดทำ



อภิวัฒน์ ทวยเจริญ สำเร็จการศึกษาระดับ  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบัน  
เป็นนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สุพัฒน กิตติรัตนสังจา ได้รับวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
และ M.S. และ Ph.D. ในสาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจาก Rensselaer

Polytechnic Institute มลรัฐนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา ได้รับการ  
บรรจุเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ.  
2545 และดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์เมื่อปี พ.ศ. 2548  
งานวิจัยที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องจักรกลแบบสวิทซ์  
รีติคแตนซ์ และงานส่องสว่างแบบ solid state

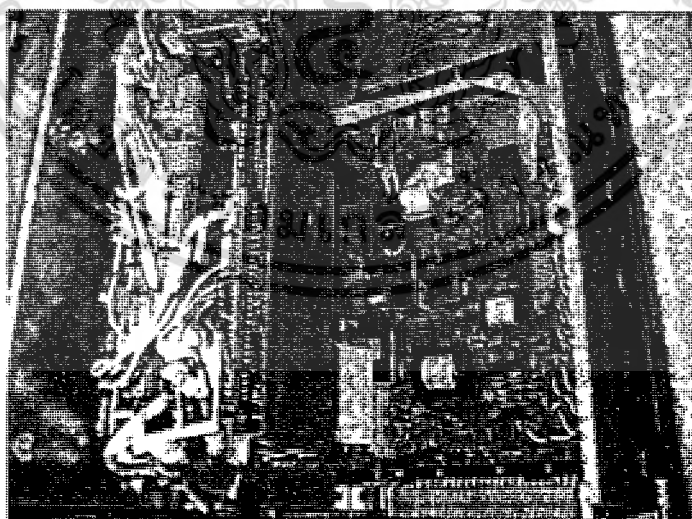
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## แสดงชุดทดลองระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อกและระบบดิจิทัล



รูปที่ ข.1 ชุดทดลองระบบขับเคลื่อนระบบอนาล็อก



รูปที่ ข.2 ชุดทดลองระบบขับเคลื่อนระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอภิวัฒน์ ทวยเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	27 กันยายน 2524
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้