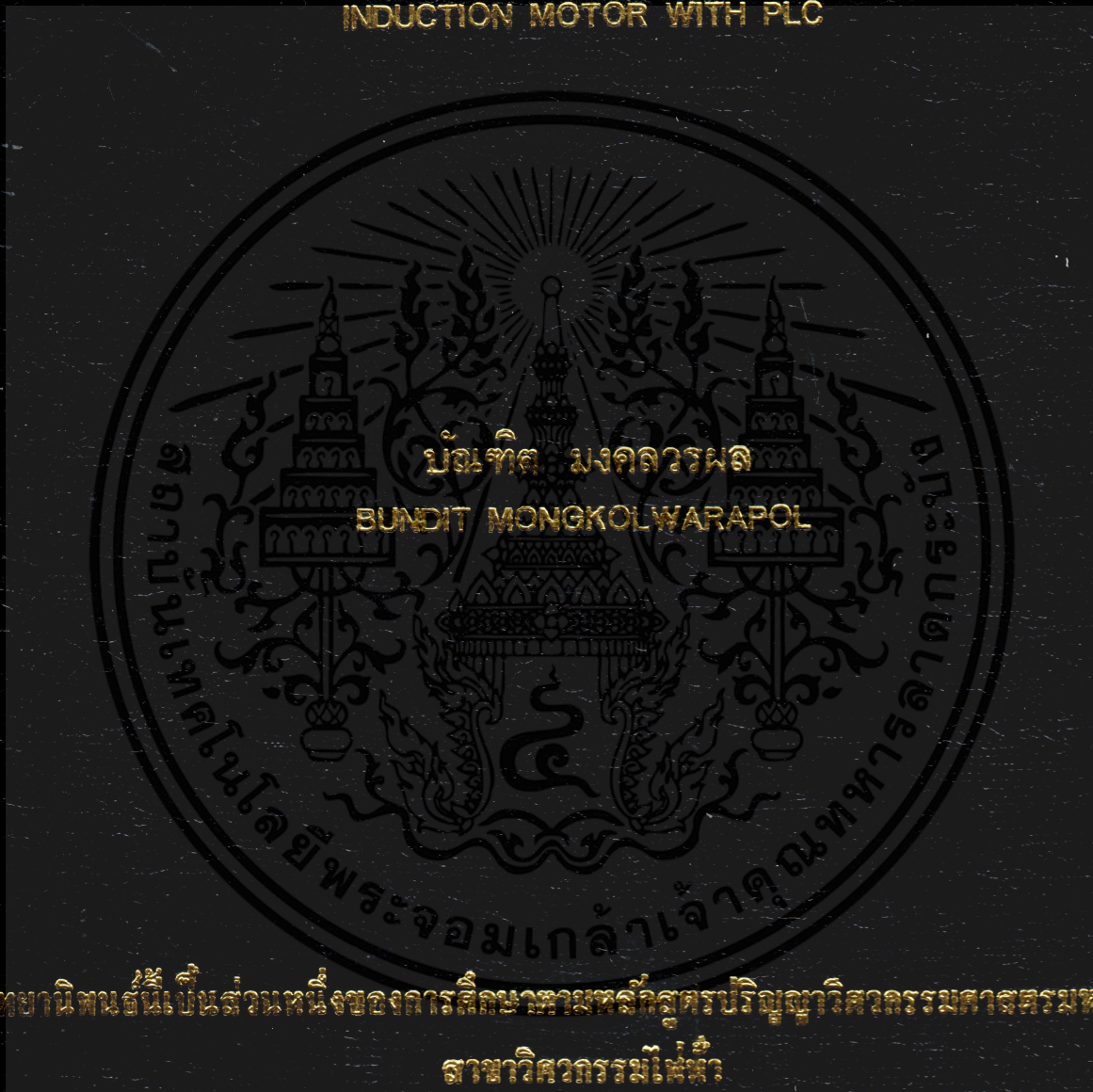


ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้

PLC ควบคุม

EFFICIENCY INCREASING SYSTEM FOR
INDUCTION MOTOR WITH PLC



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-483-4

ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้

PLC ควบคุม

EFFICIENCY INCREASING SYSTEM FOR
INDUCTION MOTOR WITH PLC



เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 41507
....., เดือน, ปี..... 19 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-483-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFICIENCY INCREASING SYSTEM FOR
INDUCTION MOTOR WITH PLC**



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

2001

ISBN 974-684-483-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ดิฉันทั้งห้ามิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PLC
ควบคุม
EFFICIENCY INCREASING SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR
WITH PLC

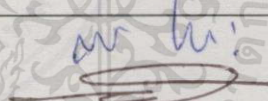



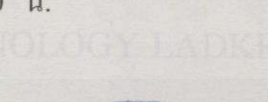
ชื่อนักศึกษา นายบัณฑิต มงคลวรผล

รหัสประจำตัว 39061052

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.สมยศ	จุมณะปิยะ	
ผศ.พิชิต	ถ้ายอง	
รศ.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
รศ.ดร.ฟูศักดิ์	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 25 ตุลาคม 2544 เวลา 13.30-15.30 น.

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

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒนา อัครฐ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒.....เดือน.....๕๒๒๕๔.....พ.ศ.....๒๕๔๔

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PLC ควบคุม
นักศึกษา	นายบัณฑิต มงคลวรผล
รหัสประจำตัว	39061052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่มีลักษณะการทำงานที่มีช่วงรับภาระมากและช่วงรับภาระน้อยสลับกัน ซึ่งพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมให้กับ PLC เพื่อให้ PLC ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตามช่วงจังหวะการทำงาน เพื่อเป็นการเพิ่ม ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในช่วงที่มอเตอร์เหนี่ยวนำรับภาระน้อย คือการลดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ลงมาให้เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ ปัจจุบันลำดับการทำงานของเครื่องจักรมักจะใช้ PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมและ PLC จะรู้ช่วงเวลาการทำงานรับภาระมากหรือรับภาระน้อยของมอเตอร์อยู่แล้ว บทความนี้จึงมีการพัฒนา โปรแกรมเพิ่มเติมให้กับ PLC เพื่อให้ PLC ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตามช่วงจังหวะการทำงาน เพื่อเป็นการเพิ่ม ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ในเครื่องจักรนั้นๆ ทั้งยังเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์อีกด้วย

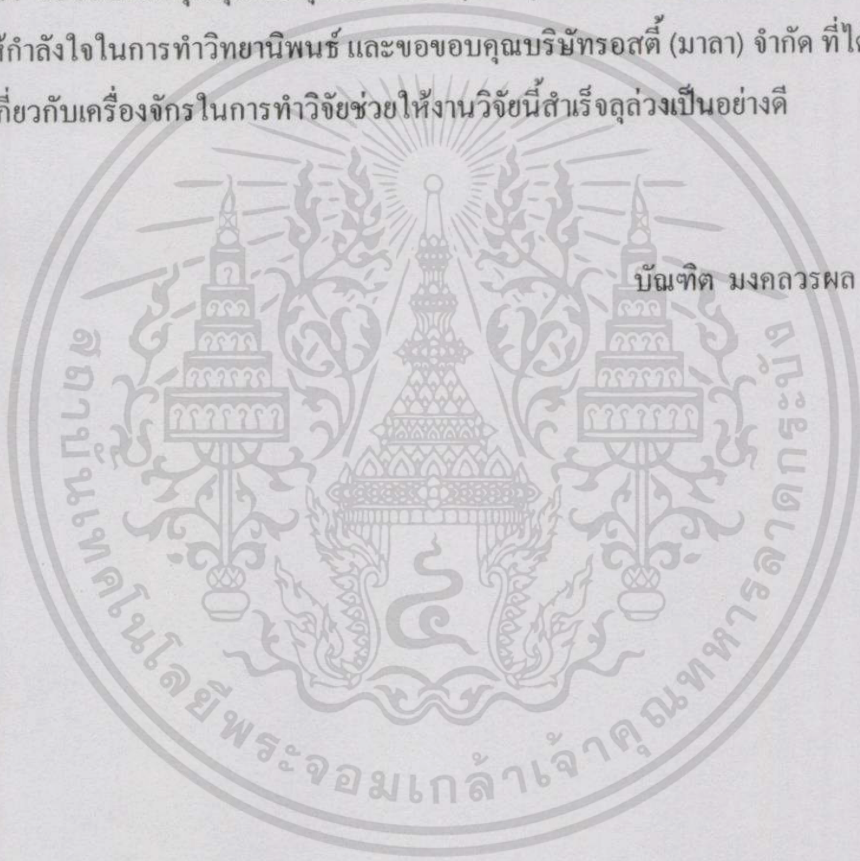
Thesis Title	Efficiency Increasing System for Induction Motor with PLC
Student	Mr.Bundit Mongkolworapol
Student ID.	39061052
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan

ABSTRACT

This paper presents a method to increase the 3 phase induction motor with high efficiency operation for the big load and small load operation. In normal situation the motor efficiency will be high when the motor gets full load and will be decrease when it has a small load less than $\frac{3}{4}$ of full load. The method to increase the motor efficiency while it has a small load is to decrease the voltage to the motor to a proper voltage in order to maintain continuous operation . The process of the machine always uses PLC to control, because PLC already knows the load status of motors. This paper will also add a program to PLC for controlling the voltage of the motor following to the cycle time of the motor operation. It will increase the efficiency of the induction motor in that machine and also saves the electrical power consumption.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ แก่ผู้เขียน ขอขอบพระคุณ อาจารย์ เชื้อ นกอยู่ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำแนะนำและแนวทางในการเขียนอย่างใกล้ชิด ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่า ขอขอบพระคุณพี่ๆ น้องๆ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยเป็นกำลังใจ ตลอดจนช่วยเหลือแนะนำในเรื่องต่างๆ ด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆน้องๆ ที่บริษัท รอสดี (มาลา) ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบริษัทรอสดี (มาลา) จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องจักรในการทำวิจัยช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และคัดลอกอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.7 รายละเอียดในการทำวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	4
2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	4
2.2 การกำเนิดแรงบิดและการวิเคราะห์แรงบิด.....	7
2.2.1 หลักการเบื้องต้น.....	7
2.2.2 ความถี่ของกระแสโรเตอร์.....	11
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตัวประกอบกำลังของโรเตอร์.....	11
2.2.4 แรงบิดขณะเริ่มต้น.....	12
2.2.5 เงื่อนไขสำหรับแรงบิดเริ่มต้นสูงสุด.....	13
2.2.6 ผลการเปลี่ยนแรงดันของแหล่งจ่ายที่แรงบิดเริ่มต้น.....	14
2.2.7 แรงดัน โรเตอร์และรีแอคเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการหมุนโรเตอร์.....	14
2.2.8 แรงบิดภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่อง.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.9	แรงบิดสูงสุดในสภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน.....	16
2.2.10	แรงบิดและแรงบิดที่ควบคุมไม่ได้ของโรเตอร์.....	18
2.2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป.....	18
2.3	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	20
2.4	การควบคุมมอเตอร์ใช้พลังงานต่ำสุด.....	24
บทที่ 3	การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	26
3.1	ไคริสเตอร์.....	26
3.1.1	หลักการทํางานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์.....	27
3.1.2	หลักการทํางานและลักษณะสมบัติของไครแอ็ค.....	33
3.2	การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	37
3.2.1	การควบคุมช่วงครึ่งคลื่น.....	37
3.2.2	การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น.....	41
3.2.3	การควบคุมเต็มคลื่นสำหรับภาระเอช.....	44
บทที่ 4	พีแอลซี.....	49
4.1	พีแอลซี.....	49
4.1.1	ความหมายของพีแอลซี.....	49
4.1.2	หลักการทํางานและโครงสร้างของพีแอลซี.....	49
4.1.3	ภาษาพีแอลซี.....	51
4.2	หลักการเขียนโปรแกรมให้กับพีแอลซี TSX 3722 Telemecanique.....	52
4.2.1	บทนำ.....	52
4.2.2	คุณลักษณะทั่วไปของพีแอลซี TSX 3722 Telemecanique.....	52
4.2.3	การเข้าตำแหน่ง I/O โมดูลของพีแอลซี TSX 3722	53
4.2.4	การเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ด.....	54
4.2.5	บล็อกจะใช้บิตและเวิร์ดอย่างเฉพาะเจาะจง.....	56
4.2.6	การใช้หน่วยความจำ.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.7 โหมคการทำงานของพีแอลซี.....	59
4.2.8 กระบวนการกระตุ้นการเริ่มสตาร์ท.....	60
4.2.9 โครงสร้างของโปรแกรมและการทำงานของโปรแกรม.....	61
4.2.10 ควบเวลาการทำงานของพีแอลซี.....	63
4.2.11 โครงสร้างซอร์ฟแวร์หลายๆส่วนงาน.....	64
บทที่ 5 เครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	67
5.1 โครงสร้างและหลักการทํางาน.....	67
5.2 ระบบชุดควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	74
5.3 อุปกรณ์ควบคุมการปรับเฟสมอเตอร์.....	75
5.4 ตัววัดมุมต่างเฟส.....	77
5.5 ตัวแปลงกระแสและแรงดัน.....	77
5.6 วงจรชุดควบคุมการประหยัดพลังงานมอเตอร์.....	78
5.7 ลำดับการทํางานของโปรแกรม.....	79
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	80
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง.....	86
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	90
ภาคผนวก ข. ข้อมูล.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กอย่างง่าย.....	4
2.2	ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก.....	6
2.3	ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน.....	6
2.4	การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน.....	7
2.5	โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน.....	8
2.6	หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดโรเตอร์.....	9
2.7	การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์.....	9
2.8	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป.....	19
2.9	แบบของวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
2.10	วงจรสมมูลย์เฟสเดียวของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	23
2.11	ลักษณะความเร็วของแรงบิด.....	24
2.12	ลักษณะของแรงบิด – ความเร็ว กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันสเตเตอร์.....	25
3.1	การเรียงสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นเป็นชั้นๆ PNPN.....	26
3.2	โครงสร้างของเอสซีอาร์.....	27
3.3	การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก.....	28
3.4	โมเดลของเอสซีอาร์แบบวงจรถานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก.....	30
3.5	การต่อสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็น 2 ชั้น อย่างขนานแต่กลับขั้วกัน.....	34
3.6	โครงสร้างของไดรแอก.....	34
3.7	เส้นโค้งลักษณะสมบัติของไดรแอก.....	35
3.8	วงจรเบื้องต้นของการควบคุมเฟสเอชอี.....	37
3.9	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของภาระที่เป็นความต้านทานของวงจรรูปที่ 3.8(ก) สำหรับการควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น.....	38
3.10	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันค่าเฉลี่ย ค่าอาร์เอ็มเอส ค่ายอดสูงสุด และกำลัง.....	40
3.11	วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีการควบคุมกระแสป้อนให้ภาระ RL.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเปิดกระแส γ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.11 (ก)43
3.13	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฉลี่ยไหลผ่านเอสซีอาร์ $I_{AVG,N}$ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.11 (ก).....43
3.14	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เอ็มเอสไหลผ่านเอสซีอาร์ $I_{RMS,N}$ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.8 (ก).....44
3.15	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของการควบคุมเต็มคลื่นเฟสเดียวสำหรับภาระเอชทีที่เป็นเชิงเหนี่ยวนำ.....45
3.16	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับ α สำหรับค่า ϕ ของรูปที่ 3.15 (ก)46
3.17	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{SCR,AVG,N}$ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ ของวงจรรูปที่ 3.8.25(ก).....47
3.18	เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{SCR,N}$ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ ของวงจรรูปที่ 3.15 (ก).....48
4.1	โครงสร้างของพีแอลซี.....49
4.2	โครงสร้างของซีพียู.....50
4.3	ลักษณะการใช้งานควบคุมด้วยพีแอลซี.....50
4.4	แสดงการเข้าถึง I/O โมดูลของ PLC TSX372253
4.5	แสดงการเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ด.....54
4.6	แสดงการเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ด.....54
4.7	รูปแบบของเวิร์ดข้อมูล.....55
4.8	รูปแบบของดับเบิลเวิร์ดข้อมูล.....56
4.9	แสดงบิทข้อมูลและเวิร์ด.....56
4.10	แสดงการใช้คำสั่งบิตออกข้อมูล.....57
4.11	โครงสร้างของเมมโมรีเวิร์ดแบบไม่มีเมมโมรีการ์ด กับแบบมีเมมโมรีการ์ด.....59
4.12	แสดงโหมดการทำงานของพีแอลซี.....60
4.13	กระบวนการกระตุ้นการเริ่มสตาร์ท.....60

สารบัญรูป (ต่อ)

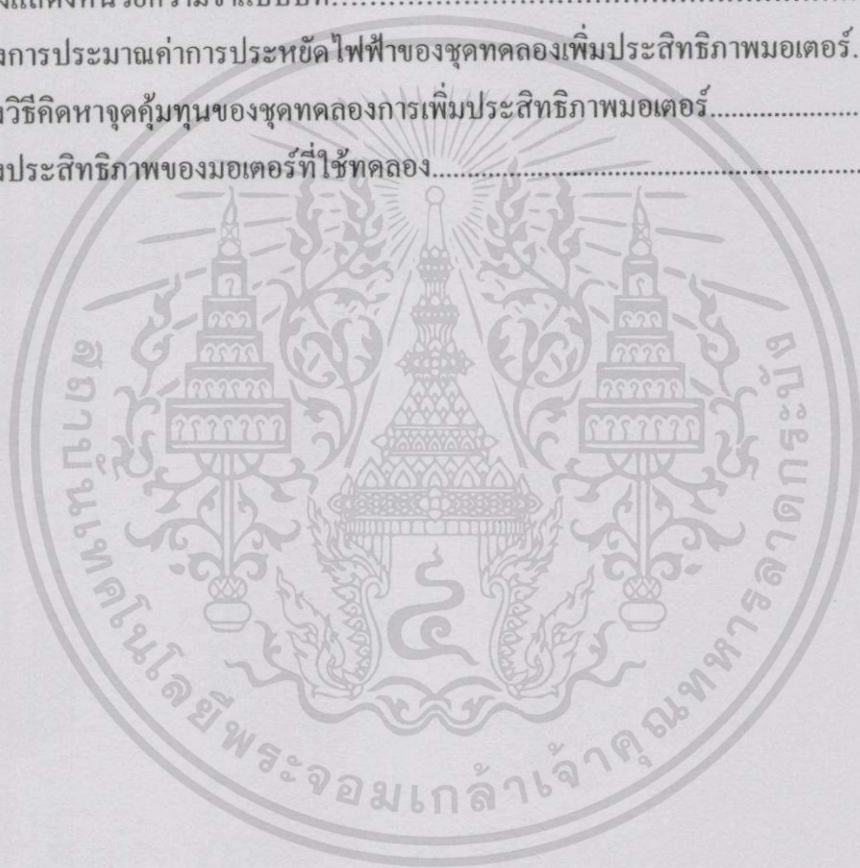
รูปที่	หน้า
4.14	กระบวนการเริ่มสตาร์ทของเครื่องขณะเครื่องหยุดหลังจากปิดเครื่องโดยไม่จ่ายไฟเลี้ยง.....61
4.15	รอบการทำงานของพีแอลซี.....61
4.16	วัฏจักรการสแกน.....62
4.17	แสดงคาบเวลาการทำงานของพีแอลซี63
4.18	วัฏจักรคาบเวลาการทำงาน.....64
4.19	การจัดการของทาสท์.....65
4.20	แสดงความสัมพันธ์ของการทำงานในแต่ละทาสท์.....65
5.1	การต่อเครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์.....68
5.2	ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์.....68
5.3	แสดงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิด 1 เฟส.....69
5.4	เครื่องเป่าขวดพลาสติก.....70
5.5	ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องเป่าขวดพลาสติก.....71
5.6	วงจรไฮดรอลิกของเครื่องเป่าขวดพลาสติก.....72
5.7	วงจรการทำงานของชุดควบคุมเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์.....75
5.8	ภาพ Phase Angle Controller76
5.9	รูปวงจรเทียบเคียง.....76
5.10	รูป Phase Angle Converter และวงจรการต่อใช้งาน.....77
5.11	อุปกรณ์เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าและการต่อใช้งานกับอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและการต่อใช้งาน.....78
5.12	รูปชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า.....79
5.13	Flow Chart ของการทำโปรแกรมชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์.....79
6.1	รูปแสดงการนำชุดทดลองประกอบใช้งานที่เครื่องจักร.....80
6.2	แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 10 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง เจ็ดคอนโทรลเลอร์.....80
6.3	แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 7 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง เจ็ดคอนโทรลเลอร์.....81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4	แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 6 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง เจิตคอนโทรลเลอร์.....81
6.5	แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 5 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง เจิตคอนโทรลเลอร์.....82
6.6	แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 4 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง เจิตคอนโทรลเลอร์.....82
6.7	กระแสที่ไม่ได้ต่อชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....83
6.8	กระแสที่มีการใช้ชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....83
6.9	แสดงแรงดันไฟฟ้าโดยไม่ต่อชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....83
6.10	กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าขณะต่อชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....84
6.11	กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยไม่มีชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....84
6.12	กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยมีชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า.....85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางตัวการกระทำแบบบิทของ PLC TSX3722.....	53
4.2 แสดงตำแหน่งและหมายเลขชั้นแนล.....	54
4.3 ตารางกำหนดกลุ่มของเวิร์คและบิทข้อมูลของฟังก์ชันบล็อก.....	57
4.4 แสดงการเข้าถึงข้อมูลโดยการบ่งชี้.....	57
4.5 ตารางแสดงหน่วยความจำแบบบิท.....	59
7.1 แสดงการประมาณค่าการประหยัด ไฟฟ้าของชุดทดลองเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์.....	86
7.2 แสดงวิธีคิดหาจุดคุ้มทุนของชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์.....	87
7.3 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง.....	87



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

เนื่องจากแนวโน้มของค่าไฟฟ้ามีราคาสูงขึ้น ความจำเป็นในการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงๆ เป็นเรื่องที่ต้องคำนึงถึงมากขึ้น รวมทั้งมอเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังของเครื่องจักร จะต้องมีการเลือกขนาดให้เหมาะสมกับภาระที่ต่อกับเพลลาของมอเตอร์ แต่ถ้าวิเคราะห์ลงไปแล้วจะพบว่าลักษณะการทำงานของเครื่องจักรเองที่เป็นตัวกำหนดให้มอเตอร์ทำงานไม่มีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าการเลือกขนาดของมอเตอร์จะเหมาะสมกับภาระแล้วก็ตาม ตัวอย่างมอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกของเครื่องเป่าขวดพลาสติกจะมีภาระน้อยมาก ในช่วงหล่อเย็นชิ้นงาน โดยทั่วไปจังหวะการทำงานของเครื่องเป่าขวดพลาสติก หรือเครื่องฉีดพลาสติกจะมีภาระเต็มๆ เมื่อมีการเปิดปิดแม่พิมพ์ และจะมีช่วงที่ปั๊มไฮดรอลิกจะมีภาระน้อยมากในช่วงหล่อเย็นชิ้นงาน โดยทั่วไปจังหวะการทำงานของเครื่องเป่าพลาสติก 1 รอบการทำงาน ประมาณ 12-20 วินาที ซึ่งการหยุดมอเตอร์ในช่วงที่ปั๊มมีภาระน้อย และสตาร์ทมอเตอร์ในช่วงที่ปั๊มต้องการภาระเต็มพิกัดเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นจะต้องให้มอเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เป็นเหตุให้ช่วงที่ปั๊มมีภาระน้อยมอเตอร์จะทำงานมีประสิทธิภาพลดลง ด้วยเหตุนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะที่ทำงานรับภาระน้อยๆ สามารถทำได้โดยลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในค่าที่เหมาะสมที่มอเตอร์สามารถทำงานต่อไปได้ แต่จะเป็นการลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนหลักของมอเตอร์และกำลังงานสูญเสียในขดลวด เนื่องจากกระแสของมอเตอร์จะลดลงด้วย การควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์นี้จะใช้ PLC ที่ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรอยู่แล้วเป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบัน PLC สามารถทำงานตรวจสอบอินพุตได้ในช่วงเวลา 1 มิลลิวินาที จึงเป็นการง่ายที่จะทำให้โปรแกรม PLC ทำงานเป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการนำ PLC ที่มีอยู่แล้วที่เครื่องจักร ไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์
2. เป็นแนวทางใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมให้กับ PLC ที่มีอยู่แล้วในเครื่องจักร แล้วนำมาใส่โปรแกรมเพิ่มขึ้นเพื่อให้ PLC ควบคุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ตามจังหวะการทำงานของเครื่องจักรที่ต้องการภาระมากหรือน้อยเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ได้สูง โดยการปรับพลังงานให้มอเตอร์ทุกๆ 10 มิลลิวินาที

1.4 วิธีการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ เอกสารและตำราทางวิชาการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ
2. วิเคราะห์ระบบควบคุมจากสมการทางคณิตศาสตร์และเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการกำหนดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์เท่าที่จำเป็นเพื่อให้ประสิทธิภาพมอเตอร์สูงขึ้น
3. ออกแบบวงจรที่ใช้ในระบบควบคุมแต่ละส่วน
4. ทำการสร้างและประกอบเป็นชุดควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สามารถทดสอบผลได้ตามทฤษฎีที่นำเสนอ
5. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1. สามารถนำหลักการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส โดยการปรับลดแรงดันให้ต่ำสุด เท่าที่มอเตอร์ยังทำงานอยู่ได้เพื่อเป็นการลดพลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้ลดลง
2. สามารถนำหลักการในวิทยานิพนธ์นี้ ไปใช้กับเครื่องจักรอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีระบบปั๊มไฮดรอลิก เช่น เครื่องเป่าขวดพลาสติก และเครื่องฉีดพลาสติก

1.6 แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

มอเตอร์ปั๊มของระบบไฮดรอลิกของเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องเป่าขวดพลาสติก หรือเครื่องฉีดพลาสติกจะมีภาระเต็มๆ เมื่อมีการใช้แรงดันเปิดปิดแม่พิมพ์ และจะมีช่วงที่ปั๊มไฮดรอลิกจะมีภาระน้อยมากในช่วงหล่อเย็นชิ้นงาน ซึ่งเป็นช่วงที่มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ถ้าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในช่วงเวลานี้ได้ จะทำให้การใช้พลังงานในเครื่องจักรลดลง ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้น โดยการลดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ลงเท่าที่มอเตอร์ยังรองรับภาระ **ขณะไม่มีภาระน้อยอยู่ได้**

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 รายละเอียดในการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบวงจรสำหรับควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ PLC ที่มีอยู่แล้วในเครื่องจักรมาควบคุม ซึ่งรายละเอียดแบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 : บทนำ ได้กล่าวถึงแนวทางต่างๆ ไปที่นำมาสู่การวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย และรายละเอียดในแต่ละบท

บทที่ 2 : มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กล่าวถึงการกำเนิด แรงบิด และการวิเคราะห์แรงบิด การหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ และการควบคุมมอเตอร์ให้ใช้พลังงานต่ำสุด

บทที่ 3 : การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกล่าวถึงไทรสเตอร์และการควบคุมการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

บทที่ 4 : พีแอลซี กล่าวถึงหลักเบื้องต้นของพีแอลซีและการทำโปรแกรมของพีแอลซีเทเลแมคเคนิครุ่น TSX 3722 ไมโครพีแอลซี

บทที่ 5 : ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย กล่าวถึงการควบคุมเฟสด้วย PLC การทำงานของเครื่องเป่าขวดพลาสติก การทำโปรแกรมการควบคุมเฟสด้วย PLC และวงจรการทดลองของชุดควบคุม

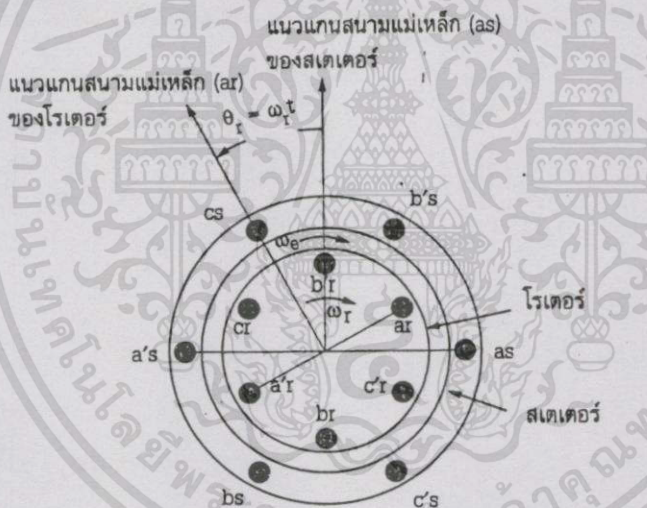
บทที่ 6 : ผลการทดลอง

บทที่ 7 : สรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากและเป็นอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าเพื่อนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปขับอุปกรณ์อื่นๆ ของเครื่องจักรให้ทำงาน ในรูปที่ 2.1 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขั้ว แม่เหล็กในอุดมคติ แต่ละเฟสของสเตเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 1 ชุด ส่วนโรเตอร์จะมีทั้งแบบที่เป็นขดลวด (wound rotor) และแบบที่เป็นแท่งตัวนำ (squirrel cage) เมื่อต่อไฟให้ขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ และแรงบิดที่ทำให้โรเตอร์หมุน ด้วยเหตุผลที่มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ จึงเรียกเครื่องจักรกลประเภทนี้ว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กอย่างง่าย

2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ

- ส่วนที่ไม่มีกระแสเคลื่อนที่ (stator)
- ส่วนที่เคลื่อนที่ (rotor)

สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ประกอบด้วย (Frame) ซึ่งภายในจะมีร่อง (Slots) อยู่โดยรอบเพื่อใช้ฝังขดลวด จำนวนวงจรจะเท่ากับจำนวนเฟสของแหล่งจ่ายไฟเมน (Main Supply)

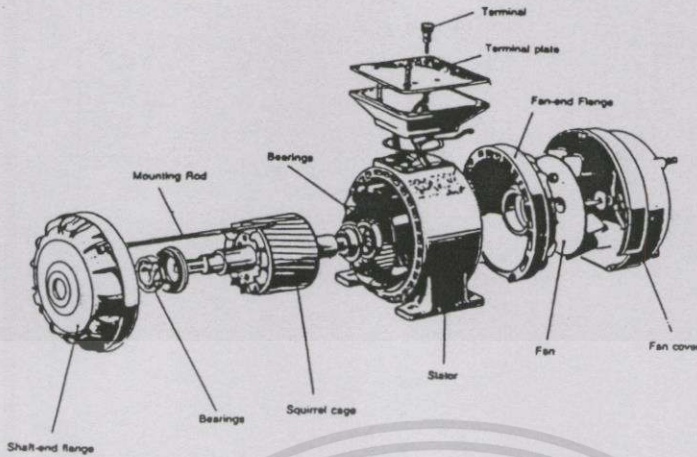
โรเตอร์ (Rotor)

เป็นส่วนเคลื่อนที่ของมอเตอร์ซึ่งจะถูกลดประกอบด้วยเหล็กกล้าแผ่นบางเป็นรูปทรงกระบอก แบ่งเป็น 2 แบบคือ

- โรเตอร์แบบกรงกระรอก
- โรเตอร์แบบขดลวดพัน

2.1.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก แบ่งออกเป็น

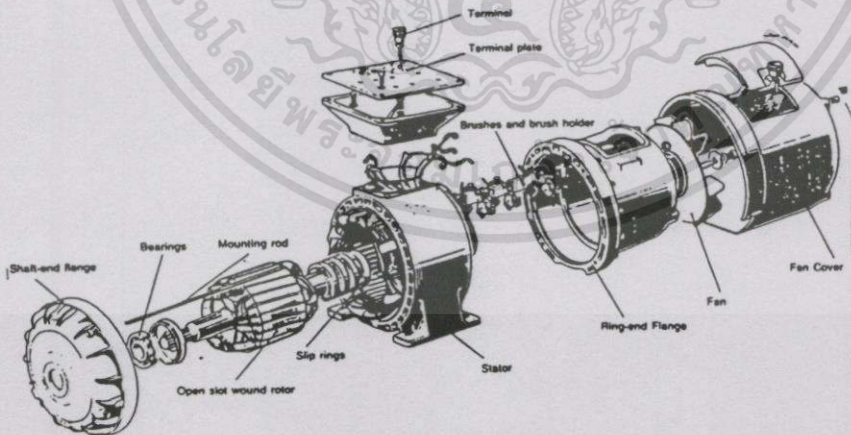
- แบบกรงกระรอกเดี่ยว (Single Cage Rotor) ในร่องด้านนอกของทรงกระบอกจะมีตัวนำฝังอยู่โดยรอบและมีทิศทางขนานกับแกน โดยที่แต่ละปลายของแกนจะต่ออยู่กับวงแหวนโลหะ (metal Ring) มอเตอร์แบบนี้จะให้แรงบิดเริ่มต้น (Starting Torque) ส่วนกระแสเริ่มต้น (Starting Current) จะมีค่าสูงกว่าปกติมาก
- แบบกรงกระรอกคู่ (Double Cage Rotor) โรเตอร์ประกอบด้วยกรงร่วมศูนย์กลาง 2 กรง (Two Concentric Cage) ซึ่งเป็นลักษณะฝังด้วยตัวนำ 2 ชั้นรอบโรเตอร์ โดยที่ด้านนอกมีตัวนำที่มีความต้านทานสูงกว่าตัวนำด้านใน ขณะเริ่มเดินเครื่องจะเกิดฟลักซ์ที่มีความถี่สูงกระแสเหนี่ยวนำจะดันฟลักซ์ไม่ให้ไปสู่กรงด้านในเป็นผลให้เกิดแรงบิดค่าสูงที่กรงด้านนอกและกระแสก็จะมีค่าลดลง หลังจากนั้นความถี่ก็จะลดลงทำให้ฟลักซ์สามารถผ่านสู่กรงด้านในได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้มอเตอร์มีโครงสร้างคล้ายกรงกระรอกเดี่ยวมอเตอร์แบบนี้จะให้แรงบิดขณะเริ่มต้นต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกมีลักษณะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก

2.1.2 โรเตอร์แบบขดลวดพัน (วงแหวนลื่น)

โรเตอร์ประกอบด้วยขดลวดพันอยู่ในร่องเช่นเดียวกับสเตเตอร์ โดยปรกติเป็นแบบ 3 เฟสจะต่อกับวงแหวนทองแดงซึ่งติดอยู่กับ โรเตอร์ มอเตอร์แบบนี้จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูงถึง 2.5 เท่าของแรงบิดปกติ และกระแสเริ่มต้นจะเป็นสัดส่วนเดียวกันกับกระแสที่ระบุ (Nominal Current) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดมีลักษณะดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน

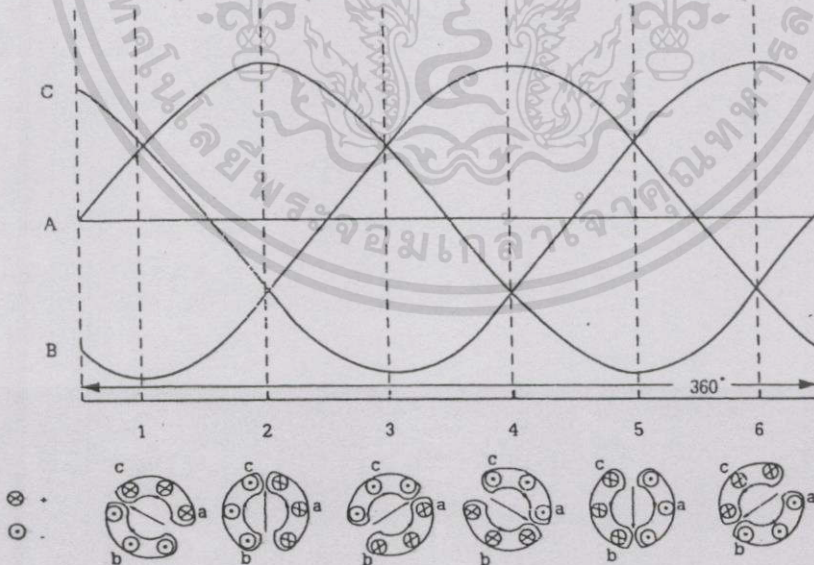
2.2 การเกิดแรงบิดและการวิเคราะห์แรงบิด

2.2.1 หลักการเบื้องต้น

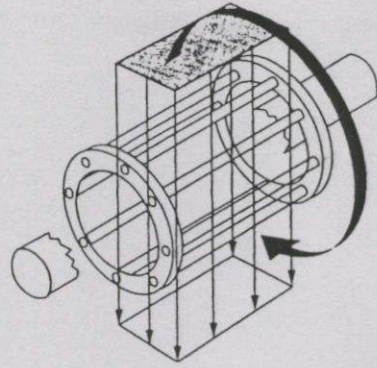
จากรูปที่ 2.1 เมื่อจ่ายไฟ 3 เฟส เข้าไปที่สเตเตอร์จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120f_s}{p} \quad (2.1)$$

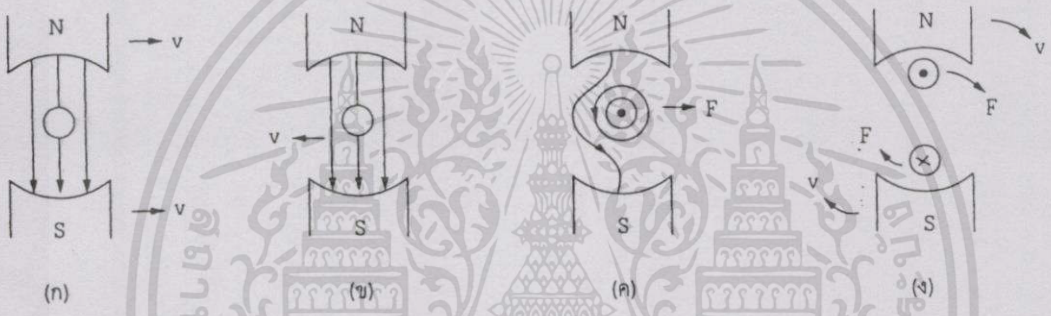
เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส มีหน่วยเป็น rpm, f_s คือความถี่ของคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป และ p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก และในทันทีที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์ที่วางอยู่ในสเตเตอร์ก็จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของโรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดังวงจร ดังรูปที่ 2.5 ทิศทางแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่เกิดขึ้น จะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้กระแสเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดขึ้นมา หลักการกำเนิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้ คือ กฎของเลนซ์ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมนี้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงขออธิบายการกำเนิดกระแสเหนี่ยวนำ และแรงบิดที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ของโรเตอร์เหนี่ยวนำ ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

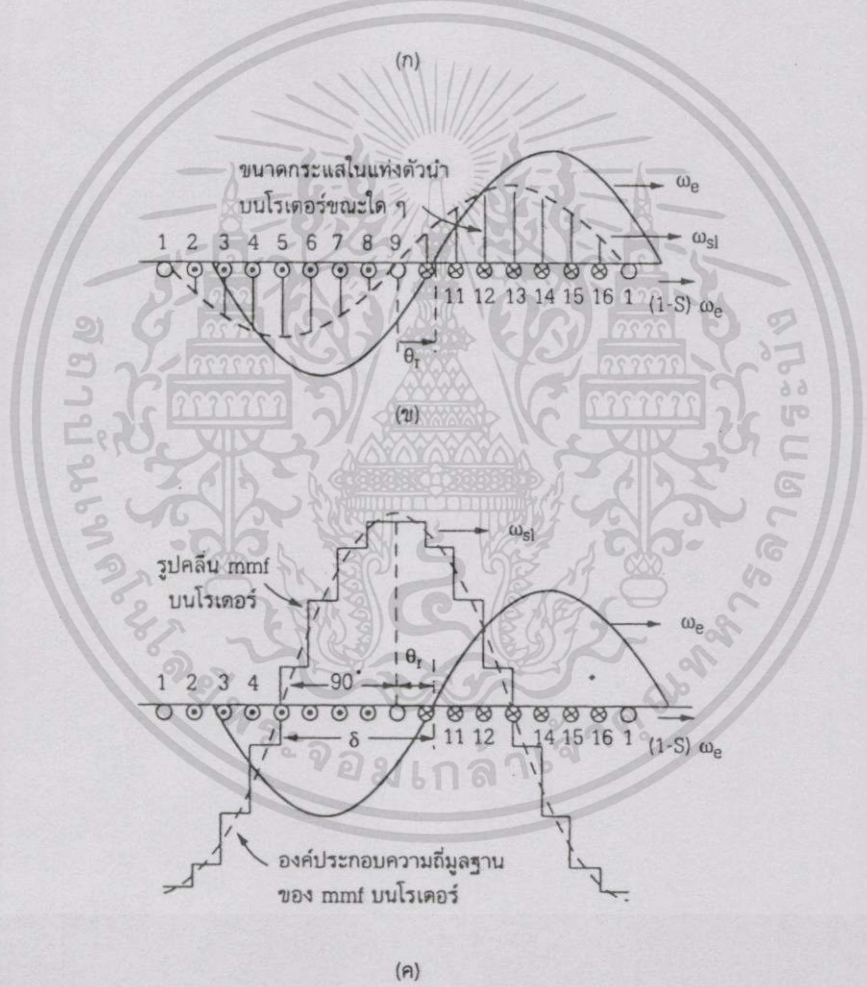
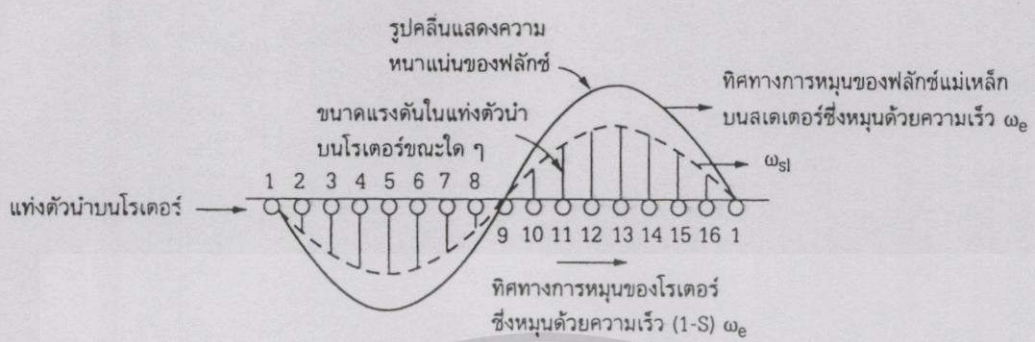


รูปที่ 2.5 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.6 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบนโรเตอร์

จากรูปที่ 2.6 (ก) สมมติว่ามีแม่เหล็กคู่หนึ่งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และให้สนามแม่เหล็กวิ่งตัดผ่านแท่งตัวนำไปด้วยความเร็ว v จากหลักการความเร็วสัมพัทธ์ เราอาจกล่าวได้ว่าจะมีผลเหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ และตัวนำถูกทำให้วิ่งไปทางซ้ายด้วยความเร็ว v แทน ดังรูป 2.6 (ข) ในกฎของเลนส์จะได้ว่า กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้องมีทิศทางที่ทำให้เกิดแรงผลักตัวนำไปทางขวา ทั้งนี้เพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ซึ่งทิศทางดังกล่าวในกรณีนี้ คือ กระแสต้องมีทิศออกจากหน้ากระดาษ ดังรูป 2.6 (ค) เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำ 2 ตัว ที่ประกบกันเป็นโรเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กของหมุนของสเตเตอร์หมุนตัดผ่าน ก็จะทำให้ได้แรงบิดเกิดขึ้นบนโรเตอร์ ตามรูป 2.6 (ง) และนี่คือหลักการกำเนิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.7 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ คือ แรงที่ทำให้เกิดแรงบิดบนตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ รูปที่ 2.7 (ก) แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_s ตัดผ่านโรเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว ω_r ทำให้โรเตอร์รู้สึกว่ามีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านด้วยความเร็ว ω_s ผลลัพธ์นี้เองทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าความถี่ f_s โดยเส้นตรงแนวตั้งแสดงขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำ และแท่งที่ฝังอยู่บนตัวโรเตอร์ รูปที่ 2.7 (ข) แสดงการเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ซึ่งจะล่าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่ด้วยมุม ω_r โดยกระแสเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เพราะเป็นผลตอบสนองของอิมพีแดนซ์ (impedance) บนโรเตอร์ต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น รูปที่ 2.7 (ค) แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นบนโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้เกิดจากกระแส I_r ที่ไหลผ่านแท่งตัวนำแต่ละแท่งในทิศทางคircular ทำให้เกิดการเสริมกันของสนามแม่เหล็กแต่ละคู่ ขดลวดจากวงในถึงวงนอกเกิดเป็นสนามแม่เหล็กคircular ที่มีลักษณะเป็นขั้วบน โคนและมีความถี่มูลฐานคงเส้นประ จากรูปจะเห็นว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์นี้ล่าหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์อยู่ถึง $90 + \omega_r$ ซึ่งนิยามให้ค่ามุมนี้คือ θ และมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω_s เทียบกับโรเตอร์

ในการทำงานโรเตอร์จะไม่สามารถไล่ตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ได้ทัน เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นก็จะทำให้ความเร็วระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ไม่แตกต่างกัน อันจะส่งผลให้โรเตอร์ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสและแรงบิดในการรักษาสภาพการหมุนของโรเตอร์ได้ และเป็นเหตุผลว่าทำไมโรเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์เสมอ ความแตกต่างของความเร็วดังกล่าวขึ้นอยู่กับภาระของมอเตอร์ ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส N_s และความเร็วตามความเป็นจริง N_r คือโรเตอร์ของสลิป (slip) แม้สลิปอาจแสดงให้เห็นในการหมุนหลายๆ รอบ / วินาที เป็นปรกติธรรมดาที่สลิปจะแสดงผลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส

$$\% \text{ slip } s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.2)$$

ความแตกต่างระหว่าง $N_s - N_r$ บางครั้งถูกเรียกว่าความเร็วสลิป

$$\text{จะเห็นว่าความเร็วของโรเตอร์นั้น } N_r = N_s(1-s) \quad (2.3)$$

2.2.2 ความถี่ของกระแสโรเตอร์

เมื่อโรเตอร์หยุดนิ่ง ความถี่ของกระแสโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่าย และเมื่อโรเตอร์เริ่มหมุนความถี่ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเร็ว หรือความเร็วสลลิป ที่ความเร็วสลลิปใดๆ ความถี่ของกระแสโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ f'

$$N_s - N_r = \frac{120f'}{P} \quad (2.4)$$

และจากสมการที่ (2.1)

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

หารสมการที่ (2.3) ด้วย N_s จะได้

$$\frac{f'}{f} = \frac{N_s - N_r}{N_s} = s \quad (2.5)$$

เพราะฉะนั้น

$$f' = sf \quad (2.6)$$

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตัวประกอบกำลังของโรเตอร์

ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงบิดจะสัมพันธ์กับการผลิตฟลักซ์ต่อขั้วของสเตเตอร์และกระแสของโรเตอร์ อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่สามารถอธิบายได้อีก เช่น ตัวประกอบกำลังของโรเตอร์

$$T \propto \Phi I_2 \cos \phi_2 \quad \text{หรือ}$$

$$T = k \Phi I_2 \cos \phi_2 \quad (2.7)$$

เมื่อ I_2 เป็นกระแสของโรเตอร์

ϕ_2 เป็นมุมระหว่างแรงดันและกระแสของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k เป็นค่าคงที่

แรงดันของโรเตอร์ที่สภาวะหยุดนิ่ง จะแสดงให้เห็นว่า $E_2 \propto \Phi$ จึงทำให้

$$T \propto E_2 I_2 \cos \phi_2 \quad (2.8)$$

เมื่อ k_1 เป็นค่าคงที่อื่นๆ

2.2.4 แรงบิดขณะเริ่มต้น

แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นที่ขณะการเริ่มต้นหนึ่ง เรียกว่า “แรงบิดขั้นต้น” (starting torque) ซึ่งในบางกรณีจะมีค่ามากกว่าแรงบิดในขณะมอเตอร์หมุนตามปกติ

ให้ E_2 เป็นแรงดันโรเตอร์ต่อเฟสขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง

R_2 เป็นความต้านทานของโรเตอร์

X_2 เป็นรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสที่มอเตอร์หยุดนิ่ง

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$$

เป็นอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่มอเตอร์หยุดนิ่ง

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

(2.9)

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.10)$$

แรงบิดขณะหยุดนิ่งหรือกำลังเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งค่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{st} = k_1 E_2 I_2 \cos \phi_2 \quad (2.11)$$

$$= k_1 E_2 \frac{E_2}{\sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}} \times \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{k_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.12)$$

ถ้าแรงดันแหล่งจ่าย V คงที่ขณะที่ฟลักซ์ (Φ) และ E_2 คงที่ด้วย จะได้ว่า

$$T_{st} = k_2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.13)$$

$$= k_2 \frac{R_2}{Z_2^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ k_2 เป็นค่าคงที่

2.2.5 เงื่อนไขสำหรับค่าแรงบิดเริ่มต้นสูงสุด

แรงบิดเริ่มต้นของโรเตอร์ สามารถพิสูจน์ได้ว่ามีค่าสูงสุดเมื่อความต้านทานของโรเตอร์เท่ากับรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์

$$T_{st} = \frac{k_2 R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

$$\therefore \frac{dT_{st}}{dR_2} = k_2 \left[\frac{1}{R_2^2 + X_2^2} - \frac{R_2(2R_2)}{(R_2^2 + X_2^2)^2} \right] = 0$$

หรือ

$$R_2^2 + X_2^2 = 2R_2^2 \quad (2.15)$$

$$\therefore R_2 = X_2 \quad (2.16)$$

2.2.6 ผลการเปลี่ยนแรงดันของแหล่งจ่ายที่แรงบิดเริ่มต้น

พิจารณาสมการแรงบิดเริ่มต้น

$$T_{st} = \frac{k_2 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

$E_2 \propto$ แรงดันแหล่งจ่าย V

$$T_{st} = \frac{k_3 V^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{k_3 V^2 R_2}{Z_2^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ k_3 เป็นค่าคงที่

\therefore สรุปได้ว่า $T_{st} \propto V^2$

แรงบิดจะมีความไวสูงไม่ว่าจะเป็นการเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายใดๆ ก็ตาม โดยการเปลี่ยนแปลงเพียง 5% ของแหล่งจ่าย จะทำให้แรงบิดที่โรเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงประมาณ 25% ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้การสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีสตาร์ทเดลต้า (Start Delta) และออโต้

ทรานฟอเมอร์ (Auto Transformer)

2.2.7 แรงดันโรเตอร์และรีแอกเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการหมุนโรเตอร์

ให้ E_2 เป็นแรงดัน โรเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

X_2 เป็นโรเตอร์รีแอกแตนซ์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

f_2 เป็นความถี่ของกระแสขณะหยุดนิ่ง

ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ สลิป (s) = 1 ความถี่ของแรงดัน โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายของสเตเตอร์ ค่าของค่านเหนี่ยวนำใน โรเตอร์ขณะหยุดนิ่งจะมีค่าสูงสุด เพราะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์และการหมุนรอบ พลิกซ์ของสเตเตอร์จะมีค่าสูงสุดในความเป็นจริงจะเหมือนกับหม้อแปลง 3 เฟส ด้วยการช้อตวงจรด้านทุติยภูมิ

เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับความเร็วของสนามแม่เหล็กของการหมุนของสเตเตอร์จะมีค่าลดลง ดังนั้นแรงเหนี่ยวนำของโรเตอร์ซึ่งเป็นความสัมพันธ์โดยตรงกับความสัมพันธ์ของความเร็วนี้ ก็จะลดลงด้วย ดังนั้นสำหรับสลิป (s) แรงดันเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะเป็นเวลา (s) ของแรงดันเหนี่ยวนำขณะหยุดนิ่ง

$$\text{เพราะฉะนั้นภายใต้เงื่อนไขของการหมุน } E_r = sE_2 \quad (2.18)$$

$$\text{ความถี่ของแรงดันเหนี่ยวนำจะเป็น } f_r = sf_2 \quad (2.19)$$

เนื่องจากการลดความถี่ในแรงดันโรเตอร์ จะทำให้โรเตอร์รีแอกแตนซ์ลดลงด้วย

$$X_r = sX_2 \quad (2.20)$$

เมื่อ E_r และ X_r เป็นแรงดันโรเตอร์และรีแอกแตนซ์ภายใต้เงื่อนไขการหมุนของโรเตอร์

2.2.8 แรงบิดภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่อง

$$T \propto E_r I_r \cos \phi_2 \quad \text{หรือ} \quad T \propto \Phi I_r \cos \phi_2$$

เมื่อ E_r เป็นแรงดันโรเตอร์ต่อเฟสภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่อง
 I_r เป็นกระแสโรเตอร์ต่อเฟสภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่อง

$$\text{ขณะที่ } E_r = sE_2$$

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (2.21)$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้น

$$T \propto \frac{s\Phi E_2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2}$$

เมื่อ k_1 เป็นค่าคงที่ พิสูจน์แล้วมีค่าเท่ากับ $3/2 \pi N_s$

$$\begin{aligned} \therefore T &= \frac{3}{2\pi N_s} \cdot \frac{sE_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \\ &= \frac{3}{2\pi N_s} \cdot \frac{sE_2^2 R_2}{Z_r^2} \end{aligned} \tag{2.23}$$

ที่ขณะหยุดนิ่ง เมื่อ $s = 1$

$$T_{st} = \frac{k_1 E_2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \tag{2.24}$$

2.2.9 แรงบิดสูงสุดในสภาวะที่มอเตอร์กำลังหมุน

แรงบิดของโรเตอร์ภายใต้สภาวะการหมุนเป็น

$$T_{st} = \frac{k\Phi s E_2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} = k_1 \frac{sE_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \tag{2.25}$$

สภาวะที่แรงบิดมีค่าสูงสุด อาจได้รับการจำแนกสมการที่ (2.25) เกี่ยวข้องกับค่าของส

ลิป (s) ในขณะที่สลิปเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามอาจกำหนดให้ $Y = \frac{1}{T}$ และจะได้ว่า

$$Y = \frac{R_2^2 + (sX_2)^2}{k\Phi s E_2 R_2} = \frac{R_2}{k\Phi_s E_2} + \frac{sX_2^2}{k\Phi E_2 R_2} \tag{2.26}$$

$$\frac{dy}{ds} = \frac{-R_2 + (sX_2)^2}{k\Phi s^2 E_2} + \frac{X_2^2}{k\Phi E_2 R_2} = 0$$

$$\therefore \frac{R_2}{k\Phi s^2 E_2} = \frac{X_2^2}{k\Phi E_2 R_2} \quad \text{หรือ}$$

$$R_2^2 = s^2 X_2^2 \text{ หรือ } R_2 = sX_2 \quad (2.27)$$

ดังนั้นแรงบิดภายใต้เงื่อนไขการหมุนของโรเตอร์มีค่าสูงสุดที่ค่าน้ำของสลิป (s) ซึ่งสร้างรีแอคแทนซ์ของโรเตอร์ต่อเฟสให้มีค่าเท่ากับความต้านทานของโรเตอร์ต่อเฟส สลิปที่ค่ารีแอคแทนซ์และความต้านทานของโรเตอร์ที่มีค่าเท่ากันนี้ บางครั้งเรียกว่า S_0 และแรงบิดสูงสุดเรียกว่า T_0 การสอดคล้องของสลิปถึงแรงบิดสูงสุดคือ

ประมาณว่า

$$s = \frac{R_2}{X_2}$$

$$R_2 = sX_2 \quad \text{ในสมการข้างบนของแรงบิด โดยให้}$$

$$T_{max} = \frac{k\Phi s^2 E_2 X_2}{2s^2 X_2^2} \quad (2.28)$$

แทนค่าของ

$$s = \frac{R_2}{X_2} \text{ ในสมการที่ (28) จะได้ว่า}$$

$$T_{max} = k_1 \frac{(R_2/X_2) * E_2^2 * R_2}{R_2^2 + (R_2/X_2)^2 * X_2^2} = k_1 \frac{E_2^2}{2X_2} \quad (2.29)$$

แต่ $k_1 = 3/2\pi N_s$ จะได้ว่า

$$T_{max} = \frac{3}{2\pi N_s} \times \frac{E_2^2}{2X_2} \quad \text{N-m} \quad (2.30)$$

จากที่กล่าวมาจะพบได้ว่า

1. แรงบิดสูงสุดนั้นไม่ขึ้นกับความต้านทานของโรเตอร์
2. อย่างไรก็ตามความเร็วของแต่ละสลิปที่แต่ละแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่ถูกกำหนดโดยความต้านทานโรเตอร์ จากที่กล่าวมาแรงบิดจะมีค่าสูงสุดเมื่อรีแอกแตนซ์เท่ากับความต้านทานของโรเตอร์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของโรเตอร์ แรงบิดสูงสุดที่สามารถสร้างขึ้นจะเกิดขึ้นที่ค่าสลิปที่ต้องการได้
3. แรงบิดสูงสุดจะแปรผกกลับที่รีแอกแตนซ์ขณะ โรเตอร์หยุดนิ่ง ดังนั้นจึงควรให้มีค่าน้อยๆ ดีที่สุด
4. แรงบิดสูงสุดจะแปรผันตรงกับแรงดันกำลังสอง
5. การแทนที่แรงบิดสูงสุดที่เริ่มการหมุน ($s=1$) ความต้านทานของโรเตอร์ต้องเท่ากับรีแอกแตนซ์

2.2.10 แรงบิดและแรงบิดที่ควบคุมไม่ได้ของโรเตอร์

แรงบิดหมุนของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ สามารถแสดงออกให้เห็นในช่วงระยะหนึ่งของแรงบิดสูงสุด T_b ดังสมการ

$$T = \left[\frac{2}{(s_b/s) + (s/s_b)} \right] \quad (2.31)$$

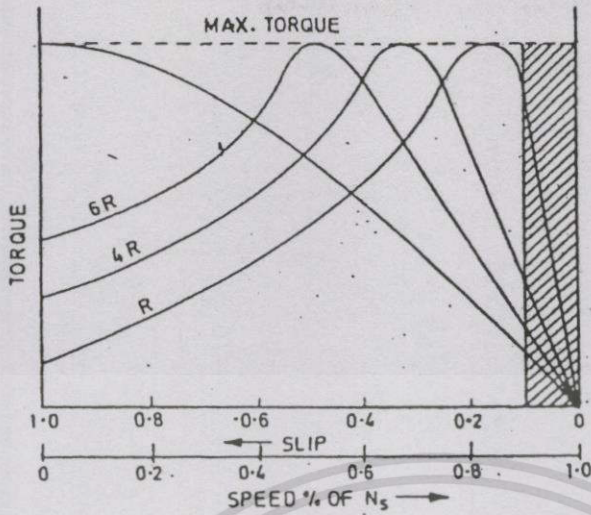
เมื่อ s_b คือค่าสลิปที่ควบคุมไม่ได้

2.2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป

เส้นโค้งของแรงบิดต่อสลิป ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โดยช่วงของ $s=0$ ถึง $s=1$ โดยมี R_2 เป็นตัวกำหนด

$$T = \left[\frac{k\Phi s E_2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \right] \quad (2.32)$$

เมื่อ $s=0$, $T=Q$ ดังนั้นเส้นกราฟจะเริ่มจาก 0



รูปที่ 2.8 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลลิป

ในเทอมของ (sX_2) เป็นค่าที่น้อยมาก จึงต้องตัดทิ้งไป และได้สมการใหม่เป็น

$$T \propto \left[\frac{s}{R_2} \right] \quad \text{หรือ}$$

$$T \propto s \quad \text{ถ้า } R_2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

ดังนั้นเมื่อสลลิปมีค่าน้อย เส้นกราฟของแรงบิดต่อสลลิปจึงเกือบเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับสลลิปที่เพิ่มขึ้น (สำหรับการเพิ่มของภาระที่มอเตอร์) แรงบิดที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$s = \left[\frac{R_2}{X_2} \right]$$

ซึ่งจะเรียกแรงบิดนี้ว่าพูล เอาร์ท์ หรือ เบริคควาน์ ทอร์ค T_b หรือ สทอลลิ่ง ทอร์ค เมื่อสลลิปเพิ่มขึ้น (มอเตอร์มีความเร็วที่น้อยลง) ภาระของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ R_2 มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับ (sX_2) ∴ สำหรับค่าสลลิปสูงๆ

$$T\alpha \left[\frac{s}{(sX_2)^2} \right] \alpha \frac{1}{s}$$

ดังนั้นเส้นโค้งของแรงบิดต่อสลิปจะเป็นรูปสามเหลี่ยมไฮเพอร์โบลา ซึ่งจะเห็นจุดที่แรงบิดมีค่าสูงสุด ผลของการที่ภาระของมอเตอร์เพิ่มขึ้น จะไปลดการเพิ่มขึ้นของแรงบิดเมื่อมอเตอร์ทำงานช้าลงและหยุดในที่สุด วงจรที่หยุดทำงานจะเปิด ถ้าวางจนวนั้นมีการป้องกันการลัดวงจรอยู่ ซึ่งในความเป็นจริงการทำงานที่เสถียรของมอเตอร์ มอเตอร์ที่มีค่า $s = 0$ จะสอดคล้องกับแรงบิดสูงสุด ดังภาพที่ 6

จะเห็นได้ว่า แรงบิดสูงสุดจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของ R_2 แต่จะขึ้นอยู่กับ R_2 ที่มีค่ามากกว่าค่าของสลิปมากๆ ซึ่งจะเกิดเป็นค่าแรงบิดสูงสุดได้

2.3 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กระแสของโรเตอร์ I_2' และกระแสของสเตเตอร์ I_1 สามารถดูได้จากรูปวงจรที่ 2.9 เมื่อ R_2' และ X_2' ถูกอ้างไปถึงขดลวดทางสเตเตอร์ อีกค่าหนึ่งของ I_2' และ I_1 ที่รู้จักแสดงให้เห็นพารามิเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส และนิยามได้ว่า ความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)

$$P_{su} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.33)$$

ความสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

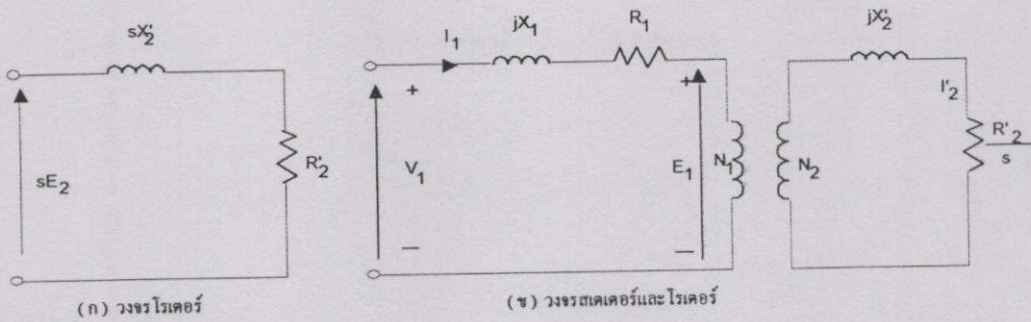
$$P_{ru} = 3I_2'^2 R_2' \quad (2.34)$$

ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

$$P_c = \frac{3V_m^2}{R_m} \approx \frac{3V_1^2}{R_m} \quad (2.35)$$

กำลังงานระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ผ่านช่องอากาศ (Gap Power)

$$P_g = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.9 แบบของวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(Develop Power)

$$P_d = P_g - P_m = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} (1-s) = P_g (1-s) \tag{2.37}$$

แรงบิดที่เกิดขึ้น (Develop Torque)

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{P_g (1-s)}{\omega_s (1-s)} = \frac{P_g}{\omega_s} \tag{2.38}$$

กำลังงานอินพุท

$$P_i = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \tag{2.39}$$

$$= P_c + P_{su} + P_g \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานเข้าที่พู่ท

$$P_o = P_d - P_{no\ load} \quad (2.41)$$

ประสิทธิภาพ (Efficiency)

$$\eta = \frac{P_o}{P_I} = \frac{P_D - P_{no\ load}}{P_c + P_{su} + P_g} \quad (2.42)$$

ถ้า $P_g \gg (P_c + P_{su})$ และ $P_g \gg P_{no-load}$ ประสิทธิภาพจะเสมือนเป็น

$$\eta = \frac{P_d}{P_g} = \frac{P_g(1-s)}{P_g} = 1-s \quad (2.43)$$

ค่าของ X_m ปกติจะมีค่ามากกว่า R_m จึงสามารถเอาค่า R_m ซึ่งน้อยกว่าออกไป สูตรคำนวณได้ว่า

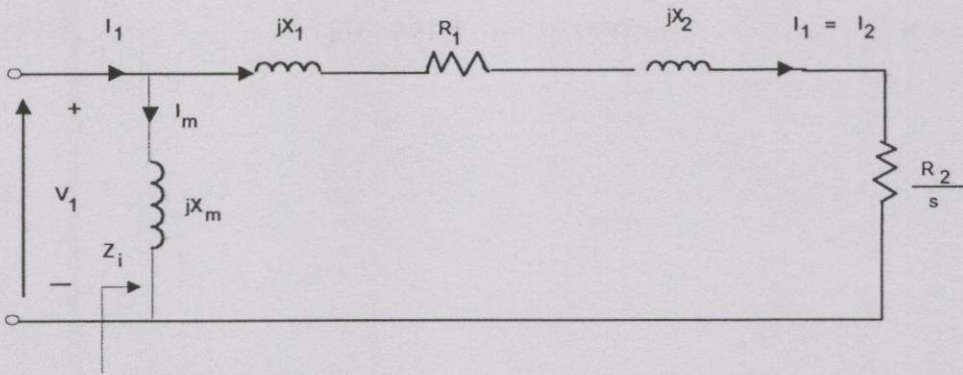
ถ้า $X_m \gg (R_1^2 + X_1^2)$ แล้ว $V_1 \approx V_m$ และค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็ก X_m อาจถูกส่งไปทางขดลวดสเตเตอร์เป็นวงจรวง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.10

ความต้านทานอินพุทของมอเตอร์จะกลายเป็น

$$Z_1 = \frac{-X_m(X_1 + X_2') - j_{xm}(R_1 - R_{1/s'})}{R_1 - R_{1/s} + j(X_m + X_1 - X_2')} \quad (2.44)$$

และมุมของตัวประกอบกำลังของโรเตอร์เป็น

$$\phi_1 = \frac{\pi - \tan^{-1} R_1 + R_{1/s}}{X_1 + X_2'} + \frac{\tan^{-1} X_m + X_1 - X_2'}{R_1 + R_2'/s} \quad (2.45)$$



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเฟสเดียวของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.10 กระแส rms ของโรเตอร์จะเป็น

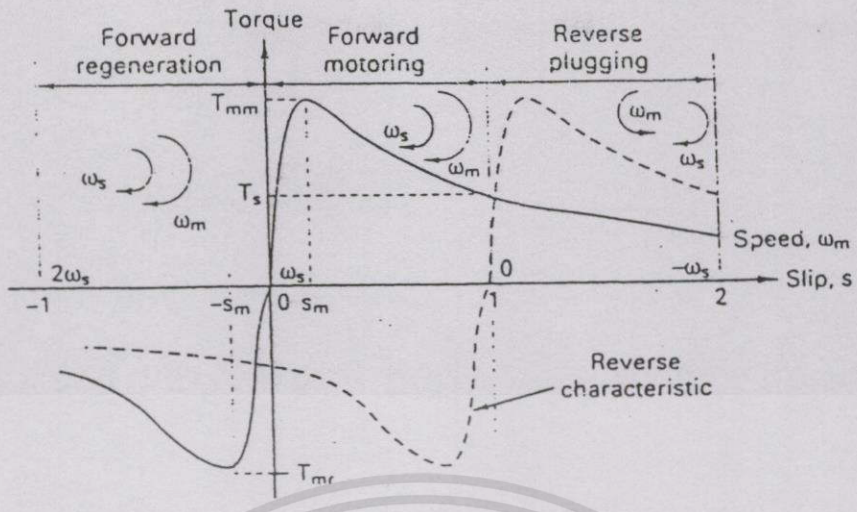
$$I_2' = \frac{V_1}{\left[(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]^{1/2}} \quad (2.46)$$

แทนสมการที่ (2.46) ลงในสมการที่ (2.36) และแทน P_g ลงในสมการที่ (2.38) ผลปรากฏ คือ

$$T_d = \frac{3R_2'V_1^2}{s\omega_s \left[(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (2.47)$$

ถ้ามอเตอร์มีการส่งแรงดันที่คงที่ ω ความถี่ที่คงที่แล้ว มอเตอร์จะเกิดแรงบิดหมุนที่เพลาของมอเตอร์ในฟังก์ชันของค่าสลิปที่เปลี่ยนแปลงไป ดังในรูปที่ 9 ซึ่งจะมีย่านการทำงานอยู่ 3 ด้าน คือ

1. ย่านที่ทำงานเป็นมอเตอร์ เป็นย่านระหว่าง $0 \leq s \leq 1$
2. ย่านการเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานเข้าระบบได้ ซึ่งเป็นย่านการทำงานที่ $s < 0$ และ
3. ย่านการทำงานเป็นเบรกในย่าน $1 \leq s \leq 2$



รูปที่ 2.11 ลักษณะความเร็วของแรงบิด

2.4 การควบคุมมอเตอร์ให้ใช้พลังงานต่ำสุด

จากสมการ (2.47) จะเห็นว่าแรงบิดจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันแหล่งจ่ายของสเตอร์ โดยแรงดันของสเตเตอร์ที่ลดลงจะทำให้ความเร็วลดลงด้วย ถ้ากำหนดให้แรงดันมีค่าลดลงเป็น bV_1 แรงดันจะถูกสร้างขึ้นดังแสดงให้เห็นในสมการที่ (2.48)

$$T_d = \frac{3R_2'(bV_1)^2}{s\omega_s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 - X_2')^2]} \tag{2.48}$$

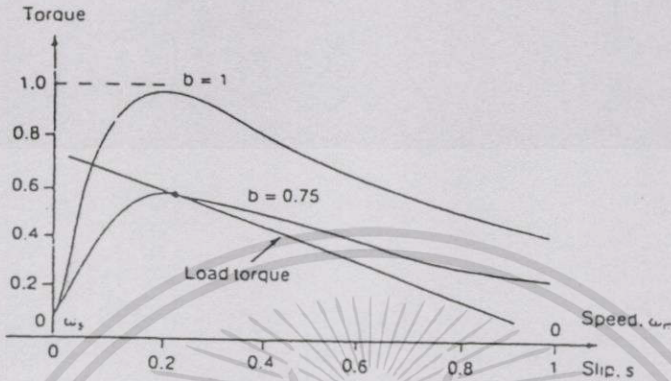
เมื่อ $b \leq 1$

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว ที่มีค่าของ b หลายค่า จุดที่แสดงการทับกันของเส้นแสดงค่าภาระ (load line) จะบ่งบอกถึงจุดการทำงานที่คงที่ ที่วงจรสนามแม่เหล็กใดๆ แรงดันเหนี่ยวนำของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์และความถี่ และค่า rms ของแอร์แก่ป ฟลักซ์ สามารถพิสูจน์โดย

$$V_a = bV_1 = K_m\omega\Phi \text{ หรือ}$$

$$\Phi = \frac{V_a}{K_m\omega} = \frac{bV_1}{K_m\omega}$$

เมื่อ K_m เป็นค่าคงที่ และขึ้นกับจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ เมื่อแรงดันสเตเตอร์ลดลง แอร์แก๊ป ฟลักซ์และแรงบิดจะลดลงด้วย



รูปที่ 2.12 ลักษณะแรงบิด-ความเร็ว กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันสเตเตอร์

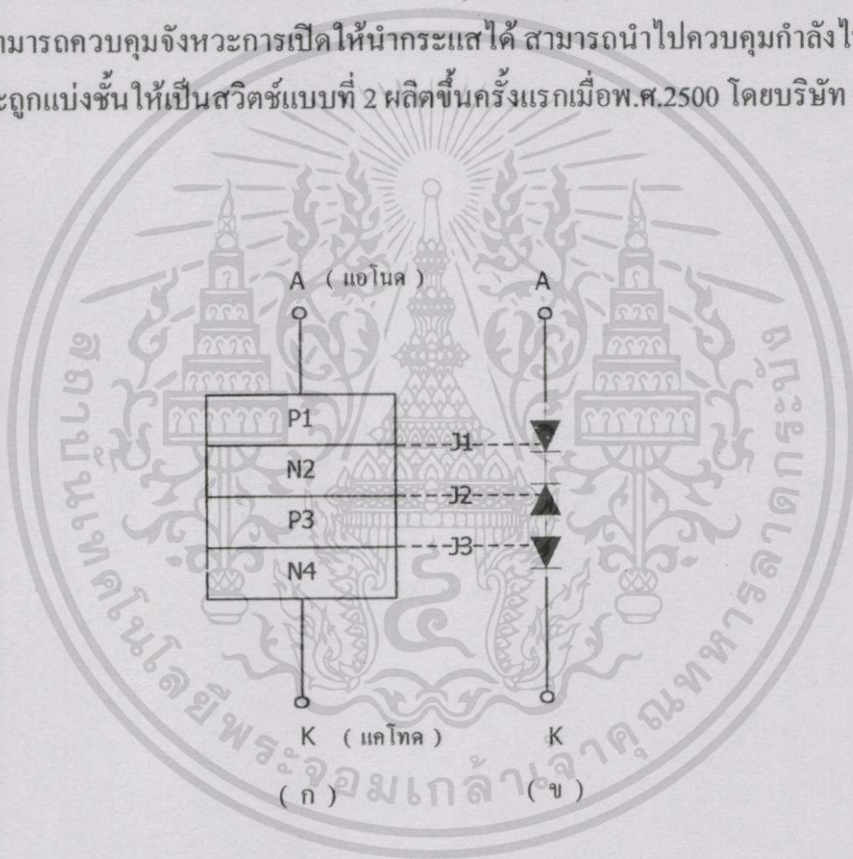
แรงดันที่ต่ำลงกระแจะสูงขึ้น ที่สลิปของ $s_u = 1/3$ ช่วงของการควบคุมความเร็วขึ้นอยู่กับสลิปที่แรงบิดสูงสุด s_m สำหรับมอเตอร์ที่มีค่าสลิปต่ำ ช่วงของความเร็วจะแคบมาก ชนิดของการควบคุมแรงดันแบบนี้จะไม่เหมาะสม สำหรับภาระคงที่ของแรงบิด โดยปกติจะถูกนำไปใช้กับแรงบิดเริ่มต้นที่มีค่าต่ำตามความต้องการ และช่วงแคบของความเร็วที่สัมพันธ์กับสลิปต่ำๆ

บทที่ 3

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1 ไคริสเตอร์

ไคริสเตอร์เป็นชื่อรวมหรือชื่อตระกูล (family name) ของสิ่งประดิษฐ์ทางสถานะของแข็ง (solid-state) ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นสลับกันเป็นชั้นๆ ตั้งแต่สี่ชั้นขึ้นไป ซึ่งทำให้เกิดมีรอยต่อพีเอ็นสามารถย่นต่อขึ้นไปเรียงเป็นอนุกรม ดังรูปที่ 3.1 สามารถทำหน้าที่เป็นสวิทช์เปิดวงจร สามารถควบคุมจังหวะการเปิดให้นำกระแสได้ สามารถนำไปควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ และถูกแบ่งชั้นให้เป็นสวิทช์แบบที่ 2 ผลิตขึ้นครั้งแรกเมื่อพ.ศ.2500 โดยบริษัท เจเนอรัล อิเล็กทริก



รูปที่ 3.1 (ก) การเรียงสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นเป็นชั้นๆ PNPN

(ข) รูปสมมูลของสิ่งประดิษฐ์ PNPN เป็นไดโอดสามตัวต่อเรียงกัน

ไคริสเตอร์มีสมาชิกหลายชนิดซึ่งอาจมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทางเดียว หรือให้กระแสไหลได้สองทาง และอาจจะมีขั้ว สองขั้ว สามขั้ว หรือสี่ขั้ว ดังเช่น

เอสซีอาร์ เป็นไคริสเตอร์ชนิดมีสามขั้ว คือ แอนโอด แคโทด และเกต มีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวจากแอนโอดไปยังแคโทด และอาจเรียกชื่อว่า ไดโอด ไคริสเตอร์ที่กั้นไม่ให้กระแสไหลกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไตรแอนด์ เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีสามขั้ว คือ เกต และอีกสองขั้วเป็นได้ทั้งแอนโอดและแคโทด เพราะว่าไตรแอนด์มีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้สองทิศทาง และอาจเรียกชื่อว่า ไตรโอด ทรานซิสเตอร์ ที่ให้กระแสไหลได้สองทิศทาง

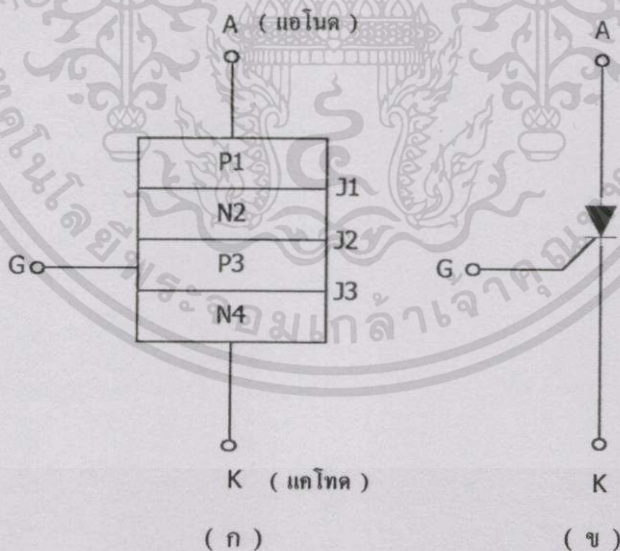
เอสซีเอส เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีสี่ขั้ว คือ แอนโอด แคโทด เกตบวก และเกตลบ มีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว และอาจเรียกชื่อว่า เดโตรด ทรานซิสเตอร์ที่กันไม่ให้กระแสไหลกลับ

เอสยูเอสหรือช็อคเลย์ไดโอด เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีสองขั้ว คือ แอนโอดกับแคโทด และมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว เป็นต้น

เนื่องจากเอสซีอาร์และไตรแอนด์สามารถนำกระแสขนาดใหญ่มากและนิยมนำไปใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ จึงขออธิบายละเอียดถึงเอสซีอาร์และไตรแอนด์เท่านั้น

3.1.1 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้ว เรียกว่า แอนโอด แคโทด และเกต ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายรูปที่ 3.1 ยกเว้นแต่ว่าที่ชั้นของสาร P_3 มีขั้วเกต (G) เข้าต่อติด ดังรูปที่ 3.2 (ก) และเขียนสัญลักษณ์แทนด้วยรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.2 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์

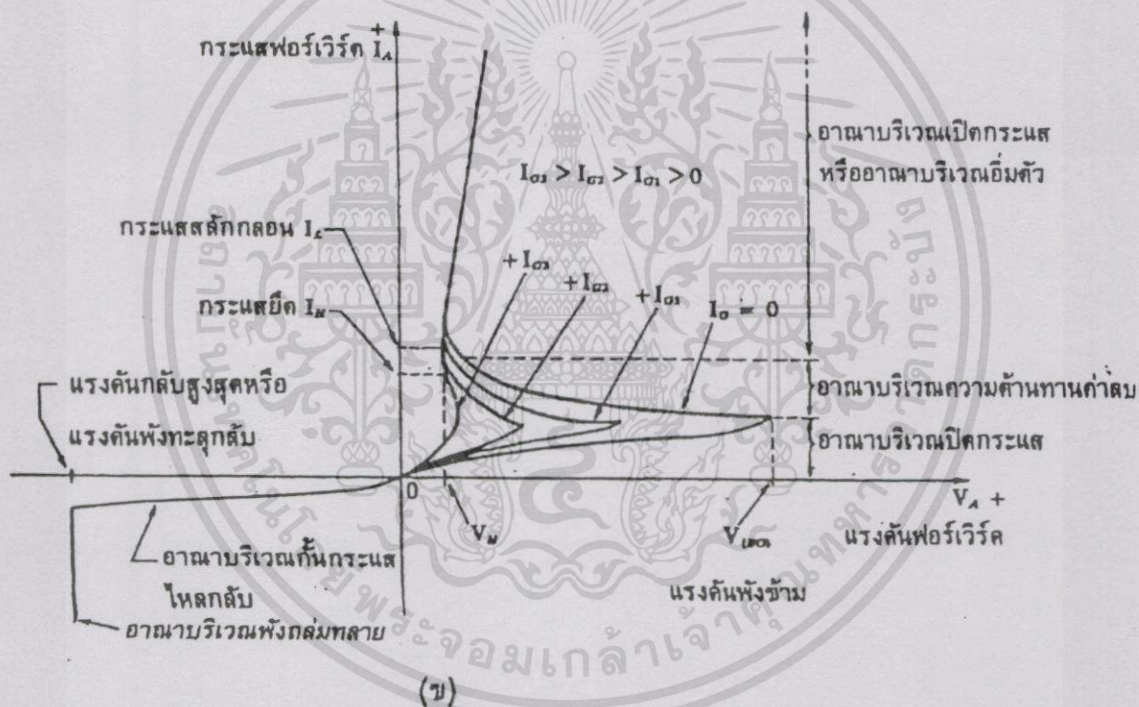
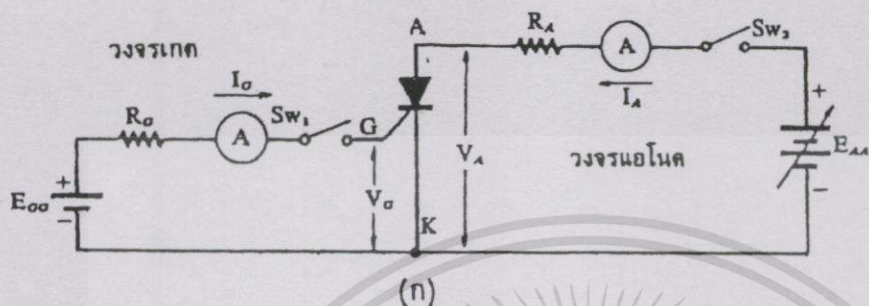
(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้างดังรูป 3.3 (ก) ถ้าปิดสวิตช์ Sw_1 และ Sw_2 ลงแล้วปรับค่า

แรงดันเฉลี่ยวงจรแอนโอด E_{AA} และวงจรเกต E_{GG} ให้เหมาะสม จะได้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังรูป 3.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกขาดในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) โดยยึดหลักว่า กระแสไอโนด I_A และกระแสเกต I_G มีค่าบวกถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วของเอสซีอาร์ และแรงดันแอโนด V_A แรงดันเกต V_G มีค่าบวก ถ้าแอโนดและเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังรูป 3.3 (ก)



รูปที่ 3.3 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์ Sw_1 ไว้ ปิดสวิตช์ SW_2 ลง และให้แรงดันแอมโพล V_A มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้ $I_G = 0$ แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอมโพลจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวก หรือในทิศฟอว์เวิร์ดเราจะเห็นกระแส I_A เพิ่มขึ้นจากศูนย์เพียงเล็กน้อย เรียกว่า "เอสซีอาร์อยู่ในภาวะปิดกระแส" แต่เมื่อแรงดัน V_A เพิ่มขึ้นสูงถึงค่า $V_{(BO)}$ เรียกว่า "แรงดันพังข้าม" แล้วเอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เองโดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่งเรียกว่า "เวลาเปิดกระแส" เราเรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณปิดกระแส หรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิศฟอว์เวิร์ด"

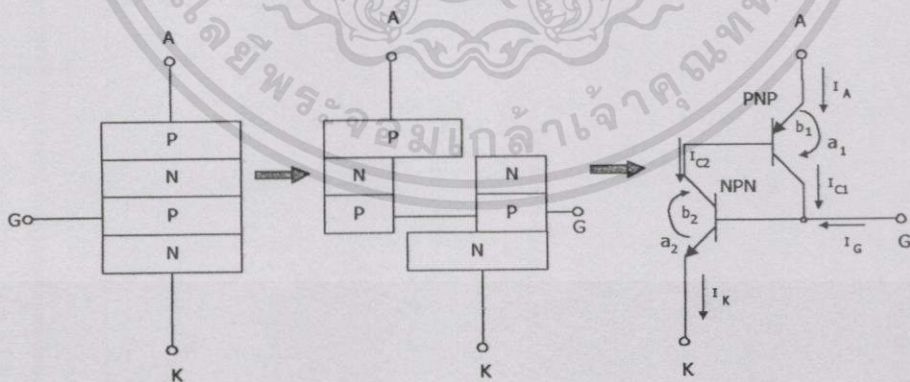
ถ้าควบคุมกระแส I_A ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มค่าแรงดันแอมโพล E_{AA} จะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_A ดังรูป 3.3 (ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน V_A นี้ได้ผ่านค่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ ไปสู่ค่า V_H และกระแส I_A เพิ่มขึ้นสูงขึ้นไป (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$) ไปสู่ค่า I_H (อยู่ตรงจุดเกิด V_H) โดยกระแส I_H นี้เป็นค่าที่น้อยที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแส เรียกกระแสนี้ว่า "กระแสขีด หรือ กระแสโหดดึง" โดยช่วงนี้เป็นช่วงของการที่เอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณของความต้านทานค่าลบ" ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส I_A มีค่าใหญ่กว่ากระแสขีด I_H เล็กน้อยไปถึงค่าที่ใหญ่มาก โดยแรงดันแอมโพลเพิ่มค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เรียกช่วงที่สองนี้ว่า "อาณาบริเวณเปิดกระแส หรือ อาณาบริเวณอิมพัลส์" กระแส I_A ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มากจะสามารถทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ให้ชำรุดเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน R_A ที่มีค่าใหญ่เข้าคือเป็นอนุกรมในวงจรแอมโพลเพื่อจำกัดกระแส I_A ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าเราต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสภาวะเปิดกระแสเปลี่ยนกลับไปสู่สภาวะปิดกระแส ให้ลดกระแสแอมโพล I_A ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสขีด I_H ในขณะที่ $I_G = 0$ ยังมีกระแสอีกชนิดหนึ่งคือ "กระแสสลักกลอน" I_L ซึ่งนิยามว่าเป็นกระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแสทันทีทันใด ภายหลังจากเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสไปสู่สภาวะเปิดกระแสโดยปลดเอาสัญญาณป้อนเข้าเกิดออกซึ่งเมื่อลดกระแส I_H ให้ต่ำกว่ากระแส I_L ได้แล้ว เอสซีอาร์จะหยุดเปิดกระแส เรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณปิด" กระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิศฟอว์เวิร์ด การเปลี่ยนสถานะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า "เวลาปิดกระแส" การลดกระแสแอมโพลให้ต่ำกว่ากระแสสลักกลอน I_L แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นใหม่ ในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิดกระแสของเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะกลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสต่อไปตามเดิม กระแสเกิด I_G มีอิทธิพลมากในการช่วยให้เอสซีอาร์จากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องใช้แรงดันแอมโพล V_A สูงมากซึ่งเมื่อเราจัดให้ I_G มีค่าใหญ่มากขึ้นจะยังทำให้แรงดันพังข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

เมื่อจัดให้แรงดันแอมโพล V_A มีค่าลบหรือมีแรงดันกลับ กระแสแอมโพลจะไหลกลับทางและมิต้านน้อยมาก เรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ" ต่อเมื่อเราเพิ่มค่าแรงดันแอมโพลค่า

ลปไปจนถึงค่าที่เรียกว่า "แรงดันพังทะลุกลับ" กระแสแอนโอดจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วๆ ไปผู้ผลิตมักออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพังทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพังข้ามทิสฟอรัเวิร์ด ในขณะที่ $I_G = 0$

กลไกการทำงานของเอสซีอาร์อาจอธิบายได้โดยทฤษฎีของรอยต่อพีเอ็น หรือโดยอาศัยวงจรสมมติแบบทรานซิสเตอร์ ซึ่งในที่นี้ขออธิบายด้วยวิธีคิดให้เอสซีอาร์มีโมเดลเป็นทรานซิสเตอร์ โดยให้ชั้นพีเอ็นพีเอ็นของเอสซีอาร์ถูกแบ่งออกเป็นตัวทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น และพีเอ็นพี สองตัวต่อกันด้วยการป้อนกลับค่าบวก ดังรูปที่ 3.4

เมื่อป้อนแรงดันแอนโอดในทิสฟอรัเวิร์ดให้กับเอสซีอาร์ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวก็จะมีแรงดันเข้าไปเลี้ยงอิมิตเตอร์และคอลเล็กเตอร์ในทิสฟอรัเวิร์ด แต่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองยังอยู่ในภาวะปิดกระแส ต่อมาเพิ่มแรงดันแอนโอดถึงค่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ เอ็นพีเอ็น ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่างมีศักย์ลบปรากฏอยู่จะเข้าไปกระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ พีเอ็นพี ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดการนำกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวบน จึงมีศักย์บวกปรากฏสูงขึ้นและส่งเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่างให้เปิดกระแสมากขึ้น คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะมีศักย์ลบปรากฏมากขึ้น และเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดการนำกระแสมากขึ้นซึ่งผลอันนี้จะวนกลับมากกระตุ้นทรานซิสเตอร์ตัวล่างอีก กระบวนการนี้เป็นการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งผลสุดท้ายจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวนำกระแสอยู่ในสภาวะอิ่มตัว ก็จะมีกระแสแอนโอดของเอสซีอาร์ไหลได้สูงมากและเอสซีอาร์เข้าอยู่ในสภาวะเปิดกระแส



รูปที่ 3.4 โมเดลของเอสซีอาร์แบบวงจรทรานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก

ถ้าต้องการให้เอสซีอาร์เปลี่ยนจากสภาวะเปิดกระแสกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแสต้องลดขนาดของกระแสแอนโอด I_A ให้ต่ำกว่ากระแสขีด I_H (ถ้า $I_G > 0$) กระแสคอลเล็กเตอร์ตัวบนจะต่ำลง

มากไม่พอที่จะกระตุ้นให้เบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่างเปิดให้กระแสได้ต่อไป ศักย์ที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะลดน้อยลงมาก ไม่พอที่จะไปกระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดนำกระแสต่อไปอีก ทรานซิสเตอร์ก็หยุดนำกระแส ดังนั้นเอสซีอาร์จึงเปลี่ยนสภาวะกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแส

ถ้านำแรงดันแอมโตนค่าลบเข้าต่อกับเอสซีอาร์ทรานซิสเตอร์ทั้งสองต่อจะอยู่ในสภาวะถูกไบแอสกลับทาง จึงมีกระแสแอมโตนไหลได้น้อยมาก เมื่อเราป้อนแรงดันค่าลบที่มีค่าสูงมากที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวเกิดพังถล่มทลายจึงมีกระแสแอมโตนไหลได้สูงมากและเอสซีอาร์ก็ชำรุดวงจรป้อนกลับที่อยู่ภายในของเอสซีอาร์ค่ากระแสแกน มีค่า

$$G = \beta_1 \times \beta_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ G เป็นค่ากระแสแกนรวม
 β_1 และ β_2 เป็นค่ากระแสแกนชนิดอิมิตเตอร์ร่วมของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี และเอ็นพีเอ็น ตามลำดับ ถ้า I_{CBO1} เป็นกระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเมื่อต่อวงจรแบบเฟสรวม จะได้ว่า

$$I_{C1} = \beta_1(I_{C2} + I_{CBO1}) + I_{CBO1} \quad (3.2)$$

เมื่อ I_{C1} เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีและเป็นกระแสเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น

$$I_{C2} = \text{เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น}$$

ถ้า I_{CBO2} เป็นกระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเมื่อต่อวงจรแบบเฟสรวม จะได้ว่า

$$I_{C2} = \beta_2(I_{C1} + I_{CBO2}) + I_{CBO2} \quad (3.3)$$

และกระแสแอมโตน คือ

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} \quad (3.4)$$

โดยสามารถหากระแสแอมโตน I_A จากสมการที่ (3.2) ถึง (3.4) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_A = \frac{(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(I_{CBO1} + I_{CBO2})}{1 - G} \quad (3.5)$$

ในตอนเริ่มต้นถึงแม้มีแรงดันแวนไดโอดป้อนเข้าทิสฟอว์เวิร์ด แต่เอสซีอาร์ยังอยู่ในสภาวะปิด กระแส β_1 และ β_2 มีค่าต่ำทั้งคู่และ G มีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ดังนั้นส่วนของสมการที่ (3.5) มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง เป็นผลให้กระแสแวนไดโอด I_A มีค่าสูงกว่าผลบวกของกระแสรั่วของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว เพียงเล็กน้อย

เพื่อที่จะเปลี่ยนเอสซีอาร์จากสภาวะปิดกระแสให้เข้าสู่สภาวะเปิดกระแสทำได้โดยการเพิ่มค่ากระแสแกนรวม G มีค่าเข้าหาหนึ่ง (คือ $\beta_1 * \beta_2 \rightarrow 1$) ทำให้เราได้ I_A

ถ้าลดกระแสแวนไดโอด I_A ให้ต่ำกว่ากระแสยึด I_H จะทำให้แกน G มีค่าลดลง ทำให้เอสซีอาร์เปลี่ยนสภาวะกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแส และถ้าเราป้อนแรงดันเอสซีอาร์กลับทาง ก็เป็นการลดค่าแกน G และค่าแกน G จะเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งเมื่อแรงดันกลับทางนั้นมีค่าสูงเท่ากับค่าแรงดันล้นทลายของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว

เราอาจวิเคราะห์ห้วงจรทรานซิสเตอร์ที่เป็น โมเดลของเอสซีอาร์โดยอาศัยค่ากระแสแกน " α หรือ α_B " ของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อแบบเบสร่วมซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกระแสคอลเล็กเตอร์ต่อกระแสอีมิเตอร์โดยมีความสัมพันธ์กับกระแสแกน β ของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อแบบอีมิเตอร์ร่วม ดังนี้

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.6)$$

ซึ่งเราอาจเขียนสมการแกนของทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CBO} \quad (3.7)$$

เมื่อ I_C และ I_E = กระแสคอลเล็กเตอร์และกระแสอีมิเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{CBO} = กระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อวงจรแบบเฟสรวม

สามารถเขียนสมการของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวได้ ดังนี้

$$\text{พีเอ็นพี } I_A - I_{C2} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (3.8)$$

$$\text{เอ็นพีเอ็น } I_{C2} = \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{CBO2} \quad (3.9)$$

เมื่อ α_1 และ α_2 เป็นค่ากระแสแกนของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพีตามลำดับ

I_G เป็นกระแสเกตของเอสซีอาร์

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.9) ในสมการที่ (3.8) เพื่อขจัด I_{C2} จะคำนวณกระแสแอมโนด I_A ได้

$$I_A = \frac{I_{CBO1} + I_{CBO2} + \alpha_1 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3.10)$$

ค่า $(\alpha_1 + \alpha_2)$ ในสมการที่ (3.10) คล้ายค่า G ในสมการที่ (3.5) โดยที่ $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 0$, $I_A \rightarrow I_{C1} = I_{CBO1} + I_{CBO2}$ เมื่อ I_{C1} เป็นกระแสรั่วรวมทั้งหมด ซึ่งในกรณีนี้จะสมนัยกับเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแสต่อเมื่อ $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1$, $I_A \rightarrow \infty$ เอสซีอาร์ก็จะอยู่ในสภาวะป้อนกลับค่าบวกซึ่งทำให้เอสซีอาร์อยู่ในฐานะเปิดกระแส

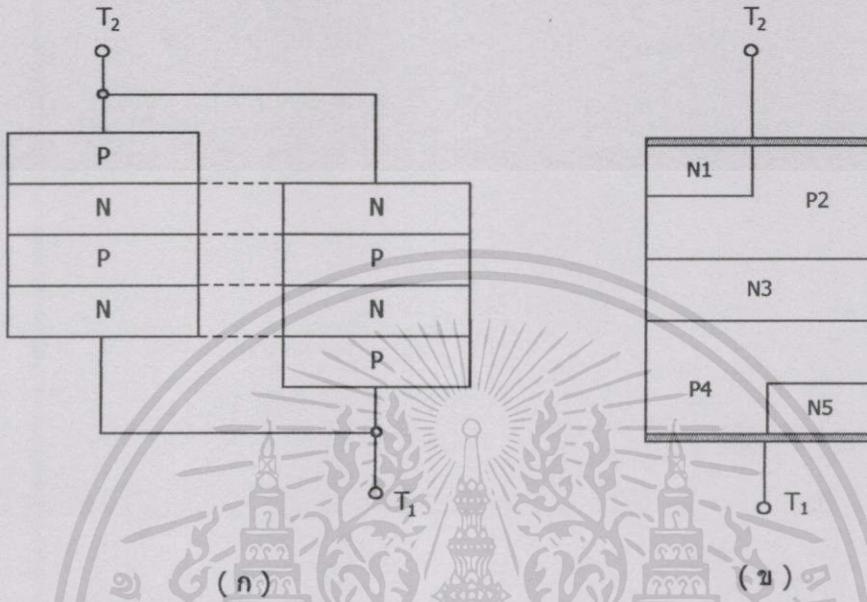
3.1.2 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของไตรแอด

ไตรแอดเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วคล้ายเอสซีอาร์ แต่สามารถให้กระแสไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งแตกต่างกับเอสซีอาร์ที่สามารถให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวได้ทิศทางเดียวจึงไม่สามารถเรียกขั้วสองขั้วของไตรแอดว่าขั้วโคเป็นแอมโนดหรือแคโทด แต่เรียกเป็นขั้ว T_1 และ T_2 แทนและขั้วที่สามมีรูปร่างเล็กเป็นขั้วเกต (G) ไตรแอดมีหลักการทำงานเหมือนกับเอสซีอาร์สองตัวต่อขนานกันแต่กลับขั้วกัน ซึ่งคล้ายกับเอาสิ่งประดิษฐ์สถานะของแจ็ทพีเอ็นพีเอ็นสองชิ้นมาต่อขนานกันแต่กลับขั้วกันดังรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งมีชั้นของสารกึ่งตัวนำแตกต่างกันห้าชั้น คือ $N_1P_2N_3P_4N_5$ เมื่อนำเข้ารวมกันเป็นโครงสร้างเดียว จะได้ดังรูปที่ 3.5(ข) เมื่อต่อขั้วเกตและตัดแปลง

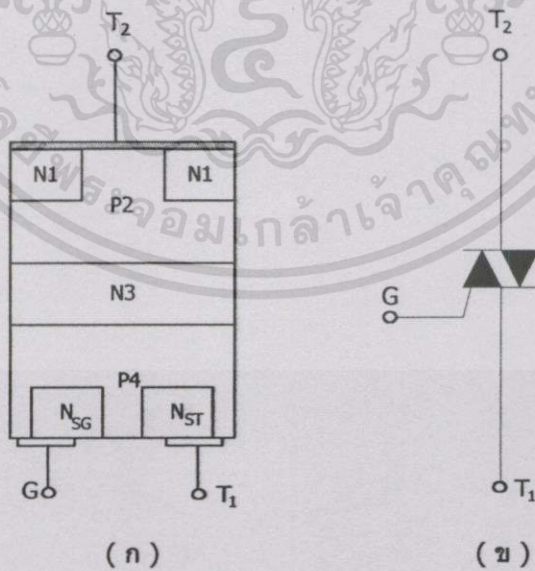
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างภายในให้เป็นแบบลวดวงจรอิมิตเตอร์ ดังรูปที่ 3.6(ก) จะได้ไทรแอดดังสัญลักษณ์ในรูปที่ 3.6(ข) โดยทั่วไปใช้ขั้ว T_1 เป็นขั้วอ้างอิง เช่น เมื่อกำหนดว่าแรงดันที่ขั้ว T_2 เป็นบวก จะมีความหมายว่า ขั้ว T_2 มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้ว T_1



รูปที่ 3.5 (ก) การต่อสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็นสองขั้วอย่างขนานแต่กลับขั้วกัน
(ข) โครงสร้างรวมของ (ก)



รูปที่ 3.6 (ก) โครงสร้างของไทรแอด (ข) สัญลักษณ์ของไทรแอด

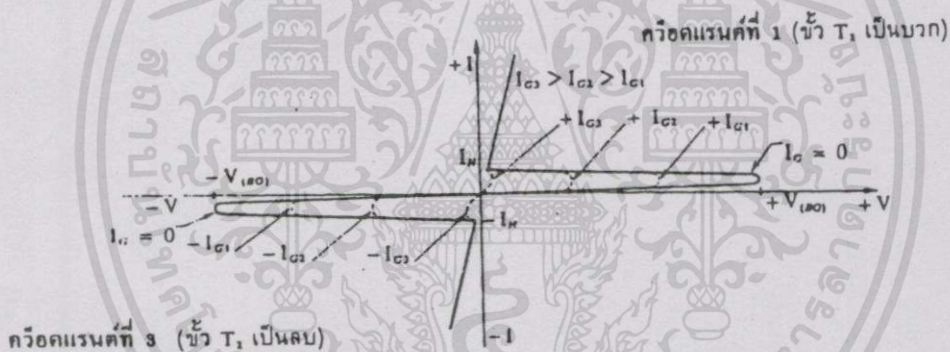
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่มีโครงสร้างแบบลัดวงจรมีมิติเตอร์คล้ายกับใส่ความต้านทานเข้าขนานระหว่างเกตกับแคโทดเพื่อแบ่งกระแสรั่วที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนและประจุที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมรอยต่อระหว่างเกตกับแคโทด ซึ่งอาจทำให้การป้อนกลับค่าบวกมีผลลดน้อยลงแต่กลับทำให้ไตรแอ็คทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงและเมื่อมีแรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ไตรแอ็คมีข้อดีที่มีราคาถูกกว่าเอสซีอาร์ ไตรแอ็คตัวเดียวสามารถใช้แทนเอสซีอาร์สองตัวที่ต่อขนานกันแต่ต่อขั้วสลับกัน และแรงดันกลับทางที่สูงมากซึ่งทำให้เอสซีอาร์ชำรุดนั้น เมื่อนำมาป้อนเข้าไตรแอ็คแล้วแรงดันนี้เพียงแต่ทำให้ไตรแอ็คนำกระแสได้เท่านั้น ข้อเสียของไตรแอ็คคือไม่สามารถใช้กับวงจรที่มีความถี่สูงได้

การนำกระแสของไตรแอ็คจะเป็นเส้นโค้งลักษณะสมบัติดังรูปที่ 3.7 ซึ่งคล้ายกับของเอสซีอาร์สำหรับสภาวะเปิดนำกระแสสองเส้นมาต่อสลับขั้วกัน

เมื่อ $I_G = 0$ ไตรแอ็คจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สภาวะเปิดกระแสได้เอง ถ้าแรงดันที่ขั้ว T_2 มีค่าบวกและสูงถึงแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ หรือถ้าแรงดันที่ขั้ว T_2 เป็นลบและสูงถึงแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของไตรแอ็ค

ไตรแอ็คที่กำลังอยู่ในสภาวะเปิดกระแสอาจจะเปลี่ยนกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแสได้ถ้าลดกระแสไหลผ่านไตรแอ็ค ลงให้เหลือน้อยกว่าค่ากระแสขีด I_H เป็นเวลานานมากกว่าเวลาปิดกระแส

ไตรแอ็คซึ่งอยู่ในสภาวะปิดกระแสอาจเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส โดยใช้แรงดันที่ขั้ว T_2 น้อยกว่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ พร้อมกับใช้กระแสเกตค่าต่างๆ ซึ่งทำได้ 4 วิธี คือ

1. แบบ I+ เมื่อแรงดันที่ขั้ว T_2 เป็นบวก และแรงดันที่ขั้วเกิดเป็นลบ
2. แบบ I- เมื่อแรงดันขั้ว T_2 เป็นบวก และแรงดันขั้วเกิดเป็นลบ
3. แบบ III+ เมื่อแรงดันขั้ว T_2 เป็นลบ และแรงดันขั้วเกิดเป็นบวก
4. แบบ III- เมื่อแรงดันขั้ว T_2 เป็นลบ และแรงดันขั้วเกิดเป็นลบ

เมื่อแรงดันที่ขั้ว T_2 เป็นบวก รอยต่อ N_3P_4 จะถูกไบแอสกลับ ถ้าสวิตช์ให้แรงดันบวก เข้าป้อนขั้วเกิดซึ่งทำให้กระแสบวกไหลเข้าเกิดผ่านไปสู่ขั้ว T_1 เป็นผลให้ไดโอด P_4N_{5T} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร N_{5T} เข้าสู่สาร P_4 แล้วแพร่กระจายไปถึงรอยต่อ N_3P_4 ได้ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่รอยต่อนี้ผลักคืนให้พุ่งเข้าสู่สาร N_3 อีกต่อหนึ่ง วิธีการเช่นนี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการป้อนกลับค่าบวกและมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ P_2N_3 , N_3P_4 และ P_4N_{5T} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมด ทำให้ไดรแอ็คเปิดกระแสให้ไหลได้ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะไดรแอ็คให้เข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ I+

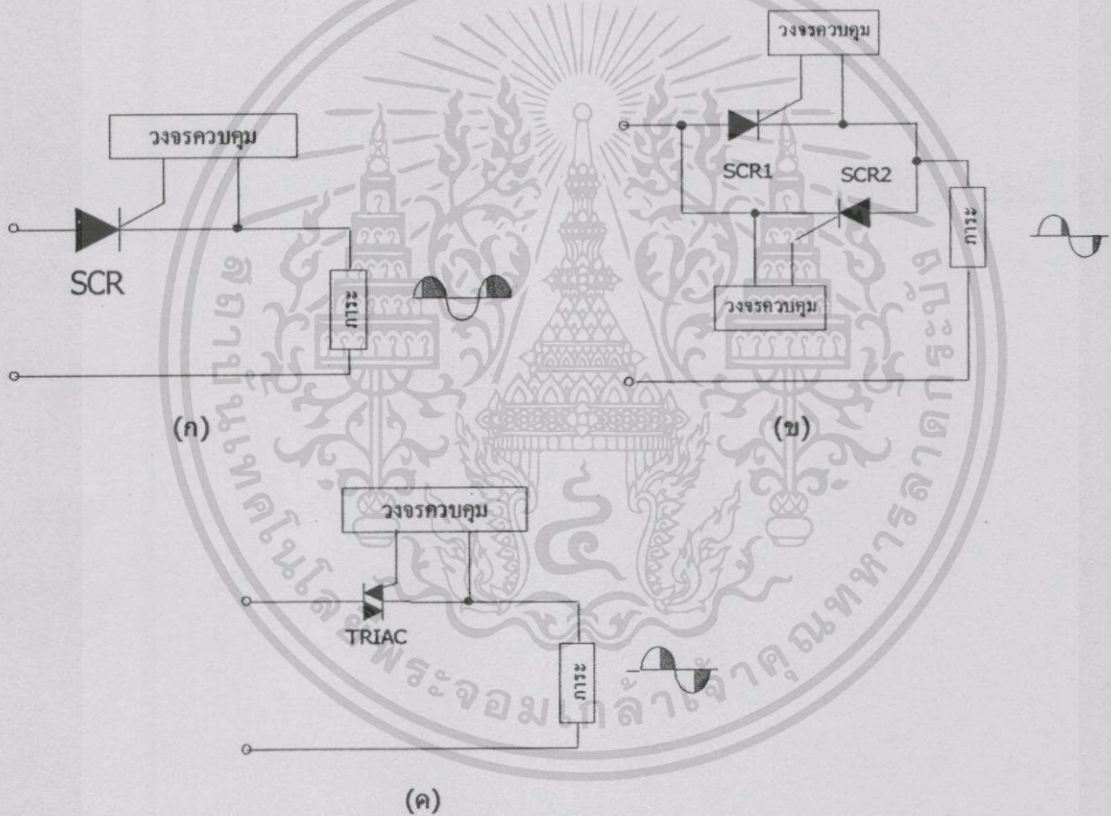
เมื่อแรงดันขั้ว T_2 เป็นบวก การป้อนขั้วเกิดด้วยศักย์ลบทำให้กระแสเกิดค่าลบไหลเข้าไดรแอ็คเป็นผลให้ไดโอด P_4N_{5G} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส และจะมีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร N_{5G} เข้าสู่สาร P_4 และแพร่กระจายไปถึงรอยต่อ N_3P_4 ได้ ซึ่งจะถูกลักคืนให้พุ่งเข้าสู่สาร N_3 อีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ P_2N_3 , N_3P_4 และ P_4N_{5G} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมด จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าของสาร P_4 ตรงบริเวณใกล้ๆ สาร N_{5G} มีค่าสูงขึ้น เข้าหาแรงดันที่ขั้ว T_2 ซึ่งเป็นผลให้รอยต่อ P_4N_{5T} ที่อยู่ใกล้ๆ บริเวณสาร N_{5G} เริ่มถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสขึ้นบ้าง ดังนั้นจึงเริ่มมีอิเล็กตรอนพุ่งออกจากสาร N_{5T} เข้าไปสู่ P_4 แล้วเลยไปสู่ N_3 อีกต่อหนึ่ง ซึ่งเป็นผลในขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ P_4N_{5T} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสเต็มที่และไดรแอ็คก็เข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนสถานะไดรแอ็คให้เข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ I-

เมื่อแรงดันขั้ว T_2 เป็นค่าลบ การป้อนศักย์บวกเข้าขั้วเกิดทำให้กระแสเกิดค่าบวกไหลเข้าไดรแอ็คเป็นผลให้รอยต่อ P_4N_{5T} ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส ซึ่งจะให้มีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร N_{5T} เข้าสู่สาร P_4 แล้วแพร่เข้าไปยังรอยต่อ N_3P_4 และจะถูกผลักคืนให้พุ่งเข้าไปในสาร N_3 อีกต่อหนึ่งซึ่งเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการป้อนค่าบวก ผลสุดท้ายทำให้รอยต่อ N_1P_2 , P_2N_3 และ N_3P_4 ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมด ดังนั้นไดรแอ็คจึงเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนสถานะไดรแอ็คเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ III+

3.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมกระแสสามารถทำได้ด้วยวิธี "ควบคุมเฟส" (phase control) ซึ่งเป็นวิธีการทำให้มีการเรียงกระแสในช่วงมุมต่างๆ ของวัฏจักรกำลัง (power cycle) โดยใช้การไธริสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ มีการควบคุมเฟสเบื้องต้นหลายรูปแบบ ดังรูป 3.8. ซึ่งมีภาระเป็นความต้านทานหรือเป็นตัวเหนี่ยวนำ โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น

- (1) การควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น (controlled half-wave) ดังรูป 3.8. (ก)
- (2) ควบคุมเต็มคลื่น (controlled full-wave) ดังรูป 3.8. (ข) โดยใช้เอสซีอาร์สองตัวต่อขนานแต่กลับขั้วกัน และรูป 3.8. (ง) โดยใช้ไตรแอ็ค



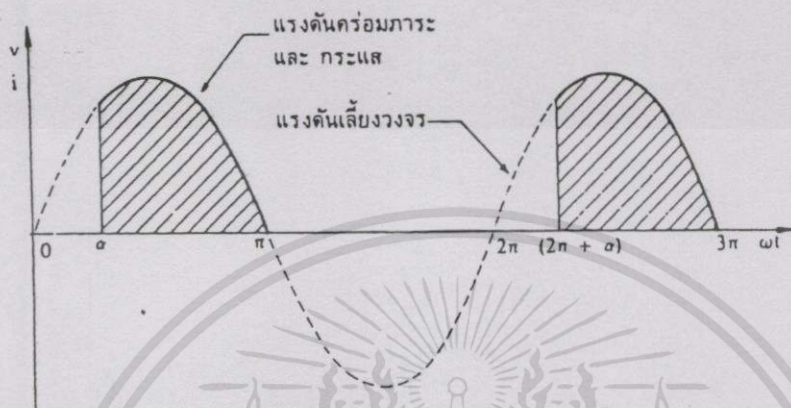
รูปที่ 3.8 วงจรเบื้องต้นของการควบคุมเฟสเอซี

- (ก) การควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น
- (ข) ควบคุมเต็มคลื่น โดยใช้เอสซีอาร์
- (ค) ควบคุมเต็มคลื่น โดยใช้ไตรแอ็ค

3.2.1 การควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่ใช้ควบคุมกระแสที่ไหลในทิศทางเดียว เหมาะสมกับภาระค้ำที่มี

วงจร ดังรูป 3.8. (ค) ซึ่งอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมการเรียงกระแสครึ่งคลื่น โดยมีมุมจุดชนวน α จาก 0° ถึง 180° ถ้าวงจรในรูปที่ 3.8.(ก) มีภาระเป็นความต้านทานล้วนๆ จะมีรูปคลื่นของแรงดันคร่อมภาระและกระแส ดังรูป 3.9 ซึ่งสามารถกระจายออกเป็นอนุกรม Fourier ดังนี้



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของภาระที่เป็นความต้านทานของวงจรรูปที่ 3.8 (ก) สำหรับการควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2V} \sin \omega t \cos n\omega t dt + \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} (0) \cos n\omega t dt \right]$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{2\pi} \left[\frac{1}{1+n} \cos(1+n)\alpha + \frac{1}{1-n} \cos(1-n)\alpha + \frac{2(-1)^n}{1-n^2} \right]; n \neq 1 \quad (3.11)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2V} \sin \omega t \cos \omega t dt$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{4\pi} (-1 + \cos 2\alpha) \quad (3.12)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2V} \sin \omega t \sin n\omega t dt + \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} (0) \sin n\omega t dt \right]$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{1+n} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right]; n \neq 1 \quad (3.13)$$

และ

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2V} \sin^2 \omega t dt \\ &= \frac{\sqrt{2V}}{4\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \end{aligned} \quad (3.14)$$

ซึ่งอาจนำเอาสัมประสิทธิ์ข้างบนนี้มาเขียนอนุกรม Fourier ได้ และเพื่อความสะดวกอาจกระจายให้อยู่ในรูปแบบ

$$V(t) = \frac{c_0}{2} + c_1 \sin(\omega t + \theta_1) + c_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + \dots + c_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3.15)$$

โดยมี

$$c_0 = a_0$$

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{a_1}{b_1} = \tan^{-1} \left[\frac{-1 + \cos 2\epsilon}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \right] \quad (3.16)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; n \neq 1 \quad \text{และ}$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} n \neq 1$$

จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเฉลี่ยของแบบควบคุมในช่วงครึ่งคลื่นได้ค่าดังนี้

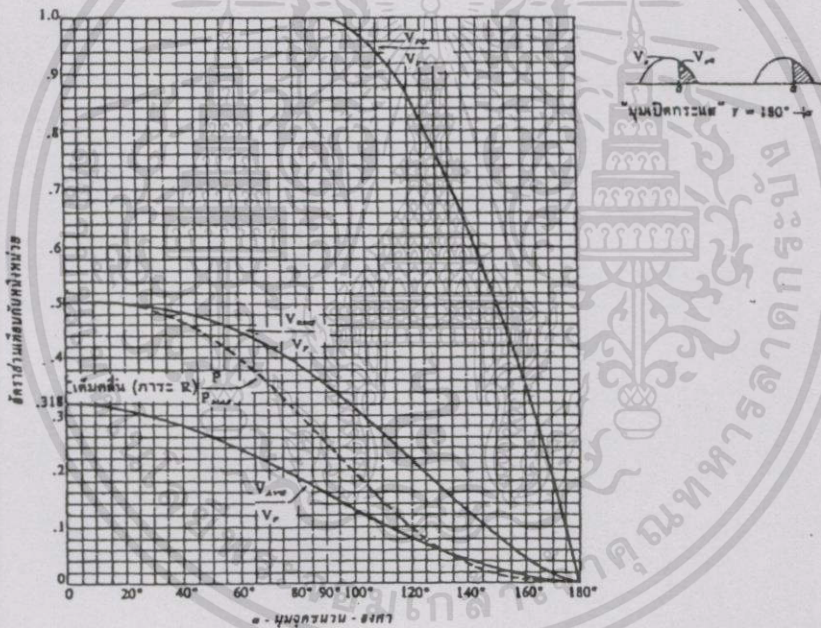
$$V_{\text{AVG}} = \frac{a_0}{2} = \frac{\sqrt{2V}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{V_p}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (3.17)$$

และสามารถคำนวณหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสได้ดังข้างล่าง

$$V_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}V \sin \omega t)^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= V_p \sqrt{\frac{1}{4\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]} \quad (3.18)$$

โดยอาจเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ของ แรงดันค่าเฉลี่ย แรงดันค่าอาร์เอ็มเอส แรงดันค่า ยอดสูงสุดและกำลังของภาวะความต้านทาน ซึ่งต่างเป็นฟังก์ชันกับมุมจุดชนวน α ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันค่าเฉลี่ย ค่าอาร์เอ็มเอส ค่ายอดสูงสุด และ กำลัง (กรณีที่มีภาระเป็นความต้านทาน) เป็นฟังก์ชันกับมุมจุดชนวนสำหรับการควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น

3.2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีการควบคุมกระแสป้อนให้ภาระ RL

ในวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.11(ก) ภายหลังจากที่มีการจุดชนวนให้พัลส์กระแสเกต i_g ไหลและเอสซีอาร์ได้เปิดกระแส เขียนเป็นสมการได้

$$V_L + V_R = V \quad (3.19)$$

หรือ

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (3.20)$$

ทำให้ได้ผลตอบสนองของสมการที่ (3.20) ดังนี้

$$i = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \sin(\omega t - \phi) + Ae^{-(R/L)t} \quad (3.21)$$

โดยที่ $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของภาระ RL

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad \text{เป็นมุมเฟสของภาระ RL}$$

เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขเริ่มต้น $i = 0$ ที่ $\omega t = \alpha$ ดังสมการที่ (3.8.11) จะกลายเป็น

$$i = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left\{ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) \cdot e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega} \right\} \quad (3.22)$$

ที่มุมปิดกระแส $\omega t = \beta$; $i = 0$ อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นสมการที่ (3.22) จะให้ความสัมพันธ์

$$\sin(\beta - \phi) = \sin(\alpha - \phi) \cdot e^{(R/L)(\alpha - \beta)/\omega} \quad (3.23)$$

โดยได้เขียนรูปคลื่นต่างๆ ของกระแสและแรงดันของรูปที่ 3.11(ก) ไว้ในรูปที่ 3.11(ข) ซึ่งมุมเปิดกระแสมีค่า

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (3.24)$$

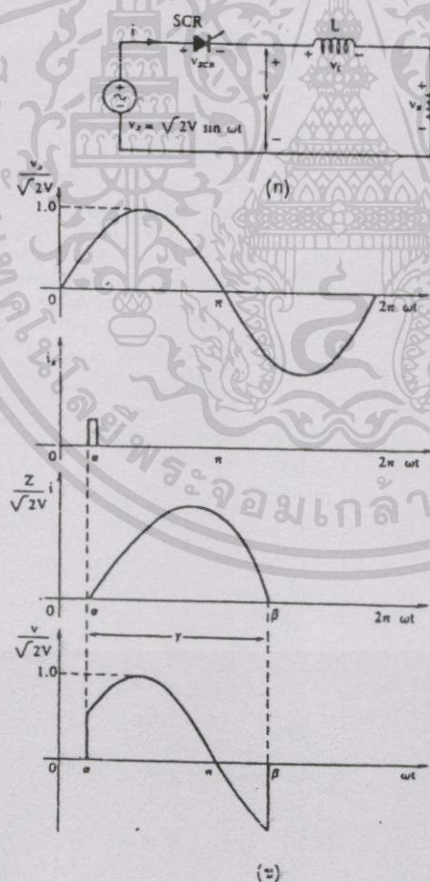
จากสมการที่ (3.23) และ (3.24) จะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับ α สำหรับค่าต่างๆ ของ ϕ ซึ่งเขียนเป็นเส้นโค้งต่างๆ ดังรูปที่ 3.11

จากสมการที่ (3.22) จะให้ค่ากระแสเอาต์พุตเฉลี่ยเทียบค่าหนึ่งหน่วย ได้ดังนี้

$$I_{AVG,N} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left\{ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \alpha) e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega} \right\} d(\omega t) \quad (3.25)$$

ซึ่งสามารถเขียนเส้นโค้งต่างๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{AVG,N}$ กับ α สำหรับค่าต่างๆ ของ ϕ แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 โดยได้เขียนเส้นขอบเขตจำกัดสำหรับ

- (1) กรณีความต้านทานล้นๆ คือ $\phi = 0^\circ$ และ
- (2) กรณีความเหนี่ยวนำล้นๆ คือ $\phi = 90^\circ$ ไว้ด้วย



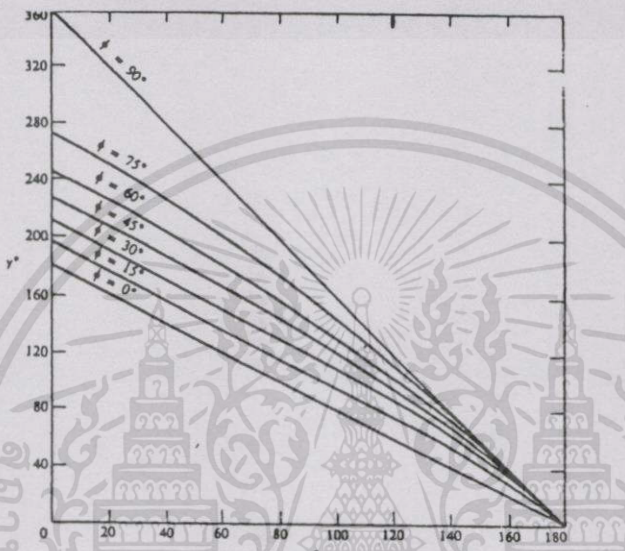
รูปที่ 3.11 (ก) วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีการควบคุมกระแสป้อนให้ภาระ RL

(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสของรูป (ก)

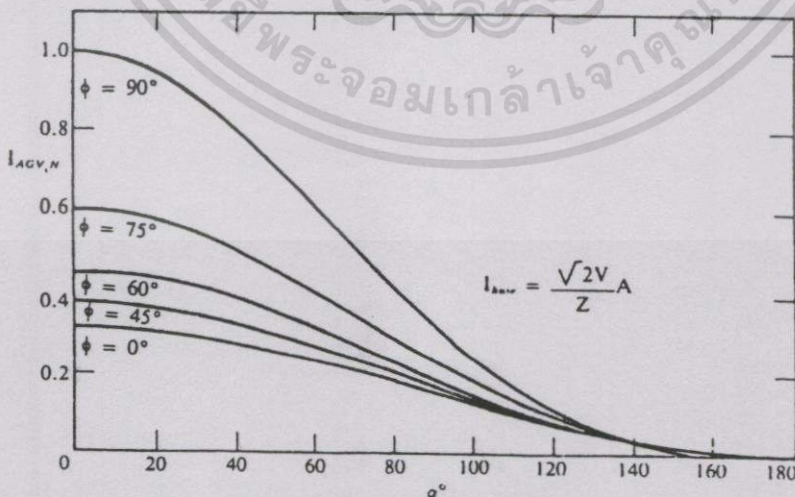
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ตีพิมพ์ขึ้นเพื่อให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ (3.22) สามารถเขียนสมการของกระแสเอาต์พุตอาร์เอ็มเอส ได้ดังนี้

$$I_{RMS} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sqrt{2}V \left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega} \right] \right\}^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (3.26)$$



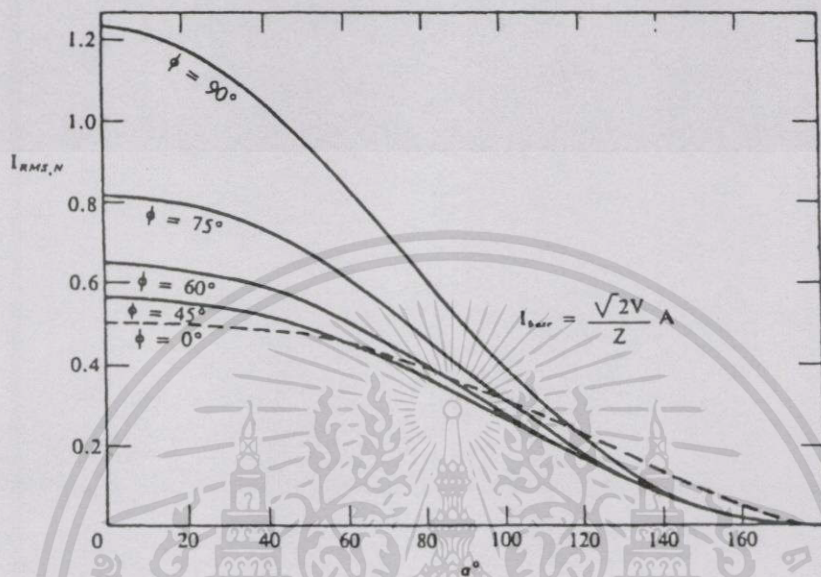
รูปที่ 3.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเปิดกระแส γ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.11(ก)



รูปที่ 3.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฉลี่ยไหลผ่านเอสซีอาร์ $I_{AVG,N}$ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.11 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{RMS,N}$ กับ α ได้ดังรูปที่ 3.14 โดยเขียนขอบเส้นจำกัดสำหรับกรณีความต้านทานล้วนๆ และความเหนี่ยวนำล้วนๆ ไว้เช่นกัน



รูปที่ 3.14 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เอ็มเอสไหลผ่านเอสซีอาร์ $I_{RMS,N}$ กับมุมจุดชนวน α ของรูป 3.8.4 (ก)

3.2.3 การควบคุมเต็มคลื่นสำหรับภาวะเอช

วงจรพื้นฐานของกรณีนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8(ค) (ง) และ (จ) ส่วนในรูปที่ 3.15 แสดงวงจรของกรณีนี้เมื่อภาวะประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำในขณะที่ทำงานจะมีเอสซีอาร์เปิดกระแสขึ้นตัวหนึ่งในช่วงครึ่งวัฏจักรหนึ่งแล้วเปลี่ยนเป็นอีกตัวหนึ่งในอีกครึ่งวัฏจักรหนึ่ง ถ้าในช่วงหนึ่งเราพิจารณาให้ SCR₁ เปิดกระแส คล้ายกับสมการที่ (3.22) สมการของกระแสสำหรับ SCR₁ จะเป็น

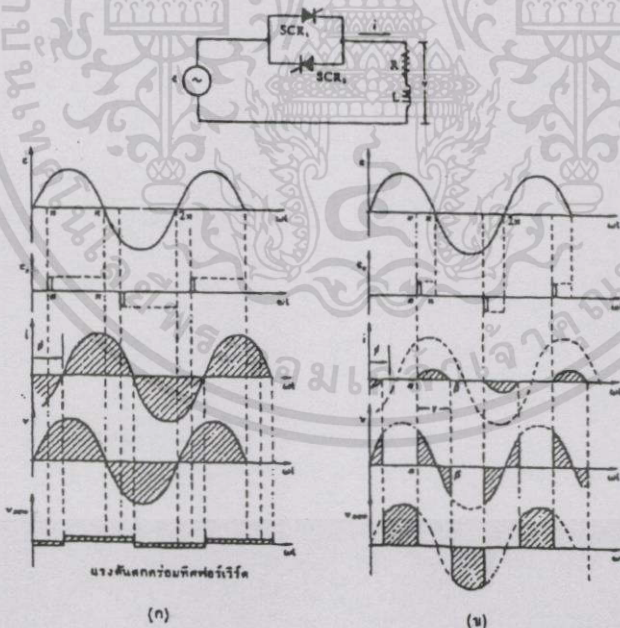
$$I_{SCR1} = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{(R/L)(\alpha - \omega T)/\omega} \right] \quad (3.27)$$

เมื่อ $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

จะสังเกตได้ว่า ถ้า $\alpha < \phi$ ค่าเหนี่ยวนำจะทำให้กระแสไหลต่อเนื่องแล้วเอสซีอาร์ไม่สามารถปิดกระแสได้ รูปคลื่นแรงดันและกระแสผลลัพ์จะเคลื่อนต่อเนื่องเป็นรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 3.15(ก) สำหรับกรณีที่ $\alpha > \phi$ เอสซีอาร์จะทำงานสลับกันคนละครึ่งวัฏจักร โดยจะทำงานคล้ายกับเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.2.1 และให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันขาดตอนเป็นห้วงๆ ดังรูปที่ 3.15(ข) ซึ่งรูปที่กล่าวมานี้มีความสัมพันธ์กับรูปที่ 3.11(ข) โดยมีเงื่อนไขที่ว่า การเปิดกระแสจะต้องไม่กินมุม γ เกินกว่า 180° ซึ่งเราจะมองเห็นอย่างชัดเจนว่า ขณะที่เรากลดค่ามุม α ลง จนกระทั่ง $\gamma = 180^\circ$ สำหรับกรณี $\alpha = \phi$ เราจะได้รูปคลื่นของ i และ v เข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากที่สุด ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความสัมพันธ์ระหว่าง α , γ , ϕ และ β ในสมการที่ (3.23) และ (3.24) จากสองสมการนี้เมื่อ $\alpha = \phi$ จะได้

$$\sin(\beta - \phi) = \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (3.28)$$

และ $\beta - \alpha = \gamma = 180^\circ \quad (3.29)$

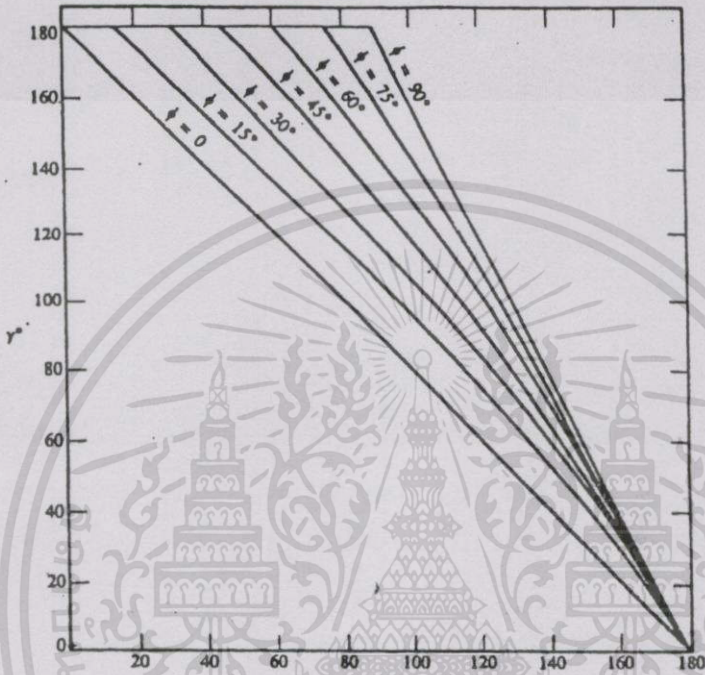


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของการควบคุมเต็มคลื่นเฟสเดียวสำหรับภาวะเอซีที่เป็นเชิงเหนี่ยวนำ

(ก) เมื่อมุมจุดชนวน α มีค่าน้อยกว่ามุมเฟส ϕ ของภาระ

(ข) เมื่อ α ใหญ่กว่า ϕ

ดังนั้นเราอาจปรับปรุงรูปที่ 3.12 ให้เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ γ สำหรับค่าต่างๆ ของวงจรในรูปที่ 3.15(ก) ดังรูปที่ 3.16 โดยจะต้องจำไว้ด้วยว่า “ γ จะใหญ่กว่า 180° และ α จะเล็กกว่า ϕ ไม่ได้”

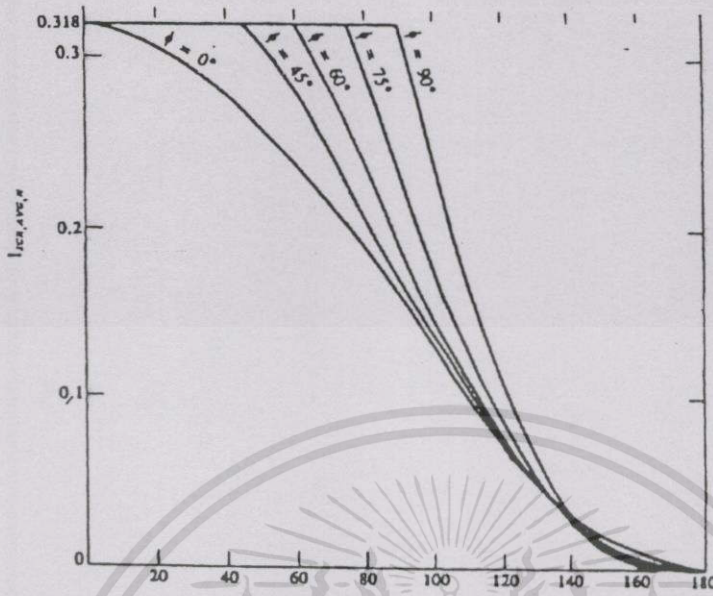


รูปที่ 3.16 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง γ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ ของรูปที่ 3.15 (ก)

เราสามารถหาคะแสเฉลี่ยไหลผ่านเอสซีอาร์เมื่อเทียบกับค่าหนึ่งหน่วยได้จาก

$$I_{SCR,AVG,N} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{(R/L)(\alpha - \omega T)/\omega}] p(\omega t) \quad (3.30)$$

ทำให้เราได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{SCR,AVG,N}$ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ มาจากรูปที่ 3.13 โดยมีเงื่อนไขว่า “ α จะต้องมีค่าไม่เล็กกว่า ϕ ” ดังรูปที่ 3.17 จะเห็นว่าเส้นโค้งจะไปสิ้นสุดที่จุด $\alpha = \phi$



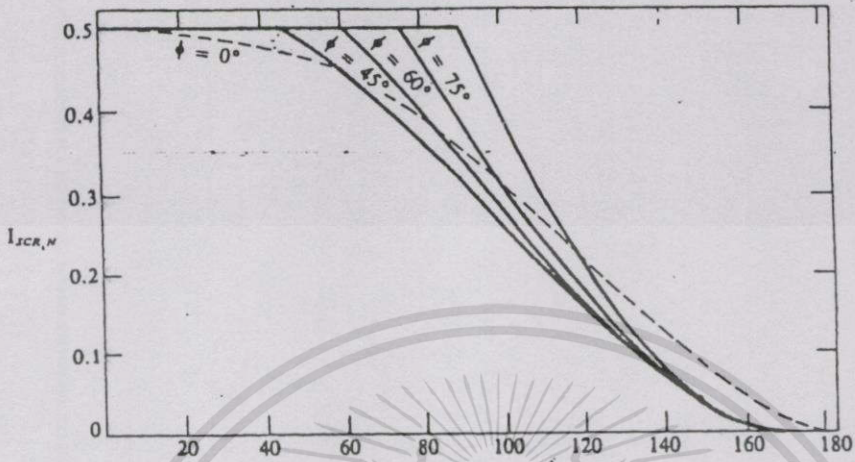
รูปที่ 3.17 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{SCR,AVG,N}$ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ ของวงจรรูปที่ 3.8.25 (ก)

และเราสามารถหาคะแสอาร์เอ็มเอสไหลผ่านเอสซีอาร์เมื่อเทียบกับค่าหนึ่งหน่วยได้จาก

$$I_{SCR,RMS,N} = \sqrt{I_{SCR,N}^2} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega}]^2 d(\omega T) \right\}^{1/2} \quad (3.31)$$

ทำให้ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $T_{SCR,N}$ กับ α มาจากรูปที่ 3.8.7 โดยมีเงื่อนไขว่า " α จะต้องมีค่าไม่เล็กกว่า ϕ " ดังรูปที่ 3.8.29 ซึ่งจะได้กระแสอาร์เอ็มเอสเทียบกับค่าหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$I_{RMS,N} = I_{SCR,N}^2 + I_{SCR,N}^2 = \sqrt{2}I_{SCR,N} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.18 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{SCR,N}$ กับ α สำหรับค่า ϕ ต่างๆ ของ วงจรรูปที่ 3.15 (ก)

ดังนั้นจะได้กระแสเอาต์พุตอาร์เอ็มเอส ดังนี้

$$I = \frac{\sqrt{2}V}{Z} I_{RMS,N} \quad (3.33)$$

บทที่ 4

พีแอลซี

4.1 พีแอลซี

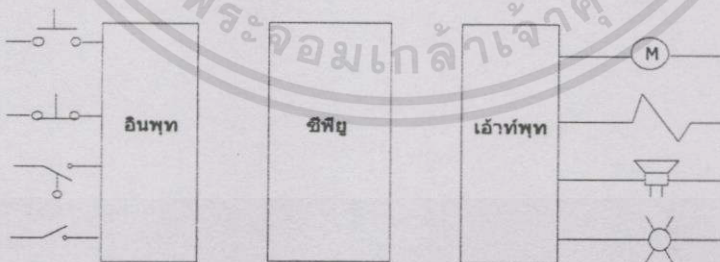
4.1.1 ความหมายของพีแอลซี

พีแอลซี หรือ Programmable Logic Controller ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดแทนระบบควบคุมแบบเก่าที่ใช้รีเลย์ซึ่งติดตั้ง ดัดแปลง และแก้ไขลำบากมากมาเป็นระบบควบคุมแบบใหม่ที่ใช้งานจริงอิเล็กทรอนิกส์แทนรีเลย์และใช้การเขียนโปรแกรมทำงานองเดียวกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดเงื่อนไขการควบคุมแทนการเดินสายเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบเก่า

4.1.2 หลักการทำงานและโครงสร้างของพีแอลซี

พีแอลซีเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ควบคุมเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิต โดยใช้โปรแกรมในหน่วยความจำกำหนดเงื่อนไขการควบคุม ผ่านทางหน่วยอินพุต/เอาต์พุต โครงสร้างของพีแอลซีประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ

- (1) หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit)
- (2) หน่วยอินพุต/เอาต์พุต (Input/Output Unit)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของพีแอลซี

4.1.3 ภาษาพีแอลซี

การเขียนโปรแกรม (ลำดับขั้นการทำงาน) ให้กับพีแอลซีนั้น จะเขียนด้วยภาษา 4 ภาษา คือ ภาษาแลดเดอร์ ภาษาบูลีน ภาษาบล็อก และคำสั่งข้อความภาษาอังกฤษ ซึ่งมีวิธีใช้แตกต่างกัน

1. ภาษาแลดเดอร์ เป็นภาษาที่ประกอบด้วยสัญลักษณ์หน้าสัมผัส คล้ายวงจรรีเลย์ การเขียนจึงทำได้ง่าย ระดับงานที่สามารถควบคุมมีทั้งจากวงจรแบบธรรมดา จนถึงแบบซีเควนซ์ในลักษณะเปิด-ปิด

2. ภาษาบูลีน เป็นภาษาพื้นฐานของพีแอลซีเช่นกัน คำสั่งมีลักษณะคล้ายกับสัญลักษณ์ของพีชคณิตบูลีน ประกอบด้วยกลุ่มคำสั่งเช่นเดียวกับภาษาแลดเดอร์ คือ วงจรรีเลย์และปฏิบัติการ จิก การหนดเวลาและนับจำนวน การคำนวณทางคณิตศาสตร์ การจัดการข้อมูล การเคลื่อนย้ายข้อมูลและคำสั่งควบคุมโปรแกรม/โปรแกรมน้อย

3. ภาษาบล็อก เป็นการเขียน โปรแกรมคำสั่งโดยใช้สัญลักษณ์ต่างๆ คล้ายกับภาษาแลดเดอร์ แต่จัดไว้ในบล็อกที่เหลี่ยม ภาษาบล็อกนี้จะใช้กับคำสั่งหรือการควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อน หรือมีข้อมูลที่เป็นตัวเลขเกี่ยวข้อง เช่น การควบคุมที่มีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และการควบคุมตำแหน่งเครื่องจักร โดยปกติภาษาบล็อกมักใช้ควบคู่กับภาษาแลดเดอร์ คำสั่งในภาษาบล็อกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม คือ

- คำสั่งหน่วยเวลาและนับจำนวน
- คำสั่งการคำนวณทางคณิตศาสตร์
- คำสั่งการเคลื่อนย้ายข้อมูล
- คำสั่งการจัดการข้อมูล
- คำสั่งควบคุม โปรแกรม/โปรแกรมน้อย

4. คำสั่งข้อความภาษาอังกฤษ ถูกดัดแปลงมาจากภาษาระดับสูงของคอมพิวเตอร์ เช่น ภาษาเบสิก และภาษาปาสคาล ทำให้การเขียน โปรแกรมมีความคล่องตัวและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โปรแกรมที่เขียนสามารถอ่านและเข้าใจง่ายเหมาะสำหรับการตรวจสอบและแก้ไขในภายหลัง พีแอลซีที่ใช้คำสั่งข้อความภาษาอังกฤษ มักเป็นพีแอลซีขนาดใหญ่ที่มีการคำนวณที่ซับซ้อน และการจัดการข้อมูลจำนวนมาก

ปัจจุบันภาษาที่ใช้เขียน โปรแกรมพีแอลซี มีลักษณะดังนี้

1. ภาษาแลดเดอร์เพียงอย่างเดียว
2. ภาษาบูลีนเพียงอย่างเดียว
3. ภาษาแลดเดอร์และภาษาบล็อก
4. ภาษาแลดเดอร์และคำสั่งข้อความภาษาอังกฤษ
5. ภาษาบูลีนและภาษาบล็อก
6. ภาษาบูลีนและคำสั่งข้อความภาษาอังกฤษ

4.2 หลักการเขียนโปรแกรมให้กับ PLC TSX 3722 Telemecanique

4.2.1 บทนำ

PLC โดยทั่วไป จะสามารถทำโปรแกรมโดยเวลาสแกนจะขึ้นอยู่กับการทำโปรแกรม และการเขียนโปรแกรมยังไม่มีฟังก์ชันพิเศษที่สามารถทำการคำนวณได้เหมือนการกระทำทางคณิตศาสตร์จริงๆ โดยเหตุนี้จึงมี PLC รุ่นใหม่ๆ มาช่วยทดแทนเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการดีที่จะมาทำความรู้จักกับการใช้งานของ PLC TSX 3722 ของ TELEMACHANIQUE

4.2.2 คุณลักษณะทั่วไปของ PLC TSX 3722 Telemecanique

ลักษณะทั่วไปของ PLC TSX 3722 ประกอบด้วย

อินพุท/เอาต์พุทบิต (Input/output bits) เป็นแบบโลจิคอล อิมเมจ โดยสถานะทางไฟฟ้าของอินพุท/เอาต์พุท จะถูกเก็บลงในหน่วยความจำข้อมูล (data memory) และถูกปรับให้ใหม่ทุกๆ การสแกนของโปรแกรมของแต่ละทาสต์

บิตข้อมูลภายใน (Internal bits) เช่น %Mi เป็นการเก็บสถานะในทันทีภายในโปรแกรมระหว่างการเอ็็กซ์คิวทีฟของโปรแกรม และไม่สามารถใช้ I/O เป็นข้อมูลภายในได้

บิตข้อมูลกระทำต่อระบบ (System bits) เช่น %SO ถึง % S127 เป็นการควบคุมการทำงานที่ถูกต้องของ PLC และต่อการประยุกต์ใช้โปรแกรม ซึ่งแต่ละตัวจะมีบทบาทต่อการนำไปใช้ต่อระบบต่างๆ กัน

บิตฟังก์ชันบล็อกซ์ (Function block bits) จะเป็นเหมือนกับเอาต์พุทของบล็อกซ์ โดยเอาต์พุทนี้เป็น ได้กับการต่อสายในโดยตรง หรือทั้งใช้วัตถุอื่นๆ

การเข้าถึงข้อมูลที่เป็นบิตแยกออกจากเวิร์ด (Word extract bits) ในซอฟต์แวร์โปรแกรมนี้สามารถกำหนดบิตทีละบิตของเวิร์ดได้

บิตข้อมูลจากสถานะสเต็ปกราฟเซต (Grafcet step status bits) %Xi เป็นการบอกสถานะการทำงานของกราฟเซตสเต็ปที่ i ในตารางที่ 1 เป็นการแสดงรายการทั้งหมดของตัวกระทำทางบูลีน

ตารางที่ 4.1 ตารางตัวการกระทำแบบบิทของ PLC TSX 3722

ชนิด	ตำแหน่ง (ค่า)	จำนวนสูงสุด (2)		Access in write mode(1)
		TSX 37	TSX 57	
ค่าโดยตรง	0 หรือ 1 (ผิดหรือถูก)	-	-	-
อินพุตบิท	%Ix.i หรือ %Ixx.i	328	1024	ไม่ใช่
เอาต์พุตบิท	%Qx.i หรือ %Qxx.i			ใช่
บิทภายใน	%Mi หรือ %Mxi	256	4096 (3)	ใช่
บิทระบบ	%Si	128	128	ขึ้นอยู่กับ i
บิทฟังก์ชันบล็อกซ์	Eg ; %Tmi.Q %DRIF.....	-	-	ไม่ใช่
บิทสเต็ป	%Xi	96	128	ใช่
บิทเวิร์ดเอ็กซ์เชกซ์แซก	Eg ; %MW10:X5	-	-	ขึ้นกับชนิดของเวิร์ด

4.2.3 การเข้าถึงตำแหน่ง I/O โมดูลของ PLC TSX 3722

การเข้าถึงตำแหน่งในแต่ละ โมดูลของ PLC TSX 3722 แสดงตามลักษณะดังนี้

%	I หรือ Q	X, W หรือ D	x	i
สัญลักษณ์	ชนิด หรือวัตถุ	รูปแบบ	ตำแหน่ง	จำนวนช่อง
	I = อินพุต	X = บูลลีน	X = ตำแหน่งของ	i = 0-127 หรือ MOD
	Q = เอาต์พุต	W = เวิร์ด	จำนวนในซ้ำ	
		D = ดับเบิลเวิร์ด		

รูปที่ 4.4 แสดงการเข้าถึง I/O โมดูลของ PLC TSX 3722

ชนิดของแต่ละ โมดูล (Type of object) I และ Q เป็นอินพุตและเอาต์พุตทางกายภาพของแต่ละ โมดูล โดยแต่ละครั้งของการสแกนของทาสท์ในโปรแกรม จะต้องผูกติดการสแกนคู I และ Q ทุกครั้ง

ตำแหน่งชั้นเนลและหมายเลข (Channel position and number) การกำหนด โมดูลพื้นฐานทั่วไปของ TSX 3722 แสดงดัง โคอะแกรมต่อไปนี้

%	M, K หรือ S	B, W, D หรือ F	i
สัญลักษณ์	ชนิดของวัตถุ	รูปแบบ	จำนวน
	M = ภายใน	B = บูลีน	
	K = ค่าคงที่	W = เวิร์ด	
	S = ระบบ	D = ดับเบิลเวิร์ด	
		F = จุดลอยตัว	

รูปที่ 4.5 แสดงการเข้าถึงข้อมูลแบบเวิร์ด

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งและหมายเลขชั้นแนล

โมดูล	รูปแบบ 1/2			รูปแบบมาตรฐาน			
	4Q	8Q	12I	28I/Q	32I	32Q	64I/Q
หมายเลขชั้นแนล: i	0-3	0-7	0-11	0-15 0-11	0-15 0-15	0-15 0-15	0-31 0-31
ตำแหน่งและ หมายเลขชั้นแนล X=ตำแหน่ง	x.0-x.3	x.0-x.7	x.0-x.11	x.0-x.15 (x+1).0- (x+1).11	x.0-x.15 (x+1).0- (x+1).15	x.0-x.15 (x+1).0- (x+1).15	x.0-x.31 (x+1).0- (x+1).31

4.2.4 การเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ด (Addressing words)

การเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ดในการใช้ภาษาของ PL7 คือการเข้าถึงข้อมูลดังแสดงต่อไปนี้

%	M, K หรือ S	B, W, D หรือ F	i
สัญลักษณ์	ชนิดของวัตถุ	รูปแบบ	จำนวน
	M = ภายใน	B = บูลีน	
	K = ค่าคงที่	W = เวิร์ด	
	S = ระบบ	D = ดับเบิลเวิร์ด	
		F = จุดลอยตัว	

รูปที่ 4.6 แสดงการเข้าถึงข้อมูลที่เป็นเวิร์ด

ชนิดของข้อมูล

- M เป็นเวิร์ดภายในซึ่งจะเก็บค่าข้อมูลระหว่างที่ทำการเอ็กซ์คิวต์โปรแกรม โดยจะเก็บไว้ใน โชนของข้อมูล
- K เป็นเวิร์ดค่าคงที่ โดยจะเก็บค่าคงที่หรือประกอบด้วยสัญลักษณ์อักษรและตัวเลข โดยค่าเหล่านี้สามารถที่จะเขียนหรือเปลี่ยนแปลงได้ และจะเก็บไว้ในที่เดียวกันกับโปรแกรม และยังสามารถใช้หน่วยความจำแฟลชอีพროม (Flash Eprom) เป็นการขยายเพิ่มเติมได้อีกด้วย
- S เป็นเวิร์ดในการกระทำกับระบบ ซึ่งจะมีหน้าที่หลายอย่าง เช่น
- บางทีเป็นการแสดงให้เห็นสถานะของระบบ โดยการอ่าน %SWI
 - ส่วนการใช้อื่นๆ โดยการแสดงให้เห็นการทำงานที่การประยุกต์ใช้งานต่างๆ

รูปแบบของเวิร์ดข้อมูล (Format)

เจตนาของเวิร์ดข้อมูล คือ เป็นการเข้าถึงข้อมูลโดยซอฟต์แวร์ PL7 โดยการใช้รูปแบบที่

แตกต่างกัน

- B ไบท์ หมายถึง รูปแบบที่ใช้ในรูปของอักขระ
- W ความยาวของข้อมูล เป็น 16 บิต โดยสามารถเก็บเป็นค่าของพีชคณิต ระหว่าง -32768 จนถึง 32767

ตำแหน่งบิต

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0

บิตที่สำคัญสูงสุด

บิตที่สำคัญต่ำสุด

รูปที่ 4.7 รูปแบบของเวิร์ดข้อมูล

- D ความยาวของข้อมูลเป็น 2 เท่าของเวิร์ด โดยความยาวของข้อมูลจะเป็น 32 บิต สามารถเก็บค่าพีชคณิตระหว่าง -2147483648

															บิตที่สำคัญต่ำสุด																	
															15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
รูปแบบ 32 บิต	0 1 0 1				0 0 1 1				1 1 1 1				0 1 1 1				ตำแหน่ง n															
	0 0 1 1				0 1 1 0				0 1 0 1				0 0 1 0				ตำแหน่ง n+1															
															บิตที่สำคัญสูงสุด																	

รูปที่ 4.8 รูปแบบของคัมเบิลเวิร์ดข้อมูล.

F โพลตคิงพอยท์ เป็นการใช้รูปของวิทยาศาสตร์ของตัวเลข ตัวอย่างเช่น
1.285.28 เป็น 12.8528 E2

การเข้าถึงข้อมูลเป็นบิตที่ออกมาจากเวิร์ด (Word extract bits) ซอฟต์แวร์ของ PL7 สามารถ
นำบิต 1 ใน 16 บิต มาใช้ได้เป็นไปตามการแสดง ดังนี้



รูปที่ 4.9 แสดงบิตข้อมูลและเวิร์ด

ตัวอย่างเช่น

%MW10.X4 = บิตที่ 4 ของเวิร์ดภายใน %MW10

%QW5.1X10 = บิตที่ 10 ของเอาต์พุทเวิร์ด %QW5.1

4.2.5 บล็อกจะใช้บิตและเวิร์ดอย่างเฉพาะเจาะจง ดังต่อไปนี้

บิต ใช้อย่างสอดคล้องตามเอาต์พุทของบล็อก โดยสามารถเข้าถึงได้โดยการทดลอง
ใช้คำสั่งทางบูลีน

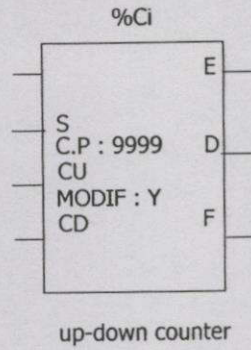
เวิร์ด เป็นไปตาม

a. ลักษณะของพารามิเตอร์ของบล็อก ส่วน โปรแกรมอาจเข้าถึงและอาจไม่เข้า
ถึงพารามิเตอร์

b. ค่าปัจจุบัน (ตัวอย่าง %Ci.V เป็นค่าเค้านเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการใช้คำสั่งบล็อกข้อมูล

ตารางที่ 4.3 ตารางกำหนดกลุ่มของเวิร์คและบิทข้อมูลของฟังก์ชันบล็อก

รายการฟังก์ชันบล็อก	กลุ่มของเวิร์คและบิท		ตำแหน่ง	โหมดการเขียน
ไทม์เมอร์ %Tmi (i=0-63)(1)	เวิร์ค	ค่าหมุนเวียน	%Tmi.V	ไม่ใช่
		ค่าที่ทำไว้ล่วงหน้า	%Tmi.P	ใช่
	บิท	ไทม์เมอร์ เอาท์พุท	%Tmi.Q	ไม่ใช่
อีพ-คานัน เคาน์เตอร์ %Ci (i=0-31)	เวิร์ค	ค่าหมุนเวียน	%Ci.V	ไม่ใช่
		ค่าที่ทำไว้ล่วงหน้า	%Ci.P	ใช่
	บิท	อันเดอร์โฟลว เอาท์พุท (ว่าง)	%Ci.E	ไม่ใช่
		เอาท์พุทที่มาถึงก่อน	%Ci.D	ไม่ใช่
		อันเดอร์โฟลว เอาท์พุท (เต็ม)	%Ci.F	ไม่ใช่
มอนสเตอร์เบิ้ล %Mni (i=0-7)	เวิร์ค	ค่าหมุนเวียน	%Mni.V	ไม่ใช่
		ค่าที่ทำไว้ล่วงหน้า	%Mni.P	ใช่
	บิท	เอาท์พุททางรอบโมโนสเตเบิล	%Mni.R	ไม่ใช่
รีจิสเตอร์ %Ri (i=0-3)	เวิร์ค	รีจิสเตอร์ อินพุท	%Ri.I	ใช่
		รีจิสเตอร์ เอาท์พุท	%Ri.O	ใช่
	บิท	การบันทึกเอาท์พุทติ่มอัปเดตโมเมนต์	%Ri.F	ไม่ใช่
		การบันทึกเอาท์พุทว่างอัปเดตโมเมนต์	%Ri.E	ไม่ใช่
ดรัม คอนโทรลเลอร์ %Dni (i=0-7)	เวิร์ค	รอบของชั้นจำนวน	%Dni.S	ใช่
		สถานะของสเต็ป j	%Dni.Wj	ไม่ใช่
	บิท	เวลากระทำการของสเต็ป	%Dni.V	ไม่ใช่
		ชั้นของรอบล่าสุดที่ถูกจำกัด	%Dni.F	ไม่ใช่
ซีรีส์ 7 ไทม์เมอร์ %Ti (i=0-63)	เวิร์ค	ค่าหมุนเวียน	%Ti.V	ไม่ใช่
		ค่าที่ทำไว้ล่วงหน้า	%Ti.P	ใช่
	บิท	การเดินเวลาของเอาท์พุท ไทม์เมอร์	%Ti.R	ไม่ใช่
		การกระทำของเอาท์พุท ไทม์เมอร์	%Ti.D	ไม่ใช่

การเข้าถึงของข้อมูลโดยการบ่งชี้

การเข้าถึงข้อมูลโดยตรง (Direct addressing) เป็นการเข้าถึงข้อมูลโดยตรงโดยการกำหนดค่าคงที่ตายตัวในการเข้าถึง และเมื่อเข้าถึง โปรแกรมสามารถเขียนใหม่ได้อีก ตัวอย่างเช่น : %MW26 เป็นเวิร์ดภายในที่ตำแหน่ง 26

การเข้าถึงโดยการบ่งชี้ (Indexed addressing) เป็นการเข้าถึงโดยการบ่งชี้ การเข้าถึงข้อมูลโดยตรงเป็นการกำหนดค่าให้เกิดการเข้าถึงโดยทางอ้อม ตัวอย่างเช่น : %MW108(%MW2) หมายถึง การเข้าถึงโดยตรงของเวิร์ด 108 + ค่าที่อยู่ใน %MW2 ถ้าค่าที่อยู่ใน %MW2 เท่ากับ 12 การเขียน %MW108 (%MW2) จะเป็นการเขียนถึง %MW120

ตารางที่ 4.4 แสดงการเข้าถึงข้อมูลโดยการบ่งชี้

ชนิด	รูปแบบ	ตำแหน่ง	ขนาดสูงสุด	การเข้าถึงโดยการเขียน
อินพุท บิต	บูลีน	%Lj[MWj]	$0 \leq +\%MWj \leq m(1)$	ไม่ใช่
เอาต์พุท บิต	บูลีน	%Qj[MWj]		ใช่
อินเทอนอล บิต	บูลีน	%Mi[MWj]		ใช่
อินเทอนอล เวิร์ด	Single length	%MWj[%MWj]		ใช่
	Double length	%MDi[%MWj]		ใช่
	Floating length	%MFi[%MWj]		ใช่
คอนสแตนท์ เวิร์ด	Single length	%KWj[%MWj]		ไม่ใช่
	Double length	%KDi[%MWj]		ไม่ใช่
	Floating length	%KFi[%MWj]		ไม่ใช่
เวิร์ด เทเบิล	<Object> [%MWj]:L	%MWj[%MWj]:L		ใช่

ถ้ามีการบ่งชี้เลขเกิดไปจากโปรแกรม จะมีตัวบิตข้อมูลกระทำต่อระบบ %S20 เป็นตัวบอก ถ้าปรกติ การอ้างข้อมูลอยู่ในขีดจำกัด ค่า%S20 จะเป็น 0 แต่ถ้าเลขเกิดออกไป %S0 จะเป็น 1

4.2.6 การใช้หน่วยความจำ (User memory)

4.2.6.1 ที่ว่างของหน่วยความจำของ TSX 3722 PLC ซึ่งสามารถเข้าถึงได้โดยการใช้ความแตกต่างที่เห็นเด่นชัดของ

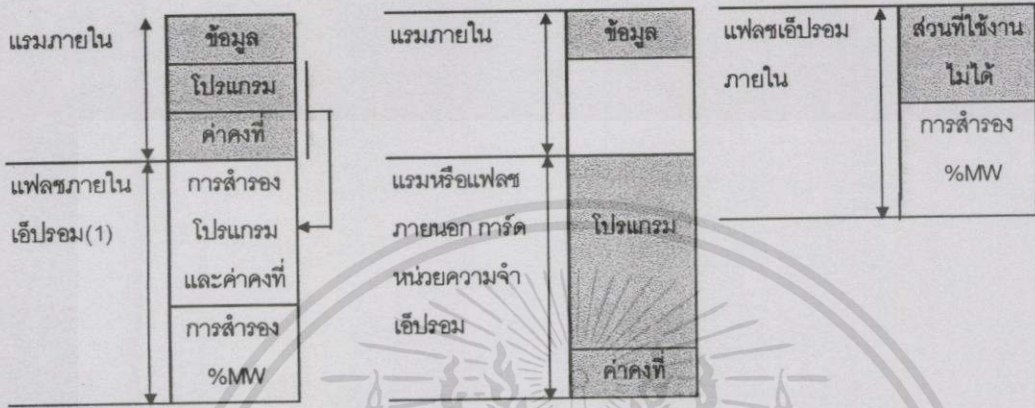
หน่วยความจำบิต (Bit memory) ถ้ารวมทั้งในแรมของ โปรเซสเซอร์ สามารถกำหนดได้ 1280 บิต

หน่วยความจำเวิร์ด (Word memory) เวิร์ดสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้แรม เป็นตัวเสริม

หน่วยความจำ หรือเรียกว่าแฟลช อีพริอม โดยใช้เป็นการ์ดหน่วยความจำ และสามารถขยายได้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32 หรือ 64K เวิร์ด ในตัว PLC เองจะมี 16K เวิร์ดหน่วยความจำแฟลช อีพรีอิม อยู่แล้ว ใช้ได้กับโปรแกรม 15K เวิร์ด และ 1000 เวิร์ดภายใน ส่วนถ้าขยายเป็น 32 หรือ 64K เวิร์ด จะใช้การ์ด PCMCIA ซึ่งสามารถเพิ่มหน่วยความจำในส่วนโปรแกรม และค่าคงที่ได้เพิ่มมากขึ้นอีก ในรูปที่ 4.10 เป็นการจัดหน่วยความจำโดยไม่ได้ใช้การ์ด PCMCIA และใช้การ์ดนี้



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเมมโมรีเวิร์ด แบบไม่มีเมมโมรีการ์ด กับแบบมีเมมโมรีการ์ด

4.2.6.2 หน่วยความจำบิต (Bit memory)

การนำส่วนต่างๆ มาประกอบกัน ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของหน่วยความจำบิตของ PLC TSX 57

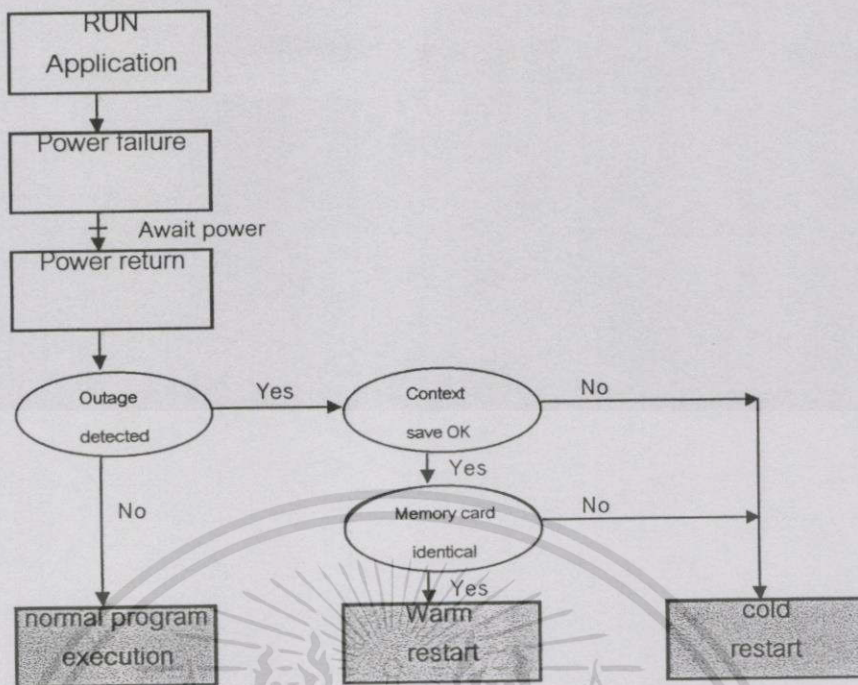
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงหน่วยความจำแบบบิต

		TSX 37-10	TSX 37-21/22	TSX 57-10	TSX 57-20
ระบบของบิต	%SI	128	128	128	128
บิต I/O	%I/Qx	408(1)	472(1)	512	1024
บิตภายใน	%Mi	256	256	4096(2)	4096(2)
บิตสแต็ป	%Xi	96	128	128	128

4.2.7 โหมดการทำงานของ PLC

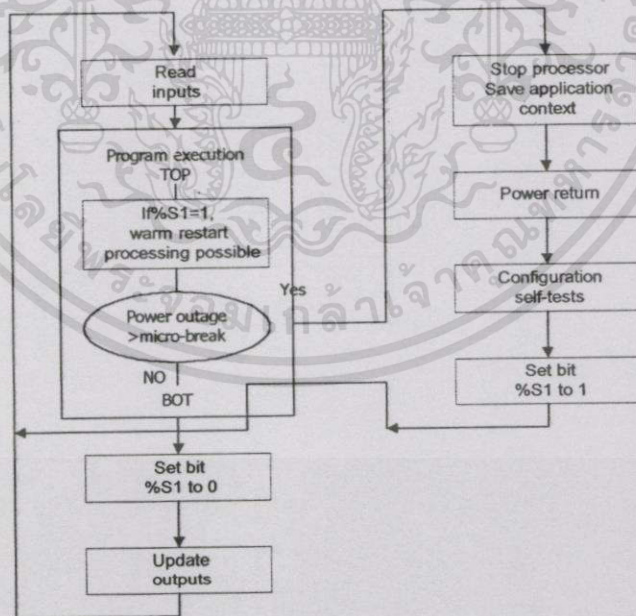
เมื่อกำลังงานทางเข้าทพุทเกิดขึ้นระบบจะเก็บการใช้งานทางเข้าทพุทและเวลาลงไปด้วย เพราะเมื่อมีการนำมาใช้ชิ้นใหม่จากการเปิดเครื่องใหม่ระบบจะได้นำสถานะเข้าทพุทเดิมลงมาแต่สามารถกำหนดการสตาร์ทโดยการกำหนดการสตาร์ทที่ซูด โคลรีสตาร์ทและวอลต์รีสตาร์ทเพื่อทำการเริ่มต้นระบบใหม่ในทันทีที่เริ่มเปิดเครื่องใหม่เพื่อเป็นการเปลี่ยนเข้าทพุทใหม่ไม่ให้มีผลกับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น คือทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงโหมดการทำงานของ PLC

4.2.8 กระบวนการกระตุ้นการเริ่มสตาร์ท (Warm restart processing)



รูปที่ 4.13 กระบวนการกระตุ้นการเริ่มสตาร์ท

4.2.8.1 การเอ็ชคิวค่าโปรแกรมขณะเริ่มสตาร์ท (Restart program execution)

การเอ็ชคิวโปรแกรมขณะเริ่มสตาร์ทนั้น ในช่วงเวลาที่กำลังงานยังไม่สมบูรณ์

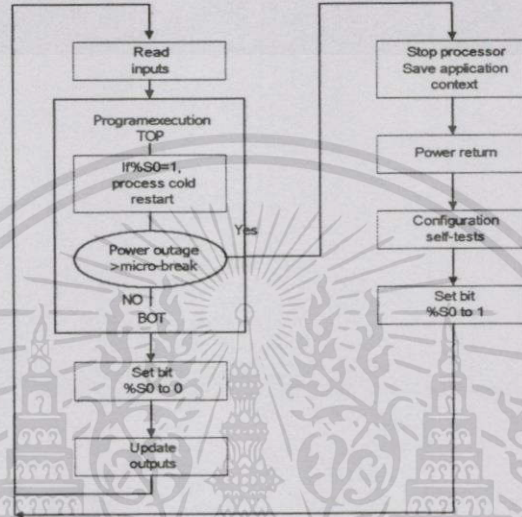
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLC จะเข้าสู่การเอ็กซ์คิวโปรแกรมขณะเริ่มสตาร์ท ในช่วงเวลานี้กำหนดโดยใช้บิต %S1 ซึ่งจะเซ็ทเป็น 1 เวลาสแกน ซึ่งในช่วงเวลานี้จะไม่มีการทำงานในส่วนของเขาท์พุท

กระบวนการกระตุ้นการเริ่มสตาร์ทในการทำการกระตุ้นตอนแรกในขณะเริ่มสตาร์ท

4.2.8.2 การเริ่มสตาร์ทของเครื่องเย็น

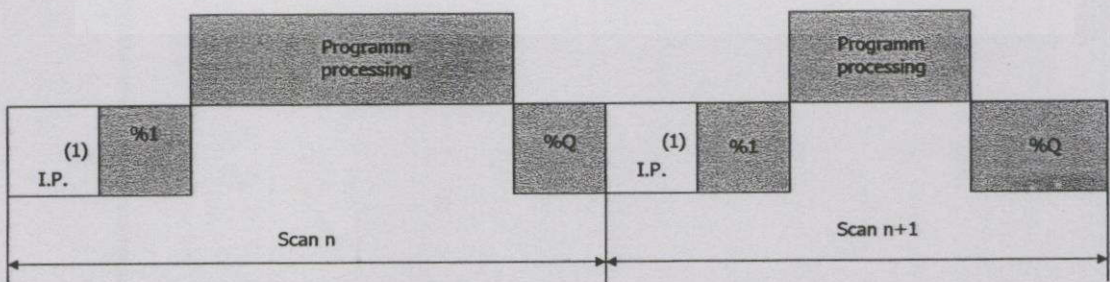


รูปที่ 4.14 กระบวนการเริ่มสตาร์ทของเครื่องขณะเครื่องหยุดหลังจากปิดเครื่องโดยไม่จ่ายไฟเลี้ยง

4.2.9 โครงสร้างของโปรแกรมและการทำงานของโปรแกรม

4.2.9.1 รอบการทำงานของ PLC (Cyclic execution)

ในการทำงานลักษณะนี้ จะมีความสอดคล้องกับการสแกนโดยปกติของ PLC (default option) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการเชื่อมโยงวงจรของมาสเตอร์ทาส หลังจากการเช็คข้อมูลเข้าที่พุทให้เป็นปัจจุบัน ระบบจะมีกระบวนการเฉพาะและจะเชื่อมไปสู่การสแกนทาสอื่นๆ



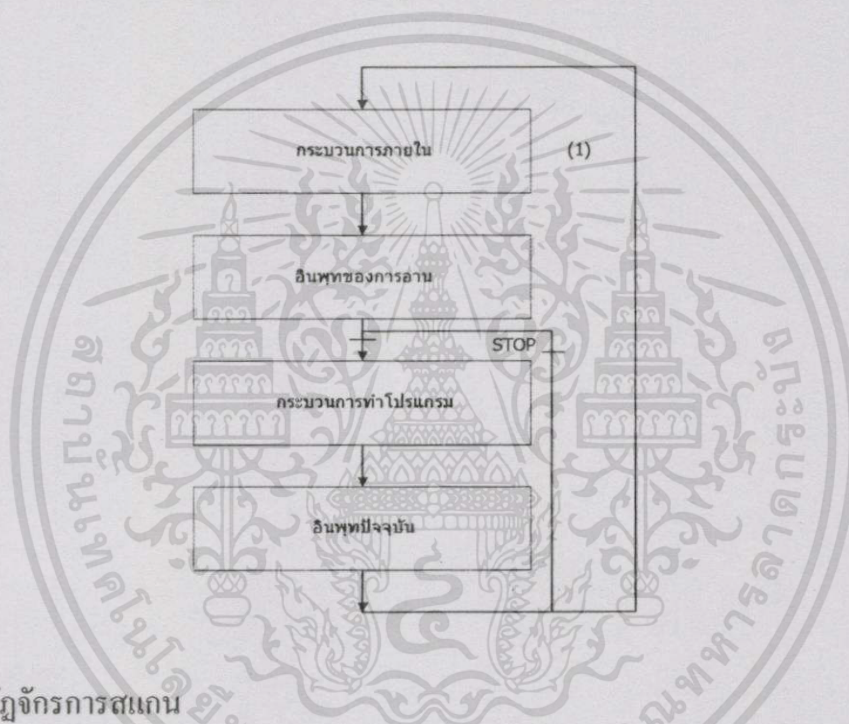
รูปที่ 4.15 รอบการทำงานของ PLC

I.P. กระบวนการภายใน (Internal processing) ระบบจะชี้ให้เห็นการติดตามการทำงานของ PLC และความต้องการของกระบวนการจากจุดต่อวงจร

%I การอ่านข้อมูลอินพุต เขียนลงในหน่วยความจำ สถานะข้อมูลอินพุตของ discrete และของแต่ละ โมดูลที่มีความสัมพันธ์กันในแต่ละงาน

กระบวนการทำโปรแกรม : เป็นส่วนของการทำโปรแกรมซึ่งเกิดขึ้นได้จากการที่มีผู้เขียนโปรแกรมเข้าไป

%Q การแสดงสถานะปัจจุบันของเอาต์พุต : สามารถเขียนความสัมพันธ์ที่เป็นบิต / เวิร์ด ได้ หรือความสัมพันธ์ที่เป็น โมดูลได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของ โปรแกรมการใช้งาน



รูปที่ 4.16 วัฏจักรการสแกน

PLC ขณะทำงาน : โปรเซสเซอร์จะแสดงรายการของกระบวนการภายใน, การอ่านอินพุต, กระบวนการต่างๆ ในการใช้โปรแกรมและการปรับเอาต์พุตให้เป็นปัจจุบัน

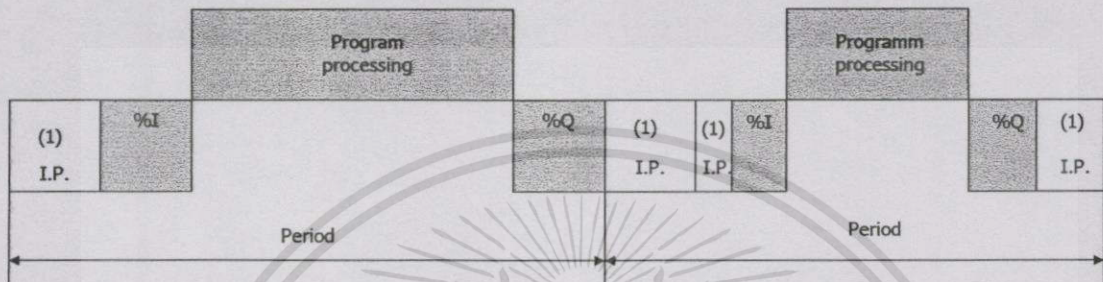
PLC ขณะหยุดทำงาน : โปรเซสเซอร์จะแสดง

1. กระบวนการภายในของ PLC
2. การอ่านอินพุต
3. และขึ้นอยู่กับทางเลือกการติดตั้งของ PLC เอง

4.2.10 คาบเวลาการทำงานของ PLC

โหมคการทำงานนี้จะอ่านอินพุตและกระบวนการของโปรแกรม โดยการทำให้เข้าที่พุทให้เป็นปัจจุบัน ซึ่งจะกำหนดให้มีคาบเวลาดั้งแต่ 1-255 ms

ณ จุดที่ PLC เริ่มสแกนและเวลาเริ่มต้น ค่าของเวลาจะลดลงไปและจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของโปรแกรม แต่คาบเวลาการทำงานนี้จะแสดงเท่ากันทุกๆ คาบของเวลา



รูปที่ 4.17 แสดงคาบเวลาการทำงานของ PLC

I.P. กระบวนการภายใน (Internal processing) ระบบจะชี้ให้เห็นการติดตามการทำงานของ PLC และความต้องการของกระบวนการจากจุดต่อวงจร

%I การอ่านข้อมูลอินพุต เขียนลงในหน่วยความจำ สถานะข้อมูลอินพุตของ discrete และของแต่ละ โมดูลที่มีความสัมพันธ์กันในแต่ละงาน

กระบวนการทำโปรแกรม : เป็นส่วนของการทำโปรแกรมซึ่งเกิดขึ้นได้จากการที่มีผู้เขียนโปรแกรมเข้าไป

%Q การแสดงสถานะปัจจุบันของเอาต์พุต สามารถเขียนความสัมพันธ์ที่เป็นบิต / เวิร์ดได้ หรือความสัมพันธ์ที่เป็น โมดูลได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของโปรแกรมการใช้งาน

ในกรณีที่อยู่ในช่วงการทำงานของ PLC ตัวโปรเซสเซอร์จะสั่งการให้กระทำกระบวนการภายใน การอ่านทางอินพุตกระบวนการทางโปรแกรม ตลอดจนการปรับเอาต์พุตให้เป็นปัจจุบัน

ถ้าคาบเวลายังเหลืออยู่ตัวโปรเซสเซอร์จะสั่งให้วัฏจักรการทำงานจนกระทั่งสิ้นสุดคาบเวลาผ่านทางกระบวนการภายใน

ถ้าเวลาการทำงานมากกว่าคาบเวลาของ PLC จะแสดง **OVERRUN** โดยบิต **%S19** จะเป็น 1 ถึงแม้การทำงานจะเต็มที่แต่กระบวนการยังคงดำเนินต่อไป

ในกรณีอยู่ในช่วง PLC ไม่ทำการ ตัวโปรเซสเซอร์จะแสดง

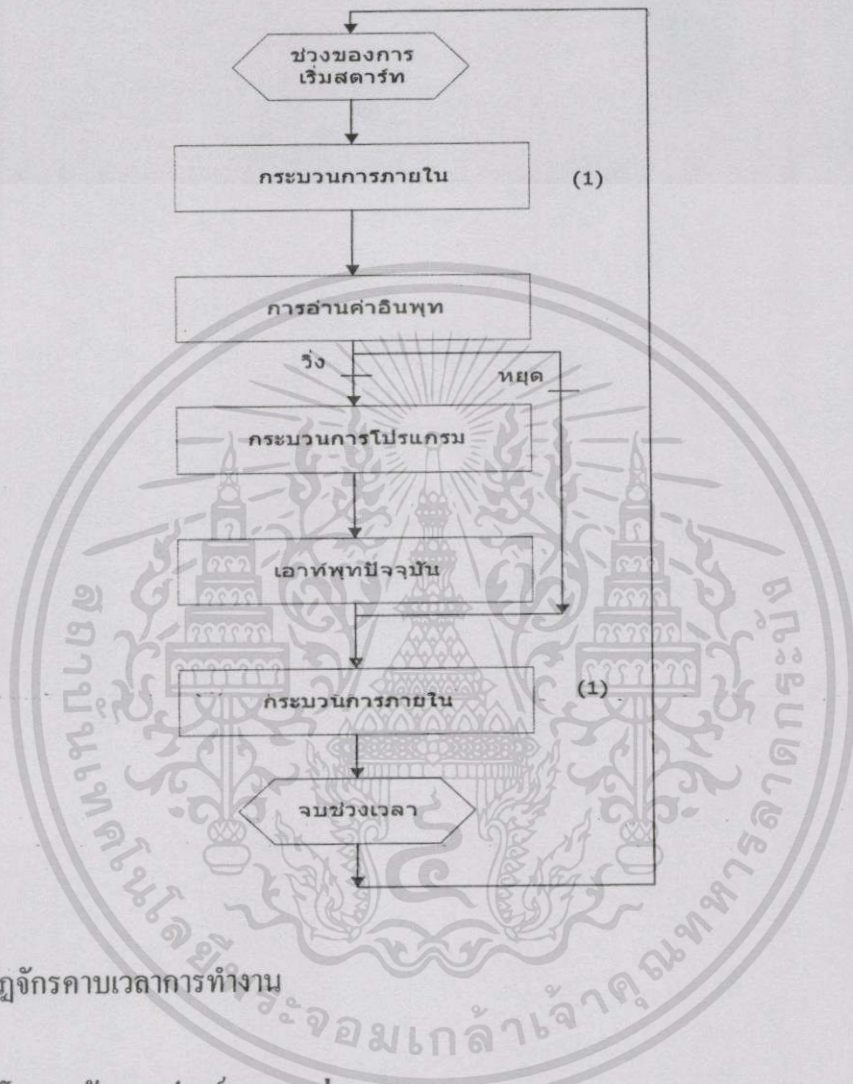
a. กระบวนการภายใน

b. อินพุตที่อ่านได้

c. และกรณีอื่นๆ ที่ได้เลือกไว้เพื่อการใช้งาน

วัฏจักรการแสดงผลควบคุมกระบวนการ มีด้วยกัน 2 ระบบ คือ

- แสดงคาบเวลา OVERRUN
- แสดงผลผ่านทางวอร์ชด็อก

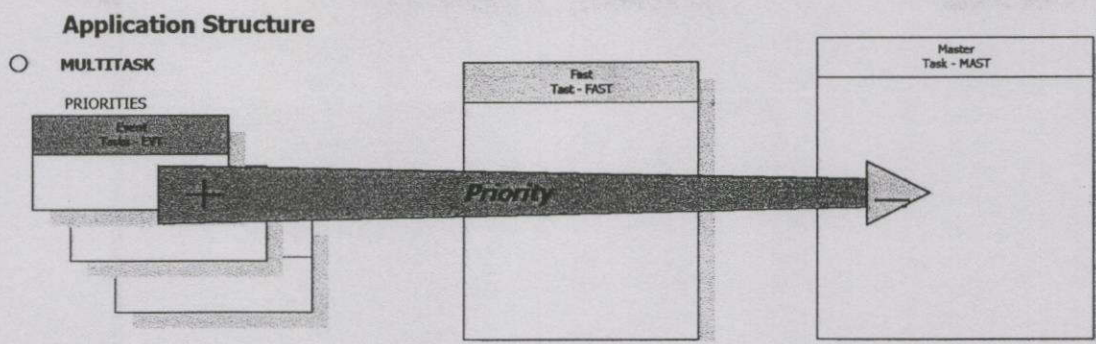


รูปที่ 4.18 วัฏจักรคาบเวลาการทำงาน

4.2.11 โครงสร้างซอฟต์แวร์หลายๆ ส่วนงาน

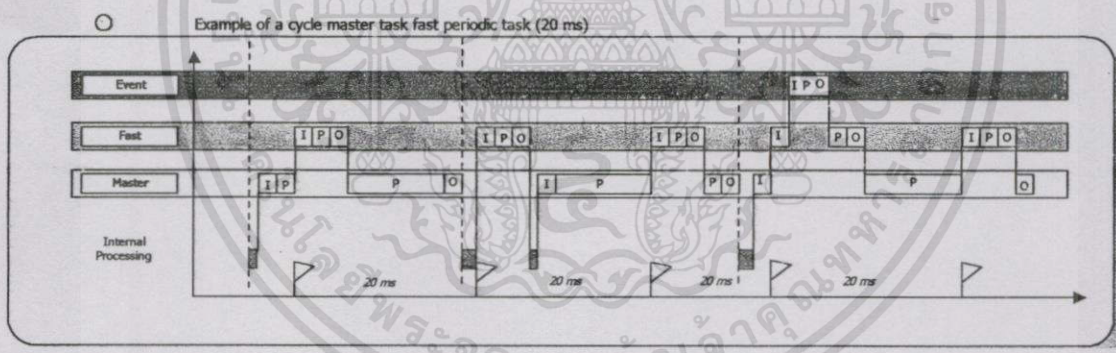
4.2.11.1 รายละเอียด โครงสร้างของภาระงานแสดงให้เห็น ดังนี้

- มาตรฐานทาส MAST สามารถใช้ได้ทั้งการสแกนแบบวัฏจักร หรือคาบเวลา
- ฟาสต์ทาส EVTi จะทำงานเมื่อ I/O มีเหตุการณ์เกิดขึ้น โดยมีการเลือก I/O นั้นๆ ไว้เป็นเหตุการณ์ที่ต้องเข้าไปตอบสนองการทำงานนำได้ทันที



รูปที่ 4.19 การจัดการของทาสท์

จากรูปที่ 4.19 ในขณะทำงานที่มาสเตอร์ทาสท์ รับอินพุตและดำเนินการทางกระบวนการของโปรแกรมอยู่ ถ้าถึงคาบเวลาของการสร้างในส่วนฟาสท์ทาสท์ ก็จะสลับไปดำเนินการทางอินพุตกระบวนการ โปรแกรม ตลอดจนเข้าที่พุด ดังนั้นจึงกลับมาทำงานในส่วนของมาสเตอร์ทาสท์ต่อให้จบ แต่ถ้าในกระบวนการต่อมานอกจากจะทำงานมาสเตอร์ทาสท์และมีมาสเตอร์ทาสท์แทรกแล้ว ถ้ามีอินพุตที่ทริกเกอร์ทาสท์ เข้ามาแทรกโปรเซสเซอร์จะทำให้โปรแกรมในส่วนนี้ก่อน จึงกลับมาทำฟาสท์ทาสท์และมาสเตอร์ทาสท์ต่อ



รูปที่ 4.20 แสดงความสำคัญของการทำงานในแต่ละทาสท์

Master Task

เป็นส่วนองงานซึ่งมีลำดับความสำคัญน้อยที่สุดของการจัดการ โปรแกรมการประยุกต์ใช้งาน ไม่ว่าจะกรณีใดโหมดการทำงานเป็นทั้งแบบคาบเวลาหรือวัฏจักรเวลา ภาระงานนี้จะถูกมอนิเตอร์โดยวอร์ลด์ดอกภายใน PLC ซึ่งจะใช้วิธีตรวจจับความคิดปกติระหว่าง โปรแกรมการประยุกต์ใช้งาน ในส่วนเหตุการณ์ที่เกิดการทำงานที่เลยเกิดขึ้น บิตควบคุมระบบ%S11 จะเป็น1 ซึ่งจะทำให้ PLC หยุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fast Task

ส่วนการทำงานนี้ ซึ่งจะมีลำดับความสำคัญสูงกว่ามาสเตอร์ ทาสท์ คือการทำงานเป็นแบบคาบเวลา ในทันทีที่ออกจากเวลา สำหรับการกระทำของภาระงานลำดับความสำคัญที่ต่ำกว่า ก็คือมาสเตอร์ ทาสท์

คาบเวลาของฟาสท์ทาสท์ สามารถกำหนดได้ตั้งแต่ 1-255 ms โดยคาบเวลาอาจจะยาวกว่าการทำงานของคาบเวลาฟาสท์ทาสท์ แต่ต้องระวังการเกิดการกระทำที่เลเย็ดของภาระงานที่มีลำดับความสำคัญที่ต่ำกว่า

การทำงานของฟาสท์ทาสท์จะถูกลบออกโดยวอตช์ดอก ซึ่งจะใช้ตรวจจับความผิดปกติระหว่างโปรแกรมการประยุกต์ใช้งาน โดยถ้าเกิดเหตุการณ์ผิดปกติของการทำงานแล้ว บิทควบคุมระบบ %S11 จะเป็น 1 ซึ่งจะเป็นการประกาศการใช้งานโปรแกรมที่ผิดพลาด ซึ่ง PLC จะหยุดทำงาน



บทที่ 5

เครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์เอชชนิดเหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก ซึ่งการควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้มี 5 วิธี คือ

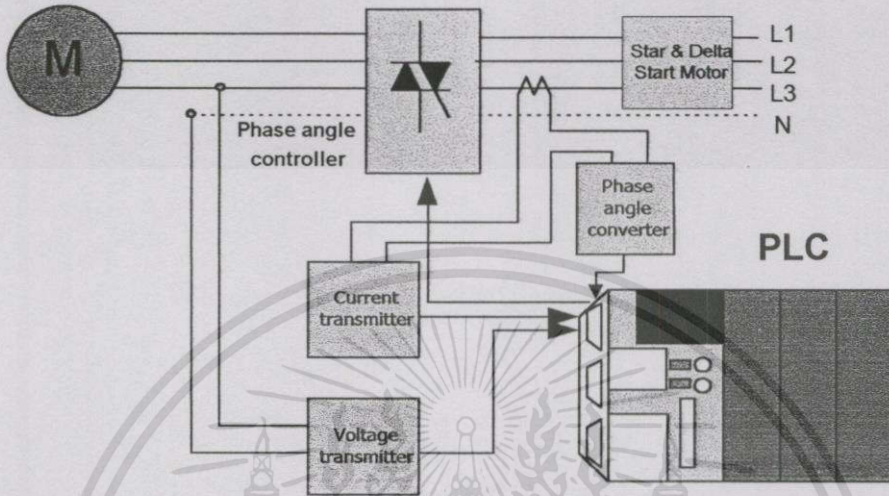
1. การควบคุมมอเตอร์เอชด้วยวิธีควบคุมเฟส โดยอาศัยการควบคุมเฟสที่กล่าวในบทที่ 3
2. การควบคุมมอเตอร์เอชด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าดิซีโดยอาศัยอินเวอร์เตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์เอชด้วยแหล่งจ่ายไฟดิซี จำเป็นต้องเปลี่ยนไฟฟ้าดิซีให้เป็นไฟฟ้าเอชก่อน แล้วจึงป้อนเข้ามอเตอร์เอช ซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์
3. การควบคุมมอเตอร์เอชด้วยวิธีปรับค่าโวลท์/เฮิร์ตซ์ให้คงที่ การควบคุมมอเตอร์เอชให้ทำงานด้วยประสิทธิภาพที่ดี เราต้องควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน โดยมีฟลักซ์คงที่ โดยการรักษาค่าอัตราส่วน "โวลท์/เฮิร์ตซ์" ให้คงที่
4. การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบมีลวดพันบนส่วนหมุน โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนกำลังสลิปด้วยการจัดค่าสัดส่วนการเปลี่ยนรูปเป็นกำลังและการเปลี่ยนรูปเป็นกำลังสูญเสียในทองแดง

แต่ในงานวิจัยนี้ จะเสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ที่มีลักษณะการทำงานที่มีช่วงรับภาระมากและช่วงรับภาระน้อยสลับกัน ซึ่งโดยปกติมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมอเตอร์ทำงานรับภาระเต็มพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์จะใช้วิธีการควบคุมเฟสดังในข้อที่ 1 โดยการช้อปสัญญาณไฟฟ้าเอชเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ลงมาให้เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำงานต่อไปได้ ปัจจุบันลำดับการทำงานของเครื่องจักรมักจะใช้ PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมและ PLC จะรู้ช่วงเวลาการทำงานรับภาระมากหรือรับภาระน้อยของมอเตอร์อยู่แล้ว งานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมให้ PLC เพื่อให้ PLC ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตามช่วงจังหวะการทำงาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ในเครื่องจักรนั้นๆ

5.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

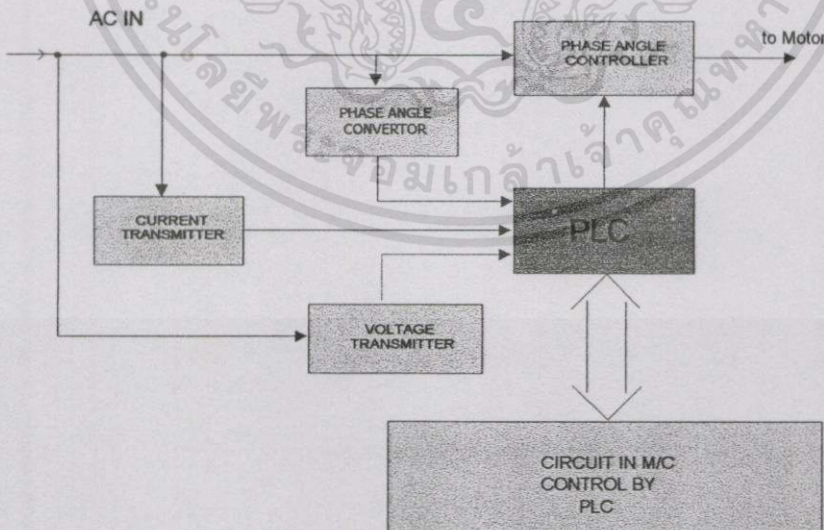
PLC ในชุดควบคุมจะตรวจสอบมุมระหว่างแรงดันและกระแสโดยการวัดจุดโวลท์เดจซีโรครอสซิง โดยการวัดแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ จากนั้นนำไปคำนวณค่าที่เหมาะสมแล้วสั่งให้ไทรสเตอร์จ่ายพลังงานแก่มอเตอร์เท่าที่ภาระของมอเตอร์จำเป็นเท่านั้น โดยจะค่อยๆ ลดแรงดันถึงจุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่มอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งเป็นจุดความเร็วรอบของมอเตอร์ยังคงใช้พลังงานต่ำสุด เมื่อมอเตอร์มีความต้องการภาระมากขึ้น PLC ในชุดควบคุมก็จะสั่งให้ไทรสเตอร์จ่ายพลังงานให้แก่ มอเตอร์มากขึ้นเท่าที่จำเป็น โดยมอเตอร์ยังคงรอบเดิมไว้ ดังรูปที่ 5.1

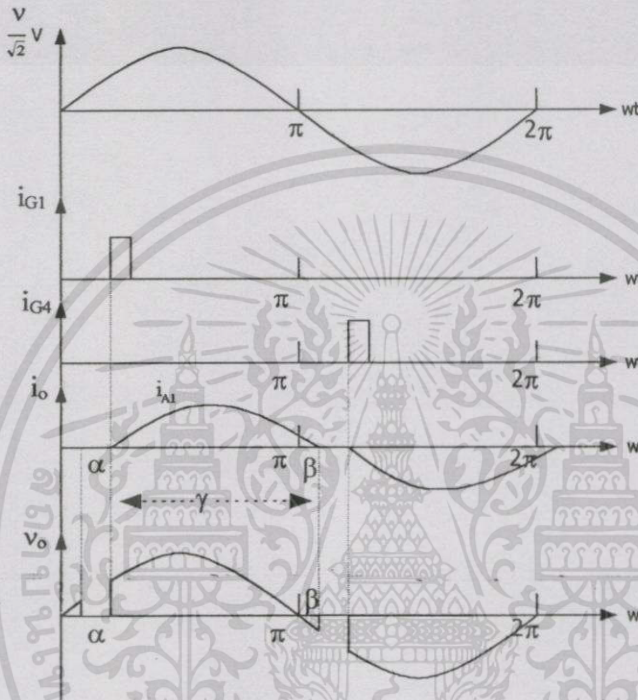
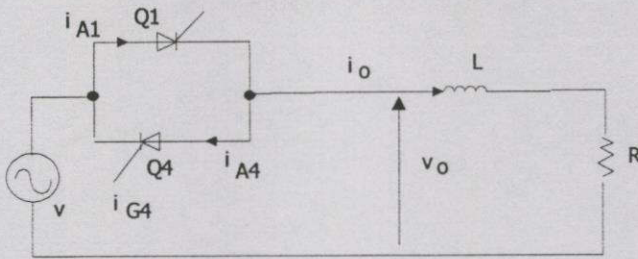


รูปที่ 5.1 การต่อเครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์

การตรวจสอบมุมระหว่างแรงดันและกระแสจะทำอยู่ตลอดเวลา โดยใช้ตัววัดค่ามุมเฟส (phase-angle metering) ระหว่างกระแสและแรงดันตลอดเวลา ดังแสดงวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 5.2 การปรับจ่ายพลังงานของไทรสเตอร์ทำโดยการปรับมุม α ดังในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ไดอแกรมการทำงานเครื่องควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์



รูปที่ 5.3 รูปที่ 2 แสดงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิด 1 เฟส

จะเห็นได้ว่าค่าของมุมที่ SCR นำกระแส (γ) จะไม่สามารถเกิน 180° แสดงดังในรูปที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อมุมทริกเกอร์ (α) ลดลงจนกระทั่งจำนวนมุมที่ SCR นำกระแสเท่ากับ 180° รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเอาต์พุตจะเป็น รูปไซน์ และจะได้สมการของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดังนี้

กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่าน SCR จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{T(\text{ave})} = \frac{\sqrt{2}V}{Z} I_N = I_{\text{base}} \cdot I_N \quad (5.1)$$

$$I_N = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{\omega L}(\alpha - t)}] d(\omega t) \quad (5.2)$$

กระแส RMS ที่ไหลผ่าน SCR จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{T(\text{rms})} = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \cdot I_{RN} = I_{\text{base}} \cdot I_{RN} \quad (5.3)$$

$$I_{RN} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{L \frac{R}{\omega} (\alpha - \omega t)}]^2 d(\omega t)]^{1/2} \quad (5.4)$$

กระแส RMS ที่ไหลในโหลดหรือเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$I_{O(\text{rms})} = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \cdot I_{O(RN)} \quad (5.5)$$

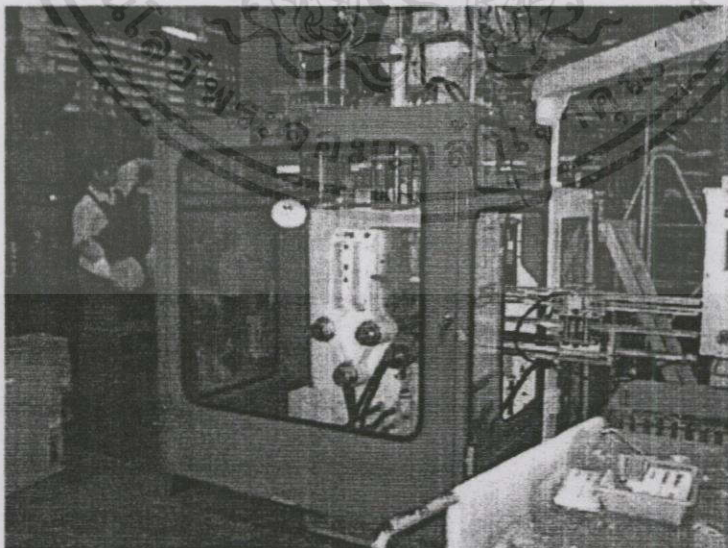
แต่ $I_{O(RN)} = [I_{RN}^2 + I_{RN}^2]^{1/2} = \sqrt{2} I_{RN}$

ดังนั้น $I_{O(\text{rms})} = \frac{2V}{Z} \cdot I_{RN} = \sqrt{2} I_{T(\text{RMS})} \quad (5.6)$

แรงดัน RMS ที่ตกคร่อมโหลดจะมีค่าเท่ากับ

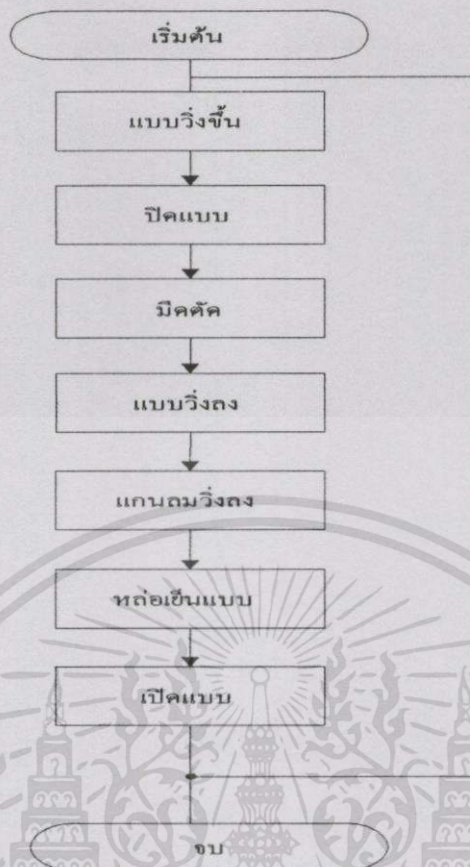
$$V_{O(\text{rms})} = \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sqrt{2}V \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)]^{1/2} \\ = \sqrt{2}V \left[\frac{1}{2\pi} \left\{ \gamma + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2(\alpha + \gamma) \right\} \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองจะเป็นเครื่องเป่าขวดพลาสติก ดังในรูปที่ 5.4 โดยจะมีลำดับการทำงานดังรูปที่ 5.5 เริ่มจากชุดกระบอกลูกไฮดรอลิกเหวี่ยงแบบ (mold) ขึ้น (carriage up) จากนั้นจะทำการปิดแบบ (close clamp) และมีจะทำการตัดพลาสติกของจากหัวเป่า จากนั้นก็จะเหวี่ยงแบบลงมาให้แกนลงมาถึงแบบและทำการเป่าลมพร้อมกับหล่อเย็นแบบให้พลาสติกเย็นลง เมื่อครบเวลาการหล่อเย็นก็จะทำการเปิดแบบเพื่อให้ชิ้นงานหล่นออกมาใช้งานได้



รูปที่ 5.4 เครื่องเป่าขวดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ไคอแกรมการทำงานของเครื่องเป่าขวดพลาสติก

จากวงจรไฮดรอลิกของเครื่องเป่าขวดพลาสติกดังรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าเมื่อปั๊มจ่ายพลังงานให้แก่ระบบผ่านเช็ควาล์ว(หมายเลข 16) เข้าสู่โซลินอยวาล์วและไปยังกระบอกสูบ ในกรณีที่ระบบทำงาน เปิด-ปิดกระบอกสูบต่างๆ แรงดันที่จ่ายออกจากปั๊มก็ต้องสร้างให้เพียงพอต่อความต้องการ แรงดันจะมีมาก เมื่อมีการดันกระบอกสูบ แต่ถ้ามีการปิดแบบ (โดยการแคลมป์) และอยู่ในช่วงหล่อเย็น เมื่อกระบอกสูบถูกดันออกจนสุดจะทำให้แรงดันเหนือเช็ควาล์ว มากกว่าก่อนที่จะเข้าเช็ควาล์ว ผลที่ตามมาวิธีฟาว์ดจะปลดแรงดันลงแทงค์ ทำให้มอเตอร์จ่ายพลังงานมาให้ปั๊มเหมือนไม่มีภาระ เพราะปั๊มจะส่งน้ำมันไฮดรอลิกลงถึงหมดแต่ในระบบแรงดันที่จ่ายให้กระบอกสูบยังคงที่ที่ค่าแรงดันใช้งาน เพราะในระบบน้ำมันไฮดรอลิกจะถูกบดอัดเอาไว้ และยังมีตัวแอดคิวิมูลเตเตอร์ (หมายเลข 18) คอยจ่ายพลังเสริมให้แก่ระบบ ในกรณีที่เกิดการรั่วไหลของน้ำมันซึ่งเป็นการรักษาพลังงานให้ระบบในขณะที่ใช้งานได้ โดยไม่ต้องจ่ายพลังงานมาจากปั๊มน้ำมัน ซึ่งก็หมายความว่าระบบจะมีภาระน้อย ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสมือนวิ่งโดยไม่มีภาระ อัตราการจ่ายน้ำมันของปั๊มไฮดรอลิกคำนวณได้จากอัตราความจุของปั๊มต่อรอบคูณกับความเร็วยรอบที่หมุน ดังสมการ (5.8)

$$Q_{p \text{ ทฤษฎี}} = V_p N \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดความจุของปั๊มก็คือ ปริมาตรจ่ายของปั๊ม (V_p) นั่นเอง เพราะปั๊มไฮดรอลิกเป็นปั๊มชนิดดูด-อัด คือดูดมาเท่าไรก็จะส่งออกไปเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริง อัตราการจ่ายน้ำมันของปั๊มไม่สามารถดูดและจ่ายได้ 100% จะเกิดการสูญเสีย เนื่องจากระยะเบียดระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ภายในปั๊ม อัตราจึงต้องคิดประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (η_{vp}) ด้วย โดยเอา η_{vp} ไปคูณกับอัตราการจ่ายทางทฤษฎี เพราะอัตราจ่ายจริงมีค่าน้อยกว่าอัตราจ่ายทางทฤษฎี ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรนี้มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานของปั๊ม คือ การเลือกใช้ขนาดของปั๊มให้สัมพันธ์กับความดันใช้งานในระบบ เพราะความดันในระบบยิ่งสูงมากเท่าไร ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรก็ยิ่งลดลงเท่านั้น

$$Q_p = \frac{V_p \cdot N_p \cdot \eta_{vp}}{\text{ค่าคงที่}} \quad (5.9)$$

เมื่อ Q_p	=	อัตราจ่ายน้ำมันจริงของปั๊มไฮดรอลิก มีหน่วยเป็น gpm, lpm
V_p	=	ปริมาตรจุหรือปริมาตรจ่ายของปั๊มต่อรอบมีหน่วยเป็น $\text{in}^3/\text{rev}, \text{cm}^3/\text{rev}$
N_p	=	ความเร็วรอบที่ปั๊มหมุน มีหน่วยเป็น RPM
η_{vp}	=	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่ตัวปั๊ม
ค่าคงที่	=	ค่าคงที่ในการแปลงหน่วยเพื่อให้ได้หน่วย Q_p ตามต้องการ

อัตราป้อนน้ำมันแก้มอเตอร์ไฮดรอลิก เพื่อให้ความเร็วรอบหมุนที่เพลตามต้องการ จะขึ้นกับปริมาตรจุหรือปริมาตรป้อนต่อรอบและความเร็วรอบที่ต้องการ เช่น สมเป็คของมอเตอร์ไฮดรอลิกตัวหนึ่งบอกว่ามีปริมาตรต่อรอบเป็น 80 ลูกบาศก์นิ้วต่อรอบ หมายความว่า ต้องป้อนน้ำมันให้กับมอเตอร์ตัวนี้จำนวน 80 ลูกบาศก์นิ้ว จึงจะทำเพลลาหมุนได้หนึ่งรอบ แต่ในขณะที่ทำงานจะมีการรั่วซึมที่ระยะเบียดของส่วนประกอบภายใน ถ้าป้อนน้ำมันให้เท่ากับสมเป็คก็อาจหมุนได้ไม่ครบรอบ จึงต้องเพิ่มอัตราป้อนให้กับมอเตอร์ไฮดรอลิกด้วยการเอาประสิทธิภาพเชิงปริมาตรไปหาร ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรนี้ขึ้นกับสภาพของมอเตอร์ไฮดรอลิกและความดันใช้งาน

$$Q_M = \frac{V_M \cdot N_M}{\text{ค่าคงที่} \times \eta_{vM}} \quad (5.10)$$

เมื่อ Q_M	=	อัตราป้อนน้ำมันแก้มอเตอร์ไฮดรอลิก มีหน่วยเป็น gpm, lpm
V_M	=	ปริมาตรจุ / ปริมาตรป้อนต่อรอบ มีหน่วยเป็น $\text{in}^3/\text{rew}, \text{cm}^3/\text{rew}$
N_M	=	ความเร็วรอบหมุนที่เพลลา มีหน่วยเป็น rpm
η_{vM}	=	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่ตัวมอเตอร์ไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ = ค่าคงที่ในการแปลงหน่วยเพื่อให้ได้หน่วย Q_m ตามต้องการ

กำลังงานไฮดรอลิก หมายถึงความดันใช้งานในระบบที่เกิดขึ้นตามภาระของงานกล แล้วกระทำต่อพื้นที่ภายในห้องปริมาตรของอุปกรณ์การทำงานจนได้แรงผลักดันให้ภาระของงานกลนั้นเคลื่อนที่ไป

$$\text{กำลังงานไฮดรอลิก} = \frac{\text{งานไฮดรอลิก}}{\text{เวลา}}$$

$$= \frac{\text{ความดันใช้งาน} \times \text{ปริมาตรของน้ำมันที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ทำงาน}}{\text{เวลา}}$$

$$= \text{ความดันใช้งาน} \times \text{อัตราการไหลที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ทำงาน} / \text{กำลังงานไฮดรอลิก}$$

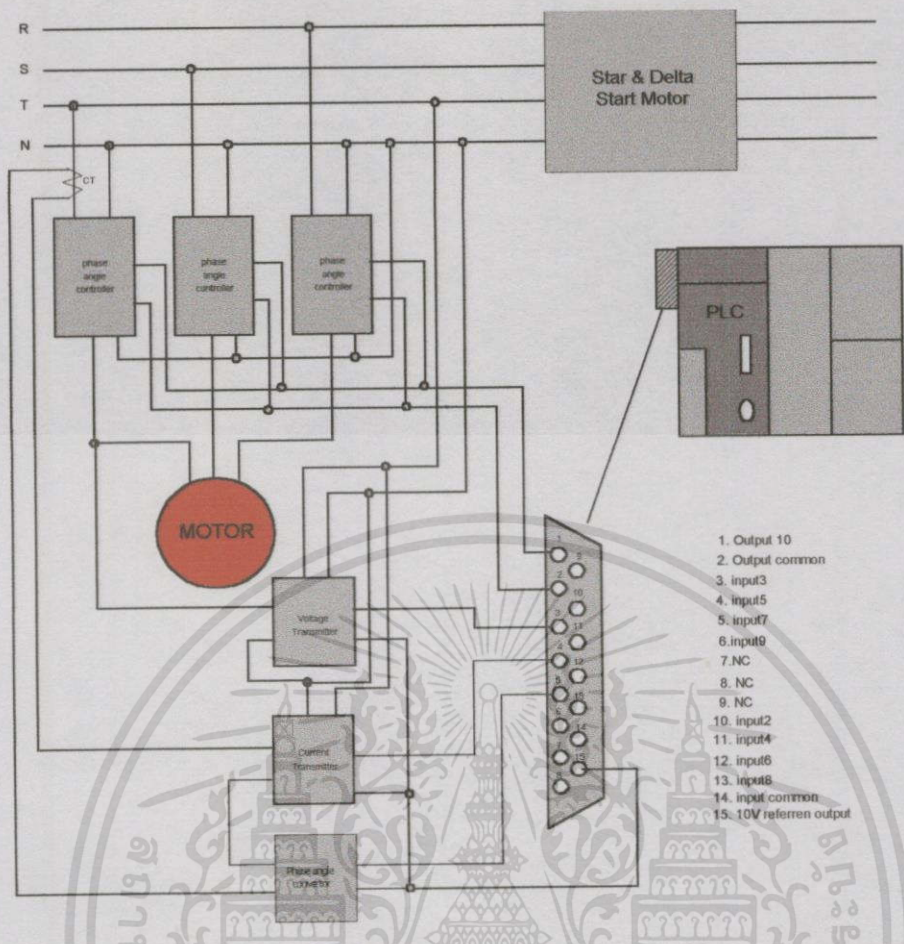
$$= \frac{PV}{t} \quad (5.11)$$

$$= \frac{PQ}{\text{ค่าคงที่}} \quad (5.12)$$

ดังสมการที่ (5.12) ในขณะที่ แรงดัน (P) ลดลงเนื่องจากอยู่ในช่วงหล่อเย็นของเครื่องเป่าขวดพลาสติกจะทำให้กำลังงานที่ต้องการจากมอเตอร์ลดลงด้วยซึ่งหากลดพลังงานมอเตอร์ลงได้ในช่วงนี้ก็จะไม่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องจักร โดยการลดพลังงานลงจนถึงจุดต่ำสุดที่ยังคงให้มอเตอร์สามารถทำงานได้โดยการลดแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ก็จะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ได้

5.2 ระบบชุดควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

เมื่อ PLC ตรวจสอบโปรแกรมของเครื่องจักรแล้วพบว่าอยู่ในช่วงรับภาระน้อย PLC จะสั่งให้ Phase angle controller ปรับมุมการทริกแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์ลดลง สำหรับการตรวจเช็คค่าพลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์เป็นพลังงานที่ต่ำสุดที่มอเตอร์ยังคงทำงานได้นั้น จะใช้ current transmitter และ phase angle controller

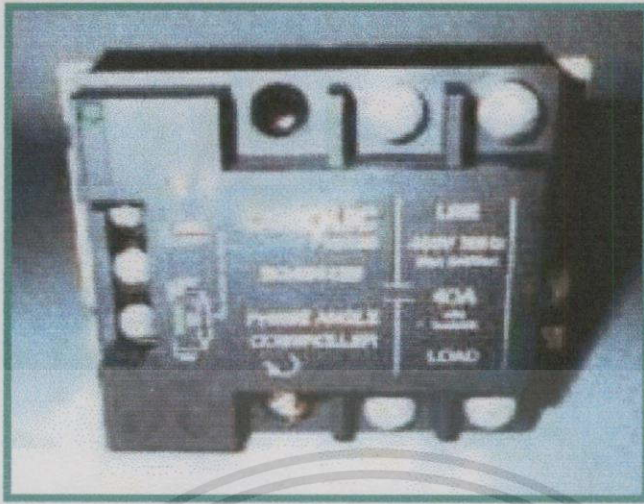


รูปที่ 5.7 วงจรการทำงานของชุดควบคุมเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

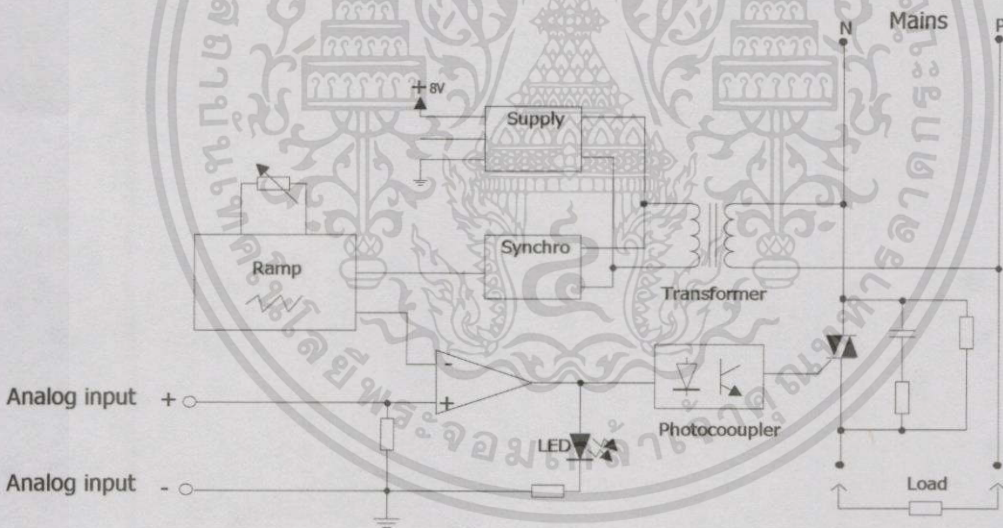
โดยในขณะที่มอเตอร์อยู่ในสภาวะรับภาระน้อย ซึ่งเกิดขึ้นขณะเริ่มต้น โปรแกรมใน PLC จะสั่งให้ phase angle controller ปรับมุมการตริกแรงดันเพิ่มขึ้น เพื่อลดพลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์ จนถึงจุดก่อนที่มอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้ และจะเก็บค่าของกระแสและมูมเฟสในขณะนั้นไว้เป็นค่าอ้างอิง เพื่อใช้ในการทำงานของโปรแกรมเครื่องจักรในช่วงที่มีภาระน้อย เพื่อลดพลังงานลงมาให้ได้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานให้ได้ต่ำที่สุดแสดงการทำงานดังโปรแกรมใช้งานในภาคผนวก

5.3 อุปกรณ์ควบคุมการปรับเฟสมอเตอร์ (phase angle controller)

สำหรับตัวควบคุมปรับเฟสมอเตอร์ดังรูปที่ 5.8 จะทำหน้าที่รับสัญญาณอนาล็อก 0-10V จาก PLC เพื่อนำมาปรับการตริกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ ดังในวงจรเทียบเคียงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะทำการปรับตามแรงดันที่ป้อน 0-10 โวลต์ที่ปรับมูมเฟส 0-90 องศา โดยค่าแรงดันยิ่งมากมูมตริกยิ่งน้อย



รูปที่ 5.8 รูป phase angle controller

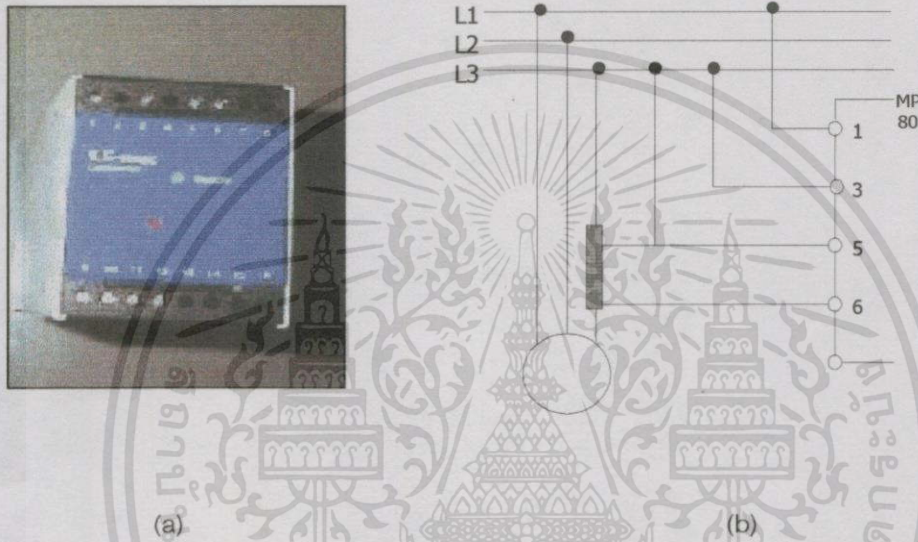


รูปที่ 5.9 รูปวงจรเทียบเคียง

สำหรับการทำงานเมื่อ PLC ป้อนแรงดัน 0-10V มาให้จะทำให้ฮอปแอมทำการเปรียบเทียบสัญญาณ AC ที่เข้ามาจากแรงดันไฟหลัก โดยมีซินโครนัสเรมทำหน้าที่กำหนดสัญญาณเรมตามค่าสัญญาณ AC ที่จ่ายเข้ามา โดยจะกำหนดมุมของสัญญาณที่ $0-180^\circ$ และสร้างแอมป์ 0-10V จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุทที่ป้อนมาจาก PLC 0-10V ถ้าแรงดันเทียบเคียงเท่ากันที่ค่าแรงดันใด ก็จะทำให้ตัวควบคุมมุมเฟสนี้ ทริกสัญญาณไฟฟ้า AC เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ที่มุมต้องการได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 อุปกรณ์วัดมุมต่างเฟส (phase angle converter)

เป็นตัววัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะแปลงจากมุมที่วัดได้จากกระแสล่าหลัง -90° - 0 และแปลงเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรง 0 - $10V$ ซึ่งส่งให้ PLC เป็นการบอกค่ามุมต่างเฟสได้ สำหรับรูปที่ 5.10 เป็นรูปของตัววัดมุมค่าต่างเฟส และไดอะแกรมการทำงานและการต่อใช้งาน



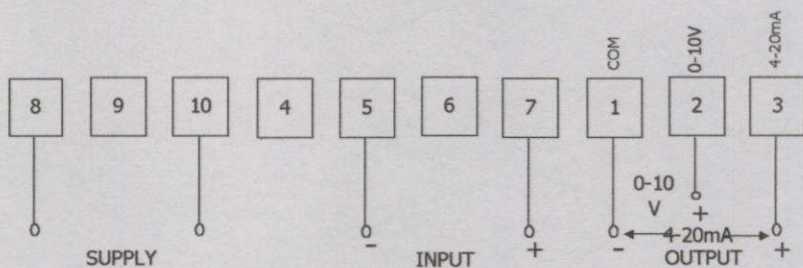
รูปที่ 5.10 (a) รูป phase angle converter
(b) วงจรการต่อใช้งาน

5.5 อุปกรณ์แปลงกระแสและแรงดัน (Current and voltage converter)

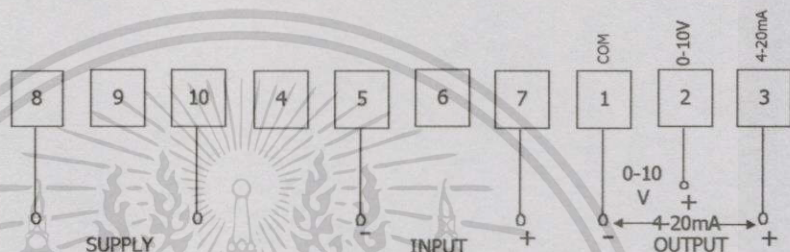
เป็นอุปกรณ์แปลงกระแสและแรงดันไฟฟ้า AC ให้เป็นแรงดัน 0 - $10V_{DC}$ เพื่อใช้วัดกระแสและแรงดันของมอเตอร์เพื่อนำมาคำนวณการปรับมุมเฟสของชุดควบคุม สำหรับรูปที่ 5.11 เป็นรูปของตัวแปลงกระแส AC เป็นแรงดัน 0 - $10V$ และวงจรการต่อใช้งาน



(a)



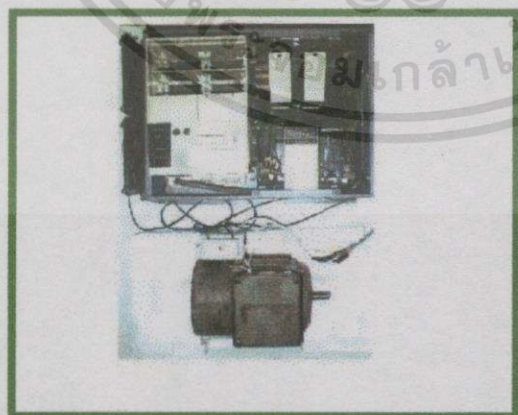
(b)



รูปที่ 5.11 (a) อุปกรณ์เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าและการต่อใช้งาน

(b) อุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและการต่อใช้งาน

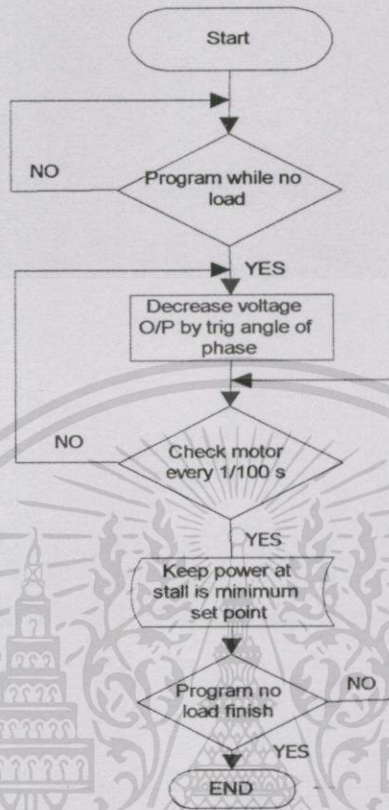
5.6 วงจรชุดควบคุมการประหยัดพลังงานของมอเตอร์



รูปที่ 5.12 รูปชุดทดลองเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 ลำดับการทำงานของโปรแกรม



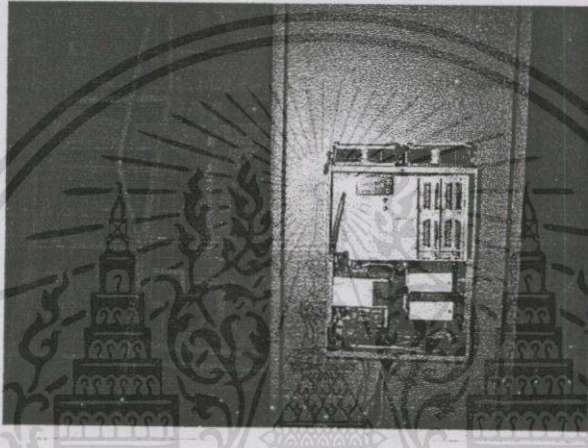
รูปที่ 5.13 Flow chart ของการทำโปรแกรมชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์

เมื่อโปรแกรมเข้าสู่สภาวะรับภาระน้อย PLC จะปรับลดแรงดันที่ป้อนให้กับตัวปรับเฟสมอเตอร์เพื่อปรับลดการใช้พลังงานลงให้ต่ำที่สุดที่มอเตอร์ยังทำงานได้โดยทำการปรับแรงดันในทุก 1/100 วินาทีและเมื่อโปรแกรมเข้าสู่สภาวะทำงานที่มีการใช้พลังงานมากจะทำการเลิกใช้หม้อพริกตั้งกล่าวและจะให้มอเตอร์ใช้พลังงานตามปรกติจนกว่าจะเข้าสู่ช่วงรับภาระน้อยอีกครั้ง

บทที่ 6

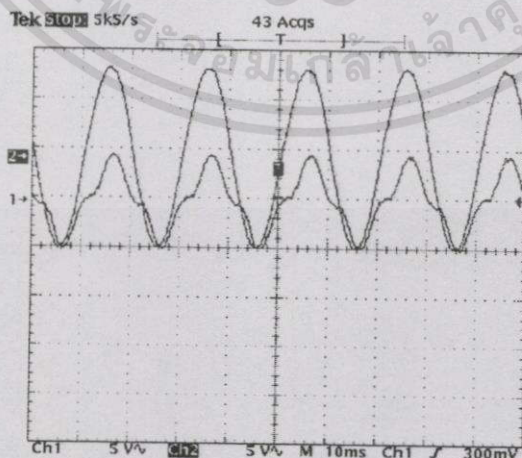
ผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์

การทดลองได้ทดสอบกับเครื่องเป่าขวดพลาสติกของบริษัท SMC รุ่น 2000 DST ซึ่งสามารถเป่าขวดพลาสติกขนาดสูงสุด 2 ลิตร โดยใช้มอเตอร์ขนาด 25 แรงม้าขับเคลื่อนน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้เปิดปิดแม่พิมพ์ดังในรูปที่ 6.1 เป็นการแสดงการต่อใช้งานที่เครื่องจักร



รูปที่ 6.1 รูปแสดงการนำชุดทดลองประกอบใช้งานที่เครื่องจักร

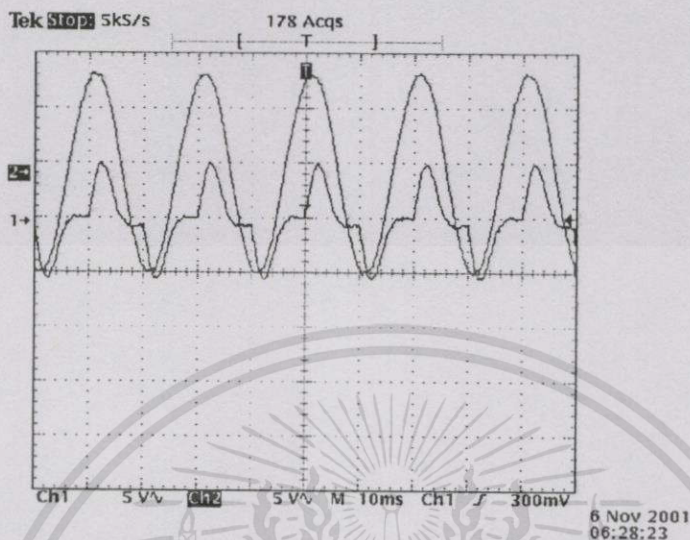
สำหรับในรูปที่ 6.2 ทำการวัดแรงดันเทียบกับกระแสในขณะการต่อมอเตอร์ปกติโดยไม่มีการใช้ชุดควบคุมในการปรับลดพลังงานของมอเตอร์



รูปที่ 6.2 แสดงแรงดันเทียบ (หน้าหน้า) กับกระแส (ด้านหลัง) โดยแรงดันที่ 10 โวลต์ ทริกที่เฟสเอง
เจิลคอนโทรลเลอร์ (ไม่มีการทริกมูฟ) โดยใช้มอเตอร์ 1.2 KW ในขณะมีภาระน้อย

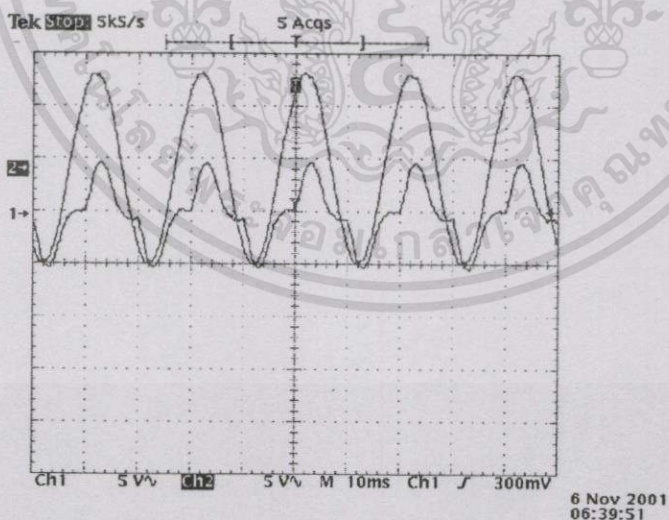
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในรูปที่ 6.3 ทำการปรับแรงดันที่ทริกให้กับเฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการลดกำลังงานของมอเตอร์ลงมาที่มุมทริก 7 โวลท์



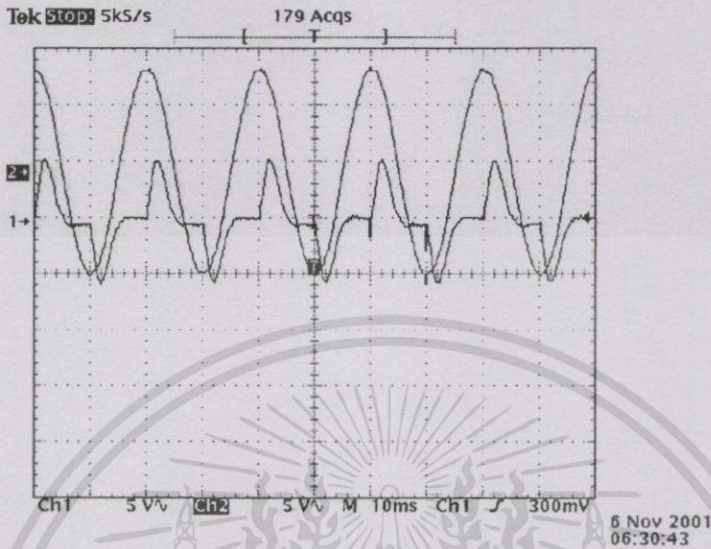
รูปที่ 6.3 แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 7 โวลท์ ทริกที่เฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ โดยใช้มอเตอร์ 1.2 KW ในขณะมีภาระน้อย

สำหรับในรูปที่ 6.4 ทำการปรับแรงดันที่ทริกให้กับเฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการลดการใช้กำลังงานของมอเตอร์ลงมาที่มุมทริก 6 โวลท์



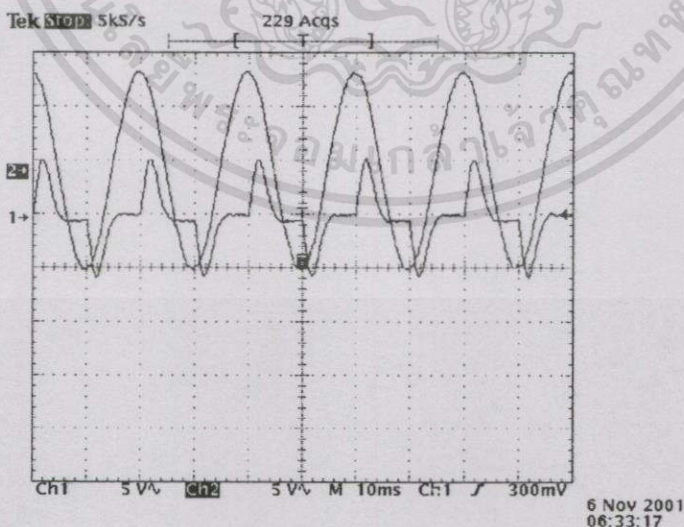
รูปที่ 6.4 แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 6 โวลท์ ทริกที่เฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ โดยใช้มอเตอร์ 1.2 KW ในขณะมีภาระน้อย

สำหรับในรูปที่ 6.5 ทำการปรับแรงดันที่ทริกให้กับเฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการลดการใช้กำลังงานของมอเตอร์ลงมาที่มุมทริก 5 โวลต์



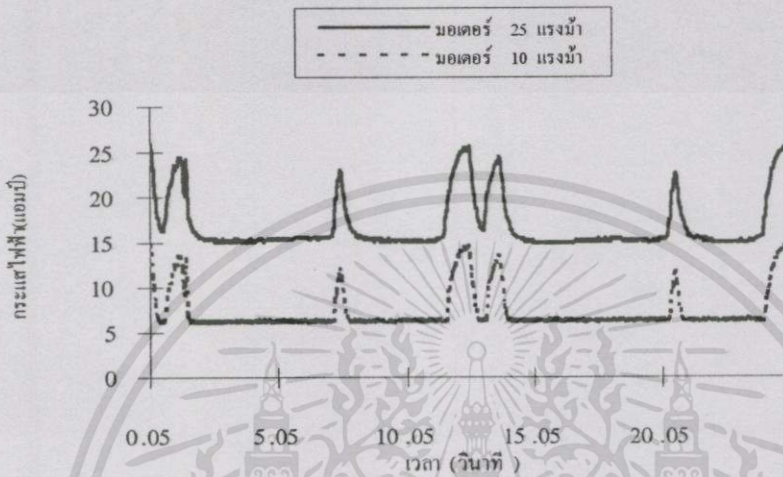
รูปที่ 6.5 แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 5 โวลต์ทริกที่เฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ โดยใช้มอเตอร์ 1.2 KW ในขณะที่ไม่มีภาระ

สำหรับรูปที่ 6.6 ทำการปรับแรงดันที่ทริกให้กับเฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการลดการใช้กำลังงานของมอเตอร์ลงมาที่มุมทริก 4 โวลต์

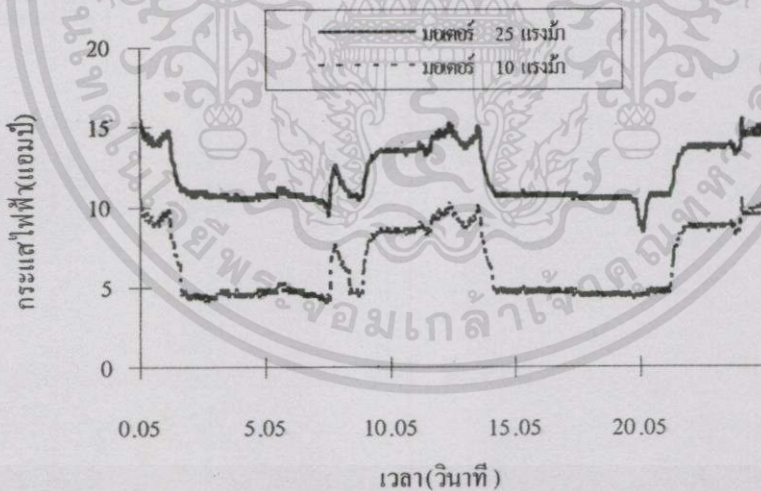


รูปที่ 6.6 แสดงแรงดันเทียบ (นำหน้า) กับกระแส (ล่าหลัง) โดยแรงดันที่ 4 โวลต์ทริกที่เฟสเองเจลคอนโทรลเลอร์ โดยใช้มอเตอร์ 1.2 KW ในขณะที่มีภาระน้อย

ผลการทดลองดังในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 เป็นการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์ก่อนและหลังใส่ชุดควบคุม ผลก็คือ ช่วงเวลาล่อเย็นของการทำงานจะเป็นช่วงที่กระแสไฟหล่น้อยที่สุดและถ้าใช้ชุดทดลองจะทำให้กระแสไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ลดลงซึ่งทำการวัดโดยเคอร์เร็นท์คอนเวอร์เตอร์

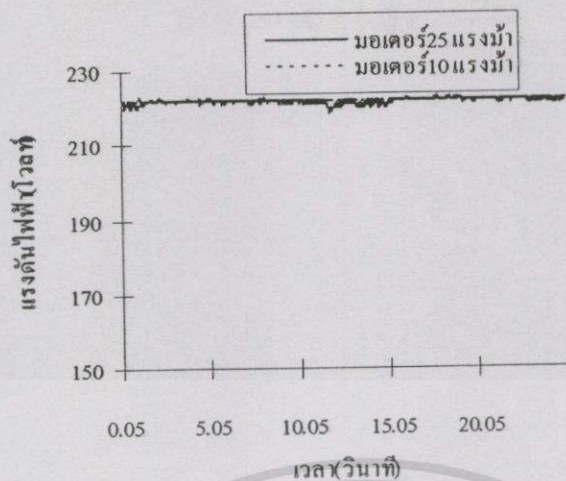


รูปที่ 6.7 กระแสในขณะที่ไม่ได้ใส่ชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า

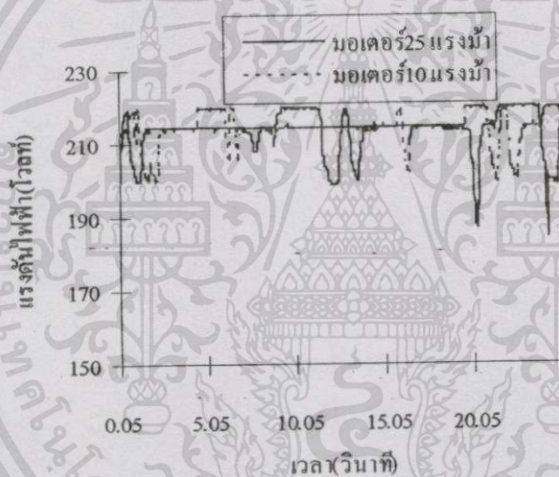


รูปที่ 6.8 กระแสที่มีการใส่ชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า

สำหรับผลการทดลองดังในรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 เป็นการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ก่อนและหลังใส่ชุดควบคุมจะเห็นว่าใส่ชุดควบคุมจะทำให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาล่อเย็นลดเพราะการปรับแรงดันขณะที่เข้าสู่ช่วงเวลการล่อเย็น ซึ่งทำการวัดโดยเคอร์เร็นท์คอนเวอร์เตอร์

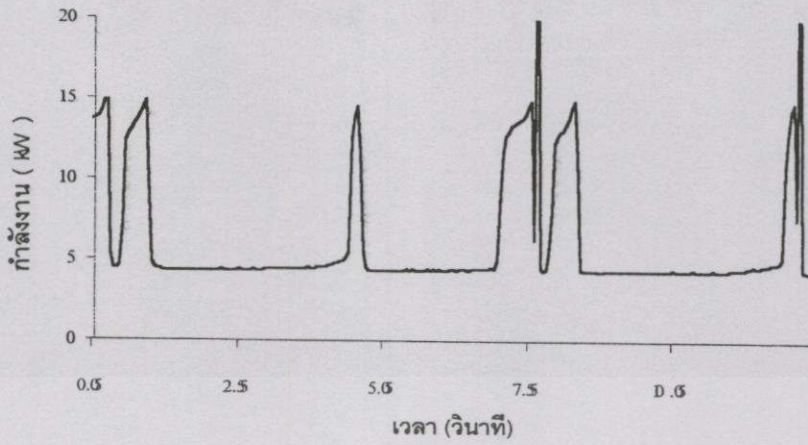


รูปที่ 6.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าโดยไม่ได้ต่อชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า

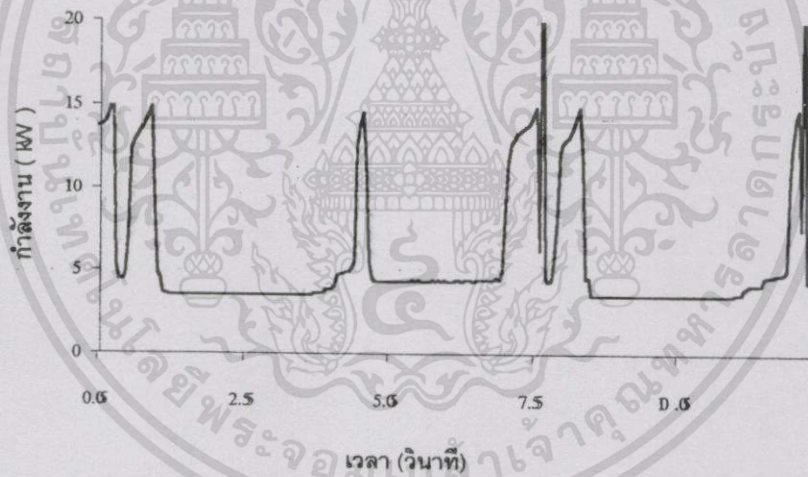


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าขณะต่อชุดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า

สำหรับผลการทดลองดังในรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 เป็นการเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ก่อนและหลังใส่ชุดควบคุมจะเห็นว่าใช้ชุดควบคุมจะทำให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาหล่อเย็นลดเพราะการปรับแรงดันขณะที่เข้าสู่ช่วงเวลการหล่อเย็น ซึ่งทำการวัดตัววัดกำลังงาน MP 90 ของ Celduc โดยจะทำการวัดกำลังงานออกมาเป็นแรงดัน 0-10 โวลต์ และนำมาคำนวณเป็นกำลังงานที่ใช้จริง



รูปที่ 6.11 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์โดยไม่มีขีดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 6.12 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์โดยมีขีดควบคุมกำลังงานไฟฟ้า

สรุปผลการทดลอง

ผลการปรับลดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์มีภาระน้อยโดยใช้ PLC ที่มีอยู่แล้วในเครื่องจักร นำมาประกอบชุด Analog module ต่อเข้ากับ PLC ที่มีอยู่เดิม โดยจะใช้ Analog input เพิ่ม 3 ช่อง และ Analog output เพิ่ม 1 ช่อง จากนั้นก็นำมาทำโปรแกรมเพิ่มเติมโดยการปรับแรงดันลงในช่วงที่เครื่องจักรอยู่ในสภาวะที่รับภาระน้อย PLC จะทำการลดแรงดันจนถึงจุดที่มอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้ โดยใช้ Current Converter ซึ่งจะวัดกระแสที่เกิดขึ้นและแจ้งกลับไป PLC จากนั้น PLC จะจดจำมุมทริกก่อนที่มอเตอร์จะทำงานไม่ได้ จากนั้นทุกครั้งเข้าสู่ภาวะ cooling time PLC จะสั่งให้ลดแรงลงมาที่จุดที่ได้บันทึกค่ามุมทริกนี้ไว้ และจะยังคงเช็คค่าว่าถ้าจะเพิ่มมุมทริกอีก มอเตอร์จะทำงานต่อได้หรือไม่ ตลอดทุกๆ 10 ms ในช่วงเวลา cooling time จะทำให้มั่นใจว่าจะลดพลังงานได้ต่ำสุดจริงๆ ในช่วงเวลาดังกล่าวลดลงได้จริงๆ

จากผลการทดลอง เนื่องจากอุปกรณ์เฟสเองเจ็ดคอนโทลเลอร์ ที่เป็นตัวปรับมุมทริกเพื่อลดแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ สามารถปรับมุมทริกได้ จาก 0-90° เท่านั้น จึงทำให้การสตาร์ทมอเตอร์ไม่สามารถทำระบบ ซอร์ฟสตาร์ทได้ จึงต้องมีวงจรสตาร์ทและเคลดมาใช้ในช่วงสตาร์ทมอเตอร์ และในการปรับมุมทริก หากภาระน้อยมากจนสามารถปรับมุมทริกสูงๆ ให้ลดพลังงานต่ำสุด ก็จะทำให้ได้เพียงมุมทริกดังกล่าวเท่านั้น แต่ในผลการทดลองพบว่ามุมทริก 0-90° นี้ สามารถลดพลังงานมอเตอร์ดังในตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 โดยในตารางที่ 7.1 แสดงถึงการนำชุดทดลองไปใช้กับเครื่องเป่ารุ่นต่างๆ ที่มีมอเตอร์ปั๊มขนาดต่างๆ กัน และจะได้ผลการประหยัดพลังงาน ซึ่งจะเห็นว่าถ้าใช้เครื่องมือที่มีมอเตอร์ปั๊มมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้

สำหรับตารางที่ 7.2 เป็นการประเมินการลงทุนและหาจุดคืนทุน เมื่อมีการตั้งชุดทดลองนี้ในเครื่องเป่าพลาสติกต่างๆ

ตารางที่ 7.1 แสดงการประมาณค่าการประหยัดไฟฟ้าของชุดทดลองเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์

Description	No.	Name plate KW/HP, Amps	True power (KW)	Voltage (Volts)	Current (Amps)	Apparent power (Kva)	reactive power (Kvar)	Power Factor		Type of load	Energy Savings	
								Plant	Machine		%	KW
1. เครื่องเป่า B34	1	40 HP	12.6	404	30.5	21.7	17.5	0.85	0.58	Vary	5.99%	1.3
2. เครื่องเป่า B24	1	45 kw	9.41	402	34.2	23.8	21.9	0.85	0.4	Vary	7.14%	1.7
3. เครื่องเป่า B2	1	20 kw	5.66	405	15.4	10.8	9.3	0.85	0.53	Vary	6.90%	0.65
4. เครื่องเป่า B11	1	25 HP	5.58	403	15.8	15.5	14.46	0.85	0.36	Vary	9.60%	1.5
5. เครื่องเป่า B49	1	10 HP	2.14	408	8.1	4.9	5.35	0.85	0.4	Vary	11%	0.625

ตารางที่ 7.2 แสดงวิธีคิดหาจุดคุ้มทุนของชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

Description	No.	Energy Savings (KW)	Work period		Peak Demand ฿285.05	Energy Consumption ฿1,0582	FT ฿0.3792	Total Saving	Investment	Pay Back
			(hr / day)	(day / years)						
1. เครื่องเป่า B34	1	1.3	24	317	฿4,446.78	฿10,466.02	฿3,750.44	฿18,663.24	฿25,000	1.34
2. เครื่องเป่า B24	1	1.7	24	317	฿5,815.02	฿13,686.33	฿4,904.42	฿24,405.77	฿25,000	1.02
3. เครื่องเป่า B2	1	0.65	24	317	฿2,223.39	฿5,233.01	฿1,875.22	฿9,331.62	฿25,000	2.68
4. เครื่องเป่า B11	1	1.5	24	317	฿5,130.90	฿12,076.17	฿4,327.43	฿24,534.00	฿25,000	1.02
5. เครื่องเป่า B49	1	0.625	24	317	฿2,137.87	฿5,031.74	฿1,803.09	฿8,972.06	฿25,000	2.78

ตารางที่ 7.3 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง

Description	Eff	Name plate	Voltage (Volts)	Current (Amps)	Power factor	Efficiency (%)
		K W/HP, Amps				
1. เครื่องเป่า B34	1	40 H P	380	61.8	0.85	86
2. เครื่องเป่า B24	1	45 k W	380	94	0.85	85
3. เครื่องเป่า B2	1	20 k W	380	39.5	0.85	84
4. เครื่องเป่า B11	1	25 H P	380	39.5	0.85	84
5. เครื่องเป่า B49	1	10 H P	380	16	0.85	83

เนื่องจากเทคโนโลยีการปรับลดพลังงาน โดยใช้ตัวประกอบกำลังเป็นตัวควบคุมนี้เป็นเทคโนโลยีที่วิศวกรของนาซาชื่อ FRANK J. NOLA นำมาเสนอตั้งแต่ช่วงปี 1968-1970 และได้มีผู้นำหลักการนี้ไปผลิตอุปกรณ์ประหยัดพลังงานมากมาย แต่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างตรงที่จะทำการปรับลดพลังงานให้กับมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์รับภาระน้อย โดยสามารถตรวจสอบโปรแกรมการทำงานของเครื่องจักร PLC ที่มีอยู่แล้วในเครื่องจักรเอง

บรรณานุกรม

- [1]. D.O'Kelly and S.Simmons, "Introduction to Generalized Machine Theory," McGraw-Hill.Publishing Company Limited.,1968.
- [2]. T.J.E.Miller, "Brushless Permanent-Magnet and RRReluctance Motor Drives," Clarendan Press Oxford. 1989.
- [3]. โยชิน เปรมปราณีรัชต์ "วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์" 2526.
- [4]. P.C. Krause, "Analysis of the electronic machine," McGraw-Hill, 1986.
- [5]. C.W. Lander, "Power electronic," McGraw-Hill, 1981.
- [6]. Group Schneider, "PL7 Micro/Junior," User manual, 1997.
- [7]. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, "การควบคุมมอเตอร์," สมศิริพริ้นติ้ง, 2541.
- [8]. อุดมศักดิ์ ชัยยีน, "Power electronic I," 2540.
- [9]. วิชัย สังข์จินทรานนท์, "การควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง1" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2540.
- [10]. บริษัทเซิงชาย จำกัด, "การอนุรักษ์พลังงานโดยใช้อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง" 2542
- [11]. ขวัญใจ สันทิพย์สมบูรณ์ ปานเพชร จินนทร, "ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม" ส.ส.ท. 2543
- [12]. ศิวะ หงษ์นภา, "ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ" ส.ส.ท. 2543
- [13]. บัณฑิต มงคลวรผล เชื้อ นกอยู่ กอบชัย เดชหาญ, "ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PLC ควบคุม," วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่18 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2544



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. บัณฑิต มงคลวรผล เชื้อ นกอยู่ กอบชัย เศรษฐาญ, “ระบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ PLC ควบคุม,” วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2544



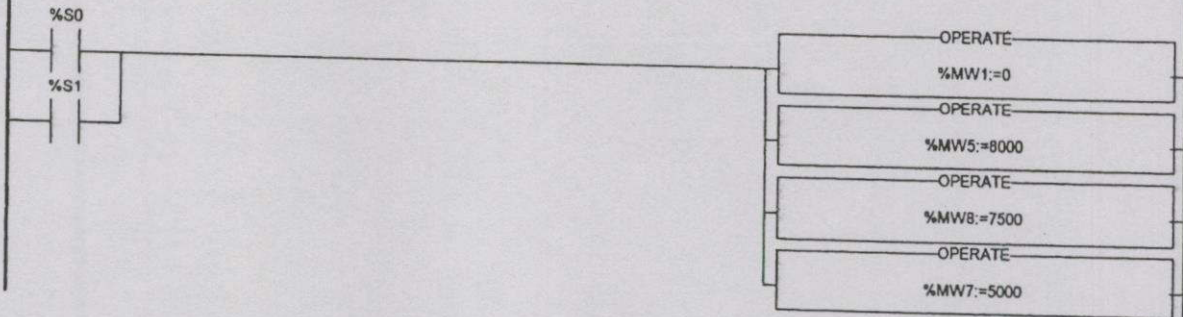
ภาคผนวก ข.

ข้อมูล

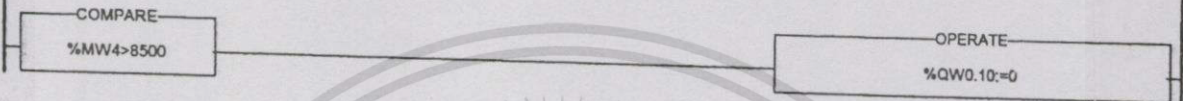
- โปรแกรมของชุดทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์
- ฟังก์ชันพื้นฐานของ PLC TSX 3722 Telemecanique



(*Warm & cool restrat*)



(*Set safety current*)



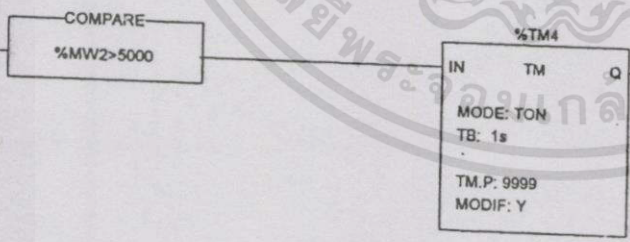
(*Transfer I/P to memory word*)



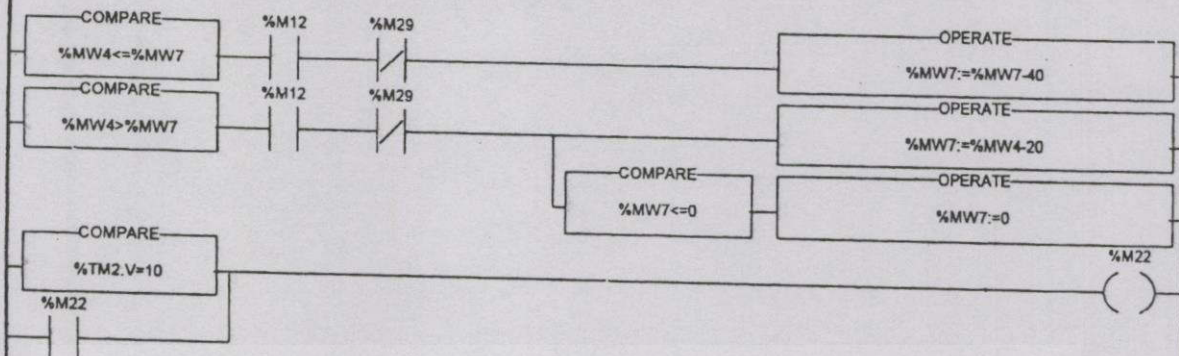
(*Program haven't cooling time.*)



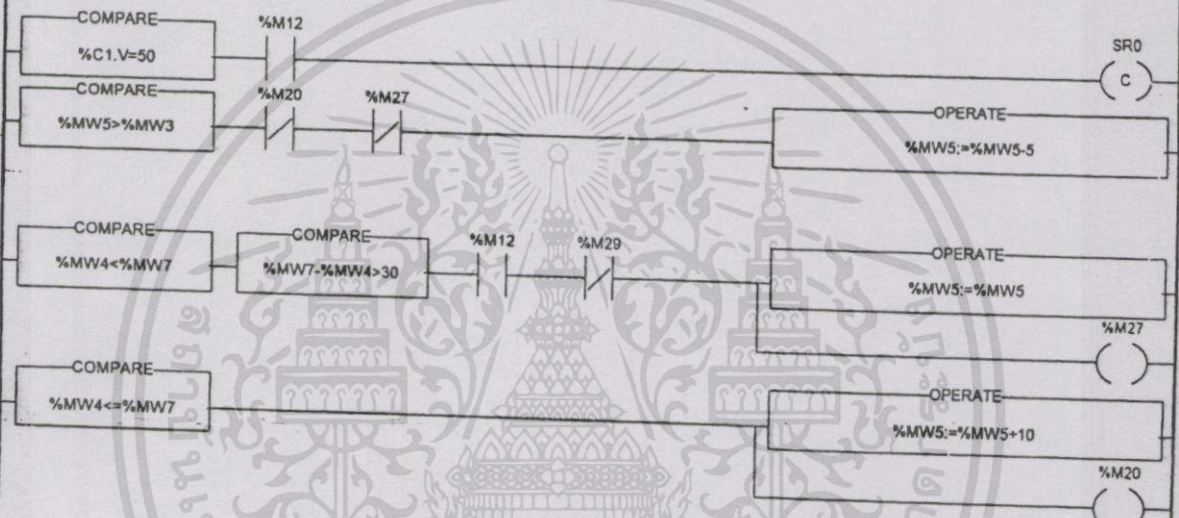
(*Program in cooling time.*)



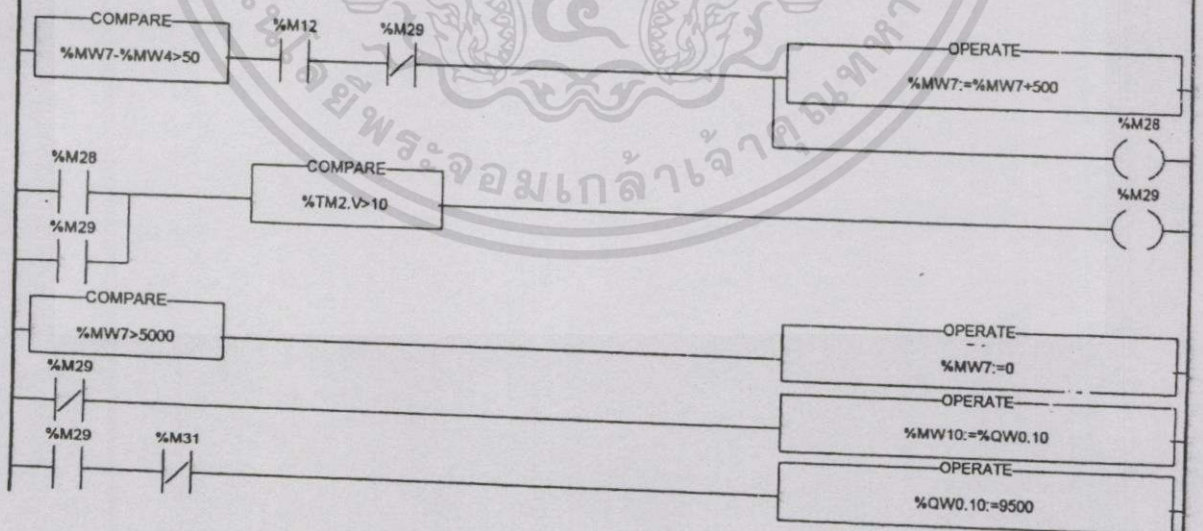
(*Set minimum of current for coolinf time*)

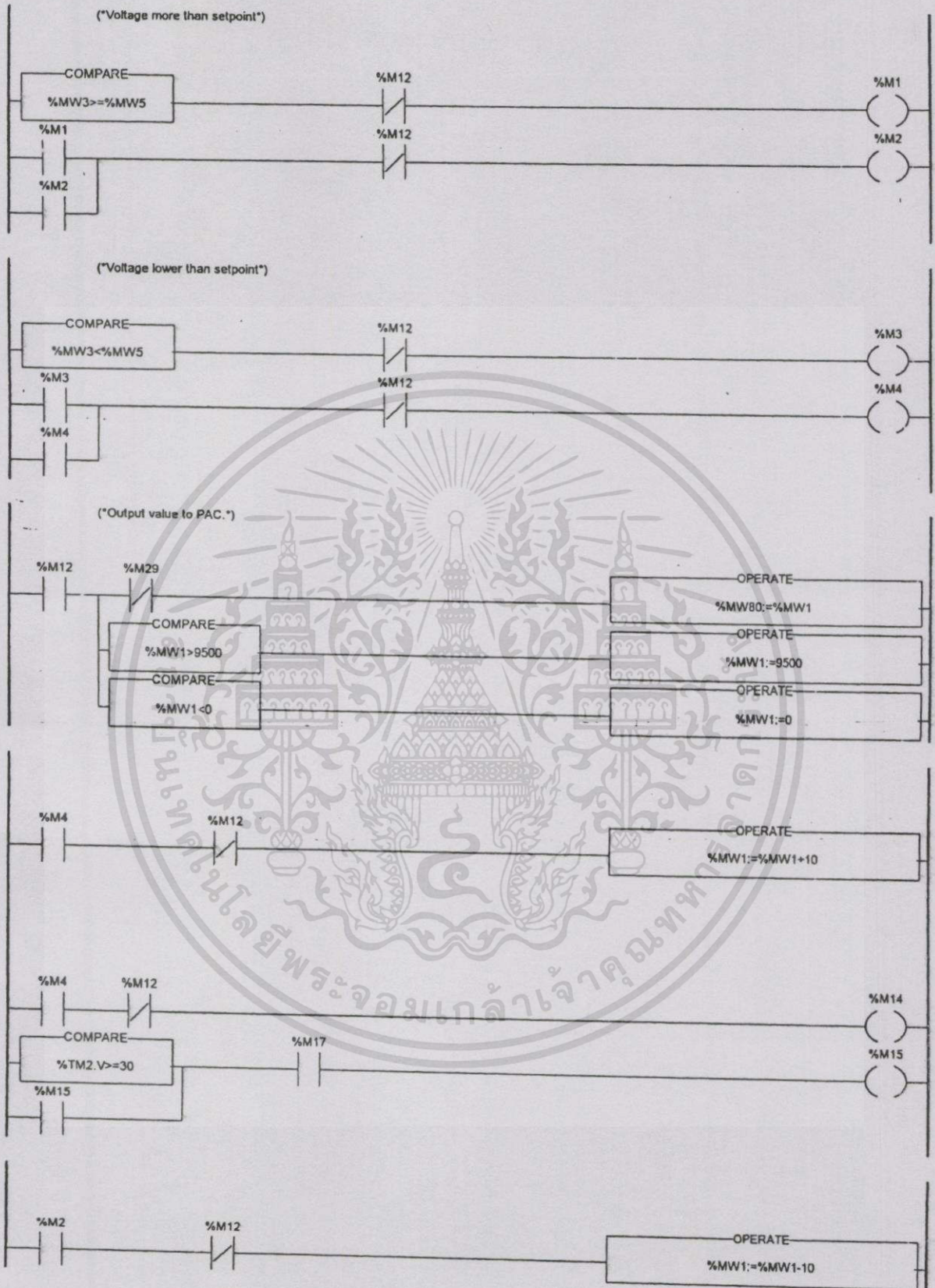


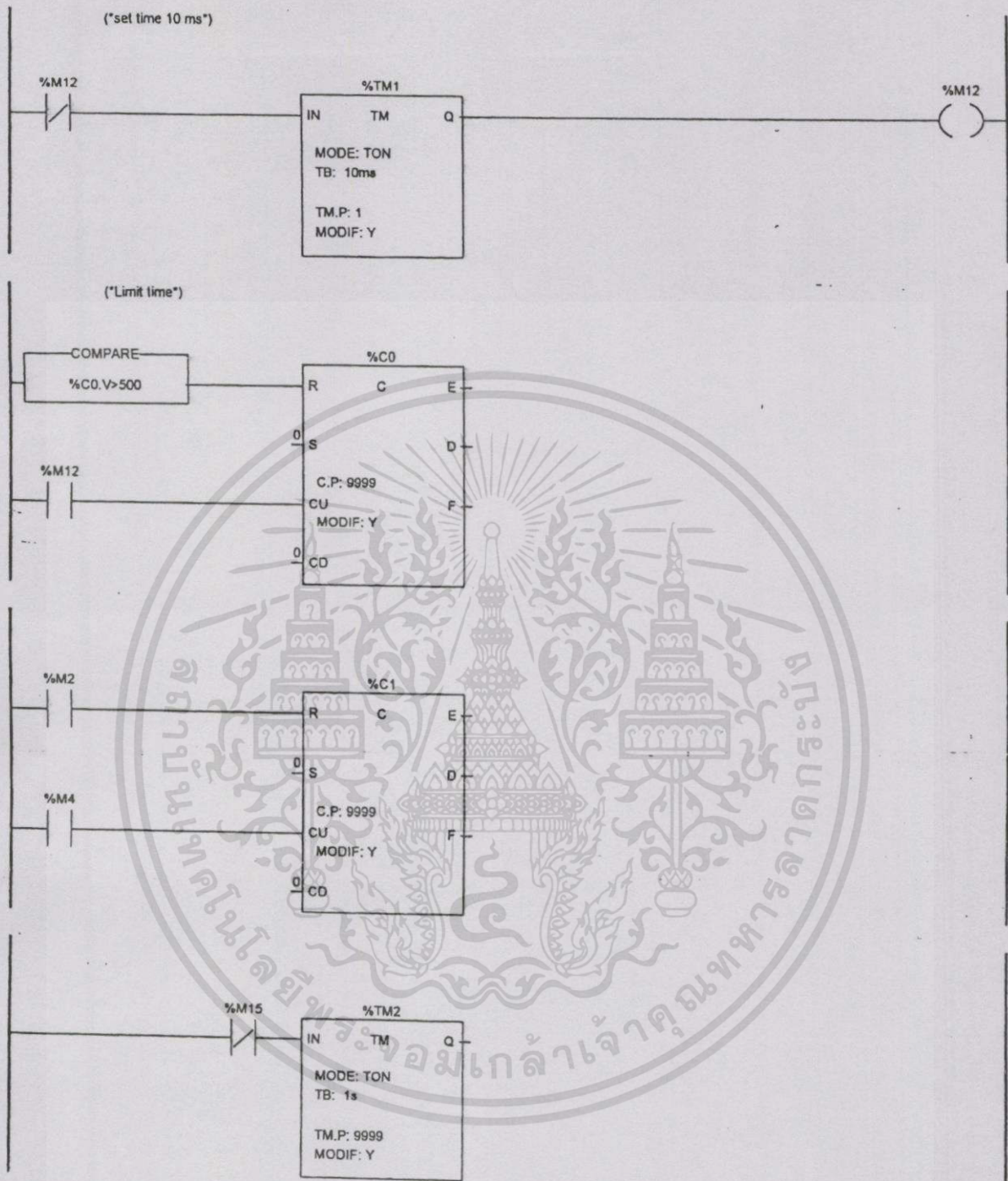
(*Set level voltage maximum*)

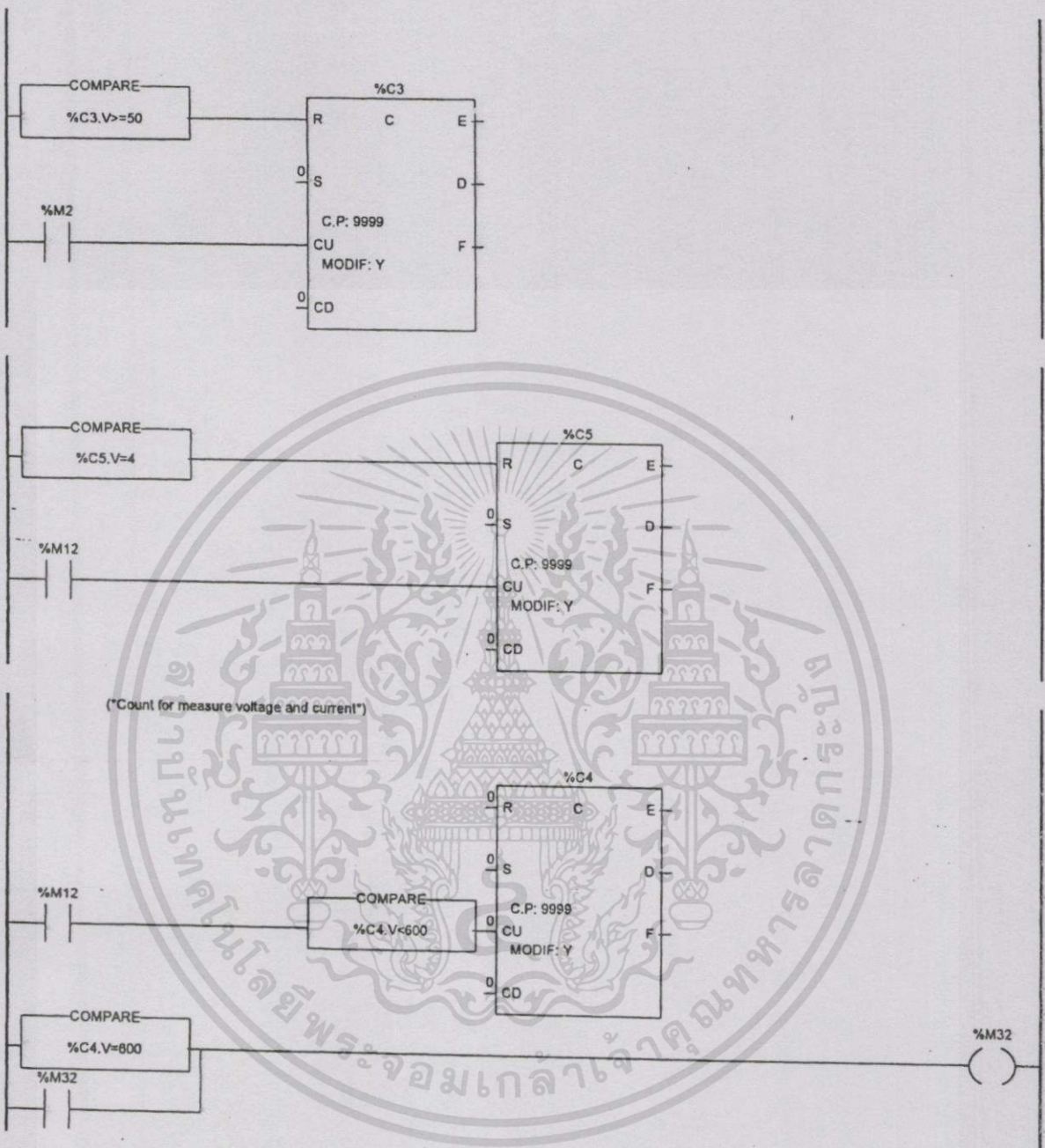


(*Automatic set voltage minimum*)





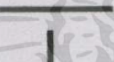

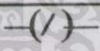
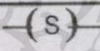
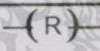
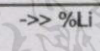
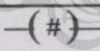
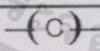






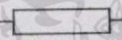
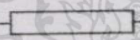




ฟังก์ชันบล็อก 1

ตำแหน่ง	สัญลักษณ์	หน้าที่ทำงาน
การทดสอบพื้นฐาน	* คอนแทคแบบปกติเปิด	 คอนแทคจะถูกปิดเมื่อบิทของคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมเป็น1
	* คอนแทคแบบปกติปิด	 คอนแทคจะถูกปิดเมื่อบิทของคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมเป็น0
	* คอนแทคแบบตรวจจับขอบขาของสัญญาณ	 ขอบขาขึ้น : คอนแทคจะถูกปิดเมื่อบิทของคำสั่งใช้ในการควบคุมเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1  ขอบขาลง : คอนแทคจะถูกปิดเมื่อบิทของคำสั่งใช้ในการควบคุมเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0
การเชื่อมโยงพื้นฐาน	* ทางแนวนอน	 โดยการให้การเชื่อมโยงระหว่างจุดสองจุดที่ต่ออนุกรมกัน
	* ทางแนวตั้ง	
การกระทำพื้นฐาน	* คอยล์โดยตรง	 สภาวะของคอยล์ซึ่งเป็นผลจากค่าโดยตรงของผลจากการที่บิทแต่ละส่วนที่ส่งต่อมายังเข้าทั้งหมด
	* คอยล์โดยตรงข้าม	 สภาวะของคอยล์ซึ่งเป็นผลจากค่าโดยตรงกันข้ามของผลจากการที่บิทแต่ละส่วนที่ส่งต่อมายังเข้าทั้งหมด
	* แลชคอยล์	 สภาวะของคอยล์ซึ่งเป็นผลของค่าบิทซึ่งกำหนดให้เป็น1 และที่ขอบเขตโรงงานกำหนดให้เป็น1
	* อันแลชคอยล์	 สภาวะของคอยล์ซึ่งเป็นผลของค่าบิทซึ่งกำหนดให้เป็น1 และที่ขอบเขตโรงงานกำหนดให้เป็น 0
	* การกระโดดไปยังริงอื่นๆ	 -> %L ยอมติดต่อยังจุดเริ่มต้นของริงอื่น ๆ ทั้งด้านบนและล่าง โดยมีผลในโปรแกรมเท่านั้น
	* คอยล์ที่ใช้ในการส่งผ่านสภาวะ	 จะทำในกรณีเป็นภาษากราฟเซ็ท (Grafset) คือโปรแกรมจะแสดงสภาวะการส่งผ่านไปยังสแต็ปต่อไป
	* คอยล์ที่เรียกโปรแกรมย่อย	 โดยจะต่อไปยังจุดเริ่มต้นของโปรแกรมย่อยเมื่อขอบเขตเป็น1
	* การกลับออกจากโปรแกรมย่อย	<RETURN> เมื่อไปยังโปรแกรมย่อยใดๆ การกลับมาจากโปรแกรมย่อยนั้นเมื่อขอบเขตเป็น1
	* การหยุดโปรแกรม	<HALT> จะหยุดโปรแกรมเมื่อขอบเขตที่กำหนดเป็น 1

ฟังชันบล็อก2

ฟังชัน บล็อก	สัญลักษณ์	หน้าที่ทำงาน
การทดสอบ * พื้นฐาน	บล็อก : 	มาตรฐานของฟังชันบล็อกแต่ละตัวจะให้อินพุทและเอาท์พุท โดยสามารถเชื่อมโยงกับพื้นฐานอื่นๆ ได้
โอเปอร์เรชั่นบล็อก		
* บล็อกเปรียบเทียบ ทางแนวตั้ง		เปรียบเทียบระหว่างตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ 2 ตัว โดยขึ้นกับผลที่สอดคล้องซึ่งทำให้อาท์พุทเปลี่ยนเป็น 1
* บล็อกเปรียบเทียบ ทางแนวนอน		เปรียบเทียบระหว่างตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ 2 ตัว ซึ่งผลที่ถูกเช็คจะทำให้เอาท์พุทเป็น 1
การกระทำ * พื้นฐาน		เป็นการกระทำทางคณิตศาสตร์ซึ่งผลที่ออกมาขึ้นอยู่กับการ นำค่าคณิตศาสตร์เหล่านั้นมาใช้ เป็นผลทางเอาท์พุท

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายบัณฑิต มงคลวรผล
 เกิดวันที่ 18 มีนาคม 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
 การศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น
 โรงเรียนวัดราชโอรส กรุงเทพฯ
 การศึกษา ระดับปวช. สาขาอิเล็กทรอนิกส์
 วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร สมุทรสาคร
 การศึกษา ระดับปวส. อิเล็กทรอนิกส์
 มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ
 การศึกษา ระดับปริญญาตรี เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
 ปัจจุบัน ทำงานที่บริษัท รอสดี (มาลา) จำกัด
 ในตำแหน่ง หัวหน้าแผนกซ่อมบำรุง