

ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเอง



นายศุภโชค ศิวะเกื้อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533

ISBN 974-578-151-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016937

i 10310216

A D.C. MOTOR DRIVE SYSTEM USING ADAPTIVE REGULATOR

MR. SUPACHOK SIVAKUA

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University


1990

ISBN 974-578-151-7

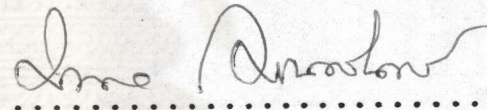


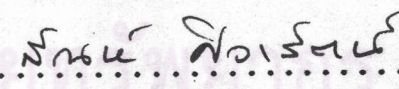
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเอง  
โดย นายศุภโชค ศิวะเกื้อ  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สันต์ ศิวารัตน์

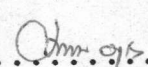
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. อถรร วัชรากิจ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ สันต์ ศิวารัตน์)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ไชยะ แซ่มช้อย)

ศุภโชค ศิวะเกื้อ : ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้วงจรมุมค่าแบบปรับตัวเอง  
(A D.C. MOTOR DRIVE SYSTEM USING ADAPTIVE REGULATOR) อ.ที่ปรึกษา :  
รศ.สันต์ ศิวารัตน์, 174 หน้า. ISBN 974-578-151-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง  
ที่ใช้วงจรมุมค่าแบบปรับตัวเอง เพื่อลดผลกระทบจากกรณีที่กระแสอาร์เมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง ระบบนี้ใช้  
สำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้วงจรรีเลย์กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ควบคุมเต็ม  
ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์ ระบบมุมค่าที่ใช้เป็นการต่อวงจรมุมค่าแบบทอดเนื่อง (cascade) โดยมี  
วงจรมุมค่ากระแสอาร์เมเจอร์เป็นวงปิดภายในและมีวงจรมุมค่าความเร็วเป็นวงปิดภายนอกอีกชั้นหนึ่ง ขณะที่  
กระแสอาร์เมเจอร์ไหลอย่างต่อเนื่องวงจรมุมค่าทั้งสองจะแสดงคุณสมบัติแบบ PI แต่ถ้ากระแสอาร์เมเจอร์  
ไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง วงจรมุมค่าของกระแส จะเป็นวงจรมุมค่าแบบปรับตัวเองให้เป็นแบบ PI และ I  
ได้ตามความเหมาะสม จากผลการทดลองระบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถเริ่มเดินมอเตอร์ได้อย่างนุ่มนวลสามารถ  
จำกัดกระแสอาร์เมเจอร์ไม่ให้เกิดค่าพิกัด มีเวลาตอบสนองต่อภาระทางกลดีกว่า 2 วินาที สามารถ  
ควบคุมค่าความเร็วรอบ 10-100% ของค่าพิกัดได้ และการคุมค่าความเร็วดีกว่า 1% ตามความต้องการได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
ปีการศึกษา ..... 2533 .....

ลายมือชื่อนิติ ..... *ศุภโชค ศิวะเกื้อ* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *สันต์ ศิวะเกื้อ* .....

SUPACHOK SIVAKUA : A D.C. MOTOR DRIVE SYSTEM USING ADAPTIVE  
REGULATOR. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SUN SIVARATANA, 174 PP.  
ISBN 974-578-151-7

This thesis presents the design, construction and testing of a D.C. motor drive system using adaptive regulator which reduces the effect of discontinuous armature current on the drive performance. This system is used for speed control of a separately excited D.C. motor, using a three-phase fully-controlled bridge circuit which controls the power of the motor.

The control system is a cascade control one having the armature circuit with direct current as the internal control loop and speed control as the external control loop. In the continuous current region, both regulator circuits use PI control. But in the discontinuous current region, the current regulation used adaptive current control between PI and I.

The results of test on the built system show that it can provide motor soft start and armature current limit. The settling time to load disturbance is better than 2 seconds, speed can be varied from 10% to 100% of rated speed, and speed regulation is better than 1% of rated speed.



ศูนย์วิทยุโทรคมนาคม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
ปีการศึกษา ..... 2533 .....

ลายมือชื่อนิสิต สุพจน์ สิวากู  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุรินทร์ สิวารัตนา  
ลายมือชื่อคณาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคลากร ประจำห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และบุคคลภายนอกอีกหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ. สัมภ์ ศิวารัตน์ ที่ได้กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. โศภณ อารีธา ศ. ดร. มงคล เดชนครินทร์ ผศ. ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต อาจารย์ เจิดกุล โสภานิตย์ คุณวิทยา เกษมุดิ และ คุณวิจิตร เหลืองเจริญโต ที่ได้ให้วิชาความรู้แขนงนี้ พร้อมทั้งได้มอบคำแนะนำ และกำลังใจที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย อาจารย์ ดร. วิษณุ พงศ์นิวัฒน์ ที่ได้กรุณาสนับสนุนอุปกรณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่ง และคำแนะนำในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่สำคัญเสมอมา อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย ที่กรุณาให้ความคิดเห็นในการทดสอบวิทยานิพนธ์ คุณ คมน์ อังคะวาทีน และคุณ สมบัติ วิเศษประภา ที่กรุณาช่วยค้นคว้าวิจัย พัฒนาและสร้างโครงการนี้ และอีกหลาย ๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ตลอดจนบัณฑิตวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุน อุปกรณ์ เครื่องมือ และอื่น ๆ เพื่อการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่า วิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะก่อประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

ศุภโชค ศิวะเกื้อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

๗

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง.....	4
3. วงจรแปลงผัน (Converter).....	19
4. วงจรจุดชนวน วงจรวัด และ วงจรประกอบอื่น ๆ.....	28
5. วงจรควบคุมค่าและวงจรที่ใช้ช่วยในการคุมค่า.....	40
6. พื้นฐานการคุมค่าความเร็วมอเตอร์กระแสตรง.....	61
7. การออกแบบและเลือกใช้ส่วนประกอบต่าง ๆ.....	98
8. การทดสอบ ผล และการวิเคราะห์ผล.....	146
9. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	165
เอกสารอ้างอิง.....	169
ประวัติผู้เขียน.....	174

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญตาราง

๗

หน้า

ตารางที่

3.1	คุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสควบคุมแบบต่าง ๆ.....	20
7.1	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ 460/230 3 เฟส 4 สาย.....	127
7.2	ความต้านทานและรีแอ็กแตนซ์ของสายไฟตาม มอก.11-2518.....	128
8.1	ผลการทดสอบ การคงค่าเมื่อแรงดันขาเข้าของวงจรเรียง กระแสเปลี่ยนแปลงขึ้นลง 10 % .....	162
8.2	ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรบริดจ์เรียง กระแสสามเฟส.....	163
9.1	ผลการเปรียบเทียบระหว่างวงจร บริดจ์เรียงกระแสควบคุม เต็มทีกับ ครึ่งเดียว.....	166

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





## สารบัญญภาพ

ณ

หน้า

รูปที่

2.1	ระบบ วาร์ดเลโอนาร์ด ที่ใช้มอเตอร์กระแสสลับและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.2	ลักษณะสมบัติของระบบวาร์ดเลโอนาร์ด.....	5
2.3	วิธีการพื้นฐานในการแปรค่าแรงดันขาออกโดยที่แรงดันขาเข้ามีรูปแบบคงที่.....	7
2.4	แสดงแผนภาพที่ใช้ประกอบคำนิยามของพารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	9
2.5	แสดงแผนภาพสมการของระบบมอเตอร์กระแสตรง.....	9
2.6	แผนภาพของวงจรมอเตอร์ในกรณีใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	10
2.7	(ก) แผนผังจากสมการ (2.11) และ (2.12) (ข) แผนผังจากสมการ (2.14).....	11
2.8	แผนภาพของมอเตอร์กระแสตรง.....	13
2.9	ลักษณะ $T - \omega$ ของมอเตอร์กระแสตรง.....	14
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	15
2.11	โครงสร้างทั่วไปของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง.....	16
2.12	แสดงแผนภาพเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับวงจรคุมค่ากระแสของแหล่งจ่ายกำลังให้อาร์เมเจอร์.....	17
2.13	วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองประเภทหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติแบบ PI และ I อยู่ในวงจรเดียวกัน.....	18
2.14	แหล่งจ่ายกำลังคงที่ให้วงจรสนาม (ASEA, 1981).....	18
3.1	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น.....	22
3.2	กระแสที่ไหลผ่านวงจรสนามเมื่อแรงดันคงที่.....	23
3.3	วงจรเรียงกระแสควบคุมแบบเต็มคลื่น.....	23
3.4	วงจรเรียงกระแสควบคุมแบบเต็มลูกคลื่นและมีไดโอด Free wheeling.....	24
3.5	วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟสควบคุมเต็มที่.....	25

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.6 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟสควบคุมครึ่งเดียว.....	26
4.1 แผนภาพการทำงานของวงจร TCA 785.....	28
4.2 แสดงสัญญาณการทำงานของ TCA 785.....	29
4.3 แสดงวงจรจุดชนวน.....	31
4.4 แสดงการใช้ CT วัดกระแส.....	31
4.5 แสดงอุปกรณ์ตัดต่อวงจร.....	33
4.6 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงคงค่า (ตัวอย่าง).....	34
4.7 แสดงวงจรป้องกันภาคขาเข้า.....	35
5.1 วงจรที่ให้ค่าสัมบูรณ์.....	40
5.2 วงจรขยายกลับเฟส.....	41
5.3 ผลของการต่อโหลด $R_L$ เข้ากับวงจรตั้งค่าที่ใช้โพเทนชิโอมิเตอร์...	42
5.4 วงจรตั้งค่าสำหรับการควบคุมแบบวงรอบเปิด.....	42
5.5 วงจรคุมค่าธรรมชาติสำหรับการคุมค่าแบบวงรอบปิด.....	44
5.6 วงจรคุมค่าแบบ PI ที่ปรับค่าคงตัวเวลาได้.....	45
5.7 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุมค่าแบบ PI.....	47
5.8 ผลตอบต่อสัญญาณขั้นของวงจรคุมค่าแบบ PI.....	47
5.9 วงจรออปแอมป์ที่ใช้ไดโอดในการจำกัดค่า.....	49
5.10 ลักษณะของวงจรจำกัดค่าในรูปที่ 5.9.....	50
5.11 แสดงวงจรควบคุมค่าแบบปรับตัวเองได้ที่ใช้ในวงรอบปิดของกระแส..	51
5.12 วงจรคุมค่าแบบปรับโครงสร้างได้ระหว่างแบบ PI และ แบบ I....	52
5.13 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์ใน วงจรถูกคุมค่าแบบปรับตัวเองได้.....	54
5.14 แผนภาพบล็อกและลักษณะของวงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรซิส.....	55
5.15 วงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรซิสที่ใช้ ออปแอมป์.....	55
5.16 แสดงวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน.....	57
5.17 ตัวอย่างวงจรถูกกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้นด้วยออปแอมป์	

สารบัญภาพ

รูปที่

หน้า

ตัวเดียว (กำเนิดฟังก์ชันใกล้เคียง $\cos^{-1}$ ).....	58
5.18 ตัวอย่างวงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้นด้วย EPROM.....	59
6.1 การต่อวงจรคุมค่าแบบทอดเนื่อง.....	62
6.2 การคุมค่ากระแสของวงจรเรียงกระแสควบคุม.....	63
6.3 ระบบป้อนกลับ.....	64
6.4 ตัวอย่างแผนภาพโบเด.....	64
6.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชัน $G_o(s) = 1/[sT_1(1+sT_2)]$ .....	65
6.6 ช่วงปลอดภัยเชิงเฟสในฟังก์ชันของ $T_2/T_1$ .....	66
6.7 ผลการตอบสนองสัญญาณขึ้นของระบบที่มีการป้อนกลับ ซึ่งฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดเป็นดังสมการ (6.2).....	67
6.8 การพุ่งสูง $\Delta Y'_{max}$ ในฟังก์ชันของ $T_2/T_1$ .....	67
6.9 กราฟของเวลาขึ้น $t_r/T_2$ ในฟังก์ชันของ $T_2/T_1$ .....	68
6.10 ระบบป้อนกลับที่ประกอบด้วยวงจรคุมค่าของระบบที่ต้องการคุมค่า....	68
6.11 แผนภาพบล็อกของระบบที่มีตัวแปรของ $x_o$ .....	70
6.12 ขนาดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด.....	70
6.13 ขนาดของ $G'_o(j\omega)$ ซึ่งแสดงถึงผลของค่าคงตัวเวลา $T_n$ .....	72
6.14 ผลตอบต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของ $x_u$ .....	73
6.15 ผลตอบต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของ $x_o$ .....	73
6.16 แผนภาพบล็อกของระบบที่มีตัวแปรของ $x_o$ และการกรองตัวแปร $x_u$ .....	74
6.17 เฟสของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลและฟังก์ชันโอนย้ายที่มีหนึ่งขั้ว.....	75
6.18 ระบบที่มีวงรอบเล็กและวงรอบใหญ่.....	75
6.19 การเปรียบเทียบเฟสของ $G'_u(s)$ กับเฟสของนิพจน์ใกล้เคียง.....	76
6.20 แผนภาพบล็อกแสดงการคุมค่าวงจรเรียงกระแสควบคุมต่อโหลด.....	77
6.21 แผนภาพบล็อกของวงจรจุดชนวนและกราฟที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิง รูปโคไซน์.....	78

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{d\alpha}$ กับ $V_c$ เมื่อใช้ฟังก์ชัน อ้างอิงรูปโคไซน์.....	79
6.23 กราฟของวงจรถัดขึ้นที่ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อย.....	81
6.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $v_{d\alpha}$ กับ $v_c$ เมื่อกระแสไหลอย่าง ต่อเนื่องและใช้วงจรถัดขึ้นที่ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อย.....	81
6.25 วงจรเทเวนินของวงจรเรียงกระแส.....	83
6.26 วงจรสมมูลแสดงการชั้มนำมอเตอร์กระแสตรงด้วย วงจรเรียงกระแสควบคุม.....	83
6.27 แผนภาพบล็อกแสดงฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรเรียงกระแส ที่มีการควบคุม.....	84
6.28 การเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของความเร็วมอเตอร์ เมื่อทอร์กของโหลดเปลี่ยนแปลงขึ้น.....	85
6.29 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์เมื่อทอร์กของโหลด เปลี่ยนแปลงสุ่ม ๆ (random).....	86
6.30 วงจรสมมูลแสดงการชั้มนำมอเตอร์กระแสตรง ด้านวงจรเรียงกระแสควบคุม.....	88
6.31 แผนภาพบล็อกของมอเตอร์กระแสตรงที่ชั้มนำโดยวงจรเรียงกระแส..	89
6.32 แผนภาพบล็อกของระบบคุมค่าความเร็ว.....	90
6.33 แผนภาพบล็อกการคุมค่ากระแสอาร์เมเจอร์.....	91
6.34 แผนภาพบล็อกกิลล์เคียงของระบบคุมค่าความเร็ว.....	93
6.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{d\alpha}$ กับ $V_c$ และผลกระทบ จากการที่กระแสอาร์เมเจอร์ไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง ของวงจร บริดจ์เรียงกระแสสามเฟสควบคุมเต็มที่.....	95
6.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $v_{d\alpha}$ กับ $v_c$ และผลกระทบ ขณะกระแสไม่ต่อเนื่อง ของวงจรบริดจ์เรียงกระแสสามเฟส ควบคุมเต็มที่ โดยใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อย.....	97

## สารบัญภาพ

รูปที่

หน้า

6.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $v_{d\alpha}$ กับ $v_c$ และผลกระทบ ขณะกระแสไม่ต่อเนื่อง ของวงจรบริดจ์เรียงกระแสสามเฟส ควบคุมครึ่งเดียวโดยใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อย.....	97
7.1	วงจรจ่ายกำลังสำหรับอาร์เมเจอร์.....	99
7.2	วงจรจ่ายกำลังสำหรับขดลวดสนาม.....	100
7.3	อุปกรณ์ตัดต่อภาคกำลัง.....	102
7.4	แหล่งจ่ายไฟตรง +/- 12 โวลต์ที่ใช้.....	103
7.5	การต่อหม้อแปลงเพื่อการชิ่งโครไนส์ระหว่าง ภาคกำลังและภาคควบคุม.....	105
7.6	วงจรตรวจแรงดันผ่านศูนย์ (Zero crossing).....	105
7.7	วงจรสำหรับ TCA 785 .....	106
7.8	แผนภาพมุมเฟสของการต่อหม้อแปลง.....	107
7.9	รูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ในวงจรจุดชนวนเทียบกับแรงดันเฟสขาเข้า...	107
7.10	รูปคลื่นของ TCA 785 .....	108
7.11	วงจรบริดจ์เรียงกระแสสามเฟสควบคุมเต็มทีและคุณสมบัติ.....	109
7.12	การต่อวงจรสำหรับขาออก (14, 15) ของ TCA 785 ทั้งสามตัว...	110
7.13	วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาด้วย IC 555 .....	111
7.14	วงจรผสมสัญญาณและชั้บนำเกิดของ SCR.....	112
7.15	วงจรชั้บนำเกิดอย่างต่อเนื่อง.....	113
7.16	วงจรช่วยสำหรับ OFF ภาคกำลัง.....	114
7.17	การต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อวัดกระแสขาเข้าวงจรเรียงกระแส.....	116
7.18	วงจรฟังก์ชันอาร์คโคไซน์ (arccos) โดยใช้ฮอปแอมป์ตัวเดียว.....	117
7.19	วงจรฟังก์ชัน arccos ที่ใช้ EPROM.....	120
7.20	สัญญาณเข้าและออกจาก วงจรอาร์คโคไซน์(arccos).....	122
7.21	วงจรควบคุมขณะวงรอบเปิดที่ใช้ในการทดลอง.....	123
7.22	วงจรควบคุมขณะวงรอบเปิดที่ออกแบบสำหรับทดลองทั่วไป.....	124

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
7.23 วงจรเทเวนินของวงจรเรียงกระแส.....	126
7.24 แผนภาพใช้ประกอบการอธิบายวิธีหา $L_c$ .....	126
7.25 วงจรสมมูลย์ของวงจรเรียงกระแสและโหลด.....	128
7.26 วงจรคุ่มค่าธรรมดาสำหรับการคุ่มค่าแบบวงรอบปิด.....	134
7.27 วงจรคุ่มค่าแบบปรับตัวเองสำหรับคุ่มค่ากระแส.....	138
7.28 วงจรคุ่มค่าแบบ PD.....	139
7.29 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุ่มค่าแบบ PD ซึ่งใช้ออปแอมป์ไม่ อุดมคติ.....	140
8.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันขาออกและแรงดันขา 11 ของ TCA 785 (เทียบกับมุมจุดชนวน).....	147
8.2 ผลตอบต่อการใช้วงจรคุ่มค่า PI แบบธรรมดาคุ่มค่ากระแสและ ความเร็วรอบ โดยต่อกอดเนื่องกัน ขณะใช้วงจรจุดชนวนที่ใช้ ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อยใช้วงจรบริดจ์เรียงกระแสสามเฟส ควบคุมเต็มที่.....	150
8.3 ตัวอย่างของการทดสอบโดยใช้วงจรคุ่มค่าแบบปรับตัวเองและ ใช้วงจรจุดชนวนที่เสมือนใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปโคไซน์ ในการ ควบคุมวงจรบริดจ์เรียงกระแสสามเฟสควบคุมเต็มที่.....	155
8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์ กับภาวะปิด-เปิด สวิตซ์ ตามคำแนะนำในบทที่ 6 .....	160
8.5 กระแสและแรงดันที่ขดลวดสนามขณะใช้งาน.....	164