

การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับชนิดโปรแกรมได้สำหรับทดสอบ
ความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว



นายสราวุธ เมธาวี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4916-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF PROGRAMMABLE AC VOLTAGE AND CURRENT SOURCES FOR
ACCURACY TESTING OF SINGLE PHASE ELECTRICITY ENERGY METERS

Mr.Sarawoot Methawee

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4916-3

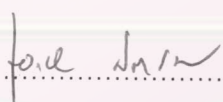
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับชนิดโปรแกรมได้
สำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว
โดย นายสรวิช เมธาวิ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัฒน์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์. เจตกุล ไสภานิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วันเฉลิม โปธา)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรารุช เมธาวี : การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟฟสลักษณะโปรแกรมได้สำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว. (A DESIGN OF PROGRAMMABLE AC VOLTAGE AND CURRENT SOURCES FOR ACCURACY TESTING OF SINGLE PHASE ELECTRICITY ENERGY METERS) อ . ที่ ป ร ี ก ษ า : รัช.ดร.เอกชัย ลีลาวัศมี, 105 หน้า. ISBN 974-17-4916-3.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่มีความเที่ยงตรง สาร์มอนิกต่ำ และสามารถปรับขนาด, เฟส และความถี่ของสัญญาณที่สร้างได้ โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 687 วงจรที่ออกแบบจะสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสแยกกัน ภายในประกอบไปด้วยส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบ และส่วนขยายสัญญาณ ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบจะสร้างสัญญาณแรงดันต้นแบบรูปไซน์ที่มีขนาดค่ายอดสูงสุด ± 5 V สองสัญญาณ สัญญาณหนึ่งจะถูกขยายโดยวงจรขยายแรงดันเป็นสัญญาณแรงดันออกขนาดสูงสุดประมาณ $250 V_{rms}$ ส่วนอีกสัญญาณจะถูกขยายและแปลงเป็นกระแสเป็นสัญญาณกระแสออกขนาดสูงสุดประมาณ $50 A_{rms}$ ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิต และวงจรรองความถี่ผ่านตัววิธีการสร้างสัญญาณที่เลือกใช้คือ ขั้นตอนวิธีการค้นตาราง (Look-up table algorithm; LUT) โดยใช้ตารางเก็บขนาดสัญญาณ 200 ค่า ส่วนขยายสัญญาณประกอบไปด้วยออปแอมป์กำลังสูงและหม้อแปลงกำลัง โครงสร้างของวงจรเป็นแบบป้อนกลับเพื่อให้สัญญาณออกถูกขยายโดยที่ยังมีคุณภาพดีเหมือนสัญญาณเข้า วงจรขยายสัญญาณถูกออกแบบโดยคำนึงถึงเสถียรภาพของวงจร การคงค่าสัญญาณออก และความต่างเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้า ผลการทดลองทดสอบการทำงานพบว่า วงจรที่ออกแบบสามารถสร้างสัญญาณแรงดันได้ในช่วง $180-250 V_{rms}$ สร้างสัญญาณกระแสได้ในช่วง $0.2 - 50 A_{rms}$ มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.1 % ของค่าเต็มพิกัด ความเที่ยงตรงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณไม่เกิน 2 % ความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วง 45 -55 Hz ความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% ของค่าที่ตั้ง สร้างความต่างเฟสระหว่างสัญญาณได้ในช่วง 0-360 องศา ผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา วงจรขยายมีการคงค่าแรงดันไม่เกิน 0.2 % ที่โหลดมิเตอร์ 5 ตัว และการคงค่ากระแสไม่เกิน 0.8 % ที่โหลดสายไฟความต้านทาน $42.9 m\Omega$ เทียบกับโหลดสายไฟความต้านทาน $6.04 m\Omega$

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต..... สรารุช เมธาวี
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Jone Jarr
ปีการศึกษา..... 2546.....

4470588721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : AC POWER SOURCE / ENERGY METER CALIBRATOR / ACCURACY TESTER

SARAWOOT METHAWEE : A DESIGN OF PROGRAMMABLE AC VOLTAGE AND CURRENT SOURCES FOR ACCURACY TESTING OF SINGLE PHASE ELECTRICITY ENERGY METERS. THESIS ADVISOR : EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 105 pp. ISBN 974-17-4916-3.

This thesis presents a design of voltage and current sources that generate sinusoidal signals with low harmonic distortion. Amplitude, phase and frequency of the signals are adjustable. The signals are used to test accuracy of single phase electrical energy meters referred to IEC 687 standard. The designed circuits produce separate voltage and current signals which consist of a reference signal generating part and an amplifier part. The first part generates 2 reference voltage signals with peak value of ± 5 V. One is amplified by a voltage amplifier circuit to give a maximum voltage output of $250 V_{rms}$. The other is converted and amplified by voltage to current converter circuit to give a maximum output current of $50 A_{rms}$. The reference signal generating part contains a microcontroller, a 16-bit digital to analog converter and a low pass filter. This part employs a Look-up table algorithm with a table size of 200. The second part is composed of high power OP-AMPS and power transformers. Feedback topology is used in keeping the input signals' good quality. The amplifier circuit is designed by concentrating on stability, output regulation and phase shift of its output signal. The experimental results show that the circuit can generate a voltage signal in the range of $180-250 V_{rms}$ and a current signal in the range of $0.2-50 A_{rms}$, both with errors under 0.1 % of full scale. The total harmonic distortion is less than 2%. The output frequency can be adjusted in the range of 45-55 Hz with error under 0.1 % of set value. The phase shift between signals can be set in range of 0-360 degrees with ± 0.5 degrees error. The voltage amplifier circuit has voltage regulation less than 0.2 % at 5-meter load. The current regulation is less than 0.8 % at wire resistor $42.9 m\Omega$ as compared with wire resistor $6.04 m\Omega$.

Department... Electrical Engineering... Student's signature... *Sarawoot Methawee*
Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature... *Ekachai Leelarasamee*
Academic year... 2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.เอกชัย ลีลา
รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดี
ตลอดมา

ขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, ทุนอุดหนุนและส่งเสริม
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท - เอก ในสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ทบวงมหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุน
อุดหนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังมีเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการออกแบบและประยุกต์ใช้วงจร
รวมที่คอยห่วงใย และคอยช่วยเหลือให้คำแนะนำที่ดีต่างๆ มาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอพระคุณ บิดา-มารดา และพี่สาวที่ได้ให้คำปรึกษาและเป็น
กำลังใจ รวมทั้งยังอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ให้เป็นอย่างดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและปรีทัศน์วรรณกรรม	4
2.1 มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	4
2.2 การทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	5
2.2.1 โครงสร้างของระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	5
2.2.2 การทดสอบความแม่นยำตามมาตรฐาน IEC 687	6
2.3 โครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงาน	8
2.3.1 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบไม่มีการป้อนกลับ	8
2.3.2 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบมีการป้อนกลับ	9
2.4 กลวิธีการสร้างสัญญาณต้นแบบ	9
2.4.1 ขั้นตอนวิธีการคั่นตาราง	9
2.4.2 ขั้นตอนวิธีการคั่นตารางด้วยการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น	10
2.4.3 ขั้นตอนวิธีแบบเรียกซ้ำ	10
2.4.4 ขั้นตอนวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์	11
2.5 งานวิจัยที่เคยมีมาก่อน	12
บทที่ 3 การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับ	14
3.1 หลักการทำงานของแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับ	14

สารบัญ (ต่อ)

3.2	โครงสร้างภายในของแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับ	14
3.3	ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบ	15
3.3.1	ไมโครคอนโทรลเลอร์	16
3.3.2	ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก	17
3.3.3	วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ	21
3.3.4	ปุ่มกดรับค่า	25
3.3.5	จอแสดงผล	26
3.4	ขั้นตอนวิธีการสร้างสัญญาณต้นแบบ	26
3.4.1	กลวิธีการปรับขนาดของสัญญาณ	27
3.4.2	กลวิธีการปรับความถี่ของสัญญาณ	28
3.4.3	กลวิธีการปรับความต่างเฟสของสัญญาณ	28
3.5	โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	30
3.5.1	ส่วนประกอบของโปรแกรม	31
3.5.2	แผนผังการทำงานของโปรแกรม	32
3.6	การปรับเทียบสัญญาณออกให้มีความแม่นยำ	37
3.6.1	การปรับเทียบขนาดของสัญญาณ	37
3.6.2	การปรับเทียบความถี่ของสัญญาณ	37
3.6.3	การปรับเทียบความต่างเฟสของสัญญาณออก	39
บทที่ 4	วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณ	42
4.1	หลักการทํางาน	42
4.2	การออกแบบวงจรมัลติเพลกซ์แรงดัน	43
4.2.1	โครงสร้างของวงจรมัลติเพลกซ์แรงดัน	43
4.2.2	การวิเคราะห์และเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจร	45
4.2.3	การปรับปรุงวงจร	53
4.3	การออกแบบวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส	61
4.3.1	โครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส	61
4.3.2	การวิเคราะห์และเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจร	63
4.3.3	การปรับปรุงวงจร	69
บทที่ 5	การทดสอบ และสรุปผล	76

สารบัญ (ต่อ)

5.1	วงจรถ้าออกแบบ	76
5.2	ผลการทดสอบการสร้างสัญญาณ	77
5.2.1	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดัน	78
5.2.2	ความแม่นยำในการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ	79
5.2.3	ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออก	80
5.2.4	การคงค่าแรงดัน	81
5.2.5	ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก	83
5.2.6	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าสูง)	84
5.2.7	ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าสูง)	85
5.2.8	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าต่ำ)	87
5.2.9	ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าต่ำ)	89
5.2.10	การคงค่ากระแสด้านออก	90
5.2.11	ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออก	91
5.2.12	ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออก	92
5.3	สรุป	93
5.4	ข้อเสนอแนะ	94
	รายการอ้างอิง	95
	ภาคผนวก	97
	ภาคผนวก ก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการ	98
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	105

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (สำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวและมิเตอร์หลายเฟสที่ใช้โหลดสมดุล)..... 7

ตารางที่ 2.2 สภาพะอ้างอิงในการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 8

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการวัดค่าเพื่อเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณ..... 38



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	โครงสร้างภายในมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	4
รูปที่ 2.2	การต่อใช้งานมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 2.3	ระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว.....	6
รูปที่ 2.4	โครงสร้างเครื่องทดสอบความแม่นยำแบบไม่ป้อนกลับ.....	9
รูปที่ 2.5	โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบไม่มีการป้อนกลับ.....	9
รูปที่ 2.6	ลักษณะสัญญาณของวิธีมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	11
รูปที่ 2.7	โครงสร้างวงจรจ่ายพลังงานแบบมีการป้อนกลับ.....	12
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงานที่ใช้หลักการของแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตช์.....	13
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแส.....	15
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบ.....	16
รูปที่ 3.3	โครงสร้างส่วนประกอบภายในของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก DAC714P.....	18
รูปที่ 3.4	แผนภาพเวลาของการเลื่อนค่าและการสัง่แปลงค่าของ DAC714P.....	18
รูปที่ 3.5	วงจรปรับค่าอัตราขยายและออฟเซตของ DAC714P.....	19
รูปที่ 3.6	การปรับออฟเซตและอัตราขยายเพื่อปรับลักษณะสมบัติของ DAC714P.....	19
รูปที่ 3.7	การต่อสายสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก.....	20
รูปที่ 3.8	ลักษณะสัญญาณขั้นรูปไซน์ที่ได้จากตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก.....	21
รูปที่ 3.9	กราฟแสดงส่วนประกอบสัญญาณออกจากตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกในโดเมน ความถี่.....	22
รูปที่ 3.10	โครงสร้างของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำ.....	23
รูปที่ 3.11	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำ.....	24
รูปที่ 3.12	โครงสร้างของปุ่มกดรับค่า.....	25
รูปที่ 3.13	จอแสดงผลและการต่อใช้งาน.....	26
รูปที่ 3.14	กลวิธีการสร้างสัญญาณต้นแบบ.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.15	กลวิธีการปรับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณต้นแบบ	29
รูปที่ 3.16	แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	30
รูปที่ 3.17	แผนผังแจกแจงโปรแกรมย่อยของโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	31
รูปที่ 3.18	แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลักสำหรับควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	34
รูปที่ 3.19	แผนผังการทำงานของโปรแกรมขัดจังหวะ	35
รูปที่ 3.20	แผนผังเวลาของการขัดจังหวะเพื่อสร้างความต่างเฟส	39
รูปที่ 3.21	การสร้างการเชื่อมต่อเวลาแบบใหม่เพื่อกำจัดปัญหาด้านเวลา	40
รูปที่ 3.22	แผนผังการทำงานของโปรแกรมขัดจังหวะที่ปรับขั้นตอนวิธีใหม่	41
รูปที่ 4.1	โครงสร้างพื้นฐานของวงจรรขยายสัญญาณ	42
รูปที่ 4.2	โครงสร้างของวงจรรขยายแรงดัน	43
รูปที่ 4.3	แผนภาพแสดงโครงสร้างวงจรรขยายแรงดันที่ถูกแยกเป็นส่วน ๆ	44
รูปที่ 4.4	แผนภาพบล็อกแสดงของวงจรรขยายแรงดัน	45
รูปที่ 4.5	วงจรสมมูลของวงจรรขยายแรงดัน	46
รูปที่ 4.6	วงจรสมมูลของหม้อแปลงขยายแรงดัน	47
รูปที่ 4.7	ผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณอิมพัลส์ของระบบอันดับสองที่ค่าอัตราการหน่วง ต่างๆ	48
รูปที่ 4.8	วงจรสมมูลเพื่อหาการคงค่าแรงดัน	50
รูปที่ 4.9	การเลือกค่าพารามิเตอร์ A และ R_c ตามข้อกำหนดสำหรับวงจรรขยายแรงดัน	52
รูปที่ 4.10	วงจรรขยายแรงดันที่ออกแบบไว้และถูกนำไปจำลองการทำงาน	53
รูปที่ 4.11	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของขนาดและเฟสของระบบวงเปิดของวงจรรขยายแรงดัน	54
รูปที่ 4.12	วงจรรอย่างง่ายแสดงส่วนสร้างขั้วและศูนย์ของระบบ	55
รูปที่ 4.13	แสดงค่าความจุแฝงที่เกิดในขดลวดของหม้อแปลง	56
รูปที่ 4.14	ผลตอบสนองความถี่ของระบบวงเปิดเมื่อมีค่าความจุแฝงในวงจรสมมูลหม้อแปลง	57

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.15	วงจรปรับอัตราขยายในวิถีไปหน้าที่เพิ่มตัวเก็บประจุเพื่อกำหนดชั่วให้วงจร.....	58
รูปที่ 4.16	วงจรขยายแรงดันที่ผ่านการชดเชยเสถียรภาพแล้ว.....	58
รูปที่ 4.17	ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดของวงจรที่ชดเชยเสถียรภาพแล้ว.....	59
รูปที่ 4.18	โครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส.....	61
รูปที่ 4.19	โครงสร้างวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสมองแยกเป็นส่วนๆ.....	62
รูปที่ 4.20	แผนภาพบล็อกของวงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส.....	63
รูปที่ 4.21	วงจรขั้วกระแสที่ใช้ในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส.....	64
รูปที่ 4.22	วงจรสมมูลของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส.....	64
รูปที่ 4.23	วงจรสมมูลของหม้อแปลงขยายกระแส.....	65
รูปที่ 4.24	วงจรสมมูลเพื่อหาการคงค่ากระแส.....	67
รูปที่ 4.25	การเลือกค่าพารามิเตอร์ A และ R_c ตามข้อกำหนดสำหรับวงจรขยายกระแส.....	69
รูปที่ 4.26	วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ออกแบบ.....	70
รูปที่ 4.27	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงเปิดของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส.....	70
รูปที่ 4.28	วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงส่วนสร้างขั้วและศูนย์ของหม้อแปลงกระแส.....	71
รูปที่ 4.29	โครงสร้างของวงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันเป็นกระแส.....	72
รูปที่ 4.30	อัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ OPA544T.....	72
รูปที่ 4.31	การใส่ความต้านทานและตัวเก็บประจุเพื่อปรับชั่วของวงจร.....	73
รูปที่ 4.32	วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ผ่านการแก้ไขเสถียรภาพแล้ว.....	74
รูปที่ 4.33	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบที่แก้ไขเสถียรภาพแล้ว.....	74
รูปที่ 5.1	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสที่ออกแบบ.....	76
รูปที่ 5.2	การต่อวงจรเพื่อทดสอบวงจรจ่ายพลังงานที่ออกแบบ.....	77
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณแรงดันออก.....	78
รูปที่ 5.4	อัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบ.....	79

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.5	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างความถี่.....	80
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของแรงดันออกที่ค่าขนาดต่าง ๆ	81
รูปที่ 5.7	ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบที่ค่าแรงดันที่ตั้งต่าง ๆ	81
รูปที่ 5.8	การต่อวงจรเพื่อวัดการคงค่าแรงดันของวงจรจ่ายแรงดัน	81
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงการคงค่าแรงดันของสัญญาณ.....	82
รูปที่ 5.10	อัตราขยายของการทอนแรงดันป้อนกลับของวงจรขยายแรงดันที่ค่าแรงดันออกต่าง ๆ	83
รูปที่ 5.11	ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก.....	83
รูปที่ 5.12	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการจ่ายกระแส	84
รูปที่ 5.13	กราฟแสดงอัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบกระแส	85
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่ากระแสต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 5.15	ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบกระแส	86
รูปที่ 5.16	กราฟแสดงความแม่นยำในการจ่ายกระแสเมื่อใช้การลดทอนสัญญาณเข้าของวงจร แปลงแรงดันเป็นกระแส.....	87
รูปที่ 5.17	วงจรและผลการวัดค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง	88
รูปที่ 5.18	กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่ากระแสต่าง ๆ สำหรับวงจรจ่ายกระแสช่วง ค่าต่ำ	89
รูปที่ 5.19	ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสใน ช่วงค่าต่ำ	90
รูปที่ 5.20	กราฟแสดงการคงค่ากระแสของวงจรจ่ายกระแส	91
รูปที่ 5.21	ภาพแสดงช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแสด้านออก.....	92
รูปที่ 5.22	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าความต่างเฟสของสัญญาณออก	92