

การพัฒนาเครื่องทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบพกพา
โดยใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์



นายนาวิน วงศ์เทศ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

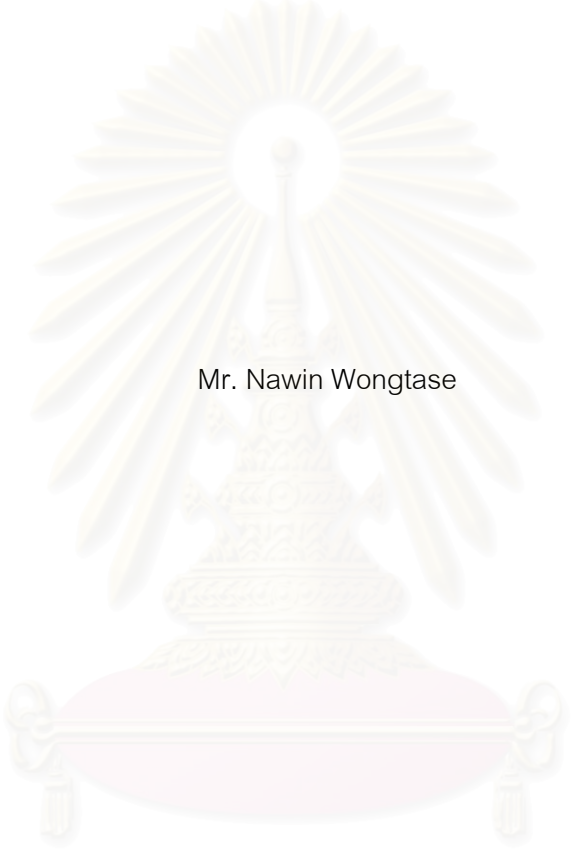
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A PORTABLE ELECTRICITY METER TESTER
USING PULSE WIDTH MODULATION



Mr. Nawin Wongtase

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องทดสอบไมเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบพกพา โดยใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์
โดย	นายนาวิน วงศ์เทศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คนบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัณวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม ไปรา)

สถาบันวิศวกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาวิน วงศ์เทศ : การพัฒนาเครื่องทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบพกพา โดยใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์. (DEVELOPMENT OF A PORTABLE ELECTRICITY METER TESTER USING PULSE WIDTH MODULATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.เอกชัย ลีลาวัณย์, 63 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบเครื่องทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวโดยใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์ มีการออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่ใช้ทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าให้มีความเที่ยงฮาร์มอนิกต่ำ สามารถปรับขนาด, เฟส และความถี่ของสัญญาณที่สร้างได้ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 687 วงจรที่ออกแบบจะสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสแยกกัน ภายในประกอบไปด้วยวงจรสวิตช์ที่ใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์เป็นหลัก โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์ประกอบไปด้วยวงจรสวิตช์ของมอสเฟตแบบบริดจ์ทำงานที่ความถี่ประมาณ 10 kHz ทำการสร้างสัญญาณพัลส์บวก-ลบที่มีค่ายอด 12 V สัญญาณพัลส์จะถูกขยายเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่ายอด 600 V โดยหม้อแปลงความถี่สูง จากนั้นจึงถูกจัดเรียงสัญญาณเป็นพัลส์ด้านบวกโดยไดโอดกำลังที่มีการต่อแบบบริดจ์เพื่อเข้าสู่วงจรสวิตช์ของมอสเฟตแบบบริดจ์ด้านแรงดันสูงที่ทำงานที่ความถี่ระหว่าง 45-55 Hz และกรองสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่มีค่าตามมาตรฐานด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำต่อไป ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสรูปไซน์ประกอบไปด้วยวงจรสวิตช์ของมอสเฟตแบบบริดจ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ความถี่สวิตช์ประมาณ 20 kHz มีค่ายอดของสัญญาณ 5 V จากนั้นจึงใช้วงจรกรองความถี่ต่ำกรองสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณกระแสที่มีค่าตามมาตรฐาน โดยวงจรที่ออกแบบสามารถสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์ได้ในช่วง $100\text{--}260\text{ V}_{\text{rms}}$ สร้างสัญญาณกระแสได้ในช่วง $0.01\text{--}40\text{ A}_{\text{rms}}$ มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.5% ของค่าเต็มพิกัด ความเที่ยงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณไม่เกิน 2% ความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วง 45-55 Hz ความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% ของค่าที่ตั้ง สร้างความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสได้ในช่วง 0-360 องศา ผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... *ณัฐณิชา วงศ์เทศ*
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *เอกชัย ลีลาวัณย์*
 ปีการศึกษา..... 2550.....

4770328121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : AC POWER SOURCE / ENERGY METER CALIBRATOR / FULL-BRIDGE
INVERTER / UNIPOLAR VOLTAGE SWITCHING

NAWIN WONGTASE : DEVELOPMENT OF A PORTABLE ELECTRICITY METER
TESTER USING PULSE WIDTH MODULATION. THESIS ADVISOR :
ASSOC.PROF.EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 63 pp.

This thesis presents a design of a 1-phase electricity meter tester using pulse width modulation (PWM). The meter tester can generate sinusoidal voltage and current sources with low harmonic distortion. Its amplitude, phase, and frequency of the signals are adjustable. These signals can be used to test the accuracy of a single phase electricity energy meter according to IEC 687 standard. The designed circuits produce separate voltage and current signals using switching devices. The voltage source circuit has a bridge circuit of mosfets switched at 10 kHz to generate PWM pulses with peak value of ± 12 V. This signal is amplified by a high-frequency transformer to give a maximum voltage signal of 600 V. A bridge circuit of diodes rectifies this signal and passes it to a bridge circuit of mosfets operated at 45-55 Hz. An LC filter then filters the high frequency components to generate a sinusoidal voltage signal at 45-55 Hz. The current source consists of the switching devices pulse width modulated at 20 kHz with peak value of ± 12 V and an LC filter to generate a sinusoidal current signal at 45-55 Hz. These circuits can generate a voltage signal in the range of 100-260 V_{rms} and a current signal in the range of 0.01-40 A_{rms}, both with errors under 0.5% 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 the range of 0-360 degrees with ± 0.5 degree error.

Department... Electrical Engineering... Student's signature... *Nawin Wongtase*
Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature... *Ekachai Leelarasmee*
Academic year... 2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และขอบคุณสำหรับมิตรภาพและความรู้สึกดี ๆ ที่มีให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งมีวิทยานิพนธ์เล่มนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและปรัทัศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	4
2.2 การทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	5
2.2.1 โครงสร้างของระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	5
2.2.2 การทดสอบความแม่นยำตามมาตรฐาน IEC687.....	6
2.3 โครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงาน.....	8
2.3.1 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการสร้างสัญญาณต้นแบบ.....	8
2.3.2 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการสวิตซ์.....	10
2.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	13
2.5 งานวิจัยที่เคยมีมาก่อน.....	14
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	17
3.1 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	17
3.2 โครงสร้างภายในของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า.....	17
3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงของเครื่องทดสอบความแม่นยำ.....	18
3.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	18
3.3.2 จอแสดงผล.....	20
3.3.3 ปุ่มกดรับค่า.....	20
3.3.4 ส่วนสร้างสัญญาณแรงดัน.....	20
3.3.5 ส่วนสร้างสัญญาณกระแส.....	21
3.3.6 แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง.....	21
3.3.7 วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลัง.....	23

3.3.8	ส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	24
3.4	ขั้นตอนการสร้างสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์	26
3.5	โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	27
3.5.1	ส่วนประกอบของโปรแกรม	27
3.5.2	แผนผังการทำงานของโปรแกรม	29
บทที่ 4	แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแส	31
4.1	หลักการทำงาน	31
4.2	การออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์	31
4.2.1	วงจรสวิตชิ่งแบบฟูลบริดจ์ ด้านแรงดันต่ำ	32
4.2.2	หม้อแปลงความถี่สูง	32
4.2.3	วงจรเรียงกระแส	34
4.2.4	วงจรสวิตชิ่งแบบฟูลบริดจ์ ด้านแรงดันสูง	35
4.2.5	วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ	35
4.2.6	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและป้อนกลับ	36
4.3	การออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ	37
4.3.1	วงจรสวิตชิ่งแบบฟูลบริดจ์	38
4.3.2	วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ	38
4.3.3	วงจรป้อนกลับ	39
4.4	การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง	41
4.4.1	วงจรสวิตชิ่งแบบฟูลบริดจ์	41
4.4.2	วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ	42
4.4.3	วงจรป้อนกลับ	43
บทที่ 5	การทดสอบและสรุปผล	45
5.1	วงจรที่ออกแบบ	45
5.2	ผลทดสอบการสร้างสัญญาณ	46
5.2.1	รูปสัญญาณแรงดันรูปไซน์	47
5.2.2	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดัน	47
5.2.3	ความแม่นยำในการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ	48
5.2.4	ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออก	49
5.2.5	การคงค่าแรงดัน	50
5.2.6	ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก	52
5.2.7	รูปสัญญาณกระแสรูปไซน์	52
5.2.8	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าสูง)	53

5.2.9	ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าสูง).....	54
5.2.10	ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าต่ำ).....	55
5.2.11	ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าต่ำ).....	55
5.2.12	ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออก.....	56
5.2.13	ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออก	57
5.3	สรุป.....	58
5.4	ข้อเสนอแนะ	60
	รายการอ้างอิง	61
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	63



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	โครงสร้างภายในของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว	4
รูปที่ 2.2	ระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว	5
รูปที่ 2.3	โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบไม่มีการป้อนกลับ	8
รูปที่ 2.4	โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการป้อนกลับ	9
รูปที่ 2.5	การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบ PWM โดยใช้สัญญาณรูปไซน์เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	11
รูปที่ 2.6	สเปคตร้าของรูปคลื่น PWM	12
รูปที่ 2.7	อัตราส่วนแอมพลิจูดองค์ประกอบหลักมูลกับแอมพลิจูดรูปคลื่น PWM ที่ย่านการมอดูเลตต่างๆ	12
รูปที่ 2.8	อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์	13
รูปที่ 2.9	การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์	13
รูปที่ 2.10	การสวิตชิงแรงดันแบบยูนิโพลาร์	14
รูปที่ 2.11	สเปคตร้าของสัญญาณออกที่มีการสวิตชิงแบบยูนิโพลาร์	14
รูปที่ 2.12	โครงสร้างวงจรจ่ายพลังงานแบบมีการป้อนกลับ	15
รูปที่ 2.13	โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานที่ใช้หลักการของแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตซ์	16
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.2	ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC2138 เปรียบเทียบขนาดกับเหรียญ 25 cent	19
รูปที่ 3.3	จอแสดงผลและการต่อใช้งาน	19
รูปที่ 3.4	โครงสร้างของปุ่มกดรับค่า	20
รูปที่ 3.5	โครงสร้างของส่วนสร้างสัญญาณแรงดัน	21
รูปที่ 3.6	โครงสร้างของส่วนสร้างสัญญาณกระแส	21
รูปที่ 3.7	แหล่งจ่ายแรงดัน 10V สำหรับขั้วมอสเฟตกำลัง	22
รูปที่ 3.8	แหล่งจ่ายแรงดัน 15V สำหรับขั้วมอสเฟตกำลัง	23
รูปที่ 3.9	แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรทั่วไป	23
รูปที่ 3.10	วงจรขั้วเกตที่มีโหนดเป็นมอสเฟตกำลัง 1 ตัว	24
รูปที่ 3.11	วงจรขั้วเกตที่มีโหนดเป็นมอสเฟตกำลัง 3 ตัว	24
รูปที่ 3.12	โครงสร้างของส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	25
รูปที่ 3.13	วงจรตรวจจับค่าพัลส์แสงจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	25
รูปที่ 3.14	ตำแหน่งการเก็บข้อมูลในหน่วยความจำในแต่ละคาบที่ค่า $m_0=0.12$ และ $m_0=0.57$	26
รูปที่ 3.15	แผนผังแจกแจงโปรแกรมย่อยของโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	27
รูปที่ 3.16	แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลักสำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	29
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายแรงดัน	31
รูปที่ 4.2	วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันต่ำ	32
รูปที่ 4.3	สัญญาณเข้าและออกของหม้อแปลงความถี่สูง	32
รูปที่ 4.4	สัญญาณเข้าและออกของวงจรเรียงกระแส	35

รูปที่ 4.5 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันสูง.....	35
รูปที่ 4.6 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายสัญญาณแรงดัน.....	36
รูปที่ 4.7 การเพิ่มโหลดของส่วนจ่ายสัญญาณแรงดัน	36
รูปที่ 4.8 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและบ็อนกลับ.....	37
รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ	38
รูปที่ 4.10 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ	38
รูปที่ 4.11 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ.....	39
รูปที่ 4.12 การเพิ่มโหลดของส่วนจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ	39
รูปที่ 4.13 วงจรบ็อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าต่ำ.....	40
รูปที่ 4.14 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าสูง	41
รูปที่ 4.15 การต่อแหล่งจ่ายไฟแยกกับมอสเฟตแต่ละตัว	42
รูปที่ 4.16 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าสูง.....	42
รูปที่ 4.17 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าสูง	43
รูปที่ 4.18 การเพิ่มโหลดของส่วนจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง	43
รูปที่ 4.19 วงจรบ็อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าสูง	44
รูปที่ 5.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสที่ออกแบบ	45
รูปที่ 5.2 การต่อวงจรเพื่อทดสอบวงจรแหล่งจ่ายพลังงานที่ออกแบบ	46
รูปที่ 5.3 รูปแสดงสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่ค่าแรงดัน 220 V _{ms}	47
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณแรงดันออก	48
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างความถี่	49
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของแรงดันออกที่ค่าต่างๆ.....	50
รูปที่ 5.7 การต่อวงจรเพื่อวัดการคงค่าแรงดันของวงจรจ่ายสัญญาณแรงดัน.....	51
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการคงค่าแรงดันของสัญญาณแรงดันออกที่ค่าต่างๆ	51
รูปที่ 5.9 ค่าประมาณช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดัน.....	52
รูปที่ 5.10 รูปแสดงสัญญาณกระแสรูปไซน์ที่ค่ากระแส 2 A _{ms}	53
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง.....	54
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง.....	54
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ	55
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ.....	56
รูปที่ 5.15 ค่าประมาณช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแส.....	57
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณออก	57

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (สำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว และมิเตอร์หลายเฟสที่ใช้โหลดสมดุล)	7
ตารางที่ 2.2 สภาวะอ้างอิงในการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า	7
ตารางที่ 4.1 การแบ่งช่วงค่ากระแสและความต้านทานในแต่ละช่วงของวงจรม้วนกลับของแหล่งกำเนิด..... กระแสช่วงค่าต่ำ	40
ตารางที่ 4.2 การแบ่งช่วงค่ากระแสและความต้านทานในแต่ละช่วงของวงจรม้วนกลับของแหล่งกำเนิด..... กระแสช่วงค่าสูง.....	44
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ทำการสร้าง	59



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบัน มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าได้กลายมาเป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าในทุกประเทศ มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัลเป็นอุปกรณ์รุ่นใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นและได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากความสามารถที่มีมากกว่ามิเตอร์แบบจานหมุนรุ่นเก่า นอกจากนี้มิเตอร์แบบดิจิทัลยังสามารถเพิ่มฟังก์ชันการทำงานที่ต้องการเข้าไปได้อย่างหลากหลายกว่าอีกด้วย การวิจัยและพัฒนา มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจึงมีขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านรูปร่างและความสามารถในการทำงาน มีการเผยแพร่ความรู้อย่างกว้างขวาง ทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างรวดเร็ว มีการพัฒนาต่างๆเกิดขึ้นในหลายสถาบัน หลายองค์กรในหลายประเทศ รวมถึงในประเทศไทยด้วย

สำหรับในขั้นตอนของการพัฒนามิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะต้องมีการทดสอบในด้านต่างๆด้วย เพื่อยืนยันสมรรถภาพของอุปกรณ์ที่ได้ การทดสอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการทดสอบความแม่นยำในการวัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งทำได้หลายวิธี แต่ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดก็ตาม สิ่งที่สำคัญไม่ได้ก็คือแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งแหล่งจ่ายที่กล่าวถึงนี้ต้องมีความแม่นยำและให้สัญญาณที่มีคุณภาพที่ดีตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้ามีความแม่นยำเปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่ากระแสไหลดเปลี่ยนแปลง การทดสอบความแม่นยำให้กับมิเตอร์จึงต้องทำที่ค่ากระแสไหลดหลายๆค่าตั้งแต่ค่าน้อยไปจนถึงค่ามาก ดังนั้นแหล่งจ่ายพลังงานจึงต้องสามารถปรับค่าพลังงานที่จ่ายได้ และต้องสามารถจ่ายกำลังได้สูงเพียงพอต่อการทดสอบด้วย ในปัจจุบัน เครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านั้นถูกผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีราคาสูงมาก วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบและพัฒนาแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสสลับชนิดโปรแกรมได้สำหรับการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว ซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงพอสำหรับการทดสอบ และลักษณะสมบัติของสัญญาณเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ทั้งนี้เพื่อเป็นต้นแบบและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาโครงสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับชนิดโปรแกรมได้เพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว
2. สร้างตัวต้นแบบของอุปกรณ์ดังกล่าว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับชนิดโปรแกรมได้สำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว ซึ่งมีลักษณะดังนี้

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์
 - 1.1 ปรับขนาดสัญญาณได้ในช่วง 100-260 V_{rms} ความละเอียดในการปรับ 0.1 V_{rms} ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด
 - 1.2 ปรับความถี่ได้ในช่วง 45-55 Hz ความละเอียดในการปรับ 0.1 Hz ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.1\%$ ของค่าที่แสดง
 - 1.3 Voltage Regulation $\leq 0.1\%$
 - 1.4 Total Harmonic Distortion ของสัญญาณ $< 2\%$
 - 1.5 ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออกจนถึงค่า 1% ของค่าที่สถานะอยู่ตัว (1% Setting time) เป็น 0.2 วินาที
 - 1.6 ปรับเฟสได้ในช่วง 0-360 องศา ความละเอียดในการปรับ 1 องศา ความผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา
2. แหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสรูปไซน์
 - 2.1. สามารถเลือกขนาดกระแสออกได้ 2 ช่วงคือ
 - ปรับขนาดได้ในช่วง 5-40 A_{rms} ความละเอียดในการปรับ 0.1 A_{rms} ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด
 - ปรับขนาดได้ในช่วง 0-5 A_{rms} ความละเอียดในการปรับ 0.01 A_{rms} ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด
 - 2.2. ปรับความถี่ได้ในช่วง 45-55 Hz ความละเอียดในการปรับ 0.1 Hz ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.1\%$ ของค่าที่แสดง
 - 2.3. Total Harmonic Distortion ของสัญญาณ $< 2\%$
 - 2.4. ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแสออกจนถึงค่า 1% ของค่าที่สถานะอยู่ตัว (1% Setting time) เป็น 0.2 วินาที
 - 2.5. ปรับเฟสได้ในช่วง 0-360 องศา ความละเอียดในการปรับ 1 องศา ความผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา
3. ส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า
 - 3.1 Light Pulse Detector ทำหน้าที่อ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบวัดได้
 - 3.2 แสดงผลเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบวัดได้กับค่าที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าคำนวณได้

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาระบบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า
2. ศึกษาโครงสร้างและเทคนิคในการสร้างเครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้าชนิดต่างๆ
3. กำหนดรูปแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์
4. ออกแบบส่วนจ่ายแรงดันและกระแส
5. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ
6. ทดสอบการทำงานและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ
7. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศึกษาโครงสร้างและแนวทางในการพัฒนาเครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า
2. สามารถพัฒนาขีดความสามารถจนนำไปใช้จ่ายพลังงานเพื่อการทดสอบความแม่นยำให้กับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าได้
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีขีดความสามารถสูงยิ่งขึ้นต่อไป
4. ลดการนำเข้าอุปกรณ์ซึ่งราคาสูงจากต่างประเทศ

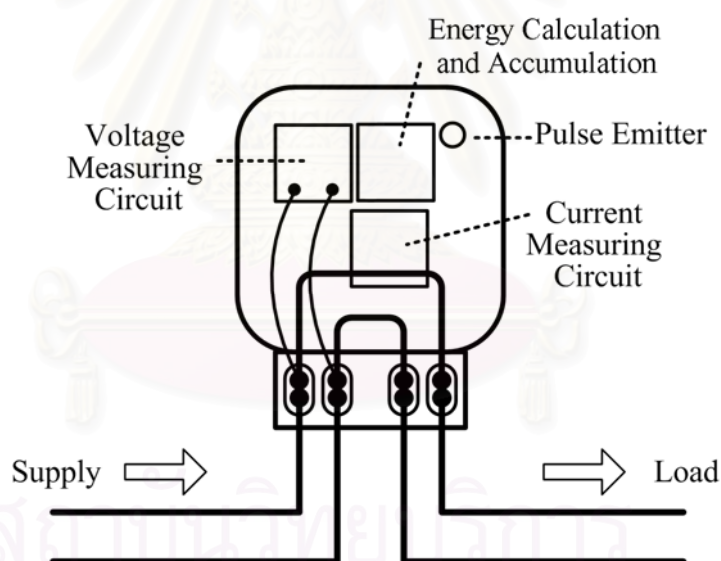
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและปรัทัศน์วรรณกรรม

2.1 มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมัน มีหลายขนาด ขึ้นกับขนาดกระแสไหลที่ใช้ สำหรับประเทศไทย มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวจะทำงานที่แรงดันพิกัดขนาด 220 V_{rms} ส่วนกระแสพิกัดจะมี 3 ขนาดด้วยกันคือ 5/15 , 15/45 และ 30/100 โดยที่ตัวเลขแรกเป็นค่ากระแสพิกัดมีหน่วยเป็นแอมแปร์ และตัวเลขหลังเป็นค่ากระแสสูงสุดที่มิเตอร์ยังสามารถทำงานได้ สำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดสามเฟสจะใช้กับระบบที่กินกำลังไฟฟ้ามก เช่น โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น มิเตอร์ชนิดนี้มีหลายขนาดขึ้นกับระบบการใช้ไฟของผู้ใช้ นอกจากนี้ยังมีการแบ่งมิเตอร์ตามชั้นของความแม่นยำ (accuracy class) เช่น ความแม่นยำชั้น 0.2 , ความแม่นยำชั้น 0.5 เป็นต้น โดยตัวเลขที่บอกมาข้างต้นหมายถึงความแม่นยำในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว

มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.1

คือ

- ส่วนวัดค่าแรงดัน (Voltage measuring circuit) ทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ระหว่างสายเข้าสู่มิเตอร์สองสาย
- ส่วนวัดค่ากระแส (Current measuring circuit) ทำหน้าที่วัดกระแสที่ไหลผ่านสายร้อน (Hot line) ในมิเตอร์

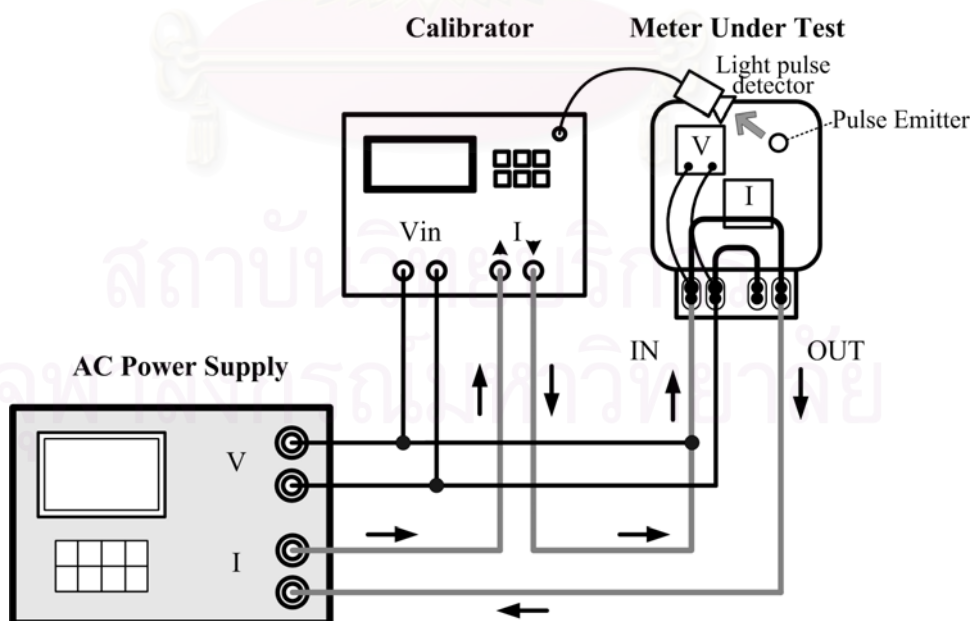
- ส่วนคำนวณและสะสมค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy Calculation and Accumulation) ทำหน้าที่คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า โดยนำค่าในการคำนวณมาจากค่าที่ส่วนวัดค่าแรงดันและส่วนวัดค่ากระแสวัดค่าออกมาได้
- ส่วนสร้างสัญญาณพัลส์แสง (Pulse emitter) ทำหน้าที่จ่ายสัญญาณพัลส์แสงที่เป็นอัตราส่วนกับค่าพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการสอบเทียบ

ปัจจุบันมีการพัฒนามิเตอร์แบบดิจิทัลออกมาเป็นจำนวนมาก มิเตอร์ชนิดนี้มีความสามารถมากมายเพิ่มมาจากแบบจานหมุนทั่วไปเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ นั่นคือ มิเตอร์แบบดิจิทัลมีความแม่นยำสูงกว่ามิเตอร์แบบจานหมุน และสามารถวัดค่าต่างๆได้หลายค่าพร้อมกัน เช่น ขนาดแรงดัน , ขนาดกระแส , ค่ากำลังจินตภาพ , ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ไป , ค่าฮาร์มอนิกต่างๆของสัญญาณ ฯลฯ

2.2 การทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

การทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อยืนยันความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานหรือไม่ โดยสำหรับมิเตอร์แต่ละระดับชั้นของความแม่นยำก็จะมีขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้แตกต่างกันออกไป และมาตรฐานจะกำหนดจุดทดสอบไว้หลายจุด โดยแต่ละจุดจะทดสอบที่ค่ากระแสต่างๆกัน เพื่อให้แน่ใจว่ามิเตอร์ที่ถูกทดสอบนั้นมีความแม่นยำทุกค่ากระแสในการวัด

2.2.1 โครงสร้างของระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว

การทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทดสอบที่เป็นระบบซึ่งมีลักษณะดังรูป 2.2[1] ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- มิเตอร์ที่ถูกทดสอบความแม่นยำ (Meter Under Test)
- เครื่องสอบเทียบความแม่นยำให้กับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (Calibrator) ทำหน้าที่เป็นมิเตอร์อ้างอิงที่มีความแม่นยำ และวัดสัญญาณพัลส์แสงที่ส่งมาจากมิเตอร์ที่ถูกทดสอบความแม่นยำ
- เครื่องจ่ายพลังงาน (AC power supply) ทำหน้าที่จ่ายแรงดันและกระแสเพื่อสร้างจุดทดสอบต่างๆให้กับระบบทดสอบ

ในการทดสอบความแม่นยำ เครื่องสอบเทียบความแม่นยำจะนับจำนวนพัลส์แสงแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบวัดได้ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องสอบเทียบความแม่นยำวัดได้ แล้วคำนวณออกมาเป็นค่าความแม่นยำในหน่วยเปอร์เซ็นต์แสดงผลให้ผู้วัดทราบ โดยก่อนการทดสอบจะต้องมีการตั้งค่าอัตราการส่งพัลส์แสงของมิเตอร์ที่ถูกทดสอบ ซึ่งส่วนมากจะมีหน่วยเป็น Pulse/kWhr และยังคงตั้งค่าจำนวนพัลส์ที่จะให้เครื่องสอบเทียบนับก่อนที่จะคำนวณเป็นความแม่นยำแสดงให้ผู้วัดทราบด้วย ส่วนเครื่องจ่ายพลังงานจะจ่ายพลังงานโดยผ่านทางช่องสัญญาณแรงดันและกระแส และต้องสามารถสร้างจุดทดสอบได้ตามต้องการ ซึ่งหมายถึง ต้องสามารถปรับขนาดแรงดัน , กระแส , ความถี่ และความต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่สร้างได้ในช่วงค่าที่ต้องการ นอกจากนี้สัญญาณที่จ่ายออกมาจากเครื่องจ่ายพลังงานจะต้องมีสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ด้วย

2.2.2 การทดสอบความแม่นยำตามมาตรฐาน IEC687

IEC687 เป็นมาตรฐานสำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าเป็นเปอร์เซ็นต์ที่จุดทดสอบต่างๆ โดยนิยามความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (Percentage error) ไว้ดังนี้

$$\text{Percentage error} = \frac{\text{Energy registered by the meter} - \text{True Energy}}{\text{True Energy}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ Energy registerer by the meter คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบอ่านค่าได้

True energy คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจริงให้กับมิเตอร์

ความจริงแล้วจะไม่สามารถทราบค่าพลังงานที่จ่ายไปจริงๆอย่างถูกต้องแน่นอนให้กับมิเตอร์ที่ถูกวัดได้ แต่จะใช้การเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมิเตอร์อ้างอิงซึ่งมีความแม่นยำสูงแทน โดยที่มิเตอร์อ้างอิงนี้ต้องมีความแม่นยำที่สามารถระบุได้ และได้รับการยอมรับทั้งจากผู้ผลิตและผู้ที่จะทดสอบ

สำหรับช่วงค่าที่จะต้องวัดความแม่นยำจะถูกระบุอยู่ในตารางขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อน ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1[2] ตารางนี้ใช้สำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชั้น 0.2 และ 0.5 โดย I_n แทนกระแสพิคกิ้งของมิเตอร์ และ I_{max} แทนกระแสสูงสุดที่มิเตอร์ตัวนั้นรับได้ จากตารางจะเห็นว่ากระแสที่ต้องจ่ายในการทดสอบจะอยู่ในช่วง 1% ของกระแสพิคกิ้งไปจนถึงค่ากระแสสูงสุดที่มิเตอร์ทนได้ที่ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ต่างๆกัน โดยผู้ทดสอบจะต้องเลือกจุดทดสอบในช่วงค่านี้ และทดสอบว่ามิเตอร์ที่ถูกวัดมีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่ระบุไว้หรือไม่ ถ้าอยู่ก็แสดงว่ามิเตอร์ที่ถูกวัดมีความแม่นยำเพียงพอที่จะจัดอยู่ในขั้นนั้นๆ

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (สำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวและมิเตอร์หลายเฟสที่ใช้โหลดสมดุล)

Value of current	Power factor of the relevant element	Percentage error limits for meters of class	
		0.2	0.5
$0.01 I_n \leq I \leq 0.05 I_n$	1	± 0.4	± 1.0
$0.05 I_n \leq I \leq I_{max}$	1	± 0.2	± 0.5
$0.02 I_n \leq I \leq 0.1 I_n$	0.5 lagging	± 0.5	± 1.0
	0.8 leading	± 0.5	± 1.0
$0.1 I_n \leq I \leq I_{max}$	0.5 lagging	± 0.3	± 0.6
	0.8 leading	± 0.3	± 0.6
When specially requested by the user :	0.25 lagging	± 0.5	± 1.0
$0.01 I_n \leq I \leq 0.05 I_n$	0.5 leading	± 0.5	± 1.0

นอกจากนี้มาตรฐานยังระบุด้วยว่าการจะวัดค่าเพื่อให้ได้ตามที่ระบุในตารางดังกล่าวข้างต้นนั้น ระบบทดสอบความแม่นยำที่ใช้ต้องมีสมบัติสอดคล้องกับสภาวะอ้างอิงตามที่มาตรฐานกำหนด รายละเอียดเป็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่จ่ายออกจากเครื่องจ่ายพลังงานนั้นก็ต้องมีคุณภาพดีเพียงพอที่จะทดสอบมิเตอร์ด้วย ทั้งในด้านขนาดแรงดันที่จ่าย ความถี่ของสัญญาณ และความเพี้ยนของสัญญาณด้วย

ตารางที่ 2.2 สภาวะอ้างอิงในการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

Influence quantity	Reference value	Permissible tolerance
Ambient temperature	Reference temperature 23°C ¹⁾	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
Voltage	Reference voltage ²⁾	$\pm 1.0\%$
Frequency	Reference frequency ³⁾	$\pm 0.3\%$
Wave-form	Sinusoidal voltages and currents	Distortion factor less than 2%
Magnetic Induction of external origin at the reference frequency	Magnetic induction equal to zero ⁴⁾	0.02 mT

1) If the test are made at a temperature other than the reference temperature, including permissible tolerances, the results shall be corrected by applying the appropriate temperature coefficient of the meter.

2) The reference conditions for voltage apply to both the measuring circuit and the auxiliary supply(ies).

3) The reference conditions for frequency apply to both the measuring circuit and the auxiliary supply(ies) (if not d.c.).

4) This magnetic induction is that at the place of test without the presence of the meter and its connections.

2.3 โครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงาน

เครื่องจ่ายพลังงานที่จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านั้นต้องสามารถจ่ายได้ทั้งสัญญาณแรงดันและกระแส โดยต้องสามารถปรับขนาด ความถี่ และความต่างเฟสของสัญญาณที่จ่ายได้ โดยช่วงค่าที่ปรับได้ต้องกว้างเพียงพอ นอกจากนี้สัญญาณออกที่สร้างจะต้องมีคุณภาพดีเพียงพอซึ่งหมายถึงมีขนาดและความถี่คงที่ และต้องเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐานกำหนด

การออกแบบโครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงานในการทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านั้นมีได้หลายแบบโดยมีจุดมุ่งหมายเดียวกันดังกล่าวข้างต้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะยกตัวอย่างโครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานหลักสองแบบมานำเสนอ

2.3.1 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการสร้างสัญญาณต้นแบบ

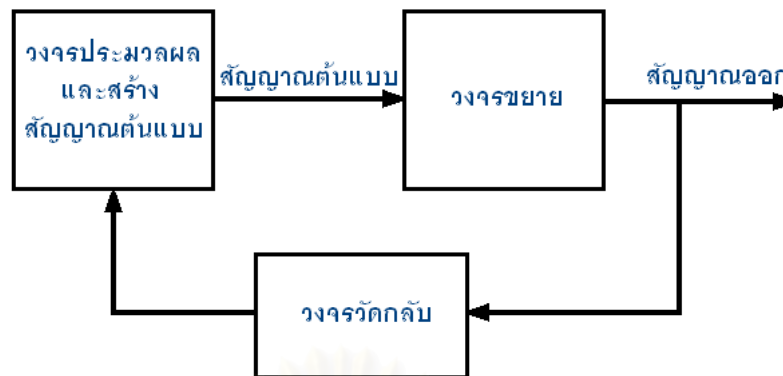
สำหรับโครงสร้างแบบนี้ใช้หลักการสร้างสัญญาณต้นแบบ โดยปกติจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ขนาดเล็ก จากนั้นจึงทำการผ่านสัญญาณเข้าสู่วงจรรขยายเพื่อให้ได้สัญญาณตามขนาดที่ต้องการ การปรับขนาด ความถี่ และความต่างเฟสของสัญญาณออกทำที่ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบทั้งสิ้น

เครื่องจ่ายพลังงานที่อาศัยการสร้างสัญญาณต้นแบบนี้ อาจมีการป้อนกลับหรือไม่ก็ได้ เครื่องจ่ายพลังงานที่ไม่มีการป้อนกลับมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 ข้อดีของโครงสร้างแบบนี้คือไม่ต้องมีการป้อนกลับของสัญญาณออกมาประมวลผลอีกครั้งทำให้สามารถตัดตัววัดกลับออกไปจากวงจรได้ และยังลดการประมวลผลที่ต้องทำในการวัดกลับและปรับค่าของสัญญาณออกได้อีกด้วย ส่วนข้อเสียคือ สัญญาณต้นแบบต้องมีคุณภาพสูง เนื่องจากต้องพิจารณาถึงความเพี้ยนของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรรขยายเข้าไปด้วย และตัววงจรรขยายก็ต้องมีคุณภาพดี คือนอกจากจะไม่ทำให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณแล้ว ยังต้องมีการควบคุมค่าสัญญาณออกที่ดีอีกด้วย



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบไม่มีการป้อนกลับ

ส่วนเครื่องจ่ายพลังงานที่มีการสร้างสัญญาณต้นแบบแบบที่มีการป้อนกลับจะมีส่วนที่เพิ่มขึ้นมานั้นคือส่วนของวงจรวัดค่ากลับไปที่ตัวประมวลผลเพื่อควบคุมสัญญาณออกให้เป็นไปตามที่ต้องการ โครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือสามารถควบคุมสัญญาณออกได้ดีกว่า เนื่องจากมีการวัดสัญญาณออกกลับไปประมวลผลจริงๆ แต่มีข้อเสียคือเพิ่มความยุ่งยากในการหาระเบียบวิธีในการควบคุมสัญญาณ เพิ่มความซับซ้อนให้กับโปรแกรม และยังต้องเพิ่มส่วนของวงจรวัดกลับเข้ามาด้วย โครงสร้างของเครื่องจ่ายพลังงานที่มีการสร้างสัญญาณต้นแบบแบบที่มีการป้อนกลับเป็นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการป้อนกลับ

สัญญาณต้นแบบที่สร้างนี้ต้องเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดของสัญญาณได้ และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกต่ำ การสร้างสัญญาณต้นแบบรูปไซน์ทำได้หลายวิธีดังตัวอย่างต่อไปนี้

(1) ขั้นตอนวิธีการค้นตาราง

ขั้นตอนวิธีการค้นตาราง (Look-up table algorithm ; LUT) เป็นวิธีการสร้างสัญญาณโดยใช้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital-to-analog converter ; DAC) มาช่วย วิธีนี้จะเก็บค่าข้อมูลที่จะส่งให้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกลงในตารางข้อมูล และส่งค่าจากตารางไปแปลงค่าเป็นสัญญาณออกด้วยอัตราที่ต้องการ ข้อมูลที่เก็บในตารางสำหรับในกรณีนี้จะเป็นข้อมูลสัญญาณไซน์ที่มุมเฟสต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับอัตราการแปลงข้อมูลที่จะใช้และความถี่ที่ต้องการสร้างด้วย ลักษณะของข้อมูลในตารางจะเป็นดังนี้ [3]

$$S(i) = \sin\left(\frac{2\pi \cdot i}{N}\right), \quad i=0,1,\dots, N-1 \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่ i คือ ดรรชนีของข้อมูลในตาราง

$S(i)$ คือ ข้อมูลในตารางตัวที่ i

N คือ ขนาดของตารางที่ใช้

โดยทั่วไปแล้วจะเก็บสัญญาณไซน์เพียงหนึ่งในสี่ของคาบก็เพียงพอ เนื่องจากในส่วนที่เหลือข้อมูลจะเป็นแบบสมมาตรกับข้อมูลดังกล่าว สัญญาณออกจากตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบขั้น ซึ่งต้องผ่านวงจรกรองก่อนจึงจะได้สัญญาณรูปไซน์ที่สมบูรณ์ สำหรับวงจรกรองที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำเพื่อตัดส่วนประกอบความถี่สูงที่เป็นผลมาจากอัตราการแปลงข้อมูลซึ่งไม่ต้องการออกไป

(2) ขั้นตอนวิธีการค้นตารางด้วยการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น

ขั้นตอนวิธีการค้นตารางด้วยการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear interpolation look-up table ; LILUT) ใช้หลักการเดียวกับขั้นตอนวิธีการค้นตาราง นั่นคือเก็บค่าข้อมูลลงในตารางเช่นกัน แต่สิ่งที่เพิ่มขึ้นก็คือในกรณีนี้ที่ต้องการค่าระหว่างจุดข้อมูลจะทำการประมาณค่าในช่วงแบบเส้นตรง (Linear interpolation) เพื่อทำการหาจุดที่ต้องการ ทำให้ค่าที่ได้เป็นไปตามสมการที่ 2.3 [3]

$$S(i+d) = \sin\left(\frac{2\pi \cdot i}{N}\right) + d\left(\sin\left(\frac{2\pi \cdot (i+1)}{N}\right) - \sin\left(\frac{2\pi \cdot i}{N}\right)\right) \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่ i คือ ดรรชนีบอกตำแหน่งในตาราง

N คือ จำนวนข้อมูลในตาราง

d คือ อัตราส่วนของเวลาที่ต้องการต่อเวลาช่วงห่างระหว่างข้อมูลในตารางที่ติดกัน

ดังนั้นวิธีนี้จะช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลน้อยลงได้ แต่ก็เสียเวลาไปส่วนหนึ่งเพื่อคำนวณข้อมูลในตารางใหม่ด้วย

(3) ขั้นตอนวิธีแบบเรียกซ้ำ

ขั้นตอนวิธีแบบเรียกซ้ำ (Recursive algorithm) เป็นวิธีสร้างสัญญาณด้วยการคำนวณเพื่อหาข้อมูลตัวถัดไปที่จะให้เป็นสัญญาณด้านนอก โดยทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ และจะได้ค่าสัญญาณออกที่เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ลักษณะสมการตั้งต้นของระบบเป็นดังนี้ [3]

$$\begin{aligned} y(nT + T) &= A \cdot y(nT) + B \cdot x(nT) \\ x(nT + T) &= C \cdot y(nT) + D \cdot x(nT) \end{aligned} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

โดยที่ T คือ คาบของการส่งไปเป็นสัญญาณออก

n คือ ครั้งที่คำนวณ โดยมีค่าเป็น $0, 1, 2, \dots$

y คือ ตัวแปรของสมการที่นำไปเป็นสัญญาณออก โดย $y(nT+T)$ หมายถึงค่าสัญญาณออกที่คำนวณได้สำหรับครั้งถัดไป และ $y(nT)$ หมายถึงค่าสัญญาณออกในคาบปัจจุบัน

x คือ ตัวแปรของสมการ

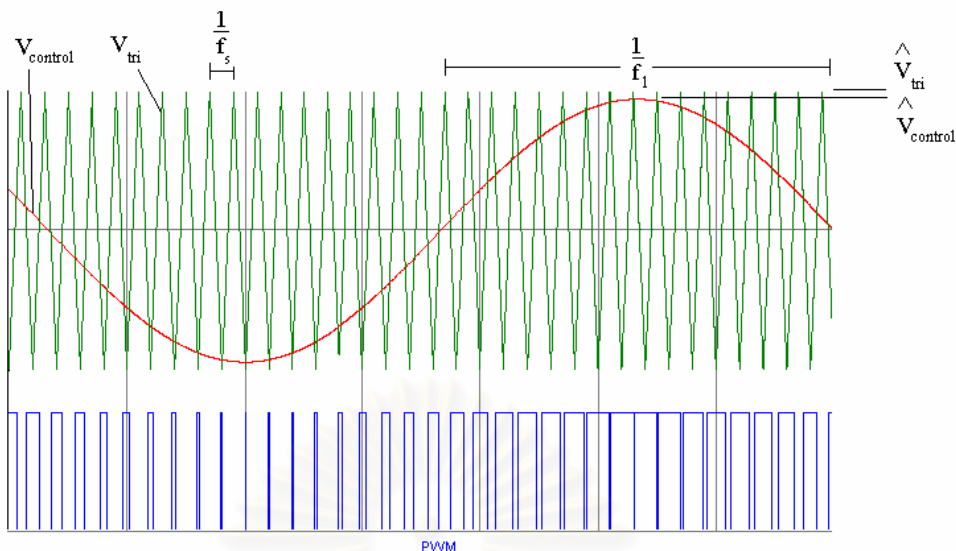
A, B, C และ D คือ สัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณ ซึ่งจำเป็นต้องหาสัมประสิทธิ์และค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อให้วงจรคำนวณได้สัญญาณออกเป็นไซน์ตามต้องการ

วิธีดังกล่าวนี้สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนต่ำ แต่การคำนวณมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก

2.3.2 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแบบที่มีการสวิตชิง

โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานที่อาศัยหลักการสวิตชิงนี้ โดยทั่วไปเป็นวงจรแปรผันพลังงานจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ หรือวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) วงจรอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่สวิตชิงสัญญาณที่ความถี่สูง ซึ่งอุปกรณ์สวิตชิงโดยทั่วไปของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต ทรานซิสเตอร์แบบไอจีบีที (IGBT Transistors) ไทรซิสเตอร์ เป็นต้น รูปแบบการสวิตชิงของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แปลงผันพลังงานจากสัญญาณกระแสตรงเป็นสัญญาณกระแสสลับรูปไซน์ที่นิยมโดยทั่วไปใช้หลักวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation ; PWM) ซึ่งเป็นวิธีการสำคัญในการปรับปรุงสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ การมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้สามารถใช้แรงดันไฟตรงด้านเข้าที่มีค่าคงตัว แต่สามารถปรับองค์ประกอบหลักมูลของปริมาณด้านออกได้ ยิ่งไปกว่านั้นคือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ทำให้สัญญาณออกที่ได้มีขนาดฮาร์มอนิกต่ำ

การสร้างสัญญาณแรงดันด้านออกเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ได้ โดยปกติจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ตามความถี่ที่ต้องการมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบ PWM โดยใช้สัญญาณรูปไซน์เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ความถี่ของการสวิตชิง (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยมีการกำหนดค่าย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิงแบบ PWM ดังนี้

$v_{control}$ คือ สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

v_{tri} คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง

f_1 คือ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

f_s คือ ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์

m_a คือ อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

m_f คือ อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

โดยค่า m_a และ m_f มีการนิยามดังต่อไปนี้ [4]

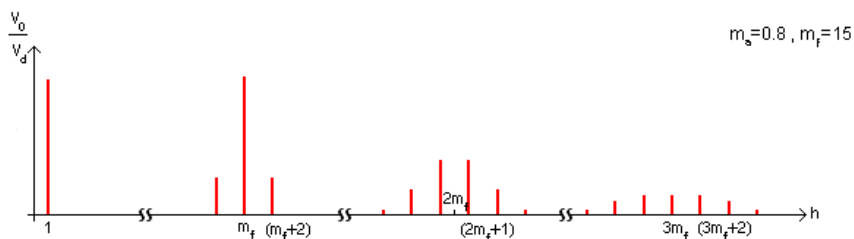
$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \tag{สมการที่ 2.5}$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \tag{สมการที่ 2.6}$$

โดยที่ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

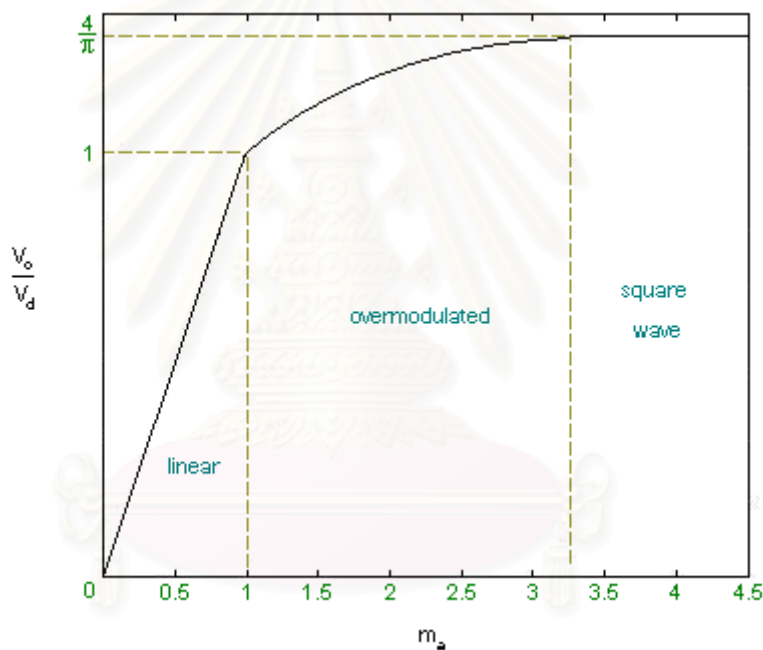
\hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

เมื่อพิจารณาถึงค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณออก การมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยการใช้สัญญาณไซน์ ตัดกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมนี้ ก่อให้เกิดค่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิก (sideband harmonics) รอบๆความถี่ที่ $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของรูปคลื่น PWM

ในกรณีที่อัตราส่วนมอดูเลตด้านแอมพลิจูด m_a มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่าแอมพลิจูดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์เล็กกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม นั่นคือการทำงานอยู่ในพิสัยเชิงเส้น ในกรณีที่สัญญาณควบคุมรูปไซน์มีแอมพลิจูดสูงกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ($m_a > 1$) กรณีนี้เรียกว่ามีการมอดูเลตเกิน (over modulation) ดังรูปที่ 2.7



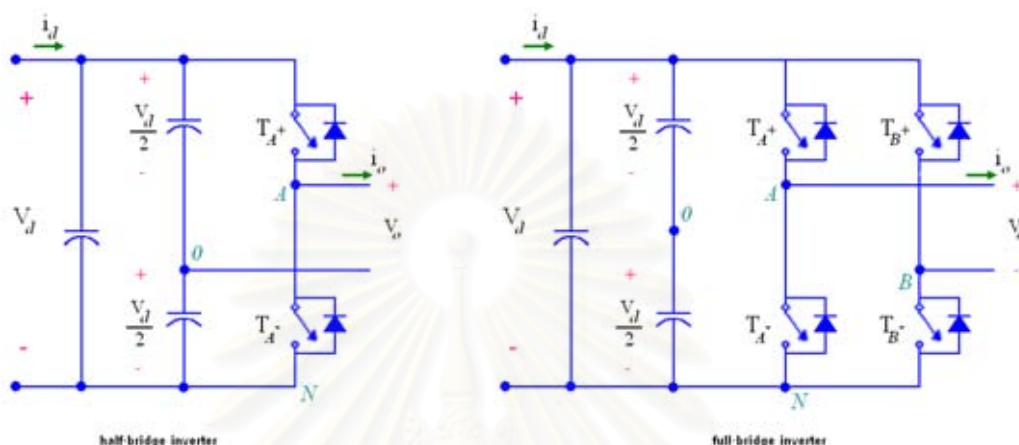
รูปที่ 2.7 อัตราส่วนแอมพลิจูดองค์ประกอบหลักมูลกับแอมพลิจูดรูปคลื่น PWM ที่ย่านการมอดูเลตต่างๆ

การมอดูเลตเกินนี้ทำให้แอมพลิจูดขององค์ประกอบหลักมูลไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของ m_a และส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกต่ำในรูปคลื่น PWM ใกล้เคียงความถี่หลักมูล เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,5,7 เป็นต้น ทำให้ยากแก่การควบคุมค่าสัญญาณที่แม่นยำ

ในการเลือกค่าการใช้งาน เมื่อพิจารณาในช่วง $m_a < 1$ ซึ่งเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ที่มีองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Fundamental-frequency component of the output voltage) แปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a ส่วนอัตราส่วนมอดูเลตเชิงความถี่ m_f ที่เป็นจำนวนคี่จะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่ ทำให้เกิดเฉพาะฮาร์มอนิกเลขคี่เท่านั้นที่ปรากฏทางฝั่งแรงดันด้านออก ส่วนฮาร์มอนิกเลขคู่จะเกิดการหักล้างกัน ดังนั้นเพื่อลดผลของฮาร์มอนิกจึงควรพิจารณาเฉพาะที่ค่า $m_a < 1$ นอกจากนี้ควรกำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคี่ และควรมีค่าสูง

2.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบ่งตามลักษณะการต่อวงจรได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full-bridge) ดังรูปที่ 2.8

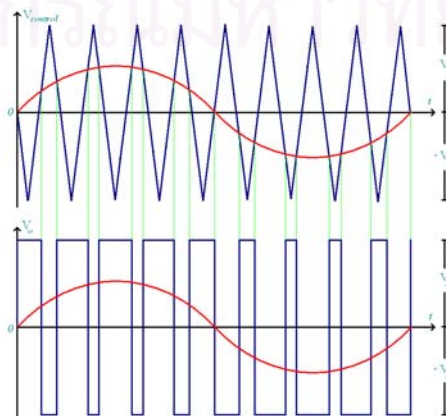


รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์

เงื่อนไขสำคัญของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบคือ อุปกรณ์สวิตช์ตัวบนและตัวล่างในกิ่งเดียวกันต้องไม่ทำงานพร้อมกัน มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกและบัสลบ โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์นิยมใช้การสวิตช์แบบไบโพลาร์ ซึ่งมีระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพียงสองสถานะ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์นิยมใช้การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ ที่มีระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันถึงสามสถานะ

1) การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์

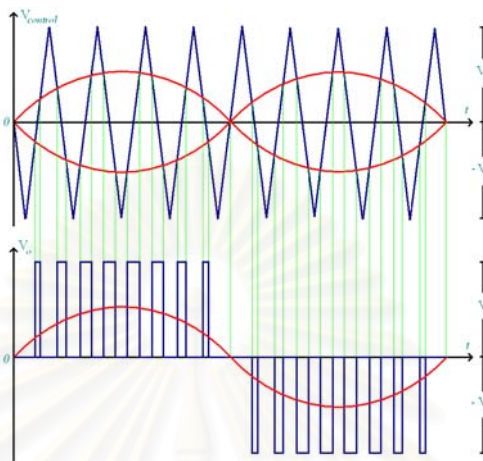
การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์ (bipolar voltage switching) มีการควบคุมให้อุปกรณ์สวิตช์ทำการจ่ายแรงดันออกในสองสถานะ คือ แรงดันออกด้านบวกและแรงดันออกด้านลบเท่านั้น ตามรูปที่ 2.9 โดยการสร้างสัญญาณ PWM ของการสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์เป็นไปตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.2 และมีค่าไซด์แบนด์ฮาร์โมนิกเกิดขึ้นรอบๆ m_f , $2m_f$, $3m_f$, ... ดังที่ได้อธิบายไว้ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.9 การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์

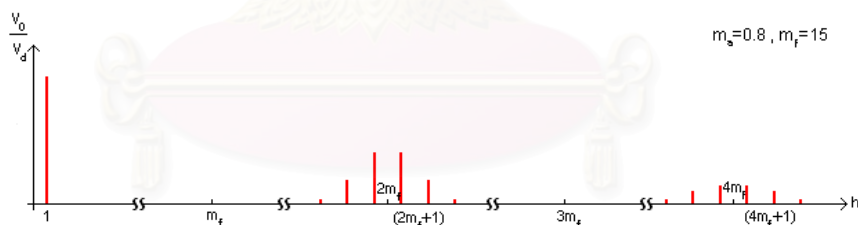
2) การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์ (unipolar voltage switching) มีการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ให้ได้สัญญาณออกในสามสถานะ เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่างศูนย์ไปยังบวก หรือศูนย์ไปยังลบ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์นี้ก่อให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกที่สองเท่าของแบบไบโพลาร์ ดังรูป 2.11 เนื่องจากมีจุดตัดระหว่างสัญญาณรูปไซน์ 2 ครั้งต่อสัญญาณรูปสามเหลี่ยมหนึ่งคาบ ทำให้เกิดสัญญาณ PWM ที่มีความถี่มากกว่าการสวิตช์แบบไบโพลาร์จำนวนสองเท่า ทำให้ออกแบบวงจรกรองได้ง่ายกว่าอินเวอร์เตอร์แบบไบโพลาร์

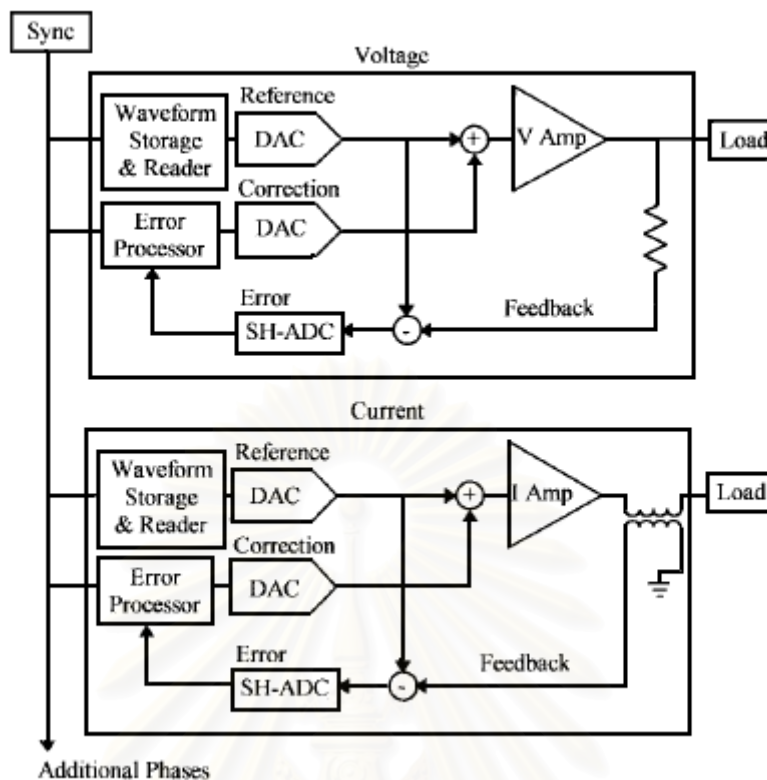


รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของสัญญาณออกที่มีการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

2.5 งานวิจัยที่เคยมีมาก่อน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้ และเป็นแนวทางในการค้นคว้าและวิจัยมีใจความดังต่อไปนี้

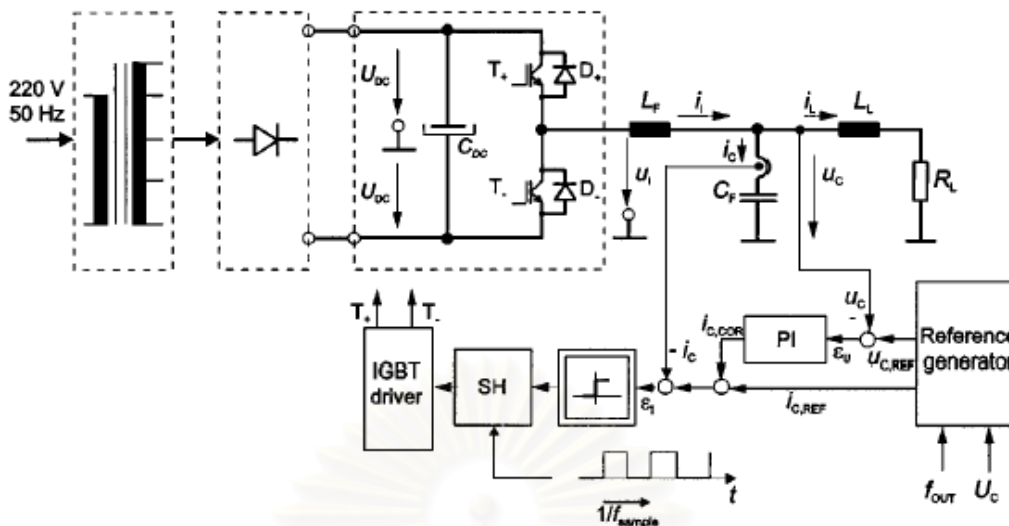
บทความแรก [5] นำเสนอโครงสร้างสำหรับเครื่องจ่ายพลังงานสำหรับทดสอบความแม่นยำให้มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการบ่อนกลับของสัญญาณออกกลับไปประมวลผลเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอมีลักษณะดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างวงจรจ่ายพลังงานแบบมีการป้อนกลับ

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าวงจรแบ่งออกเป็นสองช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณแรงดันและช่องสัญญาณกระแส สำหรับในวิถีไปข้างหน้า (Forward path) ของวงจรมันใช้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกมาช่วยแปลงรูปแบบของสัญญาณ และสร้างสัญญาณต้นแบบ จากนั้นจึงถูกส่งไปขยายผ่านวงจรขยาย ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงกำลังเพื่อให้ได้สัญญาณออกมีขนาดอยู่ในช่วงที่ต้องการ และในวิถีป้อนกลับ (Feedback path) ประกอบไปด้วยตัววัดสัญญาณป้อนกลับและวงจรขยายสัญญาณที่ประกอบด้วยออปแอมป์ ตัววัดสัญญาณป้อนกลับของช่องแรงดันใช้ตัวต้านทาน ส่วนของช่องกระแสใช้หม้อแปลงกระแส (Current transformer) การป้อนกลับทำแบบซิงโครนัส (Synchronous) โดยใช้การบูรณาการความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขสัญญาณออกให้ได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด โดยจะแก้ไขความคลาดเคลื่อนในวงจรทุกๆ สามช่วงของการสุ่ม วงจรนี้สามารถสร้างแรงดันได้ในช่วง $1-700 \text{ V}_{\text{rms}}$ และสร้างกระแสได้ในช่วง $0.001-320 \text{ A}_{\text{rms}}$ ปรับความต่างเฟสของสัญญาณได้ในช่วง $0-360$ องศา โดยมีความคลาดเคลื่อนของกำลังที่จ่ายไม่เกิน $50 \mu\text{W/W}$

บทความถัดไป [6] นำเสนอโครงสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับทดสอบมิเตอร์เช่นกัน แต่โครงสร้างนี้ใช้หลักการของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ (Switched mode power supply) แทนการใช้วงจรขยายร่วมกับหม้อแปลงกำลังเหมือนในบทความก่อนหน้านี้ โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอในบทความนี้เป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างเครื่องจ่ายพลังงานที่ใช้หลักการของแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตซ์

วงจรนี้ประกอบไปด้วยวงจรไฟแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง , ทรานซิสเตอร์แบบไอจีบีที (IGBT Transistors) และวงจรกรองแอลซี (LC filter) ใช้หลักการของวงควบคุมแรงดันแบบป้อนกลับร่วมกับการป้อนไปข้างหน้า (Feedforward-feedback voltage control loop) และวงควบคุมกระแส (Current control loop) เพื่อควบคุมแรงดันด้านออกให้คงที่เมื่อโหลดของวงจรเปลี่ยนไป ส่วนการควบคุมการเปิดปิดของทรานซิสเตอร์แบบไอจีบีทีและการคำนวณล้นวนทำโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรนี้มีข้อเด่นตรงที่สามารถควบคุมแปลงจ่ายแบบสวิตซ์ให้จ่ายสัญญาณที่มีความแม่นยำสูงได้ โดยมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณต่ำ และยังเพิ่มการชดเชยความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกอีกด้วย วงจรที่นำเสนอนี้สามารถสร้างสัญญาณออกได้ในช่วง 30-500 V_{rms} และมีความคลาดเคลื่อนของขนาดไม่เกิน ±0.2% รวมไปถึงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณออกไม่เกิน 0.7%

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

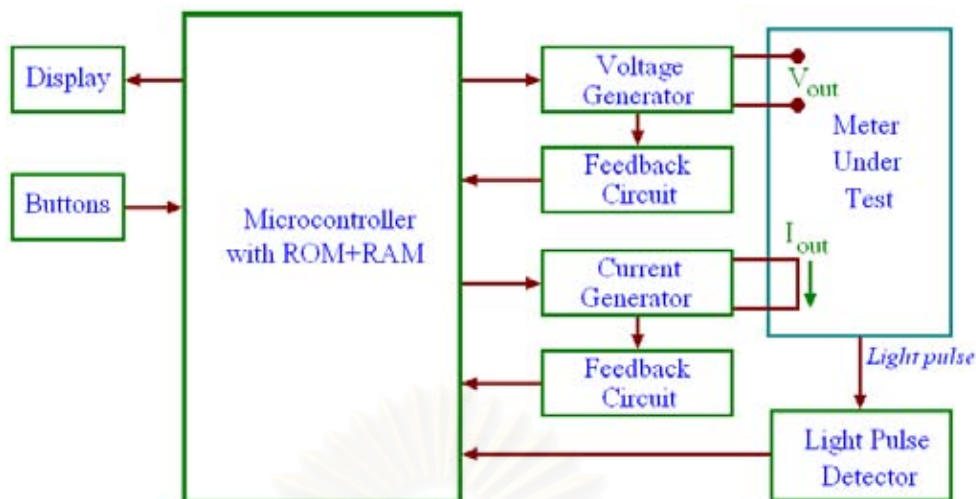
3.1 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

เครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับ มีหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์สำหรับจ่ายให้ระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสัญญาณดังกล่าวต้องสามารถปรับขนาดแรงดันและกระแสที่จะจ่ายได้ สามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้สูงพอ ปรับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายออกมาได้ ปรับความถี่ของสัญญาณทั้งคู่ได้ รวมถึงค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณที่จ่ายออกมาต้องอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ด้วย

แหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ตั้งเป้าไว้ให้สามารถจ่ายแรงดันไฟสลับได้ในช่วง 100-260 V_{rms} สามารถจ่ายกระแสได้ 0-40 A_{rms} โดยมีความผิดพลาดในการตั้งค่าแรงดันและกระแสไม่เกิน $\pm 0.5\%$ สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 45-55 Hz มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% และยังสามารถปรับความต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสได้ตั้งแต่ 0-360 องศา ผิดพลาดไม่เกิน 0.5 องศา โดยสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายออกมาต้องมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion ; THD) ไม่เกิน 2%

3.2 โครงสร้างภายในของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

ส่วนสำคัญอย่างยิ่งของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านี้คือแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสที่มีความแม่นยำสูงตามมาตรฐาน โดยมีการสร้างสัญญาณออกแยกเป็น 2 ช่อง คือ ช่องสัญญาณแรงดันและช่องสัญญาณกระแส ดังแสดงในรูป 3.1 โดยมีการอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบวัดได้กลับมาทางส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับคำนวณหาค่าผิดพลาดของมิเตอร์ที่ถูกทดสอบ เพื่อแสดงผลค่าทางจอแสดงผล สัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายให้มิเตอร์ที่ถูกทดสอบนี้ใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์สร้างสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้กับส่วนสร้างสัญญาณแรงดันและส่วนสร้างสัญญาณกระแส ซึ่งมีโครงสร้างหลักภายในเป็นวงจรวจรสวิตช์ โดยมีการป้อนกลับสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรวจรป้อนกลับของสัญญาณแรงดันและกระแสอย่างละชุดเพื่อนำผลที่ได้เป็นตัวแปรเข้ากลับเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล ค่าของสัญญาณแรงดันและกระแสที่เข้าทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านี้มาจากการที่ผู้ใช้ป้อนค่าผ่านทางปุ่มกดรับค่าร่วมกับจอแสดงผล ซึ่งมีการควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์อีกเช่นกัน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงของเครื่องทดสอบความแม่นยำ

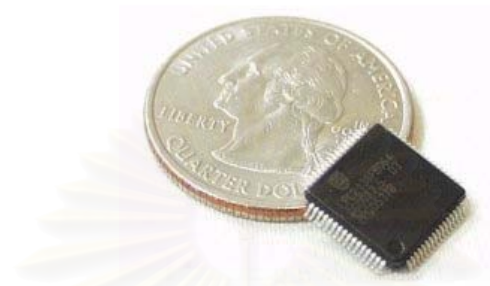
เครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้ามีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่ทำงานร่วมกับปุ่มกดรับค่าในการรับค่าและแสดงผลต่างๆผ่านทางจอแสดงผล รวมไปถึงการควบคุมสัญญาณ PWM และอ่านค่าที่ได้ของมิเตอร์ที่ถูกทดสอบความแม่นยำผ่านทางส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7TDMI-S เบอร์ LPC2138 ของบริษัท Philips [7] ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีลักษณะดังนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16/32 บิต ในตัวถัง LQFP64 มีจำนวนขา 64 ขา
- ใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 3.0 V ถึง 3.6 V ($3.3 \text{ V} \pm 10\%$)
- ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน่วยความจำข้อมูล Static RAM ขนาด 32 kB และหน่วยความจำ Flash Program Memory ขนาด 512 kB
- โปรแกรมได้ทันทีผ่าน In-System Programming (ISP) และ In-Application Programming (IAP) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Boot-loader ที่อยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์
- มี I/O pin ออกประสงค์ที่สามารถใช้กับระดับแรงดัน 5 V ได้สูงสุด 47 ขา
- วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 10 บิตจำนวน 2 ชุด รับอินพุตได้ชุดละ 8 ช่องสัญญาณ โดยมีเวลาในการแปลงค่าต่ำถึง 2.44 us
- วงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกความละเอียด 10 บิตจำนวน 1 ตัว
- วงจร Timer 32-bit จำนวน 2 ช่อง (4 Input Capture / 4 Output Compare)
- PWM (Pulse width modulation) จำนวน 6 ช่องสัญญาณ

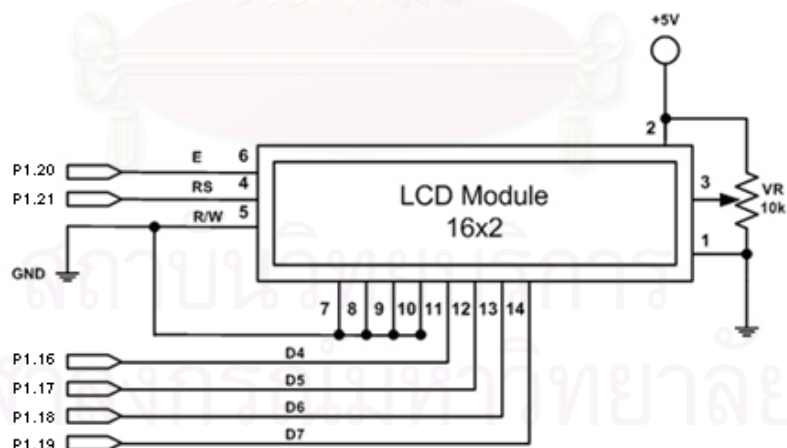
- มีวงจร Phase-Locked Loop (PLL) ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคูณค่าให้สัญญาณนาฬิกาภายในทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดถึง 60 MHz
- วงจรสื่อสารอนุกรม UART แบบ Full-Duplex จำนวน 2 ช่อง
- วงจรสื่อสารอนุกรม I2C
- มีโหมดประหยัดพลังงาน 2 โหมด ได้แก่ Idle และ Power-down



รูปที่ 3.2 ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC2138 เปรียบเทียบขนาดกับเหรียญ 25 cent

3.3.2 จอแสดงผล

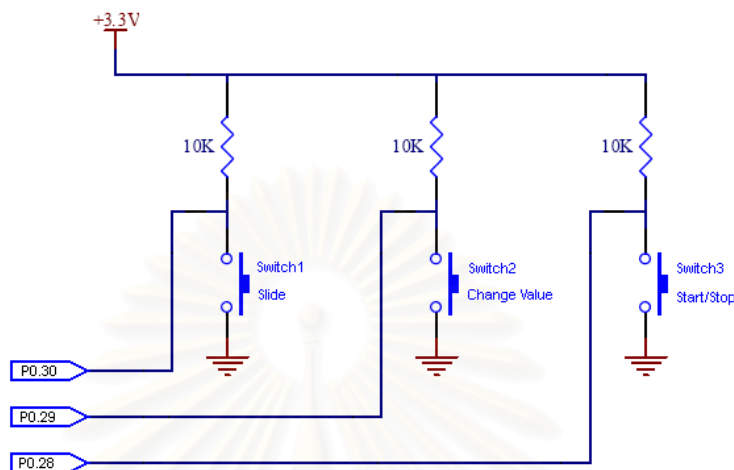
จอแสดงผลที่ใช้เป็นแบบผลึกเหลว (Liquid crystal display ; LCD) ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัดโดยภายในตัวอุปกรณ์มีวงจรขับ (Driver circuit) สำหรับรับคำสั่งซึ่งส่งมาเป็นแบบ 4 บิต (DB4-DB7) ร่วมกับขาสัญญาณพิเศษอีก 2 ขา (RS,E) การทำงานของจอแสดงผลล้วนถูกสั่งจากจากไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้น โดยมีการต่อวงจรรวมดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 จอแสดงผลและการต่อใช้งาน

3.3.3 ปุ่มกดรับค่า

ปุ่มกดรับค่าเป็นอุปกรณ์สำหรับผู้ใช้ในการติดต่อสื่อสารกับเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ปุ่มกดรับค่าจำนวน 3 ปุ่ม ทำการต่อเข้ากับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่าการทำงาน ดังรูปที่ 3.4



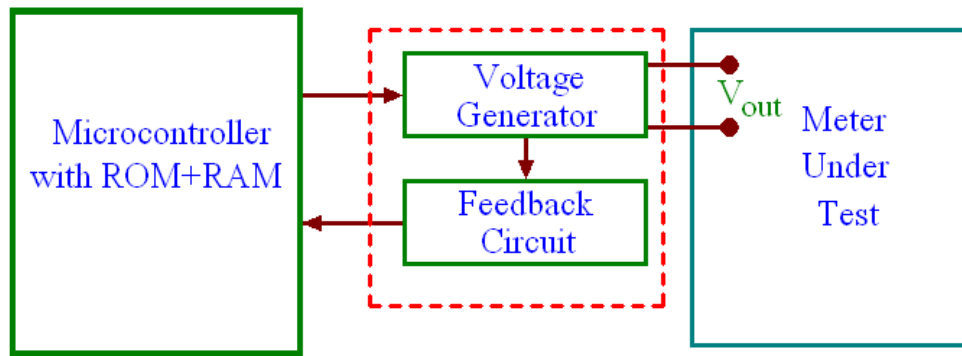
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของปุ่มกดรับค่า

ปุ่มกดรับค่าทั้ง 3 ปุ่มมีการทำงานดังนี้

- 1) ปุ่มเลื่อน ทำหน้าที่เลื่อนไฟกระพริบของส่วนแสดงผลจอ LCD ไปทางขวามือ
- 2) ปุ่มเปลี่ยนค่า ทำหน้าที่เปลี่ยนค่าต่างๆที่แสดงผลบนหน้าจอแสดงผล
- 3) ปุ่มเริ่ม/หยุดการทำงาน ทำหน้าที่รับคำสั่งในการเริ่มหรือหยุดการทำงานของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

3.3.4 ส่วนสร้างสัญญาณแรงดัน

ส่วนสร้างสัญญาณแรงดันทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันออกขนาด $100-260 V_{rms}$ โดยมีความผิดพลาดในการตั้งค่าแรงดันไม่เกิน $\pm 0.5\%$ สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 45-55 Hz มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (THD) ไม่เกิน 2% โดยรับสัญญาณ PWM เพื่อนำไปสร้างสัญญาณแรงดันจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการป้อนกลับค่าตัวแปรจากวงจรป้อนกลับเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 3.5

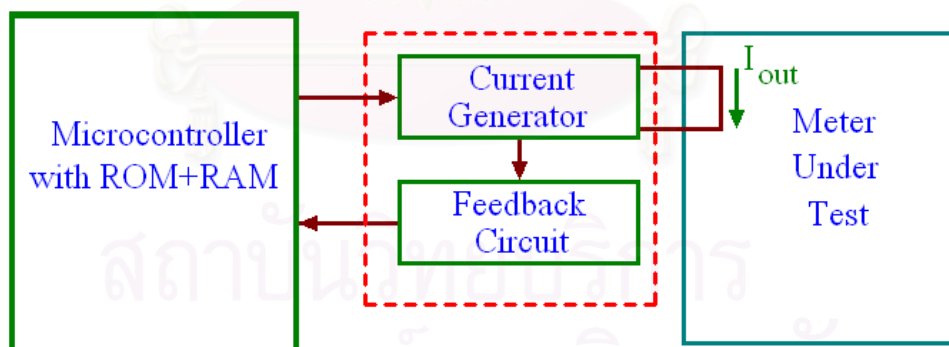


รูปที่ 3.5 โครงสร้างของส่วนสร้างสัญญาณแรงดัน

ภายในส่วนสร้างสัญญาณแรงดันประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์ อุปกรณ์ถ่ายโอนพลังงาน วงจรเรียงกระแส วงจรกรอง และวงจรป้อนกลับ โดยมีลักษณะค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.2 ต่อไป

3.3.5 ส่วนสร้างสัญญาณกระแส

ส่วนสร้างสัญญาณกระแสทำหน้าที่สร้างสัญญาณกระแสขาออกขนาด 0-40 A_{rms} โดยมีความผิดพลาดในการตั้งค่ากระแสไม่เกิน $\pm 0.5\%$ สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 45-55 Hz มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.1% และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (THD) ไม่เกิน 2% ส่วนสร้างสัญญาณกระแสรับสัญญาณ PWM เพื่อนำไปสร้างสัญญาณกระแสจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการป้อนกลับค่าตัวแปรจากวงจรป้อนกลับเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเช่นเดียวกับส่วนสร้างสัญญาณแรงดัน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของส่วนสร้างสัญญาณกระแส

วงจรภายในของส่วนสร้างสัญญาณกระแสนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์ วงจรกรอง และวงจรป้อนกลับ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ต่อไป

3.3.6 แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง

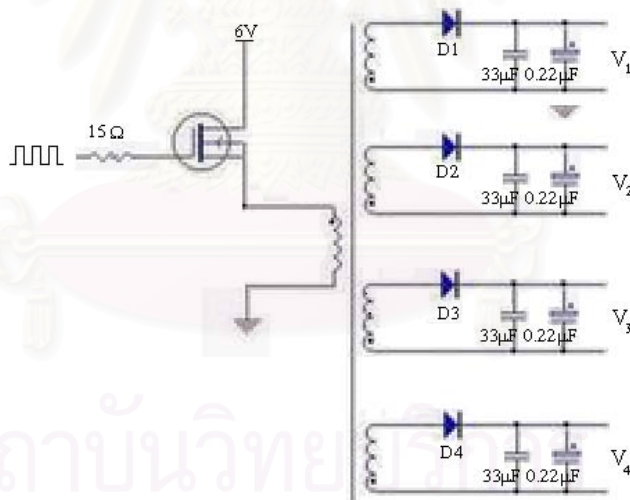
แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแยกเป็นส่วนต่างๆได้ 4 ส่วนดังนี้

(1) แหล่งจ่ายแรงดันเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแส

แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสต้องเป็นแหล่งจ่ายที่มีคุณภาพดีเพียงพอ สัญญาณแรงดันต้องนิ่งและสามารถจ่ายกระแสได้สูง โดยเฉพาะวงจรสร้างกระแสไฟฟ้า แหล่งจ่ายแรงดันต้องสามารถจ่ายกระแสได้สูงกว่ากระแสที่ทำการสร้าง ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่เป็น Switching Supply ของคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถจ่ายกระแสที่ระดับแรงดัน +5V ได้ถึง 30 A จำนวน 4 ตัว สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้วงจรสร้างสัญญาณแรงดัน 1 ตัว และสำหรับวงจรจ่ายกระแสอีกจำนวน 3 ตัว

(2) แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับขับมอสเฟตชุดละ 1 ตัว

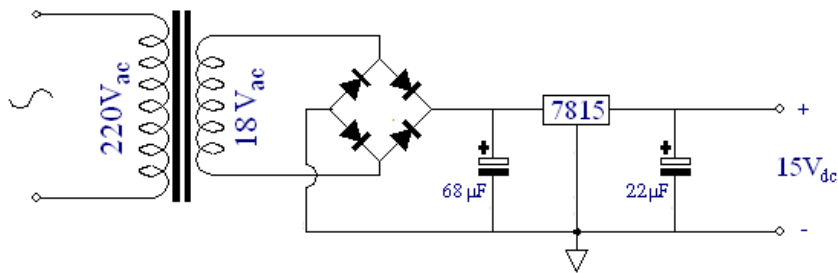
แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงนี้ใช้สำหรับขับมอสเฟตกำลังของจ่ายแรงดันซึ่งมีการต่อแบบบริดจ์จำนวน 2 ชุด (วงจรบริดจ์ภาคแรงดันต่ำและวงจรบริดจ์ภาคแรงดันสูง) และวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ (0-5 A_{rms}) อีก 1 ชุด ซึ่งต่อเป็นแบบบริดจ์เช่นเดียวกัน มอสเฟตกำลังในวงจรบริดจ์ทุกตัวเป็นแบบ N-channel มีการต่อแยกกราวด์กัน ดังนั้นแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับมอสเฟตจึงต้องจ่ายแรงดันให้มอสเฟตเพียงชุดละ 1 ตัวก็เพียงพอ แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับมอสเฟตนี้ใช้วงจรฟลายแบ็ก (Fly-back converter) เป็นวงจรแปลงผันเพื่อให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันขนาด +10V สำหรับขับมอสเฟตกำลัง ตามรูป 3.7 โดยใช้ไอซีไทเมอร์ 555 เป็นตัวกำหนดสัญญาณสวิตซ์ซึ่งให้กับมอสเฟต IRF3205 ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลงความถี่สูงที่มีขดลวดด้านทุติยภูมิแยกกันจำนวน 4 ชุด โดยไม่มีการป้อนกลับเพื่อคุมค่าแรงดัน เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันนี้ใช้สำหรับจ่ายแรงดันให้มอสเฟตกำลังเพียงชุดละ 1 ตัวและไม่จำเป็นต้องมีความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 3.7 แหล่งจ่ายแรงดัน 10V สำหรับขับมอสเฟตกำลัง

(3) แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับขับมอสเฟตชุดละ 3 ตัว

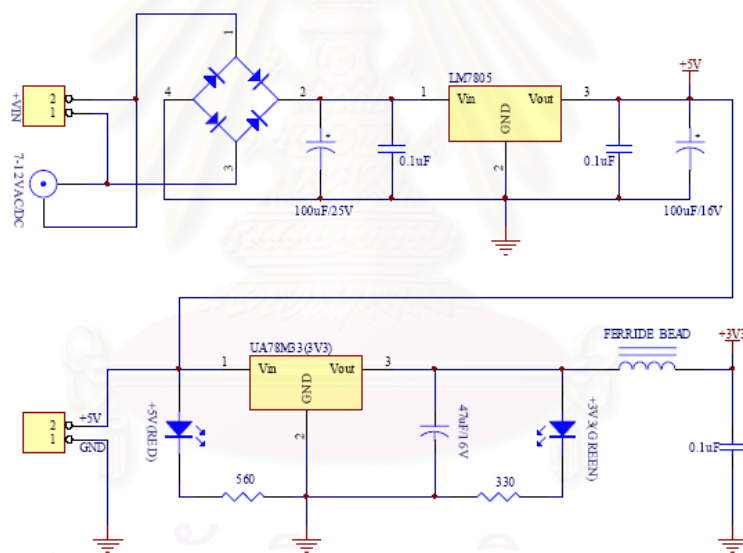
แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงนี้ใช้สำหรับขับมอสเฟตกำลังของวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าสูง (5-40 A_{rms}) ซึ่งต่อเป็นแบบบริดจ์ โดยในแต่ละกิ่งของวงจรบริดจ์ใช้มอสเฟตต่อขนานกันจำนวน 3 ตัวเพื่อทำการแบ่งกระแส ดังนั้นแหล่งจ่ายแรงดัน 1 ชุดต้องสามารถทำการจ่ายกระแสให้มอสเฟตกำลังอย่างน้อย 3 ตัวได้เพียงพอ แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าสูงนี้ใช้ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ 78L15ACZ ทำการสร้างแรงดัน +15V ดังรูปที่



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายแรงดัน 15V สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์กำลัง

(4) แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรทั่วไปขนาด +3.3 โวลต์และ +5 โวลต์

แหล่งจ่ายแรงดัน 3.3 โวลต์นี้ใช้สำหรับจ่ายเป็นแรงดันไฟเลี้ยงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และแหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ใช้สำหรับเป็นแรงดันไฟเลี้ยงในส่วนของวงจรต่อพ่วงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ ได้แก่ วงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่สร้างขึ้น ส่วนจอแสดงผล ส่วนปุ่มกด รับค่า และส่วนอ่านค่าจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ LM7805 และ UA78M3 ทำหน้าที่สร้างแหล่งจ่ายแรงดัน +5V และ +3.3V ตามลำดับ ดังรูป 3.9



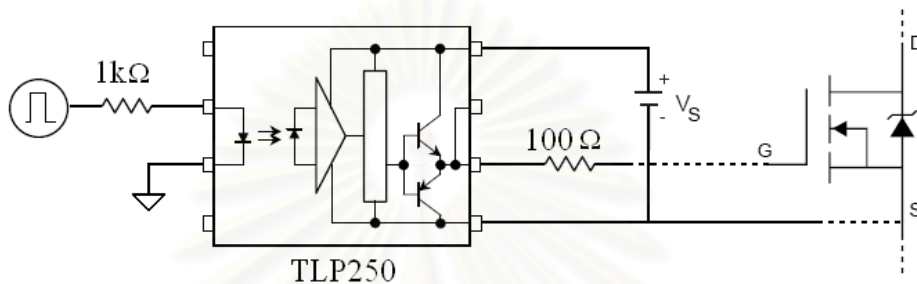
รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรทั่วไป

3.3.7 วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลัง

วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ชุดด้วยกัน ได้แก่

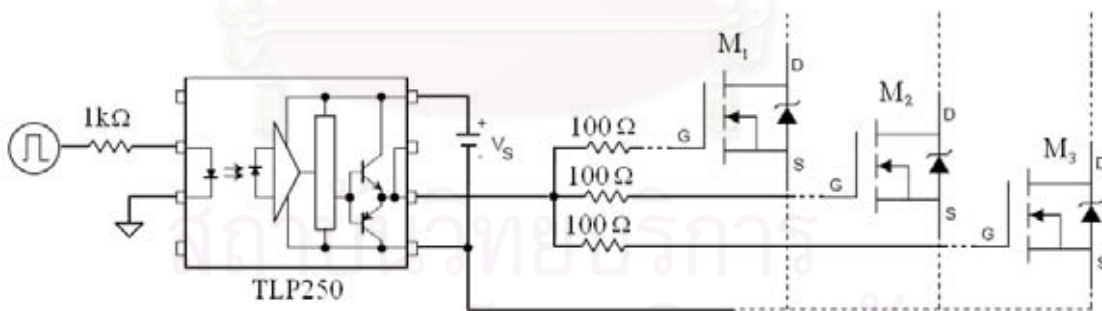
- วงจรขับเคลื่อนของวงจรบริดจ์ส่วนแรงดันต่ำของแหล่งจ่ายแรงดัน
- วงจรขับเคลื่อนของวงจรบริดจ์ส่วนแรงดันสูงของแหล่งจ่ายแรงดัน
- วงจรขับเคลื่อนของวงจรบริดจ์ของแหล่งจ่ายกระแสต่ำ (0-5 A_{rms})
- วงจรขับเคลื่อนของวงจรบริดจ์ของแหล่งจ่ายกระแสสูง (5-40 A_{rms})

วงจรขับเคลื่อนของแหล่งจ่ายสัญญาณแรงดันรูปไซน์สำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าทั้งสองชุด และแหล่งจ่ายกระแสสำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าช่วงค่าต่ำทำหน้าที่ขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลังชุดละ 1 ตัว วงจรขับเคลื่อนไอซีออปโตคัปเปลอร์ TLP250 [8] ในการแยกกราวด์ระหว่างวงจรภาคควบคุมและภาคกำลัง ออกจากกันเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเนื่องจากการการสวิตชิงความถี่สูงของอุปกรณ์ โดยไอซีออปโตคัปเปลอร์ TLP250 มีลักษณะเด่นคือสามารถต่อวงจรเพื่อขับมอสเฟตหรือทรานซิสเตอร์ไอจีบีทีได้โดยตรง โดยรับแรงดันฝั่งเอาต์พุตได้ถึง 35 V ขับกระแสได้ถึง 2 A โดยมีการกำหนดค่าเดดไทม์ (dead time) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้เท่ากับ 1 μ s วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรขับเคลื่อนสำหรับมอสเฟตกำลัง 1 ตัว

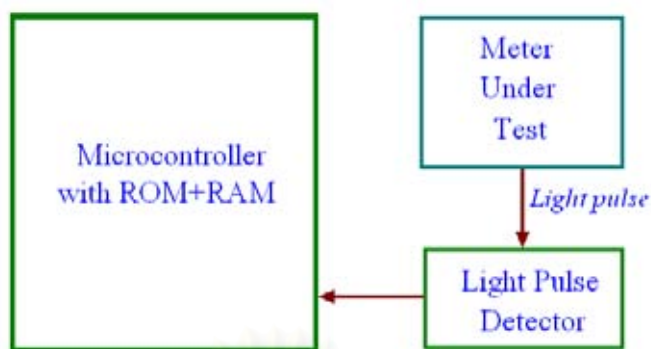
สำหรับวงจรบริดจ์ของแหล่งจ่ายกระแสช่วงค่าสูงมีการต่อมอสเฟตกำลังขนานกัน 3 ชุดเพื่อทำการแบ่งกระแส ดังรูปที่ 3.11 โดยปกติมอสเฟตสามารถนำมาต่อขนานกันได้ทันทีเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่เป็นบวกของค่า $R_{DS(on)}$ จะคอยกำหนดไม่ให้เกิดกระแสเดรนในมอสเฟตกำลังตัวใดตัวหนึ่งสูงกว่าตัวอื่นๆ ส่วนที่ขาเกตของมอสเฟตแต่ละตัวมีการต่ออนุกรมด้วยตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม เพื่อลดผลของการออสซิลเลตที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 วงจรขับเคลื่อนสำหรับมอสเฟตกำลัง 3 ตัว

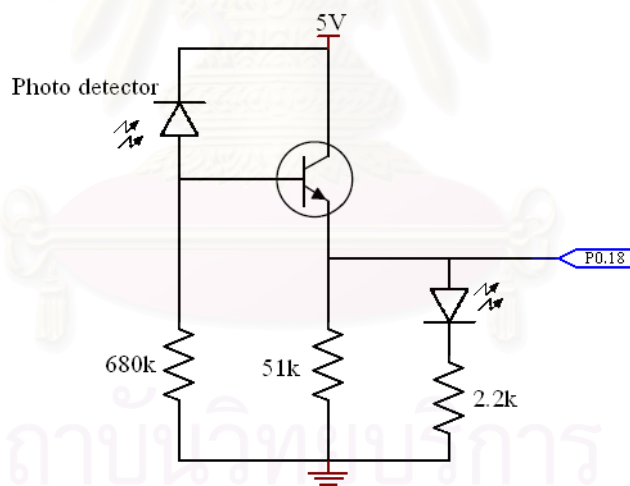
3.3.8 ส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

ส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าทำหน้าที่วัดคาบสัญญาณพัลส์แสงที่ส่งมาจากมิเตอร์ที่ถูกทดสอบความแม่นยำ และนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าผิดพลาดโดยเทียบกับค่าแรงดันและกระแสที่ถูกป้อนโดยผู้ใช้ จากนั้นจึงแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดผ่านทางจอแสดงผลให้ผู้ใช้งานทราบ ส่วนสอบเทียบความแม่นยำของเครื่องสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้ามีโครงสร้างดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

การตรวจจับค่าพัลส์แสงจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้านี้ใช้โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าพัลส์แสง และใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC546 สำหรับต่อขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดเพื่อส่งเข้าสู่มicroคอนโทรลเลอร์ เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่มีเตอร์ที่ถูกสอบเทียบคำนวณค่าได้ การตรวจจับค่าพัลส์แสงนี้ทำการตรวจจับ ครั้งละ 1 พัลส์เพื่อหาคาบของสัญญาณในการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า โดยสัญญาณพัลส์แสงจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวที่ใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการส่งค่าพลังงานไฟฟ้ามาในความถี่ เท่ากับ 10,000 พัลส์/kWhr



รูปที่ 3.13 วงจรตรวจจับค่าพัลส์แสงจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

เมื่อคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์ได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของมิเตอร์ที่ถูกสอบเทียบและแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทางหน้าจอแสดงผล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณความผิดพลาดในการสร้างสัญญาณแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าเต็มพิกัด (Power error) ตามสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$\text{Power error (\%)} = \frac{\text{Measure value} - \text{Set value}}{\text{Set value}} \times 100$$

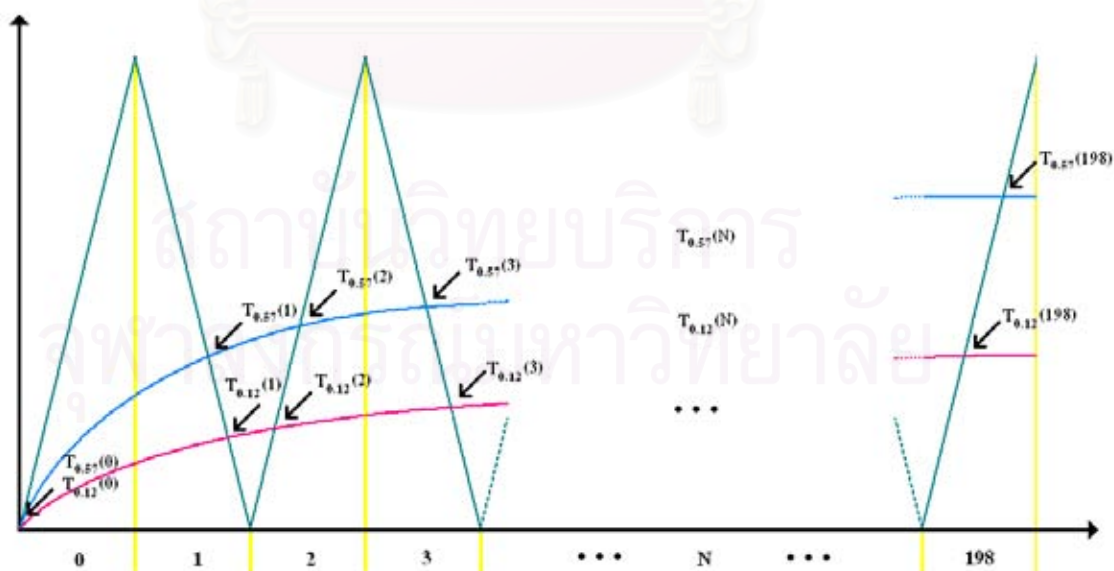
สมการที่ 3.1

โดยที่ Measure value คือ ค่าที่ไม่ใครคอนโทรลเลอร์วัดได้จากส่วนสอบเทียบความแม่นยำ
 Set value คือ ค่าพลังงานที่คำนวณจากแรงดันและกระแสที่กำหนดโดยผู้ใช้

3.4 ขั้นตอนการสร้างสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์

สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ถูกกำหนดโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางช่องสัญญาณ PWM ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่กำหนดสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่เหมาะสมให้กับวงจรสวิตชิงของแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส การมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้สัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด m_a ในขณะที่อัตราส่วนการมอดูเลตด้านความถี่ m_f ถูกกำหนดไว้ตายตัวเท่ากับ 199 ซึ่งทำให้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ทำงานที่ความถี่ระหว่าง 8.955-10.945 kHz ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณขาออกรูปไซน์ระหว่าง 45.0-55.0 Hz (ความถี่สวิตชิงประมาณ 10 kHz ที่ความถี่ของสัญญาณออกรูปไซน์ 50 Hz ซึ่งทำให้สัญญาณพัลส์มีความถี่ประมาณ 20 kHz ก่อนเข้าสู่วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ)

การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เก็บค่าขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณ PWM ที่อัตราส่วนการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด m_a เท่ากับ 0.12 และ 0.57 ไว้ในหน่วยความจำสลับกันไป เช่น เมื่ออยู่ในคาบที่ 1 ถ้า n เป็นจำนวนคู่ สัญญาณที่เก็บไว้ก็จะเป็นค่าขอบขาลง ถ้า n เป็นจำนวนคี่ สัญญาณที่เก็บไว้ก็จะเป็นค่าขอบขาขึ้น ดังรูปที่ 3.13 รวมเป็นจำนวนที่ต้องโปรแกรมเก็บไว้ในหน่วยความจำจำนวน 199 ค่าใน 1 คาบ (Quadrant) ค่าที่เก็บลงในหน่วยความจำนี้มีขนาด 31 บิต (เหลือไว้หนึ่งบิตสำหรับระบุค่าบวกลบ) โดยเก็บค่าลงในหน่วยความจำเพียง 1 คาบ ก็เพียงพอ เนื่องจากในแต่ละคาบมีการสมมาตรกัน



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลในหน่วยความจำในแต่ละคาบที่ค่า $m_a=0.12$ และ $m_a=0.57$

จากรูปที่ 3.14 ในการเรียกค่าสัญญาณ PWM ที่ค่า m_a ต่างๆ ใช้การประมาณการเชิงเส้นในช่วงแบบเส้นตรง (Linear Interpolation) โดยมีการคำนวณดังสมการที่ 3.1

$$T(n) = \frac{T_{0.57}(n) - T_{0.12}(n)}{0.57 - 0.12} \times (m_a - 0.12) + T_{0.12}(n) \tag{สมการที่ 3.2}$$

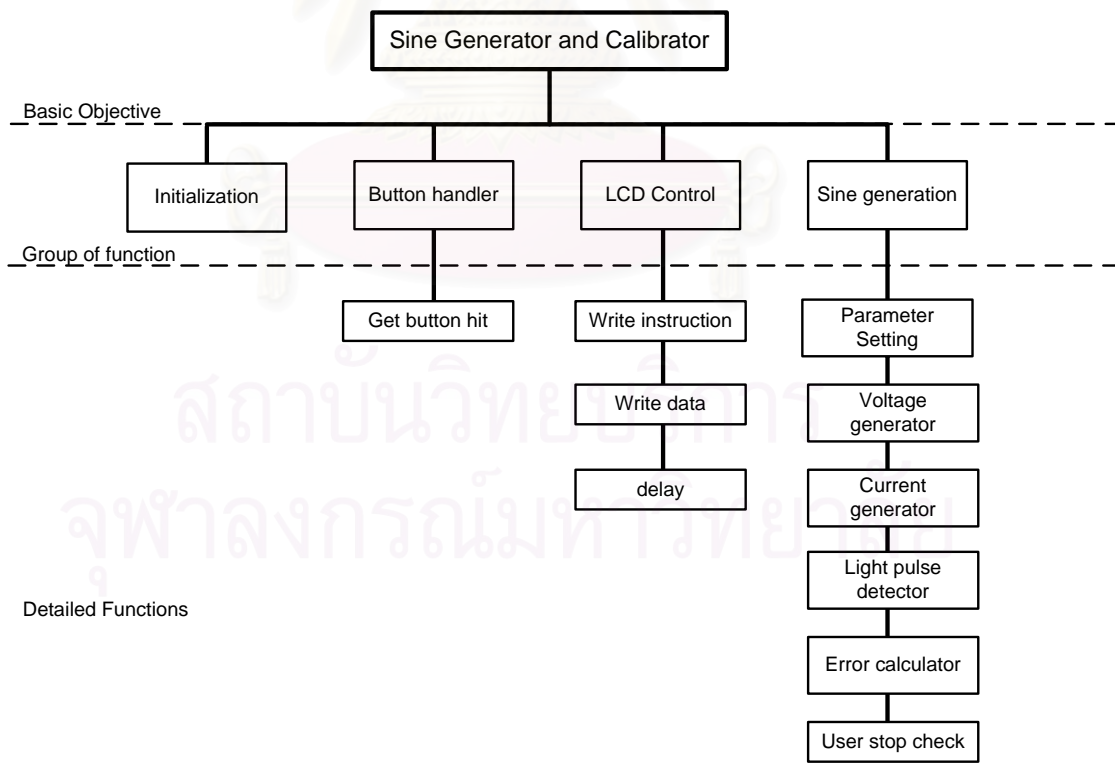
- โดยที่ $T(n)$ คือ ค่าสัญญาณ PWM ในหนึ่งหน่วยตามค่า m_a ที่ต้องการเรียกใช้
 $T_{0.12}(n)$ คือ ค่าสัญญาณ PWM ในหนึ่งหน่วยที่ $m_a=0.12$
 $T_{0.57}(n)$ คือ ค่าสัญญาณ PWM ในหนึ่งหน่วยที่ $m_a=0.57$

3.5 โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

หน้าที่ของไมโครคอนโทรลเลอร์คือควบคุมการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ รับสัญญาณพัลส์แสงจากส่วนสอบเทียบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า คำนวณผลค่าผิดพลาดของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า และติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ผ่านทางปุ่มกดรับค่าและจอแสดงผล โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมหดังนี้

3.5.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม

โครงสร้างของซอฟต์แวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแสดงรายละเอียดตามหน้าที่การทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนผังแจกแจงโปรแกรมย่อยของโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปเห็นได้ว่าโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วนด้วยกันคือ

(1) ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของตัวแปร

โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวแปรต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ แล้วทำการเก็บค่าลงในหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตั้งค่าทิศทางของช่องทางเข้าออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกสำหรับวงจรถ่ายกลับ ตั้งค่าพารามิเตอร์ของส่วน Pulse width modulation ของทั้งช่องสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ และส่งคำสั่งให้จอแสดงผลเริ่มทำงานและแสดงผลหน้าจอขณะเริ่มต้น

(2) ส่วนรับค่าจากปุ่มกดรับค่า

โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่ตรวจสอบว่ามีกรกดปุ่มใดหรือไม่ เมื่อมีกรกดปุ่มใดขึ้นก็ทำหน้าที่แจกแจงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตอบสนองปุ่มที่ถูกกด โดยปุ่มกดมีอยู่ 3 ปุ่มด้วยกันคือ ปุ่มกดเลื่อน ทำหน้าที่เลื่อนตัวชี้ตำแหน่งตัวอักษรไปทางขวามือของจอแสดงผล ปุ่มเปลี่ยนค่า ทำหน้าที่เพิ่มค่าต่างๆขึ้นในตำแหน่งที่ตัวชี้ตำแหน่งหยุดอยู่ และปุ่มเริ่มหรือหยุดการทำงาน ทำหน้าที่รับคำสั่งในการเริ่มหรือหยุดการทำงานของเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

(3) ส่วนควบคุมการทำงานของจอแสดงผล

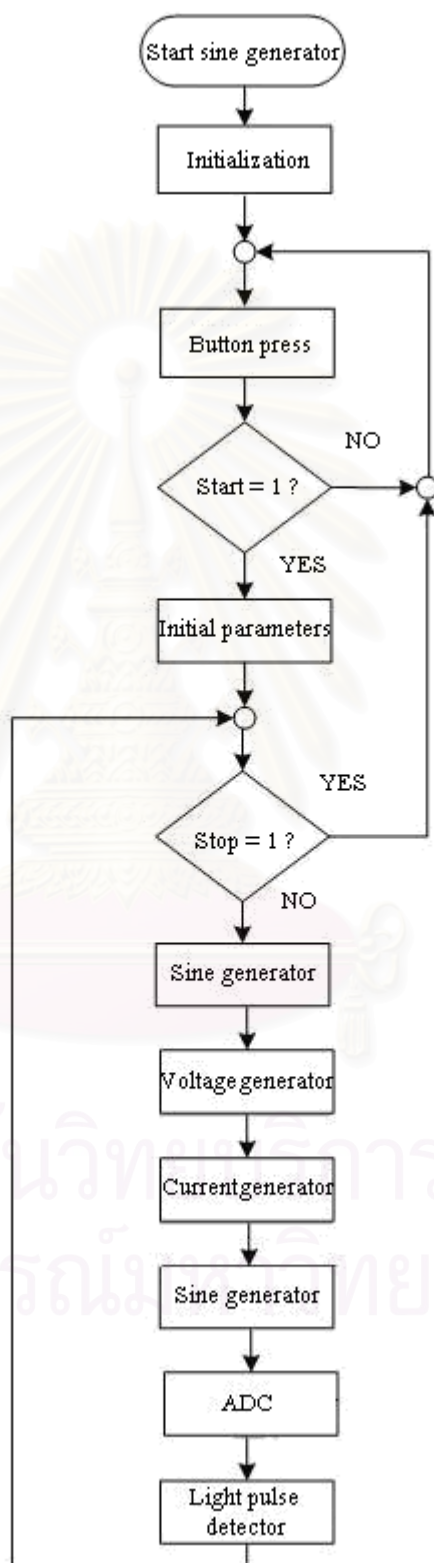
ส่วนนี้ทำหน้าที่ควบคุมการสั่งงานจอแสดงผลแบบผลึกเหลว เนื่องจากการสั่งงานจอแสดงผลชนิดนี้จะมีรูปแบบคำสั่งเฉพาะ โดยโปรแกรมย่อยของส่วนนี้ประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อย Write instruction สำหรับส่งคำสั่งเพื่อให้จอแสดงผลปฏิบัติตาม เช่น การล้างหน้าจอ การเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งตัวอักษรไปที่ตำแหน่งต่างๆบนหน้าจอ เป็นต้น โปรแกรมย่อย Write data ทำหน้าที่ส่งค่าตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบนหน้าจอแสดงผลนั้นๆ และโปรแกรมย่อย Delay ทำหน้าที่ประวิงเวลาเพื่อรอให้จอแสดงผลประมวลผลคำสั่งก่อนที่จะทำการส่งคำสั่งถัดไป

(4) ส่วนควบคุมการสร้างสัญญาณรูปไซน์

ส่วนนี้ประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ โปรแกรมย่อย Parameter Setting ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆจากที่ผู้ใช้ตั้งค่ามา ทั้งค่าแรงดัน , กระแส , ความถี่ และความต่างเฟส จะถูกแปลงมาเป็นค่าตั้งต้นให้กับตัวแปรต่างๆภายในส่วนนี้ ส่วนโปรแกรมย่อย Voltage generator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM และสัญญาณควบคุมต่างๆเพื่อกำหนดการสวิตช์ของมอสเฟตทั้งในส่วนของแรงดันต่ำและแรงดันสูง โดยมีการอ่านค่าจากรางค่ามอดูเลตด้านแอมพลิจูดเพื่อนำมาคำนวณ รวมทั้งมีหน้าที่รับค่าสัญญาณป้อนกลับ เช่นเดียวกับโปรแกรมย่อย Current generator ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM และสัญญาณควบคุมของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อสร้างกระแสรูปไซน์ รวมถึงรับค่าสัญญาณป้อนกลับเพื่อนำกลับไปประมวลผล โปรแกรมย่อย Light pulse detector ทำหน้าที่ตรวจวัดคาบของสัญญาณพัลส์แสงเพื่ออ่านค่าพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ที่ถูกทดสอบ ส่วนโปรแกรมย่อย Error calculator ทำหน้าที่คำนวณค่าความผิดพลาดของมิเตอร์ที่ถูกทดสอบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ใช้ป้อนค่า โดยแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และโปรแกรมย่อย User Stop check ทำหน้าที่ตรวจสอบการกดปุ่มหยุดการทำงาน เพื่อหยุดการทำงานและรอการป้อนค่าใหม่จากผู้ใช้

3.5.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

โครงสร้างทางซอฟต์แวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแสดงรายละเอียดตามหน้าที่การทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลักสำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานในส่วนขอโปรแกรมหลัก เมื่อผู้ใช้เริ่มต้นเปิดเครื่อง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ กำหนดช่องสัญญาณเข้าออก รวมถึงแสดงผลเริ่มต้นทางหน้าจอแสดงผลเพื่อรอให้ผู้ใช้ป้อนค่าทางปุ่มกดรับค่า ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าแรงดัน , ค่ากระแส , ความถี่ของสัญญาณที่สร้าง และความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสตามที่ต้องการผ่านทางปุ่มกดรับค่าที่ทำงานร่วมกับจอแสดงผล เมื่อมีการกดปุ่มเริ่มการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีการนำค่าต่างๆที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปไปประมวลผลเป็นค่าตัวแปรต่างๆ และเริ่มรอบการทำงานด้วยการตรวจสอบการกดปุ่มหยุดการทำงานจากผู้ใช้ เมื่อผู้ใช้ไม่มีการกดปุ่มหยุดการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานในโปรแกรมหลักไปเรื่อยๆด้วยการสร้างสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสรูปไซน์ ในหนึ่งรอบการทำงานขอโปรแกรมหลักจะมีการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสอย่างละหนึ่งพัลส์ และมีการตรวจจับสัญญาณพัลส์แสงจากมิเตอร์ที่ถูกทดสอบเพื่อหาคาบของสัญญาณเพื่ออ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบวัดได้ และแสดงค่าผิดพลาดของมิเตอร์ที่ถูทดสอบบนหน้าจอแสดงผล และจะหยุดการทำงานก็ต่อเมื่อผู้ใช้กดปุ่มหยุดการทำงาน และรอให้ผู้ใช้ทำการป้อนค่าใหม่ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

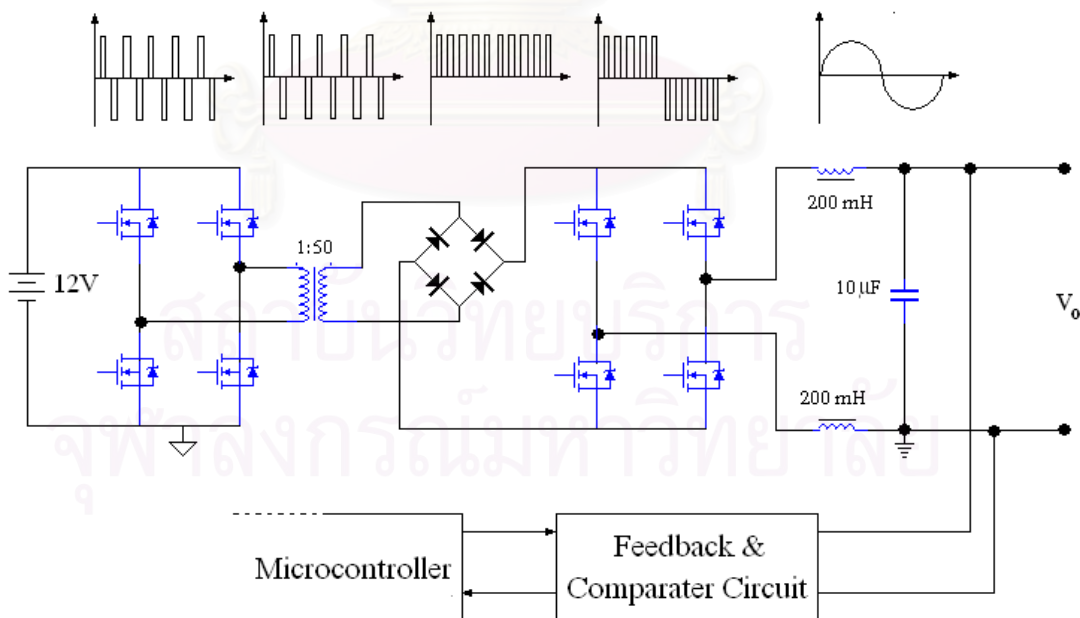
แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแส

4.1 หลักการทำงาน

สิ่งสำคัญที่สุดสำหรับเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าคือแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด แหล่งจ่ายแรงดันและกระแสรูปไซน์สำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้สร้างขึ้นด้วยหลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่มีความถี่ประมาณ 20 kHz เพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่มีความถี่ 45-55 Hz โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนดจังหวะการสวิตช์ แหล่งจ่ายสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์รูปนี้ต้องมีการป้อนสัญญาณกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมสัญญาณให้เป็นรูปไซน์ตามที่มาตรฐานกำหนดด้วย

4.2 การออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์

แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์นี้ต้องสามารถจ่ายแรงดันออกได้ระหว่าง 100 ถึง 260 V_{rms} โดยมีโครงสร้างภายในประกอบไปด้วยวงจรสวิตช์ซึ่งมอสเฟตแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันต่ำ 12 V , หม้อแปลงความถี่สูง , ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ , วงจรสวิตช์ซึ่งมอสเฟตแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันสูง 600 V , วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (LC filter) และวงจรป้อนกลับและเปรียบเทียบสัญญาณ ดังรูปที่ 4.1 [9]

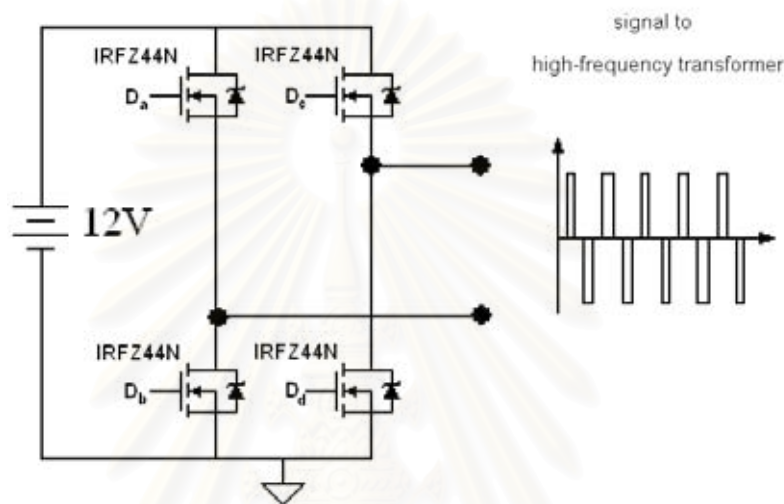


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแสดงส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายแรงดัน

ส่วนประกอบต่างๆของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ ด้านแรงดันต่ำ

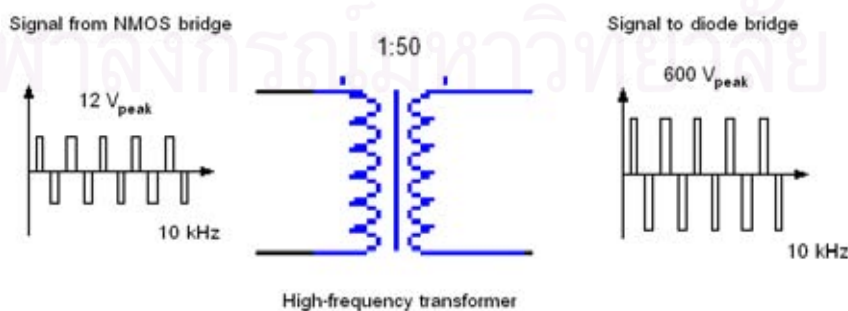
วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันต่ำทำหน้าที่จัดสัญญาณรูปพัลส์เพื่อส่งเข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูงในการขยายแอมพลิจูดของสัญญาณ พัลส์รูปสี่เหลี่ยมขนาด 12 V จากวงจรสวิตชิงจะถูกขยายเป็นพัลส์ที่มีค่ายอด 600 V โดยหม้อแปลงความถี่สูง วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์นี้ใช้โมสเฟตแบบ N-Channel เบอร์ IRFZ44N ของบริษัท International Rectifier [10] ซึ่งรับแรงดันได้ 55 V และรับกระแสได้ถึง 49 A และมีค่า $R_{DS(on)}$ เพียง 17.5 มิลลิโห์ม ที่ $V_{GS} = 10$ V วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์นี้ทำงานที่ความถี่ประมาณ 20 kHz เพื่อจัดเรียงสัญญาณเป็นพัลส์บวกและลบสลับกันไปเพื่อส่งให้แก่หม้อแปลงความถี่สูงต่อไป ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันต่ำ

4.2.2 หม้อแปลงความถี่สูง

หม้อแปลงความถี่สูงมีข้อดีคือมีขนาดที่เล็กกว่าหม้อแปลงความถี่ต่ำมาก อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงความถี่สูงมักใช้แกนเฟอร์ไรต์ซึ่งมีค่า B_s ต่ำกว่าแกนเหล็กของหม้อแปลงความถี่ต่ำ ดังนั้น การลดขนาดของหม้อแปลงจึงยังไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มความถี่ การมอดูเลตรูปคลื่นของหม้อแปลงความถี่สูงต้องให้เกิดพัลส์บวก-ลบสลับกันไป เพื่อให้อินทิกรัลของโวลต์ x วินาทีที่มีค่าต่ำเนื่องจากการหักล้างกันทั้งสองพัลส์ [11] ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณเข้าและออกของหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงสำหรับแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีผลคูณพื้นที่ (Area product) สำหรับวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ มีแรงดันด้านปฐมภูมิเท่ากับ 12 V และแรงดันด้านทุติยภูมิเท่ากับ 600 V โดยมีกำหนดขนาดของอุปกรณ์ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงและวิธีการคำนวณดังนี้

1) ขนาดของแกนแม่เหล็ก

ในหนึ่งคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ทิศทางของกระแสจะกลับทิศไปมา เป็นผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าระหว่าง $-\phi_m$ ถึง ϕ_m ซึ่งใช้ประโยชน์จากวงฮีสเทอรีซิสของแกนแม่เหล็กทั้งซีกบวกและลบ ทำให้โอกาสที่จะทำให้แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวมีค่าน้อยลง วิธีผลคูณพื้นที่ (Area product) ต้องมีการคำนวณหาค่าผลคูณพื้นที่เพื่อนำไปเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กที่จะใช้สร้างหม้อแปลงความถี่สูง โดยมีการคำนวณดังสมการที่ 4.1[4]

$$A_p = \frac{P_{o2} \left(\sqrt{2} + \frac{1}{\eta} \right)}{4JK_w B_m f_s} \tag{สมการที่ 4.1}$$

โดยที่	P_{o2}	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (W)
	η	คือ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง
	J	คือ ความหนาแน่นของกระแส (A/m^2)
	K_w	คือ ค่า window utilization factor เป็นค่าชดเชยพื้นที่หน้าต่างของแกนหม้อแปลงความถี่สูง โดยปกติกำหนดค่าประมาณเท่ากับ 0.3-0.4
	B_m	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (wb/m^2)
	f_s	คือ ความถี่ในการสวิตซ์ (Hz)

กำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิกำหนดไว้ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 600 V และกำหนดค่ากระแสสูงกว่าจุดทำงานปกติเพื่อป้องกันการลัดวงจรเนื่องจากวงจรมีการจ่ายกระแสเกินขณะเริ่มทำงาน โดยกำหนดไว้เท่ากับ 0.2 A ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิที่ใช้ในการคำนวณจึงรวมค่าชดเชยไว้มีค่าเท่ากับ 120 W ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง η กำหนดไว้เท่ากับ 0.75 ความหนาแน่นของกระแสกำหนดไว้เท่ากับ $3 \times 10^6 A/m^2$ ค่า K_w กำหนดไว้เท่ากับ 0.3 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด B_m กำหนดไว้เท่ากับ 0.2 wb/m^2 และความถี่ f_s ของหม้อแปลงเท่ากับ 10 kHz คำนวณผลคูณพื้นที่ที่ใช้ในการเลือกขนาดของหม้อแปลงความถี่สูง A_p เท่ากับ 45,792 mm^2 แกนแม่เหล็กที่เลือกใช้ต้องมีค่า A_p สูงกว่าที่คำนวณได้ จึงเลือกใช้แกนแม่เหล็กขนาด E 46/24/15 ที่มีค่า A_p โดยประมาณเท่ากับ 60,000 mm^2

2) จำนวนรอบ

จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2[4] และ 4.3[4] ดังนี้

$$N_1 = \frac{V_1}{4A_c B_m f_s} \tag{สมการที่ 4.2}$$

$$N_2 = \frac{V_2}{4A_c B_m f_s} \tag{สมการที่ 4.3}$$

โดยที่	N_1	คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ (รอบ)
	N_2	คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ (รอบ)
	V_1	คือ แรงดันด้านปฐมภูมิ (V)
	V_2	คือ แรงดันด้านทุติยภูมิ (v)
	A_c	คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่เลือกใช้ (mm^2)
	B_m	คือ ความหนาแน่นเส้นแกนแม่เหล็กสูงสุด (wb/m^2)
	f_s	คือ ความถี่ในการสวิตช์ (Hz)

วงจรที่ใช้กำหนดแรงดันด้านปฐมภูมิเท่ากับ 12 V แรงดันด้านทุติยภูมิมีค่ายอต่อเท่ากับ 600 V ค่า A_c ของแกนแม่เหล็กขนาด E 46/24/15 มีค่าประมาณ 220 mm^2 ค่าความหนาแน่นเส้นแกนแม่เหล็กสูงสุด B_m กำหนดไว้เท่ากับ 0.2 wb/m^2 และความถี่ f_s ของสัญญาณที่เข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 10 kHz คำนวณได้จำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิเท่ากับ 6.82 รอบ และด้านทุติยภูมิเท่ากับ 340.91 รอบ จึงเลือกใช้จำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิเท่ากับ 7 รอบ และด้านทุติยภูมิเท่ากับ 341 รอบ

3) ขนาดของขดลวดตัวนำ

ขนาดของขดลวดตัวนำพิจารณาตามพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ดังสมการที่ 4.4[4]

$$a = \frac{I}{J}$$

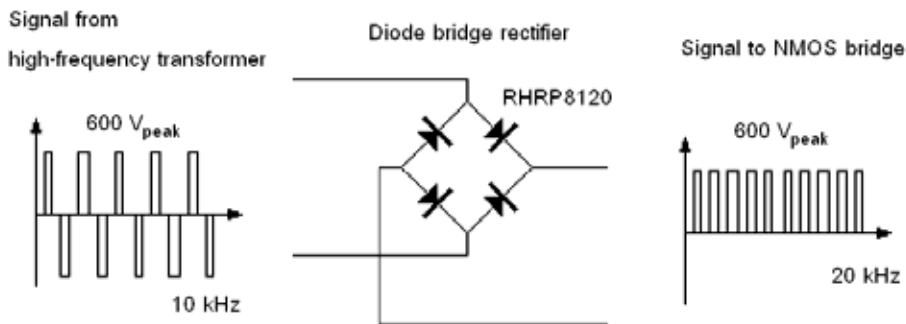
สมการที่ 4.4

โดยที่	I	คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด (A)
	J	คือ ความหนาแน่นของกระแส (A/m^2)

ในการคำนวณนี้เลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ $3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิกำหนดไว้ที่ 5 A ส่วนกระแสทางทุติยภูมิมีการชดเชยไว้ที่ค่าสูงสุดที่ 200 mA เนื่องจากขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีการพันขดลวดขนาดเล็กทับกันจำนวนหลายรอบ เมื่อขดลวดมีความร้อนสูงจึงอาจทำให้น้ำยาที่เคลือบขดลวดละลายจนกระแสในขดลวดเกิดการลัดวงจรได้ จึงมีการกำหนดค่ากระแสในการคำนวณเกินกว่าค่ากระแสที่ใช้จริง จากการคำนวณจึงได้พื้นที่หน้าตัด a ของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ 1.67 mm^2 และ 0.067 mm^2 ตามลำดับ จึงเลือกใช้ขดลวดเบอร์ SWG17 ทางด้านปฐมภูมิที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.589 mm^2 และเลือกใช้ขดลวดเบอร์ SWG30 ทางด้านทุติยภูมิที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.07791 mm^2

4.2.3 วงจรเรียงกระแส

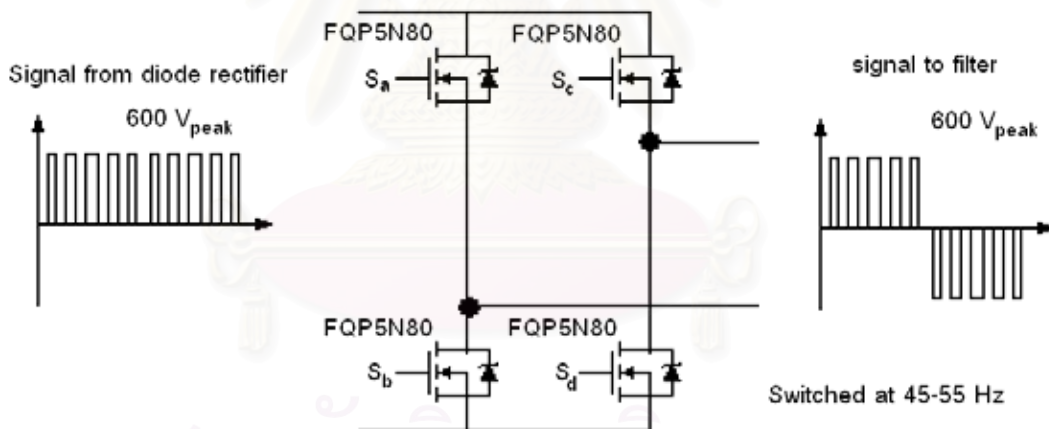
วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เรียงสัญญาณพัลส์บวก-ลบขนาด 600 V จากหม้อแปลงความถี่สูง โดยใช้ไดโอดกำลังเบอร์ RHRP8120 ของบริษัท Fairchild Semiconductor Corporation [12] ซึ่งเป็นไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Hyperfast Diode) สามารถรับแรงดันได้ถึง 1,200 V กระแส 8 A มีการต่อแบบบริดจ์เพื่อจัดเรียงสัญญาณพัลส์บวกและลบให้เป็นสัญญาณพัลส์บวกเพียงอย่างเดียว สัญญาณออกจากวงจรเรียงกระแสจะถูกจัดรูปโดยวงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ต่อไป ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สัญญาณเข้าและออกของวงจรเรียงกระแส

4.2.4 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ ด้านแรงดันสูง

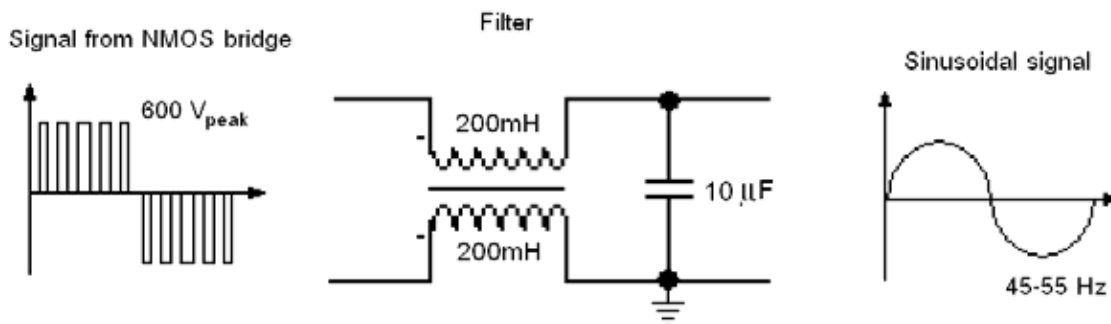
วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันสูงนี้ทำหน้าที่จัดสัญญาณพัลส์จากไดโอดกำลังให้เป็นสัญญาณพัลส์ที่ความถี่ที่ผู้ใช้ตั้งค่าไว้ (45.0-55.0 Hz) วงจรนี้ใช้ MOSFET แบบ N-Channel เบอร์ FQP5N80 ของบริษัท Fairchild Semiconductor Corporation [13] รับแรงดันได้ถึง 800 V และรับกระแสได้ 4.8 A มีค่า $R_{DS(on)}$ เท่ากับ 2.6 โอห์ม ที่ $V_{GS} = 10$ V (วงจรมีค่าอิมพีแดนซ์ขาออกสูง จึงสามารถละเลยความต้านทานของ MOSFET ได้) วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันสูงมีลักษณะดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ด้านแรงดันสูง

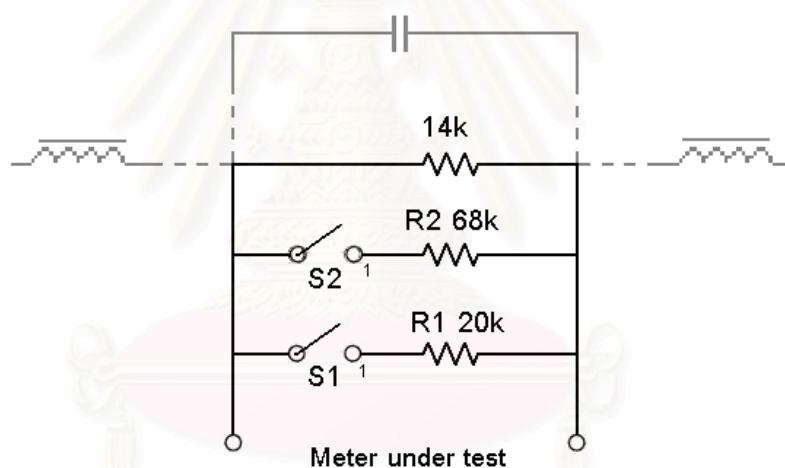
4.2.5 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ

วงจรรองความถี่ผ่านต่ำเป็นวงจรกรองแบบแอลซี ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 400 mH ร่วมกับตัวเก็บประจุแบบไบโพลาร์ขนาด 10 nF ดังรูปที่ 4.6 โดยมีความถี่คัตออฟเท่ากับ 2,516 Hz



รูปที่ 4.6 วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายสัญญาณแรงดัน

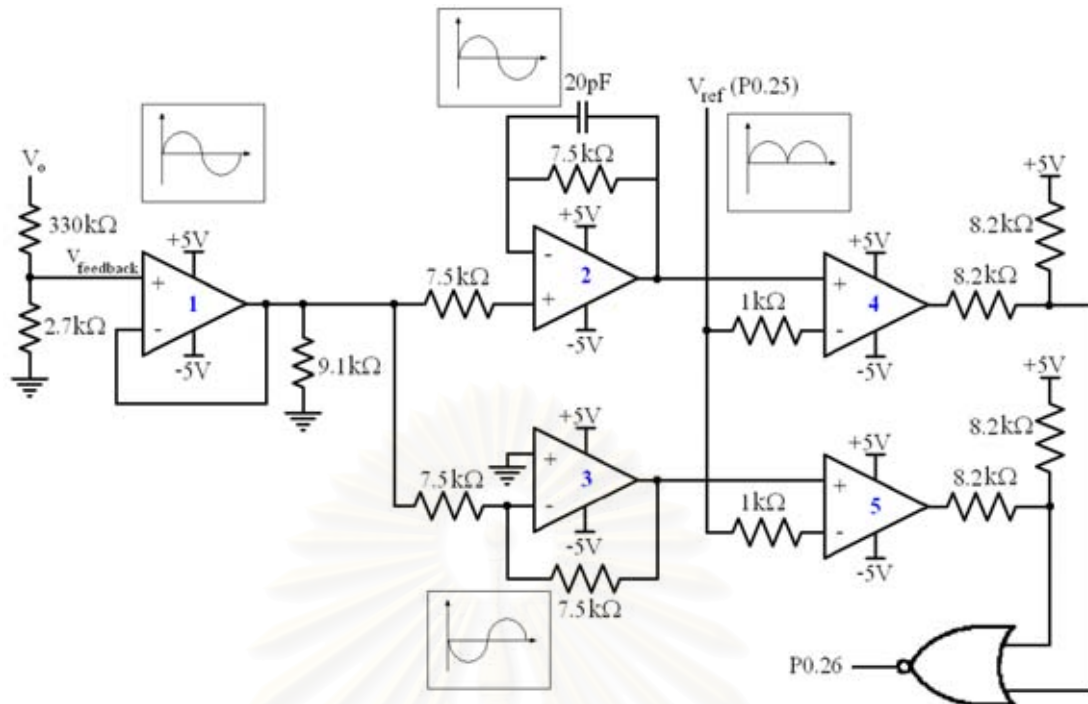
เนื่องจากวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำมีลักษณะเป็นวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance form) การเปลี่ยนแปลงโหลดมีผลทำให้ผลตอบสนองของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป จึงมีการต่อตัวต้านทานโหลดเพิ่มเติมทางช่องสัญญาณออกของวงจร ตัวต้านทานที่เพิ่มเข้ามามีขนาดต่างๆกันเพื่อจำกัดโหลดของวงจรให้เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ควบคุมได้ และเพื่อลดฮาร์มอนิกของสัญญาณเนื่องจากวงจรมีเสถียรภาพที่ความต้านทานขาออกต่ำ ตัวต้านทานโหลดที่เพิ่มเข้ามาในวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเพิ่มโหลดของส่วนจ่ายสัญญาณแรงดัน

4.2.6 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและป้อนกลับ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและป้อนกลับประกอบด้วยตัวต้านทานต่อขนานกันเพื่อทำการแบ่งแรงดัน วงจรออปแอมป์ทำการส่งผ่านสัญญาณและทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปไซน์ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำผลที่ได้ไปกลับประมวลผลต่อไป มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 4.8

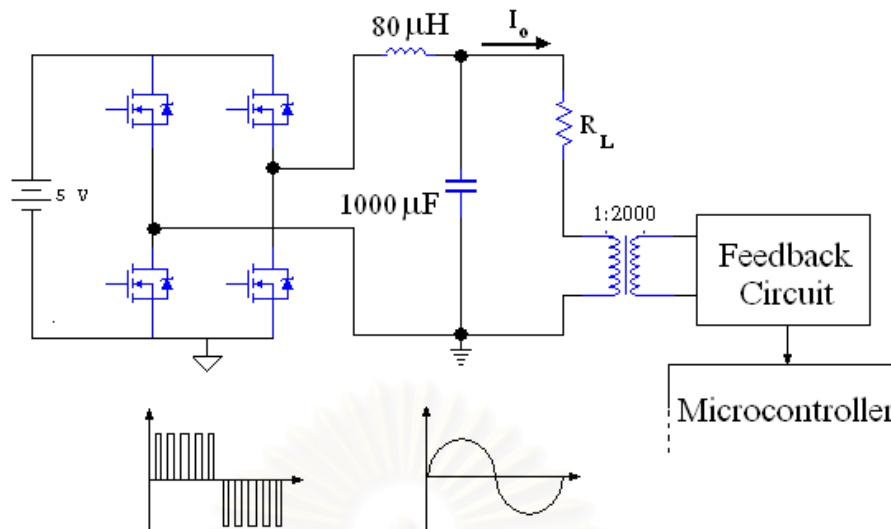


รูปที่ 4.8 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและบ่อนกลับ

จากรูปที่ 4.8 มีการต่อตัวต้านทานจากช่องสัญญาณออกซึ่งเป็นแรงดันรูปไซน์ขนาด $100\text{-}260\text{ V}_{\text{rms}}$ เพื่อแบ่งสัญญาณแรงดันตัวอย่างให้มีค่าขอดีไม่เกิน 3.3 V เพื่อเข้าสู่วงจร Voltage Follower (ออปแอมป์หมายเลข 1) เนื่องจากข้อจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ได้เฉพาะค่าสัญญาณค่าบวก ดังนั้นสัญญาณตัวอย่างที่นำไปเปรียบเทียบนี้จึงมีการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเข้าสู่วงจรขยายไฟตรงไม่กลับเฟส (ออปแอมป์หมายเลข 2) และวงจรขยายไฟตรงกลับเฟส (ออปแอมป์หมายเลข 3) เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณตัวอย่างเฉพาะเมื่อค่าเป็นบวกเท่านั้น วงจรขยายทั้งสองวงจรมีอัตราขยายเท่ากับ 1 สัญญาณออกของวงจรออปแอมป์ทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปไซน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ (ออปแอมป์หมายเลข 4 และ 5) ค่าสัญญาณจากออปแอมป์ของวงจรเปรียบเทียบแรงดันนี้มีค่าระหว่าง $+5\text{ V}$ และ -5 V และมีการนำค่าสัญญาณนี้ไปเข้าสู่วงจรเกตเพื่อส่งสัญญาณการเปรียบเทียบค่าเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประเมินผล แต่เนื่องจากขาสัญญาณขาเข้าของวงจรเกตต้องมีค่าระหว่าง $0\text{-}5\text{ V}$ จึงต้องมีการต่อตัวต้านทาน Pull-up เพื่อให้ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง $0\text{-}5\text{ V}$ เพื่อนำค่าที่ได้ไปประเมินผล โดยออปแอมป์ในวงจรใช้ออปแอมป์เบอร์ LM318N ของบริษัท National Semiconductor Corporation [12] มีค่า Slew Rate ที่อัตราขยายเท่ากับ 1 เป็น $70\text{ V}/\mu\text{s}$ เพื่อให้มีการตอบสนองของสัญญาณไวพอต่อการทำงาน

4.3 การออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ

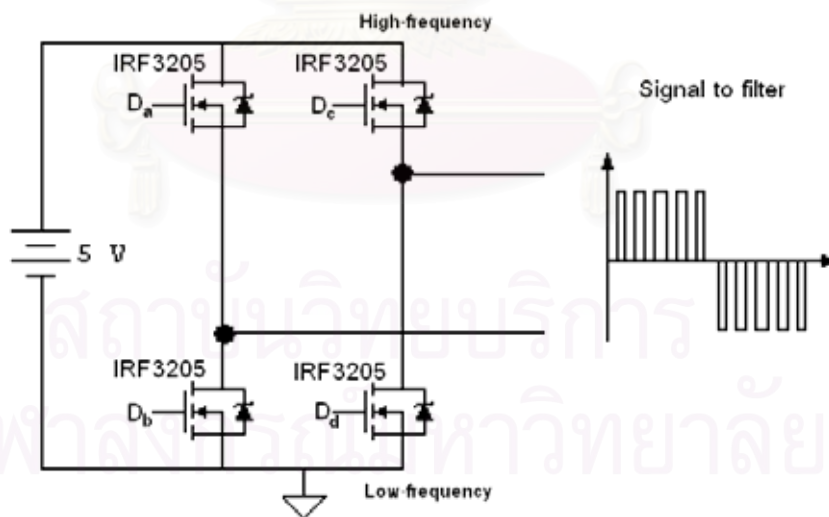
การออกแบบแหล่งกำเนิดกระแสไฟสลับในช่วงค่าต่ำนี้กำหนดให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง $0\text{-}5\text{ A}_{\text{rms}}$ มีความละเอียดในการปรับ $0.01\text{ A}_{\text{rms}}$ ผิดพลาดไม่เกิน 0.5% ของค่าเต็มพิกัด โครงสร้างภายในประกอบด้วยวงจรสวิตชิงของมอสเฟสแบบบริดจ์, วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ และวงจรบ่อนกลับ ดังรูปที่ 4.9 [15]



รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ

4.3.1 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์

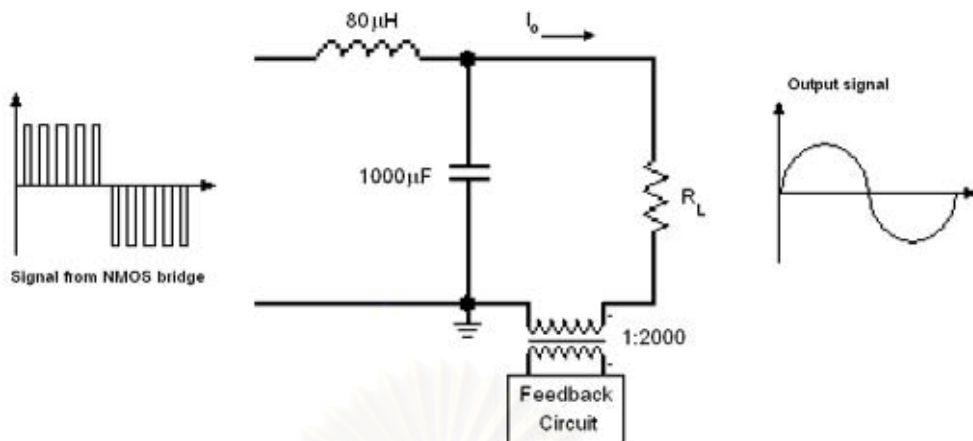
วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ของแหล่งกำเนิดกระแสนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ PWM มีค่ายอด 5 V ทำงานที่ความถี่สวิตชิงประมาณ 20 kHz ใช้มอสเฟตแบบ N-Channel เบอร์ IRF3205 ของบริษัท International Rectifier [16] มีคุณสมบัติรับแรงดันได้สูงสุด 55 V และรับกระแสได้ถึง 110 A มีค่า $R_{DS(on)}$ เท่ากับ 8 มิลลิโห์ม ที่ $V_{GS} = 10 V$ มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ

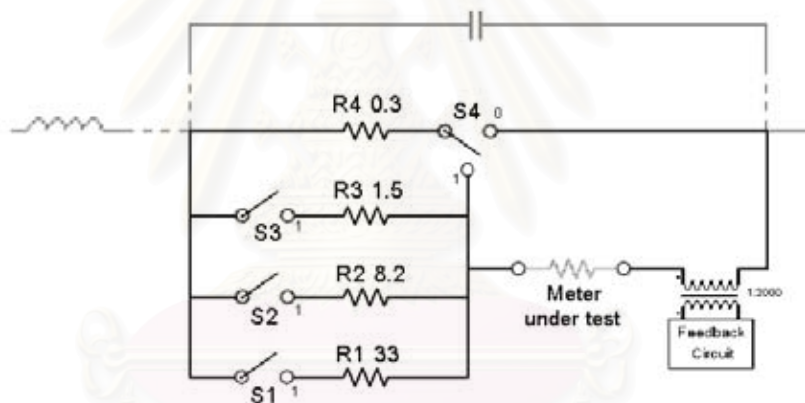
4.3.2 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ

วงจรรองความถี่ผ่านต่ำเป็นวงจรกรองแบบแอลซี ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 80 μH ร่วมกับตัวเก็บประจุแบบโพลีคาร์ขนาด 1000 μF มีความถี่คัตออฟเท่ากับ 563 Hz ลักษณะของสัญญาณดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ

วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำนี้มีการเพิ่มโหนดเป็นตัวต้านทานเพื่อควบคุมค่าความต้านทานขาออกของวงจรเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันรูปไซน์ ตัวต้านทานโหนดที่เพิ่มเข้ามาในวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 4.12



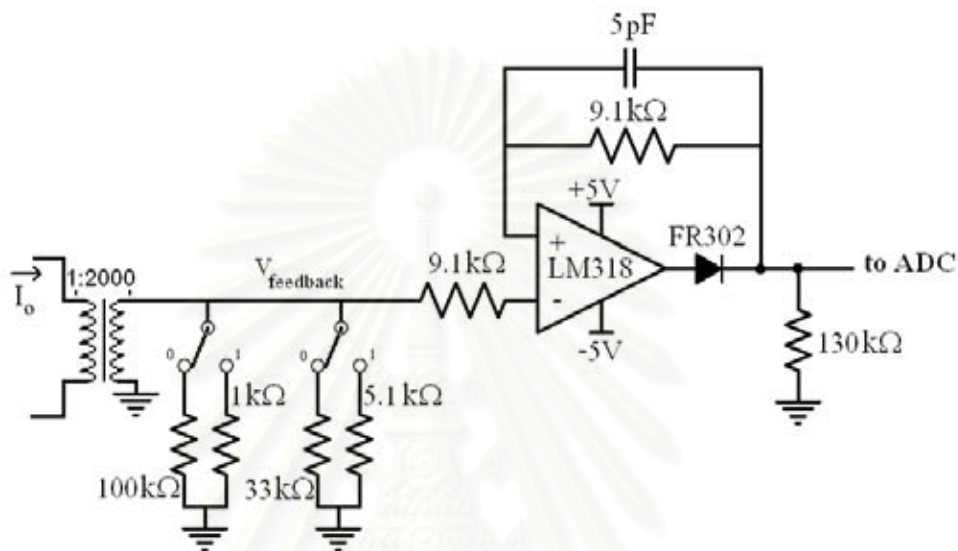
รูปที่ 4.12 การเพิ่มโหนดของส่วนจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ

พิจารณาจากรูปที่ 4.12 กล่าวได้ว่า เมื่อมีการตั้งค่าที่กระแสขนาดต่ำ จะมีการต่อตัวต้านทาน R4 ขนานกับตัวเก็บประจุโดยตรง และมีการกำหนดการสวิตซ์ตัวต้านทาน R1 , R2 และ R3 ให้มีขนาดเหมาะกับการใช้งาน ที่ค่ากระแสต่ำวงจรจึงมีลักษณะเหมือนวงจรแบ่งกระแส ทั้งนี้เพื่อต้องการควบคุมค่าการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เนื่องจากที่ค่าการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดที่สูงหรือต่ำเกินไปล้วนส่งผลทำให้ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกมีค่าสูงเกินมาตรฐาน

4.3.3 วงจรป้อนกลับ

วงจรป้อนกลับของของแหล่งกำเนิดกระแสประกอบด้วยตัวต้านทานต่อคร่อมหม้อแปลงกระแสทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านวงจรบัฟเฟอร์เข้าสู่วงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรบัฟเฟอร์ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM318 และมีการต่อไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Fast-recovery Diode) เพิ่มที่ช่องสัญญาณออกของออปแอมป์เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานก่อนเข้าสู่

วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลมีค่าเป็นบวกเท่านั้น เพื่อป้องกันไม่ให้วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดความเสียหาย เนื่องจากวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถรับค่าแรงดันระหว่าง 0-3.3 V ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจจับค่ายอดของสัญญาณด้วยวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแล้วทำการคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดเก็บไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์หลายๆค่าเพื่อหาค่ากระแสสูงสุดในหนึ่งคาบ จากนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลง m_a ใหม่เพื่อกำหนดสัญญาณ PWM ที่เหมาะสมให้วงจรสวิตซ์แบบฟูลบริดจ์ต่อไป วงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าต่ำดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าต่ำ

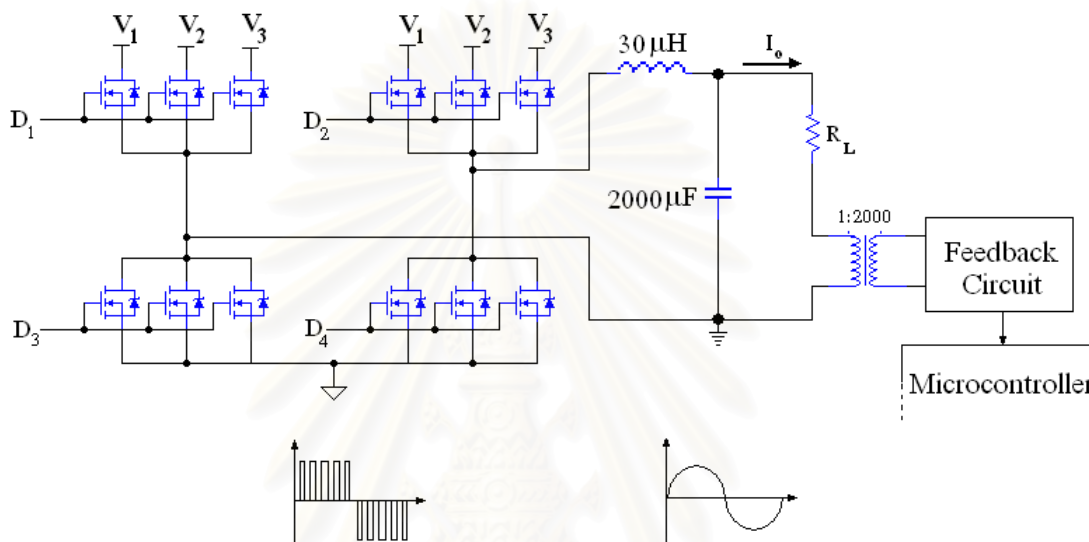
จากรูปที่ 4.13 เนื่องจากสัญญาณกระแสที่เข้ามามีค่าระหว่าง 0.01 – 5 A_{rms} ซึ่งเป็นช่วงค่าที่ห่างกันพอสมควร วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิตภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถแปลงค่าได้อย่างถูกต้องเพียงพอ วงจรตรวจจับค่ายอดจึงมีการกำหนดค่าความต้านทานในการแปลงค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแสเป็นค่าแรงดันที่เหมาะสมเพื่อเข้าสู่วงจรเพื่อให้วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการอ่านค่ากระแสได้อย่างถูกต้องต่อไป ตัวต้านทานที่ตกคร่อมหม้อแปลงมีการสวิตซ์และกำหนดค่าสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การแบ่งช่วงค่ากระแสและความต้านทานในแต่ละช่วงของวงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าต่ำ

ช่วงค่ากระแส (A_{rms})	สัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์	ตัวต้านทานที่ต่อขนาน	ค่าความต้านทาน	ช่วงค่าแรงดันเข้าสู่วงจร ADC
1.00-5.00	11	1 kΩ // 5.1 kΩ	836 Ω	0.59 V - 2.96 V
0.90-0.99	10	1 kΩ // 33 kΩ	970 Ω	0.61 V - 0.68 V
0.17-0.89	01	100 kΩ // 5.1 kΩ	4,852 Ω	0.58 V - 3.05 V
0.04-0.16	00	100 kΩ // 33 kΩ	24,812 Ω	0.70 V - 2.81 V

4.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง

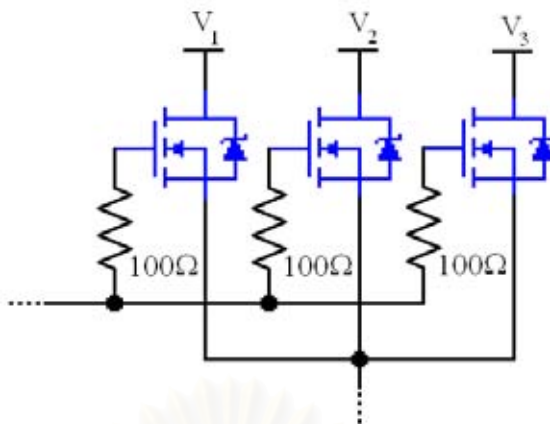
การออกแบบแหล่งกำเนิดกระแสไฟสลับในช่วงค่าสูงกำหนดให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง $5-40 A_{rms}$ มีความละเอียดในการปรับ $0.1 A_{rms}$ ผิดพลาดไม่เกิน 0.5% ของค่าเต็มพิกัด โครงสร้างภายในประกอบคล้ายวงจรสร้างสัญญาณกระแสในช่วงค่าต่ำ โดยประกอบด้วยวงจรสวิตชิงของมอสเฟสแบบบริดจ์, วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ และวงจรป้อนกลับ เพียงแต่วงจรสวิตชิงของแหล่งกำเนิดกระแสไฟสลับในช่วงค่าสูงนี้มีการต่อขานามอสเฟตเพื่อรับกระแสเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีการปรับแปลงส่วนประกอบอื่นๆให้มีความเหมาะสมกับการทำงานในย่านนี้ โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าสูง

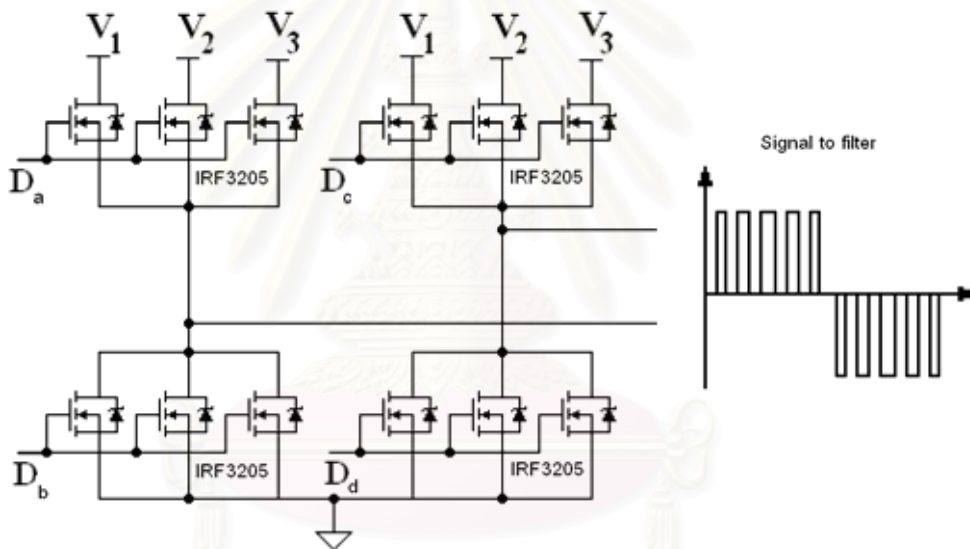
4.4.1 วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์

วงจรสวิตชิงแบบฟูลบริดจ์ของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าสูงนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ PWM มีค่ายอด $5 V$ ทำงานที่ความถี่สวิตชิงประมาณ $20 kHz$ ใช้มอสเฟตแบบ N-Channel เมอร์ IRF3325 ของบริษัท International Rectifier เช่นเดียวกับโครงสร้างวงจรของแหล่งกำเนิดกระแสสลับช่วงค่าต่ำ แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสรูปไซน์นี้ต้องการสร้างกระแสที่มีค่ายอดสูงสุดถึง $56.6 A_p$ ($40 A_{rms}$) จึงมีการใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด $+5 V$ ที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด $30 A$ ร่วมกัน 3 ชุด เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอ แหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 ชุดเป็นแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงจึงไม่สามารถต่อรวมกันได้โดยตรงเพราะจะทำให้วงจรคุมค่าของแหล่งจ่ายไฟตัวอื่นทำงานผิดพลาดได้ จึงทำการต่อแหล่งจ่ายไฟด้านบวกของแหล่งจ่ายไฟแต่ละชุดเข้ากับมอสเฟตแต่ละตัวดังรูปที่ 4.15 โดยที่ใช้กราวด์ร่วมกัน เนื่องจากมอสเฟตมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก เมื่อมอสเฟตตัวใดมีกระแสไหลผ่านมากกว่าจะทำให้เกิดความร้อนและมีความต้านทานภายในสูงขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านตัวมันลดลง จึงเกิดการสมดุลย์ของมอสเฟตที่ทำการต่อขนานทั้ง 3 ตัว



รูปที่ 4.15 การต่อแหล่งจ่ายไฟแยกกับมอสเฟตแต่ละตัว

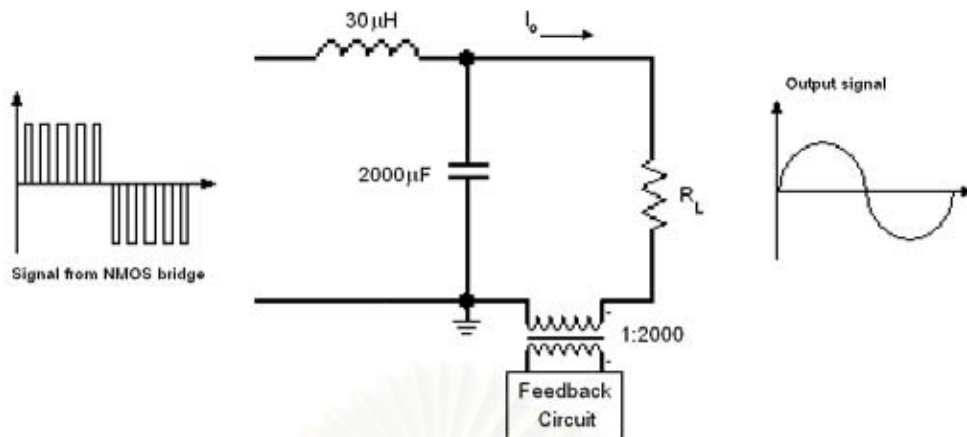
วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าสูงมีลักษณะการต่อวงจรและรูปสัญญาณดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าสูง

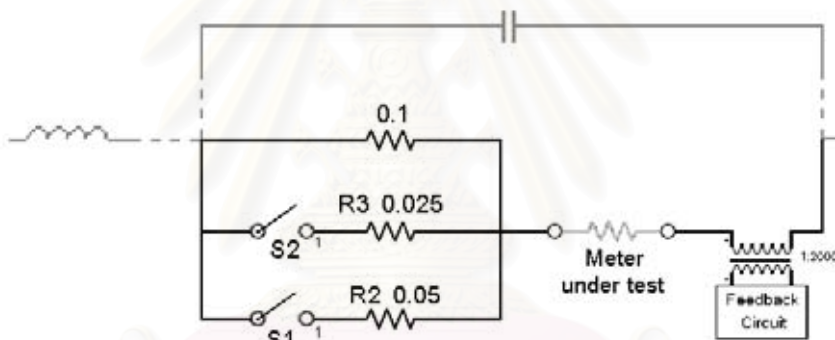
4.4.2 วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ

วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำเป็นวงจรกรองแบบแอลซี ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 30 μ H ร่วมกับตัวเก็บประจุแบบโพลีคาร์บอนขนาด 2000 μ F โดยมีความถี่คัตออฟเท่ากับ 650 Hz ลักษณะของสัญญาณดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 วงจรรองความถี่ผ่านต่ำของส่วนจ่ายกระแสช่วงค่าสูง

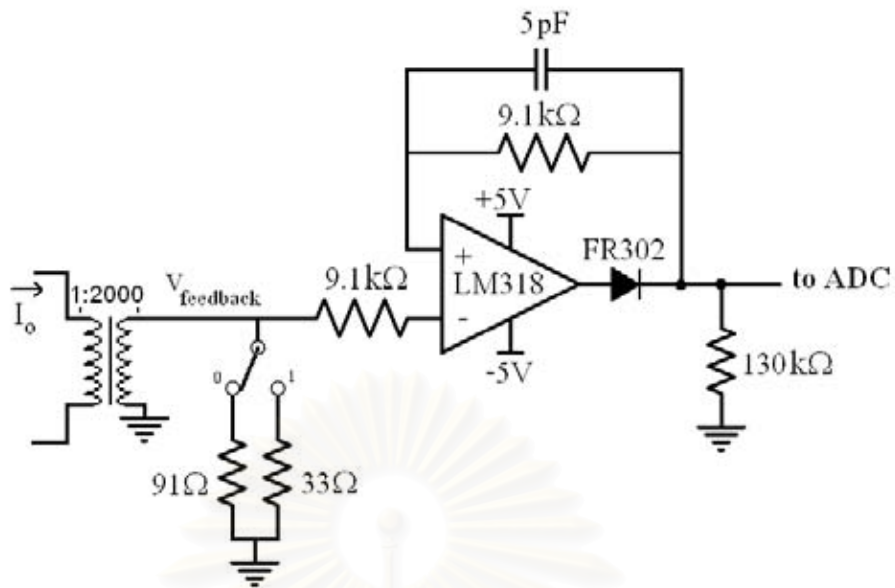
วงจรรองความถี่ผ่านต่ำของแหล่งจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าสูงนี้มีการเพิ่มโหลดเป็นตัวต้านทานเพื่อควบคุมค่าความต้านทานขาออกของวงจรเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเพิ่มโหลดของส่วนจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง

4.4.3 วงจรป้อนกลับ

วงจรป้อนกลับของของแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสช่วงค่าสูงมีลักษณะเดียวกันกับวงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ เพียงแต่เปลี่ยนค่าตัวต้านทานคร่อมห้อแปลงกระแส ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 วงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแสช่วงค่าสูง

การกำหนดค่าความต้านทานในการแปลงค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแสเป็นค่าแรงดันเข้าสู่วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีการกำหนดค่าตัวต้านทานดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 การแบ่งช่วงค่ากระแสและความต้านทานในแต่ละช่วงของวงจรป้อนกลับของแหล่งกำเนิดกระแส ช่วงค่าสูง

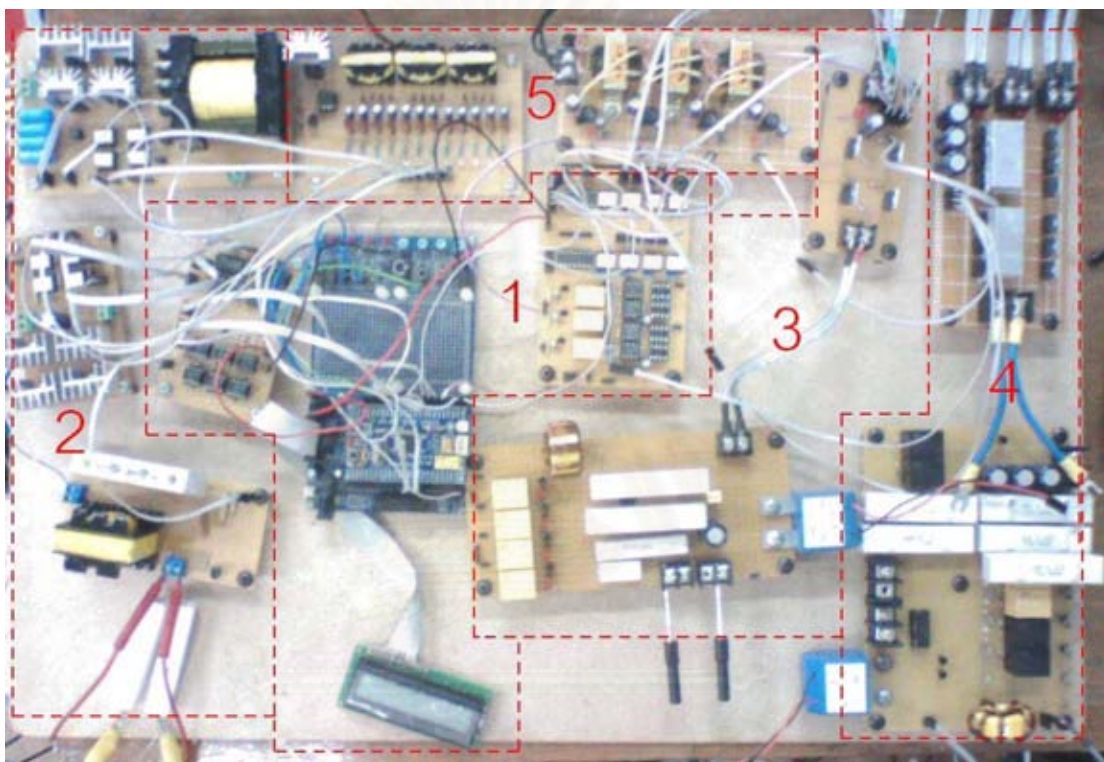
ช่วงค่ากระแส (A_{rms})	สัญญาณจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์	ค่าความต้านทาน	ช่วงค่าแรงดันเข้าสู่ วงจร ADC
15-40	1	33 Ω	0.96 V - 2.90 V
5-15	0	91 Ω	1.05 V - 2.80 V

บทที่ 5

การทดสอบและสรุปผล

5.1 วงจรที่ออกแบบ

เมื่อประกอบวงจรสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆทั้งหมดแล้วนั้นจะได้วงจรที่มีลักษณะตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสที่ออกแบบ

จากรูปสามารถแบ่งวงจรออกเป็นส่วนต่างๆได้ดังนี้

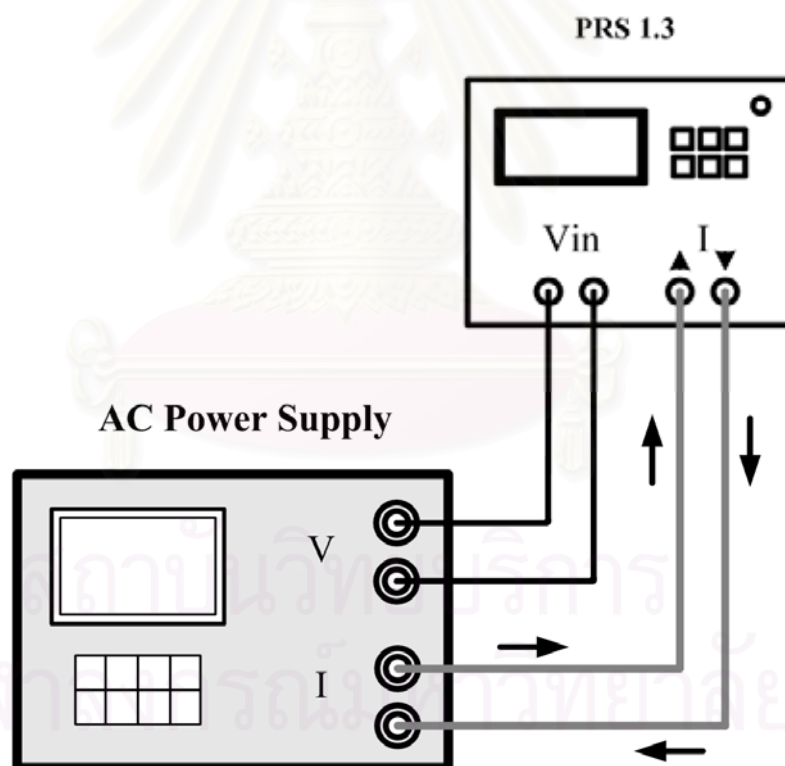
- วงจรหมายเลข 1 เป็นส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน วงจรขับมอเตอร์และวงจรป้อนกลับของส่วนสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์
- วงจรหมายเลข 2 เป็นส่วนของวงจรจ่ายสัญญาณแรงดันรูปไซน์
- วงจรหมายเลข 3 เป็นส่วนของวงจรจ่ายสัญญาณกระแสรูปไซน์ช่วงค่าต่ำ
- วงจรหมายเลข 4 เป็นส่วนของวงจรจ่ายสัญญาณกระแสรูปไซน์ช่วงค่าสูง
- วงจรหมายเลข 5 เป็นแหล่งจ่ายไฟเพื่อทำหน้าที่ขับเคลื่อนของมอเตอร์

5.2 ผลทดสอบการสร้างสัญญาณ

การทดสอบการสร้างสัญญาณของแหล่งจ่ายพลังงานที่ได้ออกแบบสามารถทำได้โดยให้วงจรจ่ายพลังงานที่ออกแบบทำการจ่ายพลังงานให้กับเครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นของบริษัท EMH Energy Messtechnik GmbH รุ่น PRS 1.3 โดยมีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดังนี้

1. ช่วงค่าแรงดันที่วัดได้คือ $30 V_{\text{rms}}$ ถึง $480 V_{\text{rms}}$ ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05% ของค่าที่วัดได้
2. ช่วงค่ากระแสที่วัดได้คือ $1 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ถึง $120 \text{ A}_{\text{rms}}$ ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05% ของค่าที่วัดได้
3. ช่วงค่าของเฟสที่วัดได้คือ 0-360 องศา ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05% ของค่าเต็มพิกัด (คิดเป็น 0.18 องศา)
4. ความผิดพลาดในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 0.05%

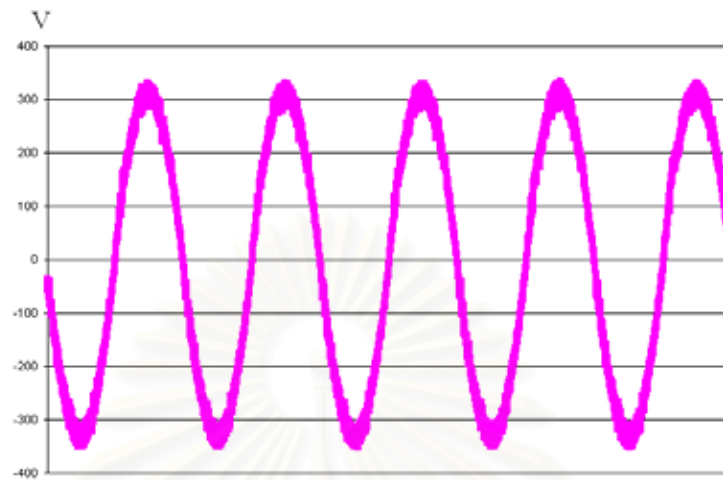
การทดสอบสมบัติของวงจรที่ออกแบบสามารถทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การต่อวงจรเพื่อทดสอบวงจรแหล่งจ่ายพลังงานที่ออกแบบ

5.2.1 รูปสัญญาณแรงดันรูปไซน์

การทดสอบการสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์ของแหล่งจ่ายพลังงานที่ค่าแรงดัน $220 V_{rms}$ โดยใช้ ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS3014B มีลักษณะดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปแสดงสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่ค่าแรงดัน $220 V_{rms}$

5.2.2 ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดัน

ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดันนี้กำหนดค่าความผิดพลาดไว้ไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด การทดสอบทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 โดยตั้งค่าแรงดันค่าต่างๆที่ต้องการทดสอบให้กับวงจรจ่ายพลังงานที่ได้ออกแบบ และให้เครื่อง PRS 1.3 วัดค่าแรงดันที่ได้ จากนั้นจึงคำนวณเป็นความผิดพลาดในการสร้างสัญญาณแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าเต็มพิกัด (Voltage error) ตามสมการดังนี้

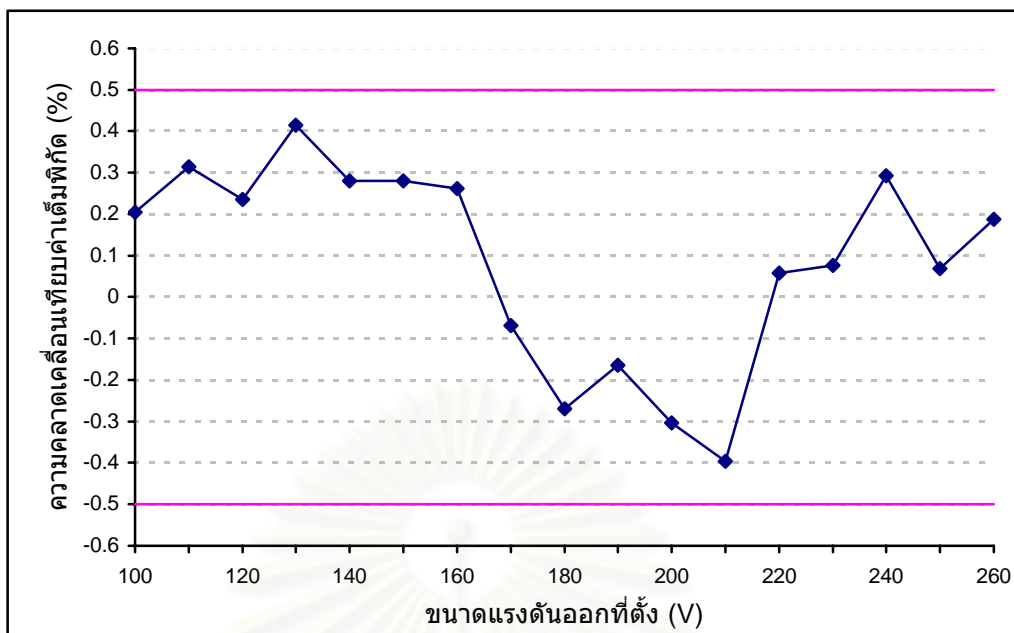
$$\text{Voltage error (\%)} = \frac{\text{Measure value} - \text{Set value}}{\text{Full scale value}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5.1}$$

โดยที่ Measure value คือ ค่าแรงดันที่วัดได้จากเครื่อง PRS 1.3

Set value คือ ค่าที่ตั้งจากวงจรจ่ายพลังงาน

Full scale value คือ ค่าเต็มพิกัดของขนาดสัญญาณแรงดันที่สร้างได้ ซึ่งในที่นี้มีค่าเป็น $260 V_{rms}$

ผลการทดสอบในช่วงค่าแรงดันออกตั้งแต่ $100 - 260 V_{rms}$ (ตั้งค่ากระแสเป็น $0 A_{rms}$) เมื่อวงจรไม่จ่ายโหลด (ไม่ถือว่าเครื่อง PRS 1.3 และอุปกรณ์ภายในวงจรจ่ายพลังงานเป็นโหลด) ทดสอบที่ค่าความถี่ 50 Hz ได้ผลเป็นดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณแรงดันออก

จากการทดสอบเพื่อคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณแรงดันออก พบว่าวงจรมีความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดันอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด

5.2.3 ความแม่นยำในการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ

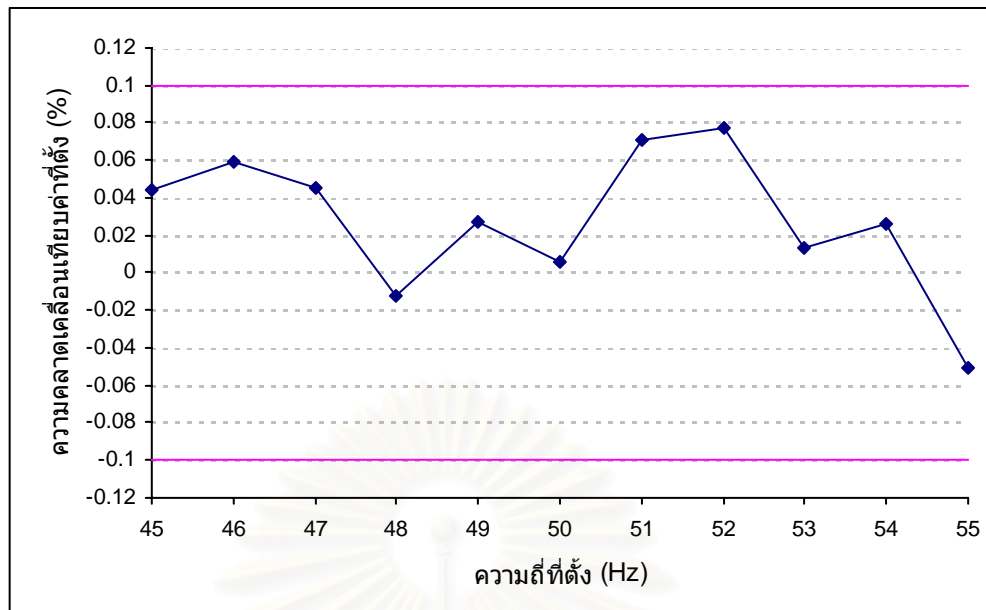
การตั้งค่าความถี่ของสัญญาณกำหนดความคลาดเคลื่อนไว้ไม่เกิน $\pm 0.1\%$ ของค่าที่แสดง การทดสอบทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 โดยตั้งค่าแรงดันไว้คงที่ที่ $220 V_{rms}$ ทำการทดลองปรับความถี่เป็นค่าต่างๆ ระหว่าง 45.0 Hz ถึง 55.0 Hz จากนั้นจึงคำนวณเป็นความคลาดเคลื่อนในการสร้างความถี่เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (Frequency error) ตามสมการดังนี้

$$\text{Frequency error (\%)} = \frac{\text{Measure value} - \text{Set value}}{\text{Set value}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5.2}$$

โดยที่ Measure value คือ ค่าความถี่ที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ PRS 1.3

Set value คือ ค่าความถี่ที่ตั้งไว้

ผลการทดสอบในช่วงค่าความถี่ตั้งแต่ $45.0 - 55.0 \text{ Hz}$ ที่แรงดัน $220 V_{rms}$ และกระแสเป็น $0 A_{rms}$ ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้



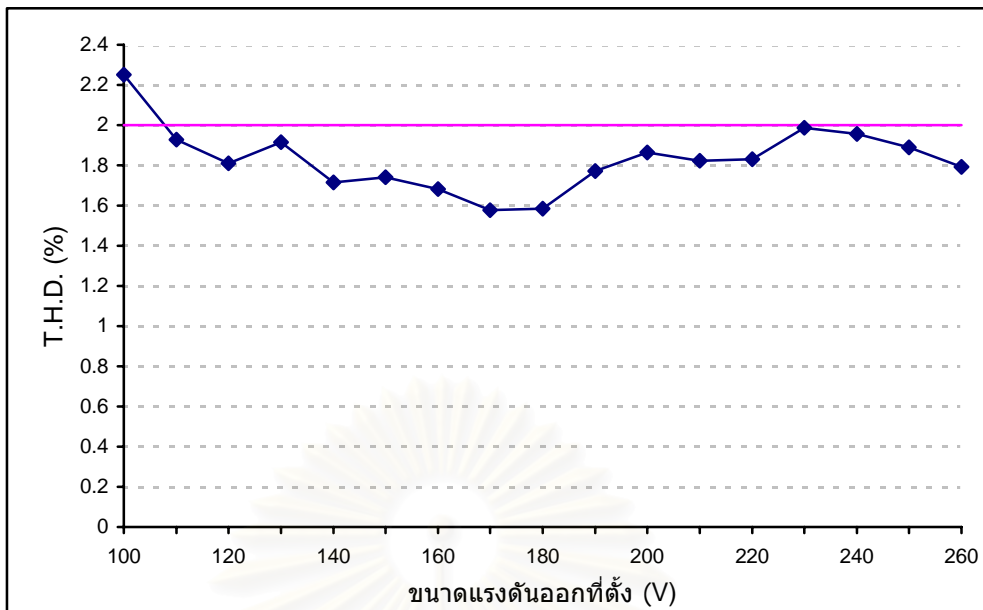
รูปที่ 5.5 กราฟแสดง ความคลาดเคลื่อนของการสร้างควมถี่

การสร้างควมถี่ของไมโครคอนโทรลเลอร์นำค่ามาจากการโปรแกรมไว้ในหน่วยควมจำ จากการทดสอบพบว่าแหล่งจ่ายสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์มีความแม่นยำในการต้งค่าควมถี่ของสัญญาณอยู่ตามมาตรฐานที่กำหนด

5.2.4 ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออก

การวัดควมเพี้ยนของสัญญาณออกในที่นี้หมายถึง ควมเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion ; THD) ซึ่งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดมาตรฐานของสัญญาณออกไว้ไม่เกิน 2% การทดสอบทำได้โดยใช้เครื่อง Dynamic signal analyzer รุ่น 35670A ของบริษัท Aligent [17] โดยทำการทดสอบค่าสัญญาณแรงดันระหว่าง $100 V_{rms}$ ถึง $260 V_{rms}$ โดยไม่จ่ายกระแส (ค่ากระแสเท่ากับ $0 A_{rms}$) ทำการทดสอบถึงค่าฮาร์โมนิกที่ 20 ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของแรงดันออกที่ค่าต่างๆ

จากการทดสอบความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออกพบว่าที่ค่าแรงดันออกค่าต่ำกว่า 110 V_{rms} สัญญาณแรงดันออกมีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมสูงเกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งอาจเนื่องมาจากที่ช่วงค่าดังกล่าวมีค่ามอดูเลตเชิงแอมพลิจูด m_a ที่ต่ำเกินไป ทำให้มีพัลส์ที่แคบ เมื่อสัญญาณพัลส์ถูกแปลงรูปสัญญาณด้วยวงจรต่างๆหลายวงจรจึงเกิดการเพี้ยนของสัญญาณได้ง่ายกว่าพัลส์ที่ค่ามอดูเลตเชิงแอมพลิจูดสูงขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจากสัญญาณไซน์ที่นำไปเปรียบเทียบกับในวงจรป้อนกลับมีขนาดไม่ใหญ่พอ โดยสัญญาณไซน์ที่นำไปเปรียบเทียบกับสร้างจากวงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีขนาด 10 บิต ทำให้สัญญาณไซน์ที่มีขนาดเล็กอาจไม่มีความละเอียดพอ ทำให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณแรงดันออกมีค่าสูงเกินที่มาตรฐานกำหนด

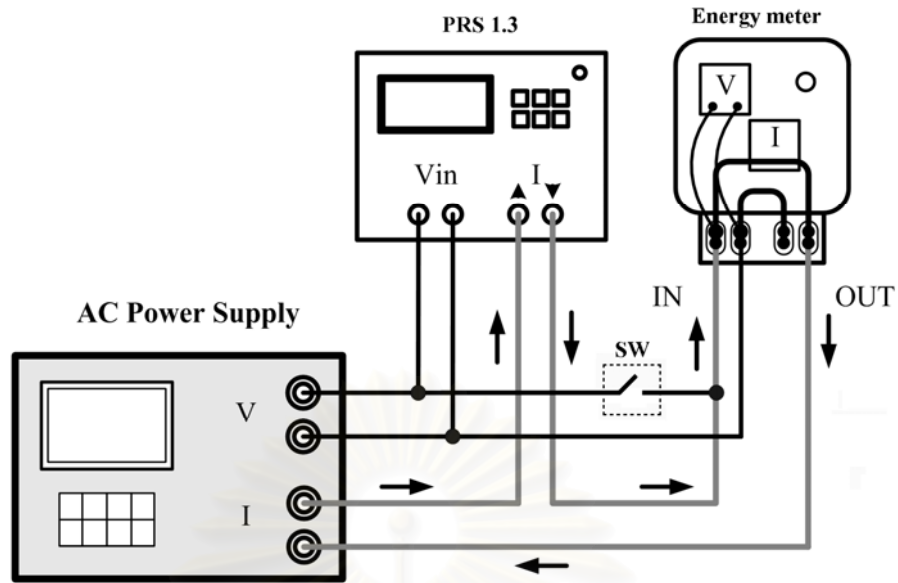
5.2.5 การคงค่าแรงดัน

ในการวัดการคงค่าแรงดันของวงจรกำหนดค่าไว้ไม่เกิน 0.1% ทดสอบโดยการใช้โหลดเป็นมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า ทำได้โดยต่อวงจรตามรูปที่ 5.7 การทดสอบมีการสับสวิตช์ SW เพื่อทดสอบการทำงานระหว่างกรณีที่มีโหลดและกรณีที่ไม่มีโหลดในวงจร เพื่อนำมาคำนวณค่าการคงค่าแรงดัน (Voltage regulation) ตามสมการดังนี้

$$\text{Voltage regulation (\%)} = \frac{V_{n1} - V_{n2}}{V_{n1}} \times 100 \tag{สมการที่ 5.3}$$

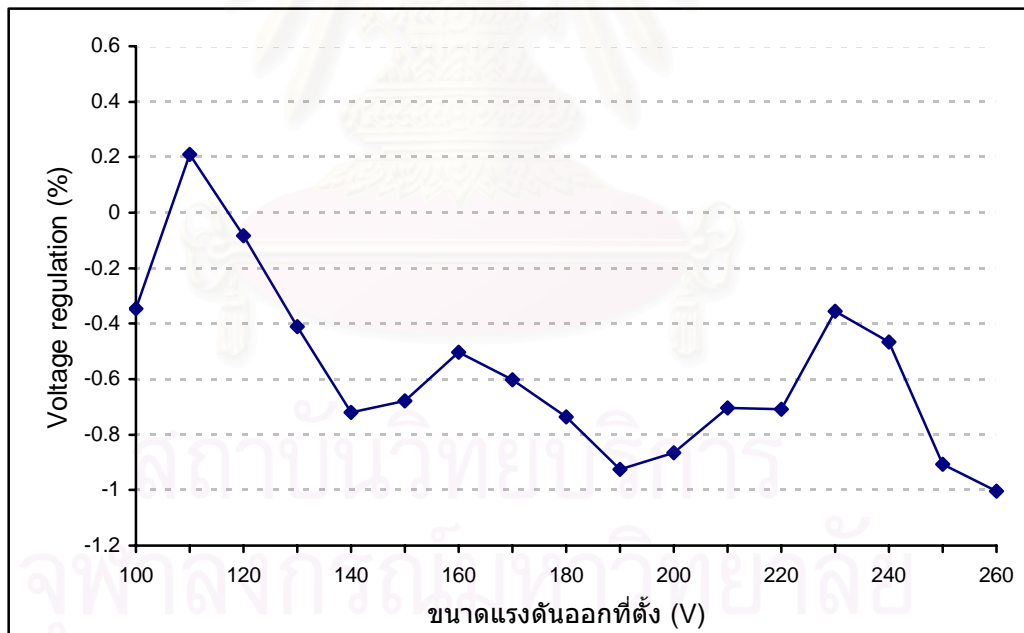
โดยที่ V_{n1} คือ แรงดันขาออกของวงจรเมื่อไม่มีโหลด

V_{n2} คือ แรงดันขาออกของวงจรเมื่อมีโหลดพิกัดมาต่อ



รูปที่ 5.7 การต่อวงจรเพื่อวัดการคงค่าแรงดันของวงจรจ่ายสัญญาณแรงดัน

ผลการทดสอบในช่วงค่าแรงดันออกตั้งแต่ 100 – 260 V_{rms} เมื่อวงจรไม่จ่ายกระแส (กระแสเป็น 0 A_{rms}) ได้ผลเป็นดังนี้



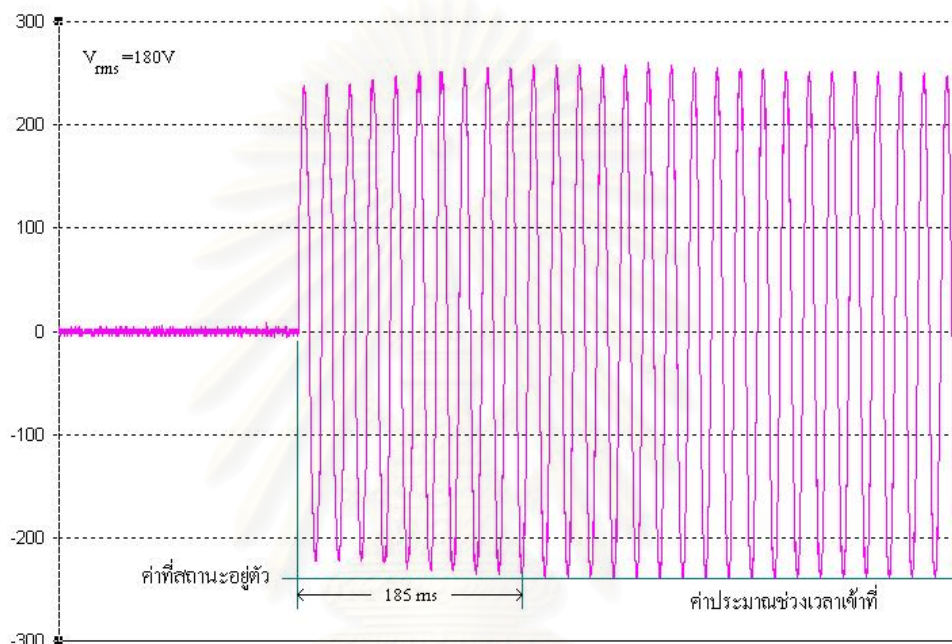
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการคงค่าแรงดันของสัญญาณแรงดันออกที่ค่าต่างๆ

จากการทดสอบพบว่าวงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์มีการคงค่าแรงดันที่แย่ โดยเฉพาะในช่วงค่าแรงดันสูงเกิน 230 V_{rms} เนื่องจากวงจรกรองเป็นลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ การเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดทำให้ค่าแรงดันด้านออกมีขนาดเปลี่ยนแปลง แม้จะมีการควบคุมโหลดของแรงดันด้านออกด้วยการต่อตัวต้านทาน

ที่มีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าอยู่ช่วงหนึ่ง แต่เมื่อต่อมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าเข้าไปก็ ยังทำให้อิมพีแดนซ์รวมมีการเปลี่ยนแปลงจนสังเกตเห็นได้ชัด

5.2.6 ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก

ช่วงเวลาเข้าที่ของวงจรสามารถวัดได้โดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดที่แรงดันขาออกของวงจร แล้วจับภาพ ขณะเริ่มสร้างสัญญาณ โดยทำการทดสอบที่ค่าแรงดัน $180\text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งเป็นช่วงค่าที่มีลักษณะการเข้าสู่ค่าคงที่ของ สัญญาณที่เห็นได้ค่อนข้างชัดเจน ได้สัญญาณออกขณะเริ่มสร้างสัญญาณดังรูปที่ 5.9

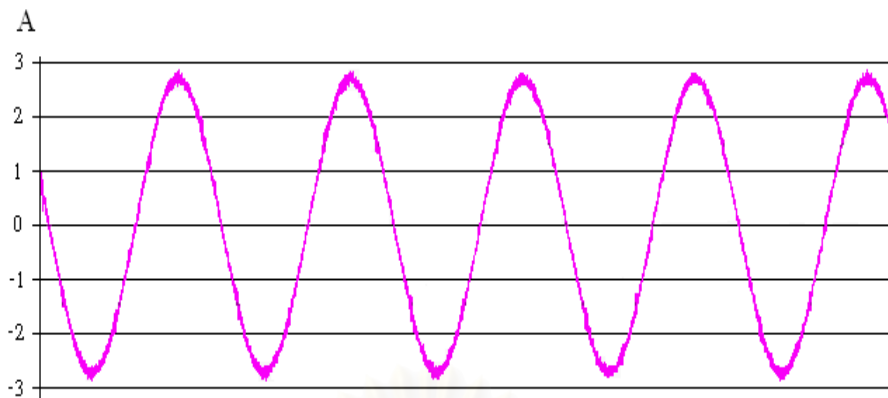


รูปที่ 5.9 ค่าประมาณช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดัน

จากการทดสอบพบว่าวงจรมีช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณน้อยกว่า 0.2 วินาทีตามที่กำหนด เนื่องจากมีการโปรแกรมไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ให้วงจรทำการปรับขนาดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่อัตราส่วนสูงภายในช่วง 9 พัลส์แรก หลังจากนั้นจะมีการปรับอย่างละเอียดในค่าต่ำ ทำให้ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณ อยู่ในช่วงที่กำหนด

5.2.7 รูปสัญญาณกระแสรูปไซน์

การทดสอบการสร้างสัญญาณกระแสรูปไซน์ของแหล่งจ่ายพลังงานที่ค่ากระแส 2 A_{rms} โดยใช้ ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS3014B มีลักษณะดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 รูปแสดงสัญญาณกระแสรูปไซน์ที่ค่ากระแส $2 A_{\text{rms}}$

5.2.8 ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าสูง)

ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าสูงนี้กำหนดค่าความผิดพลาดไว้ไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด การทดสอบทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 โดยตั้งค่ากระแสค่าต่างๆที่ต้องการทดสอบให้กับวงจรจ่ายพลังงานที่ได้ออกแบบ และให้เครื่อง PRS 1.3 วัดค่ากระแสที่ได้ จากนั้นจึงคำนวณเป็นความผิดพลาดในการสร้างสัญญาณกระแสเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าเต็มพิกัด (Current error) ตามสมการดังนี้

$$\text{Current error (\%)} = \frac{\text{Measure value} - \text{Set value}}{\text{Full scale value}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5.4}$$

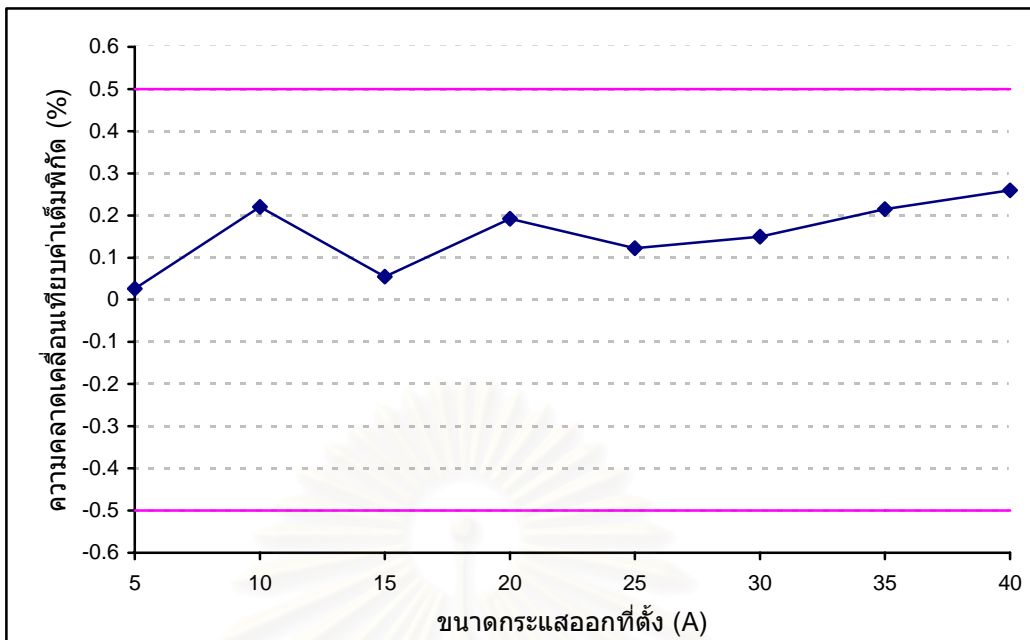
โดยที่ Measure value คือ ค่ากระแสแสดงที่วัดได้จากเครื่อง PRS 1.3

Set value คือ ค่ากระแสที่ตั้งจากวงจรจ่ายพลังงาน

Full scale value คือ ค่าเต็มพิกัดของขนาดสัญญาณกระแสที่สร้างได้ ในที่นี้มีค่าเป็น $40 A_{\text{rms}}$

สำหรับผลการทดสอบความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแสสำหรับช่วงค่ากระแสแสดงตั้งแต่ $5 - 40 A_{\text{rms}}$ ได้ผลการทดสอบดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

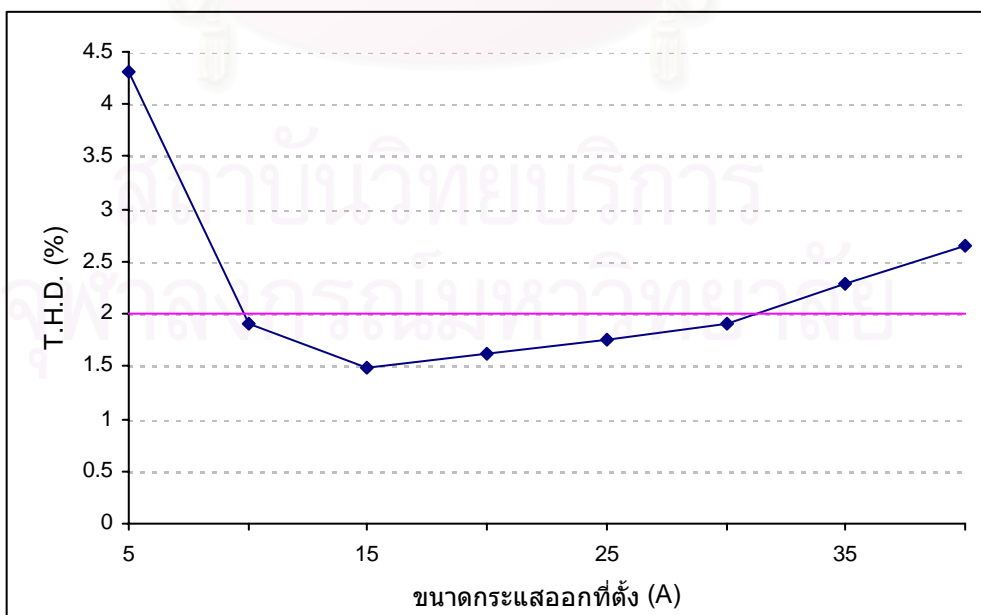


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง

จากการทดสอบพบว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสรูปไซน์มีความคลาดเคลื่อนของการจ่ายสัญญาณกระแสในช่วงค่าสูงอยู่ระหว่าง 0.03% - 0.26% ซึ่งอยู่ช่วงค่าที่ยอมรับได้ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 0.5%

5.2.9 ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าสูง)

การวัดความเพี้ยนของสัญญาณออกทำได้โดยใช้เครื่อง Dynamic signal analyzer รุ่น 35670A ของบริษัท Agilent โดยทำการทดสอบค่าสัญญาณกระแสระหว่าง 5 A_{rms} ถึง 40 A_{rms} โดยทำการทดสอบถึงค่าฮาร์มอนิกที่ 20 ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

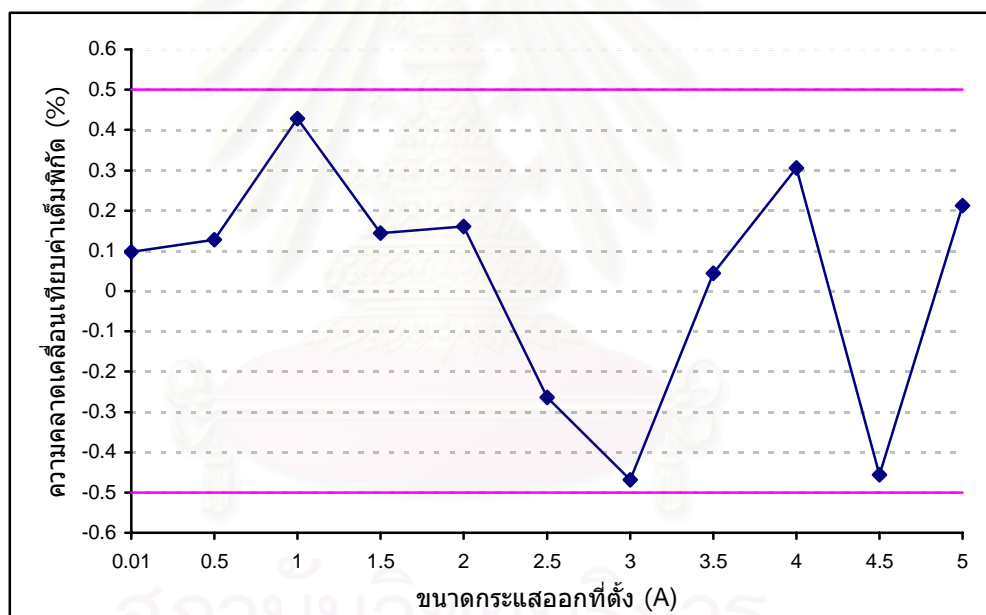


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสช่วงค่าสูง

จากการทดสอบพบว่าวงจรสร้างกระแสในช่วงค่าสูงมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสูงกว่ามาตรฐานที่ค่าเริ่มต้นและค่าสูงสุด อาจเนื่องมาจากมีอัตราการผลิตเชิงแอมพลิจูดที่ต่ำเกินไปในช่วงกระแสต่ำกว่า 10 A_{rms} ซึ่งทำให้สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์มีความเพี้ยนเมื่อผ่านวงจรมอดูเลตของมอสเฟต ในขณะที่ช่วงค่ากระแสสูงกว่า 30 A_{rms} มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสูงเกินมาตรฐานอาจเนื่องมาจากอัตราการผลิตเชิงแอมพลิจูดที่สูงเกินไปทำให้เกิดความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสูงเกินไปในช่วงนี้

5.2.10 ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าต่ำ)

ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำกำหนดค่าความผิดพลาดไว้ไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด การทดสอบทำได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 โดยตั้งค่ากระแสค่าต่างๆที่ต้องการทดสอบให้กับวงจรจ่ายพลังงานที่ได้ออกแบบ และให้เครื่อง PRS 1.3 วัดค่ากระแสที่ได้ จากนั้นจึงคำนวณเป็นความผิดพลาดในการสร้างสัญญาณกระแสเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าเต็มพิกัด (Current error) ตามสมการดังนี้ 5.3 โดยมีค่าเต็มพิกัดของขนาดสัญญาณกระแสที่สร้างได้ (Full scale value) ในที่นี้เป็น 5 A_{rms} โดยผลการทดสอบในช่วงค่ากระแสออกตั้งแต่ 0.01 – 5 A_{rms} ได้ผลดังนี้

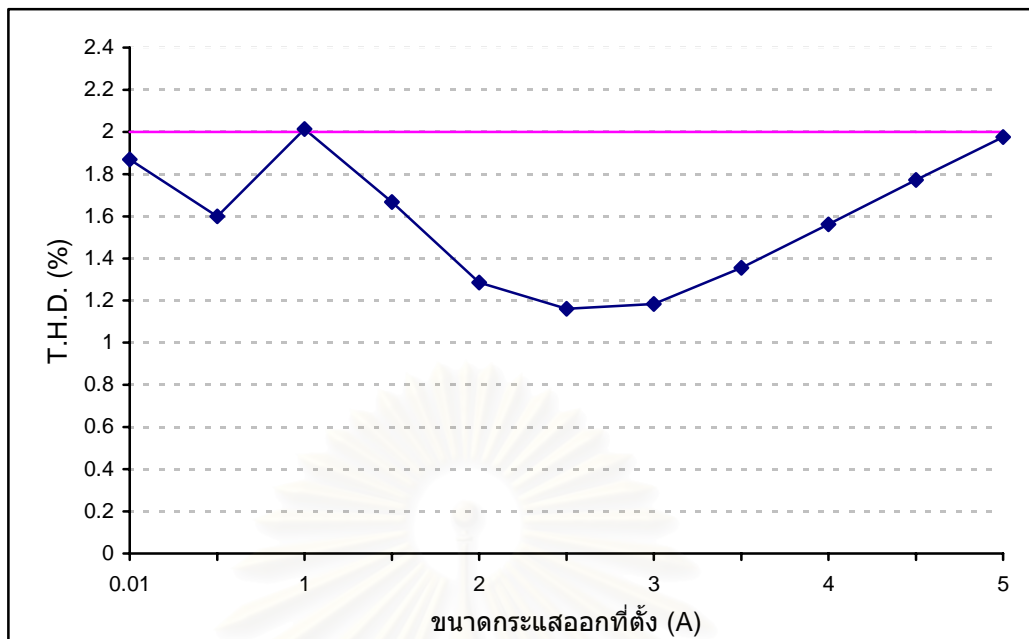


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ

จากการทดสอบพบว่าวงจรสร้างสัญญาณกระแสในช่วงค่าต่ำมีการสร้างสัญญาณกระแสออกที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

5.2.11 ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าต่ำ)

การวัดความเพี้ยนของสัญญาณกระแสออกในช่วงค่าต่ำนี้มีการทดลองและกำหนดมาตรฐานเช่นเดียวกับในค่ากระแสสูงตามหัวข้อ 5.2.7 โดยกำหนดมาตรฐานความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสออกไม่เกิน 2% จากการทดสอบค่าสัญญาณกระแสระหว่าง 0.01 A_{rms} ถึง 5 A_{rms} ทำการทดสอบถึงค่าฮาร์มอนิกที่ 20 ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

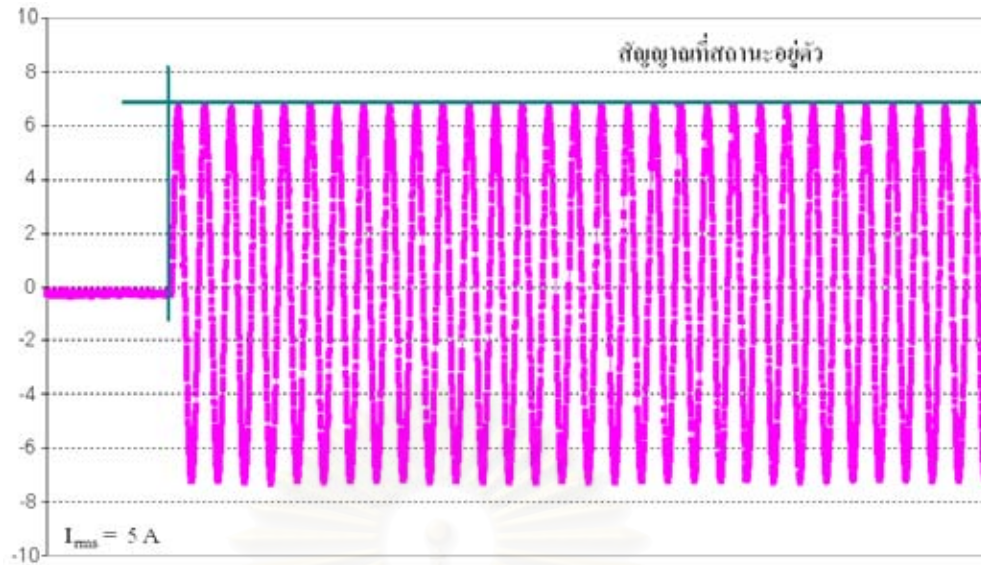


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำ

จากการทดสอบพบว่าวงจรสร้างสัญญาณกระแสช่วงค่าต่ำมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกมากกว่ามาตรฐานเล็กน้อยในช่วงค่ากระแสประมาณ $1 A_{rms}$ อาจเนื่องมาจากค่ามอดูเลตเชิงแอมพลิจูด m_a ที่น้อยเกินไปในช่วงดังกล่าว ซึ่งเป็นผลทำให้มีพัลส์ในการสร้างสัญญาณที่แคบและอาจมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อออกจากวงจรบริดจ์ของมอสเฟตได้ง่ายกว่าช่วงพัลส์กว้าง จึงส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกเกินกว่ามาตรฐานในช่วงค่ากระแสออกประมาณ $1 A_{rms}$

5.2.12 ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออก

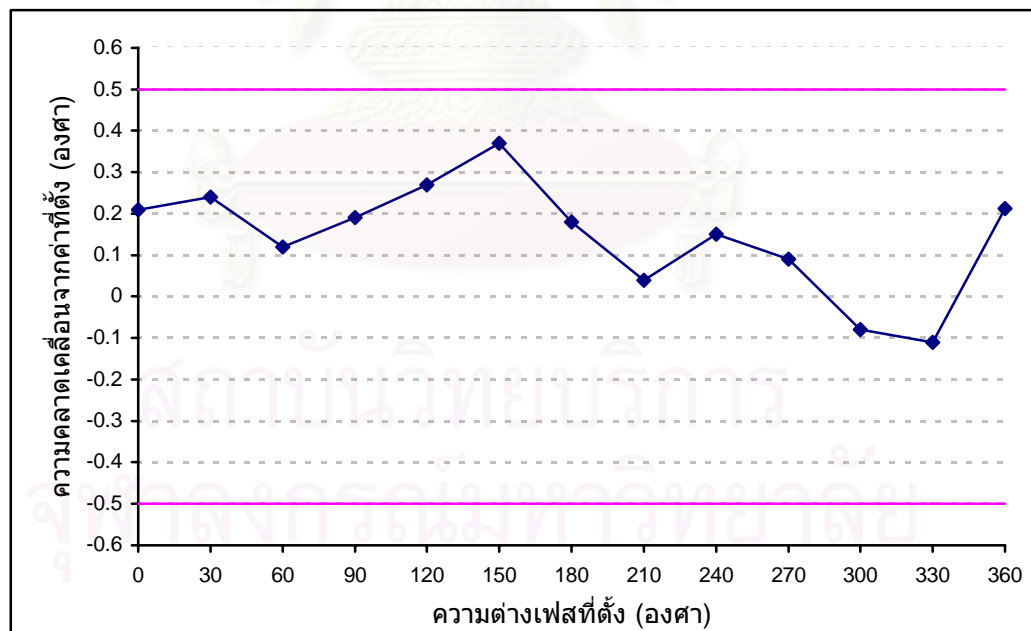
ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออกกำหนดไว้ไม่เกิน 20 ms วัดได้โดยใช้หม้อแปลงกระแสต่ออนุกรมเข้ากับแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสรูปไซน์ และต่อโหลดตัวต้านทานเข้ากับออสซิลโลสโคป จากนั้นจึงจับภาพขณะเริ่มสร้างสัญญาณกระแส โดยทำการทดสอบที่ค่ากระแส $5 A_{rms}$ ได้สัญญาณออกขณะเริ่มสร้างสัญญาณดังรูปที่ 5.15 จากการทดสอบพบว่าสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่สร้างออกมา เมื่อผ่านวงจรรองความถี่ต่ำแล้วเกิดการเหนี่ยวนำเกิดเป็นสัญญาณกระแสรูปไซน์ที่มีค่าคงที่ตั้งแต่พัลส์แรก ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ว่าช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแสไม่เกิน 20 ms



รูปที่ 5.15 ค่าประมาณช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแส

5.2.13 ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออก

ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออกกำหนดความผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา ทดสอบโดยการต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 กำหนดจุดทดสอบที่ขนาดแรงดัน $220 V_{rms}$ และขนาดกระแส $2 A_{rms}$ จากนั้นจึงปรับขนาดความต่างเฟสต่างๆกันในช่วง 0-360 องศา ผลที่ได้เทียบกับค่าความต่างเฟสที่ตั้งไว้ตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณออก

จากการทดสอบหาค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแส พบว่าสัญญาณแรงดันมีเฟสนำสัญญาณกระแสอยู่ในแต่ละค่าความถี่โดยเฉลี่ยประมาณ 5 องศา ผลการทดสอบในรูปที่ 5.14 เป็นผลหลังจากมีการชดเชยค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสแล้ว สาเหตุที่ดังต้องมีการชดเชยดังกล่าว

เนื่องจากการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณแรงดันและวงจรสร้างสัญญาณกระแสมีการละเลยเรื่องเฟสของสัญญาณไป การสร้างความต่างเฟสจึงทำเพื่อยืดความต่างเฟสของสัญญาณแรงดันเป็นหลัก แล้วกำหนดเลื่อนสัญญาณกระแสออกไปตามค่าที่กำหนดบวกด้วยค่าชดเชยดังกล่าว เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่า วงจรสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์สามารถสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสที่มีความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าต่างเฟสไม่เกิน ± 0.5 องศา ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้

5.3 สรุป

แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟสลับสำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์ โดยมีการกำหนดความกว้างพัลส์จากการใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ตัดกับสัญญาณควบคุมรูปสามเหลี่ยมแล้วโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่กำหนดสัญญาณควบคุม PWM เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ร่วมกับวงจรบริดจ์ของมอสเฟต สำหรับการสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์ สัญญาณพัลส์บวก-ลบจากวงจรบริดจ์ของมอสเฟตจะถูกขยายจากสัญญาณแรงดันต่ำไปเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันสูงโดยหม้อแปลงความถี่สูง จากนั้นจึงถูกจัดรูปเป็นสัญญาณด้านบวกด้านเดียวด้วยไดโอดที่มีการเรียงกระแสแบบบริดจ์ และถูกจัดรูปสัญญาณอีกครั้งหนึ่งด้วยวงจรบริดจ์ของมอสเฟตที่ถูกกำหนดการทำงานด้วยความถี่ที่ผู้ใช้ป้อน สัญญาณที่ได้จะถูกกรองด้วยวงจรกรองเป็นสัญญาณแรงดันรูปไซน์เพื่อใช้ในการทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า และมีการนำตัวอย่างสัญญาณมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปไซน์มาตรฐานเพื่อป้อนกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ส่วนการสร้างสัญญาณกระแสรูปไซน์แบ่งออกเป็นสองช่วงคือช่วงค่าต่ำที่จ่ายกระแสระหว่าง $0-5 A_{rms}$ และช่วงค่าสูงที่จ่ายกระแสระหว่าง $5-40 A_{rms}$ ทั้งสองช่วงมีโครงสร้างวงจรคล้ายกัน คือมีวงจรมอสเฟตแบบบริดจ์สร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ จากนั้นจึงกรองสัญญาณด้วยวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำเป็นสัญญาณกระแสรูปไซน์เพื่อเข้าสู่มิเตอร์ที่ถูกทดสอบ โดยมีการสุ่มส่งค่าสัญญาณกระแสผ่านวงจรป้อนกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

สัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่สร้างขึ้นต้องมีคุณภาพที่ดีเพียงพอ โดยกำหนดมาตรฐานความแม่นยำผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณไม่เกิน 2% ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณไม่เกิน 0.2 วินาที รวมทั้งต้องสามารถปรับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสได้ที่มีความผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา โดยอุปกรณ์ต้นแบบของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์สำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่ทำการสร้างมีการทดสอบค่าต่างๆตามที่มาตรฐานกำหนดได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ทำการสร้าง

ค่าที่วัด	มาตรฐานที่กำหนด	ผลการทดสอบ
1. ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดัน	ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
2. ความแม่นยำในการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ	ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.1\%$ ของค่าที่แสดง	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
3. ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออก	T.H.D. ของสัญญาณ $< 2\%$	T.H.D. ของสัญญาณมากกว่ามาตรฐานในช่วงแรงดัน $< 110 V_{rms}$
4. การคงค่าแรงดัน	$\leq 0.1\%$	มากกว่าที่มาตรฐานกำหนด
5. ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก	ไม่เกิน 0.2 วินาที	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
6. ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าสูง)	ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
7. ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าสูง)	T.H.D. ของสัญญาณ $< 2\%$	T.H.D. ของสัญญาณมากกว่ามาตรฐานในช่วงกระแส $< 10 A_{rms}$ และ $> 30 A_{rms}$
8. ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าต่ำ)	ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าเต็มพิกัด	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
9. ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าต่ำ)	T.H.D. ของสัญญาณ $< 2\%$	T.H.D. ของสัญญาณมากกว่ามาตรฐานเล็กน้อยค่ากระแสเท่ากับ $1 A_{rms}$
10. ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออก	ไม่เกิน 0.2 วินาที	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด
11. ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออก	ผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5 องศา	อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด

ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์มีองค์ประกอบต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร เช่น สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ต่างๆ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่ทำการสร้าง โดยเฉพาะในด้านความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณ แม้จะมีการแก้ไขในบางส่วน เช่น การแยกกราวด์ระหว่างอุปกรณ์สวิตซ์กับด้านสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น แต่ก็ยังมีผลต่อค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกในบางค่าของสัญญาณอยู่ รวมถึงสมบัติบางอย่างที่ไม่เป็นที่น่าพอใจ ได้แก่ การคงค่าแรงดัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงโหลดของวงจรเมื่อมีการต่อมิเตอร์ที่ถูกทดสอบเพิ่มเข้ามา ซึ่งโดยปกติแล้วมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้ามีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าอยู่ในหน่วย $100k\Omega$ แต่ก็มี การดึงพลังงานส่วนหนึ่งไปใช้ในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรร่วมในมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าด้วย

ทำให้จุดทำงานของวงจรรองซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป ในส่วนนี้มีผลส่วนหนึ่งมาจากวงจรป้อนกลับที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ รวมถึงข้อจำกัดด้านการระบายความร้อนที่ส่งผลให้ค่าบางประการของวงจรเปลี่ยนไปขณะใช้งาน

การพัฒนาเครื่องทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ ด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ น่าจะช่วยกระตุ้นและเป็นแนวทางให้เกิดการตื่นตัวและเห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนาอุปกรณ์นี้ขึ้นมาใช้เองสำหรับกลุ่มผู้ผลิตมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศ ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนในการนำเข้าอุปกรณ์ซึ่งมีราคาสูงจากต่างประเทศ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรติดตั้งวงจรป้องกันสำหรับวงจรจ่ายแรงดันและกระแสรูปไซน์ ทั้งนี้เนื่องจากวงจรนี้ต้องมีการต่อโหลดโดยผู้ใช้งานจึงอาจมีข้อผิดพลาด เช่น ต่อสายสัญญาณแรงดันออกกลับวงจร หรือไม่ได้ต่อสายกระแสครบวงจร หรือต่อโหลดที่มีความต้านทานเกินกำหนดทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสบางค่าได้ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์บางอย่าง เช่น หม้อแปลงความถี่สูง หรือมอสเฟต เกิดความเสียหายได้
2. ในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันรูปไซน์สำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงวงจรเหลือเพียงวงจรสวิตช์แบบบริดจ์ทางฝั่งแรงดันสูงเพียงอย่างเดียว และใช้แหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันสูง อาจทำให้ได้สัญญาณออกที่มีคุณภาพมากขึ้นและลดความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลงได้ เนื่องจากเป็นการตัดความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกที่แผ่มาจากวงจรสวิตช์แบบบริดจ์ด้านแรงดันต่ำและหม้อแปลงความถี่สูง แต่การทดลองอาจมีอันตรายจากการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันสูง จึงต้องมีการออกแบบวงจรป้องกันการลัดวงจรที่ดีพอ
3. พัฒนาการระบายความร้อนให้แก่มอสเฟตและตัวต้านทานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ในส่วนของมอสเฟต การขนานมอสเฟตสามารถแบ่งกระแสและลดความร้อนให้แก่มอสเฟตได้อีกทางหนึ่ง
4. ควรมีการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถดึงข้อมูลจากการทดสอบหรือสั่งการทำงานอุปกรณ์โดยอัตโนมัติได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] สราวุธ เมธาวิ. การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟสลับชนิดโปรแกรมได้สำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [2] International Electrotechnical Commission. IEC 687 ; Alternating current static watt-hour meters for active energy (class 0,2S and 0,5S). 1992.
- [3] Vladimir Matic, Verica Marinkovic-Nedelicki, Vladimir Tadic. Comparison of Digital Signal Processing Methods for Sine Wave Signal Generation. Telecommunications Symposium, ITS'98 Proceedings, SBT/IEEE international (August 1998) :290-295.
- [4] วีระเชษฐ ชันเงิน, วุฒิพิล ธาราธิระเศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. กรุงเทพมหานคร: วี.เจ.พรินติ้ง, 2547.
- [5] Andrew Gubisch, Pual L. Lualdi Jr., Peter N. Miljanic, and James L. West. Power Calibrator Using Sampled Feedback for Current and Voltage. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 46, 2 (April 1997): 403-407
- [6] Peter Zajec and Janez Nastran. Power Calibrator Using Switched Mode Voltage Source. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 49, 4 (August 2000): 790-794
- [7] Koninklijke Philips Electronics N.V. 2005. LPC213x User Manual[Online]. 2005. Available from: <http://www.semiconductors.philips.com> [June, 2005]
- [8] Toshiba Corporation. TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC TLP250 [Online]. Available from: <http://www.semicon.toshiba.co.jp/eng> [October, 2007]
- [9] E. Koutroulis, J. Chatzakis, K. Kalaitzakis, N.C. Voulgaris. A bidirectional, sinusoidal, high-frequency inverter design . Electric Power Applications, IEE Proceedings - Volume: 148, Issue: 4 : 315-321 , Jul 2001
- [10] International Rectifier. IRFZ44N HEXFET® Power MOSFET[Online]. Available from: <http://www.irf.com> [January, 2001]
- [11] โคทม อารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544
- [12] Fairchild Semiconductor Corporation. RHRP8120 8A, 1200V Hyperfast Diode[Online]. Available from: <http://www.fairchildsemi.com> [January, 2002]
- [13] Fairchild Semiconductor Corporation. FQP5N80 800V N-Channel MOSFET[Online]. Available from: <http://www.fairchildsemi.com> [September, 2000]
- [14] National Semiconductor Corporation. LM118/LM218/LM318 Operational Amplifiers[Online]. Available from: <http://www.national.com> [August, 2000]

- [15] G. Spiazzi, S. Buso, G.M. Martins, J.A. Pomilio. Single Phase Line Frequency Commutated Voltage Source Inverter Suitable for Fuel Cell Interfacing . Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual Volume 2, Issue , 2002
- [16] International Rectifier. IRF3205 HEXFET® Power MOSFET[Online]. Available from: <http://www.irf.com> [January, 2001]
- [17] Agilent Technologies Incorporation. 35670A Dynamic Signal Analyzer; Technical Specifications[Online]. Available from: <http://www.cp.literature.agilent.com> [Dec, 2003]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนาวัน วงศ์เทศ เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นจึงได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรแผนกซ่อมบำรุงและคลังพัสดุ บริษัทซีดีแพค
จำกัด จังหวัดสระบุรี ในกลุ่มกระดาษและบรรจุภัณฑ์ เครือซีเมนต์ไทย จนถึงปี 2547 ได้ลาออกมาศึกษาต่อใน
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาการออกแบบและประยุกต์วงจรรวม ที่
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย