

การออกแบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาแบบ 3 เฟสที่ใช้ในอาคารที่ระดับความแม่นยำ 0.5



นาย กวิน เลขานนท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

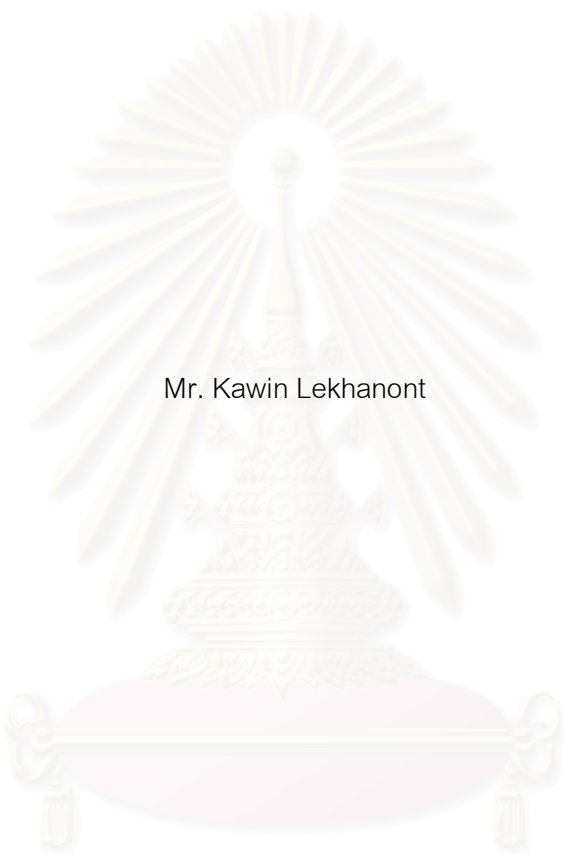
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4857-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF AN INDOOR 3-PHASE TIME-OF-USE ENERGY METER WITH CLASS 0.5 ACCURACY



Mr. Kawin Lekhanont

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4857-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาแบบ 3 เฟสที่ใช้ในอาคารที่
ระดับความแม่นยำ 0.5
โดย นายกวิน เลขานนท์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัณย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กวิน เลขานนท์ : การออกแบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาแบบ 3 เฟสที่ใช้ในอาคารที่ระดับความแม่นยำ 0.5. (DESIGN OF AN INDOOR 3-PHASE TIME-OF-USE ENERGY METER WITH CLASS 0.5 ACCURACY.) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. วันเฉลิม ไบรา , 76 หน้า. ISBN 974-17-4857-4.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้ในอาคาร และแม่นยำระดับ 0.5 ตามมาตรฐาน IEC687 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ DS89C450 ของบริษัท Dallas Semiconductor ทำหน้าที่คำนวณและควบคุมการทำงาน ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 16 บิตเบอร์ ADS8345 จากบริษัท Texas Instrument จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ซิกตัวอย่างสัญญาณกระแสและแรงดันแยกกัน หม้อแปลงกระแส และตัวต้านทานแบ่งแรงดันทำหน้าที่เป็นตัวแปรสัญญาณเพื่อวัดกระแสและแรงดันตามลำดับ ค่าที่วัดได้แสดงผลทางจอแสดงผลแอลซีดีและพัลส์แสง มิเตอร์ที่ออกแบบมีความสามารถในการวัดและบันทึกปริมาณทางไฟฟ้าแบบต่างๆ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ ค่ากำลังแบบแอดทีฟ ค่ากำลังรีแอดทีฟ ค่ากำลังปรากฏ ค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสเฟส แรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสาย ค่าตัวประกอบกำลัง และค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 15 นาที นอกจากนี้มิเตอร์สามารถติดต่อกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ผ่านพอร์ตแสงหรือผ่านโมเด็มโดยใช้ข้อตกลงการสื่อสารตามมาตรฐาน ANSI C12.18 และสามารถตัดกระแสไฟฟ้าด้วยรีเลย์ภายใน เพื่อรองรับกับระบบการจำหน่ายไฟฟ้าแบบชำระค่าบริการล่วงหน้า จากการทดสอบพบว่ามิเตอร์มีความแม่นยำภายในช่วงที่มาตรฐาน IEC687 กำหนด และสามารถทนต่อแรงดันเล็จแบบผสม 8/20 μ s 1.2/50 μ s ที่มีขนาด 5kA, 10kV ที่เกิดระหว่างสายเฟสกับสายกลางได้โดยไม่มีความเสี่ยงต่อวงจร

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2546.....

##4470209921: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: High Accuracy TOU Meter, Error Analysis

KAWIN LEKHANONT : DESIGN OF AN INDOOR 3-PHASE TIME-OF-USE ENERGY METER WITH CLASS 0.5 ACCURACY. THESIS ADVISOR: WANCHALERM PORA, Ph.D., 76 pp. ISBN 974-17-4857-4.

This thesis presents a design of an indoor 3 phase energy meter with IEC687 class 0.5 accuracy. The meter is controlled by the DS89C450 microcontroller from Dallas Semiconductor. Two ADS8345 16-bit analog-to-digital converters from Texas Instrument are used to digitize current and voltage signals independently. Current transformers and voltage dividers are used as current and voltage transducer respectively. The measured value will be processed and then displayed on an LCD display panel and an LED pulse. The meter can measure and store many electrical quantities such as time of used energy, active power, reactive power, apparent power, root mean square values of current, phase voltage and line voltage, power factor and 15-minute demand. The meter may communicate with a meter reader via an optical port or an analog modem. Communication protocol complies with the ANSI C12.18 standard. In order to support a pre-paid system, the meter may cease to supply electricity via build-in relays. Experiments show that accuracy of the meter lies within ranges specified in the IEC687 standard. Moreover it withstands a combination 5kA 10kV, 8/20 μ s 1.2/50 μ s waveform surge if it should occur between any phase and neutral line without any damage.

Department.....Electrical Engineering Student's signature.....
 Field of study.....Electrical Engineering Advisor's signature.....
 Academic year.....2003.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วันเฉลิม โปธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านอุปกรณ์การวิจัย ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ โครงการศิษย์ก้นกุฎิภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และโครงการวิจัยร่วมที่สนับสนุนทุนการศึกษาและทุนผู้ช่วยวิจัย

ขอขอบคุณ พี่เอก ที่ช่วยเขียนโปรแกรมอ่านมิเตอร์ผ่านพอร์ตแสงและโมเด็ม ทำให้สามารถทำงานได้สะดวกและเร็วขึ้น

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ LAB IDAR ที่คอยให้ความช่วยเหลืออย่างดี และทำให้บรรยากาศการทำงานไม่น่าเบื่อ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆทั้งสอง ที่คอยสนับสนุนในทุกด้าน และให้กำลังใจตลอดมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การวัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้.....	4
2.2 การวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้า.....	4
2.3 การวัดค่ารกกกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้า.....	5
2.3.1 การคำนวณแบบเฉลี่ยสัญญาณเรียงกระแส.....	5
2.3.2 การคำนวณแบบรกกกำลังสองเฉลี่ย.....	5
2.4 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดกระแสและแรงดัน.....	6
2.4.1 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดกระแส.....	6
2.4.2 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดแรงดัน.....	10
2.5 การป้องกันแรงดันเสิร์จ.....	11
2.5.1 รูปคลื่นมาตรฐานในการทดสอบผลของแรงดันเสิร์จ.....	11
2.5.2 แนวทางการป้องกันเสิร์จ.....	15
2.5.3 รูปแบบทั่วไปของวงจรป้องกันแรงดันเสิร์จ.....	15
2.5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเสิร์จแบบไม่เชิงเส้น.....	15
2.6 มาตรฐาน ANSI C12.18.....	17
2.6.1 ชั้นของการประยุกต์.....	17
2.6.2 ชั้นของการเชื่อมโยงข้อมูล.....	19
2.7 ข้อกำหนดเรื่องความแม่นยำของมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC687.....	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 ส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์.....	22
3.1 โครงสร้างของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส.....	22
3.2 ไมโครคอนโทรเลอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง	23
3.2.1 ไมโครคอนโทรเลอร์	23
3.2.2 จอแสดงผลแอลซีดี.....	23
3.2.3 พัลส์แสง	24
3.2.4 ฐานเวลาจริง	24
3.2.5 หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน.....	25
3.2.6 อีอีพรอม	25
3.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล.....	26
3.3.1 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล	26
3.3.2 วงจรวัดแรงดัน.....	27
3.3.3 วงจรวัดกระแส.....	29
3.3.4 วงจรสร้างแรงดันออฟเซต.....	29
3.4 วงจรพอร์ตแสง	30
3.5 วงจรโมเด็ม	30
3.6 วงจรตรวจสอบไฟตกและไฟดับ.....	32
3.7 วงจรไฟเลี้ยง.....	32
3.8 วงจรป้องกันเสิร์จ.....	33
3.9 วงจรรีเลย์.....	34
บทที่ 4 ซอร์ฟแวร์ไมโครคอนโทรเลอร์.....	35
4.1 หลักการและโครงสร้างซอร์ฟแวร์ไมโครคอนโทรเลอร์	35
4.2 โปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้น	36
4.3 โปรแกรมหลัก.....	37
4.3.1 โปรแกรมย่อยของการคำนวณ	38
4.3.2 โปรแกรมย่อยการแสดงผลและกำหนดการแสดงผล.....	41
4.3.3 โปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา.....	42
4.4 โปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชักตัวอย่างสัญญาณ	45
4.5 โปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับ	48
4.6 โปรแกรมการสื่อสารเพื่ออ่านข้อมูล.....	49
4.6.1 โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสาร.....	49
4.6.2 โปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0	53
4.6.3 โปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 ผลการทดสอบ และสรุปผล	56
5.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของการวัด.....	56
5.2 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดในการวัด	65
5.2.1 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดเนื่องจากหม้อแปลงกระแส.....	66
5.2.2 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดเนื่องจากความถี่ในการชักตัวอย่างสัญญาณ	69
5.3 สรุปผล	74
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	76



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันลีสวิตช์แบบไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าแรงดันอ้างอิงมาตรฐานของมิเตอร์ประเภทต่างๆ.....	20
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดที่โหลดสมดุล	20
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดเมื่อมีกระแส 1 เฟสและแรงดัน 3 เฟสสมดุล....	21
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าอื่นๆในระบบ	21
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า E_c ที่อัตราการกระพริบค่าต่างๆ.....	47



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 รูปตัวอย่างของตัวต้านทานชั้นท์.....	6
รูปที่ 2.2 รูปตัวอย่างหม้อแปลงกระแสแบบ 1 เฟส.....	7
รูปที่ 2.3 รูปตัวอย่างหม้อแปลงกระแสแบบ 3 เฟส.....	7
รูปที่ 2.4 รูปแสดงหลักการการทำงานของขดลวด Rogowski	8
รูปที่ 2.5 รูปตัวอย่างของขดลวด Rogowski.....	8
รูปที่ 2.6 รูปแสดงหลักการการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์	9
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s.....	11
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s.....	12
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแบบวง 0.5 μ s-100kHz	13
รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแบบวง 1.25MHz.....	13
รูปที่ 2.11 รูปคลื่น 10/1000 μ s.....	14
รูปที่ 3.1 รูปแผนภาพบล็อกของมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟส	22
รูปที่ 3.2 รูปวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์	23
รูปที่ 3.3 รูปวงจรของพัลส์แสง	24
รูปที่ 3.4 รูปวงจรของฐานเวลาจริง	24
รูปที่ 3.5 รูปวงจรของหน่วยความจำไม่ลบเลือน	25
รูปที่ 3.6 รูปวงจรของอีซีพรวม	26
รูปที่ 3.7 รูปวงจรตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อวัดกระแส.....	26
รูปที่ 3.8 รูปวงจรตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อวัดแรงดัน.....	26
รูปที่ 3.9 รูปวงจรวัดแรงดัน.....	27
รูปที่ 3.10 รูปวงจรวัดกระแสด้วยหม้อแปลงกระแส.....	29
รูปที่ 3.11 รูป วงจรสร้างแรงดันออฟเซต.....	29
รูปที่ 3.12 รูปวงจรภาครับและส่งของพอร์ตแสง	30
รูปที่ 3.13 รูปวงจรของโมเด็ม.....	30
รูปที่ 3.14 รูปวงจรตรวจสอบการใช้งานของสายโทรศัพท์	31
รูปที่ 3.15 รูปวงจรตรวจสอบการยกหูของผู้ใช้โทรศัพท์.....	31
รูปที่ 3.16 รูปวงจรตรวจสอบไฟตกและไฟดับ.....	32
รูปที่ 3.17 รูปวงจรไฟเลี้ยง.....	32
รูปที่ 3.18 รูปวงจรป้องกันเสิร์จของแต่ละเฟส	33
รูปที่ 3.19 รูปผลการทดสอบวงจรป้องกันเสิร์จ 500 V/DIV และ 5 μ s/DIV	34
รูปที่ 3.20 รูปวงจรรีเลย์.....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.1	รูปโครงสร้างของซอฟต์แวร์ของมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟส.....	35
รูปที่ 4.2	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้น	36
รูปที่ 4.3	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมหลัก	37
รูปที่ 4.4	รูปแสดงการใช้เวลาของโปรแกรมหลักใน 1 วินาที	38
รูปที่ 4.5	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยของการคำนวณ.....	39
รูปที่ 4.6	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา	42
รูปที่ 4.7	รูปแสดงการแบ่งเนื้อที่ของอีอีพรอม	43
รูปที่ 4.8	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา	44
รูปที่ 4.9	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชັกด่วนอย่างสัญญาณ.....	45
รูปที่ 4.10	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับ.....	48
รูปที่ 4.11	รูปแผนภาพสถานะของมิเตอร์	48
รูปที่ 4.12	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสาร	50
รูปที่ 4.13	รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อย GenResponse	52
รูปที่ 4.14	รูปแผนภาพสถานะการทำงานของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0.....	53
รูปที่ 4.15	รูปแผนภาพสถานะการทำงานของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1.....	55
รูปที่ 5.1	รูปแสดงระบบทดสอบมิเตอร์.....	56
รูปที่ 5.2	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 220V	57
รูปที่ 5.3	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 198V	57
รูปที่ 5.4	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 242V	58
รูปที่ 5.5	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ	58
รูปที่ 5.6	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lag ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ.....	59
รูปที่ 5.7	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lead ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ.....	59
รูปที่ 5.8	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 45 Hz	60
รูปที่ 5.9	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 50 Hz	60
รูปที่ 5.10	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 55 Hz	61
รูปที่ 5.11	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ.....	61
รูปที่ 5.12	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lag ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ....	62
รูปที่ 5.13	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lead ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ..	62
รูปที่ 5.14	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส R.....	63
รูปที่ 5.15	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส S	63
รูปที่ 5.16	รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส T	64
รูปที่ 5.17	รูปวงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส	66
รูปที่ 5.18	รูปตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์กับความแรงของสนามแม่เหล็ก.....	67

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.19 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ค่าเฟสเริ่มต้นของสัญญาณแรงดันต่างๆ.....	69
รูปที่ 5.20 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดค่าต่างๆ.....	70
รูปที่ 5.21 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดค่าต่างๆ..	70
รูปที่ 5.22 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของการชักตัวอย่างสัญญาณต่างๆ.....	71
รูปที่ 5.23 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของการชักตัวอย่างสัญญาณ ต่างๆ.....	71
รูปที่ 5.24 แสดงตัวอย่างการชักตัวอย่างสัญญาณเมื่อความถี่ในการชักตัวอย่างสัญญาณสามารถหารด้วย ความถี่ของสัญญาณที่วัดลงตัว.....	72
รูปที่ 5.25 แสดงตัวอย่างการชักตัวอย่างสัญญาณเมื่อความถี่ในการชักตัวอย่างสัญญาณหารด้วยความถี่ของ สัญญาณที่วัดไม่ลงตัว	73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายให้การไฟฟ้าส่งเสริมการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าด้วยอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ หรือ ทีโอยู (TOU: Time Of Use rate) โดยมีวัตถุประสงค์ส่งเสริมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า โดยลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงและหันมาใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าต่ำแทน ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์หลายด้านคือ

- ประชาชนสามารถลดงบประมาณลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าและลดการขาดดุลในการนำเข้าเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด
- การไฟฟ้าสามารถชะลอการลงทุนเพื่อสร้างระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อให้สามารถรองรับการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ทำให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าไม่สูงขึ้น
- ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตระหนักถึงค่าไฟฟ้าที่สะท้อนถึงต้นทุนของการผลิตไฟฟ้า และสามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าให้จ่ายค่าไฟฟ้าน้อยลงและการใช้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในโรงงานอุตสาหกรรมหรืออาคารที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟสจะต้องใช้เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถวัดและบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาได้ เครื่องวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าประเภทนี้ยังไม่มีผู้ผลิตในประเทศไทย จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก การออกแบบและวิเคราะห์ความผิดพลาดของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นการพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องวัดพลังงานที่สามารถใช้งานได้จริงและเป็นต้นแบบของการพัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถวัดและบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้โดยมีความแม่นยำในการวัดสูงและสามารถใช้งานได้จริงในสภาพการใช้งานจริง
2. วิเคราะห์หาสาเหตุของความผิดพลาดของการวัดที่เกิดจากวิธีการคำนวณ ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถวัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 % ตามมาตรฐาน IEC687 [1] เมื่อแรงดันมีค่า $220 V_{rms} (\pm 10\%)$ กระแส 0-5 A_{rms} และความถี่ 50 Hz ($\pm 10\%$)
2. สามารถวัดค่าได้ดังนี้
 - a) ค่ารอกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเฟส
 - b) ค่ารอกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสาย
 - c) ค่ากำลังแอกทีฟ กำลังรีแอกทีฟ และกำลังปรากฏ
 - d) ค่าพลังงานแอกทีฟ พลังงานรีแอกทีฟ และพลังงานปรากฏที่วัดตามช่วงเวลาการใช้
 - e) ค่าตัวประกอบกำลังของแต่ละเฟส
 - f) ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 15 นาทีและค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 15 นาทีสูงสุดของแต่ละเฟส
 - g) ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 15 นาทีสูงสุดรวมทุกเฟส
3. ช่วงเวลาที่วัดพลังงานสามารถแบ่งได้มากที่สุด 4 ช่วงเวลาและสามารถเปลี่ยนเวลาได้ด้วยการโปรแกรมผ่านพอร์ตสื่อสารด้วยแสง
4. มีปฏิทินวันหยุดที่กำหนดโดยผู้จำหน่ายไฟฟ้าได้นานถึง 5 ปี
5. มีพอร์ตสื่อสารด้วยแสงเพื่อใช้อ่านข้อมูลและโปรแกรมตามมาตรฐาน ANSI C12.18 [2]
6. มีโมเด็มเพื่อใช้สื่อสารข้อมูลผ่านสายโทรศัพท์ รองรับระบบอ่านข้อมูลอัตโนมัติ (AMR)
7. แสดงค่าการใช้พลังงานที่วัดได้ทางจอแสดงผลซีดี และพัลส์แสง
8. สามารถวัดและบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0.001-999999.999 kWh
9. สามารถโปรแกรมให้ตัดกระแสไฟฟ้าของผู้ใช้ เพื่อรองรับการให้บริการแบบจ่ายค่าบริการล่วงหน้า (pre-paid)
10. วิเคราะห์และหาสาเหตุของความผิดพลาดของการวัดค่าพลังงานโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแยกเป็น
 - a) ผลของความผิดพลาด (Error) ของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลงกระแส ตัวต้านทาน ตัวสร้างแรงดันอ้างอิง
 - b) ผลจากความผิดพลาดของการควอนไทซ์ของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
 - c) ผลจากการเปลี่ยนแปลงของระบบเช่น ตัวประกอบกำลัง ความถี่
 - d) ผลจากวิธีการคำนวณ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ส่งเสริมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบการคิดค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา
2. ลดการนำเข้ามิเตอร์จากต่างประเทศซึ่งจะลดการสูญเสียเงินตราให้กับต่างประเทศ
3. สามารถลดรายจ่ายของผู้ใช้ไฟฟ้า
4. ส่งเสริมการพัฒนาความรู้และการสร้างผลิตภัณฑ์ของคนไทย

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการวัดและคำนวณพลังงานไฟฟ้า
2. ศึกษาเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าของต่างประเทศ ทั้งโครงสร้างและวิธีการทำงาน
3. ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ เช่น ฐานเวลาจริง, อีอีพรอม, หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (NVRAM: Non-Volatile RAM), ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล, จอแสดงผลแอลซีดี
4. ออกแบบวงจรวัดและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส ทดสอบการทำงานด้านต่างๆ ปรับปรุงโครงสร้างและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อความเหมาะสม
5. ศึกษา ออกแบบ และพัฒนางจรการสื่อสารผ่านพอร์ตแสงและโมเด็ม
6. ศึกษา ออกแบบ และทดสอบวงจรป้องกันแรงดันเสิร์จ
7. ทดสอบและแก้ไขการทำงานของมิเตอร์ที่รวมส่วนต่างๆเข้ากันแล้ว
8. วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดในการวัด
9. สรุปผลและเขียนรายงาน

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งการนำเสนอเนื้อหาเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย

ส่วนแรกคือบทที่ 2 จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่การวัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ การวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้า การวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณทางไฟฟ้า การป้องกันแรงดันเสิร์จ มาตรฐานการสื่อสารผ่านพอร์ตแสง ANSI C12.18 และข้อกำหนดเรื่องความแม่นยำของมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC687

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบฮาร์ดแวร์ของมิเตอร์ เช่น แผนภาพบล็อกของวงจรส่วนต่างๆ การทำงานและสมการการคำนวณ

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบซอฟต์แวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์

และในบทสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการทดสอบความแม่นยำของการวัดพลังงานไฟฟ้า วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดในการวัด ส่วนท้ายของบทนี้คือสรุปผลและข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้

การวัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ เป็นการคิดค่าไฟฟ้าตามเวลาที่กำหนดให้มีอัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าแตกต่างกัน อัตราค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาจะขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิตในช่วงเวลานั้นๆ ผู้จำหน่ายไฟฟ้าจะเป็นผู้กำหนดจำนวนของช่วงเวลา เวลาเริ่มต้น และเวลาสิ้นสุดของแต่ละช่วงเวลา ตัวอย่างเช่น การไฟฟ้านครหลวงแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือ

- ช่วงต้องการไฟฟ้าสูง (On-peak) ระหว่างเวลา 9.00-22.00 น. ของวันทำงาน โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้า 4.3093 บาทต่อหน่วย สำหรับที่อยู่อาศัยและกิจการขนาดเล็ก
- ช่วงต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-peak) ระหว่างเวลา 22.00-9.00 น. ของวันทำงานและระหว่างเวลา 0.00-24.00 น. ของวันเสาร์อาทิตย์และวันหยุดราชการตามปกติแต่ไม่รวมวันหยุดชดเชย โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้า 1.2246 บาทต่อหน่วย สำหรับที่อยู่อาศัยและกิจการขนาดเล็ก

2.2 การวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณแบบเชิงเลขของปริมาณทางไฟฟ้า ในช่วงเวลา $\Delta t = t_2 - t_1$ มีการชักตัวอย่างสัญญาณกระแส $I(t)$ และแรงดันที่ $V(t)$ ทุกคาบเวลา T โดยให้ $t = t_1 + nT$ และ $t_2 - t_1 = NT$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $N-1$ จะได้ตัวอย่างสัญญาณ I_n และ V_n ตามลำดับ จะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [3]

$$\text{ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแส} \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n^2} \quad (A) \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

$$\text{ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน} \quad V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_n^2} \quad (V) \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าแอดทีฟ} \quad P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n V_n \quad (W) \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้าแอดทีฟ} \quad W = \frac{\Delta t}{3.6 \times 10^6} \sum_{n=0}^{N-1} I_n V_n \quad (kWh) \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ} \quad U = I_{RMS} \times V_{RMS} \quad (VA) \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

พลังงานไฟฟ้าปรากฏ	$W_{VA} = \frac{\Delta t}{3.6 \times 10^6} U$	(kVAh)	สมการที่ 2.6
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	$Q = \sqrt{U^2 - P^2}$	(VAr)	สมการที่ 2.7
พลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ	$W_{VAr} = \frac{\Delta t}{3.6 \times 10^6} Q$	(kVArh)	สมการที่ 2.8
ตัวประกอบกำลัง	$pf = \frac{P}{U}$		สมการที่ 2.9

2.3 การวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้า

การวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ

2.3.1 การคำนวณแบบเฉลี่ยสัญญาณเรียงกระแส

โดยนำสัญญาณกระแสลบผ่านการเรียงกระแสก่อนแล้วหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้นำมาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์รูปคลื่น (Form Factor) สามารถเขียนเป็นสมการคำนวณได้ดังนี้

$$V_{RMS} = C_F \times \frac{1}{T} \int_0^T |V(t)| dt$$

หรือ

$$V_{RMS} = C_F \times \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |V_n|$$

เมื่อ C_F คือค่าสัมประสิทธิ์รูปคลื่น

การวัดแบบนี้มีข้อได้เปรียบคือวิธีการคำนวณง่ายและรวดเร็วกว่า และได้ค่าเท่ากับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยเมื่อรูปคลื่นเป็นไปตามที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์รูปคลื่น แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียเปรียบคือหากรูปคลื่นของสัญญาณเพี้ยนไปจากที่กำหนดจะทำให้ผลการวัดที่ได้ผิดไป

2.3.2 การคำนวณแบบรากกำลังสองเฉลี่ย

เป็นการคำนวณตามสมการการหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยดังต่อไปนี้

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$

หรือ

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_n^2}$$

การวัดค่าแบบนี้มีข้อได้เปรียบคือจะได้ค่าที่ถูกต้องเสมอไม่ว่ารูปคลื่นของสัญญาณจะเป็นรูปใดแต่วิธีนี้จะมีข้อเสียเปรียบคือการคำนวณค่อนข้างซับซ้อน

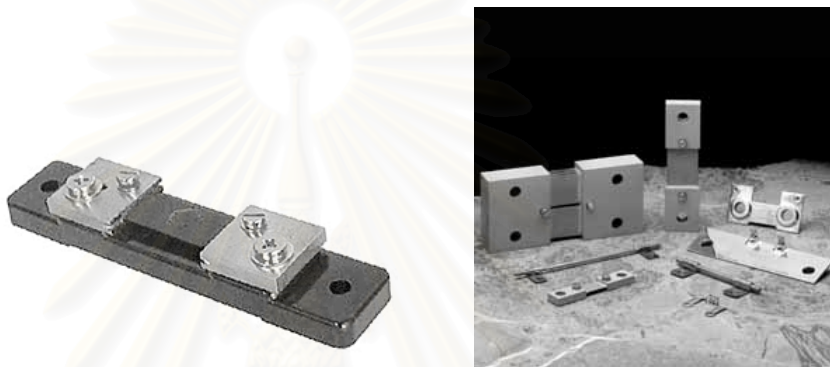
2.4 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดกระแสและแรงดัน

ตัวแปลงสัญญาณสำหรับวัดกระแสและแรงดันของระบบเพื่อนำมาคำนวณนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ลักษณะจะมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกัน สำหรับชนิดที่นิยมใช้มีดังนี้

2.4.1 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดกระแส

1) ตัวต้านทานชัณฑ์ (Shunt Resistor)

ตัวต้านทานชัณฑ์คือตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำมากใช้ต่ออนุกรมกับวงจรกระแสเพื่อสร้างแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจากนั้นใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลวัดค่าแรงดันดังกล่าวมาคำนวณ



รูปที่ 2.1 รูปตัวอย่างของตัวต้านทานชัณฑ์

ข้อได้เปรียบของตัวต้านทานชัณฑ์

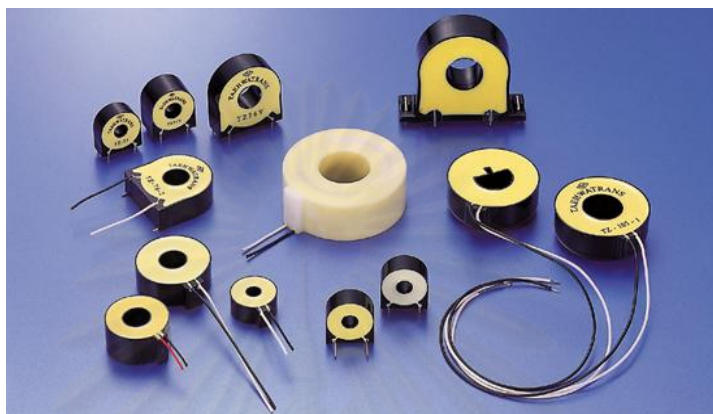
- มีราคาถูก
- มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างดี

ข้อเสียเปรียบของตัวต้านทานชัณฑ์

- ในการวัดกระแสขนาดใหญ่อาจผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ
- ค่าความเหนี่ยวนำปรสิต (Parasitic Inductance) อาจมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดของเฟส
- มีขนาดใหญ่สำหรับชนิดที่ใช้วัดกระแสสูง
- ในกรณีที่เกิดกระแสกระชากอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อวงจรวัดได้

2) หม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแส ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 จะแบ่งเป็นชนิดลวดปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบน้อยและชนิดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบมากที่ต่อกับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำเพื่อสร้างแรงดันส่งให้กับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ชนิดลวดทั้งสองจะแยกออกจากกันแต่เชื่อมต่อกันทางแม่เหล็กด้วยแกนทอรอยด์



รูปที่ 2.2 รูปตัวอย่างหม้อแปลงกระแสแบบ 1 เฟส



รูปที่ 2.3 รูปตัวอย่างหม้อแปลงกระแสแบบ 3 เฟส

ข้อได้เปรียบของตัวหม้อแปลงกระแส

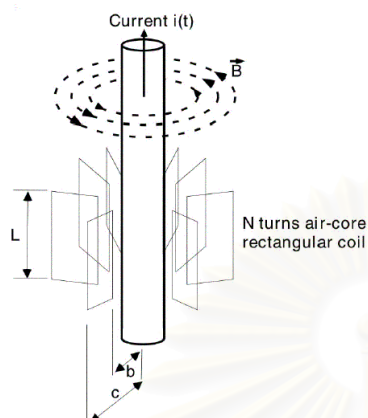
- สามารถวัดกระแสค่าสูงได้
- แยกโดดออกจากวงจรกระแส
- การสูญเสียพลังงานมีน้อย
- สัญญาณออกแปรผันกับอุณหภูมิมีน้อยมาก

ข้อเสียเปรียบของตัวหม้อแปลงกระแส

- มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณออก
- ถ้าสัญญาณเข้ามีกระแสตรงด้วยอาจทำให้เกิดการอิ่มตัวได้
- มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่บ้าง

3) ขดลวด Rogowski

ขดลวด Rogowski อาศัยหลักการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส เมื่อมีขดลวดแกนอากาศอยู่รอบขดลวดปฐมภูมิจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันขึ้นในขดลวดทุติยภูมิโดยแรงดันดังกล่าวจะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส ดังตัวอย่างการคำนวณด้านล่าง



$$|\vec{B}(t)| \propto I(t)$$

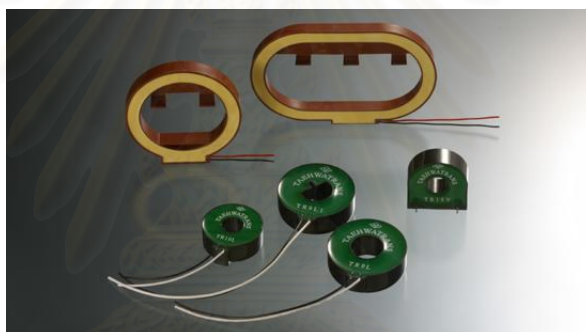
$$EMF \propto \frac{d\vec{B}(t)}{dt}$$

$$\therefore EMF \propto \frac{dI(t)}{dt}$$

จากรูปตัวอย่างจะได้

$$EMF = \frac{\mu_{air} NL}{2\pi} \ln\left(\frac{c}{b}\right) \frac{dI(t)}{dt} \quad (V)$$

รูปที่ 2.4 รูปแสดงหลักการการทำงานของขดลวด Rogowski



รูปที่ 2.5 รูปตัวอย่างของขดลวด Rogowski

ข้อได้เปรียบของขดลวด Rogowski

- สามารถวัดกระแสค่าสูงได้
- แยกโดดออกจากวงจรกระแส
- การสูญเสียพลังงานมีน้อย
- สัญญาณออกแปรผันกับอุณหภูมิมีน้อยมาก
- ไม่มีการอิ่มตัวเพราะเป็นแกนอากาศ
- เฟสของสัญญาณออกคงที่ที่ 90 องศา
- มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างดี

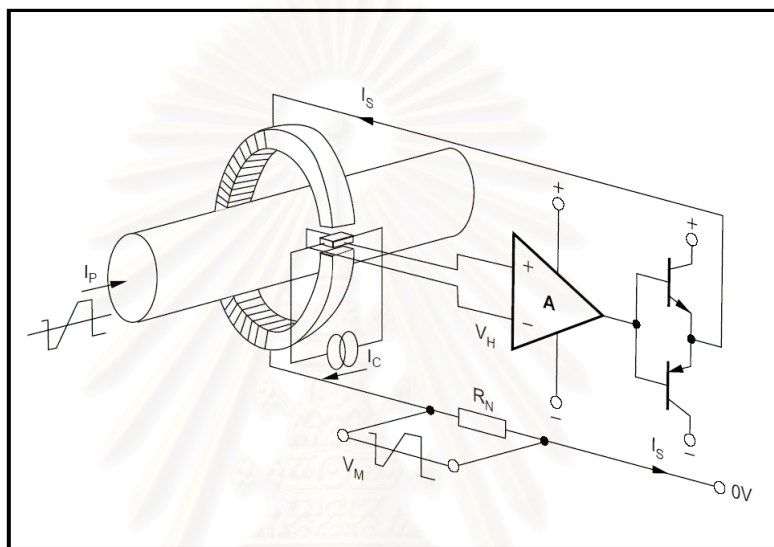
ข้อเสียเปรียบของขดลวด Rogowski

- สัญญาณออกเป็นแบบแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสซึ่งทำให้ต้องการตัวอินทิเกรตทำให้ต้องเพิ่มอุปกรณ์
- ถูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่าย

4) อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์

การวัดกระแสด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์ อาศัยหลักการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดที่ค้ำจั่นแกนทอรอยด์ สนามแม่เหล็กจะแปรผันตามขนาดของกระแส เมื่อใช้อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์รับสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะได้แรงดันขาออกแปรผันตรงกับขนาดของกระแสในขดลวด

ในบางชนิดจะมีการสร้างสัญญาณป้อนกลับเพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนทอรอยด์เพื่อให้ได้สัญญาณออกมีความเป็นเชิงเส้นดีขึ้น



รูปที่ 2.6 รูปแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์

ข้อได้เปรียบของ อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์

- สามารถวัดกระแสค่าสูงได้

ข้อเสียเปรียบของ อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์

- ราคาแพง
- ความเป็นเชิงเส้นไม่ค่อยดี
- ถ้าสัญญาณเข้ามีกระแสดังกล่าวอาจทำให้เกิดการอิ่มตัวได้
- สัญญาณออกมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

2.4.2 ตัวแปรสัญญาณสำหรับวัดแรงดัน

1) ตัวต้านทานแบ่งแรงดัน

ตัวต้านทานแบ่งแรงดันคือการใช้ตัวต้านทานมากกว่า 1 ตัวมาต่ออนุกรมกัน แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานตัวหนึ่ง ซึ่งจะได้แรงดันที่เป็นอัตราส่วนกับแรงดันที่ต้องการวัด

ข้อได้เปรียบของตัวต้านทานแบ่งแรงดัน

- มีความเป็นเชิงเส้นสูง
- ไม่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณออก
- วงจรง่ายไม่ซับซ้อน

ข้อเสียเปรียบของตัวต้านทานแบ่งแรงดัน

- ไม่สามารถวัดค่าแรงดันสูงๆได้
- ในกรณีที่เกิดแรงดันล้นในระบบอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่วงจรได้

2) หม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดันจะแบ่งเป็นขดลวดปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบน้อยและขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบมากที่ต่อกับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์สูง แรงดันขาออกมีขนาดเป็นอัตราส่วนกับแรงดันเข้าเท่ากับอัตราส่วนของจำนวนขดลวด

ข้อได้เปรียบของหม้อแปลงแรงดัน

- สามารถวัดแรงดันที่มีค่าสูงๆได้
- แยกโดดออกจากวงจรวัดทำให้ปลอดภัยต่อวงจร

ข้อเสียเปรียบของหม้อแปลงแรงดัน

- มีการเลื่อนของเฟสของสัญญาณออก
- มีขนาดใหญ่
- ความเป็นเชิงเส้นไม่ดี

2.5 การป้องกันแรงดันเสิร์จ

เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะต้องต่ออยู่กับสายส่งพลังงานไฟฟ้าซึ่งอาจมีเสิร์จเกิดขึ้นในสายส่งได้ หากวงจรที่ใช้วัดไม่ได้แยกโดดออกจากสายส่งจะต้องมีวงจรป้องกันเสิร์จเพื่อไม่ให้ผลของเสิร์จสร้างความเสียหายให้กับวงจร ดังนั้นเราควรจะทราบเกี่ยวกับลักษณะของเสิร์จและวิธีป้องกันเสิร์จตามหัวข้อต่อไปนี้ [4]

2.5.1 รูปคลื่นมาตรฐานในการทดสอบผลของแรงดันเสิร์จ

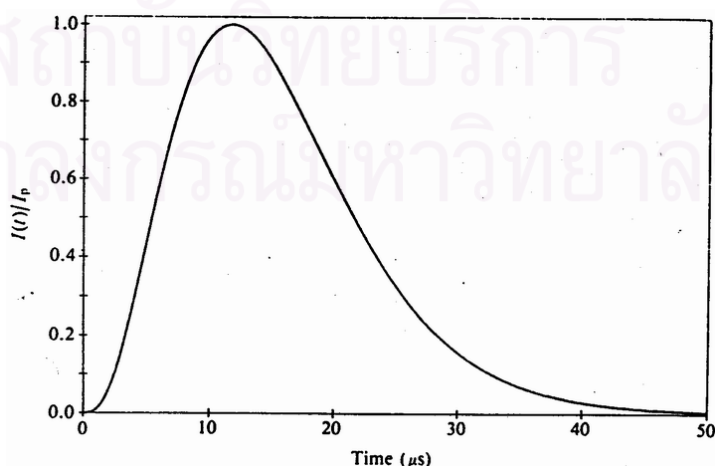
ในบทความมาตรฐานทั่วไปจะกำหนดรูปแบบของรูปคลื่นทดสอบด้วยค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

- เวลาค้นหาคลื่น (Front Time) ซึ่งมีค่าเป็น 1.25 เท่าของเวลาที่ขนาดของสัญญาณเพิ่มจาก 10%-90% ของค่ายอด
- เวลาครึ่งหนึ่งของค่ายอด (Time to half the peak value) ซึ่งเป็นเวลาที่ขนาดของสัญญาณลดลงมาเหลือ 50% ของค่ายอด
- ขนาดยอดของรูปคลื่น (Amplitude)
- ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Oscillation frequency) สำหรับรูปคลื่นบางแบบ

สมการที่ใช้แสดงรูปคลื่นเหล่านี้ไม่ได้ถูกกำหนดออกมาอย่างชัดเจนแต่ว่ารูปคลื่นที่ออกมาจะต้องสอดคล้องกับค่าต่างๆที่ใช้กำหนดรูปแบบของรูปคลื่นนั้นโดยคลาดเคลื่อนได้ในขอบเขตที่กำหนด ขอบเขตความผิดพลาดนี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ถึง $\pm 30\%$ แล้วแต่มาตรฐานจะกำหนด

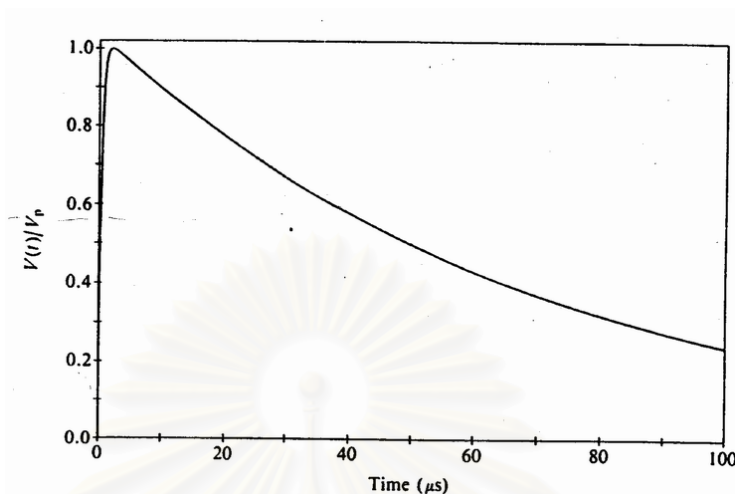
รูปคลื่นที่ใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบหลักๆมีดังนี้

1. รูปคลื่นกระแส 8/20 μs เป็นรูปคลื่นที่จำลองรูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากผลของฟ้าผ่าบนสายส่งหรือสายจ่ายไฟฟ้าแต่รูปคลื่นนี้ไม่รวมถึงผลของกระแสต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในขณะที่ฟ้าผ่าจากฟ้าลงมายังดิน จากรูปที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแกนตั้งเป็นอัตราส่วนของขนาดของกระแสที่เวลาใดๆกับขนาดกระแสยอด และแกนนอนเป็นเวลา โดยรูปคลื่นนี้จะมีค่าเวลาค้นหาคลื่นเท่ากับ 8 μs และเวลาครึ่งหนึ่งของค่ายอดเท่ากับ 20 μs รูปคลื่นนี้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60-2, ANSI/IEEE Std 4-1978, ANSI C62.1-1984



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแส 8/20 μs

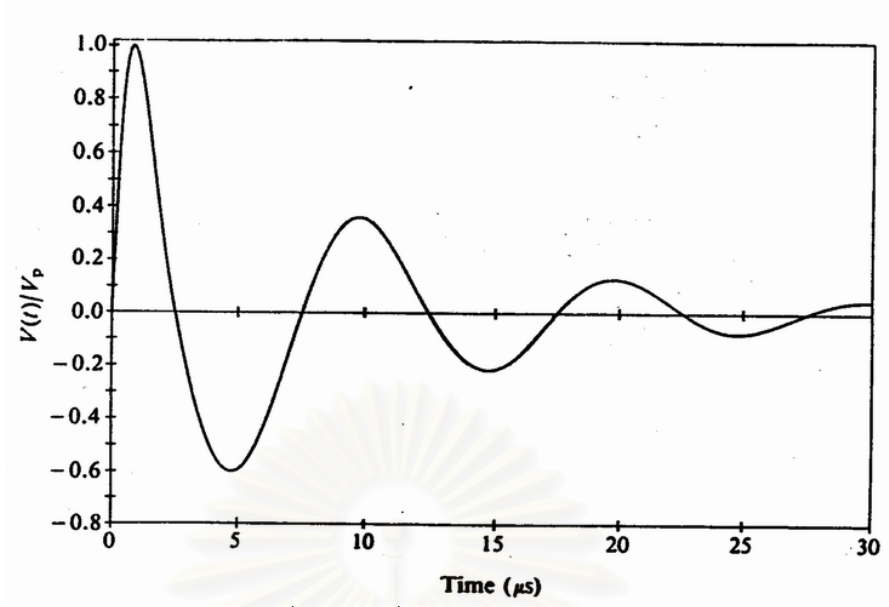
2. รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs เป็นรูปคลื่นที่จำลองรูปคลื่นแรงดันเปิดวงจรในกรณีเดียวกันกับรูปคลื่นกระแส 8/20 μs รูปคลื่นนี้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน เดียวกับ รูปคลื่นกระแส 8/20 μs ด้วย



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs

3. รูปคลื่นรวม 8/20 μs และ 1.2/50 μs เนื่องจากรูปคลื่นกระแส 8/20 μs เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการลัดวงจร ส่วนรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs เป็นการกำหนดเงื่อนไขของวงจรเปิดซึ่งในการเลือกรูปคลื่นที่จะใช้ทดสอบจะขึ้นอยู่กับลักษณะโหลดคือ จะใช้รูปคลื่นกระแสกับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในขณะที่ใช้รูปคลื่นแรงดันกับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง รูปคลื่นแบบรวมจะใช้เมื่อไม่สามารถระบุธรรมชาติของโหลดได้ มาตรฐาน ANSI C62.41-1980 ได้ระบุรูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบโดยเป็นการรวมของรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs ที่มีแรงดันยอดเมื่อวงจรเปิดขนาด 6 kV กับรูปคลื่นกระแส 8/20 μs ที่มีกระแสยอดเมื่อลัดวงจร 3 kA

4. รูปคลื่นแบบวง 0.5 μs -100kHz เป็นรูปคลื่นที่จำลองภาวะแรงดันเกินชั่วคราวในสายส่งแรงดันต่ำ ซึ่งจะมีลักษณะรูปคลื่นที่มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปถึงค่ายอดจากนั้นจะมีการสั่นของสัญญาณโดยขนาดของสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ค่าเวลา 0.5 μs เป็นเวลาที่สัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 10%-90% ของค่ายอดและตามมาด้วยการสั่นของสัญญาณด้วยความถี่ 100 kHz ข้อกำหนดนี้ถูกกำหนดในมาตรฐาน IEEE 587 ซึ่งต่อมาเปลี่ยนเป็น ANSI C62.41-1980 และมีชื่อเรียกว่าคลื่นแบบวง (ring wave)

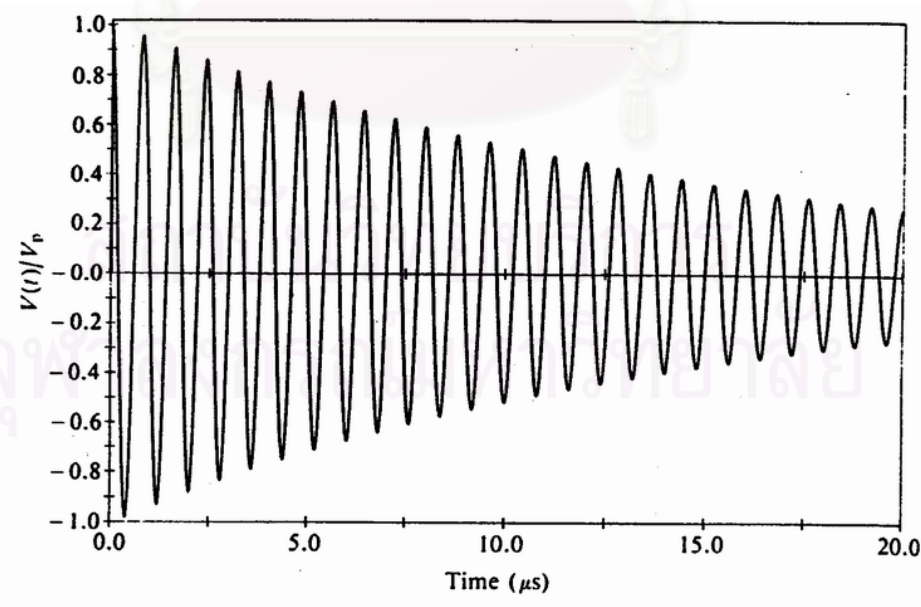


รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแบบวง 0.5 μs -100kHz

5. รูปคลื่นแบบวง 1.25MHz เป็นรูปคลื่นที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.90a-1974 ซึ่งจำลองสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นเมื่อสวิตช์เกียร์แรงดันสูงทำงาน ซึ่งจะกระทบต่อวงจรีเล็กควบคุม รูปคลื่นนี้ใช้เป็นรูปคลื่นทดสอบหาค่าความทนทานต่อเสิร์จ (SWC: Surge Withstand Capability) รูปคลื่นนี้มีค่าตัวแปรที่สำคัญคือ

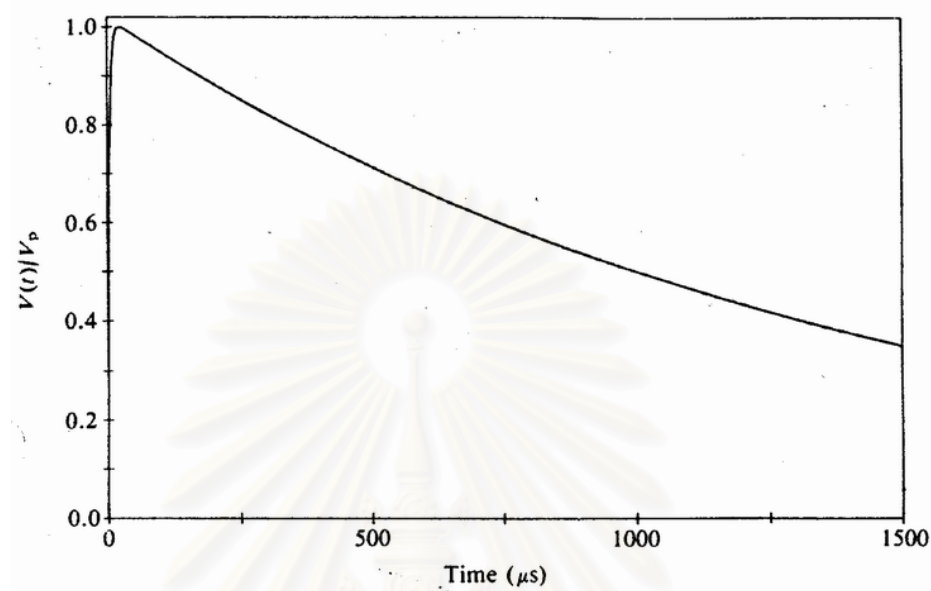
- ความถี่ของการสั่น 1.25 ± 0.25 MHz
- ค่าแรงดันยอด 2.75 ± 0.25 kV

โดยขนาดจะลดลงเหลือ 50% ของค่ายอดใช้เวลาไม่น้อยกว่า 6 μs



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแบบวง 1.25MHz

6. รูปคลื่น 10/1000 μs เป็นรูปคลื่นของสภาวะแรงดันเกินในสายโทรศัพท์ระหว่างที่มีพายุ ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่เร็วที่สุดของการเกิดแรงดันเกินในสายโทรศัพท์ เนื่องจากสัญญาณมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าลดลงช้ากว่ารูปคลื่นอื่นๆ รูปคลื่นนี้นิยมใช้ทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อเครือข่ายโทรศัพท์ และทดสอบไดโอดแบบอะวาลานซ์ประเภทที่ไวต่อแรงดันเกิน



รูปที่ 2.11 รูปคลื่น 10/1000 μs

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 แนวทางการป้องกันลัดวงจร

การป้องกันกระแสลัดวงจรจะให้ความสำคัญกับ 2 แนวทางคือ

1. ป้องกันและจำกัดขนาดของกระแสลัดวงจรด้วยอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน
2. การเบี่ยงเบนกระแสลัดวงจรออกจากอุปกรณ์ที่เราต้องการป้องกันด้วยอิมพีแดนซ์ค่าต่ำที่ต่อขนานกับอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

ทั้งสองแนวทางสามารถใช้ร่วมกันได้และโดยทั่วไปมักจะใช้ร่วมกันโดยอุปกรณ์ที่ใช้จำกัดกระแสอาจจะใช้ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน ตัวแยกโดดด้วยแสง (Optical-Isolator) และหม้อแปลงแยกโดด (Isolation Transformer) ซึ่งใช้ป้องกันกระแสในโหมดร่วม (Common Mode) แต่ไม่ป้องกันกระแสในโหมดต่าง (Differential Mode) ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้เบี่ยงเบนกระแสลัดวงจรโดยทั่วไปนิยมใช้ กับดักลัดวงจร (Surge Arrester หรือ Gas Discharge Tube) วาริสเตอร์ และไดโอดแบบอะวาลานช์

อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ควรจะต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยอุปกรณ์ที่ใช้จำกัดกระแสจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้เบี่ยงเบนกระแสควรจะมีอิมพีแดนซ์สูงในสภาวะการทำงานปกติ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน ในสภาวะที่มีลัดวงจรเข้ามา อุปกรณ์ที่ใช้จำกัดกระแสควรจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงและอุปกรณ์ที่ใช้เบี่ยงเบนกระแสควรมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเพื่อจำกัดกระแสที่จะผ่านไปถึงและเบี่ยงเบนกระแสดังกล่าวออกไปจากอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน

2.5.3 รูปแบบทั่วไปของวงจรป้องกันแรงดันลัดวงจร

วงจรที่ใช้ป้องกันลัดวงจรสามารถแบ่งตามหลักการที่ใช้ป้องกันได้ดังนี้คือ

1. ใช้ขนาดของแรงดันเพื่อแยกสภาวะปกติกับสภาวะที่มีลัดวงจร
2. ใช้ความถี่ของสัญญาณเพื่อแยกสภาวะปกติกับสภาวะที่มีลัดวงจร
3. แบบแยกสถานะ (state) โดยแบ่งเป็นสถานะปกติและสถานะลัดวงจรที่วงจรจะละเลยสัญญาณข้อมูลต่างๆที่เข้ามาเพื่อป้องกันไม่ให้วงจรทำงานผิดพลาด

2.5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันลัดวงจรแบบไม่เชิงเส้น

อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันลัดวงจรแบบไม่เชิงเส้นนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้

1. Clamp จะเป็นชนิดที่แรงดันค่อนข้างคงที่ระหว่างที่มีกระแสลัดวงจร
2. Crowbars เป็นชนิดที่มีการเปลี่ยนสถานะจากไม่นำไฟฟ้ามาเป็นสถานะเกือบจะลัดวงจรเมื่อแรงดันตกคร่อมเกินค่าที่กำหนด
3. Isolators เป็นอุปกรณ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกับแรงดันโหมดร่วมเท่านั้น

อุปกรณ์เหล่านี้มีข้อได้เปรียบ และข้อเสียเปรียบแตกต่างกันไป สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเลิร์จแบบไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ

ชนิด	ชื่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
Clamp	MOV	<ol style="list-style-type: none"> 1. การตอบสนองเร็ว 2. สามารถดูดซับพลังงานได้มาก 3. สามารถรับกระแสขนาดใหญ่ได้ 4. ราคาถูก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าตัวเก็บประจุปรสิตสูง (ประมาณ 1-10nF)
	Avalanche Diode	<ol style="list-style-type: none"> 1. การตอบสนองเร็วมาก 2. ค่าแรงดันตกคร่อมค่อนข้างแม่นยำ (ในช่วง 6.8-200 โวลต์) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับกระแสขนาดใหญ่ไม่ได้ มีค่าตัวเก็บประจุปรสิตสูง (ประมาณ 1-3nF)
	Switching & Rectifier Diode	<ol style="list-style-type: none"> 1. ราคาถูก 2. มีค่าตัวเก็บประจุปรสิตต่ำ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีแต่ชนิดที่แรงดันต่ำ
Crowbars	GDT	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถรับกระแสขนาดใหญ่ได้ 2. แรงดันตกคร่อมต่ำมากในสถานะนำไฟฟ้า 3. มีค่าตัวเก็บประจุปรสิตต่ำมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องการแรงดันค่าสูงเพื่อเข้าสู่สถานะนำไฟฟ้า 2. การตอบสนองช้า 3. อาจมีปัญหาเรื่องกระแสติดตาม (Follow current)
	SCR & Triac	<ol style="list-style-type: none"> 1. แรงดันตกคร่อมบนขาตัวนำต่ำมาก 2. สามารถทนต่อกระแสขนาดใหญ่ได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. การตอบสนองเพื่อเปลี่ยนสถานะระหว่างสถานะนำไฟฟ้ากับสถานะไม่นำไฟฟ้าช้ามาก
Isolator	Optical Isolators	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าแรงดันแยกโดดสูงมาก 2. ความสามารถในการกำจัดแรงดัน Common-Mode ดี 3. ง่ายต่อการใช้รับข้อมูล 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ยากต่อการใช้ส่งข้อมูล 2. ชนิดที่ตอบสนองเร็วมีราคาแพง
	Isolation Transformer	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าแรงดันแยกโดดสูงมาก 2. ความสามารถในการกำจัดแรงดัน Common-Mode ดี 3. ไม่มีการลดทอนแรงดัน Differential-Mode 	
	Common-Mode filter	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความสามารถในการกำจัดแรงดัน Common-Mode ดีมากในช่วงเวลาสั้นๆ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีปัญหาเมื่อใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันเลิร์จเพียงตัวเดียว

2.6 มาตรฐาน ANSI C12.18

มาตรฐาน ANSI C12.18 คือมาตรฐานที่ระบุข้อกำหนดของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์วัดค่าพลังงานไฟฟ้ากับอุปกรณ์อ่านข้อมูลผ่านพอร์ตแสง อุปกรณ์อ่านข้อมูลอาจเป็น อุปกรณ์อ่านแบบพกพา เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ โดยมีข้อกำหนดคือเป็นการสื่อสารแบบจุดต่อจุดระหว่างอุปกรณ์ 2 ตัวผ่านพอร์ตแสง 1 ชุด

มาตรฐานจะกำหนดข้อกำหนดต่างๆ โดยแบ่งตาม การเชื่อมต่อระบบเปิด 7 ชั้น (OSI 7 Layer) แต่มีข้อกำหนดใน 3 ชั้น เท่านั้นคือ ชั้นของการประยุกต์ ชั้นของการเชื่อมโยงข้อมูล และชั้นที่เกี่ยวกับทางกายภาพ

2.6.1 ชั้นของการประยุกต์

เป็นการกำหนดเกี่ยวกับกระบวนการที่จำเป็น โครงสร้างข้อมูลที่ต้องการเพื่อรองรับกับเครื่องวัดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่า การโปรแกรมข้อมูล และการอ่านข้อมูลออกมา

ภาษาที่ใช้เป็นข้อกำหนดการสื่อสารสำหรับเครื่องวัดทางไฟฟ้า (PSEM: Protocol Specification for Electric Metering) ประกอบด้วยกระบวนการ 9 แบบ แต่ละแบบจะประกอบด้วยการร้องขอ (Request) และการตอบสนอง (Response)

ในการสื่อสารด้วยวิธีนี้จะมีการกำหนดสถานะลำดับของกระบวนการ (Service Sequence State) ไว้ 3 ระดับโดยแต่ละกระบวนการจะมีข้อกำหนดในแต่ละสถานะ และบางกระบวนการที่ร้องขอ เมื่อได้รับการดำเนินการแล้วจะทำให้มีการเปลี่ยนสถานะด้วย สถานะลำดับของกระบวนการมีดังนี้คือ

1. สถานะพื้นฐาน (Base State) เป็นสถานะเริ่มต้น การสื่อสารในสถานะนี้จะใช้ตามค่าตั้งต้น
2. สถานะไอดี (ID State) เป็นสถานะหลังจากกระบวนการระบุได้ดำเนินการแล้ว
3. สถานะสื่อสารข้อมูล (Session state) เป็นสถานะหลังจากกระบวนการลงบันทึกเปิดได้ดำเนินการแล้ว

การร้องขอ (Request) และการตอบสนอง (Response) มีรายละเอียดดังนี้

- การร้องขอ

1. กระบวนการระบุ (Identification service) เป็นกระบวนการแรกที่ต้องใช้หลังจากการต่อหัวอ่านแล้ว การตอบสนองจะบอกรุ่นและครั้งที่ของการแก้ไขของข้อตกลงในการสื่อสาร
2. กระบวนการอ่าน (Read service) เป็นกระบวนการสำหรับอ่านข้อมูลโดยอนุญาตให้อ่านทั้งตารางข้อมูลหรืออ่านเพียงบางส่วน และสามารถทำได้ในสถานะสื่อสารข้อมูลเท่านั้น
3. กระบวนการเขียน (Write service) เป็นกระบวนการสำหรับเขียนข้อมูลโดยอนุญาตให้เขียนทั้งตารางข้อมูลหรือเขียนเพียงบางส่วน และสามารถทำได้ในสถานะสื่อสารข้อมูลเท่านั้น
4. กระบวนการลงบันทึกเปิด (Logon service) เป็นกระบวนการสำหรับเข้าสู่สถานะสื่อสารข้อมูล และสามารถทำได้ในสถานะไอดีเท่านั้น
5. กระบวนการเพื่อความปลอดภัย (Security service) เป็นกระบวนการสำหรับตั้งระดับสิทธิของคู่สื่อสาร
6. กระบวนการลงบันทึกปิด (Logoff service) เป็นกระบวนการสำหรับออกจากสถานะสื่อสารข้อมูลกลับไปยังสถานะไอดี

7. กระบวนการเจรจา (Negotiate service) เป็นกระบวนการสำหรับตั้งค่าหรือเปลี่ยนค่าตัวแปรในการสื่อสาร
8. กระบวนการรอ (Wait service) เป็นกระบวนการสำหรับบอกคู่สื่อสารให้คงช่องทางสื่อสารไว้เป็นระยะเวลาที่ส่งไปเพื่อป้องกันการสิ้นสุดของช่องทางสื่อสารโดยอัตโนมัติเนื่องจากไม่มีการสื่อสารเกิดขึ้นนานเกินกำหนด
9. กระบวนการสิ้นสุดการสื่อสาร (Terminate service) เป็นกระบวนการสำหรับบอกคู่สื่อสารให้สิ้นสุดการสื่อสารกลับสู่สถานะพื้นฐาน

- การตอบสนอง

1. ok (Acknowledge) แสดงว่าคู่สื่อสารสามารถรับข้อมูลที่ส่งไปได้ถูกต้อง หรือกระบวนการที่ร้องขอได้รับการดำเนินการ
2. err (Error) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ โดยไม่ระบุสาเหตุ
3. sns (Service Not Support) แสดงว่าคู่สื่อสารสามารถรับทราบการร้องขอ แต่ไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากคู่สื่อสารไม่รองรับต่อกระบวนการที่ร้องขอ
4. isc (Insufficient Security Clearance) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากระดับสิทธิของผู้ร้องขอไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการนั้น
5. onp (Operation Not Possible) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากข้อมูลที่ส่งมาไม่สามารถนำมาใช้ได้ เช่นความยาวของข้อมูลที่ส่งกับขนาดของตารางไม่ตรงกัน
6. iar (Inappropriate Action Request) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากการร้องขอไม่ถูกต้องเช่น การเขียนบนตารางที่สามารถอ่านได้อย่างเดียว
7. bsy (Busy) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากกำลังดำเนินการอื่นอยู่
8. dnr (Data Not Ready) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากข้อมูลที่ร้องขอยังไม่พร้อมที่จะเข้าถึงได้
9. dlk (Data Lock) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากข้อมูลที่ร้องขอไม่สามารถเข้าถึงได้
10. rno (Renegotiate Request) แสดงว่าคู่สื่อสารต้องการเปลี่ยนสถานะการสื่อสารกลับมายังสถานะ Base หรือ ID เพื่อดำเนินกระบวนการเจรจาเพื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรในการสื่อสาร
11. iss (Invalid Service Sequence State) แสดงว่าคู่สื่อสารไม่สามารถดำเนินการตามกระบวนการที่ร้องขอได้ เนื่องจากการร้องขอที่ส่งไปไม่ถูกต้องกับสถานะการสื่อสารขณะนั้น

2.6.2 ชั้นของการเชื่อมโยงข้อมูล

การสื่อสารในชั้นที่เหนือขึ้นไปจะถูกส่งในรูปแบบของแพ็กเกจของข้อมูล โดยแต่ละแพ็กเกจจะมีความยาวเท่าไรก็ได้แต่ไม่เกินความยาวสูงสุดของแพ็กเกจที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นค่าตั้งต้นเมื่อช่องทางการสื่อสารถูกเปิดขึ้น แต่ค่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการเจรจา

ทุกแพ็กเกจที่ส่งออกไปจะได้รับการตอบสนองเบื้องต้นจากคู่สื่อสารปลายทางเพื่อแสดงว่าได้รับแพ็กเกจถูกต้องครบถ้วนหรือไม่ โดยการตอบสนองเบื้องต้นนี้จะเป็นข้อมูลขนาด 1 ไบท์ที่ไม่ได้ส่งในรูปแบบของแพ็กเกจ โดยแบ่งเป็น Ack แสดงว่าได้รับแพ็กเกจถูกต้อง และ Nak แสดงว่าได้รับแพ็กเกจไม่ถูกต้อง ถ้าผู้ส่งไม่ได้รับการตอบสนองก่อนเวลาที่กำหนดไว้ หรือได้รับการตอบสนอง Nak จะต้องส่งแพ็กเกจเดิมซ้ำอีกครั้งหนึ่ง หากเกิดเหตุที่ทำให้ต้องส่งแพ็กเกจเดิมซ้ำ 3 ครั้งติดกันแล้วผู้ส่งจะถือว่าช่องทางการสื่อสารถูกตัดขาดและสิ้นสุดการสื่อสารทันที ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลออกมาชนกันให้มีเดอริหยุดส่งข้อมูลและรอรับข้อมูลจากตัวอ่าน

ข้อกำหนดของมาตรฐานในชั้นการสื่อสารนี้มีดังนี้

1. ชนิดของข้อมูล (Data Type) เป็นการส่งข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส สื่อสารทางเดียว
2. รูปแบบของข้อมูล (Data Form) เป็นข้อมูลขนาด 8 บิต บิตเริ่มต้น 1 บิต บิตสิ้นสุด 1 บิต และไม่มีบิตภาวะคู่หรือคี่
3. ขั้วของข้อมูล (Data Polarity) แบ่งเป็นเมื่อแอลอีตีเปล่งแสงจะมีค่าเป็นบิตเริ่ม ช่องว่าง และตรรกะ 1 เมื่อแอลอีตีไม่เปล่งแสงจะมีค่าเป็นบิตสิ้นสุด ตรรกะ 0 และสภาวะเงียบ
4. อัตราข้อมูล (Data Rate) กำหนดให้อัตราสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลต้องไม่ต่ำกว่า 9600 บิตต่อวินาที ส่วนอัตราข้อมูลที่ใช้จริงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 300-56200 บิตต่อวินาที
5. จำนวนของแพ็กเกจ (Number of Packet) กำหนดให้ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1 และถ้าต้องการมากกว่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงผ่านกระบวนการเจรจา
6. ขนาดของแพ็กเกจ (Packet Size) มีค่าตั้งต้นเท่ากับ 64 ไบท์ถ้าต้องการมากกว่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงผ่านกระบวนการเจรจา
7. ระยะเวลาว่างการสื่อสาร (Channel Traffic Time Out) คือระยะเวลาที่มากที่สุดที่จะต้องมีการสื่อสารเกิดขึ้น หากระยะเวลานี้สิ้นสุดลงจะถือว่าช่องทางการสื่อสารถูกตัดขาดและการสื่อสารเป็นอันสิ้นสุด ค่าระยะเวลานี้กำหนดให้เท่ากับ 6 วินาที
8. ระยะเวลาระหว่างตัวอักษร (Inter Character Time Out) คือระยะเวลาที่มากที่สุดที่ข้อมูลไบท์ถัดไปในแพ็กเกจเดียวกันต้องถูกส่งออกมา หากระยะเวลานี้สิ้นสุดลงจะถือว่าได้รับแพ็กเกจไม่ถูกต้อง ผู้รับจะส่งการตอบสนอง Nak กลับไปเพื่อให้ผู้ส่งส่งแพ็กเกจเดิมซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ค่าระยะเวลานี้กำหนดให้เท่ากับ 0.5 วินาที
9. ระยะเวลาตอบสนอง (Response Time Out) คือระยะเวลาที่มากที่สุดที่ผู้รับแพ็กเกจจะต้องตอบสนองกลับมายังผู้ส่ง หากระยะเวลานี้สิ้นสุดลงจะถือว่าผู้รับไม่ได้รับแพ็กเกจที่ส่งไป ผู้ส่งจะส่งแพ็กเกจเดิมซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ค่าระยะเวลานี้กำหนดให้เท่ากับ 2 วินาที
10. ระยะเวลากลับตัว (Turn Around Delay) คือระยะเวลาที่มากที่สุดที่ใช้เปลี่ยนสถานะจากผู้ส่งข้อมูลมาเป็นผู้รับข้อมูล หลังจากที่ถูกส่งข้อมูลส่งข้อมูลออกไปเสร็จสิ้นแล้ว ค่าระยะเวลานี้กำหนดให้เท่ากับ 175 ไมโครวินาที

2.7 ข้อกำหนดเรื่องความแม่นยำของมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC687

มาตรฐาน IEC687 เป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าความแม่นยำของมิเตอร์ ที่มีความแม่นยำระดับ 0.2 และ 0.5 โดยมีค่าข้อกำหนดในเรื่องต่างๆดังนี้

- แรงดันอ้างอิงมาตรฐาน U_n ถูกแบ่งตามประเภทของมิเตอร์ได้ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าแรงดันอ้างอิงมาตรฐานของมิเตอร์ประเภทต่างๆ

ประเภทของมิเตอร์	ค่ามาตรฐาน (โวลต์)	ค่ายกเว้น (โวลต์)
มิเตอร์ที่ต่อกับหม้อแปลง กระแสเท่านั้น	120-230-277-400-480	100-127-200-220-240- 380-415
มิเตอร์ที่ต่อกับหม้อแปลง แรงดัน	57.7-63.5-100-110- 115-120-200	173-190-220

- กระแสพิกัดมาตรฐาน I_n มี 3 ระดับคือ 1 A, 2 A และ 5 A โดยกระแสสูงสุดมาตรฐาน (I_{max}) ที่มิเตอร์สามารถวัดได้ถูกต้องคือ $1.2 I_n$
- ความถี่อ้างอิงมาตรฐาน 50 เฮิร์ต และ 60 เฮิร์ต
- ช่วงแรงดันที่มิเตอร์ทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ
 - ช่วงแรงดันที่มิเตอร์ต้องทำงานได้ตามมาตรฐานคือ $0.9U_n-1.1U_n$
 - ช่วงแรงดันที่มิเตอร์สามารถทำงานได้คือ $0.8U_n-1.15U_n$
- ขอบเขตของความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดที่โหลดสมดุล

ขนาดของกระแส	ค่าตัวประกอบกำลัง	ร้อยละของความผิดพลาดในการวัดของมิเตอร์ระดับ	
		0.2	0.5
$0.01I_n < I < 0.05I_n$	1	± 0.4	± 1.0
$0.05I_n < I < I_{max}$	1	± 0.2	± 0.5
$0.02I_n < I < 0.1I_n$	0.5 ตามหลัง	± 0.5	± 1.0
	0.8 นำหน้า	± 0.5	± 1.0
$0.1I_n < I < I_{max}$	0.5 ตามหลัง	± 0.3	± 0.6
	0.8 นำหน้า	± 0.3	± 0.6
$0.1I_n < I < I_{max}$ (สำหรับการร้องขอ พิเศษจากผู้ใช้)	0.25 ตามหลัง	± 0.5	± 1.0
	0.5 นำหน้า	± 0.5	± 1.0

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดเมื่อมีกระแส 1 เฟสและแรงดัน 3 เฟสสมดุล

ขนาดของกระแส	ค่าตัวประกอบกำลัง	ร้อยละของความผิดพลาดในการวัดของมิเตอร์ระดับ	
		0.2	0.5
$0.05I_n < I < I_{max}$	1	± 0.3	± 0.6
$0.1I_n < I < I_{max}$	0.5 ตามหลัง	± 0.4	± 1.0

- ขอบเขตของความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าอื่น ๆ ในระบบแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงขอบเขตของความผิดพลาดในการวัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าอื่น ๆ ในระบบ

ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลง	ขนาดของกระแส (โหลดสมดุล)	ค่าตัวประกอบกำลัง	ขอบเขตการเปลี่ยนแปลง ร้อยละของความผิดพลาดในการวัดของมิเตอร์ระดับ	
			0.2	0.5
ค่าแรงดัน $\pm 10\%$	$0.05I_n < I < I_{max}$	1	0.1	0.2
	$0.1I_n < I < I_{max}$	0.5 ตามหลัง	0.2	0.4
การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ	$0.05I_n < I < I_{max}$	1	0.1	0.2
	$0.1I_n < I < I_{max}$	0.5 ตามหลัง	0.1	0.2
รูปคลื่นของกระแสที่มีฮาร์โมนิกที่ 3 10%	$0.05I_n < I < I_{max}$	1	0.1	0.1
ลำดับเฟสกลับด้าน	$0.1 I_n$	1	0.05	0.1
แรงดันไม่สมดุล	I_n	1	0.5	1.0

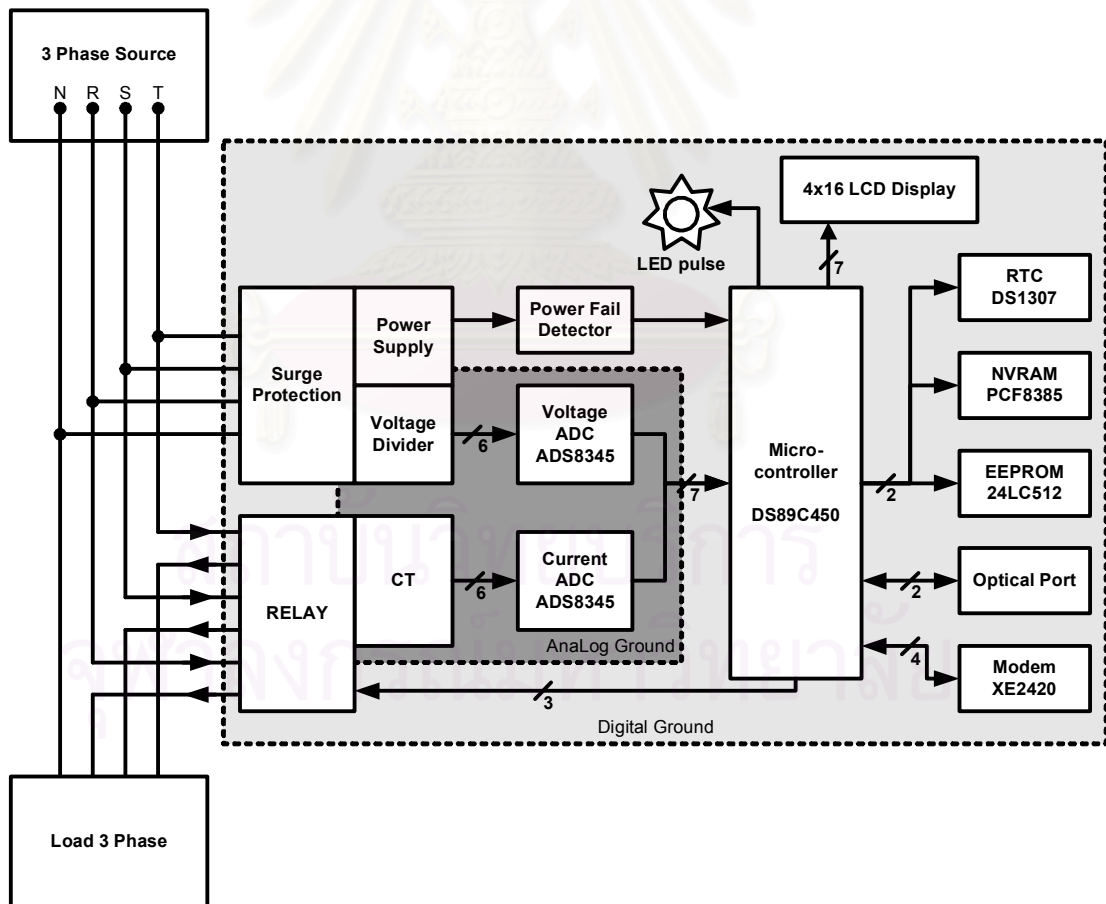
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์

3.1 โครงสร้างของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส

มิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟสควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ มีการชั่งตัวอย่างสัญญาณมาจากตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 2 ตัว แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณ การแสดงผลการวัดมี 2 ทางคือทางจอแสดงผลแอลซีดี และแสดงผ่านพัลส์แสงที่มีความถี่การกระพริบแปรผันตรงกับพลังงานที่วัดได้ ข้อมูลของความต้องการพลังงานในรอบ 15 นาทีจะเก็บลงหน่วยความจำอีอีพรอม ส่วนฐานเวลาจริงมีหน้าที่เก็บค่าเวลาเพื่อควบคุมการเก็บข้อมูลของพลังงานตามช่วงเวลาการใช้ ในกรณีที่แรงดันในระบบทุกเฟสมีค่าต่ำลงเกินกว่าค่าที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเก็บข้อมูลที่สำคัญไว้ในหน่วยความจำไม่ลบเลือนก่อนที่ไฟเลี้ยงจะดับไป เมื่อแรงดันกลับมาสภาวะปกติไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านข้อมูลกลับมาจากหน่วยความจำไม่ลบเลือน และทำงานตามปกติต่อไป มิเตอร์สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านทางช่องทางสื่อสาร 2 ช่องคือพอร์ตแสง และโมเด็ม



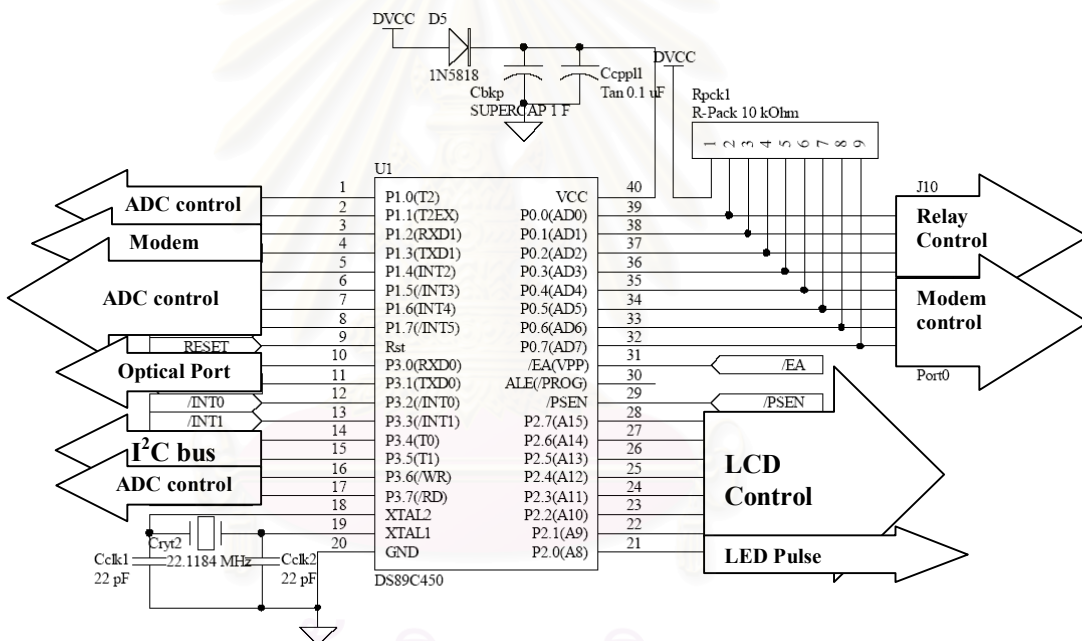
รูปที่ 3.1 รูปแผนภาพบล็อกของมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟส

3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง

ส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการควบคุม การคำนวณและการเก็บข้อมูลของการวัด ซึ่งประกอบไปด้วย

3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ DS89C450 ของบริษัท Dallas Semiconductor [5] ซึ่งมีจุดเด่นคือใช้สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผล 1 คำสั่งน้อยกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ทั่วไปเฉลี่ยแล้วประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความสำคัญของการขัดจังหวะได้แตกต่างกัน 4 ระดับ หน้าที่ของไมโครคอนโทรลเลอร์คือควบคุมการทำงานของมิเตอร์ทั้งหมด ทั้งควบคุมการชั่งตัวอย่างสัญญาณของตัวแปลงและแอนะล็อกเป็นดิจิทัล คำนวณค่าพลังงานและค่าที่ต้องการวัดต่างๆ ควบคุมการบันทึกค่าที่คำนวณได้ในหน่วยความจำ ควบคุมการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ภายนอกทั้งทางพอร์ตแสงและโมเด็ม ควบคุมการเปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าด้วยรีเลย์ ตรวจสอบสถานะของไฟเลี้ยงในเรื่องของไฟตกและไฟดับ และตรวจสอบเวลาของฐานเวลาจริงสำหรับกาการวัดพลังงานตามช่วงเวลาการใช้



รูปที่ 3.2 รูปวงจรมิโครคอนโทรลเลอร์

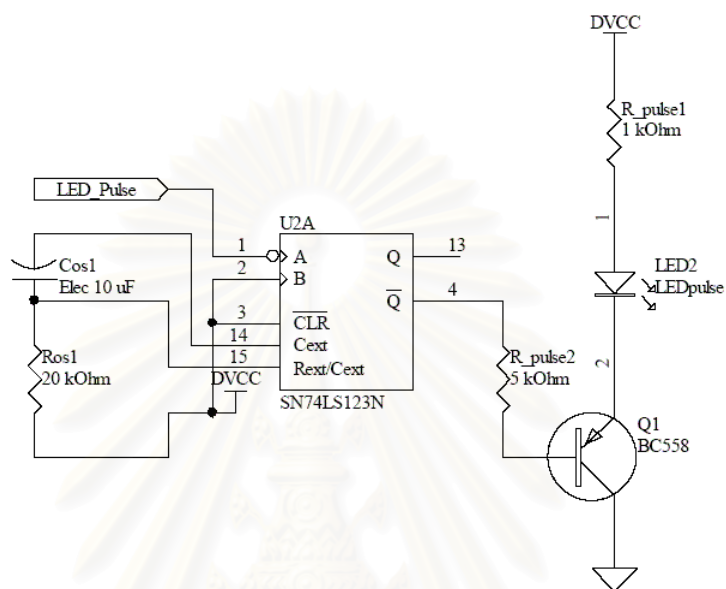
3.2.2 จอแสดงผลแอลซีดี

จอแสดงผลแอลซีดีขนาด 4x16 ตัวอักษร ทำหน้าที่แสดงผลของค่าที่วัดได้โดยการแสดงผลสามารถเลือกได้เป็น 2 โหมดคือ

- โหมดแสดงผลหลัก แสดงเฉพาะพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา
- โหมดแสดงผลรวม แสดงผลทั้งพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ค่าเฉลี่ยรากกำลังสองของกระแส แรงดันเฟส และแรงดันระหว่างสาย

3.2.3 พัลส์แสง

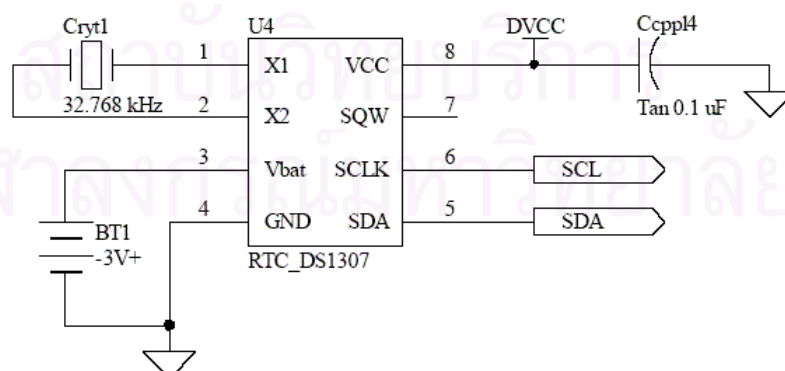
พัลส์แสงทำหน้าที่แสดงค่าพลังงานโดยความถี่ของการกระพริบจะแปรผันตรงกับค่าพลังงานที่วัดได้ อัตราการกระพริบของพัลส์แสงสามารถตั้งได้ด้วยซอฟต์แวร์ วงจรของพัลส์แสงใช้ไอซีเบอร์ 74LS123 Retriggerable Monostable Multivibrators เพื่อหน่วงเวลาการสว่างของพัลส์แสงให้สว่างขึ้นช่วงเวลาหนึ่ง โดยการต่อวงจรแสดงดังรูป



รูปที่ 3.3 รูปวงจรของพัลส์แสง

3.2.4 ฐานเวลาจริง

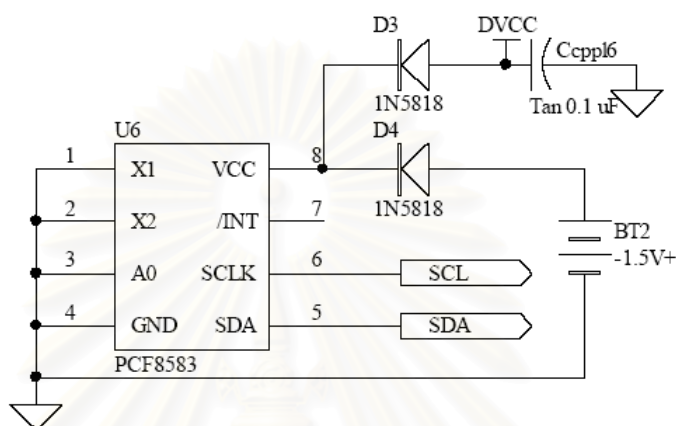
ฐานเวลาจริง (Real Time Clock) ใช้ไอซีเบอร์ DS1307 ของบริษัท Dallas Semiconductor [6] ทำหน้าที่เก็บค่าเวลาปัจจุบันไว้ โดยมีแบตเตอรี่ต่อเป็นไฟเลี้ยงสำรองเพื่อให้เวลาถูกต้องอยู่เสมอแม้เวลาที่ไฟดับ แบตเตอรี่ 1 ก้อนสามารถเก็บค่าเวลาได้นานถึง 5 ปี



รูปที่ 3.4 รูปวงจรของฐานเวลาจริง

3.2.5 หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน

หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (Non-Volatile Memory) ใช้ไอซีเบอร์ PCF8583 ของบริษัท Phillips Semiconductor [7] มีหน่วยความจำขนาด 240 ไบต์ โดยต่อแบตเตอรี่แบบอัลคาไลน์ แรงดัน 1.5 โวลต์จ่ายเป็นไฟเลี้ยงสำรองไว้ ข้อมูลสามารถเก็บได้ด้วยไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ได้นานถึง 5 ปี หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนใช้เก็บข้อมูลสำคัญและสถานะการทำงานของมิเตอร์เมื่อไฟดับ เมื่อไฟในระบบเข้าสู่สภาวะปกติไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำนี้เพื่อทำงานต่อไป



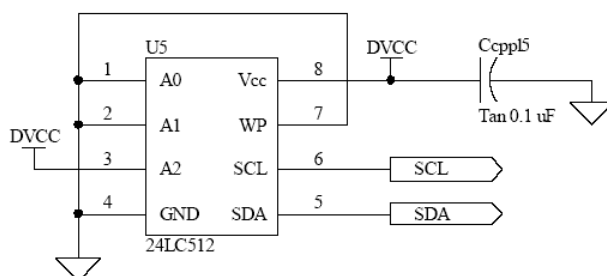
รูปที่ 3.5 รูปวงจรของหน่วยความจำไม่ลบเลือน

ข้อมูลที่เก็บในหน่วยความจำนี้ประกอบไปด้วย

- เวลาที่ไฟดับ
- พลังงานแอกทีฟของทั้ง 4 ช่วงเวลา
- พลังงานรีแอกทีฟของทั้ง 4 ช่วงเวลา
- พลังงานปรากฏของทั้ง 4 ช่วงเวลา
- ตำแหน่งของความต้องการพลังงานล่าสุดก่อนไฟดับ
- ความต้องการพลังงานไฟฟ้าแบบแอกทีฟแยกเฟส
- ความต้องการพลังงานไฟฟ้าแบบแอกทีฟสูงสุดแยกเฟส
- ความต้องการพลังงานไฟฟ้าแบบแอกทีฟสูงสุดรวมทั้ง 3 เฟส
- เวลาของการอ่านมิเตอร์ครั้งล่าสุด
- เลขที่บล็อคของหน่วยความจำอีอีพรอมที่กำลังใช้อยู่

3.2.6 อีอีพรอม

อีอีพรอม ใช้ไอซีเบอร์ 24LC512 เป็นอีอีพรอมขนาด 64 กิโลไบต์ ของบริษัท Microchip [8] มีหน้าที่เก็บข้อมูลความต้องการพลังงานไฟฟ้าทุก 15 นาทีของเฟสต่างๆ โดยมีการแบ่งหน่วยความจำออกเป็น 2 บล็อค แต่ละบล็อคมียขนาด 18 กิโลไบต์ ลักษณะการใช้คือ สลับระหว่างสองบล็อค หากบล็อคหนึ่งใช้เก็บข้อมูลของเดือนปัจจุบัน อีกบล็อคหนึ่งจะเก็บข้อมูลของเดือนก่อนหน้า เมื่อครบเดือนข้อมูลของเดือนก่อนหน้าจะถือว่าถูกอ่านไปแล้วและหน่วยความจำบล็อคนั้นจะถูกใช้เก็บข้อมูลของเดือนใหม่ต่อไป



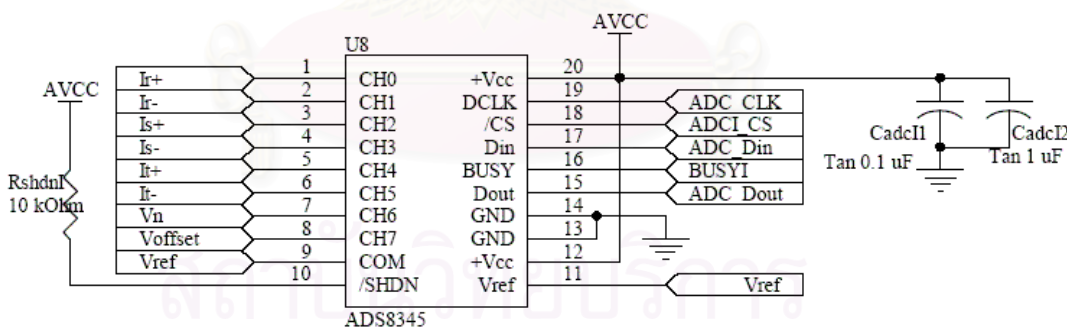
รูปที่ 3.6 รูปวงจรของอีอีพรอม

3.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

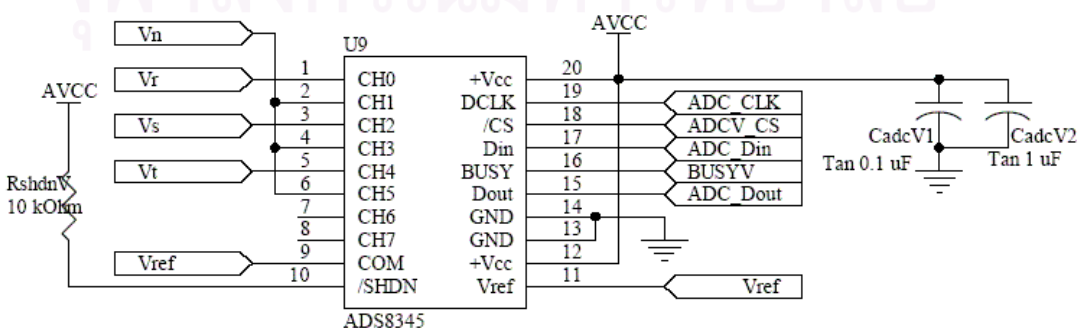
เป็นส่วนที่ติดต่อกับระบบที่เราต้องการวัดโดยสามารถแยกย่อยออกเป็นส่วนประกอบดังนี้

3.3.1 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จำนวน 2 ตัว ใช้ไอซีเบอร์ ADS8345 ของบริษัท Texas Instrument [9] เป็นตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีโครงสร้างแบบ SAR (Successive Approximation Register) มีความละเอียด 16 บิต สามารถรับสัญญาณเข้าแบบเส้นเดียวได้ 8 ช่อง หรือ สัญญาณเข้าเชิงผลต่างได้ 4 ช่อง ควบคุมการทำงานและรับส่งข้อมูลผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมสำหรับอุปกรณ์ต่อพ่วง (SPI: Serial Peripheral Interface) ใช้แรงดันอ้างอิงขนาด 2.5 โวลต์ แต่สามารถวัดแรงดันได้เป็นสองเท่าของแรงดันอ้างอิง แรงดันอ้างอิงสร้างจากไอซีเบอร์ REF3025 ของบริษัท Texas Instrument แรงดันอ้างอิงมีระดับความแม่นยำเท่ากับ 0.2% ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทั้งสองตัวจะแยกกันชั้กตัวอย่างสัญญาณของกระแสและแรงดันโดยมีการต่อวงจรดังรูป



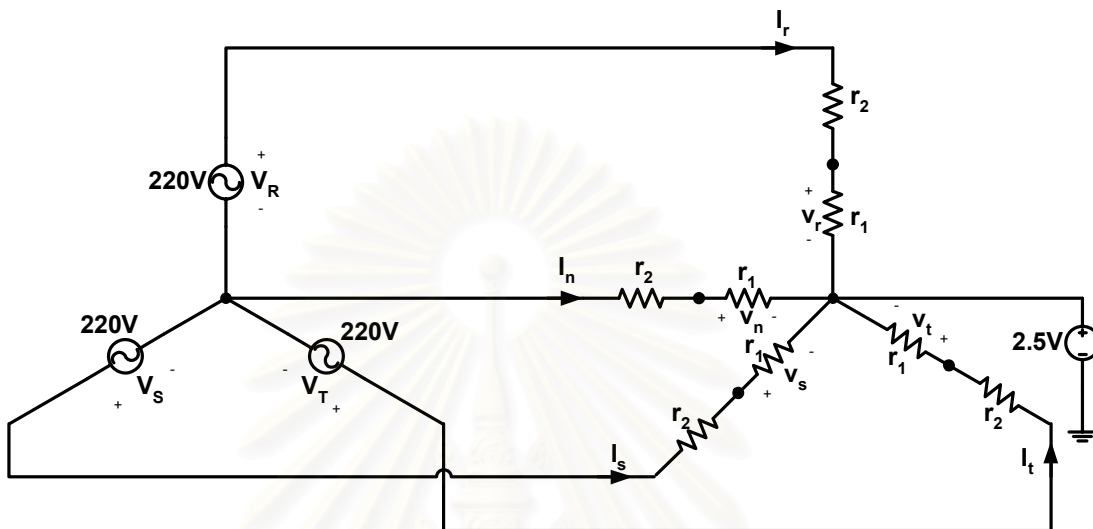
รูปที่ 3.7 รูปวงจรตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อวัดกระแส



รูปที่ 3.8 รูปวงจรตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อวัดแรงดัน

3.3.2 วงจรวัดแรงดัน

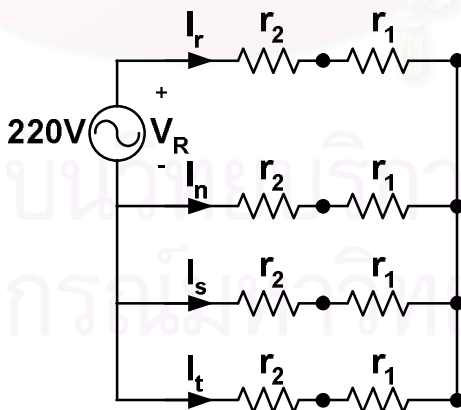
วงจรวัดแรงดันที่ใช้เลือกแบบการใช้ตัวต้านทานแบ่งแรงดันเนื่องจากความเป็นเชิงเส้นที่ดีแล้ววงจรไม่ยุ่งยาก ตัวต้านทานที่เลือกใช้เป็นชนิดที่มีความแม่นยำสูง คือมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดไม่เกิน 0.1 % และมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าตามอุณหภูมิต่ำเพียง 15 ppm เนื่องจากต้องการวัดค่าให้ได้ความแม่นยำสูง



รูปที่ 3.9 รูปวงจรวัดแรงดัน

โดย $r_1 = 3.3 \text{ k}\Omega$ และ $r_2 = 1 \text{ M}\Omega$

จากรูปวงจรถ้า $V_S = V_T = 0$ สามารถเปลี่ยนวงจรเป็นดังรูป



จะได้

$$I_R = \frac{V_R}{R_T + \frac{R_T}{3}} = \frac{3V_R}{4R_T}$$

เมื่อ $R_T = r_1 + r_2$

และ

$$I_S = I_T = I_N = \frac{-V_R}{4R_T}$$

ในกรณีที่ $V_R, V_S, V_T \neq 0$ และเนื่องจากค่าตัวต้านทานที่ต่อทั้ง 3 เฟสเท่ากัน จากทฤษฎีการซ้อนทับ
จะได้ว่า

$$I_N = -\left(\frac{I_R}{3} + \frac{I_S}{3} + \frac{I_T}{3}\right) = -\left(\frac{V_R + V_S + V_T}{4R_T}\right)$$

$$I_R = \frac{3V_R - V_S - V_T}{4R_T}$$

$$I_S = \frac{3V_S - V_R - V_T}{4R_T}$$

$$I_T = \frac{3V_T - V_R - V_S}{4R_T}$$

$$v_n = \frac{r_1}{4(r_1 + r_2)}(V_R + V_S + V_T)$$

$$v_r = \frac{r_1}{4(r_1 + r_2)}(3V_R - V_S - V_T)$$

$$v_s = \frac{r_1}{4(r_1 + r_2)}(3V_S - V_R - V_T)$$

$$v_t = \frac{r_1}{4(r_1 + r_2)}(3V_T - V_R - V_S)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าแรงดันเฟสจาก

$$v_r - v_n = \frac{r_1}{r_1 + r_2}V_R$$

สมการที่ 3.1

และสามารถหาแรงดันระหว่างเฟสจาก

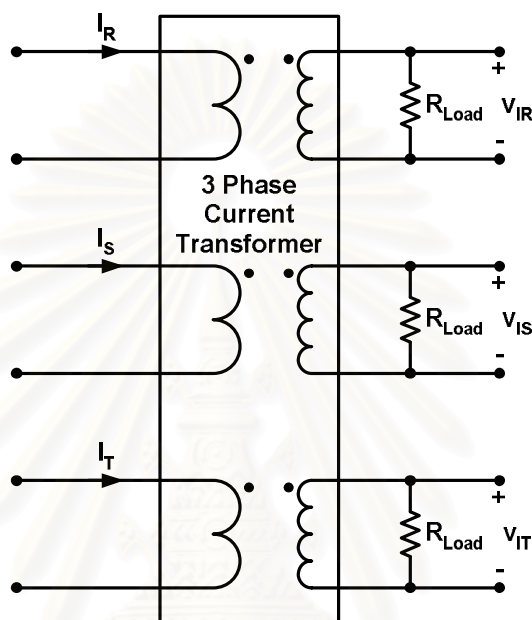
$$v_r - v_s = \frac{r_1}{r_1 + r_2}(V_R - V_S)$$

สมการที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 วงจรวัดกระแส

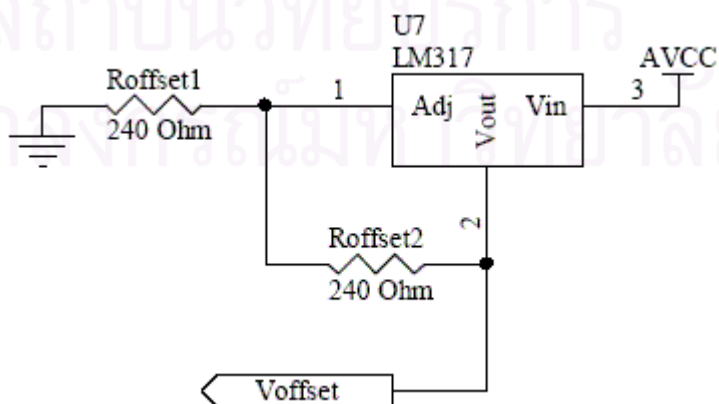
วงจรวัดกระแสที่ใช้เป็นหม้อแปลงกระแสแบบ 3 เฟส รุ่น CT01 ของบริษัท Shenzhen Belta Electronic มีความแม่นยำระดับ 0.1 % อัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิต่อขดลวดทุติยภูมิเท่ากับ 1:1000 กระแสพิกัด 5 A ขดลวดทุติยภูมิต่อกับตัวต้านทานโหลดขนาด 91Ω เพื่อสร้างแรงดันส่งให้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 3.10 รูปวงจรวัดกระแสด้วยหม้อแปลงกระแส

3.3.4 วงจรสร้างแรงดันออฟเซต

วงจรสร้างแรงดันออฟเซต ใช้ไอซีเบอร์ LM317 สร้างแรงดันขนาด 2.5 โวลต์ให้กับวงจรวัดแรงดัน เพื่อให้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถวัดค่าของสัญญาณที่มีค่าลบได้

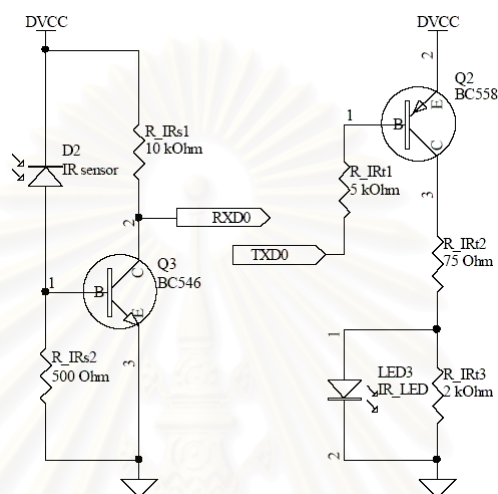


รูปที่ 3.11 รูป วงจรสร้างแรงดันออฟเซต

3.4 วงจรพอร์ตแสง

วงจรพอร์ตแสงเป็นส่วนที่ใช้สื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ที่ใช้แสงอินฟราเรดเป็นตัวนำในการสื่อสาร ตามมาตรฐาน ANSI C12.18 วงจรพอร์ตแสงแยกเป็นภาครับและภาคส่ง

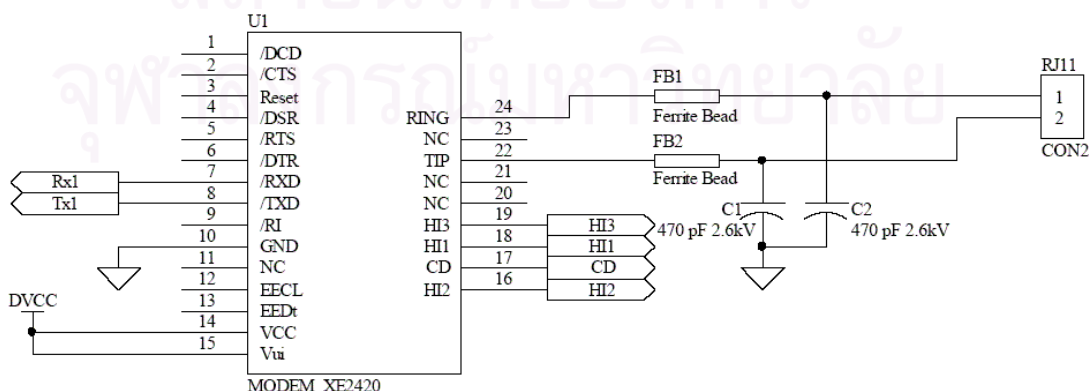
ภาครับ ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ NPN ต่อเป็นวงจรรขยายแบบอิมิตัวเพื่อขยายสัญญาณที่รับมาจากตัวรับแสงอินฟราเรด ส่วนภาคส่ง ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ PNP ต่อเป็นวงจรรขยายแบบอิมิตัวกลับขั้วไปยังแอลอีดีอินฟราเรด จากการทดสอบสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงสุดที่ 56,700 บิตต่อวินาที



รูปที่ 3.12 รูปวงจรถูกภาครับและส่งของพอร์ตแสง

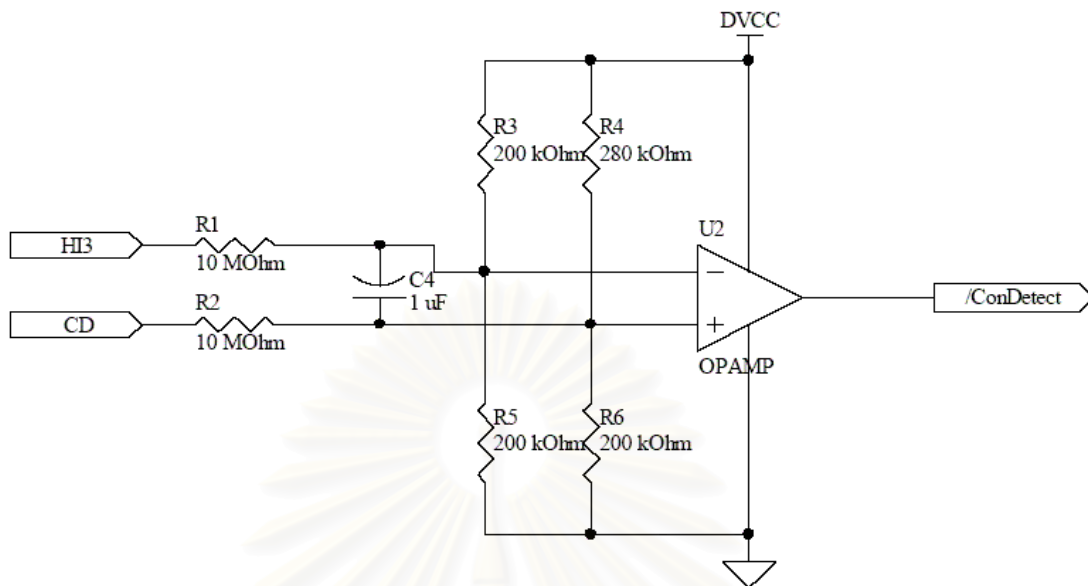
3.5 วงจรโมเด็ม

วงจรโมเด็มเป็นส่วนที่ใช้สื่อสารผ่านสายโทรศัพท์กับโมเด็มปลายทางเพื่ออ่านข้อมูลจากมิเตอร์ รองรับการอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ (AMR: Automatic Meter Reading) โมเด็มที่ใช้เลือกใช้โมเด็มเบอร์ XE2420 ของบริษัท XECOM [10] ภายในจะประกอบด้วย โมเด็มคอนโทรลเลอร์ Analog Front End และ วงจรต่อประสานกับสายโทรศัพท์ โมเด็มนี้รองรับการสื่อสารตามมาตรฐาน V.22bis, V.22, V.23, V.21, Bell202, Bell212A และ Bell103 โดยสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงสุด 2400 บิตต่อวินาที ควบคุมการทำงานผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยคำสั่งตามมาตรฐาน AT Command



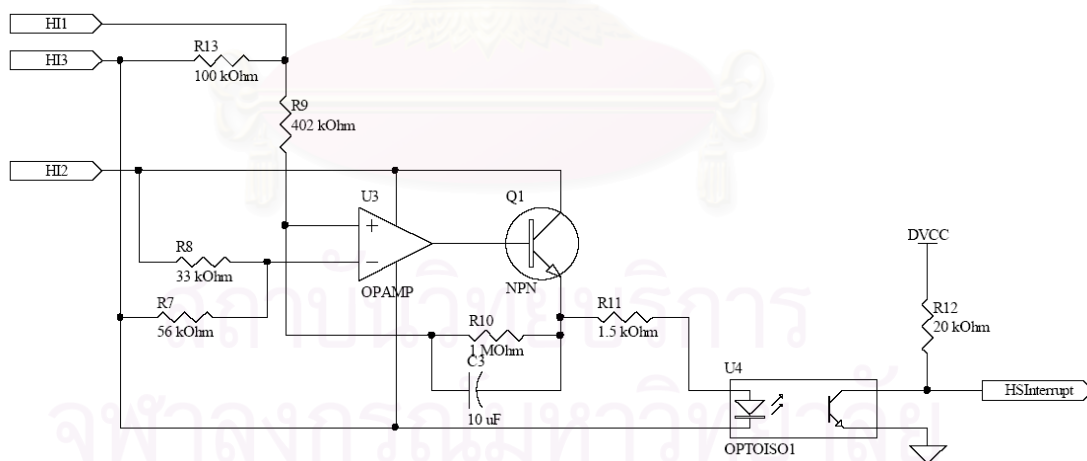
รูปที่ 3.13 รูปวงจรของโมเด็ม

นอกจากโมเด็มแล้วจะมีวงจรที่ต่อเพื่อตรวจสอบว่าสายโทรศัพท์ถูกใช้หรือไม่ ดังรูป



รูปที่ 3.14 รูปวงจรตรวจสอบการใช้งานของสายโทรศัพท์

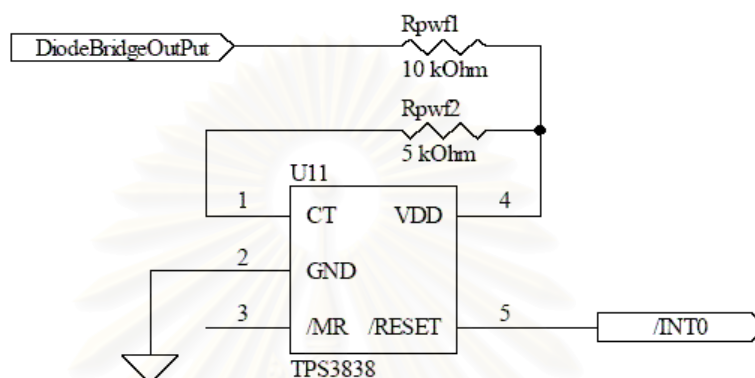
และวงจรที่ตรวจสอบการยกหูของผู้ใช้โทรศัพท์ หากมีการยกหูโทรศัพท์วงจรนี้จะส่งสัญญาณขัดจังหวะให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อบอกให้ยกเลิกการใช้สายและเลื่อนเวลาการโทรออกไปเพื่อป้องกันในกรณีที่ผู้ใช้โทรศัพท์มีความจำเป็นอย่างฉุกเฉิน จะต้องสามารถใช้ได้ทันที



รูปที่ 3.15 รูปวงจรตรวจสอบการยกหูของผู้ใช้โทรศัพท์

3.6 วงจรตรวจสอบไฟตกและไฟดับ

มีหน้าที่ตรวจสอบค่าแรงดันในระบบว่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือไม่ โดยดูจากขนาดของแรงดันขาเข้าของไอซีสร้างไฟเลี้ยง เมื่อแรงดันดังกล่าวตกลงมาต่ำกว่าร้อยละ 70 ของค่าปกติวงจรจะส่งสัญญาณขัดจังหวะให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป วงจรตรวจสอบไฟตกและไฟดับนี้จะใช้ ไอซีเบอร์ TPS3838 ของบริษัท Texas Instrument ต่อเป็นวงจรตรวจสอบค่าแรงดันที่ตั้งค่าไว้ที่ 10 โวลต์ เนื่องจากในสภาวะปกติแรงดันขาเข้าของไอซีสร้างไฟเลี้ยงจะมีค่าประมาณ 14 โวลต์

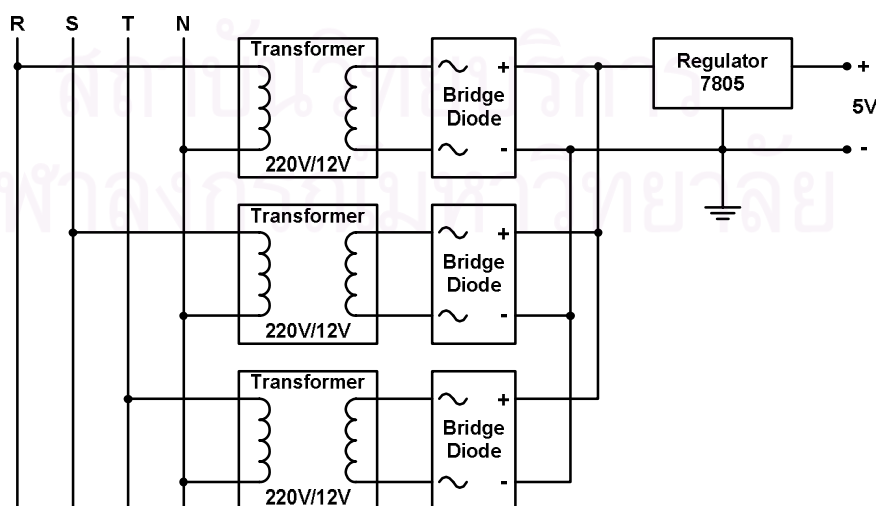


รูปที่ 3.16 รูปวงจรตรวจสอบไฟตกและไฟดับ

3.7 วงจรไฟเลี้ยง

ประกอบด้วยหม้อแปลงที่แปลงจากแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์เป็น 12 โวลต์ จำนวน 3 ตัว (ในกรณีที่มีหม้อแปลงจ่ายกระแสจะได้ออกแรงดันประมาณ 14 โวลต์) หม้อแปลงแต่ละตัวจะต่อกับไดโอดเรียงกระแสแรงดันออกของไดโอดเรียงกระแสจะมารวมกันต่อที่ด้านเข้าของไอซีเบอร์ 7805 เพื่อสร้างไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์

วงจรแบบนี้จะทำให้สามารถสร้างไฟเลี้ยงของมิเตอร์จากแรงดันเฟสใดก็ได้ทำให้มิเตอร์สามารถทำงานได้ครบใบที่ยังมีแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าปกติ



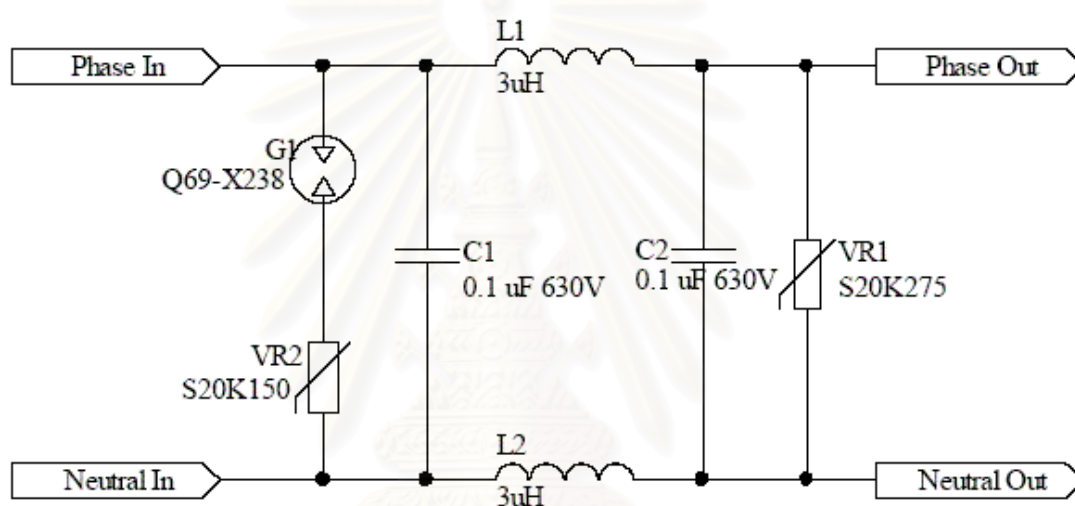
รูปที่ 3.17 รูปวงจรไฟเลี้ยง

3.8 วงจรป้องกันเล็รจ

วงจรมนี้ทำหน้าที่เป็ยงเบนกระแสเล็รจจากสายเฟส (R,S,T) ไปยังสายกลาง (N) ในการออกแบบได้กำหนดค่าแรงดันป้องกันไว้ที่ 500 โวลต์และต้องการแรงดันที่เกิดในขณะที่มีเล็รจเข้ามามีค่าไม่เกิน 800 โวลต์เนื่องจากเป็นขนาดแรงดันที่วงจรวัดแรงดันสามารถทนได้ วงจรมนี้จะใช้กับการต่อแบบ Y 4 สายเท่านั้น

วงจรมป้องกันเล็รจประกอบด้วย กับดักเล็รจ วารีสเตอร์ ตัวเหน็ยวนำ และตัวเก็บประจุโดยเลือกใช้

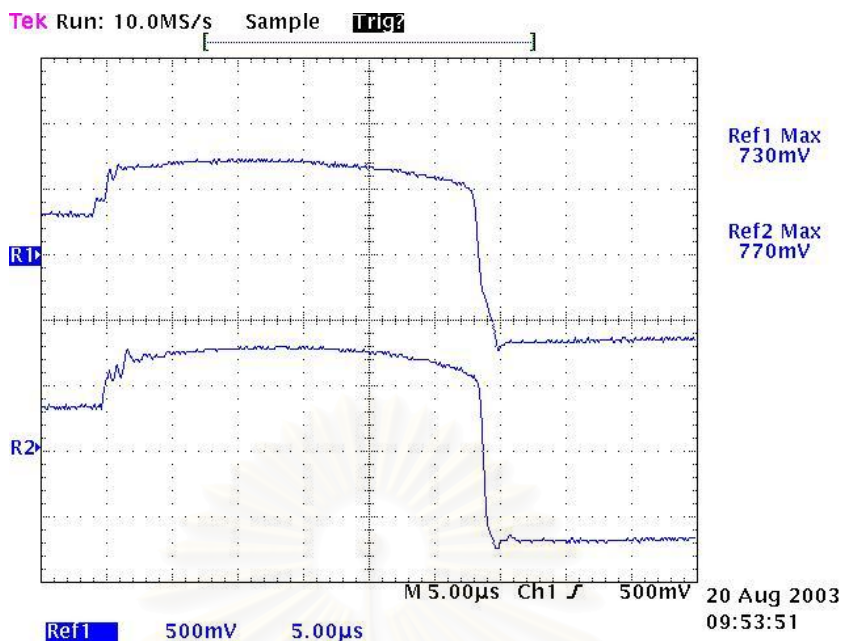
- กับดักเล็รจเบอร์ Q69-X238 มีค่าแรงดันเส็ยสภาพฉับพลัน (Breakdown Voltage) ที่ 350 โวลต์
- วารีสเตอร์เบอร์ S20K150 และเบอร์ S20K275 ของบริษัท EPCOS
- ตัวเหน็ยวนำขนาด 3 uH ที่สามารถรับค่ากระแสสูงได้
- ตัวเก็บประจุขนาด 0.1uF 630 V



รูปที่ 3.18 รูปวงจรมป้องกันเล็รจของแต่ละเฟส

หลักการท้งานของวงจรมคือวงจรมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ทั้งสองส่วนถูกแยกออกจากกันด้วยตัวเหน็ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อเป็นวงจรมกรองแบบ π ส่วนแรกจะเป็นกับดักเล็รจที่มีแรงดันท้งานที่ 350 VDC กับวารีสเตอร์ที่มีแรงดันท้งานที่ 150 VAC ทำหน้าที่รับพลังงานส่วนใหญ่วิโดยในช่วงแรกวงจรมกรองจะช่วยหน่วงให้แรงดันไปถึงส่วนที่สองซึ่งพลังงานที่เหลือจะผ่านไปยังส่วนที่สองที่เป็นวารีสเตอร์ ที่มีแรงดันท้งานที่ 275 VAC

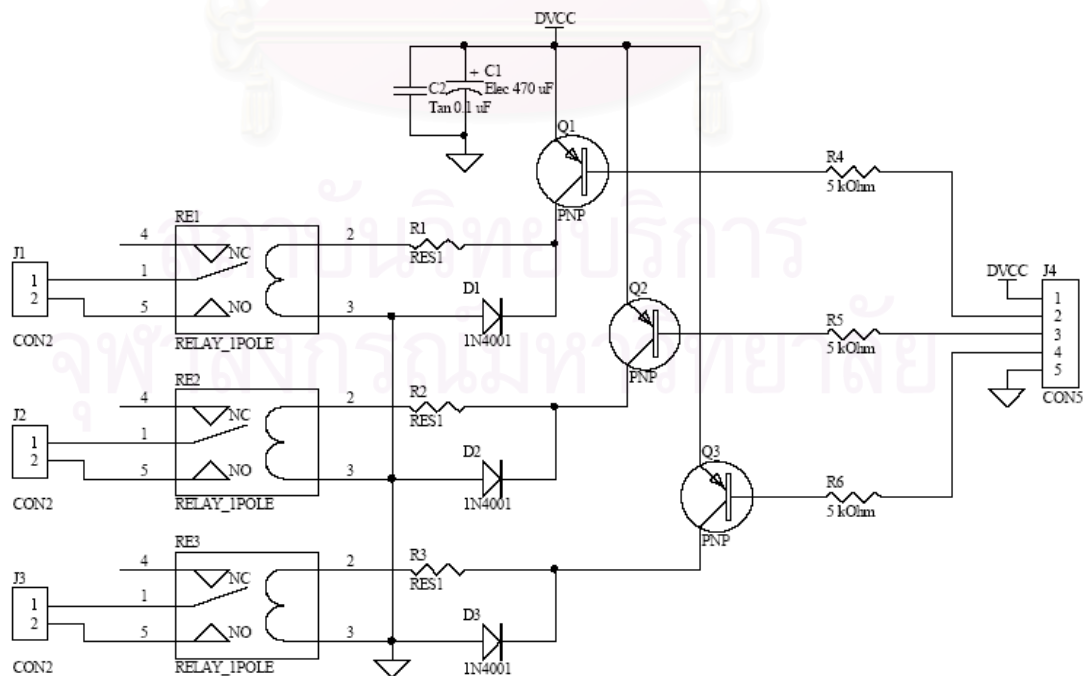
จากการทดสอบด้วยรูปคลื่นแบบผสม 8/20 μ s-5kA 1.2/50 μ s-10kV ได้รูปคลื่นด้านออกดังรูปที่ 3.19 พบว่าแรงดันขาออกมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 770 V และมีแรงดันต่ำสุดอยู่ที่ 770 V ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.19 รูปผลการทดสอบวงจรป้องกันเล็รจ 500 V/DIV และ 5 µs/DIV

3.9 วงจรรีเลย์

ทำหน้าที่ตัดกระแสไฟฟ้าเพื่อรองรับกับระบบการคิดค่าไฟฟ้าแบบจ่ายค่าบริการล่วงหน้า (Pre-paid) โดยใช้รีเลย์เบอร์ FTR-H1CA005V มีสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรรีเลย์จะต่อแบบวงจรปกติ เปิดเมื่อแรงดันในระบบมีค่าปกติและข้อมูลจำนวนหน่วยที่ผู้ใช้สามารถใช้ได้ยังเหลืออยู่ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งรีเลย์ให้ปิดวงจรเพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถใช้จ่ายได้ตามปกติ



รูปที่ 3.20 รูปวงจรรีเลย์

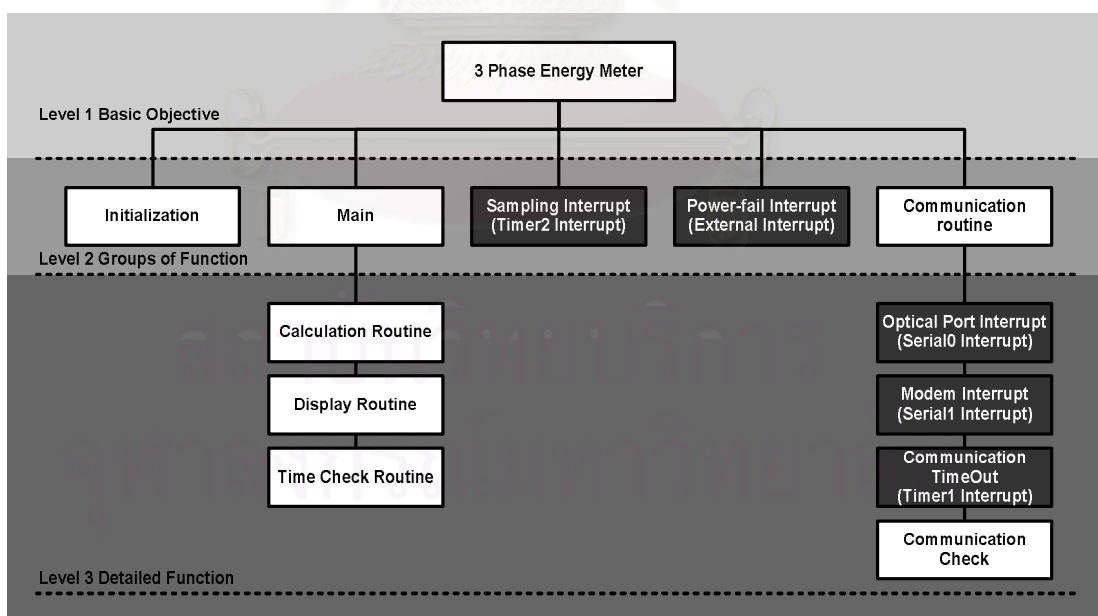
บทที่ 4

ซอฟต์แวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1 หลักการและโครงสร้างซอฟต์แวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์

หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ไมโครคอนโทรลเลอร์คือ การชักตัวอย่างของสัญญาณแรงดันและกระแสของแต่ละเฟสที่ควบคุมด้วยการซัดจังหวะของตัวตั้งเวลาเพื่อให้ความถี่ของการชักตัวอย่างสัญญาณมีค่าคงที่ และระยะเวลาระหว่างการชักตัวอย่างที่ติดกันจะต้องมีค่าที่เท่ากัน ในโปรแกรมซัดจังหวะเพื่อชักตัวอย่างสัญญาณจะมีการเก็บข้อมูลแบบสะสมไว้ ทุกๆ 1 วินาทีโปรแกรมหลักจะย้ายข้อมูลดังกล่าวมาเก็บในหน่วยความจำอีกส่วนหนึ่งพร้อมกับลบข้อมูลเดิมเพื่อรอข้อมูลใหม่จากการชักตัวอย่างสัญญาณในรอบวินาทีถัดไป ข้อมูลที่ย้ายมาจะถูกนำมาใช้คำนวณ แสดงผล และบันทึกลงหน่วยความจำต่อไป ในกรณีที่แรงดันของระบบตกต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือดับไปเลย จะมีการซัดจังหวะเพื่อเก็บข้อมูลที่สำคัญไว้ในหน่วยความจำไม่ลบเลือน เมื่อแรงดันในระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้นจะอ่านข้อมูลเหล่านี้กลับมาแล้วจึงเข้าสู่การทำงานในโปรแกรมหลักต่อไป ในส่วนของการสื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ผ่านพอร์ตแสงและโมเด็มจะใช้การซัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมเพื่อรับส่งแพ็คเกจข้อมูล โดยในตอนท้ายของโปรแกรมหลักจะมีการตรวจสอบว่ามีแพ็คเกจข้อมูลเข้ามาหรือไม่ ถ้ามีก็จะประมวลผลแพ็คเกจข้อมูลต่อไป

โครงสร้างของซอฟต์แวร์ของมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟสแสดงดังรูปต่อไปนี้

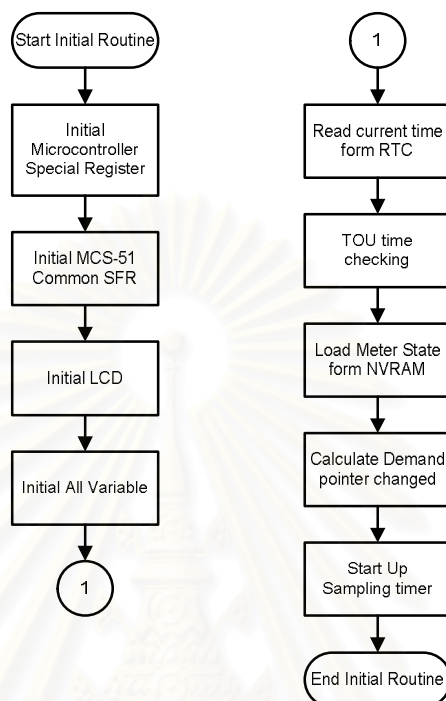


Remark : ■ Interrupt service routine

รูปที่ 4.1 รูปโครงสร้างของซอฟต์แวร์ของมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟส

4.2 โปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้น

โปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้นจะทำงานเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์บูต ไม่ว่าจะเป็นการรีเซ็ตหลังจากไฟเลี้ยงทำงาน หรือการรีเซ็ตจากตัวตั้งเวลาวอตซ์ได้ออก



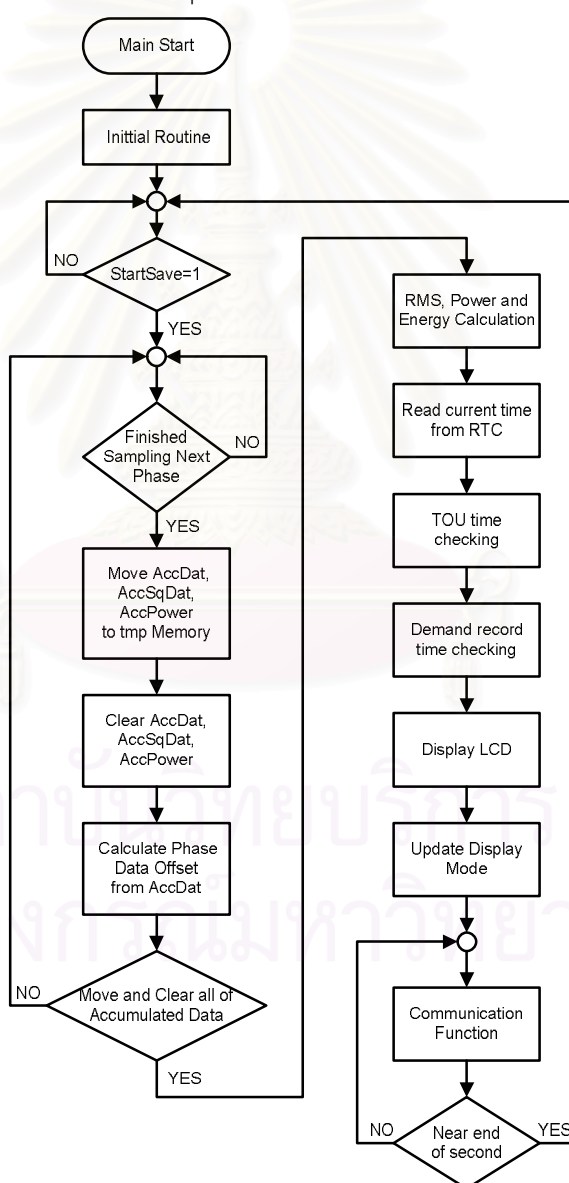
รูปที่ 4.2 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้น

โปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ การกำหนดค่าในส่วนที่ค่าตั้งต้นเหมือนเดิมทุกครั้งไม่ขึ้นกับเวลาและส่วนที่ค่าตั้งต้นขึ้นกับเวลา ในส่วนที่ค่าตั้งต้นไม่ขึ้นกับเวลาจะเริ่มด้วยการกำหนดค่าเรจิสเตอร์ที่มีเฉพาะในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ DS89C450 เพื่อกำหนดจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่จะใช้ประมวลผลต่อ 1 คำสั่ง กำหนดจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่ตัวตั้งเวลาแต่ละตัวจะใช้ต่อการนับ 1 ครั้ง และสั่งให้ตัวตั้งเวลาวอตซ์ได้ออกทำงาน ต่อมาเป็นการกำหนดค่าตั้งต้นของเรจิสเตอร์มาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เพื่อกำหนดช่องทางของการขัดจังหวะและความสำคัญของการขัดจังหวะแต่ละแบบ จากนั้นเป็นการกำหนดค่าตั้งต้นการทำงานให้กับจอแสดงผลแอลซีดีให้ทำงานโดยใช้สัญญาณข้อมูลเพียง 4 เส้น สุดท้ายจึงเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ สำหรับส่วนที่สองเป็นการกำหนดค่าตั้งต้นที่ขึ้นกับเวลา โดยเริ่มจากการอ่านค่าเวลาปัจจุบันจากฐานเวลาจริง ค่าเวลาที่อ่านได้จะใช้กำหนดค่าของช่วงเวลาเพื่อใช้บันทึกพลังงาน ต่อมาเป็นการอ่านข้อมูลและสถานะการทำงานจากหน่วยความจำไม่ลบเลือนกลับมา ในข้อมูลเหล่านี้จะมีค่า DemandPtr เป็นค่าที่บอกตำแหน่งของการบันทึกความต้องการพลังงานในช่วง 15 นาทีที่บันทึกไว้ล่าสุดก่อนไฟดับ ค่า DemandPtr นี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า DemandPtr ที่ถูกคำนวณใหม่จากเวลาปัจจุบันเพื่อหาจำนวนของช่วงเวลา 15 นาทีที่ผ่านมา จำนวนช่วงเวลาที่ได้จะใช้เพื่อเขียนค่า 0 ลงในอีพียูมในตำแหน่งที่บันทึกค่าความต้องการพลังงานในช่วง 15 นาทีในช่วงเวลาที่ไฟดับไป

ในตอนท้ายของโปรแกรมเป็นการสั่งให้ตัวตั้งเวลาหมายเลข 2 เริ่มนับเพื่อเริ่มกระบวนการชั่งตัวอย่างสัญญาณต่อไป

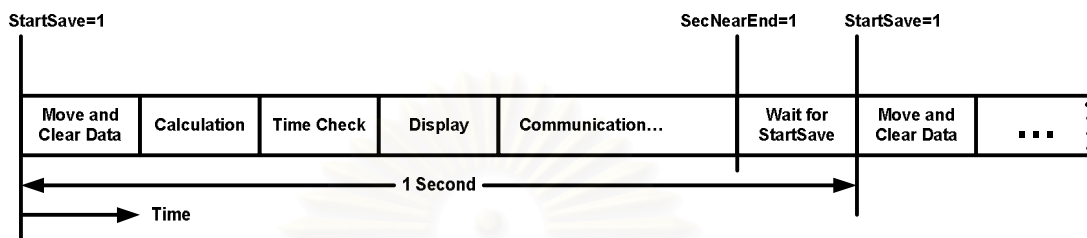
4.3 โปรแกรมหลัก

โปรแกรมหลักจะเริ่มทำงานหลังจากโปรแกรมกำหนดค่าตั้งต้นทำงานเสร็จ โปรแกรมหลักจะวนรอบรอให้ StartSave ถูกกำหนดค่าเป็น 1 ซึ่งแสดงว่าการซักรหัสอย่างสัญญาณได้ทำมาครบ 1 วินาทีแล้ว การซักรหัสอย่างสัญญาณในแต่ละเฟสจะไม่พร้อมกัน แต่จะทำถัดกันไป ดังนั้นแต่ละเฟสจะซักรหัสอย่างเร็วไม่พร้อมกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จาก SavAndClr_f มีค่าเป็น 1 จะหมายความว่าเฟสที่ซักรหัสอย่างเร็วแล้วและรอการย้ายข้อมูลอยู่ เมื่อ StartSave และ SavAndClr_f ถูกกำหนดค่าเป็น 1 แล้วโปรแกรมหลักจะย้ายข้อมูลที่โปรแกรมขัดจังหวะคำนวณสะสมไว้ มายังหน่วยความจำอีกแห่งหนึ่งเพื่อรอการคำนวณ และลบข้อมูลที่ตำแหน่งเดิมเพื่อรอข้อมูลของการซักรหัสอย่างสัญญาณในรอบวินาทีใหม่ต่อไป โปรแกรมหลักจะวนรอบเพื่อรอย้ายและลบข้อมูลทั้งหมด 3 รอบ เมื่อครบแล้วจึงเข้าสู่การคำนวณค่าต่างๆ เช่น ค่ารอกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันและกระแส ค่ากำลังแบบต่าง รวมถึงค่าพลังงานแบบต่างๆ



รูปที่ 4.3 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมหลัก

หลังจากการคำนวณค่าต่างๆจะเป็นการตรวจสอบเวลาเพื่อใช้สำหรับการบันทึกการใช้พลังงานตามช่วงเวลาการใช้ และการบันทึกข้อมูลของความต้องการพลังงานในรอบ 15 นาทีด้วย ต่อมาเป็นการแสดงผลบนจอแสดงผลแอลซีดีและกำหนดว่าในวินาทีถัดไปจะเป็นการแสดงผลค่าอะไร สุดท้ายเวลาที่เหลือในรอบวินาทีนั้นจะเป็นการวนรอบเพื่อตรวจสอบการสื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ผ่านพอร์ตแสงและโมเด็ม จนกว่า SecNearEnd จะถูกกำหนดให้เป็น 1 จึงออกจากการวนรอบและกลับไปวนรอบรอบ StartSave ต่อไป

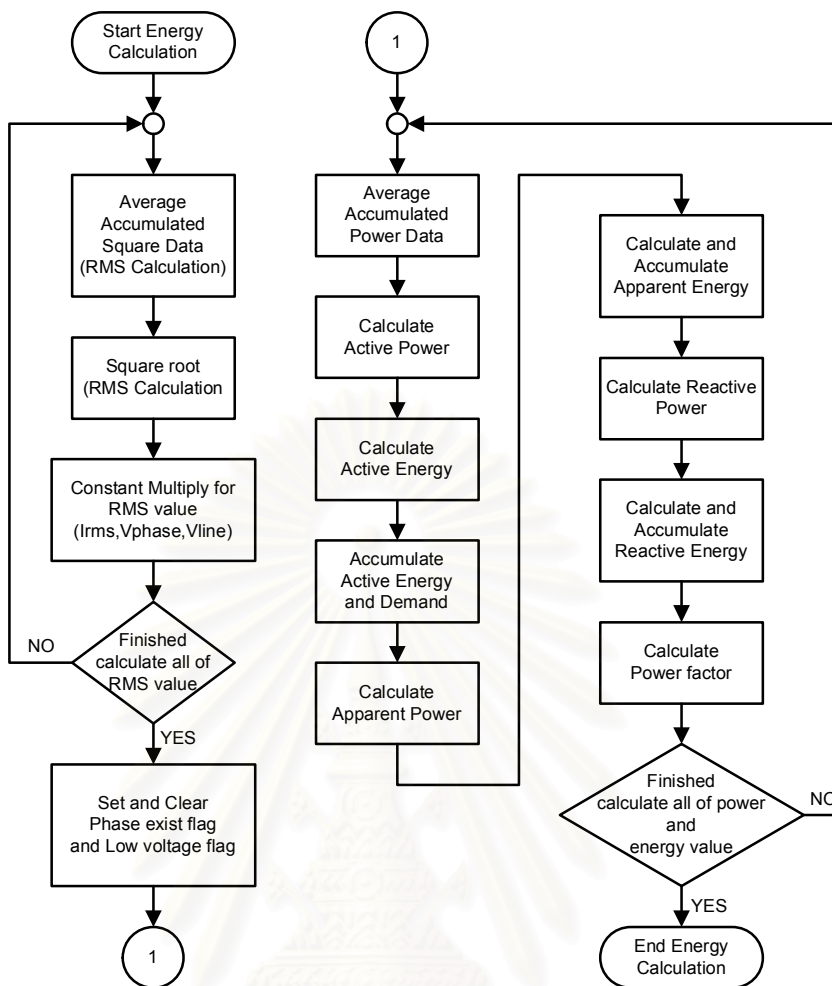


รูปที่ 4.4 รูปแสดงการใช้เวลาของโปรแกรมหลักใน 1 วินาที

4.3.1 โปรแกรมย่อยของการคำนวณ

โปรแกรมย่อยของการคำนวณเป็นส่วนของการคำนวณค่าต่างๆที่ต้องการวัด โดยการคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ

1. การคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ กระแสเฟส แรงดันเฟส และแรงดันระหว่างสาย เนื่องจากค่ากำลังสองสะสมที่โปรแกรมซัดจ์หวนเพื่อซัดจ์ตัวอย่างสัญญาณคำนวณไว้ จะเก็บอยู่ในตัวแปรแถวลำดับ(Array)ของตัวแปรขนาด 6 ไบท์ การคำนวณจึงสามารถวนรอบทำซ้ำได้เพียงแค่เปลี่ยนค่าดัชนีที่ชี้ตัวแปรเท่านั้น การคำนวณจะเริ่มจากการเฉลี่ยค่ากำลังสองสะสมจากนั้นจึงเป็นการถอดรากที่สองของค่าที่ได้ ผลการคำนวณจะถูกเก็บไว้ใช้คำนวณพลังงาน และถูกนำมาคูณกับค่าคงที่เพื่อแปลงหน่วย
2. การคำนวณกำลังและพลังงานแบบต่างๆ เนื่องจากค่าพลังงานสะสมถูกเก็บไว้เป็นตัวแปรแถวลำดับ ทำให้การคำนวณสามารถวนรอบทำซ้ำได้ และใช้ดัชนีชี้ว่าจะคำนวณค่าชุดใด การคำนวณจะเริ่มจากการเฉลี่ยค่าพลังงานสะสม ค่าที่ได้สามารถนำมาหาค่ากำลังแอกทีฟ และหาพลังงานแอกทีฟ จากนั้นเป็นการคำนวณหาค่ากำลังปรากฏและพลังงานปรากฏจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ กระแสเฟสและแรงดันเฟส ต่อมาเป็นการหาค่ากำลังรีแอกทีฟและพลังงานรีแอกทีฟและค่าตัวประกอบกำลังจากค่ากำลังแอกทีฟและกำลังปรากฏ สูตรการคำนวณได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อการวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยของการคำนวณ

- ค่าคงที่ในการแปลงหน่วยของแรงดันสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการที่ 3.1 $v_r - v_n = v_m = \frac{r_1}{r_1 + r_2} V_R$

ค่าที่ได้จากตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลคือ

$$v_{dm} = \frac{v_m}{V_{ref}} \times 2^{15} = \left(\frac{r_1}{r_1 + r_2} V_R \right) \times \frac{2^{15}}{V_{ref}}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า V_R จาก v_{dm} คือ

$$V_R = v_{dm} \times \frac{V_{ref}}{2^{15}} \times \frac{r_1 + r_2}{r_1}$$

แทนค่า $V_{ref} = 2.5 \text{ V}$, $r_1 = 3.3 \text{ k}\Omega$, $r_2 = 1 \text{ M}\Omega$

$$V_R = v_{dm} \times \frac{2.5}{2^{15}} \times \left(\frac{1000 + 3.3}{3.3} \right) \quad (V)$$

$$V_R = \frac{2508.25}{108134.4} v_{dm} \quad (V)$$

สมการที่ 4.1

เนื่องจากการคำนวณเป็นการคำนวณเลขจำนวนเต็มทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องแปลงหน่วยให้เล็กลงเพื่อความถูกต้องของการวัดเอาไว้

$$V_R = \frac{25082.5}{108134.4} v_{dm} \quad (100mV)$$

ค่าคงที่ที่ได้สามารถแทนด้วยการคูณและหารด้วยค่าคงที่มีอัตราส่วนใกล้เคียงกันดังนั้นจะได้ว่า

$$V_R \approx \frac{7601}{2^{15}} v_{dm} \quad (100mV)$$

จะได้ค่าคงที่การคูณ $V_{MUL}=7,601$ และใช้การเลื่อนบิตไปทางขวา 15 ครั้งแทนการหารด้วย 2^{15}

- ค่าคงที่ในการแปลงหน่วยของกระแสสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.10 สามารถหาค่าแรงดันคร่อม R_{Load} ได้ดังนี้

$$v_{IR} = \frac{I_R}{CT_ratio} R_{Load}$$

ค่าที่ได้จากตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลคือ

$$v_{dIR} = \frac{v_{IR}}{V_{ref}} \times 2^{15} = \left(\frac{I_R}{CT_ratio} R_{Load} \right) \times \frac{2^{15}}{V_{ref}}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า I_R จาก v_{dIR} คือ

$$I_R = v_{dIR} \times \frac{V_{ref}}{2^{15}} \times \frac{CT_ratio}{R_{Load}}$$

แทนค่า $V_{ref}=2.5V$, $CT_ratio=1000$, $R_{Load}=91\Omega$

$$I_R = v_{dIR} \times \frac{2.5}{2^{15}} \times \frac{1000}{91} \quad (A)$$

$$I_R = \frac{v_{dIR}}{1192.7552} \quad (A) \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

$$I_R = \frac{v_{dIR}}{1.1927552} \quad (mA)$$

$$I_R \approx \frac{27473}{2^{15}} v_{dIR} \quad (mA)$$

จะได้ค่าคงที่การคูณ $I_{MUL}=27,473$ และใช้การเลื่อนบิตไปทางขวา 15 ครั้งแทนการหารด้วย 2^{15}

- ค่าคงที่ในการแปลงหน่วยของกำลังและพลังงานสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการที่ 4.1
$$V_R = \frac{2508.25}{108134.4} v_{dm} \quad (V)$$

และสมการที่ 4.2
$$I_R = \frac{v_{dIR}}{1192.7552} \quad (A)$$

ค่ากำลังขับพลันมีค่าเท่ากับ

$$P_R = I_R \times V_R = \frac{1}{1192.7752} \times \frac{2508.25}{108134.4} \times v_{dIR} \times v_{dm} \quad (W)$$

$$P_R = \frac{P_{dR}}{51421.45635} \quad (W)$$

สามารถหาค่ากำลังเฉลี่ยในเวลา 1 วินาทีจาก

$$P_{Ravg} = \int_0^1 P_R dt = \frac{1}{51421.45635} \int_0^1 P_{dR} dt \quad (W)$$

$$P_{Ravg} = \frac{P_{dRavg}}{51421.45635} \quad (W)$$

ค่าพลังงานที่ใช้ใน 1 วินาทีมีค่าเท่ากับ

$$W_R = \frac{P_{dRavg}}{36 \times 51421.45635} \quad (0.01Wh)$$

$$W_R = \frac{P_{dRavg}}{1851172.429} \quad (0.01Wh) \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

ดังนั้นจะได้ค่า $P_{const} = 51,421$ และได้ค่า $E_{const} = 1,851,172$

ค่าคงที่ที่คำนวณได้นี้จะใช้กับการคำนวณแรงดัน กระแส กำลังและพลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ของทั้ง เฟส R S และ T

4.3.2 โปรแกรมย่อยการแสดงผลและกำหนดการแสดงผล

โปรแกรมย่อยการแสดงผลเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการแสดงผลการวัดทางจอแสดงผลแอลซีดี โดยเริ่มจากการลบข้อมูลการแสดงผลก่อนหน้าออกก่อนเป็นการเตรียมพื้นที่ว่างให้กับโปรแกรมย่อยของการแสดงผลเฉพาะอย่าง จากนั้นจึงเป็นการตรวจสอบค่าตัวแปร DisplayMode ซึ่งใช้แสดงว่าจะต้องแสดงผลค่าอะไรบนจอแสดงผล จากนั้นจึงเรียกโปรแกรมย่อยของการแสดงผลเฉพาะอย่างตามที่ค่า DisplayMode กำหนดไว้

โปรแกรมย่อยของการแสดงผลเฉพาะอย่างมีด้วยกัน 8 โปรแกรมดังนี้

- การแสดงผลค่าพลังงานไฟฟ้า
- การแสดงผลค่ารอกำลังสองเฉลี่ยของกระแสและแรงดันเฟส
- การแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้า
- การแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง
- การแสดงผลค่ารอกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันระหว่างสาย
- การแสดงผลค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 15 นาทีนั้นๆ
- การแสดงผลเวลาปัจจุบัน
- การแสดงว่ามีเตอร์กำลังมีการสื่อสารผ่านพอร์ตแสงหรือโมเด็ม

หลังจากโปรแกรมย่อยการแสดงผลทำงานเสร็จแล้วจะเป็นการเรียกโปรแกรมย่อยกำหนดการแสดงผลเพื่อกำหนดค่าของ DisplayMode ที่จะใช้ในการแสดงผลครั้งถัดไป โปรแกรมย่อยนี้มีหน้าที่ควบคุมว่าจะแสดงผลอะไร หรือไม่แสดงผลอะไร การแสดงผลเฉพาะอย่างแต่ละแบบจะมีการหน่วงเวลาดังไว้ก็วินาที

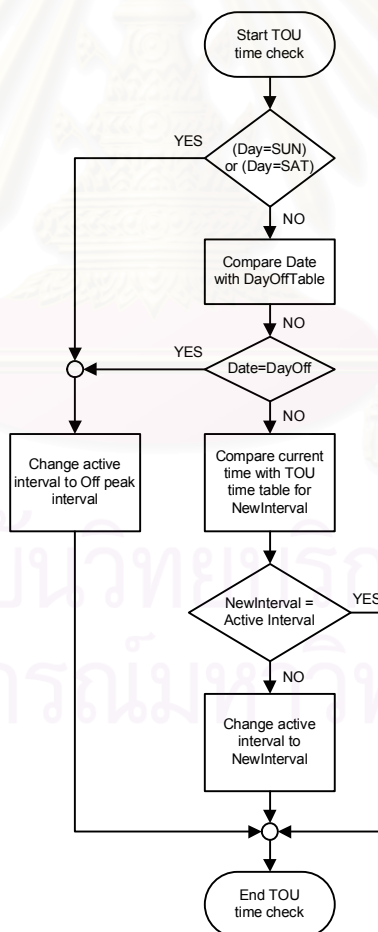
4.3.3 โปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา

โปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลาทำหน้าที่ตรวจสอบเวลาปัจจุบันจากฐานเวลาจริงเพื่อปรับค่าตัวแปรควบคุมการบันทึกข้อมูลที่สามารถคำนวณได้ การตรวจสอบเวลาจะใช้กับการบันทึกข้อมูล 2 อย่างคือ

1. การบันทึกค่าพลังงานตามช่วงเวลาการใช้

ช่วงเวลาที่ใช้บันทึกพลังงานสามารถกำหนดให้มีจำนวนได้มากที่สุด 4 ช่วงเวลา และสามารถกำหนดได้ว่าแต่ละช่วงเวลาจะเริ่มและสิ้นสุดเวลาใด แต่ในการใช้งานจริงอาจใช้น้อยกว่า 4 ช่วงก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดได้ว่าช่วงเวลาไหนจะเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ (Off-peak Interval) โดยช่วงเวลานี้จะรวมวันเสาร์-อาทิตย์และวันหยุดเข้าไปด้วย ในโปรแกรมนี้กำหนดตัวแปร ActiveIntev ให้เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงว่าเวลาปัจจุบันอยู่ในช่วงเวลาใด และใช้เป็นดัชนีในการบันทึกข้อมูลการใช้พลังงาน

การตรวจสอบเวลาจะเริ่มจากการตรวจสอบว่าเป็นวันเสาร์-อาทิตย์ หรือวันหยุดราชการหรือไม่ ถ้าใช่จะปรับค่าของ ActiveIntev ให้เป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ ถ้าไม่ใช่จะเปรียบเทียบเวลาปัจจุบันกับตารางเวลาเพื่อหาว่าเวลาปัจจุบันอยู่ในช่วงเวลาใด แล้วปรับค่า ของ ActiveIntev ให้ตรงกับช่วงเวลาที่ต้องการ

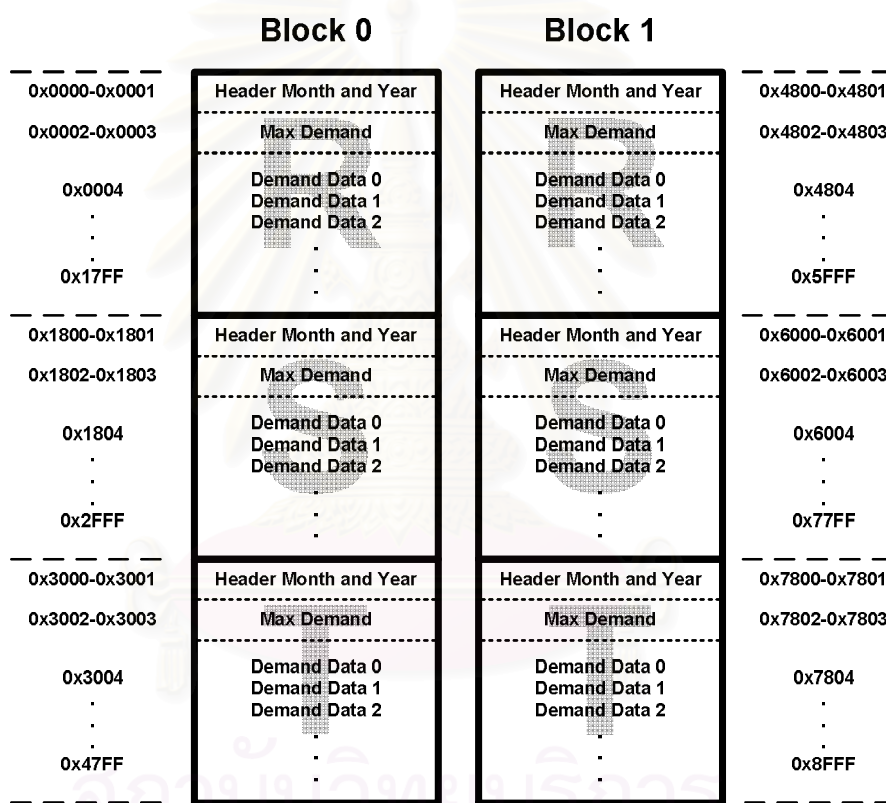


รูปที่ 4.6 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา

2. การบันทึกค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาที

การบันทึกค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาที ลงในอีอีพรอมจะมีการแบ่งหน่วยความจำออกเป็น 2 บล็อกคือ บล็อกที่ใช้บันทึกข้อมูลของเดือนก่อนหน้าและ บล็อกที่ใช้บันทึกข้อมูลของเดือนปัจจุบัน แต่ละบล็อกถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน รูปแบบการบันทึก 1 ค่าใช้เนื้อที่ 2 ไบท์ในรูปแบบของเลขฐานสิบเข้ารหัสฐานสอง (BCD: Binary Coded Decimal) มีหน่วยเป็น Wh ในอีอีพรอมแต่ละส่วนจะประกอบด้วย

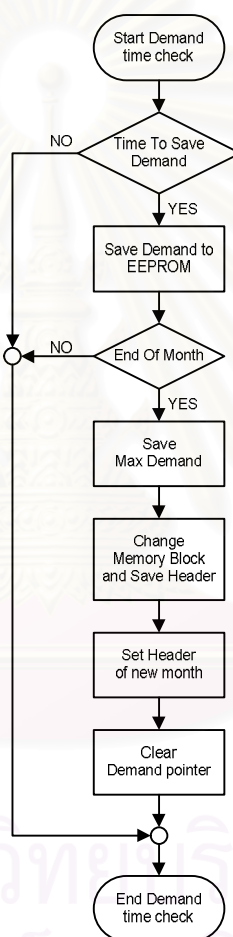
- เดือนและปีของข้อมูลในอีอีพรอมส่วนนั้น
- ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาทีสูงสุดของเดือนนั้น
- ข้อมูลความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาทีของทั้งเดือน



รูปที่ 4.7 รูปแสดงการแบ่งเนื้อที่ของอีอีพรอม

ในโปรแกรมการบันทึกค่าจะมีตัวแปรควบคุมอยู่ 2 ตัวแปรคือ DemandPtr เป็นตัวแปรที่ใช้เป็นดัชนีชี้ตำแหน่งของการบันทึกค่าลงในอีอีพรอม โดยใช้ร่วมกับค่าออฟเซตของแต่ละส่วนในการบันทึกค่าทั้ง 3 เฟส และ MemBlockNo เป็นตัวแปรที่ใช้ชี้บล็อกของอีอีพรอมที่กำลังใช้อยู่

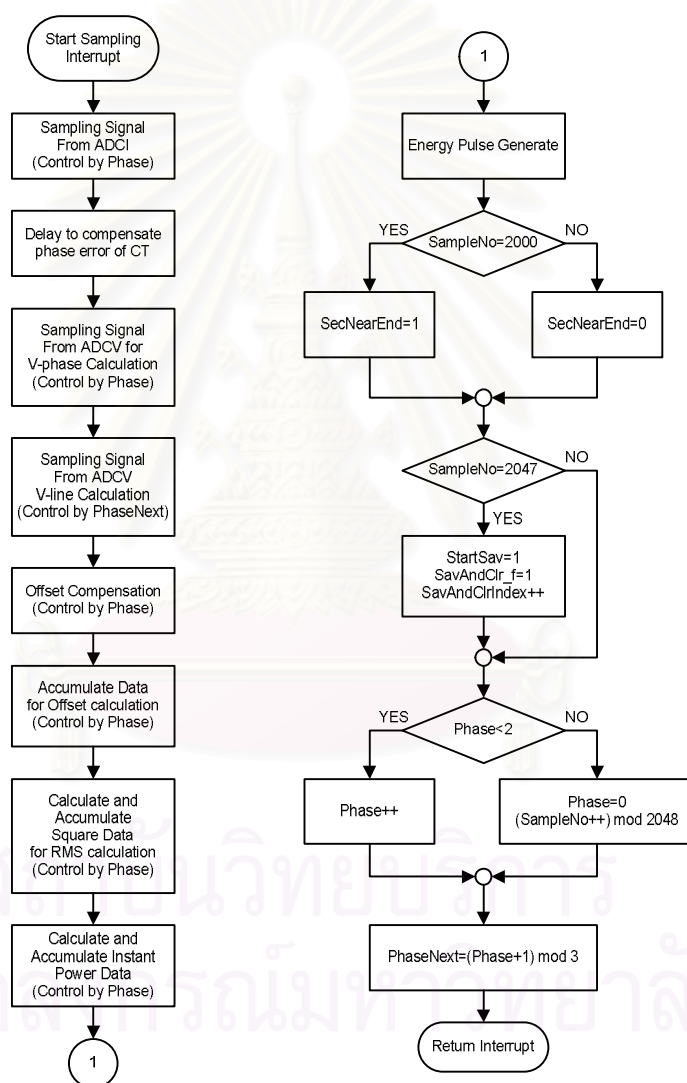
การตรวจสอบเวลาจะเริ่มจากการตรวจสอบเวลาว่าตรงกับวินาทีแรกของนาฬิกาที่ 0, 15, 30 และ 45 หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะจบการตรวจสอบเวลา แต่ถ้าใช่จะบันทึกค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาทีที่สะสมมาลงอีอีพรอมในตำแหน่งที่ DemandPtr ชี้อยู่ แล้วปรับค่า DemandPtr เพื่อชี้ตำแหน่งของการบันทึกครั้งต่อไป จากนั้นจะเทียบเวลาว่าเป็นเวลาขึ้นเดือนใหม่หรือไม่ถ้าใช่จะบันทึกค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และปรับค่า MemBlockNo เพื่อเลือกใช้อีอีพรอมอีกบล็อกหนึ่งสำหรับบันทึกค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในรอบ 15 นาทีในเดือนถัดไป พร้อมกับบันทึกค่าเดือนและปีของเดือนใหม่ในตอนต้นของแต่ละส่วน จากนั้นกำหนดค่า DemandPtr ให้ชี้ไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการบันทึก อีอีพรอมบล็อกเดิมจะถูกเก็บไว้เพื่อรอการอ่านข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4.8 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการตรวจสอบช่วงเวลา

4.4 โปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณ

โปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณใช้การขัดจังหวะของตัวตั้งเวลาหมายเลข 2 ซึ่งทำงานในรูปแบบการนับเลขขนาด 16 บิตโดยมีการกำหนดค่าเริ่มต้นใหม่อัตโนมัติเพื่อให้เวลาระหว่างการชั่งตัวอย่างสัญญาณมีค่าเท่ากันเสมอ ความถี่ของการขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณกำหนดที่ค่า 6,144 ตัวอย่างต่อวินาที ซึ่งแบ่งได้เป็นเฟสละ 2,048 ตัวอย่างต่อวินาที สาเหตุที่เลือกค่าความถี่ในการชั่งตัวอย่างสัญญาณเป็นค่านี้นี้เพราะว่าต้องการความผิดพลาดในการคำนวณต่ำและในการคำนวณค่าเฉลี่ยสามารถใช้การเลื่อนค่าไปทางขวาแทนการหารได้ โปรแกรมขัดจังหวะนี้ถูกกำหนดให้มีความสำคัญระดับ 2 ซึ่งเป็นระดับที่สำคัญที่สุดรองจากโปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับเท่านั้น



รูปที่ 4.9 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณ

โปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณมีตัวแปรที่ใช้ควบคุมการทำงาน 2 ตัวคือ Phase เป็นตัวแปรที่กำหนดว่าการขัดจังหวะครั้งนี้จะต้องชั่งตัวอย่างสัญญาณของเฟสใด รวมถึงควบคุมการบันทึกค่าที่คำนวณสะสมต่างๆลงในตัวแปรแถวลำดับ และตัวแปร SampleNo เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงจำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ชั่งมาได้ ใช้ควบคุมการกำหนดค่าตัวแปร SecNearEnd และตัวแปร StartSave

โปรแกรมซัดจิงหวะเพื่อซัดจิงหวะอย่างสัญญาณเริ่มด้วยการซัดจิงหวะอย่างสัญญาณกระแสก่อนโดยจะมีตัวแปร Phase เป็นตัวกำหนดว่าจะต้องซัดจิงหวะอย่างกระแสของเฟสใด จากนั้นเป็นการหนดเวลาเพื่อซัดจิงหวะความผิดพลาดมมูมเฟสของหม้อแปลงกระแส ต่อมาจึงเป็นการซัดจิงหวะอย่างสัญญาณแรงดันของเฟสเดียวกันและเฟสถัดไปติดต่อกัน ข้อมูลที่ได้จะถูกบวกรอกด้วยค่าออฟเซตออกก่อนแล้วจึงถูกนำมาใช้ในการคำนวณต่างๆ

ค่าที่คำนวณได้จะถูกบวกรวบรวมลงในตัวแปรลำดับแถวที่กำหนดขึ้นคือ

- ACC_DAT[Phase][I,V,VI] เป็นตัวแปรลำดับแถว 2 มิติชนิด long ที่ใช้เก็บค่าบวกรวมของตัวอย่างสัญญาณที่ยังไม่ได้ลบค่าออฟเซตออก มิติที่ใช้ข้างตัวแปรนี้คือเฟสของสัญญาณและชนิดของสัญญาณว่าเป็น กระแสเฟส แรงดันเฟส หรือ แรงดันระหว่างสาย
- SUM48[Phase][I,V,VI,P] เป็นตัวแปรลำดับแถว 2 มิติของตัวแปรขนาด 6 ไบที่ใช้เก็บค่ากำลังสองสะสมของสัญญาณที่ลบค่าออฟเซตออกแล้วและค่ากำลังไฟฟ้าสะสม มิติที่ใช้ข้างตัวแปรนี้คือเฟสของสัญญาณและชนิดของสัญญาณว่าเป็น กระแสเฟส แรงดันเฟส แรงดันระหว่างสาย หรือกำลังไฟฟ้า
- Epulse เป็นตัวแปรชนิด long ใช้เก็บค่ากำลังไฟฟ้าสะสมเพื่อใช้ในการสร้างพัลส์แสง

การคำนวณค่าของตัวอย่างสัญญาณที่ได้มีดังนี้

- ค่ากระแสเฟสและแรงดันเฟสถูกนำไปบวกรวมในตัวแปร ACC_DAT
- ค่าสัญญาณแรงดันเฟสปัจจุบันลบด้วยค่าสัญญาณแรงดันเฟสถัดไปจะได้แรงดันระหว่างสาย นำไปบวกรวมไว้ในตัวแปร ACC_DAT
- ค่ากระแสเฟส แรงดันเฟส และแรงดันระหว่างสาย นำไปยกกำลังสองแล้วบวกรวมในตัวแปร SUM48
- นำค่าสัญญาณกระแสเฟสปัจจุบันมาคูณกับค่าสัญญาณแรงดันเฟสปัจจุบันเป็นกำลังไฟฟ้าเฉียบพลันแล้วบวกรวมเข้าไปในตัวแปร SUM48
- ค่ากำลังไฟฟ้าเฉียบพลันหารด้วย 256 แล้วบวกรวมเข้าไปในตัวแปร Epulse สาเหตุของการหารจะชี้แจงในเนื้อหาส่วนการคำนวณค่าคงที่เพื่อสร้างพัลส์แสง

เมื่อการคำนวณค่าต่างๆข้างต้นเสร็จแล้ว จะเป็นกระบวนการสร้างพัลส์แสง โดยตัวแปร Epulse จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ Ec เพื่อสร้างพัลส์แสง ถ้าค่า Epulse สูงกว่า Ec จะส่งพัลส์แสงออกไปและลบค่า Epulse ออกด้วย Ec

อัตราการกระพริบของพัลส์แสง (Pulse Rate) สามารถตั้งได้ 4 อัตราคือ 1,000 2,000 5,000 และ 10,000 พัลส์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงหรือ 1, 0.5, 0.2 และ 0.1 วัตต์ชั่วโมงต่อพัลส์ตามลำดับ การเปลี่ยนอัตราการกระพริบจะทำได้โดยการเปลี่ยนค่าคงที่ Ec ค่าคงที่ Ec คือปริมาณของค่ากำลังไฟฟ้าสะสมที่ยังไม่ผ่านการเฉลี่ยและแปลงหน่วยที่มีค่าเท่ากับอัตราการกระพริบของพัลส์ที่มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง ค่าคงที่ Ec สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ 4.3} \quad W_R = \frac{P_{dRavg}}{1851172.429}$$

ในการคำนวณเชิงเลข ที่มีการซัดจิงหวะอย่าง N ตัวอย่างใน 1 วินาทีจะได้ว่า

$$W_R = \frac{1}{1851172.429} \times \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_{dR} \quad (0.01Wh)$$

$$W_R = \frac{1}{185117242.9} \times \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_{dR} \quad (Wh)$$

จะได้ว่ากำลังสะสมในโปรแกรมขัดจังหวะจะมีค่าเท่ากับ

$$\sum_{n=0}^{N-1} P_{dR} = W_R \times 185117242.9 \times N$$

$$\therefore Ec = PulseRate(Wh / impulse) \times 185117242.9 \times N$$

แต่เนื่องจากเมื่อลองแทนค่าอัตราการกระพริบเป็น 1 วัตต์ชั่วโมงต่อพัลส์ และ N=2048 จะได้

$$Ec = 3.791201135 \times 10^{11}$$

ค่า Ec ที่ได้มีค่าใหญ่เกินกว่าที่จะใส่ในตัวแปร long จึงใช้วิธีลดค่ากำลังสะสมที่ใช้บวกสะสมลงด้วยการหารด้วย 256 การลดค่าของกำลังสะสมที่ใช้สร้างพัลส์จะส่งผลต่อความผิดพลาดในการคำนวณน้อยมาก เนื่องจากยังเหลือตำแหน่งนัยสำคัญอยู่ถึง 24 บิต ดังนั้นจะสามารถหาค่า Ec ใหม่ได้จาก

$$Ec = PulseRate(Wh / impulse) \times 185117242.9 \times N \div 256$$

เมื่อแทนค่า N=2048 และแทนค่าอัตราการกระพริบจะได้ค่า Ec ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า Ec ที่อัตราการกระพริบค่าต่างๆ

อัตราการกระพริบ		EC
วัตต์ชั่วโมงต่อพัลส์	พัลส์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง	
0.1	10,000	148,093,794
0.2	5,000	296,187,589
0.5	2,000	740,468,971
1	1,000	1,480,937,943

นอกจากนี้โปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณจะมีหน้าที่บอกโปรแกรมหลักว่าใกล้ครบรอบ 1 วินาทีแล้ว โดยเมื่อจำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ชั่งมาใกล้ครบ ก็จะกำหนดค่า SecNearEnd ให้เป็น 1

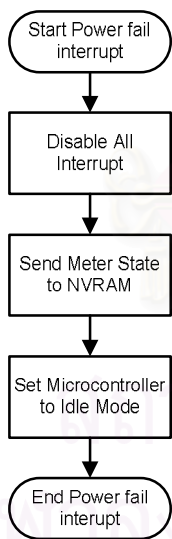
ต่อมาเมื่อเฟสแรกชั่งตัวอย่างสัญญาณครบแล้ว จะกำหนดค่า StartSave ให้เป็น 1 เพื่อบอกให้โปรแกรมหลักย้ายค่าสะสมที่ได้ไปเก็บไว้ เมื่อเฟสต่อมาชั่งตัวอย่างสัญญาณเสร็จจะมีการเพิ่มค่า SavAndClrIndex เพื่อบอกโปรแกรมหลักว่ายังเหลือข้อมูลที่ยังไม่ได้ย้ายไปเก็บไว้อีกกี่เฟส

ในตอนท้ายของโปรแกรมขัดจังหวะเพื่อชั่งตัวอย่างสัญญาณจะเป็นการกำหนดตัวแปร Phase และ PhaseNext เพื่อใช้ในการขัดจังหวะครั้งถัดไป

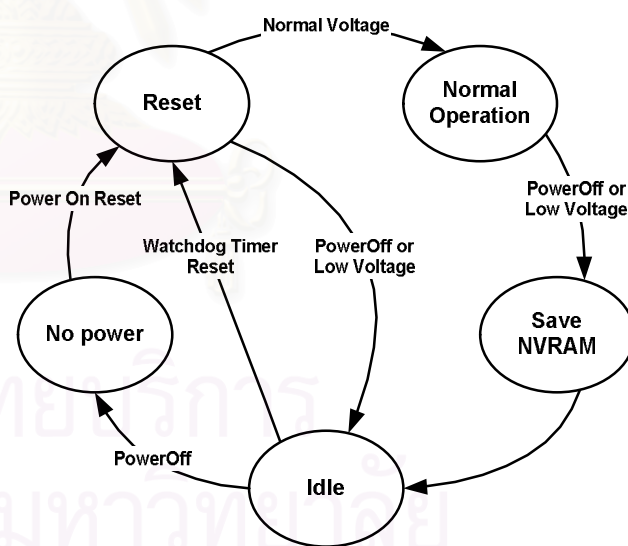
4.5 โปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับ

โปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับใช้การขัดจังหวะจากสัญญาณที่ขา /INT0 ซึ่งต่อกับวงจรตรวจสอบไฟตกหรือไฟดับ การขัดจังหวะนี้ถูกกำหนดให้มีความสำคัญระดับ 3 ซึ่งเป็นระดับที่ความสำคัญสูงสุด โปรแกรมนี้จะเริ่มจากการยกเลิกการขัดจังหวะแบบอื่นทั้งหมด ต่อมาเป็นการบันทึกข้อมูลสถานะของการทำงานของมิเตอร์และข้อมูลของพลังงานต่างๆลงในหน่วยความจำไม่ลบเลือน เมื่อบันทึกเสร็จแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์จะเข้าสู่สถานะว่างงาน (Idle)

การทำงานของมิเตอร์สามารถแบ่งเป็นสถานะโดยเริ่มจากสถานะ ไม่มีพลังงาน (No Power) ซึ่งเป็นสถานะที่มิเตอร์ยังไม่ทำงานเนื่องจากยังไม่มีไฟเลี้ยง เมื่อแรงดันในระบบเพียงพอทำให้มิเตอร์เข้าสู่สถานะ รีเซ็ต (Reset) ซึ่งเป็นการรีเซ็ตเนื่องจากไฟเลี้ยง ถ้าไม่มีสัญญาณบอกว่าไฟตกหรือไฟดับจะเข้าสู่สถานะ การทำงานปกติ (Normal Operation) ระหว่างการทำงานปกติหากมีไฟตกหรือไฟดับมิเตอร์จะเข้าสู่สถานะ การบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำไม่ลบเลือน (Save NVRAM) เมื่อบันทึกข้อมูลเสร็จแล้วจะเข้าสู่สถานะว่างงาน ในสถานะว่างงานส่วนประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการทำงานทุกอย่าง แต่ว่าตัวตั้งเวลายังทำงานอยู่ในกรณีที่ไฟดับหรือไฟตกจนถึงขั้นที่ไฟเลี้ยงมีค่าน้อยกว่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถทำงานได้มิเตอร์จะเข้าสู่สถานะไม่มีพลังงานเหมือนตอนเริ่มต้น แต่ในกรณีที่ไฟตกแต่ยังอยู่ในขั้นที่ขนาดไฟเลี้ยงเพียงพอให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานได้ ตัวตั้งเวลาขอตัดออกจะเป็นตัวส่งสัญญาณรีเซ็ตเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์กลับมาคอยตรวจสอบว่าระดับแรงดันในระบบกลับมาเป็นปกติหรือยัง



รูปที่ 4.10 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมขัดจังหวะเมื่อไฟตกหรือไฟดับ



รูปที่ 4.11 รูปแผนภาพสถานะของมิเตอร์

4.6 โปรแกรมการสื่อสารเพื่ออ่านข้อมูล

โปรแกรมการสื่อสารเพื่ออ่านข้อมูลประกอบด้วย โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารกับเครื่องอ่านมิเตอร์ที่อยู่ตอนท้ายของโปรแกรมหลัก โปรแกรมขัดจังหวะของการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0 และพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 โดยพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0 จะต่อกับวงจรถูกแปลง ใช้สื่อสารด้วยมาตรฐาน ANSI C12.18 ส่วนพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 จะต่อกับโมเด็มเพื่อใช้สำหรับการอ่านมิเตอร์ผ่านสายโทรศัพท์

โปรแกรมการสื่อสารเพื่ออ่านข้อมูลจะแยกอธิบายการทำงานได้ดังนี้

4.6.1 โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสาร

โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารทำหน้าที่ตรวจสอบว่ามีความต้องการใช้การสื่อสารผ่านพอร์ตแสงหรือโมเด็มหรือไม่ ถ้ามีจะประมวลผลตามความต้องการที่เกิดขึ้น โปรแกรมนี้จะทำงานในตอนท้ายของโปรแกรมหลัก โดยใช้เวลาที่เหลือในตอนท้ายของแต่ละวินาทีมาประมวลผล

การทำงานของโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารจะเริ่มจากการตรวจสอบว่ายังมีเวลาเหลือหรือไม่หากเวลาที่เหลือในรอบวินาทีนั้นใกล้หมดจะหยุดการทำงานไว้ก่อน แล้วรอมาทำในรอบใหม่ ดังนั้นการทำงานของโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารจะเน้นการทำงานแบบสถานะ เพื่อให้สามารถทำงานต่อเนื่องจากรอบวินาทีก่อนหน้าได้

ตัวแปรที่ใช้บอกสถานะการทำงานของการสื่อสารจะมีดังต่อไปนี้

- CommPrpf เป็นตัวแปรที่แสดงว่าพอร์ตแสงหรือโมเด็มกำลังดำเนินการสื่อสารอยู่
- Genf เป็นตัวแปรที่แสดงให้ทราบว่าต้องการใช้การสื่อสารผ่านพอร์ตแสง เนื่องจากมีแฟ็กเกจข้อมูลเข้ามา หรืออยู่ระหว่างการส่งข้อมูลแบบหลายแฟ็กเกจ
- GenMf เป็นตัวแปรที่แสดงให้ทราบว่าต้องการใช้การสื่อสารผ่านโมเด็ม เนื่องจากมีแฟ็กเกจข้อมูลเข้ามา หรืออยู่ระหว่างการส่งข้อมูลแบบหลายแฟ็กเกจ
- MultiPacf เป็นตัวแปรที่แสดงให้ทราบว่าขณะนี้กำลังอยู่ในระหว่างการส่งข้อมูลแบบหลายแฟ็กเกจ
- State0 เป็นตัวแปรแสดงสถานะของพอร์ตแสง
- StateWork เป็นตัวแปรแสดงถึงสถานะลำดับของกระบวนการการสื่อสารผ่านพอร์ตแสง
- Modemf เป็นตัวแปรบิตที่แสดงให้ทราบว่าขณะนี้กำลังใช้การสื่อสารด้วยโมเด็มอยู่หรือไม่
- ModemMode เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสถานะของโมเด็มโดยแบ่งออกเป็น Command Mode ซึ่งเป็นโหมดที่โมเด็มกำลังรับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง และ Data Mode เป็นโหมดที่โมเด็มจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางรับข้อมูลที่ส่งมาทางสายโทรศัพท์ส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่งข้อมูลที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ออกไปยังสายโทรศัพท์
- ModemState0 เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสถานะการทำงานของโมเด็มที่ทำงานใน Data Mode
- ModemCommandState เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสถานะการทำงานของโมเด็มที่ทำงานใน Command Mode
- ModemStateWork เป็นตัวแปรแสดงถึงสถานะลำดับของกระบวนการการสื่อสารผ่านโมเด็ม

โปรแกรมย่อย GenResponse สำหรับการสื่อสารก่อนหน้าเป็นแบบแพ็กเกจเดียว และเรียกโปรแกรมย่อย CommMultiPac เมื่อการสื่อสารก่อนหน้าเป็นแบบหลายแพ็กเกจ มาประมวลผลและสร้างแพ็กเกจตอบสนอง แล้วส่งออกไปด้วยโปรแกรมย่อย OpPort_StartTx สำหรับการสื่อสารด้วยพอร์ตแสง หรือด้วยโปรแกรมย่อย Modem_StartTx สำหรับการสื่อสารด้วยโมเด็ม ณ จุดนี้ถือเป็นการสิ้นสุดรอบการทำงานของการโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสาร 1 รอบ การวนรอบจะทำต่อไปจนกว่าเวลาในรอบวินาทีนั้นหมดลงจึงออกจากโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสาร

จากโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารจะพบว่ามีการใช้ประมวลผลแพ็กเกจที่สำคัญคือโปรแกรมย่อย GenResponse ทำหน้าที่ประมวลผลแพ็กเกจที่ได้รับ และสร้างแพ็กเกจตอบสนองเมื่อได้รับแพ็กเกจข้อมูลจากอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ทุกครั้ง และโปรแกรมย่อย CommMultiPac ทำหน้าที่สร้างแพ็กเกจต่อเนื่องเมื่อมีการสื่อสารที่มีเตอร์ต้องส่งข้อมูลหลายแพ็กเกจ แต่ละโปรแกรมย่อยมีการทำงานดังต่อไปนี้

โปรแกรมย่อย CommMultiPac

โปรแกรมย่อย CommMultiPac ทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากอีพีพรอมเพื่อสร้างแพ็กเกจข้อมูลต่อเนื่องโดยจะเป็นการคัดลอกข้อมูลจากตำแหน่งที่กำหนดในอีพีพรอมมายังบัฟเฟอร์ข้อมูลของพอร์ตแสงตามจำนวนที่กำหนด

โปรแกรมย่อย GenResponse

โปรแกรมย่อย GenResponse เริ่มต้นการทำงานด้วยการตรวจสอบค่า CRC ของแพ็กเกจนั้นก่อนว่ามีค่าถูกต้องตามการคำนวณและข้อมูลส่วนหัวของแพ็กเกจนั้นหรือไม่ถูกต้องตามโครงสร้างของแพ็กเกจตามมาตรฐานหรือไม่หากมีความผิดพลาดจะถือว่าแพ็กเกจที่ได้รับไม่ถูกต้อง โปรแกรมจะส่งการตอบสนอง Nack ออกไปและไม่ประมวลผลแพ็กเกจนั้น ถ้าค่า CRC และข้อมูลส่วนหัวของแพ็กเกจถูกต้องโปรแกรมจะส่งการตอบสนอง Ack จากนั้นจะตรวจสอบการร้องขอของแพ็กเกจนั้น ต่อมาจะตรวจสอบว่าการร้องขอนั้นเหมาะสมกับสถานะลำดับของกระบวนการหรือไม่ มิเตอร์สนับสนุนกระบวนการที่ร้องขอหรือไม่ และระดับสิทธิที่ใช้สามารถใช้กระบวนการที่ร้องขอได้หรือไม่ ถ้าไม่โปรแกรมจะสร้างแพ็กเกจตอบสนอง issr หรือ snp หรือ isc ตามลำดับและไม่ดำเนินกระบวนการที่ร้องขอ หากกระบวนการที่ร้องขอสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้ง 3 ข้างต้น โปรแกรมจะดำเนินการตามการร้องขอและสร้างแพ็กเกจตอบสนอง ok และเตรียมข้อมูลที่ตัวอ่านต้องการลงในบัฟเฟอร์เพื่อรอการส่งต่อไป

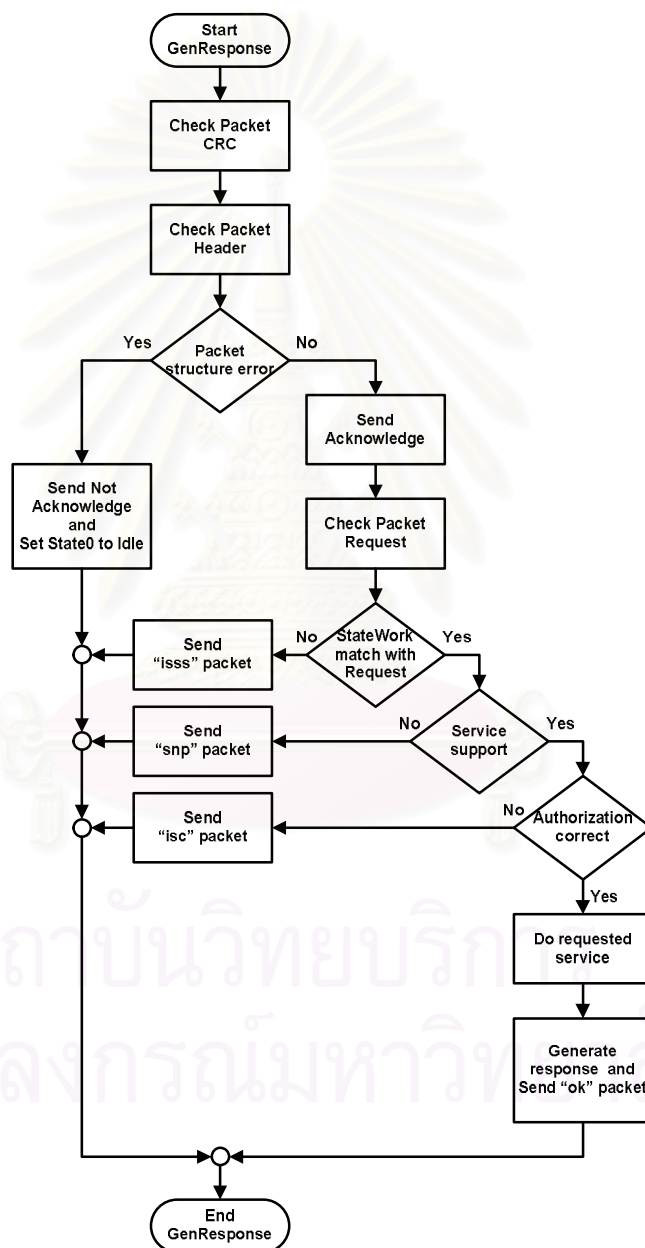
สำหรับกระบวนการอ่านและเขียนข้อมูลเป็นกระบวนการที่ใช้อ่านข้อมูลที่มีเตอร์บันทึกไว้และใช้เปลี่ยนแปลงค่าการทำงานของมิเตอร์ ข้อมูลที่สามารถอ่านหรือเขียนได้มีดังนี้

ข้อมูลที่สามารถอ่านได้

- ตารางหมายเลข 10_n ประกอบไปด้วย ค่าเวลาที่อ่านมิเตอร์ครั้งก่อน ค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ทั้ง 4 ช่วงเวลาที่ถูกอ่านไปครั้งก่อน ค่าเวลาปัจจุบันของมิเตอร์ ค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ทั้ง 4 ช่วงเวลาล่าสุด ความต้องการพลังงานในช่วงเวลา 15 นาที สูงสุดรวม 3 เฟสในเดือนก่อนหน้า และหมายเลขประจำตัวของมิเตอร์
- ตารางหมายเลข 21_n-23_n เป็นข้อมูลความต้องการพลังงานในช่วงเวลา 15 นาที และความ ต้องการพลังงานในช่วงเวลา 15 นาทีสูงสุด ของเดือนก่อนหน้าที่วัดจากเฟส R S และ T ตามลำดับ

ข้อมูลที่สามารถเขียนได้

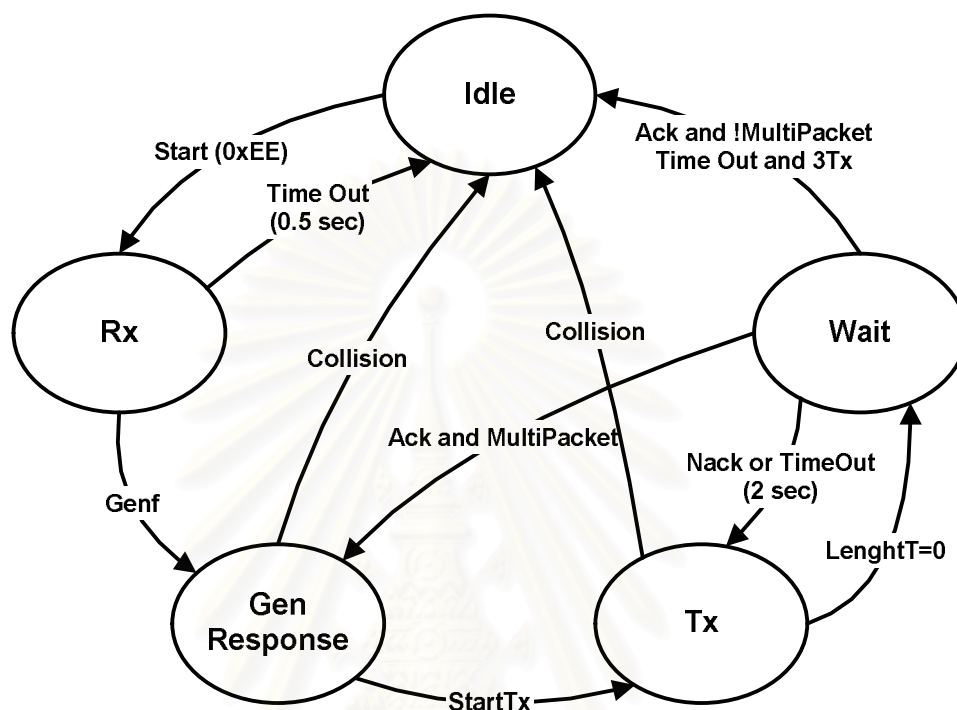
- ตารางหมายเลข $0O_n$ เป็นข้อมูลที่บอกระดับสิทธิของผู้อ่าน
- ตารางหมายเลข $0A_n$ เป็นค่าเวลาของมิเตอร์
- ตารางหมายเลข $0B_n$ เป็นตารางของวันหยุดเพิ่มเติม
- ตารางหมายเลข $0E_n$ เป็นตารางของเบอร์โทรศัพท์ที่มิเตอร์ใช้โทรออกไปยังศูนย์เพื่อส่งข้อมูล
- ตารางหมายเลข $0F_n$ เป็นตารางของหมายเลขประจำตัวของมิเตอร์



รูปที่ 4.13 รูปแผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อย GenResponse

4.6.2 โปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0

โปรแกรมขัดจังหวะพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0 ทำหน้าที่รับส่งแพ็กเกจข้อมูลที่ใช้สื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ผ่านพอร์ตแสงโดยการทำงานจะสามารถอธิบายด้วยแผนภาพสถานะดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 รูปแผนภาพสถานะการทำงานของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 0

เริ่มต้นด้วยสถานะ Idle เป็นการรอข้อมูลที่มีค่า 0xEE ซึ่งเป็นข้อมูลเริ่มต้นของแพ็กเกจ เมื่อได้รับข้อมูลเริ่มต้น พอร์ตแสงจะเข้าสู่สถานะ Rx ซึ่งเป็นสถานะสำหรับรับข้อมูลของแพ็กเกจซึ่งจะใช้ความยาวของแพ็กเกจเป็นค่าตัดสินว่ารับข้อมูลในแพ็กเกจนั้นครบหรือยัง ในสถานะ Rx นี้จะมีการตั้งตัวตั้งเวลาเพื่อนับเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละไบต์ หากข้อมูลไบต์ถัดไปยังไม่ถูกส่งมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าได้รับแพ็กเกจไม่ถูกต้อง พอร์ตแสงจะส่ง Nak แล้วเข้าสู่สถานะ Idle ในกรณีที่ได้รับแพ็กเกจครบถ้วน พอร์ตแสงจะเข้าสู่สถานะ GenResponse โดยมีการกำหนดค่า Genf เพื่อบอกโปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารว่ามีแพ็กเกจเข้ามารอการประมวลผลอยู่ โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารจะประมวลผลแพ็กเกจ สร้างแพ็กเกจตอบสนองลงในบัฟเฟอร์ข้อมูลของพอร์ตแสง แล้วสั่งให้พอร์ตแสงส่งแพ็กเกจข้อมูลตอบสนองออกไปพร้อมกับเปลี่ยนสถานะของพอร์ตแสงเป็นสถานะ Tx ที่สถานะนี้พอร์ตแสงจะอ่านข้อมูลจากบัฟเฟอร์ส่งออกไปทีละไบต์โดยมีตัวแปร LenghtT เป็นบอกว่าแพ็กเกจที่จะส่งมีกี่ไบต์ ทุกไบต์ที่ส่งไปจะลดค่า LenghtT ลงด้วย เมื่อส่งครบแล้วพอร์ตแสงจะเข้าสู่สถานะ WaitAck เพื่อรอรับการตอบรับพร้อมกับตั้งตัวตั้งเวลาให้นับเวลาที่รอการตอบรับ ที่สถานะนี้หากได้รับการตอบรับเป็นอย่างอื่นนอกจาก Ack หรือตัวตั้งเวลานับเวลาคงค่าที่กำหนดก่อนที่จะได้รับการตอบสนอง พอร์ตแสงจะเข้าสู่สถานะ Tx แล้วส่งแพ็กเกจเดิมอีกครั้ง หากมีการส่งแพ็กเกจซ้ำครบ 3 ครั้งแล้วแต่ยังไม่ได้การตอบสนอง Ack พอร์ตแสงจะเข้าสู่สถานะ Idle พร้อมกับกำหนดสถานะลำดับของการสื่อสารให้เป็นสถานะ

พื้นฐาน ในกรณีที่ได้รับการตอบสนองมาเป็น Ack จะตรวจสอบว่าแพ็กเกจที่เพิ่งส่งไปเป็นส่วนหนึ่งของการส่งแบบหลายแพ็กเกจหรือไม่ ถ้าใช่พอร์ตแสงจะกลับไปยังสถานะ GenResponse เพื่อรอให้โปรแกรมตรวจสอบการสื่อสารสร้างแพ็กเกจใหม่ต่อไป แต่หากเป็นการส่งแบบแพ็กเกจเดียวพอร์ตแสงจะกลับเข้าสู่สถานะ Idle เพื่อรอรับข้อมูลเริ่มต้นแพ็กเกจใหม่ต่อไป ที่สถานะ GenResponse และ Tx หากพอร์ตแสงได้รับข้อมูลเข้ามา ถือว่ามีการชนกันของข้อมูลเกิดขึ้น พอร์ตแสงจะกลับเข้าสู่สถานะ Idle พร้อมกับกำหนดสถานะลำดับของการสื่อสารให้เป็นสถานะพื้นฐานทันที

4.6.3 โปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1

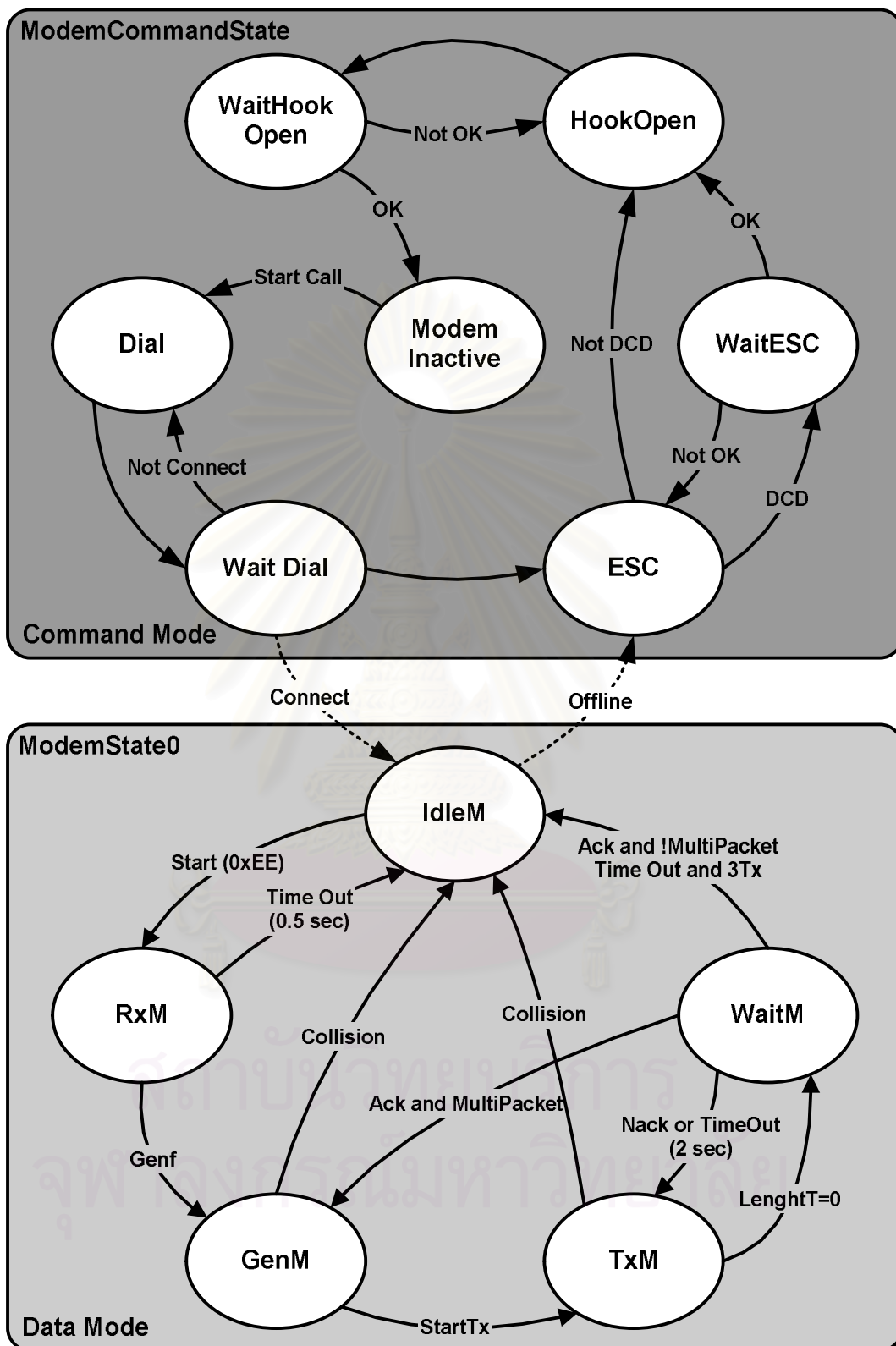
โปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 ทำหน้าที่รับส่งแพ็กเกจข้อมูลที่ใช้สื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ผ่านโมเด็มโดยใช้ข้อกำหนดการสื่อสารแบบเดียวกับพอร์ตแสง แต่จะเพิ่มการสวนของการสื่อสารกับโมเด็มเข้าไปด้วย เพื่อสร้างช่องทางสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ก่อนที่จะสื่อสารกับอุปกรณ์อ่านมิเตอร์ที่ปลายทาง

ในโปรแกรมขัดจังหวะของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 จะทำงานโดยดูโหมดการทำงานจากตัวแปร ModemMode ก่อนเป็นอย่างแรก โดยในแต่ละโหมดจะทำงานดังนี้

Command Mode เป็นโหมดการทำงานที่พอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 จะติดต่อกับโมเด็มเพื่อสร้างหรือปิดช่องทางสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ ใน Command Mode โปรแกรมจะมีตัวแปรที่แสดงสถานะการทำงาน ModemCommandState โดยเริ่มจากสถานะ ModemInactive เมื่อถึงเวลาที่กำหนด จะเปลี่ยนสถานะไปยัง Dial เพื่อโทรออกไปยังศูนย์อ่านข้อมูลแล้วเปลี่ยนไปยังสถานะ WaitDial เพื่อรอการตอบสนองจากโมเด็ม หากได้รับการตอบสนองจากโมเด็มแบบอื่นที่ไม่ใช่ connect จะวนกลับมายังสถานะ Dial เพื่อโทรใหม่ หากโทรติด (ได้รับการตอบสนองเป็น connect) โปรแกรมและโมเด็มจะเปลี่ยนการทำงานเป็น Data Mode โดยตั้งสถานะ ModemCommandState ไว้ที่ ESC ต่อมาเมื่อจบการสื่อสาร โปรแกรมจะตรวจสอบคลื่นพาห์จากสัญญาณ DCD (Data Carrier Detect) หากมีคลื่นพาห์ โมเด็มจะยังอยู่ใน Data Mode โปรแกรมจะส่งคำสั่งให้โมเด็มออกมายัง Command Mode แล้วไปรอการตอบสนองจากโมเด็มที่สถานะ WaitESC ถ้าตอบกลับมาเป็น OK โปรแกรมจะเปลี่ยนสถานะไปยัง HookOpen ในกรณีที่จบการสื่อสารแล้วไม่มีคลื่นพาห์ แสดงว่าโมเด็มออกมายัง Command Mode แล้ว โปรแกรมจะเปลี่ยนสถานะไปยัง HookOpen เพื่อวางหู เมื่อโมเด็มวางหูแล้วจะเข้าสู่สถานะ ModemInactive ดั้งเดิม

Data Mode เป็นโหมดการทำงานที่พอร์ตอนุกรมหมายเลข 1 จะติดต่อกับเครื่องอ่านมิเตอร์โดยมีโมเด็มเป็นตัวส่งผ่านข้อมูล รูปแบบการสื่อสาร และสถานะการทำงานจะเหมือนกับพอร์ตแสงทุกประการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



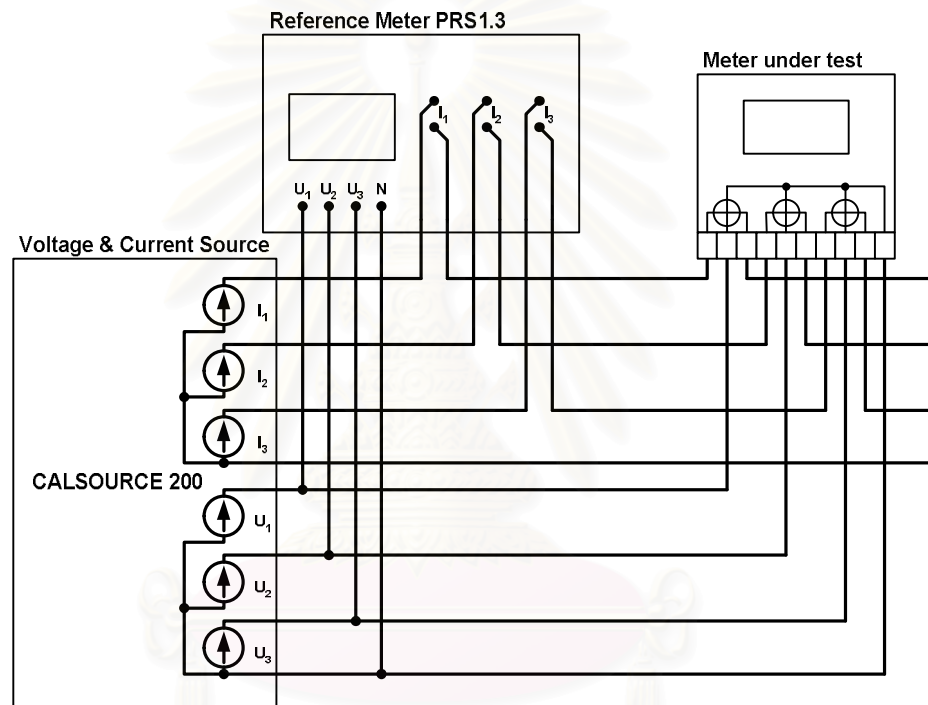
รูปที่ 4.15 รูปแผนภาพสถานะการทำงานของพอร์ตอนุกรมหมายเลข 1

บทที่ 5

ผลการทดสอบ และสรุปผล

5.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของการวัด

ระบบทดสอบความแม่นยำที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือน รุ่น CALSOURCE 200 ของบริษัท MEH (Energie Messtechnik GmbH) และมิเตอร์อ้างอิง รุ่น PRS1.3 ของบริษัทเดียวกันโดยมิเตอร์อ้างอิงนี้มีความแม่นยำในการวัดระดับ 0.05 % โดยระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รูปแสดงระบบทดสอบมิเตอร์

ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดจะมาจากสมการต่อไปนี้คือ

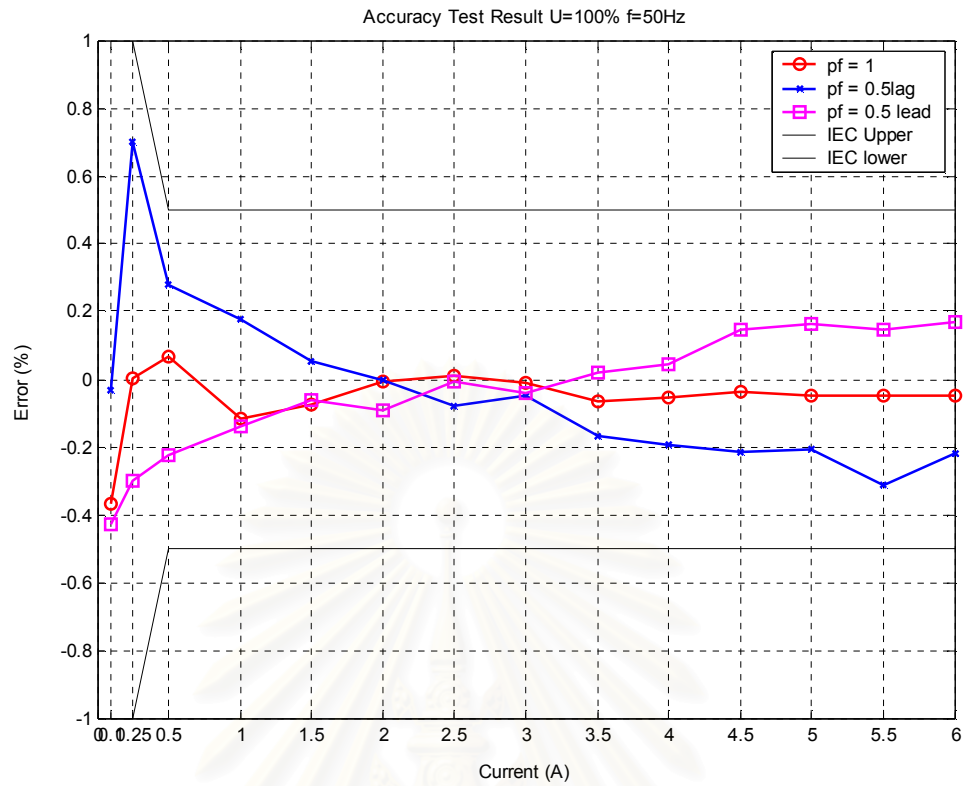
$$error = \frac{W_{meter} - W_{ref}}{W_{ref}} \times 100 \quad (\%)$$

เมื่อ W_{meter} คือ ค่าพลังงานที่มิเตอร์ที่ออกแบบวัดได้

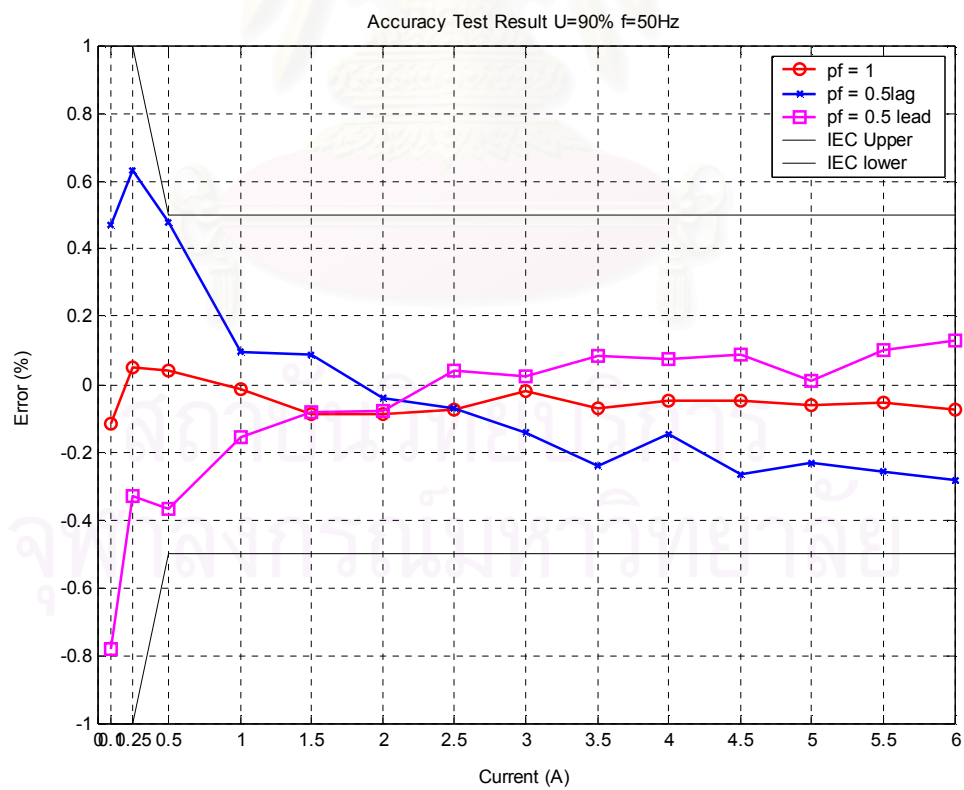
และ W_{ref} คือ ค่าพลังงานที่มิเตอร์อ้างอิงวัดได้

ในการทดสอบความแม่นยำของการวัดจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนโดยคือ

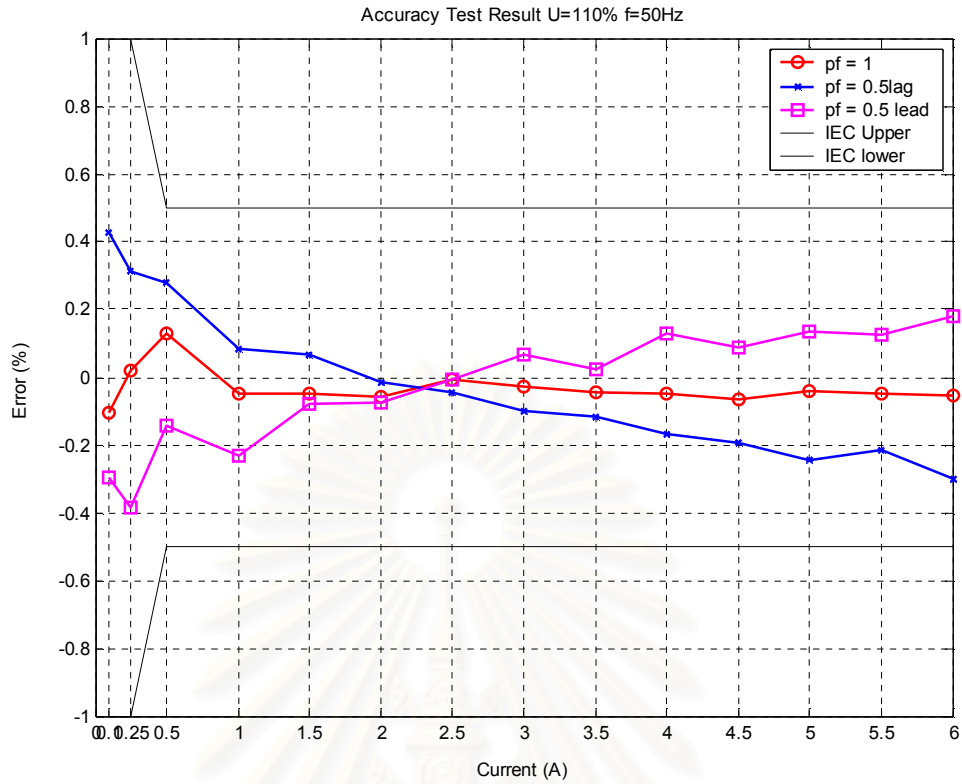
- การทดสอบความแม่นยำแบบโหลดสมดุลที่ค่าแรงดันของระบบในช่วง 198-242V ดังแสดงผลในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.7
- การทดสอบความแม่นยำแบบโหลดสมดุลที่ความถี่ของระบบในช่วง 45-55Hz ดังแสดงผลในรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.13
- การทดสอบความแม่นยำแยกเฟสโดยมีแรงดันสมดุล 3 เฟสดังแสดงผลในรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.16



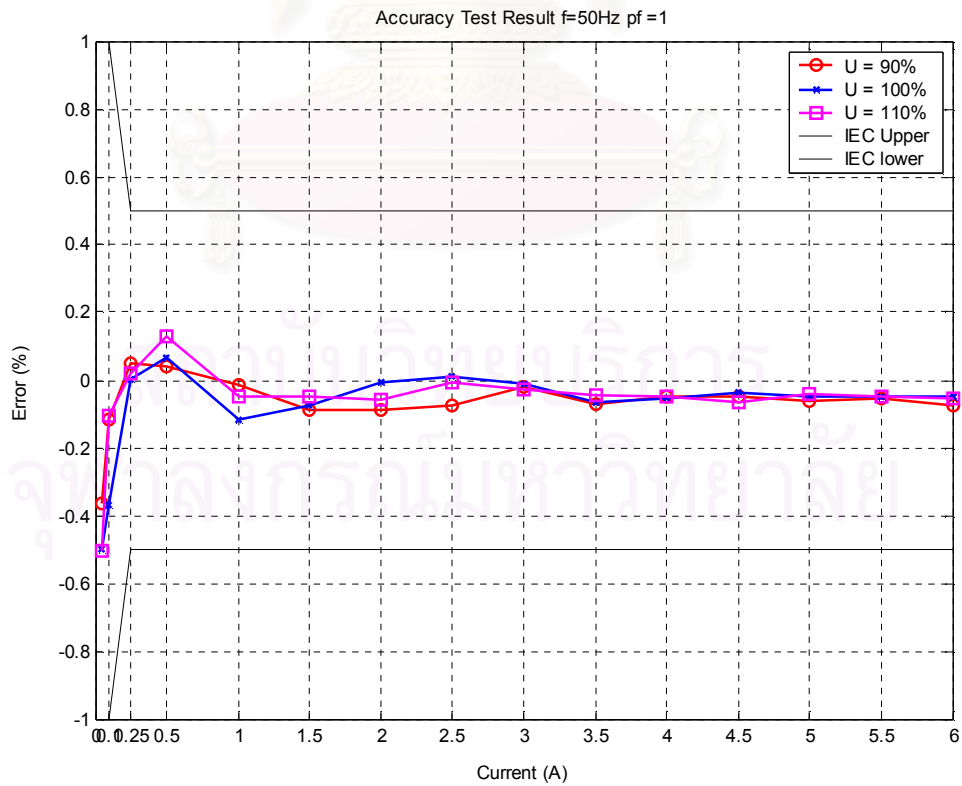
รูปที่ 5.2 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 220V



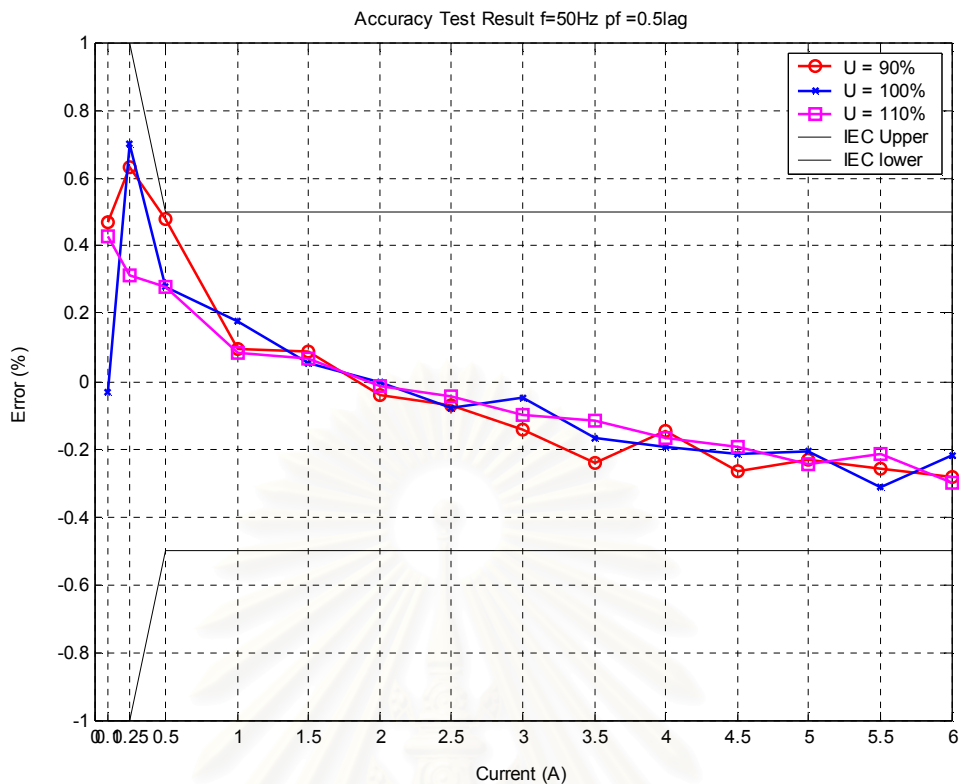
รูปที่ 5.3 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 198V



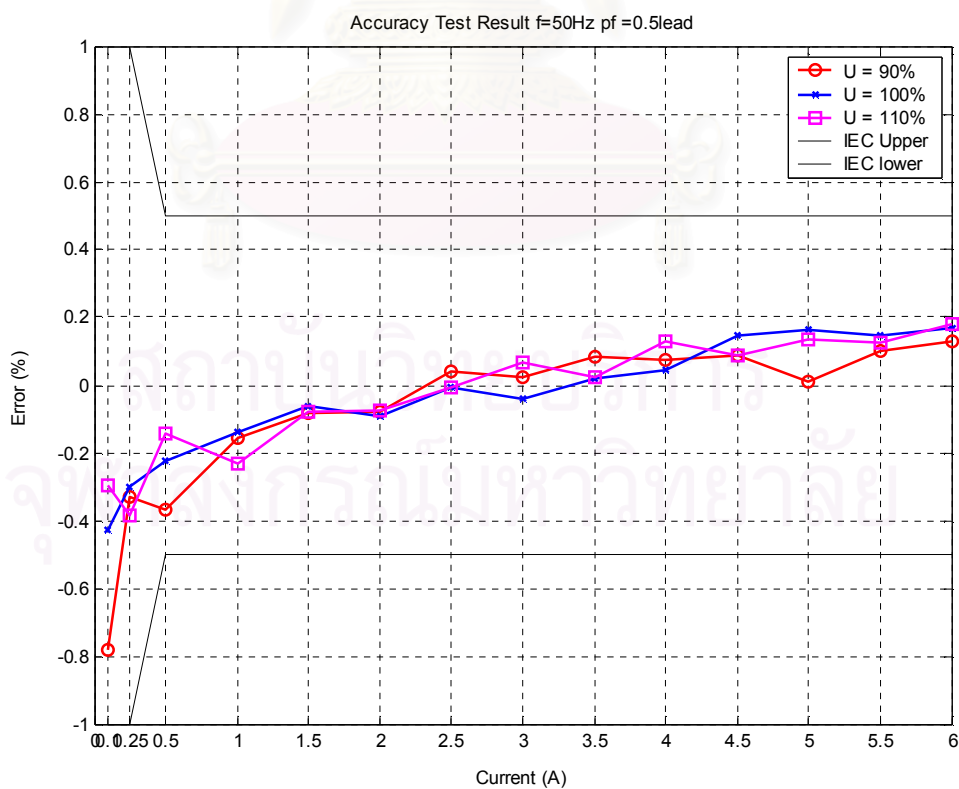
รูปที่ 5.4 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อแรงดันของระบบมีค่า 242V



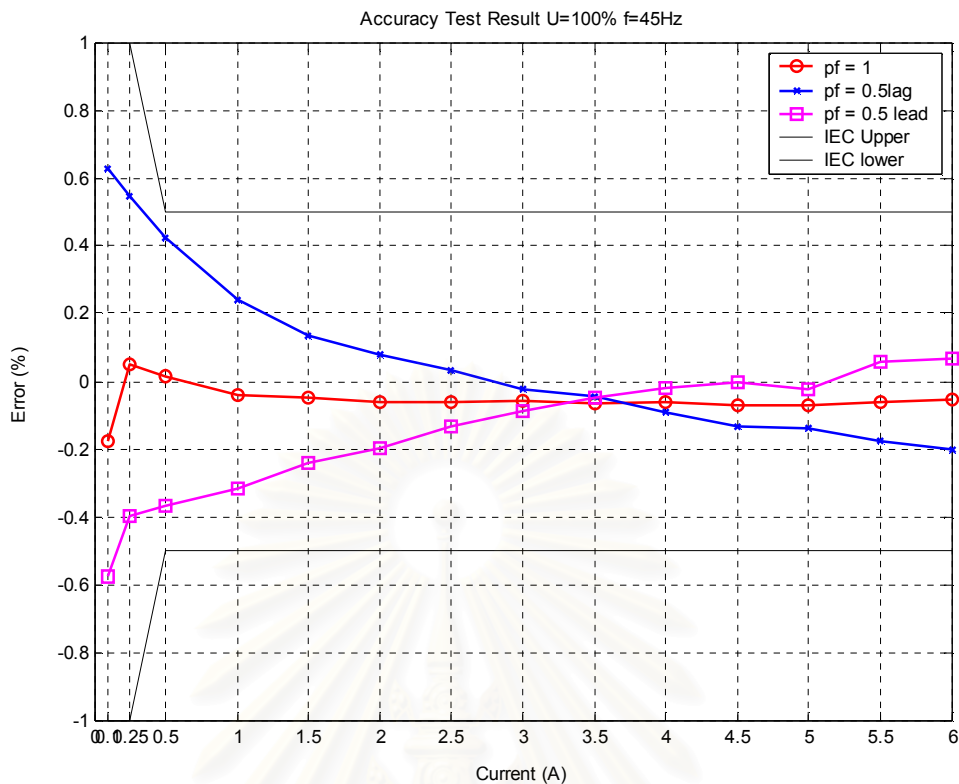
รูปที่ 5.5 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ



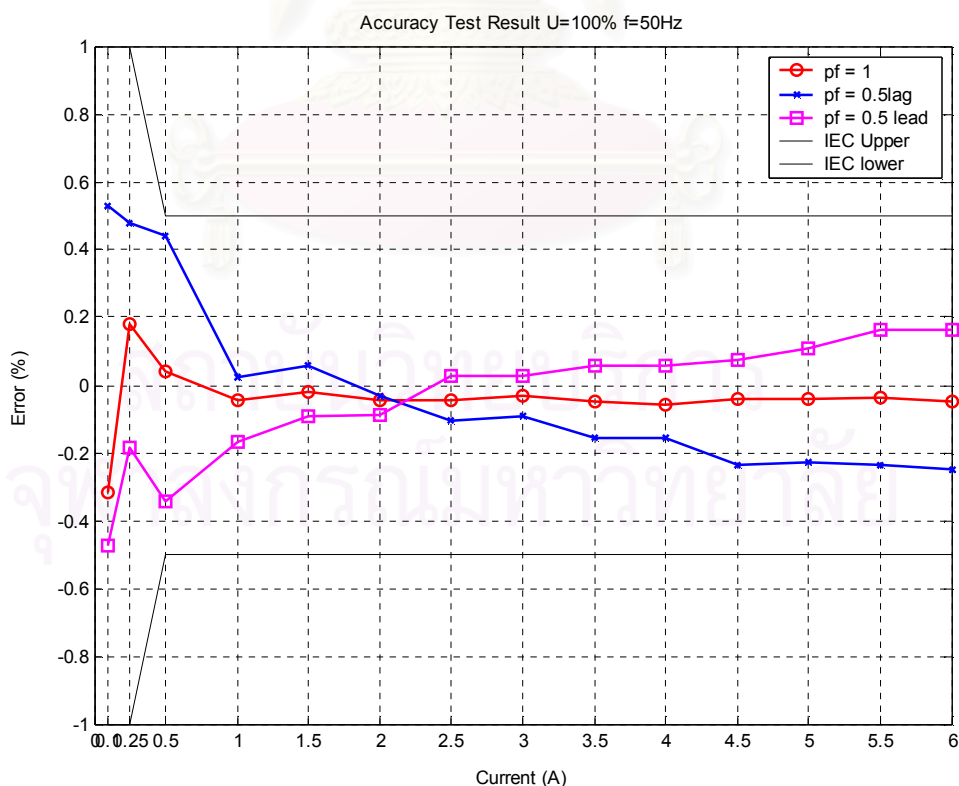
รูปที่ 5.6 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lag ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ



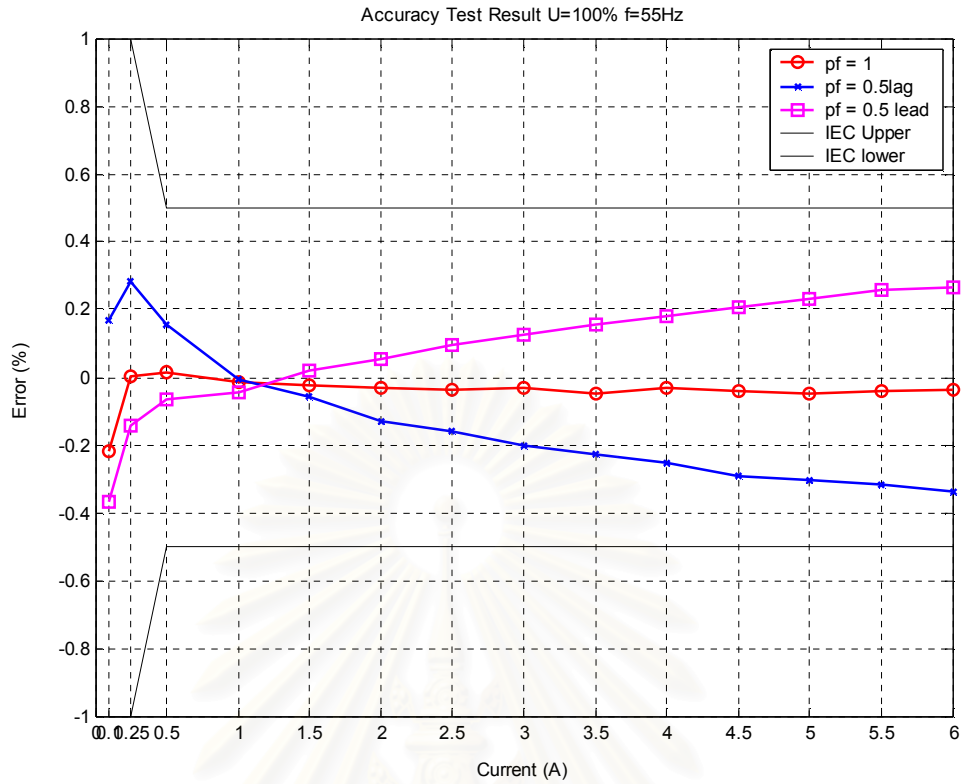
รูปที่ 5.7 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lead ที่แรงดันของระบบค่าต่างๆ



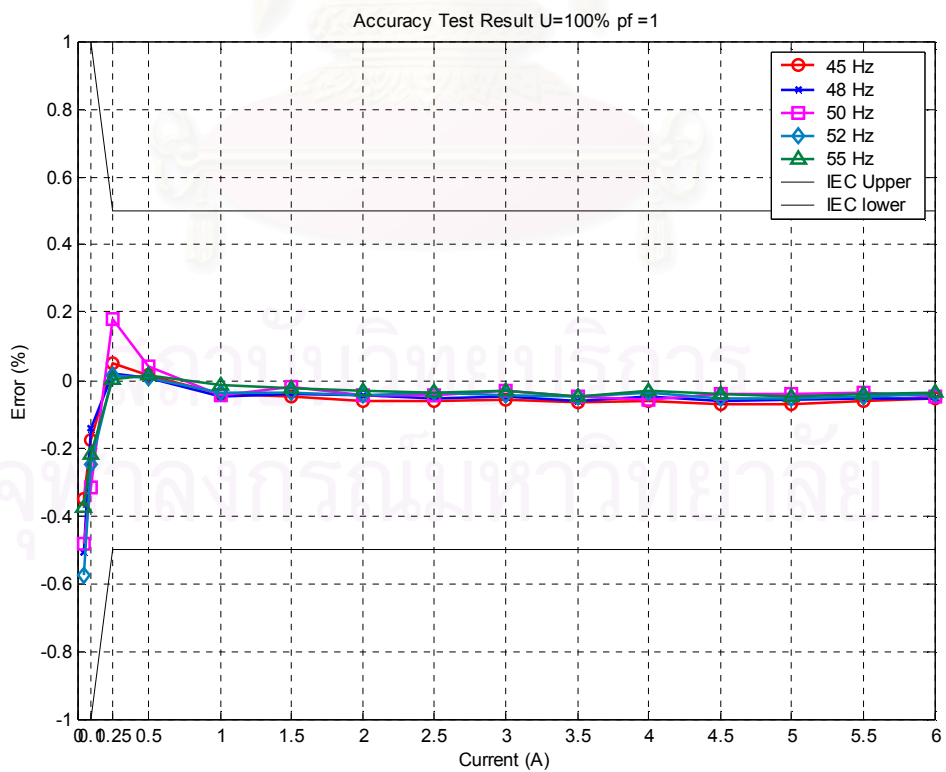
รูปที่ 5.8 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 45 Hz



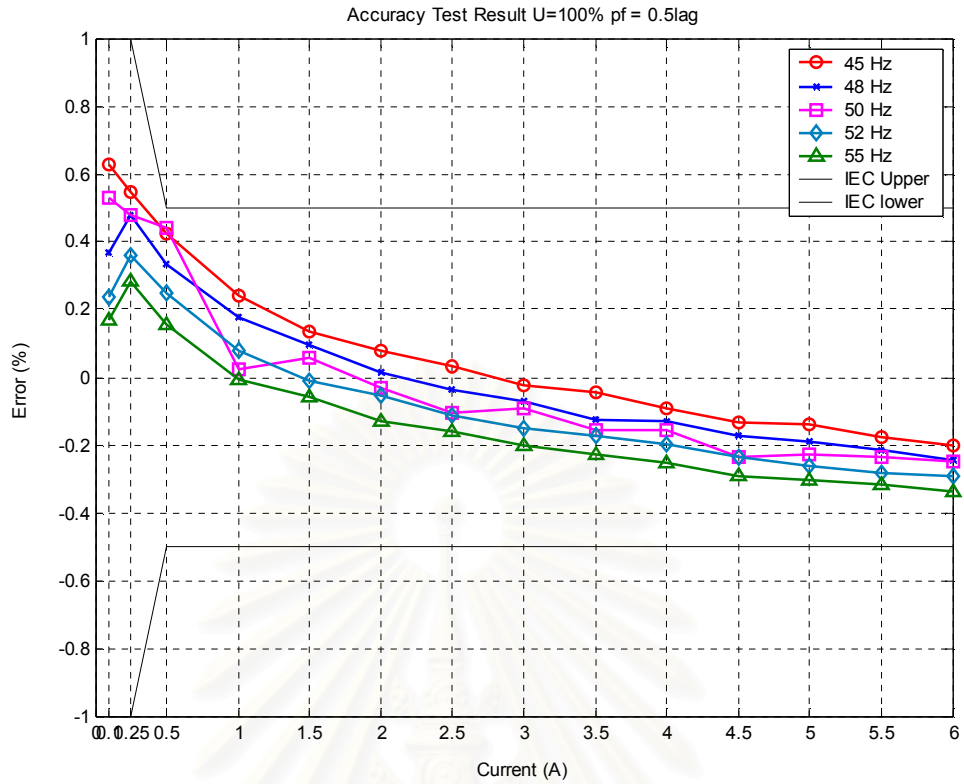
รูปที่ 5.9 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 50 Hz



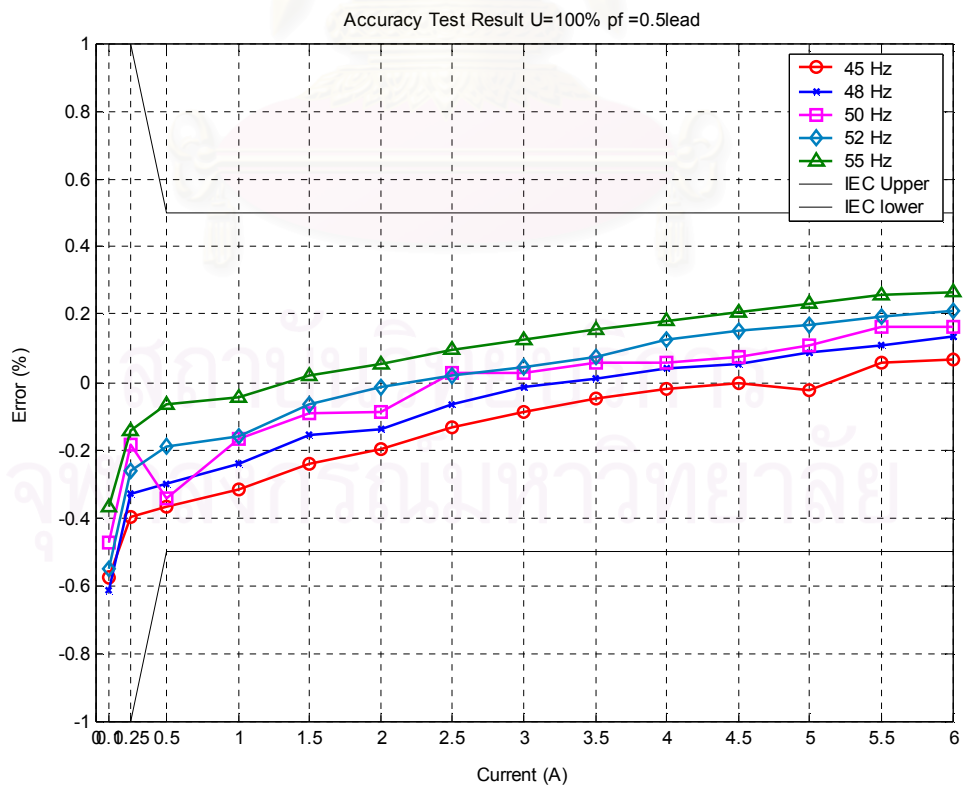
รูปที่ 5.10 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำเมื่อความถี่ของระบบเท่ากับ 55 Hz



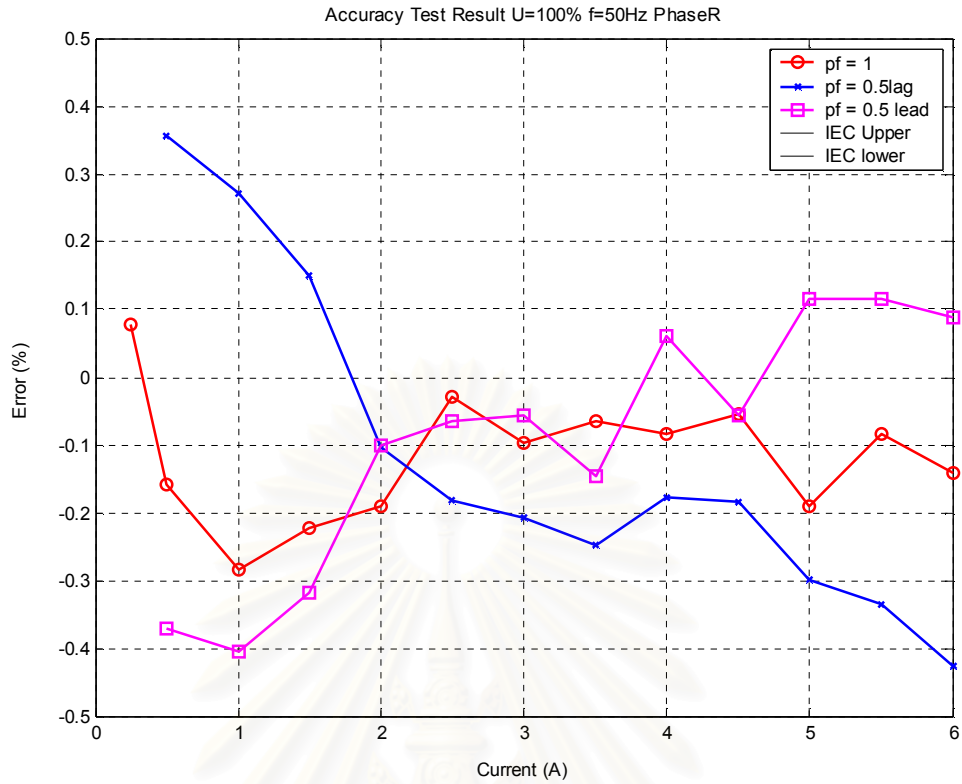
รูปที่ 5.11 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ



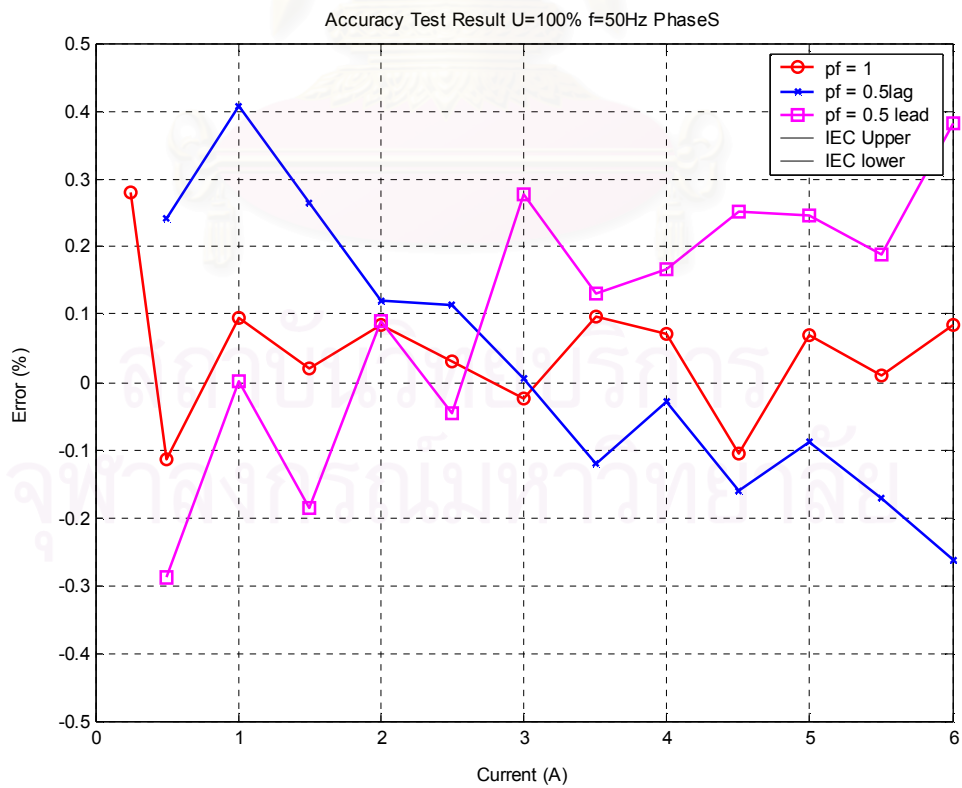
รูปที่ 5.12 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lag ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ



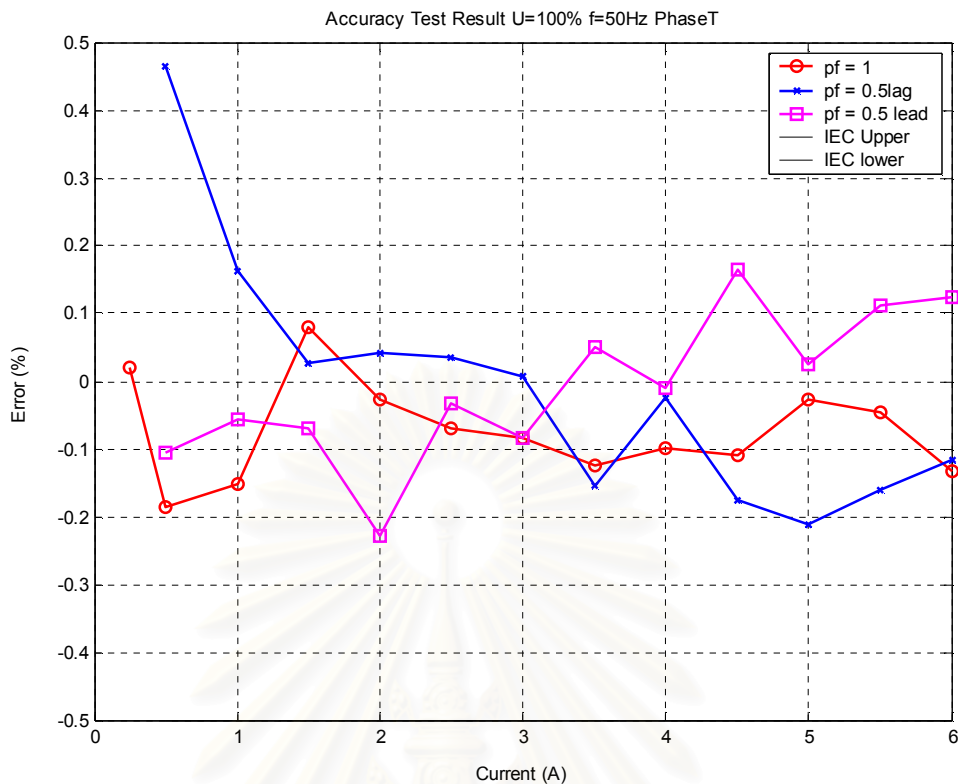
รูปที่ 5.13 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5lead ที่ความถี่ของระบบค่าต่างๆ



รูปที่ 5.14 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส R



รูปที่ 5.15 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส S



รูปที่ 5.16 รูปแสดงผลการวัดความแม่นยำ เมื่อจ่ายแรงดันสมดุลและจ่ายกระแสเฉพาะเฟส T

จากรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อแรงดันของระบบเปลี่ยนไปในช่วง $\pm 10\%$ จะทำให้ความแม่นยำในการวัดเปลี่ยนไปน้อยมาก โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างๆจะมีลักษณะที่ต่างกันคือ

- ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงกระแสต่ำเป็นค่าลบ เมื่อกระแสมีค่าสูงขึ้นจะได้ความคลาดเคลื่อนประมาณคงที่ใกล้ค่า 0
- ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ล้าหลัง ในช่วงกระแสต่ำจะมีความคลาดเคลื่อนเป็นบวก และลดลงเรื่อยๆเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น
- ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 นำหน้า ในช่วงกระแสต่ำจะมีความคลาดเคลื่อนเป็นลบ และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.13 พบว่าเมื่อความถี่ของระบบเปลี่ยนไปจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าเปลี่ยนไปด้วยแต่ยังมีแนวโน้มที่ตัวประกอบกำลังต่างๆเหมือนกับที่กล่าวข้างต้น

จากรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.16 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อมีกระแสเฟสเดียวจะมีค่าขึ้นลงมากกว่าในกรณีที่มีกระแสทั้ง 3 เฟส แต่แนวโน้มของความคลาดเคลื่อนที่ตัวประกอบกำลังต่างๆก็ยังมีค่าเหมือนกับที่กล่าวข้างต้น

5.2 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดในการวัด

จากการทดสอบความแม่นยำของการวัดพบว่ามิเตอร์ที่ออกแบบมีความผิดพลาดในการวัดอยู่ในขอบเขตที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC687 สำหรับมิเตอร์ระดับ 0.5 สาเหตุของความผิดพลาดในการวัดนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณดังนี้

ในระบบที่มีแรงดันเท่ากับ V และมีค่ากระแสเท่ากับ A โดยมีมุมต่างเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันเท่ากับ θ จะสามารถหาค่ากำลังแอกทีฟที่มีค่าเท่ากับ $P = AV \cos \theta$

ในการวัดจริงจะเกิดความผิดพลาดขึ้น ทำให้ค่ากระแสที่วัดได้มีค่าเท่ากับ $A + \Delta A$ แรงดันที่วัดได้เท่ากับ $V + \Delta V$ และมุมต่างเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันเท่ากับ $\theta + \delta$ จะได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P + \Delta P &= (V + \Delta V) \times (A + \Delta A) \times \cos(\theta + \delta) \\ &= (V \times A + V \times \Delta A + \Delta V \times A + \Delta V \times \Delta A)(\cos \theta \times \cos \delta - \sin \theta \sin \delta) \\ &= VA \cos \theta \cos \delta - VA \sin \theta \sin \delta + V \Delta A \cos \theta \cos \delta - V \Delta A \sin \theta \sin \delta \\ &\quad + \Delta V A \cos \theta \cos \delta - \Delta V A \sin \theta \sin \delta \\ &\quad + \Delta V \Delta A \cos \theta \cos \delta - \Delta V \Delta A \sin \theta \sin \delta \end{aligned}$$

ที่ δ มีค่าน้อยมาก จะได้ $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, $V \Delta A \delta \sin \theta \approx \Delta V A \delta \sin \theta \approx 0$

จะได้ $P + \Delta P = VA \cos \theta - VA \delta \sin \theta + V \Delta A \cos \theta + \Delta V A \cos \theta$

$$P + \Delta P = VA \cos \theta \left(1 - \delta \tan \theta + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta V}{V}\right) \quad \text{สมการที่ 5.1}$$

จากสมการที่ 5.1 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta V}{V} - \delta \tan \theta \quad \text{สมการที่ 5.2}$$

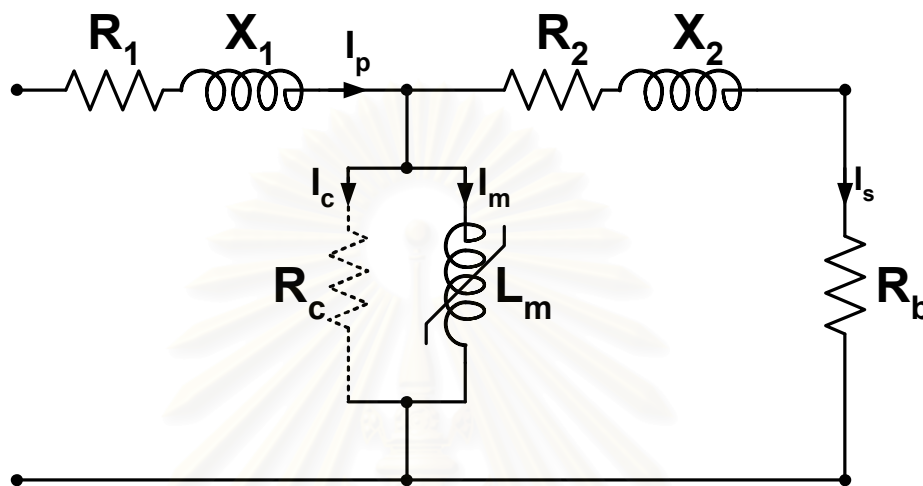
จากสมการที่ 5.2 พบว่าความผิดพลาดในการวัดสามารถแยกเป็น 3 สาเหตุคือ

- 1) ความผิดพลาดของการวัดค่ากระแสอาจเกิดจาก 2 สาเหตุคือ
 - ความผิดพลาดของค่าตัวต้านทานโหลดของหม้อแปลงกระแส ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการปรับค่าคงที่ที่ใช้แปลงหน่วยของกระแสและพลังงาน
 - ความผิดพลาดจากความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงกระแส ซึ่งจะขอกว่าในการวิเคราะห์หม้อแปลงกระแสในหัวข้อถัดไป
- 2) ความผิดพลาดของการวัดแรงดันอาจเกิดจากความผิดพลาดของค่าตัวต้านทานที่ใช้แบ่งแรงดันซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการปรับค่าคงที่ที่ใช้แปลงหน่วยของแรงดันและพลังงาน
- 3) ความผิดพลาดของการวัดเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันเกิดจากความคลาดเคลื่อนเฟสของหม้อแปลงกระแส

5.2.1 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดเนื่องจากหม้อแปลงกระแส

จากสาเหตุของความผิดพลาดในการวัดที่กล่าวมาข้างต้น สาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งมาจากหม้อแปลงกระแสที่เลือกใช้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแสนั้นสามารถประมาณด้วยวงจรมุมลที่มองจากด้านทุติยภูมิ [10] [11] ได้ดังนี้



รูปที่ 5.17 รูปวงจรมุมลของหม้อแปลงกระแส

Z_1 คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิโดย $Z_1 = R_1 + jX_1$

Z_2 คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านทุติยภูมิโดย $Z_2 = R_2 + jX_2$

R_c คือที่ความต้านทานใช้แทนผลของการสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งอาจละเลยไปเนื่องจากมีค่ามาก

L_m คืออิมพีแดนซ์แบบไม่เชิงเส้นแทนผลของการสูญเสียของการทำแม่เหล็ก (Magnetization) ของหม้อแปลงกระแส

R_b คือค่าความต้านทานโหลดด้านทุติยภูมิ

I_p คือกระแสจากด้านปฐมภูมิที่ลดทอนด้วยอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงกระแส

I_m คือกระแสที่เกิดจากผลของการสูญเสียในการทำแม่เหล็ก

I_s คือกระแสที่ด้านขดลวดทุติยภูมิ

จากรูปที่ 5.17 จะได้

$$I_s = I_p - I_m$$

$$I_s = I_p \left(1 - \frac{(Z_2 + R_b)}{Z_2 + R_b + X_m} \right)$$

$$\frac{I_s}{I_p} = 1 - \frac{(Z_2 + R_b)}{Z_2 + R_b + X_m} = \frac{X_m}{Z_2 + R_b + X_m}$$

จะได้
$$e_p = \angle\left(\frac{I_s}{I_p}\right) = \angle X_m - \angle(Z_2 + R_b + X_m)$$

$$e_p = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{X_m + X_2}{R_2 + R_b}\right) \quad \text{สมการที่ 5.3}$$

เมื่อ e_p คือความคลาดเคลื่อนเฟสของ I_s เมื่อเทียบกับ I_p (ซึ่งเป็นค่าเดียวกับ δ)

จะได้
$$e_A = \frac{I_s}{I_p} - 1 = -\frac{Z_2 + R_b}{Z_2 + R_b + X_m}$$

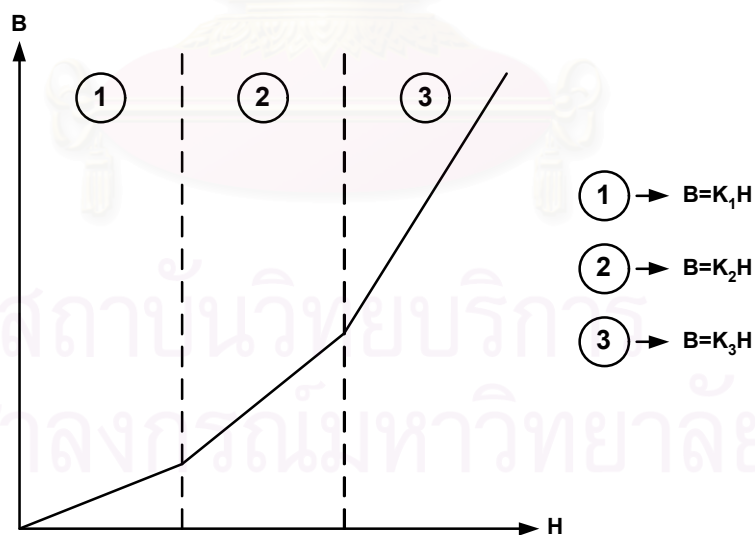
จะได้
$$e_A = -\frac{|Z_s|}{|Z_s + X_m|} \quad \text{สมการที่ 5.4}$$

เมื่อ e_A คือความคลาดเคลื่อนขนาดของ I_s เมื่อเทียบกับ I_p (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ $\frac{\Delta A}{A}$)

$$\text{และ } Z_s = Z_2 + R_b$$

จากสมการที่ 5.3 จะพบว่า การเปลี่ยนความต้านทานโหลดของหม้อแปลงกระแสจะทำให้ความคลาดเคลื่อนเฟสของสัญญาณออกเปลี่ยนไป โดยเมื่อค่า R_b เพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณออกของหม้อแปลงกระแสมีความคลาดเคลื่อนเฟสเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงกระแสจะมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์ (B) กับความแรงของสนามแม่เหล็ก (H) ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากจะทำงานในย่านที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ต่ำ [12][13]



รูปที่ 5.18 รูปตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์กับความแรงของสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 5.18 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์กับความแรงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งประมาณด้วยการแบ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น 3 ช่วง โดย $K_1 < K_2 < K_3$

จากความหมายของค่าความซาบซึมได้ (permeability)

$$\mu_0 \mu_r = \frac{dB}{dH}$$

เนื่องจากค่า L_m มีค่าแปรผันตรงกับค่าความซาบซึมได้ ดังนั้นจะได้ว่าค่า L_m จะมีค่าแปรผันตรงกับ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์กับความแรงของสนามแม่เหล็ก

จากความสัมพันธ์ข้างต้นและจากสมการที่ 5.3 และสมการที่ 5.4 ในกรณีที่กระแสด้านปฐมภูมิมีค่าต่ำ จะได้ L_m มีค่าต่ำ ทำให้ e_A มีค่าเป็นลบมาก ส่วน e_p จะมีค่าม้วนหน้ามาก และในกรณีที่กระแสด้านปฐมภูมิมีค่าสูงขึ้นไปจะได้ L_m มีค่าสูงขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้ e_A มีค่าเป็นลบน้อยและ ส่วน e_p จะมีค่าม้วนหน้าลดลง

ดังนั้น จากสมการที่ 5.2

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta V}{V} - \delta \tan \theta$$

จะสามารถสรุปลักษณะของความคลาดเคลื่อนในการวัดพลังงานได้ดังนี้

- 1) ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ค่า $\tan \theta$ มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจะเป็นผลมาจาก ความคลาดเคลื่อนขนาดของกระแสจากสมการ 5.4 ดังนั้นลักษณะของความคลาดเคลื่อน จึงเป็นลบมากที่กระแสต่ำและมีค่าเป็นลบน้อยลงที่ค่ากระแสสูงขึ้น
- 2) ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ถ้าหลัง ค่า $\tan \theta$ มีค่าเป็นลบ ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนเฟสจากสมการที่ 5.3 และความคลาดเคลื่อนขนาดของกระแสจากสมการ 5.4 ดังนั้นลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่กระแสต่ำจะมีค่าเป็นบวก และเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนขนาดของกระแสมีค่าเป็นลบลดลง สุดท้ายจะมีค่าลดลงเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนเฟสมีค่าลดลง
- 3) ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 นำหน้า ค่า $\tan \theta$ มีค่าเป็นบวก ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนเฟสจากสมการที่ 5.3 และความคลาดเคลื่อนขนาดของกระแสจากสมการ 5.4 ดังนั้นลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่กระแสต่ำจะมีค่าเป็นลบ และเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนขนาดของกระแสและความคลาดเคลื่อนเฟสมีค่าลดลง

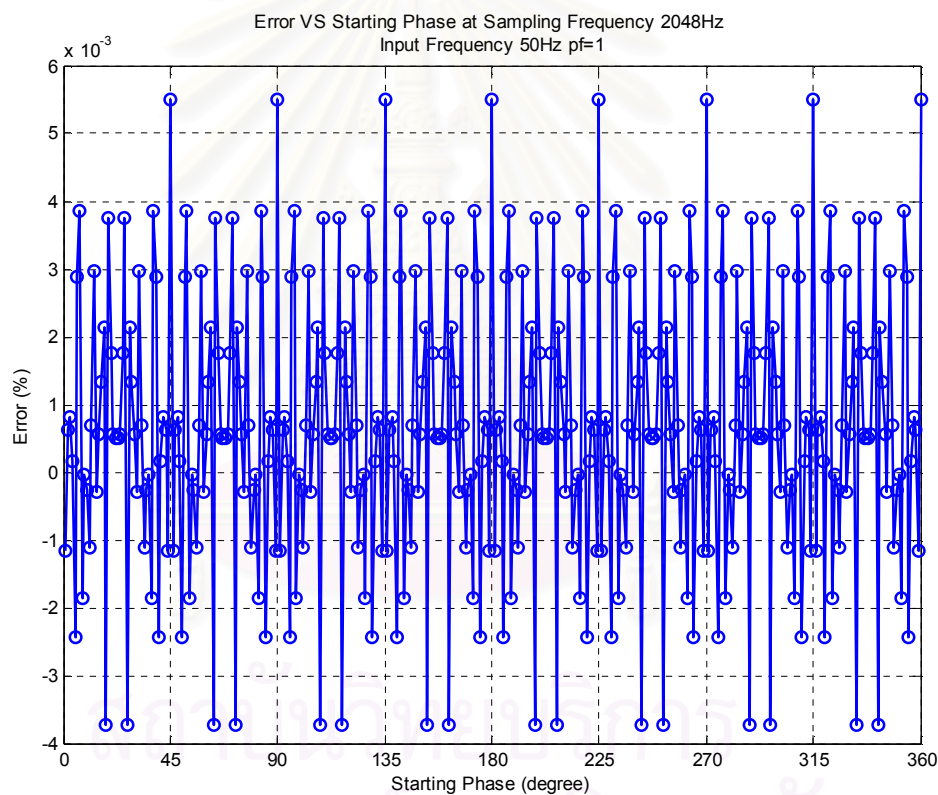
จากผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.16 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของเฟสด้วยการหน่วงเวลาระหว่างการสุ่มสัญญาณกระแสและแรงดันเป็นเวลาคงที่ ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่ได้ที่ค่าทั้งบวกและลบที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.5 ทั้งนำหน้าและล่าหลังและมีแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนดังที่วิเคราะห์ไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 วิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดเนื่องจากความถี่ในการชักตัวอย่างสัญญาณ

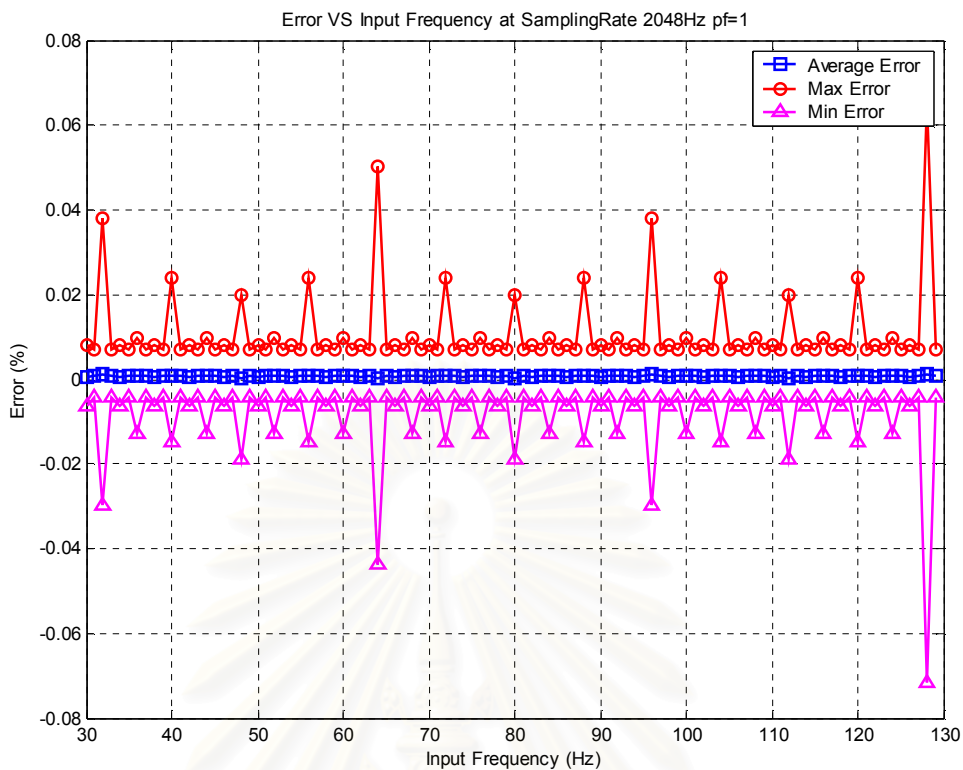
จากรูปที่ 5.11 จะพบว่าที่ความถี่ของสัญญาณในระบบที่แตกต่างกัน และไม่มีผลของความคลาดเคลื่อนเฟสของหม้อแปลงกระแส ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดจะมีค่าแตกต่างกันน้อยมากการวิเคราะห์จึงใช้การจำลองการคำนวณพลังงานไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อดูผลของความผิดพลาดในการวัดเนื่องจากความผิดพลาดของการควอนไทซ์ที่ความถี่ของสัญญาณและความถี่ของการสุ่มตัวอย่างต่างๆทำให้ได้ผลดังนี้

- 1) การจำลองการทำงานเมื่อใช้ความถี่ของการชักตัวอย่างสัญญาณคงที่และเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัด ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.21
- 2) การจำลองการทำงานเมื่อให้ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัดคงที่ที่ 50Hz และเปลี่ยนความถี่ของการชักตัวอย่างสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ถึงรูปที่ 5.23

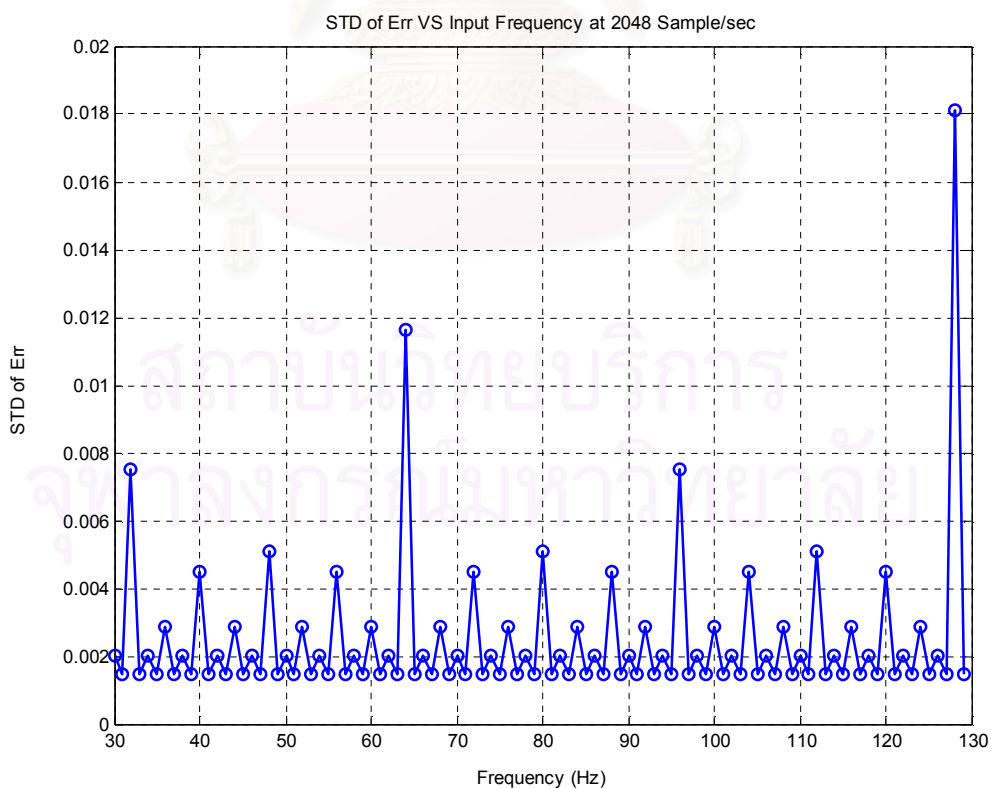


รูปที่ 5.19 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ค่าเฟสเริ่มต้นของสัญญาณแรงดันต่างๆ

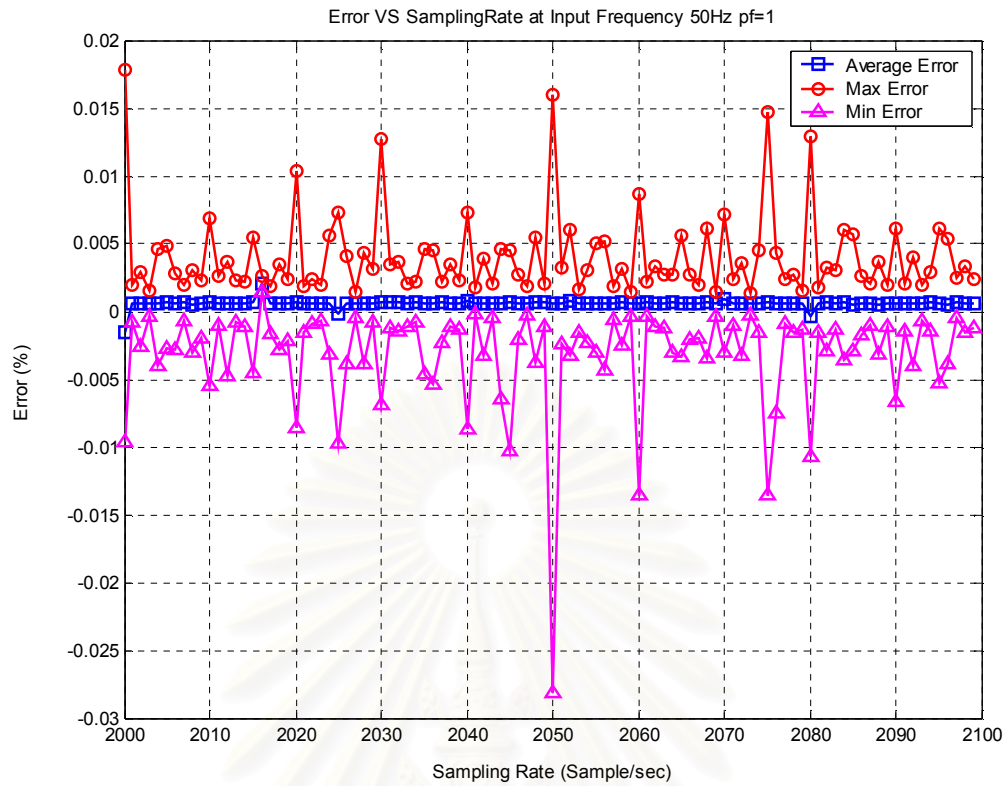
จากรูปที่ 5.19 จะพบว่าที่เฟสเริ่มต้นของสัญญาณแรงดันค่าต่างๆกันจะได้ค่าความผิดพลาดในการวัดที่เกิดจากผลของความผิดพลาดของการควอนไทซ์ไม่เท่ากัน ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้ค่าเฉลี่ย พิกัด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดในการวัดมาพิจารณาด้วย



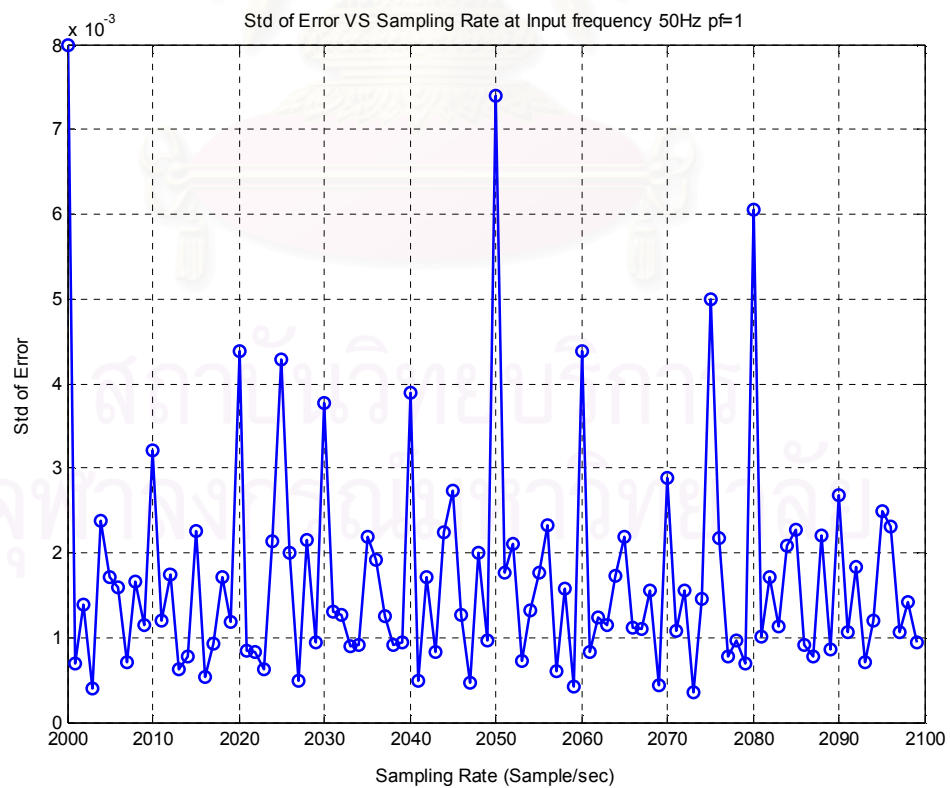
รูปที่ 5.20 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดค่าต่างๆ



รูปที่ 5.21 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดค่าต่างๆ

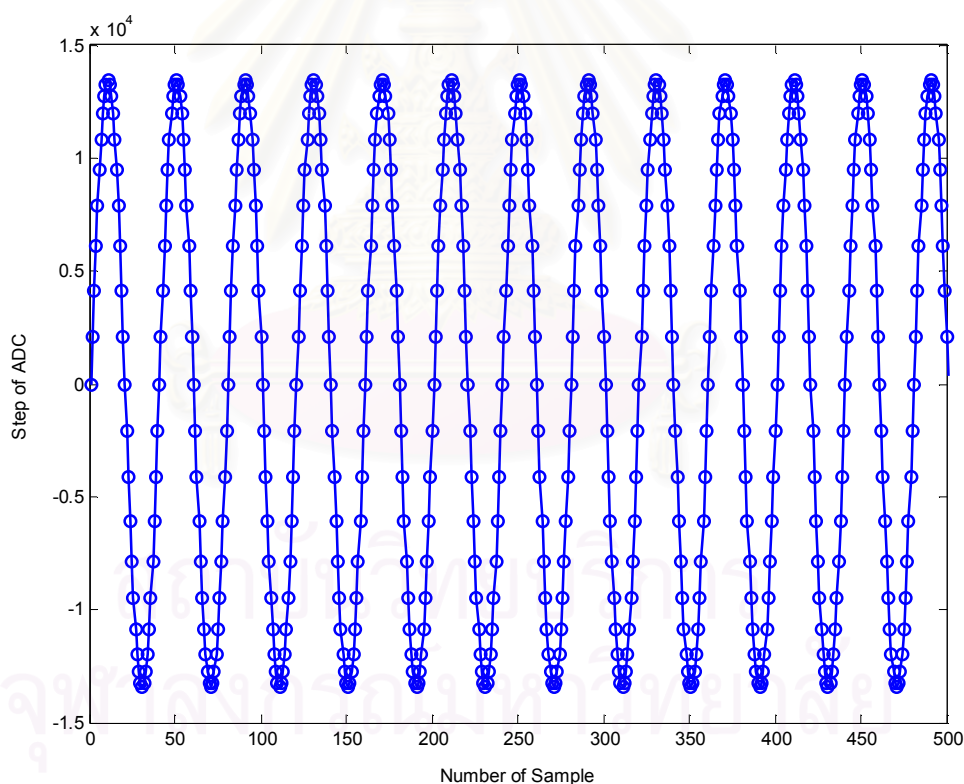


รูปที่ 5.22 แสดงค่าความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของการซีกตัวอย่างสัญญาณต่างๆ

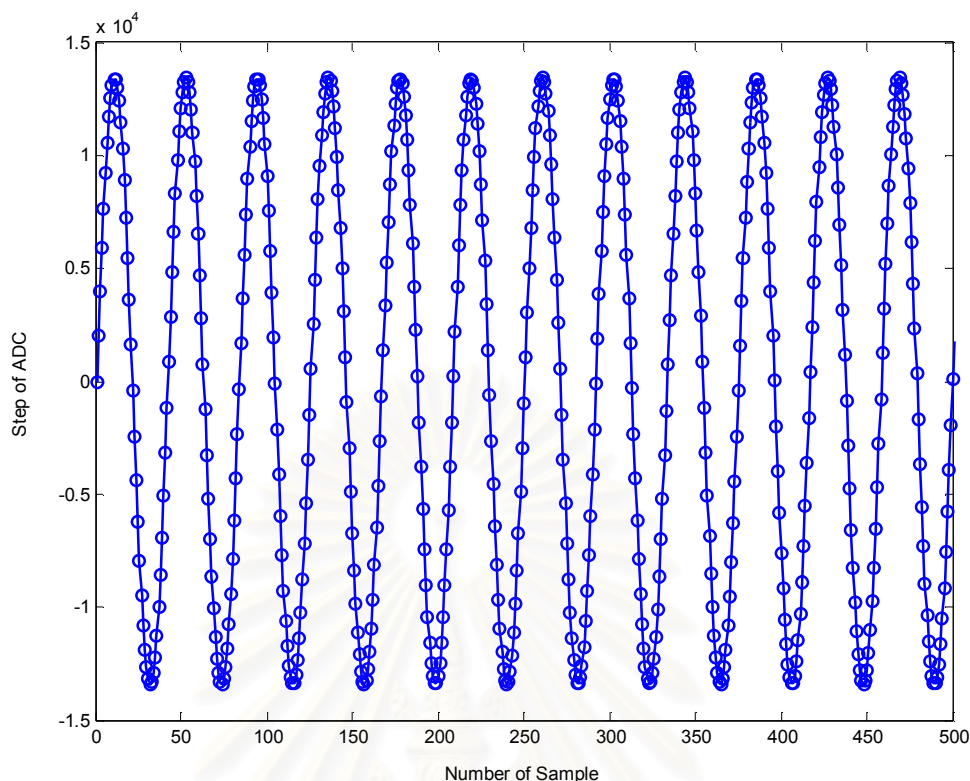


รูปที่ 5.23 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดที่ความถี่ของการซีกตัวอย่างสัญญาณต่างๆ

จากรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 แสดงผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ความถี่ของการซิกตัวอย่าง สัญญาณคงที่เท่ากับ 2048 Hz มีค่าตัวประกอบกำลังคงที่เท่ากับ 1 และเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่ต้องการ วัด จะพบว่าที่ค่าความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัดต่าง ๆ นั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันแต่ที่บาง ความถี่จะมีค่าพิกัดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่าที่ความถี่อื่นอย่างเห็นได้ชัดเช่นที่ความถี่ 32Hz 64 Hz หรือ 128Hz เนื่องจากความถี่เหล่านี้จะมีค่าที่สามารถหารค่าความถี่ในการซิกตัวอย่างสัญญาณลงตัว ค่า ตัวอย่างของสัญญาณที่ซิกมาได้จะเป็นค่าซ้ำกันตลอดทุกคาบของสัญญาณที่ถูกวัดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.24 ผลของความผิดพลาดของการควอนไทซ์จะมีค่าเท่ากันทุกคาบของสัญญาณด้วย ในขณะที่ความถี่อื่นที่ หารค่าความถี่ในการซิกตัวอย่างสัญญาณไม่ลงตัวจะมีค่าพิกัดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่าเนื่องจาก ตัวอย่างสัญญาณที่ได้ในแต่ละคาบของสัญญาณที่ถูกวัดจะต่างกันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.25 ทำให้ผลของ ความผิดพลาดของการควอนไทซ์จะมีค่าไม่เท่ากันและจะมีการหักล้างกันเมื่อผ่านการซิกตัวอย่างสัญญาณ หลายคาบ ในความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดที่มีค่าหารรวมมากกับความถี่ในการซิกตัวอย่างสัญญาณเท่ากับ 1 จะมีค่าพิกัดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเนื่องจากตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จะไม่ซ้ำกันเลยทำให้ผล ของความผิดพลาดของการควอนไทซ์ถูกหักล้างออกไปมาก



รูปที่ 5.24 แสดงตัวอย่างการซิกตัวอย่างสัญญาณเมื่อความถี่ในการซิกตัวอย่างสัญญาณ สามารถหารด้วยความถี่ของสัญญาณที่วัดลงตัว



รูปที่ 5.25 แสดงตัวอย่างการซักรับตัวอย่างสัญญาณเมื่อความถี่ในการซักรับตัวอย่างสัญญาณ
หารด้วยความถี่ของสัญญาณที่วัดไม่ลงตัว

จากรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 แสดงผลการจำลองการทำงานเมื่อให้ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัด
คงที่เท่ากับ 50Hz ค่าตัวประกอบกำลังคงที่เท่ากับ 1 และเปลี่ยนความถี่ของการซักรับตัวอย่างสัญญาณ จะพบว่าที่
ค่าความถี่ของการซักรับตัวอย่างสัญญาณต่าง ๆ นั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันแต่ที่บางความถี่จะมีค่าพิกัด
และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่าที่ความถี่อื่นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งเป็นความถี่ที่มีลักษณะเหมือนกับที่กล่าว
ในกรณีก่อนหน้านี้คือสามารถหารด้วยค่าความถี่ของสัญญาณที่ถูกวัดลงตัวเช่นที่ความถี่ 2000Hz 2050Hz
รวมถึงความถี่ที่มีค่าหารร่วมมากของความถี่ทั้ง 2 มากเช่นความถี่ 2025Hz 2075Hz 2020Hz 2040Hz 2060
Hz 2080Hz และ 2090Hz โดยมีสาเหตุเหมือนกันคือผลของความผิดพลาดของการควอนไทซ์จะมีค่าเท่ากันทุก
คาบของสัญญาณทำให้ไม่มีการหักล้างกัน

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทำให้ได้แนวคิดเพิ่มเติมคือการเลือกความถี่ในการซักรับตัวอย่างสัญญาณนั้น
ควรเลือกความถี่ที่ไม่สามารถหารด้วยค่าความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัดลงตัวหรือเป็นจำนวนเฉพาะเพื่อให้
เกิดผลการหักล้างกันของความผิดพลาดของการควอนไทซ์

5.3 สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลากการใช้ที่มีความแม่นยำสูงคือระดับ 0.5 ตามมาตรฐาน IEC687 โดยมิเตอร์มีความสามารถที่หลากหลาย สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์การอ่านมิเตอร์ได้ทั้งทางพอร์ตแสงและโมเด็ม รวมถึงยังสามารถทนต่ออันตรายที่เกิดขึ้นในระบบอย่างเช่นเสิร์จได้ดีพอสมควร ความคลาดเคลื่อนของการวัดที่เกิดขึ้นนั้นสามารถวิเคราะห์ที่มาเพื่อนำไปปรับปรุงความแม่นยำในการวัดได้ มิเตอร์ที่ออกแบบนี้ยังสามารถนำไปเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนามิเตอร์ที่มีความสามารถสูงขึ้น มีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถใช้งานได้จริงต่อไป

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต การคำนวณที่ต้องการความละเอียดจะต้องใช้เวลามาก จึงอาจพัฒนาต่อไปโดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต หรือ 32 บิต หรือใช้ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิทัลช่วยในการคำนวณ ทำให้มิเตอร์มีความสามารถวัดค่าต่างๆได้มากขึ้น
- 2) เนื่องจากมิเตอร์ที่ออกแบบจะหยุดการทำงานทุกครั้งที่ไฟฟ้าในระบบดับทำให้การทำงานไม่ต่อเนื่องและอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานได้ ดังนั้นอาจออกแบบมิเตอร์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยมาก ๆ ร่วมกับการใช้แบตเตอรี่แบบชาร์จได้ เพื่อลดความผิดพลาด
- 3) จากผลการทดลองบางจุดจะพบว่าไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้มที่วิเคราะห์ซึ่งอาจเกิดจากผลของสัญญาณรบกวนภายนอก ดังนั้นควรมีการออกแบบเพื่อให้ทนต่อสัญญาณรบกวนให้มากขึ้น
- 4) เนื่องจากมิเตอร์ที่ออกแบบยังใช้อุปกรณ์หลายอย่างที่มีความแม่นยำสูงซึ่งบางอุปกรณ์อาจสามารถทดแทนด้วยอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำต่ำกว่าแต่มีการเปลี่ยนค่าเนื่องจากอุณหภูมิน้อย และใช้การปรับเทียบช่วยจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้อีก

รายการอ้างอิง

- [1] IEC687: 1992, Alternating current static watt-hour meters for active energy (class 0.2S and 0.5S).
- [2] ANSI Std C12.18-1996: Protocol Specification for ANSI Type 2 Optical Port.
- [3] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly. Engineering Circuit Analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [4] Ronald B. Standler. Protection of Electronic Circuits from Overvoltages. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [5] Dallas Semiconductor. DS89C450: Ultra-High-Speed Flash Microcontrollers. 2003.
- [6] Dallas Semiconductor. DS1307: 64x8 Serial Real-Time Clock. 2001.
- [7] Phillips Semiconductor. PCF8583: Clock/calendar with 240x8-bit RAM. 1997.
- [8] Microchip Technology. 24LC512: 512K I²C CMOS Serial EEPROM. 2002.
- [9] Texas Instrument. ADS8345: 16-Bit, 8-Channel Serial Output Sampling ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER. 2003.
- [10] J.R.Marti, L.R.Linares, H.W.Dommel, Current Transformer and Coupling-Capacitor Voltage Transformer in Real-Time Simulations on IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.1, January 1997., pp.164-168.
- [11] Stephen J. Chapman. Electric Machinery Fundamentals. 2rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [12] J.R. Lucas, , P.G. McLaren, , W.W.L. Keerthipala, R.P. Jayasinghe, Improved Simulation Models For Current and Voltage Transformers In Relay Studies on IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Issue: 1 , January 1992., pp.152–159.
- [13] Edison Electric Institute, Handbook for Electricity Metering. 9th ed. Edison Electric Inst., 1999.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกวิน เลขานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เชิงเลข ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2544 ระหว่างการศึกษได้สมัครเป็นผู้ช่วยวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยออกแบบ และประยุกต์วงจรรวม ในโครงการวิจัยย่อยเรื่องวงจรวัดค่าพลังงานไฟฟ้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย