

การพัฒนาระบบวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าประกอบพลังงานสูญเสียได้อิเล็กทรอนิกส์ของสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินขณะ  
ไม่จ่ายโหลด



นายमाणพ ณะคำดี

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

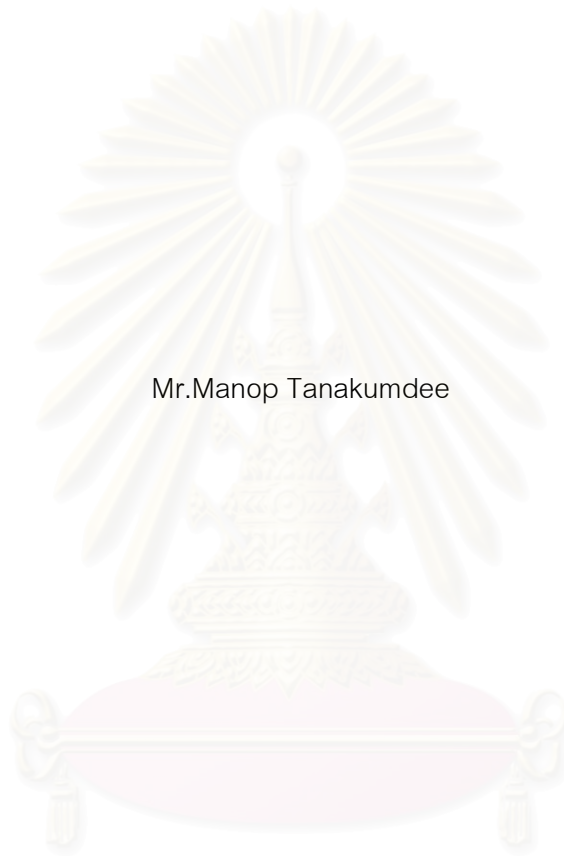
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A CAPACITANCE AND DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASURING SYSTEM FOR  
UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE CABLES UNDER NO LOAD CONDITIONS



Mr.Manop Tanakumdee

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าประกอบพลังงานสูญเสีย  
เปล่าไดอิเล็กตริกของสายไฟฟ้าแรงสูงได้ดินขณะไม่จ่ายโหลด

โดย

นายมานพ ธนะคำดี

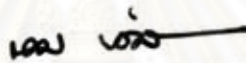
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนริญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

มาตรฐาน ณะคำดี : การพัฒนาระบบวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าประกอบพลังงานสูญเสีย  
ไดอิเล็กตริกของสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินขณะไม่จ่ายโหลด. (DEVELOPMENT OF A  
CAPACITANCE AND ELECTRIC LOSS FACTOR MEASURING SYSTEM FOR  
UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE CABLES UNDER NO LOAD CONDITIONS).

อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.วิระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

76 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบระบบตรวจสอบค่าความจุ  
ไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ที่มีรูปแบบเป็น  
ตัวเก็บประจุ เช่น สายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน โดยอาศัยหลักการตรวจสอบแบบสังเคราะห์สัมพัทธ์ ซึ่งใน  
งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นแบบจำลองของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีสภาพดีและมีสภาพที่  
เสี่ยงต่อความผิดปกติ โดยอาศัยเครื่องมือที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด การ  
ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำได้โดยการตรวจวัดสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ และจาก  
แบบจำลอง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบตรวจสอบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้



## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต..... ๑๙๗๗ ๓๓๐๒๑  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....๒๕๕๐.....

47700411521 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : DISSIPATION FACTOR MEASUREMENT / LOSS TANGENT  
MEASUREMENT / DIELECTRIC LOSS MEASUREMENT

MANOP TANAKUMDEE : DEVELOPMENT OF A CAPACITANCE AND  
DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASURING SYSTEM FOR UNDERGROUND  
HIGH-VOLTAGE CABLES UNDER NO LOAD CONDITIONS.

THESIS ADVISOR : WEERAPAN RUNGSIVIJITPRAPA, Dr.-Ing 76 pp

This thesis deals with the design and development of a capacitance and dielectric loss factor measurement for high voltage insulation apparatus, capacitive type equipment. Such as power cables based on the principle of relative synthetic method. This research uses capacitors as model of insulator of high voltage power system apparatus, which in good condition and used under the risk of malfunction. The designed and developed measuring instrument was used to measure the signals from a signal generator and a simplify cable model. The test result indicates that the inspection system works as well as it designed.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature..... *Manop Tanakumdee*  
Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature..... *W. Rungsivijitprapa*  
Academic year..... 2007.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากอาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย , การแก้ไข ปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร.วันเฉลิม ไบรา ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณไชยวัฒน์ อภินะวิทย์ ที่ให้คำแนะนำเรื่องการเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมทั้งเชื้อเพื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆและผองเพื่อนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่เป็นกำลังใจและช่วยกันฝ่าฟัน อุปสรรคจนประสบความสำเร็จ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้องและเหล่าญาติของข้าพเจ้า ผู้เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา จนประสบความสำเร็จ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ต
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2. ทฤษฎีและหลักการ .....	4
2.1 บทนำทั่วไป .....	4
2.2 ตัวประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทริก.....	6
2.3 กำลังสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทริกของฉนวน .....	8
2.3.1 กำลังสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า .....	8
2.3.1.1 กำลังสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสตรง .....	8
2.3.1.2 กำลังสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับ .....	9
2.3.2 กำลังสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทริกเนื่องจากไอออนในเซชันในลักษณะดีสชาร์จบางส่วน .....	9
2.3.3 พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากไอออนในเซชันในลักษณะดีสชาร์จบางส่วน.....	9
2.4 วิธีการวัดแบบสัมพัทธ์สังเคราะห์ .....	10
2.5 การวัดคาบหรือความถี่ของสัญญาณคาบ .....	11
2.6 การวัดและเครื่องมือวัด .....	13
2.6.1 การวัดกระแสด้วยตัวต้านทาน.....	14
2.6.1.1 ความต้านทานชั้นที่ .....	15

บทที่	หน้า
2.6.2 โวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดัน.....	16
2.6.2.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสลับ .....	17
2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	19
3. การออกแบบและประกอบสร้าง.....	20
3.1 ชุดตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ .....	21
3.2 การออกแบบชุดตรวจจับการผ่านศูนย์ของกระแสและแรงดัน .....	23
3.2.1 ชุดตรวจจับก่อนการผ่านศูนย์.....	23
3.2.2 ชุดตรวจจับการผ่านศูนย์.....	27
3.3. ชุดตัวต้านทานความเหนียวนำต่ำ .....	29
3.4. การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	30
3.5 การออกแบบชุดควบคุมคำสั่ง .....	30
3.5.1 ชุดคำสั่งหาความต่างเฟส.....	31
3.5.2 ชุดคำสั่งหาค่าสูงสุด .....	33
3.6 การประกอบสร้างและคู่มือการใช้งาน .....	34
3.7 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบ .....	35
4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล .....	38
4.1 การทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น.....	38
4.1.1 การทดสอบวงจรเลือกช่องสัญญาณ .....	38
4.1.2 การทดสอบวงจรชุดสร้างสัญญาณพัลส์ .....	40
4.1.3 การทดสอบการนับของไทเมอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	42
4.1.4 การทดสอบและเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้น .....	43
4.2 การทดสอบชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า .....	47
4.2.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	47
4.2.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นและหา Ratio ของตัวดีไวเดอร์แรงดันและ สายสัญญาณ .....	48
4.3 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง.....	49
4.3.1 การทดสอบวัดสายเคเบิลเส้นเดียว .....	49
4.3.2 การทดสอบวัดแบบเปรียบเทียบระหว่างสายเคเบิล .....	51
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	55



บทที่	หน้า
5.1 สรุปผล.....	55
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	56
รายการอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างสายไฟฟ้าแรงสูงที่มีเกราะป้องกัน .....	2
2.1 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอรมิตติวิตี้เป็นสุญญากาศ.....	4
2.2 วงจรสมมูลของไดอิเล็กทริก .....	5
2.3 แสดงแผนภาพเฟเซอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าไม่สมบรูณ์.....	7
2.4 วงจรสมมูลของไดอิเล็กทริกที่แทนกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โพลาริเซชัน และดีสชาร์จบางส่วน.....	8
2.5 แสดงปัญหาการตัดผ่านศูนย์หลายครั้งเนื่องจากมีสัญญาณรบกวน.....	12
2.6 แสดงสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่ต้องการวัด .....	12
2.7 วงจรสมมูลการวัดกระแสและแรงดันในสายไฟฟ้าใต้ดิน 1 เส้น .....	13
2.8 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดัน .....	13
2.9 แสดงไดอะแกรมการทำงาน .....	14
2.10 วงจรวัดกระแสด้วยขั้วขึ้นที่.....	14
2.11 วงจรสมมูลความต้านทานขั้วขึ้นที่ .....	15
2.12 ผลตอบสนองของแรงดันรูปขั้วขึ้นของขั้วขึ้นที่ .....	15
2.13 แสดงวงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์.....	16
2.14 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ .....	17
2.15 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุต่ออันดับ .....	18
3.1 วงจรเครื่องวัดค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้า .....	20
3.2 แสดงชุดวงจรตรวจจับค่ายอด .....	22
3.3 ตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านวงจรตรวจจับค่าสูงสุดและสัญญาณหลังผ่านการปรับสภาพ สัญญาณ .....	23
3.4 ไดอะแกรมฟังก์ชันของอนาล็อกมัลติเพล็กซ์เซอร์ .....	24
3.5 แสดงภาพสาเหตุที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อการวัด .....	25
3.6 แสดงการเปรียบเทียบระดับแรงดันสูงสุดที่ 5 โวลต์และจุดที่ต้องการให้ผ่านศูนย์ที่ มุม 0.0001 องศา .....	25
3.7 แสดงชุดวงจรขยายกลับเฟส .....	26

ภาพประกอบที่	หน้า
3.8 วงจรกรองแถบผ่านที่มีจุดศูนย์กลางความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	26
3.9 แสดงพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อมีสัญญาณผ่านศูนย์ด้านลบไปด้านบวก .....	27
3.10แสดงวงจรสร้างรูปคลื่นพัลส์ .....	28
3.11แสดงรูปวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ด้านอุปกรณ์ .....	28
3.12แสดงรูปวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ด้านลายวงจร .....	28
3.13แสดงค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานที่วัดโดย RLC มิเตอร์.....	29
3.14การวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของตัวต้านอินพัลส์.....	29
3.15แสดงวงจรสมมูลชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และหน้าจอ LCD.....	30
3.16แสดงแผนผังการทำงานโปรแกรมตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	31
3.17แสดงแผนผังการทำงานโปรแกรมย่อยอินเตอร์รับปี.....	32
3.18แสดงไดอะแกรมของโปรแกรมหาค่ายอดแบบเปรียบเทียบ .....	33
3.19แสดงเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นด้านหน้าอุปกรณ์ .....	34
3.20แสดงเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นด้านหลังอุปกรณ์.....	34
3.21หม้อแปลงจำหน่ายสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	35
3.22ตัวต้านทานความเหนี่ยวนำต่ำ .....	35
3.23C divider ratio =1000.....	36
3.24ตัวอย่างสายเคเบิลสำหรับทดสอบ.....	36
3.25 วาริแอก .....	36
3.26สายนำสัญญาณพร้อมหัวต่อ BNC 50 ohm .....	37
4.1 แสดงวงจรทดสอบช่องเลือกสัญญาณแบบอนาล็อก .....	39
4.2 แสดงสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวเลือกช่องสัญญาณ .....	39
4.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของตัวเลือกช่องสัญญาณ.....	40
4.4 แสดงชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์และสร้างสัญญาณพัลส์ .....	41
4.5 แสดงสัญญาณตรวจจับผ่านศูนย์ที่ 50 mV/Div .....	41
4.6 แสดงจุดตัดผ่านศูนย์เมื่อลดเวลาต่อช่องเป็น 20 ns/Div.....	41
4.7 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ใช้ตรวจสอบชุดไทมเมอร์ .....	42
4.8 แสดงการทดสอบและเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้น.....	43
4.9 สัญญาณไซน์และการสร้างสัญญาณหลังการผ่านศูนย์.....	44
4.10กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของมุมที่วัดได้ .....	45

ภาพประกอบที่

4.11 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเมื่อผ่านวงจร all pass filter..... 46

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมที่วัดได้ 46

4.13 แสดงสัญญาณรูปคลื่นอินพุตกับเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีขนาด 100mV และ 3 V ..... 46

4.14 แสดงสัญญาณรูปคลื่นอินพุตกับเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีขนาด 100mV และ 3 V ..... 48

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต..... 48

4.16 ตัวดีไวเดอร์แรงดันแบบตัวเก็บประจุ ..... 49

4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V1 และ V2 ของตัวดีไวเดอร์แรงดัน..... 49

4.18 ภาพแสดงวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสัญญาณเปล่าไดอิเล็กทริก ..... 50

4.19 ภาพวงจรตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสัญญาณเปล่าไดอิเล็กทริก ..... 50

4.20 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดจากออกซิลโลสโคป ..... 50

4.21 แสดงภาพตัวอย่างสัญญาณอินพุตก่อนวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ..... 51

4.22 แสดงแผนภาพวงจรสมมูลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์..... 52

4.23 แสดงวงจรทดสอบค่าประกอบพลังงานสัญญาณเปล่าโดยเปรียบเทียบอุปกรณ์ ..... 52

4.24 แสดงสัญญาณแรงดันอ้างอิงสี่เหลี่ยม Uv ..... 53

ก.1 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิรตซ์..... 60

ก.2 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิรตซ์..... 61

ก.3 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 50 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div ..... 62

ก.4 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 100 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div ..... 62

ก.5 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 200 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div ..... 62

ก.6 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 500 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div ..... 63

ก.7 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 1 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div..... 63

ก.8 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 2 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div..... 63

ก.9 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 2.5 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div ..... 64

ก.10 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 3 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div..... 64

ข.1 แสดงวงจรชุดตรวจจับผ่านศูนย์ ..... 65

ข.2 แสดงวงจรชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และแอลซีดีใช้กับชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์..... 66

ข.3 ชุดวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ..... 67

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	
ข้อกำหนดความบกพร่องของอุปกรณ์โดยอาศัยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ผลของการวัดโดยวิธีสัมพัทธ์สังเคราะห์.....	11
ตารางที่ 4.1	
ตารางแสดงค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตสำหรับตรวจสอบตัวเลือก สัญญาณอนาล็อก.....	40
ตารางที่ 4.2	
แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการนับจาก Timer register กับ ออกซิลโลสโคป.....	42
ตารางที่ 4.3	
แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 50 เฮิร์ตซ์.....	44
ตารางที่ 4.4	
ผลการวัดเทียบมุมที่แอมพลิฟายด์ขนาดต่างๆ.....	46
ตารางที่ 4.5	
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของชุดวงจรตรวจวัด ค่าความจุไฟฟ้า.....	47
ตารางที่ 4.6	
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของตัวดิไวเดอร์แรงดัน.....	48
ตารางที่ 4.7	
แสดงผลการวัด $\Delta \tan \delta$ ของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ระดับ 1 kV.....	50
ตารางที่ 4.8	
แสดงผลการทดลองวัดเทียบระหว่างสายเคเบิลที่แรงดัน 1 kV.....	53
ตารางที่ 4.9	
แสดงผลการทดลองวัดเทียบระหว่างสายเคเบิลที่แรงดัน 1 kV.....	53
ตารางที่ ก.1	
ผลการทดสอบการเทียบวัดคาบเวลา.....	59
ตารางที่ ก.2	
แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 50 เฮิร์ตซ์.....	60
ตารางที่ ก.3	
แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 200 เฮิร์ตซ์.....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

สายส่งจ่ายหรือระบบจำหน่ายที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า อาจแบ่งตามลักษณะโครงสร้างและฉนวนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบซึ่งในอากาศ (Overhead Aerial System) และแบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System)

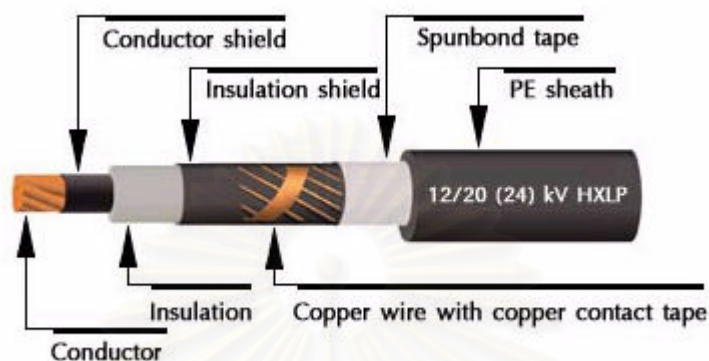
สายส่งจ่ายแบบซึ่งในอากาศ เป็นสายส่งจ่ายที่อาศัยอากาศเป็นฉนวนหลัก ซึ่งข้อดีของอากาศคือเป็นฉนวนที่สามารถกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้เอง หลังจากการเกิดการดีสชาร์จหรือเบรกดาวร์ผ่านไป การใช้ระบบสายส่งไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศต้องคำนึงถึงเงื่อนไขของสภาวะแวดล้อม สภาวะ การเกิดโคโรนารบกวนระบบสื่อสาร ความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า ระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้า และที่สำคัญก็คือมีผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ส่วนสายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดินเป็นสายตัวนำที่หุ้มด้วยฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว หรือฉนวนกึ่งแข็งความดัน เพื่อให้ทนต่อแรงดันได้สูงโดยมีความหนาของฉนวนไม่ต้องมากนัก เนื่องจากในกรณีมีที่ว่างไม่มากพอที่จะเดินสายแบบซึ่งในอากาศ เช่นในเมืองใหญ่หรือย่านชุมชน หรือในกรณีที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อม ความสวยงามทางภูมิทัศน์

ในปัจจุบันการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบสายไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศ มีอุปสรรคมากขึ้นตามความเจริญของพื้นที่ โดยเฉพาะในเมืองหลวงและแหล่งท่องเที่ยว ซึ่งอุปสรรคที่สำคัญ คือ ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ของระบบสายไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศลดลง เนื่องจากในเมืองใหญ่หรือแหล่งชุมชนที่มีความต้องการไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้นแต่มีพื้นที่ในขีดจำกัด ทำให้เกิดการส่งจ่ายไฟฟ้าจำนวนหลายวงจรบนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกัน ทำให้เกิดผลกระทบเป็นบริเวณกว้างเมื่อเกิดการผิดปกติขึ้น ส่วนอุปสรรคอีกข้อที่สำคัญคือ สภาพพื้นที่ ไม่ว่าจะเป็นการต้องการความปลอดภัยแก่ชีวิตและทรัพย์สินจากอันตรายที่เกิดจากสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศ บางพื้นที่นั้นไม่สามารถสร้างสายไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศได้ เนื่องจากระยะความปลอดภัย (Clearance) ไม่เพียงพอ เช่นต้องหลบสิ่งกีดขวางต่างๆ หรือมีเขตทาง (ROW = Right of Way) แคบเกินไป บางพื้นที่อาจจะต้องการความสวยงามทางภูมิทัศน์ แต่การใช้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบซึ่งในอากาศทำให้เกิดความไม่สวยงามขึ้น

การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการเดินสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดิน ซึ่งเป็นระบบที่มีความปลอดภัย ความมั่นคง และความน่าเชื่อถือของระบบสูง แต่ในทางกลับกันหากการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินนั้นทำไม่ถูกต้อง ไม่ได้มาตรฐาน ความมั่นคงและความน่าเชื่อถือของระบบก็จะ

เสียไป เนื่องจากระบบสายเคเบิลใต้ดินเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น การหาจุดบกพร่องและการใช้เวลาในการซ่อมแซมใช้เวลานาน ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้จึงต้องมีคุณสมบัติสำหรับการใช้งานในระบบสายเคเบิลใต้ดิน ตัวอย่างของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินที่มีเกราะป้องกัน

## 1.2 ที่มาของปัญหา

การผิดปกติที่เกิดจากระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ ความน่าเชื่อถือ และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อใช้งานร่วมกันนั้นเกิดความเสียหาย ทำให้เสียค่าใช้จ่าย จำนวนคนและเวลาในการซ่อมบำรุงเป็นจำนวนมาก

เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสกับกราวด์ ฉนวนของสายเคเบิลต้องมีสภาพที่ดี ซึ่งในปัจจุบันสายไฟฟ้าใต้ดินส่วนใหญ่ใช้ฉนวนเป็น XLPE ซึ่งฉนวน XLPE ได้จากการนำโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งมีสภาพเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มาเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลภายใน ทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายโมเลกุลของโพลีเอทิลีน จึงเกิดการเปลี่ยนสภาพจากเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting) สายไฟฟ้าใต้ดินที่ฉนวนเป็น XLPE มีข้อดีหลายอย่างคือ ทนอุณหภูมิได้สูงประมาณ 90 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือ มีพลังงานสูญเสียต่ำไดอิเล็กตริกต่ำ และ ความคงทนไดอิเล็กตริกสูง ทนแรงกลจากภายนอกได้ดี ทนสารเคมีดีกว่า PE ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม แต่ในความเป็นจริงเมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาหนึ่งสภาพของฉนวนจะเกิดการเสื่อมสภาพ [1-3] ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากปรากฏการณ์ Water Treeing เนื่องจากความชื้นช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมในฉนวน และสนามไฟฟ้าความเข้มสูง จากปรากฏการณ์นี้สามารถทำให้เกิดการผิดปกติขึ้น จึงทำให้การตรวจสอบสภาพของฉนวนเป็นเรื่องที่จำเป็น ดังนั้นการตรวจสอบสภาพฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดินตามคาบเวลาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถบ่งชี้ถึงสภาพของฉนวน พร้อมทั้งยังทำหน้าที่ช่วยเตือนเมื่อสภาพของฉนวนเสื่อมถึงค่าวิกฤตที่เสี่ยงต่อการเกิดความผิดปกติ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ช่วยตัดสินใจเพื่อทำการซ่อมบำรุง

### 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ในปี ค.ศ.1997 Mr.Nitaigour Premchand Mahalik ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กทริกแบบตัวเลข โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8085A เป็นอุปกรณ์ประมวลผล ซึ่งนำเสนอเป็นตารางที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบค่ามุมที่วัดได้ให้เป็นค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กทริกและนำเสนอแผนการคำนวณของอุปกรณ์ประมวลผล

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือที่มีความสามารถในการตรวจวัดสภาพฉนวนของสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินหรือฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยการตรวจวัดตัวประกอบสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบที่สามารถใช้ทำนายสภาพฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดิน ในสภาพไม่มีโหลด

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีเครื่องมือที่ใช้วัดและแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บ่งชี้ถึงสภาพฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดิน
2. สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสภาพฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินในขณะไม่ต่อโหลด
3. ทำให้ทราบสภาพฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดินในขณะที่มีความเสี่ยงต่อความผิดปกติ ทำให้สามารถช่วยในการตัดสินใจเพื่อทำการซ่อมบำรุงหรือเพื่อการวางแผนในการจัดลำดับสำหรับการเปลี่ยนอุปกรณ์ชุดใหม่
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดสภาพฉนวนของอุปกรณ์แรงสูงอื่นๆ ได้
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดตรวจวัดและทำนายสภาพฉนวนของสายเคเบิลในขณะใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

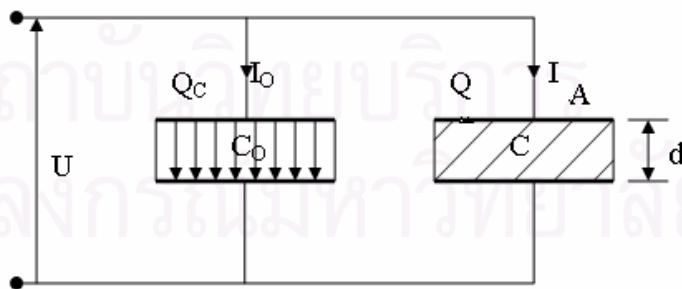
### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 บทนำทั่วไป

ไดโอดีทริกเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้คั่นระหว่างตัวนำไฟฟ้า เพื่อรับแรงดันหรือความเครียดของสนามไฟฟ้า รับแรงกล ทนต่อสภาพแวดล้อม ความร้อนและปฏิกิริยาเคมีได้ ตัวอย่างการนำฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำไฟฟ้า เช่น คั่นระหว่างแผ่นโลหะของตัวเก็บประจุ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของสายไฟฟ้าใต้ดิน คั่นระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดหม้อแปลง และลักษณะสำคัญที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนคือ ความต้านทาน เปรอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวของไดโอดีทริก ตัวประกอบพลังงานสูญเสีย ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ความต้านทานของฉนวนที่สมบูรณ์จะต้องไม่นำกระแส หากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ฉนวนต้องมีค่าความต้านทานสูงถึงอนันต์แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในทางปฏิบัตินั้นจะมีการนำกระแส แต่ค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง และค่ากระแสที่ไหลผ่านฉนวนนี้เรียกว่า กระแสรั่ว กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้แบ่งออกเป็น 2 ทาง คือ ไหลผ่านเนื้อฉนวน และไหลผ่านผิวฉนวน เนื่องจากสิ่งสกปรกและความชื้น นั้นแสดงว่าสารที่ใช้ทำฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่เป็นอนันต์ หากแต่มีค่าความต้านทานสูงที่วัดได้ ดังนั้นค่าความต้านทานของฉนวนยิ่งมากก็แสดงว่าฉนวนยิ่งมีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เปอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวของไดโอดีทริกสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคุณค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของสูญญากาศเมื่อใส่ฉนวนที่มีเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r$  เข้าแทนที่



รูปที่ 2.1 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นสูญญากาศ

ถ้ามีการใส่ฉนวนที่เป็นสารอื่น(ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว ก๊าซ) เข้าแทนที่ของสูญญากาศระหว่างอิเล็กโทรด จะพบว่าแม้มีการป้อนแรงดันคงที่ก็ตามแต่กระแสที่ไหลในวงจร  $I$  (รูปที่ 2.2) จะมากขึ้นซึ่ง

แสดงว่าเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโทรดสูงขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านฉนวนมากขึ้น ในตัวเก็บประจุสุญญากาศที่มีค่าความจุไฟฟ้า  $C_0$  จะได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านเป็น

$$i(t) = c \frac{du(t)}{dt} \text{ หรือ } \bar{I} = j\omega c_0 \bar{U} \dots\dots\dots(2.1)$$

ซึ่งเห็นว่ากระแสมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม  $90^\circ$  ส่วนตัวเก็บประจุที่มีสารฉนวน ค่าความจุไฟฟ้า  $C$  จะไม่เท่ากับ  $C_0$  และยิ่งกว่านั้นในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า  $90^\circ$  เพราะมีพลังงานสูญเสียเปล่าในลักษณะความต้านทาน นั้นแสดงว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเป็นจำนวนเชิงซ้อน คือ มีค่าจริงและค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี้ คือ

$$\bar{C} = \epsilon_r C_0 \dots\dots\dots(2.2)$$

โดยที่

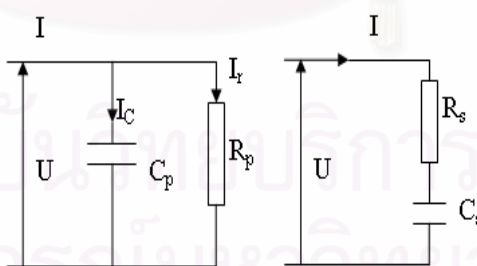
$$\bar{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots(2.3)$$

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านความจุไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} \bar{I} &= j\omega \bar{C} \bar{U} \\ &= j\omega (\epsilon' - j\epsilon'') C_0 \bar{U} \\ &= j\omega \epsilon' C_0 \bar{U} + \omega \epsilon'' C_0 \bar{U} \dots\dots\dots(2.4) \end{aligned}$$

นิพจน์แรกขวามือของสมการ  $\bar{I}$  คือ กระแสที่ไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้า  $I_c$  และนิพจน์หลังคือ กระแสพลังงานสูญเสียเปล่า  $I_r$  หรือสรุปได้ว่า  $\bar{I} = I_c + I_r$

ฉนวนมีพลังงานสูญเสียเปล่า และสามารถเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของไดอิเล็กทริก

$$C_p = \epsilon' C_0$$

วงจรขนาน :  $R_p = 1/(\omega \epsilon'' C_0) \dots\dots\dots(2.5)$

$$tg\delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

$$C_s = \frac{|\bar{\epsilon}_r|^2}{\epsilon'} C_0 = \epsilon' (1 + (\text{tg}\delta)^2) C_0$$

$$\text{วงจรรวม} : R_s = \epsilon'' / \omega |\bar{\epsilon}_r|^2 C_0 \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\text{tg}\delta = \omega R_s C_s = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

มุม  $\delta$  เรียกว่ามุมกำลังสูญเสีย (Loss angle)

จากสมการ  $C_p$  และ  $C_s$  จะเห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับวงจรมุมสูญเสียในกรณีที่กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำ คือ  $\epsilon'' \ll \epsilon'$  หรือ  $\text{tg}\delta \ll 1$  ค่าความจุไฟฟ้าของทั้งสองจะเท่ากัน คือ  $C_p = C_s$  และจะได้

$$\bar{\epsilon}_r \rightarrow \epsilon_r = \epsilon'$$

นั่นคือ  $\epsilon'$  จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)  $\epsilon_r$

## 2.2 ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับตัวเก็บประจุที่สมบรูณ์ กระแสจะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม  $90^\circ$

ถ้าให้

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin \omega t \\ i &= \omega C U_m \cos \omega t \dots \dots \dots (2.7) \\ I &= \omega C U \end{aligned}$$

เมื่อ  $U$  = เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันที่ป้อน

แต่ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า  $90^\circ$  องศา ดังในรูปที่

2.4 ซึ่ง  $\phi$  เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้นตัวประกอบกำลังเท่ากับ  $\cos\phi$  หรืออีกนัยหนึ่งคือ  $\sin\delta$  ฉะนั้นกำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบรูณ์ คือ

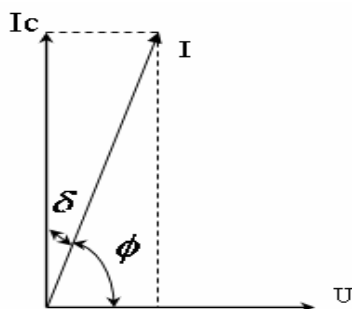
$$UI \cos \phi \text{ หรือ } UI \sin \delta$$

แต่

$$\delta = 90 - \phi$$

$\delta$  = มุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก

$\text{tg}\delta$  = ตัวประกอบพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าไม่สมบูรณ์

จากรูปเฟสเซอร์จะได้

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \dots \dots \dots (2.8)$$

ฉะนั้นพลังงานสูญเสียเปล่าคือ

$$P_d = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \dots \dots \dots (2.9)$$

หรือ

$$P_d' = E^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta \dots \dots \dots (2.10)$$

เมื่อ  $P_d'$  เป็นพลังงานสูญเสียเปล่าต่อปริมาตร

$E$  เป็นความเครียดสนามไฟฟ้า

ถ้า  $C$  เป็น ฟารัด

$U$  เป็น โวลต์

ในทางทฤษฎีฉนวนมีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ

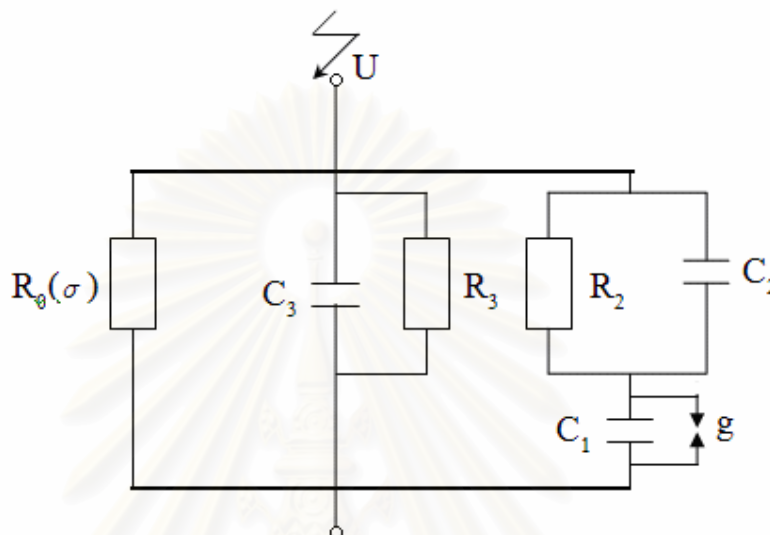
1. พลังงานสูญเสียเปล่าจากสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  (Conduction loss)
2. พลังงานสูญเสียเปล่าจากการโพลาไรเซชัน (Polarization)
3. พลังงานสูญเสียเปล่าจากการไอออไนเซชัน (ionization loss) ในลักษณะของดิสชาร์จ

บางส่วน

พลังงานสูญเสียเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อมีการป้อนแรงดันเข้าไป และจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นภายในฉนวน ฉนวนส่วนมากจะนำความร้อนได้ไม่ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกได้ยาก และเมื่อพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นความร้อนสะสมยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนยังสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของความร้อน ก็ยังอยู่ในสภาพสมดุลเกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าการระบายออกของความร้อนน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความร้อนในฉนวน จะทำให้อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดการเบรกดาวนั้ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นในการตรวจสอบสภาพฉนวนหรือวัดค่าพลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กทริก

กำลังสูญเสียได้อิเล็กทริกของฉนวนขึ้นกับขนาดของแรงดัน และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เวลาและคุณสมบัติได้อิเล็กทริก กำลังสูญเสียได้อิเล็กทริกทั้ง 3 เทอมสามารถเขียนเป็นวงจรมุมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 วงจรมุมูลของได้อิเล็กทริกที่แทนกำลังสูญเสียได้อิเล็กทริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โฟลาไรเซชัน และดีสชาร์จบางส่วน

จากรูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนในวงจรมุมูล คือ  $R_0(\sigma)$  แทนกำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  $C_3$  แทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของได้อิเล็กทริก ส่วน  $R_3$  แทนกำลังสูญเสียเนื่องจากโฟลาไรเซชัน  $R_2$  แทนกำลังสูญเสียเนื่องจากดีสชาร์จบางส่วน PD และ ในส่วนของเทอม  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $g$  แทนวงจรมุมูลดีสชาร์จบางส่วน

## 2.3 กำลังสูญเสียเปล่าได้อิเล็กทริกของฉนวน

### 2.3.1 พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า

#### 2.3.1.1 พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสดตรง

ในสนามไฟฟ้าคงตัว  $E$  ที่มีแรงดันกระแสดตรง  $U$  ค่าความหนาแน่นของกระแส  $J$  อาจคำนวณโดยอาศัยกฎของโอห์มจากค่าสภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ  $\sigma$  และสภาพต้านทาน  $R_0$  ได้คือ

$$P = U^2/R_0 \dots\dots\dots(2.11)$$

$$J = \sigma E$$

กำลังสูญเสียได้อิเล็กทริกต่อปริมาตรหาได้จาก

$$P'_0 = EJ = \sigma E^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

สภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  ของระบบการฉนวน ซึ่งประกอบไปด้วย ของเหลว ของแข็ง จะเป็นผลมาจากไอออน สภาพนำไฟฟ้าของฉนวนจึงขึ้นกับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณความชื้น ค่าความต้านทานกระแสรั่ว  $R_0(\sigma)$  ของฉนวน อาจหาได้จากกราฟวัดค่ากระแสจากการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่

### 2.3.1.2 พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ

ในกรณีการป้อนแรงดันกระแสสลับที่มีความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{j} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \dots\dots\dots(2.13)$$

### 2.3.2 พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน

ฉนวนที่อยู่ระหว่างตัวนำที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของฉนวนที่เคยวางตัวอย่างอิสระจะเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้า และอาจมีการกลับขั้วไฟฟ้า เช่น ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งทำให้โมเลกุลของฉนวน หมุนกลับไปกลับมาตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และทำให้เกิดการชนกันหรือเสียดสีระหว่างพันธะโมเลกุล ทำให้มีพลังงานความร้อนสะสมเกิดขึ้น และหากการชนมีพลังงานมากพอก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น ทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้ามากขึ้น อันเป็นเหตุให้ฉนวนเสื่อมสภาพและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้อายุของฉนวนสั้นลง

### 2.3.3 พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอออนในเซชันในลักษณะดีสชาร์จบางส่วน

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกในเทอมของการไอออนในเซชันในลักษณะดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนแข็งหรือเหลวจะเป็นดีสชาร์จภายในที่มีฟองก๊าซอยู่ภายในความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดีสชาร์จภายในเริ่มเกิด

ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กทริกนอกจากค่าจริงแล้วยังมีค่าในเทอมของจินตภาพด้วย ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก  $\tan \delta$  ของฉนวนซึ่งมีนิยาม คือ อัตราส่วนของกระแสกำลัง  $I_a$  ต่อค่ากระแสประจุ  $I_c$  นั่นคือ

$$\tan \delta = I_a/I_c = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \dots\dots\dots(2.14)$$

ซึ่งกำลังสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ  $P_d$  คือ กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

$P_{\sigma}$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  
 $P_p$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน  
 $P_i$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากการไอออไนเซชัน  
 ค่าประกอบกำลังสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันได้เป็น

$$\tan \delta = \tan \delta_{\sigma} + \tan \delta_p + \tan \delta_i \dots\dots\dots(2.16)$$

และเป็นที่ยอมรับกันว่า  $\tan \delta$  เป็นแฟกเตอร์ที่ใช้วัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก ซึ่งได้มาจากการวัดค่าความต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละอุปกรณ์ดังกล่าวถึงในข้างต้น ส่วนความแตกต่างของมุม  $\tan \delta$  เรียก  $\tan \delta$  สัมพัทธ์ หรือ  $\Delta \tan \delta$  สามารถนำมาใช้ตรวจสอบการเสื่อมสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือฉนวนของสายไฟฟ้า ได้โดยพิจารณาจากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta \tan \delta$  ของสายเคเบิลที่มีความสัมพันธ์กัน ทำให้สามารถประเมินสภาพของฉนวนได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เคยถูกบันทึกไว้

#### 2.4 วิธีการวัดสัมพัทธ์สังเคราะห์

การวัดโดยวิธีการวัดสัมพัทธ์สังเคราะห์ เป็นการเปรียบเทียบมุมเฟสของกระแสที่วัดจากอุปกรณ์ 2 ตัว(ในที่นี้หมายถึงสายไฟฟ้าใต้ดินสองเส้น) ผลต่างของมุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกของทั้ง 2 คือ  $\Delta \delta_{12}$  และ  $\Delta \tan \delta_{12}$  เมื่อ  $\delta_1$  และ  $\delta_2$  มีค่าน้อยมาก จะได้สมการ

$$\Delta \tan \delta_{12} \approx \Delta \delta_{12} = |\delta_1 - \delta_2| \approx |\tan \delta_1 - \tan \delta_2| \dots\dots\dots(2.17)$$

โดยทั่วไปแล้วการเปรียบเทียบอุปกรณ์ 2 ตัวที่มีสภาพของฉนวนดีค่า  $\Delta \delta_{12}$  และ  $\Delta \tan \delta_{12}$  ของทั้ง 2 ตัวจะมีค่าที่แตกต่างกันน้อยมาก อย่างไรก็ตามหากมีการขัดข้องในตัวอุปกรณ์ตัวหนึ่งค่า  $\tan \delta$  ของอุปกรณ์ตัวนั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้ค่า  $\Delta \delta_{12}$  และ  $\Delta \tan \delta_{12}$  ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้น เหนือสิ่งอื่นใดก็คือการหาอุปกรณ์ที่เกิดการขัดข้องขึ้น จึงต้องมีการวัดเทียบอุปกรณ์เป็นคู่โดยใช้อุปกรณ์ 3 ตัวเพื่อใช้ในการพิจารณาอุปกรณ์ที่เกิดการขัดข้องขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดความบกพร่องของอุปกรณ์โดยอาศัยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงผลของการวัด  
โดยวิธีสัมพัทธ์สังเคราะห์

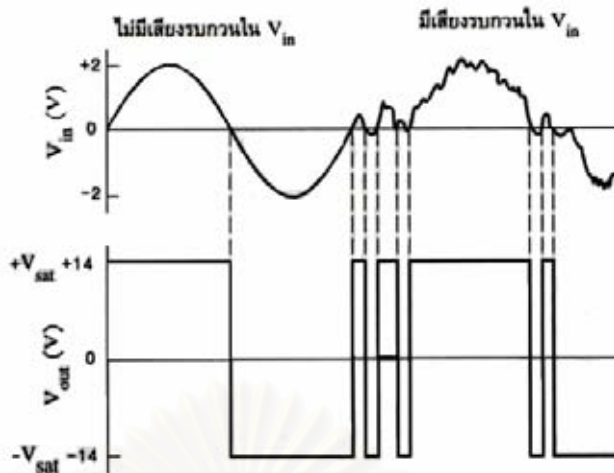
$\Delta \tan \delta_{12}$	$\Delta \tan \delta_{13}$	$\Delta \tan \delta_{23}$	ข้อสรุป
ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	สภาพฉนวนดีในทุกอุปกรณ์
เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	มีความบกพร่องในอุปกรณ์1
เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	มีความบกพร่องในอุปกรณ์2
ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	มีความบกพร่องในอุปกรณ์3
เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	มีความบกพร่องอย่างน้อย 2 อุปกรณ์

ในตารางที่ 2.1  $\Delta \tan \delta_{12}$ ,  $\Delta \tan \delta_{13}$  และ  $\Delta \tan \delta_{23}$  แสดง  $\tan \delta$  สัมพัทธ์ ระหว่างอุปกรณ์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในตารางที่ 2.1 บอกเราว่าหากสภาพฉนวนของอุปกรณ์ตัวนั้นมีสภาพดี  $\tan \delta$  สัมพัทธ์เทียบกับอุปกรณ์ตัวอื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน ถ้าหากมีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดการชำรุดหรือมีแนวโน้มของการเสื่อมสภาพ  $\tan \delta$  สัมพัทธ์ของอุปกรณ์ที่เกิดการชำรุดกับอุปกรณ์ตัวอื่น จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น ตามทฤษฎีในตารางที่ 2.1 ทำให้เราทราบว่าอุปกรณ์ตัวไหนเกิดการชำรุดขึ้นหรือเสื่อมสภาพ และสามารถเลือกอุปกรณ์ตัวนั้นออกมาหรือสามารถจัดลำดับสำหรับการเปลี่ยนอุปกรณ์ชุดใหม่

## 2.5 การวัดคาบหรือความถี่ของสัญญาณคาบ

การวัดคาบหรือความถี่ของสัญญาณคาบสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวัด ว่ามีความเร็วปฏิบัติการมากน้อยแค่ไหน อย่างเช่น การใช้วิธีการประมวลผลสัญญาณ (Digital signal processing : DSP) ที่ต้องใช้เวลาเร็วในการปฏิบัติการสูง และมีกระบวนการในการคำนวณขั้นสูงที่ค่อนข้างซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็น DFT(Discrete Fourier Transform) และ Wavelet type algorithms



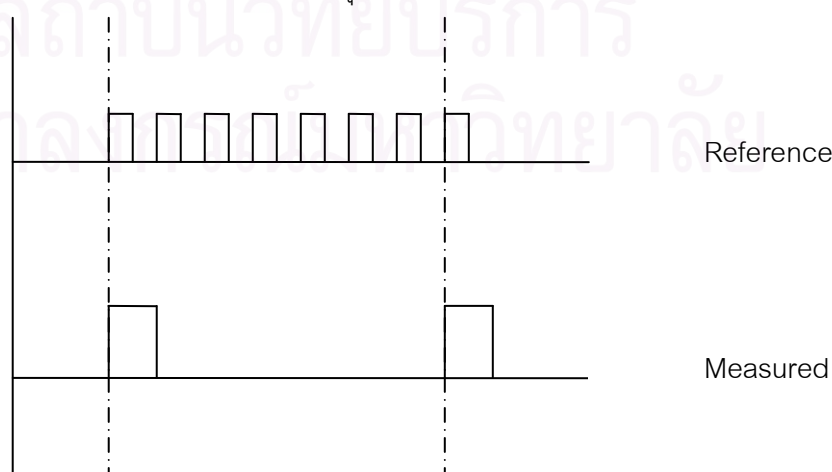


รูปที่ 2.5 แสดงปัญหาการตัดผ่านศูนย์หลายครั้งเนื่องจากมีสัญญาณรบกวน

แต่วิธีการวัดค่าโดยการตรวจนับการผ่านศูนย์เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการวัดค่าหรือความถี่ของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นช่วงเวลา เครื่องมือที่ใช้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ซึ่งปัญหาที่จะเกิดขึ้นแน่นอนสำหรับการตรวจนับผ่านศูนย์คือการมีสัญญาณรบกวนปนมากับสัญญาณที่ต้องการวัดค่าหรือความถี่ ซึ่งอาจทำให้การผ่านศูนย์เกิดขึ้นหลายครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.5 การผ่านศูนย์หลายครั้งเนื่องจากสัญญาณรบกวนเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้

วิธีการแก้ไขทำได้โดยการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านหรือวงจรกรองแถบผ่านเพื่อกรองเฉพาะสัญญาณที่ต้องการให้ผ่านหรืออาจจะกล่าวได้ว่าไม่เกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการวัดแต่จะลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีความถี่อื่น ซึ่งในที่นี้สัญญาณที่เราสนใจจะวัดมีความถี่ที่ 50 เฮิรตซ์

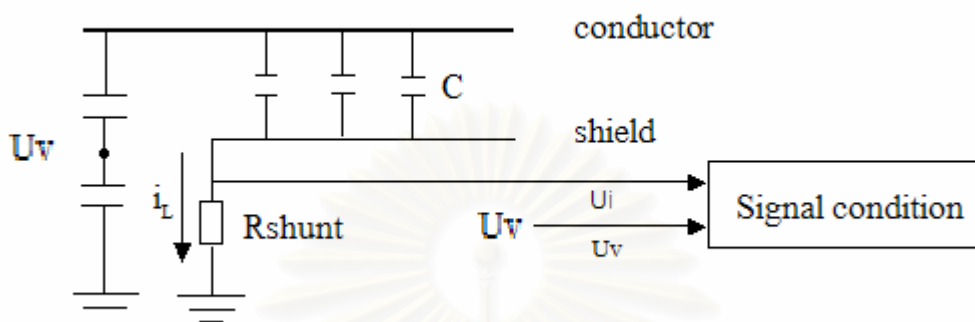
การวัดความถี่ทำได้โดยการนับรอบของสัญญาณอ้างอิงเทียบกับสัญญาณที่ต้องการวัดอย่างน้อย 1 คาบหรือมากกว่าเพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน ทำให้ผลของการวัดมีความถูกต้องมากขึ้น แม้เครื่องมือวัดจะมีอัตราการสุ่มที่ช้าก็ตาม



รูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่ต้องการวัด

## 2.6 การวัดและเครื่องมือวัด

การวัดค่าคงตัวไดอิเล็กทริกและตัวประกอบความสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก สามารถวัดได้จากความต่างเฟสระหว่างแรงดันที่คร่อมฉนวนและกระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลการวัดกระแสและแรงดันในสายไฟฟ้าใต้ดิน 1 เส้น

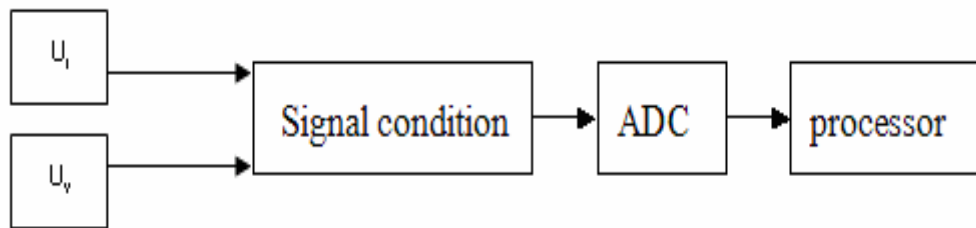
สัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านฉนวนและสัญญาณแรงดันที่คร่อมฉนวนควรมีลักษณะสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดัน

ในขั้นตอนการวัดลำดับต่อไปจะนำเอาสัญญาณของแรงดันที่คร่อมฉนวนและสัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านฉนวนไปทำการตรวจวัดเพื่อหาความต่างเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ดังนั้นการที่จะวัดและทำการประเมินผลที่ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณที่ใช้ต้องเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเหมาะสมและไม่ทำให้อุปกรณ์วัดเกิดความเสียหาย ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่วัดได้จะเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องและอาจไม่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาณที่ได้ก่อนส่งไปประมวลผลยังไมโครคอมพิวเตอร์ ดังแสดงเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงไดอะแกรมการทำงาน

ไดอะแกรมในรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

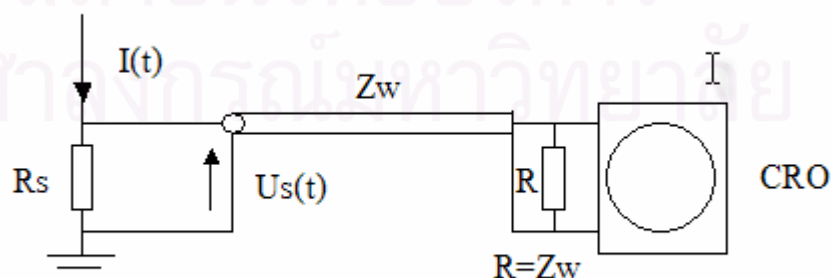
ส่วนตรวจจับสัญญาณ คือ ตัวแปลงสัญญาณทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่วนสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นกระแสต้องมีการแปลงให้เป็นแรงดัน และในงานชิ้นนี้ได้มีการตรวจจับกระแสรั่วในฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดินที่มีเกราะป้องกัน แล้วทำให้เป็นสัญญาณแรงดันโดยการให้กระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานชั้นที่ลงกราวนด์แล้วนำสัญญาณแรงดันคร่อมความต้านทานชั้นที่ได้ส่งต่อไปที่ส่วนปรับสภาพสัญญาณ

### 2.6.1 การวัดกระแสด้วยตัวต้านทาน

เป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้า แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อมชั้นที่ด้วยออกซิลโลสโคป ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมจะขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชั้นที่ โดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วมมีความต้านทานสมคู่กัน  $R=Z_w$  ต่อที่ปลายเคเบิลขนานกับ CRO เพื่อลดการสะท้อนของสัญญาณในกรณีที่สัญญาณมีความถี่สูงดังในรูปที่ 2.10 หรือนำแรงดันคร่อมชั้นที่ไปใช้งานอย่างอื่น

ถ้าชั้นที่  $R_s$  เป็นความต้านล้นและไม่คิดถึงค่า  $Z_w$  เพราะ  $R_s \ll Z_w$  และอาศัยกฎของโอห์ม ก็จะสามารถหากระแสได้ คือ

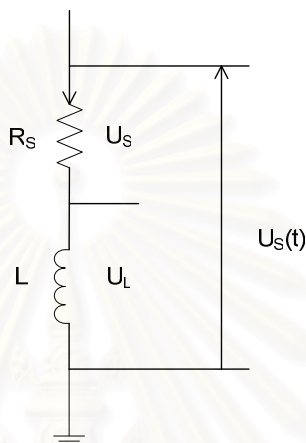
$$U_s(t) = I(t) \cdot R_s \dots\dots\dots(2.18)$$



รูปที่ 2.10 วงจรวัดกระแสด้วยชั้นที่

### 2.6.1.1 ความต้านทานขั้ว

ความต้านทานขั้วนี้เป็นความต้านทานต่ำที่ทราบค่าแน่นอน ค่ารีแอกแตนซ์คือ  $1/\omega c$  จะมีค่าในเกณฑ์เดียวกับ  $R_s$  เมื่อความถี่มีค่าถึง 100 MHz. หรือมากกว่า ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากค่าเก็บประจุจึงมีน้อยที่ความถี่สูง จนสามารถละทิ้งได้ แต่ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจะมีความสำคัญ เพราะเมื่อมีกระแสไหลผ่านความต้านทานขั้ว จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าโดยรอบ ฉะนั้นวงจรสมมูลจึงเขียนแทนด้วย R และ L ต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.11



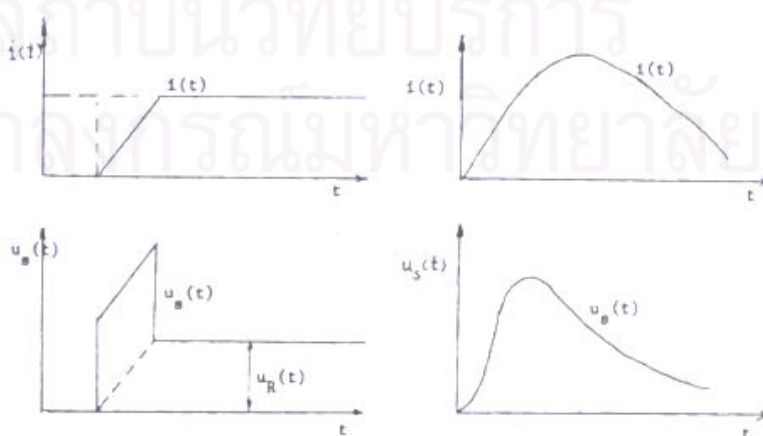
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลความต้านทานขั้ว

แรงดันตกคร่อมความต้านทานและความเหนี่ยวนำจะเป็น

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t)$$

$$U(t) = R_s \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \dots \dots \dots (2.19)$$

ด้วยเหตุนี้ความต้านทานของขั้วจึงต้องเป็นความต้านทานที่ปัดลดค่าความเหนี่ยวนำ หรือมีแต่น้อยมาก เนื่องจากแรงดันตกคร่อม  $L \frac{di(t)}{dt}$  ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อม ความต้านทานล้วนดังรูปที่ 2.12



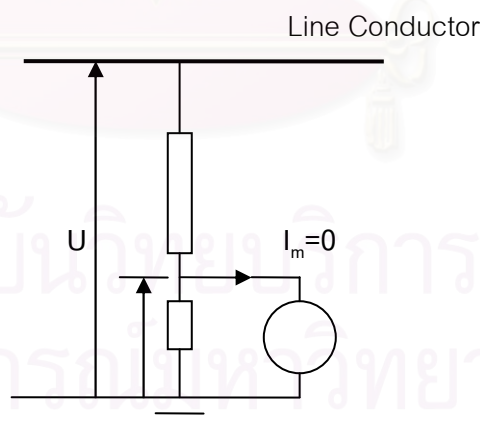
รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้วของขั้ว

การต่อชั้นเพื่อวัตต์แรงดันตกคร่อมจะต้องไม่มีวงรอบ (loop) มิฉะนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในวงรอบนั้น ความต้านทานของชั้นที่มีค่าเหนี่ยวนำต่ำอาจทำได้โดยใช้เส้นลวด หรือแผ่นความต้านทานพับทบขนานกัน (bifilar) เพื่อให้กระแสไหลสวนทาง กระแสที่เกิดขึ้นจะหักล้างกัน หรืออาจจะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแทนร่วม

ในส่วนของการนำแรงดันที่ระบบจำหน่ายที่แก่ป้อนให้กับสายไฟฟ้าใต้ดินเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณโดยไม่ใครคอนโทรลเลอร์จะใช้ดิโวลเตอร์แรงดันเป็นเครื่องมือในการวัดและลดระดับแรงดันจนสามารถใช้ในระดับแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

## 2.6.2 โวลเตจดิโวลเตอร์วัดแรงดัน

โวลเตจดิโวลเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันออกเป็นแรงดันส่วนๆ เพื่อให้ได้ระดับแรงดันต่ำที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้งาน ทำได้โดยใช้อิมพีแดนซ์  $Z_1$  ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ค่าน้อยออกมาวัดหรือใช้งานอย่างอื่น ฉะนั้นโวลเตจดิโวลเตอร์จึงแบ่งแรงดันออกเป็น 2 ภาค คือภาคแรงสูง  $Z_1$  และภาคแรงต่ำ  $Z_2$  ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่อกับแรงดันที่ต้องการวัด ส่วนอีกปลายหนึ่งจะต่อกับภาคแรงต่ำ ส่วนปลายอีกข้างของภาคแรงต่ำจะต้องต่อลงกราวนด์ ซึ่งจุดที่เป็นรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต่อเข้ากับเครื่องวัดหรือนำแรงดันมาใช้งาน เครื่องวัดที่จะต่อเข้ากับดิโวลเตอร์ ต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำ คือต้องให้หมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เพราะจะได้ไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของดิโวลเตอร์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรสมมูลของโวลเตจดิโวลเตอร์

เมื่อวัด  $U_2$  ด้วยเครื่องวัดแรงต่ำได้แล้ว จึงคำนวณค่าแรงดันสูงที่ต้องการวัดได้ดังสมการคือ

$$U = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} U_2 \dots \dots \dots (2.20)$$

โดย  $U$  คือแรงดันที่ต้องการวัด

$U_2$  คือแรงดันคร่อมอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

การวัดแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสามารถกำจัดได้โดยการใช้อิมพีแดนซ์  $Z_1$  และ  $Z_2$  ที่ทำจากวัสดุหรือสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ปัญหาที่ทำให้ผลการวัดเกิดความผิดพลาด คือ องค์ประกอบ การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อน เป็นต้น อิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำโวลเตจดีไวเดอร์อาจจะมีความต้านทาน หรือตัวเก็บประจุก็ได้ ซึ่งนิยมใช้งานแตกต่างกันไป แบบความต้านทาน มักถูกใช้วัดแรงดันกระแสตรง ส่วนดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุจะถูกใช้วัดแรงดันกระแสสลับ

**2.6.1.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ**

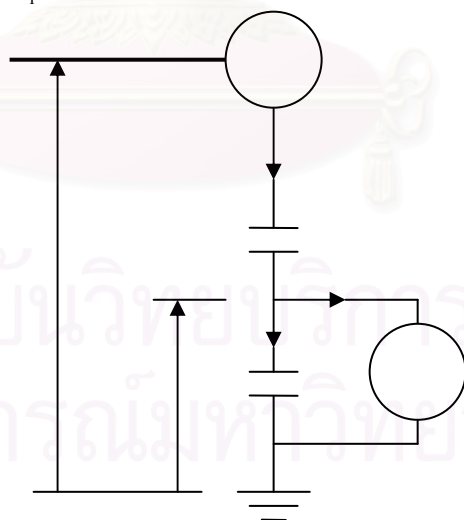
โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแสดงได้ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ ด้านแรงสูง  $C_1$  และตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ  $C_2$  โดยหลักการแล้ว กระแสที่ไหลเข้าเครื่องวัดต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็น 0 เนื่องจากว่ากระแสด้านแรงสูงและกระแสด้านแรงต่ำจะต้องเท่ากัน นั่นคือ

$$I = \omega C_1 U = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_2 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$I_2 = \omega C_2 U_2 = I$$

ฉะนั้น  $U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2$

เมื่อ  $C_2 \gg C_1$   $U \approx \frac{C_2}{C_1} U_2$



รูปที่ 2.14 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

**ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง**

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่กั้นในห้องปฏิบัติการทั่วไปจะมีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุอัด ก๊าซความดันกับตัวเก็บประจุแบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับกัน

**1. ตัวเก็บประจุแรงสูงแบบอัดก๊าซความดัน**

ตัวเก็บประจุชนิดนี้เป็นตัวเก็บประจุที่มีข้อดีตรงที่มีขนาดเล็กแต่ทนแรงดันได้สูง มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ นิยมใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า C ทำเป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุชนิดนี้ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น อัดด้วยก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซ SF<sub>6</sub>

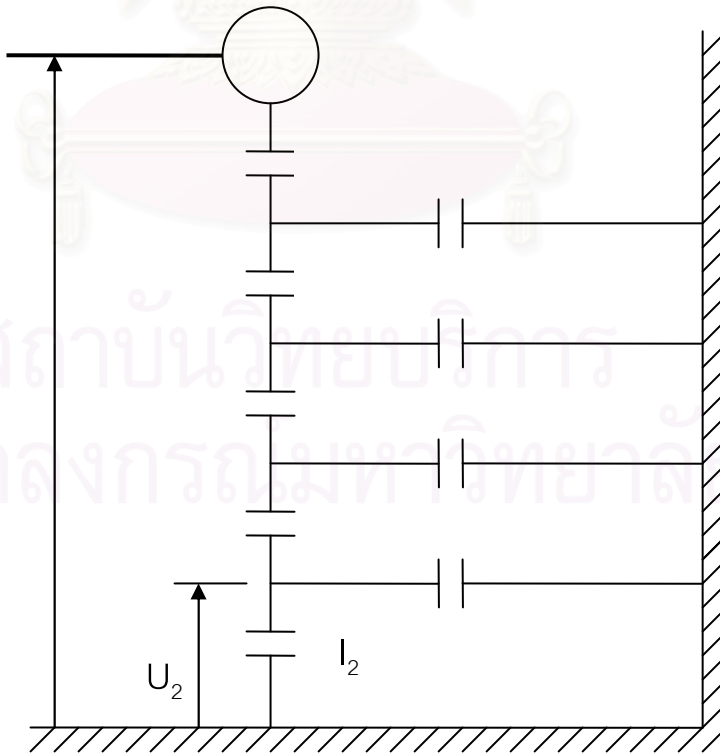
**2. ตัวเก็บประจุแบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ**

ตัวเก็บประจุแรงสูงชนิดนี้ ได้จากการนำตัวเก็บประจื่อย่อยประเภทเซรามิกส์ ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ หรือตัวเก็บประจุแบบฉนวนกระดาษชุบน้ำมันจำนวนหลายๆตัวมาต่ออันดับกัน ซึ่งการต่อในลักษณะเช่นนี้จะมีผลของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุกับสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น ที่เรียกว่าค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ ในการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อแรงดันสูงต้องมีการนำค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์มาคิดด้วย จากวงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับทำให้ได้สมการอัตราส่วนของแรงดันต่อแรงดันสูงเป็น

$$\frac{U_2}{U} = \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left( 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right) \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อ n คือ จำนวนตัวเก็บประจุแรงสูงต่ออันดับและจำนวนตัวเก็บประจุแรงต่ำเท่ากับ 1

C<sub>1</sub> คือ C<sub>1</sub>'/n และ C<sub>e</sub> คือ nC<sub>e</sub>'



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ

## 2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้ต้องการเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบที่ขึ้นกับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก จึงต้องการเครื่องมือที่มีความสามารถในการเก็บบันทึกค่าข้อมูลในหน่วยความจำ ทำการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล นอกจากนั้นยังต้องเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เพื่อความสะดวกในการตรวจวัด ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นอีกทางเลือกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



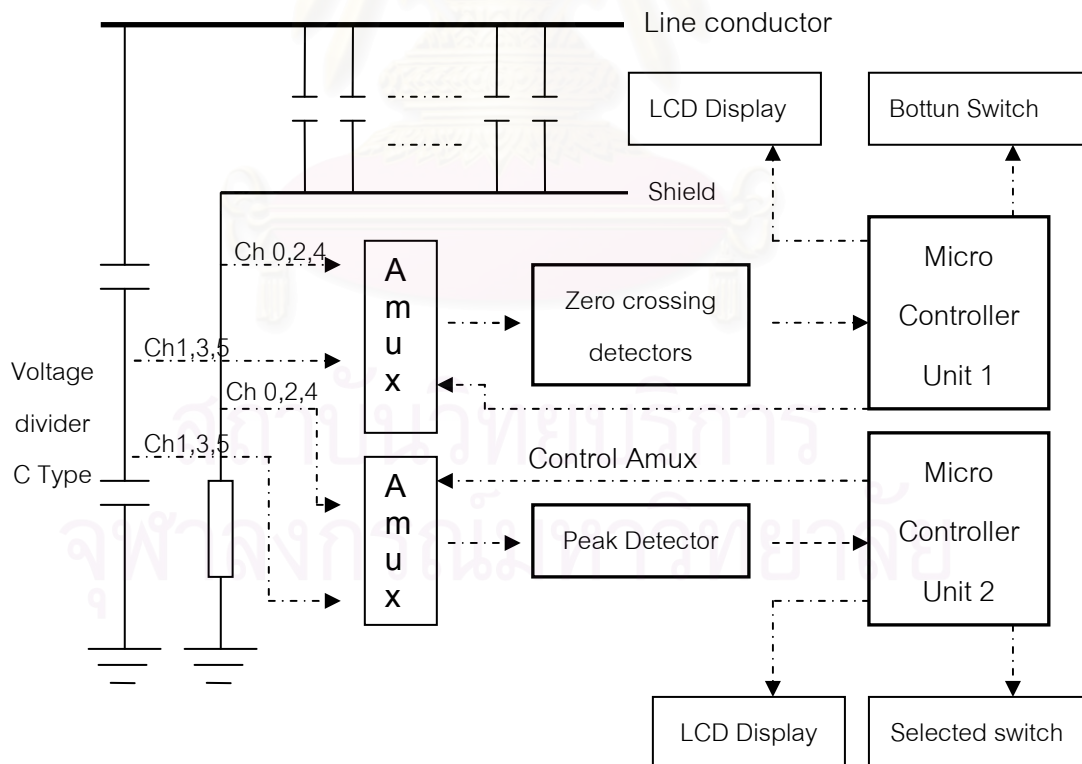
### บทที่ 3

#### การออกแบบและประกอบสร้าง

เครื่องวัดค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบและสร้างโดยใช้หลักการวัดความต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้ารั่วและแรงดันเฟสในการวัดค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ส่วนการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะใช้การวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและขนาดของกระแส ซึ่งการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ภาคดังนี้

- 1) การออกแบบและประกอบสร้างชุดตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและขนาดกระแส
- 2) การออกแบบและประกอบสร้างชุดตรวจจับการผ่านศูนย์ของสัญญาณ
- 3) การออกแบบและประกอบสร้างชุดการประมวลผลและแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC ( Programmable system on chip )
- 4) การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

โดยภาพรวมของเครื่องวัดค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและความจุไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังในรูป 3.1 และบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างในแต่ละส่วนต่อไป



รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องวัดค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุไฟฟ้า

### 3.1 ชุดตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ

เนื่องจากสายเคเบิลและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีฉนวนคั่นระหว่างตัวนำมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ แต่จากความไม่สมบูรณ์ของฉนวนทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสผ่านฉนวน ซึ่งกระแสรั่วนี้สามารถนำไปประเมินสภาพฉนวนของสายเคเบิลและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ ซึ่งการตรวจวัดอาจแสดงผลเป็นค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบฟ้าแรงสูงเพราะว่าค่าความจุไฟฟ้าและกระแสรั่วที่มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$I = \omega CU \dots\dots\dots [A] \dots\dots\dots (3.1)$$

ซึ่ง C คือ ค่าความจุไฟฟ้า

I คือ ค่ายอดของกระแสรั่ว

U คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้า

สำหรับในงานวิจัยนี้ต้องการเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของสายไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน เช่น ฉนวนชนิดเดียวกัน การเข้าหัวสายเหมือนกัน ความยาวสายเท่ากัน เป็นต้น ซึ่งการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นการวัดแบบเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์แต่ละตัวเพื่อนำมาประเมินถึงการเสื่อมสภาพ และระยะเวลาของการใช้งานที่เหลือ หรือเพื่อการจัดลำดับก่อนหลังสำหรับการเปลี่ยนอุปกรณ์ชุดใหม่

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีฉนวนเป็น XLPE มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 300 pF/m ทำให้สามารถประมาณค่ากระแสรั่วสำหรับแรงดันทดสอบที่ 24 KV ได้จากสมการ

$$I = \omega CU \dots\dots\dots (3.2)$$

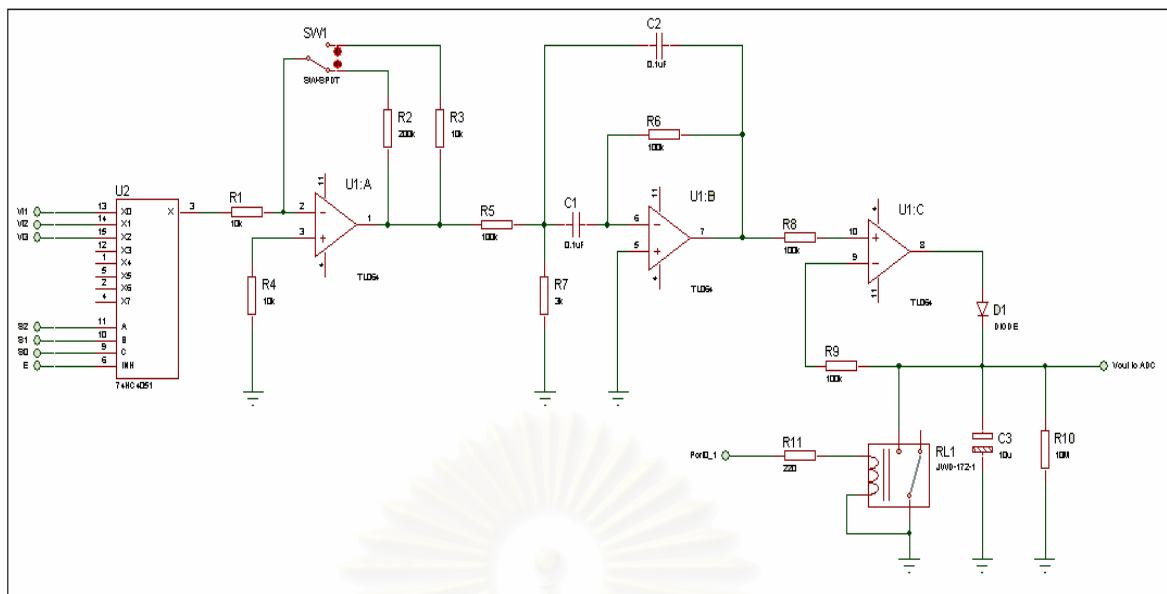
$$I = 300\text{pF} \times 2 \times \pi \times 50 \times 24 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ kV} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$I = 1.847\text{mA/m} \dots\dots\dots (3.4)$$

ซึ่งความต้านทานชั้นที่ 115 โอห์ม ทำให้คำนวณระดับแรงดันของสัญญาณได้เป็น

$$\begin{aligned} V &= IR \\ &= 1.847\text{mA} \times 115\Omega \dots\dots\dots (3.5) \\ &= 212.405\text{mV/m} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าระดับแรงดันของสัญญาณต่ำมากและมีสัญญาณที่ไม่ต้องการปนเข้ามาดังแสดงในรูปที่ 2.5 จึงต้องทำการปรับสภาพสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการวัด ซึ่งตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถรับสัญญาณอินพุตแอนะล็อกที่ระดับแรงดัน 0-5 โวลต์



รูปที่3.2 แสดงชุดวงจรตรวจจ็ับค่ายอด

**อธิบายการทำงานของวงจร**

จากรูปที่ 3 เป็นชุดวงจรตรวจจ็ับค่ายอดของสัญญาณที่ประกอบไปด้วย 4 ส่วนวงจรย่อย คือ ส่วนวงจรเลือกช่องสัญญาณ ส่วนวงจรขยายสัญญาณ ส่วนวงจรรองสัญญาณ และส่วนวงจรตรวจจ็ับค่ายอด

**ส่วนวงจรเลือกช่องสัญญาณ**

เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่ต้องการวัดมี 3 สัญญาณ จึงต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่เลือกช่องสัญญาณอินพุต เพื่อนำสัญญาณแต่ละช่องเข้ามาวัดที่ละช่องสัญญาณ และเครื่องมือที่ใช้คือวงจรเลือกช่องสัญญาณที่สามารถเลือกช่องสูงสุดได้ 8 ช่อง และออก 1 ควบคุมการเลือกช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ IC 74HC4051E

**ส่วนวงจรขยายสัญญาณ**

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีระดับสัญญาณที่เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่งจากรูปที่ 3 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีอัตราขยายดังสมการ

$$A = -\frac{R_f}{R_i} \dots\dots\dots(3.6)$$

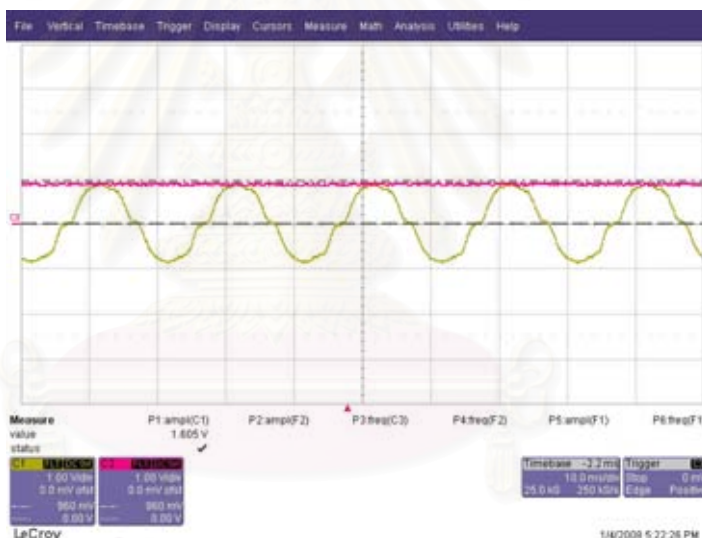
จากรูปในวงจรที่ 3.2 จะเห็นว่า มีสวิทช์สำหรับเลือกอัตราขยายได้ 2 ค่า โดยการเลือกค่า  $R_f$  เพื่อให้ได้อัตราขยายที่เหมาะสมกับความยาวของสายเคเบิลหรือค่ากระแสรั่วที่ต้องการวัด

**ส่วนวงจรรองสัญญาณ**

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้งไปหรืออาจจะกล่าวได้ว่าทำการลดทอนสัญญาณความถี่อื่นนอกเหนือจากสัญญาณที่เราต้องการให้ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับความถี่ที่เราต้องการ ในงานวิจัยนี้ความถี่ที่ต้องการคือความถี่ของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ จากรูปที่ 3 เป็นวงจรถองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่คัตออฟ 750 เฮิร์ตซ์

**ส่วนวงจรตรวจจับค่าสูงสุด**

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ตรวจจับและคงค่ายอดของสัญญาณไว้ เนื่องจากความเร็วในการแซมปลิงสัญญาณของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในไมโครคอนโทรลเลอร์ Psoc มีอัตราการแซมปลิงต่ำมากจึงต้องยึดค่ายอดของสัญญาณไว้ก่อนนำไปป้อนให้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4 จากวงจรในรูปที่ 3 ในวงจรตรวจจับค่าสูงสุดของสัญญาณจะมีรีเลย์สวิตช์เพื่อทำหน้าที่ในการคลายประจุของตัวเก็บประจุลงกราวด์เมื่อมีการเปลี่ยนช่องสัญญาณเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดในแต่ละช่องที่ถูกต้องสำหรับการวัดแบบเปรียบเทียบ



รูปที่3.3 ตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านวงจรตรวจจับค่าสูงสุดและสัญญาณหลังผ่านการปรับสภาพสัญญาณ

**3.2 การออกแบบชุดตรวจจับการผ่านศูนย์ของกระแสและแรงดัน**

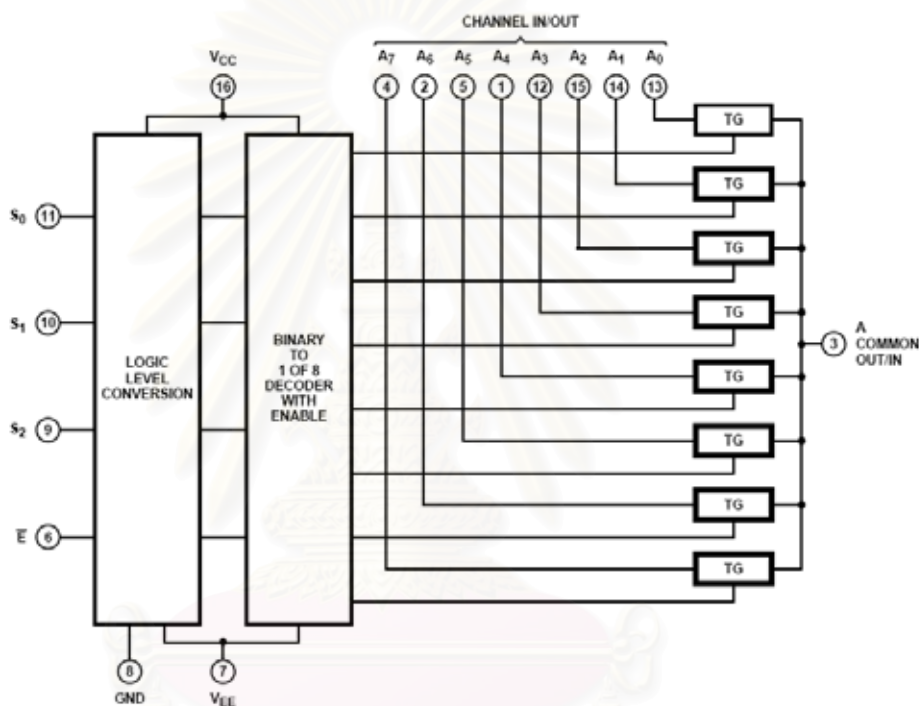
ชุดตรวจจับการผ่านศูนย์ของกระแสและแรงดัน เป็นชุดที่ทำให้ทราบถึงการผ่านศูนย์ของแต่ละสัญญาณในช่วงขอบขาขึ้นเพื่อนำไปตรวจวัดความต่างเฟส

**3.2.1 ชุดก่อนการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์**

**1. วงจรเลือกช่องสัญญาณ (Analog Multiplexer)**

เนื่องจากมีสัญญาณที่ต้องการวัดถึง 6 สัญญาณ การออกแบบและใช้งานวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์เป็น 6 ชุดสามารถทำได้แต่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาในวงจรละชุด เพื่อตัด

ปัญหาความคลาดเคลื่อนในวงจรแต่ละชุด จึงจำเป็นต้องมีตัวเลือกของสัญญาณเพื่อนำสัญญาณมาผ่านวงจรตรวจจับผ่านศูนย์เป็นชุดเดียวกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซี 74HC4051E ทำงานเป็นตัวเลือกสัญญาณ ซึ่งมีข้อดีคือรับสัญญาณอนาล็อกในย่านแรงดัน  $\pm 5V$  เกิดการรบกวนในแต่ละสวิตช์ต่ำ มีความเร็วในการเปิดและปิดสวิตช์สูงและหยุดการทำงานก่อนการสวิตช์ ทำงานในช่วงอุณหภูมิ  $-55^{\circ}C$  ถึง  $125^{\circ}C$  สามารถเลือกช่องสัญญาณป้อนเข้าได้มากที่สุด 8 ช่อง และมีเอาต์พุตร่วมกัน 1 ช่องสัญญาณ ความคุมการทำงานที่ระดับโลจิกต่ำ เลือกช่องสัญญาณโดยการกำหนดเป็นเลขฐานสองให้กับขา  $S_0, S_1, S_2$  จากที่กล่าวมาข้างต้น IC 74HC4051E มีฟังก์ชันการใช้งานดังนี้

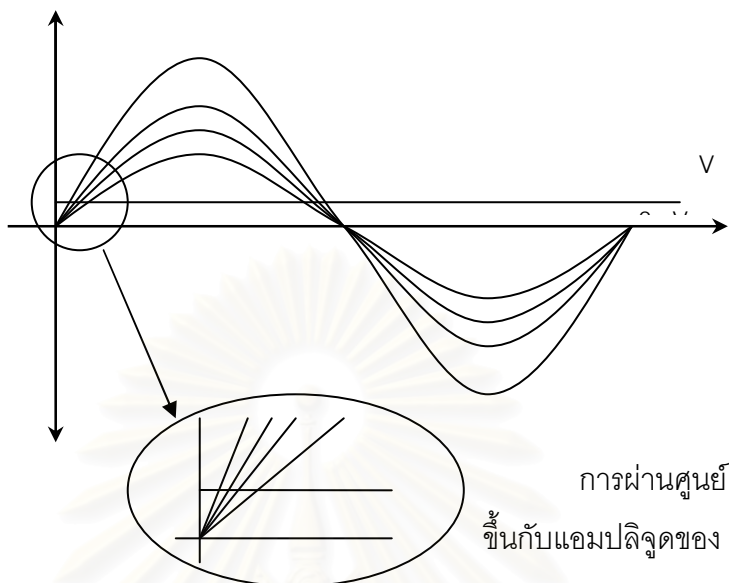


รูปที่3.4 ไดอะแกรมฟังก์ชันของอนาล็อกมัลติเพล็กซ์เซอร์

## 2. วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณ

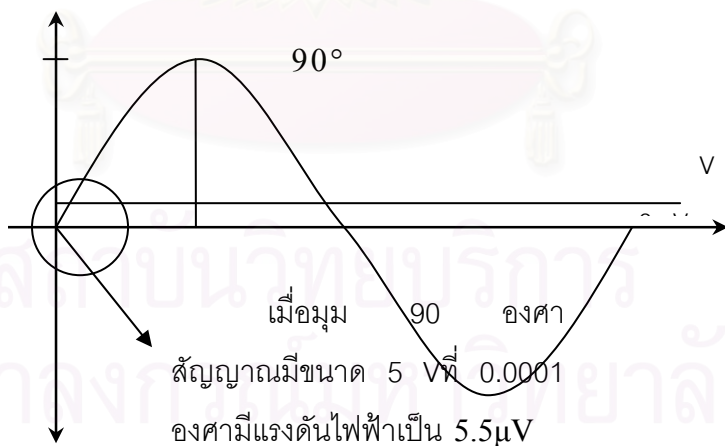
เนื่องจากสามารถคาดเดาลักษณะสัญญาณและความถี่ของกระแสรั่วและแรงดันที่ต้องการในวิทยานิพนธ์นี้ได้ ซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยคือ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะมีความแตกต่างกันที่เฟสและแอมพลิจูด สัญญาณของกระแสรั่วสามารถเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณได้โดยผ่านตัวต้านทานขั้นที่หรือตัวต้านทานอิมพัลส์ที่มีค่าความต้านทานต่ำ มีความเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ำและเป็นค่าคงตัว แรงดันที่ตกคร่อมจึงขึ้นกับกระแสรั่วและขนาดของตัวต้านทาน ซึ่งกระแสรั่วที่ต้องการวัดจะขึ้นกับความยาวของสายเคเบิลและขนาดของ

กระแสรั่วมีค่าน้อยมาก การเปลี่ยนจากกระแสรั่วเป็นแรงดันจึงมีระดับของสัญญาณต่ำ แต่การตรวจจับศูนย์ของสัญญาณขึ้นกับแอมพลิฟิเคชันของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพสาเหตุที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อการวัด

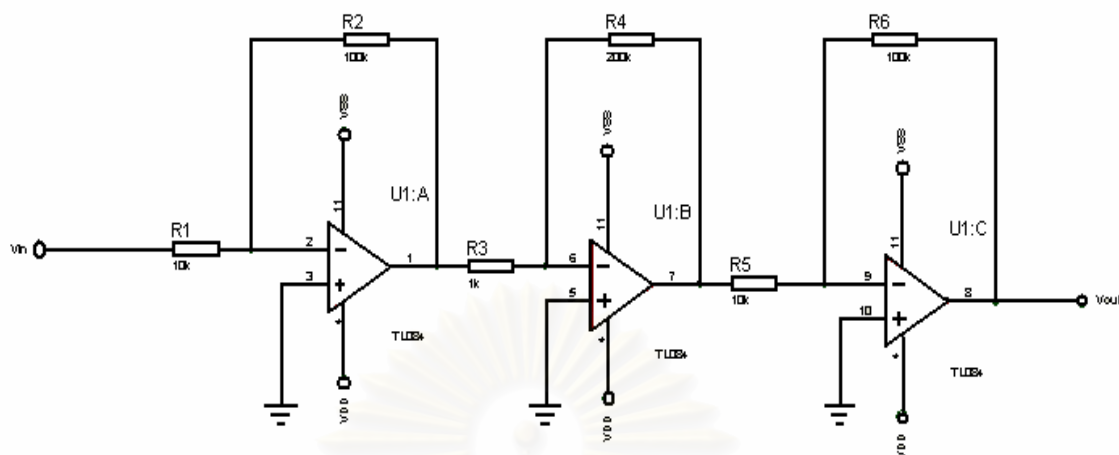
จึงออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่อัตราการขยายสูงๆ สำหรับสัญญาณที่ระดับแรงดันต่ำ เหนือสิ่งอื่นใดต้องการให้เกิดการตัดผ่านศูนย์ที่มุมมีความละเอียดถึง 0.0001 องศา ณ จุดนี้สัญญาณจะมีระดับแรงดันที่  $5.5\mu\text{V}$  แต่จุดผ่านศูนย์ของไอซี LM 339 N มีออฟเซตที่ 3 mV ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบระดับแรงดันสูงสุดที่ 5 โวลต์และจุดที่ต้องการให้ผ่านศูนย์ที่มุม 0.0001 องศา

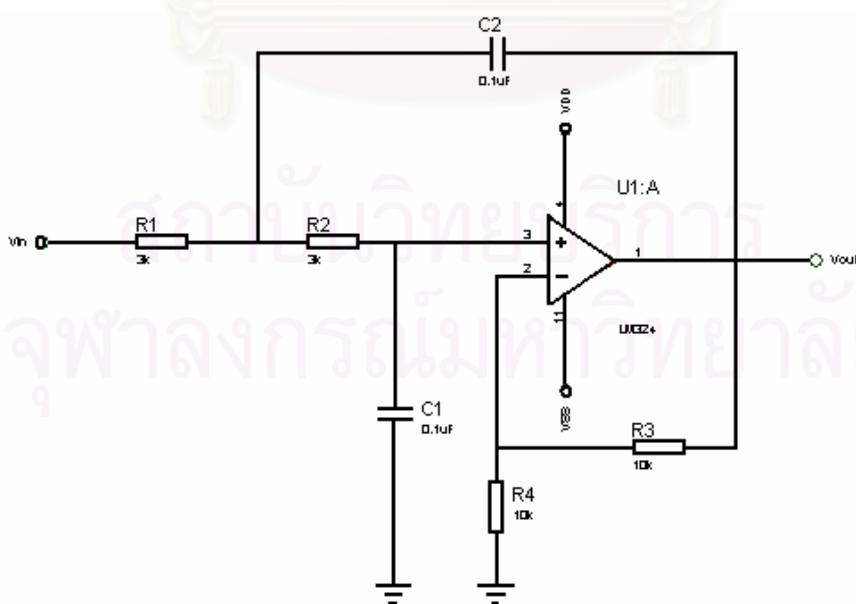
เพื่อให้แรงดัน ณ มุม 0.0001 องศา มีขนาดแรงดันที่ 3 mV เป็นอย่างน้อย ต้องออกแบบวงจรขยายที่มีอัตราการขยายต่ำสุดที่ 540 เท่า แต่สัญญาณของกระแสรั่วนั้นอาจจะมีระดับสัญญาณสูงสุดที่ประมาณ 100 mV ดังนั้น ณ จุดที่มีมุมเป็น 0.0001 องศา จะมีระดับแรงดันของสัญญาณที่ 100 นาโนโวลต์ เพื่อให้เกิดการตัดผ่านศูนย์ที่แรงดัน 3 mV จึงต้องออกแบบวงจรขยายให้มีอัตราการ

ขยายอย่างน้อยที่ 27000 เท่า โดยการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเป็นแบบขยายกลับเฟสสามสเตจ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่3.7 แสดงชุดวงจรถ่ายกลับเฟส

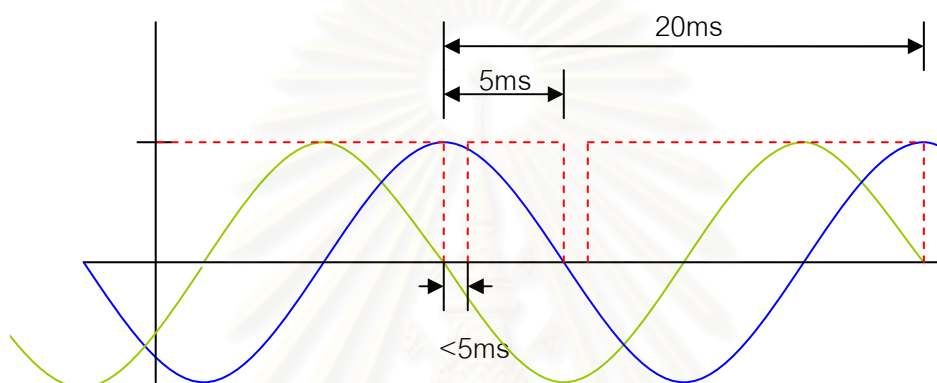
แต่สัญญาณที่ได้จากวงจรถ่ายจะขยายทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณความถี่อื่นปะปนมาด้วยไม่ว่าจะเป็นฮาร์โมนิกส์ หรือสัญญาณรบกวน (Noise) ต่างๆ ทำให้สัญญาณที่ต้องการเกิดความผิดเพี้ยนทำให้ผลการวัดเกิดความผิดพลาด ในการแก้ไขปัญหาส่วนนี้ได้จัดท่วงจรของความถี่แถบผ่านเพื่อกำหนดช่วงความถี่และแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ต้องการให้ผ่านได้ แม้ว่าผลที่ตามมาคือการทำให้เกิดการเลื้อนเฟสแต่สามารถทำการชดเชยได้โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือจากการปรับค่าความต้านทานเพื่อปรับเฟสของสัญญาณเข้าก่อนเข้าตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) จากรูปวงจรถ่ายสัญญาณผ่านแถบตัวต้านทาน  $R_3$  เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้



รูปที่3.8 วงจรถ่ายความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ตัดออกฟ 750 เฮิรตซ์

### 3.2.2 ชุดตรวจจับการผ่านศูนย์

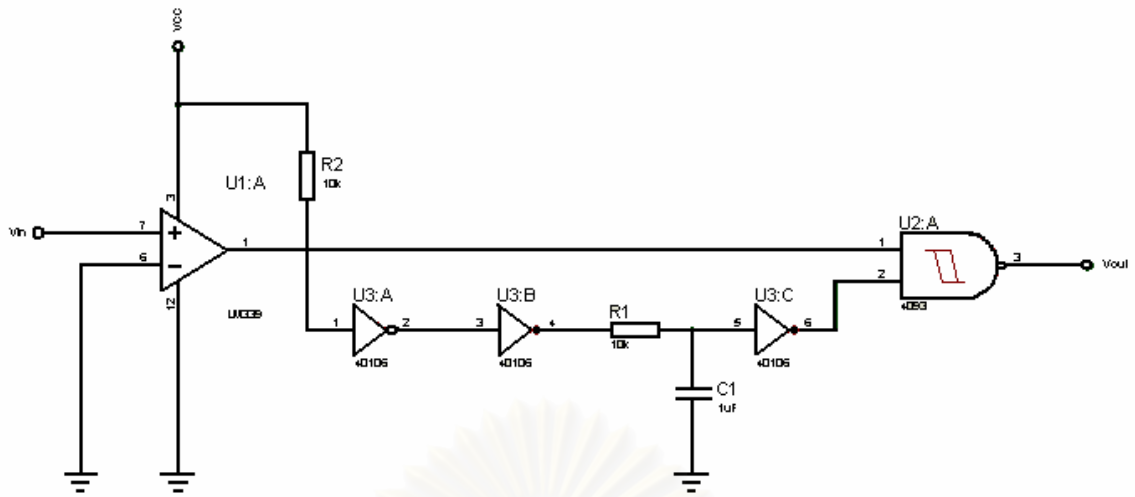
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจจับการผ่านศูนย์ของสัญญาณแรงดันที่มีความถี่ของสัญญาณเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยคือ 50 เฮิรตซ์ และต้องการตรวจจับการผ่านศูนย์เฉพาะช่วงของสัญญาณป้อนเข้าเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อนำไปใช้ในการสั่งให้ไทเมอร์ขนาด 24 บิต ที่เป็นหนึ่งในโมดูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PsoC (Programmable system on chip) ให้ทำงานเพื่อจับเวลา แล้วนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อเปลี่ยนเป็นมุมต่างเฟส



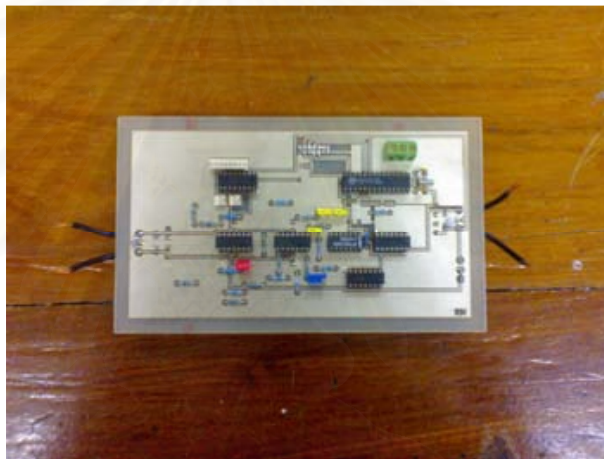
รูปที่ 3.9 แสดงพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อมีสัญญาณผ่านศูนย์ด้านลบไปด้านบวก

การสร้างพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สามารถทำได้โดยวงจรในรูปที่ 3.10 รายละเอียดของวงจรคือการสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 5 โวลต์ จากตัวตรวจจับผ่านศูนย์ที่อาศัยออปแอมป์เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันอินพุตกับแรงดันอ้างอิง 0 โวลต์ มีตัวอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และทำหน้าที่กลับเฟส จากนั้นทำให้เกิดการเลื่อนเฟสโดยใช้ตัว RC ซึ่งนอกจากใช้ในการเลื่อนเฟสแล้วยังเป็นตัวกำหนดความกว้างของพัลส์ ก่อนนำสัญญาณมาผ่านตัว Schmitt trigger nand gate เพื่อให้ได้สัญญาณตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายการทำงานของวงจรในรูปของไดอะแกรมเวลาตามรูปที่ 3.10

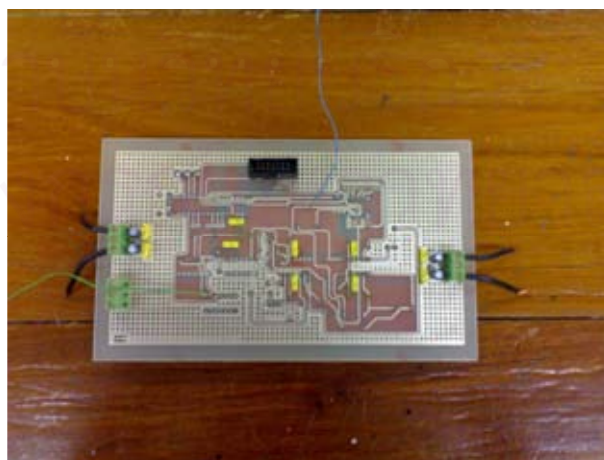




รูปที่3.10 แสดงวงจรสร้างรูปคลื่นพัลส์



รูปที่3.11 แสดงรูปวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ด้านอุปกรณ์



รูปที่3.12 แสดงรูปวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ด้านลายวงจร

รูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 เป็นรูปวงจรสำเร็จของวงจรสร้างพัลส์เมื่อเกิดการตัดผ่านศูนย์กลางของสัญญาณที่ด้านขาขึ้นของสัญญาณ ซึ่งรูปทั้ง 2 แสดงทั้งด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และด้านลายวงจร ซึ่งวงจรตรวจจับผ่านศูนย์กลางและวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าได้อิเล็กทริกที่สมบูรณ์แสดงในภาพที่ ข.1 ในภาคผนวก ข

### 3.3 ตัวต้านทานชั้นที่ไร้ความเหนียวนำ

เนื่องจากต้องแปลงกระแสเป็นแรงดันจึงต้องใช้ตัวต้านทานที่มีค่าเหนียวนำต่ำ ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และยังมีผลต่อการเลื่อนเฟสของสัญญาณ ซึ่งในที่นี่ได้เลือกใช้ตัวต้านทานที่ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าความต้านทาน 115 โอห์ม ค่าความเหนียวนำ 4.0 ไมโครเฮนรี่ โดยใช้ RLC มิเตอร์ แม่นยำสูง ของ HP 4264 A ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14



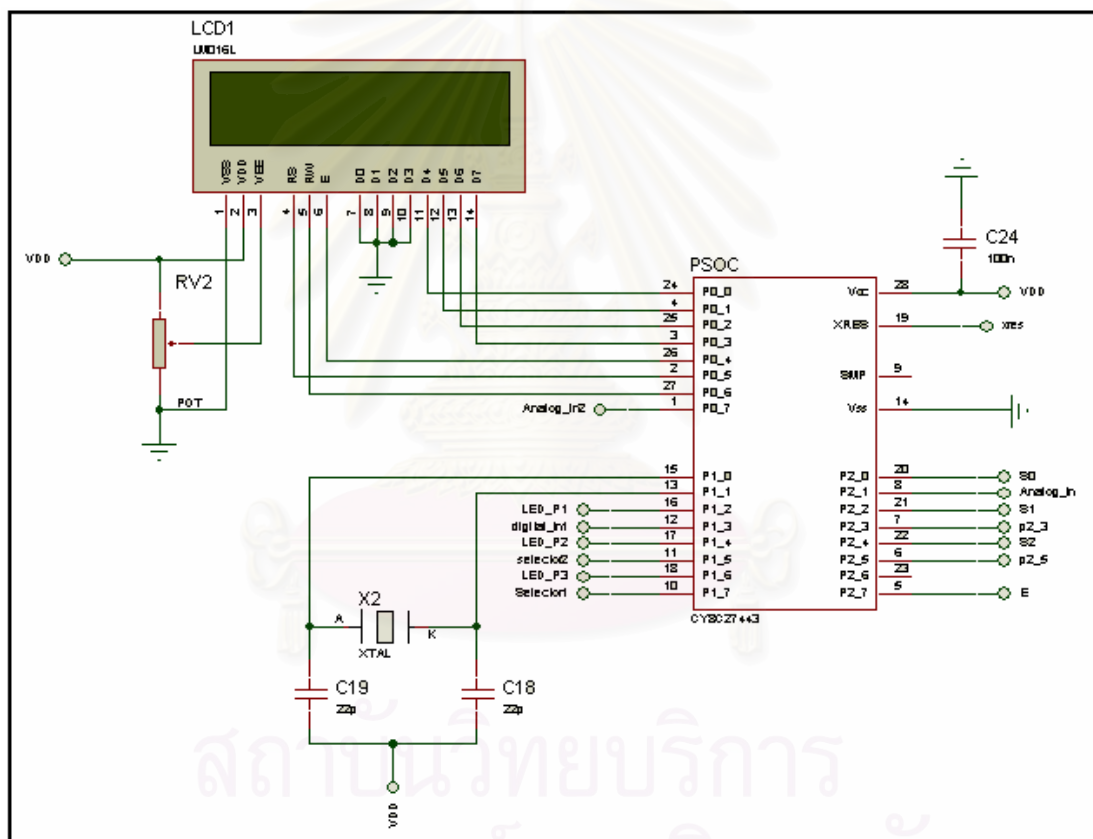
รูปที่ 3.13 แสดงค่าความเหนียวนำและความต้านทานที่วัดโดย RLC มิเตอร์



รูปที่ 3.14 การวัดค่าความเหนียวนำและค่าความต้านทานของตัวต้านอิมพัลส์ จากค่าความต้านทานและความเหนียวนำที่ได้เมื่อนำมาพิจารณา

### 3.4 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC (Programmable system on chip) ของบริษัท Cypress Microsystems เบอร์ CY8C27443-24PXI ที่มีข้อดีหลายอย่างที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ เนื่องจากมีวงจรเฟสล็คคูลูที่สามารเพิ่มความเร็วของสัญญาณนาฬิกาที่มีความเที่ยงตรงให้มีความถี่สูงสุดถึง 48 เมกกะเฮิร์ตซ์ สามารถกำหนดการทำงานการอินเตอร์รัปต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ขาอินพุตซึ่งจะกำหนดได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้งานทางด้านฮาร์ดแวร์ที่ได้กำหนดพื้นที่เป็นดิจิตอลบล็อกไว้ 8 บล็อกและอนาล็อกบล็อกไว้ 12 บล็อก ทำให้สามารถเลือกใช้งานไทมเมอร์ขนาด 8,16,24 และ 32 ได้ตามต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไทมเมอร์ 24 บิต และ ADC ขนาด 12 บิต เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่อยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งหมด ส่วนอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ใช้ก็มี จอแสดงผลแบบตัวอักษร LCD ชุดหน้าสัมผัสควบคุม



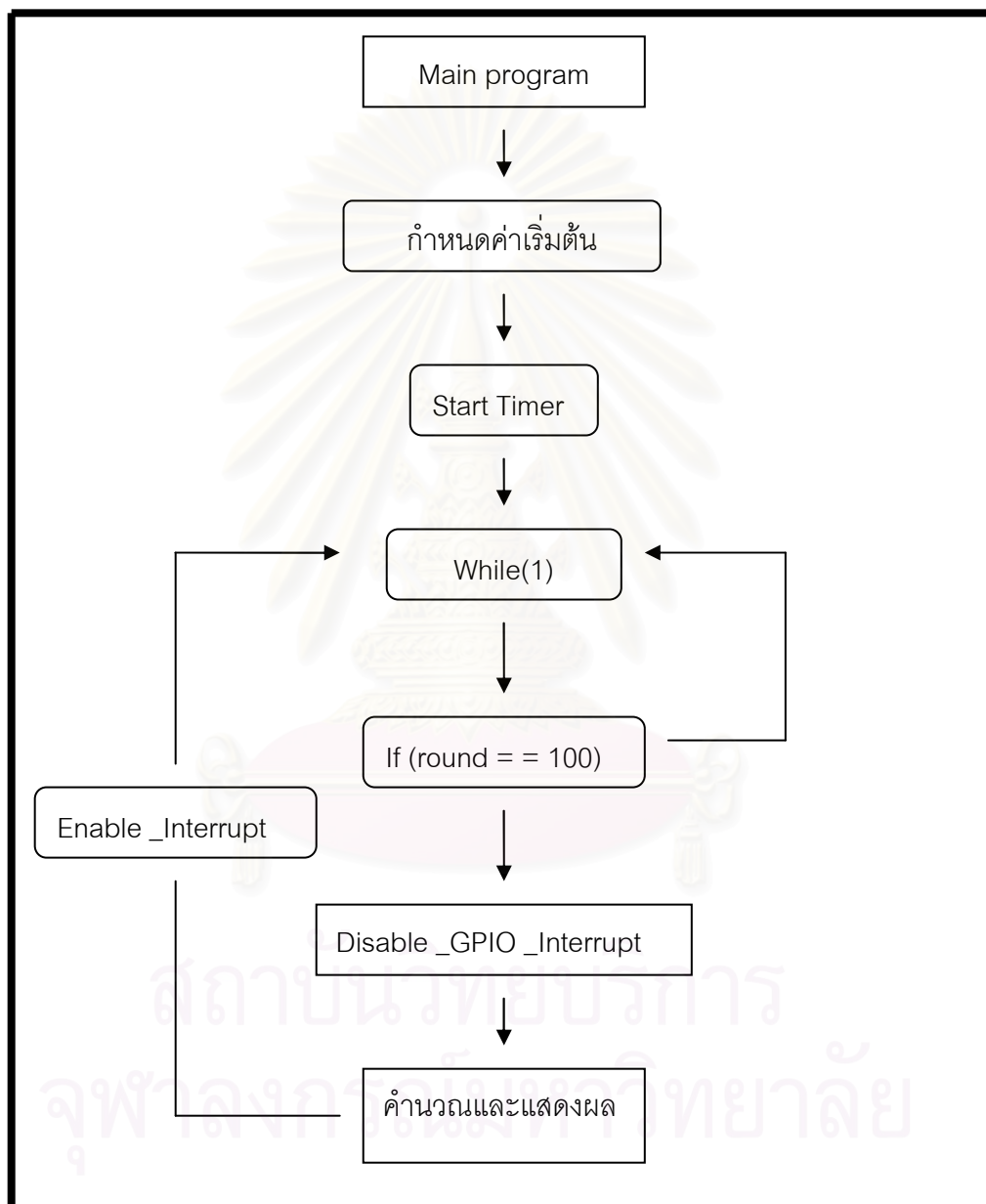
รูปที่3.15 แสดงวงจรสมมูลชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และหน้าจอล CD

### 3.5 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

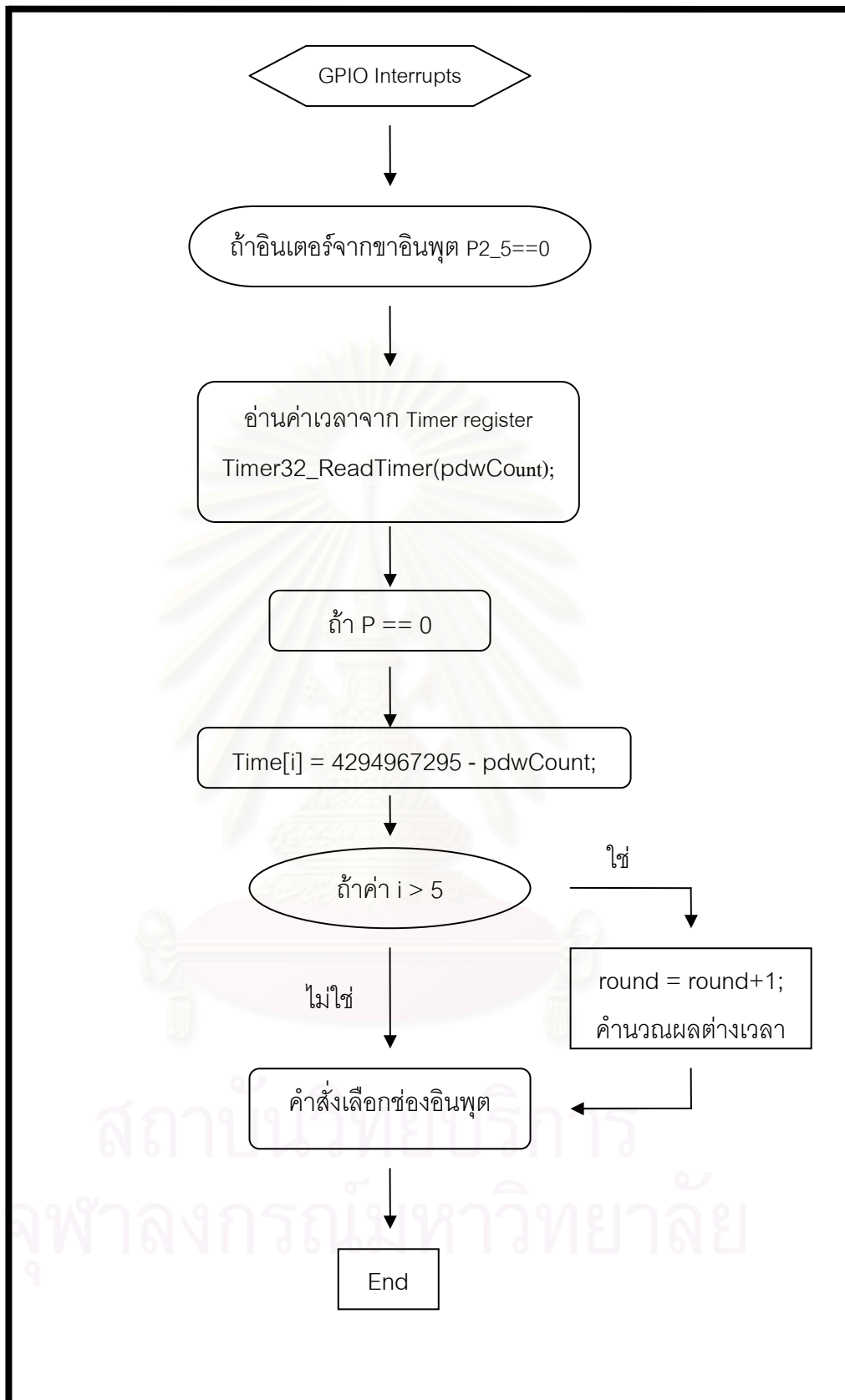
ชุดคำสั่งควบคุมได้พัฒนาบนโปรแกรมภาษา C โดยใช้ชุดแปลคำสั่งโปรแกรม Psoc Designer ของบริษัท Cypress Microsystems ซึ่งนอกจากใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานแล้วยังใช้ในการกำหนดคุณสมบัติต่างๆทางด้านฮาร์ดแวร์ด้วย ชุดคำสั่งที่พัฒนาสามารถแบ่งออกเป็น ส่วนหลักๆดังนี้

### 3.5.1 ชุดคำสั่งหาความต่างเฟส

เป็นชุดคำสั่งที่ใช้หาความต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันโดยการรับสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัวตรวจจับผ่านศูนย์ ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้นจะนำมาใช้เพื่อให้มีการนำค่าของจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่นับได้และเก็บไว้ในไทเมอร์จีจิสเตอร์มาเก็บไว้ในตัวแปรต่างๆ แล้วจึงนำค่าจากตัวแปรมาใช้คำนวณและแสดงผล โดยชุดคำสั่งหาความต่างเฟสสามารถทำเป็นแผนผังได้ดังนี้



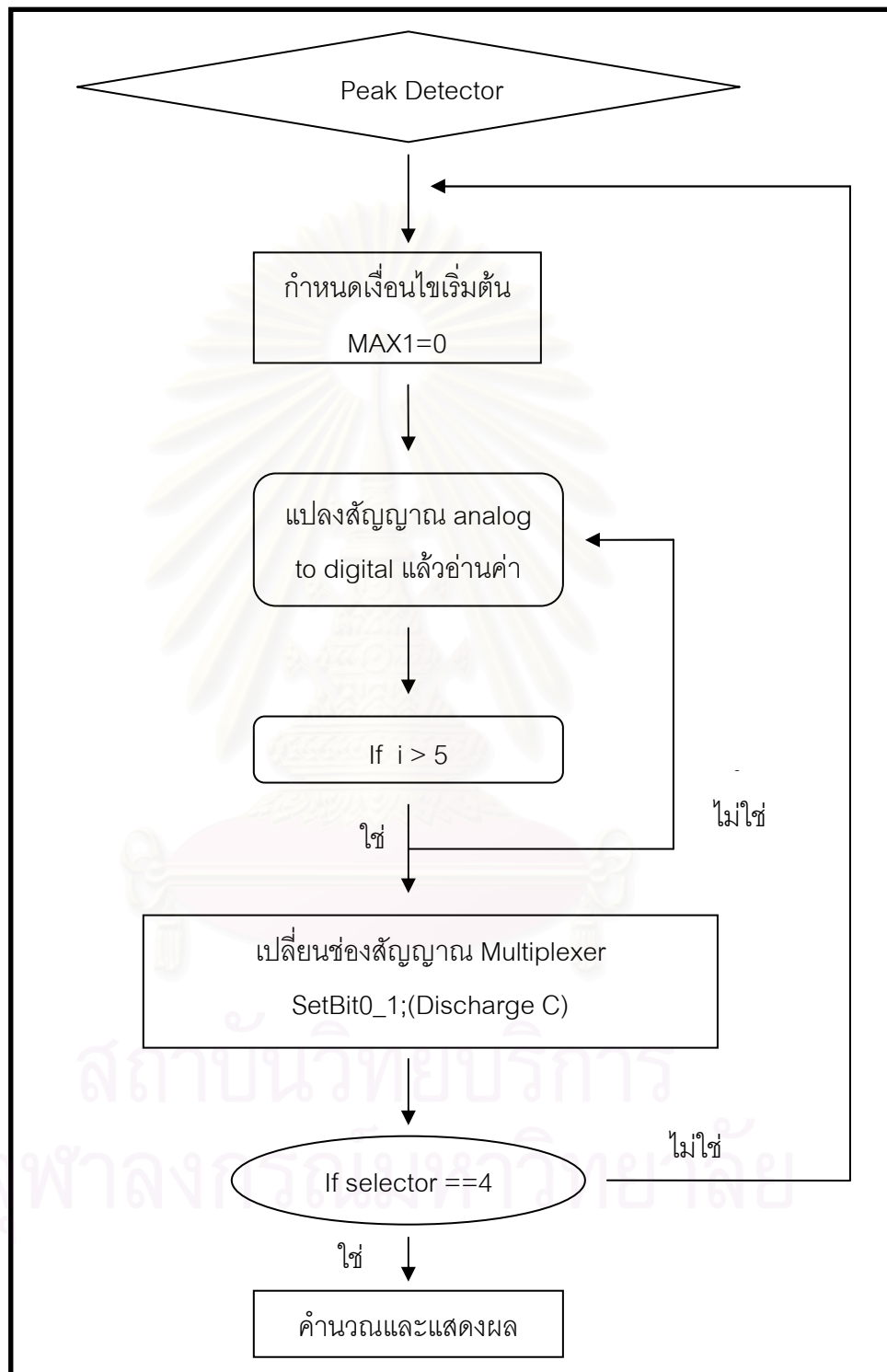
รูปที่ 3.16 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริก



รูปที่3.17 แสดงแผนผังการทำงานโปรแกรมย่อยอินเตอร์รัพท์

### 3.5.2 ชุดคำสั่งหาค่าสูงสุด

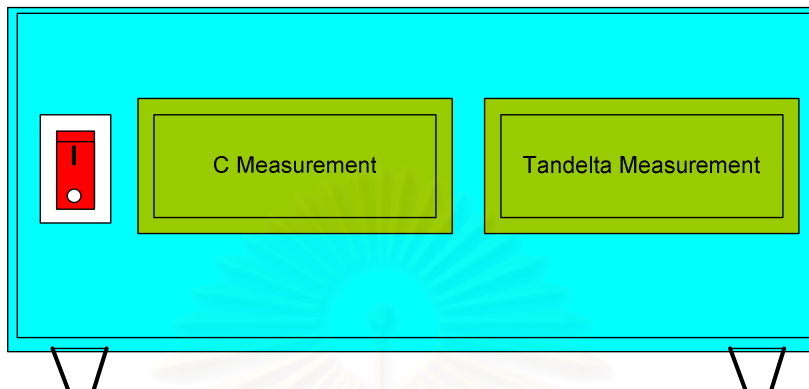
เป็นชุดคำสั่งที่ใช้ตรวจจับค่าสูงสุดของสัญญาณในหนึ่งคาบของแต่ละสัญญาณ ค่าสูงสุดที่ได้จะใช้ในการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ถูกตรวจจับ



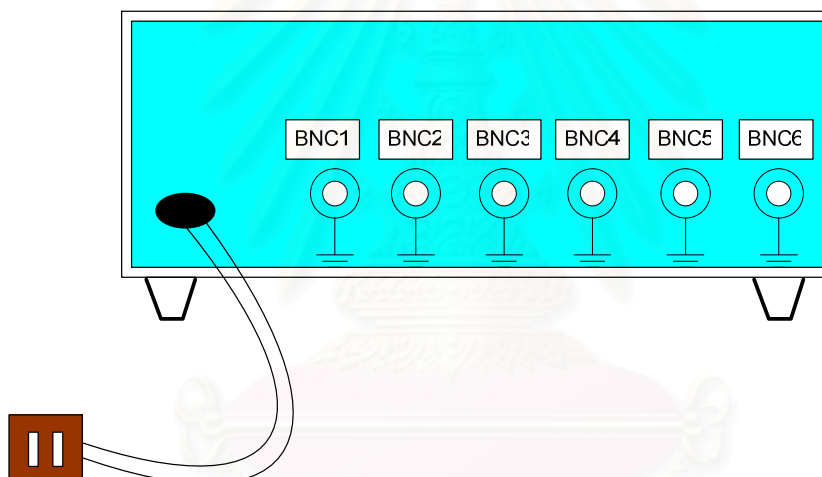
รูปที่3.18 แสดงไดอะแกรมของโปรแกรมหาค่ายอดแบบเปรียบเทียบ

### 3.6 การประกอบสร้างและคู่มือการใช้งาน

เมื่อทำการออกแบบและทดสอบการทำงานของวงจรในแต่ละส่วนย่อยว่าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนต่อไปคือการประกอบสร้างเพื่อให้ได้อุปกรณ์วัดที่สมบูรณ์พร้อมใช้งาน โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20



รูปที่3.19 แสดงเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นด้านหน้าอุปกรณ์



รูปที่3.20 แสดงเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นด้านหลังอุปกรณ์

รูปที่ 3.19 เป็นภาพแสดงด้านหน้าของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกของฉนวน ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์สำหรับเปิดปิด จอแอลซีดี 2 จอภาพ สำหรับแยกแสดงค่าที่ตรวจวัดทั้ง 2

รูปที่ 3.20 เป็นภาพแสดงด้านหลังของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกของฉนวน ซึ่งประกอบไปด้วยหัวต่อ BNC1-BNC6 เพื่อใช้รับสัญญาณแรงดันและกระแสรั่วไหล โดยหัวต่อ BNC1 ใช้สำหรับรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง หัวต่อ BNC4-BNC6 ใช้สำหรับสัญญาณกระแสรั่วของอุปกรณ์ หัวต่อ BNC2-BNC3 ไม่ใช้งาน

สำหรับการตรวจวัดหรือใช้งานเครื่องที่พัฒนาขึ้นต้องต่อสัญญาณที่ให้ครบทั้ง 4 ช่อง คือ BNC1, BNC4, BNC5, BNC6 ระดับแรงดันป้อนเข้าต้องไม่เกิน 3 โวลต์นั่นคือ สำหรับการใช้งานกับตัวดิโวลเตอร์แรงดันที่มี ratio 992 เท่าสามารถป้อนแรงดันได้ไม่เกิน 2.5 kV

### 3.7 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

การทดสอบตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกของสายเคเบิลในขณะไม่จ่ายโหลด ซึ่งเป็นการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า สายเคเบิล ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เป็นต้นดังแสดงในรูปต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่3.21 หม้อแปลงจำหน่ายสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่3.22 ตัวต้านทานความเหนี่ยวนำต่ำ





รูปที่3.23 C divider ratio =1000



รูปที่3.24 ตัวอย่างสายเคเบิลสำหรับทดสอบ



รูปที่3.25 วาริแอก



รูปที่3.26 สายนำสัญญาณพร้อมหัวต่อ BNC 50 ohm



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินระบบตรวจสอบค่าประกอบกำลังสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ

เป้าหมายหลักของการออกแบบสร้างระบบตรวจสอบค่าประกอบกำลังสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้า คือการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าและพลังงานสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริกของสายเคเบิลเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบและประเมินสภาพของฉนวน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและประเมินเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาพฉนวนของสายเคเบิลที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องมือนี้สำหรับเป็นตัวบ่งชี้สภาพของฉนวน สำหรับการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

#### 1. ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น

- ชุดวงจรตรวจวัดค่าตัวประกอบสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริก
- ชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

2. ทดสอบตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสัญญาณไฟฟ้าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

การทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นโดยแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ ดังนี้

#### 4.1 การทดสอบชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์มีส่วนของวงจรย่อยประกอบไปด้วย

1. วงจรเลือกช่องสัญญาณ
2. วงจรขยายและวงจรกรองสัญญาณ
3. วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดัน
4. วงจรกำเนิดสัญญาณสัญญาณพัลส์

##### 4.1.1 การทดสอบวงจรเลือกช่องสัญญาณ

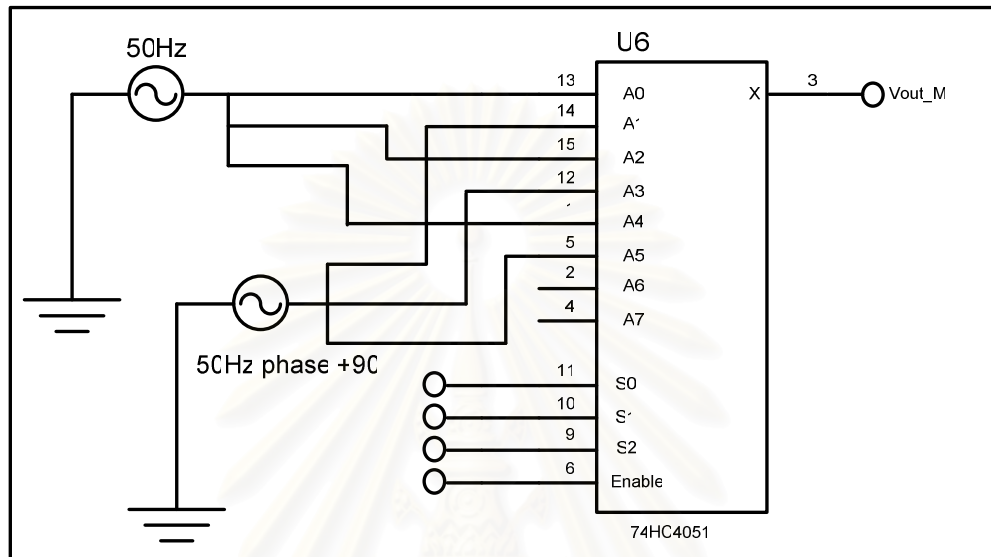
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวเลือกช่องสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog Multiplexer) ที่สามารถเลือกช่องสัญญาณอินพุต 6 ช่องและเอาต์พุต 1 ช่อง ที่ควบคุมการทำงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือ

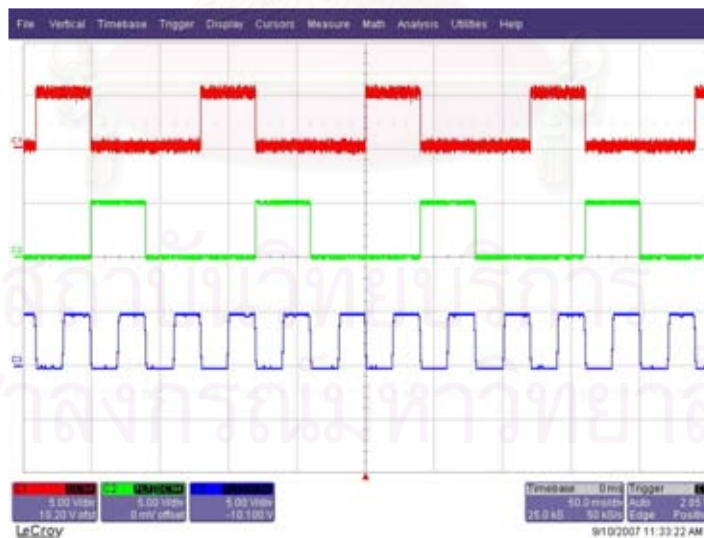
1. Oscilloscope LeCroy 6050A
2. Function generator
3. วงจร all pass filter

## วิธีการทดสอบ

กำหนดสัญญาณอินพุตที่มีความถี่มากกว่า 50 เฮิรตซ์ให้กับช่องรับสัญญาณอนาล็อกแต่ละช่องซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องโดยวิเคราะห์จากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรทดสอบช่องเลือกสัญญาณแบบอนาล็อก



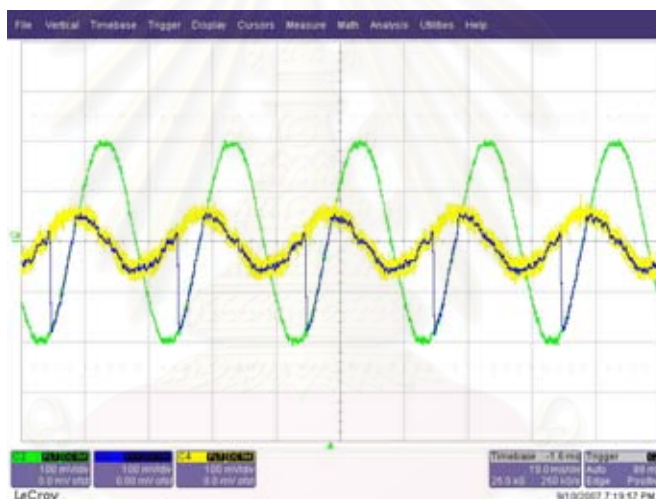
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวเลือกช่องสัญญาณ

เป็นรูปแสดงสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวเลือกช่องสัญญาณที่สร้างโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC CY8C27443-PXI เป็นเลขฐาน 2 ขนาด 3 บิต

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตสำหรับตรวจสอบตัวเลือกสัญญาณอนาล็อก

สัญญาณที่	อนาล็อกอินพุตช่องที่	ความถี่(เฮิร์ตซ์)	เฟส
1	A0	50	0
2	A1	50	90
3	A2	50	0
4	A3	50	90
5	A4	50	0
6	A5	50	90

จากการทดลองป้อนสัญญาณให้กับตัวเลือกช่องสัญญาณตามค่าในตารางที่4.1สัญญาณเอาต์พุตที่ได้คือซิลิโคนโคปมีลักษณะดังรูปที่4.3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

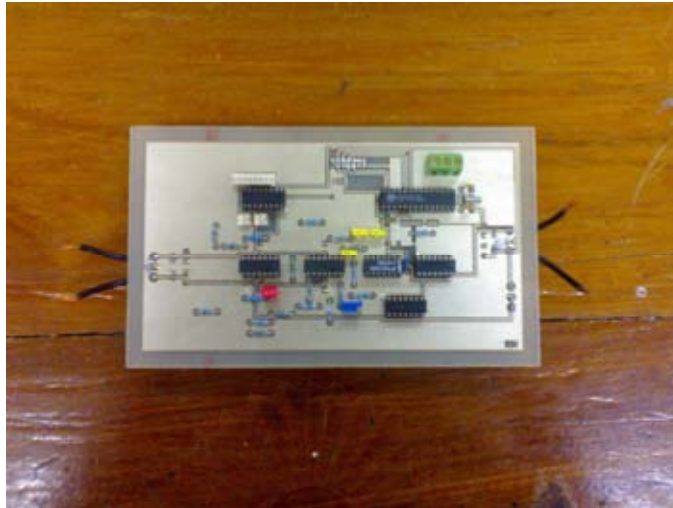


รูปที่4.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของตัวเลือกช่องสัญญาณ

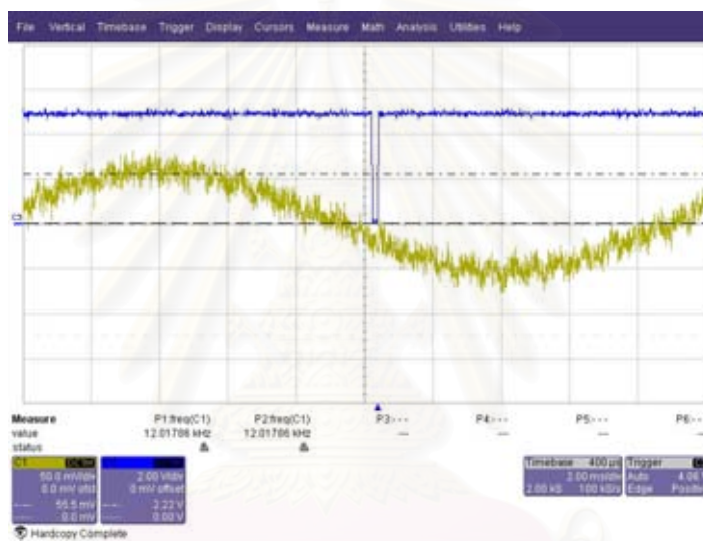
สัญญาณที่ป้อนให้กับช่องรับ A0, A2, A4 เป็นสัญญาณความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ที่เฟสหน้าสัญญาณช่อง A1, A3, A5 ซึ่งก็คือสัญญาณแถบสี่เหลี่ยม ส่วนอินพุตอีกสัญญาณเป็นสี่เหลี่ยม จากรูปจะเห็นว่า เมื่อเกิดการตัดผ่านศูนย์ที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณแต่ละสัญญาณจะมีการเปลี่ยนช่องอินพุตดังแสดงในสัญญาณรูปสีน้ำเงิน ซึ่งถือว่าตัวเลือกช่องสัญญาณอนาล็อกทำงานถูกต้อง

#### 4.1.2 การทดสอบชุดสร้างสัญญาณพัลส์

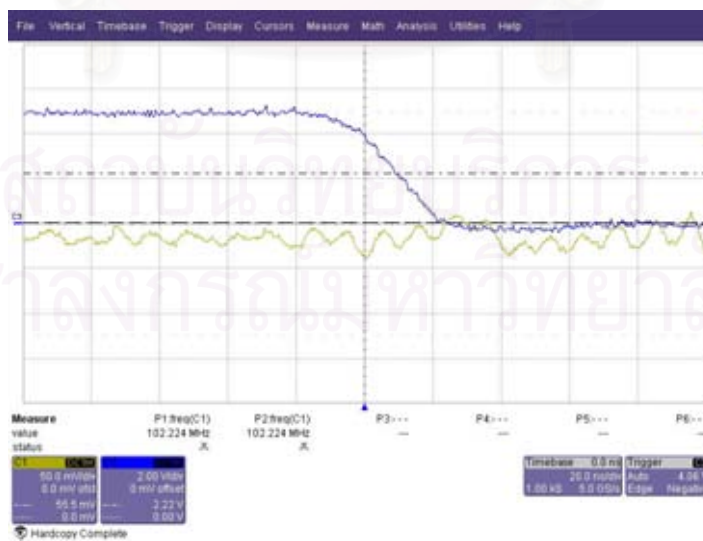
เป็นการทดสอบป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้วงจรมายสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ และชุดสร้างพัลส์ เพื่อตรวจสอบการตัดผ่านศูนย์และสร้างสัญญาณเพื่อนำไปใช้ในการสั่งให้เกิดการอินเตอร์รัพท์แก้มโครคอนโทรลเลอร์ Psoc ลักษณะสัญญาณที่ได้จากซิลิโคนโคปดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 แสดงชุดวงจรตรวจจ็ับผ่านศูนย์และสร้างสัญญาณพัลส์



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณตรวจจ็ับผ่านศูนย์ที่ 50 mV/Div



รูปที่ 4.6 แสดงจุดตัดผ่านศูนย์เมื่อลดเวลาต่อช่องเป็น 20 ns/Div

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าความเร็วในการเปลี่ยนจากแรงดัน 5 โวลต์เป็น 0 โวลต์ใช้เวลาประมาณ 40 นาโนวินาที ซึ่งถ้าเป็นมุมมองศาจะมีค่าประมาณ  $7.2 \times 10^{-4}$  องศา สำหรับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ คิดเป็นค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกได้เป็น  $\tan(7.2 \times 10^{-4}) = 0.00001257$

### 4.1.3 การทดสอบการนับสัญญาณอ้างอิงและไทเมอร์

เป็นการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของไทเมอร์และสัญญาณอ้างอิง ซึ่งทดสอบโดยวัดระยะเวลาห่างระหว่างสัญญาณพัลส์ ซึ่งความยาวคาบของพัลส์ที่ใช้มี 20ms ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ใช้ตรวจสอบชุดไทเมอร์

แล้วเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นกับออสซิลโลสโคป Lecroy wave runner 6050A ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ซึ่งที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 24 MHz. ควรนับได้ 471600 ครั้งเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ส่วนที่ความถี่ 48 MHz. ควรนับได้ 943200 ครั้งเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการนับจาก Timer register กับ ออสซิลโลสโคป

วัดโดย	ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 24 MHz.			ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 48 MHz.		
	สัญญาณที่นับได้	คาบเวลา	ความผิดพลาด (%)	สัญญาณที่นับได้	คาบเวลา	ความผิดพลาด (%)
(มิลลิวินาที)	(ครั้ง)	(วินาที)	(%)	(ครั้ง)	(วินาที)	(%)
19.65	471518	19.64658	0.017	942660	19.63875	0.057
19.65	471534	19.64725	0.014	942651	19.63856	0.058
19.65	471514	19.64642	0.018	942635	19.63823	0.060
19.65	471533	19.64721	0.014	942649	19.63852	0.058
19.65	471534	19.64725	0.014	942640	19.63833	0.059
19.65	471546	19.64775	0.011	942642	19.63838	0.059

19.65	471550	19.64792	0.011	942668	19.63892	0.056
19.65	471545	19.64771	0.012	942700	19.63958	0.053
19.65	471549	19.64788	0.011	942668	19.63892	0.056
19.65	471528	19.64700	0.015	942666	19.63888	0.057
19.65	471525	19.64688	0.016	942670	19.63896	0.056
19.65	471519	19.64663	0.017	942681	19.63919	0.055
19.65	471526	19.64692	0.016	942655	19.63865	0.058
19.65	471524	19.64683	0.016	942658	19.63871	0.057
19.65	471528	19.64700	0.015	942652	19.63858	0.058
19.65	471551	19.64796	0.010	942664	19.63883	0.057
19.65	471552	19.64800	0.010	942614	19.63779	0.062

หมายเหตุ1 จากตารางที่ 4.2 ความผิดพลาดของการนับจากไทเมอร์จีเอสเตอร์ที่ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 24 MHz. มีค่าน้อยกว่าความผิดพลาดจากการนับจากไทเมอร์จีเอสเตอร์ที่ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 48 MHz. เนื่องจากว่าความเร็วสัญญาณนาฬิกาที่ 24 MHz.มีการประสานเวลากับตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ของระบบ

หมายเหตุ2 ค่าความผิดพลาดในตารางที่ 4.2 นำมาใช้ในการชดเชยความผิดพลาดจากการนับโดยการเพิ่มจำนวนสัญญาณนาฬิกาให้กับค่าที่นับได้จากไทเมอร์จีเอสเตอร์

#### 4.1.4 การทดสอบและปรับเทียบอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้น

เป็นการทดสอบและปรับเทียบอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยเครื่องมือสอบเทียบที่เชื่อถือได้ เป็นอุปกรณ์อ้างอิง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้คือ

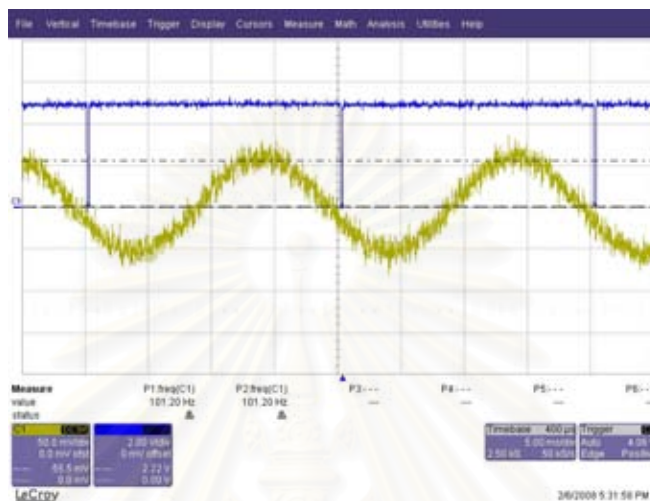
1. เครื่องกำเนิดสัญญาณ TRIO AG-203 CR Oscillator
2. Oscilloscope LeCroy WR 6050A



รูปที่ 4.8 แสดงการทดสอบและปรับเทียบอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้น



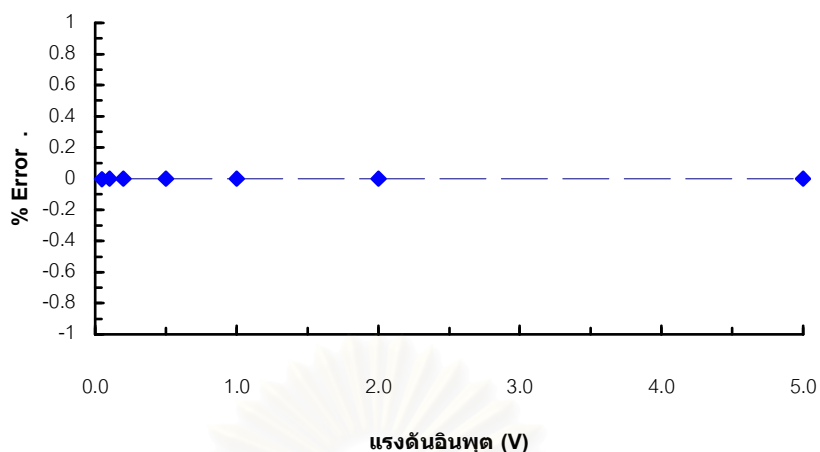
ช่วงแรกทดสอบโดยการป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ให้กับเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งค่ามุมที่ถูกต้องจะมีขนาดเป็น 360 องศา เนื่องจากการผ่านศูนย์ของสัญญาณคาบ ณ ขอบขาขึ้นหรือขอบขาลง หรือ 1 รอบเป็น 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งค่ามุมที่ได้จากสมูทที่แสดงในตารางในแต่ละครั้งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้ง



รูปที่ 4.9 สัญญาณไซน์และการสร้างสัญญาณหลังการผ่านศูนย์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

แรงดัน(V)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ค่าเฉลี่ย	%Error
0.05	360.0161	360.0135	360.0143	360.0005	359.9970	360.0083	-0.0023
0.10	359.9987	359.9970	359.9980	360.0038	360.0035	360.0002	-0.0001
0.20	360.0006	359.9990	359.9988	360.0000	360.0000	359.9997	0.0001
0.50	359.9995	359.9987	359.9967	360.0006	360.0020	359.9995	0.0001
1.00	360.0010	360.0018	360.0020	360.0005	360.0006	360.0012	-0.0003
2.00	359.9979	359.9962	359.9998	359.9992	359.9979	359.9982	0.0005
5.00	359.9999	359.9994	359.9998	360.0000	359.9994	359.9997	0.0001



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของมุมที่วัดได้

จากนั้นทดสอบโดยการป้อนแรงดันความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ที่แอมพลิฟายด์ค่าต่าง ๆ กันให้กับวงจรออลพาส (All pass filter) ที่สามารถทำให้เกิดของการเลื่อนเฟสของสัญญาณระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต ซึ่งในที่นี้ทำการปรับค่าให้เกิดการเลื่อนเฟสที่มีความต่างเฟสเป็น 5 มิลลิวินาที โดยในโปรแกรมได้กำหนดช่วงเวลานี้เป็น 90 องศา โดยสมการ

$$\text{Angle} = \frac{360 \times \text{Number of count}}{T_{\text{count1Cycle}} \times \text{Reference clock}}$$

ซึ่ง Number of count คือ จำนวนสัญญาณนาฬิกาที่นับได้

$T_{\text{count1Cycle}}$  คือ จำนวนสัญญาณนาฬิกาที่นับได้ใน 1 รอบ

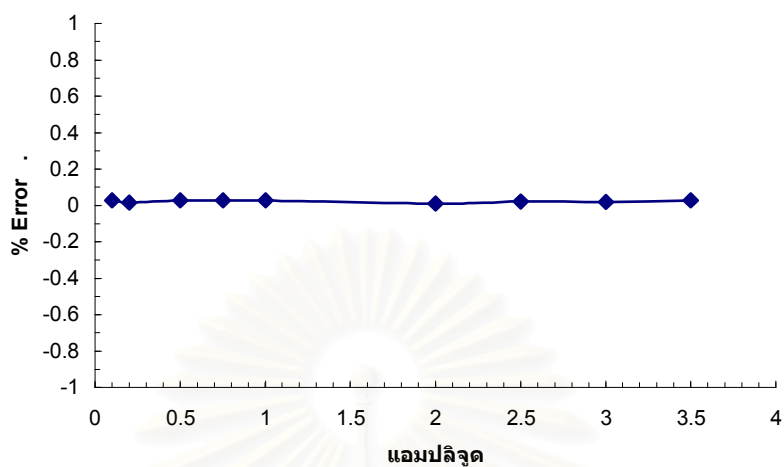
Reference clock คือ ความเร็วของสัญญาณนาฬิกา

ผลการวัดมุมที่แอมพลิฟายด์ค่าต่าง ๆ ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 เป็นการเฉลี่ยค่าที่วัดได้ 10 ค่าต่อการวัด 1 ครั้ง

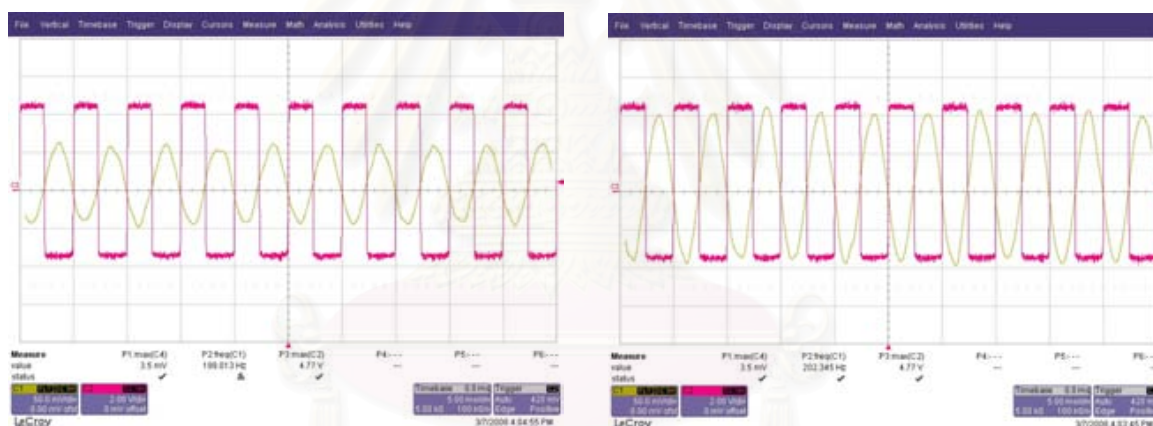
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดเทียบมุมที่แอมพลิฟายด์ขนาดต่างๆ

แอมพลิฟายด์ (V)	มุมที่วัดได้(องศา)					เฉลี่ย	ความผิดพลาด (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5		
0.10	89.97041	89.98328	89.98340	89.96693	89.96866	89.97454	0.02829
0.20	90.00546	89.97041	89.98328	89.99205	89.97213	89.98467	0.01704
0.50	89.98573	89.96637	89.96943	89.97438	89.98069	89.97532	0.02742
0.75	89.97306	89.98151	89.95762	89.98191	89.98048	89.97492	0.02787
1.00	89.97303	89.97457	89.96693	89.98462	89.96947	89.97373	0.02919
2.00	89.99187	89.98576	89.98072	89.99744	90.00356	89.99187	0.00903
2.50	89.98361	89.98387	89.97263	89.98497	89.97832	89.98068	0.02147

3.00	89.97145	89.98251	90.00093	89.97681	89.97856	89.98205	0.01994
3.50	89.98084	89.96879	89.96991	89.97168	89.98444	89.97513	0.02763



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมที่วัดได้



รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณรูปคลื่นอินพุตกับเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีขนาด 50 mV และ 100mV



รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณรูปคลื่นอินพุตกับเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีขนาด 100mV และ 3 V

## 4.2 การทดสอบชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

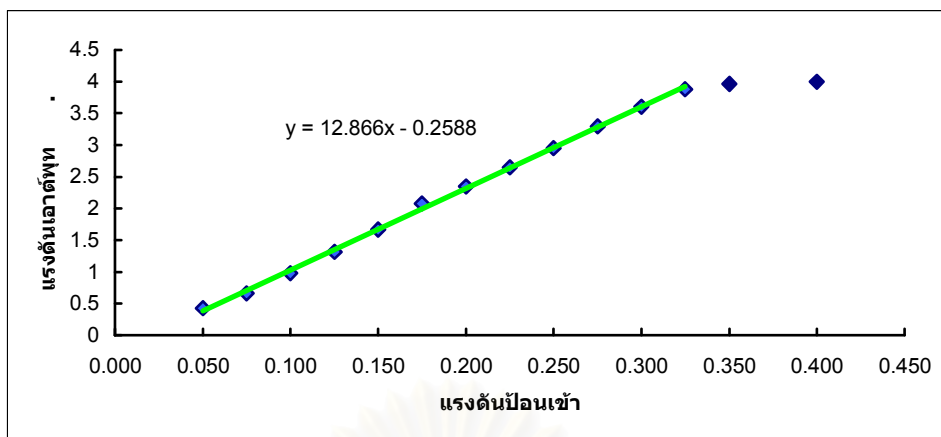
การตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์แรงสูงหรือของสายเคเบิลเป็นอีกส่วนหนึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

### 4.2.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

เป็นการป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีวงจรถายและวงจรกรองสัญญาณเพื่อหาอัตราขยายและค่าความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของชุดวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

Vin(โวลต์)	Vout(โวลต์)
0.050	0.426
0.075	0.662
0.100	0.980
0.125	1.315
0.150	1.665
0.175	2.080
0.200	2.350
0.225	2.645
0.250	2.950
0.275	3.290
0.300	3.600
0.325	3.880
0.350	3.960
0.400	4.000



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต

#### 4.2.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นและหา Ratio ของตัวดีไวเดอร์แรงดันและสายสัญญาณ

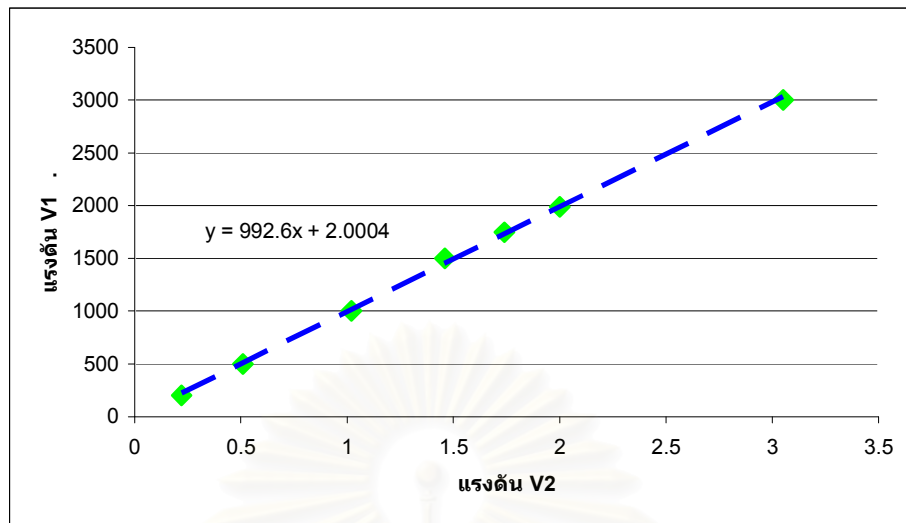
เป็นการทดสอบหาความเป็นเชิงเส้นและอัตราส่วนของตัวดีไวเดอร์แรงดันและสายสัญญาณ โดยการป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้แก่ตัวดีไวเดอร์แรงดันแล้ววัดค่าแรงดันซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.15 ตัวดีไวเดอร์แรงดันแบบตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของตัวดีไวเดอร์แรงดัน

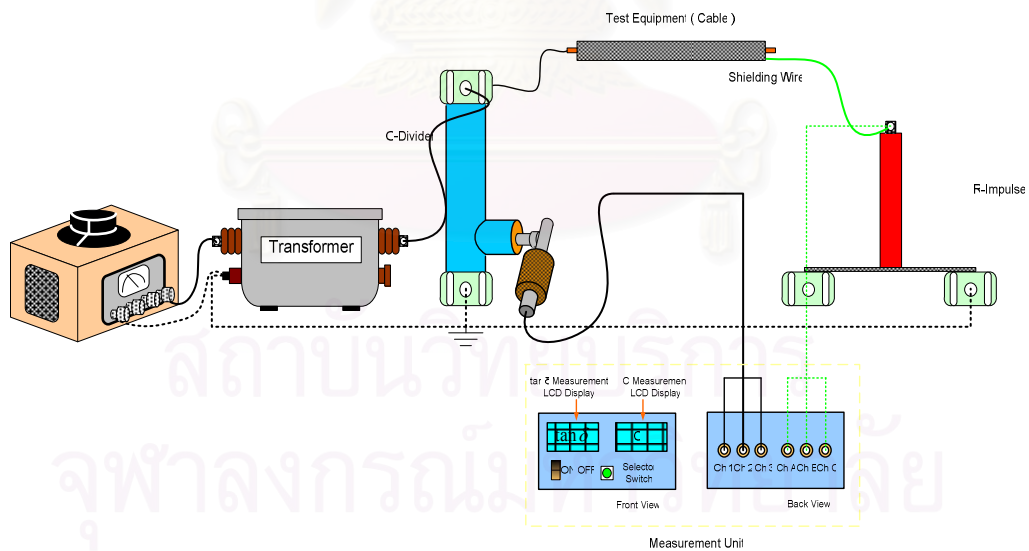
Vin(kV)	Vout(V)
3	3.11
1.99	2
1.75	1.74
1.5	1.52
1	1.02
500	0.51
200	0.22



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V1 และ V2 ของตัวดีไวเดอร์แรงดัน

### 4.3 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

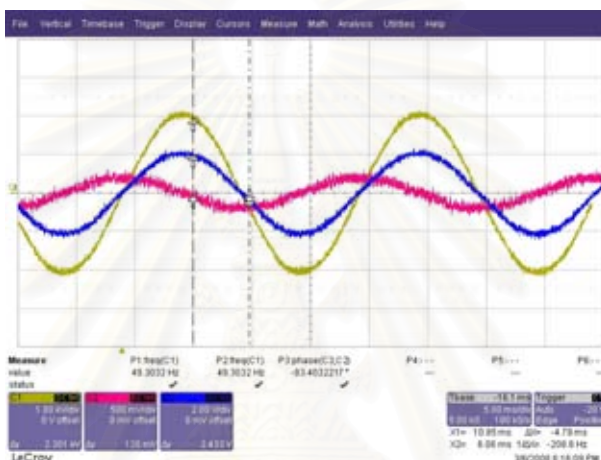
#### 4.3.1 การทดสอบวัดสายเคเบิลเส้นเดียว



รูปที่ 4.17 ภาพแสดงวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก

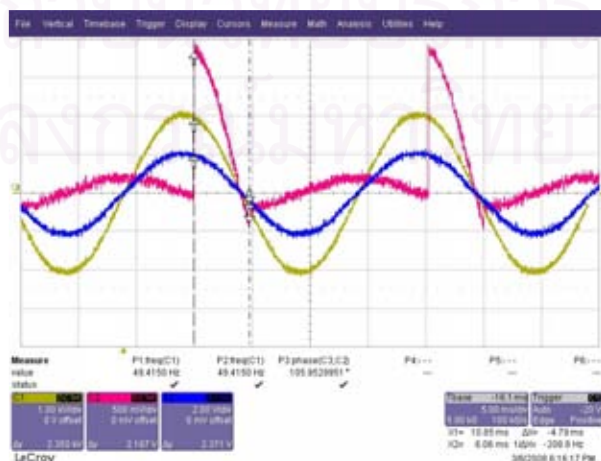


รูปที่ 4.18 ภาพวงจรตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสัญญาณไดอิเล็กทริก



รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดจากออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จากระบบตรวจวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป จะเห็นได้ว่าสัญญาณเส้นสีเหลืองและสีน้ำเงินเป็นสัญญาณของแรงดันที่ด้านแรงสูงและแรงต่ำหลังจากผ่านตัวโวลเตจดีไวเดอร์จะมีเฟสตรงกัน ส่วนเส้นสีแดงเป็นสัญญาณของกระแสรั่วจากอุปกรณ์ที่ต้องการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสัญญาณไดอิเล็กทริก



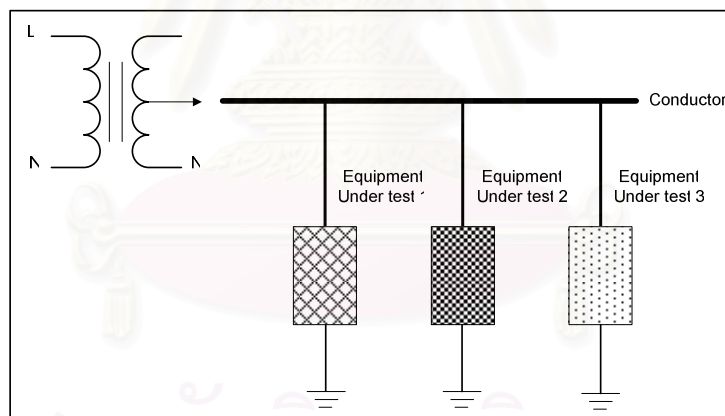
รูปที่ 4.20 แสดงภาพตัวอย่างสัญญาณอินพุตก่อนวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัด  $\Delta \tan \delta$  ของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ระดับ

ครั้งที่	$\Delta \tan \delta_{12}$	C(nF)
1	0.000140	2.82
2	0.000168	2.74
3	0.000203	2.73
4	0.000157	2.66
5	0.000191	2.78

จากตารางที่ 4.7 เป็นการวัดค่า  $\tan \delta$  และ  $\Delta \tan \delta$  ของสายเคเบิลตัวอย่างซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $\tan \delta$  ของสายเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความถี่ของระบบไฟฟ้าในขณะที่ทำการวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ค่า  $\tan \delta$  แต่เมื่อพิจารณาค่า  $\Delta \tan \delta$  จะเห็นว่าค่าที่วัดได้ยังคงให้ค่าที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าความถี่ของระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงก็ตามจากข้อดีตรงนี้จึงได้นำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์หรือสายเคเบิลเส้นอื่นที่ใช้แรงดันอ้างอิงเป็นตัวเดียวกัน

#### 4.3.2 การทดสอบวัดแบบเปรียบเทียบระหว่างสายเคเบิล

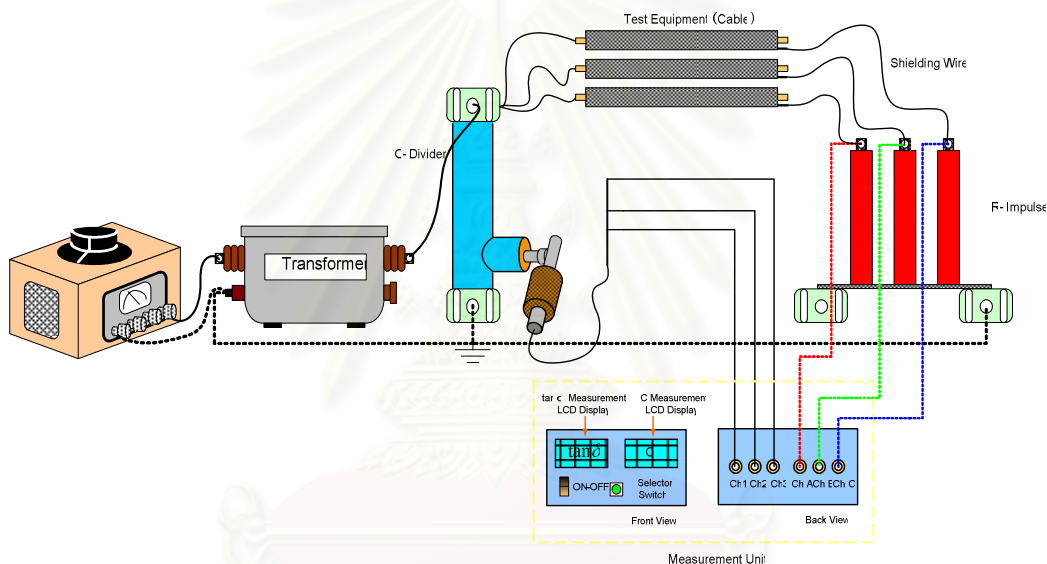


รูปที่ 4.21 แสดงแผนภาพวงจรสมมูลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์



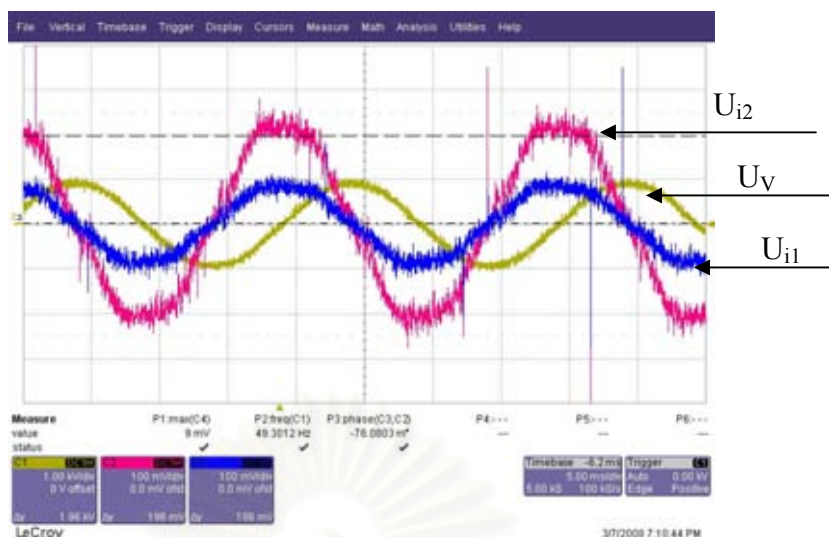


รูปที่ 4.22 ภาพวงจรตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล้าไดอิเล็กทริกแบบเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.23 แสดงวงจรทดสอบค่าประกอบพลังงานสูญเสียเปล้าโดยเปรียบเทียบอุปกรณ์

การทดสอบวัดเทียบระหว่างสายเคเบิลในที่นี้ได้ใช้สายเคเบิล 2 เส้น โดยกำหนดให้ช่อง 1 และ 2 วัดค่า  $\tan \delta$  ของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ส่วนช่องที่ 3 เป็นการวัดค่า  $\tan \delta$  ของสายเคเบิลเส้นที่ 2 หลังจากจ่ายแรงดันทดสอบขนาด 2 kV ซึ่งได้ลักษณะของสัญญาณที่ต้องการวัดดังแสดงในรูปที่ 4.24 แล้วบันทึกค่า  $\tan \delta$  และค่า  $\Delta \tan \delta$  ดังแสดงผลในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณแรงดันอ้างอิงสี่เหลี่ยม  $U_v$   
สัญญาณกระแสรั่วของสายเคเบิลเส้นที่ 1 สีน้ำเงิน  $U_{i1}$   
สัญญาณกระแสรั่วของสายเคเบิลเส้นที่ 2 สีแดง  $U_{i2}$

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองวัดเทียบระหว่างสายเคเบิลที่แรงดัน 1 kV

ครั้งที่	$\Delta \tan \delta_{12}$	$\Delta \tan \delta_{13}$	$\Delta \tan \delta_{23}$
1	0.000143	0.075573	0.075716
2	0.000152	0.075787	0.075635
3	0.000158	0.077081	0.076922
4	0.000130	0.075367	0.075237
5	0.000110	0.079940	0.079829

จากนั้นเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ใช้วัดโดยให้ช่อง 1 และ 3 วัดค่า  $\tan \delta$  ของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ส่วน  
สัญญาณช่องที่ 2 ใช้วัดค่า  $\tan \delta$  ของสัญญาณเส้นที่ 2 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองวัดเทียบระหว่างสายเคเบิลที่แรงดัน 1 kV

ครั้งที่	$\Delta \tan \delta_{12}$	$\Delta \tan \delta_{13}$	$\Delta \tan \delta_{23}$
1	0.077583	0.000174	0.077409
2	0.075460	0.000196	0.075656
3	0.075092	0.000133	0.074960
4	0.075595	0.000173	0.075768
5	0.074993	0.000156	0.074837

จากตารางที่ 4.7 , 4.8 และ 4.9 ทั้ง 3 ตารางแสดงให้เห็นว่าระบบวัดที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าได้อิเล็กทริกไม่สามารถวัดค่า  $\tan \delta$  ที่แม่นยำได้เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟมีความถี่เท่ากับของระบบไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามโหลดที่เปลี่ยนแปลงในระบบและสัญญาณที่ป้อนให้กับเครื่องมือวัดค่อนข้างมีสัญญาณรบกวน แต่เมื่อมีการพิจารณาแบบเป็นค่าเปรียบเทียบหรือค่าความสัมพันธ์กับสายเคเบิลวัด อาจนำมาใช้ในการวิเคราะห์หรือตรวจสอบสภาพของสายเคเบิลได้ถ้ามีการทำประวัติบันทึกข้อมูลการวัดเปรียบเทียบในช่วงเวลาใด ๆ ซึ่งอาจทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลง  $\Delta \tan \delta$  ถ้ามีสายใดสายหนึ่งเกิดการเสื่อมสภาพแตกต่างจากสายอื่น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาและประกอบสร้างเครื่องมือตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาพฉนวนของสายเคเบิล ในสภาวะไม่จ่ายโหลด โดยอาศัยหลักการวัดแบบสังเคราะห์สัมพันธ์เปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกระหว่างสายเคเบิลที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน จากการออกแบบสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC CY8C27443-PXI มีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณต่ำ การแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของตัวแปลงสัญญาณในไมโครคอนโทรลเลอร์มีอัตราการสุ่มต่ำ จึงต้องสร้างชุดตรวจจับผ่านศูนย์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บันทึกค่าเวลาเมื่อเกิดการผ่านศูนย์ของสัญญาณ ซึ่งค่าเวลาที่ถูกบันทึกนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณ จากการทดลองเมื่อประยุกต์ใช้ชุดตรวจจับผ่านศูนย์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC CY8C27443-PXI ที่มีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณต่ำ ก็สามารถให้ความต่างเฟสของสัญญาณได้

2. วงจรตรวจจับค่ายอดได้นำมาประยุกต์ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PsoC CY8C27443-PXI ที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณของตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต่ำ ทำให้สามารถใช้ตรวจจับและอ่านค่าสูงสุดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เพื่อใช้คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้แม้ว่า ADC จะมีอัตราการสุ่มสัญญาณที่ต่ำ

3. จากการทดลองเปรียบเทียบระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ตัวกำเนิดสัญญาณป้อนสัญญาณความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆกัน ให้กับวงจรตรวจวัดค่าประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก พบว่าวงจรตรวจวัดวัดมุมผิดพลาดประมาณ 0.001 องศา หรือประมาณ 0.0005 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับมุม 360 องศา

4. จากทดสอบวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล XLPE ค่า  $\tan \delta$  ที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เมื่อนำค่า  $\tan \delta$  ที่วัดโดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้กับหลักการวัดแบบสังเคราะห์สัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta \tan \delta$  หรือผลต่างของค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกระหว่างอุปกรณ์มีค่าค่อนข้างคงตัว เมื่อทำการบันทึกผลการ

วัดเพื่อนำไปเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการใช้งานหรือที่เวลาใด ๆ จะสามารถนำมาใช้ตรวจสอบสภาพจนวนได้ เมื่อค่า  $\Delta \tan \delta$  ระหว่างอุปกรณ์ใด ๆ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่บันทึกไว้

5. ชุดตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าสามารถวัดค่าของสัจญาณกระแสและแรงดันได้ เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Schering Bridge แล้วค่าที่วัดได้โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จาก Schering Bridge

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

1. เนื่องจากความถี่ของระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้การคำนวณและแสดงผลจากโปรแกรมที่ประยุกต์เพื่อหาค่าตัวประกอบกำลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกมีความผิดพลาดและคลาดเคลื่อนอยู่บ้างขึ้นกับความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ 50 เฮิร์ตซ์

2. ระบบตรวจวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น ถ้าแรงดันที่คร่อมตัวต้านทานชั้นที่มีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์ จะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของจุดตัดผ่านศูนย์ที่ขึ้นกับแอมพลิจูด ซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าที่วัดได้เกิดความผิดพลาด

3. ถ้าระบบที่ต้องการตรวจวัดค่ากำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกมีฮาร์มอนิกปนเข้ามาจะทำให้รูปคลื่นของสัจญาณเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งมีผลต่อการตัดผ่านศูนย์ของสัจญาณทำให้เกิดความผิดพลาดต่อค่าที่วัดได้

## รายการอ้างอิง

- [1] John Densley. Ageing Mechanisms and Diagnostics for Power Cables - An Overview. IEEE Electrical Insulation Magazine 17(1) (January/February 2001) : 14-22.
- [2] John Densley. Ageing and Diagnostics in Extruded Insulations for Power . IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid (1995) : 1-15.
- [3] C.L.Griffiths, S.Betteridge and RN.Hampton. Thermoelectric ageing of cable grade XLPE in dry conditions. Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998. ICSD '98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference (June22-25, 1998) : 279-282.
- [4] H.Faremo and E.Ildstad. Water treeing and dielectric loss of WTR-XLPE cable insulation. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings Volume.140 (September 1993) : 393-396.
- [5] Pie Wang, M.R.Raghuveer, W.McDermid and J.C.Bromley. A Digital Technique for the On-line Measurement of Dissipation Factor and Capacitance. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 8 No. 2 ( April 2001) : 228-232.
- [6] Huang Xinhong; Bai Feng, Gao Wensheng and Yan Zhang. A New On-line Insulation Diagnostic Method for Capacitive-type Equipment. Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference Volume 1 (August 18-21, 1998 ) : 100-104.
- [7] Nitaigour Premchand Mahalik. A Digital Meter for Measuring Dissipation Factor. Proceeding for the 5th International conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (May 25-30,1997) : 1129-1131.
- [8] ส้ารวย สั้งข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [9] อุกฤษฏ์ ตันตสุทธานนท์. การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ Psoc ด้วยภาษาซี. กรุงเทพฯ : ไมโครริเซิร์ช เทคโนโลยี, 2548.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ประมวลผลการทดสอบ

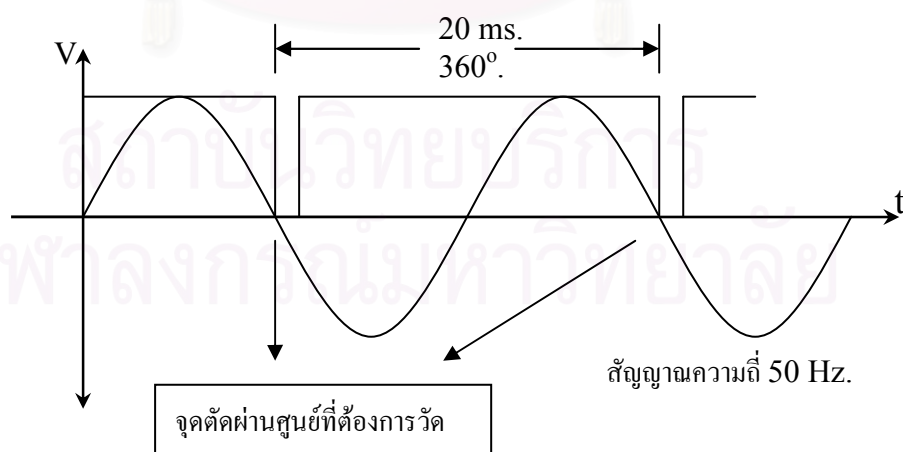
ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการเทียบวัดคาบเวลา

วัดโดย Oscilloscope (มิลลิวินาที)	ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 24 MHz.		ความผิดพลาด (%)	ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 48 MHz.		ความผิดพลาด (%)
	สัญญาณที่นับได้ (ครั้ง)	คาบเวลา (วินาที)		สัญญาณที่นับได้ (ครั้ง)	คาบเวลา (วินาที)	
19.65	471518	19.64658	0.017	942660	19.63875	0.057
19.65	471534	19.64725	0.014	942651	19.63856	0.058
19.65	471514	19.64642	0.018	942635	19.63823	0.060
19.65	471533	19.64721	0.014	942649	19.63852	0.058
19.65	471534	19.64725	0.014	942640	19.63833	0.059
19.65	471546	19.64775	0.011	942642	19.63838	0.059
19.65	471550	19.64792	0.011	942668	19.63892	0.056
19.65	471545	19.64771	0.012	942700	19.63958	0.053
19.65	471549	19.64788	0.011	942668	19.63892	0.056
19.65	471528	19.64700	0.015	942666	19.63888	0.057
19.65	471525	19.64688	0.016	942670	19.63896	0.056
19.65	471519	19.64663	0.017	942681	19.63919	0.055
19.65	471526	19.64692	0.016	942655	19.63865	0.058
19.65	471524	19.64683	0.016	942658	19.63871	0.057
19.65	471528	19.64700	0.015	942652	19.63858	0.058
19.65	471551	19.64796	0.010	942664	19.63883	0.057
19.65	471552	19.64800	0.010	942614	19.63779	0.062



ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 50 เฮิรตซ์

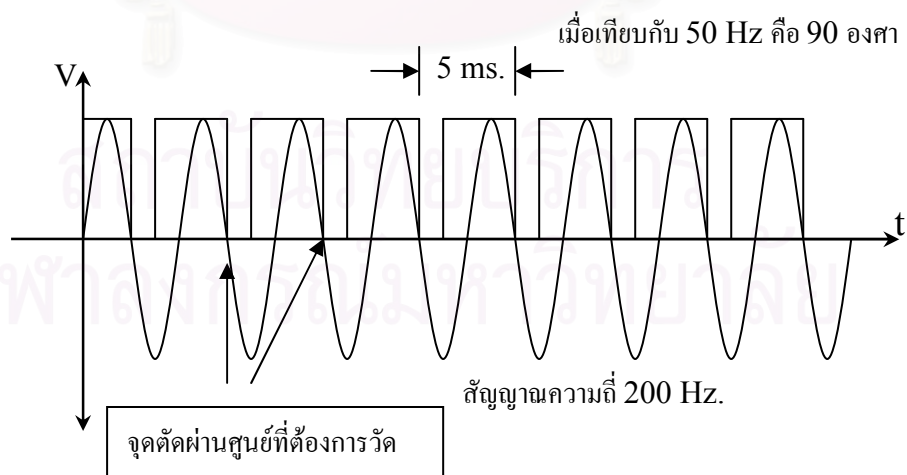
ความถี่สัญญาณ 50 เฮิรตซ์					
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5
ครั้งที่1	49.987	50.214	50.117	49.917	49.873
ครั้งที่2	49.993	50.145	49.987	49.857	50.132
ครั้งที่3	49.988	49.990	49.943	50.224	50.015
ครั้งที่4	50.075	50.123	50.304	49.982	49.878
ครั้งที่5	49.994	50.321	50.113	49.975	49.734
ครั้งที่6	50.104	49.989	48.967	50.013	50.213
ครั้งที่7	50.013	49.917	50.078	50.115	50.211
ครั้งที่8	49.965	48.957	50.214	49.878	49.893
ครั้งที่9	49.985	49.972	49.896	50.144	49.959
ครั้งที่10	49.957	50.059	50.412	49.985	50.163
ค่าเฉลี่ย	50.006	49.998	50.003	50.009	50.007
T	0.0199976	0.0200008	0.0199988	0.0199964	0.0199972
angle	359.956	360.014	359.978	359.935	359.949



รูปที่ ก.1 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิรตซ์

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบการวัดเทียบเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 200 เฮิรตซ์

ความถี่สัญญาณ 200 เฮิรตซ์					
ครั้งที่	1	2	3	4	5
1	200.153	200.141	200.014	199.924	199.981
2	199.996	200.266	200.124	199.969	199.941
3	199.981	198.986	199.815	199.981	199.925
4	200.134	199.985	200.023	199.906	200.106
5	199.928	199.975	200.076	200.041	199.952
6	199.916	199.985	200.098	199.979	199.984
7	200.204	199.995	199.882	199.922	199.957
8	199.965	200.257	199.873	200.010	199.974
9	199.927	199.997	200.108	199.989	199.816
10	199.934	200.215	199.940	199.967	199.957
ค่าเฉลี่ย	200.014	199.980	199.995	199.969	199.959
T	0.0049997	0.0050005	0.0050001	0.0050008	0.0050010
angle	89.994	90.009	90.002	90.014	90.018



รูปที่ ก.2 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิรตซ์

## การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรมายสัญญาณ



รูปที่ ก.3 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 50 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



รูปที่ ก.4 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 100 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



รูปที่ ก.5 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 200 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



รูปที่ ก.6 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 500 mV และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



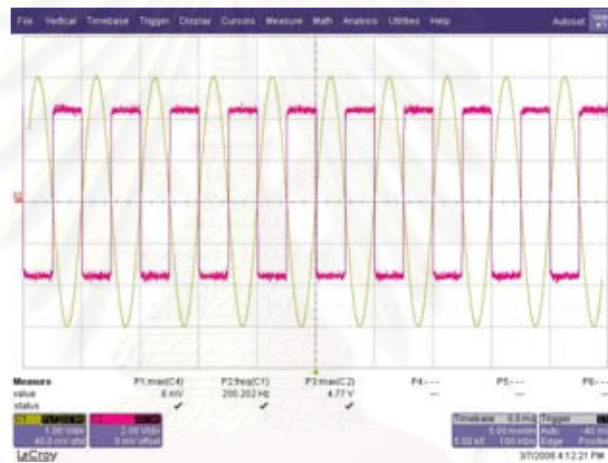
รูปที่ ก.7 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 1 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



รูปที่ ก.8 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 2 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div



รูปที่ ก.9 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 2.5 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div

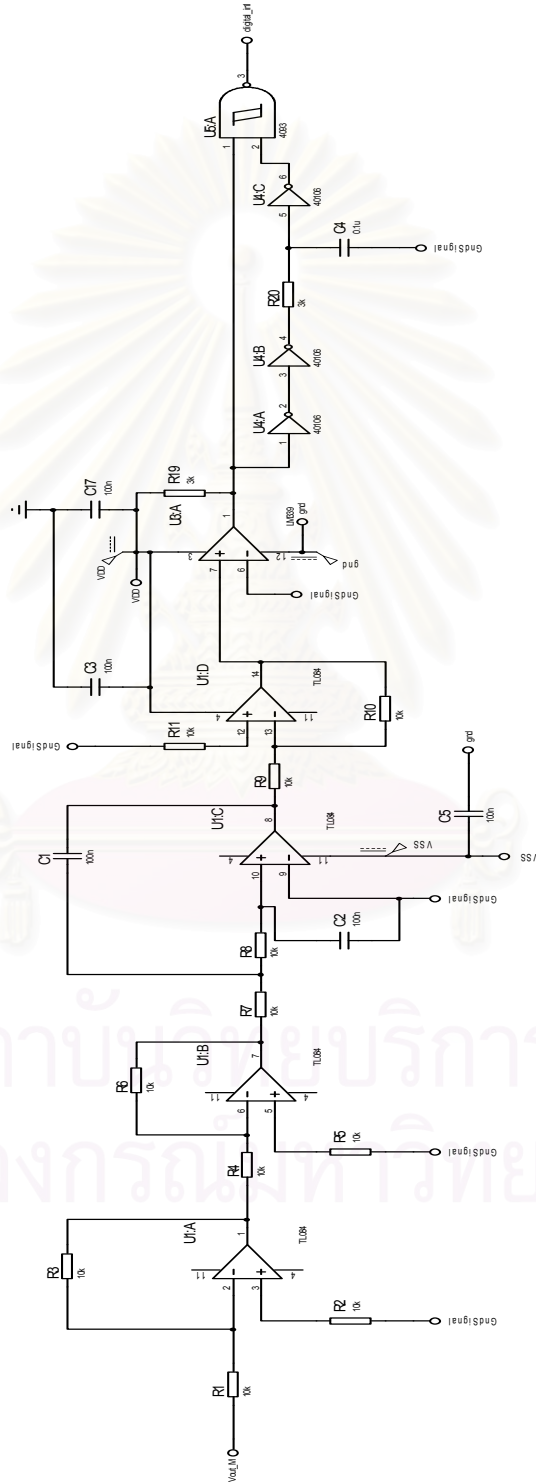


รูปที่ ก.10 แสดงสัญญาณอินพุตขนาด 3 V และเอาต์พุตเมื่อมีแกนเวลาเป็น 5 ms/Div

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

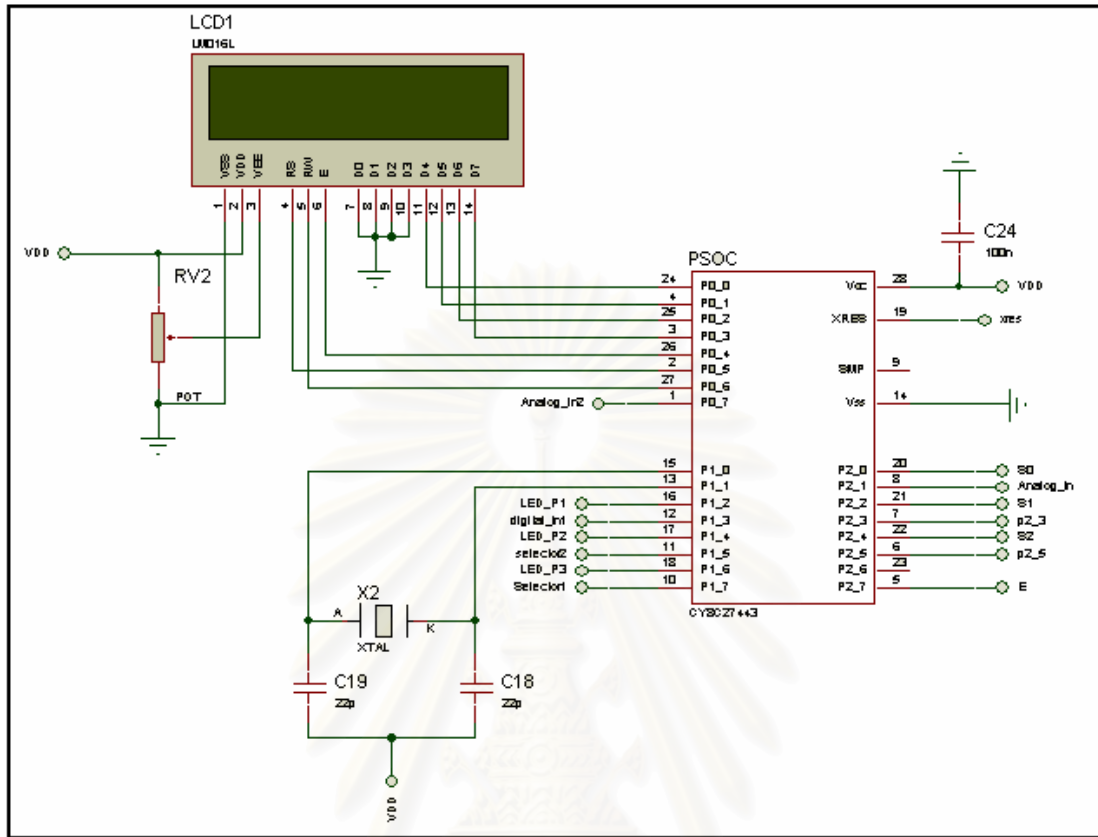
### ภาคผนวก ข

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์



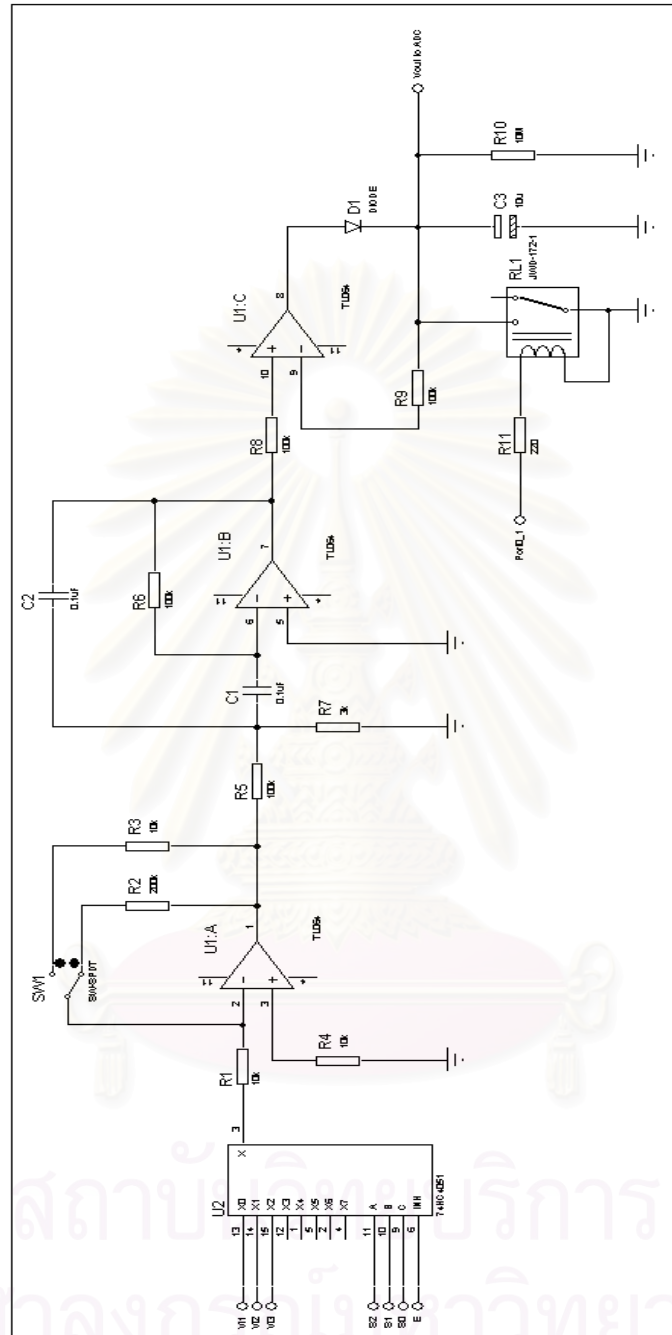
รูปที่ ข.1 แสดงวงจรชุดตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และจอภาพแอลซีดี



รูปที่ ข.2 แสดงวงจรชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และแอลซีดีที่ใช้กับชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

ชุดวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ



รูปที่ ข.3 ชุดวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ



## ภาคผนวก ค

โปรแกรมและชุดคำสั่งหาความต่างเฟส

```

//-----
// File name : Relative synthetics method for cale condition
// Author : Manop Tanakumdee
// Description : this program use for cable diagnostics 3 phase in degree
//-----

#include <m8c.h> // part specific constants and macros
#include "PSoCAPI.h" // PSoC API definitions for all User Modules
#include <stdlib.h>
#include <ioport.h>
#include <delay.h>
#include <math.h>

#pragma interrupt_handler GPIO_Interrupt

#define PI 3.1415926 /* ..535897932 */

void LCD_Init(void);
void DecadeToBinary(void);

DWORD Time1,Time2,Time3,Time[5],period[1];
DWORD Time1Total,Time2Total,Time3Total,TotalPeriod,period1;
int i,selector,round,check,p,j,q;
float Dummy,m,n,l,AvgPeriod;
BYTE DeToBinary;
DWORD *pdwCount;
char sOutputStr[16];

void main()
{
  SetBit2_5;
  ClrBit1_2;
  ClrBit1_3;
  ClrBit1_6;
  LCD_Start();
  LCD_Position(0,0);
  LCD_PrCString(" C and TanDelta ");
  LCD_Position(1,0);
  LCD_PrCString(" Measurement. ");
  i=0;
  j=0;
  p=0;
  q=0;
  round=0;
  selector=0;
  GPIO_EnableInt;
  M8C_EnableGInt;
  Timer32_Start();
  while(1)
  {
    if (round==100)

```

```

{
  GPIO_DisableInt;
  Timer32_Stop();

  LCD_Control(0x01);
  LCD_Position(0,0);
  LCD_PrCString("TanDelta Measurement");

  Dummy = (Time1Total)/100.0; // calculate equipt 1
  AvgPeriod = (TotalPeriod)/100.0;
  Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;

  LCD_Position(1,0);
  LCD_PrCString("anger:");
  LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

  Dummy = (Time2Total)/100.0; // calculate equipt 1
  Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;

  LCD_Position(2,0);
  LCD_PrCString("anger:");
  LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

  Dummy = (Time3Total)/100.0; // calculate equipt 1
  Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;

  LCD_Position(3,0);
  LCD_PrCString("anger:");
  LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));
  Delay1mS(10000);

```

```

/*****/

```

```

  Dummy = (Time1Total)/100.0; // calculate equipt 1
  Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;
  Dummy = (90-Dummy);
  Dummy = tan(Dummy*PI/180);
  l = Dummy;
  LCD_Position(1,0);
  LCD_PrCString("tan1:");
  LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

```

```

  Dummy = (Time2Total)/100.0; // calculate equipt 1
  Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;
  Dummy = (90-Dummy);
  Dummy = tan(Dummy*PI/180);
  m = Dummy;
  LCD_Position(2,0);
  LCD_PrCString("tan2:");
  LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

```

```

Dummy = (Time3Total)/100.0; // calculate equipt 1
Dummy = 360*Dummy/AvgPeriod;
Dummy = (90-Dummy);
Dummy = tan(Dummy*PI/180);
n = Dummy;
LCD_Position(3,0);
LCD_PrCString("tan3:");
LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));
Delay1mS(5000);

```

```

/*****/

```

```

// show difference tan delta

```

```

if (l > m)
{
    Dummy = l-m;
}
else
{
    Dummy = m-l;
}

```

```

LCD_Position(1,0);
LCD_PrCString("Del12:");
LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

```

```

if (l > n)
{
    Dummy = l-n;
}
else
{
    Dummy = n-l;
}

```

```

LCD_Position(2,0);
LCD_PrCString("Del13:");
LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));

```

```

if (m > n)
{
    Dummy = m-n;
}
else
{
    Dummy = n-m;
}

```

```

LCD_Position(3,0);
LCD_PrCString("Del23:");
LCD_PrString(ftoa(Dummy,&check));
Delay1mS(1000);

```

```

round=0;
Time1 =0;Time2=0;Time3=0;Time3Total=0;Time2Total=0;

```

```

Time1Total=0;period1=0;TotalPeriod=0;i=0;

Timer32_WritePeriod(4294967295);
Timer32_Start();
GPIO_EnableInt;

}
}
}

```

```

void GPIO_Interrupt(void)
{ if(Bit2_5==0)
  {
    SetBit1_4;
    Timer32_ReadTimer(pdwCount);
    if (p==0)
    {
      period[j]=4294967295-*pdwCount;
      j++;
      if(j==2)
      {
        p=1;
        j=0;
        i=0;
      }
    }
    if (p==1)
    {
      p=2;
    }
    if (p==2)
    {
      Time[i]= 4294967295-*pdwCount;
      i++;

      if (selector>=6)
      {
        selector = 0;
        ClrBit1_6;
        ClrBit1_3;
        ClrBit1_2;
      }

      if(i>5)
      { i=0;
        round++;
        if (Time[1]>Time[0])
        {
          Time1 = Time[1]-Time[0];
        }
        else
        {
          Time1 = 4294967295-Time[0]+Time[1];
        }
      }
      if (Time[3]>Time[2])
      {
        Time2 = Time[3]-Time[2];

```

```

    }
    else
    {
        Time2 = 4294967295-Time[2]+Time[3];
    }
    if (Time[5]>Time[4])
    {
        Time3 = Time[5]-Time[4];
    }
    else
    {
        Time3 = 4294967295-Time[4]+Time[5];
    }
    if (period[1]>period[0])
    {
        period1 = period[1]-period[0];
    }
    else
    {
        period1 = 4294967295-period[0]-period[1];
    }
    Time1Total = Time1Total + Time1 ;
    Time2Total = Time2Total + Time2 ;
    Time3Total = Time3Total + Time3 ;
    TotalPeriod = TotalPeriod + period1;
    p=0;
}

selector++;
SetBit1_7;
switch(selector)
{
    case 1 :ClrBit1_6; ClrBit1_3; SetBit1_2; break;
    case 2 :ClrBit1_6; SetBit1_3; ClrBit1_2; break;
    case 3 :ClrBit1_6; SetBit1_3; SetBit1_2; break;
    case 4 :SetBit1_6; ClrBit1_3; ClrBit1_2; break;
    case 5 :SetBit1_6; ClrBit1_3; SetBit1_2; break;
    case 6 :ClrBit1_6; ClrBit1_3; ClrBit1_2; break;
}
ClrBit1_7;
ClrBit1_4;
}
}
}

```

โปรแกรมและชุดคำสั่งหาความจุไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบ

```
//-----
// This program used for find maxvalue
// and calculation of Capacitor
//-----

#include <m8c.h> // part specific constants and macros
#include "PSoC_API.h" // PSoC API definitions for all User Modules
#include <stdlib.h>
#include <delay.h>
#include <ioport.h>

#define PI 3.1415926 /* ..535897932 */

char TextBuff[5],s[];
long value,Rshunt,Cratio;
float Vin[3],max1,Cap1,Cap2,Cap3,Coefficient,Coefficient1;
int i,selector,check;

void main()
{
    LCD_1_Start();
    LCD_1_Position(0,0);
    LCD_1_PrCString(" C Measurement ");
    Delay1mS(2000);
    Rshunt = 115 ; // Rshunt
    Cratio = 992; // C divider ratio;
    Coefficient = 100*PI*Rshunt*Cratio ; // Coefficient of C
    Coefficient1= 1000000000/Coefficient; // nF unit
    ADCINC12_1_Start(3);
    ADCINC12_1_GetSamples(0);
    M8C_EnableGInt;
    i=0,max1=0,selector=0;

    while(1)
    {
//*****
        if (selector == 4)
        {
//*****
            Cap1 = Vin[1]/(Coefficient1*Vin[0]);
            Cap2 = Vin[2]/(Coefficient1*Vin[0]);
            Cap3 = Vin[3]/(Coefficient1*Vin[0]);

//*****/

            LCD_1_Control(0x01);
            LCD_1_Position(0,0);
            LCD_1_PrCString(" C Measurement ");
            LCD_1_Position(1,0);
            LCD_1_PrCString(" C1=");
            LCD_1_PrString(ftoa(Cap1,&check));
            LCD_1_Position(1,12);

```

```

LCD_1_PrCString(" nF ");
Delay1mS(5000);

LCD_1_Control(0x01);
LCD_1_Position(0,0);
LCD_1_PrCString(" C Measurement ");
LCD_1_Position(1,0);
LCD_1_PrCString(" C2=");
LCD_1_PrString(ftoa(Cap2,&check));
LCD_1_Position(1,12);
LCD_1_PrCString(" nF ");
Delay1mS(5000);

LCD_1_Control(0x01);
LCD_1_Position(0,0);
LCD_1_PrCString(" C Measurement ");
LCD_1_Position(1,0);
LCD_1_PrCString(" C3=");
LCD_1_PrString(ftoa(Cap3,&check));
LCD_1_Position(1,12);
LCD_1_PrCString(" nF ");
Delay1mS(1000);

Vin[0]=0;Vin[1]=0;Vin[2]=0;Vin[3]=0;

selector = 0; //clear selector and selected channel 1
ClrBit2_4;
ClrBit2_2;
ClrBit2_0;
Delay1mS(100);
}
//*****

if(ADCINC12_1_flsDataAvailable!=0)
{
value=ADCINC12_1_iGetData();

max1 = max1+value; //sum of max value

ADCINC12_1_ClearFlag();
i++;
}

if (i==5)
{
max1 = max1/5;
Vin[selector]=(max1+2048)*2.5/2048;

SetBit0_1;
Delay1mS(100); //discharge C in peak detector circuit
ClrBit0_1;

//*****
// This part of program used for multiplexer's channel selected
//
//*****

```

```
Delay1mS(1000);
selector++;
switch(selector)
{
  case 1 :ClrBit2_4; ClrBit2_2; SetBit2_0; break;
  case 2 :ClrBit2_4; SetBit2_2; ClrBit2_0; break;
  case 3 :ClrBit2_4; SetBit2_2; SetBit2_0; break;
  case 4 :ClrBit2_4; ClrBit2_2; ClrBit2_0; break;
}

//*****
max1 = 0.0;
i=0;
}
}
}
```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมาณพ ณะคำดี เกิดเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 จังหวัดนครพนม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่นในปีการศึกษา 2544 เข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย