

การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย



นายธีรุตน์ สุกใสว

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

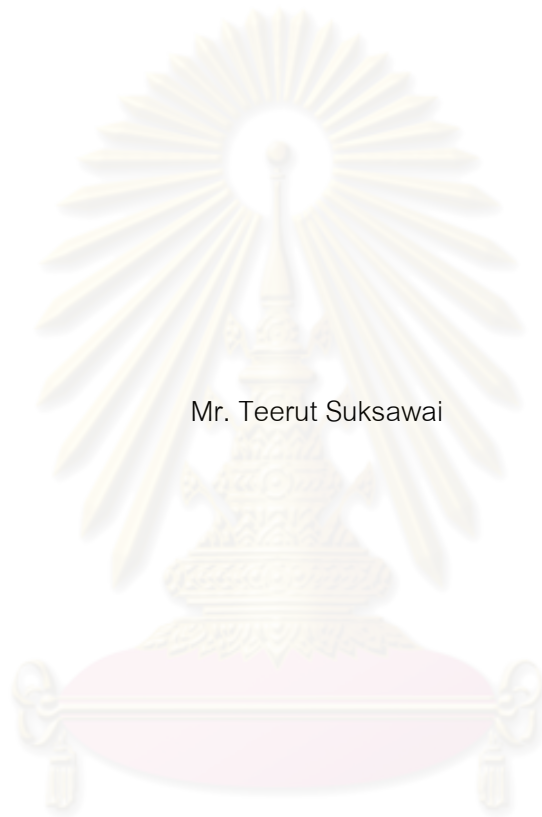
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT ON INSULATION QUALITY MONITORING SYSTEM FOR  
DISTRIBUTION TRANSFORMERS



Mr. Teerut Suksawai

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลง  
ไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย

โดย

นายธีรุตน์ สุกใส


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

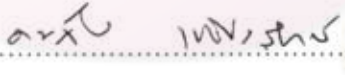
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

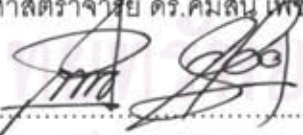
อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศฤทธิ์วงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

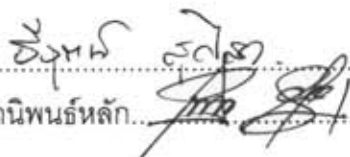

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วารี กงประเวชนนท์)

ธีรุตม์ สุกใสว : การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง  
 ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย. (DEVELOPMENT ON INSULATION MONITORING SYSTEM  
 FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :  
 อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 79 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลง  
 ไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย โดยระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนที่พัฒนาขึ้นจะใช้  
 หลักการวัดกระแสรั่วของฉนวน โดยวัดที่ปลอกฉนวนนำสายด้านแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการ  
 ทดลองจะเริ่มจากการใช้เซลล์ทดลองเป็นแบบจำลองของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อรวบรวมข้อมูล  
 ที่จำเป็นในการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ใน  
 ระบบจำหน่าย ในการทดสอบการทำงานของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนที่พัฒนาขึ้นนั้น  
 จะทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและเปรียบเทียบผลที่ได้กับการประเมินจากจากเครื่องมือ  
 วิเคราะห์ที่ได้มาตรฐาน ผลการทดสอบพบว่าระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลง  
 ไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงให้เห็น  
 ว่าความชื้นและการปนเปื้อน ส่งผลโดยตรงต่อค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าและตัว  
 ประกอบกระแสตรงของกระแสรั่ว

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต.....   
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....   
 ปีการศึกษา.....2553.....

##5070569721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY-WORDS : LEAKAGE CURRENT / INSULATION QUALITY / CAPACITANCE / DC  
COMPONENT / DISTRIBUTION TRANSFORMER

TEERUT SUKSAWAI : DEVELOPMENT ON INSULATION QUALITY MONITORING  
SYSTEM FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS. THESIS ADVISOR :  
WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing. 79 pp

This thesis deals with the design and development of insulation monitoring system for distribution transformers. Transformer's insulation leakage current at high voltage bushing was measured and used as the concept of the monitoring system. Test cells were used in the study to collect necessary data for the design and development of the monitoring system. The test results of insulation monitoring system were compared with the results of standard analysis equipment and indicated that the insulation monitoring system for distribution transformers works as well as it designed. It shows that the insulation capacitance and insulation leakage current dc component are directly related to humidity and contamination of insulation.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:.....Electrical Engineering..... Student's signature.....Teerut Suksawai  
Field of study:.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....W.P.  
Academic year:.....2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจาก อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย การแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วารี กงประเวชนนท์ ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆและผองเพื่อนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่เป็นกำลังใจและช่วยกันฝ่าฟัน อุปสรรคจนประสบความสำเร็จ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้เป็น กำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา จนประสบความสำเร็จ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต.....	1
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
2. ทฤษฎีและหลักการ .....	3
2.1 บทนำทั่วไป .....	3
2.2 คุณสมบัติของฉนวน.....	3
2.2.1 ความนำไฟฟ้าในฉนวน.....	4
2.2.2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก.....	5
2.2.3 กำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก.....	6
2.2.4 กระแสรั่วในฉนวน.....	10
2.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter).....	10
2.4 หลักการทำงานของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวน.....	12
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	13
2.5.1 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F4620.....	14
2.5.2 โมดูลการแปลงสัญญาณจากอะนาลอกเป็นดิจิทัล .....	15
2.5.3 โมดูลสื่อสารอนุกรม.....	17

บทที่	หน้า
3. การออกแบบและประกอบสร้าง.....	18
3.1 ชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter).....	19
3.2 ชุดวงจรยกระดับแรงดัน.....	22
3.3 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	24
3.3.1 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม.....	25
3.3.2 ชุดคำสั่งการทำงานหลัก.....	25
3.3.3 ชุดคำสั่งเมนู.....	27
3.4 การประกอบสร้าง.....	32
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	34
4.1 การทดลองในเซลล์ทดลอง.....	34
4.1.1 การใช้กระแสรั่วในการหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดลอง.....	34
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วเมื่อฉนวนเหลวเปลี่ยนแปลง.....	34
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนเหลวเมื่อฉนวนเหลวเปลี่ยนแปลง.....	39
4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.2 การทดลองในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	42
4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดที่มีในห้องทดลอง.....	42
4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนที่พัฒนาขึ้น.....	46
4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	50
5.1 สรุปผล.....	50
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	57
ภาคผนวก ค.....	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของตัวอย่างฉนวนที่มีใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	3
ตารางที่ 4.1 การทดลองวัดตัวประกอบกระแสตรงของน้ำมันแร่กรณีต่างๆ.....	38
ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบกระแสตรง ของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดในห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง.....	45
ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรง ของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง .....	48
ตารางที่ 4.4 ผลของการวัดค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังทำการซ่อมบำรุง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์หี้อ Doble รุ่น M4100 .....	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในฉนวนเหลว .....	4
2.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำและอุณหภูมิที่มีต่อความนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว .....	5
2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก .....	7
2.4 ความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีต่อตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก .....	7
2.5 ผลกระทบของโพลาริเซชันที่มีต่อฉนวนภายใต้แรงดันกระแสสลับ.....	8
2.6 การ plot ของจำนวนเชิงซ้อน $\epsilon_r$ .....	9
2.7 ผลตอบสนองของควมถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่าน.....	10
2.8 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำแบบพื้นฐาน.....	11
2.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบปรับปรุงความชัน .....	12
2.10 ไดอะแกรมแสดงรูปแบบสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์.....	13
2.11 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการไปป์ไลน์ที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC .....	14
2.12 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620 .....	15
2.13 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลใน PIC18F4620 .....	16
2.14 วงจรสมมูลของขาอินพุตอะนาลอกของโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลใน PIC18F4620.....	17
3.1 ภาพรวมของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ใน ระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น.....	18
3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	19
3.3 ผลตอบสนองของควมถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	20
3.4 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 50 Hz.....	20
3.5 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 5 kHz.....	21
3.6 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 50 kHz .....	21
3.7 วงจรทอนแรงดัน (Voltage divider) .....	22
3.8 ชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและชุดวงจรระดับแรงดัน.....	23
3.9 การทดสอบวงจรระดับแรงดัน.....	23
3.10 ภาพรวมของชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	24

ภาพประกอบที่

3.11 ชุดวงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ..... 25

3.12 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งหลัก ..... 26

3.13แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 1 ..... 28

3.14แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2 ..... 29

3.15แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3 ..... 30

3.16แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 4 ..... 31

3.17แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 5 ..... 32

3.18ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายประกอบ  
แล้วเสร็จ ..... 33

4.1เซลล์ทดลอง ..... 34

4.2วงจรที่ใช้ในการทดลอง ..... 35

4.3การติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับเซลล์ทดลอง ..... 35

4.4วงจรสมมูลของเซลล์ทดลอง ..... 36

4.5ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลอง (ฉนวนอากาศ) ..... 37

4.6ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลอง (ฉนวนน้ำมันแร่) ..... 37

4.7วงจรที่ใช้ในการทดลอง ..... 39

4.8ผลการทดลองการหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่เมื่อความชื้นของน้ำมันแร่  
มีการเปลี่ยนแปลง ..... 39

4.9ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในฉนวน XLPE ..... 40

4.10การเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วต่อความหนาแน่นของต้นไม้ใน  
ฉนวน XLPE ..... 41

4.11วงจรที่ใช้ในการทดลอง ..... 42

4.12การต่อเทปตัวนำเข้ากับปลอกฉนวนนำสาย ..... 43

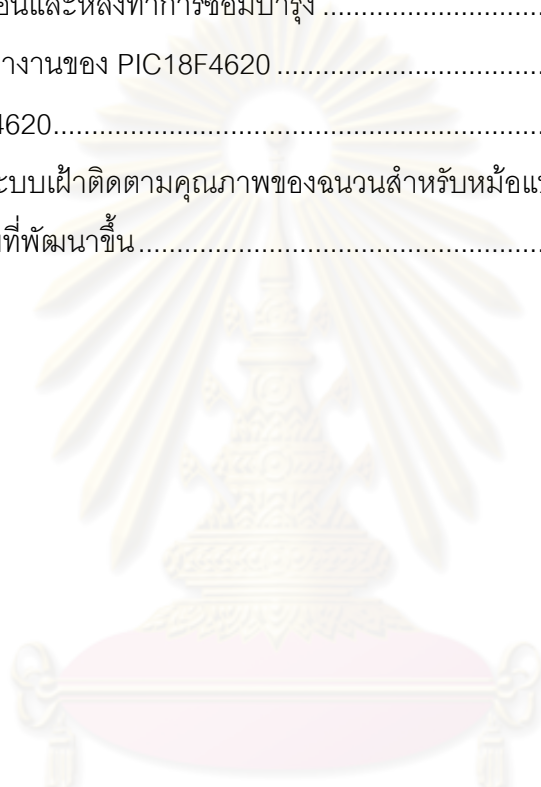
4.13ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าจากกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดใน  
ห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง ..... 44

4.14 ผลการทดลองวัดค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือ  
วัดในห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง ..... 45

4.15 วงจรที่ใช้ในการทดลอง ..... 46

ภาพประกอบที่

4.16 ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าจากกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบเฝ้าติดตาม คุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง .....	47
4.17 ผลการทดลองวัดค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบเฝ้า ติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง .....	47
ก.1 ไดอะแกรมการทำงานของ PIC18F4620 .....	55
ก.2 ขาของ PIC18F4620 .....	56
ข.1 แสดงวงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ใน ระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น .....	57



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรม ประเทศไทยกำลังพัฒนาด้านการผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ และกระจายไปทั่วถึงทุกตำบลในพื้นที่กว้างใหญ่ หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการส่งกำลังไฟฟ้าให้เข้าถึงทั่วทุกพื้นที่ ดังนั้นความน่าเชื่อถือของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง ในการบ่งชี้ถึงความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในภาพรวม

### 1.2 ที่มาของปัญหา

จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีเพิ่มขึ้นมากจากอดีต ส่งผลทำให้ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งของผู้ผลิตไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้าต้องมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ผนวกรวมไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าแทบทุกชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หากเกิดความเสียหายต่อระบบฉนวน อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆไม่สามารถใช้งานได้ และส่งผลกับความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในภาพรวม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบสภาพของฉนวนไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบสภาพการใช้งานและทำนายความเสียหายของฉนวนล่วงหน้า รวมถึงการวางแผนซ่อมบำรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าก่อนเกิดความเสียหายเท่าที่จำเป็น

ฉนวนไฟฟ้านั้น อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ฉนวนเหลว เช่น น้ำมันหม้อแปลง ฉนวนแข็ง เช่น XLPE , ปลอกฉนวนนำสาย และ ฉนวนก๊าซ เช่น อากาศ, SF<sub>6</sub> เป็นต้น เป็นที่ทราบกันดีว่าเราสามารถเปรียบเทียบฉนวนได้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งในอุดมคตินั้นฉนวนจะต้องไม่นำกระแสไฟฟ้า แต่การใช้งานฉนวนในทางปฏิบัตินั้น ฉนวนจะมีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก พลังงานสูญเสียนี้เกิดจาก “กระแสรั่ว” ในฉนวน เราจึงเปรียบเทียบฉนวนในทางปฏิบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานที่ต่ออนุกรมหรืออาจต่อขนานกันก็ได้ เมื่อค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานในฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้น, การปนเปื้อน หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี จะส่งผลให้กระแสรั่วเปลี่ยนแปลงไปด้วย [1] และใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนไฟฟ้า เพื่อทำนายสภาพการใช้งานของฉนวนไฟฟ้า และวางแผนในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าในอนาคตได้

### 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ในปี ค.ศ.1997 Mr.Nitaigour Premchand Mahalik ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกแบบตัวเลข โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8085A เป็นอุปกรณ์ประมวลผล ซึ่งนำเสนอเป็นตารางที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบค่ามุมที่วัดได้ให้เป็นค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริกและนำเสนอแผนการคำนวณของอุปกรณ์ประมวลผล

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ได้แก่ การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวน เพื่อนำไปใช้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของฉนวนไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการประมวลผลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานและมีจำหน่ายในท้องตลาด และนำระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจริง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายนี้ จะทำการศึกษาถึงปัจจัยที่ทำให้คุณภาพของฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยใช้วิธีการวัดค่ากระแสรั่วที่เปลี่ยนแปลง จากคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง การวัดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของกระแสรั่วนี้ ทำให้เราสามารถนำไปพัฒนาระบบประมวลผลสัญญาณเพื่อเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่มีการใช้งานอยู่ โดยไม่จำเป็นต้องหยุดใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงสามารถวางแผนในการซ่อมบำรุงหม้อแปลงไฟฟ้าหากมีสัญญาณบอกว่าฉนวนเริ่มมีการเสียหายได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 บทนำทั่วไป

ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะพบเห็นการใช้ฉนวนแข็ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนเพื่อรับแรงทางกลและฉนวนเหลวที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนที่เกิดจากการใช้งาน

เราสามารถสรุปหน้าที่การใช้งานของฉนวนไฟฟ้าคร่าวๆได้ดังต่อไปนี้ [2]

- ทำหน้าที่เป็นฉนวนคั่นส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้า
- ทำหน้าที่แทรกซึมช่องว่างระหว่างกระดาษพันขดลวดซึ่งเป็นชั้นบางๆได้
- ทำหน้าที่ระบายความร้อนโดยการหมุนเวียน
- ทำหน้าที่รับแรงทางกล

ฉนวนนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะ ซึ่งหากคุณสมบัติของฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงไป อาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานได้ และส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเช่นกัน ตัวอย่างของคุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนได้แก่ ความนำไฟฟ้า , ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก และตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) [3]

#### 2.2 คุณสมบัติของฉนวน

มีการศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนไว้อย่างมากมาย [4 - 6] โดยสรุปคุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนที่ใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ดังตารางที่ 2.1

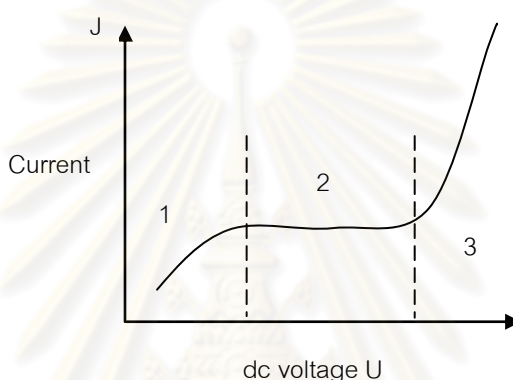
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของตัวอย่างฉนวนที่มีใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

	Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	Loss tangent ( $\tan \delta$ ) ( $10^{-4}$ )	Dynamic viscosity (Pa.s)
<u>Transformer oil</u>			
20°C, 50 Hz	2.0	$\leq 10$	0.0067 – 0.0143
40°C, 50 Hz	-	$\leq 40$	-
<u>กระดาษหุ้มขดลวด</u>			
20°C, 50 Hz	3.5-3.9	26-30	-

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าค่าต่างๆของคุณสมบัติของฉนวนจะมีการระบุคุณภูมิและความถี่ในการใช้งานอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาพการใช้งานฉนวนไม่ว่าจะเป็นคุณภูมิหรือความถี่ใช้งานนั้นน่าจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของฉนวนด้วย

### 2.2.1 ความนำไฟฟ้าในฉนวน

ในการศึกษาค่าความนำไฟฟ้าในฉนวนเหล่านั้น มีการพิจารณาเฉพาะกรณีของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป โดยพบว่าปริมาณสิ่งเจือปนที่มีขั้วที่อยู่ในฉนวนเหลวสามารถใช้อธิบายถึงคุณสมบัติความนำไฟฟ้าของฉนวนเหลวได้ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในฉนวนเหลว

ในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าช่วงของความหนาแน่นของกระแส (J) แบ่งได้ออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 จะแสดงให้เห็นว่ากระแสเพิ่มตามกฎของโอห์ม ในช่วงที่ 2 นั้นเป็นช่วงที่กระแสเริ่มมีการอิ่มตัว เนื่องจากไอออน ที่ทำหน้าที่นำไฟฟ้าภายในฉนวนเหลวนั้นมีจำกัด ทำให้การนำกระแสในช่วงนี้มีค่าเพิ่มไม่มากนัก ส่วนช่วงที่ 3 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว เมื่อมีการเพิ่มแรงดันแล้วทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความคงทนของฉนวนเหลว โดยกระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จึงได้ข้อสรุปจากรูปที่ 2.1 ว่าความนำไฟฟ้าของฉนวนเหลวนั้นขึ้นกับจำนวนไอออนที่มีอยู่ในฉนวนเหลวและขนาดของแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนเหลว หากมีจำนวนอยู่มาก ค่าความนำไฟฟ้าก็จะมากตาม และหากเพิ่มแรงดันมากขึ้นความเครียดสนามไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อถึงค่าหนึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เบรกดาวน ขึ้นและมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านฉนวน

ในขณะเดียวกันได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของคุณภูมิที่มีต่อความหนืดของฉนวนเหลว [7] เราอาจคิดได้ง่ายๆว่าเมื่ออุณหภูมิของฉนวนเหลวสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดน้อยลง โดยความหนืดนี้จะส่งผลกระทบต่อตรงต่อความนำไฟฟ้าตามสมการของ Van't Hoffsch ดังนี้



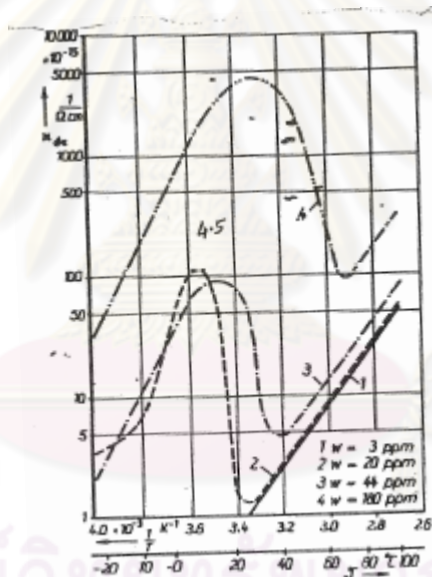
$$\kappa = \kappa_0 \exp(-F / kT) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\kappa$	คือ ความนำไฟฟ้า
$K$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
$T$	คือ absolute temperature
$\kappa_0, F$	คือ material constant

จากสมการ (2.1) จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสมการนี้จะเป็นจริงที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิห้อง [6]

Holle [8] ได้ศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อความนำไฟฟ้าในฉนวน และผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำและอุณหภูมิที่มีต่อความนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นจะทำให้ความนำไฟฟ้าของฉนวนมีค่าสูงขึ้น

### 2.2.2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของฉนวนใดๆสามารถนิยามได้เป็นผลคูณระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ  $\epsilon_0$  และค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของฉนวนนั้นๆ  $\epsilon_r$ ,

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\epsilon_0 \text{ คือ } 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

จากสมการ (2.2) จะพบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศนั้นเป็นค่าคงที่ แต่ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์นั้นจะเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นกับสภาพแวดล้อมได้แก่อุณหภูมิและความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน [3]

ในทางคณิตศาสตร์นั้นสามารถนิยามค่าคงตัวไดอิเล็กทริกโดยคำนึงถึงผลกระทบของโพลาริเซชันในฉนวน ที่ทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของฉนวนใดๆสามารถแสดงได้ด้วยเลขเชิงซ้อน  $\bar{\epsilon}$

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

เมื่อ

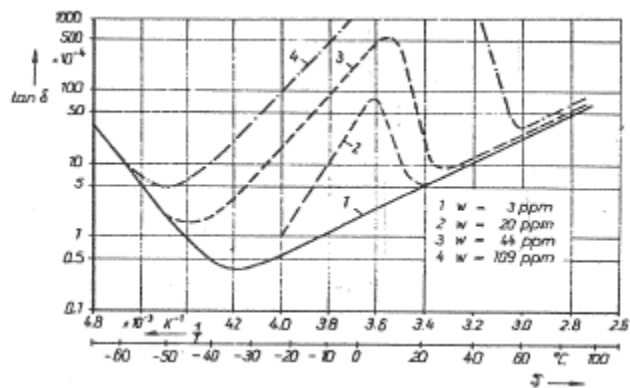
$\epsilon'_r$  คือ ส่วนจริงของเลขเชิงซ้อน

$\epsilon''_r$  คือ ส่วนจินตภาพของเลขเชิงซ้อน

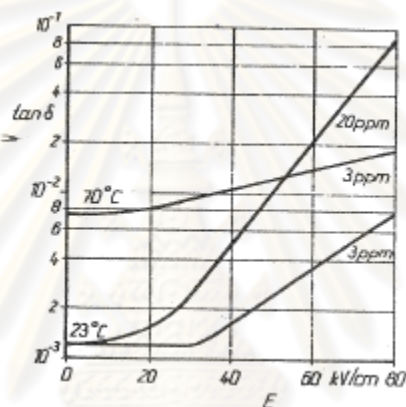
### 2.2.3 กำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กทริก

นอกเหนือจากกระแสเชิงความจุที่มีปรากฏในฉนวนแล้ว ยังมีกระแสแวกที่ปรากฏในฉนวนด้วยเช่นกัน ซึ่งกระแสที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นผลเนื่องมาจากความนำไฟฟ้าและโพลาริเซชันของฉนวน ความถี่และอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อความนำไฟฟ้าและโพลาริเซชันของฉนวน กระแสทั้งหมดที่ไหลในฉนวนคือ  $i_{ins}$  หากผลของโพลาริเซชันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดและมุมของ  $i_{ins}$  เพิ่มตามไปด้วย โดยที่ค่า  $\tan \delta$  คือตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของฉนวนเหลวไว้เช่นกันดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 [8] และ 2.4 [6] ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าความชื้นและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของฉนวนมีค่าเพิ่มขึ้น



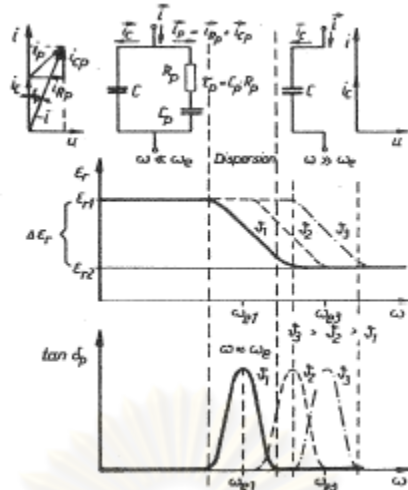
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีต่อตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

เมื่อเราป้อนแรงดันกระแสสลับให้กับฉนวน ไดโพลของฉนวนจะเปลี่ยนทุกๆ ครั้ง ไซเคิล เมื่อความถี่ของแรงดันกระแสสลับไม่มากจนเกินไปจะทำให้ไดโพลของฉนวนเปลี่ยนทิศทางได้จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของฉนวนขึ้นกับผลของโพลาริเซชัน ซึ่งสามารถแสดงได้โดยค่า  $\epsilon_{r1}$  ในรูปที่ 2.5 จากวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2.5 ในช่วงความถี่  $\omega \ll \omega_e$  นั้น  $C_p$  จะแสดงการเพิ่มของค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากผลของโพลาริเซชัน ในขณะที่  $R_p$  จะแสดงผลของเวลาที่เมื่อต่อโพลาริเซชัน ดังนั้นค่าคงตัวเวลาสามารถแสดงได้โดย

$$\tau_p = C_p \cdot R_p \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.5 ผลกระทบของโพลาริเซชันที่มีต่อฉนวนภายใต้แรงดันกระแสสลับ

ในช่วงที่ความถี่มีค่าสูงทำให้ไดโพลไม่สามารถหมุนได้ทันนั้นผลกระทบของโพลาริเซชันจะลดลงจนถึงศูนย์เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยกราฟซีกขวาของรูปที่ 2.4 โดยค่าคงตัวไดอิเล็กทริกคือ  $\epsilon_{r2}$

พิจารณากราฟในรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ามีช่วงความถี่อยู่ช่วงๆหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอย่างชัดเจน เราเรียกช่วงความถี่นี้ว่า dispersion domain โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau_p$  และความถี่  $\omega_e$  คือ

$$\omega_e = \frac{1}{\tau_p} \tag{2.5}$$

ค่า  $\omega_e$  เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของฉนวนแต่ละชนิด ซึ่งในฉนวนแต่ละชนิดนั้นจะมีค่า  $\omega_e$  แตกต่างกันไป เช่นน้ำบริสุทธิ์มีค่า  $\omega_e$  อยู่ในช่วง 100 MHz ในขณะที่กระดาษฉนวนมีค่า  $\omega_e$  อยู่ในช่วง 10 kHz เป็นต้น ซึ่งค่า  $\omega_e$  นั้นขึ้นตรงกับอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า  $\omega_e$  จะเพิ่มขึ้นตามดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.5

พิจารณารูปที่ 2.5 ถ้าคิดผลของโพลาริเซชันจะได้ว่า

$$Y_{total} = j\omega C + \frac{j\omega C_p}{1 + j\omega R_p C_p} \tag{2.6}$$

และ

$$Y_{total} = j\omega \epsilon_r \cdot C_0 \tag{2.7}$$

ดังนั้น

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} + \frac{C_p}{C_0} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_p \cdot C_p} \quad (2.8)$$

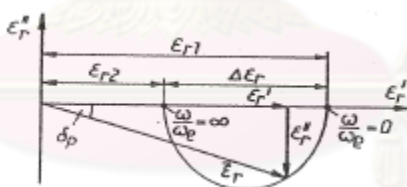
จากสมการ (2.4) และ (2.5) แทนค่าในสมการ (2.7) จะได้ว่า

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} + \frac{C_p}{C_0} \cdot \frac{1}{[1 + j(\omega/\omega_e)]} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_r = \frac{C}{C_0} + \frac{C_p}{C_0} \cdot \frac{[1 - j(\omega/\omega_e)]}{[1 + (\omega/\omega_e)^2]} \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.4 จะได้ว่า  $\frac{C}{C_0} = \epsilon_{r2}$  และ  $\frac{C_p}{C_0} = \Delta\epsilon_r$  แทนค่าในสมการ (2.8) ได้ว่า

$$\epsilon_r = \epsilon_{r2} + \frac{\Delta\epsilon_r}{1 + (\omega/\omega_e)^2} - j(\omega/\omega_e) \cdot \frac{\Delta\epsilon_r}{1 + (\omega/\omega_e)^2} \quad (2.10)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.9) จะมีรูปแบบเดียวกับสมการ (2.3) คือเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่ง  $\epsilon_r$  นี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การ plot ของจำนวนเชิงซ้อน  $\epsilon_r$

พิจารณารูปที่ 2.6 จะได้ว่า

$$\tan \delta_p = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \text{หรือ} \quad \tan \delta_p = \frac{\Delta\epsilon_r(\omega/\omega_e)}{\epsilon_{r2}[1 + (\omega/\omega_e)^2] + \Delta\epsilon_r} \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.9) และสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่า  $\epsilon_r$  และ  $\tan \delta_p$  ขึ้นอยู่กับ  $\omega_e$  แต่จากที่เราทราบอยู่แล้วว่าค่า  $\omega_e$  ขึ้นกับคุณสมบัติ ดังนั้นค่า  $\epsilon_r$  และ  $\tan \delta_p$  จึงขึ้นกับคุณสมบัติ

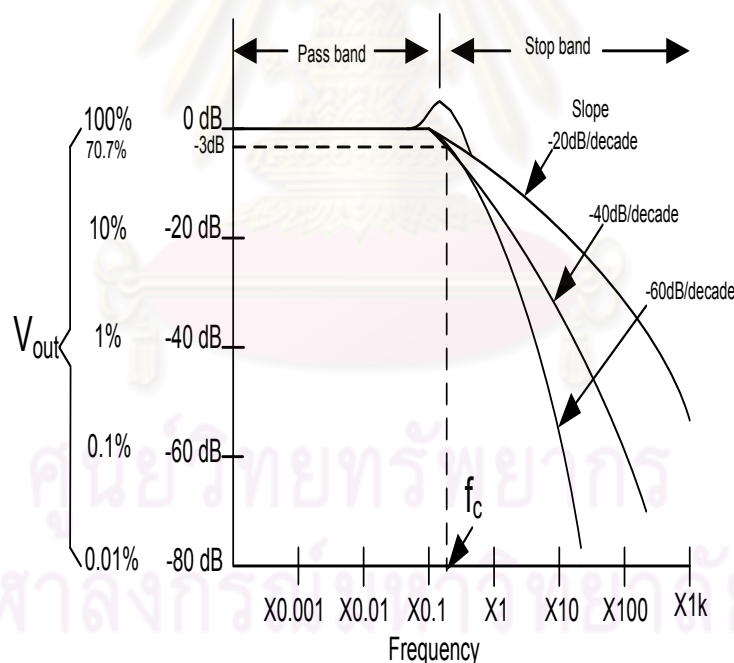
ด้วย ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก จะขึ้นกับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน

## 2.2.4 กระแสรั่วในฉนวน

เมื่อคุณภาพของฉนวนเหลวเปลี่ยนแปลง จะทำให้ลักษณะของกระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนเหลวเปลี่ยนแปลงไปด้วย [7] โดยลักษณะของกระแสรั่วภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับที่สำคัญได้แก่ ขนาดของกระแสรั่ว เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความจุไฟฟ้ารวมของฉนวน, มุมเฟสระหว่างกระแสรั่ว เป็นตัวบ่งชี้ถึงตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

## 2.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter)

ในการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์บางครั้ง เราอาจต้องการความถี่บางช่วง โดยสัญญาณที่นอกเหนือจากนี้จะถูกกำจัดออกไป ในกรณีที่เราต้องการสัญญาณเฉพาะความถี่ต่ำ เราจำเป็นต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำในวงจรที่เราสร้างขึ้น จากกราฟรูปที่ 2.7 เป็นผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

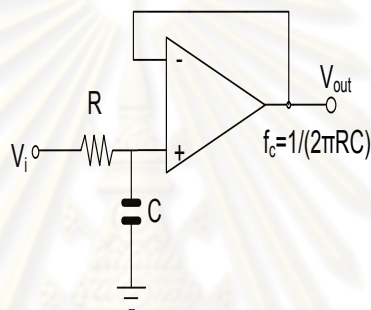


รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่าน

ในทางอุดมคติ วงจรกรองความถี่ต่ำจะกันไม่ให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ ( $f_c$ ) ผ่านเข้าไปในวงจรเลย หากสัญญาณมีความถี่สูงกว่า  $f_c$  เพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติ ลักษณะของความถี่สูงที่ถูกกันออกไปนั้นจะไม่เป็นเช่นนั้น แต่จะค่อยๆ ลดอัตราขยายลงเรื่อยๆ จุดที่มีความถี่มีค่าเท่ากับ  $f_c$  ถูกเรียกได้หลายชื่อเช่น ความถี่ 0.707 (ขนาด

ของ  $V_o$  ลดลงเหลือเพียง 70.7% เทียบกับ  $V_i$  สูงสุด) ความถี่ -3 dB (อัตราขยายของแรงดันเอาต์พุตลดลง 3dB) หรือความถี่หักมุมเป็นต้น กล่าวโดยสรุปแล้ว วงจรนี้จะลดขนาดของสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า  $f_c$  และเรียกช่วงสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า  $f_c$  ว่าช่วงที่ผ่านได้ (Pass Band) และช่วงที่มีความถี่สูงกว่า  $f_c$  ว่าช่วงที่ถูกกั้น (Stop Band)

จากรูปแสดงการตอบสนองของความถี่ในรูปที่ 2.7 จะพบว่า เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงกว่าแรงดันคัทออฟแล้ว สัญญาณบางเส้นอาจจะถูกลดทอนด้วยอัตราที่น้อยกว่าแรงดันเส้นอื่น เช่นสัญญาณที่มีความชัน -20 dB/decade (อัตราขยายลดลง 20 dB ต่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น 10 เท่า) จะมีความชันน้อยกว่าสัญญาณที่มีค่า -60 dB/decade คุณสมบัตินี้เกิดจากการออกแบบวงจรกรองความถี่และเป็นที่น่าพอใจว่า ยิ่งค่าความชันมีขนาดลบมากขึ้นเท่าไร วงจรนี้ก็จะมีความถี่ที่ใกล้เคียงอุดมคติยิ่งขึ้น



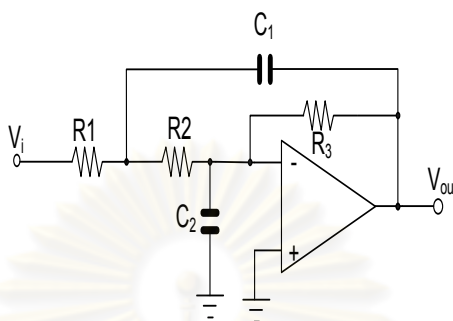
รูปที่ 2.8 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำแบบพื้นฐาน

รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของวงจรกรองความถี่ต่ำพื้นฐาน ซึ่งใช้ในออปแอมป์ที่ถูกต่อในลักษณะของวงจรตามแรงดัน และใช้หลักการแบ่งแรงดันธรรมดาที่ขั้วอินพุตบวก โดยใช้คุณสมบัติที่ว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตจะมีค่าต่อค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุดังสมการ

$$x_c = \frac{1}{w_c} = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2.12)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ของสัญญาณอินพุต ดังนั้นเมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่ต่ำ  $x_c$  จะมีค่าสูงทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจากอินพุตตกคร่อมตัวเก็บประจุ และเป็นผลให้แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $V_{in}$  ด้วย ในขณะที่สัญญาณซึ่งเป็นความถี่สูงจะทำให้  $x_c$  มีค่าต่ำเป็นผลให้ตัวเก็บประจุเสมือนถูกลัดวงจร ดังนั้น  $V_o$  มีค่าต่ำด้วย สรุปได้ว่าช่วงสัญญาณที่มีความถี่ต่ำผ่านไปปรากฏที่เอาต์พุตได้ โดยสัญญาณซึ่งมีความถี่สูงจะถูกกั้นเอาไว้และเราสามารถหาความถี่  $f_c$  ที่แบ่งช่วงสัญญาณออกเป็น 2 ส่วนได้ดังสมการ 2.13

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบปรับความชัน

วงจรกรองความถี่ต่ำในรูปที่ 2.9 เป็นวงจรที่ถูกปรับให้มีความชันถึง  $-40$  dB/decade โดยมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่เช่นเดิม แต่เพิ่มตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในการป้อนกลับมาหักล้างสัญญาณอินพุตที่มีความถี่สูง และสามารถหาความถี่คัตออฟได้จากสมการ 2.14

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.14)$$

## 2.4 หลักการทำงานของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวน

หลักการทำงานของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้การตรวจจับกระแสรั่วที่เปลี่ยนแปลงไปตามคุณภาพของฉนวนที่เปลี่ยนแปลง กระแสรั่วที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในตำแหน่งของฐานปลอกฉนวนนำสายด้านแรงสูงทั้ง 3 เฟสจะไหลผ่านความต้านทานชนิด ค่าแรงดันที่ตกคร่อมนี้จะเป็นแรงดันป้อนเข้าสู่ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนที่จะพัฒนาขึ้นโดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ลักษณะของกระแสรั่วที่จะทำการเฝ้าติดตามเมื่อคุณภาพของฉนวนเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งได้เป็น

- ขนาดของกระแสรั่วเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความจุไฟฟ้ารวมของฉนวนในแต่ละเฟส
- วิเคราะห์องค์ประกอบกระแสตรงสภาพของฉนวนเปลี่ยนแปลงไป

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จะใช้ในการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนนี้คือ PIC18F4620 เป็น digital signal controller จากบริษัท Microchip Technology Inc. ซึ่งสามารถ

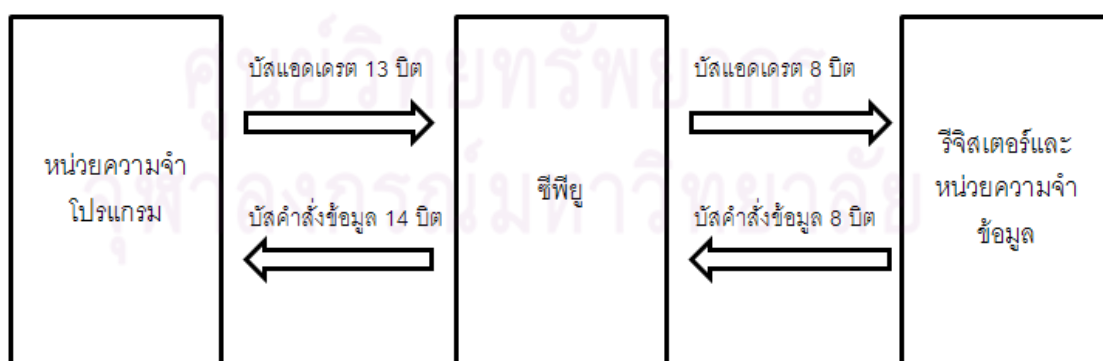


พัฒนาชุดคำสั่งได้ด้วยภาษา C มีความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาทีและมีโมดูลสำเร็จรูปให้เลือกใช้งานได้เช่นโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เป็นต้น [9]

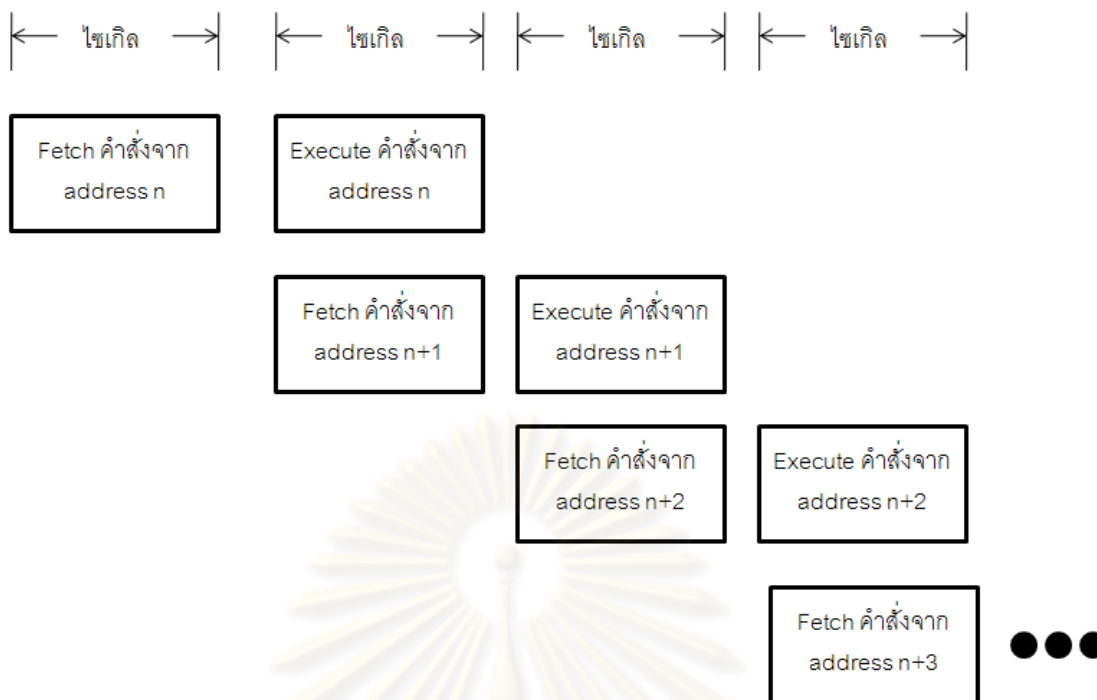
## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้ต้องการเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนซึ่งคำนวณจากกระแสรั่วและค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่ว จึงต้องการเครื่องมือที่มีความสามารถในการเก็บบันทึกค่าข้อมูลในหน่วยความจำ จากนั้นทำการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล นอกจากนั้นยังต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัดและสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวกในการตรวจวัด ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์ดแวร์ [9] กล่าวคือมีการแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกัน โดยมีบัสสำหรับติดต่อแยกกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 นอกจากนั้นกรกระทำคำสั่งทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ยังใช้กระบวนการที่เรียกว่าไปป์ไลน์ (Pipeline) ดังรูปที่ 2.11 ทำให้สามารถเฟตช์ (fetch) คำสั่งถัดไป ในขณะที่กำลังเอ็กซีคิวต์ (execute) คำสั่งในปัจจุบัน ส่งผลให้ความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเริ่มต้นกระทำคำสั่งที่ 1 ซีพียูจะเฟตช์คำสั่งจากหน่วยความจำโปรแกรมที่แอดเดรส  $n$  จากนั้นทำการเอ็กซีคิวต์ในไซเคิลถัดมา และที่ไซเคิลของการเอ็กซีคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส  $n$  นั้น ซีพียูก็จะเริ่มต้นเฟตช์คำสั่งจากแอดเดรส  $n+1$  ทันที เมื่อเอ็กซีคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส  $n$  เรียบร้อย ซีพียูก็จะสามารถเอ็กซีคิวต์คำสั่งที่แอดเดรส  $n+1$  ต่อเนื่องกันไปได้ในทันที และในทำนองเดียวกันขณะที่กำลังเอ็กซีคิวต์คำสั่งแอดเดรส  $n+1$  ซีพียูก็จะดำเนินการเฟตช์คำสั่งที่แอดเดรส  $n+2$  ต่อไป



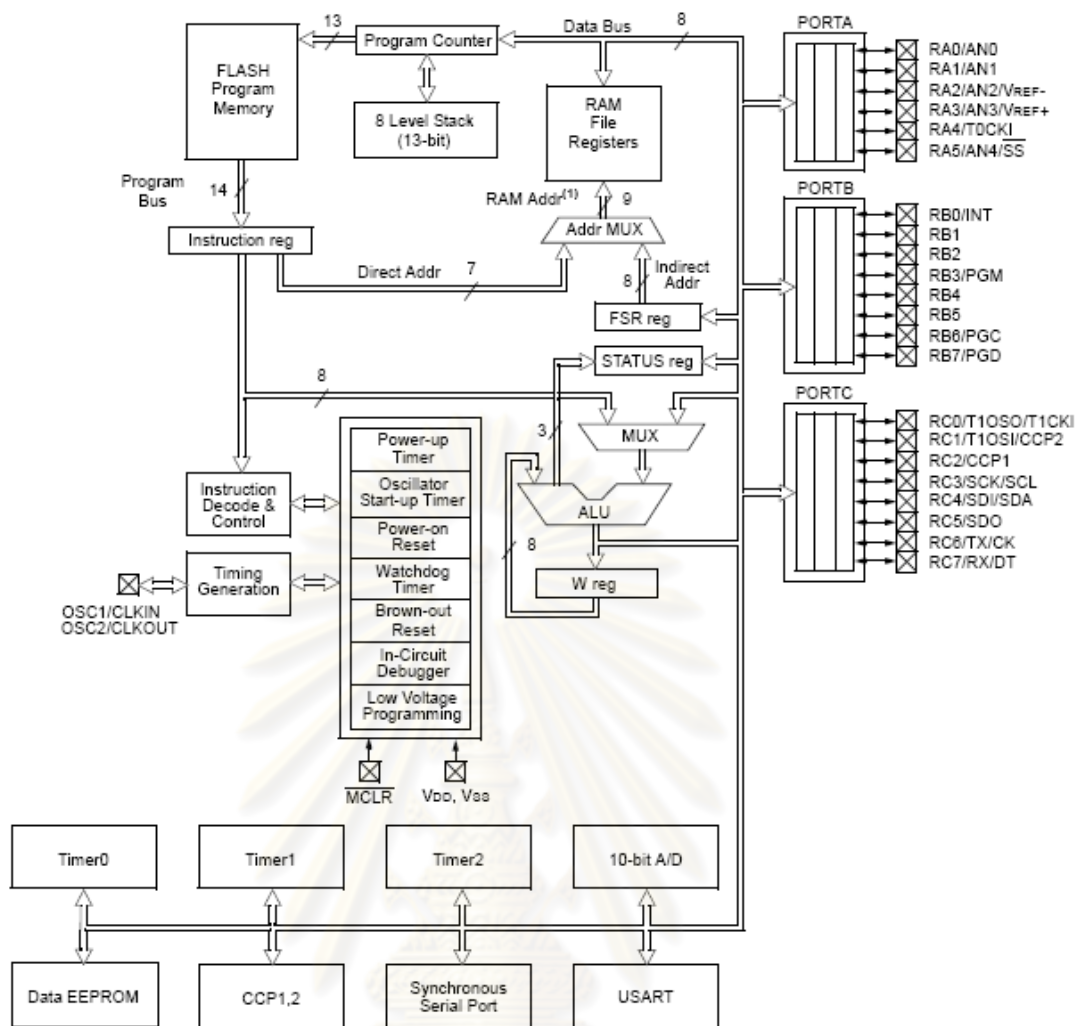
รูปที่ 2.10 โดอะแกรมแสดงรูปแบบสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการไปป์ไลน์ที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

### 2.5.1 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620

โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.12 โดยส่วนประกอบหลักคือ ซีพียู, หน่วยความจำโปรแกรม, หน่วยความจำข้อมูล, ส่วนติดต่อพอร์ต, ส่วนจัดการสัญญาณนาฬิกาของระบบ, วงจรรีเซ็ตหลัก, ส่วนควบคุมการตอบสนองของอินเทอร์รัปต์ และส่วนจัดการด้านไฟเลี้ยง และมีโมดูลพิเศษเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อเพิ่มความสามารถให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620 ได้แก่ วงจรบราวเอาต์รีเซ็ต (brown-out reset), ส่วนแก้ไขข้อมูลในวงจรดีบั๊กเกอร์ (In-circuit debugger), วงจรโปรแกรมข้อมูลด้วยแรงต่ำ (low-voltage programming), ไทมเมอร์, วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล, โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรม (SPI : Serial Peripheral Interfacing), โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบบัส I2C, โมดูลสื่อสารอนุกรม (USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) และโมดูลเปรียบเทียบสัญญาณ-ตรวจจับสัญญาณ-วงจรโมดูลเลขนความกว้างของพัลส์หรือ PWM (CCP : Compare Capture Pulse-width modulation) นอกจากนั้นในอนุกรม PIC18F4620 จะมีวงจรเปรียบเทียบแรงดันแอนะล็อกและโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงเพิ่มเติมเข้ามาอีกด้วย [9]



Note 1: Higher order bits are from the STATUS register.

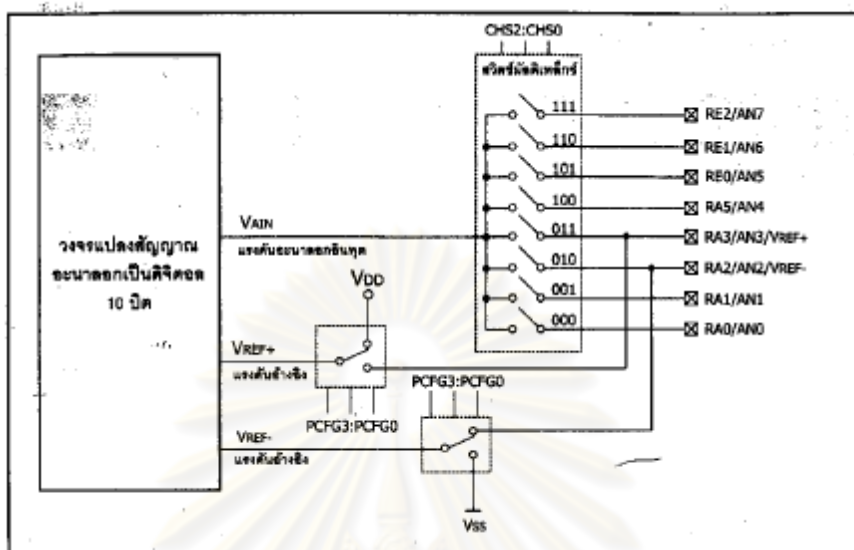
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620

### 2.5.2 ไมโครแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ไมโครที่สำคัญที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ต้องมีคือ ไมโครแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620 มีความละเอียด 10 บิต 5 ช่องอินพุต สำหรับรุ่น 28 ขา และ 8 ช่องอินพุตสำหรับรุ่น 40 ขา โดยขาพอร์ตที่ใช้งานร่วมด้วยคือขาพอร์ต RA0-RA3, RE0-RE2 การทำงานเพื่อรองรับอินพุตจำนวนมากจะใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์ ซึ่งควบคุมด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ สำหรับการงานของไมโครแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเป็นแบบซักระยะชีพ แอปพลิเคชัน [9]

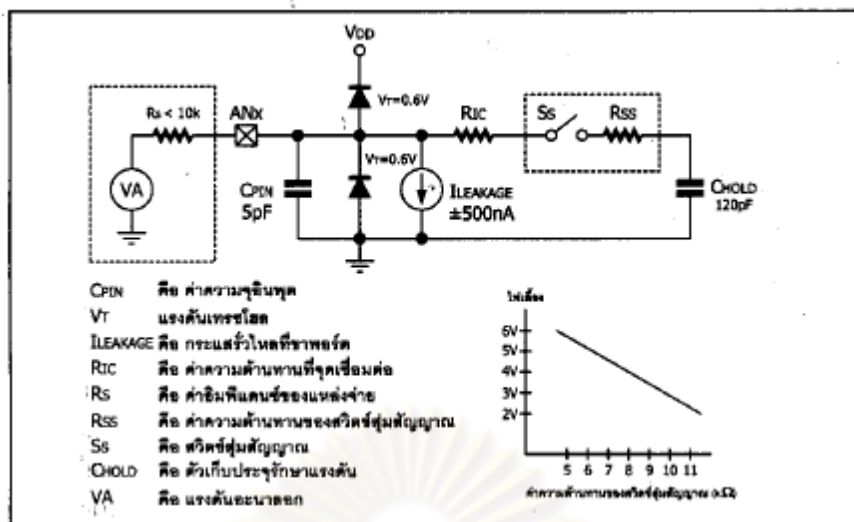
การทำงานของไมโครแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแสดงได้ในรูปที่ 2.13 ขาพอร์ตที่ใช้เป็นอินพุตแอนะล็อกจะต้องได้รับการกำหนดจากบิต PCFG3:PCFG0 ในรีจิสเตอร์ ADCON1 ที่จะให้พอร์ตได้รับแรงดันอ้างอิง หรือพอร์ตใดเป็นพอร์ตดิจิทัล จากนั้นสัญญาณแ

นะลือกที่ต้องการแปลงจะถูกส่งผ่านวงจรเลือกช่องสัญญาณซึ่งควบคุมด้วยบิต CHS2:CHS0 ในรีจิสเตอร์ ADCON0



รูปที่ 2.13 ไตอะแกรมการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลใน PIC18F4620

ภาคินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายใน PIC18F4620 แสดงด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.14 โดยประกอบด้วยวงจรสุ่มและเก็บสัญญาณ (sample and hold) ที่มีตัวเก็บประจุ 120 pF ทำหน้าที่เก็บแรงดันด้านอินพุตไว้ให้กับวงจรแปลงดิจิทัลแอนะล็อก และวงจรเปรียบเทียบกับภายในหรือ  $C_{Hold}$  ซึ่งในการแปลงนั้นต้องรอให้  $C_{Hold}$  ประจุแรงดันอินพุตให้เต็มก่อนจึงจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง ซึ่งถ้าพิจารณาจากวงจรสมมูลแล้ว จะเห็นว่าวงจรภายในนอกจาก  $C_{Hold}$  แล้วยังมีตัวต้านทานอีก 3 ตัวที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ นั่นคือความต้านทานของแหล่งจ่ายสัญญาณภายนอกหรือ  $R_S$  ค่าความต้านทานภายในของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลหรือ  $R_C$  และความต้านทานของสวิทช์สุ่มสัญญาณหรือ  $R_{SS}$



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของขาอินพุตแอนะล็อกของโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลใน

PIC18F4620

### 2.5.3 โมดูลสื่อสารอนุกรม

โมดูลสื่อสารอนุกรม USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitters) ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F87x สามารถกำหนดการทำงานได้ 3 รูปแบบ [10] ได้แก่

- อะซิงโครนัสแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Asynchronous Full Duplex) เป็นการรับส่งข้อมูล 2 ทิศทางได้ในเวลาเดียวกัน นิยมนำมาใช้ในการเชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS-232) นอกจากนี้ยังนำมาใช้เชื่อมต่อกับระบบที่ใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 2 เส้นในการรับและส่งข้อมูลที่เรียกว่า Tx และ Rx
- ซิงโครนัส-มาสเตอร์/สเลฟ (Synchronous Master/Slave) เป็นการรับส่งข้อมูลแบบทางเดียว ไม่สามารถรับและส่งได้พร้อมกัน นิยมนำมาใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์ไอซี เช่น ไอซี A/D, D/A และไอซีหน่วยความจำ EEPROM อนุกรม เป็นต้น

ในโมดูล USART มีรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงาน 3 ตัวคือ TXSTA (Transmit status and control register) ใช้ควบคุมและแสดงสถานะการส่งข้อมูล, RSCTA (Receive status and control register) ใช้ควบคุมและแสดงสถานะการรับข้อมูล และ SPBRG (Serial port baud rate generator) ใช้กำหนดอัตราเร็วในการถ่ายทอดข้อมูล นอกจากนี้ยังมีรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลอีก 2 ตัวคือ TXREG (Transmit data register) ใช้เก็บข้อมูลที่ต้องการส่ง และ RCREG (Receive data register) ใช้เก็บข้อมูลที่รับเข้ามา

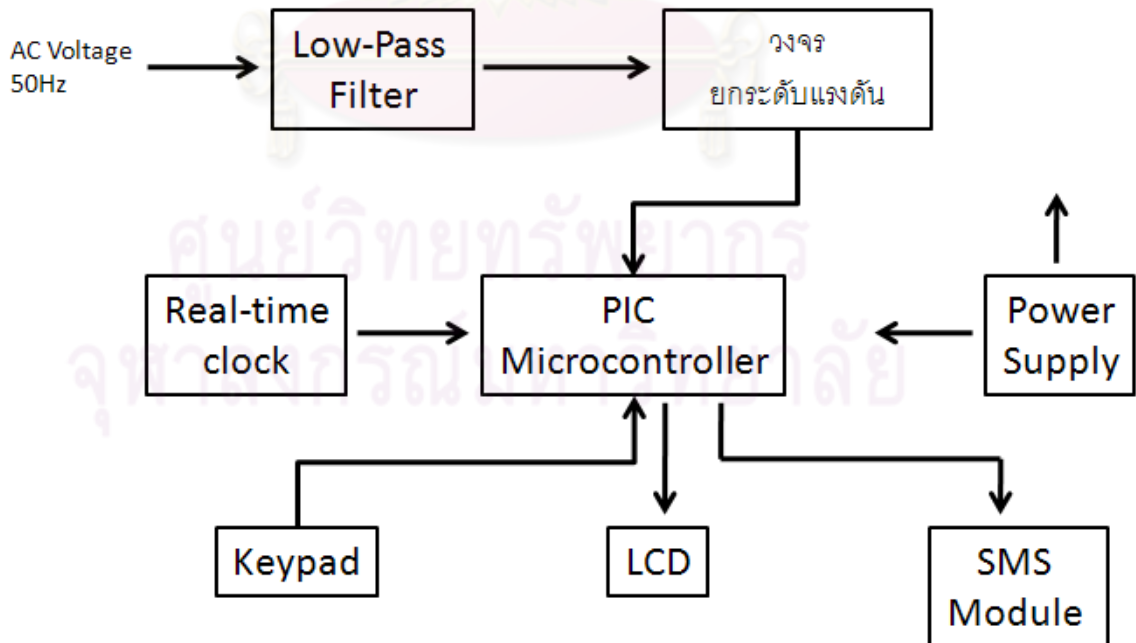
### บทที่ 3

#### การออกแบบและประกอบสร้าง

ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นใช้หลักการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้กระแสรั่วของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าวิ่งผ่านความต้านทานชั้นดี แรงดันดังกล่าวจะวิ่งเข้าสู่ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนเพื่อทำการประมวลผลสัญญาณ หลังจากนั้นจะประมวลผลในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงจากกระแสรั่วเพื่อแสดงผลที่หน้าจอ LCD และส่งค่าที่ประมวลผลได้ผ่านระบบ sms เข้าสู่โทรศัพท์มือถือในเวลา 8.00 น.ของทุกวันโดยอัตโนมัติต่อไป ซึ่งการออกแบบสามารถแบ่งได้ดังนี้

- ชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)
- ชุดวงจรยกกระดัดแรงดัน
- ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
- ชุดวงจรสื่อสารผ่านระบบ sms

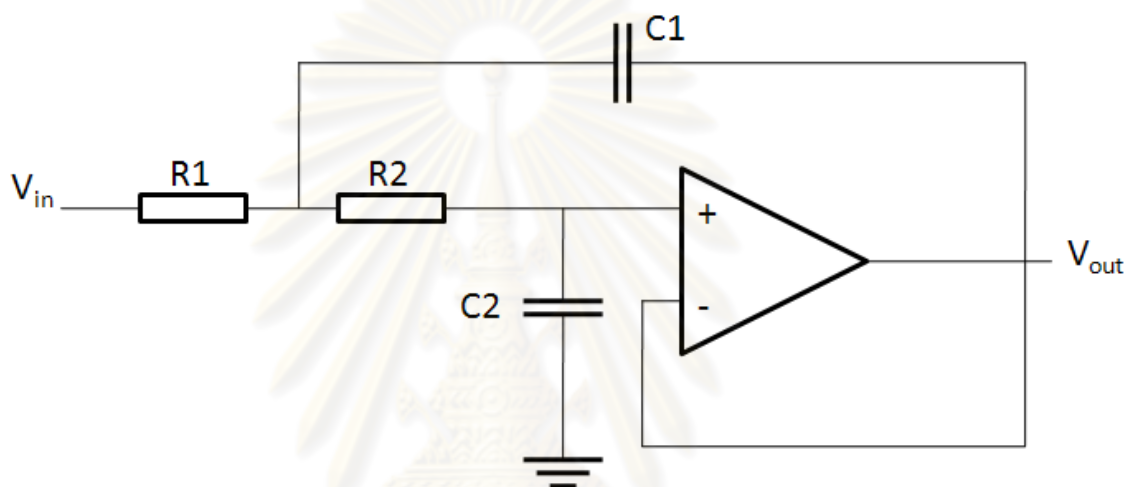
ภาพรวมของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย ที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น

### 3.1 ชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

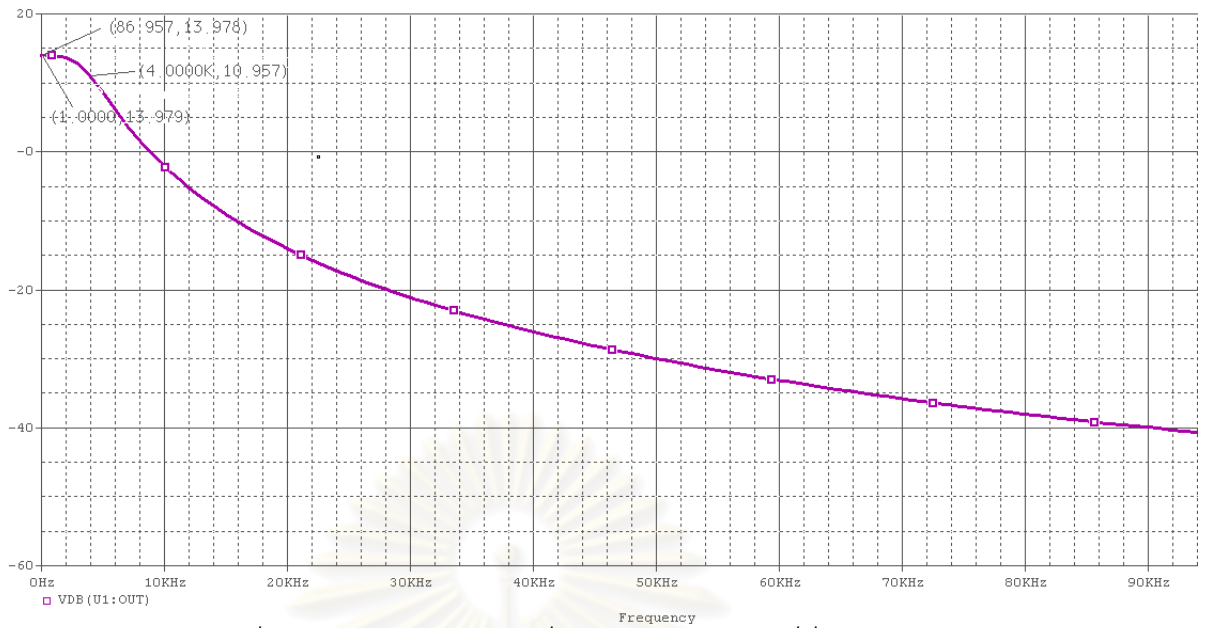
ในการออกแบบระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายนั้น สัญญาณ Input คือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระแสรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าวิ่งผ่านความต้านทานชัณฑ์ กระแสรั่วนี้มักจะมี noise ที่ความถี่สูงปะปนเข้ามาด้วยเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัด noise เหล่านี้ออกจากสัญญาณ Input เสียก่อนโดยการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) ซึ่งปรับปรุงให้มีความชัน  $-40 \text{ dB/decade}$  ตามรูปที่ 3.2



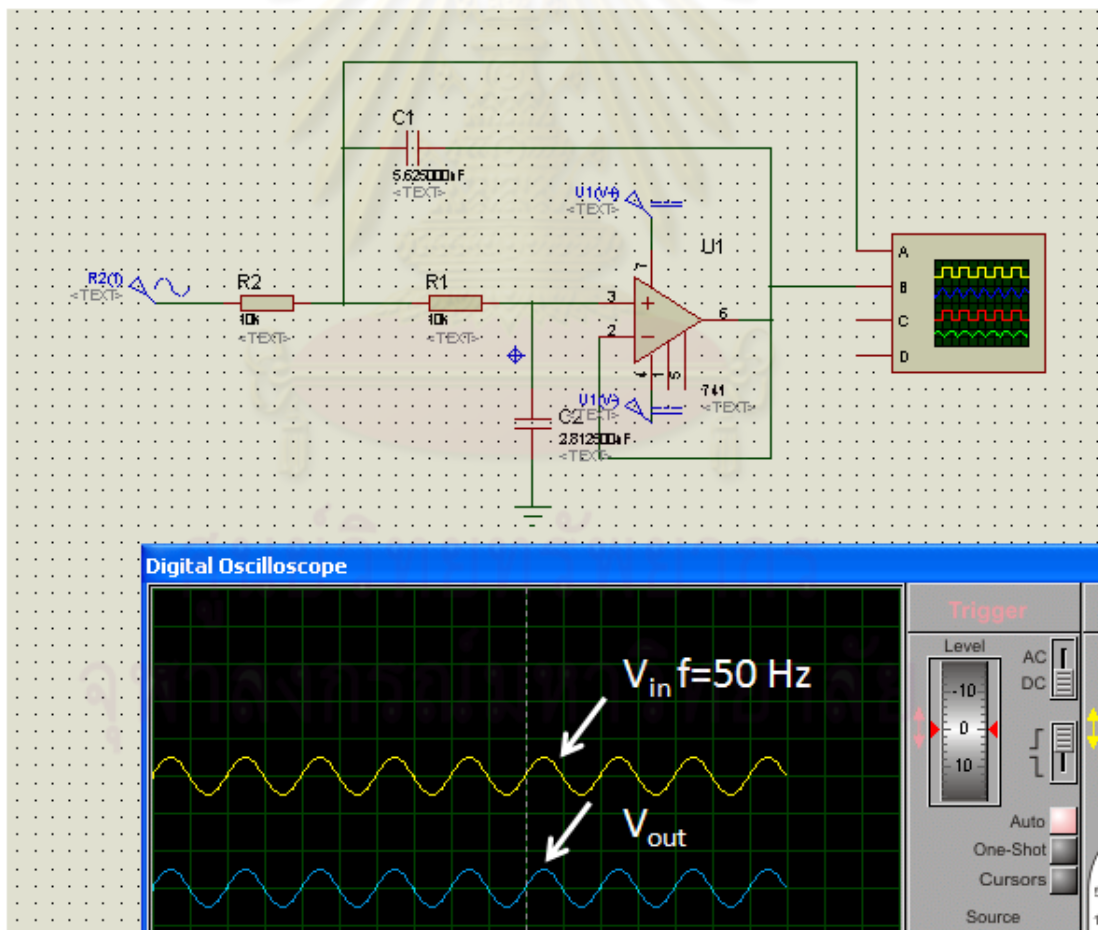
รูปที่ 3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระแสรั่วนี้คือ  $50 \text{ Hz}$  เช่นเดียวกับกับความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อไม่ให้สัญญาณที่ความถี่  $50 \text{ Hz}$  ถูกลดทอน จึงออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้มีความถี่ตัดออฟ (cut-off frequency) โดยใช้สมการที่ (2.14) ที่  $4 \text{ kHz}$  จากนั้นกำหนดค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  เท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  จึงสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่จะใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้  $C_1$  เท่ากับ  $5.6 \text{ nF}$  และ  $C_2$  เท่ากับ  $2.7 \text{ nF}$

ผลการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงได้ในรูปที่ 3.3 ถึง 3.6 เมื่อพิจารณาจากผลตอบสนองของความถี่ ของวงจรกรองความถี่ตามที่ได้ออกแบบไว้จะเห็นว่าสัญญาณที่ความถี่  $50 \text{ Hz}$  ไม่ได้ถูกลดทอน ในขณะที่สัญญาณที่ความถี่สูงจะถูกลดทอนตามลำดับ

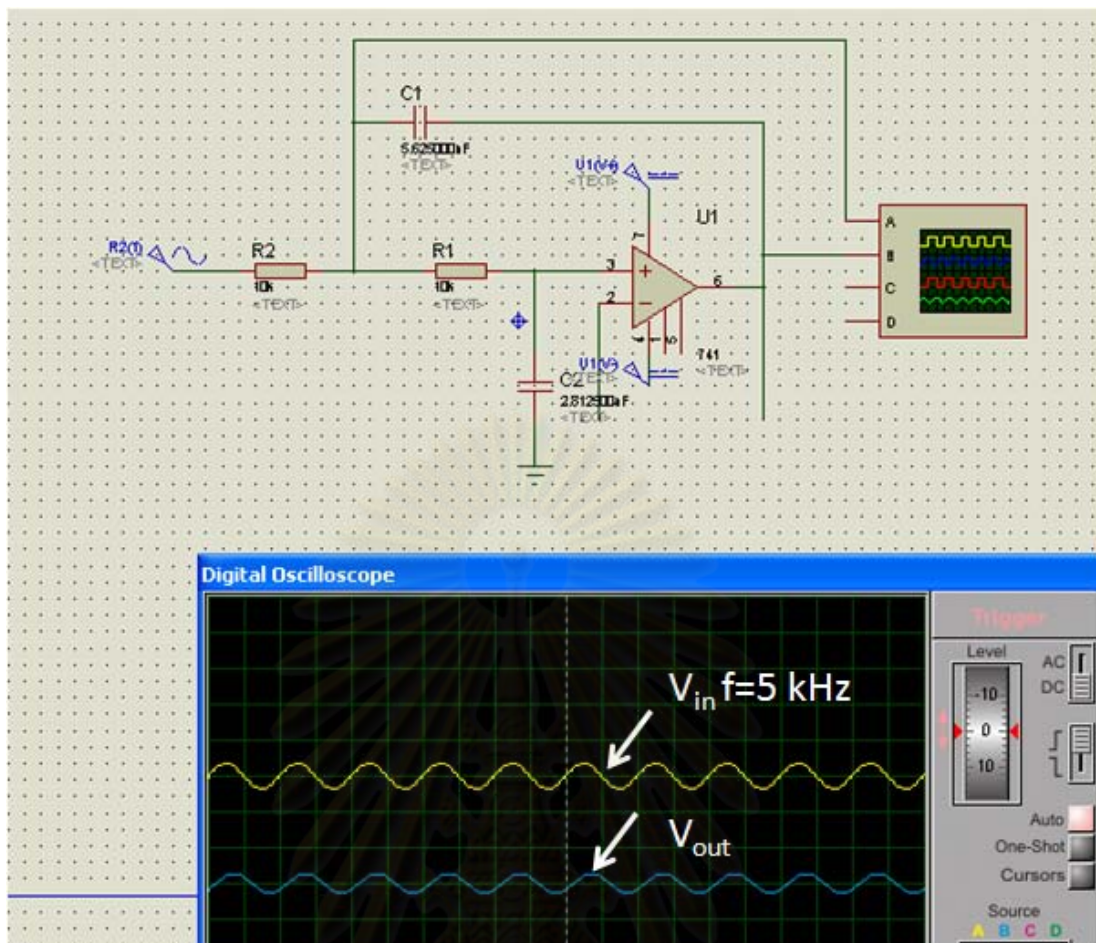


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่าน

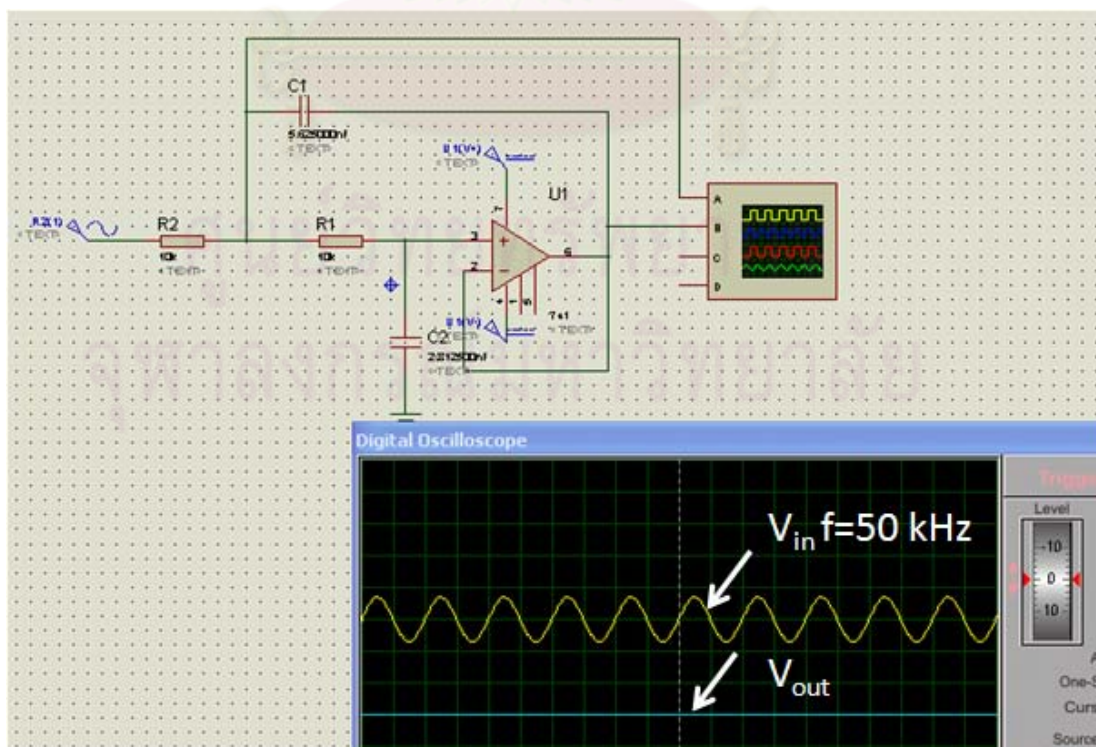


รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 50 Hz





รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 5 kHz

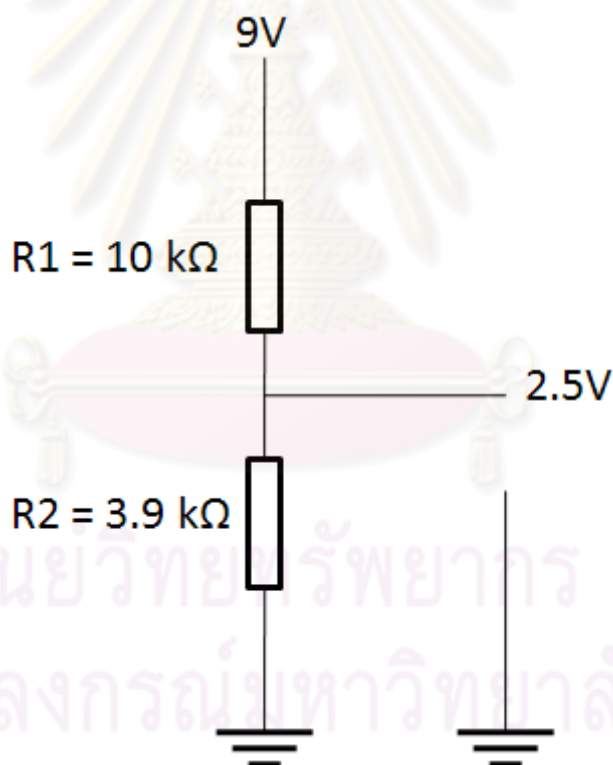


รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการลดทอนของสัญญาณ Input และ Output ที่ความถี่ 50 kHz

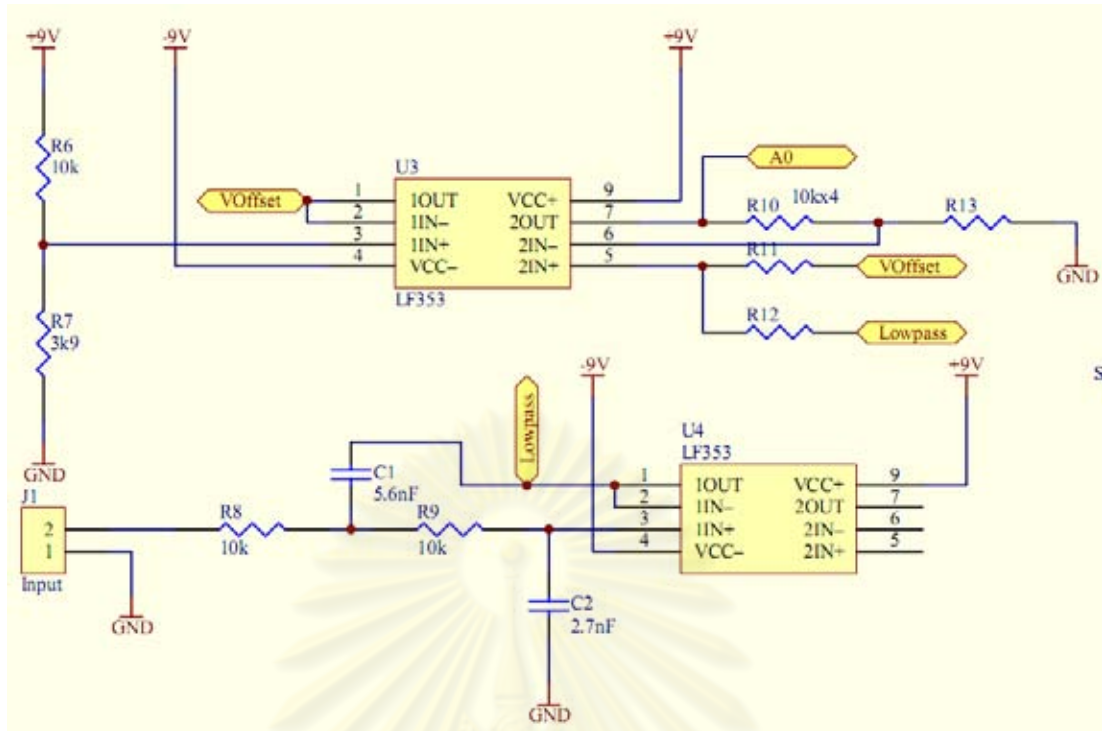
### 3.2 ชุดวงจรระดับแรงดัน

เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620 สามารถรับสัญญาณแรงดันได้ในระดับ 0 – 5V ในขณะที่สัญญาณ Input แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระแสรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าวิ่งผ่านความต้านทานชั้ตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีทั้งแรงดันด้านบวกและลบ จึงต้องทำให้สัญญาณ Input ดังกล่าวอยู่ในด้านบวกเสียก่อนโดยใช้ชุดวงจรระดับแรงดัน

เนื่องจากระบบเฝ้าติดตามคุณภาพขนวนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายได้ออกแบบให้แรงดันกระแสตรงขนาด 9 V เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงวงจรในระบบ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบชุดวงจรระดับแรงดันโดยใช้วงจรทอนแรงดัน (Voltage divider) ไฟเลี้ยงให้เหลือ 2.5 V ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นแรงดันระดับกึ่งกลางที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับได้ หลังจากนั้นใช้ Op-amp เพื่อทำการรวมแรงดันกระแสตรง 2.5 V เข้ากับแรงดันกระแสสลับที่ได้จากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านในหัวที่ผ่านมาเพื่อเป็นสัญญาณ Input ให้กับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไปดังแสดงได้ในรูปที่ 3.8

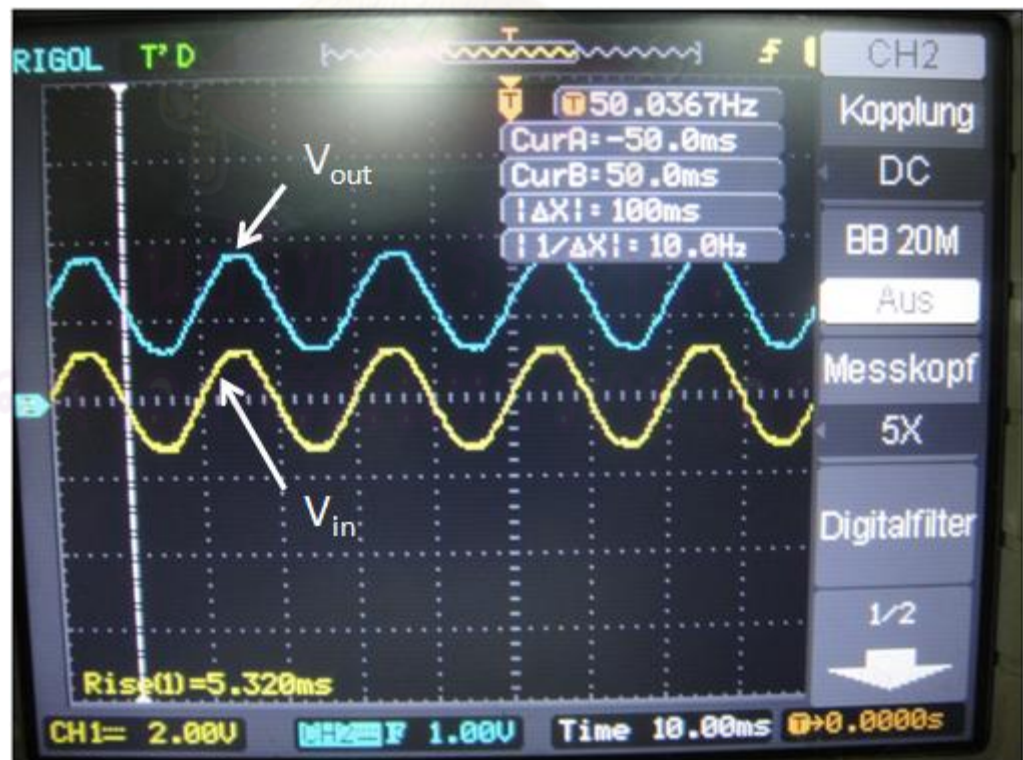


รูปที่ 3.7 วงจรทอนแรงดัน (Voltage divider)



รูปที่ 3.8 ชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและชุดวงจรยกระดับแรงดัน

ผลการทดสอบวงจรถ่ายระดับแรงดันแสดงได้ในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าวงจรถ่ายระดับแรงดันสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

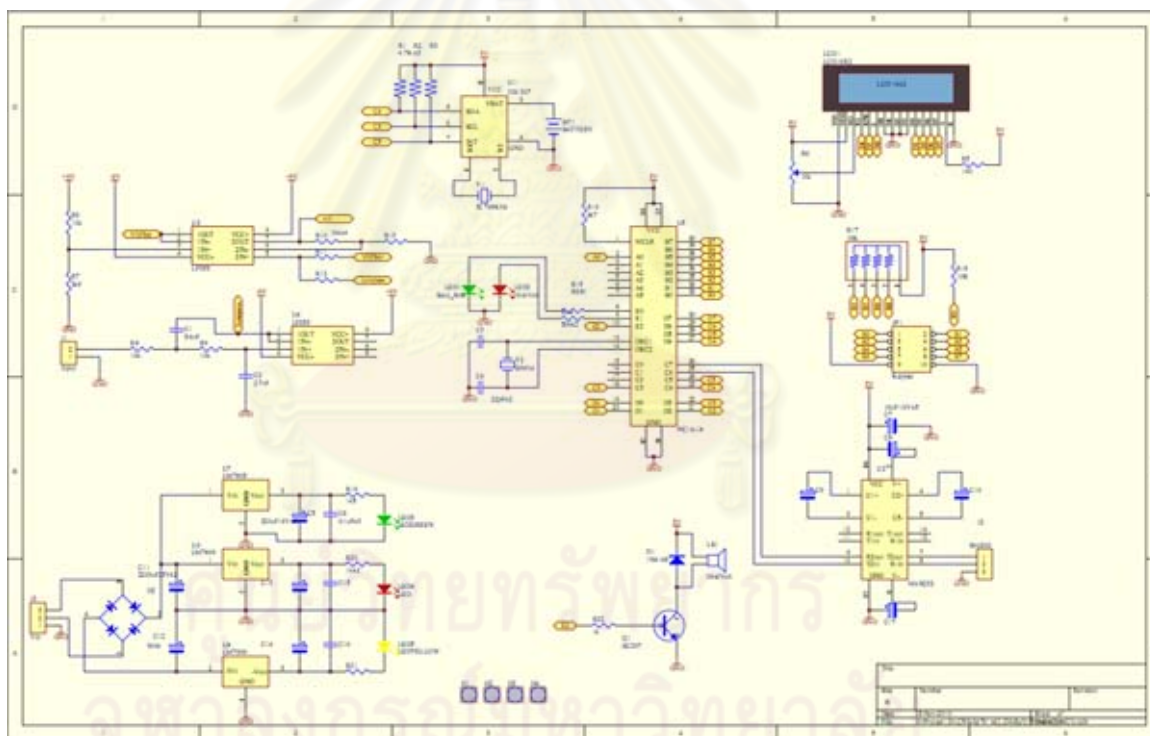


รูปที่ 3.9 การทดสอบวงจรถ่ายระดับแรงดัน

### 3.3 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพจนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ของบริษัท Microchip เบอร์ PIC18F4620 เนื่องจากมีโมดูลสำเร็จรูปที่รองรับการใช้งานอยู่หลายโมดูล ได้แก่

- โมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อรับและทำการแปลงสัญญาณจากวงจรของความถี่และวงจรระดับแรงดันเป็นค่าดิจิตอล หลังจากนั้นจะประมวลผลและคำนวณค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงเพื่อแสดงผลที่หน้าจอ LCD
  - โมดูลติดต่อสื่อสารอนุกรมเพื่อติดต่อสื่อสารกับระบบส่งสัญญาณ sms ในการส่งค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงเข้าสู่โทรศัพท์มือถือ
- ภาพรวมของชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาพรวมของชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



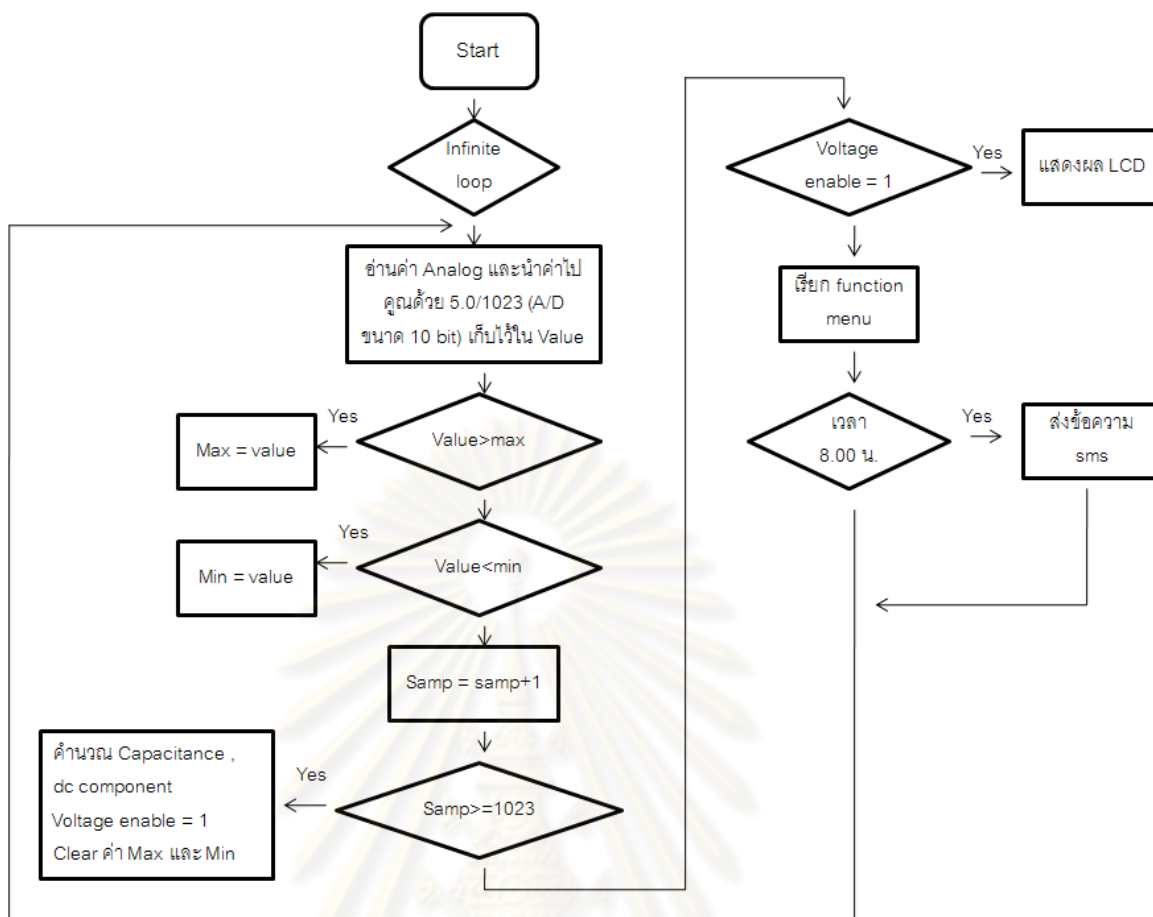
รูปที่ 3.11 ชุดวงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพพจนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

### 3.3.1 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

ชุดคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์จะพัฒนาโดยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C โดยใช้ชุดแปลคำสั่งโปรแกรม CCS เนื่องจากชุดคำสั่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

### 3.3.2 ชุดคำสั่งการทำงานหลัก

เป็นชุดคำสั่งการทำงานเพื่ออ่านค่าแรงดันที่ได้จากวงจรรองความถี่และวงจรยกระดับแรงดัน หลังจากนั้นจะคำนวณค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงเพื่อแสดงผลที่หน้าจอ LCD และส่งสัญญาณ sms เข้าสู่โทรศัพท์มือถือ ชุดคำสั่งหลักสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 3.12 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งหลัก

โปรแกรมจะทำงานตรวจจับแรงดันเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างต่อเนื่อง โดย จะทำการสุ่มสัญญาณที่มีความถี่ประมาณ 150 ไมโครวินาที เพื่อหาค่าแรงดันสูงสุด (Max) และ ค่าแรงดันต่ำสุด (Min) เมื่อได้ค่าแรงดันสูงสุดแล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของ ฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าจากสมการที่ (3.1) โดยจะต้องทำการป้อนค่าความต้านทานขั้วและ แรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูงในฟังก์ชันเมนู

$$C = \frac{V_{shunt}/R_{shunt}}{V_H \omega} \tag{3.1}$$

เมื่อ

- $C$  คือ ความจุไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า
- $V_{shunt}$  คือ ค่าสูงสุดของแรงดันที่อ่านค่าได้
- $R_{shunt}$  คือ ค่าความต้านทานขั้ว (ป้อนในฟังก์ชันเมนู)

$V_H$	คือ แรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง (ป้อนในฟังก์ชันเมนู)
$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม

ในส่วนของ การคำนวณค่าตัวประกอบกระแสตรงนั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับการหาค่าเฉลี่ยของกระแสหรือแวลต์ในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งลูกคลื่น (Half-wave Rectifier) โดยโปรแกรมจะคำนวณจากสมการที่ (3.2)

$$dc\ comp = \max av - \min av \quad (3.2)$$

เมื่อ

$dc\ comp$  คือ ตัวประกอบกระแสตรง

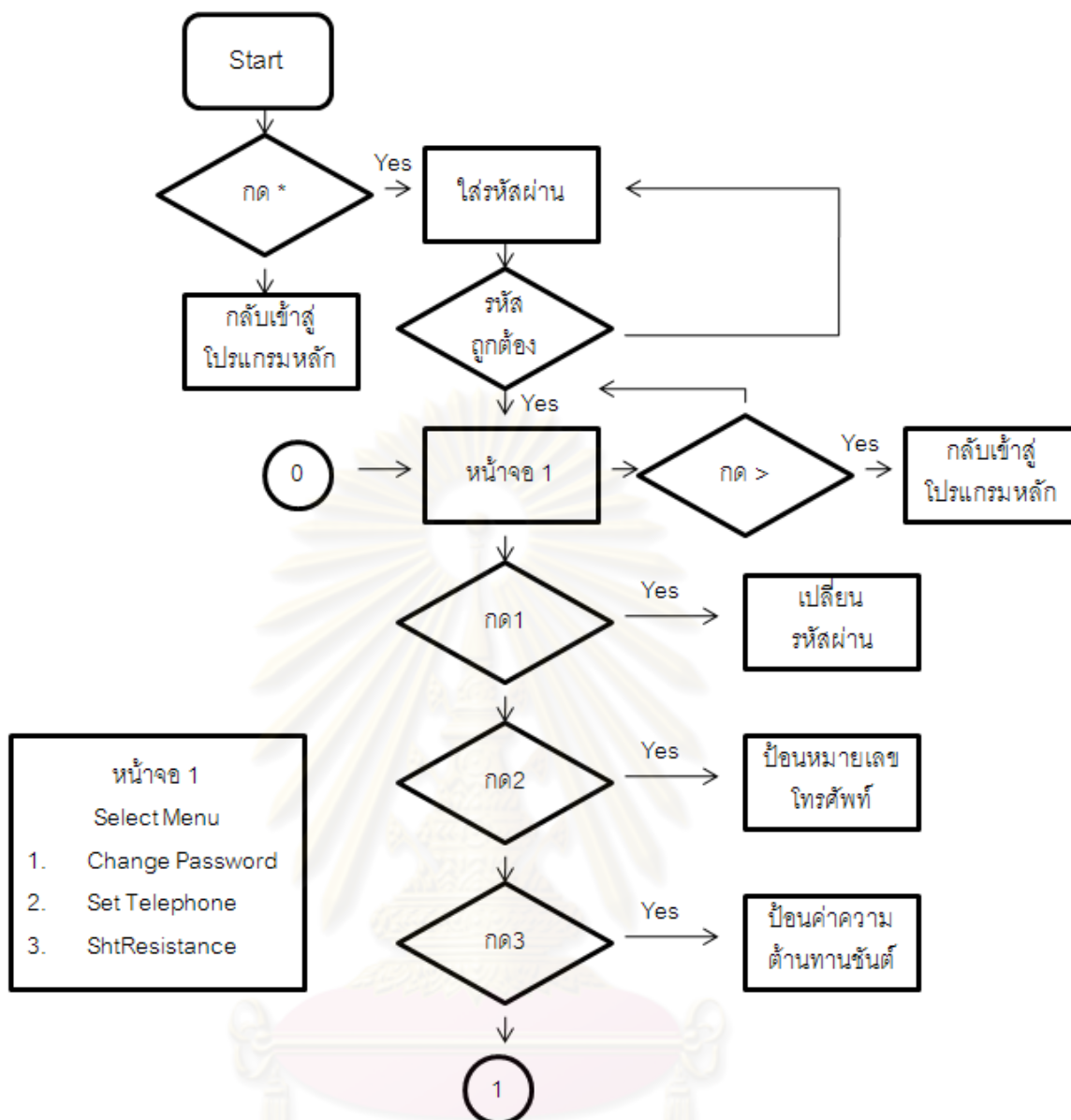
$\max av$  คือ  $(\max - 2.5) * 0.318$

$\min av$  คือ  $(2.5 - \min) * 0.318$

### 3.3.3 ชุดคำสั่งเมนู

เป็นชุดคำสั่งที่ใช้ในการป้อนค่าความต้านทานขั้ว และค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง เพื่อนำไปคำนวณในสมการ (3.1) นอกจากนั้นยังเป็นชุดคำสั่งที่ใช้ในการตั้งค่าวันที่และเวลา, หมายเลขโทรศัพท์มือถือที่จะให้ส่งข้อความ sms และรหัสผ่านเพื่อเข้าสู่ระบบอีกด้วย ชุดคำสั่งเมนูสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังนี้

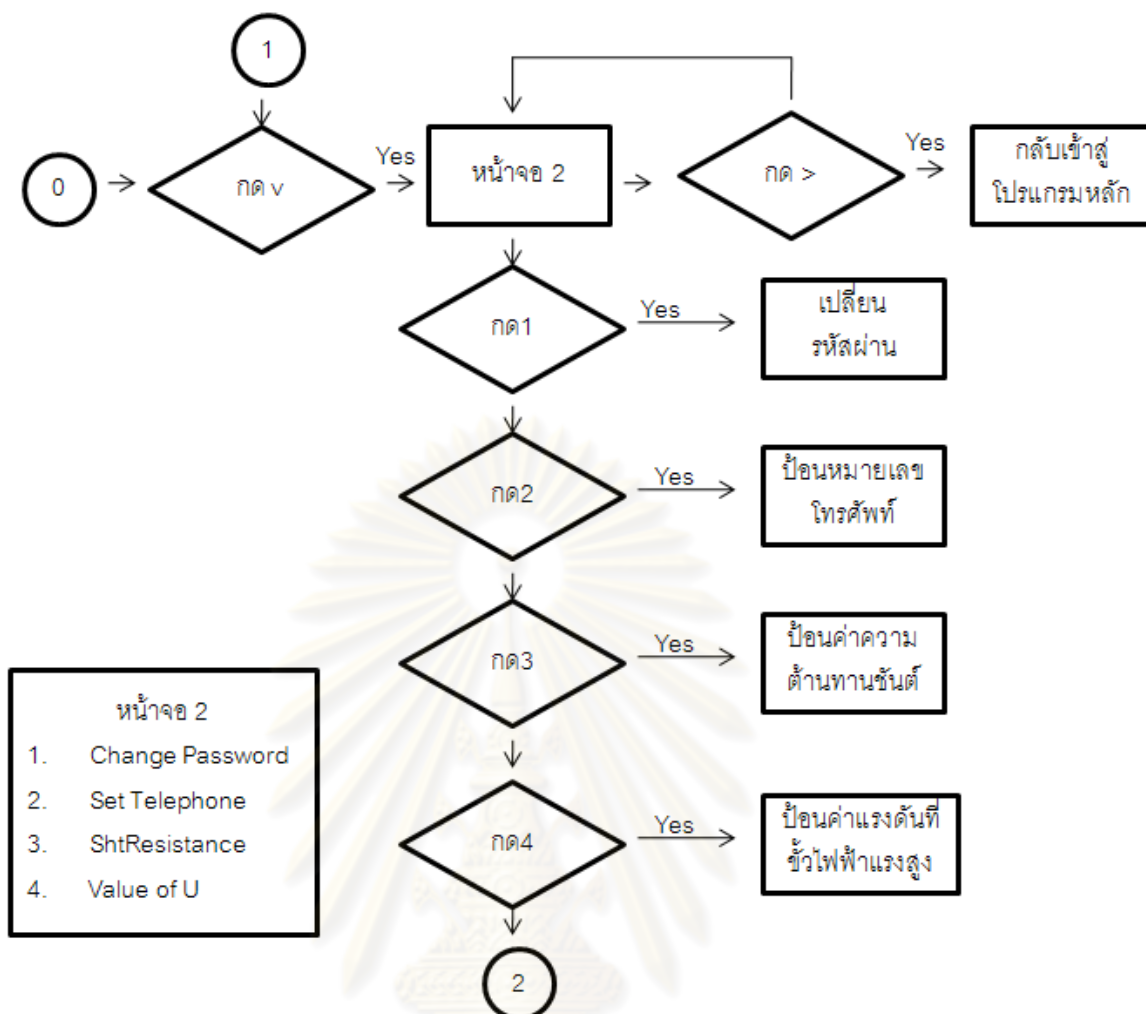
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 1

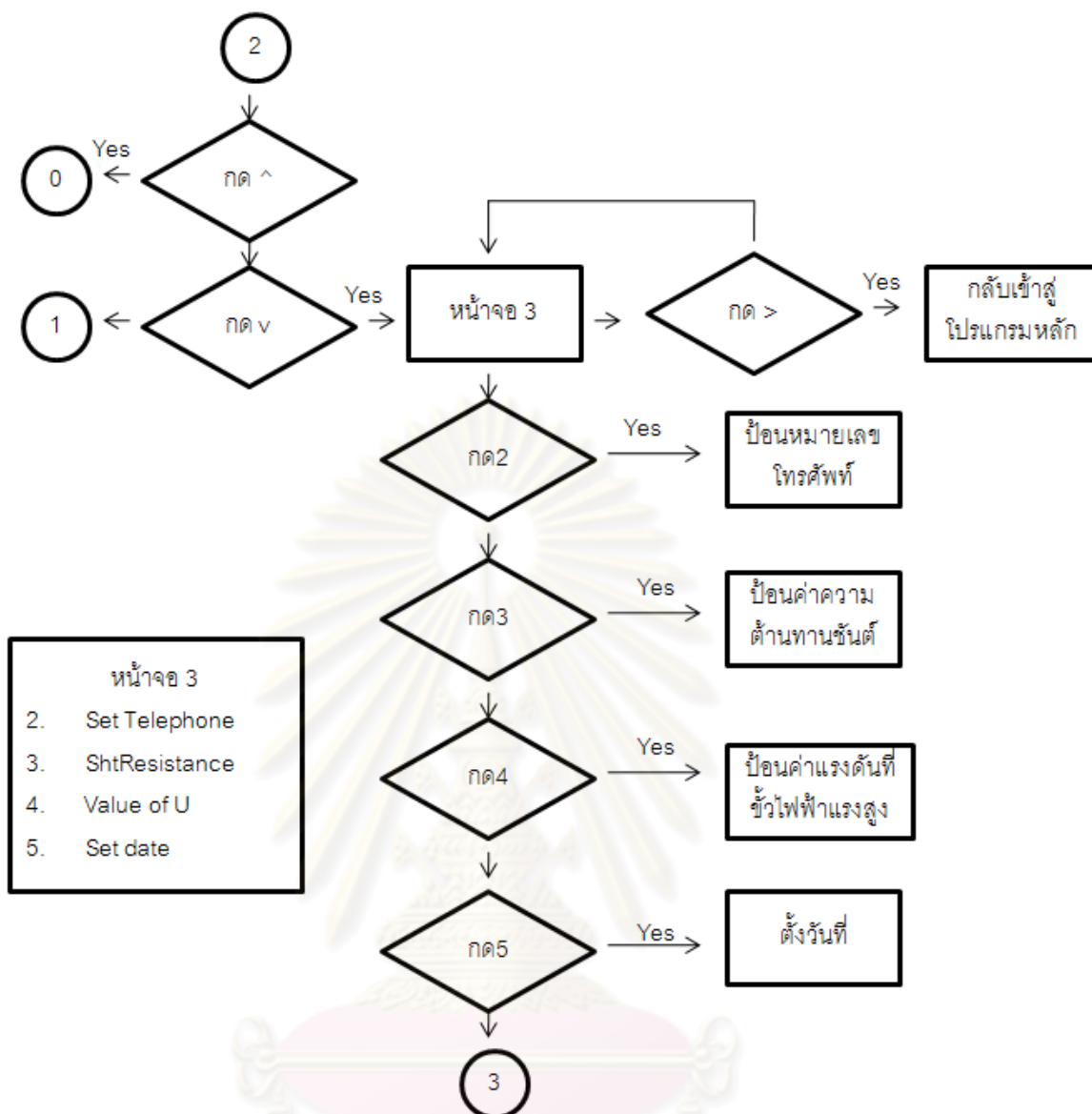
ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 1 จะประกอบด้วยเมนูเปลี่ยนรหัสผ่านเพื่อเข้าสู่ระบบ , เมนูป้อนค่าหมายเลขโทรศัพท์ที่จะให้ส่งข้อความ sms และเมนูป้อนค่าความต้านทานขั้นต่ำ เมื่อกดปุ่มลูกศรลง (v) จะทำการเข้าสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2 หากกดปุ่มลูกศรขวา (>) จะเป็นการออกจากชุดคำสั่งเมนูเพื่อเข้าสู่ชุดคำสั่งหลัก





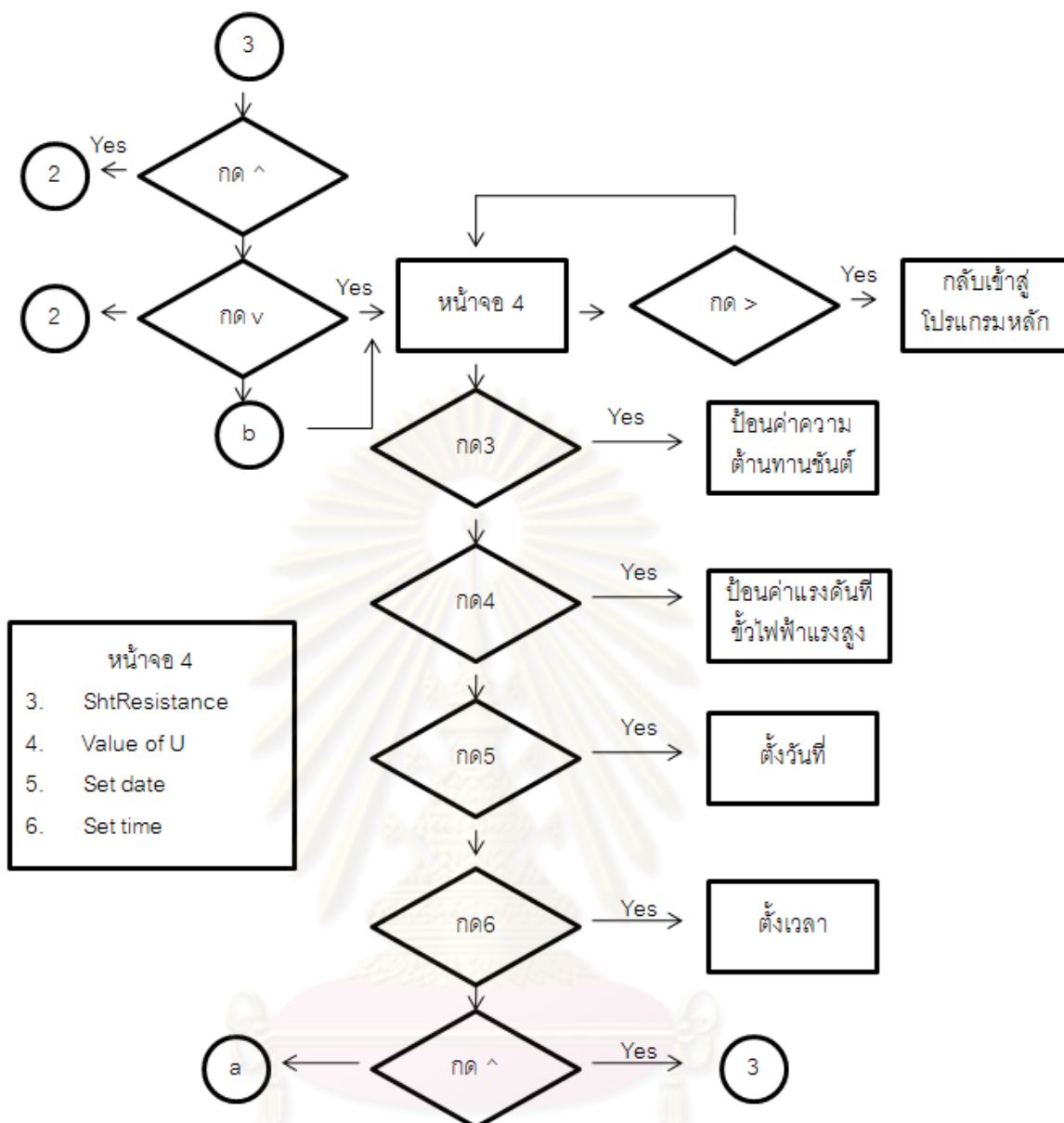
รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2

ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2 จะเป็นการเพิ่มเมนูจากชุดคำสั่งแรก เพื่อความต่อเนื่องของหน้าจอเมนู โดยประกอบด้วยเมนูเปลี่ยนรหัสผ่านเพื่อเข้าสู่ระบบ , เมนูป้อนค่าหมายเลขโทรศัพท์ที่จะให้ส่งข้อความ sms , เมนูป้อนค่าความต้านทานขั้ว และเมนูป้อนค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง เมื่อกดปุ่มลูกศรลง (v) จะทำการเข้าสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3 หากกดปุ่มลูกศรขวา (>) จะเป็นการออกจากชุดคำสั่งเมนูเพื่อเข้าสู่ชุดคำสั่งหลัก



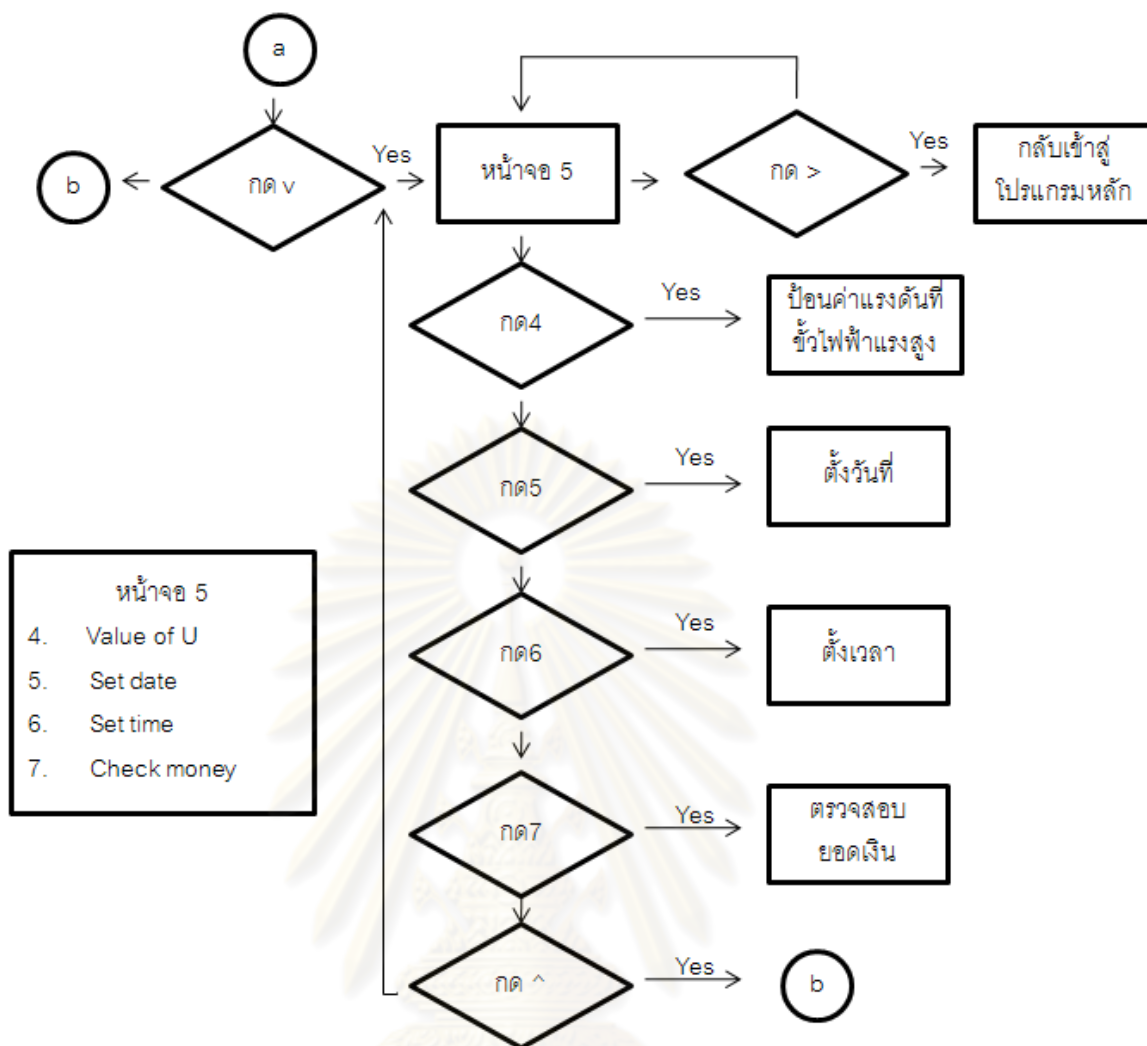
รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3

ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3 จะเป็นการเพิ่มเมนูจากชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2 เพื่อความต่อเนื่องของหน้าจอเมนู โดยประกอบด้วยเมนูป้อนค่าหมายเลขโทรศัพท์ที่จะให้ส่งข้อความ sms , เมนูป้อนค่าความต้านทานขั้ว , เมนูป้อนค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง และเมนูป้อนวันที่ เมื่อกดปุ่มลูกศรลง (v) จะทำการเข้าสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 4 หากกดปุ่มลูกศรขวา (>) จะเป็นการออกจากชุดคำสั่งเมนูเพื่อเข้าสู่ชุดคำสั่งหลัก นอกจากนั้นหากกดปุ่มลูกศรขึ้น (^) จะเป็นการกลับไปสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 2



รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 4

ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 4 จะเป็นการเพิ่มเมนูจากชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3 เพื่อความต่อเนื่องของหน้าจอเมนู โดยประกอบด้วยเมนูบ่อนค่าความต้านทานชนิด , เมนูบ่อนค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง , เมนูบ่อนวันที่ และเมนูบ่อนเวลา เมื่อกดปุ่มลูกศรลง (v) จะทำการเข้าสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 5 หากกดปุ่มลูกศรขวา (>) จะเป็นการออกจากชุดคำสั่งเมนูเพื่อเข้าสู่ชุดคำสั่งหลัก นอกจากนั้นหากกดปุ่มลูกศรขึ้น (^) จะเป็นการกลับไปสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที่ 3



รูปที่ 3.17 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งเมนูหน้าที 5

ชุดคำสั่งเมนูหน้าที 5 จะเป็นการเพิ่มเมนูจากชุดคำสั่งเมนูหน้าที 3 เพื่อความต่อเนื่องของหน้าจอเมนู โดยประกอบด้วยเมนูป้อนค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง , เมนูป้อนวันที่ , เมนูป้อนเวลา และเมนูตรวจสอบยอดเงิน เมื่อกดปุ่มลูกศรลง (v) จะทำการเข้าสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที 5 หากกดปุ่มลูกศรขวา (>) จะเป็นการออกจากชุดคำสั่งเมนูเพื่อเข้าสู่ชุดคำสั่งหลัก นอกจากนั้นหากกดปุ่มลูกศรขึ้น (^) จะเป็นการกลับไปสู่ชุดคำสั่งเมนูหน้าที 4

### 3.4 การประกอบสร้าง

เมื่อประกอบสร้างระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ อยู่ในระบบจำหน่ายแล้วเสร็จจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 โดยด้านหน้าของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ อยู่ในระบบจำหน่ายจะประกอบไปด้วยปากคืบ เพื่อรองรับแรงดันไฟฟ้าที่ได้กระแสรั่วของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าวิ่งผ่านความต้านทานชั้นดี หน้าจอ

LCD เพื่อแสดงการประมวลผลค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบการแสดงของฉนวน และ keypad เพื่อให้ในการป้อนค่าความต้านทานขั้ว , ค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง ค่าวันที่และเวลา, หมายเลขโทรศัพท์มือถือที่จะให้ส่งข้อความ sms และรหัสผ่านเพื่อเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.18 ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายประกอบแล้วเสร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การทดลองในเซลล์ทดลอง

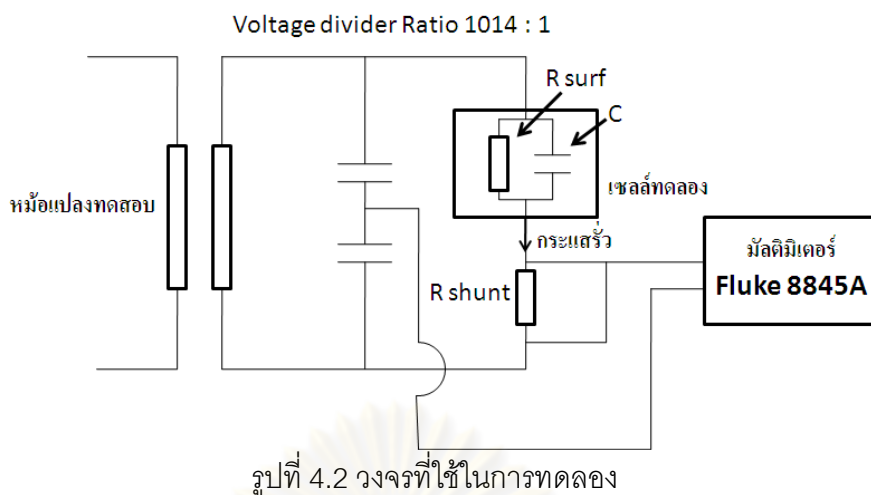
ในการทดลองเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนจากการวัดกระแสรั่ว ซึ่งในที่นี้จะใช้ฉนวนน้ำมันแร่ในการศึกษา จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่เข้าเซลล์ทดลองตามรูปที่ 4.1 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของฝาเท่ากับ 10 เซนติเมตรและมีส่วนสูง 8 เซนติเมตรโดยเซลล์ทดลองสามารถบรรจุน้ำมันแร่เข้าไปได้ ซึ่งเปรียบเสมือนฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะใช้งาน



รูปที่ 4.1 เซลล์ทดลอง

#### 4.1.1 การใช้กระแสรั่วในการหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดลอง

จุดประสงค์ของการทดลองนี้คือการยืนยันว่าเราสามารถกระแสรั่วเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนได้หรือไม่ ดังนั้นในการทดลองวัดขนาดของกระแสรั่ว จะทำได้โดยการคำนวณจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นดีไนวงจรถัดรูปที่ 4.2 หลังจากนั้นทำการวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นดีไนวงจรถัดที่ได้จากกระแสรั่วโดยใช้มัลติมิเตอร์และคำนวณกลับเป็นกระแสรั่ว ในขณะที่เดียวกันใช้โวลต์จีโอเดอริ์วัดค่าแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบ เพื่อสังเกตค่าแรงดันที่จ่ายให้กับเซลล์ทดลอง

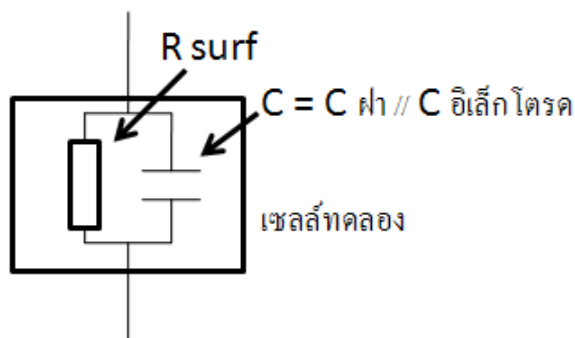


ในการทดลอง จะติดตั้งอิเล็กโตรดของเหล็องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตรที่ฝาของเซลล์ทดลองตามรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถปรับช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดของเหล็องได้ เพื่อทดลองว่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลองที่คำนวณได้จากกระแสรั่ว เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลองทางทฤษฎี (ความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากโครงสร้างและอิเล็กโตรดของเซลล์ทดลอง) แตกต่างกันเพียงไร เพื่อพิสูจน์ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากกระแสรั่วมีความถูกต้อง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเซลล์ทดลอง จะพบว่าในเซลล์ทดลองไม่ได้มีแค่ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดลองเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่จะประกอบด้วยค่าความต้านทานพื้นผิว อันเป็นผลเนื่องมาจากฝาและผนังของเซลล์ทดลอง นอกจากนั้นความจุไฟฟ้าของฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดลอง จะประกอบด้วยความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากฝาชนานกับความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอิเล็กโตรด เราจึงสมมุติให้เซลล์ทดลองประกอบด้วยค่าความต้านทานพื้นผิวและค่าความจุไฟฟ้า โดยมีวงจรสมมูลตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การติดตั้งอิเล็กโตรดเข้ากับเซลล์ทดลอง



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของเซลล์ทดลอง

เพื่อให้ผลของการวัดค่ากระแสรั่ว เป็นค่าอันเนื่องมาจากความจุไฟฟ้าของฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดลองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องกำจัดผลของค่าความต้านทานพื้นผิวของเซลล์ทดลองออกก่อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การใช้การ์ดริง หรือ การหาค่าความต้านทานพื้นผิวของเซลล์ทดลอง สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้วิธีหลัง เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องทดลอง โดยไม่จำเป็นต้องลงทุนเพิ่มเติม

การหาค่าความต้านทานพื้นผิวของเซลล์ทดลอง ทำได้โดยป้อนแรงดันกระแสสลับขนาดต่างๆ ให้เซลล์ทดลอง (ฉนวนอากาศ) ที่ไม่ได้ติดตั้งอิเล็กโตรดของเหลืองตามรูปที่ 4.1 ซึ่งคำนวณค่าความจุไฟฟ้า จากนั้นบันทึกค่ากระแสที่ได้ ความชันของกราฟระหว่างแรงดันและกระแสคือค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ทดลอง จากนั้นจึงหาค่าความต้านทานพื้นผิวจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.4

ทำการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน ที่บรรจุในเซลล์ทดลอง 2 ครั้งโดยใช้อากาศและน้ำมันแร่ ( $\epsilon_R = 2.22$ ) เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดของเหลือง จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาดคงที่ 3 kV เข้าไปที่เซลล์ทดลอง วัดค่ากระแสรั่วและคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในเซลล์ทดลองจากสมการที่ (4.1)

$$C = \frac{V_{shunt}/R_{shunt}}{V_{sup}\omega} - \frac{1}{R_{surf}\omega} \quad (4.1)$$

เมื่อ

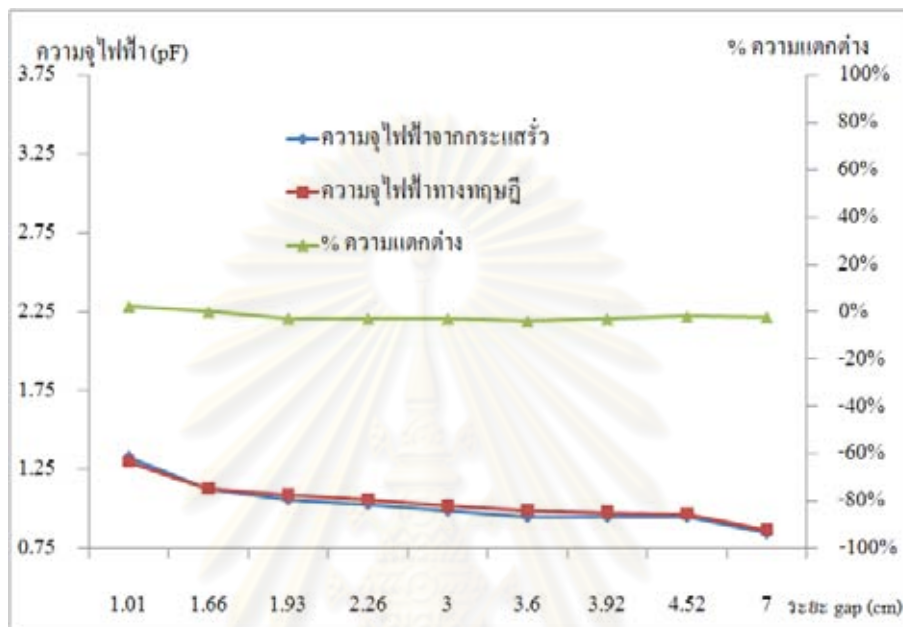
 $C$  คือ ความจุไฟฟ้าของฉนวนในเซลล์ทดลอง $V_{shunt}$  คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทานชัณฑ์ $R_{shunt}$  คือ ค่าความต้านทานชัณฑ์ มีค่า  $15 \text{ k}\Omega$  $V_{sup}$  คือ แรงดันจ่ายเซลล์ทดลอง



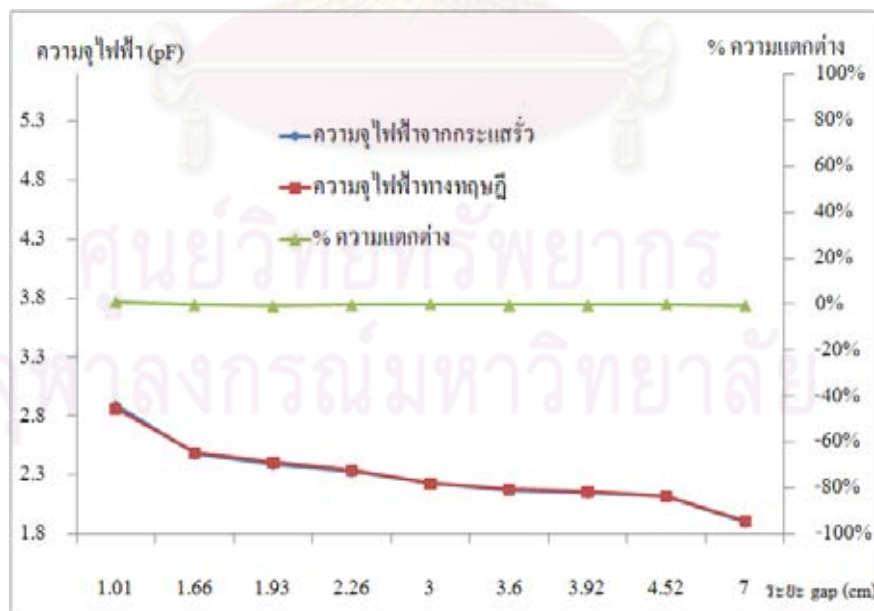
$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม

$R_{surf}$  คือ ความต้านทานพื้นผิว มีค่า  $335.7 \text{ M}\Omega$

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลอง (ฉนวนอากาศ)



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์ทดลอง (ฉนวนน้ำมันแร่)

จากผลการทดลอง พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากกระแสรั่วเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าทางทฤษฎี มีความใกล้เคียงกันมากทั้งในฉนวนอากาศและน้ำมันแร่ การทดลองนี้พิสูจน์ให้เห็นว่า เราสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ของฉนวนจากการวัดกระแสรั่วจากเซลล์ทดลองได้

#### 4.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วเมื่อฉนวนเหลวเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้จะเป็นการดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะของกระแสรั่วเมื่อสภาพของฉนวนมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวนเนื่องจากสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงลักษณะของฉนวนได้ ลักษณะของกระแสรั่วที่จะพิจารณาคือตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่ว

จากทฤษฎีที่ผ่านมาทำให้รู้ว่าน้ำมันแร่จะมีความนำไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อน้ำหรือฝุ่นผงจากการ arc เข้าไปผสมอยู่ในน้ำมันแร่ ซึ่งความนำไฟฟ้านี้จะส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปและจะทำให้ลักษณะของกระแสรั่วเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ในการทดลองจะทำการติดตั้ง electrode ขนาดเล็กลงไปใฝ่ลวดมูนิเยมบนและล่างของเซลล์ทดลองและทำการกำหนดระยะช่องว่างระหว่าง electrode บนและล่างให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.81 เซนติเมตรใส่น้ำมันแร่เข้าไปใน test cell ให้ท่วม electrode บน จากนั้นป้อนแรงดันกระแสสลับขนาด 3 kV เข้าไปที่ test cell แล้วทำการวัดค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วออกมา โดยทำการเปลี่ยนคุณภาพของน้ำมันที่ใช้ไปเรื่อยๆ ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่

4.1

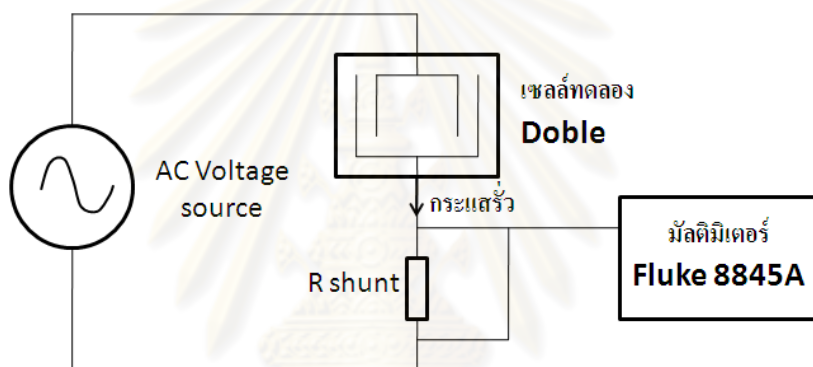
ตารางที่ 4.1 การทดลองวัดตัวประกอบกระแสตรงของน้ำมันแร่กรณีต่างๆ

ฉนวน	dc component (uA)
อากาศ	0.600
น้ำมันสะอาด	0.740
น้ำมันผสมน้ำมันเก่า 1% ปริมาตร	0.771
น้ำมันผสมน้ำมันเก่า 2% ปริมาตร	0.778
น้ำมันผสมน้ำมันเก่า 3% ปริมาตร	0.784
น้ำมันผสมน้ำมันเก่า 4% ปริมาตร	0.804
น้ำมันผสมน้ำมันเก่า 5% ปริมาตร	0.807

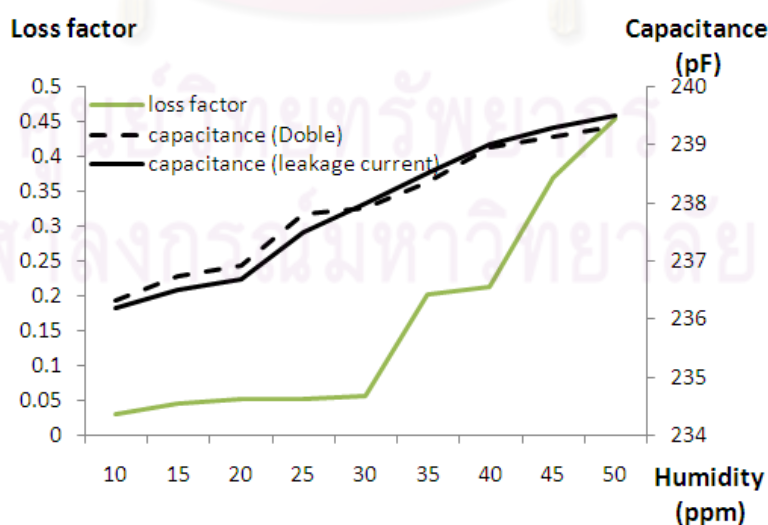
ผลการทดลองจากตารางข้างต้นจะเห็นว่าค่าตัวประกอบกระแสตรงมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันแร่มีคุณภาพแย่งหรือมีฝุ่นจากการ arc มากขึ้น

### 4.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนเมื่อฉนวนเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้ จะทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นของน้ำมันแร่เพื่อสังเกตผลของความชื้นที่มีต่อค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่ ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันแร่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเซลล์ทดลองที่กำหนดผลของความต้านทานพื้นผิวแล้ว ทำการหาค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์หี้อ Doble รุ่น M4100 เปรียบเทียบกับการวัดค่ากระแสรั่วจากเซลล์ทดลองผ่านความต้านทานชนิดดังรูปที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



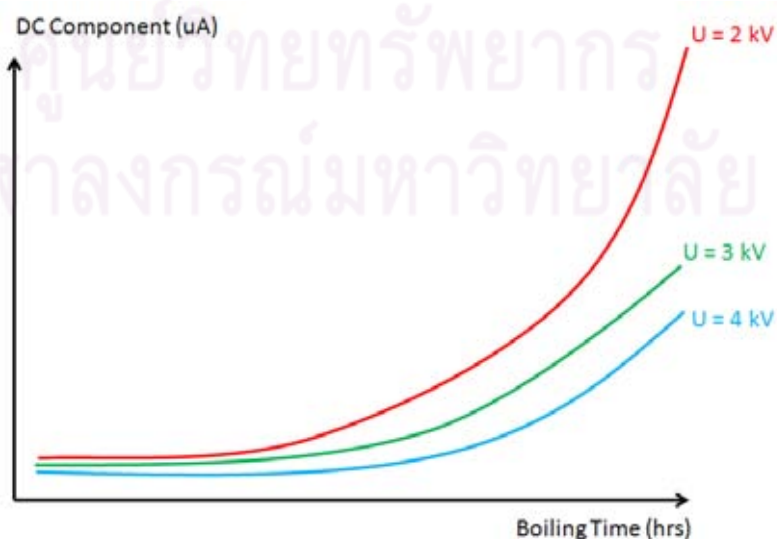
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่เมื่อความชื้นของน้ำมันแร่มีการเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองพบว่าค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจพูดได้ว่าคุณภาพของน้ำมันแร่แยลง [7] ซึ่งสอดคล้องกับค่ากระแสรั่วที่มากขึ้น ดังนั้นเราจึงสามารถใช้กระแสรั่วในการหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่เมื่อความชื้นของน้ำมันแร่มีการเปลี่ยนแปลงได้

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบผลการหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่โดยการคำนวณจากกระแสรั่วจากสมการที่ 4.1 (ไม่คิดผลของพจน์ที่มีความต้านทานพื้นผิว) กับค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่ที่วัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์หี้อ Doble รุ่น M4100 พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่า เราสามารถใช้การวัดกระแสรั่วเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่ได้

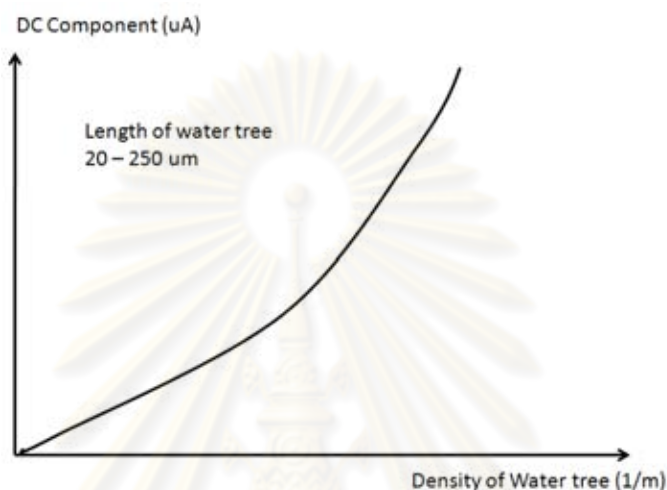
#### 4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 พบว่าเราสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนจากการวัดกระแสรั่วจากเซลล์ทดลองได้ ในหัวข้อ 4.1.2 พบว่าตัวประกอบกระแสตรงมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันแร่มีคุณภาพแยลงหรือมีฝุ่นจากการ arc มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ C. Zhang, S. Sheng, J. Yang, X. Chi [11] เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในฉนวนแข็ง XLPE ที่เปลี่ยนสภาพไปจากการทดลองต้มฉนวนแข็งเป็นเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้เกิดต้นไม้ (water tree) ได้ง่ายขึ้น จากผลการทดลองของ C. Zhang, S. Sheng, J. Yang, X. Chi พบว่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในกรณีของฉนวน XLPE ที่ต้มเป็นเวลานานจะมีค่ามากกว่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในฉนวน XLPE ที่มีสภาพสมบูรณ์มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในฉนวน XLPE

นอกจากนี้ W. Zhang, Y. Zhu, B. Yang, Y. Liu [12] ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วต่อความหนาแน่นของต้นไม้ใน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากรูปจะเห็นว่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความหนาแน่นของต้นไม้ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณความนำไฟฟ้าของฉนวนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่ว



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วต่อความหนาแน่นของต้นไม้ในฉนวน XLPE

พิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 ที่ได้เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีตที่ได้แสดงในข้างต้นจะเห็นว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วเมื่อฉนวนมีการเสื่อมสภาพไปมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

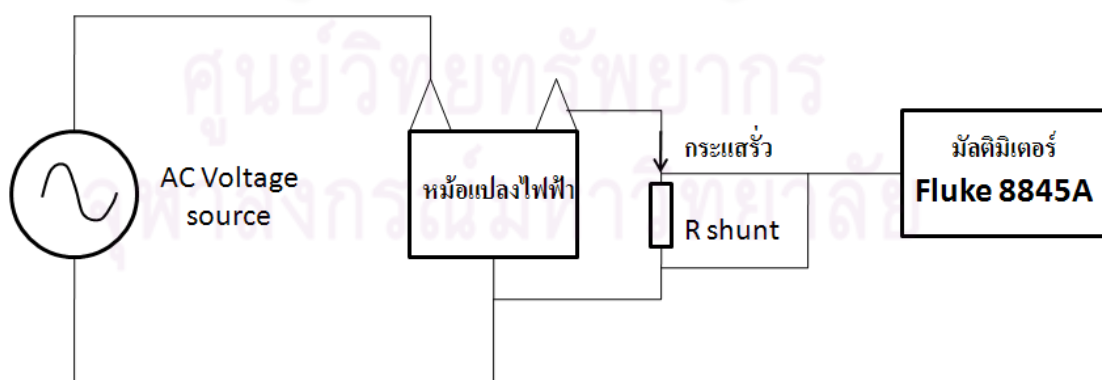
หลังจากนั้น ในหัวข้อ 4.1.3 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น หรือคุณภาพของน้ำมันแร่แยกลง โดยสอดคล้องกับค่ากระแสรั่วที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้น้ำมันแร่มีความนำไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อความนำไฟฟ้าของน้ำมันแร่มีค่ามากขึ้นกระแสรั่วจึงเพิ่มตาม และส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการวัดกระแสรั่วเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่ได้ผลใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ จึงสรุปได้ว่าเราสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าของน้ำมันแร่ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะใช้งานได้ตลอดเวลาจากการวัดกระแสรั่ว

## 4.2 การทดลองในหม้อแปลงไฟฟ้า

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาเราพบว่า เราสามารถใช้กระแสรั่วในการหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนเหลว ซึ่งเป็นแบบจำลองของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า ในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าอยู่ระหว่างการใช้งานจริงได้ และความจุไฟฟ้าของฉนวนเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพของฉนวนเหลว ซึ่งในการทดลองต่อไปนี้จะใช้แนวคิดของการใช้กระแสรั่วในการหาค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวกับการหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะใช้งานจริง โดยทำการเปรียบเทียบกระแสรั่วและค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีฉนวนในสภาพการใช้งานที่ต่างกัน สุดท้ายจะเปรียบเทียบผลการทดลองจากการใช้เครื่องมือวัดในห้องทดลอง , ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น กับเครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีจำหน่ายอยู่ตามท้องตลาดว่ามีความแม่นยำเพียงไร

### 4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดที่มีในห้องทดลอง

ในการทดลองนี้จะต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3 kVA , 220/20kV ตามรูปที่ 4.11 โดยจะจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้านแรงต่ำ เมื่อจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้านแรงต่ำจะเกิดแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง จากการทดลองจะปรากฏกระแสรั่วที่ปลอกฉนวนนำสายของขั้วไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะต่อสายตัวนำเข้ากับปลอกฉนวนนำสายนี้ เพื่อทำการวัดกระแสรั่วจากฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งกระแสรั่วนี้จะไหลผ่านความต้านทานชัณฑ์ ทำการวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานชัณฑ์โดยใช้มัลติมิเตอร์เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 จากนั้นจึงคำนวณกลับเป็นค่าความจุไฟฟ้า

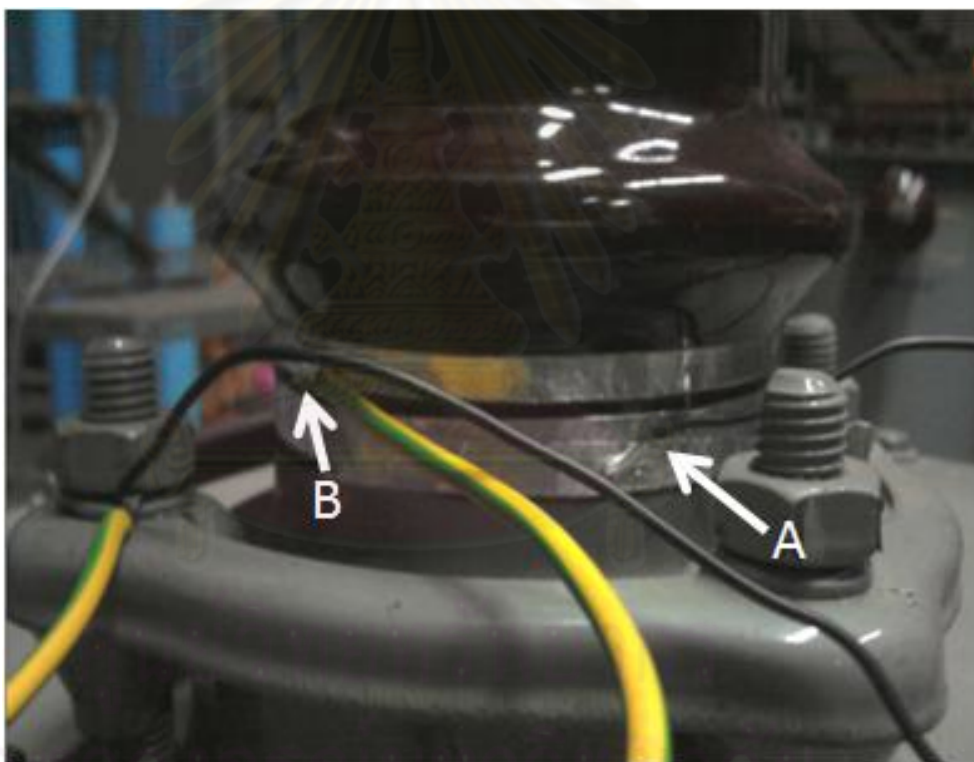


รูปที่ 4.11 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

การวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานชัณฑ์อื่นเนื่องมาจากกระแสรั่วที่ปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลงไฟฟ้านี้ทำได้โดยใช้เทปตัวนำ (Conductive tape) พันไว้รอบฐานของ

ปลอกฉนวนนำสาย จากนั้นจึงต่อลวดตัวนำเข้ากับเทปตัวนำเพื่อต่อกับความต้านทานชั้นถัดไป ดังแสดงได้ในจุด A ของรูปที่ 4.12

พิจารณาปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลงไฟฟ้า จะพบว่ากระแสรั่วที่ออกจาก ปลอกฉนวนนำสายนั้นไม่ได้มีส่วนประกอบเฉพาะกระแสรั่วอันเนื่องมาจากความจุไฟฟ้าของ ปลอกฉนวนนำสายและโครงสร้างภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่จะประกอบไปด้วยกระแสรั่วอัน เนื่องมาจากความต้านทานพื้นผิวของปลอกฉนวนนำสายเอง ดังนั้นจึงต้องกำจัดผลของกระแสรั่วอัน เนื่องมาจากความต้านทานพื้นผิวของปลอกฉนวนนำสายนี้เสียก่อน โดยการใช้เทปตัวนำพันไว้รอบ ปลอกฉนวนนำสายบริเวณเหนือเทปตัวนำในจุด A ดังแสดงได้ในจุด B ของรูปที่ 4.12 จากนั้นจึง ต่อลวดตัวนำเข้ากับจุด B ลงกราวด์เพื่อนำกระแสรั่วอันเนื่องมาจากความต้านทานพื้นผิวลงพื้นดิน ต่อไป ซึ่งการพันเทปตัวนำลักษณะนี้เรียกว่าการดีริง



รูปที่ 4.12 การต่อเทปตัวนำเข้ากับปลอกฉนวนนำสาย

การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงในการทดลองนี้จะทดลอง เปรียบเทียบในหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุงโดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อ แปลงและอบขดลวด เพื่อสังเกตความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงจาก การวัดกระแสรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 สภาวะ

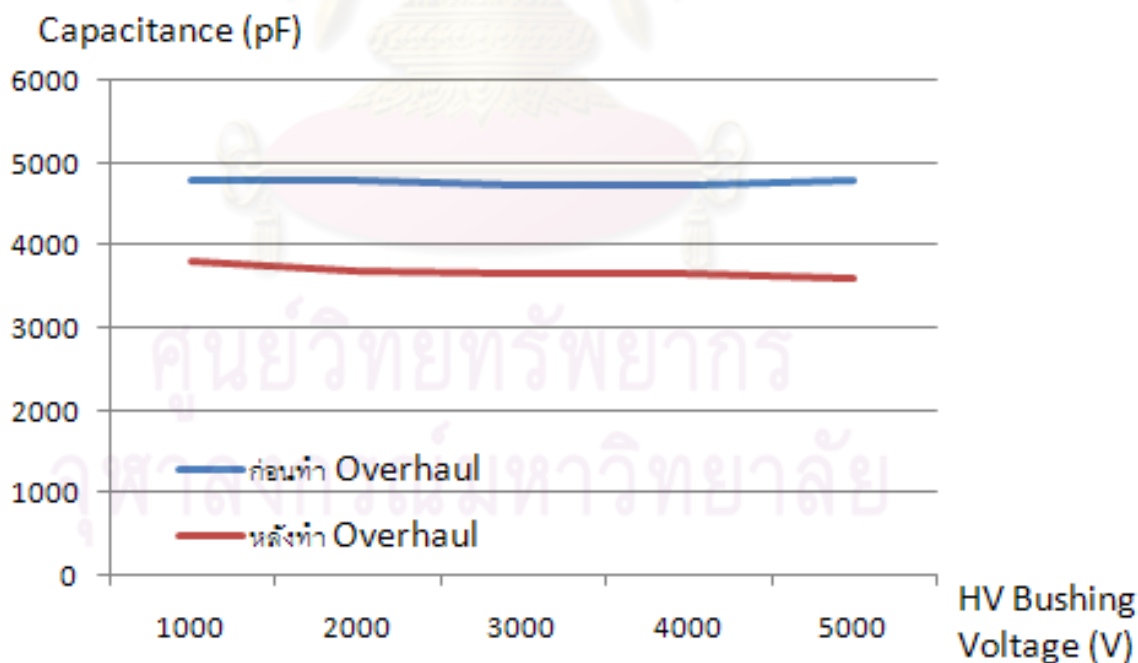
ในการทดลองจะทำการเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าด้านแรงต่ำ จากนั้นวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นที่ได้จากกระแสรั่วเพื่อคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าจากสมการที่ (4.2) และทำการวัดตัวประกอบกระแสรั่วจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นเช่นกัน

$$C = \frac{V_{shunt}/R_{shunt}}{V_H \omega} \quad (4.2)$$

เมื่อ

$C$	คือ ความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า
$V_{shunt}$	คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้น
$R_{shunt}$	คือ ค่าความต้านทานชั้น มีค่า $100 \Omega$
$V_H$	คือ แรงดันที่ขั้วไฟฟ้าแรงสูง
$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม

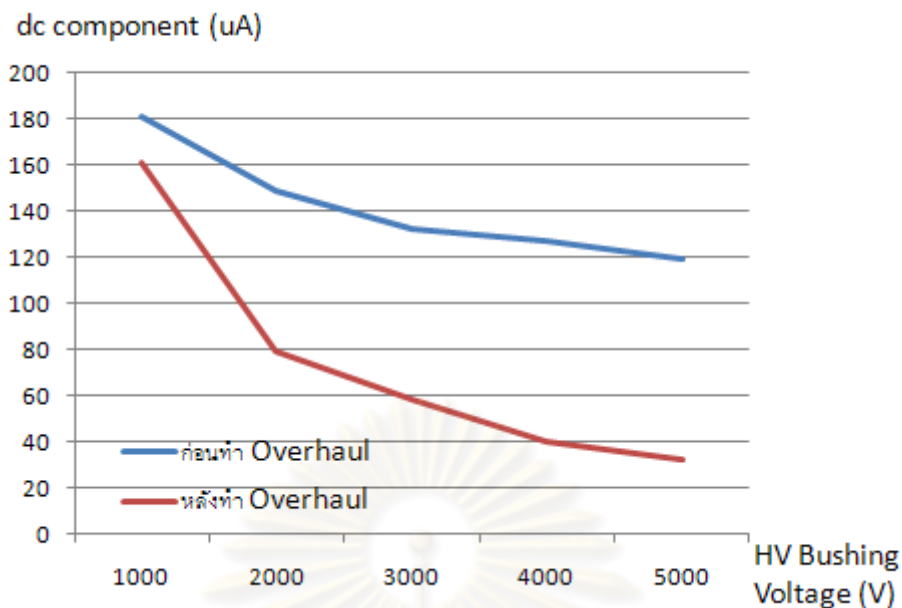
ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.13 , 4.14 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าจากกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัด

ในห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง





รูปที่ 4.14 ผลการทดลองวัดค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดในห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดในห้องทดลอง เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง

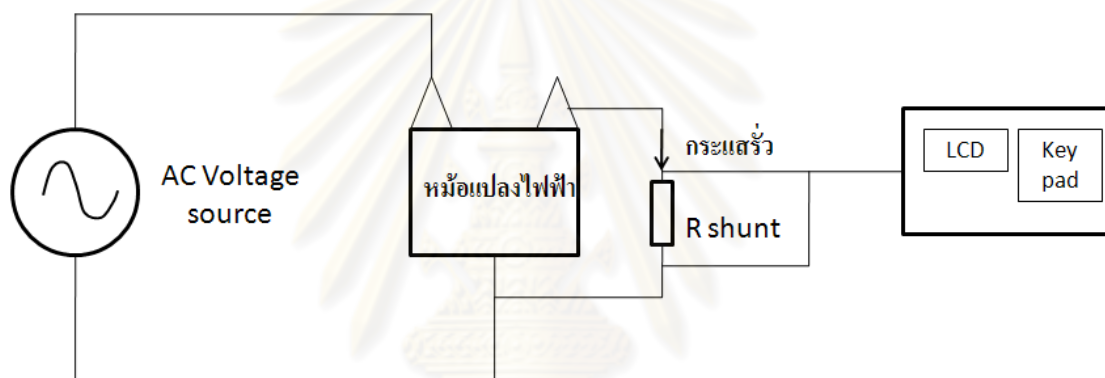
แรงดันจ่าย ด้านแรงต่ำ (V)	แรงดันที่ Bushing แรงสูง (V)	ก่อนทำ Overhaul			หลังทำ Overhaul		
		Leakage current	Capacitance	dc component	Leakage current	Capacitance	dc component
		(mA)	(pF)	(uA)	(mA)	(pF)	(uA)
22	1000	1.50	4775	181	1.20	3820	161
44	2000	3.01	4791	149	2.32	3693	79
66	3000	4.45	4722	132	3.44	3650	58
88	4000	5.95	4735	127	4.58	3645	40
110	5000	7.51	4781	119	5.64	3591	32

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก่อนทำการซ่อมบำรุงหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งฉนวนผ่านการใช้งานมายาวนาน จะมีกระแสรั่วจากฉนวนมากกว่ากระแสรั่วที่วัดได้จากหม้อแปลงตัวเดียวกันซึ่งผ่านการซ่อมบำรุงแล้ว ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงซึ่งผ่านการซ่อมบำรุงแล้ว มีค่าน้อยกว่าตอนก่อนทำการซ่อมบำรุง ในขณะเดียวกันค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแส

รั่วในหม้อแปลงซึ่งผ่านการซ่อมบำรุงแล้วจะมีค่าน้อยกว่าตอนก่อนทำการซ่อมบำรุง และมีลักษณะลดลงแบบ Exponential เมื่อแรงดันที่ป้อนจนจนนำสายด้านแรงสูงมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพจนวนที่พัฒนาขึ้น

ในการทดลองนี้จะต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1600 kVA , 230/6.9 kV โดยใช้วงจรเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา แต่ระบบวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่ว ที่วัดได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพจนวน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น ตามรูปที่ 4.15

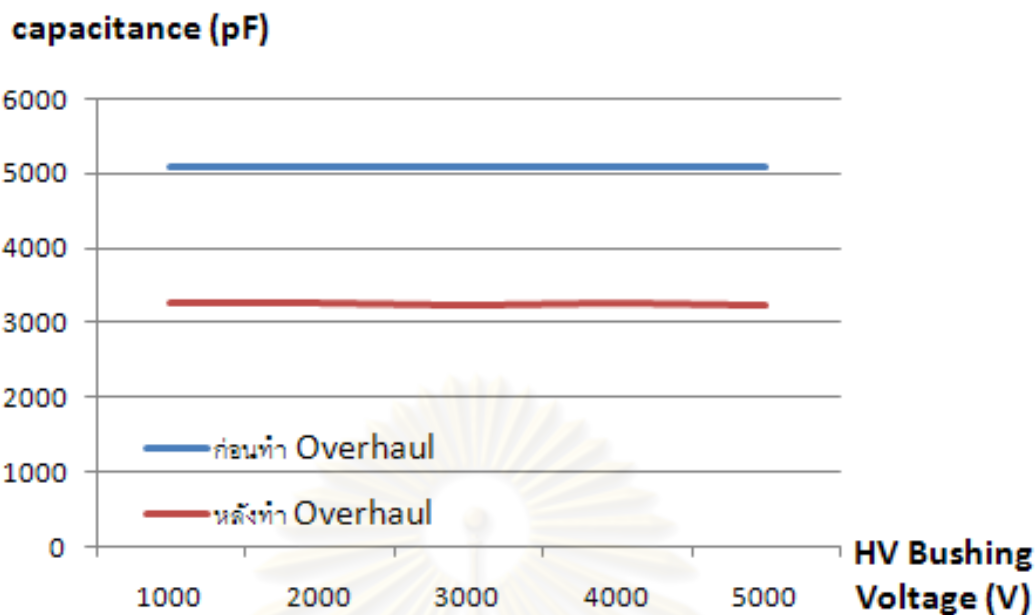


รูปที่ 4.15 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

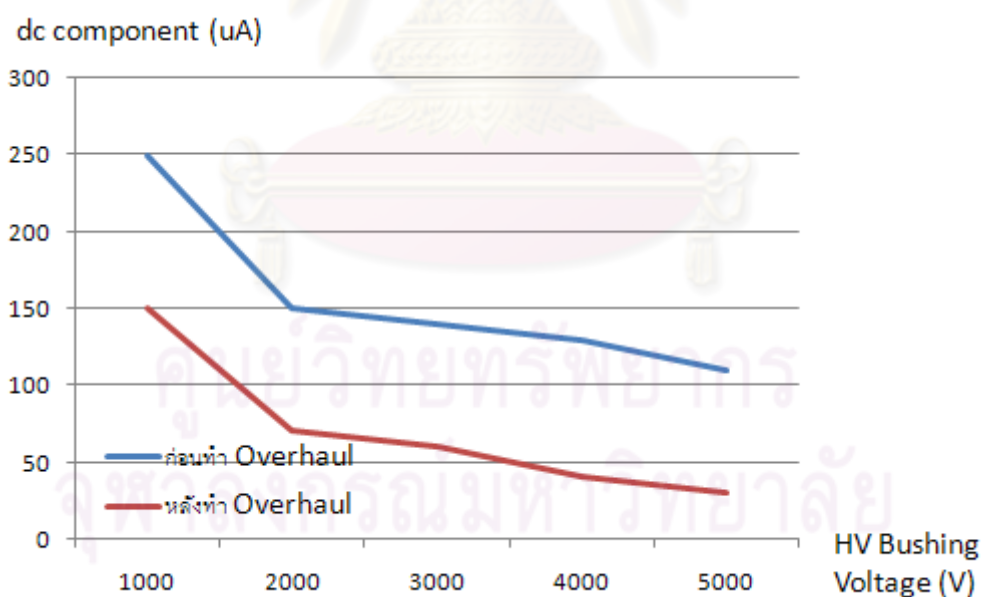
การวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นดี อันเนื่องมาจากกระแสรั่วที่ป้อนจนวนนำสายของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดลองนี้จะใช้การวัดตรงเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อกำจัดผลของกระแสรั่วอันเนื่องมาจากความต้านทานพื้นผิวของป้อนจนวนนำสาย

การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงในการทดลองนี้จะทดลองเปรียบเทียบในหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุงโดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อแปลงและอบขดลวด เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา

ในการทดลองจะทำการเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าด้านแรงต่ำ จากนั้นวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรง จากระบบเฝ้าติดตามคุณภาพจนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าไฟฟ้า ที่ได้จากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์หัยข้อ Doble รุ่น M4100 ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.16 , 4.17 , ตารางที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าจากกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น  
เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง



รูปที่ 4.17 ผลการทดลองวัดค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น  
เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ระบบฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการซ่อมบำรุง

แรงดันจ่าย ด้านแรงต่ำ (V)	แรงดันที่ Bushing แรงสูง (V)	ก่อนทำ Overhaul			หลังทำ Overhaul		
		Leakage current	Capacitance	dc component	Leakage current	Capacitance	dc component
		(mA)	(pF)	(uA)	(mA)	(pF)	(uA)
33	1000	1.60	5093	250	1.02	3247	150
66	2000	3.19	5078	150	2.04	3247	70
99	3000	4.80	5093	140	3.05	3236	60
132	4000	6.40	5093	130	4.09	3255	40
165	5000	8.01	5100	110	5.08	3234	30

ตารางที่ 4.4 ผลของการวัดค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังทำการซ่อมบำรุงโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์หี้อ Doble รุ่น M4100

แรงดันที่ Bushing แรงสูง (V)	Capacitance (pF)
5000	3234.22

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา โดยค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วมีค่าลดลง เมื่อหม้อแปลงผ่านการบำรุงรักษาโดยการอบขดลวดและเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์หี้อ Doble รุ่น M4100

#### 4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วมีค่าลดลง เมื่อหม้อแปลงผ่านการบำรุงรักษาโดยการอบขดลวดและเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 , 4.1.2 และ 4.1.3 เนื่องจากฉนวนของหม้อแปลงได้รับการบำรุงรักษาทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงส่งผลโดยตรงต่อค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนั้น

ค่าตัวประกอบกระแสตรงจากการะแสรั้วที่วัดได้จะมีค่าลดลงแบบ Exponential เมื่อแรงดันที่ปลดกนวนนำสายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ C. Zhang, S. Sheng, J. Yang, X. Chi [11] ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั้วในฉนวนแข็ง XLPE จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนแข็ง จากผลการทดลองของ C. Zhang, S. Sheng, J. Yang, X. Chi พบว่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั้วของฉนวน XLPE จะลดลงแบบ Exponential เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนเพิ่มขึ้นแบบ linear (กราฟสีแดง, สีเขียว และสีฟ้ามีค่าแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน XLPE เท่ากับ 2 kV , 3 kV และ 4 kV ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากประจุอิสระที่อยู่ในต้นไม้เป็นประจุลบ เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนเพิ่มขึ้นประจุลบจะหักล้างกับตัวประกอบกระแสตรงด้านบวกมากขึ้น ส่งผลให้ตัวประกอบกระแสตรงด้านบวกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบกระแสตรงของกระแสรั้วจะลดลงเมื่อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาหรือมีสภาพที่ดีขึ้น

ผลการทดลองโดยใช้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ จึงสรุปได้ว่าระบบเฝ้าติดตามที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ดีตามที่ได้ออกแบบไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย เพื่อนำไปใช้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของฉนวนไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการประมวลผลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานและมีจำหน่ายในท้องตลาด และนำระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีการใช้งานจริง ซึ่งจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าและพัฒนาระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ความชื้นและการปนเปื้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนและตัวประกอบกระแสตรงที่ได้จากการวัดกระแสรั่ว โดยค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบกระแสตรงที่วัดได้จากกระแสรั่วจะมีค่าลดลง เมื่อฉนวนไฟฟ้าได้รับการซ่อมบำรุงหรือมีสภาพการใช้งานที่ดีขึ้น
2. ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากการวัดกระแสรั่วที่วัดได้จากปลอกฉนวนนำสายด้านแรงสูง ซึ่งเป็นหลักการในการทำงานของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากการวัดกระแสรั่ว มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่ได้มาตรฐานและมีจำหน่ายในท้องตลาด
3. ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ดีตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาตรฐาน และมีจำหน่ายในท้องตลาด

#### 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น จะทำการวัดค่ากระแสรั่วจากปลอกฉนวนนำสายด้านแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานชัณฑ์ ซึ่งความต้านทานชัณฑ์ดังกล่าว จะติดตั้งอยู่ภายนอกวงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลง

ไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น ในการพัฒนางจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย หากสามารถติดตั้งความต้านทานชั้นตัวรวมไว้ในวงจรของระบบ จะทำให้การใช้งานระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

2. การเลือกใช้ความต้านทานชั้นตัว จะต้องคำนึงถึงแรงดันมากที่สุดที่วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับได้ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันจะรับแรงดันได้ไม่เกิน 5 V การเลือกใช้ความต้านทานชั้นตัวที่มีขนาดใหญ่เกินไป อาจส่งผลให้แรงดันเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่ามากเกินไปจนระบบไม่สามารถทำงานได้
3. ในการทดลอง จะใช้เทปตัวนำพันรอบปลอกฉนวนนำสายด้านแรงสูงเพื่อทำหน้าที่เป็นการ์ดริงเพื่อกำจัดผลของความต้านทานพื้นผิวของปลอกฉนวนนำสาย และยังใช้เป็นตัวนำกระแสรั่วเข้าสู่ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น การใช้เทปตัวนำอาจมีความเสี่ยงในการหลุดลอกออกจากปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายไม่สามารถทำงานได้ การออกแบบวงแหวนโลหะนำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นการ์ดริง และนำกระแสรั่วเข้าสู่ระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่าย สามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความน่าเชื่อถือการใช้งานระบบเฝ้าติดตามคุณภาพฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Fofana, I., Wasserberg, V., Borsi, H. and Gockenbach, E. ; The Effect of Temperature Gradient on the Dielectric Properties of Insulating Fluid, Conference record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp 523-526, 2006
- [2] สำรวัย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [3] Arora, R. and Mosch, W.; High Voltage Insulation Engineering, New Age International Publishers Limited, Wiley Eastern Limited, India, p. 206, 1995
- [4] Brinkmann, C., Insulating materials for electrical engineering, Springer-Verlag, Heidelberg ,1975
- [5] Bogorodizki, N.P., Pasynkow, W.W. and Tarejew, B.M., Materials for electrical engineering, VEB Verlag Technik, Berlin, 1995
- [6] Beyer, M., Boeck, W., Mouller, K. and Zaengl, W., High Voltage Engineering (Theoretical and Practical fundamentals for application), Springer-Verlag, Berlin, 1986
- [7] Takashima, T., Hunaoka, R., Ishibashi, R., and Ohtsubo, A., I-V Characteristics and liquid motion in needle-to-plane and Razor blade-to-plane configurations in Transformer oil and liquid Nitrogen, IEEE Trans. EI-23, pp.645-658, 1988
- [8] Holly and Karl, H., On electrical properties of insulating oils in particular the effect of water on their behavior at different temperatures, Dissertation, TH Braunschweig (FRG), 1967
- [9] ญัฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตร์วิไล, เรียนรู้และปฏิบัติการ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC, กรุงเทพมหานคร: บริษัท อินโนเวทีฟ แอ็กเพอริเมนต์ จำกัด
- [10] ประจัน พลังสันติกุล, PIC Works Examples and C Source Code, กรุงเทพฯ: บริษัท แอปซอพท์เทค จำกัด



- [11] Zhang, C., Sheng, S., Yang, J. and Chi, Z. ; Study on DC component caused by water treeing in XLPE cable, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena , pp 926 , 2002
- [12] Zhang, W., Zhu, Y., Yang, B. and Liu, Y. ; A Study on DC component method of on-line diagnosis for XLPE cable, Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Properties and Application of Dielectric Material, July 3, 1994
- [13] Wang, P., Raghuvver, M.R., McDermid, W. and Bromley, J.C. ; A Digital Technique for the On-Line Measurement of Dissipation Factor and Capacitance. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. April 2001
- [14] Nitaigour , Premchand and Mahalik ; A Digital Meter for Measuring Dissipation factor , Proceeding for the 5<sup>th</sup> International conference on Properties and Applications of Dielectric Materials,;Seoul, Korea, May 25-30,1997
- [15] Xingbong, H., Feng, B., Wensheng, G., Zhang, Y. ; A New on line Insulation Diagnostic Method for Capacitive-Type Equipment, IEEE, 1998
- [16] Vahedy, V. ; Polymer Insulated High Voltage Cables. Electrical Insulation Magazine, IEEE Volume 22, Issue 3, May-June 2006 Page(s):13 – 18
- [17] Greenwood, A. 1971 ; Electrical Transients in Power Systems. John Wiley & Sons, Inc., Canada,

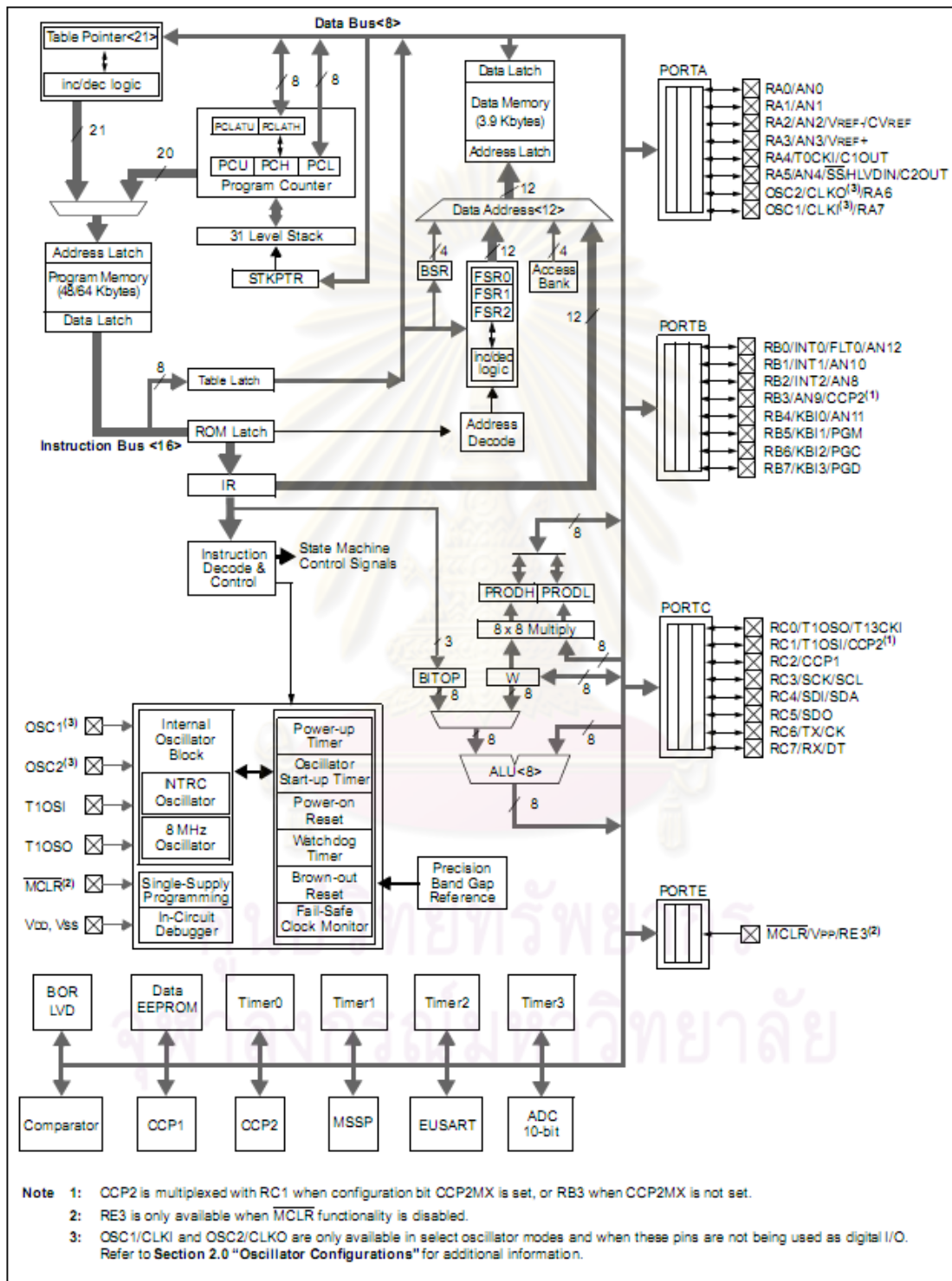


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

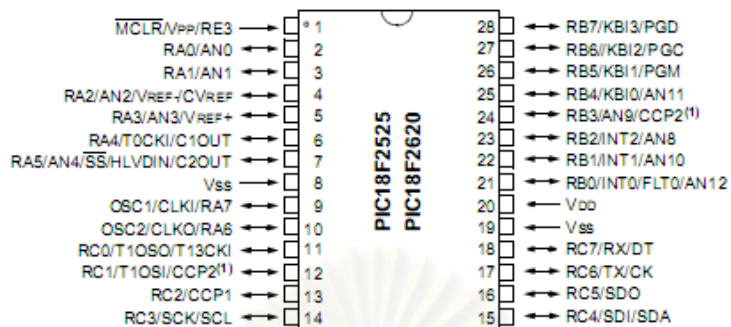
ภาคผนวก ก

รายละเอียดทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4620

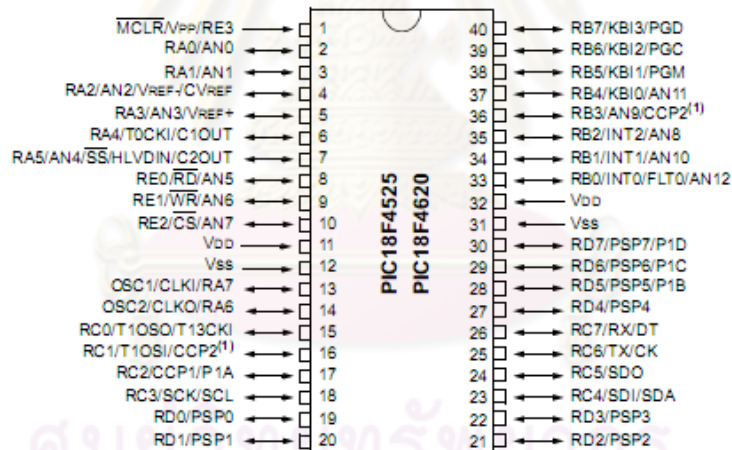


รูปที่ ก.1 ไดอะแกรมการทำงานของ PIC18F4620

28-Pin SPDIP, SOIC



40-Pin PDIP

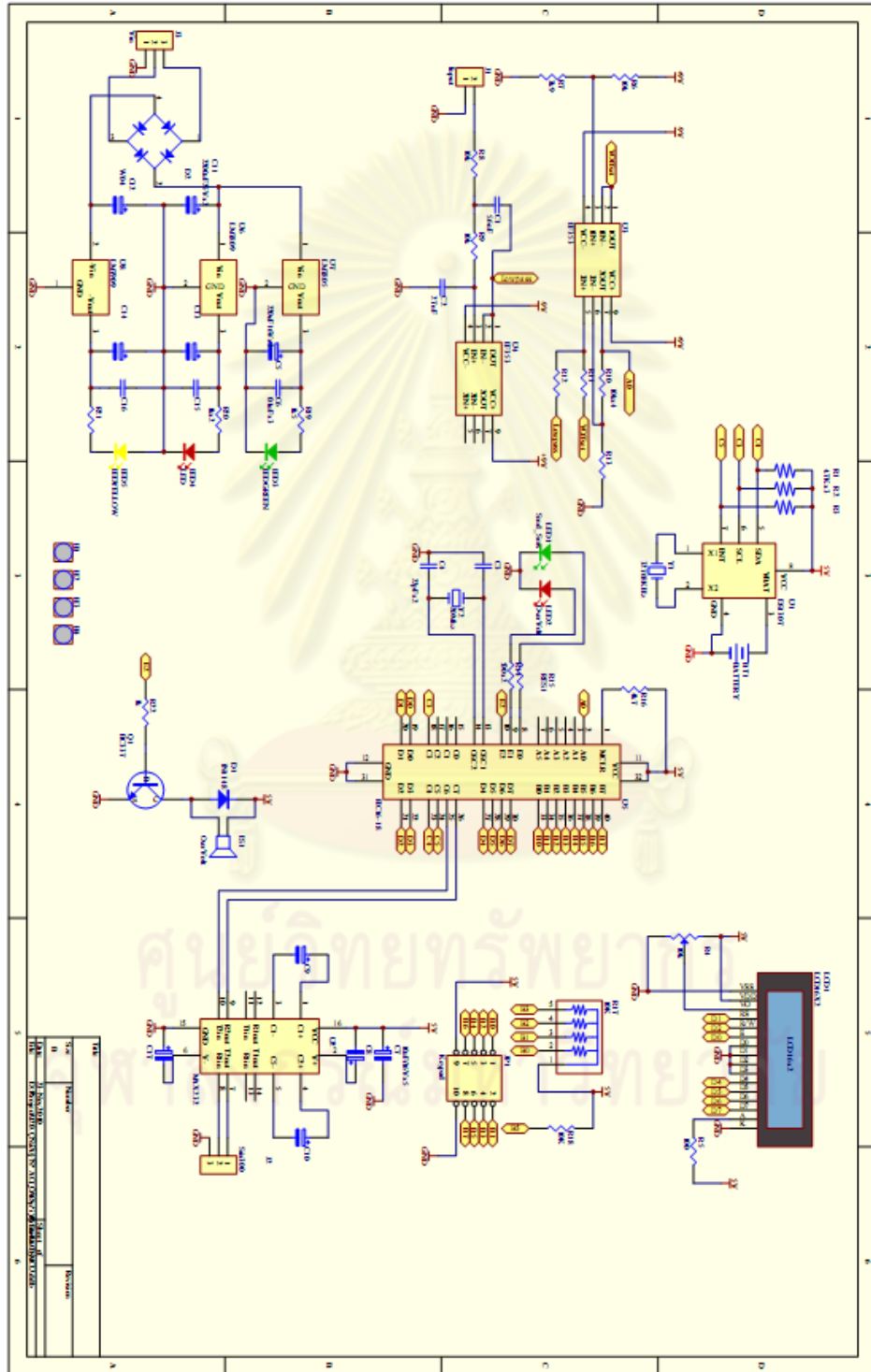


Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

รูปที่ ก.2 ขาของ PIC18F4620

ภาคผนวก ข

วงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ ข.1 แสดงวงจรของระบบเฝ้าติดตามคุณภาพของฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น

## ภาคผนวก ค

โปรแกรมและชุดคำสั่งหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์

```
#include <18F4620.h>
#define ADC=10
#define HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#define use delay(clock=2000000)
#define use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7)
#define use i2c(master, sda=PIN_C4, scl=PIN_C3)
#include "input.c"
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <LCDII.C>
#include <Realtimelock.c>
////////////////////////////////////MENU////////////////////////////////////
char mail[200]; char *ma; char comma[2]=",";
char ctrl_z=26; char cusd[8]="+CUSD: "; char M_string[200];
int check_mun=0;

unsigned char password[5];
unsigned char password_check[5];
int sw=0;
char tele_user[13]; char PUSER;

int shunt_resistance_array[9];
int digi_shunt_value=0;

int32 shunt_resistance_value=0;
int32 u_value=0;

int u_array[7];
int digi_u_value=0;

float capacitance=0;
float average_voltage=0;

float value,true_value,max=0,min=10,max_av=0,min_av=0,voltage_peak_to_peak=0;
int16 Samp;
int voltage_enable=0;

int cookie_loop1=1; int cookie_loop2=1; int cookie_loop3=1;
int cookie_loop4=1; int cookie_loop5=1; int cookie_loop6=1;
////////////////////////////////////
#define RX_BUFFER_SIZE 200
char RX_Buffer [RX_BUFFER_SIZE+1];
char RX_Wr_Index=0;
char RX_Rd_Index=0;
char Rx_Counter=0;
//////////////////////////////////// FUNCTION //////////////////////////////////////
char Read_Keypad();

void screen_sms();
void screen_cm();

void clear_buffer();
void Menu();
```

```

void show_time();
void clear_screen();
void read_password();
void white_password();
void chang_password();
void user_telephone();
void read_user_telephone();

void set_shunt_resistance();
void read_shunt_resistance_value();
void Set_U_Value();
void read_u_value();

void DS1307_Write (unsigned char ctl, unsigned char dat);
BYTE DS1307_Read (unsigned char ctl);
void DS1307_WriteDate (void);
void DS1307_WriteTime (void);
void DS1307_ReadDate (void);
void DS1307_ReadTime (void);

void menu_set_date();
void menu_set_time();

void send_sms();
////////////////////////////////////
#INT_EXT
void IntExt_isr(void)
{
    sw=1;
}
////////////////////////////////////
#INT_RDA
void serial_rx_isr()
{
    RX_Buffer[RX_Wr_Index]=getc();
    if(++RX_Wr_Index>RX_Buffer_SIZE)
        RX_Wr_Index=0;           //clear buff
    if(++RX_Counter>RX_Buffer_SIZE)
    { RX_Counter=RX_BUFFER_SIZE;    //buffer is full
    }
}
}
char bgetc (void)
{
    char c;
    while (RX_Counter==0)
    { Menu (); show_time();}
    c=RX_Buffer[RX_Rd_Index];
    if(++RX_Rd_Index>RX_Buffer_SIZE)
        RX_Rd_Index=0;
    if(RX_Counter);
        RX_Counter--;
    return c;
}
////////////////////////////////////
void main(void)
{
    SET_TRIS_A(0xFF);
    SET_TRIS_E(0x00);
    SET_TRIS_B(0xFF);
    OUTPUT_B(0xFF);
}

```

```

////////////////////////////////////
enable_interrupts(GLOBAL);
enable_interrupts(INT_RDA);
////////////////////////////////////EXT Interupt////////////////////////////////////
enable_interrupts(INT_EXT);
ext_int_edge(L_TO_H);
////////////////////////////////////
SETUP_ADC_PORTS(AN0|VSS_VDD);
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8);
////////////////////////////////////
lcd_init();
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("*****");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc(" * AC Voltage *");
lcd_gotoxy(1,3);
lcd_putc(" * Measurment *");
lcd_gotoxy(1,4);
lcd_putc("*****");

printf("AT+CMGF=1\n\r");
delay_ms(200);
printf("ATE=1\n\r");
delay_ms(500);
clear_buffer();
read_u_value();
read_shunt_resistance_value();
read_user_telephone();
while(true)
{
  set_adc_channel(0);
  value=read_adc();
  true_value=value*(5.0/1023);
  if(true_value > max) { max = true_value; }
  if(true_value < min) { min = true_value; }
  Samp++;
  if(Samp>=1024)
  {
    voltage_peak_to_peak=max-min;
    max_av=(max-2.53)*0.318;
    min_av=(2.53-min)*0.318;
    if(voltage_peak_to_peak<0.01) voltage_peak_to_peak=0;
    if(max==min) average_voltage=0;
    else average_voltage=max_av-min_av;
    if(max>4.95) output_high(PIN_E2);
    else output_low(PIN_E2);
    capacitance=(voltage_peak_to_peak/(2*shunt_resistance_value))/(2*3.1428*50*u_value);
    max=0;
    min=10;
    Samp=0;
    voltage_enable=1;
  }
  show_time();
  Menu ();
  if(check_mun)
  {
    screen_sms();
    screen_cm();
  }
}
}

```



```

}

void read_u_value()
{
    int count=0;
    count=read_eeprom(0X50);

    u_array[0]=read_eeprom(0X40);
    u_array[1]=read_eeprom(0X41);
    u_array[2]=read_eeprom(0X42);
    u_array[3]=read_eeprom(0X43);
    u_array[4]=read_eeprom(0X44);
    u_array[5]=read_eeprom(0X45);

    if(count==1)    u_value=u_array[0];
    else if(count==2)    u_value=(u_array[0]*10)+u_array[1];
    else if(count==3)    u_value=(u_array[0]*100)+(u_array[1]*10)+u_array[2];
    else if(count==4)    u_value=(u_array[0]*1000)+(u_array[1]*100)+(u_array[2]*10)+u_array[3];
    else if(count==5)
u_value=(u_array[0]*10000)+(u_array[1]*1000)+(u_array[2]*100)+(u_array[3]*10)+u_array[4];
    else if(count==6)
u_value=(u_array[0]*100000)+(u_array[1]*10000)+(u_array[2]*1000)+(u_array[3]*100)+(u_array[4]
]*10)+u_array[5];
}
void read_shunt_resistance_value()
{
    int count=0;
    count=read_eeprom(0X30);

    shunt_resistance_array[0]=read_eeprom(0X20);
    shunt_resistance_array[1]=read_eeprom(0X21);
    shunt_resistance_array[2]=read_eeprom(0X22);
    shunt_resistance_array[3]=read_eeprom(0X23);
    shunt_resistance_array[4]=read_eeprom(0X24);
    shunt_resistance_array[5]=read_eeprom(0X25);
    shunt_resistance_array[6]=read_eeprom(0X26);
    shunt_resistance_array[7]=read_eeprom(0X27);

    if(count==1)    shunt_resistance_value=shunt_resistance_array[0];
    else if(count==2)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*10)+shunt_resistance_array[1];
    else if(count==3)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*100)+(shunt_resistance_array[1]*10)+shunt_
resistance_array[2];
    else if(count==4)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*1000)+(shunt_resistance_array[1]*100)+(shu
nt_resistance_array[2]*10)+shunt_resistance_array[3];
    else if(count==5)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*10000)+(shunt_resistance_array[1]*1000)+(s
hunt_resistance_array[2]*100)+(shunt_resistance_array[3]*10)+shunt_resistance_array[4];
    else if(count==6)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*100000)+(shunt_resistance_array[1]*10000)
+(shunt_resistance_array[2]*1000)+(shunt_resistance_array[3]*100)+(shunt_resistance_array[4]*
10)+shunt_resistance_array[5];
    else if(count==7)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*1000000)+(shunt_resistance_array[1]*10000
0)+(shunt_resistance_array[2]*10000)+(shunt_resistance_array[3]*1000)+(shunt_resistance_arra
y[4]*100)+(shunt_resistance_array[5]*10)+shunt_resistance_array[6];
    else if(count==8)
shunt_resistance_value=(shunt_resistance_array[0]*10000000)+(shunt_resistance_array[1]*1000

```

```
000)+(shunt_resistance_array[2]*100000)+(shunt_resistance_array[3]*10000)+(shunt_resistance_array[4]*1000)+(shunt_resistance_array[5]*100)+(shunt_resistance_array[6]*10)+(shunt_resistance_array[7]);
```

```
}
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
void screen_sms()
{
  unsigned char str=0;int i=0;
  while(str!='+')
  {
    str=bgetc();
  }
  for(i;str!=0x0D;i++)
  { mail[i]=str;
    str=bgetc();
  }
}
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
void screen_cm()
{
```

```
  int x; int i=0; int k=1; char *pch; int y=2;
  if(strstr(mail,cusd))
  {
    if(check_mun)
    {
      pch=strstr(mail,comma);
      ma=strtok(pch,comma);
      strcpy(M_string,ma);
      x=strlen(M_string);
      lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc(" Money ");
      lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc(" ");
      lcd_gotoxy(1,3); lcd_putc(" ");
      lcd_gotoxy(1,4); lcd_putc(" ");
      lcd_gotoxy(1,2);
      do{
        for(i;(i<x)&&(Read_Keypad()!='A');i++)
        { lcd_gotoxy(k,y);
          printf(lcd_putc, "%c",M_string[i]);
          delay_ms(100);
          k++;
          if(k>16) { k=1; y++; if (y>4) {y=2;}}
        }
        delay_ms(500);
        i=0;k=1;y=2;
        lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc(" Money ");
        lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc(" ");
        lcd_gotoxy(1,3); lcd_putc(" ");
        lcd_gotoxy(1,4); lcd_putc(" ");
      }while(Read_Keypad()!='A');
      sw=0;
    }
  }
  clear_buffer();
  check_mun=0;
```

```
}
void clear_buffer()
{
  int8 i=0;
  for(i=0;i<200;i++)
```



```

set_shunt_resistance();
while(Read_Keypad()!='D')
{
    sw=0;
    do{
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("1. Change Pass ");
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("2. Set Telephone");
        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc("3. ShtResistance");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("4. Value of U ");
        chang_password();
        user_telephone();
        set_shunt_resistance();
        Set_U_Value();
        while(Read_Keypad()!='D')
        {
            sw=0;
            do{
                lcd_gotoxy(1,1);
                lcd_putc("2. Set Telephone");
                lcd_gotoxy(1,2);
                lcd_putc("3. ShtResistance");
                lcd_gotoxy(1,3);
                lcd_putc("4. Value of U ");
                lcd_gotoxy(1,4);
                lcd_putc("5. Set Date ");
                user_telephone();
                set_shunt_resistance();
                Set_U_Value();
                menu_set_date();
                while(Read_Keypad()!='D')
                {
                    sw=0;
                    do{
                        lcd_gotoxy(1,1);
                        lcd_putc("3. ShtResistance");
                        lcd_gotoxy(1,2);
                        lcd_putc("4. Value of U ");
                        lcd_gotoxy(1,3);
                        lcd_putc("5. Set Date ");
                        lcd_gotoxy(1,4);
                        lcd_putc("6. Set Time ");
                        set_shunt_resistance();
                        Set_U_Value();
                        menu_set_date();
                        menu_set_time();
                        while(Read_Keypad()!='D')
                        {
                            sw=0;
                            do{
                                lcd_gotoxy(1,1);
                                lcd_putc("4. Value of U ");
                                lcd_gotoxy(1,2);
                                lcd_putc("5. Set Date ");
                                lcd_gotoxy(1,3);
                                lcd_putc("6. Set Time ");
                                lcd_gotoxy(1,4);

```

```

        lcd_putc("7. Check Money ");
        Set_U_Value();
        menu_set_date();
        menu_set_time();
        while(Read_Keypad()=='7')
        { sw=0;
          check_mun=1;
          printf("ATD*121#\n\r");
          delay_ms(200);
          lcd_gotoxy(1,1);
          lcd_putc("*****");
          lcd_gotoxy(1,2);
          lcd_putc("** Just A **");
          lcd_gotoxy(1,3);
          lcd_putc("** Moment **");
          lcd_gotoxy(1,4);
          lcd_putc("*****");
          delay_ms(5000);
          return;
        }
      }while(Read_Keypad()!='C'&&Read_Keypad()!='F');
    sw=0;
  }
}while(Read_Keypad()!='C'&&Read_Keypad()!='F');
sw=0;
}
}while(Read_Keypad()!='C'&&Read_Keypad()!='F');
sw=0;
}
}while(Read_Keypad()!='C'&&Read_Keypad()!='F');
sw=0;
}
} while(Read_Keypad()!='F');
  sw=0;
}
else
{ do{
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("*****");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("** The Password **");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("** is Incorrect **");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("*****");

  }while(Read_Keypad()!='F');
  sw=0;
}
}
}
}

```

```

////////////////////////////////////
void clear_screen()
{
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc(" ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc(" ");
  lcd_gotoxy(1,3);

```



```

{
  unsigned char c;int i=0;
  password_check[0]='X';password_check[1]='X';password_check[2]='X';password_check[3]='X';
  while(Read_Keypad()!= '1')
  { sw=0;
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("*****");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("** New Password **");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("** ENTER :   **");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("*****");
    do{
      c=Read_Keypad();
      sw=0;
      if(c>='0'&&c<='9'&&i<4)
      { password_check[i]=c;
        delay_ms(100);
        i++;
      }
      lcd_gotoxy(11,3);

  printf(lcd_putc,"%c%c%c%c",password_check[0],password_check[1],password_check[2],password
  _check[3]);
      if(Read_Keypad()=='A')
      { i=0;sw=0;

password_check[0]='X';password_check[1]='X';password_check[2]='X';password_check[3]='X';
      }
      }while(Read_Keypad()!='F');
      sw=0;
      for(i=0;i<4;i++) password[i]=password_check[i];

      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("*****");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("** SavePassword **");
      lcd_gotoxy(1,3);
      printf(lcd_putc,"**   %c%c%c%c   **",password[0],password[1],password[2],password[3]);
      lcd_gotoxy(1,4);
      lcd_putc("*****");
      white_password();
      delay_ms(2000);
    }
  }

  ////////////////////////////////////////////////////
  void read_password()
  {
    password[0]=read_eeprom(0X00);
    password[1]=read_eeprom(0X01);
    password[2]=read_eeprom(0X02);
    password[3]=read_eeprom(0X03);
  }

  ////////////////////////////////////////////////////
  void white_password()
  { if(password[0]!=read_eeprom(0X00))
    { write_eeprom (0X00,password[0]); delay_ms(10); }
  }

```

```

if(password[1]!=read_eeprom(0X01))
{ write_eeprom (0X01,password[1]); delay_ms(10); }
if(password[2]!=read_eeprom(0X02))
{ write_eeprom (0X02,password[2]); delay_ms(10); }
if(password[3]!=read_eeprom(0X03))
{ write_eeprom (0X03,password[3]); delay_ms(10); }
}

void user_telephone()
{
char c;int i;int j;
while(Read_Keypad()=='2')
{
sw=0;
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("*****");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("**UserTeleNumber**");
lcd_gotoxy(1,3);
lcd_putc("**:      **");
lcd_gotoxy(1,4);
lcd_putc("*****");

read_user_telephone();
i=4;
do{ c=Read_Keypad();
sw=0;
if(c>='0'&&c<='9'&&i<12)
{ tele_user[i]=c;
delay_ms(100);
i++;
}
lcd_gotoxy(3,3);
printf(lcd_putc,"+");
for(j=1;j<=11;j++)
{ lcd_gotoxy(j+3,3);
printf(lcd_putc,"%c", tele_user[j]);
}

if(Read_Keypad()=='A')
{ sw=0;
tele_user[0]='+'; tele_user[1]='6'; tele_user[2]='6';
tele_user[3]='8'; for(i=4;i<12;i++) { tele_user[i]='X'; }
write_eeprom (0x10,'0'); delay_ms(10);

lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("*****");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("**ClearTelephone**");
lcd_gotoxy(1,3);
lcd_putc("** Number **");
lcd_gotoxy(1,4);
lcd_putc("*****");
delay_ms(1000);
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("*****");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("**UserTeleNumber**");
lcd_gotoxy(1,3);
lcd_putc("**:      **");
}
}
}

```



```

        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("*****");
        i=4;
    }
    if(Read_Keypad()=='B')
    { sw=0;
      write_eeprom (0X10,'1');
      if(read_eeprom(0X11)!=tele_user[0]) { write_eeprom (0X11,tele_user[0]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X12)!=tele_user[1]) { write_eeprom (0X12,tele_user[1]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X13)!=tele_user[2]) { write_eeprom (0X13,tele_user[2]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X14)!=tele_user[3]) { write_eeprom (0X14,tele_user[3]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X15)!=tele_user[4]) { write_eeprom (0X15,tele_user[4]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X16)!=tele_user[5]) { write_eeprom (0X16,tele_user[5]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X17)!=tele_user[6]) { write_eeprom (0X17,tele_user[6]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X18)!=tele_user[7]) { write_eeprom (0X18,tele_user[7]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X19)!=tele_user[8]) { write_eeprom (0X19,tele_user[8]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X1A)!=tele_user[9]) { write_eeprom (0X1A,tele_user[9]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X1B)!=tele_user[10]) { write_eeprom (0X1B,tele_user[10]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X1C)!=tele_user[11]) { write_eeprom (0X1C,tele_user[11]);
delay_ms(10);}
      read_user_telephone();
      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("*****");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("**Save Telephone**");
      lcd_gotoxy(1,3);
      lcd_putc("** Number **");
      lcd_gotoxy(1,4);
      lcd_putc("*****");
      delay_ms(1000);
      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("*****");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("**UserTeleNumber**");
      lcd_gotoxy(1,3);
      lcd_putc("**: **");
      lcd_gotoxy(1,4);
      lcd_putc("*****");
    }
  }while(Read_Keypad()!='F');
  sw=0;
}
}

void read_user_telephone()
{ int i;
  PUSER=read_eeprom(0X10);
  if(PUSER=='1'){ tele_user[0]=read_eeprom(0X11); tele_user[1]=read_eeprom(0X12);
tele_user[2]=read_eeprom(0X13);

```

```

        tele_user[3]=read_eeprom(0X14); tele_user[4]=read_eeprom(0X15);
tele_user[5]=read_eeprom(0X16);
        tele_user[6]=read_eeprom(0X17); tele_user[7]=read_eeprom(0X18);
tele_user[8]=read_eeprom(0X19);
        tele_user[9]=read_eeprom(0X1A); tele_user[10]=read_eeprom(0X1B);
tele_user[11]=read_eeprom(0X1C);
        tele_user[12]='\0';
    }
    else { tele_user[0]='+';          tele_user[1]='6';          tele_user[2]='6';
          tele_user[3]='8'; for(i=4;i<12;i++) { tele_user[i]='X'; }
    }
}

void set_shunt_resistance()
{
char c; int i;
while(Read_Keypad()=='3')
{
    sw=0;
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("*****");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("** Enter Shunt **");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("** Resistance **");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("** :      **");

    digi_shunt_value=read_eeprom(0X30);
    if((digi_shunt_value>0)&&(digi_shunt_value<=8))
    {
        read_shunt_resistance_value();
        i=digi_shunt_value;
    }
    else
    {
        digi_shunt_value=0;
        i=0;
    }
}
do{
    c=Read_Keypad(); sw=0;
    if(c>='0'&&c<='9'&&i<8)
    { shunt_resistance_array[i]=c-'0';
      delay_ms(50);
      i++;
      digi_shunt_value++;
    }
    if(digi_shunt_value==0) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"0      "); }
    if(digi_shunt_value==1) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d
",shunt_resistance_array[0]); }
    if(digi_shunt_value==2) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1]); }
    if(digi_shunt_value==3) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1],shunt_resistance_array[2]); }
    if(digi_shunt_value==4) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1],shunt_resistance_array[2],shunt_resistance_array[3]); }
    if(digi_shunt_value==5) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1],shunt_resistance_array[2],shunt_resistance_array[3],shunt_resistance_array[4]); }
}

```

```

        if(digi_shunt_value==6) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d%d",
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1],shunt_resistance_array[2],shunt_resistanc
e_array[3],shunt_resistance_array[4],shunt_resistance_array[5]); }
        if(digi_shunt_value==7) { lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d%d%d",
",shunt_resistance_array[0],shunt_resistance_array[1],shunt_resistance_array[2],shunt_resistanc
e_array[3],shunt_resistance_array[4],shunt_resistance_array[5],shunt_resistance_array[6]); }
        if(digi_shunt_value==8) {
lcd_gotoxy(6,4);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d%d%d",shunt_resistance_array[0],shunt_resis
tance_array[1],shunt_resistance_array[2],shunt_resistance_array[3],shunt_resistance_array[4],sh
unt_resistance_array[5],shunt_resistance_array[6],shunt_resistance_array[7]); }

if(Read_Keypad()=='A')
{ sw=0;
  for(i=0;i<8;i++)
  {
    shunt_resistance_array[i]=0;
  }
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("*****");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("**ClearTelephone**");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("** Number **");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("*****");
  delay_ms(1000);
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("*****");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("** Enter Shunt **");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("** Resistance **");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("** : **");
  i=0; digi_shunt_value=0;
}
if(Read_Keypad()=='B')
{ sw=0;
  if(read_eeprom(0X30)!=digi_shunt_value){ write_eeprom (0X30,digi_shunt_value); }
  if(read_eeprom(0X20)!=shunt_resistance_array[0]) { write_eeprom
(0X20,shunt_resistance_array[0]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X21)!=shunt_resistance_array[1]) { write_eeprom
(0X21,shunt_resistance_array[1]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X22)!=shunt_resistance_array[2]) { write_eeprom
(0X22,shunt_resistance_array[2]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X23)!=shunt_resistance_array[3]) { write_eeprom
(0X23,shunt_resistance_array[3]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X24)!=shunt_resistance_array[4]) { write_eeprom
(0X24,shunt_resistance_array[4]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X25)!=shunt_resistance_array[5]) { write_eeprom
(0X25,shunt_resistance_array[5]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X26)!=shunt_resistance_array[6]) { write_eeprom
(0X26,shunt_resistance_array[6]); delay_ms(10);}
  if(read_eeprom(0X27)!=shunt_resistance_array[7]) { write_eeprom
(0X27,shunt_resistance_array[7]); delay_ms(10);}
  read_shunt_resistance_value();
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("** Save Shunt **");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("** Resistance **");
}

```

```

        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc("** Value **");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("      ");
        delay_ms(1000);
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("*****");
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("** Enter Shunt **");
        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc("** Resistance **");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc(" :      ");
        for(i=0;i<dig_i_shunt_value;i++)
        {
            lcd_gotoxy(i+6,4);
            printf(lcd_putc,"%d",shunt_resistance_array[i]);
        }
        i=0;
    }
}while(Read_Keypad()!='F');
sw=0;
}
}

```

```
void Set_U_Value()
```

```

{
    char c; int i;

    while(Read_Keypad()=='4')
    {
        sw=0;
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("*****");
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("** Enter U Value**");
        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc(" :      ");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("*****");

        dig_i_u_value=read_eeprom(0X50);
        if((dig_i_u_value>0)&&(dig_i_u_value<=6))
        {
            read_u_value();
            i=dig_i_u_value;
        }
        else
        {
            dig_i_u_value=0;
            i=0;
        }
    }
    do{
        c=Read_Keypad(); sw=0;
        if(c>='0'&&c<='9'&&i<6)
        { u_array[i]=c-'0';
          delay_ms(50);
          i++;
          dig_i_u_value++;
        }
    }
}

```

```

    }
    if(digi_u_value==0) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"0    "); }
    if(digi_u_value==1) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d    ",u_array[0]); }
    if(digi_u_value==2) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d%d
",u_array[0],u_array[1]); }
    if(digi_u_value==3) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d%d%d
",u_array[0],u_array[1],u_array[2]); }
    if(digi_u_value==4) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d
",u_array[0],u_array[1],u_array[2],u_array[3]); }
    if(digi_u_value==5) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d
",u_array[0],u_array[1],u_array[2],u_array[3],u_array[4]); }
    if(digi_u_value==6) { lcd_gotoxy(6,3);printf(lcd_putc,"%d%d%d%d%d%d
",u_array[0],u_array[1],u_array[2],u_array[3],u_array[4],u_array[5]); }

    if(Read_Keypad()=='A')
    { sw=0;
      for(i=0;i<8;i++)
      {
        u_array[i]=0;
      }
      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("*****");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("*ClearTelephone*");
      lcd_gotoxy(1,3);
      lcd_putc("* Number *");
      lcd_gotoxy(1,4);
      lcd_putc("*****");
      delay_ms(1000);
      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("*****");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("* Enter U Value*");
      lcd_gotoxy(1,3);
      lcd_putc("* : *");
      lcd_gotoxy(1,4);
      lcd_putc("*****");

      i=0; digi_u_value=0;
    }
    if(Read_Keypad()=='B')
    { sw=0;
      if(read_eeprom(0X50)!=digi_u_value){ write_eeprom (0X50,digi_u_value); }
      if(read_eeprom(0X40)!=u_array[0]) { write_eeprom (0X40,u_array[0]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X41)!=u_array[1]) { write_eeprom (0X41,u_array[1]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X42)!=u_array[2]) { write_eeprom (0X42,u_array[2]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X43)!=u_array[3]) { write_eeprom (0X43,u_array[3]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X44)!=u_array[4]) { write_eeprom (0X44,u_array[4]);
delay_ms(10);}
      if(read_eeprom(0X45)!=u_array[5]) { write_eeprom (0X45,u_array[5]);
delay_ms(10);}
      read_u_value();
      lcd_gotoxy(1,1);
      lcd_putc("* Save Shunt *");
      lcd_gotoxy(1,2);
      lcd_putc("* Resistance *");

```

```

        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc("  Value  ");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("      ");
        delay_ms(1000);
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("*****");
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc(" Enter U Value");
        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc(" :      ");
        lcd_gotoxy(1,4);
        lcd_putc("*****");
        for(i=0;i<dig_i_value;i++)
        {
            lcd_gotoxy(i+6,3);
            printf(lcd_putc,"%d",u_array[i]);
        }
        i=0;
    }
}while(Read_Keypad()!='F');
sw=0;
}
}
void menu_set_time()
{ int hour_set[3]; int min_set[3];
  unsigned char c; int i=0;
  while(Read_Keypad()=='6')
  {
    sw=0;
    DS1307_ReadTime ();
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc(" Setup Date ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc," Set Hour : %x ",RTC.hr);
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc," Set Minute : %x",RTC.min);
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"      ");

    hour_set[0]=RTC.hr/16; hour_set[1]=RTC.hr%16;
    min_set[0]=RTC.min/16; min_set[1]=RTC.min%16;

    i=0;
    do{ c=Read_Keypad(); sw=0;
        if(c>='0'&&c<='9'&&i<2)
        { hour_set[i]=c-'0';
          delay_ms(100);
          i++;
        }
        lcd_gotoxy(13,2);
        printf(lcd_putc,"%d%d",hour_set[0],hour_set[1]);
        if(Read_Keypad()=='A'||Read_Keypad()=='B')
        {
            sw=0;
            i=0;
        }
    }while(Read_Keypad()!='D'&&Read_Keypad()!='F');sw=0;
    RTC.hr=hour_set[0]*16+hour_set[1];

```

```

i=0;
do{ c=Read_Keypad(); sw=0;
  if(c>='0'&&c<='9'&&i<2)
    { min_set[i]=c-'0';
      delay_ms(100);
      i++;
    }
  lcd_gotoxy(15,3);
  printf(lcd_putc,"%d%d",min_set[0],min_set[1]);
  if(Read_Keypad()=='A'||Read_Keypad()=='B')
    {
      sw=0;
      i=0;
    }
}while(Read_Keypad()!='D'&&Read_Keypad()!='F');sw=0;
RTC.min=min_set[0]*16+min_set[1];
RTC.sec=0;
DS1307_WriteTime();
}
}

```

```

void menu_set_date()
{ int date_set[3]; int month_set[3]; int year_set[3];
  unsigned char c; int i=0;
  while(Read_Keypad()=='5')
  {
    sw=0;
    DS1307_ReadDate();
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc(" Setup Date ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc," Set Date : %x ",RTC.date);
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc," Set Month : %x ",RTC.month);
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc," Set Year : %x ",RTC.year);

    date_set[0]=RTC.date/16; date_set[1]=RTC.date%16;
    month_set[0]=RTC.month/16; month_set[1]=RTC.month%16;
    year_set[0]=RTC.year/16; year_set[1]=RTC.year%16;
  }
}

```

```

i=0;
do{ c=Read_Keypad(); sw=0;
  if(c>='0'&&c<='9'&&i<2)
    { date_set[i]=c-'0';
      delay_ms(100);
      i++;
    }
  lcd_gotoxy(13,2);
  printf(lcd_putc,"%d%d",date_set[0],date_set[1]);
  if(Read_Keypad()=='A'||Read_Keypad()=='B')
    {
      sw=0;
      i=0;
    }
}while(Read_Keypad()!='D'&&Read_Keypad()!='F');sw=0;
RTC.date=date_set[0]*16+date_set[1];

```

```

i=0;
do{ c=Read_Keypad(); sw=0;
  if(c>='0'&&c<='9'&&i<2)

```

```

    { month_set[i]=c-'0';
      delay_ms(100);
      i++;
    }
    lcd_gotoxy(14,3);
    printf(lcd_putc,"%d%d",month_set[0],month_set[1]);
    if(Read_Keypad()=='A'||Read_Keypad()=='B')
    {
      sw=0;
      i=0;
    }
  }while(Read_Keypad()!='D'&&Read_Keypad()!='F');sw=0;
  RTC.month=month_set[0]*16+month_set[1];

i=0;
do{ c=Read_Keypad(); sw=0;
  if(c>='0'&&c<='9'&&i<2)
  { year_set[i]=c-'0';
    delay_ms(100);
    i++;
  }
  lcd_gotoxy(13,4);
  printf(lcd_putc,"%d%d",year_set[0],year_set[1]);
  if(Read_Keypad()=='A'||Read_Keypad()=='B')
  {
    sw=0;
    i=0;
  }
}while(Read_Keypad()!='D'&&Read_Keypad()!='F');sw=0;
RTC.year=year_set[0]*16+year_set[1];
DS1307_WriteDate();
}
}

void show_time()
{
  if(voltage_enable)
  {
    DS1307_ReadDate();
    DS1307_ReadTime ();
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc,"Time : %x:%x:%x ",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"V peak : %.2f V",voltage_peak_to_peak/2);
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"V avg : %.2f V",average_voltage);
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"Capaci : %.3fnF",capacitance*1000000000);

    // if(capacitance>0.001)                printf(lcd_putc,"Capaci : %.3f
F",capacitance);
    // else if((capacitance<=0.001)&&(capacitance>0.000001))
    printf(lcd_putc,"Capaci : %.3fmF",capacitance*1000);
    // else if((capacitance<=0.000001)&&(capacitance>0.000000001))
    printf(lcd_putc,"Capaci : %.3fuF",capacitance*1000000);
    // else if((capacitance<=0.000000001)&&(capacitance>0.000000000001))
    printf(lcd_putc,"Capaci : %.3fnF",capacitance*1000000000);
    // else                printf(lcd_putc,"Capaci : 0 nF");
    if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x00))&&cookie_loop1)
    {

```



```

    send_sms();
    cookie_loop1=0;
}
if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x10))&&cookie_loop2)
{
    send_sms();
    cookie_loop2=0;
}
if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x20))&&cookie_loop3)
{
    send_sms();
    cookie_loop3=0;
}
if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x30))&&cookie_loop4)
{
    send_sms();
    cookie_loop4=0;
}
if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x40))&&cookie_loop5)
{
    send_sms();
    cookie_loop5=0;
}
if(((RTC.hr==0x08)&&(RTC.min==0x50))&&cookie_loop6)
{
    send_sms();
    cookie_loop6=0;
}
if(RTC.hr==0x09)
{
    cookie_loop1=1;
    cookie_loop2=1;
    cookie_loop3=1;
    cookie_loop4=1;
    cookie_loop5=1;
    cookie_loop6=1;
}

while(Read_Keypad()=='A')
{
    sw=0;
    do{
        DS1307_ReadDate();
        DS1307_ReadTime ();
        lcd_gotoxy(1,1);
        printf(lcd_putc,"Date : %x/%x/%x ",RTC.date,RTC.month,RTC.year);
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"Time : %x:%x:%x ",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
        lcd_gotoxy(1,3);
        printf(lcd_putc,"V peak : %.3f V",voltage_peak_to_peak/2);
        lcd_gotoxy(1,4);
        printf(lcd_putc,"V rms : %.3f V",voltage_peak_to_peak/2.828);
    }while(Read_Keypad()!='F');
    sw=0;
}
voltage_enable=0;
}
}

void send_sms()

```

```

{
    printf("AT+CMGF=1\n\r");
    delay_ms(200);
    printf("ATE=1\n\r");
    delay_ms(200);
    printf("AT+CMGS=\"%s\"\n\r",tele_user);
    printf("Date : %x/%x/%x \n\r",RTC.date,RTC.month,RTC.year);
    printf("Time : %x:%x:%x \n\r",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
    printf("V peak : %.2f V\n\r",voltage_peak_to_peak/2);
    printf("V avg : %.2f V\n\r",average_voltage);
    printf("C : %.5f nF\n\r",capacitance*1000000000);

    // if(capacitance>0.001)                printf("Capaci : %.3f
F\n\r",capacitance);
    // else if((capacitance<0.001)&&(capacitance>0.000001))        printf("Capaci : %.3f
mF\n\r",capacitance*1000);
    // else if((capacitance<0.000001)&&(capacitance>0.000000001))    printf("Capaci :
%.3f uF\n\r",capacitance*1000000);
    // else if((capacitance<0.000000001)&&(capacitance>0.000000000001))    printf("Capaci :
%.3f nF\n\r",capacitance*1000000000);
    // else                                printf("Capaci : 0 nF");
    printf("%c",ctrl_z);
    printf("\n\r");
}

```


  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรุตน์ สุกไสว เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยี นานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2546 และการศึกษาระดับปริญญา การจัดการมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทั่วไป จากวิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2550 และเข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย