

การพัฒนาเครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อประเมินการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าแรงสูง



นายฐิตินันท์ ศิริประภาวัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DEVELOPMENT OF LEAKAGE CURRENT METER FOR EVALUATING DEGRADATION OF  
SURGE ARRESTERS INSTALLED IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS

Mr. Thitinun Siriprapawat



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อประเมินการเสื่อมสภาพของกักเก็บเสิร์จในระบบไฟฟ้าแรงสูง
โดย	นายฐิตินันท์ ศิริประภาวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

ฐิตินันท์ ศิริประภาวัฒน์ : การพัฒนาเครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อประเมินการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าแรงสูง. (DEVELOPMENT OF LEAKAGE CURRENT METER FOR EVALUATING DEGRADATION OF SURGE ARRESTERS INSTALLED IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล, 45 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีหารูปคลื่นกระแสรั่วผ่านกัปดักเสิร์จ 3 ตัวที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงแบบสามเฟสโดยวิธีวัดกระแสรั่วรวมในสายกราวด์ร่วมเท่านั้น วิธีนี้ใช้สมมติฐานว่ากระแสรั่วแต่ละเฟสจะเกิดในช่วงเวลาต่างกันทำให้สามารถแยกออกจากกันได้ง่าย ส่วนลำดับเฟสของกระแสนั้นหาได้จากการวัดรูปคลื่นแรงดันต่ำในตำแหน่งที่ห่างออกไปแล้วส่งผลการวัดกลับมาแบบไร้สายพร้อมกับสัญญาณเข้าจังหวะที่ได้จากอุปกรณ์จีพีเอส ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นจากวิธีนี้มี 2 ส่วน ส่วนแรกใช้วัดกระแสรั่วรวม ณ จุดวัด ส่วนที่สองใช้วัดแรงดันต่ำที่ตำแหน่งห่างไกลออกไป ฮาร์ดแวร์ทั้งสองตัวมีโครงสร้างคล้ายกัน กล่าวคือประกอบด้วยวงจรรับสัญญาณอนาล็อกไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมจอแสดงผลสีเหลว อุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่แบบจีพีอาร์เอส และอุปกรณ์จีพีเอส วิธีนี้ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จบนสายไฟโดยไม่ต้องถอดออกมาจากระบบไฟฟ้าแรงสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5470552321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: THREE PHASE SYSTEM / LIGHTNING ARRESTER / RESISTIVE CURRENT

THITINUN SIRIPRAPAWAT: DEVELOPMENT OF LEAKAGE CURRENT METER FOR EVALUATING DEGRADATION OF SURGE ARRESTERS INSTALLED IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS. ADVISOR: ASSOC. PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., CO-ADVISOR: CHARNARONG BANMONGKOL, Ph.D., 45 pp.

A method for determining the leakage waveforms of currents through 3 surge arresters installed on high voltage system by measuring only the total leakage current at their common ground line is presented. It exploits the assumption that each phase leakage contributes to the total current at different time interval, and hence can be easily extracted. To determine the phase sequence of the leakage, a voltage waveform measurement is carried out on low voltage system at a remote location and wirelessly transferred to the measurement site along with synchronizing pulses from a global position system (GPS) device. Two piece of hardware are developed based on this method. The first is used for measuring the total leakage current at the site. The second is used for measuring voltage at a remote low voltage location. Both hardware are similar. It consists of an analog conditioning circuit, a microcontroller with LCD display, a GPRS mobile transceivers and a GPS unit. This method allows the operator to evaluate the degradation of surge arresters online without removing them from the high voltage system.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature .....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature .....
Academic Year:	2013	Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุน การวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองตลอดจนให้ คำแนะนำแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้และประสบการณ์ดี ๆ ทั้งด้านวิชาการ ด้าน สังคมและอื่นๆแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา คุณลุง คุณป้า คุณน้า อย่างสูงที่เล็งดูให้การสนับสนุน ในด้านการเงินและกำลังใจ ขอขอบคุณพี่สาว ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ มาตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวมทุก คน และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ชาวชมรมโรบอททุกคน สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำและความรู้สึก ดีๆที่มีให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสิ่งเล็กๆที่เรียกว่าจินตนาการ ที่ยังคงมีอยู่ตลอดมาและหวังว่าจะคงอยู่ ตลอดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1. โครงสร้างของกัปดักเสิร์จ.....	4
2.1.1. กัปดักเสิร์จชนิด Silicon Carbide (SiC).....	4
2.1.2. กัปดักเสิร์จชนิด Metal Oxide (MO).....	4
2.2. การติดตั้งกัปดักเสิร์จ.....	6
2.3. คำนิยามจาก IEC[12] และ IEEE[13].....	6
2.4. กราฟลักษณะสมบัติของกัปดักเสิร์จ.....	7
2.5. การระบุความเสี่ยงของกัปดักเสิร์จด้วยวิธีวัดกระแสรั่วความต้านทาน.....	9
บทที่ 3 การวิเคราะห์กระแสรั่วของกัปดักเสิร์จชนิด Metal Oxide (MO).....	10
3.1. คุณลักษณะของอุปกรณ์กัปดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	10
3.2. วิธีแยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรั่วรวมเพื่อหารูปคลื่นกระแสความต้านทานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	13
3.3. กัปดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟส.....	16

3.4.	วิธีการแยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรั่วรวมเพื่อหารูปคลื่นกระแสความ ต้านทานในระบบไฟฟ้าสามเฟส.....	17
3.5.	การวัดสัญญาณกระแส .....	21
3.6.	การวัดสัญญาณแรงดัน .....	21
บทที่ 4	การออกแบบอุปกรณ์ระบุความถี่ของกับดักเสิร์จ .....	22
4.1.	วิเคราะห์ลักษณะของกระแสรั่วเชิงความถี่.....	22
4.2.	อัตราการซีกตัวอย่าง (Sampling rate).....	23
4.3.	ความละเอียดของการวัด (Resolution).....	24
4.4.	ออกแบบวงจรกรอง.....	24
4.5.	อุปกรณ์วัดกระแสรั่ว.....	26
4.6.	อุปกรณ์วัดแรงดันอ้างอิง.....	30
4.7.	ขั้นตอนวิเคราะห์ความถี่.....	32
บทที่ 5	การทดสอบและประเมินผล .....	33
5.1.	ทดสอบความถี่ของกับดักเสิร์จด้วยวิธีวัดกระแสรั่วในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่แรงดัน 12.7 กิโลโวลต์ .....	33
5.2.	การทดสอบผลของความคลาดเคลื่อนจากการวัดแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆกัน เพื่อสังเกต ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) กับระยะทางของสายส่งในสถานที่จริง .....	38
บทที่ 6	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ .....	41
6.1.	ข้อสรุป .....	41
6.2.	ข้อเสนอแนะ.....	41
	รายการอ้างอิง .....	42
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	45



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงค่าที่ได้จากการแยกกระแสความต้านทานออกจากกระแสรวม.....	37
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความต่างเฟสที่วัดได้ในแต่ละสถานที่ .....	39



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญญภาพ

รูปที่ 2-1 ลักษณะของกับดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ.....	5
รูปที่ 2-2 กราฟลักษณะสมบัติของกับดักเสิร์จชนิด Metal Oxide และ Silicon Carbide .....	5
รูปที่ 2-3 การติดตั้งกับดักเสิร์จชนิด MO ในสถานที่จริง .....	6
รูปที่ 2-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของกับดักเสิร์จ .....	7
รูปที่ 2-5 กราฟลักษณะสมบัติของกับดักเสิร์จที่มีสภาพดี และเสีย .....	8
รูปที่ 3-1 แบบจำลองกับดักเสิร์จ.....	10
รูปที่ 3-2 ลักษณะของกระแสความต้านทานกับแรงดัน .....	11
รูปที่ 3-3 ลักษณะของกระแสความจุกับแรงดัน .....	12
รูปที่ 3-4 แสดงกระแสรั่วในกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพ.....	12
รูปที่ 3-5 แสดงกระแสรั่วในกับดักเสิร์จที่มีสภาพดี .....	12
รูปที่ 3-6 กับดักเสิร์จชนิด MO สภาพดี.....	13
รูปที่ 3-7 กับดักเสิร์จชนิด MO สภาพเสื่อม.....	13
รูปที่ 3-8 รูปคลื่นกระแสความต้านทาน และกระแสตัวเก็บประจุเทียบกับแรงดันอ้างอิง .....	14
รูปที่ 3-9 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิง .....	14
รูปที่ 3-10 การสร้างรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุจากกระแสรั่วรวม.....	15
รูปที่ 3-11 รูปคลื่นกระแสความต้านทานที่แยกได้ .....	15
รูปที่ 3-12 กระแสรั่วในแต่ละเฟสและกระแสรั่วรวมสามเฟส .....	16
รูปที่ 3-13 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานรวมในระบบสามเฟส .....	17
รูปที่ 3-14 รูปคลื่นกระแสความต้านทานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส .....	18
รูปที่ 3-15 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานในแต่ละเฟส .....	18
รูปที่ 3-16 กราฟสัญญาณแรงดัน กระแสไฟฟ้ารั่วรวมและกระแสตัวเก็บประจุรวมที่สร้างขึ้น.....	19
รูปที่ 3-17 กราฟสัญญาณแรงดัน กระแสความต้านทานและกระแสตัวเก็บประจุรวม.....	20
รูปที่ 3-18 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานที่แยกได้ในแต่ละเฟส .....	20
รูปที่ 3-19 ระบบการวัดและประมวลผลของสัญญาณกระแส.....	21
รูปที่ 4-1 ลักษณะเชิงความถี่ของกระแสรั่ว.....	22
รูปที่ 4-2 ไอซีแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิต.....	24
รูปที่ 4-3 ทอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองต่ำผ่านแสดงในหน่วยเดซิเบลกับเรเดียนต่อวินาที.....	24
รูปที่ 4-4 ขั้นตอนการวัดกระแสรั่วจากการจำลองรูปคลื่นกระแสรั่วในรูปแบบต่างๆ.....	25
รูปที่ 4-5 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของส่วนวัดกระแสรั่ว .....	26

รูปที่ 4-6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดกระแสรั่ว .....	26
รูปที่ 4-7 โมดูล GSM ของบริษัท sagem.....	27
รูปที่ 4-8 โมดูล GPS ซึ่งใช้ในการระบุตำแหน่งและเวลาอ้างอิง .....	28
รูปที่ 4-9 จอแสดงผล OLED แบบกราฟิก .....	29
รูปที่ 4-10 โครงสร้างการทำงานของ USB to UART .....	29
รูปที่ 4-11 แผนผังแสดงโครงสร้างของส่วนวัดแรงดันอ้างอิง.....	30
รูปที่ 4-12 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดันอ้างอิง .....	30
รูปที่ 4-13 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์.....	31
รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันในสายส่งกับสัญญาณตรวจจับแรงดันศูนย์.....	31
รูปที่ 4-15 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกับดักเสิร์จ .....	32
รูปที่ 5-1 การทดสอบวัดค่ากระแสรั่วจากการทดลองจริง.....	33
รูปที่ 5-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสรั่วรวมสามเฟส กับ แรงดันเฟส A.....	34
รูปที่ 5-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสรั่วในเฟส A , กระแสรั่วรวมสามเฟส และ แรงดันเฟส A.....	35
รูปที่ 5-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสรั่วรวมสามเฟส , กระแสตัวเก็บประจุรวมที่สร้างขึ้น.....	35
รูปที่ 5-5 เปรียบเทียบ กระแสรั่วความจุรวมที่สร้างขึ้นจากการวัดในระบบ 3 เฟสและกระแสตัวเก็บประจุรวมที่แยกได้จากการวัดแต่ละเฟส .....	36
รูปที่ 5-6 เปรียบเทียบกระแสรั่วความต้านทานรวมที่แยกจากระบบ 1 เฟส กับ ระบบ 3 เฟส .....	36
รูปที่ 5-7 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดแรงดันบนแผนที่ .....	38
รูปที่ 5-8 แบบจำลองสายส่งระยะสั้น .....	40

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

กับดักเสิร์จเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงหน้าที่ของกับดักเสิร์จคือใช้ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะเกิดภาวะแรงดันเกินหรือจากเหตุการณ์ฟ้าผ่า อย่างไรก็ตามกับดักเสิร์จที่ใช้เป็นเวลานานอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้ หากกับดักฟ้าเกิดการชำรุดจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบสายส่งได้ การตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จจึงมีความสำคัญ

การเสื่อมสภาพของกับดักฟ้าสามารถตรวจสอบได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น ระบบการตรวจสอบอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง และสภาวะแวดล้อมมีผลมากในการวัด [1-3] หรือในการวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้างก็จำเป็นต้องถอดอุปกรณ์มาทดสอบเท่านั้น[4]

ในงานนี้ ได้เลือกใช้วิธีการระบุความสัมพันธ์ด้วยการระบุขนาดของกระแสรั่วความต้านทานที่ไหลผ่านตัวกับดักเสิร์จซึ่งเป็นวิธีที่แพร่หลายวิธีหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนักกระแสรั่วที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อกับดักเสิร์จมีความเสื่อมเพิ่มมากขึ้น[5-10] การวัดในสถานที่จริงใช้วิธีวัดกระแสรั่วรวมซึ่งเป็นการวัดกระแสรั่วที่ไหลผ่านสายดินบริเวณโคนเสา กระแสรั่วที่วัดได้จะเป็นผลรวมของกระแสรั่วของกับดักแต่ละเฟส เพื่อความสะดวกโดยไม่ต้องถอดอุปกรณ์ออกมาเพื่อทำการวัดและหลีกเลี่ยงอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและแสดงวิธีการแยกกระแสไฟฟ้าวัดในแต่ละเฟสออกจากกระแสรั่วรวมในระบบไฟฟ้าสามเฟส ทำให้สามารถระบุความสัมพันธ์ของกับดักเสิร์จได้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาวิธีการหารูปคลื่นกระแสรั่วความต้านทานของกัปดักเสิร์จแต่ละตัวในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยการวัดรูปคลื่นของกระแสรั่วรวมสามเฟสที่โคนเสาไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันเฟส
2. ออกแบบสร้างเครื่องวัดกระแสรั่ว ตามวิธีที่กล่าวในข้อที่ 1

## 1.3. ขอบเขตของการวิจัย

เครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อวิเคราะห์ความเสื่อมของกัปดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. วงจรวัดกระแสขนาดต่ำกว่า 1 มิลลิแอมป์ที่มีความละเอียดต่ำกว่า 5 ไมโครแอมป์ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการวัดเฟสไม่เกิน 0.36 องศา
2. อ้างอิงเวลาที่เริ่มเก็บค่าที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 60 นาโนวินาที
3. แยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรั่วรวมสามเฟสได้
4. ระบุจำนวนและเจาะจงเฟสของกัปดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพได้

## 1.4. วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาาระบบไฟฟ้า หนึ่งเฟส วิเคราะห์รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสรั่วรวม กระแสรั่วความต้านทาน และ กระแสรั่วความจุ
2. ศึกษาาระบบไฟฟ้า สามเฟส วิเคราะห์รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสรั่วรวม กระแสรั่วความต้านทาน และ กระแสรั่วความจุ ทั้งในแต่ละเฟสและกระแสรวมของสามเฟส
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรม Labview 2012 ที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นกระแสรั่ว
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการวิเคราะห์และจำลองรูปคลื่น
5. ศึกษาและออกแบบวิธีทดสอบการวัดกระแสรั่วจากการจำลองรูปคลื่นโดยใช้อุปกรณ์ DAQ (Data acquisition)
6. ศึกษาการใช้ current clamp ใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณกระแสมาเป็นแรงดัน
7. เลือกตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC, A/D)
8. ศึกษาและออกแบบวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำแบบแอกทีฟ (Active Low-Pass Filter)

9. ออกแบบ รวมวงจรและสร้างวงจรต้นแบบโดยใช้ dspic30f6014a เป็นหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU)
10. ออกแบบวงจรวัดเฟสอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าแบบโอดเดี่ยว ที่ตานแรงดันต่ำ
11. เลือกและทดลองใช้ เครื่องรับสัญญาณจากระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (GPS Receiver)
12. เขียนโปรแกรมเชื่อมต่อข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์
13. รวบรวมผลการทดลอง, สรุปผล และ เขียนเสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์

#### 1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องต้นแบบในการระบุมหาความถี่ของกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีวัดกระแสรั่วรวม
2. ได้ขั้นตอนวิธีวิเคราะห์ความถี่ของกับดักเสิร์จที่สามารถทำได้สะดวกและปลอดภัย
3. ได้เครื่องต้นแบบที่สามารถทำงานแบบแมนตรง (online) ได้

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. โครงสร้างของกับดีกเสิร์จ

ลักษณะการทำงานกับดีกเสิร์จหรือกับดีกเสิร์จจะทำงานในสภาวะชั่วครู่ เมื่อระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังเกิดภาวะแรงดันเกิน ซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการปลดสับสวิตช์ หรือมีเหตุการณ์เกิดฟ้าผ่า ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะดังกล่าวอาจมีค่ามากกว่าแรงดันใช้งานในสภาวะปกติ ดังนั้นในการป้องกันอุปกรณ์มิให้เสียหายจากเหตุการณ์ดังกล่าวแก่อุปกรณ์ที่สำคัญ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์กับดีกเสิร์จโดยจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน กับดีกเสิร์จจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นมี 2 ชนิด คือ Silicon Carbide (SiC) และ Metal Oxide (MO)[11]

##### 2.1.1. กับดีกเสิร์จชนิด Silicon Carbide (SiC)

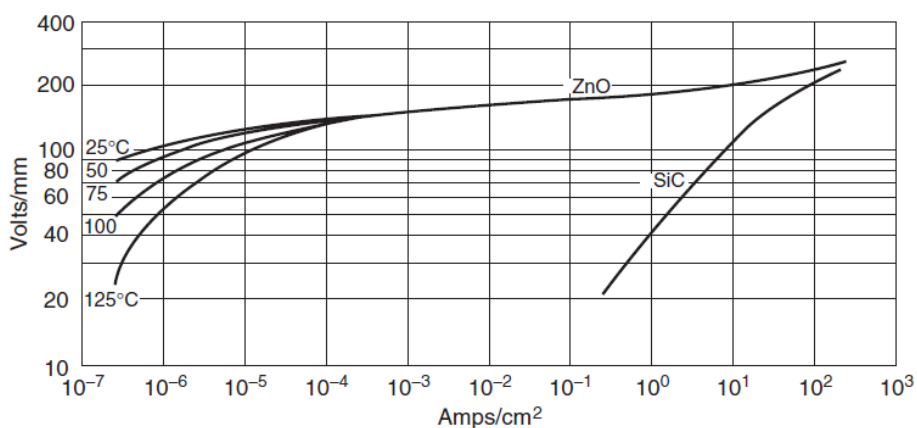
กับดีกเสิร์จชนิดนี้จะมีสปาร์กแกป (spark gap) ต่ออนุกรมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดพิคกแรงดันของกับดีกเสิร์จ ทำหน้าที่เป็นฉนวนในสภาวะแรงดันปกติ และเกิดการพังทลายผ่านเมื่อได้รับแรงดันเกิน ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดีกเสิร์จลดลง เหลือเพียงแต่แรงดันคงค้าง (residual voltage)

##### 2.1.2. กับดีกเสิร์จชนิด Metal Oxide (MO)

กับดีกเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะเป็นชนิดที่ใช้กันแพร่หลายกว่าแบบ SiC กับดีกเสิร์จนี้ จะใช้ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกวางซ้อนกัน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นตัวกำหนดขนาดกระแส ความสูงของแท่งที่ซ้อนกันเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันตามรูปที่ 2-1 กับดีกเสิร์จชนิด MO ได้รับการออกแบบให้ทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -40 ถึง 40 องศาเซลเซียส ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอกอยู่ในบริเวณใกล้เคียงยอมให้อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2-1 ลักษณะของกั๊บดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ



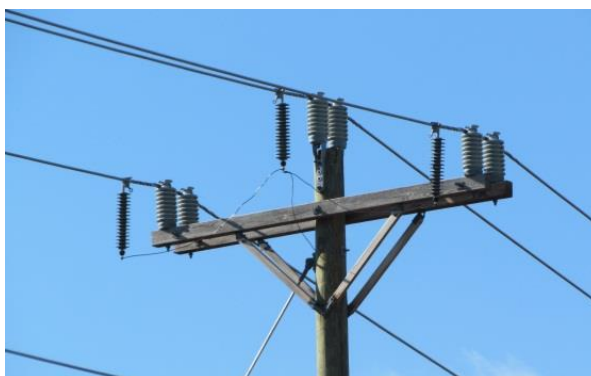
รูปที่ 2-2 กราฟลักษณะสมบัติของกั๊บดักเสิร์จชนิด Metal Oxide และ Silicon Carbide

จากรูปที่ 2-2 ที่แรงดันปกติ กระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของชนิด MO มีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ จึงไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างต่ออนุกรมอยู่ เรียกว่าเป็นกั๊บดักเสิร์จชนิดไร้ช่องว่าง (gapless arrester) ส่วนชนิด SiC มีกระแสผ่านช่วง 100-500 แอมป์ จึงจำเป็นต้องมีช่องว่างต่ออนุกรมเพื่อลดขนาดของกระแสรั่ว



## 2.2. การติดตั้งกับดักเสิร์จ

ในรูปที่ 2-3 แสดงถึงการติดตั้งกับดักเสิร์จในสถานที่จริงบนระบบไฟฟ้าสามเฟสของกับดักเสิร์จชนิด MO กับดักเสิร์จจะติดตั้ง 1 ตัวต่อ 1 เฟส แล้วจึงรวมสายจากปลายที่เหลือเข้าด้วยกันก่อนจะต่อลงสู่ดิน

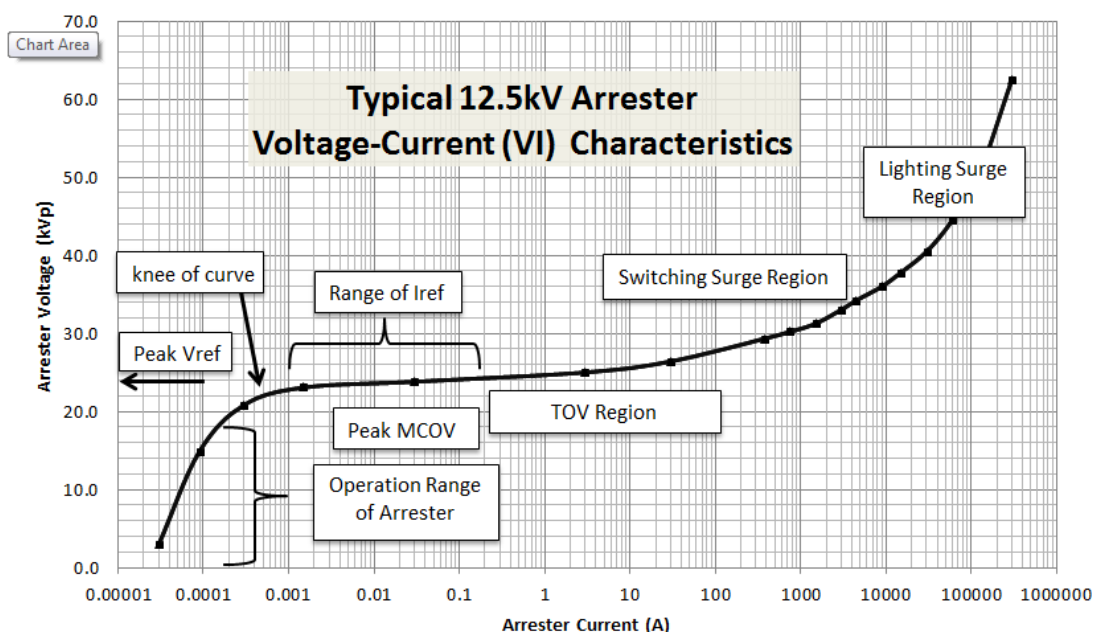


รูปที่ 2-3 การติดตั้งกับดักเสิร์จชนิด MO ในสถานที่จริง

## 2.3. คำนิยามจาก IEC[12] และ IEEE[13]

1. แรงดันอ้างอิง (Reference Voltage-Vref) คือค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ต่ำสุดที่ทำให้กระแสความต้านทาน มีขนาดเท่ากับกระแสอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ระดับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จหลายส่วนที่ต่ออนุกรมกันมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันอ้างอิงทั้งหมด ระดับแรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิต
2. กระแสอ้างอิง (Reference Current-Iref) คือค่ายอดของกระแสความต้านทานที่ทำให้สามารถละลายผลของกระแสตัวเก็บประจุ โดยส่วนใหญ่ ค่ากระแสอ้างอิงจะอยู่ในช่วง  $0.05 - 1.0 \frac{\text{มิลลิแอมป์}}{\text{เซนติเมตร}^2}$  ของขนาดกับดักเสิร์จ ค่ากระแสอ้างอิงนี้ถูกกำหนดโดยผู้ผลิต
3. กระแสความต้านทาน (Resistive Current) คือกระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จโดยมีเฟสของกระแสตรงกับเฟสของแรงดัน ขนาดของกระแสนี้จะมีความเด่นชัดเมื่อจุดทำงานอยู่เหนือส่วนโค้งของกราฟ (knee of the curve) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตามรูปที่
4. กระแสตัวเก็บประจุ (Capacitive Current) คือกระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จโดยมีเฟสของกระแสน่าเฟสของแรงดันอยู่  $90^\circ$  ขนาดของกระแสนี้จะมีความเด่นชัดเมื่อจุดทำงานอยู่ต่ำกว่าส่วนโค้งของกราฟ (knee of the curve) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

## 2.4. กราฟลักษณะสมบัติของก๊ับดักเสิร์จ



รูปที่ 2-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของก๊ับดักเสิร์จ

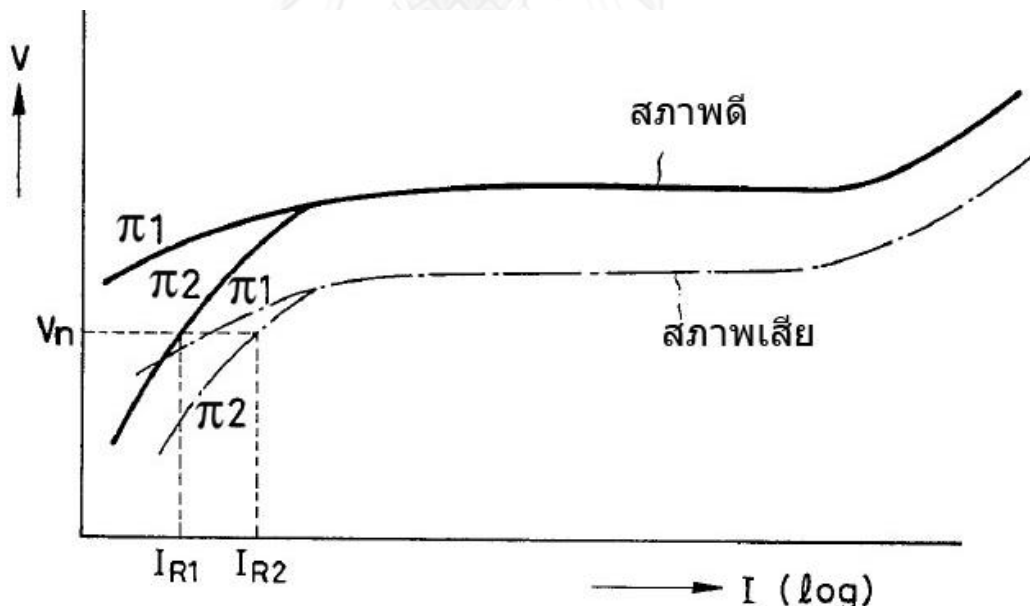
กราฟลักษณะสมบัติแรงดันและกระแสของก๊ับดักเสิร์จแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของก๊ับดักเสิร์จที่ขึ้นกับแรงดันค่าต่างๆโดยมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและช่วงแรงดันการใช้งานของก๊ับดักเสิร์จ

ตำแหน่งที่สำคัญบนกราฟกระแส แรงดันสามารถแสดงได้ดังนี้

1. ช่วงการทำงาน (Operating Range) ก๊ับดักเสิร์จใช้เวลาเกือบทั้งหมดในการทำงานในช่วงนี้ การนำไฟฟ้าของก๊ับดักเสิร์จมีขนาดน้อยมากโดยมีแค่เพียงกระแสรั่วไหลผ่านเท่านั้น ในช่วงการทำงานนี้อุณหภูมิจะมีผลเป็นอย่างมาก ที่แรงดันเท่ากันการนำไฟฟ้าจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
2. ส่วนโค้งของกราฟ (Knee of the Curve) เป็นช่วงรอยต่อการนำไฟฟ้าของก๊ับดักเสิร์จจากช่วงการทำงานเปลี่ยนเป็นช่วงนำไฟฟ้า การเปลี่ยนช่วงนี้เกิดขึ้นเร็วมาก ดังแสดงในรูปที่ 2-4
3. ช่วงแรงดันและกระแสอ้างอิง ( $V_{ref}-I_{ref}$ ) เป็นช่วงที่อยู่เหนือจุดหัวเข่า (knee of the curve) ในช่วงนี้เป็นช่วงนำไฟฟ้าโดยกระแสความต้านทานมีความเด่นชัดมากกว่ากระแสตัวเก็บประจุ หากค่าแรงดันเปลี่ยนไปเพียงนิดเดียว

ค่ากระแสจะเปลี่ยนไปมากเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของกักเก็บพลังงานในช่วงนี้จะใช้เวลาไม่นานนัก

4. ค่ายอดแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Peak Maximum Continuous Operating Voltage – Peak MCOV) ซึ่งตามมาตรฐาน IEC เรียกว่า  $U_c$  จุดนี้แสดงให้เห็นความเครียดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในช่วงการทำงานปกติ ค่ายอดแรงดันในช่วงการทำงานอยู่ในช่วงของ 70-85% ของแรงดันอ้างอิง
5. ภาวะแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage-TOV) ภาวะแรงดันเกินชั่วคราวเริ่มจากส่วนโค้งของกราฟ (Knee of the Curve) และจุดแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นเป็นลิขๆเท่า โดยทั่วไปแล้วยังไม่มีการกำหนดขอบเขตสิ้นสุดของช่วงนี้ ในช่วงการเกิดภาวะแรงดันเกินชั่วคราวกระแสที่ไหลผ่านสูงจะทำให้กักเก็บพลังงานร้อนกว่าในสภาวะปกติ
6. ช่วงการเกิดกระแสกระชากและการเกิดฟ้าผ่า (Switching Surge and Lightning Surge) ในทั้งสองช่วงนี้ กักเก็บพลังงานจะทำหน้าที่เป็นตัวหลักในการนำกระแสไฟฟ้าแบบการดล (impulse) เท่านั้น อุณหภูมิไม่มีผลกับความสามารถในการนำกระแสของกักเก็บพลังงานในช่วงนี้ ตามรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 กราฟลักษณะสมบัติของกักเก็บพลังงานที่มีสภาพดี และเสีย

รูปที่ 2-5 แสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของกระแสรั่วความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเส้นที่ 1 เป็นของตัวกักเก็บพลังงานที่เป็นปกติ และ เส้นที่ 2 แสดงลักษณะของกระแสที่

ไหลผ่านตัวกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพ กระแสรั่วความต้านทานของกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพจะมีขนาดสูงกว่ามากแม้ว่าอยู่ในอุณหภูมิที่เท่ากัน เช่น ในกรณีที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่  $\pi_2$  ที่ระดับแรงดันเท่ากัน กระแสรั่ว  $I_{R1}$  ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ในสภาวะปกติ(เส้นทึบ) จะมีขนาดน้อยกว่ากระแสรั่ว  $I_{R2}$  ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ในสภาวะเสื่อม ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการนำกระแสมากขึ้นตามไปด้วย  $\pi_2 > \pi_1$  โดยอุณหภูมิจะส่งผลชัดเจนในช่วงกระแสต่ำ

## 2.5. การระบุความเสื่อมของกับดักเสิร์จด้วยวิธีวัดกระแสรั่วความต้านทาน

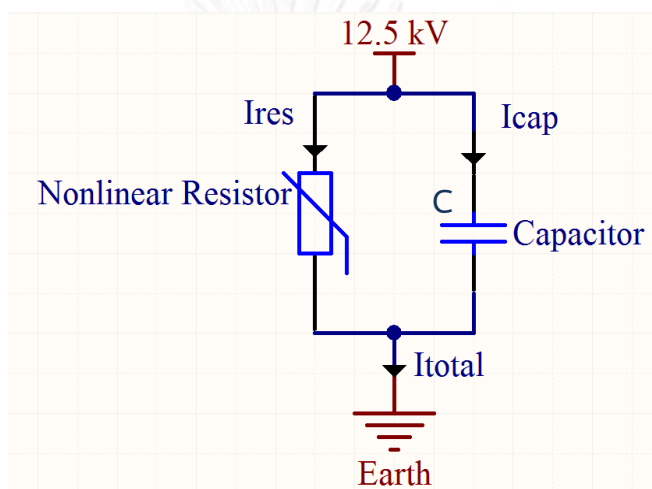
วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการวัดทั้งในขณะที่กับดักเสิร์จอยู่ในสภาพดีและสภาวะเสื่อม กับดักเสิร์จเมื่อเข้าสู่สภาวะเสื่อมจะมีกระแสความต้านทานที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในขณะที่คุณสมบัติอื่นๆจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ข้อมูลกระแสรั่วความต้านทานจึงสามารถใช้ในการประเมินสภาพของกับดักเสิร์จได้[5-10] ในการใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แล้ว การวัดข้อมูลจะมีความรวดเร็วเป็นอย่างมาก สามารถเก็บข้อมูลจากกระยะไกลได้ หากข้อมูลไม่ถูกส่งโดยอัตโนมัติไปยังศูนย์กลางก็สามารถเก็บลงหน่วยความจำได้อย่างรวดเร็ว การใช้งานเครื่องมือวัดใช้งานง่าย สะดวกในการติดตั้ง สามารถวัดกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งจริงได้ วิธีนี้มีความน่าเชื่อถือในการระบุอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จโดยอ้างอิงสถิติจากฐานข้อมูล ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแต่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องจัดการด้วยความระมัดระวัง

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์กระแสรั่วของกัปดักเสิร์จชนิด Metal Oxide (MO)

##### 3.1. คุณลักษณะของอุปกรณ์กัปดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

แบบจำลองของตัวกัปดักเสิร์จชนิด MO ประกอบด้วยความต้านทานไม่เชิงเส้นต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ซึ่งเชื่อมต่ออยู่ระหว่างสายไฟกับดินดังใน รูปที่ 3-1[5-10]



รูปที่ 3-1 แบบจำลองกัปดักเสิร์จ

โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวกัปดักเสิร์จประกอบไปด้วยกระแสความต้านทาน กับกระแสตัวเก็บประจุ โดยกระแสทุกเส้นจะเปลี่ยนตามเวลา ตามสมการที่(3-1)

$$I_{total} = I_{res} + I_{cap} \quad (3-1)$$

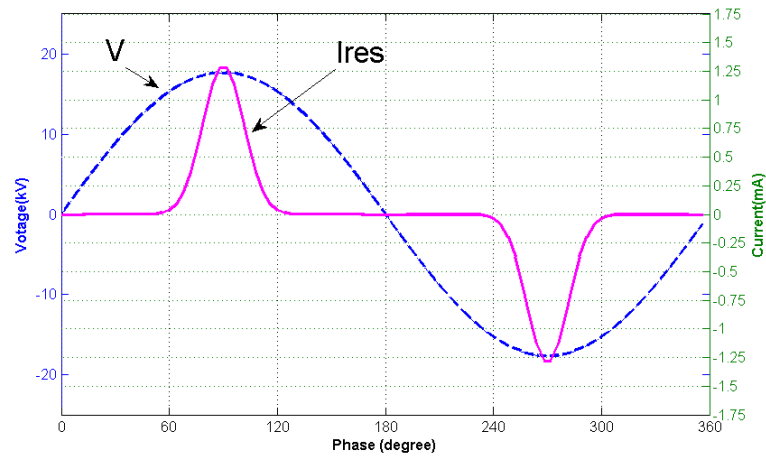
กำหนดไฟ  $V$  เป็นแรงดันคร่อมกัปดักฟ้าผ่าซึ่งเป็นแรงดันกระแสสลับ เขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) \quad (3-2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่(3-3) [5-10]

$$I_{res} = kV^\alpha \quad (3-3)$$

โดยค่า  $\alpha$  จะมีค่าระหว่าง 25-30 และ  $k$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นลักษณะของกัปดักเสิร์จแต่ละตัว ลักษณะรูปคลื่นของกระแสรั่วความต้านทานกับแรงดันตกคร่อมแสดงได้ดังรูปที่ 3-2

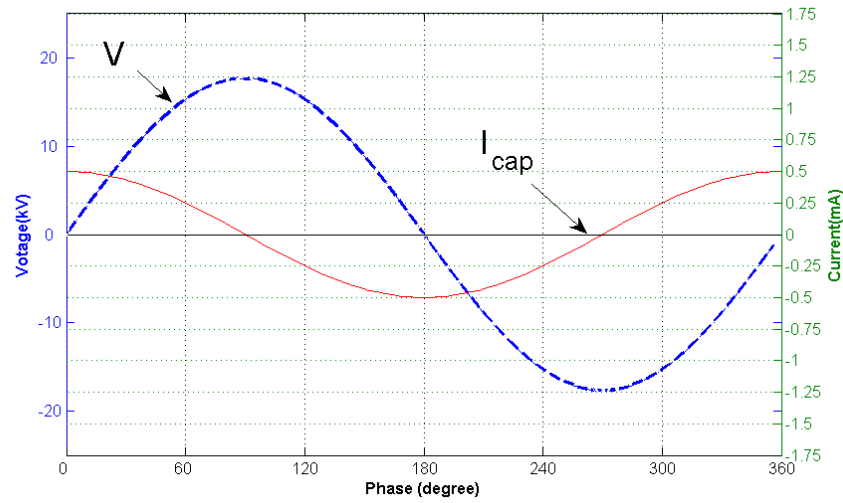


รูปที่ 3-2 ลักษณะของกระแสความต้านทานกับแรงดัน

ลักษณะรูปคลื่นของกระแสตัวเก็บประจุเป็นฟังก์ชันโคไซน์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ตามสมการ(3-4) ซึ่งไม่มีฮาร์มอนิกส์ดังรูปที่ 3-3[7]

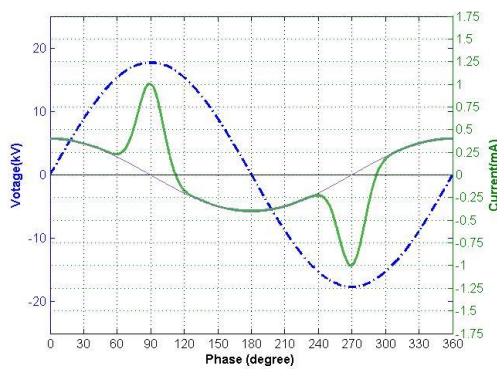
$$I_{cap} = c \frac{dV}{dt} \quad (3-4)$$

$$I_{cap} = I_{c,max} \cos(\omega t)$$

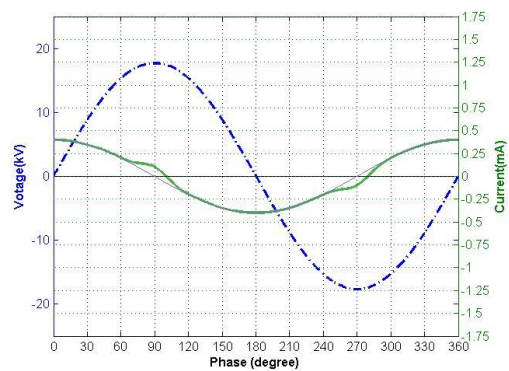


รูปที่ 3-3 ลักษณะของกระแสความจุกับแรงดัน

ความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จสามารถบอกได้โดยสังเกตจากค่ายอดของกระแสความต้านทาน ในกัปดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพจะมีค่ายอดของกระแสความต้านทานที่ไหลผ่านสูงกว่าในกัปดักเสิร์จที่มีสภาพดีแสดงในรูปที่ 3-4 ถึงรูปที่ 3-7 [5-10]



รูปที่ 3-4 แสดงกระแสรั่วในกัปดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพ



รูปที่ 3-5 แสดงกระแสรั่วในกัปดักเสิร์จที่มีสภาพดี



รูปที่ 3-6 กักดักเสิร์จชนิด MO สภาพดี



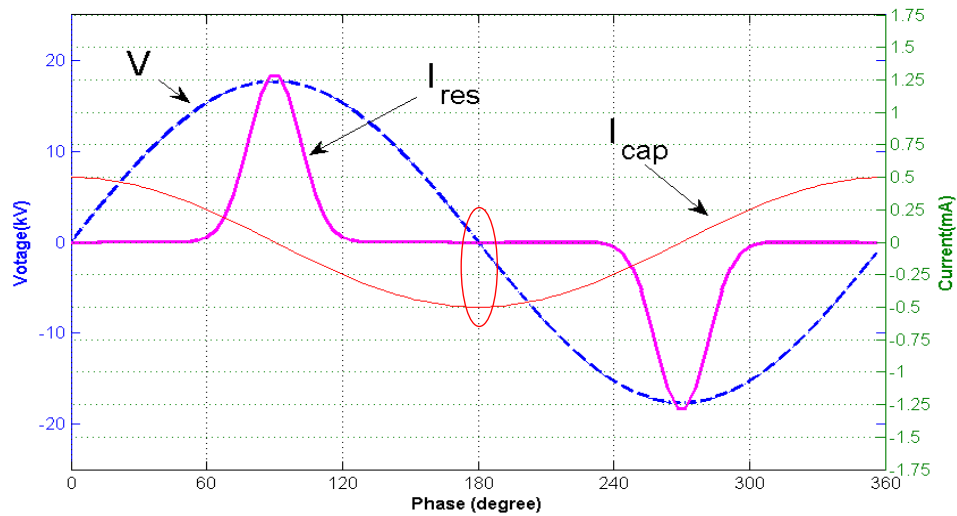
รูปที่ 3-7 กักดักเสิร์จชนิด MO สภาพเสื่อม

### 3.2. วิธีแยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรวมเพื่อหารูปคลื่นกระแสความต้านทานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

เมื่อสังเกตลักษณะของกระแสความต้านทาน และกระแสตัวเก็บประจุเปรียบเทียบกับแรงดันพบว่า ที่มุม  $180^\circ$  กระแสความต้านทานมีขนาดเป็นศูนย์และกระแสตัวเก็บประจุมีขนาดเป็นค่ายอดตามสมการที่(3-5)

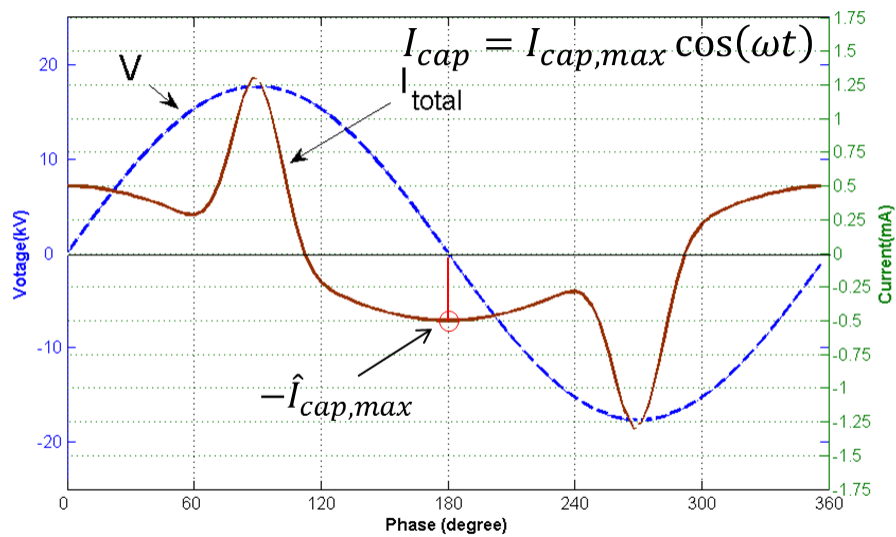
$$I_{res} = 0, I_{cap} = -I_{cap,max} \quad \text{at } 180^\circ \quad (3-5)$$





รูปที่ 3-8 รูปคลื่นกระแสความต้านทาน และกระแสตัวเก็บประจุเทียบกับแรงดันอ้างอิง

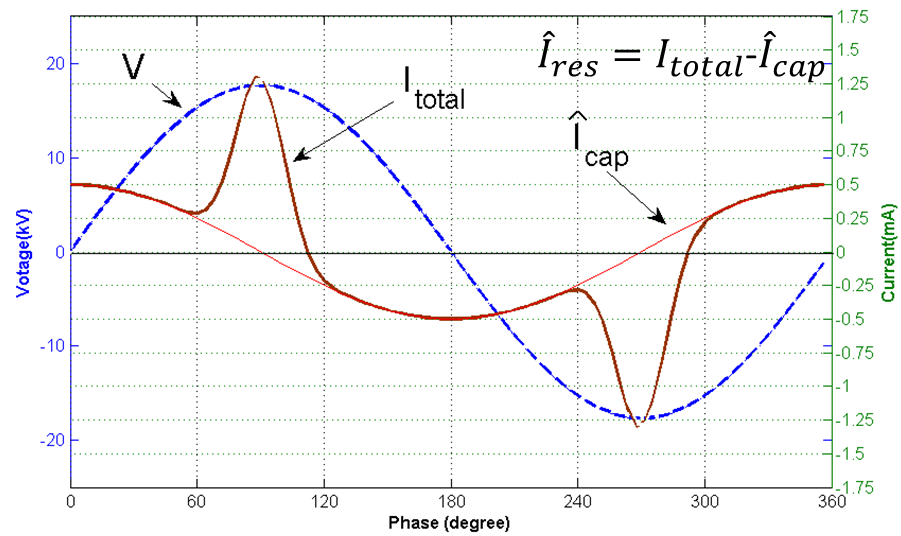
ส่งผลให้สามารถวิเคราะห์แยกกระแสตัวเก็บประจุและกระแสความต้านทานออกจากกระแสรั่วรวมที่วัดได้โดยสัมพันธ์มุมที่ตำแหน่งมุม  $180^{\circ}$  ของแรงดัน ทำให้ทราบค่ายอดของกระแสตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิง

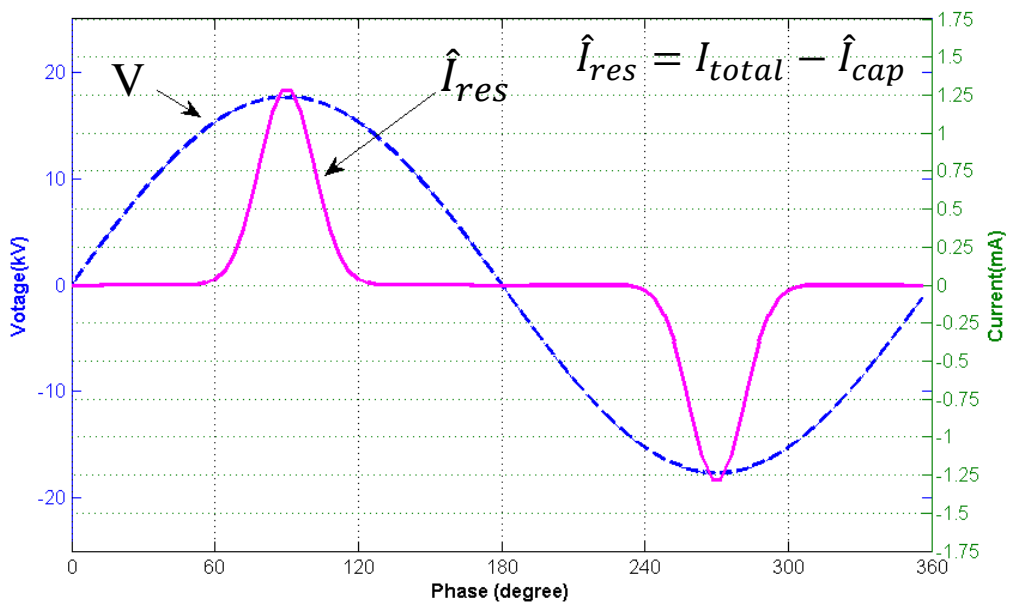
จากนั้นนำค่ายอดของกระแสตัวเก็บประจุมาสร้างรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุตามสมการ(3-6) ดังในรูปที่ 3-10

$$\hat{I}_{cap} = I_{cap,max} \cos(\omega t) \tag{3-6}$$



รูปที่ 3-10 การสร้างรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุจากกระแสรวม

แล้วนำรูปคลื่นกระแสรวมมาลบออกด้วยรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นจะได้รูปคลื่นกระแสความต้านทานตาม รูปที่ 3-11

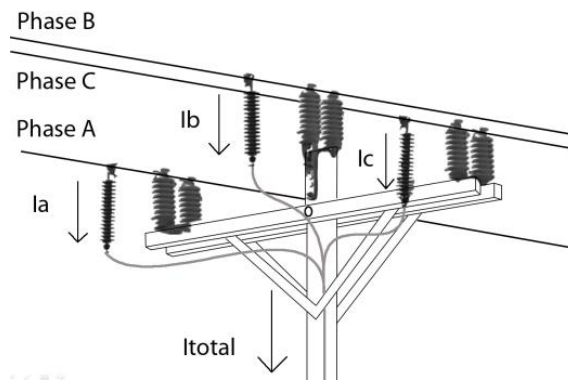


รูปที่ 3-11 รูปคลื่นกระแสความต้านทานที่แยกได้

โดยความสัมพันธ์ของกับดักเลิร์จสามารถบอกได้โดยสังเกตจากค่ายอดของกระแสความต้านทานที่แยกได้

### 3.3. กักตักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟส

ในความเป็นจริงแล้ว ระบบส่งไฟฟ้ากำลังแรงดันสูงเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส กระแสไฟฟ้ารั่วที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยกระแสรั่วที่ไหลมาจากแต่ละเฟส แล้วมารวมกันเป็นกระแสรั่วรวมสามเฟสก่อนลงดิน ดัง รูปที่ 3-12 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3-7)



รูปที่ 3-12 กระแสรั่วในแต่ละเฟสและกระแสรั่วรวมสามเฟส

$$I_{total} = I_{leak,A} + I_{leak,B} + I_{leak,C} \quad (3-7)$$

แรงดันแต่ละเฟสที่ละเลยฮาร์มอนิกส์อันดับสูง เป็นไปตามสมการที่(3-8)

$$V_A = V \sin(\omega t)$$

$$V_B = V \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (3-8)$$

$$V_C = V \sin(\omega t + 240^\circ)$$

โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวกักตักเสิร์จในแต่ละเฟส ประกอบด้วยกระแสความต้านทานและกระแสตัวเก็บประจุ ตามสมการที่(3-9)

$$I_{leak,A} = I_{res,A} + I_{cap,A}$$

$$I_{leak,B} = I_{res,B} + I_{cap,B} \quad (3-9)$$

$$I_{leak,C} = I_{res,C} + I_{cap,C}$$

สามารถแบ่งกลุ่มกระแสรั่วในรูปแบบอื่นๆ ได้ตามสมการ(3-10)

$$I_{total} = I_{leak,A} + I_{leak,B} + I_{leak,C} \quad (3-10)$$

$$I_{total} = I_{res,3\phi} + I_{cap,3\phi}$$

เนื่องจากแรงดันละเลยฮาร์มอนิกส์อันดับสูง กระแสตัวเก็บประจุมจึงเป็นไปตามสมการ (3-11)

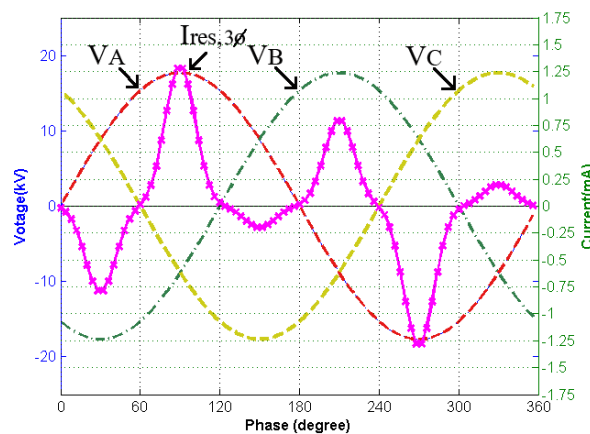
$$I_{cap,3\phi} = I_{capmax,3\phi} \cos(\omega t + \theta) \quad (3-11)$$

### 3.4. วิธีการแยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรั่วรวมเพื่อหารูปคลื่นกระแสความต้านทานในระบบไฟฟ้าสามเฟส

- ก. กรณีที่กระแสตัวเก็บประจุในแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน กรณีนี้ กระแสตัวเก็บประจุในแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน ส่งผลให้กระแสตัวเก็บประจุรวมหักล้างกันหมด ดังสมการที่ (3-12)

$$\begin{aligned}
 I_{capmax,\phi A} &= I_{capmax,\phi B} = I_{capmax,\phi C} \\
 I_{cap,3\phi} &= I_{capmax,\phi A} \cos(\omega t) \\
 &\quad + I_{capmax,\phi B} \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (3-12) \\
 &\quad + I_{capmax,\phi C} \cos(\omega t + 240^\circ) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

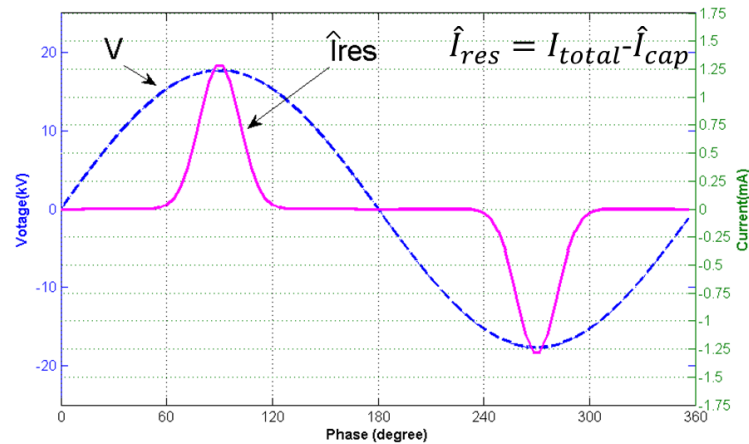
ดังนั้นกระแสรั่วรวมสามเฟสตามรูปที่ 3-12 มีค่าเท่ากับกระแสรั่วความต้านทานรวมตามสมการ(3-13) และแสดงในรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานรวมในระบบสามเฟส

$$\begin{aligned}
 I_{total} &= I_{leak,A} + I_{leak,B} + I_{leak,C} \\
 &= I_{res,3\phi} \quad (3-13)
 \end{aligned}$$

เนื่องจากลักษณะของกระแสรั่วความต้านทานในระบบหนึ่งเฟสมีค่าเฉพาะในช่วงมุมเฟส  $60^\circ$ - $120^\circ$  และ  $240^\circ$ - $300^\circ$  ในช่วงอื่นจะมีขนาดเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 รูปคลื่นกระแสความต้านทานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

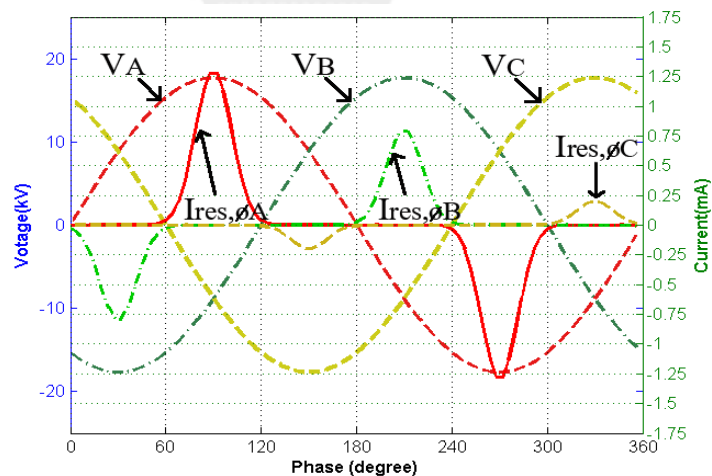
จึงนำกระแสไฟฟ้ารวบรวมที่ได้จากการวัดมาแยกกระแสความต้านทานในแต่ละเฟสได้ดังนี้

กระแสความต้านทานในเฟส A คือ กระแสไฟฟ้ารวบรวมในช่วงมุมเฟส  $60^{\circ}$ - $120^{\circ}$  และ  $240^{\circ}$ - $300^{\circ}$

กระแส ความต้านทานในเฟส B คือ กระแสไฟฟ้ารวบรวมในช่วงมุมเฟส  $0^{\circ}$ - $60^{\circ}$  และ  $180^{\circ}$ - $240^{\circ}$

กระแสความต้านทานในเฟส C คือ กระแสไฟฟ้ารวบรวมในช่วงมุมเฟส  $120^{\circ}$ - $180^{\circ}$  และ  $300^{\circ}$ - $360^{\circ}$

โดยมุมเฟสวัดจากเฟสแรงดันอ้างอิง A ดังแสดงใน รูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานในแต่ละเฟส

เมื่อทราบถึงขนาดค่ายอดของกระแสความต้านทานที่แยกได้ในแต่ละเฟสแล้ว สามารถวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพและระบุเฟสที่กับดักเสิร์จเกิดการเสื่อมได้

ข. กรณีที่กระแสตัวเก็บประจุในแต่ละเฟสมีขนาดไม่เท่ากัน กรณีนี้ กระแสไฟฟ้าวรรวมเกิดจากกระแสไฟฟ้าวรรวมในแต่ละเฟสไหลมารวมกัน ดังสมการที่ (3-14)

$$\begin{aligned} I_{total,3\phi} &= I_{leak,A} + I_{leak,B} + I_{leak,C} \\ I_{total,3\phi} &= I_{res,3\phi} + I_{cap,3\phi} \end{aligned} \quad (3-14)$$

โดยกระแสตัวเก็บประจุรวมในระบบสามเฟสสามารถแสดงได้ในสมการที่ (3-15)

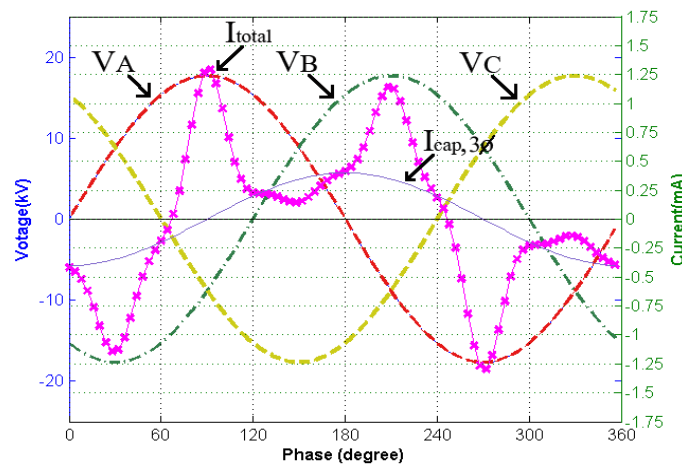
$$I_{cap,3\phi} = I_{capmax,3\phi} \cos(\omega t + \theta) \quad (3-15)$$

เนื่องจากตำแหน่งที่มุมเฟสของแรงดันมีค่าเป็น  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ, 360^\circ$  มีขนาดของ  $I_{res,3\phi}$  ประมาณศูนย์ ส่งผลให้ที่ตำแหน่งดังกล่าวข้างต้นมีขนาดของกระแสไฟฟ้าวรรวมใกล้เคียงกระแสตัวเก็บประจุรวม ดังสมการที่ (3-16)

$$I_{total,3\phi} \approx I_{cap,3\phi} \text{ ที่ } \omega t = 0, 60^\circ, \dots \quad (3-16)$$

คำนวณค่า  $\hat{\theta}$  จากการปรับเส้นโค้งเชิงไซน์ (sine curve fitting) แล้วนำผลที่ได้มาสร้างรูปคลื่น  $\hat{I}_{cap,3\phi}$  ดังใน(3-17) แสดงผลในรูปที่ 3-16

$$\hat{I}_{cap,3\phi} = \hat{I}_{capmax,3\phi} \cos(\omega t + \hat{\theta}) \quad (3-17)$$

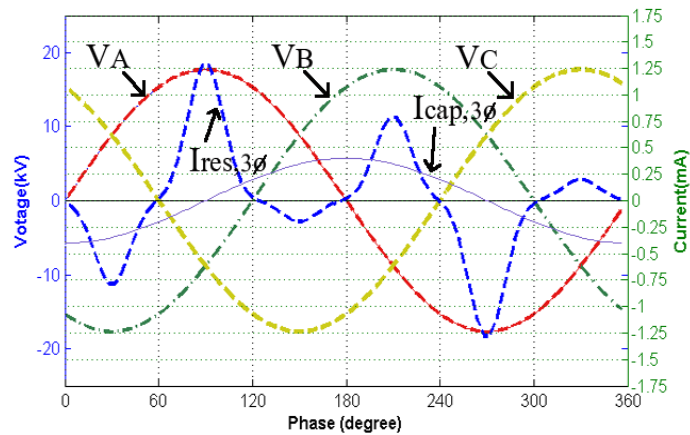


รูปที่ 3-16 กราฟสัญญาณแรงดัน กระแสไฟฟ้าวรรวมและกระแสตัวเก็บประจุรวมที่สร้างขึ้น

จากนั้นแยกกระแสความต้านทานออกจากกระแสรวม ดังสมการที่ (3-18)

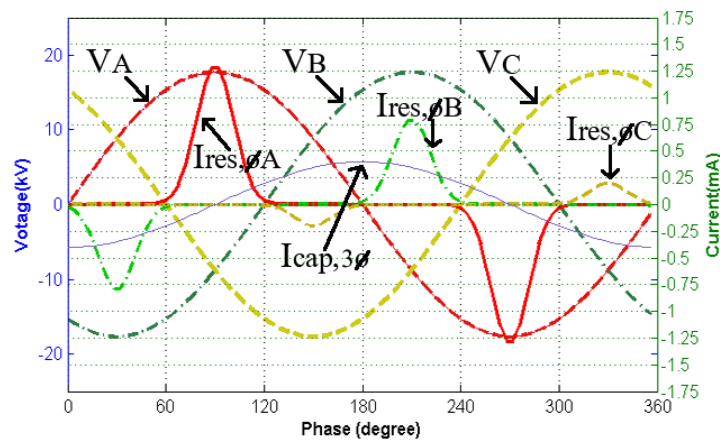
$$\hat{I}_{res,3\phi} = I_{total,3\phi} - \hat{I}_{cap,3\phi} \quad (3-18)$$

แสดงกราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานที่แยกกระแสตัวเก็บประจุรวมออกไป



รูปที่ 3-17 กราฟสัญญาณแรงดัน กระแสความต้านทานและกระแสตัวเก็บประจุรวม

ดังนั้น การแยกกระแสความต้านทานในแต่ละเฟสจากกระแสไฟฟ้าวัดรวมที่แยกกระแสตัวเก็บประจุออกไปแล้ว สามารถใช้วิธีเดียวกับกรณีที่กระแสตัวเก็บประจุในแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 3-18

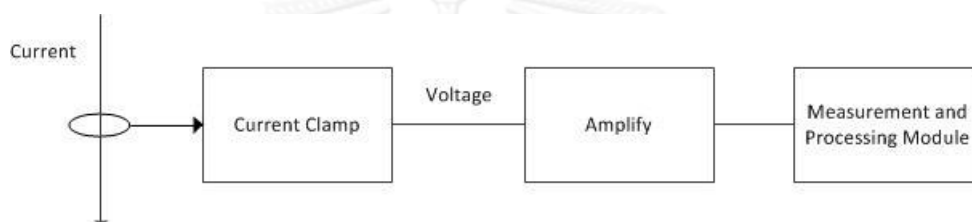


รูปที่ 3-18 กราฟสัญญาณแรงดันและกระแสความต้านทานที่แยกได้ในแต่ละเฟส

เมื่อทราบถึงขนาดค่ายอดของกระแสความต้านทานที่แยกได้ในแต่ละเฟสแล้ว สามารถวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพและระบุเฟสที่กับดักเสิร์จเกิดการเสื่อมได้

### 3.5. การวัดสัญญาณกระแส

เพื่อความสะดวกในการวัด โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่เส้าไฟฟ้า จึงเลือกใช้ current clamp คล้องที่ตำแหน่งโคนเส้า เมื่อเรานำเอาแคลมป์มิเตอร์คล้องเข้ากับสายไฟในขณะที่มีกระแสไหลอยู่ภายในสายเส้นนั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ สายไฟจะเกิดการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดบนแกนเหล็ก กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำของขดลวดนี้จะถูกส่งผ่านไปอย่างวงจร เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน และผ่านการขยายสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณขนาดที่พอเหมาะ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังภาคประมวลผลและเก็บข้อมูลแบบดิจิทัลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 ระบบการวัดและประมวลผลของสัญญาณกระแส

### 3.6. การวัดสัญญาณแรงดัน

เนื่องจากการแยกกระแสรั่วความต้านทานออกจากกระแสรั่วรวมสามเฟสนั้น จะต้องทำการวัดทั้งสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส โดยที่สัญญาณแรงดันต้องการเพียงแค่มุมเฟสเท่านั้น แต่การวัดสัญญาณกระแสทำการวัดที่เส้าไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง การวัดเฟสที่ตำแหน่งแรงดันสูง (12.5 กิโลโวลต์) ทำได้ยากและเป็นอันตราย เพื่อความสะดวกและปลอดภัยจึงทำการวัดเฟสที่ตำแหน่งแรงดันต่ำแทน (220 โวลต์) แล้วจึงนำข้อมูลเฟสของแรงดันมาสร้างรูปคลื่นแรงดัน นำข้อมูลแรงดันและกระแสที่วัดได้มาคำนวณร่วมกันในภายหลัง โดยการหาเฟสเริ่มต้นของแรงดันวัดด้วยวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

ในการวัดค่าสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส นั้น ทำการวัดที่คนละสถานที่แต่วัดในเวลาเดียวกัน จึงจำเป็นต้องใช้ระบบ GPS(global positioning system) เพื่อเป็นตัวกำหนดเวลาอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส ก่อนการวิเคราะห์แยกกระแสรั่วตัวต้านทานออกจากกระแสรั่วรวมสามเฟส

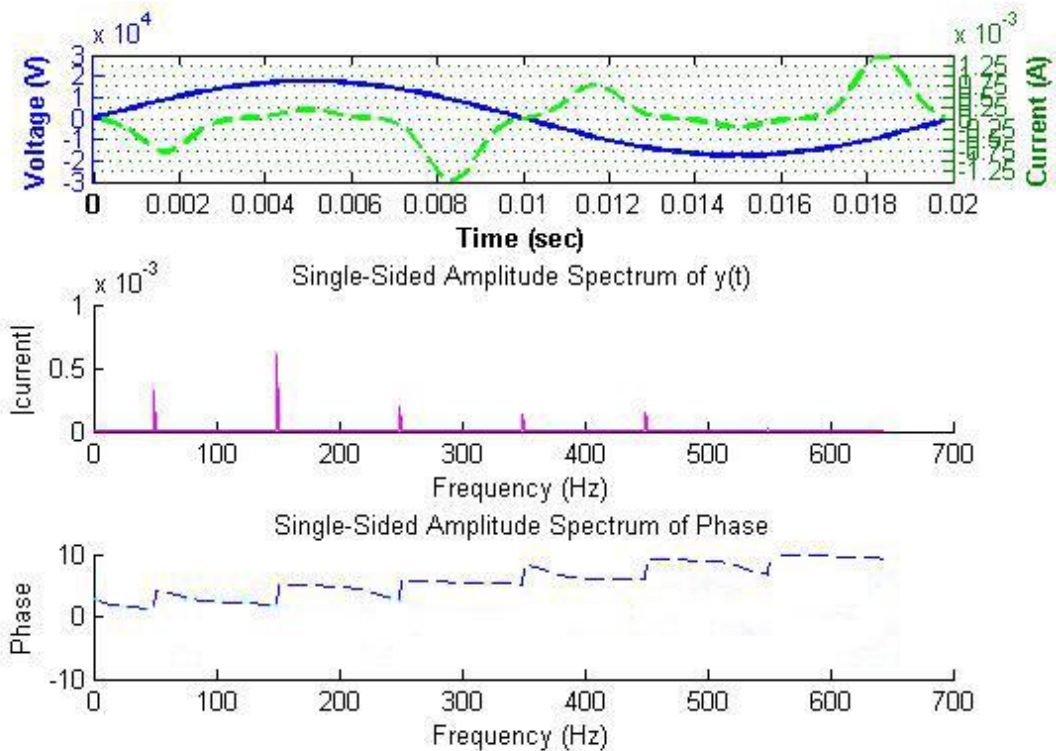


## บทที่ 4

### การออกแบบอุปกรณ์ระบุความถี่ของกับดักเสิร์จ

#### 4.1. วิเคราะห์ลักษณะของกระแสรั่วเชิงความถี่

ลักษณะของสัญญาณกระแสรั่วจากกับดักเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามเฟส เมื่อนำมาวิเคราะห์เชิงความถี่ จากรูปที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นมีถึงลำดับที่ 9 คือที่ความถี่ 450 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4-1 ลักษณะเชิงความถี่ของกระแสรั่ว

การวิเคราะห์ลักษณะของกระแสรั่วเชิงความถี่จะได้ข้อมูลขนาดและเฟส จากรูปที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่เกิดขึ้นมีถึงลำดับที่ 9 คือที่ความถี่ 450 เฮิร์ตซ์ อุปกรณ์การวัดจะต้องมีประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลในช่วง 10-450 เฮิร์ตซ์ได้ ในการวิเคราะห์เฟสกับความถี่จะต้องเลือกอุปกรณ์หม้อแปลงกระแสที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงนี้ด้วย

#### 4.2. อัตราการซึกตัวอย่าง (Sampling rate)

เนื่องจากความถี่สูงสุด ( $f_{max}$ ) ของสัญญาณมีค่า 450 เฮิรตซ์ อุปกรณ์ที่ทำการบันทึกจะต้องมีเงื่อนไขของอัตราการซึกตัวอย่าง (Sampling rate- $f_s$ ) ตามสมการ(4-1)

$$f_s > 2f_{max} \quad (4-1)$$

จำนวนข้อมูลที่อ่านในหนึ่งซึกคือ 512 ค่า โดยความละเอียดความถี่ (frequency resolution) ที่อุปกรณ์ควรวัดได้คือ 5 เฮิรตซ์ ดังนั้นอัตราการซึกตัวอย่างมีค่าตามสมการ(4-2)

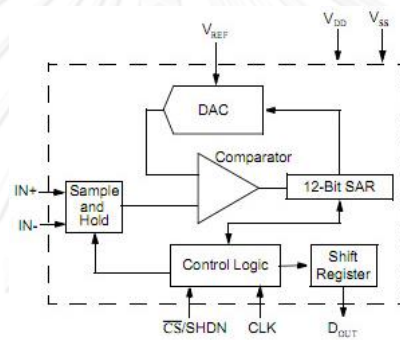
$$\begin{aligned} f_s &= 512 \times 5 \\ &= 2560 \text{ เฮิรตซ์} \end{aligned} \quad (4-2)$$

อัตราการซึกตัวอย่างที่คำนวณได้นั้น สอดคล้องกับสมการที่ (4-1)

### 4.3. ความละเอียดของการวัด (Resolution)

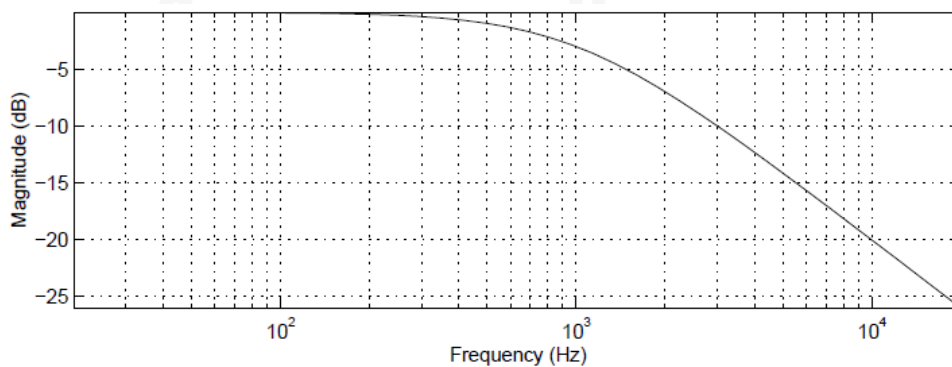
ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการควอนไทซ์ (Quantization) จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของรหัสไบนารี (Binary Code) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{FS}{2^N}$  โดยที่ (FS คือ ค่าเต็มสเกลแรงดันอินพุตของการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล) และ (N คือ จำนวนของบิตความละเอียดของการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล)

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือวัดสามารถวัดค่ามาได้ถูกต้องตั้งนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความละเอียดของการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล 12 บิต ก็จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนคือ  $\frac{5}{2^{12}} \times 1000 = 1.2$  มิลลิโวลต์ จากข้อกำหนดข้างต้นเลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลเบอร์ MCP3201[14] แสดงในรูปที่ 4-2 ซึ่งมีการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมแบบ SPI ซึ่งมีความเร็วในการส่งสัญญาณสูง



รูปที่ 4-2 ไอซีแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิต

### 4.4. ออกแบบวงจรกรอง

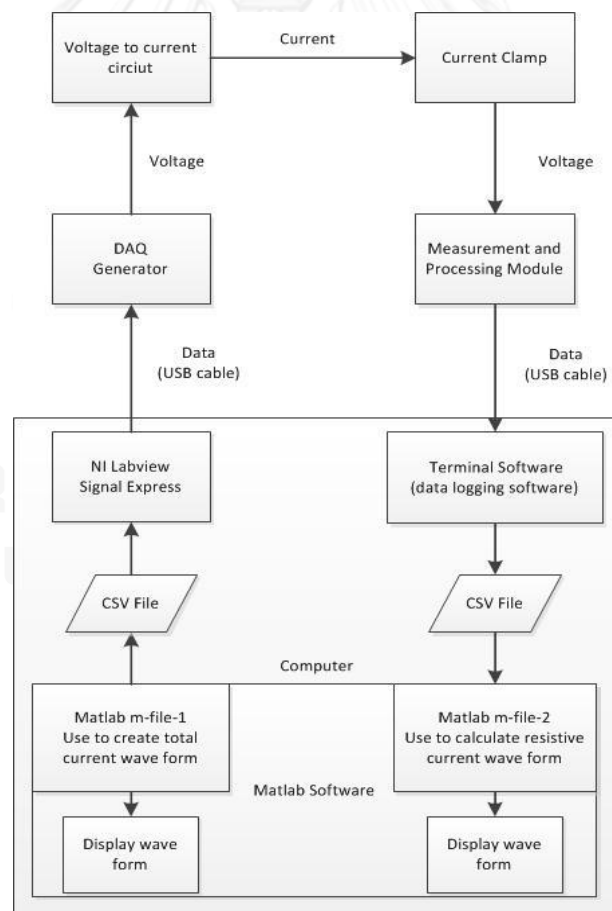


รูปที่ 4-3 ทอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองต่ำผ่านแสดงในหน่วยเดซิเบลกับเรเดียนต่อวินาที

การที่จะสามารถวัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ถึง 9 ได้โดยไม่มีปัญหา aliasing นั้น จะต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำโดยเลือกความถี่หัทึมที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ตามรูปที่ 4-3 เพื่อการใช้งานอุปกรณ์น้อยและเพื่อความเสถียรจึงเลือกใช้วงจรกรองอันดับหนึ่ง

#### การออกแบบวิธีทดสอบการวัดกระแสรั่วจากการจำลองรูปคลื่นกระแสรั่วในรูปแบบต่างๆ

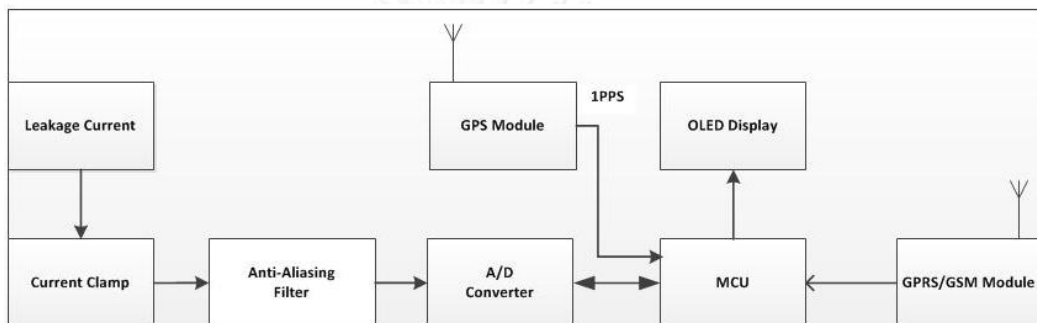
การทดสอบวิธีการวัดกระแสรั่วเริ่มต้นจากการสร้างรูปคลื่นกระแสจำลองจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในสถานะต่างๆด้วยโปรแกรม MATLAB ทำการสร้างรูปคลื่นของกระแสรั่วในแต่ละเฟสและกระแสรั่วรวมสามเฟส หลังจากนั้นทำการส่งข้อมูลรูปคลื่นกระแสรั่วรวมสามเฟสไปยัง DAQ (Data Acquisition) ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันตามรูปคลื่นที่สร้างไว้ ต่อมาทำการเปลี่ยนสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณกระแส เมื่อได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการจะนำหม้อแปลงกระแสของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสมาคล้องเพื่อทำการสุ่มสัญญาณแล้วจึงส่งข้อมูลรูปคลื่นที่วัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลพร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสรั่วที่สร้างได้ในแต่ละเฟสกับรูปคลื่นกระแสรั่วที่วัดได้ในแต่ละเฟสและทำการแสดงผลความคลาดเคลื่อนจากการวัด



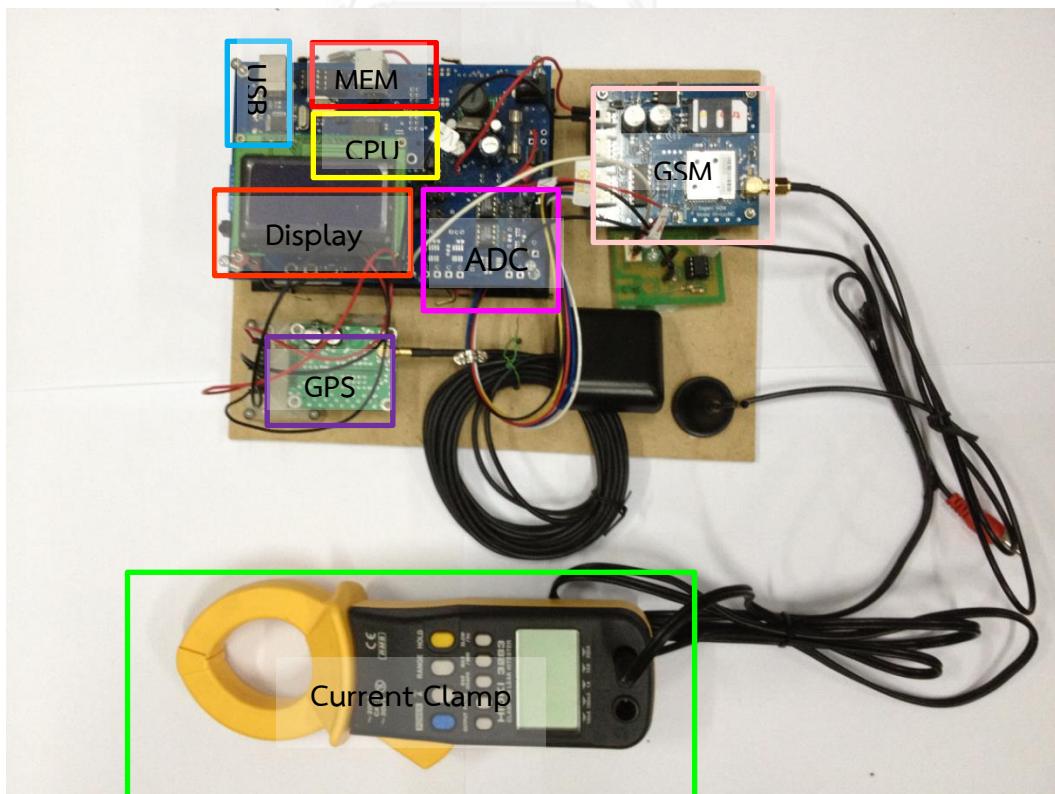
รูปที่ 4-4 ขั้นตอนการวัดกระแสรั่วจากการจำลองรูปคลื่นกระแสรั่วในรูปแบบต่างๆ

#### 4.5. อุปกรณ์วัดกระแสรั่ว

อุปกรณ์วัดกระแสรั่วทำหน้าที่วัดรูปคลื่นของกระแสรั่วที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยมีการอ้างอิงเวลาที่แม่นยำควบคู่กันในทุกๆชุดข้อมูลเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงในภายหลัง โดยจะเริ่มทำการวัดทุกๆ 1 วินาที ตั้งแต่เริ่มได้รับสัญญาณจาก GPS และโมดูล GSM แล้วเก็บค่าไว้ เมื่อทำการวัดกระแสเสร็จสิ้นจะเรียกข้อมูลเฟสของแรงดันผ่านทาง โมดูล GSM หลังจากนั้นจะทำการอ้างอิงแรงดันกับชุดข้อมูลกระแสที่เวลาเดียวกัน แล้วส่งข้อมูลกลับไปภาคประมวลผล ภาพรวมของอุปกรณ์ที่ได้ทำขึ้นแสดงในรูปที่ 4-5 และ รูปที่ 4-6



รูปที่ 4-5 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของส่วนวัดกระแสรั่ว



รูปที่ 4-6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดกระแสรั่ว

ในส่วนของชุดอุปกรณ์วัดกระแสแบ่งออกเป็น 8 ส่วนได้แก่

1. หน่วยประมวลผล ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F6014a[15] โดยโครงสร้างภายในจะเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และวงจร DSP (Digital Signal Processing) รวมเข้าไว้ด้วยกันซึ่งช่วยในการประมวลผลสัญญาณได้ดีและง่ายยิ่งขึ้น
2. Global System for Mobile communications (GSM) โมดูล ใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างส่วนวัดกระแสกับส่วนวัดแรงดัน ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนหลักในการส่งคำสั่งออกไปให้ส่วนวัดแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 4-7 โมดูล GSM ของบริษัท sagem

เลือกใช้ โมดูล GSM ของ SAGEM[16] ดังรูปที่ 4-7 เนื่องจากมีความแม่นยำและความเสถียรสูง ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สะดวกโดยติดต่อในรูปแบบคำสั่ง AT ซึ่งทำหน้าที่เหมือนโมเด็ม การติดต่อสั่งงานและสื่อสารกับโมดูลผ่านทางพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม RS-232 ความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 9600 บิตต่อวินาที

### 3. โมดูล Global Positioning System (GPS)

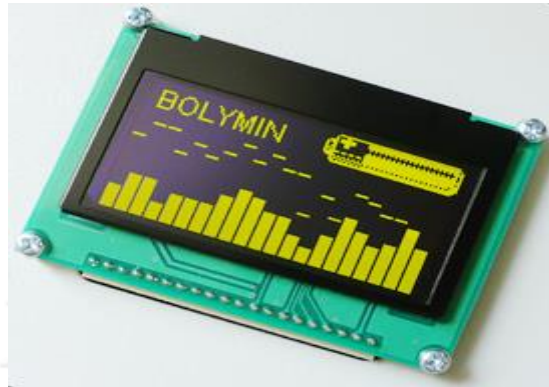


รูปที่ 4-8 โมดูล GPS ซึ่งใช้ในการระบุตำแหน่งและเวลาอ้างอิง

โมดูล GPS ใช้ในการระบุเวลาและสถานที่ๆทำการวัดข้อมูล โดยเลือกใช้ของ UBLOX[17] ดังรูปที่ 4-8 เนื่องจากต้องการความแม่นยำในการอ้างอิงเวลามาก จึงต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกา โดยจะปล่อยออกมาทุกๆ 1 วินาทีซึ่งมีความแม่นยำ ในหน่วยนาโนวินาที และอุปกรณ์รองรับหลายมาตรฐาน ทั้งนี้ได้เลือกใช้มาตรฐาน NMEA ในการอ่านข้อมูลเนื่องจากมีโปรโตคอลในการตรวจสอบข้อมูล และใช้มาตรฐาน UBLOX ในการปรับค่าเงื่อนไขการทำงานเนื่องจากสามารถปรับค่าได้รวดเร็ว การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ของโมดูล GPS จะต่อแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 เพื่อติดต่อสื่อสาร ความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 9600 บิตต่อวินาที การระบุเวลาที่แม่นยำจากระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก จำเป็นต้องระบุตำแหน่งของดาวเทียมอย่างน้อยสามดวง โดยจะคำนวณหาพิกัดที่แม่นยำจากข้อมูลระยะทางของดาวเทียมหลายดวง เมื่อใช้ข้อมูลจากจำนวนดาวเทียมที่มากขึ้น ตำแหน่งและเวลาที่คำนวณได้มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเวลาเกิดจากการเสียเวลาในการเดินทางของสัญญาณ เมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ความเร็วของสัญญาณไม่เท่ากับความเร็วแสงในสุญญากาศ หรืออาจเกิดการสะท้อนไปมาของคลื่นสัญญาณในบริเวณข้างเคียงกลายเป็นสัญญาณเพี้ยนหลายเส้นทาง (Multi-path distortion)

4. ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ส่วนนี้จะรับสัญญาณแรงดันมาจากหม้อแปลงกระแสซึ่งทำการแปลงเป็นสัญญาณจากกระแสสลับเป็นแรงดันสลับ ต่อมาทำการกรองสัญญาณให้เหมาะสมโดยมีวงจรกรองต่ำผ่าน แล้วจึงสุ่มสัญญาณโดยเลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเบอร์ MCP3201[14] เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน คือ มีความละเอียดในการแปลงสัญญาณขนาด 12 บิต อัตราการสุ่มสัญญาณสามารถทำได้ 2.56 KHz มีอินพุตอนาลอกสองช่องแบบดิฟเฟอเรนเชียล การติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมแบบ SPI (Serial Port) เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากตัวแปลงความดันก่อนส่งสัญญาณไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลต่อไป

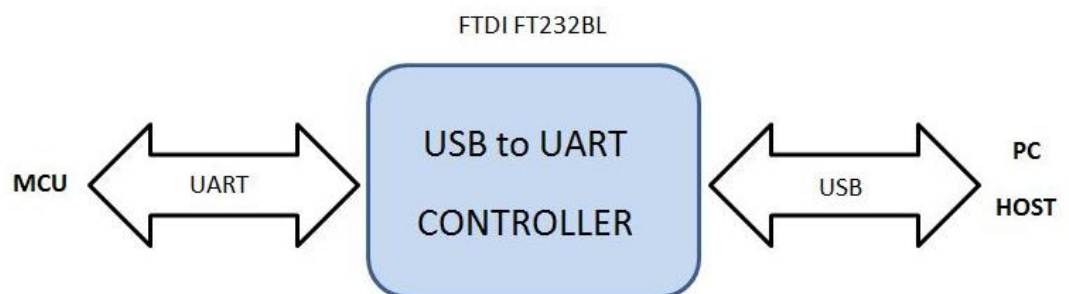
5. ส่วนการเก็บข้อมูล จะเก็บข้อมูลลง Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (eeprom) ที่มีขนาดความจุ 1024 ไบต์ เนื่องจากข้อมูลจะไม่หายหลังจากไม่จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์แล้ว สามารถเขียนข้อมูลทับได้จำนวนหลายรอบ .ใช้ในการเก็บข้อมูลเวลาและตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้วัด
6. ส่วนแสดงผล การแสดงผลออกจอภาพ



รูปที่ 4-9 จอแสดงผล OLED แบบกราฟิก

เลือกใช้หน้าจอแบบกราฟิก เพื่อแสดงรูปคลื่นและข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานได้เลือกใช้จอภาพแบบ OLED แบบแสดงผลสีเดียว ช่วยในการประหยัดพลังงาน

7. ส่วนติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ท USB



รูปที่ 4-10 โครงสร้างการทำงานของ USB to UART

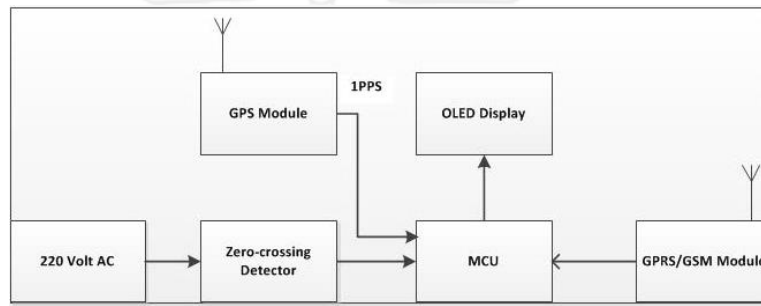
การติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ทำได้โดยการสื่อสารผ่านทางโมดูล UART ซึ่งอยู่ภายในของชิปประมวลผล โดยข้อมูลจากบอร์ดประมวลผลหลักซึ่งเป็น UART จะถูกแปลงเป็นการ



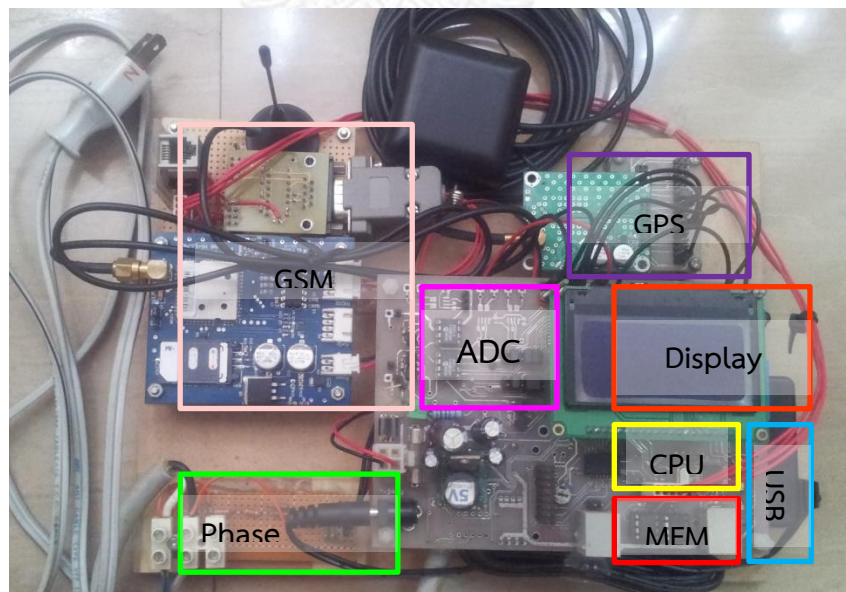
สื่อสารผ่านทางพอร์ต USB ด้วยชิป FT232RL[18] ซึ่งอยู่บนบอร์ด UART to USB สามารถรับส่งข้อมูลได้ความเร็วสูงสุดประมาณ 1 เมกกะบิตต่อวินาที มีโครงสร้างดังรูปที่ 4-10

#### 4.6. อุปกรณ์วัดแรงดันอ้างอิง

การวัดแรงดันอ้างอิงทำหน้าที่วัดข้อมูลเฟสของแรงดันโดยมีการอ้างอิงเวลาที่แม่นยำควบคู่กันในทุกๆข้อมูล โดยจะเริ่มทำการวัดทุกๆ 1 วินาที ตั้งแต่เริ่มได้รับสัญญาณจาก GPS และโมดูล GSM แล้วเก็บค่าไว้ เมื่อถูกเรียกข้อมูลเฟสผ่านทาง โมดูล GSM จะทำการค้นหาตามเวลาที่ระบุไว้ แล้วส่งข้อมูลกลับไปภาควัดกระแส ภาพรวมของอุปกรณ์ที่ได้ทำขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-11 และรูปที่ 4-12



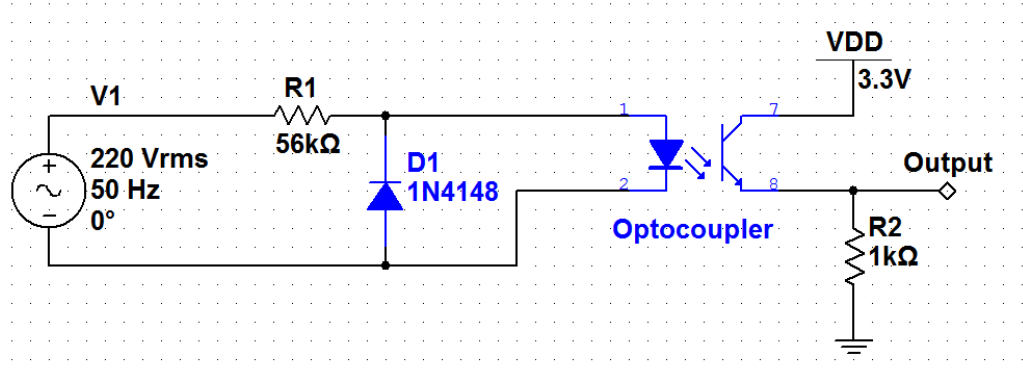
รูปที่ 4-11 แผนผังแสดงโครงสร้างของส่วนวัดแรงดันอ้างอิง



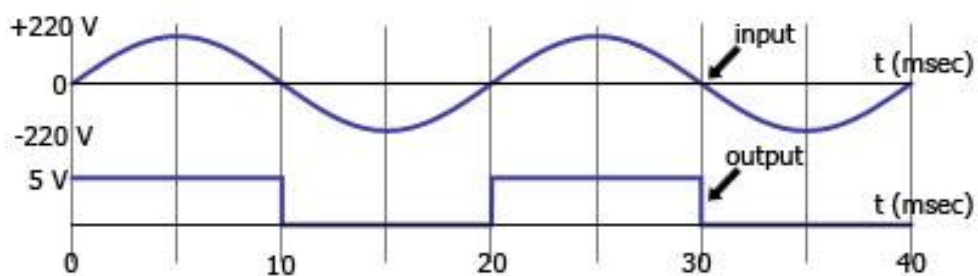
รูปที่ 4-12 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดันอ้างอิง

ชุดอุปกรณ์วัดแรงดันแบ่งออกเป็น 7 ส่วน โดยส่วนที่มีอุปกรณ์เหมือนกับอุปกรณ์วัดกระแสรั่วได้แก่ หน่วยประมวลผล โมดูล GSM-GPS ส่วนแสดงผล ส่วนการเก็บข้อมูล ส่วนติดต่อกับคอมพิวเตอร์ และส่วนที่มีอุปกรณ์ต่างกับอุปกรณ์วัดกระแสรั่วได้แก่

#### 8. วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ (Zero Crossing Detector Circuit)



รูปที่ 4-13 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันในสายส่งกับสัญญาณตรวจจับแรงดันศูนย์

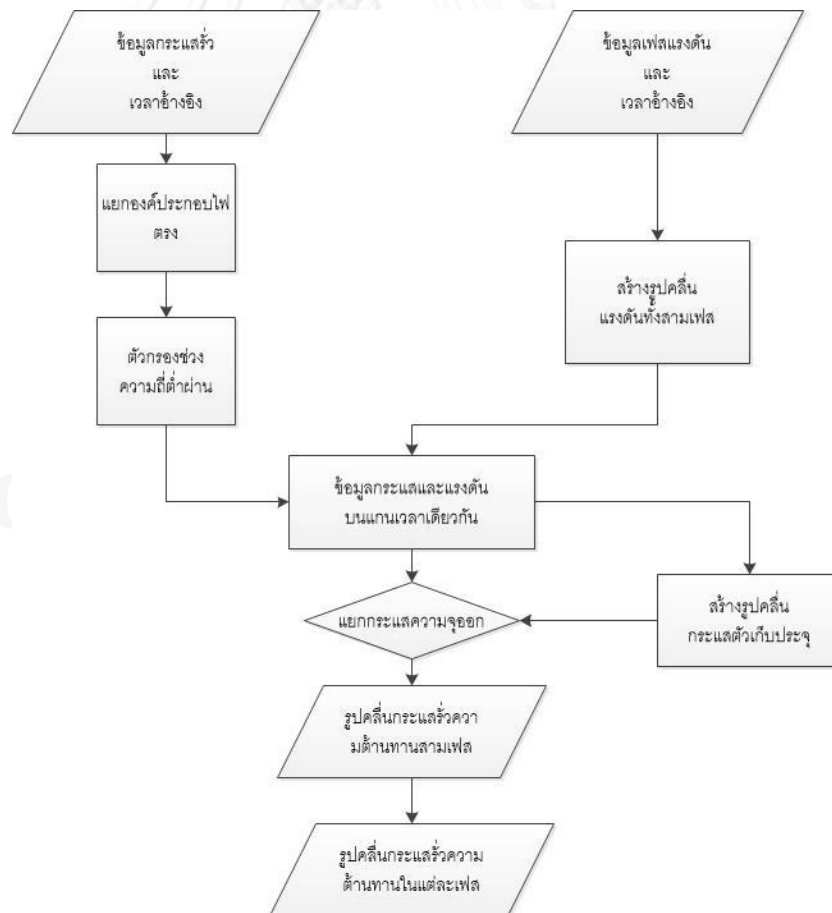
ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรตรวจจับผ่านแรงดันศูนย์ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแรงดันที่ตำแหน่งศูนย์โวลต์ การใช้อปโตไดโอดในการแยกกราวของระบบที่วัดกับตัวเครื่องมือวัดออกจากกันเพื่อความปลอดภัยในการวัด ดังรูปที่ 4-13 สามารถอธิบายหลักการทำงานของวงจรได้ว่า เมื่อมีสัญญาณแรงดันไซน์ 220 โวลต์ เข้ามา ในช่วงแรงดันบวกจะทำให้ไดโอดเกิดภาวะไบแอสกลับ ทำให้กระแสไหลผ่านออปโตไดโอดเท่านั้น ทำให้ออปโตทำงานส่งสัญญาณโลจิก 1 ที่ขั้วสัญญาณออก ในช่วงแรงดันลบจะทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดเท่านั้น ทำให้ออปโตไม่ทำงานส่งสัญญาณโลจิก 0 ที่ขั้วสัญญาณออกตามดังรูปที่ 4-14 เพราะฉะนั้นการตรวจจับตำแหน่งศูนย์ ใช้การตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการจับสัญญาณ ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดจากการที่สัญญาณขาออกไม่ได้เปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งแรงดัน

ศูนย์โวลต์จริงๆ แต่เปลี่ยนที่ตำแหน่งแรงดันตกคร่อมออปโตที่ 0.4 โวลต์ หรืออีกนัยหนึ่งจะมีความคลาดเคลื่อน 8.7 ไมโครวินาที

#### 4.7. ขั้นตอนวิเคราะห์ความเสื่อม

ใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลโดยทำงานบนโปรแกรม MATLAB ตามเนื่องด้วยกระแสรีจรวมสามเฟสที่วัดเป็นสัญญาณกระแสสลับจึงต้องการแยกองค์ประกอบไฟตรงที่เกิดจากออปแอมป์ ในส่วนของข้อมูลแรงดันถูกเก็บไว้ในรูปของเฟสอ้างอิง จึงต้องการสร้างรูปคลื่นของแรงดันทั้งสามเฟสขึ้นมาใหม่ เมื่อมีข้อมูลกระแสและข้อมูลแรงดันแล้ว จะทำการรวมและแสดงข้อมูลทั้งสองชุดบนแกนเวลาเดียวกันโดยอ้างอิงเวลาจากข้อมูล GPS

การวิเคราะห์ความเสื่อมของกับดักเสิร์จดังแสดงในรูปที่ 4-15 เริ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลความต่างเฟสของกระแสรีจรวมสามเฟสกับแรงดันอ้างอิง ค่าของความต่างเฟสจะช่วยให้การระบุตำแหน่งที่ใช้สร้างกระแสตัวเก็บประจุสามเฟส เมื่อสร้างรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุสามเฟสได้แล้วจะทำการแยกให้เหลือแต่กระแสความต้านทานสามเฟส แล้วจึงทำการแยกกระแสความต้านทานในแต่ละเฟสโดยใช้สมการรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 4-15 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสื่อมของกับดักเสิร์จ

## บทที่ 5

### การทดสอบและประเมินผล

#### 5.1. ทดสอบความเสื่อมของกับดักเสิร์จด้วยวิธีวัดกระแสรั่วในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่แรงดัน 12.7 กิโลโวลต์

การทดสอบความเสื่อมของกับดักเสิร์จด้วยวิธีวัดกระแสรั่วในระบบไฟฟ้าสามเฟส เริ่มด้วยการติดตั้งวาริแอก (variac) เพื่อปรับเลือกแรงดันที่เหมาะสม แล้วทำการเพิ่มแรงดันด้วย หม้อแปลงแรงดันโดยปรับให้ด้านแรงดันสูงมีแรงดัน 12.7 กิโลโวลต์ วัดค่าด้วยออสซิลโลสโคปผ่าน ทางโพรบแรงดันสูงทั้งสามเฟส แล้วจ่ายแรงดันให้กับกับดักเสิร์จทั้งสามตัว หลังจากนั้นนำอุปกรณ์วัดแรงดันมาต่อฟ่วงดาวน์แรงดันต่ำ ติดตั้งอุปกรณ์วัดกระแสโดยนำและคอมพิวเตอร์มาติดตั้งในระยะปลอดภัยตามรูปที่ 5-1



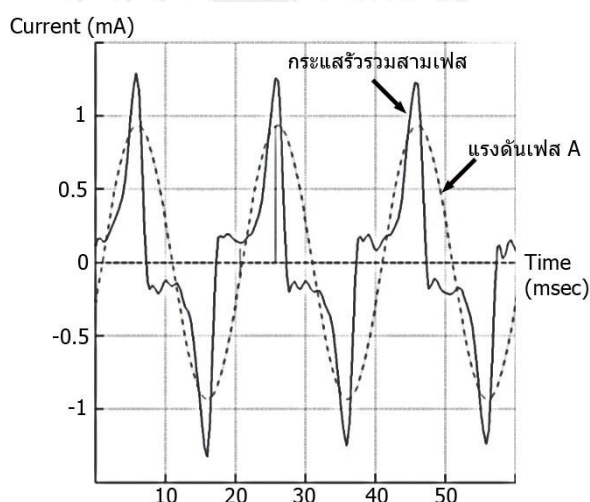
รูปที่ 5-1 การทดสอบวัดค่ากระแสรั่วจากการทดลองจริง

การทดลองทำการวัดแรงดันอ้างอิงที่แรงดันต่ำเฟส A แล้วจึงทำการเก็บค่ากระแส โดยทำการวัดเป็นจำนวน 4 รอบคือ

1. เก็บค่ากระแสรั่วที่ไหลผ่านเฟส A
2. เก็บค่ากระแสรั่วที่ไหลผ่านเฟส B
3. เก็บค่ากระแสรั่วที่ไหลผ่านเฟส C
4. เก็บค่ากระแสรั่วรวมที่เกิดจากทุกเฟสไหลมารวมกัน

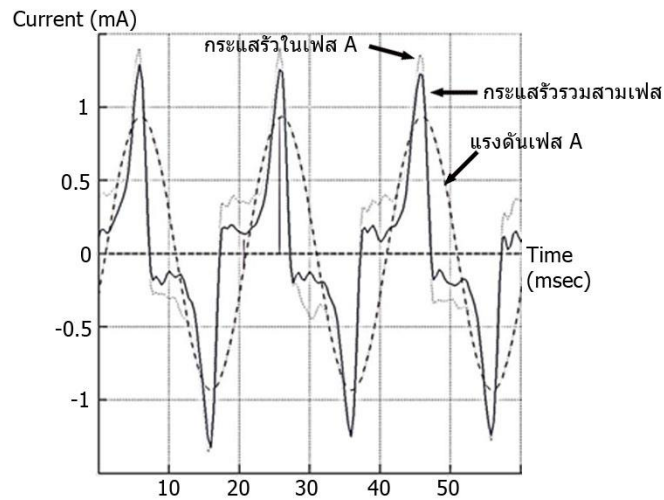
วิเคราะห์หากระแสรั่วความต้านทานกรณีที่เกิดกับตัวเสิร์จที่ติดตั้งในเฟส A เสียแบบบล็อกเสื่อม กับตัวเสิร์จที่ติดตั้งในเฟส B อยู่ในสภาพดี กับตัวเสิร์จที่ติดตั้งในเฟส C อยู่ในสภาพดี

เมื่อทำการวัดกระแสรั่วรวมสามเฟสกับแรงดันเฟส A ลักษณะกระแสรั่วของทั้งสามเฟสจะมียอดแหลมของกระแสฮาร์มอนิกส์อยู่ใกล้เคียงกับยอดของแรงดันในเฟสที่เสียดังแสดงในรูปที่ 5-2 แต่ยังไม่สามารถบอกได้อย่างแน่ชัดว่าเสียที่เฟสนั้นๆจริง



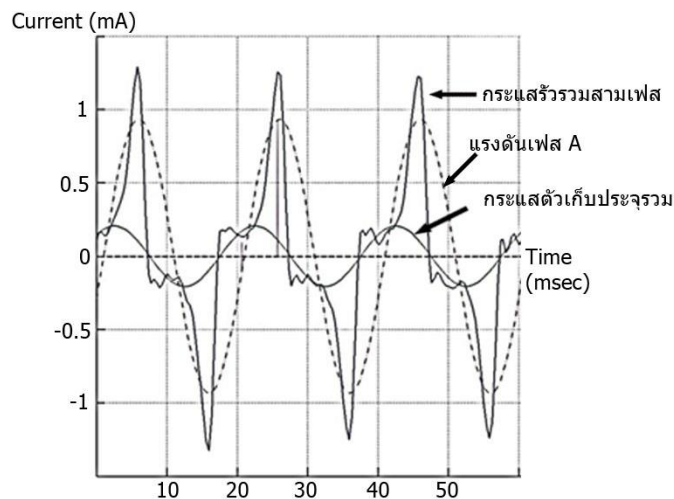
รูปที่ 5-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสรั่วรวมสามเฟส กับ แรงดันเฟส A

เมื่อทำการวัดและเปรียบเทียบกระแสรั่วทั้งสามเฟส กระแสรั่วในเฟส A และแรงดันเฟส A เนื่องจากกับตัวเสิร์จในเฟสอื่นๆอยู่ในสภาพดี ลักษณะของกระแสรั่วในเฟส A จึงปรากฏเด่นชัดในกระแสรั่วทั้งสามเฟสดังรูปที่ 5-3



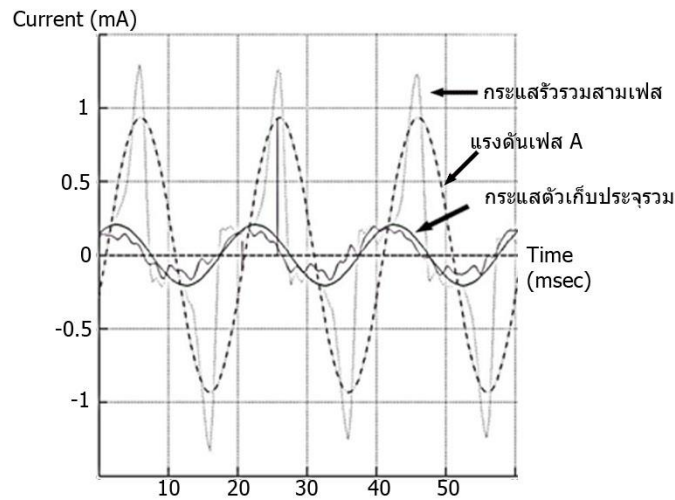
รูปที่ 5-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสในตัวเก็บประจุ A , กระแสในตัวเก็บประจุรวมสามเฟส และ แรงดันเฟส A

เมื่อทำการวัดกระแสรวมสามเฟสแล้ว เพื่อการวิเคราะห์จะทำการแยกองค์ประกอบของกระแสตัวเก็บประจุออก โดยทำการสร้างกระแสตัวเก็บประจุจำลองดังในรูปที่ 5-4 ให้เหลือเพียงกระแสความต้านทานซึ่งใช้ในการระบุความสัมพันธ์ของกับตักเสิร์จได้อย่างแม่นยำ



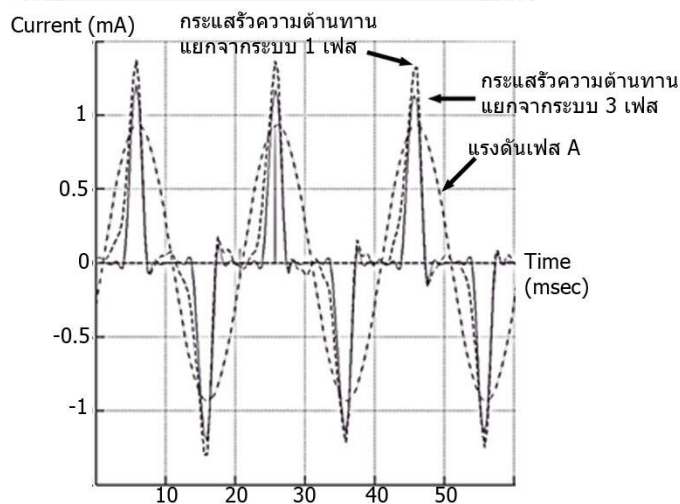
รูปที่ 5-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสในตัวเก็บประจุรวมสามเฟส , กระแสในตัวเก็บประจุรวมที่สร้างขึ้น

เพื่อการตรวจสอบความแม่นยำของกระแสตัวเก็บประจุรวมที่สร้างขึ้นจากรูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุรวมในระบบสามเฟส จึงทำการแยกกระแสตัวเก็บประจุรวมในแต่ละเฟสแล้วนำมารวมกัน นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับดังแสดงในรูปที่ 5-5 ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5-5 เปรียบเทียบ กระแสรวมความจุ่มที่สร้างขึ้นจากการวัดในระบบ 3 เฟสและกระแสตัวเก็บประจุรวมที่แยกได้จากการวัดแต่ละเฟส

เมื่อทำการวัดกระแสรั่วในเฟสที่กับดักเสิร์จเชื่อมสภาพมาแยกกระแสความต้านทานมาเปรียบเทียบกับกระแสความต้านทานที่ได้จากการแยกจากระบบสามเฟส ผลที่ได้สอดคล้องกันตามรูปที่ 5-6 โดยข้อมูลกระแสรั่วความต้านทานจะมียอดแหลมของกระแสฮาร์โมนิกส์อยู่ตรงกับยอดของแรงดันในเฟสที่เสีย ซึ่งสามารถวัดระดับความเสื่อมได้อย่างแน่ชัดและระบุเฟสที่มีการเชื่อมสภาพได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 5-6 เปรียบเทียบกระแสรั่วความต้านทานรวมที่แยกจากระบบ 1 เฟส กับ ระบบ 3 เฟส

ผลการแยกกระแสความต้านทานออกจากกระแสรวมสามเฟสแสดงในตารางที่ 1

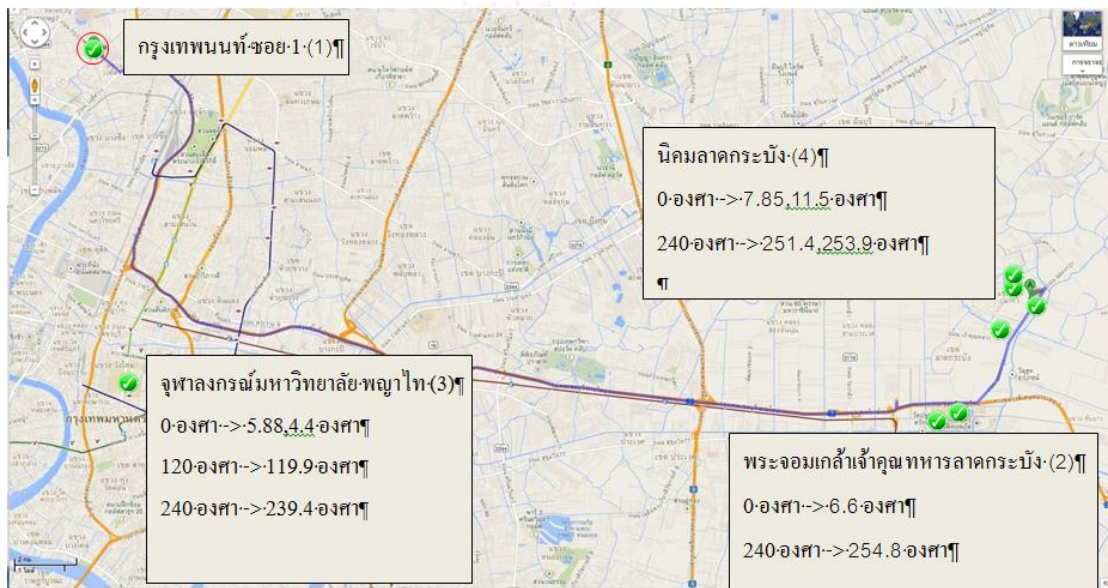
ตารางที่ 1 แสดงค่าที่ได้จากการแยกกระแสความต้านทานออกจากกระแสรวม

ข้อมูลที่วัดได้	ค่าที่วัดได้
ความถี่ของกระแสรั่วความจุได้	49.8 เฮิรตซ์
ค่ายอดของกระแสรั่วความจุ	0.21 มิลลิแอมป์
ค่ายอดของกระแสรั่วความต้านทาน ในเฟส A (ในกรณีวัดกระแสรวม จากทั้งสามเฟส)	1.18557 มิลลิแอมป์
ค่ายอดของกระแสรั่วความต้านทาน ในเฟส A (ในกรณีวัดกระแสรวม จากเฟส R เท่านั้น)	1.16078 มิลลิแอมป์
ค่าความคลาดเคลื่อนของค่ายอด กระแสรั่วความต้านทานในเฟส A	2.14 %
ค่ายอดของกระแสรั่วความต้านทาน ในเฟส B	0.289 มิลลิแอมป์
ค่ายอดของกระแสรั่วความต้านทาน ในเฟส C	0.119 มิลลิแอมป์



## 5.2. การทดสอบผลของความคลาดเคลื่อนจากการวัดแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆกัน เพื่อสังเกตผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) กับระยะทางของสายส่งในสถานที่จริง

จากสมมติฐานที่ว่า หากทำการวัดความต่างเฟสของแรงดันในสายส่งของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ตำแหน่งต่างกัน โดยไม่ทราบว่าเป็นสายส่งเส้นเดียวกันหรือไม่ และระยะทางของสายส่งมีผลกระทบต่อต่างเฟสไม่มากนัก ส่งผลให้ความต่างเฟสที่วัดได้จะมีค่าได้เพียง 3 ค่า คือ 0, 120, 240 องศา เท่านั้น



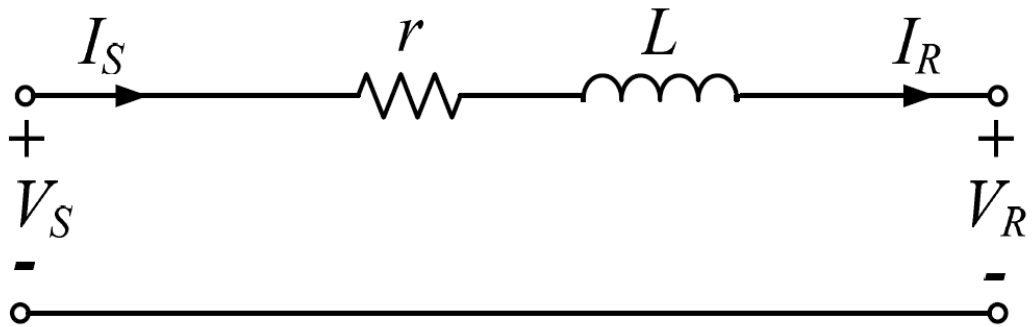
รูปที่ 5-7 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดแรงดันบนแผนที่

จากภาพในการทดสอบนั้น ได้ทำการวัดแรงดันอ้างอิงที่ตำแหน่งพิกัด 13.737759, 100.532191 แล้วเปลี่ยนสถานที่วัดความต่างเฟสไปตามสถานที่ต่างๆ โดยทดสอบที่ระยะห่างไม่เกิน 80 กิโลเมตร การทดสอบได้ทดลองเก็บข้อมูลเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความต่างเฟสที่วัดได้ในแต่ละสถานที่

ตำแหน่งที่ทำการทดลอง/ ระยะทางโดยประมาณ	ค่าที่ควรจะได้ (องศา)	ค่าที่วัดได้จริง (องศา)
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย /15 กม	0 องศา	5.16 องศา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย /15 กม	120 องศา	119.9 องศา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย /15 กม	240 องศา	239.4 องศา
นิคมลาดกระบัง/45 กม	0 องศา	9.68 องศา
นิคมลาดกระบัง/45 กม	240 องศา	252.6 องศา
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง/50 กม	0 องศา	6.6 องศา
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง/50 กม	240 องศา	254.8 องศา

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจาก ความไม่เป็นอุดมคติของสายส่ง เนื่องจากทดสอบที่ระยะไม่เกิน 80 กิโลเมตร และแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 69 กิโลโวลต์ การจำลองรูปแบบสายส่งจะอยู่ในรูปแบบสายส่งระยะสั้นซึ่งจะมีผลจากตัวเก็บประจุต่ำมาก ดังนั้นแบบจำลองของสายจึงประกอบด้วยความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับความเหนี่ยวนำเท่านั้นแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 5-8



รูปที่ 5-8 แบบจำลองสายส่งระยะสั้น

สรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดในการวัดความต่างเฟสเกิดขึ้นจากผลของความเหนี่ยวนำของสายส่งและ กระแสที่ไหลในสาย

## บทที่ 6

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1. ข้อสรุป

เครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อวิเคราะห์ความเสื่อมของกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุจำนวนและเจาะจงเฟสของกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพได้ โดยการวัดข้อมูลกระแสรั่วรวมสามเฟสและเฟสของแรงดันอ้างอิงจากคนละตำแหน่ง

วงจรวัดกระแสขนาดต่ำกว่า 1 มิลลิแอมป์ที่มีความละเอียดต่ำกว่า 10 ไมโครแอมป์ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการวัดเฟสไม่เกิน 1 องศา

การอ้างอิงเวลาจากดาวเทียมที่ใช้ในการเริ่มเก็บค่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 60 นาโนวินาที

โปรแกรมสามารถวิเคราะห์แยกกระแสรั่วความจุออกจากกระแสรั่วรวมสามเฟสได้

#### 6.2. ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาเครื่องวัดกระแสรั่วเพื่อวิเคราะห์ความเสื่อมของกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้าสามเฟสควรใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อให้การทำงานของระบบเป็นแบบเวลาจริง (Real-time) และควรมีขนาดเล็กเพื่อสะดวกในการพกพา

ในการทดสอบการวัดกระแสรั่วนี้ ไม่ได้มีผลจากอุปกรณ์อื่นๆมารบกวน เช่น กระแสรั่วจากหม้อแปลงสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้

## รายการอ้างอิง

1. Novizon, N., et al. Thermal Image and Leakage Current Diagnostic as a Tool for Testing and Condition Monitoring of ZnO Surge Arrester. July 2013.
2. Srisukkhom, C. and P. Jirapong. Analysis of electrical and thermal characteristics of gapless metal oxide arresters using thermal images. in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on. 2011.
3. Ursine, W.A.M., et al. Metal-oxide surge arrester's leakage current analysis and thermography. in Lightning Protection (XII SIPDA). 2013. International Symposium on Digital Object Identifier.
4. Doone, R.M., et al. The influence of electrical partial discharges on the performance of zinc oxide surge arrester ceramics. in Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1988., Fifth International Conference on. 1988.
5. Abdul-Malek, Z., N. Yusoff, and M.F. Mohd Yousof. Field experience on surge arrester condition monitoring - Modified Shifted Current Method. in Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International. 2010.
6. Heinrich, C. and V. Hinrichsen, Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2001. **16**(1): p. 138-143.
7. Lira, J.G.A., et al. ZnO Surge Arresters Diagnosis Using Microcontroller. in Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE. 2007.
8. Lundquist, J., et al., New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. **5**(4): p. 1811-1822.
9. Shirakawa, S., et al., Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1988. **3**(3): p. 998-1003.
10. Zhu, H. and M.R. Raghuvver, Influence of representation model and voltage harmonics on metal oxide surge arrester diagnostics. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2001. **16**(4): p. 599-603.
11. Kuffel, E., W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals. 2 ed. 2000, Great Britain: Butterworth-Heinemann. 7.
12. 60099-4, I., Metal-oxide surge arresters without gaps for A.C. systems. 2006.

13. ANSI/IEEE, IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for AC Power Circuit(>1 kV). 1987.
14. Technology, M. MCP3201 datasheet. 2013 [cited 2014 March]; [Online]. Available from: <http://www.microchip.com>.
15. Technology, M. dsPIC30F6014A datasheet. 2013 [cited 2014 March]; [Online]. Available from: <http://www.microchip.com>
16. company, S.h.-t. SAGEM HiLo datasheet. 2013 [cited 2014 March]; [Online]. Available from: <http://www.sagem.com>
17. company, S.-b.u.-b. U-blox GPS datasheet. 2013 [cited 2014 March]; [Online]. Available from: <http://www.u-blox.com>
18. Ltd, F.T.D.I. FTDI VCP user manual. 2013 [cited 2014 March]; [Online]. Available from: <http://www.ftdichip.com>



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐิตินันท์ ศิริประภาวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY