การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

โดย

นางสาวกชกร พรมมิน
นางสาวฎาริกา มณีศรี
นางสาวธัญธร บัณฑิตยุทธพงศ์
นายบุรัสกร เชิญผึ้ง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

โดย

นางสาวกชกร	พรมมิน
นางสาวฎาริกา	มณีศรี
นางสาวธัญธร	บัณฑิตยุทธพงศ์
นายบุรัสกร	เชิญผึ้ง

b.00266032

TB00223

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

KHOTCHAKORN PROMMIN
DARIKA MANEESRI
THANYATHORN BUNDITYUTTHAPONG
BHURASSAKORN CHERNPUENG

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIRMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMART OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

โดย

นางสาวกชกร	พรมมิน
นางสาวฎาริกา	มณีศรี
นางสาวธัญธร	บัณฑิตยุทธพงศ์
นายบุรัสกร	เชิญผึ้ง

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นิรุธ จิรสุวรรณกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

ผู้จัดทำ

1. นางสาว กชกร พรมมิน
2. นางสาว ฎาริกา มณีศรี
3. นางสาว ธัญธร บัณฑิตยุทธพงศ์
4. นาย บุรัสกร เชิญผึ้ง

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิรุธ จิรสุวรรณกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

นางสาว กชกร พรมมิน
นางสาว ฎาริกา มณีศรี
นางสาว ธัญธร บัณฑิตยุทธพงศ์
นาย บุรัสกร เชิญผึ้ง
ผศ.ดร.นิรุธ จิรสุวรรณกุล
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ใช้ในการศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน 4 แบบ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) ซึ่งจะใช้เวลาในการปลดวงจรที่แตกต่างกัน ตามสูตรการคำนวณของแต่ละชนิดที่เลือกใช้ ผลการทดลองจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่ารีเลย์ป้องกันกระแสเกินต้นแบบสามารถทำงานได้ในทุกลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระเกินทั้ง 4 แบบ และมีข้อผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสที่วัดได้อยู่ระหว่าง 1.5-2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

Miss Khotchakorn Prommin
Miss Darika Maneesri
Miss Thanyathorn Bundityutthapong
Mr. Bhurassakorn Chernpueng
Assistant.Prof.Dr. Nirudh Jirasuwankul Advisor

Year 2017

ABSTRACT

The aim of this project is to design and prototyping of a lab-scale digital overcurrent relay for experimental study of single phase power protection system. The design comprises four types of time-current characteristic curve, standard inverse time, very inverse time, extremely inverse time and adjustable pick-up current and tripping time respectively. Experimental results from testing in laboratory illustrated that the prototype overcurrent relay can work in all types of time-current characteristic curve with an average error of the measured current lies between 1.5-2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยดีนั้น เกิดจากการทำงานด้วยความมุมานะ อาศัยความร่วมมือกันของกลุ่มเป็นอย่างดีและได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านที่ให้ความรู้และเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับการวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิรุธ จิรสุวรรณกุล ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (Principle of Power System Protection)	5
2.1.1 องค์ประกอบของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง	5
2.1.2 คุณสมบัติของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง	8
2.1.3 การแบ่งขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Zones of Protection)	8
2.2 หม้อแปลงกระแส (Current Transformers)	10
2.2.1 หน้าที่ของหม้อแปลงกระแส	10
2.2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงกระแส	10
2.2.3 การบอกลักษณะของหม้อแปลงกระแส	11
2.2.4 ข้อควรระวังของหม้อแปลงกระแส	11
2.3 การป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection)	12
2.3.1 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ประเภทและหลักการทำงานรีเลย์	13
2.4.1 รีเลย์แบบดิจิตอล (Digital Relays)	13
2.5 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)	15
2.5.1 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time-Delay Overcurrent Relays)	16
2.5.2 ประเภทของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา ตามมาตรฐาน IEC	16
2.5.2.1 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay)	16
2.5.2.2 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay)	17
2.5.2.3 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันจำกัดเวลาต่ำสุด (Inverse Definite Minimum -Time Overcurrent Relay, IDMT Relay)	18
2.5.2.4 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay)	18
2.5.2.5 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay)	19
2.5.3 หลักการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา	20
2.6 หลักการทำงานของ Arduino เบื้องต้น	21
2.7 Solid State Relay (SSR)	23
2.7.1 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของโซลิคสเตตรีเลย์	24
2.7.2 การเลือกใช้งาน Solid State Relay (SSR) เบื้องต้น	26
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	27
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.1.1 ARDUINO UNO REV3	27
3.1.2 Current Transformer	28
3.1.3 Solid State Relay	29
3.1.4 LCD Monitor	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล ในระดับห้องปฏิบัติการ	30
3.2.1 บล็อกไดอะแกรมของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล ในระดับห้องปฏิบัติการ	30
3.2.2 การต่อวงจรของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล ในระดับห้องปฏิบัติการ	31
3.3 หลักการออกแบบซอฟต์แวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	37
3.3.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟแวร์	37
3.3.2 อธิบายขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	38
3.4 อธิบายการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง	42
4.1 การทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส	42
4.2 การทดสอบความแม่นยำของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	63
4.3 การทดสอบการ Alarm ของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ผลการดำเนินงานและแนวทางพัฒนา	72
5.1 สรุปผลการทดลอง	72
5.2 สรุปผลการดำเนินงาน	73
5.3 วิจารณ์ผลการทดลอง	73
5.4 ปัญหาที่พบในระหว่างดำเนินโครงงานและข้อมูลเสนอแนะ	73
5.5 แนวทางการพัฒนา	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	76
ประวัติผู้เขียน	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ไดอะแกรมเส้นเดียวแสดงอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้ากำลัง	6
2.2	การแบ่งขอบเขตป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง	9
2.3	หม้อแปลงกระแส (CT)	10
2.4	ตัวอย่างเงื่อนไขในระบบไฟฟ้ากำลังที่ปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินได้ยาก	12
2.5	หลักการทำงานของรีเลย์แบบดิจิตอล	15
2.6	กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ Inverse-Time Overcurrent Relay	17
2.7	กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ Definite-Time Overcurrent Relay	17
2.8	กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ IDMT Relay	18
2.9	กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตามมาตรฐาน IEC	19
2.10	บอร์ด Arduino ต่อกับ LED	21
2.11	บอร์ด Arduino ต่อกับบอร์ดเสริม (Xbee Shield)	21
2.12	ส่วนประกอบของ Arduino UNO rev3	22
2.13	Electromechanical แบบเก่า	23
2.14	Solid State Relay (SSR)	23
2.15	วงจรการต่อใช้งานแบบพื้นฐานของอาร์มาเจอร์รีเลย์ และ โซลิดสเตตรีเลย์	23
2.16	องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของโซลิคสเตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type	24
2.17	รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทางานของวงจรโซลิคสเตตรีเลย์แบบ Non Zero Crossing Type	24
2.18	องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ โซลิคเตตรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type	25
2.19	รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทางานของวงจร Solid State Relay แบบ Zero Crossing Type	26
3.1	Arduino UNO R3 ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2	Current Transformer ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3	Solid State Relay ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.4	LCD Monitor ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.5	หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	30
3.6	วงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.7	ส่วนที่ทำหน้าที่รับข้อมูลของวงจร รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ	32
3.8	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Type	32
3.9	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Current	33
3.10	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Trip	33
3.11	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Alarm	33
3.12	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Alarm Time	34
3.13	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Definite	34
3.14	หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Definite Time	34
3.15	ส่วนที่ทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งการของวงจร รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ	35
3.16	ส่วนที่ทำหน้าที่แสดงผลของวงจร รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ	36
3.17	แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบซอฟแวร์ของรีเลย์ป้องกัน	37
4.1	วงจรที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส	42
4.2	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 1 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	44
4.3	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 1 หลอด	44
4.4	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 2 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	45
4.5	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 2 หลอด	45
4.6	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 3 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	46
4.7	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 3 หลอด	46
4.8	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 4 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	47
4.9	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 4 หลอด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.10 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 5 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 48
4.11 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 5 หลอด 48
4.12 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 6 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 49
4.13 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 6 หลอด 49
4.14 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 7 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 50
4.15 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 7 หลอด 50
4.16 ราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 8 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 51
4.17 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 8 หลอด 51
4.18 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 9 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 52
4.19 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 9 หลอด 52
4.20 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 10 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 53
4.21 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 10 หลอด 53
4.22 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 11 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 54
4.23 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 11 หลอด 54
4.24 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 12 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 55
4.25 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 12 หลอด 55
4.26 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 13 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 56
4.27 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 13 หลอด 56
4.28 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 14 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ 57
4.29 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 14 หลอด 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
4.30	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 15 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	58
4.31	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 15 หลอด	58
4.32	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 16 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	59
4.33	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 16 หลอด	59
4.34	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 17 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	60
4.35	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 17 หลอด	60
4.36	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 18 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ	61
4.37	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 18 หลอด	61
4.38	วงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	63
4.39	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้นของ Definite-Time Overcurrent Relay	64
4.40	จอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้นของ Normal Inverse-Time Overcurrent Relay	64
4.41	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้นของ Very Inverse-Time Overcurrent Relay	65
4.42	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้นของ Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay	65
4.43	ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 2 หลอด	67
4.44	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้นของ Normal Inverse-Time Overcurrent Relay	68
4.45	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้นของ Very Inverse-Time Overcurrent Relay	68
4.46	หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้นของ Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay	69
4.47	กราฟแสดงช่วงที่สองที่ใช้ในการทดลองการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินโครงการ	3
2.1	หลักการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา	20
4.1	การบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเพื่อปรับเทียบหม้อแปลงกระแส	62
4.2	การบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น	66
4.3	การบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น	69
4.4	สถานะของหลอดไฟที่ระยะเวลาต่างๆ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้า ในการที่จะช่วยลดความเสียหายและให้ความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้นในระบบ ดังนั้นการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์การป้องกันที่ดีและมีเสถียรภาพสูง สามารถตรวจสอบความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น การป้องกันกระแสเกินก็เป็นหนึ่งในการป้องกันที่ระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมี รีเลย์ในระบบป้องกันไฟฟ้าทุกชนิดต่างก็มีความสำคัญ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินก็เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ การใช้รีเลย์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบจริงนั้น มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ทางห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ยังไม่มีงบประมาณเพียงพอ เพราะฉะนั้นทางเลือกหนึ่งที่เราสามารถทำได้คือ การออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินขึ้นมาใช้เอง ซึ่งจะส่งผลให้มีความรู้ในการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล สามารถออกแบบความถูกต้อง ความแม่นยำและรายละเอียดภายในของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินได้ตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เลือกนำมาใช้ ถ้าเราสามารถออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลเองได้ในอนาคตเราก็จะสามารถปรับปรุงและเปรียบเทียบการทำงาน (Algorithm) ในการคำนวณค่ากระแส รวมทั้งการกรองสัญญาณรบกวนให้มีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น กลุ่มของพวกเราจึงได้ศึกษาแนวทางการออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่เราสามารถพัฒนาขึ้นใช้ได้เองในระดับห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อให้มีองค์ความรู้ในหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล
2. เพื่อให้สามารถสร้างและพัฒนารีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลขึ้นมาใช้งานได้
3. สามารถออกแบบรายละเอียดภายในรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลใช้งานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส
3. ใช้การวัดกระแสโดยหม้อแปลงกระแสพิกัด 100A/1V (Current Transformer, CT)
4. รีเลย์ป้องกันกระแสเกินสามารถใช้กับโหลดที่พิกัดไม่เกิน 10 A

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาข้อมูลทางทฤษฎีเกี่ยวข้องกับหลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง องค์ประกอบระบบไฟฟ้ากำลัง คุณสมบัติและการแบ่งโซนป้องกันภายในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาข้อมูล หลักการป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสเกินที่เกิดขึ้น และหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล ตามมาตรฐาน IEC
3. ศึกษาหลักการทำงานของ Arduino เพื่อใช้ในการออกแบบชุดคำสั่งควบคุมระบบของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล
4. ศึกษาอัลกอริทึมของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ
5. ออกแบบชุดคำสั่งสำหรับ Arduino เพื่อใช้ในการควบคุมรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ
6. ออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ
7. ทดสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ
8. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน
9. จัดทำรูปเล่มและนำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน								
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย
1. ศึกษาข้อมูลทางทฤษฎี หลักการทำงานและประเภทของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน	←- - -→								
	←——→								
2. ศึกษาอัลกอริทึมของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล	←- - -→								
		←——→							
3. ออกแบบชุดคำสั่งสำหรับ Arduino เพื่อควบคุมการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน				←- - -→					
				←——→					
4. ออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ						←- - -→			
						←——→			
5. ทดสอบการทำงานขอรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ							←- - -→		
							←——→		
6. วิเคราะห์และสรุปการดำเนินงาน								←——→	
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←- - -→	
								←——→	

←- - -→ ระยะเวลาวางแผน

←——→ ระยะเวลาดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้มีองค์ความรู้เกี่ยวกับหลักการป้องกันกระแสเกินและหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. สามารถออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการได้ในราคาต้นทุนที่ต่ำลง
3. สามารถออกแบบรายละเอียดภายในของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลได้ตามความเหมาะสมและความต้องการของการใช้งาน
4. สามารถใช้งานรีเลย์ป้องกันกระแสเกินสำหรับการป้องกันและสำรองระบบไฟฟ้าได้
5. เข้าใจหลักการทำงานของอัลกอริทึมภายในของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล
6. ฝึกการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงาน
7. เกิดความรับผิดชอบต่อหน้าที่และตรงต่อเวลาในงานที่ได้รับมอบหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (Principle of Power System Protection) [1]

ทุกส่วนของวงจรไฟฟ้าจะต้องมีการป้องกัน การป้องกันแบบง่ายที่สุดคือการป้องกันวงจรไฟฟ้าด้วยฟิวส์ที่ใช้ในบ้านที่อยู่อาศัยทั่วไป การป้องกันที่มีมากชนิดและยุ่งยากซับซ้อนที่สุดก็คือการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิศวกรไฟฟ้าจะต้องพึงระลึกเสมอว่าจะไม่ยอมให้มีส่วนใดของระบบไฟฟ้าใช้งานโดยไม่มีการป้องกัน การเลือกชนิดของการป้องกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายประการด้วยกัน เช่น พิกัด ความสำคัญ ตำแหน่งที่ติดตั้ง ของบริภัณฑ์ที่ต้องการป้องกัน ตลอดจนขึ้นอยู่กับลักษณะความผิดปกติที่มีโอกาสเกิดบริภัณฑ์นั้นๆด้วย

หลักการสำคัญในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังคือ การตัดแยกวงจรแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบให้เร็วที่สุดโดยให้เกิดผลกระทบกับอุปกรณ์อื่นในระบบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ จะต้องมั่นใจด้วยว่าการตัดวงจรนี้ทำได้อย่างถูกต้องและไม่ตัดวงจรในส่วนที่ไม่จำเป็นออกไป อุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในระบบป้องกันจึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลว่าค่าที่ตรวจวัดมานั้นผิดปกติหรือไม่ รวมถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดแยกส่วนที่เกิดการผิดพร่องออกจากระบบอีกด้วย

2.1.1 องค์ประกอบของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง ระบบป้องกันในระบบกำลังมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันมากมาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ขนาด ตำแหน่ง และความสำคัญของบริภัณฑ์ที่ต้องการป้องกัน ในการตัดแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันเวลานั้นจะต้องอาศัยการทำงานของส่วนย่อยต่างๆ ในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังที่ถูกต้องแม่นยำ โดยหน้าที่ของส่วนย่อยหรืออุปกรณ์ย่อยแต่ละส่วนจะทำหน้าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของการเกิดความผิดพร่อง ซึ่งอุปกรณ์ในระบบป้องกันบางอย่างอาจจะมีโอกาสได้ทำงานไม่บ่อยนัก อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย

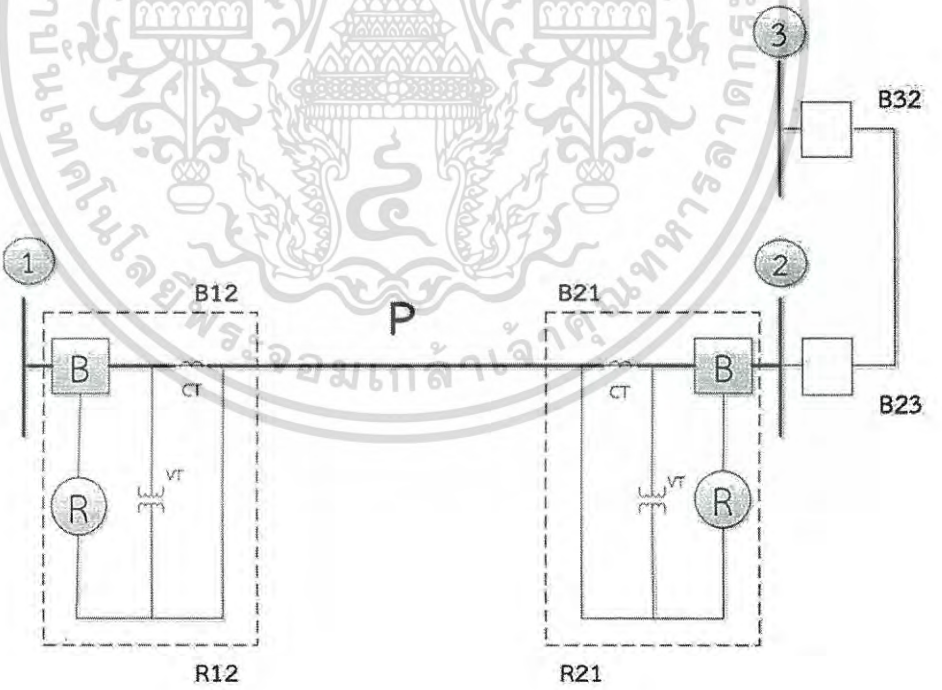
เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรทั้งในขณะที่ระบบกำลังอยู่ในภาวะปกติและในภาวะผิดปกติ การเปิดและปิดวงจรในขณะที่ระบบกำลังอยู่ในภาวะปกตินั้นสามารถกระทำด้วยมือเมื่อใดก็ได้ตามต้องการ แต่เมื่อระบบอยู่ในภาวะผิดปกติโดยทั่วไปจะต้องตัดตอนอย่างรวดเร็วภายในเวลาสั้นกว่า 1 วินาที และในบางกรณีอาจต้องตัดตอนวงจรภายในเวลา 20-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 มิลลิวินาที จึงจำเป็นต้องมีตรวจจับภาวะผิดปกติและสั่งการให้เซอร์กิตเบรคเกอร์เปิดและปิดวงจรด้วยความเร็วสูงโดยอัตโนมัติ

อุปกรณ์ตรวจวัดและแปลงสัญญาณ (Transducer) มักจะเป็นหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) และหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer , Potential Transformer) ทำหน้าที่แปลงกระแสและแรงดันจากระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าต่ำลงเพื่อให้สามารถป้อนเข้าสู่รีเลย์ ซึ่งมีขนาดกระแสและแรงดันที่กำหนดให้เป็นค่าต่ำ

รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) คืออุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถรับการกระตุ้นจากสัญญาณที่แปลงมาจากระบบกำลัง รีเลย์มีหน้าที่ตรวจจับภาวะผิดปกติในระบบกำลัง โดยมันจะทำการวัดปริมาณไฟฟ้าตลอดเวลา ค่าปริมาณไฟฟ้าที่วัดภายใต้ภาวะปกติได้แก่ แรงดัน กระแส มุมทางไฟฟ้า และความถี่ฯลฯ รีเลย์อาจมีสัญญาณป้อนเข้า 1 สัญญาณ หรือมากกว่าก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดรีเลย์ เมื่อขนาดของสัญญาณถึงขนาดที่กำหนดให้รีเลย์ทำงาน คอนแทคของรีเลย์จะปิด ทำให้วงจรทริพครบวงจร ซึ่งมีผลให้กระแสไหลในวงจรทริพกระตุ้นให้เซอร์กิตเบรคเกอร์เปิดเพื่อตัดแยกส่วนของวงจรที่เกิดภาวะผิดปกติออกจากระบบ



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวแสดงอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการเซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์จะกำหนดหมายเลข โดยสอดคล้องกับบัสและสายส่งไฟฟ้า จากรูปสายส่งมักจะเรียกว่า สายส่ง 1-2 และสำหรับเบรคเกอร์และรีเลย์ ใช้สัญลักษณ์ B12 และ R12 สำหรับเบรคเกอร์และรีเลย์ ที่ต่ออยู่ที่ปลายสายส่งด้านบัส 1 และใช้สัญลักษณ์ B21 และ R21 สำหรับเบรคเกอร์และรีเลย์ ที่ต่ออยู่ปลายสายส่งด้านบัส 2 อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจมีการกำหนดที่แตกต่างออกไปขึ้นอยู่กับการทำงาน ในการทำงานของเบรกเกอร์ อาจทำงานแยกกันแต่ละเฟสหรืออาจทำงานพร้อมกันโดยใช้เบรกเกอร์แบบสามเฟสที่ถูกสั่งจากรีเลย์ตัวเดียว

จากรูปที่ 2.1 เมื่อเกิดการผิดพร่อง ในลักษณะลัดวงจรที่จุด P ก็จะทำให้เกิดกระแสปริมาณมากไหลจากทั้งสองด้านของสายส่ง ในที่นี้เราจะพิจารณาว่ามีแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าอยู่ทั้งสองด้านของจุดลัดวงจร (เป็นแบบโครงข่าย) การไหลของกระแสปริมาณมากนี้จะเกิดขึ้น พร้อมกับการลดลงของขนาดของแรงดันไฟฟ้าในระบบ กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าหลายกิโลแอมแปร์ (kA) และหลายกิโลโวลต์ (kV) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้งานกับระบบป้องกัน จึงต้องมีการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าที่ต่ำลงโดยใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Transducer, T) ซึ่งมักจะเป็นหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน

การเพิ่มขึ้นของกระแสและการลดลงของแรงดันจะเป็นสัญญาณที่บอกว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ตรวจจับความผิดปกติดังกล่าวจะเรียกว่า รีเลย์ (Relay, R) โดยจะรับสัญญาณจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (T) ในรูปที่ 2.1 รีเลย์ R12 และ R21 จะประมวลผลจากกระแสและแรงดันได้ว่าเกิดการลัดวงจรที่สายส่ง 1-2 การประมวลผลนี้จะทำในเวลาประมาณ 0.008-0.04 วินาที ขึ้นอยู่กับการออกแบบและปรับตั้งรีเลย์

การประมวลผลการเกิดลัดวงจรของรีเลย์ R12 และ R21 จะส่งสัญญาณ (Trip signal) ไปยังเบรกเกอร์ B12 และ B21 ตัดวงจร (Trip) แยกสายส่ง 1-2 ออกจากระบบทำให้จุดที่ลัดวงจรถูกตัดออกจากระบบหรือเรียกว่าการ Clear Fault ระยะเวลาในการตัดวงจรส่วนที่ลัดวงจรออกจากระบบจะใช้เวลาประมาณ 0.030-0.1 วินาที ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบป้องกัน

จากกระบวนการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังข้างต้น จะเห็นว่าคุณลักษณะที่สำคัญของรีเลย์คือจะต้องมีความเร็วในการทำงาน (Speed) และความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) ในการตัดวงจรส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบ นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติในการแยกแยะ (Selectivity) ด้วยว่าการลัดวงจรอยู่ในส่วนใดและจะตัดวงจรส่วนไหนบ้างออกจากระบบในการที่จะแยกส่วนที่ลัดวงจรออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่ารีเลย์ R23 จะตรวจจับกระแสลัดวงจรที่จุด P ด้วยเช่นกัน เพราะจะมีกระแสไหลผ่านที่สูงมากเช่นกัน แต่รีเลย์ R23 ไม่ควรจะส่งสัญญาณตัดวงจรไปยัง B23 เนื่องจากการเกิดลัดวงจรนี้อยู่นอกขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ R23

2.1.2 คุณสมบัติของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันสามารถแบ่งตามยุคของเทคโนโลยีได้เป็น ยุคสมัยที่เป็นอนาล็อกและยุคสมัยที่เป็นรีเลย์แบบดิจิตอล ในยุคสมัยที่เป็นอนาล็อกคุณลักษณะของรีเลย์ที่ต้องการมี 6 ประการคือ

1. ความน่าเชื่อถือ (Reliability) แบ่งออกเป็น

- ความวางใจได้ (Depensibility)

- ความมั่นคง (Security)

2. ความเร็วในการทำงาน (Speed)

3. ความสามารถในการแยกแยะได้อย่างถูกต้อง (Selectivity)

4. ความไวต่อสัญญาณที่ป้อนให้ (Sensitivity)

5. ความง่าย (Simplicity)

6. ความประหยัด (Economy)

ยุคสมัยที่เป็นรีเลย์แบบดิจิตอล รีเลย์ป้องกันจะมีความสามารถพิเศษ (feature) ต่างๆ เพิ่มขึ้นอีกมากมาย เช่น

1. ความสามารถในการบอกตำแหน่งของการผิดพร่อง

2. ความสามารถในการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาเข้า เหตุการณ์ผิดปกติ สถิติข้อมูลทางไฟฟ้า

3. มีช่องทางสำหรับรับส่งข้อมูลการสื่อสาร

2.1.3 การแบ่งขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Zones of Protection) เพื่อให้รีเลย์สามารถตัดวงจรเฉพาะส่วนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ในการแยกส่วนที่ลัดวงจรออกจากระบบ การทำงานของรีเลย์จะต้องมีการแบ่งขอบเขตการป้องกัน (Zones of Protection) ที่รีเลย์ต้องรับผิดชอบ รูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างแสดงขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง เส้นประวงปิดจะแสดงขอบเขตการป้องกันแต่ละเขต โดยในแต่ละเขตจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง (สายส่ง หรือ หม้อแปลง) และเบรกเกอร์ โดยเบรกเกอร์แต่ละตัวจะอยู่ในขอบเขตการป้องกันสองเขต จากรูปจะเห็นว่าในขอบเขตที่ 1 (Zone 1) จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลง และเบรกเกอร์หนึ่งตัว ส่วนในขอบเขตที่ 3 จะประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าและเบรกเกอร์สองตัว เมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน

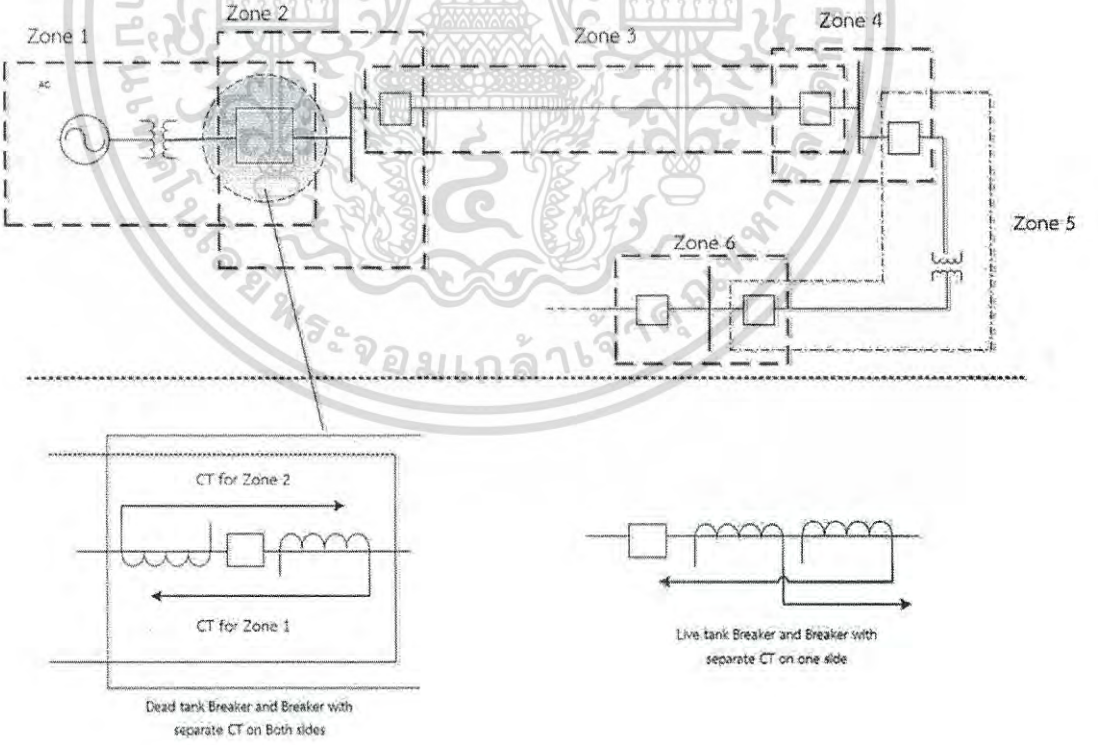
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตใดเบรคเกอร์จะทำการตัดวงจรหรืออุปกรณ์ในขอบเขตนั้นออกจากระบบ ดังนั้นการแบ่งขอบเขตการป้องกันจะมีเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการกำหนดขอบเขต

การแบ่งขอบเขตการป้องกันสามารถทำได้ทั้งแบบปลายปิดที่เป็นขอบเขตจำกัดและแบบปลายเปิด ในกรณีทีเป็นการป้องกันที่ไม่กำหนดขอบเขตแน่นอน เช่น การกำหนดขอบเขตของสายส่งที่มีระยะไกลมาก หรือเป็นแบบปิดหรือแบบหนึ่งหน่วยที่เป็นการป้องกันเฉพาะอุปกรณ์

สิ่งทีต้องการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องจัดให้ได้รับการป้องกันจากอย่างน้อย 2 ชนิดของการป้องกัน ซึ่งประกอบด้วย การป้องกันหลัก 1 ชนิด และการป้องกันสำรองอีก 1 ชนิด การป้องกันหลักและการป้องกันสำรองจะต้องจัดให้ประสานการทำงานให้สัมพันธ์อย่างเหมาะสม

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการแบ่งขอบเขตการป้องกันก็คือ ขอบเขตในการป้องกันจะต้องมีการเหลื่อมกัน (Overlap) เพื่อไม่ให้เกิดส่วนใดส่วนหนึ่งในระบบไม่ได้อยู่ในขอบเขตการป้องกันใด ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการลัดวงจรในบริเวณที่เหลื่อมขอบเขตกันจะทำให้เกิดการตัดแยกทั้งสองขอบเขตที่เหลื่อมกันออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นการเหลื่อมกันของขอบเขตในการป้องกันจะต้องเป็นบริเวณที่เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.2 การแบ่งขอบเขตป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หม้อแปลงกระแส (Current Transformers) [2]

กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องแปลงให้มีขนาดที่เล็กลงก่อนที่จะส่งไปยังเครื่องมือวัดหรือรีเลย์ ด้วยเหตุผลสำคัญ 2 ประการ คือ

- สามารถออกแบบรีเลย์ให้มีขนาดเล็ก สะดวกในการใช้งาน และราคาต่ำกว่า
- มีความปลอดภัยต่อผู้ทำงานในระบบป้องกันมากกว่า

การแปลงขนาดของกระแสในระบบป้องกันจะใช้หม้อแปลงเพื่อการวัดที่เรียกว่า หม้อแปลงกระแส (Current Transformers, CT) ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงกำลังทั่วไปแต่การออกแบบจะมีความเฉพาะเจาะจงมากกว่า เป็นต้นว่า ในการออกแบบหม้อแปลงกระแสจะต้องทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปสัญญาณเหมือนกับทางด้านปฐมภูมิให้มากกว่าที่สุดเท่าที่จะทำได้

รูปที่ 2.3 หม้อแปลงกระแส (CT)

2.2.1 หน้าที่ของหม้อแปลงกระแส หน้าที่ของหม้อแปลงกระแส คือการแปลงกระแสไฟฟ้าสูงค่าหนึ่ง เป็นกระแสไฟฟ้าอีกค่าหนึ่งที่มีค่าต่ำลงตามมาตรฐานกำหนด Rated Current ของขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary Winding) ไว้ที่ 5A และ 1A เพื่อเป็นมาตรฐานในการผลิตอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่นำมาต่อเข้าที่ Secondary Terminal กรณีที่ต้องใช้งานกับไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีฉนวนที่สามารถทนต่อแรงดันใช้งานและแรงดันผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบ

2.2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงกระแส ถ้ากระแสด้านปฐมภูมิ (Ip) ไหลผ่านทางขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) จะเกิด Induction flux : φ ในแกนเหล็ก ฟลั๊กซ์ในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding : ES) โดย ES ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดกระแสด้านทุติยภูมิ (IS) ไหลใน Secondary Circuit เป็นไปตาม Ampere-Turn Balance $N_P \times I_P = N_S \times I_S$ (เป็น Ideal Transformer)

ในทางปฏิบัติขดลวดทุติยภูมิ จะมีทั้งความต้านทาน (Resistance) ความต้านทานรอยรั่ว (Leakage Reactance) และต้องคำนึงถึง ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่อาจมีค่าสูงจนมีผลต่ออิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร

2.2.3 การบอกลักษณะของหม้อแปลงกระแส

- Ratio คือ อัตราส่วนของการแปลงกระแส จากกระแสด้านปฐมภูมิกับกระแสด้านทุติยภูมิ เช่น Ratio ของหม้อแปลงกระแส 300 : 5 มีความหมายว่า CT มี Rated Primary Current เท่ากับ 300A และ Rated Secondary Current มีค่า 5A หรือ CT ที่เป็น Multi-Ratio : 100-1200A สามารถเลือกกระแสใช้ได้ 10 Ratio ตั้งแต่ 100A ถึง 1200A โดยที่กระแสด้าน Secondary มีค่าคงที่เท่ากับ 5A และกรณีที่มี Secondary หลายชุดพันบนแต่ละ Core ให้เลือกใช้งาน เรียกว่า Multi-Core เช่น 100-1200/5

- Current Rating Factor : RF คือ ค่าจำนวนเท่าของกระแสด้านปฐมภูมิ ที่ CT สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เช่น 1, 1.3, 2 เป็นต้น

- ความแม่นยำ (Accuracy) คือ ความถูกต้องแม่นยำของการแปลงกระแส ซึ่งมีลักษณะต่างกันระหว่าง ชนิด Protection และ Metering

- Polarity ใช้ในกรณีที่นำด้านทุติยภูมิของ CT สองชุด หรือมากกว่าสองชุดมาต่อกัน และทิศทางการไหลของกระแส

- Burden เป็น Impedance ของอุปกรณ์ที่ต่อทางด้านทุติยภูมิ เช่น รีเลย์, เครื่องมือวัด หรืออุปกรณ์อื่นๆ รวมทั้งสายที่ต่อระหว่างอุปกรณ์กับ Secondary Terminal รวมทั้งหมด คือ Burden ของ CT อาจมีหน่วยเป็น VA หรือ Ω

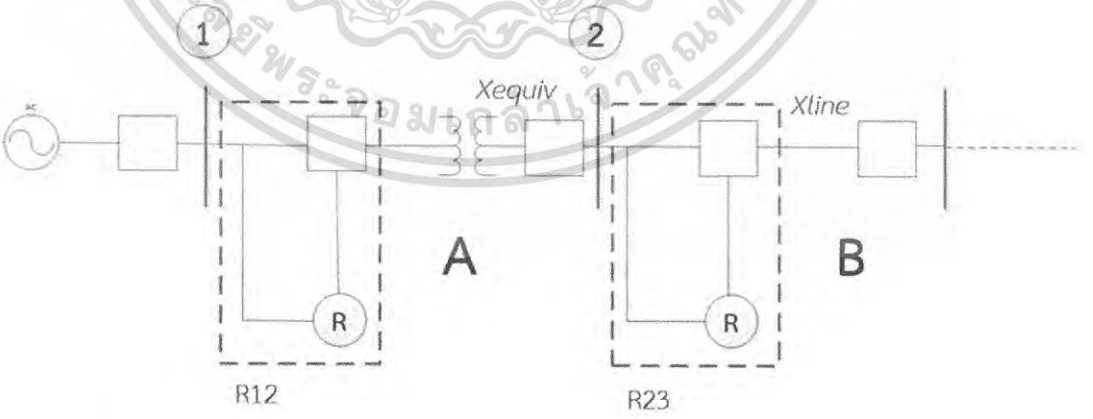
2.2.4 ข้อควรระวังของหม้อแปลงกระแส ห้าม Open-Circuit ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิ เนื่องจากการเปิดวงจรด้านทุติยภูมิไว้นั้น จะมีผลทำให้เกิดแรงดันทางด้านทุติยภูมิสูงมาก อาจเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่ได้ ดังนั้น ในการปฏิบัติงาน จำเป็นต้องถอดสายทางด้านทุติยภูมิออก จะต้องลัดวงจรที่ขั้วของทุติยภูมิไว้ก่อนเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection) [4]

การป้องกันกระแสเกินหรือกระแสลัดวงจรถือว่าเป็นการป้องกันพื้นฐานของอุปกรณ์ทุกชนิดในระบบไฟฟ้ากำลัง จุดมุ่งหมายของการป้องกันกระแสเกิน คือเพื่อตรวจจับกระแสว่ามีค่าสูงผิดปกติหรือไม่ โดยการเกิดลัดวงจรจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้อย่างมาก สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าคือ ปริมาณของกระแสลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นได้ ทิศทางการไหลและโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงการทำงานสัมพันธ์กับระบบป้องกันอื่น ๆ (Co-ordination) ด้วย ทั้งนี้การพิจารณาสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current) ด้วยวิธีการองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (System Stability) ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อนทำให้ ในทางปฏิบัติมักจะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

2.3.1 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปแล้วรีเลย์ในป้องกันกระแสเกินจะไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างการลัดวงจรที่ปลายขอบเขตการป้องกันกับการลัดวงจรที่ต้นขอบเขตที่อยู่ถัดไป และปัญหานี้จะแก้ไขได้ยากขึ้นเมื่ออิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์มีค่าต่ำเนื่องจากสิ่งที่มีผลโดยตรงต่อค่ากระแสลัดวงจรคือค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถใช้รีเลย์ป้องกันกระแสเกินเพียงอย่างเดียวในการป้องกันได้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเงื่อนไขในระบบไฟฟ้ากำลังที่ปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาระบบสายส่งดังรูปที่ 4.1 เป็นการเชื่อมต่อระหว่างสายส่งทีมีค่าอิมพิแดนซ์เป็น (Xline) ต่อเข้ากับอุปกรณ์คือหม้อแปลงทีมีค่าอิมพิแดนซ์ (Xequiv) ถ้าค่า Xline น้อยกว่า Xequiv มากๆ (เป็นสายส่งระยะสั้น) กระแสลัดวงจรที่จุด A และ B จะใกล้เคียงกันมากและรีเลย์ R12 จะแยกแยะความแตกต่างระหว่างกระแสลัดวงจรทั้งสองจุดได้ยากมาก (หรืออาจไม่ได้เลย) การปรับตั้งค่าของรีเลย์ R12 กับรีเลย์ R23 จึงเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันกระแสลัดวงจร

นอกจากค่ากระแสลัดวงจรแล้วระดับของแรงดันก็เป็นปัจจัยทีต้องพิจารณาในระบบป้องโดยปกติในระบบไฟฟ้าทีมีแรงดันสูงกว่ามักจะต้องมีการป้องกันที่ซับซ้อนและมีราคาแพงกว่า เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่มีแรงดันสูงมักจะมีราคาแพง และจะมีผลกระทบต่อระบบโดยรวมมากกว่าเมื่อเกิดปัญหาขึ้น จึงต้องให้ความสำคัญในความปลอดภัยมากกว่าระบบทีมีแรงดันต่ำ อย่างไรก็ตามบางครั้งระบบป้องกันของสายส่งในระบบแรงดันสูง (HV) ที่เป็นสายส่งส่วนที่สำคัญมากของระบบก็อาจมีการลงทุนไม่น้อยไปกว่าสายส่งในระบบแรงสูงพิเศษ (EHV)

2.4 ประเภทและหลักการทำงานรีเลย์ [5]

หน้าที่ของรีเลย์คือการระบุว่าระบบเกิดข้อผิดพร่องขึ้นหรือไม่นั่นคือรีเลย์จะต้องสามารถแยกความแตกต่างระหว่างสภาวะการทำงานปกติ (ไม่เกิดการผิดพร่องหรือการผิดพร่องนั้นอยู่นอกขอบเขตการป้องกัน) กับสภาวะที่เกิดการผิดพร่องได้รีเลย์ได้ถูกพัฒนามากกว่า70ปีและในปัจจุบันรีเลย์สามารถแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- รีเลย์แบบไฟฟ้ากล (Electromechanical Relays)
- รีเลย์แบบสแตติก (Statics Relays)
- รีเลย์แบบดิจิตอล (Digital Relays)
- รีเลย์แบบนิวเมอร์ริคอล (Numerical Relays)

2.4.1 รีเลย์แบบดิจิตอล (Digital Relays) จากหน้าที่ของรีเลย์ที่ต้องมีการรับสัญญาณอินพุทมาประมวลผลและตัดสินใจ ได้กับคอมพิวเตอร์แบบอนาล็อกชนิดหนึ่ง ดังนั้นเราสามารถออกแบบให้คอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซส เซอร์ที่ประมวลผลแบบดิจิตอลทำหน้าที่นี้ได้เช่นกัน แต่การรับสัญญาณของรีเลย์ชนิดนี้จะต้องทำการแปลงสัญญาณให้เป็น ดิจิตอลก่อน การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.5

ระบบไมโครโปรเซสเซอร์มีโครงสร้างการทำงานคล้ายกับคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำงานตามคำสั่งตามตรรกะที่โปรแกรมตั้งไว้ในหน่วยความจำ หน่วยความจำของไมโครโปรเฟสเซอร์อาจเป็นหน่วยความจำอ่านอย่างเดียว (Read only memory , ROM) ในการเก็บส่วนประมวลผลหลัก หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเป็นหน่วยความจำแบบชั่วคราวหรือหน่วยความจำแบบเข้าถึงโดยสุ่ม (Random access memory, RAM) ในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลตัวแปรและการตั้งค่าต่างๆ ไมโครโปรเซสเซอร์ติดต่อกลับหน่วยความจำด้วยระบบบัส (bus system) ซึ่งจะเชื่อมต่อสัญญาณกับส่วนสัญญาณเข้า (input) และสัญญาณออกหรือสัญญาณสั่งการ (output) ผ่านชุดแปลงสัญญาณ (Interface Adaptor)

หากมีการใช้หน่วยความจำที่ผู้ใช้สามารถโปรแกรมได้ เช่น หน่วยความจำอ่านอย่างเดียวชนิดโปรแกรมและลบได้ด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrically Erasable Programable Read Only Memory , EEPROM) ก็จะมีการทำงานในแบบของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable logic controller) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการควบคุมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย

การใช้รีเลย์แบบดิจิตอลนั้นมีทั้งข้อดีและข้อควรระวังหลายอย่าง เนื่องจากรีเลย์ชนิดนี้มีความสะดวกหลายอย่างในการใช้งาน ในขณะเดียวกันก็มีความซับซ้อนในการใช้งานด้วย รีเลย์แบบดิจิตอลจะสามารถเก็บข้อมูลย้อนหลังและสามารถนำกลับมาแสดงผลได้ทำให้วิเคราะห์สภาพสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังทำได้สะดวกขึ้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่รีเลย์ได้บันทึกไว้เป็นข้อมูลที่ผ่านส่วนแปลงสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วจึงควรมีการตรวจสอบค่าที่บันทึกว่าด้วยว่าในขณะที่เกิดผิดปกตินั้นรีเลย์ยังทำงานรับสัญญาณต่างๆอย่างเป็นปกติหรือไม่ เนื่องจากรีเลย์แบบดิจิตอลอาจทำงานผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนหรือจากสภาวะชั่วขณะ (Transient) ในขณะที่ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดผิดปกติได้

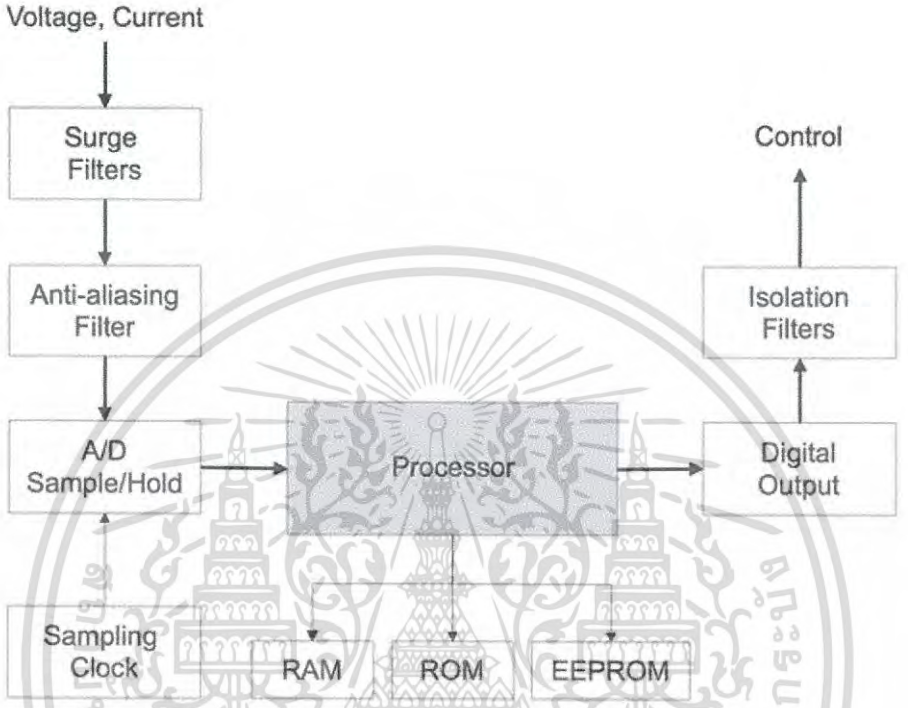
รีเลย์แบบดิจิตอลจะสามารถปรับตั้งค่าการทำงานโดยมีความสะดวกในการเชื่อมต่อกับระบบการแสดงผลที่เป็นดิจิตอลหรือคอมพิวเตอร์ สามารถทำการตรวจสอบและปรับตั้งค่าได้ทั้งที่ตัวรีเลย์เองและจากระยะไกล รีเลย์ชนิดนี้ยังมีความสามารถในการตรวจสอบและสื่อสารระหว่างรีเลย์ด้วยกันทำให้ อย่างไรก็ตามการปรับค่ารีเลย์ไม่ได้ทำบ่อยนักหลังจากที่ตั้งค่าไปแล้ว และการปรับตั้งค่าที่ทำได้ง่ายเกินไปอาจทำให้ต้องมีการระมัดระวังเป็นพิเศษในการผิดพลาดด้วย

รีเลย์แบบดิจิตอลสามารถออกแบบให้มีฟังก์ชั่นการทำงานที่ครอบคลุมเงื่อนไขที่ต้องใช้รีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าหลายชุดช่วยกัน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่การติดตั้ง อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาด้วยว่าค่าใช้จ่ายในส่วนของรีเลย์อาจถือว่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าทั้งหมดและหากเกิดความเสียหายของรีเลย์ก็จะส่งผลต่อการทำงานทั้งหมดได้ นอกจากนี้การใช้งานรีเลย์แบบดิจิตอลมีการใช้งานที่ซับซ้อนจึงต้องมีการศึกษาการทำงานและการโปรแกรมเป็นอย่างดี และต้องมีการฝึกอบรมผู้ใช้เป็นพิเศษด้วย

ในปัจจุบันการออกแบบระบบป้องกันมักจะใช้ทั้งรีเลย์แบบอนาล็อกและแบบคอมพิวเตอร์ผสมกัน แต่ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานของรีเลย์แบบคอมพิวเตอร์ขึ้น รีเลย์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์หรือแบบไมโครโปรเซสเซอร์จะมีบทบาทมากขึ้นในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมากในอนาคต



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของรีเลย์แบบดิจิตอล

2.5 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) [6]

เมื่อเกิดการลัดวงจรอิมพิแดนซ์ของวงจรจะมีค่าลดต่ำลงมาก ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่ามาก การลัดวงจร ได้แก่ การลัดวงจรระหว่างสาย การลัดวงจรลงดิน การลัดวงจรในขดลวด เป็นต้น โดยปกติกระแสฟอลต์จะเป็นหลายเท่าของพิกัดกระแส เราอาจให้คำนิยามของการป้องกันกระแสเกินว่า คือการป้องกันที่รีเลย์จะเริ่มทำงาน (pick up) เมื่อขนาดของกระแสมีค่าเกินระดับพิคอัพ (pick up level) ของรีเลย์ที่ตั้งไว้ รีเลย์ที่ใช้ก็คือ รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent relay) รีเลย์กระแสเกินจะทำงานเมื่อมีกระแสเกินพิกัดไหลในระบบที่ต้องการป้องกันเป็นรีเลย์ที่มีการใช้งานมากที่สุด คือใช้ในการป้องกันเครื่องกำเนิด หม้อแปลง สายส่ง บัสบาร์ ทั้งในระบบส่งและในระบบจำหน่าย ตลอดจนใช้ป้องกันกระแสเกินให้กับมอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time-Delay Overcurrent Relays)

การแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$t = \frac{K}{I^n - 1} \times TMS \qquad (2.1)$$

เมื่อ t เป็นเวลาที่หน่วงของรีเลย์

I เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ ซึ่งจะแสดงเป็นสัดส่วนของกระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์เป็นค่าต่อหน่วย (per unit) (ในมาตรฐาน IEC เรียกว่าค่าหมุดตัวคูณปรับตั้ง (Plug Setting Multiplier, PSM)

K, n เป็นค่าคงที่ของคุณสมบัติรีเลย์

TMS เป็นค่าการปรับค่าตัวคูณหน่วงเวลา (Time Multiplier Setting)

หรือในกรณีที่แสดงสมการโดยประมาณจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

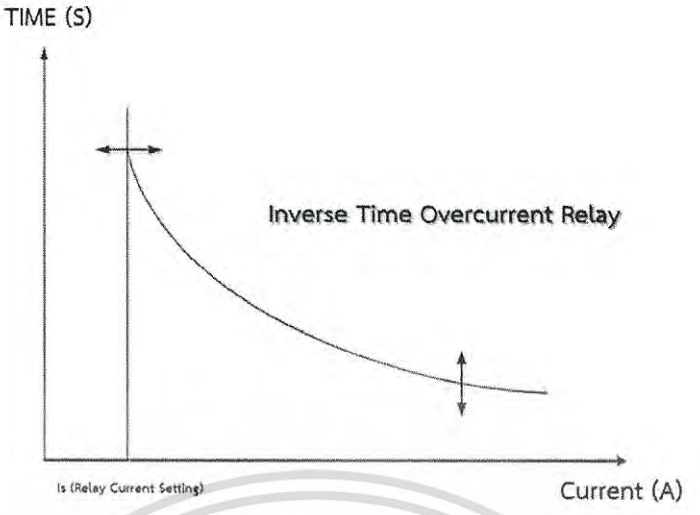
$$t = \frac{K}{I^n} \times TMS \qquad (2.2)$$

2.5.2 ประเภทของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC

รีเลย์ป้องกันกระแสเกินมีคุณสมบัติที่หลากหลายและสามารถแบ่งตาม คุณสมบัติของการตอบสนองต่อกระแสได้ ดังต่อไปนี้

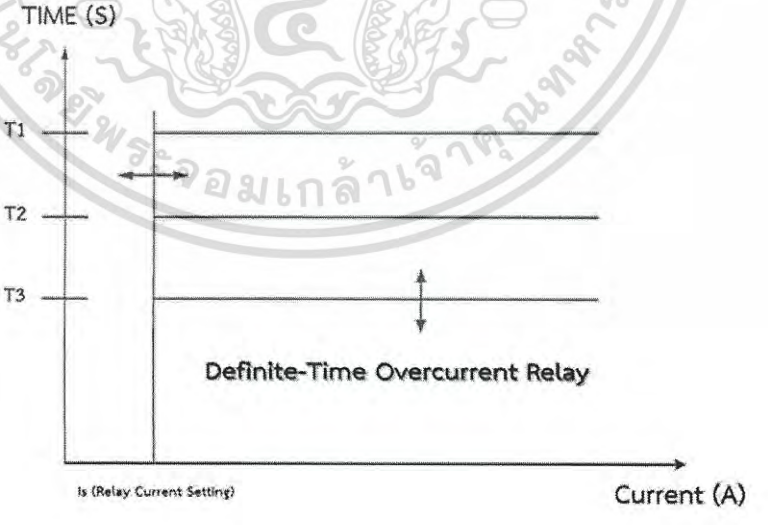
2.5.2.1 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน ใช้กระแสและเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องของระบบ จะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ เรียกว่า ค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current, Plug Setting, Ip) เวลาที่รีเลย์ใช้ในการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใด โดยเวลาจะลดลงเมื่อกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์มากขึ้น ช่วงเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบนี้เป็นส่วนกลับกับค่ากระแสและความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกระแสอาจแทนได้ด้วยสมการ It= K กล่าวคือ ความเร็วในการเริ่มทำงานของรีเลย์ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสผิดพร่องยิ่งกระแสผิดพร่องมากรีเลย์ยิ่งทำงานเร็ว ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ Inverse-Time Overcurrent Relay

2.5.2.2 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน ใช้กระแสและเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องของระบบ จะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้เช่นเดียวกัน แต่ระยะเวลาที่รีเลย์ทำงานนั้น จะมีค่าที่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใด โดยระยะเวลาในการทำงานของรีเลย์จะขึ้นอยู่กับการปรับตั้ง ดังรูป

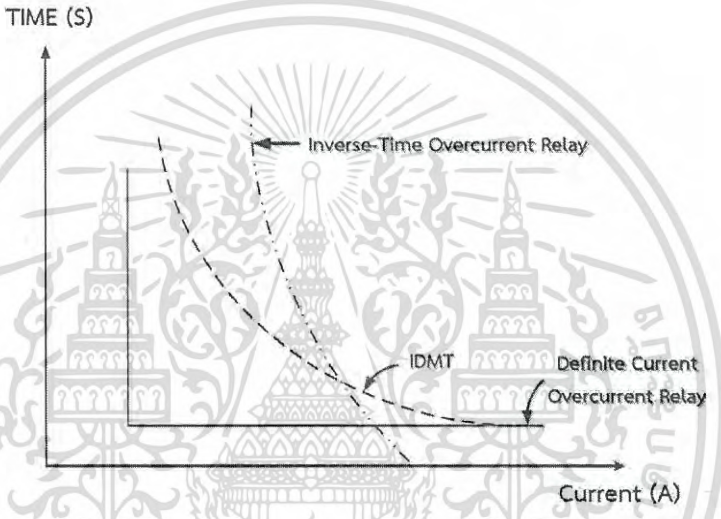


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ Definite-Time Overcurrent Relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.3 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันจำกัดเวลาต่ำสุด (Inverse Definite Minimum Time Overcurrent Relay, IDMT Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบ IDMT จะทำงานในลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน ในช่วงกระแสลัดวงจรต่ำๆ และทำงานในลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบแน่นอน ถ้าค่ากระแสลัดวงจร มีค่าสูง ตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ IDMT มาตรฐานเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02}-1} \times TMS \qquad (2.3)$$



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ IDMT Relay

2.5.2.4 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมากจะมีการทำงานที่ตอบสนองต่อกระแสลัดวงจรเร็วกว่ารีเลย์แบบ IDMT รีเลย์ชนิดนี้จะถูกเลือกใช้ในกรณีที่ไม่สามารถปรับตั้งรีเลย์ IDMT ให้ทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์ตัวอื่นได้ ใช้เมื่อต้องการเลือกใช้ค่าเวลากว้างๆในขณะที่แฟกเตอร์เวลาทั้งหมดต่ำมากๆ และ กระแสที่ตำแหน่งใดๆในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมากมาตรฐานเป็นไปตามสมการ

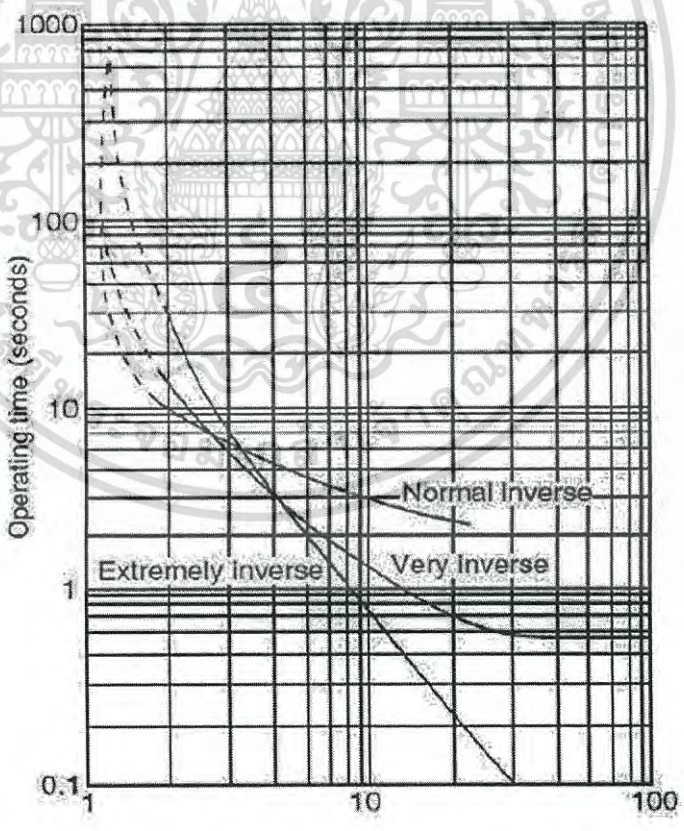
$$t = \frac{13.5}{I-1} \times TMS \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.5 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง จะมีการตอบสนองต่อค่ากระแสลัดวงเร็วขึ้นกว่ารีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้ทำงานสัมพันธ์กับฟิวส์ได้ดี นอกจากนี้รีเลย์ชนิดนีเหมาะสำหรับการใช้ในการป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างอิงมาตรฐานเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{80}{I^2-1} \times TMS \qquad (2.5)$$

คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแต่ละชนิดตามมาตรฐาน IEC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 หลักการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา การปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา จะมีการปรับตั้งค่าสองอย่าง ได้แก่

- ค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up Current) หรือเรียกว่าการปรับแท็ป (Tap Setting) หรือการปรับหมุดตัวคูณ (Plug Setting Multiplier, PSM)

- ค่าการหน่วงเวลา (Time Delay) หรือเรียกว่าการปรับหน้าปัดเวลา (Time Dial Setting) หรือการปรับตัวคูณเวลา (Time Multiplier Setting, TMS)

วัตถุประสงค์ในการปรับตั้งค่าทั้งสองดังกล่าวก็คือ การทำให้รีเลย์สามารถตรวจจับค่ากระแสเกินหรือกระแสลัดวงจรในสายส่งหรืออุปกรณ์ที่รับผิดชอบอยู่และทำหน้าที่ป้องกันสำรอง (Back up) รีเลย์ในสายส่งหรืออุปกรณ์ที่อยู่ถัดไปด้วย เรียกว่า การทำงานสัมพันธ์ (Co-ordination)

การปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานหรือการปรับแท็ปเป็นการกำหนดค่ากระแสขั้นต่ำที่รีเลย์จะตรวจจับ (input) ว่าผิดปกติและเริ่มทำงานจนกระทั่งส่งสัญญาณออกไป (output) สัญญาณนี้อาจเป็นหน้าสัมผัสหรือสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

การปรับค่าการหน่วงเวลาหรือการปรับหน้าปัดเวลาเป็นการปรับตั้งคุณสมบัติการหน่วงเวลาเมื่อรีเลย์ตรวจพบว่าเกิดกระแสเกินหรือลัดวงจรขึ้น ก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณออกไป สรุปการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงหลักการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา

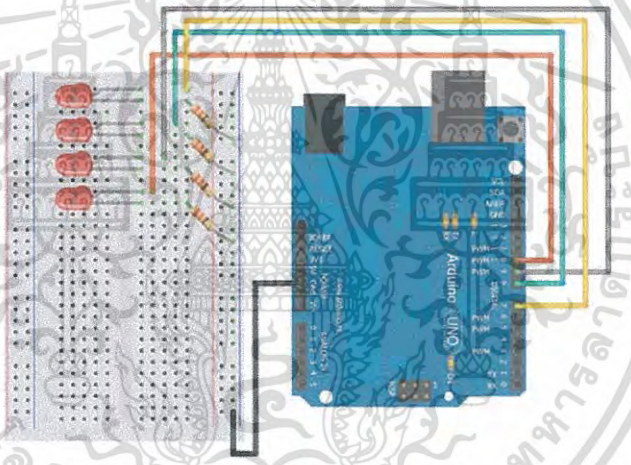
การปรับตั้ง	มาตรฐาน	
	IEEE	IEC
1. ปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน	Pick up Current หรือ Tap Setting	Relay Current Setting หรือ Plug Setting Multiplier (PSM)
2. ปรับตั้งค่าการหน่วงเวลา	Time Dial Setting (TDS)	Time Multiplier Setting (TMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

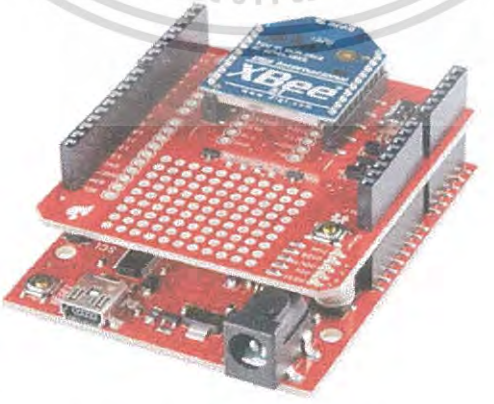
2.6 หลักการทำงานของ Arduino เบื้องต้น [7]

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอด ทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิคส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด (ดูตัวอย่างรูปที่ 2.10) หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ (ดูตัวอย่างรูปที่ 2.11) เช่น Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วจึงเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

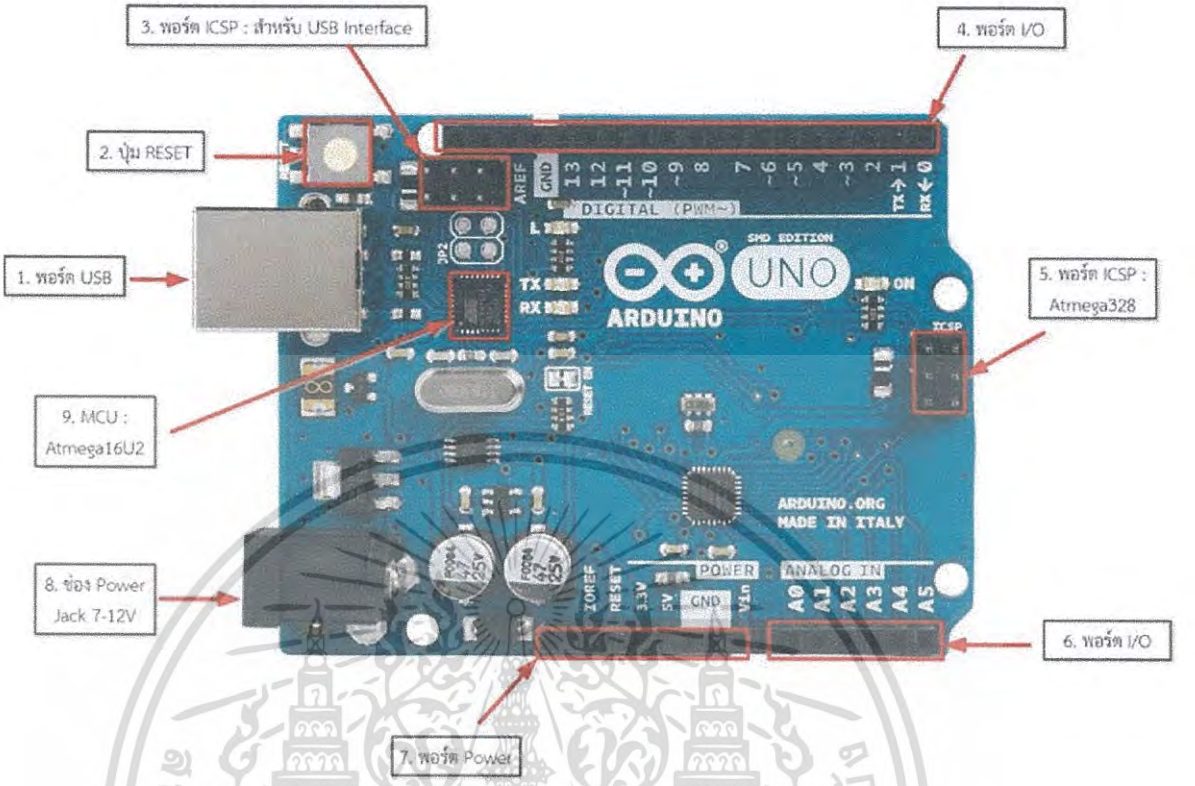


รูปที่ 2.10 บอร์ด Arduino ต่อกับ LED



รูปที่ 2.11 บอร์ด Arduino ต่อกับบอร์ดเสริม (Xbee Shield)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของ Arduino UNO rev3

1. พอร์ต USB ใช้สำหรับต่อคอมพิวเตอร์ เพื่อโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx, Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Boot loader
6. I/O Port นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5
7. Power Port ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, Vin
8. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
9. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

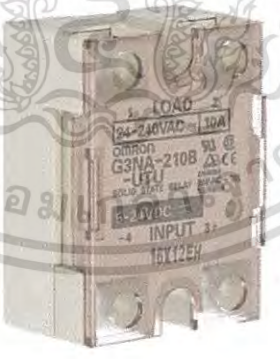
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 Solid State Relay (SSR)

การ ใช้รีเลย์ขับโหลดปกติอาจจะมีปัญหาตามมาหลายๆอย่าง เช่น การกระชากของไฟรุนแรงเกิดไป ตอบสนองช้า สัญญาณรบกวน อุปกรณ์หนึ่งที่น่าสนใจ คือ Solid State Relay (โซลิต สเตท รีเลย์) แนวคิดสำคัญ คือ ใช้ไทรแอค BTA41600 แทนรีเลย์ ทำให้มีความสะดวกกว่า ทำงานในความเร็วสูงๆ ได้ดี และทนกระแสเช่นเดียวกับรีเลย์ทั่วไป ส่วนไอซี MOC3041 เป็นไอซีควบคุมการทำงานของไทรแอคอีกทีหนึ่ง รับไฟต่ำๆ ก็ควบคุมไฟสูง (ไฟบ้าน) ให้สามารถทำงานได้

Solid State Relay หรือเรียกกันอย่างย่อๆว่า SSR นั้นก็คือ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์นั้นเอง แต่แตกต่างจาก Relay ทั่วไปที่เป็นแบบ Electromechanical

รูปที่ 2.13 Electromechanical แบบเก่า



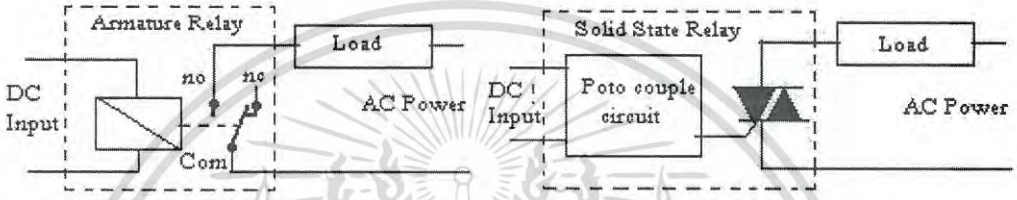
รูปที่ 2.14 Solid State Relay (SSR)

SSR คือรีเลย์ที่ไม่ใช้หน้าสัมผัสที่ ซึ่งใช้เทคโนโลยีของ Semiconductor ทำให้ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เพื่อลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากรีเลย์แบบหน้าสัมผัส และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างภาคควบคุม (Control) ซึ่งเป็นส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับวงจรภาคไฟฟ้ากำลัง (Power) โดยที่ภาคทั้งสองจะมีระบบกราวด์ (Ground) ที่แยกออกจากกันทำให้สามารถป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit) และการรบกวนซึ่งกันและกันได้

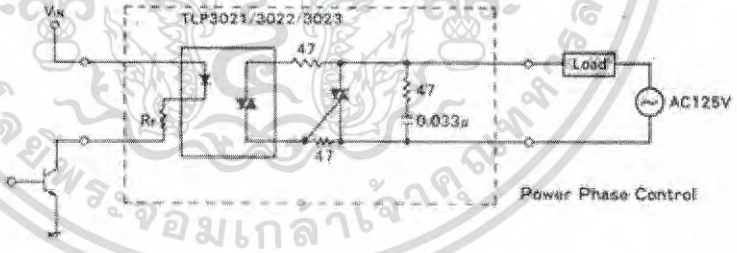
โซลิดสเตตรีเลย์ อาจถือได้ว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้แทนอาร์เมเจอร์รีเลย์ (Armature Relay) แต่มีข้อดีกว่าคือ มีขนาดเล็กกว่า มีความไวในการทำงานที่สูงกว่า มีอายุการทำงานนานกว่า เป็นต้น



รูปที่ 2.15 วงจรการต่อใช้งานแบบพื้นฐานของอาร์มาเจอร์รีเลย์ และ โซลิดสเตตรีเลย์

2.7.1 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของโซลิคสเตตรีเลย์

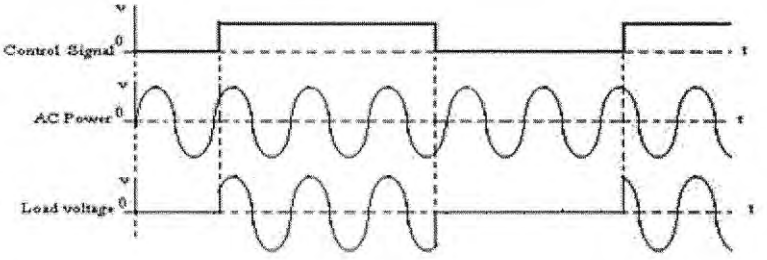
- แบบ Non Zero Crossing Type



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของโซลิคสเตตรีเลย์
แบบ Non Zero Crossing Type

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่า โซลิคสเตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Photo Couple , Main Triac , Snuber circuit การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จาก กราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรตามรูปที่ 3 ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะปรากฏทันที ที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจรโซลิคสเตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type

2. แบบ Zero Crossing Type

Recommended R_S Value

Type	Recommended R_S (Power Rating(W))		
	※V_{IN}=5V	※V_{IN}=12V	※V_{IN}=32V
TLP3021 TLP3041	120Ω (1/2)	390Ω (1/2)	1.2KΩ (2)
TLP3022 TLP3042	180Ω (1/4)	560Ω (1/2)	1.8KΩ (1)
TLP3023 TLP3043	360Ω (1/8)	1.2KΩ (1/4)	3.6KΩ (1/2)

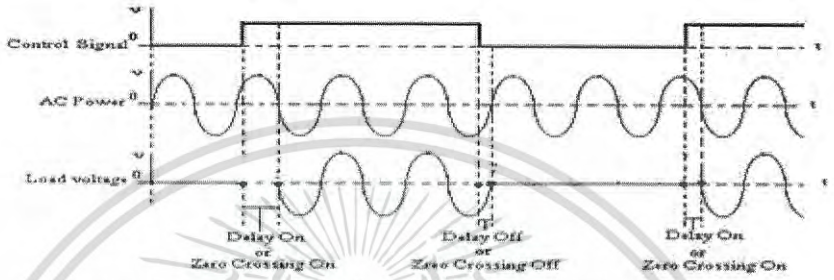
รูปที่ 2.18 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ โซลิคเตตรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าโซลิคสเตตรีเลย์แบบนี้ มีองค์ประกอบ ที่สำคัญคือ Photo Couple ที่เป็นแบบ Zero Crossing Circuit , Main Triac และ Snuber circuit

การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จาก กราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรตามรูปที่ 9 ซึ่งกระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะไม่ปรากฏทันที ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวกแต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรโหลด (ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing On) และเมื่อสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นศูนย์ก็จะไม่ตัดกระแสไฟฟ้าในวงจรโหลดทันทีแต่ต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะตัดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรโหลด (ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing Off)



รูปที่ 2.19 รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจร Solid State Relay แบบ Zero Crossing Type

2.7.2 การเลือกใช้งาน Solid State Relay (SSR) เบื้องต้น

1. Input Signal Voltage เช่น 24VDC/ VAC , 220VAC เป็นต้น
2. Output Signal Voltage
3. Type ชนิดของ Solid State Relay เช่น AC to DC, AC to AC, DC to AC
4. Rate Current เช่น 25A, 50A
5. ขนาด Dimension ของ Solid State Relay (SSR)
6. Accessory เช่น Heat Sink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบการทดลอง

ในปริญญานิพนธ์บทนี้ จะอธิบายถึงวิธีการดำเนินการจัดทำรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล สำหรับการออกแบบสร้างดิจิตอลรีเลย์ในงานทดลองนี้เป็นการออกแบบในลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน 4 แบบ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay)

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

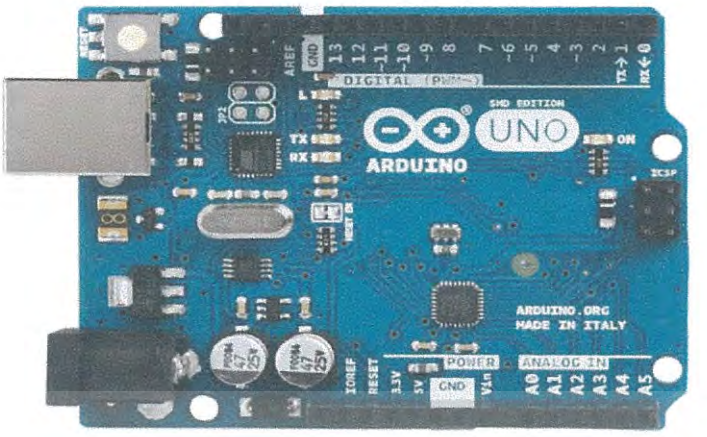
ประกอบไปด้วย Arduino UNO R3, Current Transformer, Solid State Relay, LCD Monitor, Resistor, Capacitor ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดเป็นไปดังต่อไปนี้

3.1.1 ARDUINO UNO REV3 Arduino Platform ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

ส่วนแรก คือ Hardware บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน หรือที่เรียกกันว่า บอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino เองก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ โดยในแต่ละรุ่น อาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของบอร์ด หรือสเปค เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ, แรงดันไฟที่ใช้, ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น

ส่วนที่สอง คือ Software ในส่วนนี้ก็จะแบ่งเป็น การใช้ ARDUINO IDE เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม MCU มีไวยากรณ์แบบเดียวกับภาษา C/C++ และการใช้งานโปรแกรม ARDUINO UNO R เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัพโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload) โดย Arduino ที่เลือกใช้ในการทดลองคือ Arduino UNO REV3 ซึ่งเป็นส่วนประมวลผลคำสั่งการทำงาน มี IC รุ่น ATmega328P โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE ในการเขียนคำสั่งการทำงานของรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 Arduino UNO R3 ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 Current Transformer

จะทำหน้าที่ในการแปลงขนาดของกระแสทางด้านทุติยภูมิให้มีค่าน้อยลงจากด้านปฐมภูมิตามอัตราส่วนที่กำหนด ในการออกแบบหม้อแปลงกระแสจะต้องทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปสัญญาณเหมือนกับทางด้านปฐมภูมิให้มากกว่าที่สุดเท่าที่จะทำได้ การใช้หม้อแปลงกระแสในการวัดค่ากระแส เพื่อให้เราสามารถออกแบบรีเลย์ให้มีขนาดเล็กลง สะดวกในการใช้งาน เพื่อความปลอดภัยของผู้ที่ใช้งานในระบบป้องกัน โดยหม้อแปลงที่เลือกใช้ในการทดลอง สามารถวัดกระแสได้สูงสุด 100 A โดยมี Ratio อยู่ที่ 100A : 1V

รูปที่ 3.2 Current Transformer ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 Solid State Relay

Solid State Relay คือรีเลย์ที่ไม่ใช้หน้าสัมผัสที่ ซึ่งใช้เทคโนโลยีของ Semiconductor ทำให้ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เพื่อลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากรีเลย์แบบหน้าสัมผัส และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาว Solid State Relay ที่ใช้ในการทดลอง มี Rate Current เท่ากับ 10A มีค่า Input Signal Voltage 24VDC

รูปที่ 3.3 Solid State Relay ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4 LCD Monitor

ทำหน้าที่ แสดงผลค่ากระแสและเวลาจากการทำงานผ่านหน้าจอ 16 ตัวอักษร จำนวน 2 บรรทัด

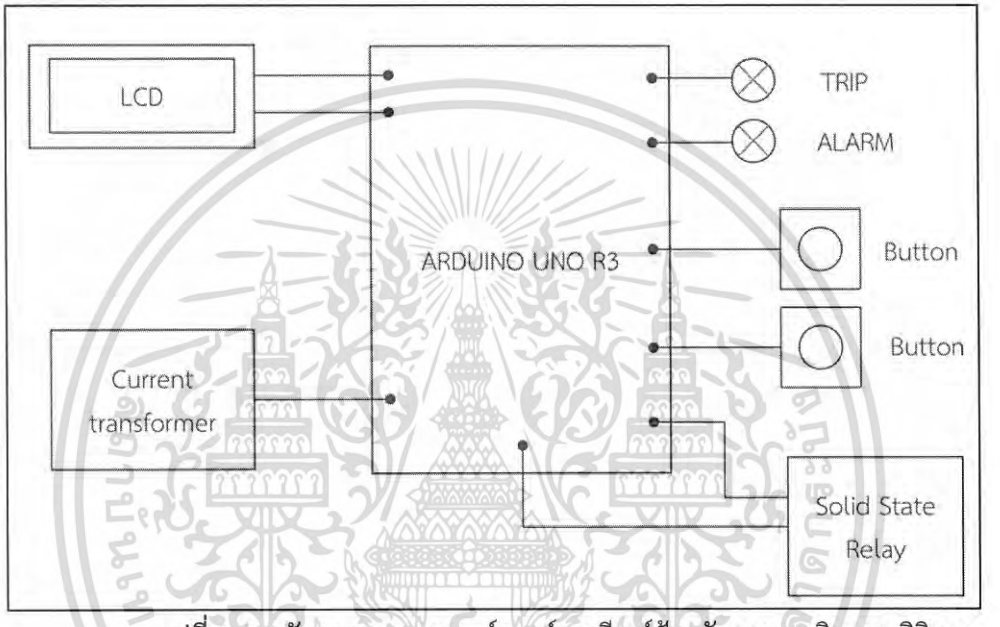
รูปที่ 3.4 LCD Monitor ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลในระดับห้องปฏิบัติการ [8][9]

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงภาพรวมของการต่ออุปกรณ์ต่างๆ ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล บล็อกไดอะแกรมที่แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจร

3.2.1 บล็อคไดอะแกรมของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลในระดับห้องปฏิบัติการ

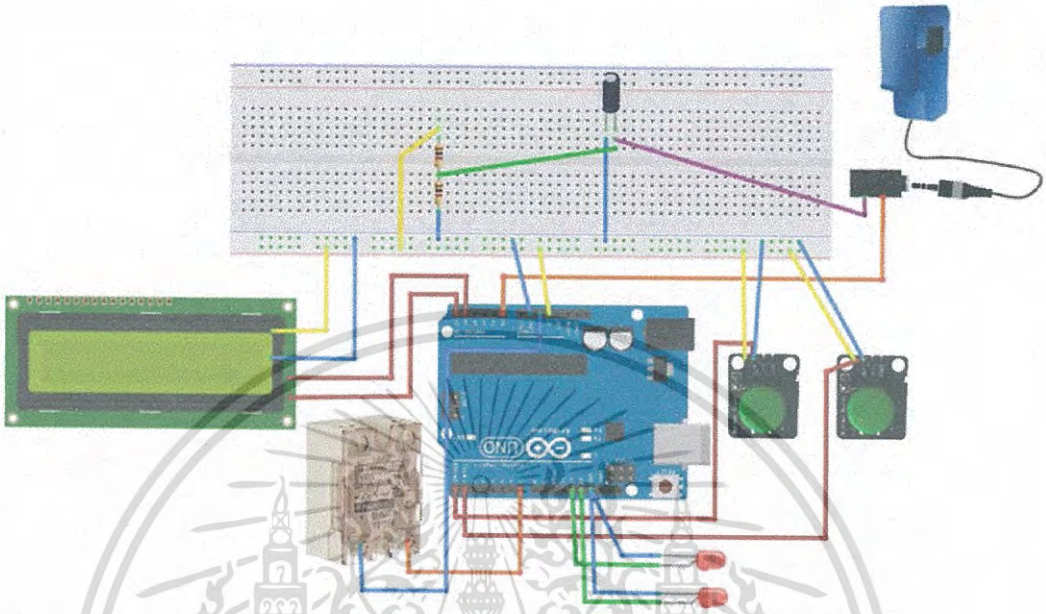


รูปที่ 3.5 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

หลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการออกแบบฮาร์ดแวร์ แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมชุดคำสั่งต่างๆ คือ Arduino UNO R3 มีส่วนรับข้อมูลเป็นปุ่มกด (Button) 2 ปุ่ม สีแดง และสีเขียว โดยสีแดงจะทำหน้าที่ในการเลื่อนเมื่อเลือกค่า และสีเขียวจะทำหน้าที่เป็นปุ่ม ตกลง มีหน้าจอแอลซีดีทำหน้าที่ในการแสดงผลขณะเลือกค่า และขณะวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากโหลด หน้าจอแอลอีดีก็จะแสดงค่ากระแสที่วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (A) และแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสเริ่มต้น โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดกระแสที่แสดงในบล็อคไดอะแกรมข้างต้นคือ หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ซึ่งเป็นหม้อแปลงกระแสแบบคล้องจะวัดกระแสโดยนำไปคล้องที่โหลดตามทิศทางของกระแส โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดวงจรโหลดออกจากระบบ คือ Solid State Relay ซึ่งจะต่ออยู่กับโหลด โดยมีสัญญาณแสดงเมื่อจะตัดวงจรเป็นหลอดแอลอีดีสีฟ้า ที่แสดงถึงการทริป และมีหลอดแอลอีดีสีเหลืองแสดงการ Alarm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

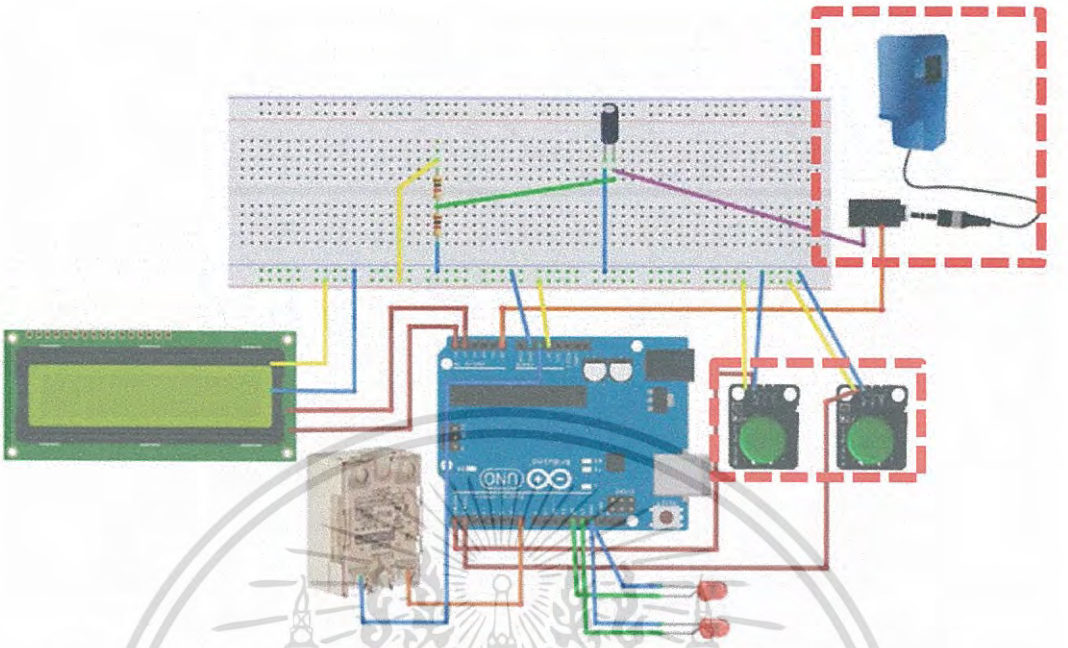
3.2.2 การต่อวงจรของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.6 วงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 3.6 จะสามารถอธิบายหน้าที่และลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนที่ทำหน้าที่รับข้อมูลของวงจร
รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ

ส่วนที่หนึ่ง ส่วนที่ทำหน้าที่รับข้อมูล จะมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับข้อมูลคือ หม้อแปลงกระแส และ ปุ่มกด โดยที่หม้อแปลงกระแสจะทำหน้าที่ในการรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในสายไฟไปที่ Arduino และปุ่มกดจะมีหน้าที่ใช้ในการตั้งค่าต่างๆดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.8 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Type

การตั้งค่า Select Type จะมีการตั้งค่าทั้ง 3 แบบ คือ Normal Inverse-Time, Very Inverse-Time และ Extremely Inverse-Time แต่ละชนิดจะใช้สมการในการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายในส่วนของการทำงานของซอฟแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Current

การตั้งค่า Select Current คือ การตั้งค่ากระแสเริ่มต้น (Set Current) ในหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) ซึ่งเป็นกระแสที่ระบบไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะปกติ

รูปที่ 3.10 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Trip

การตั้งค่า Select Trip คือ การตั้งค่าการทริปว่าเราต้องการให้ระบบทริปที่กี่เปอร์เซ็นต์ของกระแสเริ่มต้น เช่น ตั้งค่ากระแสเริ่มต้น 1 A และเลือกให้ทริปที่ 150% ดังนั้นเมื่อกระแสมีค่าเป็น 150% ของกระแสเริ่มต้น หรือมีค่าเท่ากับ 1.5 A ระบบจะสั่งให้เกิดการทริปตามชนิดของรีเลย์ที่เลือก

รูปที่ 3.11 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Alarm

การตั้งค่า Select Alarm คือ การตั้งค่าการเตือนเมื่อกระแสมีค่าเข้าใกล้กระแสที่จะทริปโดยในที่นี้จะตั้งค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสเริ่มต้น เช่นเดียวกับการตั้งค่า Select Trip

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Alarm Time

การตั้งค่า Alarm Time คือ การตั้งค่าระยะเวลาการเตือน ว่าต้องการให้เกิดการแจ้งเตือนนานกี่วินาที

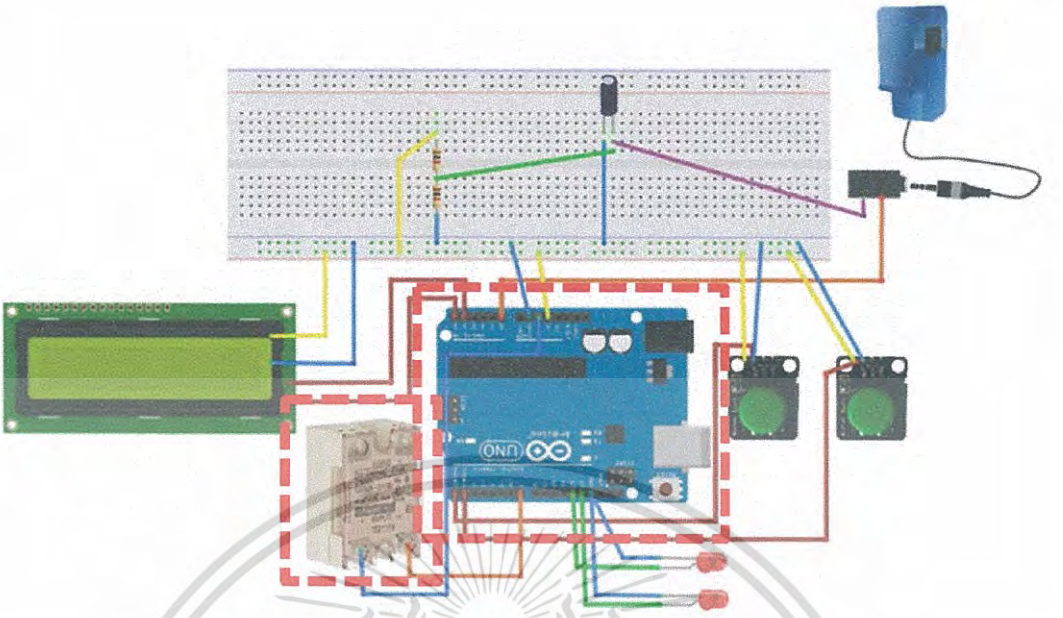
รูปที่ 3.13 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Select Definite

การตั้งค่า Select Definite คือ การตั้งค่าให้รีเลย์สั่งการให้ทริปทันทีเมื่อกระแสที่ไหลผ่านเกินค่าที่กำหนดไว้ โดยจะกำหนดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสเริ่มต้น

รูปที่ 3.14 หน้าจอ LCD แสดงการตั้งค่า Definite Time

การตั้งค่า Definite Time คือ การตั้งเวลาหน่วงก่อนที่รีเลย์จะสั่งให้เกิดการทริปของการทำงานแบบ Definite-Time คือเมื่อกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแสเกินกว่าค่าที่กำหนดตอน Select Definite หากไม่ตั้งค่า Definite-Time รีเลย์ก็จะสั่งการให้ทริปทันที แต่หากตั้งค่า Definite-Time รีเลย์ก็จะหน่วงเวลาก่อนที่จะทริปตามที่กำหนดในหน่วยวินาที

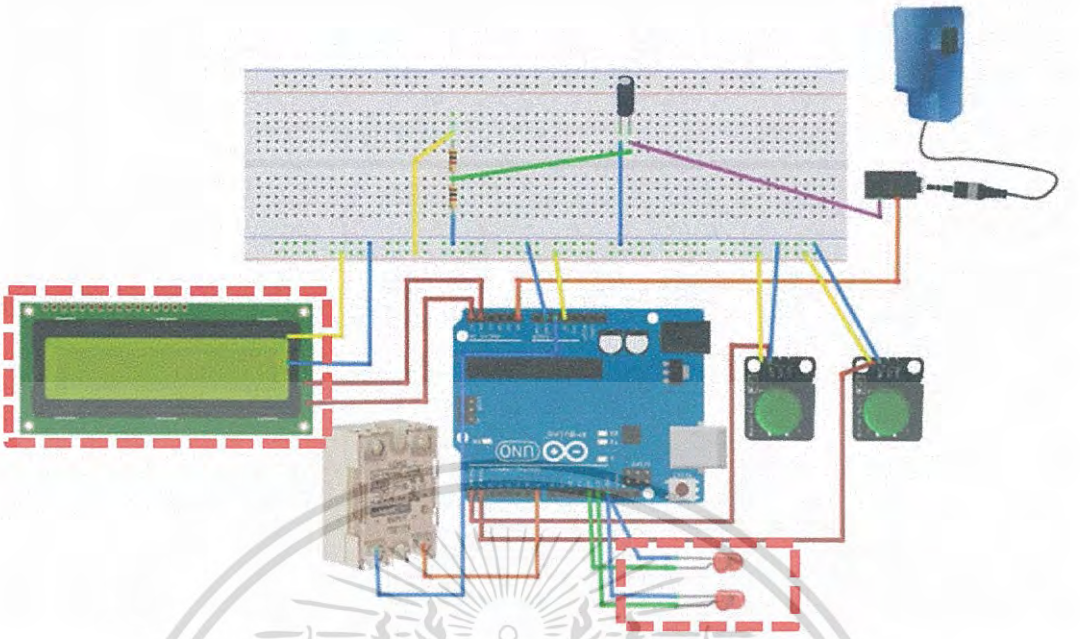
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ส่วนที่ทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งการของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ

ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการประมวลผลและสั่งการ จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ คือ Arduino UNO R3 และ Solid State Relay พิกัดกระแส 10 A โดย Arduino จะมีชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับการประมวลกระแสที่รับมาจากหม้อแปลงกระแส ซึ่งชุดคำสั่งนี้จะอธิบายในส่วนการทำงานของซอฟแวร์ในหัวข้อถัดไป ส่วน SSR หรือ Solid State Relay จะทำหน้าที่ตัดวงจรที่กระแสเกินออกจากระบบเมื่อ Arduino สั่งให้เกิดการทริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



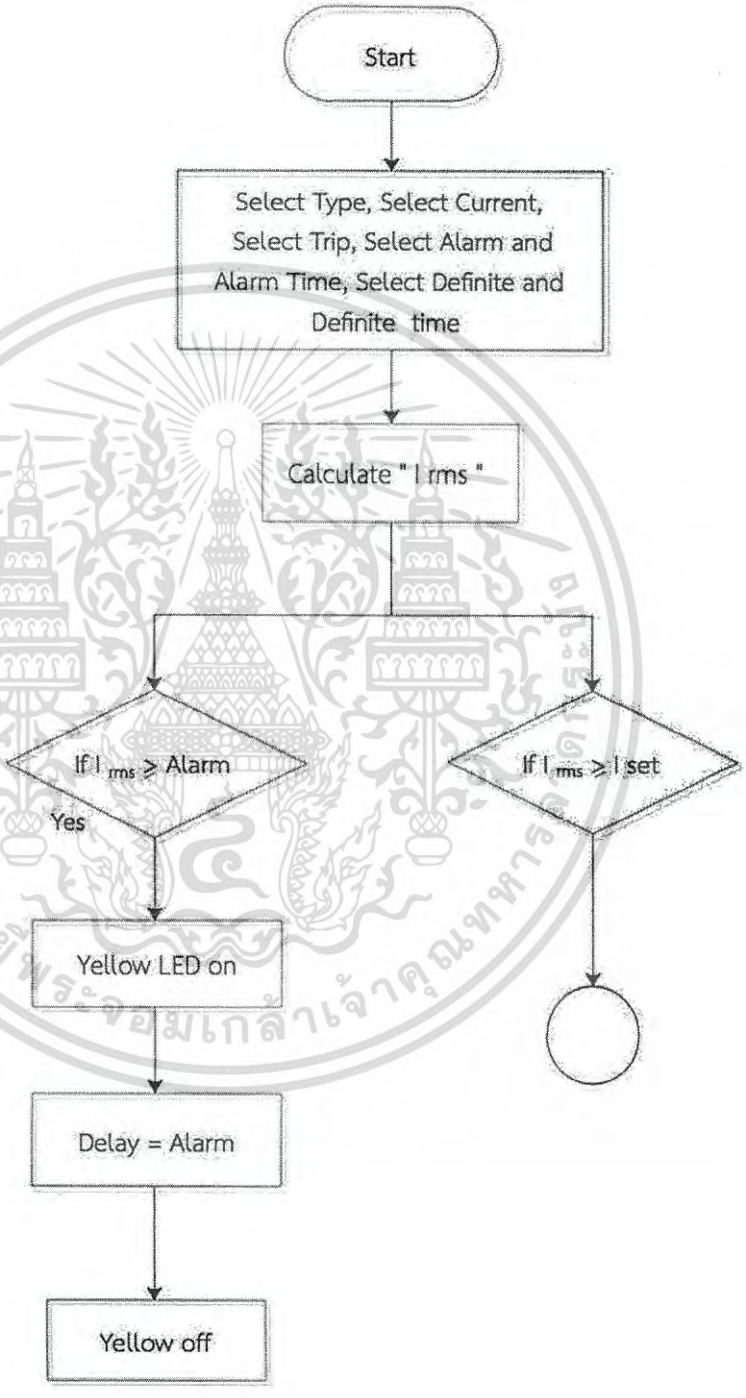
รูปที่ 3.16 ส่วนที่ทำหน้าที่แสดงผลของวงจร
รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ

ส่วนที่สาม คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการแสดงผลข้อมูล จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แสดงผล คือ หน้าจอแอลซีดี และ หลอดแอลอีดี โดย หน้าจอแอลอีดีจะทำหน้าที่แสดงผลค่ากระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแส และใช้ในการตั้งค่าต่างๆ ของรีเลย์ ส่วนหลอดไฟแอลอีดีสองหลอด จะประกอบด้วยหลอดสีเหลืองและสีฟ้า โดยหลอดสีเหลืองจะเป็นหลอดที่ใช้สำหรับการแจ้งเตือน เมื่อกระแสถึงค่าที่ต้องเกิดการ Alarm และจะติดนานตามที่ตั้งค่าในขั้นตอนแรก หลอดสีฟ้าคือหลอดที่จะติดเมื่อระบบเกิดการทริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

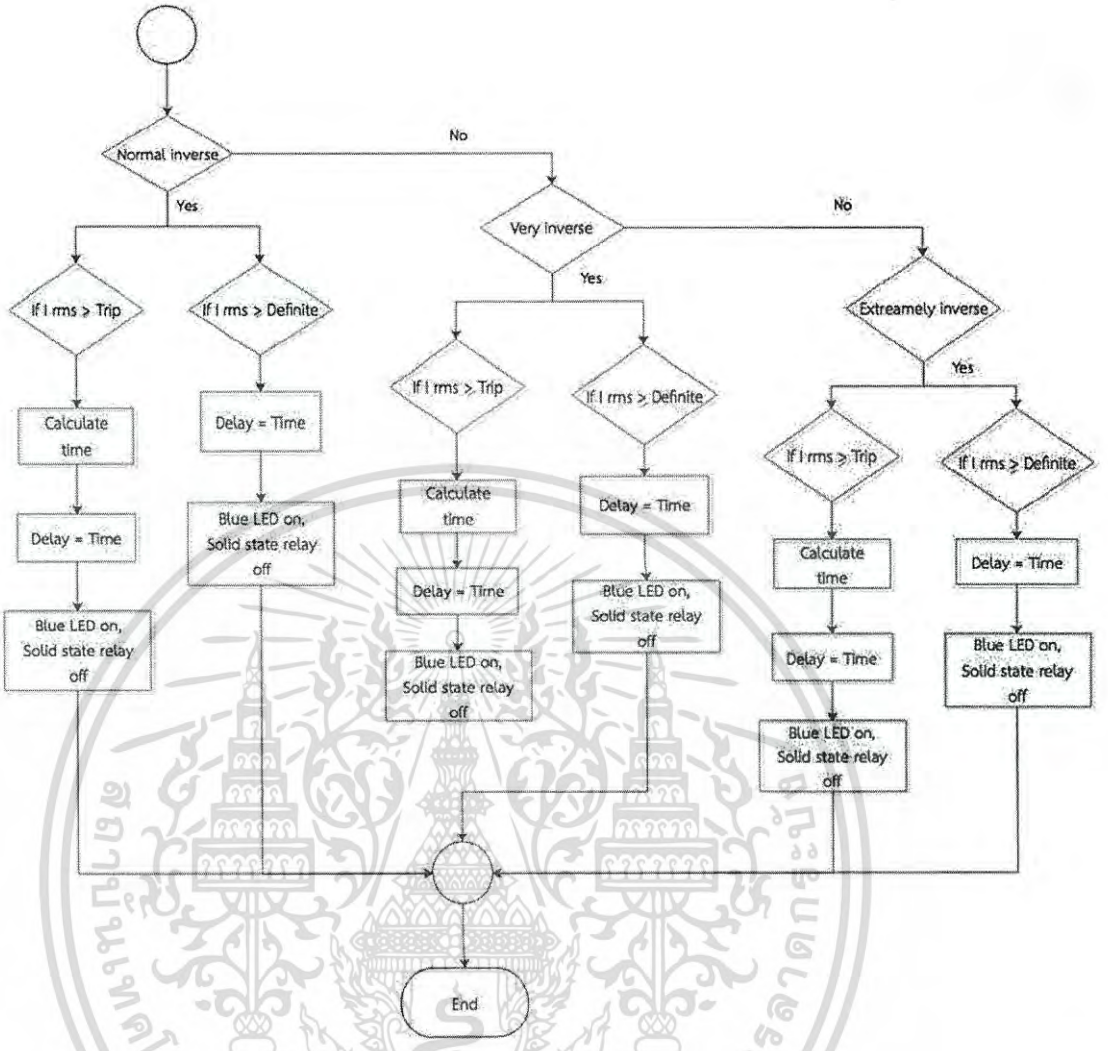
3.3 หลักการออกแบบซอฟต์แวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

3.3.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟแวร์



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบซอฟแวร์ของรีเลย์ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบซอฟแวร์ของรีเลย์ป้องกัน (ต่อ)

3.3.2 อธิบายขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

หลักการออกแบบซอฟแวร์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการออกแบบลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินทั้งหมด 4 แบบ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) โดยแบบแรกจะมีการตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการปลดวงจร ส่วนอีก 3 แบบนั้นจะมีสมการการคำนวณเวลาที่ใช้ในการปลดวงจรแตกต่างกันออกไป ทำให้เวลาที่ใช้เวลาแตกต่างในการปลดวงจรก็จะมีค่าแตกต่างกันนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10- 3.11จะแสดงถึงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งที่ใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรก เริ่มการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าที่ได้ทำการเลือก คือ ชนิดของรีเลย์ ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าเปอร์เซ็นต์และเวลาของกระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน ค่าเปอร์เซ็นต์และเวลาของกระแสที่ต้องการให้เกิดการปลดวงจร แล้วแสดงผลค่า I_{rms} บนหน้าจอ LCD Monitor ขั้นตอนที่สอง คือ การคำนวณ ค่า I_{rms} ของค่ากระแส โดยจะรับมา 10 ค่า แล้วหาค่าเฉลี่ยของกระแส (I_{rms}) ทั้ง 10 ค่า หากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน (alarm) ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะสั่งการแจ้งเตือนไปที่หลอดLED สีเหลืองให้ทำงาน เมื่อค่าหน่วงเวลาเท่ากับค่าเวลาของการแจ้งเตือนหลอดไฟสีเหลืองก็จะดับลง หากมีค่า I_{rms} น้อยกว่ากระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน (alarm) จะทำการเลือกชนิดของรีเลย์ทั้ง 3 ชนิด คือ Normal Inverse Time , Very Inverse Time และ Extremely Inverse Time

ขั้นตอนที่สาม คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเลือกชนิดของรีเลย์ตามที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อเลือกชนิดของรีเลย์ที่ต้องการแล้ว ถ้าค่า I_{rms} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ต้องการให้เกิดการปลดวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการคำนวณค่าของเวลาที่ใช้ในการปลดวงจร (Time to Trip) ตามชนิดของรีเลย์ที่กำหนด เมื่อถึงเวลาที่คำนวณได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งคำสั่งไปยังหลอดไฟสีฟ้าให้ทำงานและสั่งให้รีเลย์จะหยุดทำงาน และเมื่อ I_{rms} มากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่ตั้งไว้ เมื่อคำนวณเวลาการหน่วงแล้วเท่ากับเวลาที่ตั้งไว้ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งคำสั่งไปยังหลอดแอลอีดีสีฟ้าให้ทำงานและสั่งให้รีเลย์จะหยุดทำงาน

ขั้นตอนที่สุดท้าย คือ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณเวลาที่ใช้ในการปลดวงจรเสร็จก็จะแสดงค่าเวลาที่จะปลดวงจร และค่ากระแสที่ปลดวงจรไปที่ LCD Monitor ซึ่ง Timer ก็ยังคงนับเวลาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนเมื่อ Timer นับเวลาไปเท่ากับเวลาที่จะปลดวงจร (Time to Trip) ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะมีคำสั่งให้ปลดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อธิบายการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน

รีเลย์แบบหน่วงเวลาผกผัน แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ Normal Inverse-Time, Very Inverse และExtremely inverse โดยสามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการปลดวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

1. Normal Inverse-Time Overcurrent Relay (IDMT)

$$T = \frac{0.14}{I^{0.22}-1}$$

2. Very Inverse-Time Overcurrent Relay

$$T = \frac{13.5}{(I-1)}$$

3. Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay

$$T = \frac{80}{(I^2-1)}$$

โดยที่ $I = \frac{I_{line}}{I_{set}}$

ภาพรวมหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน คือ เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้ามาที่หม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิ หม้อแปลงกระแสจะลดค่ากระแสลงตาม Ratio ที่เราเลือกใช้ซึ่งก็คือ ค่ากระแสที่ลดลงจะออกมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส ค่ากระแสที่ถูกลดทอนลงมาจากหม้อแปลงกระแสจะ ถูกแปลงเป็นแรงดันเพื่อที่จะรับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่ากระแสเข้ามา จะมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ คือ จะทำการรับค่าชนิดของรีเลย์ ค่าเปอร์เซ็นต์และเวลาของกระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน ค่าเปอร์เซ็นต์และเวลาของกระแสที่ต้องการให้เกิดการปลดวงจร และ ค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งจะรับจากหม้อแปลงกระแส เพื่อนำมาเฉลี่ยหาค่า RMS ของค่าที่รับมา หากคำนวณแล้วค่า RMS ของค่าที่ได้ (Irms) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน (alarm) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งการแจ้งเตือนไปที่หลอดLED ให้ทำงาน หากมีค่า Irms น้อยกว่ากระแสที่ต้องการให้เกิดการแจ้งเตือน (alarm) จะทำการเลือกชนิดของรีเลย์ทั้ง 3 ชนิด คือ Normal Inverse Time , Very Inverse Time และ Extremely Inverse Time เมื่อเลือกชนิดของรีเลย์ที่ต้องการแล้ว ถ้าค่า Irms มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ต้องการให้เกิดการปลดวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำการนับเวลา (Timer) คำนวณเวลาที่ใช้ในการปลดวงจร ดังสมการข้างต้น ตามชนิดของรีเลย์ที่จะเลือกใช้ เมื่อคำนวณเสร็จหน้าจอ LCD แสดงค่าเวลาที่ใช้ในการปลดวงจร และค่ากระแสที่ปลดวงจร เมื่อ Timer นับเวลาไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนถึงเวลาที่ต้องปลดวงจร (Timer = Time to Trip) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งสัญญาณการปลดวงจรไปที่ Relay แล้ว Relay จะทำหน้าที่ปลดวงจรออกจากระบบ หากต้องการกำหนดเวลาในการปลดวงจรให้ป้อนค่าเวลาที่ต้องการ จากนั้นเมื่อ Timer นับเวลาไปถึงค่าที่กำหนดแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งสัญญาณการปลดวงจรไปที่ Relay แล้ว Relayจะทำหน้าที่ปลดวงจรออกจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

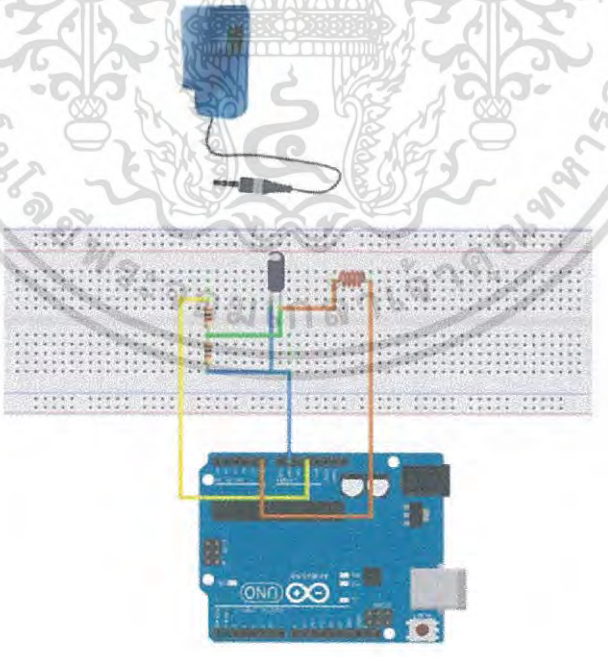
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในปริญญานิพนธ์บทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ตอน ในตอนที่หนึ่งจะเป็นการทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไปจากเครื่องมือวัดมาตรฐานเป็นค่ากี่เปอร์เซ็นต์ แล้วจึงทำการปรับเทียบ ตอนที่สอง จะเป็นการทดสอบความแม่นยำของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ออกแบบโดยมีชนิดการทำงานทั้งหมด 4 ชนิด โดยใช้หม้อแปลงกระแสในการวัดค่า และ ตอนที่สามจะเป็นการทดสอบการ Alarm ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

4.1 การทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส

ในการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของกระแส จะทำโดยการต่อวงจรดังรูป 4.1 ใช้หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ ขนาด 100W จำนวน 18 หลอด โดยเพิ่มจำนวนหลอดขึ้นทีละ 1 หลอด และทำการเก็บค่ากระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแสทั้งหมด 300 ค่า จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ (Power Meter) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแล้วจึงปรับแก้ค่าความผิดพลาดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ มีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

สูตรคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

$$\%Error = \frac{X_{mea}-X_t}{X_t} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ %Error คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

X_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการวัด

X_t คือ ค่าที่ได้จากทฤษฎี

สูตรคำนวณค่าเฉลี่ย

$$Average = \frac{\sum x}{n} \quad (4.2)$$

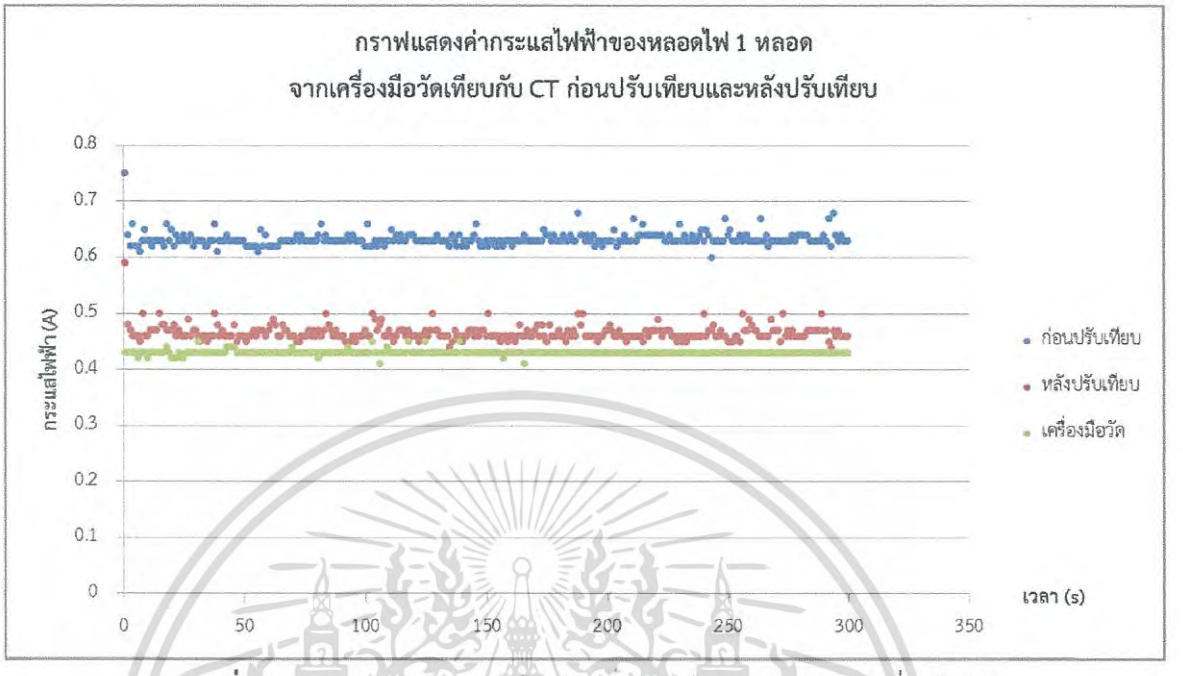
โดยที่ $\sum x$ คือ ผลบวกของข้อมูลทุกค่า

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

จะแสดงค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดและจากหม้อแปลงกระแสทั้งหมด 300 ค่า ในรูปของกราฟดังต่อไปนี้

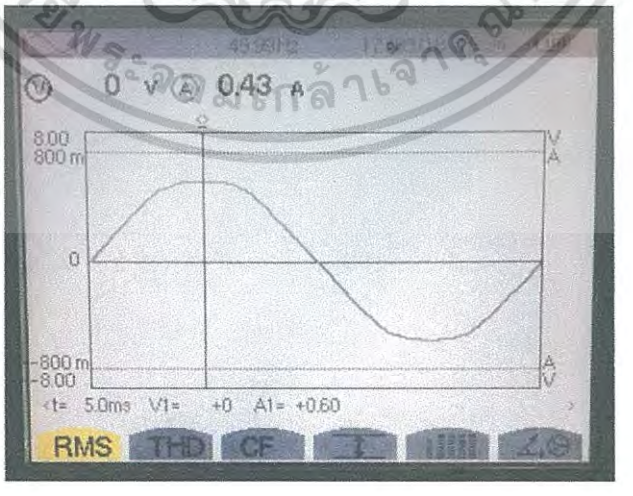
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 1 หลอด



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 1 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

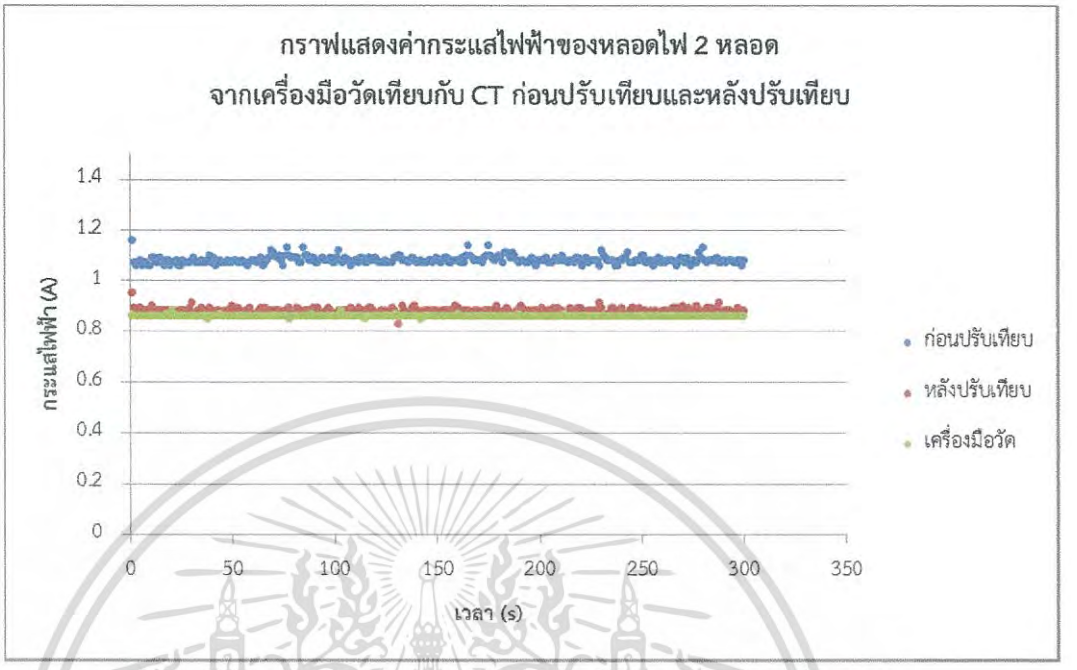
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 0.6330 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเท่ากับ 0.4300 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 0.4656 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 8.2791%



รูปที่ 4.3 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 1 หลอด

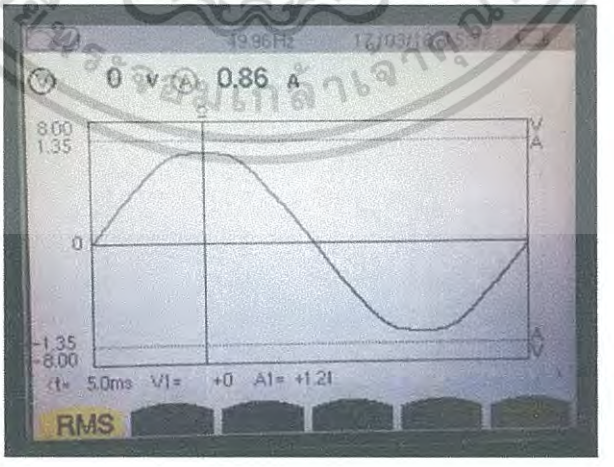
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 2 หลอด



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 2 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

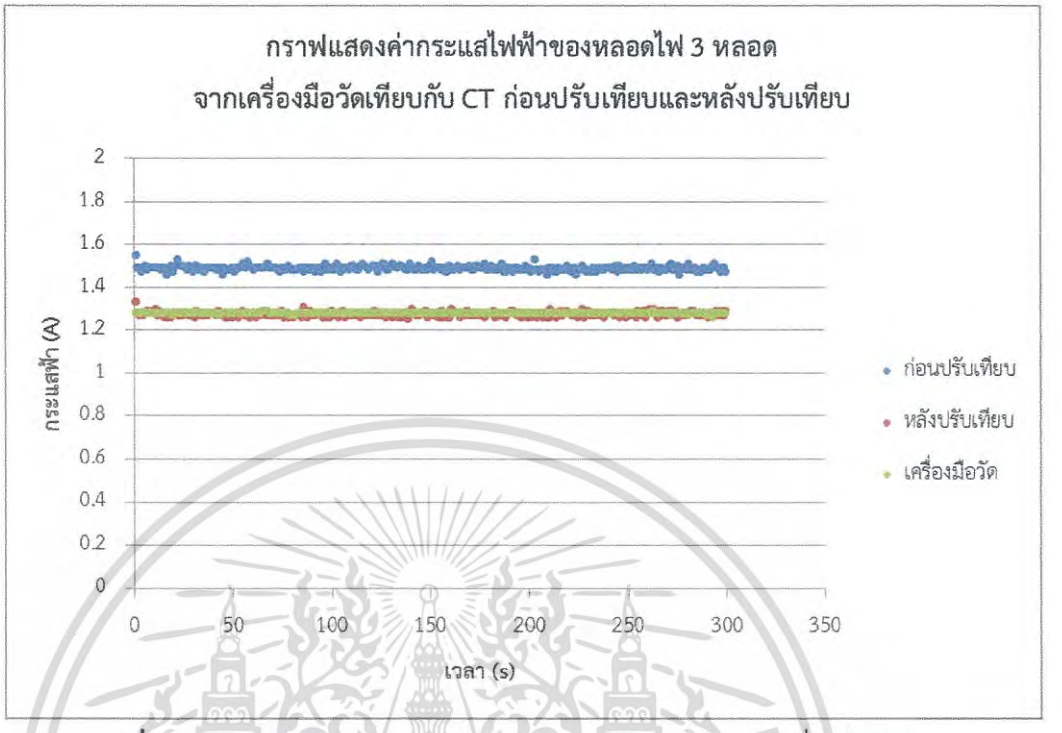
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 1.0807 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 0.8600 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 0.8791 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 2.2209%



รูปที่ 4.5 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 2 หลอด

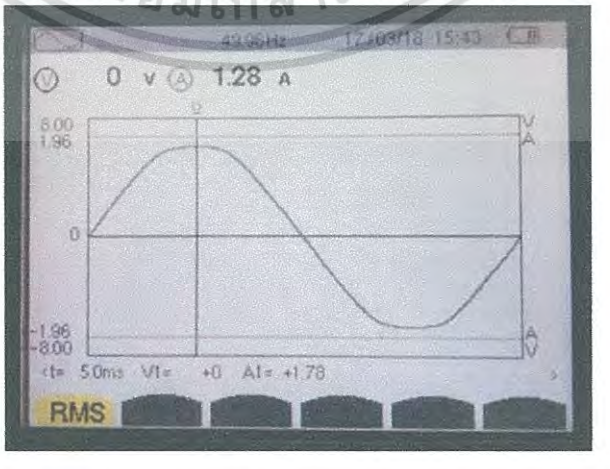
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 3 หลอด



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 3 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

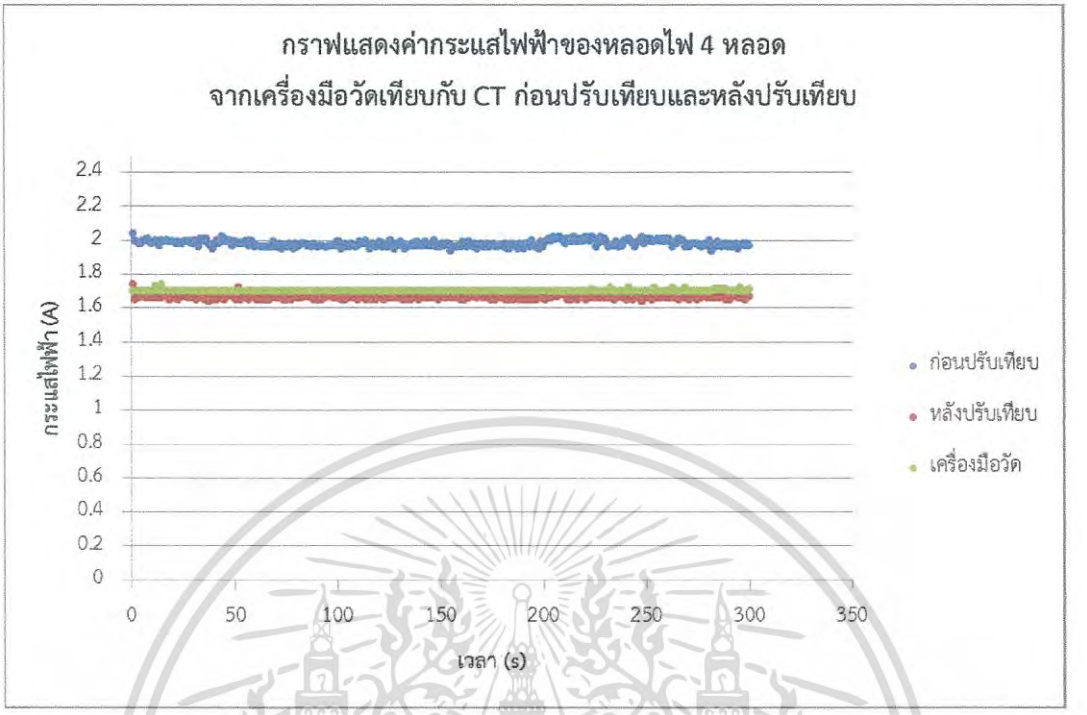
จากกราฟ ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 1.4872 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 1.2800 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 1.2745 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 0.4323%



รูปที่ 4.7 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 3 หลอด

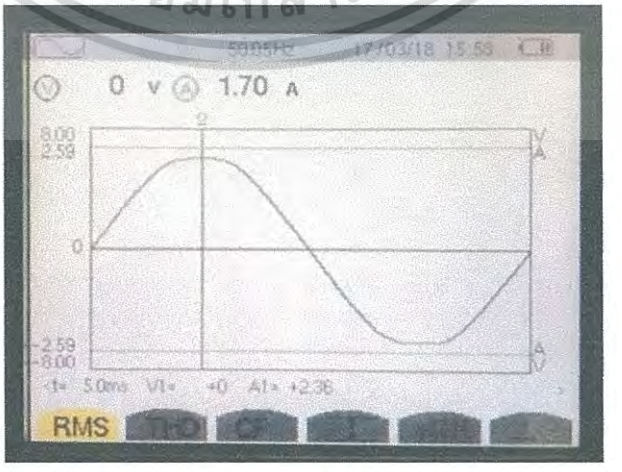
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 4 หลอด



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 4 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

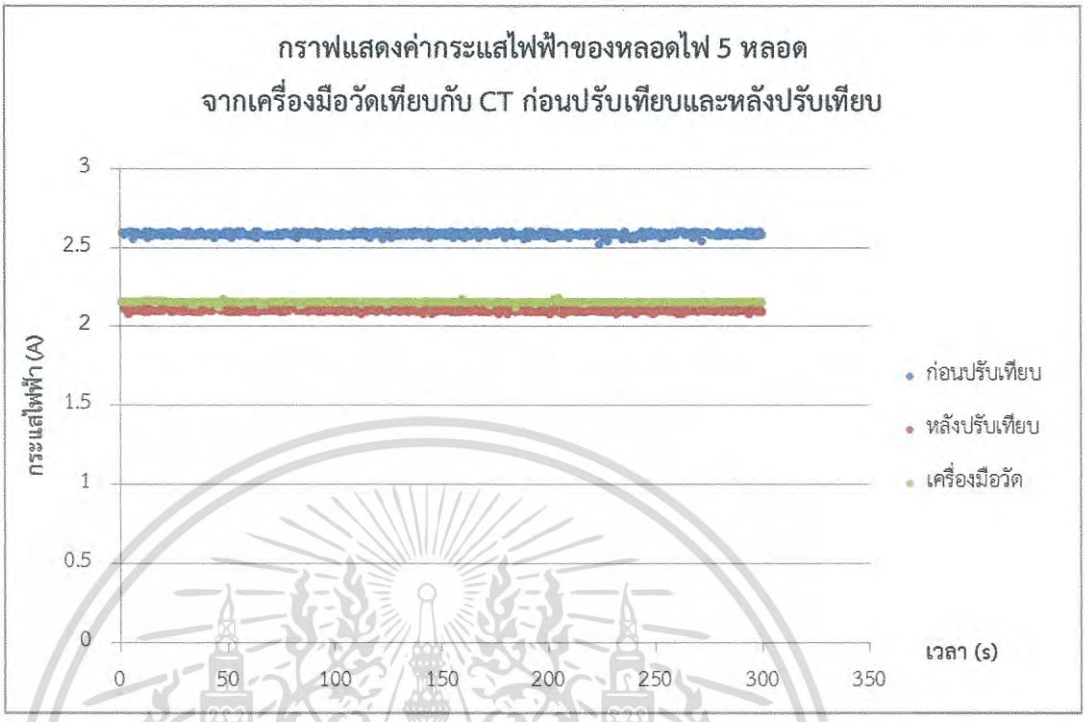
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 1.9802 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 1.7000 A ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 1.6645 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 2.0882%



รูปที่ 4.9 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 4 หลอด

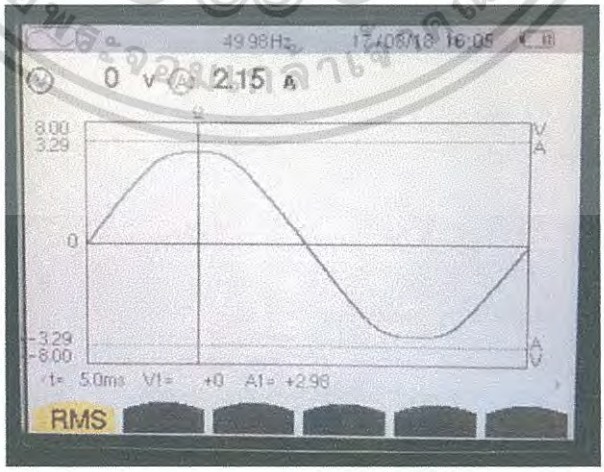
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 5 หลอด



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 5 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

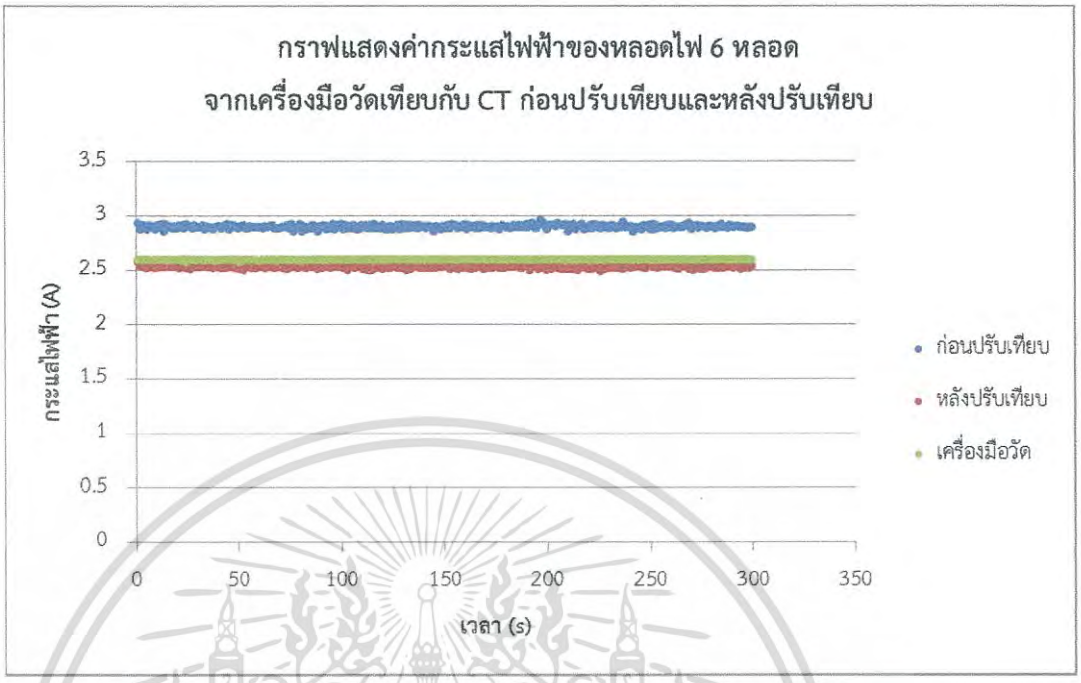
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 2.5809 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 2.1500 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 2.1011 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 2.2728%



รูปที่ 4.11 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 5 หลอด

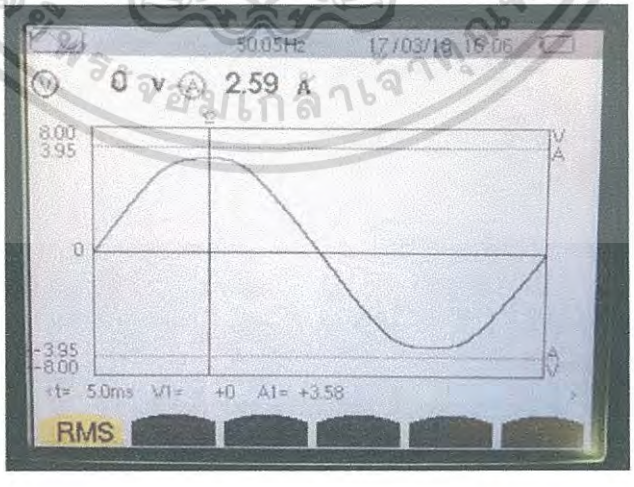
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 6 หลอด



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 6 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

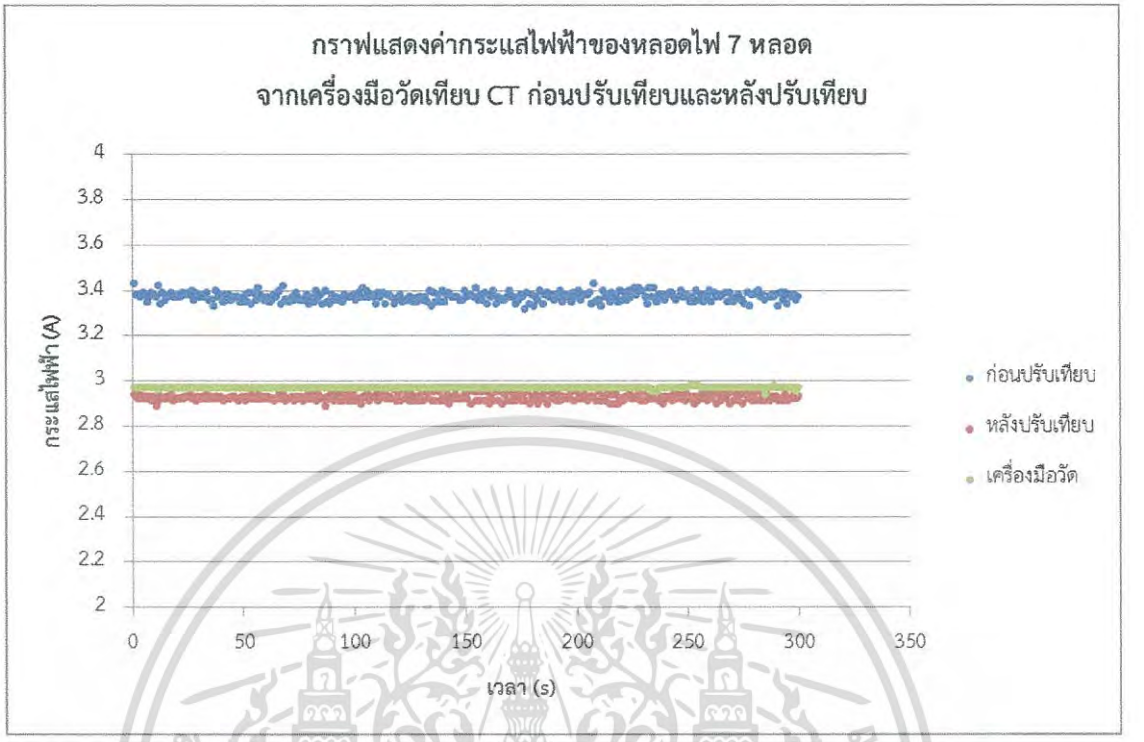
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 2.8946 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 2.5900 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 2.5315 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 2.2599%



รูปที่ 4.13 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 6 หลอด

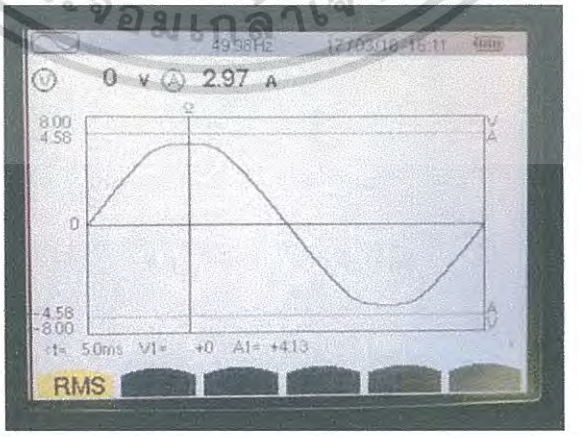
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 7 หลอด



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 7 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

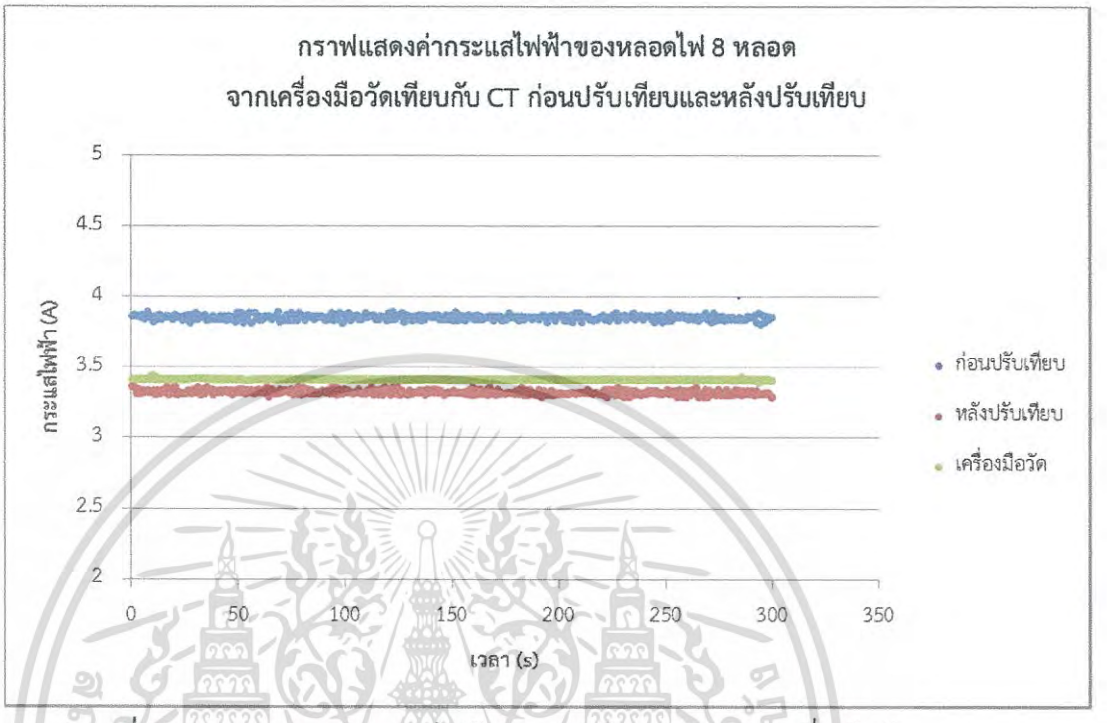
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 3.3718 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 2.9700 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 2.9253 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 1.5039%



รูปที่ 4.15 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 7 หลอด

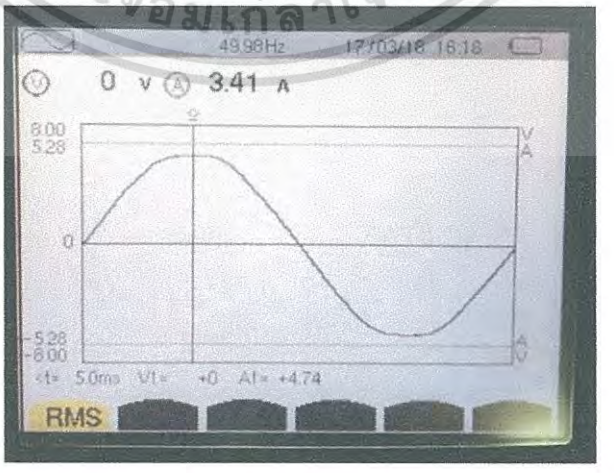
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 8 หลอด



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 8 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

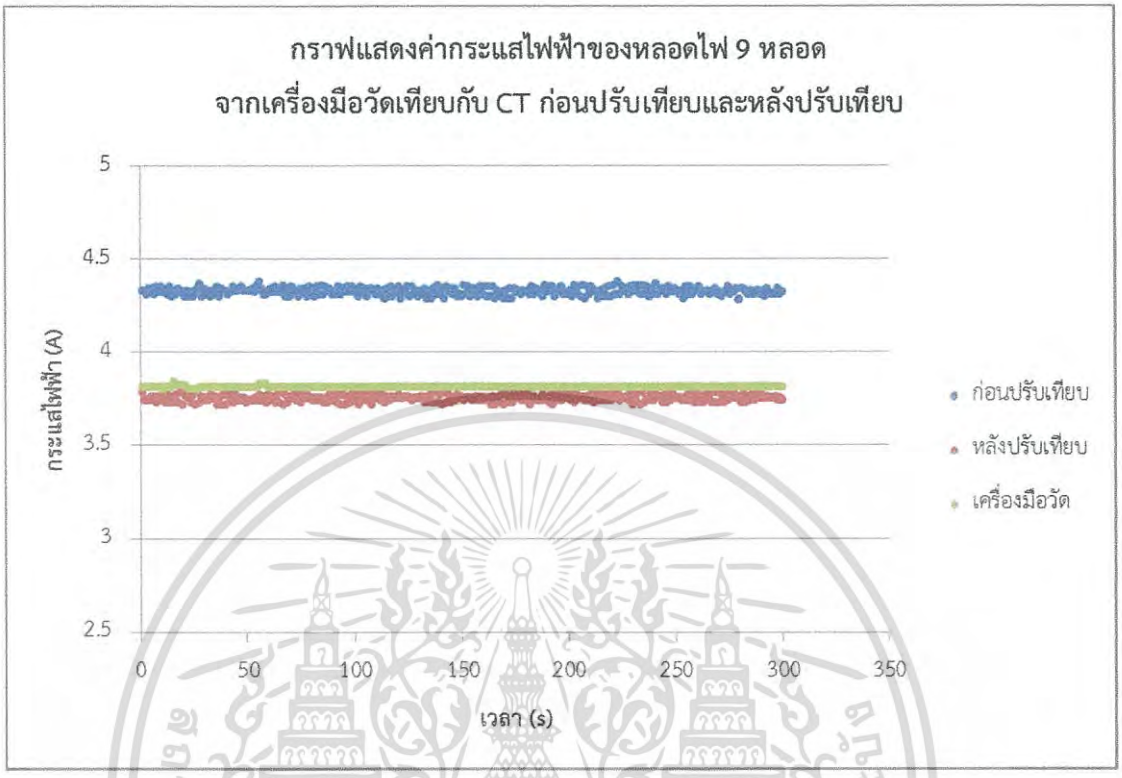
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 3.8515 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 3.4100 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 3.3205 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดเท่ากับ 2.6227%



รูปที่ 4.17 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 8 หลอด

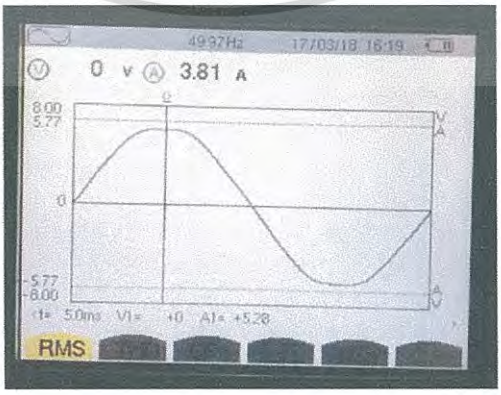
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 9 หลอด



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 9 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

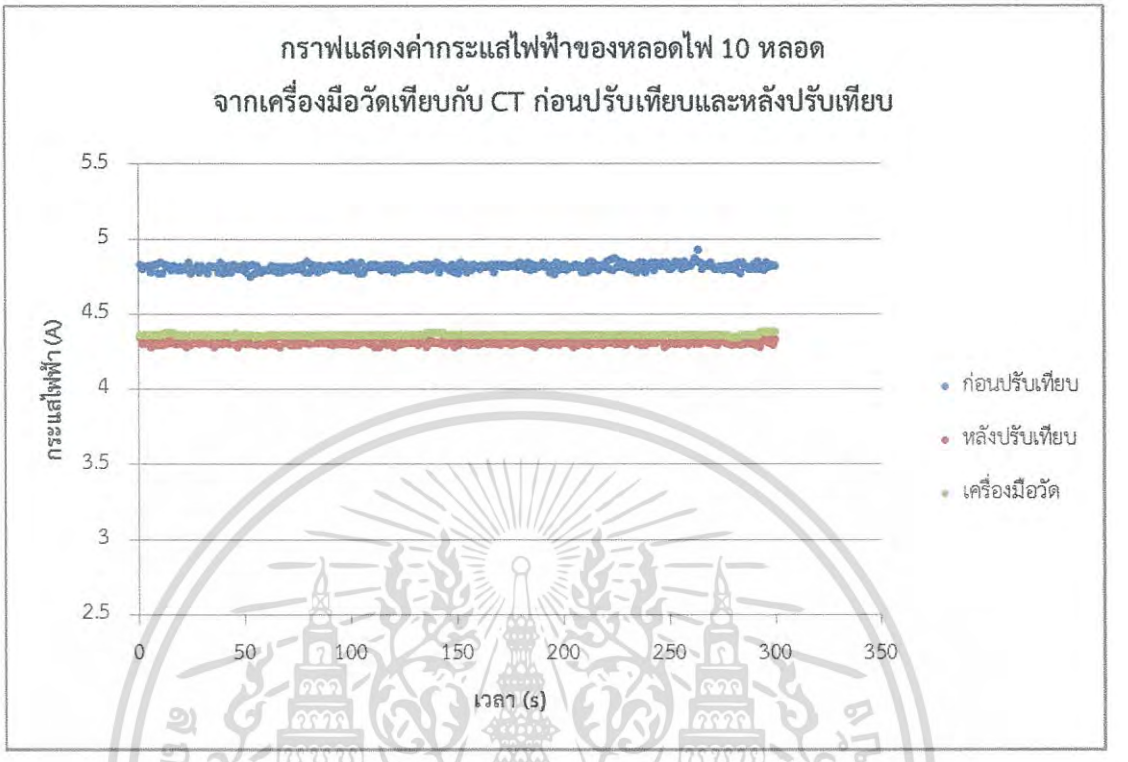
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 4.3257 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเท่ากับ 3.8100 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 3.7513 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดเท่ากับ 1.5416%



รูปที่ 4.19 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 9 หลอด

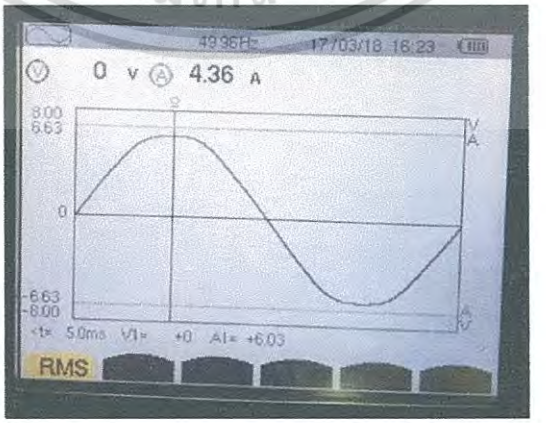
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 10 หลอด



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 10 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

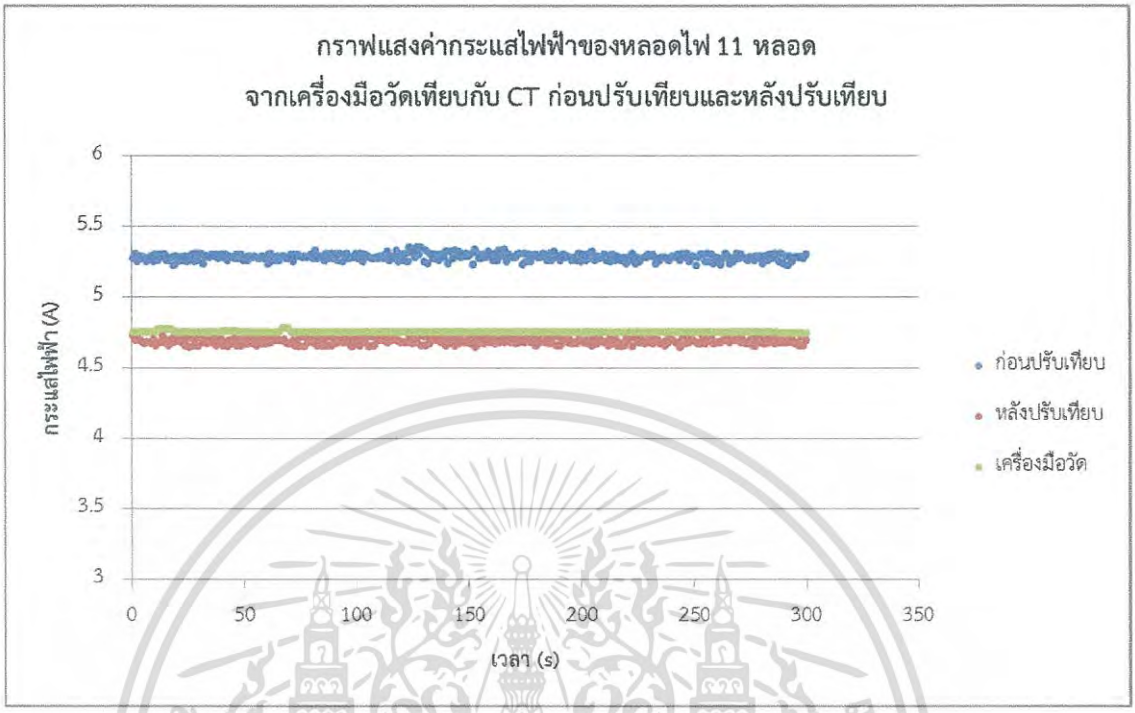
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 4.8117 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 4.3600 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 4.3125 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 1.0887%



รูปที่ 4.21 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 10 หลอด

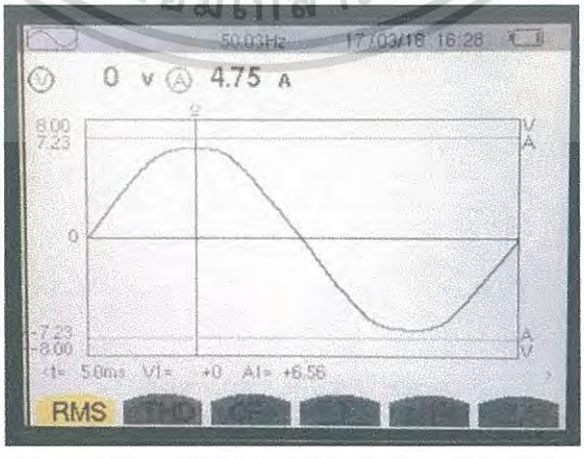
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 11 หลอด



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 11 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

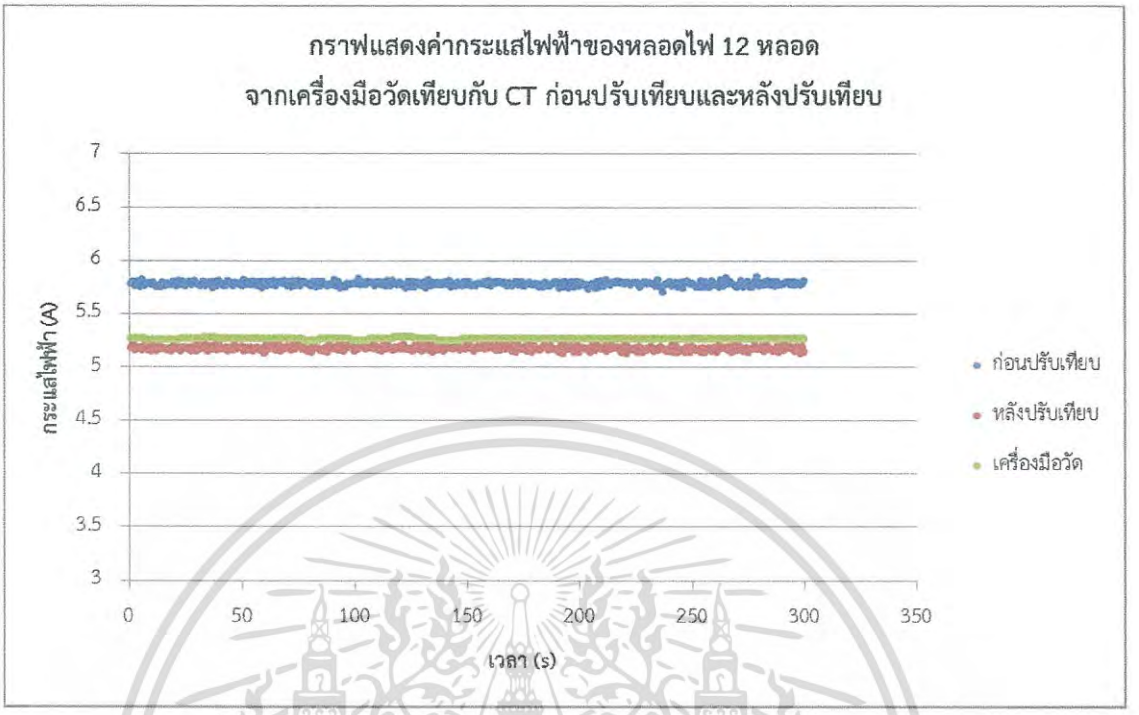
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 5.2814 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 4.7500 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 4.6869 A เมื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 1.3291%



รูปที่ 4.23 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 11 หลอด

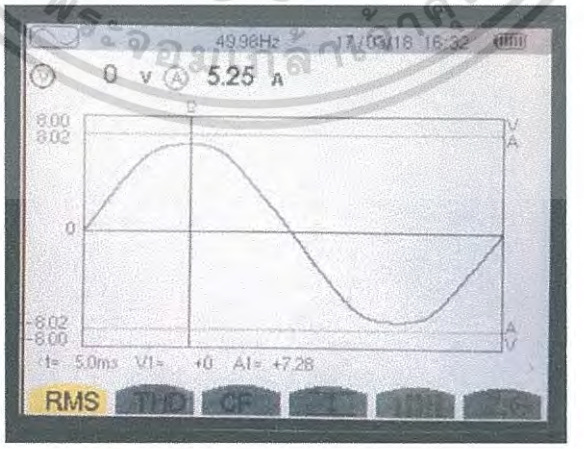
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 12 หลอด



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 12 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

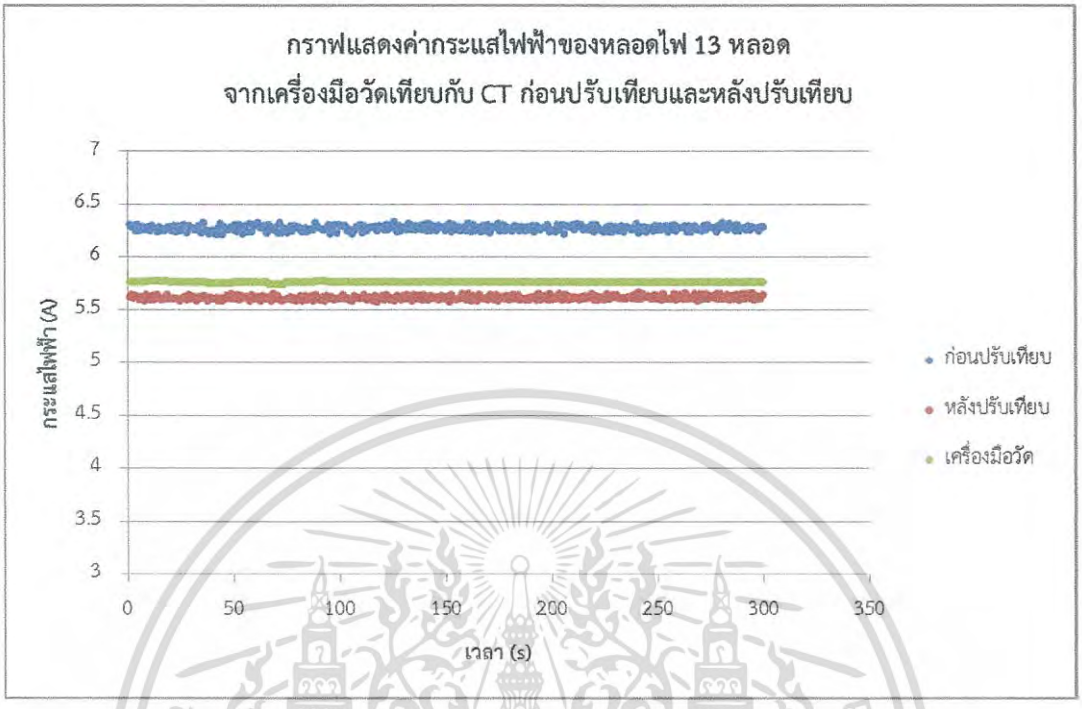
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 5.7790A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 5.2500 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 5.1745 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้เท่ากับ 1.6255%



รูปที่ 4.25 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 12 หลอด

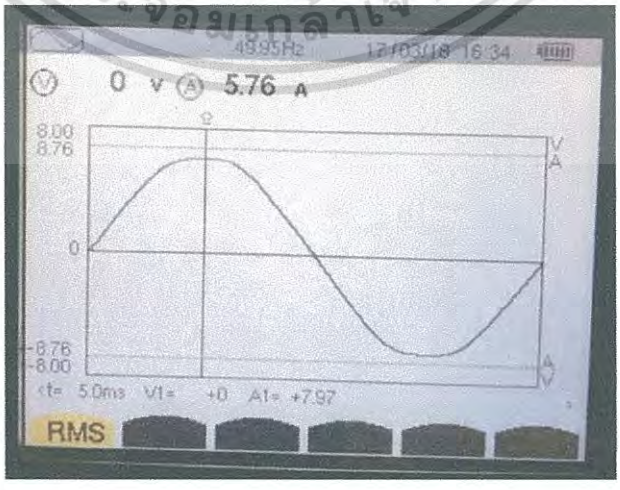
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 13 หลอด



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 13 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

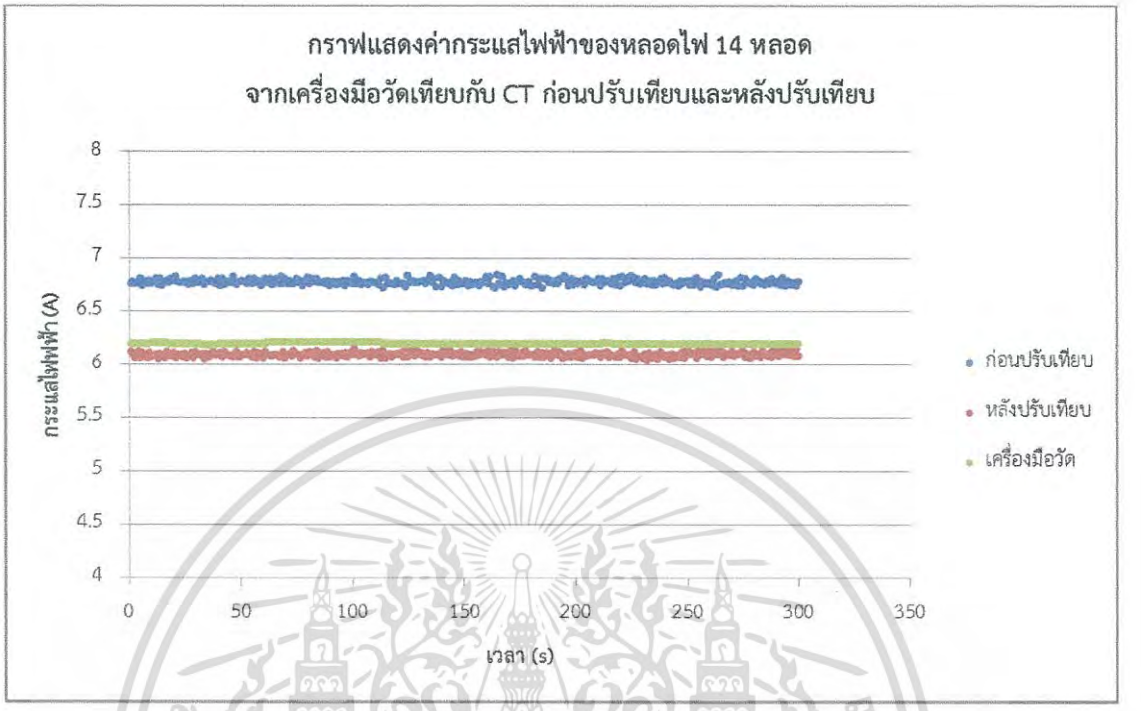
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 6.2670 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 5.7600 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 5.6125 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 2.5596%



รูปที่ 4.27 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 13 หลอด

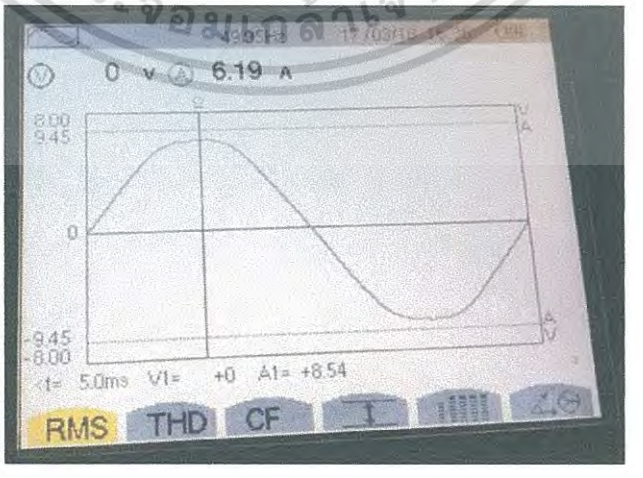
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 14 หลอด



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 14 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

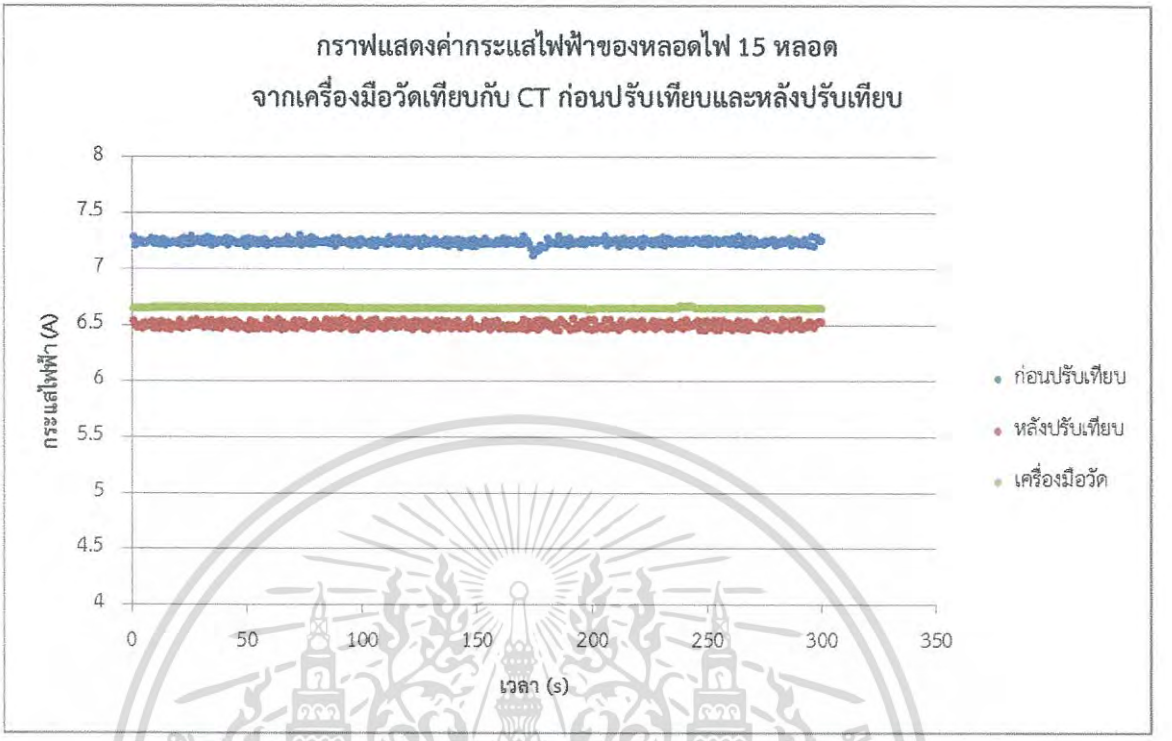
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 6.7749 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 6.1900 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 6.093 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 1.5616%



รูปที่ 4.29 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 14 หลอด

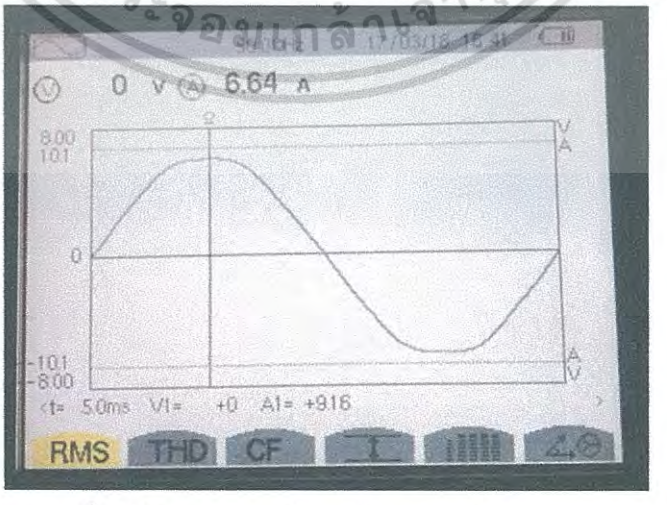
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 15 หลอด



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 15 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

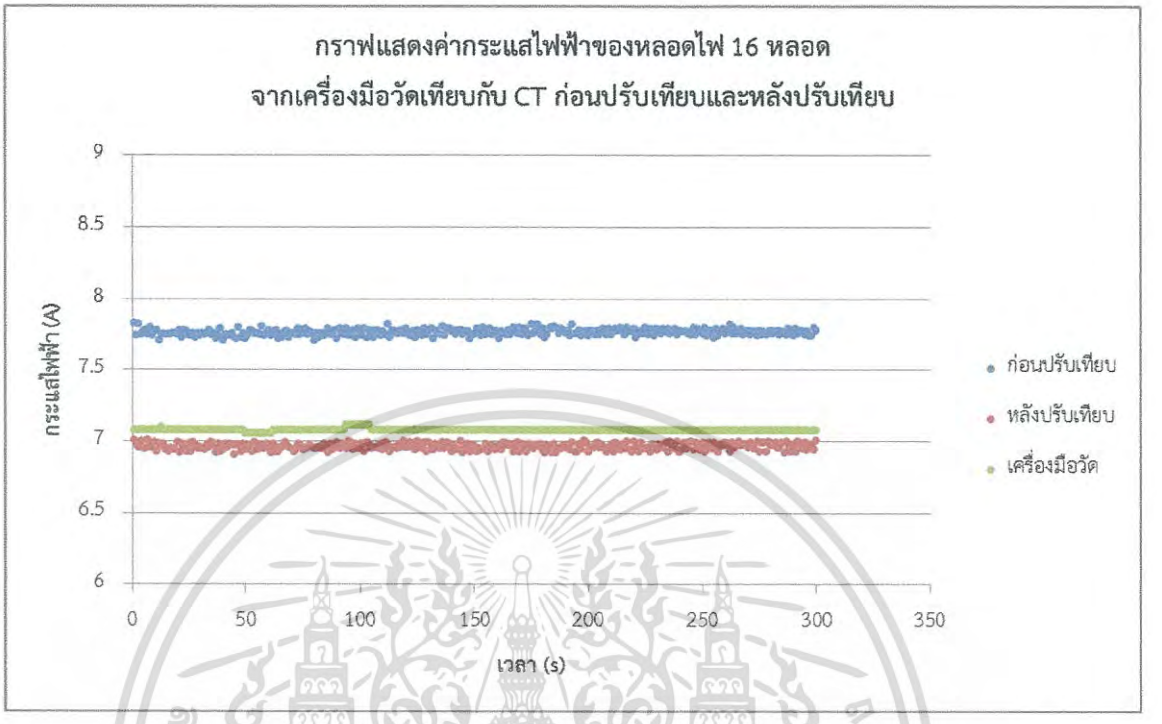
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 7.2401 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 6.6400 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 6.4979 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 2.1390%



รูปที่ 4.31 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 15 หลอด

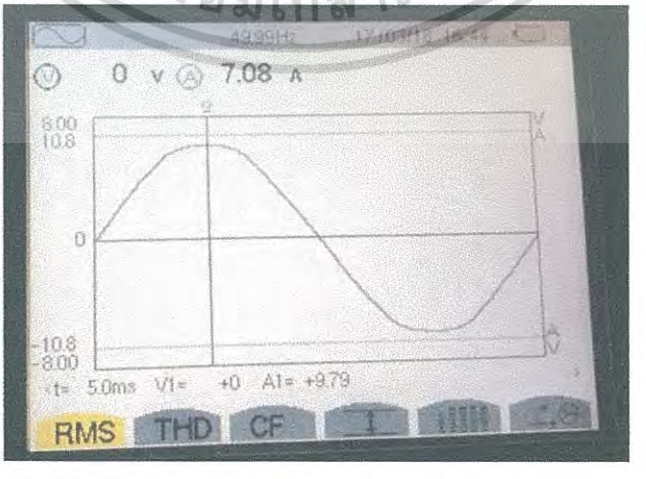
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 16 หลอด



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 16 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

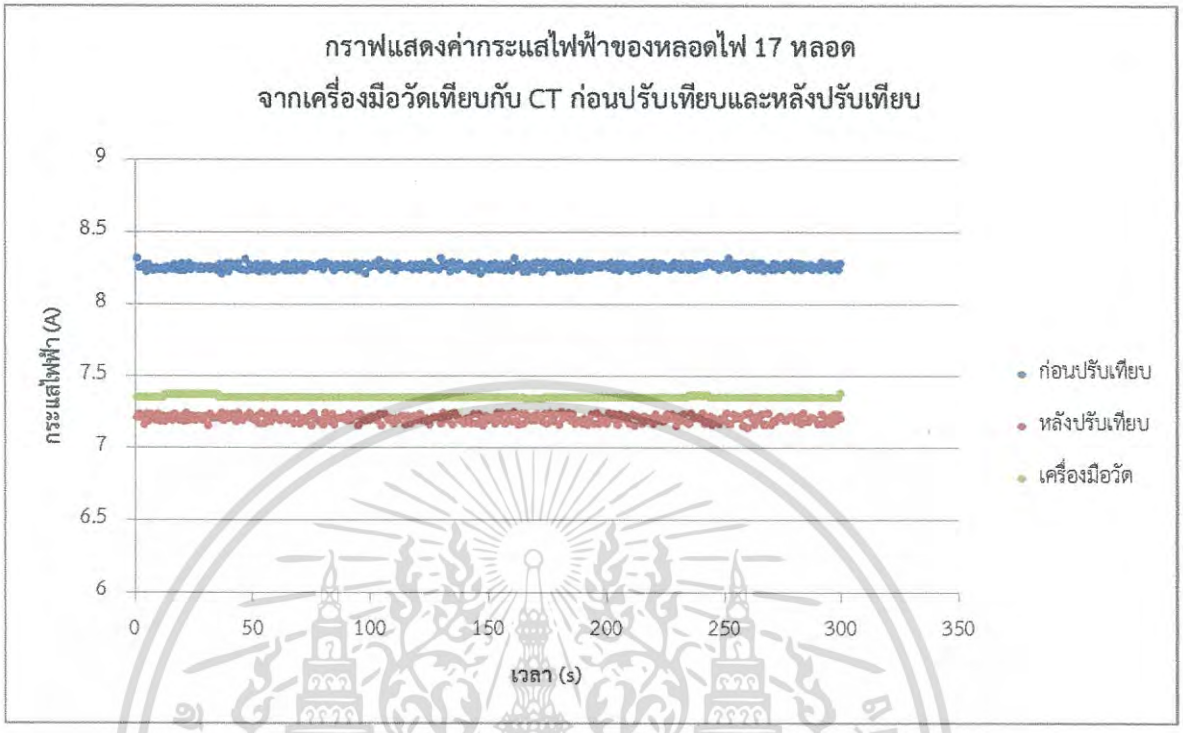
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 7.7646 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 7.0800 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 6.6920 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 1.6662%



รูปที่ 4.33 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 16 หลอด

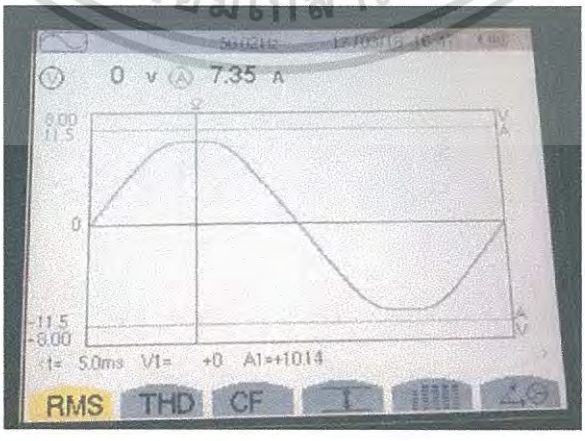
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 17 หลอด



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 17 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

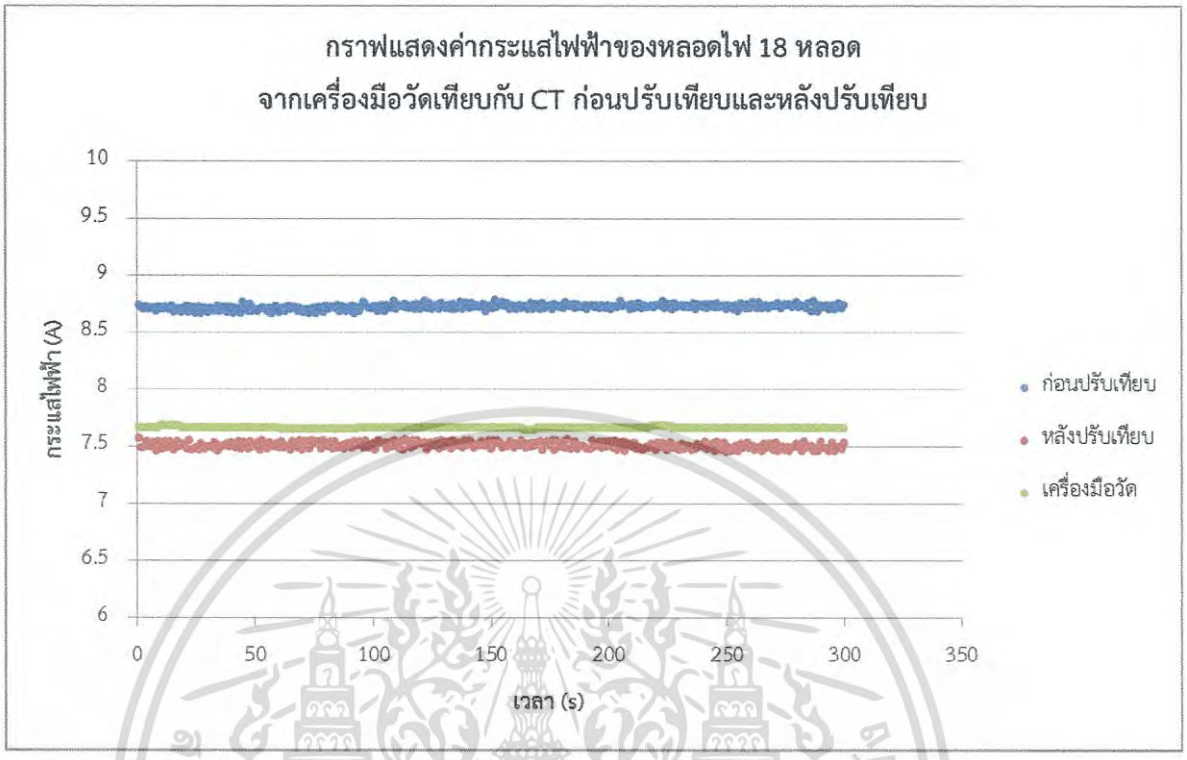
จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 8.2581 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 7.3500 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 7.2005 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 2.0336%



รูปที่ 4.35 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 17 หลอด

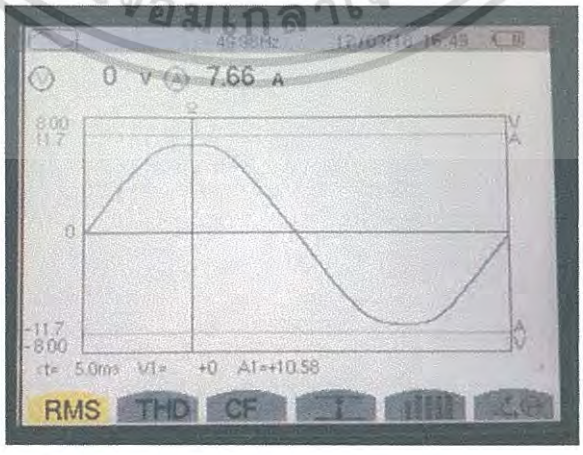
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดไฟ 18 หลอด



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดไฟ 18 หลอดจากเครื่องมือวัดเทียบกับหม้อแปลงกระแส ก่อนปรับเทียบและหลังปรับเทียบ

จากกราฟ มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าก่อนปรับเทียบเท่ากับ 8.7222 A ค่าจริงที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เท่ากับ 7.6600 A และค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าหลังปรับเทียบเท่ากับ 7.5081 A เมื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดจะได้เท่ากับ 1.9826%



รูปที่ 4.37 ค่ากระแสที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ของหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 18 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟทั้งหมด จะสามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

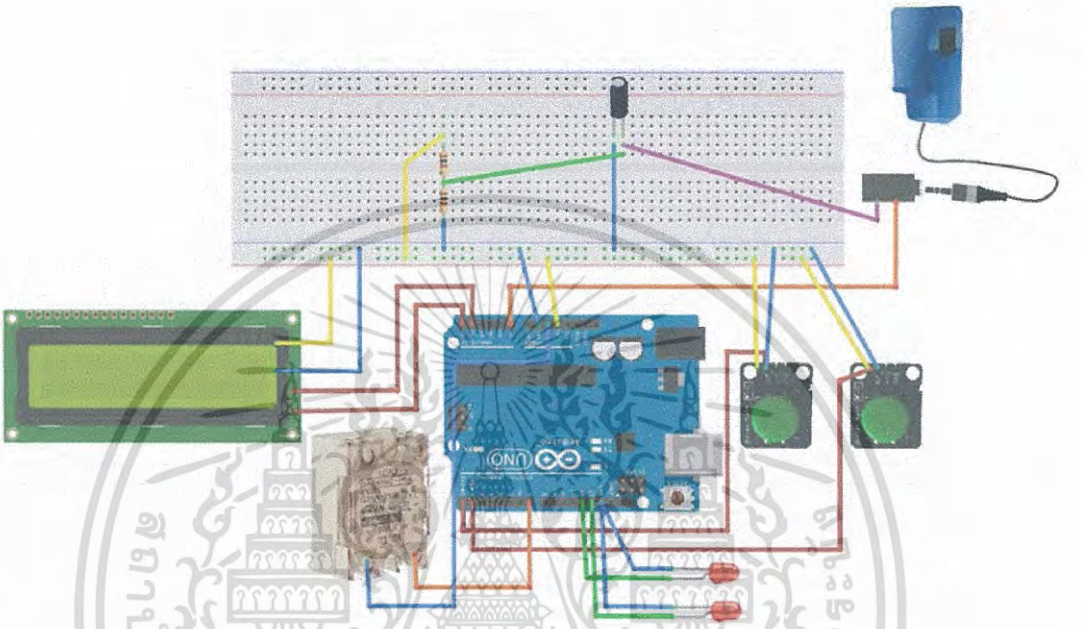
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเพื่อปรับเทียบหม้อแปลงกระแส

หลอดไฟ	ค่ากระแสจากเครื่องมือวัด (A)	ค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส (A)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
		ก่อนปรับ	หลังปรับ	
1	0.43	0.6330	0.4656	8.2791
2	0.86	1.0807	0.8791	2.2209
3	1.28	1.4872	1.2745	0.4323
4	1.70	1.9802	1.6645	2.0882
5	2.15	2.5809	2.1011	2.2728
6	2.59	2.8946	2.5315	2.2599
7	2.97	3.3718	2.9253	1.5039
8	3.41	3.8515	3.3205	2.6227
9	3.81	4.3257	3.7513	1.5416
10	4.36	4.8117	4.3125	1.0887
11	4.75	5.2814	4.6869	1.3291
12	5.25	5.7790	5.1745	1.6255
13	5.76	6.2670	5.6125	2.5596
14	6.19	6.7749	6.093	1.5616
15	6.64	7.2401	6.4979	2.1390
16	7.08	7.7646	6.6920	1.6662
17	7.35	8.2581	7.2005	2.0336
18	7.66	8.7222	7.5081	1.9826

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบความแม่นยำของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

ในการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล จะทำโดยการต่อวงจรดังรูป 4.20



รูปที่ 4.38 วงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

จากรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงวงจรทั้งหมดของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ จะสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่หนึ่ง ส่วนที่จะทำการรับค่า คือ หม้อแปลงกระแสที่จะทำการรับค่ากระแสไฟฟ้าจากหลอดไฟ และปุ่มกดที่จะใช้ในการรับค่ากระแสตามที่เราต้องการตั้งค่า

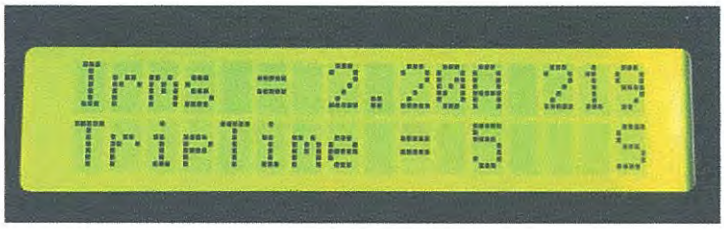
ส่วนที่สอง ส่วนที่ทำการประมวลผล คือ Arduino จะทำการประมวลค่ากระแสที่รับมาจากหม้อแปลงกระแสว่ามีค่าเกินจากที่กำหนดหรือไม่

ส่วนที่สามส่วนที่ทำหน้าที่แสดงผล คือ หน้าจอ LCD จะทำหน้าที่แสดงค่ากระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแส และหลอดไฟ LED ทั้งสองหลอด โดยหลอดที่ 1 จะติดเมื่อค่ากระแสที่ได้รับมีค่าสูงกว่า Alarm Current และหลอดที่ 2 จะติด เมื่อค่ากระแสเกินจากที่กำหนด และปลดวงจร

ในการทดลองนี้ จะทำการทดลองที่พิกัดกระแสสองค่าคือ ที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น และที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน
  (Definite-Time Overcurrent Relay)



รูปที่ 4.39 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น ของ Definite-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 150% จะใช้เวลาในการทริป 5 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 2.17 A

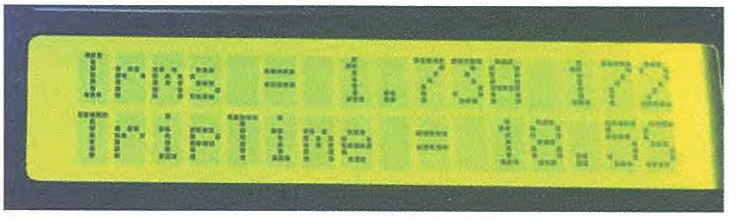
- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันปกติ
  (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay)

รูปที่ 4.40 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น ของ Normal Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 150% จะใช้เวลาในการทริป 13.0 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 1.71 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก
  (Very Inverse-Time Overcurrent Relay)



รูปที่ 4.41 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น ของ Very Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 150% จะใช้เวลาในการทริป 18.5 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 1.73 A

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง
  (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay)

รูปที่ 4.42 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น ของ Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 150% จะใช้เวลาในการทริป 39.4 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 1.74 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้น สามารถแสดงค่าที่วัดได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น

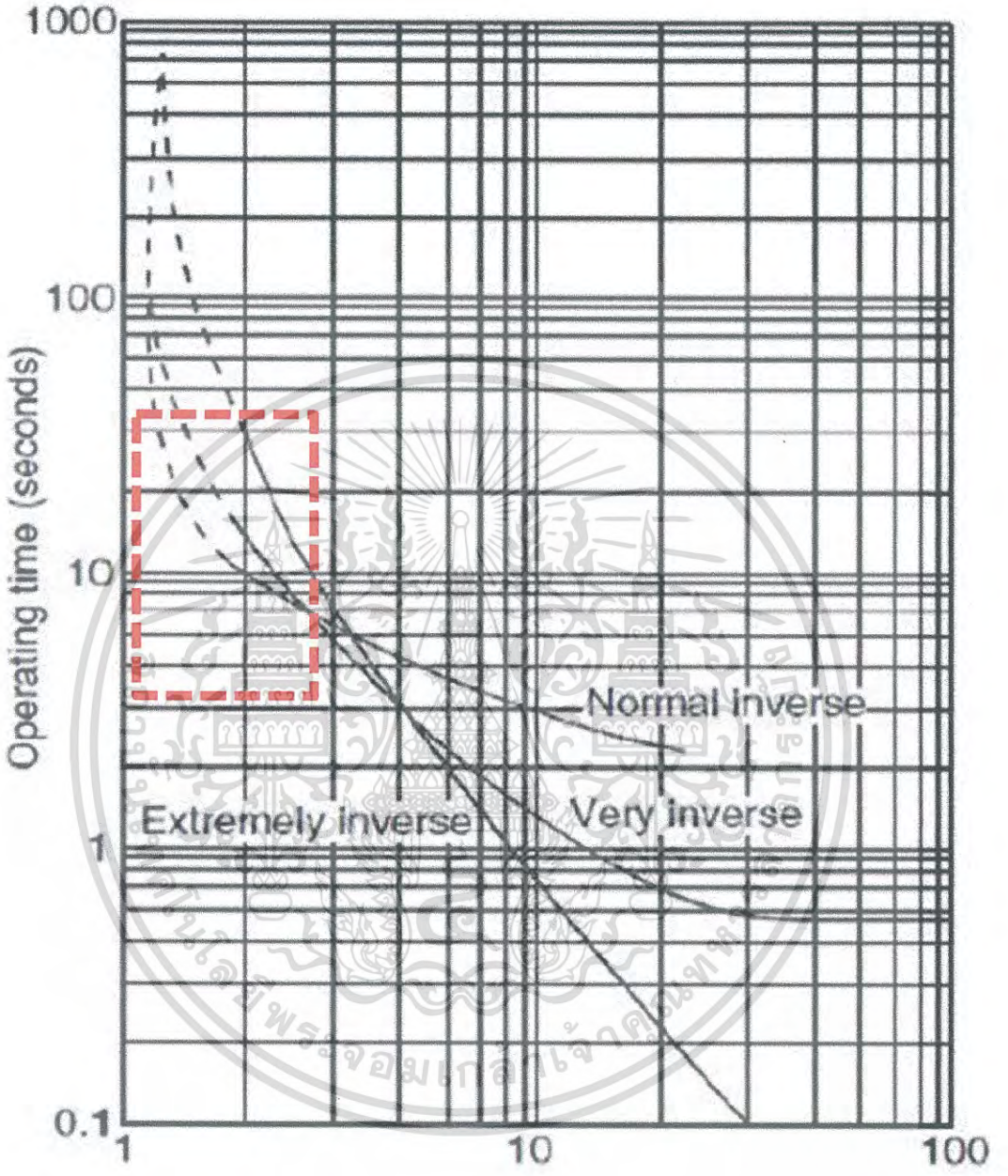
ชนิด	กระแสเริ่มต้น (A)	% Trip	กระแสที่ทริป (A)	เวลา (s)
Definite-Time	1	200	2.17	5
Normal Inverse-Time	1	150	1.71	13.0
Very Inverse-Time	1	150	1.73	18.5
Extremely Inverse-Time	1	150	1.74	39.4

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่ากระแสที่จะทำให้เกิดการทริปที่ใช้ในการทริปในช่วงนี้มีค่าเกินจากกระแสเริ่มต้นไม่มากนัก ในการทดลองส่วนนี้ ใช้ค่ากระแสที่ทริปที่ 1.5 เท่าของค่ากระแสเริ่มต้น หรือคิดเป็น 150% จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันปกติ (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปสั้นที่สุดคือใช้เวลา 13.0 วินาทีและทริปที่ 1.71 A เมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปมากขึ้น คือ 18.5 วินาทีและทริปที่ 1.73 A และเมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปมากที่สุด คือ 39.4 วินาที ที่กระแส 1.74 A ซึ่งเป็นไปตามกราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC ในรูปที่ 4.43

ในช่วงที่ค่ากระแสที่ทริปเกินจากกระแสเริ่มต้นไม่สูงมากนัก คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบผกผันปกติ (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาที่สั้นที่สุด รองลงมาคือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) ตามลำดับ

และหากกำหนดให้ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) คือเมื่อกระแสที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 150% และไม่ได้ทำการตั้งค่าให้มีการหน่วงเวลา รีเลย์จะทริปที่ค่ากระแส 1.5 A ทันที ในการทดลองตั้งค่าให้มีการหน่วงเวลาไป 5 วินาที ระบบจึงทำการทริปที่เวลาหน่วงไป 5 วินาที

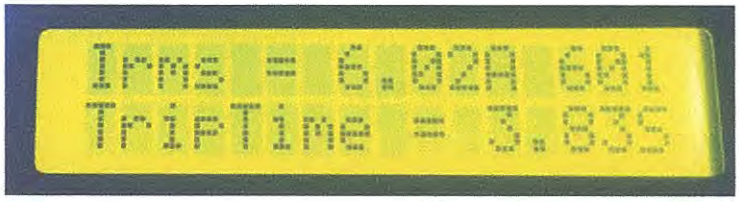
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงช่วงที่หนึ่งที่ใช้ในการทดลองการทำงาน
ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

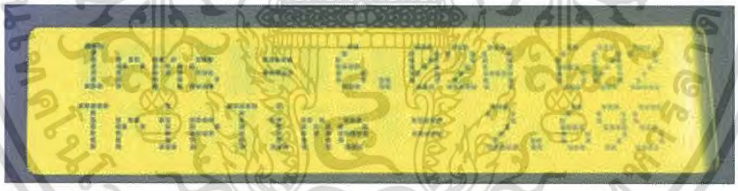
- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันปกติ
  (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay)



รูปที่ 4.44 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น ของ Normal Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 600% จะใช้เวลาในการทริป 3.83 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 6.02 A

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก
  (Very Inverse-Time Overcurrent Relay)

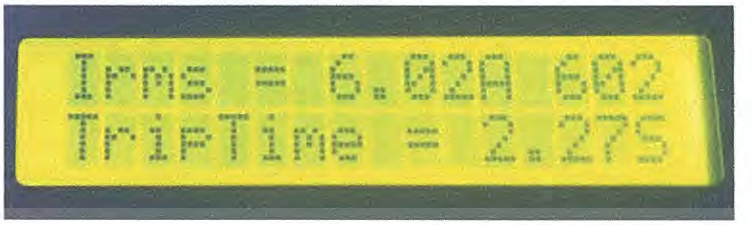


รูปที่ 4.45 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น ของ Very Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 600% จะใช้เวลาในการทริป 2.69 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 6.02 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง
(Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay)



รูปที่ 4.46 หน้าจอ LCD แสดงค่ากระแสและเวลาเมื่อปลดวงจรที่ 600% ของกระแสเริ่มต้นของ Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay

เมื่อทำการตั้งค่าให้กระแสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 A และทริปเมื่อค่ากระแสที่วัดได้ถึง 600% จะใช้เวลาในการทริป 2.27 วินาที และทริปที่ค่ากระแส 6.02 A

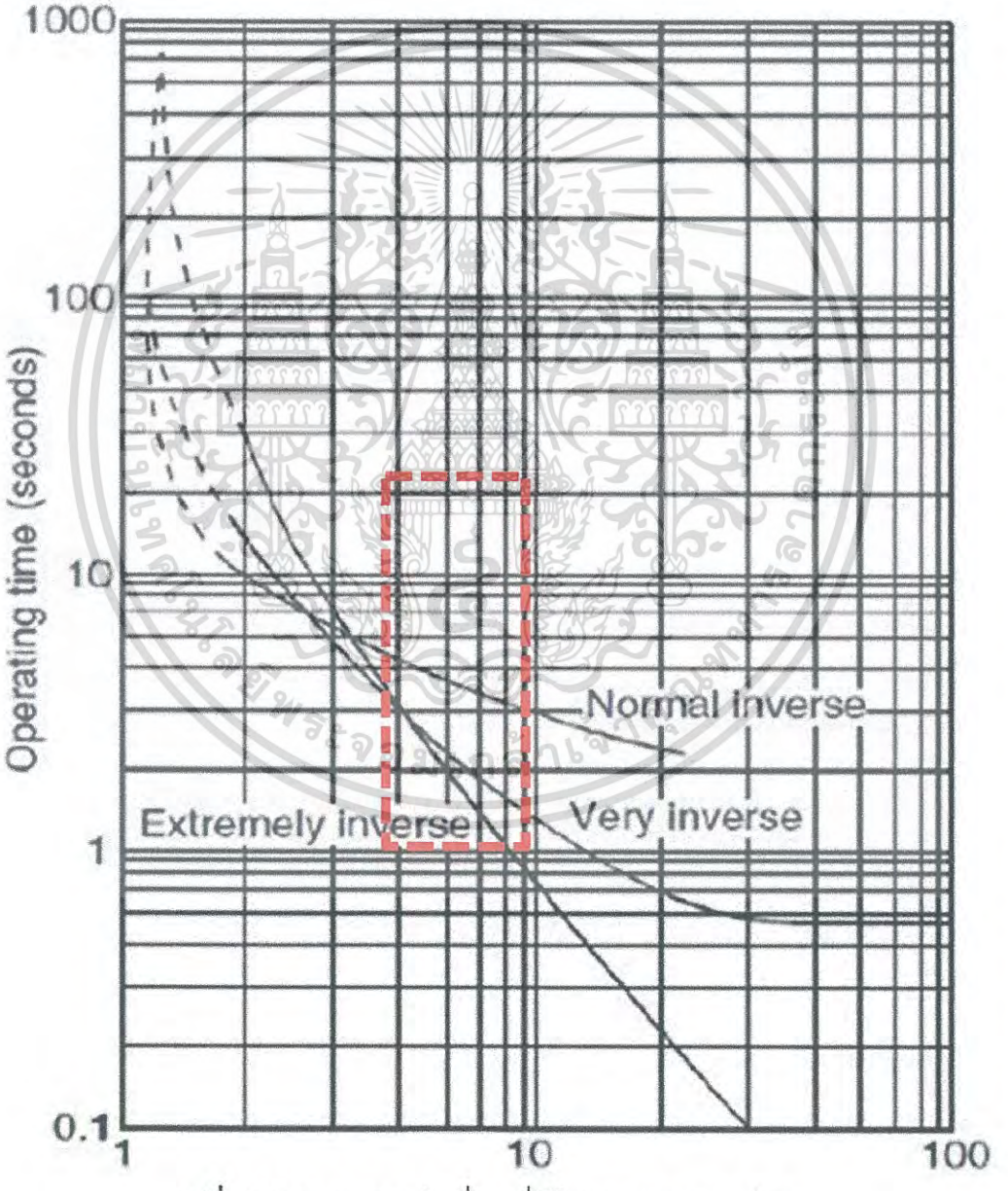
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น

ชนิด	กระแสเริ่มต้น (A)	% Trip	กระแสที่ทริป (A)	เวลา (s)
Normal Inverse-Time	1	600	6.02	3.83
Very Inverse-Time	1	600	6.02	2.69
Extremely Inverse-Time	1	600	6.02	2.27

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่ากระแสที่จะทำให้เกิดการทริปที่ใช้ในการทริปในช่วงนี้มีค่าเกินจากกระแสเริ่มต้นสูงขึ้นถึง 6 เท่าของค่ากระแสเริ่มต้น หรือคิดเป็น 600% จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันปกติ (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปมากที่สุดคือใช้เวลา 3.83 วินาทีและทริปที่ 6.02 A เมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปน้อยลงมา คือ 2.69 วินาทีและทริปที่ค่ากระแส 6.02 A และเมื่อเลือกให้รีเลย์ทำงานแบบ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปสั้นที่สุด คือ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที ที่กระแส 6.02 A ซึ่งเป็นไปตามกราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC ในรูปที่ 4.47 ในช่วงที่ค่ากระแสที่ทริปเกินจากกระแสเริ่มต้นมากๆ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบผกผันปกติ (Normal Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาในการทริปที่มากที่สุด รองลงมาคือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) จะใช้เวลาสั้นที่สุด ตามลำดับ



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงช่วงที่สองที่ใช้ในการทดลองการทำงาน
ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบการ Alarm ของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสถานะของหลอดไฟที่ระยะเวลาต่างๆ

ชนิด	ระยะเวลาที่หลอดไฟติด (s)	หลอดไฟ	
		ก่อนถึงค่ากระแส Alarm	ขณะถึงกระแส Alarm
Normal Inverse-Time	5	ไม่ติด	ติด
	10	ไม่ติด	ติด
	15	ไม่ติด	ติด
Very Inverse-Time	5	ไม่ติด	ติด
	10	ไม่ติด	ติด
	15	ไม่ติด	ติด
Extremely Inverse-Time	5	ไม่ติด	ติด
	10	ไม่ติด	ติด
	15	ไม่ติด	ติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ผลการดำเนินงานและแนวทางพัฒนา

ในปริญญานิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ผลการดำเนินงาน ของการสร้างและพัฒนารีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ในการจัดทำโครงงานการออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้งานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและใช้การวัดกระแสโดยหม้อแปลงกระแสพิกัด 100A/1V

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานนี้ได้ดำเนินการแล้วเสร็จบรรลุตามเป้าหมายที่ได้กล่าวไว้คือ ได้ออกแบบและจัดทำรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยใช้หม้อแปลงกระแสพิกัด 100A/1V เพื่อวัดกระแส ในตอนที่หนึ่งสำหรับการทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสใช้หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ ขนาด 100W จำนวน 18 หลอด โดยเพิ่มจำนวนหลอดขึ้นทีละ 1 หลอดและทำการเก็บค่ากระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแสทั้งหมด 300 ค่า เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ (Power Meter) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแล้วจึงปรับแก้ค่าความผิดพลาดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเพื่อปรับเทียบหม้อแปลงกระแสพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ โดยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1-2 เปอร์เซ็นต์ ตอนที่สองจะเป็นการทดสอบความแม่นยำของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ออกแบบทั้ง 4 ชนิด โดยมีหม้อแปลงกระแสรับค่ากระแสจากหลอดไฟฟ้า กดปุ่มเพื่อตั้งค่าประเภทของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ค่ากระแสเริ่มต้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของกระแสที่วัดได้ เวลาในการทริป (วินาที) และค่ากระแสในการทริป โดยหลอดไฟฟ้าที่หนึ่ง จะติดเมื่อค่ากระแสที่ได้รับมีค่าสูงกว่า Alarm Current และหลอดที่สองจะติดเมื่อค่ากระแสเกินจากที่กำหนดและปลดวงจร จากการทดลองพบว่ามีการแสดงค่าได้ตามที่เรากำหนด การแจ้งเตือนและตัดวงจรที่ถูกต้อง ค่าเวลาในการแจ้งเตือนและเวลาในการทริปสามารถแสดงค่าออกมาได้อย่างถูกต้อง เป็นไปตามทฤษฎีของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินในแต่ละประเภท และยังสามารถพัฒนาได้อีกในภายภาคหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้งานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและใช้การวัดกระแสจากหม้อแปลง โดยแปลงกระแสไฟฟ้าสูงค่าหนึ่ง เป็นกระแสไฟฟ้าอีกค่าหนึ่งที่มีค่าต่ำลงเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ทำงานในระบบป้องกัน การใช้ Arduino ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์โปรแกรมสำหรับประมวลค่ากระแสที่รับมาจากหม้อแปลงกระแสว่ามีค่าเกินจากที่กำหนดหรือไม่ ค่าที่ได้จากการทดลองจะแสดงผลที่หน้าจอแอลซีดีและมีหลอดไฟแอลอีดีสองหลอด ที่แสดงให้เห็นว่าถ้าหลอดไฟที่หนึ่งติด คือค่ากระแสที่ได้รับมีค่าสูงกว่า Alarm Current และหลอดที่สอง จะติดเมื่อค่ากระแสเกินจากที่กำหนด และปลดวงจร การทำงานแบบนี้เป็นการจำลองการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่สามารถทำขึ้นได้เองเพื่อนำไปใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ

การออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินขึ้นมาใช้เองในระดับห้องปฏิบัติการเป็นการลดต้นทุนที่ค่อยข้างสูงสำหรับการใช้รีเลย์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบจริง และในอนาคตเราสามารถปรับปรุงและเปรียบเทียบการทำงาน (Algorithm) ในการคำนวณค่ากระแส รวมทั้งการกรองสัญญาณรบกวนให้มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อการใช้งานในระบบจริงได้มากยิ่งขึ้น

5.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อการพัฒนาปริญญานิพนธ์เรื่องการออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สถานที่ในการทดลอง แต่ละที่อาจมีสัญญาณรบกวนการทำงานของระบบค่าที่ได้อาจมีค่าคาดเคลื่อนไปจากเดิมและอุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำไม่สูงมาก ค่าที่ได้จึงมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่บ้าง

5.4 ปัญหาที่พบในระหว่างดำเนินโครงงานและข้อมูลเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทำโครงงานมีการใช้ความสามารถในด้านการเขียนโปรแกรมทั้งความรู้ด้านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ในการเขียนโปรแกรมให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้น ต้องใช้เวลาการค้นคว้าหาข้อมูลและเรียบเรียงเป็นเวลานาน

2. ในการทำโครงงานเป็นทีมที่มีสมาชิกหลายคนทำให้การสื่อสารการทำงานมีข้อขัดแย้งบ้างในบางครั้ง การสื่อสารที่ดีควรใช้เหตุผลในการพูดคุยและไม่ใช้อารมณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 แนวทางการพัฒนา

โครงงานวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาและเพิ่มความสามารถในการทำงานได้มากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพของการใช้งาน ดังนี้

1. การปรับปรุงและเปรียบเทียบการทำงาน (Algorithm) ในการคำนวณค่ากระแส ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2. การกรองสัญญาณรบกวนหรือปรับแต่งสัญญาณที่ผ่านเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ธัชชัย สุมิตร, **รีเลย์ป้องกันระบบพลังไฟฟ้า**, กรุงเทพมหานคร, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2529.

[2] Electrical Learning (ระบบไฟฟ้ากำลัง), **"หม้อแปลงกระแส (Current Transformer),"** http://nongcom-electrical.blogspot.com/2015/08/current-transformer-ct.html

[3] กีรติ ชยะกุลคีรี, **การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังและรีเลย์ (Electrical power system protection and relays)**, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2552.

[4] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช, **"การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical power system protection)"**, กรุงเทพ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2552.

[5] กิตติพงษ์ ตันมิตร, **การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical power system protection)**, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์ท้อป, 2553.

[6] วิทยา เตชะยอด และ อรรคเดช ปัญโญใหญ่ ,"การออกแบบและทดสอบรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางแบบไมโครโปรเซสเซอร์รีเลย์,"**ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย , 2555.

[7] ThaiEasyElec, **"Arduino คืออะไร,"** https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/arduino.html

[8] MD Rayhanul Amin Rumi, S.M. Amanat Hossain, Razaul Haider Hanif and Mahdi MD Mostafa, "Design and construction of a numerical over current relay," **IEEE trans. Industrial Electron.**, 2015.

[9] OpenEnergyMonitor, **"How to Build an Arduino Energy Monitor-Measuring Mains Current Only,"** https://www.learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/how-to-build-an-arduino-energy-monitor-measuring-current-only.

[10] Arduino , **"ARDUINO UNO R3,"** https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LAB-SCALE DIGITAL OVERCURRENT RELAY

กชกร พรมมิน[1] ฎาริกา มณีศรี[2] ธัญธร บัณฑิตยุทธพงศ์[3] และ บุรัสกร เชิญผึ้ง[4]
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ใช้ในการศึกษาการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน 4 แบบ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) ซึ่งจะใช้เวลาในการปลดวงจรที่แตกต่างกัน ตามสูตรการคำนวณของแต่ละชนิดที่เลือกใช้ ผลการทดลองจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่ารีเลย์ป้องกันกระแสเกินต้นแบบสามารถทำงานได้ในทุกลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระเกินทั้ง 4 แบบ และมีข้อผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสที่วัดได้อยู่ระหว่าง 1.5-2%

คำสำคัญ : รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

Abstract

The aim of this project is to design and prototyping of a lab-scale digital overcurrent relay for experimental study of single phase power protection system. The design comprises four types of time-current characteristic curve, standard inverse time, very inverse time, extremely inverse time and adjustable pick-up current and tripping time respectively. Experimental results from testing in laboratory illustrated that the prototype overcurrent relay can work in all types of time-current characteristic curve with an average error of the measured current lies between 1.5-2%.

Keywords: Overcurrent relay

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ การใช้รีเลย์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบจริงนั้น มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ทางห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ยังไม่มีงบประมาณเพียงพอ เพราะฉะนั้นทางเลือกหนึ่งที่เราสามารถทำได้คือ การออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินขึ้นมาใช้เอง ซึ่งจะส่งผลให้มีความรู้ในการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล สามารถออกแบบความถูกต้อง ความแม่นยำและรายละเอียดภายในของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินได้ตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เลือกนำมาใช้ ถ้าเราสามารถออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลเองได้ ในอนาคตเราก็จะสามารถปรับปรุงและเปรียบเทียบการทำงาน (Algorithm) ในการคำนวณค่ากระแส รวมทั้งการกรองสัญญาณรบกวนให้มีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น กลุ่มของพวกเราจึงได้ศึกษาแนวทางการออกแบบสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่เราสามารถพัฒนาขึ้นใช้ได้เองในระดับห้องปฏิบัติการ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (Principle of Power System Protection) [1]

หลักการสำคัญในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังคือ การตัดแยกวงจรแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบให้เร็วที่สุดโดยให้เกิดผลกระทบกับอุปกรณ์อื่นในระบบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้จะต้องมั่นใจด้วยว่าการตัดวงจรนี้ทำได้อย่างถูกต้องและไม่ตัดวงจรในส่วนที่ไม่จำเป็นออกไป อุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในระบบป้องกันจึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลว่าค่าที่ตรวจวัดมานั้นผิดปกติหรือไม่ รวมถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดแยกส่วนที่เกิดการผิดพร่องออกจากระบบอีกด้วย

2.2 รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) [2]

2.2.1 รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time-Delay Overcurrent Relays) การแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$t = \frac{K}{I^{n}-1} \times TMS \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t เป็นเวลาที่หน่วงของรีเลย์

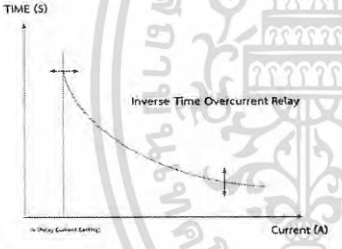
I เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ ซึ่งจะแสดงเป็นสัดส่วนของกระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์เป็นค่าต่อหน่วย (per unit) (ในมาตรฐาน IEC เรียกว่าค่าหมุดตัวคูณปรับตั้ง (Plug Setting Multiplier, PSM)

K, n เป็นค่าคงที่ของคุณสมบัติรีเลย์

TMS เป็นค่าการปรับค่าตัวคูณหน่วงเวลา

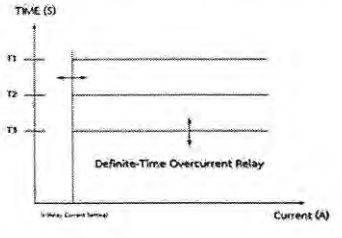
2.2.2 ประเภทของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC สามารถแบ่งตาม คุณสมบัติของการตอบสนองต่อกระแสได้ ดังต่อไปนี้

-รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน (Inverse-Time Overcurrent Relay) ใช้กระแสและเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องของระบบ จะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ เรียกว่า ค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current, Plug Setting, Ip) เวลาที่รีเลย์ใช้ในการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใด โดยเวลาจะลดลงเมื่อกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์มากขึ้น ความเร็วในการเริ่มทำงานของรีเลย์ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสผิดพร่อง ยิ่งกระแสผิดพร่องมากรีเลย์ยิ่งทำงานเร็วดังรูป



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ Inverse-Time Overcurrent Relay

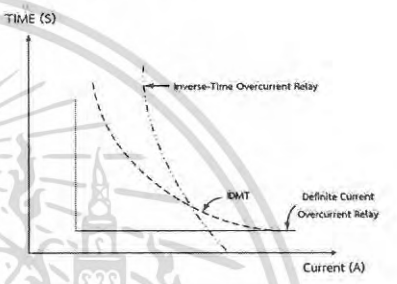
-รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน (Definite-Time Overcurrent Relay) ใช้กระแสและเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องของระบบ จะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้เช่นเดียวกัน แต่ระยะเวลาที่รีเลย์ทำงานนั้น จะมีค่าที่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใด ดังรูป



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงลักษณะการทำงาน ของ Definite-Time Overcurrent Relay

-รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันจำกัดเวลาต่ำสุด (Inverse Definite Minimum Time Overcurrent Relay, IDMT Relay) รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบ IDMT จะทำงานในลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน ในช่วงกระแสลัดวงจรต่ำๆ และทำงานในลักษณะของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบแน่นอน ถ้าค่ากระแสลัดวงจร มีค่าสูง ตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ IDMT มาตรฐานเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02}-1} \times TMS \qquad (2.2)$$



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของ IDMT Relay

-รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay) จะมีการทำงานที่ตอบสนองต่อกระแสลัดวงจรเร็วกว่ารีเลย์แบบ IDMT รีเลย์ชนิดนี้จะถูกเลือกใช้ในกรณีที่ไม่สามารถปรับตั้งรีเลย์ IDMT ให้ทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์ตัวอื่นได้ ใช้เมื่อต้องการเลือกใช้ค่าเวลากว้างๆในขณะที่แฟกเตอร์เวลาทั้งหมดต่ำมากๆ และ กระแสที่ตำแหน่งใดๆในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ตัวอย่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก มาตรฐานเป็นไปตามสมการ

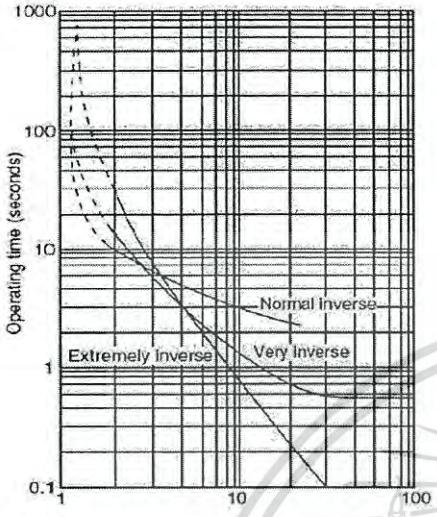
$$t = \frac{13.5}{I-1} \times TMS \qquad (2.3)$$

-รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay) จะมีการตอบสนองต่อค่ากระแสลัดวงเร็วขึ้นกว่ารีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้ทำงานสัมพันธ์กับฟิวส์ได้ดี นอกจากนี้รีเลย์ชนิดนีเหมาะสำหรับการใช้ในการป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวอย่างการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างอิงมาตรฐานเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{80}{I^2-1} \times TMS \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแต่ละชนิดตามมาตรฐาน IEC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

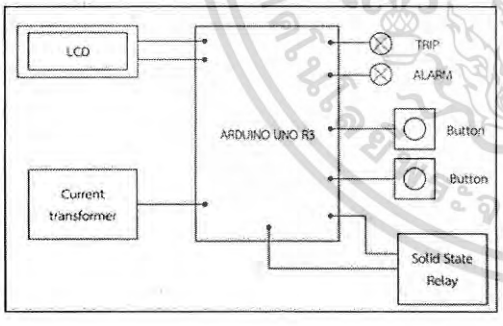


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาตามมาตรฐาน IEC

3. การออกแบบการทดลอง

3.1 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์

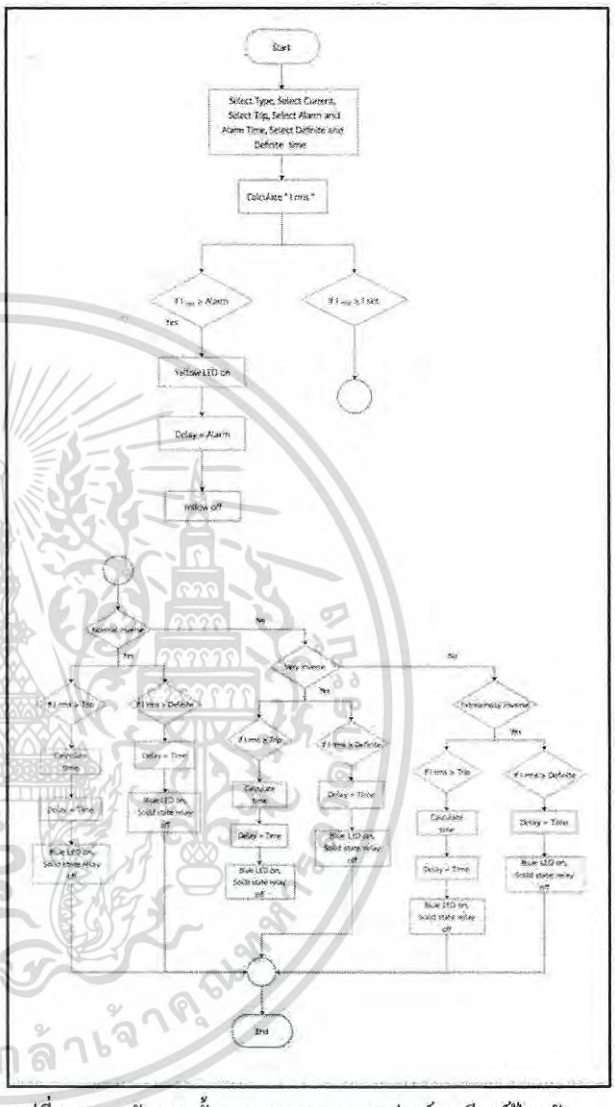
หลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ ได้ทำการออกแบบการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Block diagram หลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2 หลักการออกแบบซอฟแวร์

หลักการออกแบบซอฟแวร์ เป็นการออกแบบลักษณะการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินทั้งหมด 4 แบบ คือ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาแน่นอน รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาผกผัน รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันมาก และ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินหน่วงเวลาแบบผกผันอย่างยิ่ง โดยแบบแรกจะมีการตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการปลดวงจร ส่วนอีก 3 แบบนั้นจะมีสมการการคำนวณเวลาที่ใช้ในการปลดวงจรแตกต่างกันออกไป ทำให้เวลาที่ใช้เวลาแตกต่างในการปลดวงจรก็จะมีค่าแตกต่างกันนั่นเอง



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบซอฟแวร์ของรีเลย์ป้องกัน

4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส

ในการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของกระแส จะทำโดยการต่อวงจรดังรูป 4.1 ใช้หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ ขนาด 100W จำนวน 18 หลอด โดยเพิ่มจำนวนหลอดขึ้นทีละ 1 หลอดและทำการเก็บค่ากระแสที่วัดได้จากหม้อแปลงกระแสทั้งหมด 300 ค่า จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากพาวเวอร์มิเตอร์ (Power Meter) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแล้วจึงปรับแก้ค่าความผิดพลาดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเพื่อปรับเทียบหม้อแปลงกระแส

หลอดไฟ	ค่ากระแสจากเครื่องมือวัด (A)	ค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส (A)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
		ก่อนปรับ	หลังปรับ	
1	0.43	0.6330	0.4656	8.2791
2	0.86	1.0807	0.8791	2.2209
3	1.28	1.4872	1.2745	0.4323
4	1.70	1.9802	1.6645	2.0882
5	2.15	2.5809	2.1011	2.2728
6	2.59	2.8946	2.5315	2.2599
7	2.97	3.3718	2.9253	1.5039
8	3.41	3.8515	3.3205	2.6227
9	3.81	4.3257	3.7513	1.5416
10	4.36	4.8117	4.3125	1.0887
11	4.75	5.2814	4.6869	1.3291
12	5.25	5.7790	5.1745	1.6255
13	5.76	6.2670	5.6125	2.5596
14	6.19	6.7749	6.093	1.5616
15	6.64	7.2401	6.4979	2.1390
16	7.08	7.7646	6.6920	1.6662
17	7.35	8.2581	7.2005	2.0336
18	7.66	8.7222	7.5081	1.9826

4.2 การทดสอบความแม่นยำของวงจรรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอล

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 150% ของกระแสเริ่มต้น

ชนิด	กระแสเริ่มต้น (A)	% Trip	กระแสที่ทริป (A)	เวลา (s)
Definite-Time	1	150	2.17	5
Normal Inverse-Time	1	150	1.71	13.0
Very Inverse-Time	1	150	1.73	18.5
Extremely Inverse-Time	1	150	1.74	39.4

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทริปของรีเลย์แบบต่างๆ ที่ 600% ของกระแสเริ่มต้น

ชนิด	กระแสเริ่มต้น (A)	% Trip	กระแสทีทริป (A)	เวลา (s)
Normal Inverse-Time	1	600	6.02	3.83
Very Inverse-Time	1	600	6.02	2.69
Extremely Inverse-Time	1	600	6.02	2.27

5. สรุปผลการดำเนินงาน

จากการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบดิจิตอลที่ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้งานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและใช้การวัดกระแสจากหม้อแปลง การใช้ Arduino ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์โปรแกรมสำหรับประมวลค่ากระแสที่รับมาจากหม้อแปลงกระแสว่ามีค่าเกินจากที่กำหนดหรือไม่ ค่าที่ได้จากการทดลองจะแสดงผลที่หน้าจอแอลซีดีและมีหลอดไฟแอลอีดีสองหลอด ที่แสดงให้เห็นว่าถ้าหลอดไฟที่หนึ่งติด คือค่ากระแสที่ได้รับมีค่าสูงกว่า Alarm Current และหลอดที่สองจะติดเมื่อค่ากระแสเกินจากที่กำหนด และปลดวงจร การทำงานแบบนี้เป็นการจำลองการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่สามารถทำขึ้นได้เองเพื่อนำไปใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ

การออกแบบและสร้างรีเลย์ป้องกันกระแสเกินขึ้นมาใช้เองในระดับห้องปฏิบัติการเป็นการลดต้นทุนที่ค่อยข้างสูงสำหรับการใช้รีเลย์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบจริง และในอนาคตเราสามารถปรับปรุงและเปรียบเทียบการทำงาน (Algorithm) ในการคำนวณค่ากระแส รวมทั้งการกรองสัญญาณรบกวนให้มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อการใช้งานในระบบจริงได้มากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรุธ จิรสุวรรณกุล ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยช่วยเหลือ จนวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ธัชชัย สุมิตร, รีเลย์ป้องกันระบบพลังไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2529.

[2] MD Rayhanul Amin Rumi, S.M. Amanat Hossain, Razaul Haider Hanif and Mahdi MD Mostafa, "Design and construction of a numerical over current relay," IEEE trans. Industrial Electron., 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ARDUINO UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328P (datasheet). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz quartz crystal, a USB connection, a power jack, an ICSP header and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.. You can tinker with your UNO without worring too much about doing something wrong, worst case scenario you can replace the chip for a few dollars and start over again. "Uno" means one in Italian and was chosen to mark the release of Arduino Software (IDE) 1.0. The Uno board and version 1.0 of Arduino Software (IDE) were the reference versions of Arduino, now evolved to newer releases. The Uno board is the first in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for an extensive list of current, past or outdated boards see the Arduino index of boards. You can find here your board warranty informations. [10]

Getting Started You can find in the Getting Started section all the information you need to configure your board, use the Arduino Software (IDE), and start tinker with coding and electronics.

TECH SPECS

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OSH

Schematics Arduino Uno is open-source hardware! You can build your own board using the following files: EAGLE FILES IN .ZIPSCHEMATICS IN .PDFBOARD SIZE IN .DXF

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the (Arduino Software (IDE)). Select "Arduino/Genuino Uno from the Tools > Board menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the reference and tutorials.

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preprogrammed with a bootloader that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol (reference, C header files).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header using Arduino ISP or similar; see these instructions for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available in the Arduino repository. The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then rese ing the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use Atmel's FLIP software (Windows) or the DFU programmer (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See this user-contributed tutorial for more information.

Warnings

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

Differences with other boards

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.

Power

The Arduino Uno board can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the GND and Vin pin headers of the POWER connector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The board can operate on an external supply from 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may become unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- Vin. The input voltage to the Arduino/Genuino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- 5V.This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- 3V3. A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- GND. Ground pins.
- IOREF. This pin on the Arduino/Genuino board provides the voltage reference with which the microcontroller operates. A properly configured shield can read the IOREF pin voltage and select the appropriate power source or enable voltage translators on the outputs to work with the 5V or 3.3V.

Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB occupied by the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the EEPROM library).

Input and Output

See the mapping between Arduino pins and ATmega328P ports. The mapping for the Atmega8, 168, and 328 is identical. PIN MAPPING ATmega328P Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using pinMode(), digitalWrite(), and digitalRead() functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive 20 mA as recommended operating condition and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50k ohm. A maximum of 40mA is the value that must not be exceeded on any I/O pin to avoid permanent damage to the microcontroller.

In addition, some pins have specialized functions:

- Serial: 0 (RX) and 1 (TX). Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- External Interrupts: 2 and 3. These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the attachInterrupt() function for details.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11. Provide 8-bit PWM output with the analogWrite() function.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). These pins support SPI communication using the SPI library.
- LED: 13. There is a built-in LED driven by digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin. Support TWI communication using the Wire library.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the analogReference() function. There are a couple of other pins on the board:

- AREF. Reference voltage for the analog inputs. Used with analogReference().
- Reset. Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

Communication

Arduino/Genuino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino/Genuino board, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The 16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, on Windows, a .inf file is required. The Arduino Software (IDE) includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A SoftwareSerial library allows serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino Software (IDE) includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the documentation for details. For SPI communication, use the SPI library.

Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino/Genuino Uno board is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino Software (IDE) uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the interface toolbar. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload.

This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Uno board contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see this forum thread for details.

Revisions Revision 3 of the board has the following new features:

- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible with both the board that uses the AVR, which operates with 5V and with the Arduino Due that operates with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
CURRENT TRANSFORMER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Product Specification

Date:2015-8-7

Product Name	Current transformer	Model	SCT013-000V

Characteristics:Openning size 13mm*13mm,1m leading wire, standard Φ3.5 three-core plug output. voltage output type.

Purpose: Used for current measurement, monitor and protection for AC motor,lighting equipment, air compressor etc.

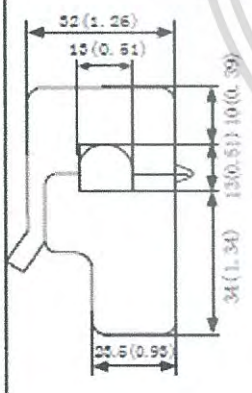
Patent No.: ZL 2015 3 0060067. X

Technical Data

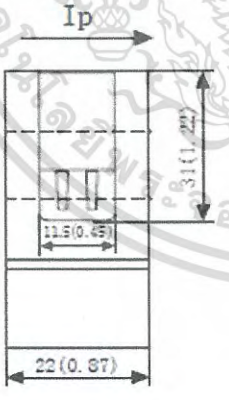
I_{PN}	Rated input	0-100A
I_{PM}	Max. detection input	
I_{OUT}	Rated output	0-1V
X	Accuracy	±1%
ε_L	Linearity	≤0.2%
N	Turns ratio	1:1800
Φ	Phase shift	
R_L	Max.Sampling resistance	
V_{PN}	Work voltage	660V
f	Work frequency	50-1KHz
T_A	Operating temperature	-25..+70℃
T_S	Storage temperature	-40..+85℃
Vd	Dielectric strength, 50 Hz, 1 min	3KV

Fire resistance	UL94-V0
Material of core	Ferrite
Mounting type	Suspension
Weight	55g

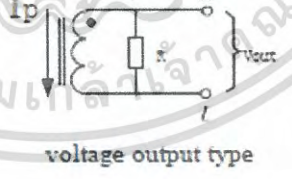
Dimension (mm(in). 1 mm= 0.0394 inch)



Front view

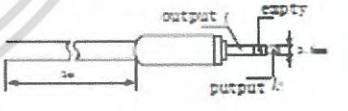


Side view



voltage output type

Schematic diagram



(can provide other wiring way)

Standard three-core pligs schematic diagram

http://www.yhdc.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาว กชกร พรมมิน
วัน เดือน ปีเกิด 16 ตุลาคม 2538
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 9 ถนน ฉลองกรุง ตำบล ลำปลาทิว
อำเภอ ลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
จากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ๔ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน
ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาว ฐาริกา มณีศรี
วัน เดือน ปีเกิด 27 มีนาคม 2539
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 18/1 ถนน บูรกรรมโกวิท ตำบลสะเดียง
อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
จากโรงเรียนวิทยานุกูลนารี จังหวัดเพชรบูรณ์

ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน
ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ-นามสกุล นางสาว ธัญธร บัณฑิตยุทธพงศ์

วัน เดือน ปีเกิด 1 มกราคม 2539

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 702/8-11 ถนน สุรนารายณ์ ตำบล บ้านเกาะ

อำเภอ เมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา

ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน

ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นาย บุรัสกร เชิญผึ้ง

วัน เดือน ปีเกิด 17 พฤษภาคม 2538

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 19/3 หมู่ 4 ตำบล บางรักใหญ่

อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนศรีบุณยานนท์ จังหวัดนนทบุรี

ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน

ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้