

การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินrushขณะสวิตชิงคาปาซิเตอร์
DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL CAPACITOR BANK
SET UP FOR REDUCE INRUSH CURRENT

โดย

| | |
|-------------|-------------|
| นายชวิน | ตัณฑลเลขา |
| นายชาญชัย | คำดี |
| นายโชติระวี | ยন্ত্রาชีวะ |
| นายณรวัฒน์ | สุชะไท |

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินรัชขณะสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์
DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL CAPACITOR BANK
SET UP FOR REDUCE INRUSH CURRENT

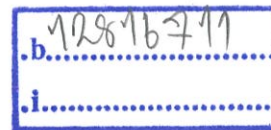


T144395

โดย

| | |
|-------------|-------------|
| นายชวิน | ตันทเลขา |
| นายชาญชัย | คำดี |
| นายโชติระวี | ยন্ত্রาชีวะ |
| นายณัฐวัฒน์ | สุขะไท |

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144395
ชั้น,เดือน,ปี 24 119. 2559



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL CAPACITOR BANK
SET UP FOR REDUCE INRUSH CURRENT

| | |
|-----------|-------------|
| CHAWIN | TANTHALEKHA |
| CHANCHAI | KHAMDEE |
| CHOTRAWEE | YONTACHEEWA |
| NATHAWAT | SUKHATHAI |

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

ปีการศึกษา 2558

การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินรัชขณะสวิตซ์คาปาซิเตอร์

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL CAPACITOR BANK

SET UP FOR REDUCE INRUSH CURRENT

โดย

นายชวิน

ต้นตลเลขา

นายชาญชัย

คำดี

นายโชติระวี

ยนตราชีวะ

นายณธวัฒน์

สุขะไท

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล

ผศ.ชายชาญ โพธิสาร



ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินรัช ขณะสวิตซ์ิงคาปาซิเตอร์

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------|-------------|
| 1. นายชวิน | ต้นทเลขา |
| 2. นายชาญชัย | คำดี |
| 3. นายโชติระวี | ยন্ত্রาชีวะ |
| 4. นายณวัฒน์ | สุชะไท |


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. ชายชาญ โพธิสาร)

การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินรัชขณะสวิตช์ิ่งคาปาซิเตอร์

นายชวิน ต้นทเลขา
นายชาญชัย คำดี
นายโชติระวี ยন্ত্রาชีวะ
นายณวัฒน์ สุขะไท
รศ.ดร.อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็น การพัฒนาชุดสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ (Switching Capacitor) ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่จำลองมาจากระบบจริง โดยโครงการนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุและออกแบบติดตั้งระบบป้องกัน เพื่อที่ลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ สัญญาณชั่วขณะที่ทำการศึกษาได้แก่ กระแสไหลพุ่ง (Inrush Current) แรงดันชั่วขณะ เป็นต้น โครงการนี้ได้ใช้รีแอกเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้าเข้ากับชุดสวิตซ์ระบบการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ เพื่อช่วยลดผลของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ และจัดทำชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมมุมที่ต้องการให้เกิดการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ จากนั้นทำการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการลดผลกระทบกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้น และในกรณีที่มีการติดตั้งชุดรีแอกเตอร์จำกัดกระแสและกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันให้ชุดตัวเก็บประจุ

Development of Experimental Capacitor Bank Set up for Reduce Inrush Current

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Mr.Chawin | Tanthalekha |
| Mr.Chanchai | Khamdee |
| Mr.Chotrawee | Yontachewa |
| Mr.Nathawat | Sukhathai |
| Associate.Prof.Dr.Attapol | Ngaopitakkul Advisor |
| Asst.Prof.Chaichan | Pothisarn Co-Advisor |

ABSTRACT

This project aims to develop switching capacitor bank experimental setup that after capacitor bank system in substation. This project analyzed behavior of transient signal that occur when switching capacitor bank into system and also implement protection device. Transient phenomena that has been study such as Inrush current and Voltage transient. To reduce the effect of switching transient while switching the capacitor bank into the system. The current limiting reactor has been used in this project to reduce the inrush current. The zero crossing circuit has been designed implement into experimental setup to control switching angle of the capacitor bank. Analyzed data will be used to evaluate the effectiveness of protection devices in inrush current reduction comparing to in case of without protection devices. Obtaining data can be used for designed and installed of protection system for capacitor bank system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมดซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ รศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล และผศ.ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การทำโครงการวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ นายสันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อมูลต่างๆในการจัดทำโครงการวิจัยและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้และสนับสนุนเครื่องมือในการทำโครงการ

ท้ายที่สุดนี้ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญภาพ | V |
| สารบัญตาราง | VI |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 8 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของปริญญานิพนธ์ | 8 |
| 1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ | 8 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 11 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 วงจรตัวเก็บประจุ | 12 |
| 2.2 การติดต่อของวงจรตัวเก็บประจุ | 15 |
| 2.3 กระแสไหลพุ่ง | 17 |
| 2.4 การลดกระแสไหลพุ่ง | 18 |
| 2.5 แรงดันผ่านศูนย์ | 21 |
| บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง | |
| 3.1 การออกแบบชุดสาธิตวงจรตัวเก็บประจุ | 24 |
| 3.2 การดัดแปลงวงจรตัวเก็บประจุให้เป็นดีจูนฟิลเตอร์ | 32 |
| 3.3 ชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | 35 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | |
| 4.1 การทดลองวงจรการสวิตชิงวงจรตัวเก็บประจุโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ | 39 |
| 4.2 การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ | 58 |
| 4.3 พฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้น ถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ | 78 |
| 4.4 พฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้น ถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ | 84 |

| | |
|---------------------------|-----|
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 91 |
| 5.2 ปัญหาที่พบ | 92 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนา | 92 |
| เอกสารอ้างอิง | 93 |
| ภาคผนวก | 96 |
| ภาคผนวก ก | 97 |
| ประวัติผู้เขียน | 102 |

สารบัญญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 วงจรตัวเก็บประจุ | 12 |
| 2.2 วงจรตัวเก็บประจุมีฟิวส์ภายนอก | 13 |
| 2.3 วงจรตัวเก็บประจุมีฟิวส์ภายใน | 14 |
| 2.4 วงจรสมมูลของการกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุเดียว | 16 |
| 2.5 วงจรสมมูลของการตัดต่อแบบอย่างต่อเนื่อง | 16 |
| 2.6 กระแสไหลพุ่งขณะทำการตัดต่อคาปาซิเตอร์ | 17 |
| 2.7 รีแอคเตอร์ | 19 |
| 2.8 กราฟไซน์และจุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | 22 |
| 2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดีโนอูโน (arduino uno) | 23 |
| 3.1 การต่อวงจรตัวเก็บประจุนับสัปดาห์ของสถานีไฟฟ้าอ่อนงจอก | 24 |
| 3.2 อุปกรณ์ของชุดสาธิตการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | 26 |
| 3.3 วงจรกำลังของชุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | 28 |
| 3.4 วงจรกำลังของชุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | 29 |
| 3.5 วงจรควบคุมของชุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | 30 |
| 3.6 วงจรควบคุมของชุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | 31 |
| 3.7 รีแอคเตอร์ 7 % | 34 |
| 3.8 รีแอคเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้ากับวงจรตัวเก็บประจุ | 35 |
| 3.9 ตัวตรวจจับกระแสชนิด 30A เบอร์ ACS712 | 36 |
| 3.10 รีเลย์เอาท์พุทแบบตัดต่อ 2 ทาง 1 ขั้ว | 36 |
| 3.11 การออกแบบการตรวจจับกระแสค่าศูนย์ | 37 |
| 4.1 ไดอะแกรมการทดลองวงจรการตัดต่อตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 43 |
| 4.2 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 0 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 45 |
| 4.3 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 45 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 47 |
| 4.4 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 90 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 49 |
| 4.5 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 135 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 51 |
| 4.6 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 180 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 53 |
| 4.7 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 225 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 51 |
| 4.8 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 270 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 56 |
| 4.9 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 315 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 57 |
| 4.10 การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ในแต่ละลำดับ | 62 |
| 4.11 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 0 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 64 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.12 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 45 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 66 |
| 4.13 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 90 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 68 |
| 4.14 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 135 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 70 |
| 4.15 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 180 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 71 |
| 4.16 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 225 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 73 |
| 4.17 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 270 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 74 |
| 4.18 | กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 315 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับ | 76 |
| 4.19 | ไดอะแกรมการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับขั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับขั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ | 79 |
| 4.20 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 0 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 80 |
| 4.21 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 45 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 82 |
| 4.22 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 90 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 83 |
| 4.23 | ไดอะแกรมการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับขั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับขั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ | 85 |
| 4.24 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 0 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 86 |
| 4.25 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 45 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 88 |
| 4.26 | กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 90 องศาต่อเนื่องหลังลำดับขั้นหนึ่ง | 89 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 1.2 ตารางการดำเนินปริญญานิพนธ์ | 10 |
| 4.1 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ | 40 |
| 4.2 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีมีรีแอคเตอร์ | 59 |
| 4.3 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 0 องศาทางไฟฟ้า | 80 |
| 4.4 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 45 องศาทางไฟฟ้า | 81 |
| 4.5 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 90 องศาทางไฟฟ้า | 83 |
| 4.6 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 0 องศาทางไฟฟ้า | 86 |
| 4.7 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 45 องศาทางไฟฟ้า | 87 |
| 4.8 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนด การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองมุม 90 องศาทางไฟฟ้า | 89 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องในระบบไฟฟ้าปัจจุบันมีการใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จากการเปรียบเทียบข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พบว่ามีความต้องการไฟฟ้ามีความสูงขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการใช้ไฟฟ้าที่ไม่มีประสิทธิภาพ การที่มีตัวประกอบกำลังไม่เหมาะสมเป็นเหตุผลหนึ่งที่ส่งผลทำให้มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอีกในอนาคต จึงมีการใช้วิธีการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งระบบวงจรตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) เป็นหนึ่งในระบบที่ผู้ผลิตไฟฟ้าและโรงงานให้ความสนใจ โดยใช้วงจรตัวเก็บประจุที่นำมาติดตั้งในระบบเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในระบบไฟฟ้าของอาคารและโรงงานมีวงจรตัวเก็บประจุทำหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังหรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) เหตุผลคือ การนำเทคโนโลยีมาใช้ในชีวิตประจำวัน การทำงาน และการผลิตทางอุตสาหกรรมนั้น อุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้สร้างกระแสไหลพุ่งขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อเริ่มใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ทำให้ชำรุดได้

กระแสไหลพุ่งที่กล่าวถึงเป็นกระแสมีค่าที่สูงมากในช่วงระยะเวลาอันสั้นที่เกิดขึ้นเมื่อมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ สามารถส่งผลทำให้วงจรตัวเก็บประจุได้รับเสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีป้องกันหรือลดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ในระบบไฟฟ้าได้มีการติดตั้งระบบวงจรตัวเก็บประจุเข้าไปที่สถานีย่อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาและประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องวงจรตัวเก็บประจุมาพัฒนาระบบไฟฟ้าเพื่อให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจากเดิมและวิเคราะห์กระแสไหลพุ่งพร้อมหาวิธีการลดกระแสไหลพุ่งเพื่อความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ว่าเป็นมอเตอร์หรือหม้อแปลง

จากการศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยของคณะวิจัยอื่น ได้ทราบว่ามีการใช้งานตัวเก็บประจุหลายรูปแบบและหลากหลายจุดประสงค์ สามารถจำแนกได้ดังนี้

งานวิจัยที่มีการใช้ตัวเก็บประจุการตัดต่อเข้าสู่ระบบและควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยในหมวดนี้มีงานวิจัยที่ [1] ถึง [8] ซึ่งงานวิจัยที่ [1] และ [2] ได้กล่าวถึงการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบและลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเครือข่ายระบบสายส่ง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองคือค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นจริงและสามารถลดฮาร์มอนิกในระบบได้ งานวิจัยที่ [3] และ [4] เป็นงานวิจัยเรื่องการใช้เครื่องควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเพื่อลดผลกระทบของกระแสไหลพุ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ทำการใช้ไทรสเตอร์เพื่อควบคุมตัวเก็บ

ประจุที่ต่ออนุกรมเสมือนเครื่องควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากวิธีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังนั้นให้ผลดีในทุกด้าน งานวิจัยที่ [5] – [6] นั้นเป็นการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเพื่อทำการเพิ่มสมรรถภาพของระบบทั้งสิ้น โดยใช้ตัวเก็บประจุต่างแบบกันไป งานวิจัยที่ [5] นำเสนอการใช้ตัวเก็บประจุแบบไรฟ์วีส งานวิจัยที่ [6] นำเสนอการใช้ตัวเก็บประจุควบคู่ไปกับการใช้ระบบป้องกันปรับค่าได้ที่ทำการออกแบบเองเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ และงานวิจัยที่ [7] และ [8] นั้นได้นำเสนอการใช้ตัวเก็บประจุแรงดันสูงเพื่อทำการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของระบบ โดยทั้ง 3 วิธีนี้ได้ผลในการทดลองใกล้เคียงกัน งานวิจัยที่ [9] – [10] ได้กล่าวถึงการใช้ตัวเก็บประจุอีกสองแบบเพื่อทำการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ งานวิจัยที่ [9] ได้ใช้วงจรตัวเก็บประจุที่ต่อแบบเดลต้าเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยเป็นตัวเก็บประจุ 3 เฟส มีจุดมุ่งหมายให้นำไปพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมแรงดันต่ำ และงานวิจัยที่ [10] เป็นการศึกษาเรื่องตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีได้เพื่อทำการสำรองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้ผลการทดลองว่าวงจรตัวเก็บประจุที่ออกแบบได้เพิ่มสมรรถภาพของระบบไฟฟ้าที่นำไปติดตั้งทั้งคู่ และการใช้ตัวเก็บประจุแรงดันต่ำในการทดลองการตัดต่อเข้าสู่ระบบในระยะฮาร์มอนิกต่างกัน [11]

อีกประเภทหนึ่งของการใช้ตัวเก็บประจุในการติดตั้งเข้าสู่ระบบคือการติดตั้งตัวเก็บประจุและใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นในการช่วยควบคุมกระแสไหลฟุ้ง ซึ่งคือ การใช้ตัวจำกัดการตัดต่อตัวเก็บประจุชั่วคราวแบบไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ซึ่งมี 2 วิธีการทำงาน คือ วิธีการจำกัดซึ่งทำการจำกัดกระแสไหลฟุ้ง และวิธีการปล่อยผ่านซึ่งทำตัวเหมือนลัดวงจรโดยไม่มีผลกระทบต่อวงจร [12]-[14] งานวิจัย [15] และ [16] ที่ได้กล่าวถึงการตัวเก็บประจุควบคู่กับสายไฟฟ้าใต้ดินเพื่อทดลองถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อมีการตัดต่อ ซึ่งผลการทดลองได้ทำการลดกระแสไหลฟุ้งได้น้อยมาก ทำให้เกิดการเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่อมาเมื่อได้ศึกษางานวิจัยที่ [17] ถึง [18] พบว่าทั้งสองงานวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อกำหนดเวลาการตัดต่อของตัวเก็บประจุ และได้ทำการวัดผลที่ได้ ทำให้ทราบว่ามีการลดลงของกระแสไหลฟุ้งจริง ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์และกระแสที่จุดศูนย์ของระบบ และงานวิจัยที่ [19] ซึ่งได้กล่าวถึงการใช้ดีจูนฟิลเตอร์ต่อเข้ากับระบบที่ทำการตัดต่อตัวเก็บประจุเพื่อทำการลดกระแสไหลฟุ้งโดยตรง และการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ (Pre-insert resistor) เป็นการนำตัวต้านทานมาต่อขนานกับวงจรก่อนเข้าตัวเก็บประจุ เมื่อมีการตัดต่อตัวเก็บประจุต่อตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมเป็นเวลาชั่วขณะหนึ่ง เพื่อลดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้น และตัดตัวต้านทานออกจากวงจรเพื่อลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวต้านทาน [20]-[22] การใช้รีแอคเตอร์จำกัดกระแส (Current limiting reactor) มาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ เพื่อลดผลของสัญญาณชั่วขณะในขณะตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ และควบคุมความถี่ธรรมชาติของตัวเก็บประจุไม่ให้เกิดการสั่นพ้อง และสุดท้ายเป็นเทคนิคการใช้รีแอคเตอร์ 6%

(6% Detuning reactor) เป็นการนำตัวรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมเข้ากับระบบตัวเก็บประจุ โดยมีความแตกต่างจากรีแอคเตอร์จำกัดกระแสตรงที่ต้องมีการคำนวณค่ารีแอคแตนซ์ให้ได้ 6% ของรีแอคแตนซ์ในระบบตัวเก็บประจุ เป็นผลให้ความสัมพันธ์ต่ำกว่าความถี่ฮาร์โมนิกตัวแรกในระบบ จึงไม่เกิดเงื่อนไขที่ทำให้การสั่นพ้องขึ้นในระบบที่ทำการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าไป [23]-[27]

อีกประเภทคืองานวิจัยที่ใช้การควบคุมการตัดต่อเพื่อทำการหาวิธีการตัดต่อที่ทำให้เกิดการลดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นโดย ควบคุมค่าความต้านทานก่อนการตัดต่อโดยทำการใช้การจำกัดแรงดันเพื่อควบคุมค่าความต้านทานทำให้กระแสไหลฟุ้งลดลงก่อนการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ เพื่อป้องกันผลเสียที่เกิดขึ้นต่อระบบเมื่อตัดต่อตัวเก็บประจุ [28][29] และการควบคุมการตัดต่อหลายระดับได้ทำการตัดต่อระดับที่สองถึงห้าเพื่อหาความแตกต่างกับการตัดต่อระดับที่หนึ่ง ได้ผลการทดลองคือการตัดต่อระดับที่สองมีกำลังไฟฟ้าเสมือนมากกว่าการตัดต่อระดับที่หนึ่งถึงสองเท่าและการตัดต่อระดับที่สูงขึ้นไปทำให้กระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งมีผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้กระแสไหลฟุ้งในระบบลดลง [30][31] และอย่างสุดท้ายคือการศึกษาหาวิธีการคำนวณประมาณกระแสไหลฟุ้งและแรงดันสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นเมื่อทำการตัดต่อตัวเก็บประจุกับภาระทางไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้การแปลงค่าของสต็อคเวลเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยในการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [32] การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุจากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้าก่อให้เกิดกระแสไหลฟุ้งที่มีขนาดสูงมากส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการลดกระแสไหลฟุ้งจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากในปัจจุบันวงจรตัวเก็บประจุถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในโรงงานต่างๆ ซึ่งการออกแบบและป้องกันจะเป็นการช่วยลดผลกระทบดังกล่าว

จากที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเป็นการใช้วงจรตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบและทำการทดลองเรื่องการลดกระแสไหลฟุ้งโดยใช้การจำลองและการคำนวณเป็นส่วนใหญ่ ปริญญาณีพนธ์นี้เป็นการทดลองเพื่อลดกระแสไหลฟุ้ง (Inrush Current) ในระบบของตัวเก็บประจุโดยใช้ชุดทดลองที่จำลองมาจากระบบไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ ในการศึกษาชิ้นนี้เป็นการเป็นการวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสไหลฟุ้ง (Inrush Current) เมื่อมีการใส่ดีจูนฟิลเตอร์และวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ โดยมีการเปรียบเทียบผลการศึกษาทั้งสองกรณี เพื่อเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในระบบที่เหมาะสมและสามารถนำไปพัฒนาวิธีการลดกระแสไหลฟุ้ง (Inrush Current) ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

ตารางที่ 1.1 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| รูปแบบงานวิจัย | งานวิจัย | วิธี | ข้อมูลเพิ่มเติม | การดำเนินการ |
|---|----------|---|---|----------------------|
| งานวิจัยที่มีการใช้ตัวเก็บประจุการติดต่อเข้าสู่ระบบและใช้ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง | [1][2] | ติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม | ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบและลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเครือข่ายระบบสายส่ง | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [3][4] | ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ | ทำการทดลองติดต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบเพื่อหาผลที่มีต่อโหลดที่มีความอ่อนไหวสูงโดยเน้นเพื่อหาวิธีควบคุมการติดต่อระบบตัวเก็บประจุแบบชั่วคราว | วิจัยจำลองผลการทดลอง |
| | [5] | ใช้ตัวเก็บประจุแบบไร้พิวส์ | ได้ผลการทดลองว่าการใช้ตัวเก็บประจุทั้งสามชนิดทำการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [6] | ใช้ตัวเก็บประจุควบคู่ไปกับการใช้ระบบป้องกันปรับค่าได้ | และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังโดยมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกันมาก | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [7][8] | ใช้ตัวเก็บประจุแรงดันสูง | | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [9] | ใช้วงจรตัวเก็บประจุที่ต่อแบบเดลต้า | เป็นตัวเก็บประจุ 3 เฟส มีจุดมุ่งหมายให้นำไปพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมแรงดันต่ำ | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [10] | ใช้ตัวเก็บประจุที่สามารถเปลี่ยน | สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |

| | | | | |
|--|-------------|--|--|----------------------|
| | | พลังงานได้ | ได้เพื่อทำการสำรองพลังงานไฟฟ้า | |
| | [11] | ใช้ตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ | ทำการจำลองการตัดต่อตัวเก็บประจุแรงดันต่ำเข้าสู่ระบบในระยะฮาร์ดมอนิกต่างกัน | วิจัยจำลองผลการทดลอง |
| งานวิจัยที่ติดตั้งตัวเก็บประจุและใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นในการช่วยควบคุมกระแสไหลฟุ้ง | [12] - [14] | ใช้ตัวจำกัดการตัดต่อตัวเก็บประจุชั่วคราวแบบไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว | ตัวจำกัดการตัดต่อชนิดนี้มี 2 วิธีการทำงาน คือวิธีการจำกัดซึ่งทำการจำกัดกระแสไหลฟุ้งและวิธีการปล่อยผ่านซึ่งทำตัวเหมือนลัดวงจรโดยไม่มีผลกระทบต่อวงจร | วิจัยจำลองผลการทดลอง |
| | [15] [16] | ใช้ตัวเก็บประจุต่อผ่านสายไฟฟ้าใต้ดิน | โดยผลการทดลองที่ได้ขึ้นอยู่กับความยาวของสายไฟฟ้าใต้ดิน ได้ผลว่าตัวเก็บประจุทำให้เกิดการเสียหายต่ออุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้าทำการต่อดีจูนฟิลเตอร์เข้ากับระบบตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไหลฟุ้งโดยตรง | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [17] [18] | ไมโครโปรเซสเซอร์ | ทำการจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อกำหนดเวลาการตัดต่อของตัวเก็บประจุ ทำให้ทราบว่ามีกรลดลงของกระแสไหลฟุ้งจริง ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์และ | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |

| | | | | |
|--|-------------|-----------------------------------|--|--------------------|
| | | | กระแสที่จุดศูนย์ของระบบ | |
| | [19] | ดีจูนฟิสเตอร์ | ทำการต่อดีจูนฟิสเตอร์เข้ากับระบบตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไหลพุ่งโดยตรง | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |
| | [20] - [22] | ตัวต้านทานขนานสวิตช์ | นำตัวต้านทานมาต่อกขนานกับวงจรก่อนเข้าตัวเก็บประจุ | |
| | [23] - [24] | รีแอคเตอร์จำกัดกระแส | ลดผลของสัญญาณชั่วขณะในขณะตัดต่อตัวเก็บประจุและป้องกันการสั้นพ้อง | |
| | [25] - [27] | รีแอคเตอร์ 6% | คำนวณค่ารีแอคแตนซ์ให้ได้ 6% ของรีแอคแตนซ์ในระบบตัวเก็บประจุเพื่อลดการสั้นพ้อง | |
| งานวิจัยที่ใช้การควบคุมการตัดต่อเพื่อทำการหาวิธีการตัดต่อที่ทำให้เกิดการลดกระแสไหลพุ่ง | [28] [29] | ควบคุมค่าความต้านทานก่อนการตัดต่อ | ทำการใช้การจำกัดแรงดันเพื่อควบคุมค่าความต้านทานก่อนการตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบเพื่อป้องกันผลเสียที่เกิดขึ้นต่อระบบเมื่อตัดต่อตัวเก็บประจุ | วิจัยในส่วนอุปกรณ์ |

| | | | | |
|---|------|------------------------------|---|--|
| | [30] | ควบคุมการตัดต่อ สองระดับ | การตัดต่อระดับที่สองมี กำลังไฟฟ้าเสมือน มากกว่าระดับที่หนึ่ง ประมาณสองเท่า | วิจัยในส่วน อุปกรณ์ |
| | [31] | ควบคุมการตัดต่อ หลายระดับ | ทำลองทำการตัดต่อตัว เก็บประจุ5ระดับเพื่อ ศึกษากระแสไหลฟุ้งที่ เกิดขึ้นในขณะที่ตัดต่อ | วิจัยในส่วน อุปกรณ์ |
| งานวิจัยที่ใช้การ คำนวณ การประมาณ ค่าและการจำลองเพื่อ ดูแนวโน้มของกระแส ไหลฟุ้ง | [32] | การแปลงค่าของ สต็อคเวล | คำนวณค่ากระแสไฟลฟุ้ง และแรงดันสัญญาณ ชั่วขณะเมื่อทำการตัดต่อ ตัวเก็บประจุกับภาระ ทางไฟฟ้า | คำนวณและ วิจัยจำลอง ผลการ ทดลอง |

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของการเกิดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดจากการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
2. ศึกษาวิธีการลดขนาดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
3. ออกแบบและจัดทำชุดสาธิตการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ
4. จัดทำชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมมุมที่ต้องการให้เกิดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ
5. ออกแบบและติดตั้งชุดดีจูนฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับวงจรตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเกิดกระแสไหลฟุ้งขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบมีสามลำดับขั้น โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุเป็นโหลดของระบบ การเก็บข้อมูลทำโดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อมีการตัดต่อในแต่ละลำดับขั้นเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ค่ามุมเฟสที่มีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ, ขนาดกระแสไหลฟุ้ง, เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ และ ขนาดกระแสที่สภาวะคงที่ โดยจัดทำชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมมุมที่ต้องการให้เกิดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุและออกแบบวิธีการลดกระแสไหลฟุ้ง (Inrush Current) ที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ด้วยวิธีการติดตั้งรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้ากับวงจรตัวเก็บประจุเพื่อจำกัดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นให้มีขนาดลดลงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับขนาดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุโดยไม่มีการติดตั้งรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้ากับวงจรตัวเก็บประจุ

1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์

1. ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรตัวเก็บประจุ ดีจูนฟิลเตอร์ รีแอคเตอร์และวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ แล้วนำข้อมูลมาเรียบเรียงและสรุปข้อมูลที่ต้องใช้ในปริญญาานิพนธ์
2. การออกแบบชุดสาธิต โดยมีการเขียนแบบแปลนของตู้ทั้งหมด
3. ออกแบบวงจรควบคุม พร้อมทั้งวางรูปแบบการติดตั้งวงจรตัวเก็บประจุ และเครื่องตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ โดยพิจารณาวัสดุจากจุดประสงค์ของการทดลองและความปลอดภัยเป็นสำคัญ

4. ทำรายชื่ออุปกรณ์ที่ต้องใช้รวมทั้งวาดแบบการเดินสายตลอดจนการติดตั้งอุปกรณ์ แล้วจึงนำค่าของอุปกรณ์แต่ละชนิดมาเขียนแบบตู้ชุดสถานีชั้นสมบูรณ์ต่อไปเพื่อนำไปจัดสร้างตามที่กำหนดไว้
5. การจัดสร้างชุดสถานีและทำการทดลองเพื่อเก็บผลการศึกษาปริญญาโท โดยนำรายชื่ออุปกรณ์ที่ได้ทำไว้ไปจัดซื้อตามที่พิจารณาไว้ แล้วจึงนำอุปกรณ์ที่ได้ไปติดตั้งในตู้ตามแบบแปลนที่ออกแบบไว้
6. ทำการทดลองการทำงานของตู้ โดยตรวจสอบการทำงานของดีจูนฟิลเตอร์และเครื่องตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ว่าทำงานตรงตามจุดประสงค์หรือไม่ ถ้าเกิดข้อผิดพลาดก็มีการตรวจสอบปัญหาและทำการแก้ไข
7. ทำการทดสอบอีกครั้ง เมื่อสมบูรณ์แล้วก็มีการทดลองจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบและตรวจสอบว่าลกระแสไหลพุ่ง (Inrush Current) ได้เพียงใด พร้อมกับลักษณะกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในการทดลอง เพื่อนำผลไปวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป

ตารางที่ 1.2 ตารางการดำเนินปริญญานิพนธ์

| การดำเนินงาน | ระยะเวลา | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|------|--|--|--|
| | ส.ค. | | | | ก.ย. | | | | ต.ค. | | | | พ.ย. | | | | ธ.ค. | | | | ม.ค. | | | | ก.พ. | | | | มี.ค. | | | | เม.ย. | | | | พ.ค. | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| 1. ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับคาปาซิเตอร์แรงค์และวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. ออกแบบและคำนวณหาขนาดของดีจูนฟิลเตอร์ที่เหมาะสมต่อคาปาซิเตอร์แรงค์ที่ติดตั้ง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. ติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์เข้ากับระบบที่มีคาปาซิเตอร์แรงค์ติดตั้งอยู่ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. ทดลองการทำงานของดีจูนฟิลเตอร์และวัดฮาร์มอนิกของระบบ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. ตรวจสอบผลที่ได้ว่าเป็นไปตามสมมุติฐานหรือไม่และดูว่าสามารถพัฒนาได้อีกหรือไม่ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6. ปรับปรุงดีจูนฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบวงจรตัวเก็บประจุ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7. นำผลการทดลองและข้อมูลต่างๆ มาสรุป | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8. วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงงาน | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



แผนที่วางไว้



แผนที่ปฏิบัติจริง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ประโยชน์เชิงวิศวกรรม

- สามารถมีการต่อยอดงานวิจัยเพื่อศึกษาต่อไปในเรื่องการลดกระแสไหลฟุ้งเพื่อนำไปใช้ในการทำงานที่มีการใช้งาน
- นำไปพัฒนาใช้ในทางอุตสาหกรรมการผลิตในโรงงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สูงขึ้น

1.5.2 ประโยชน์เชิงพลังงาน

- ส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและลดพลังงานที่สูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง
- ส่งเสริมวิธีการช่วยลดความต้องการทางไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้า ซึ่งทำให้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุดวงจรตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไหลฟุ้ง ในบทนี้กล่าวถึงคุณลักษณะของวงจรตัวเก็บประจุ การเกิดกระแสไหลฟุ้ง ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุดวงจรตัวเก็บประจุให้สามารถลดกระแสไหลฟุ้งได้ โดยจะอธิบายตามลำดับหัวข้อดังนี้

2.1 วงจรตัวเก็บประจุ

โครงสร้างของวงจรตัวเก็บประจุ โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอาศัยคุณสมบัติของประจุไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อนำแผ่นโลหะสองแผ่นมาวางใกล้กัน พร้อมกับจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองต่างศักย์กัน จะเกิดเส้นแรงไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าทั้งสองแผ่นโลหะดึงดูดกัน การดึงดูดของศักย์ไฟฟ้าจากแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นยังคงมีต่อเนื่องถึงแม้ไม่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองแผ่นโดยจะทำให้เกิดการสะสมพลังงานระหว่างตัวนำทั้งสองซึ่งเป็นคุณลักษณะของตัวเก็บประจุ วงจรตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นตามต้องการ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดกำลังงานสูญเสียในระบบ วงจรตัวเก็บประจุมีความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงหากระบบไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำแสดงว่าค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้างกล่าวข้างต้นมีค่าสูง ซึ่งหน้าที่ของวงจรตัวเก็บประจุทำการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียไป



รูปที่ 2.1 วงจรตัวเก็บประจุ [36]

วงจรตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้า หน้าที่ของวงจรตัวเก็บประจุทำการควบคุมระดับแรงดันของแหล่งจ่ายโดยลดปัญหาการลดลงของระดับแรงดัน (Voltage Drop) เนื่องจากอุปกรณ์

จำพวกตัวเหนี่ยวนำในสถานีไฟฟ้า และเป็นการปรับปรุงการส่งกำลังไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าจุดนั้น ๆ ให้มีประสิทธิภาพ

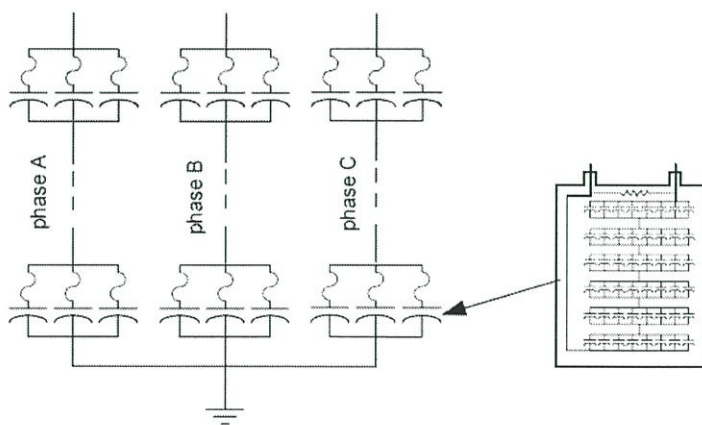
2.1.1 ชนิดของวงจรถั่วเก็บประจุ

วงจรถั่วเก็บประจุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดสามเฟสและชนิดหนึ่งเฟส โดยวงจรถั่วเก็บประจุชนิดสามเฟสเกิดจากการนำวงจรถั่วเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสมาต่อร่วมกันในรูปแบบการต่อแบบวายหรือเดลต้าซึ่งโดยปกติการผลิตวงจรถั่วเก็บประจุผลิตเพียงชนิดหนึ่งเฟสจึงสามารถทำการแบ่งชนิดของวงจรถั่วเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสได้ดังนี้

1. วงจรถั่วเก็บประจุมีมีฟิวส์ภายนอก (Externally Fused)
2. วงจรถั่วเก็บประจุโดยมีฟิวส์ภายใน (Internally Fused)
3. วงจรถั่วเก็บประจุชนิดไม่มีฟิวส์ (Unfuse Capacitor Banks)

2.1.1.1 วงจรถั่วเก็บประจุชนิดมีฟิวส์ภายนอก

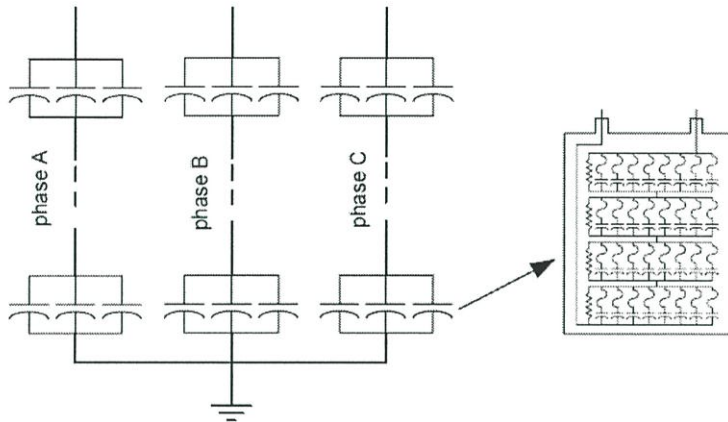
วงจรถั่วเก็บประจุโดยมีฟิวส์ภายนอก โดยวงจรมีฟิวส์ที่ติดตั้งอยู่ภายนอกระหว่างวงจรถั่วเก็บประจุและฟิวส์บัสของวงจรถั่วเก็บประจุ ฟิวส์มีหน้าที่ป้องกันความเสียหายให้กับวงจรถั่วเก็บประจุซึ่งการที่วงจรถั่วเก็บประจุมีฟิวส์ป้องกันนั้นทำให้สามารถออกแบบให้ใช้ในระบบแรงดันไฟฟ้าสูงได้ หากระบบเกิดการลัดวงจรกับวงจรถั่วเก็บประจุชนิดมีฟิวส์ภายนอก ความเสียหายเกิดภายในกลุ่มขานานของวงจรถั่วเก็บประจุ หากวงจรถั่วเก็บประจุกลุ่มหนึ่งเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่ออีกกลุ่มวงจรถั่วเก็บประจุหนึ่งทำให้มีค่าแรงดันสูงเกินพิกัดตกรวมกลุ่มวงจรถั่วเก็บประจุนั้นทำให้ผลความเสียหายส่งผลต่อ ๆ ไปจนทำให้ฟิวส์ทำการตัดวงจรถั่วเก็บประจุนั้นออกจากระบบ



รูปที่ 2.2 วงจรถั่วเก็บประจุมีฟิวส์ภายนอก [37]

2.1.1.2 วงจรตัวเก็บประจุชนิดมีฟิวส์ภายใน

วงจรตัวเก็บประจุชนิดมีฟิวส์ภายใน โดยชุดของวงจรตัวเก็บประจุมีฟิวส์อยู่ภายใน วงจรตัวเก็บประจุนั้น ฟิวส์ที่อยู่ภายในวงจรตัวเก็บประจุทำหน้าที่จำกัดกระแสและสามารถทนความร้อนที่เกิดจากการอาร์กได้ หากเกิดความเสียหายต่อวงจรตัวเก็บประจุหนึ่งฟิวส์ทำหน้าที่ตัดวงจรตัวเก็บประจุนั้นออกจากระบบเพียงตัวเดียวแต่วงจรตัวเก็บประจุอื่น ๆ ในวงจรขนานยังคงทำงานและรับแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูง



รูปที่ 2.3 วงจรตัวเก็บประจุมีฟิวส์ภายใน [37]

2.1.1.3 วงจรตัวเก็บประจุชนิดไม่มีฟิวส์

วงจรตัวเก็บประจุชนิดไม่มีฟิวส์ การเชื่อมต่อวงจรตัวเก็บประจุเชื่อมต่อแบบอนุกรมหรือขนาน เนื่องจากวงจรตัวเก็บไม่มีฟิวส์ในการป้องกันความเสียหายวงจรตัวเก็บประจุชนิดไม่มีฟิวส์ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง

2.1.2 มาตรฐานวงจรตัวเก็บประจุ [38]

วงจรตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าสามารถทำงานภายใต้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ออกแบบมาจากการผลิต ซึ่งวงจรตัวเก็บประจุมีความไวต่อค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ความสัมพันธ์ของวงจรตัวเก็บประจุกับแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสองและแปรผันตรงกับค่าความถี่ มาตรฐาน IEEE 18-1992 และ IEEE 1036-1992 ได้กำหนดมาตรฐานของวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ดังต่อไปนี้

1. ตัวเก็บประจุสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องที่ 110 % ของพิกัดแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง และค่าแรงดันยอดจะมีค่าไม่เกิน 1.2 เท่าของค่ารากที่สองของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองรวมผลของค่าที่เกิดจากฮาร์มอนิก แต่ไม่รวมผลของการเกิดแรงดันชั่วขณะ

2. วงจรตัวเก็บประจุจะจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนไม่ต่ำกว่าค่าพิกัดของวงจรตัวเก็บประจุ แต่ไม่เกิน 115 % ของค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน
3. วงจรตัวเก็บประจุสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง 135 % ของค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ซึ่งรวมผลของค่าต่าง ๆ ดังนี้
 - แรงดันไฟฟ้าที่เกินจากค่าพิกัดของป้ายแต่ไม่เกินค่า 110 % ของค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง
 - แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน

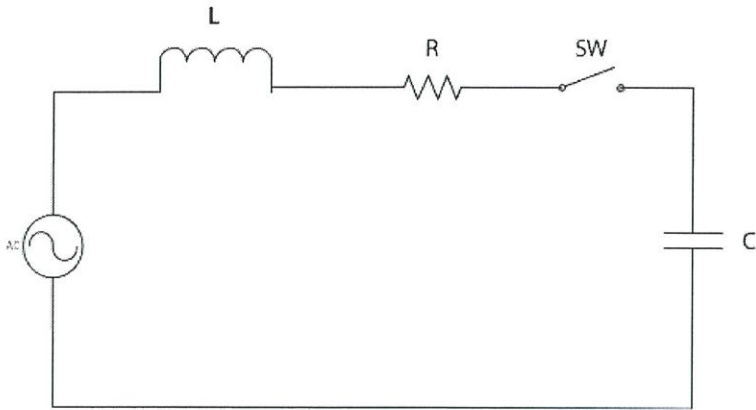
2.2 การตัดต่อของวงจรตัวเก็บประจุ

การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ ในการตัดต่อนี้ทำให้เกิดผลกระทบต่อสัญญาณชั่วขณะในระบบได้แก่ กระแสไหลพุ่ง แรงดันสูงชั่วขณะ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อตัววงจรตัวเก็บประจุและระบบที่ต่อร่วมด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อสัญญาณชั่วขณะสามารถพิจารณาได้จาก [40]

1. ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของสัญญาณที่ตำแหน่งการตัดต่อ
2. ค่าโหลดและความสูญเสียในระบบ
3. ความเร็วในการกระตุ้น (Energization) ของวงจรตัวเก็บประจุ

2.2.1 การกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุเดี่ยว

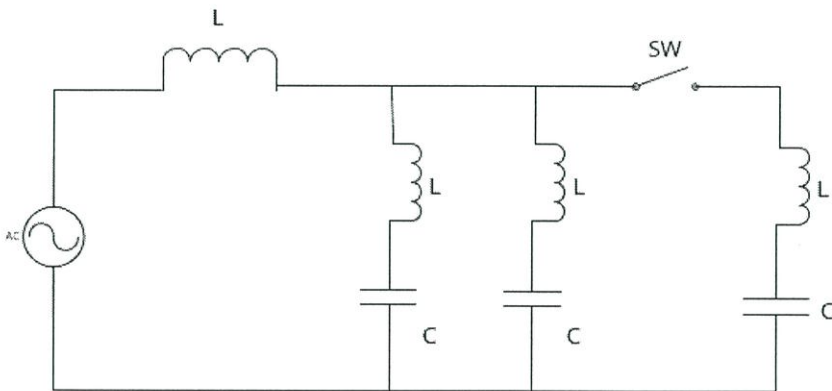
การกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุเดี่ยว (Energizing an Isolated bank) เป็นการตัดต่อของวงจรตัวเก็บประจุหนึ่งวงจรเข้าสู่ระบบโดยไม่มีวงจรตัวเก็บประจุอยู่ในระบบก่อนหน้า โดยเมื่อสวิตซ์ทำการปิดวงจรทำให้กระแสและความถี่ที่มีขนาดสูงไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ตัวเก็บประจุมีค่าแรงดันเท่ากับแรงดันระบบ โดยสวิตซ์หากถูกปิดวงจรที่ตำแหน่งแรงดันยอดของระบบไฟฟ้าทำให้เกิดการกระตุ้นไปยังแรงดันยอดอย่างทันทีทันใดซึ่งทำให้เกิดการพุ่งเกินของแรงดัน (Overshoot) ซึ่งมีขนาดเป็นเท่าตัวของแรงดันยอดโดยมีค่าแรงดันชั่วขณะมีค่าสูงสุดที่ 2.0 ระบบต่อหน่วย และแรงดันชั่วขณะนี้มีค่าความสูงเทียบเท่ากับค่ากระแสไหลพุ่ง ลักษณะของกระแสไหลพุ่งมีค่ายอดที่สูงมากในช่วงระยะเวลาหนึ่งและลดลงอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา เช่นเดียวกับแรงดันชั่วขณะที่เกิดขึ้นโดยลักษณะของแรงดันชั่วขณะมีค่ายอดที่สูงในระยะเวลาหนึ่งและมีการลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ในระยะเวลานั้นๆ หลังจากนั้นมีการเกิดแรงดันชั่วขณะที่มีค่ายอดสูงที่สุดเกิดขึ้นสำหรับค่าความถี่ของกระแสไหลพุ่งและแรงดันชั่วขณะมีค่าไม่สูง



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของการกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุเดี่ยว

2.2.2 การกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุแบบอย่างต่อเนื่อง

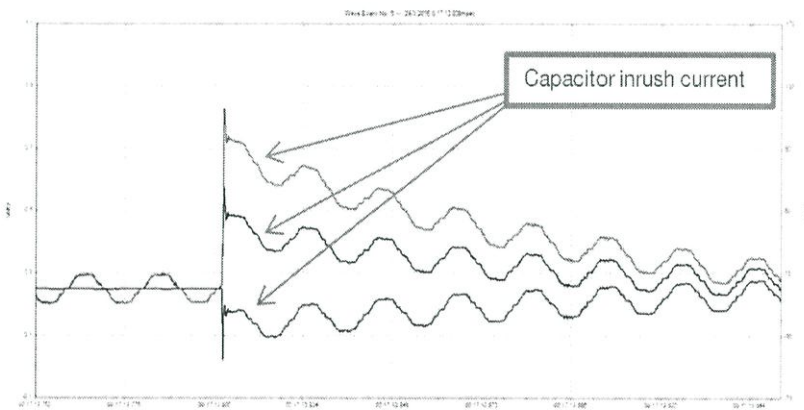
การกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุแบบอย่างต่อเนื่อง (Back-to-Back) เป็นการกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุในขณะที่มีวงจรตัวเก็บประจุตัวอื่นเชื่อมต่อกับระบบอยู่ก่อนแล้ว การตัดต่อลักษณะนี้นั้นจะทำให้เกิดสัญญาณชั่วขณะความถี่สูงจากผลรวมของวงจรตัวเก็บประจุที่ต่อไว้ก่อนหน้าซึ่งมีค่าสูงมากกว่าการกระตุ้นวงจรตัวเก็บประจุเดี่ยว ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันชั่วขณะบนบัสที่มีขนาดและความถี่สูงมาก ค่ากระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นมีค่ายอด 2-3 ระบบต่อหน่วย



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของการตัดต่อแบบอย่างต่อเนื่อง

2.3 กระแสไหลพุ่ง

กระแสไหลพุ่ง คือ กระแสที่เกิดจากการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบโดยขนาดของกระแสไหลพุ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของแรงดันและค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบกับค่าความต้านทานของวงจรตัวเก็บประจุ โดยค่าขนาดของกระแสไหลพุ่งสูงสุดมีขนาด 100-200 เท่าของค่ากระแสปกติ โดยค่ากระแสไหลพุ่งจะมีค่าขนาดที่สูงนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเชื่อมต่อของวงจรตัวเก็บประจุ รูปแบบการตัดต่อ และตำแหน่งของมุมทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าขณะทำการตัดต่อเข้าระบบ กระแสไหลพุ่งที่มีขนาดสูงเกิดจากการที่ระบบมีวงจรตัวเก็บประจุที่ถูกกระตุ้นไปแล้วก่อนอยู่ในระบบ หรือการตัดต่อแบบอย่างต่อเนื่อง วงจรตัวเก็บประจุที่อยู่ในระบบก่อนหน้าจะเกิดการดิสชาร์จกลับไปยังวงจรตัวเก็บประจุที่กำลังจะถูกกระตุ้นทำให้กระแสไหลพุ่งในขณะตัดต่อมีค่าสูงเพิ่มขึ้นไปอีก รวมทั้งความถี่ของกระแสไหลพุ่งมีค่าสูงด้วย และค่ากระแสไหลพุ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่อยู่ในระบบโดยหากมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีค่าสูงอยู่ในระบบจะทำให้ค่าของกระแสไหลพุ่งมีค่าน้อยลง ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของค่ากระแสไหลพุ่งได้ดังภาพนี้



รูปที่ 2.6 กระแสไหลพุ่งขณะทำการตัดต่อคาปาซิเตอร์

ภาพแสดงลักษณะของกระแสไหลพุ่งขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบจำนวน 3 ลำดับ กราฟค่ากระแสไหลพุ่งของการตัดต่อวงจรของลำดับที่หนึ่งจะมีค่ากระแสไหลพุ่งที่มากที่สุด และค่ากระแสไหลพุ่งจะมีค่าลดลงตามลำดับ ค่ากระแสไหลพุ่งของการตัดต่อวงจรของลำดับสามจะมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากในระบบมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอยู่ในระบบเป็นจำนวนมากจากวงจรตัวเก็บประจุที่ตัดต่อวงจรเข้าก่อนหน้า ลักษณะของกราฟจะมีความผิดเพี้ยนไปจากลักษณะดั้งเดิมและจะเข้าสู่ภาวะปกติในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยมีสมการในการคำนวณหากระแสไหลพุ่งดังสมการที่ 2.1

$$I_{inrush} = K \frac{1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}} \text{ sine}(\phi) \tag{2.1}$$

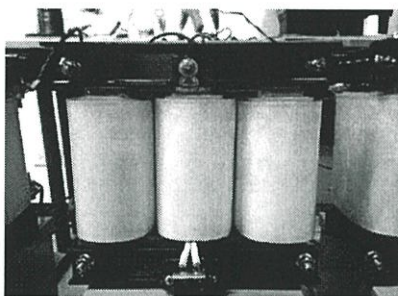
| | | | |
|-------|--------------|---|---|
| เมื่อ | I_{inrush} | = | ค่ากระแสไหลพุ่งสูงสุด (A) |
| | n | = | จำนวนวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมอยู่ก่อนหน้า |
| | Q_n | = | กำลังไฟฟ้าเสมือนวงจรตัวเก็บประจุในลำดับชั้น (kVAR) |
| | Q_1 | = | $Q_2 = Q_{...} = Q_n$ |
| | U | = | แรงดันเฟส (V) |
| | L_n | = | ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในลำดับชั้น (μH) |
| | L_1 | = | $L_2 = L_{...} = L_n$ |
| | K | = | ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz |
| | \emptyset | = | มุมในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ (องศา) |

2.4 การลดกระแสไหลพุ่ง

เมื่อมีการขนานวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้องแบบขนานขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นผลที่ทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกสูงไหลผ่านเข้ามาขยายตัวภายในวงจรตัวเก็บประจุ จนเป็นสาเหตุทำให้วงจรตัวเก็บประจุได้รับแรงดันฮาร์มอนิกสูงทำให้เกิดความเสียหายในลักษณะของการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) และเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กับฉนวนของวงจรตัวเก็บประจุอันเนื่องมาจากผลของความร้อน ดังนั้นการออกแบบติดตั้งวงจรตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันขึ้นเป็นพิเศษสำหรับระบบไฟฟ้า ซึ่งวิธีการลดกระแสไหลพุ่งของวงจรตัวเก็บประจุมีหลายวิธีการ เช่น การใช้เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้องกันการเกิดกระแสกระชากชั่วคราว การใช้ความต้านทานต่อเข้าระบบเพื่อทำการลดค่ากระแส การออกแบบวงจรมอสเฟต (MOSFET) เพื่อควบคุมการเกิดค่ากระแสไหลพุ่งสูงสุด การทำงานจรตรวจจับผ่านศูนย์เพื่อควบคุมมุมทางไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับศูนย์ขณะเชื่อมต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าระบบ และ ดีจูนฟิลเตอร์ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำในการลดค่ากระแสไหลพุ่ง ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำเพื่อป้องกันการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกภายในวงจรตัวเก็บประจุได้ ซึ่งเป็นผลที่ทำให้มีกระแสไหลพุ่งเข้าสู่วงจรตัวเก็บประจุในปริมาณที่ลดลง

2.4.1 รีแอกเตอร์

รีแอกเตอร์ คือ ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับวงจรตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไฟฟ้าในระบบ สามารถต่อในแบบอนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุเพื่อลดกระแสไหลฟุ้งในวงจรตัวเก็บประจุจากการ ตัดต่อเข้าระบบไฟฟ้า ลักษณะของรีแอกเตอร์ภายในประกอบไปด้วยแกนเหล็กที่พันด้วยขดลวดที่เคลือบฉนวนโดยปริมาณรอบของการพันขดลวดขึ้นอยู่กับค่าขนาดของความเหนี่ยวนำในการออกแบบโดย รีแอกเตอร์มีชนิดหนึ่งเฟสและสามเฟส คุณสมบัติของรีแอกเตอร์ทำให้เกิดวงจรการสั้นพ้องแบบขนานและแบบอนุกรมพร้อมกัน โดยวงจรการสั้นพ้องแบบขนานที่เกิดขึ้นนี้มีความถี่การสั้นพ้องแบบขนานที่อยู่ต่ำกว่าความถี่ของทุกฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าจึงไม่เกิดปัญหาการขยายฮาร์โมนิกขึ้น และวงจรการสั้นพ้องแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นทำหน้าที่ช่วยกรองฮาร์โมนิกบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้า การที่ความถี่การสั้นพ้องมีค่าต่ำกว่าความถี่ของทุกฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าทำให้ค่ากระแสที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าลดลง



รูปที่ 2.7 รีแอกเตอร์

2.4.2 การพัฒนางจรตัวเก็บประจุเป็นดีจูนฟิลเตอร์

ดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter) ประกอบไปด้วยวงจรตัวเก็บประจุและรีแอกเตอร์ ประกอบกันซึ่งการทำงานของดีจูนฟิลเตอร์ทำหน้าที่เหมือนวงจรตัวเก็บประจุทุกประการคือการปรับปรุงค่าประกอบกำลังไฟฟ้า และเสริมด้วยความสามารถในการแก้ปัญหาเรื่องการสั้นพ้องแบบขนานได้ โดยรีแอกเตอร์ทำหน้าที่กันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกความถี่สูง ไหลเข้าวงจรตัวเก็บประจุ โดยใช้หลักการทางไฟฟ้าเพิ่มความต้านทานให้สูงขึ้น เมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากความต้านทานของรีแอกเตอร์นี้ จะสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นความต้านทานรวมของชุดดีจูนฟิลเตอร์หมายถึงความต้านทานของรีแอกเตอร์รวมกับความต้านทานของตัวเก็บประจุ ซึ่งสูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่มีความถี่สูงไหลเข้าสู่วงจรตัวเก็บประจุน้อยลงโดยดีจูนฟิลเตอร์เป็นสัดส่วนของความต้านทานของรีแอกเตอร์ต่อความต้านทานตัวเก็บประจุ

2.4.3 วิธีคำนวณออกแบบชุดดีจูนฟิลเตอร์

การหาขนาดของรีแอคเตอร์สามารถทำได้ด้วยการเลือกขนาดสัดส่วนรีแอคเตอร์และต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าและวงจรตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าขนาดของแรงดันค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำของแต่ละความถี่ รวมทั้งข้อจำกัดของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดย IEC 61000-2 กล่าวถึงฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า 415 โวลต์ว่าต้องมีฮาร์มอนิกไม่เกินค่าที่กำหนด เพื่อไม่ให้ก่อความรบกวนให้ระบบไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ใช้แหล่งจ่ายเดียวกัน โดยขีดจำกัดของแต่ละฮาร์มอนิก ต้องเป็นดังนี้

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ต้องไม่เกิน 10% ($U_1 < 10\%$)

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ต้องไม่เกิน 5% ($U_3 < 5\%$)

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ต้องไม่เกิน 6% ($U_5 < 6\%$)

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ต้องไม่เกิน 5% ($U_7 < 5\%$)

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ต้องไม่เกิน 3.5% ($U_{11} < 3.5\%$)

แรงดันของฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ต้องไม่เกิน 3% ($U_{13} < 3\%$)

สำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อติดตั้งรีแอคเตอร์หาได้จากสมการที่ 2.3 และคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำของแต่ละความถี่ได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$U = \frac{U_s}{1-\%p} \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{Q_c}{1-\%p} \quad (2.3)$$

$$X_c = \frac{U_1^2}{Q_1} \quad (2.4)$$

$$X_l = 2\pi fL \quad (2.5)$$

| | | | |
|-------|-------|---|--|
| เมื่อ | U | = | แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) |
| | U_s | = | แรงดันไฟฟ้าของระบบ (V) |
| | %p | = | ค่าเปอร์เซ็นต์ของรีแอคเตอร์ |
| | Q | = | ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อติดตั้งรีแอคเตอร์ (kvar) |
| | Q_c | = | ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ (kvar) |
| | X_l | = | ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเหนี่ยวนำ (Ω) |
| | X_c | = | ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุ (Ω) |

$$\begin{aligned} L &= \text{ค่าตัวเหนี่ยวนำ (H)} \\ C &= \text{ค่าตัวเก็บประจุ (F)} \end{aligned}$$

เมื่อทำการหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่แต่ละความถี่แล้วจะนำมาหาค่ากระแสฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐานค่าจำกัดของฮาร์มอนิกต่างๆ และนำไปหาค่ากระแสค่ารากกำลังสองเฉลี่ยรวมสูงสุดของวงจรตัวเก็บประจุ การหากระแสฮาร์มอนิกหาได้จากสมการ 2.6

$$I_h = \frac{U_s}{\sqrt{3}|X_{lh} - X_{ch}|} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } I_h &= \text{ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ (A)} \\ U_s &= \text{แรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)} \\ X_{lh} &= \text{ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเหนี่ยวนำที่ลำดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ (\Omega)} \\ X_{ch} &= \text{ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุที่ลำดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ (\Omega)} \end{aligned}$$

สามารถทำการหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ เพื่อไปหาค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุได้จากสมการ 2.7

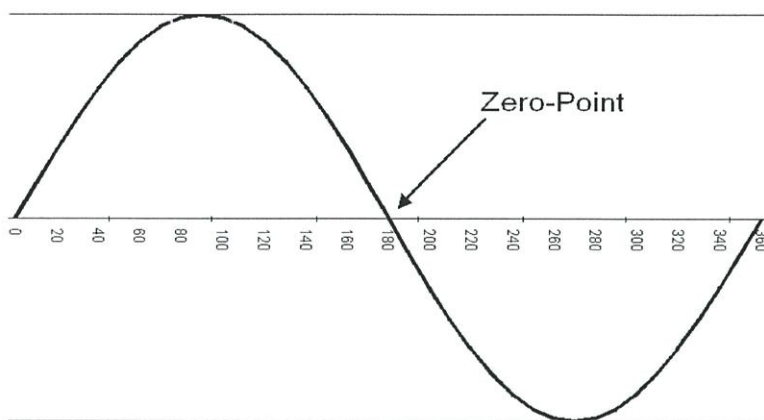
$$U_n = \sqrt{3} I_h \frac{X_c}{h} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } U_n &= \text{ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ (V)} \\ h &= \text{ลำดับฮาร์มอนิก} \end{aligned}$$

2.5 แรงดันผ่านศูนย์

แรงดันผ่านศูนย์เป็นจุดที่มีแรงดันไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับศูนย์ ซึ่งในกราฟจะเกิดแรงดันผ่านศูนย์สองครั้งในหนึ่งรูปคลื่น ตำแหน่งของแรงดันผ่านศูนย์สามารถแสดงได้สามตำแหน่งภายในรูปคลื่นไซน์จำนวนหนึ่งลูกคลื่น ได้แก่ ตำแหน่งที่มีมุมทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 องศา ตำแหน่งที่มีมุมทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 180 องศา และตำแหน่งที่มีมุมทางไฟฟ้าเท่ากับ 360 องศา โดยตำแหน่งที่มีมุมทางไฟฟ้า 360 องศา นั้นคือตำแหน่งมุมเดียวกับค่ามุม 0 จึงกล่าวว่าเป็นตำแหน่งเดียวกันจึงทำให้

ในหนึ่งรูปคลื่นมีค่าแรงดันผ่านศูนย์เพียงสองค่า โดยแรงดันสัญญาณไซน์หนึ่งรูปคลื่นมีช่วงเวลา 20 ms โดยตำแหน่งของแรงดันผ่านศูนย์อยู่ในช่วงเวลา 10 ms และ 20 ms

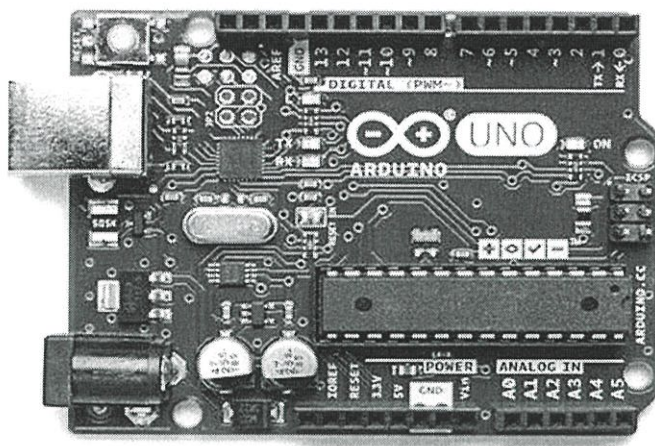


รูปที่ 2.8 กราฟไซน์และจุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

2.5.1 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์นั้นเป็นวงจรไฟฟ้าที่เริ่มการทำงานด้วยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีมุมทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับ 0 องศา หรือ 180 องศา วงจรนี้มีเพื่อควบคุมการเริ่มการทำงานของระบบให้เริ่มทำงานที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้ามีมุมเท่ากับ 0 องศา หรือ 180 องศา ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นกราฟครึ่งรอบคลื่นโดยปกติแล้วใช้ร่วมกับทรานซิสเตอร์และอุปกรณ์ตัดต่อวงจร วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการทำงานซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลากหลายรูปแบบให้ใช้งานขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของงานและความถนัดของผู้ออกแบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์พื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สร้างมาพร้อมใช้งานเพียงแต่ต้องเขียนโปรแกรมและเชื่อมต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบให้สมบูรณ์โดยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทำวงจรตรวจจับผ่านศูนย์คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดแผงวงจร (microcontroller board) โดยบนแผงวงจรมีอุปกรณ์ที่คอยสนับสนุนการทำงานให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างสมบูรณ์ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดีโนอูโน (arduino uno) โดยข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอธิบายดังนี้

ภายในแผงวงจรประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ช่วยในการทำงาน ตัวอย่างเช่น ตัวเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ตัวเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าและปุ่มทำการตั้งค่าใหม่ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกติดตั้งมาเพื่ออำนวยความสะดวกต่อการใช้ในการออกแบบวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ สามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดีโนอูโน (arduino uno) [39]

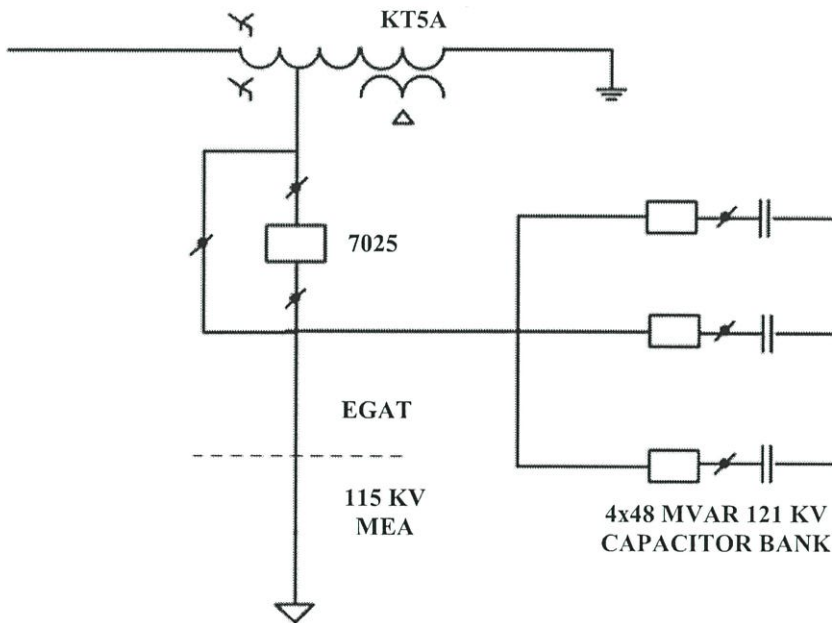
ภาพแสดงลักษณะของไมโครคอนโทรลเลอร์อาดีโนอูโน (arduino uno) โดยแผงวงจรสามารถเขียนข้อมูลและคำสั่งได้ด้วยชุดคำสั่งของอาดีโน โดยระบบการทำงานของแผงไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส 328P แรงดันขาเข้ามีขนาด 7-12 V แรงดันสูงสุดมีค่า 20 V จำนวนขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ 14 คู่ (28 ขา) ประกอบไปด้วย ขาดิจิตอล 14 ขา ขาอนาล็อก 6 ขา ขาพิ้นับเบิ้ลยูเอ็ม 6 ขา ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกโดยสามารถเชื่อมต่อจากช่องทางเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ (USB) ความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์มีจำนวน 32 KB

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 การออกแบบชุดสวิตจิวจรตัวเก็บประจุ

การออกแบบและสร้างชุดสวิตจิวจรได้มีการจำลองมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก โดยสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกมีระดับแรงดันอยู่ที่ 115 kV จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงไดอะแกรมระบบ สถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกซึ่งรับไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยผ่านหม้อแปลง KT5A เพื่อรักษาระดับแรงดันก่อนส่งจ่ายไปยังการไฟฟ้านครหลวง ผ่านชุดอุปกรณ์ป้องกันคือเซอร์กิตเบรกเกอร์ 7025 และมีการเชื่อมต่อกับวงจรตัวเก็บประจุขนาด 48 MVAR พิกัดแรงดัน 11 kV จำนวน 3 ตัว ซึ่งติดตั้งหลังอุปกรณ์ป้องกัน 7025 เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าก่อนส่งจ่ายไปยังการไฟฟ้านครหลวง ชุดสวิตจิวจรตัวเก็บประจุจำลองวงจรตัวเก็บประจุให้อยู่ที่ระดับแรงดัน 415 V และมีการต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับชุดสวิตจิวจรตัวเก็บประจุ เพื่อช่วยในการลดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ และจัดทำชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมมุมทางไฟฟ้าที่ต้องการให้เกิดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.1 การต่อวงจรตัวเก็บประจุบนบัสตัวหลักของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก

3.1.1 ค่าพารามิเตอร์ระบบค่าต่อหน่วย

การคำนวณในระบบค่าต่อหน่วยของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกมีข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ฐานแรงดัน (Voltage Base) มีค่าเท่ากับ 115 kV ฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Voltamp Base) มีค่าเท่ากับ 200 MVA ส่วนค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Impedance Base) มีค่าเท่ากับ 66.125 Ω และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกได้จากขนาดของวงจรตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ที่บัสซึ่งมีขนาด 48 MVAR เมื่อทำการแปลงเป็นระบบเพอร์ยูนิตมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 0.24 p.u. การคำนวณในระบบเพอร์ยูนิตของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

| | | | |
|--------------------|---|-----------------------|----------|
| ฐานแรงดัน | = | 115 | kV |
| ฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ | = | 200 | MVA |
| ฐานอิมพีแดนซ์ | = | $\frac{(115)^2}{200}$ | |
| | = | 66.125 | Ω |

จากขนาดของวงจรตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ที่บัสซึ่งมีขนาด 48 MVAR เมื่อแปลงเป็นระบบเพอร์ยูนิต

| | | | |
|---------------------|---|------------------|------|
| ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน | = | $\frac{48}{200}$ | |
| | = | 0.24 | p.u. |

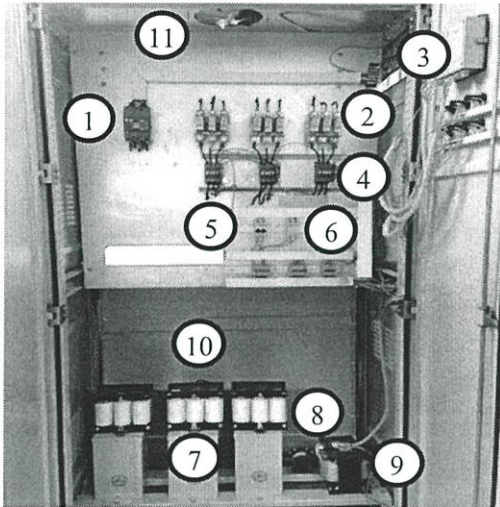
สำหรับการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย ฐานแรงดัน (V Base) มีค่าเท่ากับ 415 V และฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) ค่ากระแสนั้นใช้ค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักของห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าเท่ากับ 30A ทำการคำนวณฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) มีค่าเท่ากับ 21.56 kVA สำหรับขนาดของวงจรตัวเก็บประจุที่ใช้ในชุดสาธิตนั้นคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าเสมือนของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก โดยนำค่าเพอร์ยูนิตมาคูณกับฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏของห้องปฏิบัติการ ผลการคำนวณมีค่าเท่ากับ 5.17 kVAR แต่ตามมาตรฐานการผลิตวงจรตัวเก็บประจุนั้นไม่เหมาะสมที่ผลิตค่าดังกล่าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดวงจรตัวเก็บประจุตามมาตรฐานคือขนาด 5 kVAR ที่ระดับแรงดัน 415 V โดยการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตในห้องปฏิบัติการเพื่อทำการหาขนาดวงจรตัวเก็บประจุ มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

| | | | |
|-------------------------|---|---------------------------------|------|
| ฐานแรงดัน | = | 415 | V |
| ฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ | = | $\sqrt{3} \times 30 \times 415$ | |
| | = | 21.56 | kVA |
| ขนาดของวงจรตัวเก็บประจุ | = | 0.24×21.56 | |
| | = | 5.17 | kVAR |

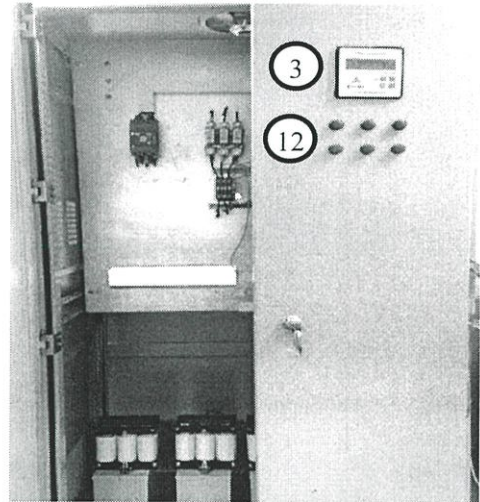
ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดวงจรตัวเก็บประจุตามมาตรฐานคือขนาด 5 kVAR ที่ระดับแรงดัน 415 V

3.1.2 อุปกรณ์ในชุดสาธิต

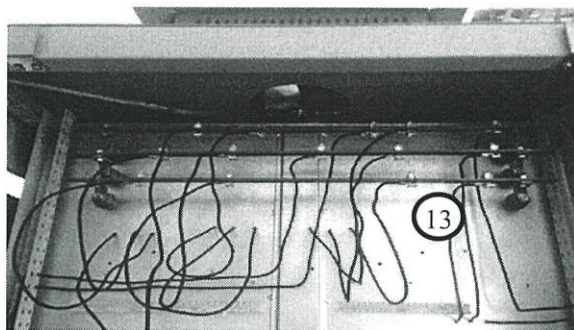
อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีในชุดการทดลองนั้น โดยรายละเอียดได้อธิบายไว้จากรูป 3.2 ออกแบบโดยต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยและความเหมาะสมในการติดตั้ง เพื่อให้การทดลองสามารถเก็บข้อมูลได้ตรงตามที่ต้องการและมีความปลอดภัยต่อผู้ทดลอง อันเนื่องมาจากขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ในช่วงเวลาขณะนั้นจะมีกระแสพุ่งสูงมากซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายต่อผู้ทดลองและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของชุดสาธิตได้



ก) อุปกรณ์ภายในชุดสาธิต



ข) ตัวควบคุมประกอบกำลังของชุดสาธิต



ค) บัสบาร์ของชุดสาธิต

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ของชุดสาธิตการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

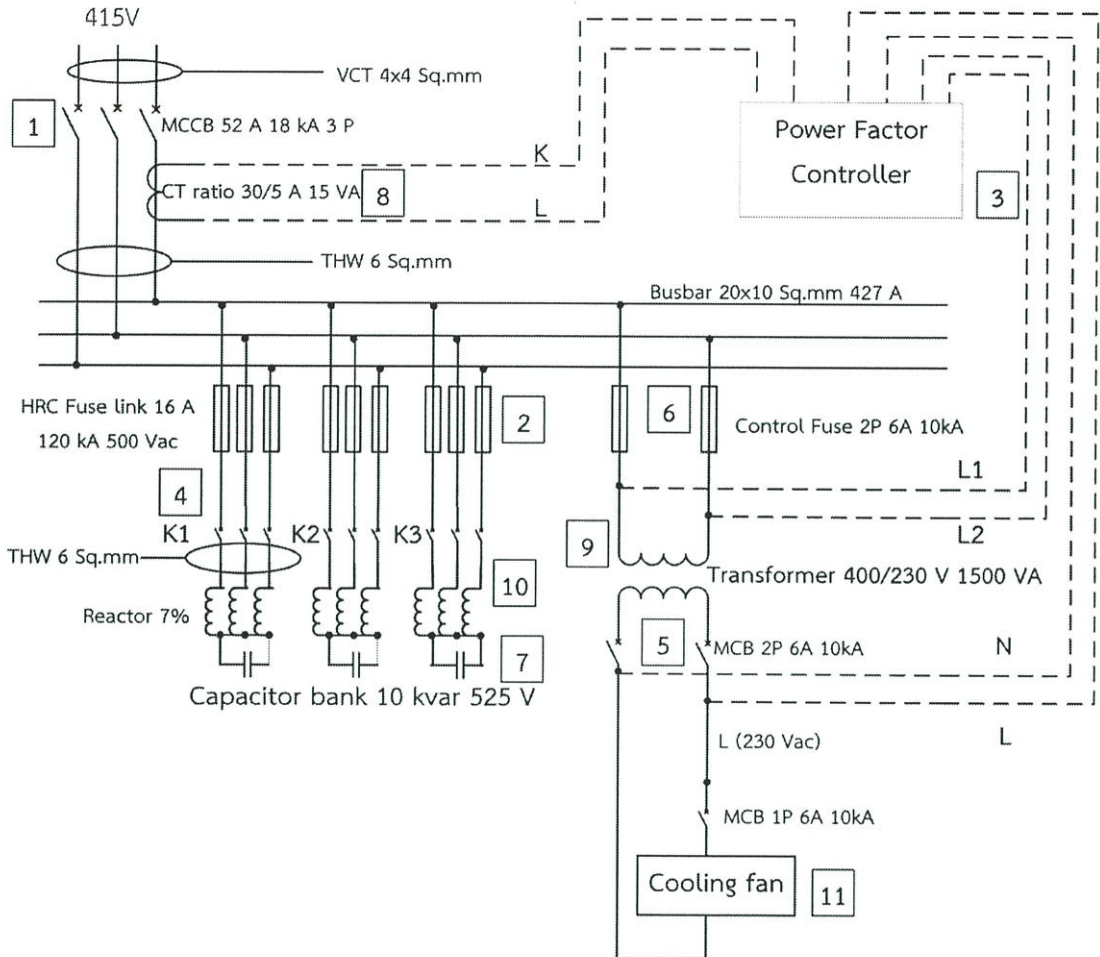
- หมายเลข 1 คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ 32A 18kA 3P
 หมายเลข 2 คือ ฟิวส์ชนิดไบเมต HRC 16A 120kA 500Vac
 หมายเลข 3 คือ ตัวควบคุมประกอบกำลังรุ่น BR6000-R6
 หมายเลข 4 คือ แมกเนติกคอนแทคเตอร์รุ่น UA30-30-10
 หมายเลข 5 คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ 2P 6A 10kA
 หมายเลข 6 คือ ฟิวส์ 2P 6A 10kA
 หมายเลข 7 คือ วงจรตัวเก็บประจุรุ่น CLMD 43 5KVAR 415V 50Hz
 หมายเลข 8 คือ หม้อแปลงกระแส Mitsubishi CW-15LP 30:5 A
 หมายเลข 9 คือ หม้อแปลงแรงดัน 400/230 V 1500VA
 หมายเลข 10 คือ รีแอกเตอร์ 7% 400 V
 หมายเลข 11 คือ พัดลมระบายอากาศ
 หมายเลข 12 คือ หลอดไฟแสดงสถานะขุดสาธิต
 หมายเลข 13 คือ บัสบาร์ ขนาด 20x10 sq.mm 427 A

3.1.3 วงจรของขุดสาธิต

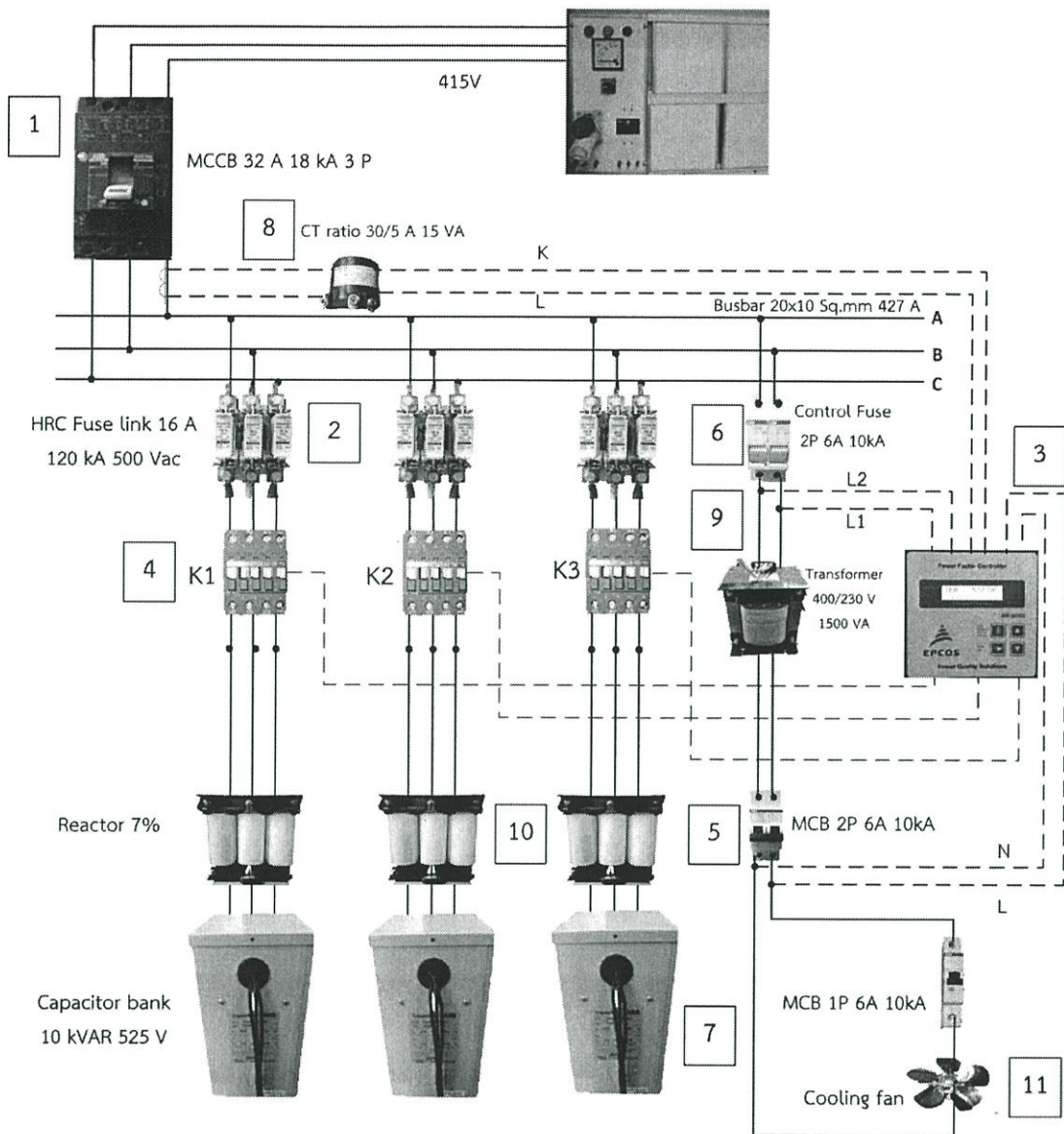
การทำงานของขุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุในโครงการวิจัยนี้ ทำงานโดยรับแรงดันจากห้องปฏิบัติการที่มีระดับแรงดัน 415 V เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับขุดสาธิต ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Controller) ทำหน้าที่วัดแรงดันและกระแสในขุดสาธิต จากนั้นนำไปคำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแล้วประมวลผลกับค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ จึงส่งสัญญาณควบคุมให้หน้าสัมผัส (Contactor) สังกัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าทำงาน โดยมีการแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ วงจรกำลังและวงจรควบคุม

ในส่วนของวงจรกำลังของขุดสาธิตนั้นมีหลักการทำงานคือรับไฟฟ้าจากระบบของห้องปฏิบัติการที่มีขนาดแรงดัน 3 เฟส 415 V โดยผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักของขุดสาธิตขนาด 32 A (ดังแสดงในหมายเลข 1 ของรูปที่ 3.4) ทำหน้าที่ตัดต่อไฟฟ้าจากระบบห้องปฏิบัติการเข้าสู่ขุดสาธิต ซึ่งมีบัสบาร์เป็นตัวนำเชื่อมต่อไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ จากนั้นวงจรที่เชื่อมต่อกับบัสบาร์ของขุดสาธิต แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นระบบระบายความร้อนแก่ขุดสาธิตโดยมีหม้อแปลงแรงดัน(ดังแสดงในหมายเลข 9 ของรูปที่ 3.4) ทำหน้าที่ลดระดับแรงดัน 415 V ของห้องปฏิบัติการให้เป็น 1 เฟส 230 V จ่ายไฟให้พัดลม (ดังแสดงในหมายเลข 11 ของรูปที่ 3.4) ทำงานเพื่อระบายความร้อนแก่ขุดสาธิต และยังเป็นไฟเลี้ยงให้แก่ ตัวควบคุมประกอบกำลัง (Power factor controller) (ดังแสดงในหมายเลข 3 ของรูปที่ 3.4) ในส่วนที่สองเป็นวงจรที่ใช้ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุมีทั้งหมด 3 ลำดับชั้น ซึ่งแต่ละลำดับชั้นมีฟิวส์ไบเมต (ดังแสดงในหมายเลข 2 ของรูปที่ 3.4) เป็นอุปกรณ์ป้องกันให้แก่วงจรตัวเก็บประจุ (ดังแสดงในหมายเลข 7 ของรูปที่ 3.4) โดยมีแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1, K2, K3 (ดังแสดงในหมายเลข 4 ของรูปที่ 3.4) รับสัญญาณคำสั่งจากตัว

ควบคุมประกอบกำลังเพื่อทำหน้าที่ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุแต่ละลำดับชั้นในชุดสวิตช์ โดยวงจรกำลังของชุดสวิตช์แสดงดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

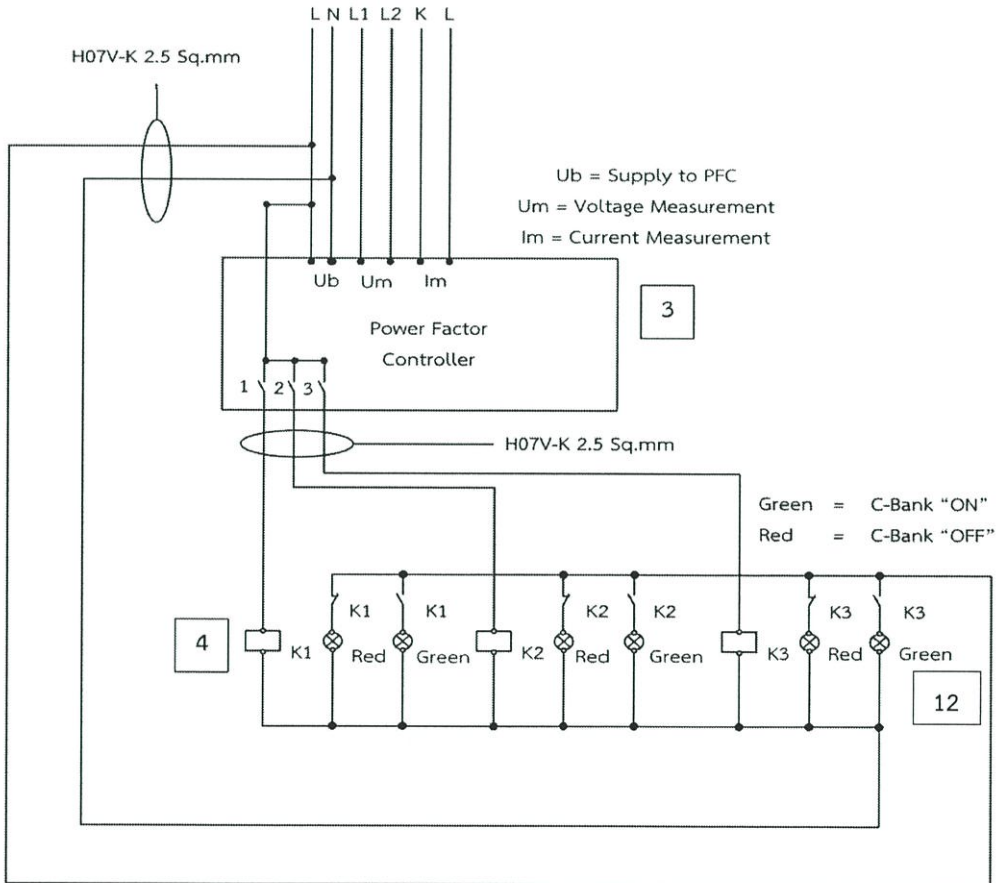


รูปที่ 3.3 วงจรกำลังของชุดสวิตช์ระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ



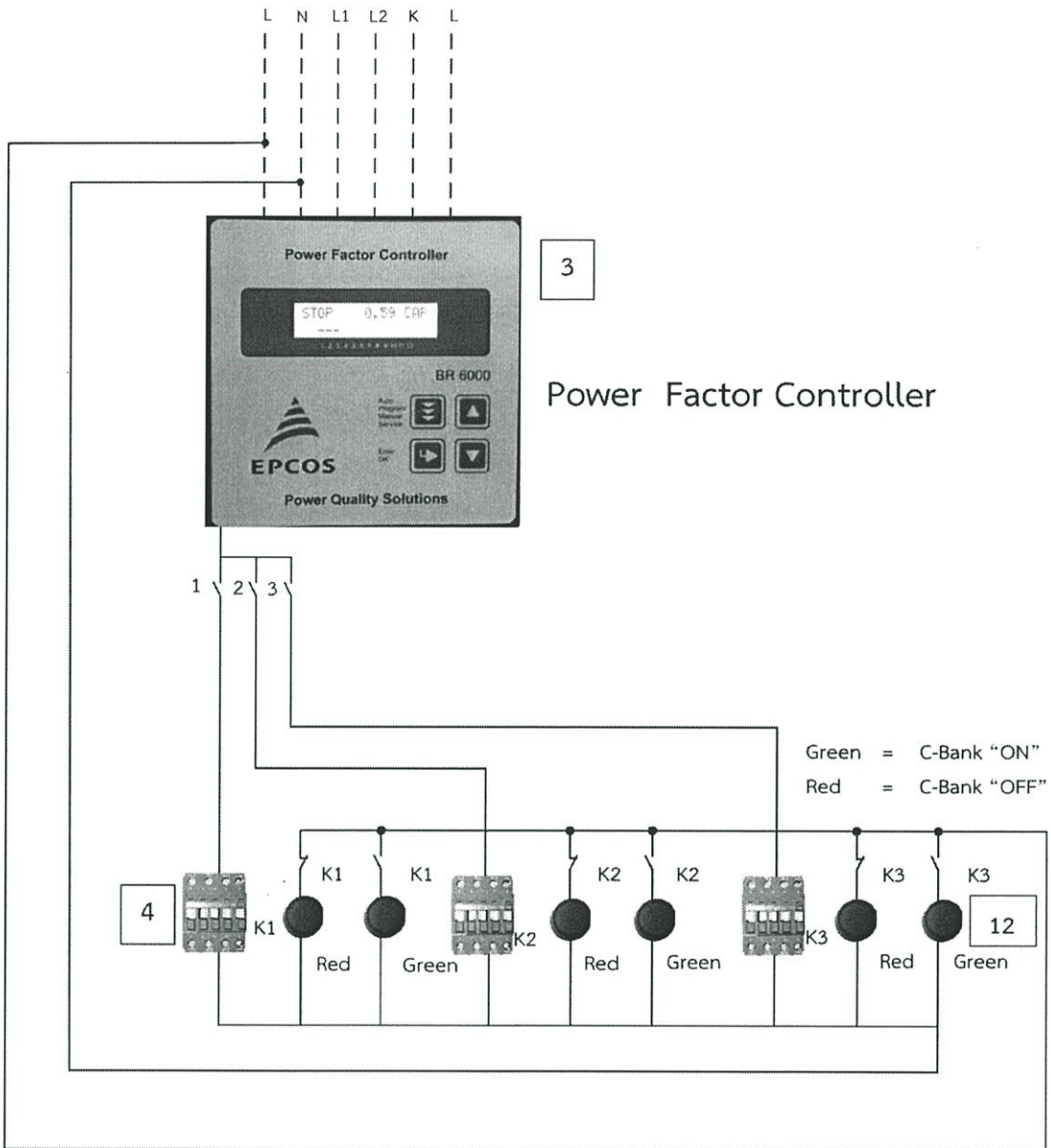
รูปที่ 3.4 วงจรกำลังของชุดสชาติระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

สำหรับวงจรควบคุมภายในชุดสาธิต มีหลักการทำงานโดยมีแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ทั้งสามตัว K1 K2 และ K3 (ดังแสดงในหมายเลข 4 ของรูปที่ 3.4) ซึ่งมีหน้าที่ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บ ประจุมีการเชื่อมต่อกับหลอดไฟสีเขียวและสีแดง (ดังแสดงในหมายเลข 12 ของรูปที่ 3.4) เพื่อ แสดงสถานะว่าขณะนั้นมีการเชื่อมต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบหรือไม่ ซึ่งหลอดไฟสีแดงหมายถึง ไม่มีการเชื่อมต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ ส่วนหลอดไฟสีเขียวหมายถึงมีการเชื่อมต่อวงจรตัว เก็บประจุเข้ากับระบบ เมื่อตัวควบคุมตัวประกอบกำลังได้รับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ส่วนคือค่ากระแส ของระบบจากหม้อแปลงกระแส (หมายเลข 8 ดังแสดงในรูปที่ 3.4) และค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบ จากหม้อแปลงแรงดัน (หมายเลข 9 ดังแสดงในรูปที่ 3.4) จากนั้นตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า นำ ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมาประมวลผล ถ้าหากว่ามีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมประกอบกำลังจะส่งสัญญาณคำสั่งให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ ระบบ ทำให้หลอดไฟสีแดงที่ติดอยู่ดับลง และเป็นหลอดไฟสีเขียวติดแทนเพื่อแสดงสถานะว่ามีการ เชื่อมต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นนั้นเชื่อมต่อกับระบบแล้ว โดยวงจรควบคุมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมของชุดสาธิตระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

- โดยที่ Ub หมายถึง จุดต่อสำหรับแหล่งจ่ายไฟให้ตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง
 Um หมายถึง จุดต่อสำหรับการวัดแรงดัน
 Im หมายถึง จุดต่อสำหรับการวัดกระแส



รูปที่ 3.6 วงจรควบคุมของชุดสาริระบบตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

3.2 การตัดแปลงวงจรตัวเก็บประจุให้เป็นติจูนฟิลเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ของระบบประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้าของระบบ 415 V ขนาดของวงจรตัวเก็บประจุ 5 kVAR 415 V 3 เฟส ทำการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุโดยเลือกเลือกใช้รีแอคเตอร์ขนาด 7% ซึ่งในส่วนของ การคำนวณใช้สมการอ้างอิงในส่วนของทฤษฎีที่กล่าวไว้โดยแสดงการคำนวณดังนี้

$$\text{แรงดันตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุ} = \frac{400}{1-0.07} = 446.24 \quad \text{V}$$

$$\text{ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ} = \frac{5}{1-0.07} = 5.38 \quad \text{kVAR}$$

$$\text{ค่าความต้านทางเชิงความจุ (Xc)} = \frac{446.24^2}{5.38 \times 1000} = 37.01 \quad \Omega$$

$$\text{ค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำ (XL)} = 0.07 \times 37.01 = 2.59 \quad \Omega$$

คำนวณหาค่าความต้านทางเชิงความจุ (Xc) และค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำ (XL) ที่แต่ละความถี่ของฮาร์มอนิกดังนี้

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ความถี่ 50 Hz} \quad X_{c1} = 37.01 \quad \Omega \quad X_{L1} = 2.59 \quad \Omega$$

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ความถี่ 150 Hz} \quad X_{c3} = 12.34 \quad \Omega \quad X_{L3} = 7.77 \quad \Omega$$

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ความถี่ 250 Hz} \quad X_{c5} = 7.40 \quad \Omega \quad X_{L5} = 12.59 \quad \Omega$$

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ความถี่ 350 Hz} \quad X_{c7} = 5.29 \quad \Omega \quad X_{L7} = 18.13 \quad \Omega$$

จากขีดจำกัดของแต่ละฮาร์มอนิกอ้างอิงในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่กำหนดไว้คือ $U_1 = 6\%$, $U_3 = 0.5\%$, $U_5 = 5\%$ และ $U_7 = 5\%$ คำนวณหากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่เกิดขึ้นได้สูงสุดอ้างอิงสมการ 2.6 ในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 $U_1 = 6\%$

$$I_1 = \frac{(1.06 \times 415)}{(\sqrt{3} \times |37.01 - 2.59|)} = 7.37 \quad \text{A}$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 $U_3 = 0.5\%$

$$I_3 = \frac{(0.005 \times 415)}{(\sqrt{3} \times |12.34 - 7.77|)} = 0.26 \quad \text{A}$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 $U_5 = 5\%$

$$I_5 = \frac{(0.05 \times 415)}{(\sqrt{3} \times |7.40 - 12.59|)} = 2.31 \quad \text{A}$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 $U_7=5\%$

$$I_7 = \frac{(0.05 \times 415)}{(\sqrt{3} \times |5.29 - 18.13|)} = 0.93 \quad A$$

กระแสอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกทั้งหมด

$$= \sqrt{7.37^2 + 0.26^2 + 2.31^2 + 0.93^2} = 7.78 \quad A$$

7% รีแอกเตอร์ ที่มาติดตั้งต้องทนกระแสได้

$$= 1.05 \times 7.78 = 8.17 \quad A$$

ดังนั้นจากการคำนวณข้างต้นต้องใช้ 7% รีแอกเตอร์ที่มีความต้านทาน 2.59 Ω หรือค่าความเหนี่ยวนำ 0.653 mH และต้องทนกระแสได้ 8.17 A ได้เป็นอย่างดีน้อย ส่วนชุดดีจูนฟิลเตอร์แต่ละ ลำดับชั้นต้องทนกระแสได้อย่างน้อย 7.78 A

การเลือกตัววงจรตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับ 7% รีแอกเตอร์และทนกระแสได้ไม่น้อยกว่าที่คำนวณไว้ สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือ แรงดันที่ตกคร่อมตัววงจรตัวเก็บประจุหลังจากติดตั้งติดตั้ง 7% รีแอกเตอร์แล้ว เมื่อวงจรตัวเก็บประจุเดิมขนาด 5 kVAR 415V มีความต้านทานเท่ากับ 34.45 โอห์ม แต่เมื่อติดตั้ง 7% รีแอกเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่รีแอกเตอร์ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมและค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุเป็น 446.24V และ 53kVAR ตามลำดับ ทำให้ค่าความต้านทานของ วงจรตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 37.01 โอห์ม จากค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่คำนวณไว้ข้างต้นกระแสดังกล่าวมาคูณกับค่าความต้านทานเพื่อหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่ตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุอ้างอิงสมการที่ 2.7 สามารถคำนวณได้ดังนี้

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 $U_1=6\%$

$$U_1 = \sqrt{3} \times 7.37 \times \frac{37.01}{1} = 472.44 \quad V$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 $U_3=0.5\%$

$$U_3 = \sqrt{3} \times 0.26 \times \frac{37.01}{3} = 5.55 \quad V$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 $U_5=5\%$

$$U_5 = \sqrt{3} \times 2.13 \times \frac{37.01}{5} = 27.30 \quad V$$

ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 $U_7=5\%$

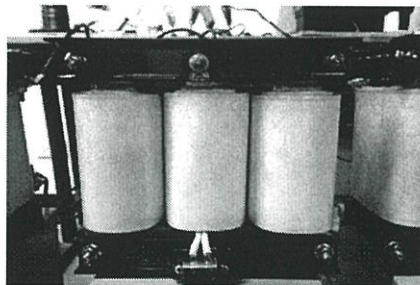
$$U_7 = \sqrt{3} \times 0.93 \times \frac{37.01}{7} = 8.51 \quad \text{V}$$

แรงดันสูงสุดที่จะตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุเท่ากับ $472.44 + 5.55 + 27.30 + 8.51 = 513.8 \text{ V}$ โดยแรงดันดังกล่าวรวมทั้งแรงดันที่เหนี่ยวนำจาก 7% รีแอกเตอร์และแรงดันที่เกิดขึ้นจากผลกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่วงจรตัวเก็บประจุ ต้องเลือกวงจรตัวเก็บประจุที่สามารถแรงดันสูงกว่า 513 V เนื่องจากในท้องตลาดประเทศไทยมีวงจรตัวเก็บประจุที่พิกัด 525 V นำค่าแรงดันไฟฟ้านี้มาคำนวณเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ สามารถคำนวณได้ดังนี้

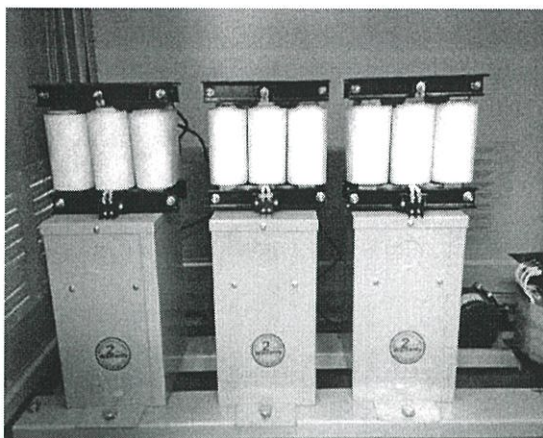
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุที่ 525 V

$$= \frac{525^2}{37.01} = 7.45 \quad \text{kVAR}$$

เมื่อมีการติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์จึงทำการเลือกใช้วงจรตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับ 7.45 kVAR และเลือกใช้วงจรตัวเก็บประจุ 3 ลำดับชั้นโดยวงจรตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นรุ่น CLMD 43 จำนวน 3 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนขนาด 10 kVAR ที่ระดับแรงดัน 525 V ความถี่ 50 Hz มีลักษณะการเชื่อมต่อภายในแบบวายไม่ลงกราวด์ (Ungrounded Wye capacitor bank) และมีการติดตั้งตัวต้านทานดิสซาร์จที่ตัววงจรตัวเก็บประจุ สามารถดิสซาร์จจนระดับแรงดันอยู่ที่ 50 V ภายในระยะเวลา 1 นาที โดยรีแอกเตอร์ขนาด 7% ที่ใช้ในชุดสาธิตแสดงดังรูปที่ 3.7 และวงจรตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับอนุกรมทางไฟฟ้ากับรีแอกเตอร์ 7% แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 รีแอกเตอร์ขนาด 7%



รูปที่ 3.8 รีเลย์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้ากับวงจรตัวเก็บประจุ

3.3 ชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

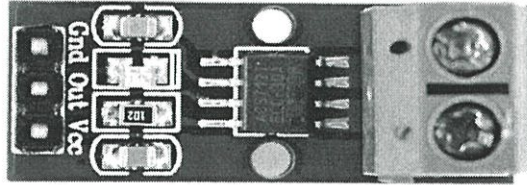
สำหรับชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดแผงวงจร (Microcontroller board) โดยได้ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกมาทำงานร่วมกับแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ ตัวตรวจจับกระแส (Current sensor) ทำการเชื่อมต่อเข้าในช่วงของขาเข้า (Input) ของแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของด้านขาออก (Output) ทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัดต่อวงจร (Relay) หลักการทำงานของชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์มีขั้นตอนวิธีทำงานโดยทำการเขียนคำสั่งที่แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่ากระแสของระบบจากตัวตรวจจับกระแส เมื่อตัวตรวจจับกระแสรับค่าเท่ากับศูนย์แอมแปร์ศูนย์แอมแปร์วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณทางไฟฟ้าด้านขาออกไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัดต่อวงจร (Relay) เพื่อทำหน้าที่ตัดต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ

3.3.1 ตัวตรวจจับกระแส

ตัวตรวจจับกระแสชนิด 30A เบอร์ ACS712 สำหรับเชื่อมต่อกับแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะให้สัญญาณออกมาเป็นค่าสัญญาณอนาล็อก (Analog) ใช้ต่อร่วมกับแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์กับขาชนิดอนาล็อก (Analog pin) โมดูลนี้ใช้วงจรรวมเชิงเส้น (Integrated circuit) เบอร์ ACS712-05 ตรวจวัดกระแส โดยคุณสมบัติของตัวตรวจจับกระแสชนิด 30A เบอร์ ACS712 มีดังนี้

1. วัดกระแสได้ในย่าน -30 ถึง +40 A (วัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง)
2. ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 5 V
3. ความรวดเร็ว (Sensitivity) 66 mV/A

- 4. ช่วงเวลาขาขึ้นในการตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าขาเข้า 5 μ s
- 5. ความกว้างของย่านความถี่ (Bandwidth) 80 kHz



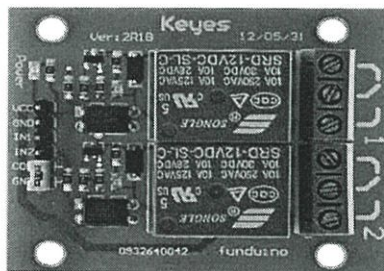
รูปที่ 3.9 ตัวตรวจจับกระแสชนิด 30A เบอร์ ACS712

3.3.1.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัดต่อวงจร (Relay)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัดต่อวงจร (Relay) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ตัดต่อวงจรแบบเดียวกับตัดต่อ โดยควบคุมการทำงานด้วยไฟฟ้า การตัดต่อวงจรมีหลายประเภท ตั้งแต่การตัดต่อวงจรขนาดเล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปจนถึงการตัดต่อวงจรขนาดใหญ่ที่ใช้ในงานไฟฟ้าแรงสูงภายในการตัดต่อวงจร (Relay)

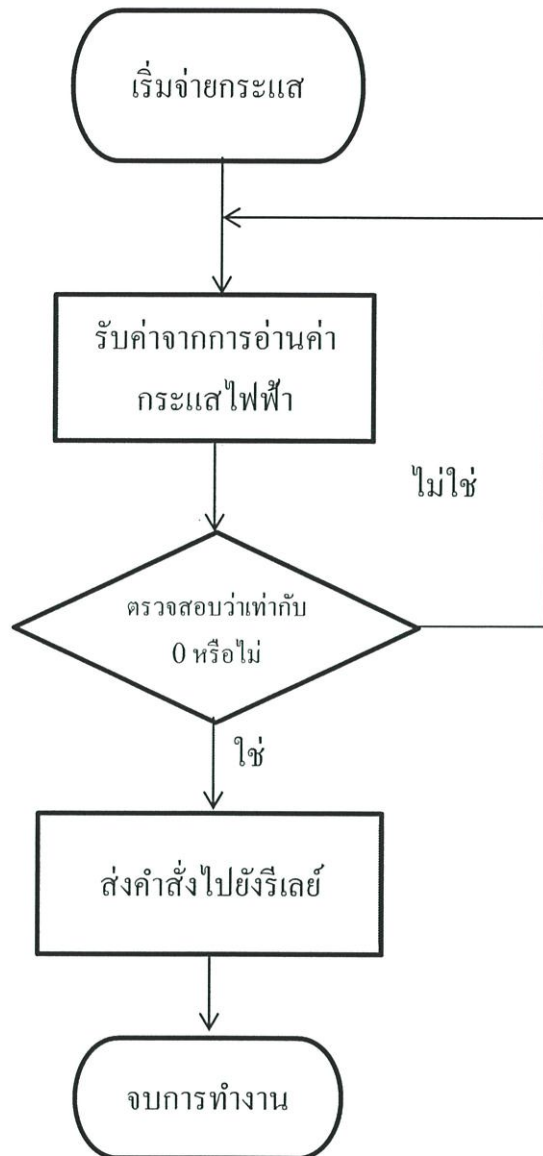
โดยในการออกแบบเลือกใช้การตัดต่อวงจร (Relay) แบบ 2 ช่อง ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. รีเลย์เอาต์พุตแบบตัดต่อ 2 ทาง 1 ขั้ว จำนวน 2 ช่อง
2. สั่งงานด้วยระดับแรงดันทรานซิสเตอร์ลอจิก
3. หน้าสัมผัสขาออกของตัวตัดต่อวงจร รับแรงดันได้สูงสุด 250 VAC 10 A, 30 VDC 10 A
4. มีหลอดไฟแสดงสถานะ การทำงานของรีเลย์และแสดงสถานะของบอร์ด
5. มีจัมป์เปอร์สำหรับเลือกว่าจะใช้กราวด์ร่วมหรือแยก



รูปที่ 3.10 รีเลย์เอาต์พุตแบบตัดต่อ 2 ทาง 1 ขั้ว

โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะออกแบบโดยตรวจจับกระแสช่วงที่มีค่าเป็นศูนย์เพื่อลดผลของการเกิดกระแสไหลฟุ้ง สามารถแสดงการเขียนและออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 การออกแบบการตรวจจับกระแสค่าศูนย์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในปฏิญานีพจน์นี้ ทำการทดลองชุดสาธิตระบบการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ โดยวงจรตัวเก็บประจุที่ใช้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนขนาด 5 kVAR จำนวนสามลำดับชั้น ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 415 V ได้แบ่งการจำลองออกเป็น 2 แบบดังนี้

1. การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอกเตอร์
2. การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอกเตอร์
3. พฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอกเตอร์
4. พฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอกเตอร์

การทดลองชุดสาธิตระบบการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบในแต่ละลำดับชั้น โดยให้ตัวเก็บประจุเป็นโหลดของระบบ การเก็บข้อมูลทำโดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมีการตัดต่อในแต่ละลำดับชั้นเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1. ค่ามูฟเฟสที่มีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ
2. กระแสไหลฟุ้ง
3. เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่
4. กระแสที่สภาวะคงที่

4.1 การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์

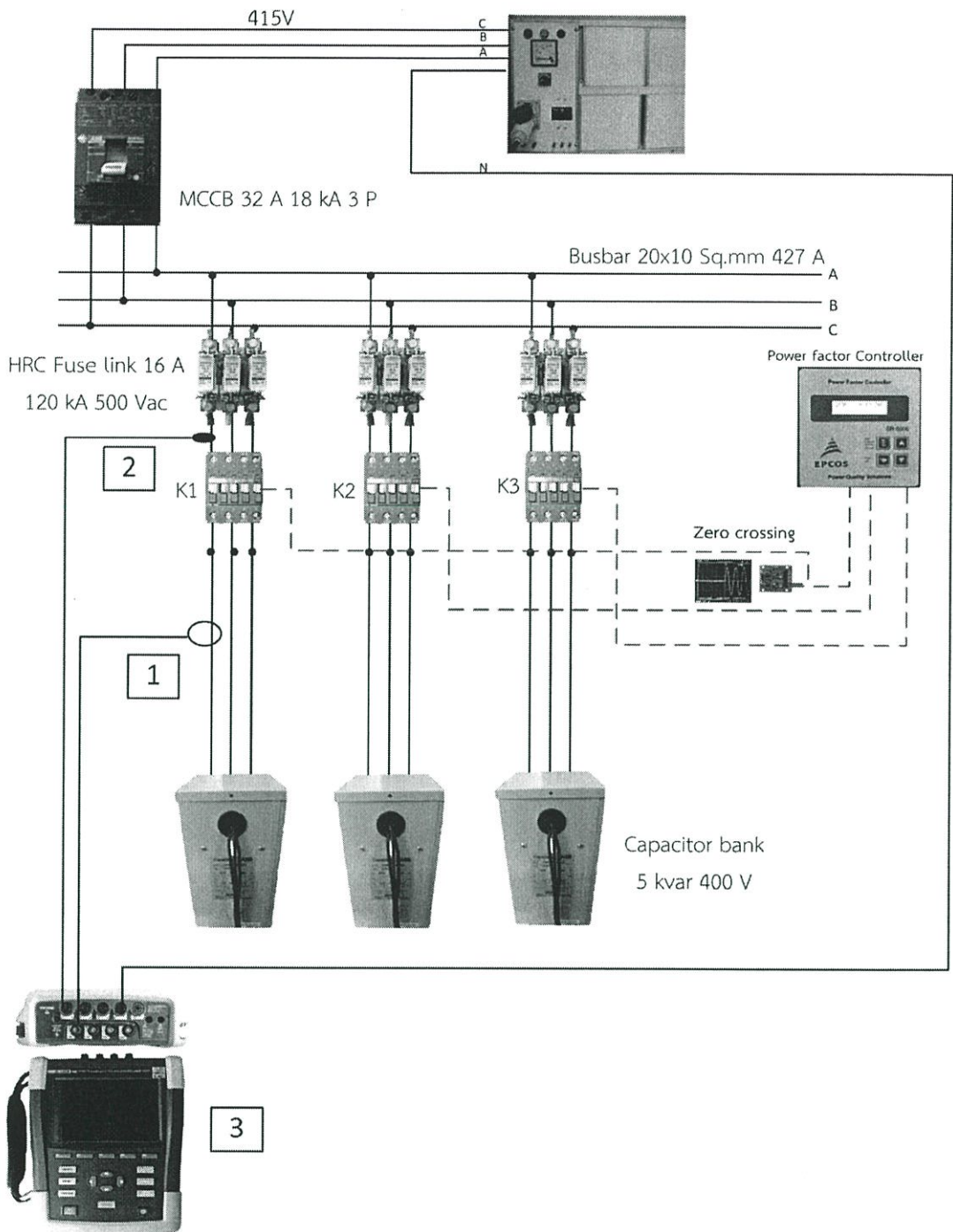
การทดลองหัวข้อนี้ทำการวัดแรงดันและกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าใช้งานในลำดับขั้นที่หนึ่ง ลำดับขั้นที่สอง และลำดับขั้นที่สาม โดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ สำหรับการขั้นตอนในการเก็บผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายแยกออกเป็นแต่ละลำดับขั้นดังนี้

การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับขั้นที่หนึ่งมีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ก ใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (หมายเลข 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) เป็นเครื่องมือวัดและเก็บผลการทดลอง สำหรับการวัดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ทำการติดตั้งสายคล้องวัดกระแสที่บริเวณระหว่างแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 กับวงจรตัวเก็บประจุ (หมายเลข 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) และสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้า ติดตั้งสายคีบวัดแรงดันที่บริเวณระหว่างฟิวส์ไบเมตกับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 (หมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) ทำการทดลองโดยชุดสาธิตรับไฟฟ้าจากระบบของห้องปฏิบัติการที่มีขนาดแรงดัน 3 เฟส 415 V โดยผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักของชุดสาธิต จากนั้นทำการกดคำสั่งตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่หนึ่ง ที่ตัวควบคุมประกอบกำลังไฟฟ้า เพื่อส่งสัญญาณคำสั่งดังกล่าวไปยังแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 เพื่อทำหน้าที่ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุในลำดับขั้นที่หนึ่งเข้าสู่ระบบ สำหรับการทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับขั้นที่สอง ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ คล้ายกับของขั้นที่หนึ่ง มีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ข โดยทำการย้ายการติดตั้งสายคล้องวัดกระแสมาอยู่ระหว่างแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K2 กับวงจรตัวเก็บประจุ (หมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข) และทำการย้ายการติดตั้งสายคีบวัดแรงดันที่มาอยู่บริเวณระหว่างฟิวส์ไบเมตกับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K2 (หมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข) เพื่อวัดกระแสและแรงดันของวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สอง สำหรับการทดลองในส่วนของลำดับขั้นที่สองนั้น ได้ทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สองเข้าสู่ระบบในขณะที่มีขั้นที่หนึ่งยังเชื่อมต่ออยู่ในระบบก่อนแล้ว โดยการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขั้นที่สองมีขั้นตอนคล้ายกับขั้นที่หนึ่งที่กล่าวไว้ข้างต้น การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับขั้นที่สาม ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ คล้ายกับของขั้นที่หนึ่งและสองเช่นกัน มีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ค ใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเป็นเครื่องมือวัดและเก็บผลการทดลอง สำหรับการวัดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ทำการย้ายการติดตั้งสายคล้องวัดกระแสที่มาอยู่ระหว่างแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K3 กับวงจรตัวเก็บประจุ (หมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ค) และสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้า ทำการย้ายการติดตั้งสายคีบวัดแรงดันที่มาอยู่บริเวณระหว่างฟิวส์ไบเมตกับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K3 (หมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ค) สำหรับการทดลองในส่วนของลำดับขั้นที่สามนั้น ได้ทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สามเข้าสู่ระบบในขณะที่มีขั้นที่หนึ่งและสองยังเชื่อมต่ออยู่ในระบบอยู่ก่อนแล้ว โดยการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขั้นที่สองมีขั้นตอนคล้ายกับขั้นที่หนึ่งและสองที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

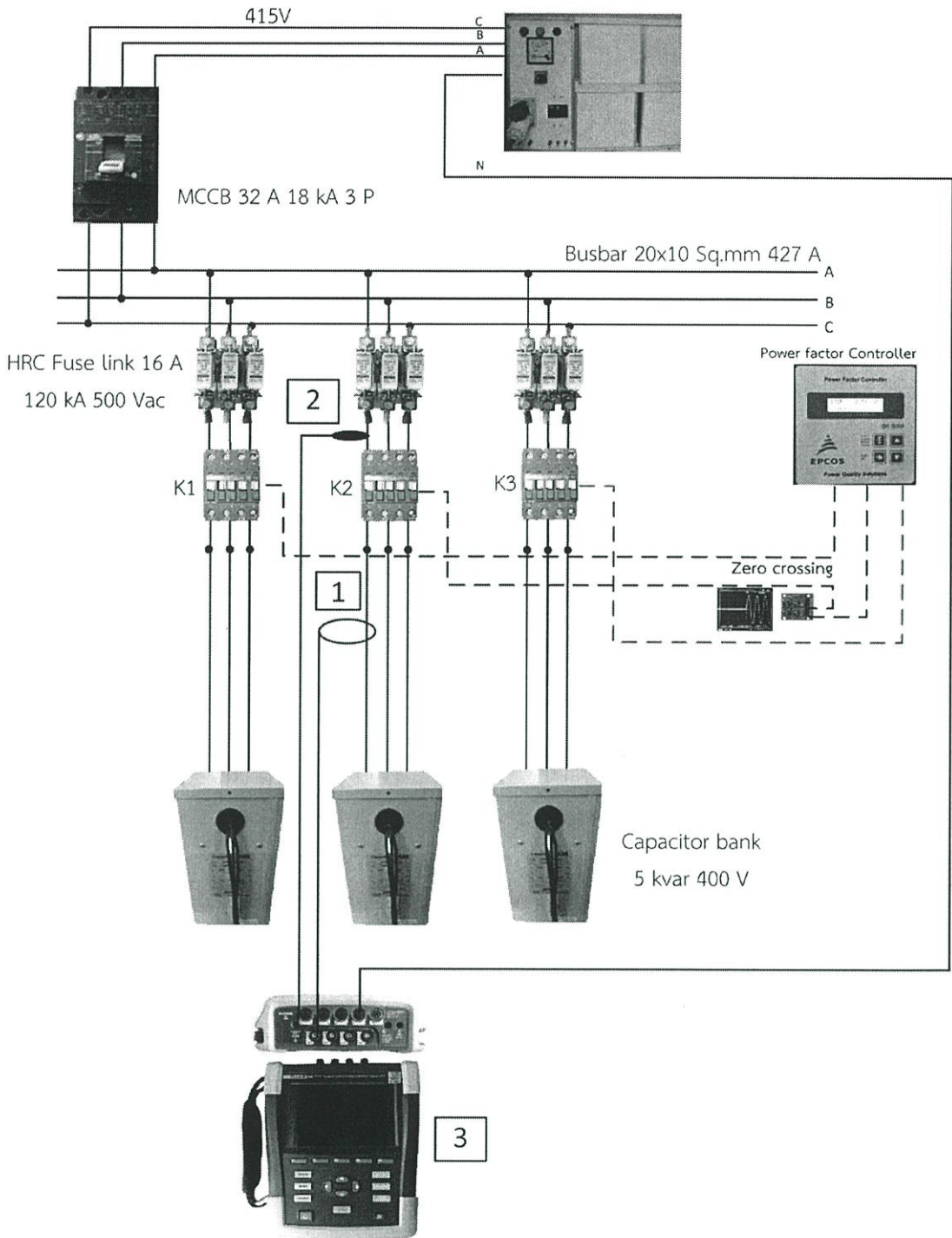
สำหรับขั้นตอนในการทดลองตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ได้ทำการควบคุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุแต่ละลำดับขั้นโดยกวดคำสั่งที่ตัวควบคุมประกอบกำลังเพื่อให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดต่อวงจรที่ลำดับขั้นที่ต้องการ จากนั้นทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า และทำการจดบันทึกค่าพร้อมทั้งรูปกราฟกระแสไหลฟุ้งและแรงดันไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์

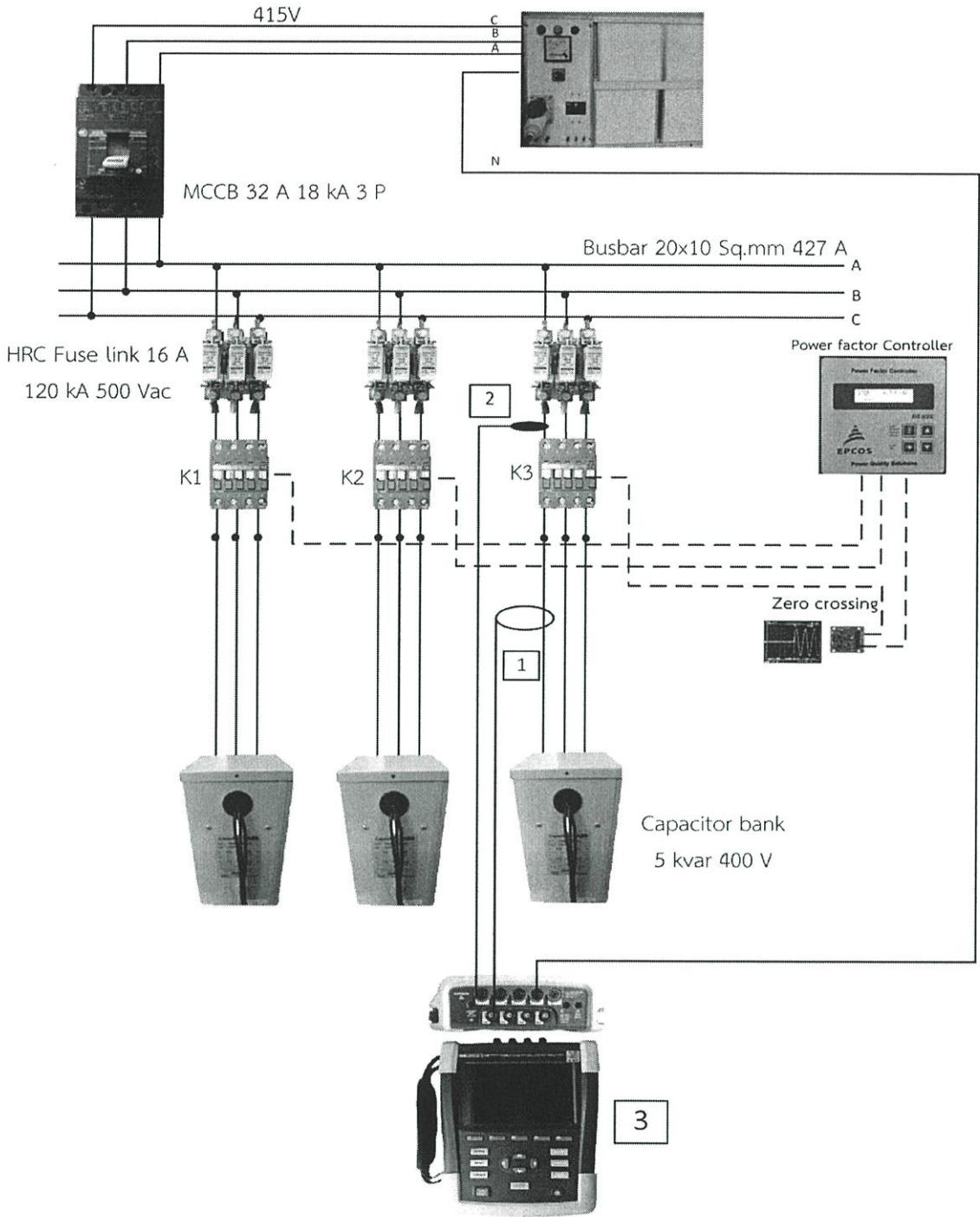
| ค่ามุมเฟส (องศา) | ลำดับขั้น 1 | | | ลำดับขั้น 2 | | | ลำดับขั้น 3 | | |
|---------------------|-------------------------------|--|---|-------------------------------|--|---|-------------------------------|--|---|
| | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) |
| 0 | -69.987 | 179 | 8.123 | 41.564 | 161 | 8.938 | -21.375 | 127 | 9.231 |
| 45 | -85.068 | 336 | 8.356 | 52.983 | 225 | 8.954 | 37.608 | 190 | 9.098 |
| 90 | -197.601 | 712 | 8.578 | -176.524 | 554 | 8.972 | 132.315 | 595 | 9.213 |
| 135 | 68.283 | 350 | 8.741 | 52.308 | 204 | 9.002 | 34.593 | 189 | 9.054 |
| 180 | 75.214 | 204 | 8.218 | 53.289 | 194 | 8.975 | 22.391 | 154 | 9.120 |
| 225 | -82.923 | 377 | 8.321 | 56.011 | 194 | 9.078 | 33.918 | 168 | 9.145 |
| 270 | 197.661 | 698 | 8.789 | 182.768 | 688 | 8.889 | 146.679 | 611 | 9.256 |
| 315 | -82.959 | 307 | 8.674 | 54.380 | 270 | 8.982 | -36.051 | 242 | 9.321 |



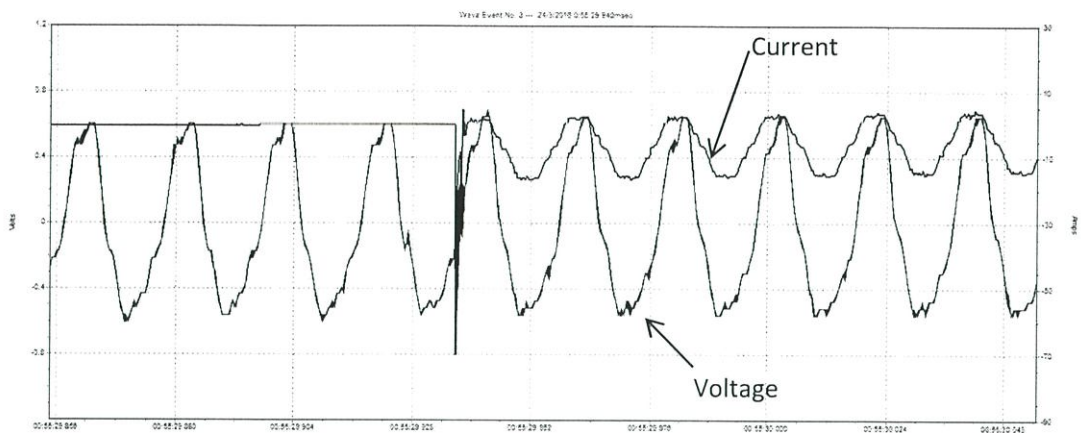
ก) ไดอะแกรมการทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นหนึ่ง



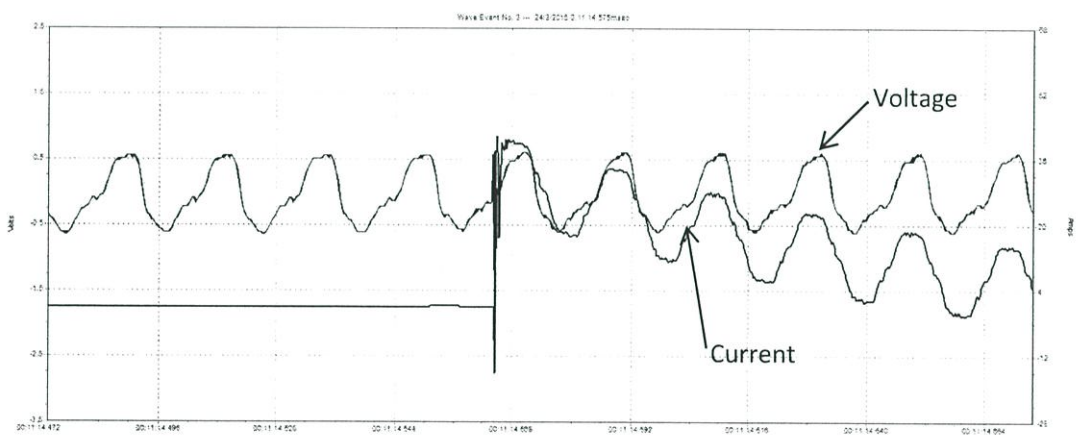
ข) ไดอะแกรมการทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นสอง



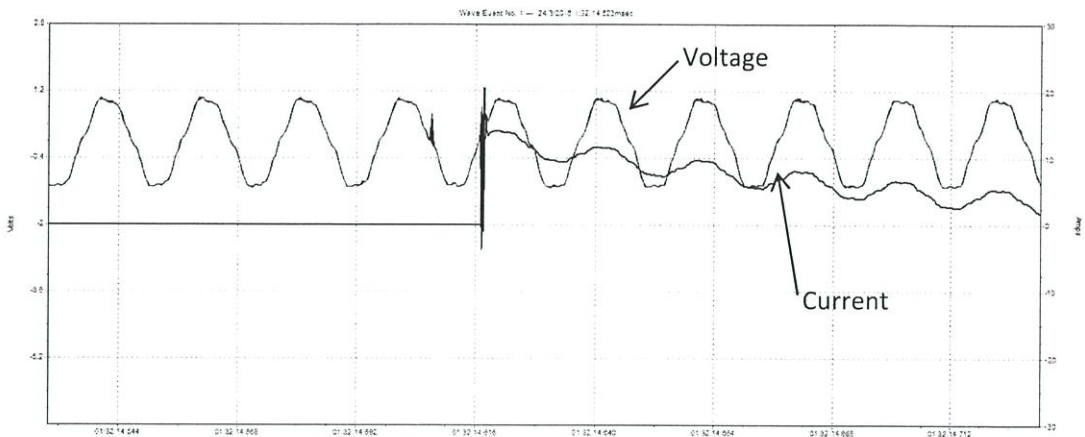
ค) ไดอะแกรมการทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นสาม
 รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมการทดลองวงจรการตัดต่อตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ในแต่ละ
 ลำดับขั้น



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.2 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 0 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

จากตารางที่ 4.1 ผลของกระแสไหลพุ่งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ชัดว่าที่ลำดับชั้นที่สองมีขนาดของกระแสไหลพุ่งต่ำกว่าลำดับชั้นที่หนึ่งและที่ลำดับชั้นที่สามมีขนาดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นต่ำกว่าทั้งลำดับชั้นที่หนึ่งและสอง อันเป็นผลเนื่องจาก สมการที่ 4.1

$$I_{inrush} = K \frac{1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}} \sin(\phi) \quad (4.1)$$

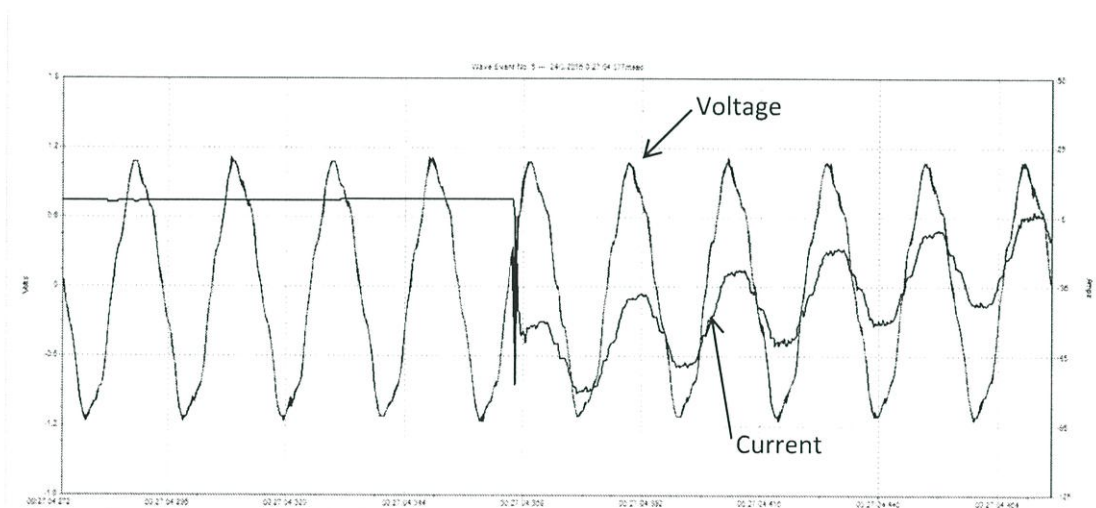
- เมื่อ I_{inrush} = ค่ากระแสไหลพุ่งสูงสุด (A)
- n = จำนวนวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมอยู่ก่อนหน้า
- Q_n = กำลังไฟฟ้าเสมือนวงจรตัวเก็บประจุในลำดับชั้น (kVAR)
- $Q_1 = Q_2 = Q_{...} = Q_n$
- U = แรงดันเฟส (V)
- L_n = ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในลำดับชั้น (μH)

$$L_1 = L_2 = L_{\dots} = L_n$$

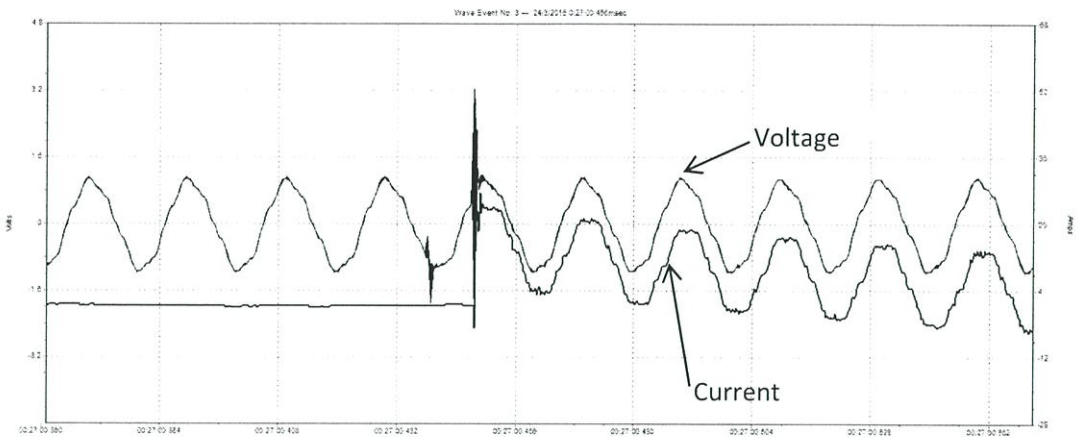
$$K = \text{ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ } 1457 \text{ ที่ระบบ } 50\text{Hz}$$

$$\emptyset = \text{มุมในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ (องศา)}$$

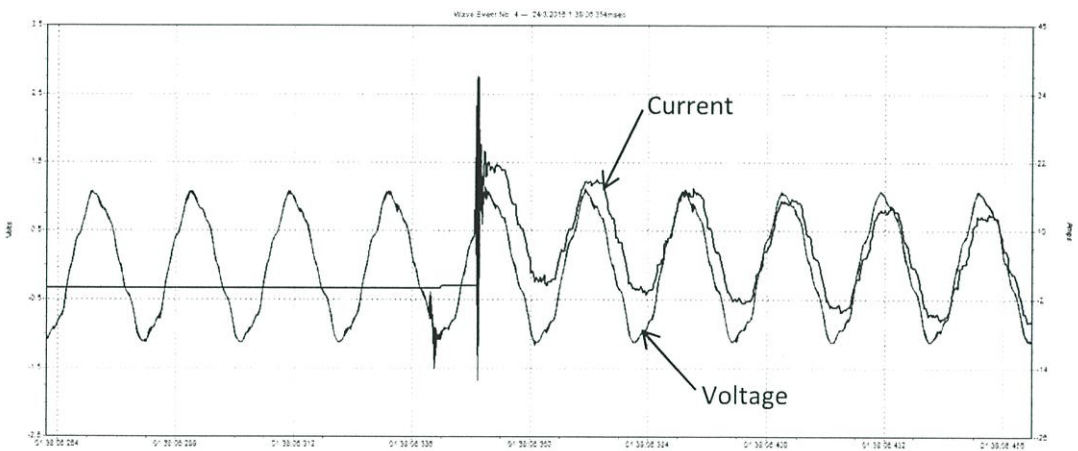
จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์จำนวนวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมอยู่ก่อนหน้า (n) มีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เมื่อมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นสูงขึ้น มีผลทำให้ขนาดของกระแสไหลฟุ้งมีขนาดลดลง และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 0 องศาหาไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้น เห็นได้ว่าที่ลำดับชั้นที่สองใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่สั้นกว่าลำดับชั้นที่หนึ่ง และที่ลำดับชั้นที่สามใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่สั้นกว่าทั้งลำดับชั้นที่หนึ่งและสอง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าแปรผันตรงตามขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้น เมื่อค่ากระแสไหลฟุ้งสูงจะทำให้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่สูง แต่เมื่อค่ากระแสไหลฟุ้งต่ำเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ต่ำเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่นจากกรณีศึกษา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่งตัดต่อมุม 0 องศา มีค่ากระแสไหลฟุ้ง -69.987 แอมแปร์ ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ 179 มิลลิวินาที และ กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม ตัดต่อมุม 0 องศา มีค่ากระแสไหลฟุ้ง -21.375 แอมแปร์ ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ 127 มิลลิวินาที เป็นต้นดังนั้นที่ลำดับชั้นสูงขึ้นขนาดของกระแสไหลฟุ้งมีค่าต่ำลง เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่จึงมีค่าต่ำลงเช่นกัน



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



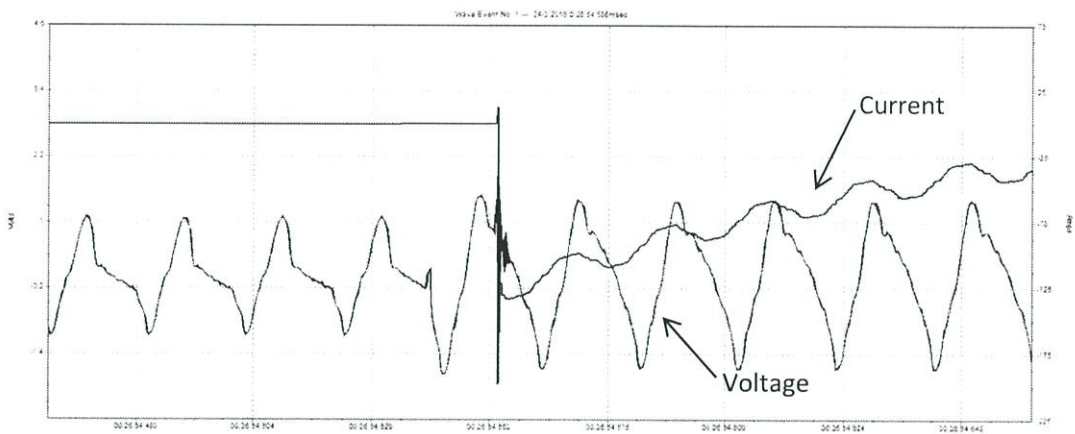
ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



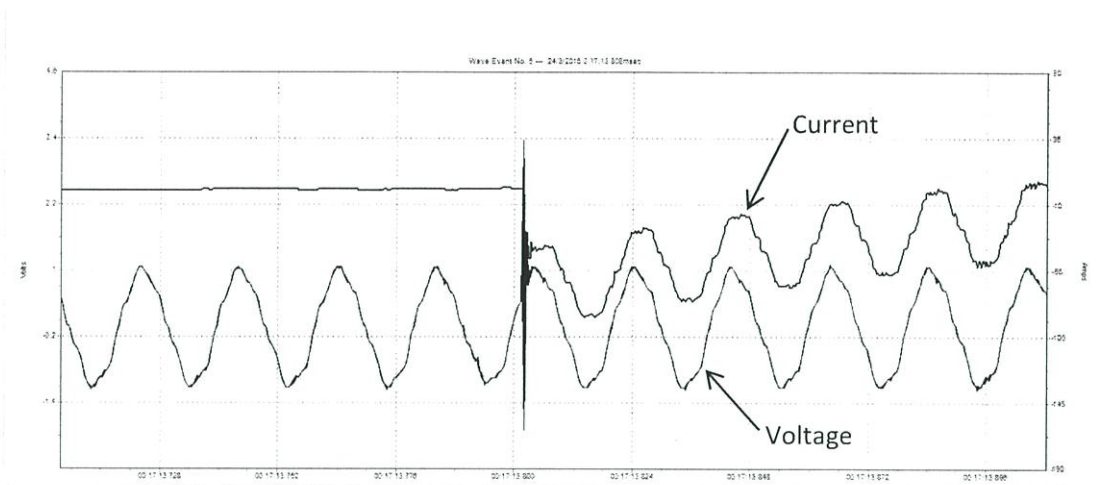
ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.3 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 45 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

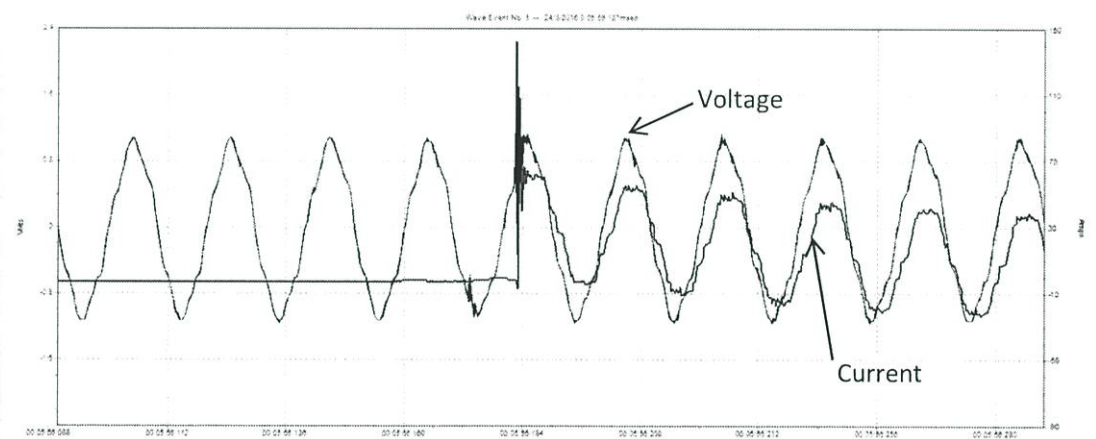
จากตารางที่ 4.1 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ว่าลำดับขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเหมือนกับการทดลองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าก่อนหน้านี้ คือขนาดกระแสไหลฟุ้งที่ระดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดสูงสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมาตามลำดับ มีเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้นผลการทดลองได้เช่นเดียวกับการทดลองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าเช่นกัน โดยลำดับชั้นที่หนึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลฟุ้งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ที่มีเหตุผลเดียวกันกับการทดลองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



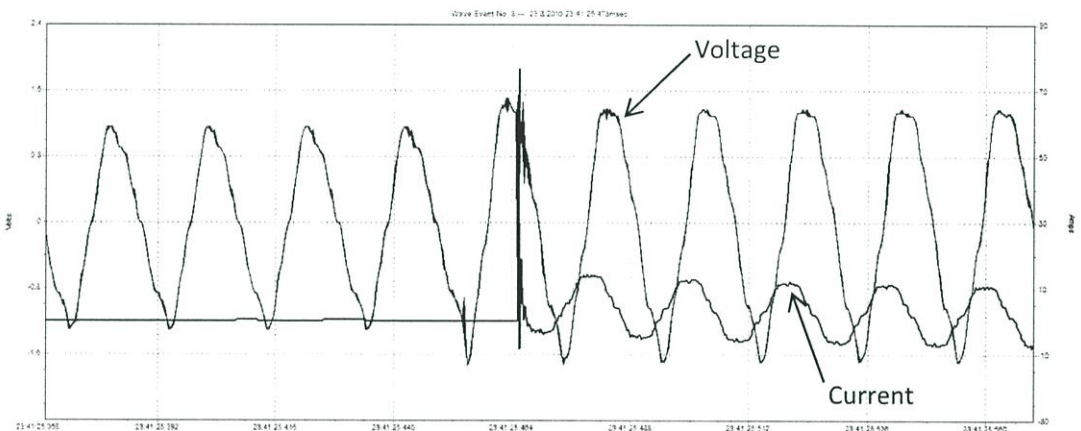
ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



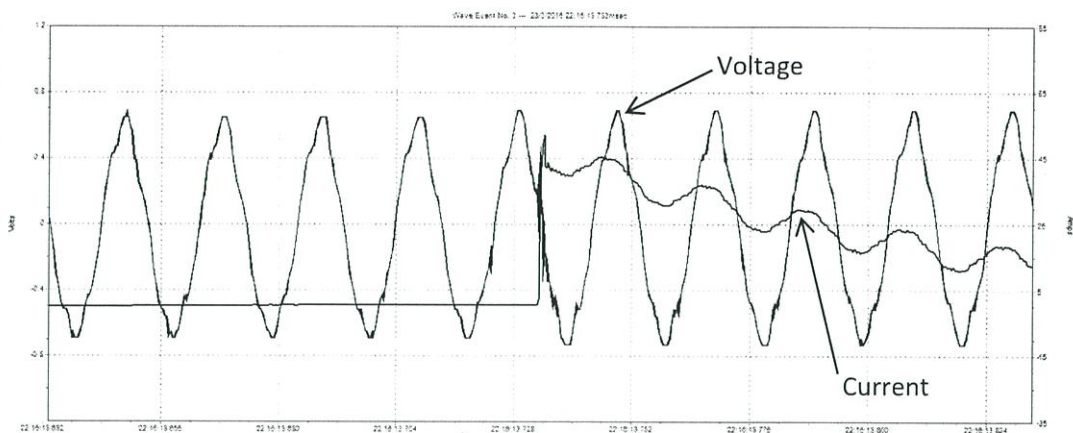
ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.4 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 90 องศา กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

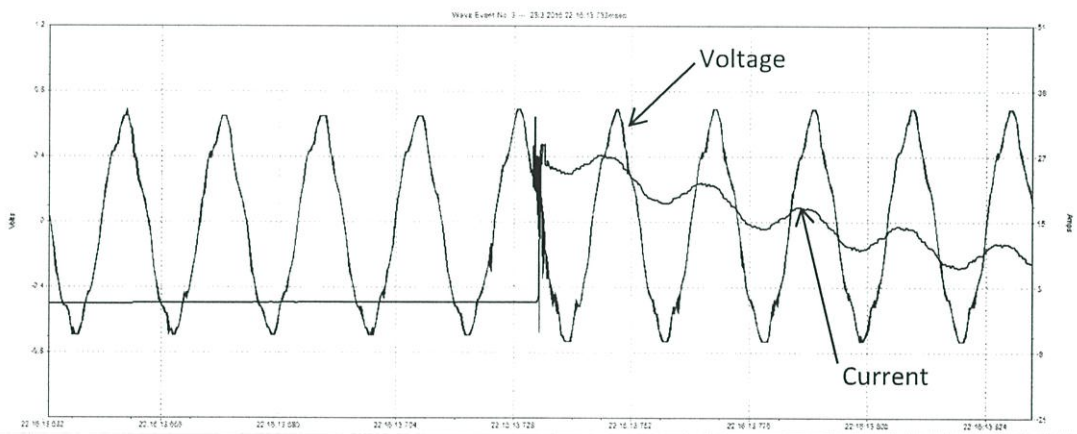
จากตารางที่ 4.1 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ว่าลำดับขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเหมือนกับการทดลองที่มุมองศาทางไฟฟ้าก่อนหน้านี้ คือขนาดกระแสไหลฟุ้งที่ระดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดสูงสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมาตามลำดับ มีเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้นผลการทดลองได้เช่นเดียวกับการทดลองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าเช่นกัน โดยลำดับชั้นที่หนึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลฟุ้งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีเหตุผลเดียวกันกับการทดลองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

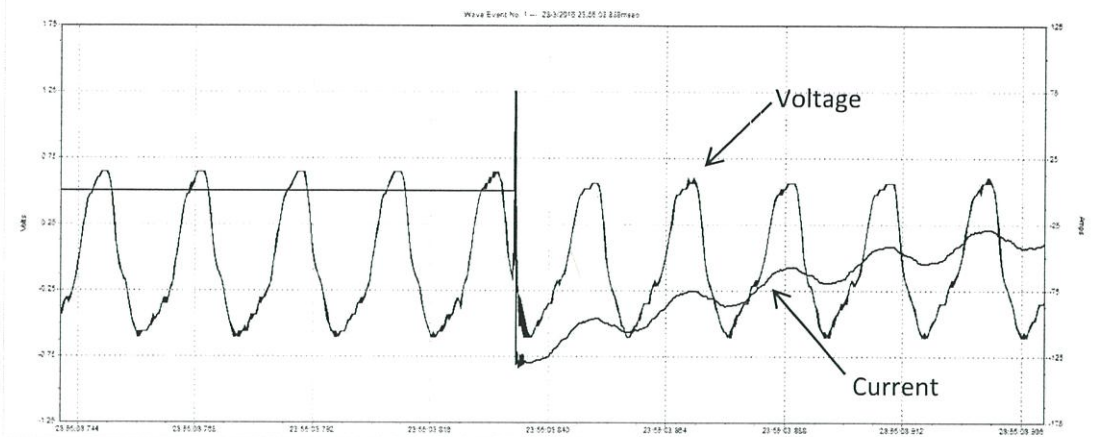


ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

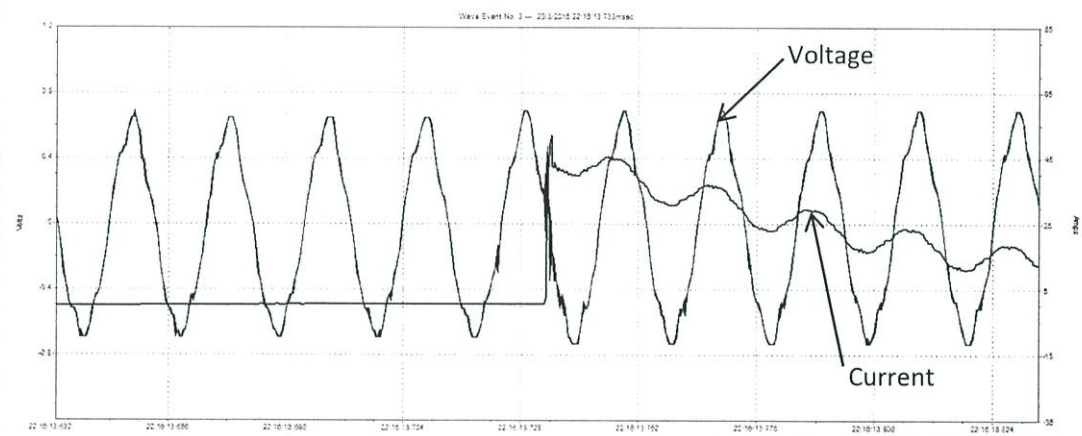


ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

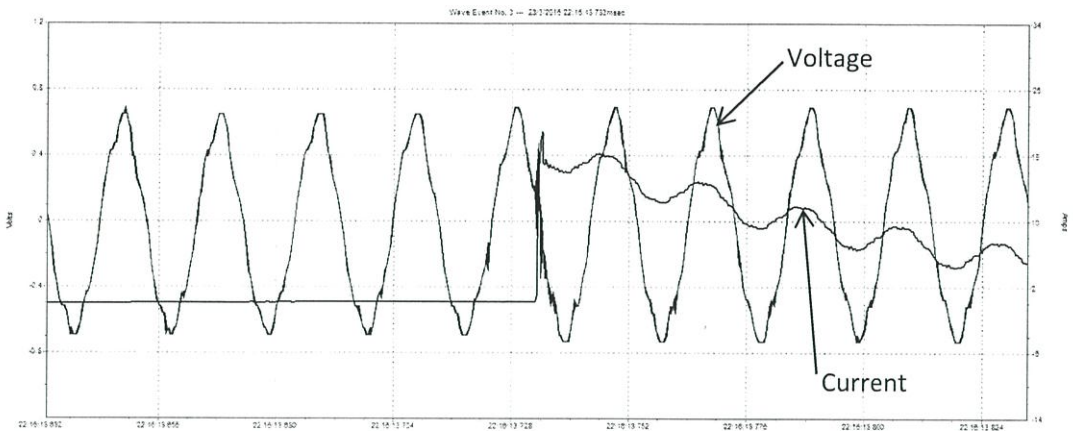
รูปที่ 4.5 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 135 องศากรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

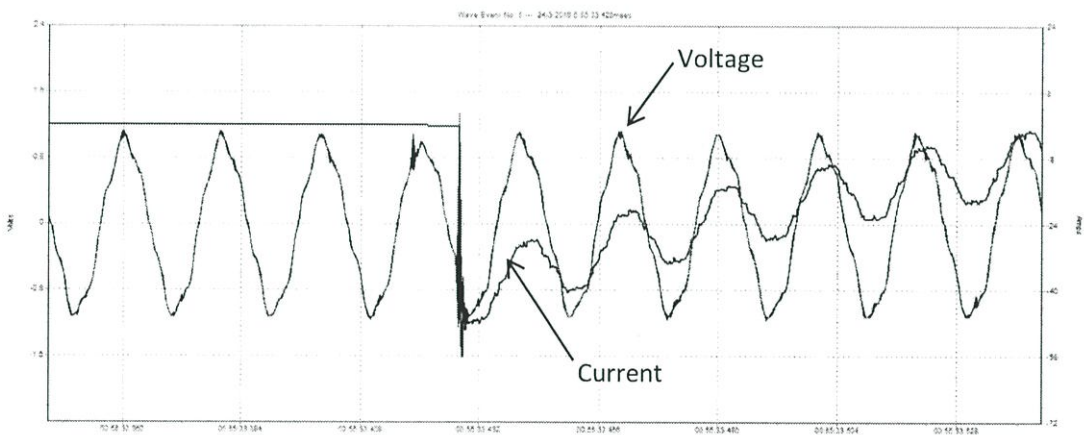


ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

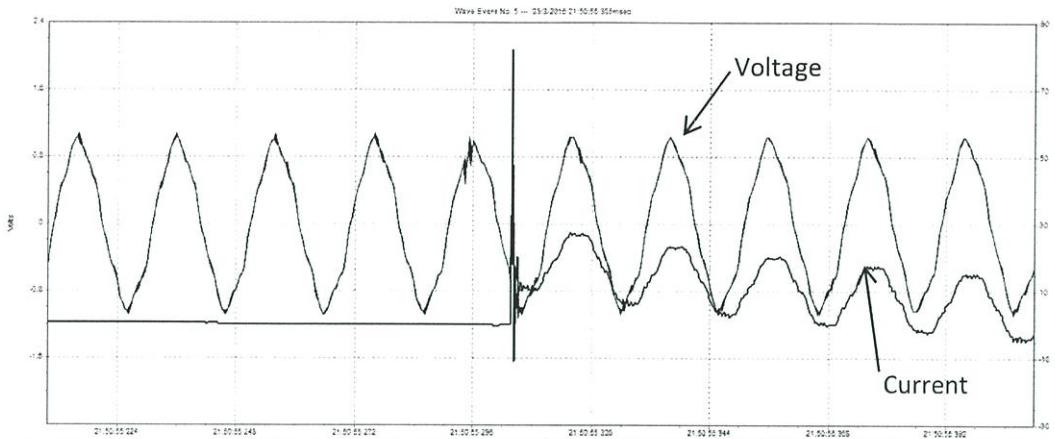


ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

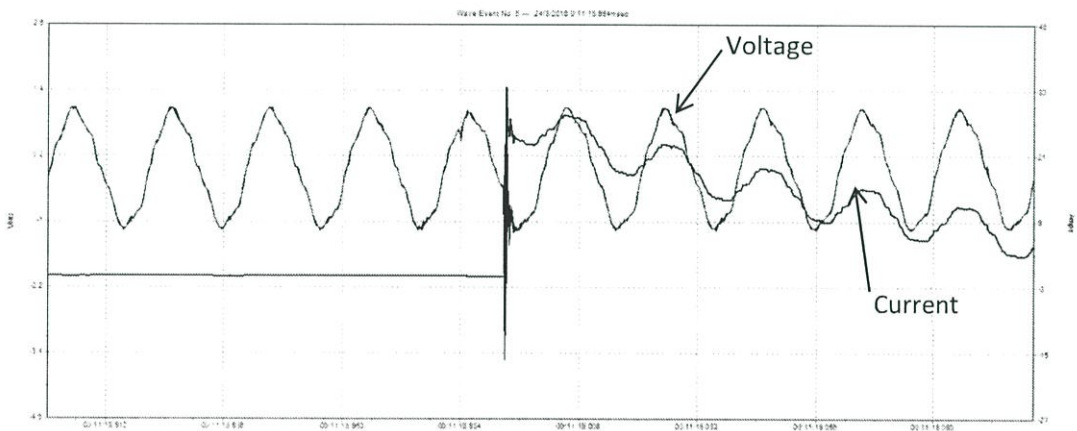
รูปที่ 4.6 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 180 องศากรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

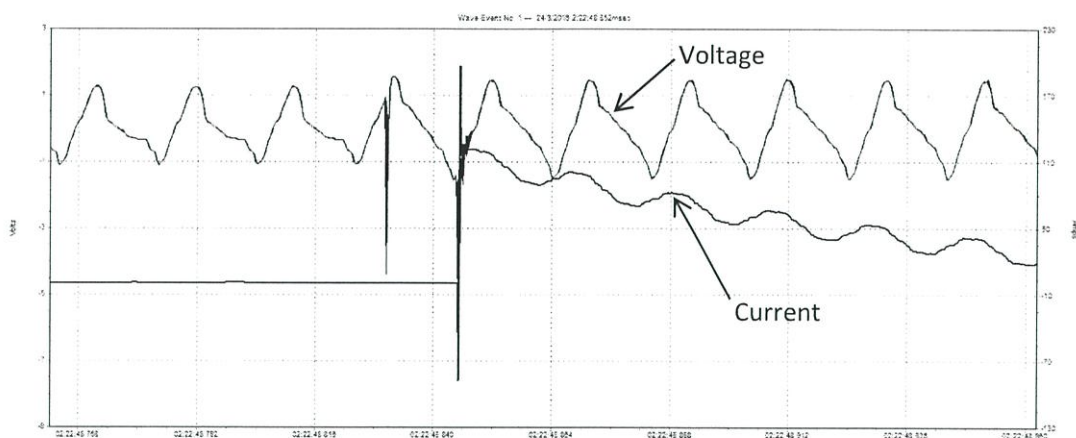


ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

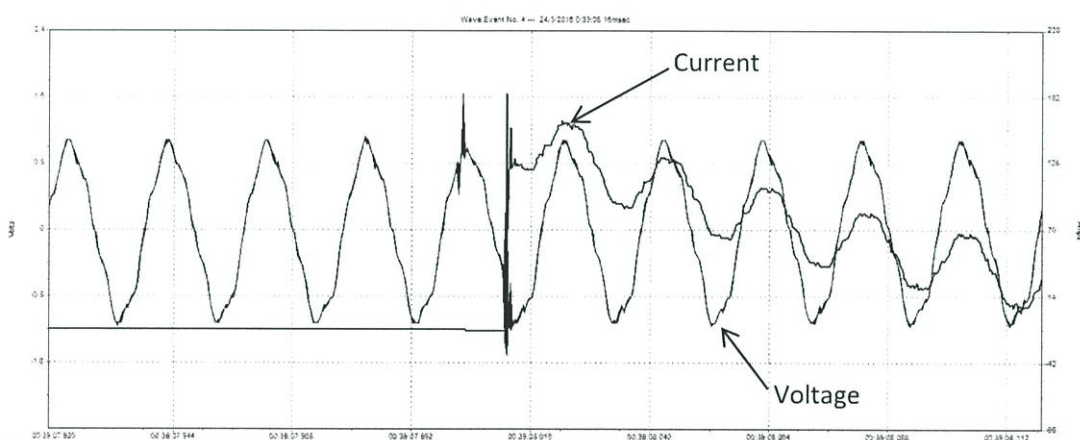


ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

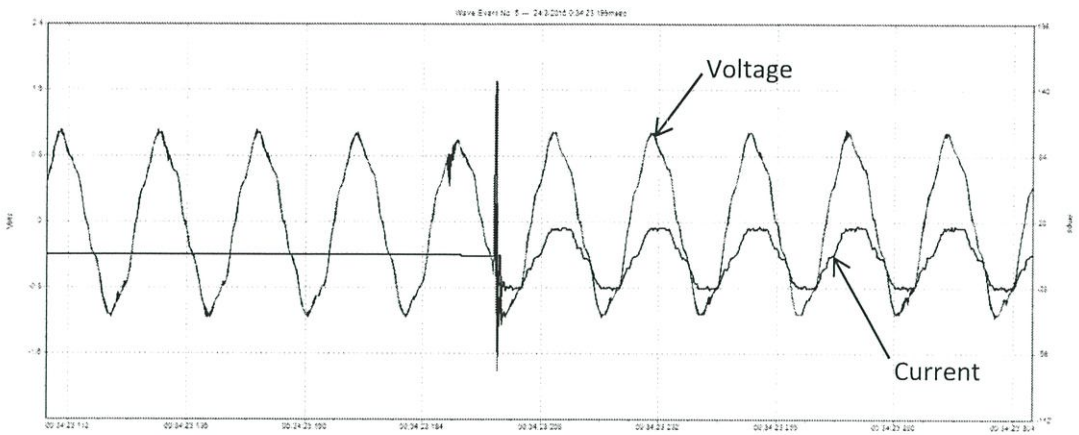
รูปที่ 4.7 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 225 องศากรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

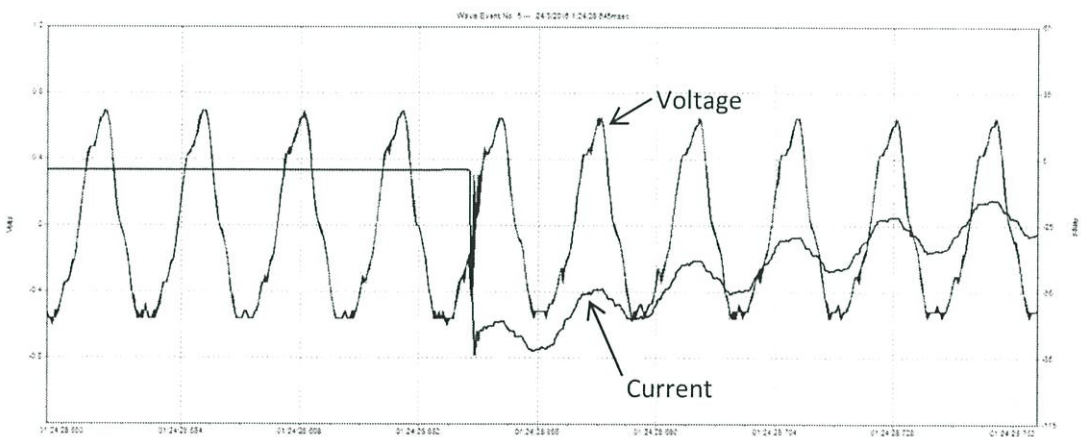


ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

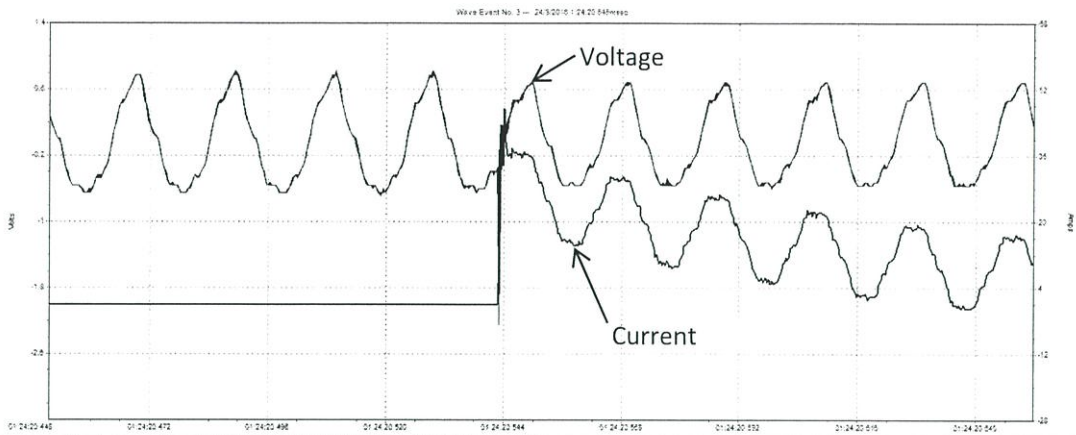


ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

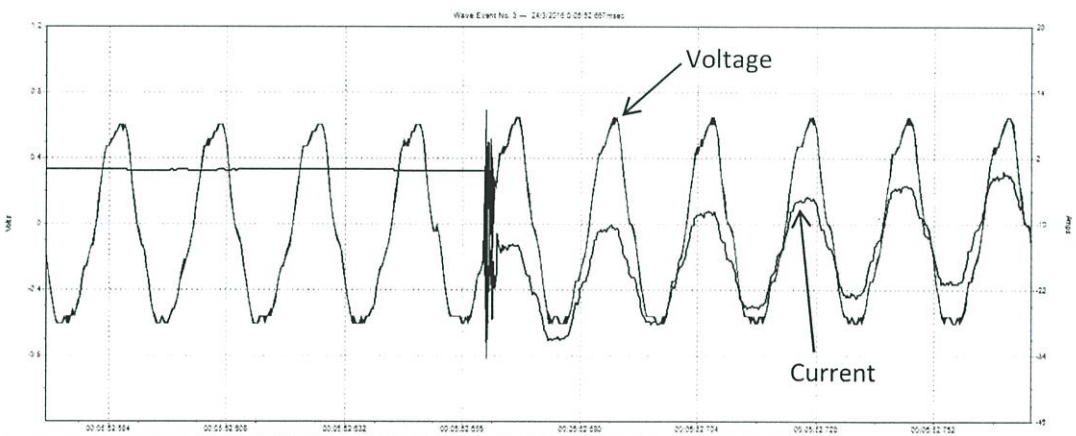
รูปที่ 4.8 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 270 องศากรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



ข) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



ค) กรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.9 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 315 องศากรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

4.2 การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์

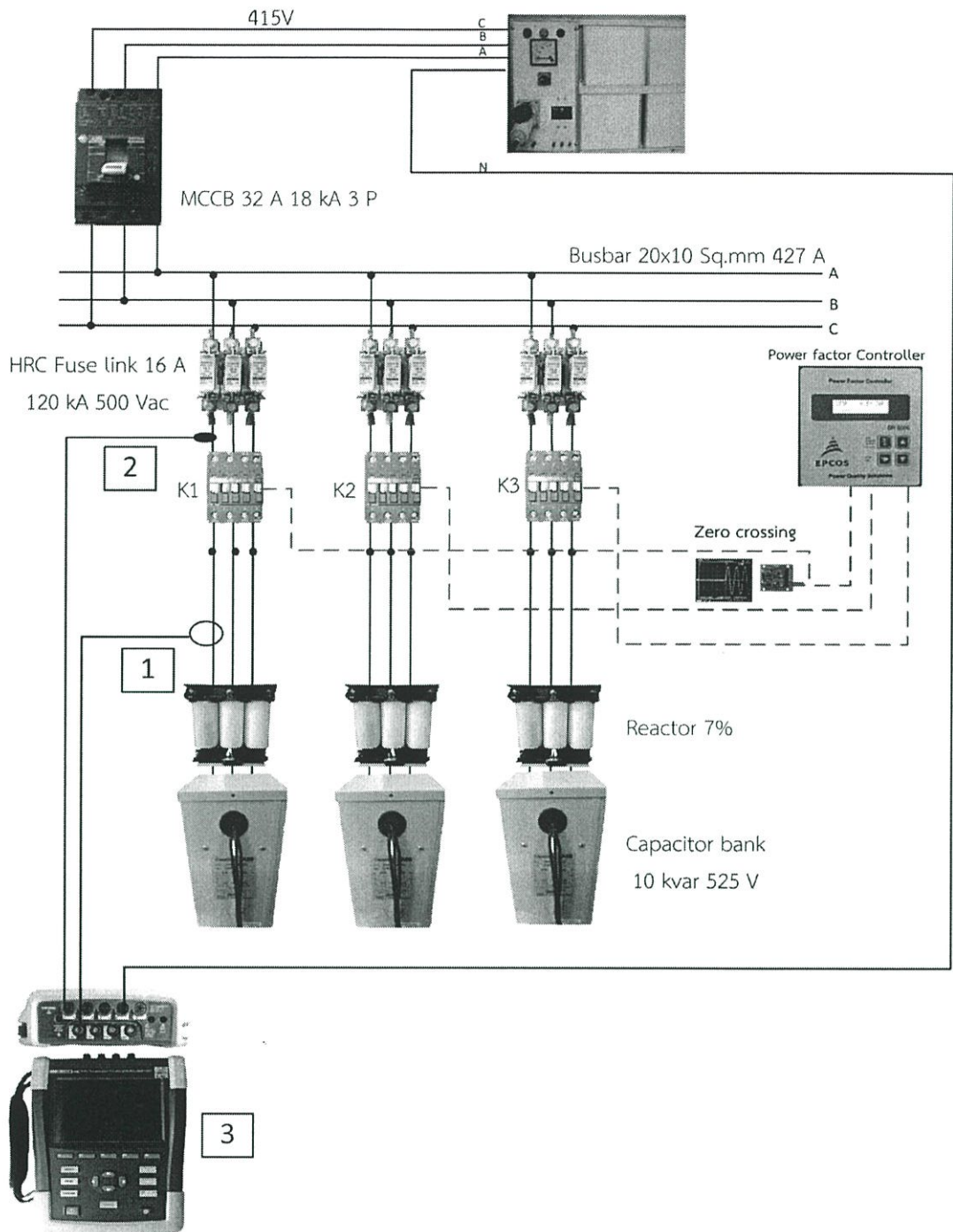
ในการทดลองหัวข้อนี้ ทำการวัดแรงดันและกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าใช้งานในลำดับขั้นที่หนึ่ง ลำดับขั้นที่สอง และลำดับขั้นที่สาม โดยมีการต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ สำหรับการขั้นตอนในการเก็บผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายแยกออกเป็นแต่ละลำดับขั้นดังนี้

การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับขั้นที่หนึ่ง สอง และสาม มีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ก), 4.2 ข), 4.2 ค) ตามลำดับ โดยการเชื่อมจุดวัดและขั้นตอนในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุทั้งสามลำดับขั้น ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ในหัวข้อนี้มีการเพิ่มชุดรีแอคเตอร์ต่อเข้าอนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุก่อนที่จะเกิดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

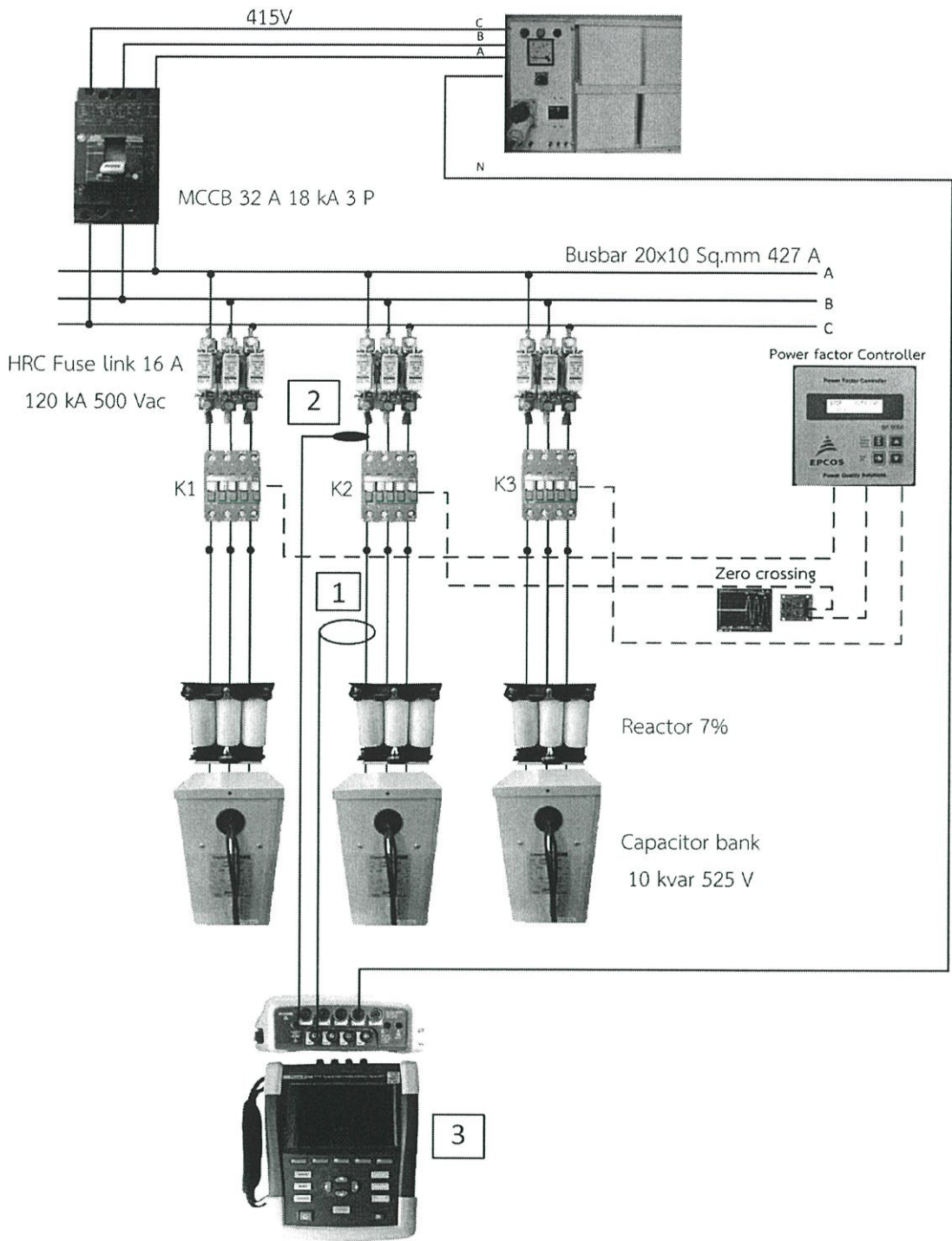
สำหรับขั้นตอนในการทดลองตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ได้ทำการควบคุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุแต่ละระดับขั้นโดยกดคำสั่งที่ตัวควบคุมประกอบกำลังเพื่อให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดต่อวงจรที่ลำดับขั้นที่ต้องการ จากนั้นทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า และทำการจดบันทึกค่าพร้อมทั้งรูปกราฟกระแสไหลฟุ้งและแรงดันไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีมีรีแอกเตอร์

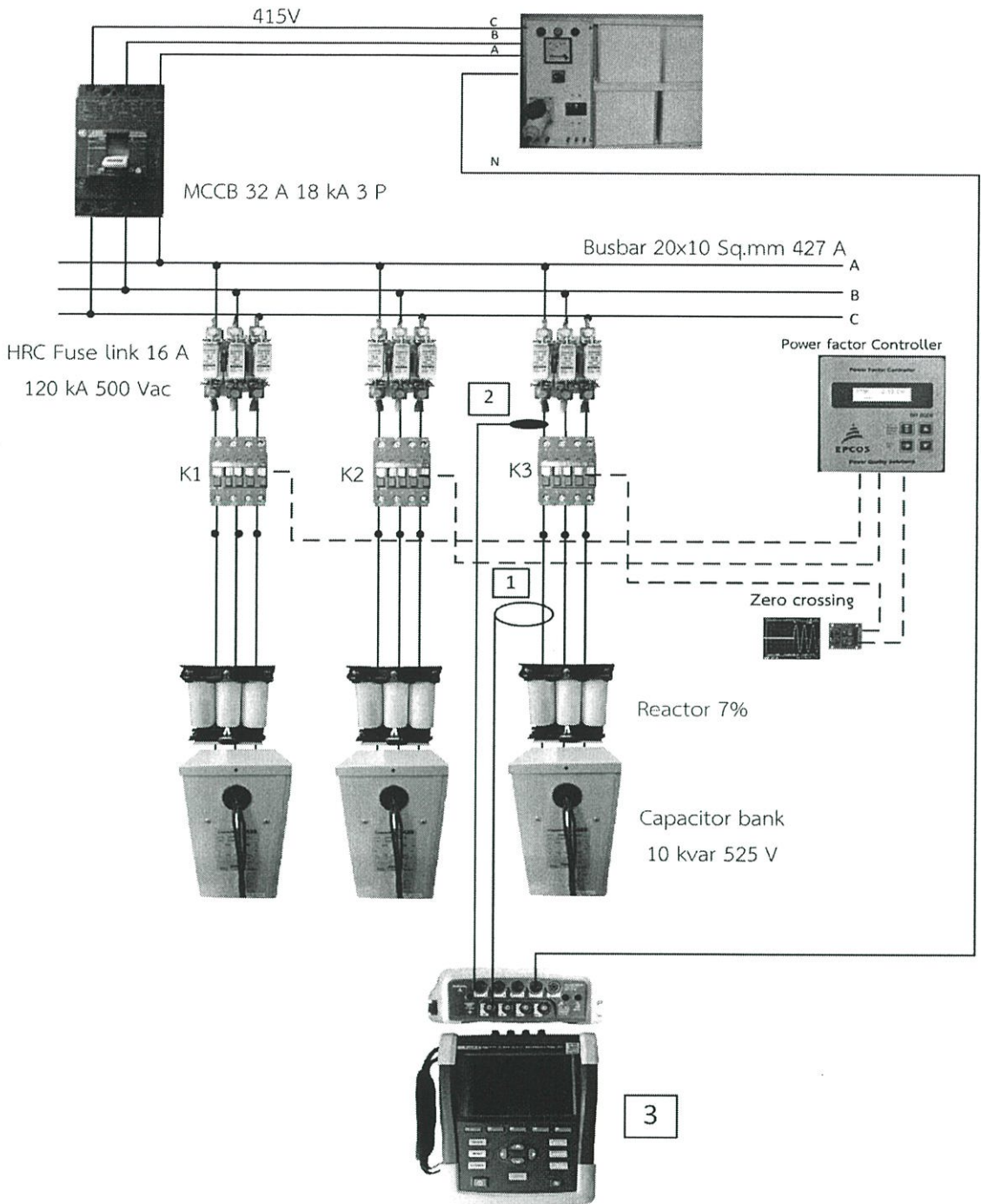
| ค่ามุมเฟส (องศา) | ลำดับชั้น 1 | | | ลำดับชั้น 2 | | | ลำดับชั้น 3 | | |
|---------------------|-------------------------------|--|---|-------------------------------|--|---|-------------------------------|--|---|
| | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) | กระแส ไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลา เข้าสู่ สภาวะ คงที่ (มิลลิ วินาที) | กระแสที่ สภาวะ คงที่ (แอมแปร์) |
| 0 | 95.874 | 79 | 12.563 | 91.087 | 48 | 14.587 | -90.456 | 39 | 15.924 |
| 45 | -95.685 | 74 | 12.561 | -91.983 | 53 | 14.401 | -90.925 | 48 | 15.901 |
| 90 | 97.981 | 84 | 12.457 | 94.561 | 68 | 14.389 | 92.864 | 63 | 15.897 |
| 135 | -96.452 | 71 | 12.574 | -91.257 | 58 | 14.397 | -92.145 | 52 | 15.756 |
| 180 | 96.058 | 64 | 12.610 | -91.097 | 51 | 14.398 | -91.008 | 49 | 15.847 |
| 225 | 97.664 | 81 | 12.497 | 93.871 | 65 | 14.408 | 91.856 | 55 | 15.907 |
| 270 | 96.785 | 73 | 12.560 | -93.562 | 61 | 14.142 | -91.941 | 56 | 15.864 |
| 315 | 95.987 | 68 | 12.601 | 92.872 | 60 | 14.197 | 91.009 | 51 | 15.945 |



ก) การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นหนึ่ง

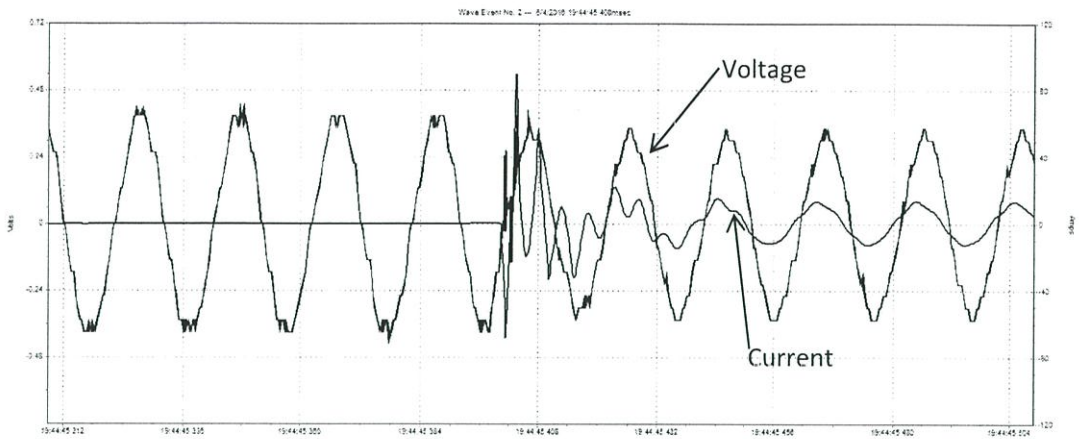


ข) การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นสอง

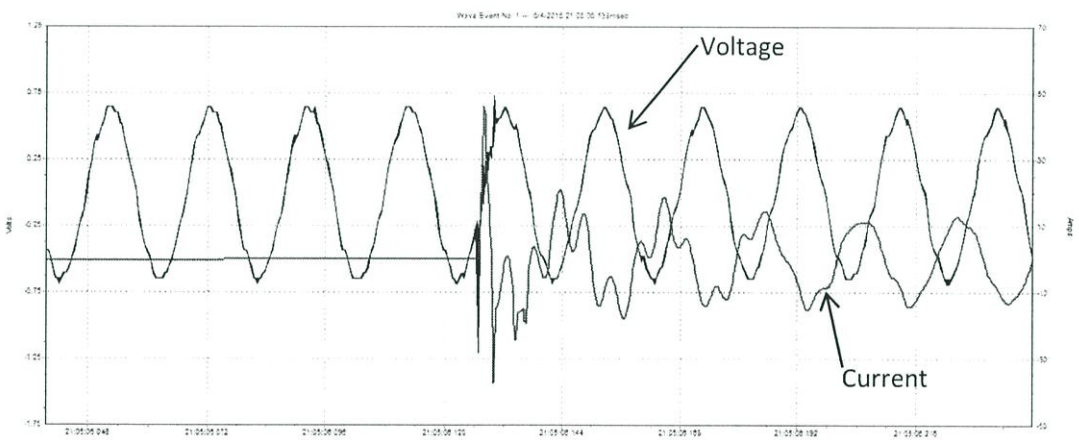


ค) การทดลองวงจรการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นสาม

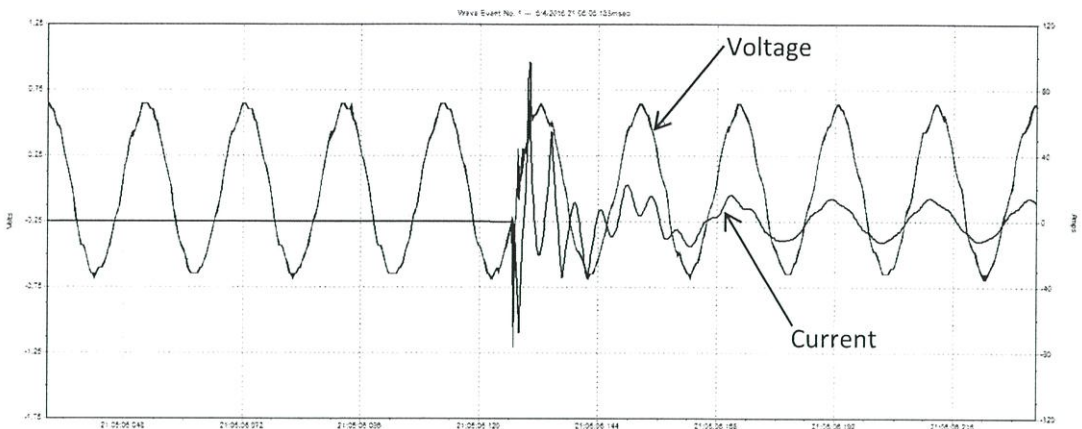
รูปที่ 4.10 การทดลองวงจรการตัดต่อตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ในแต่ละลำดับขั้น



ก) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



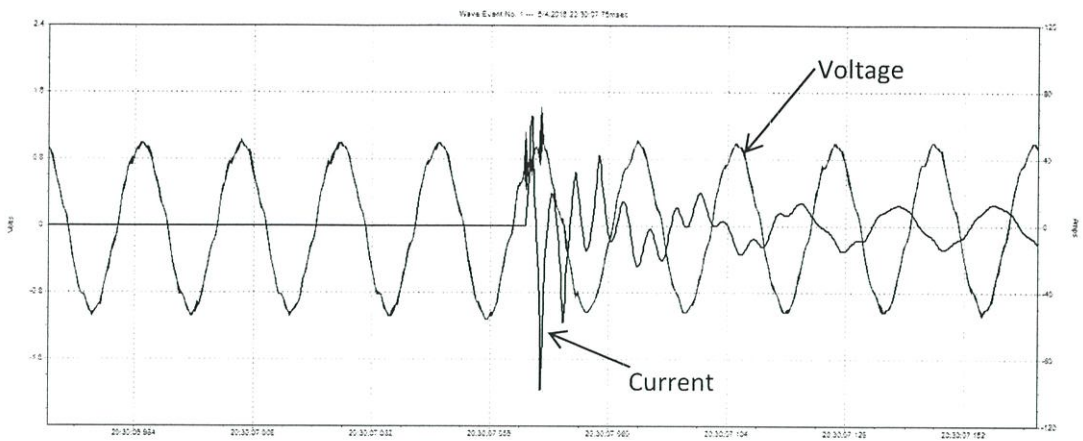
ข) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



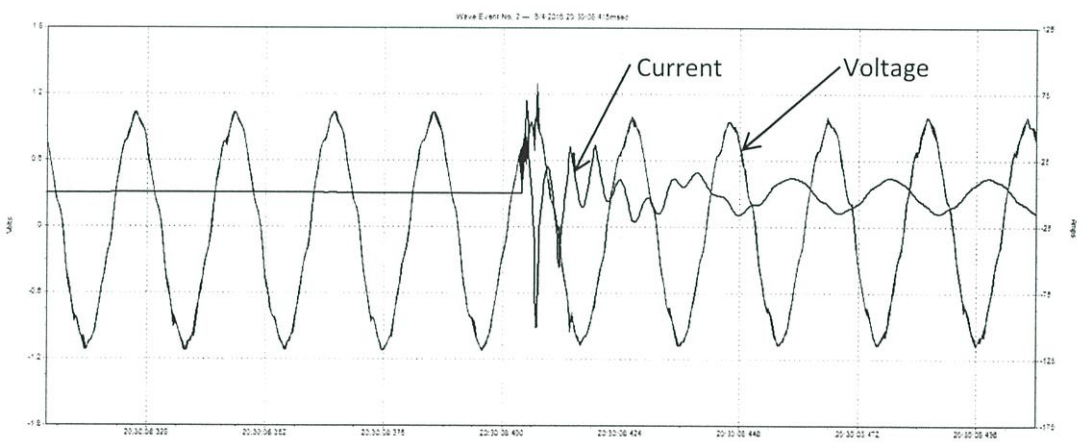
ค) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.11 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 0 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

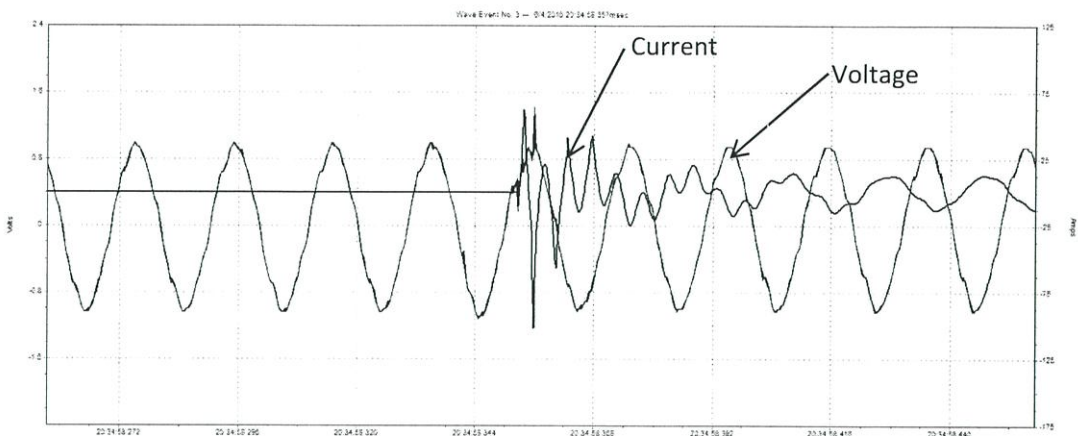
จากตารางที่ 4.2 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ว่าลำดับขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 ก่อนหน้านี้ คือขนาดกระแสไหลฟุ้งที่ระดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดสูงสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมาตามลำดับ มีเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้นผลการทดลองได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 เช่นกัน โดยลำดับชั้นที่หนึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลฟุ้งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีเหตุผลเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1



ก) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



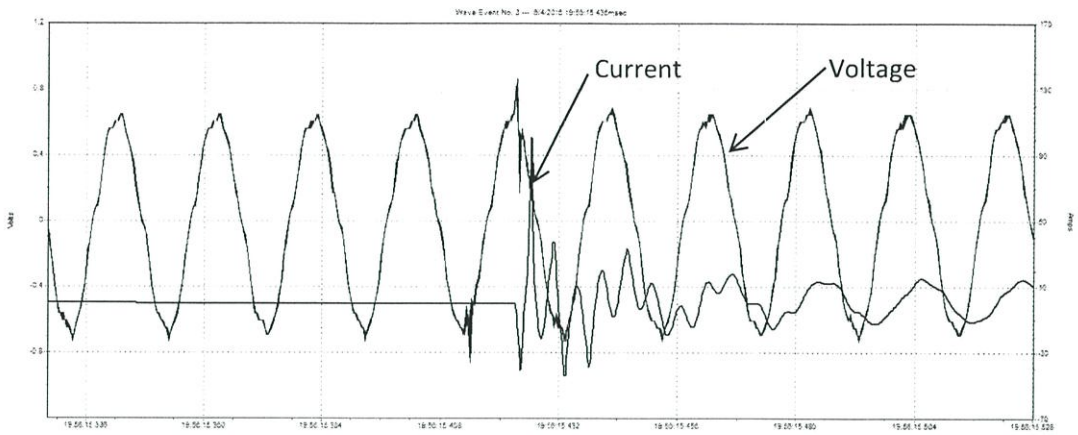
ข) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



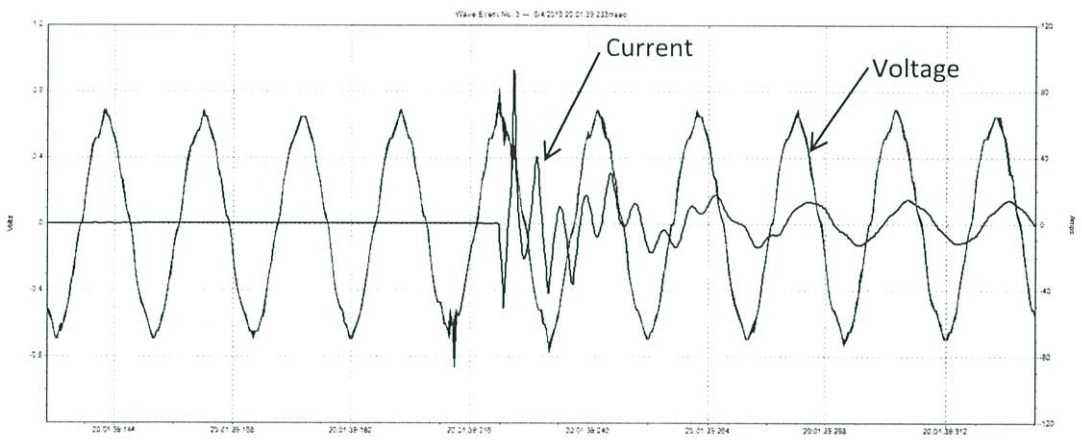
ค) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.12 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 45 องศา กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น

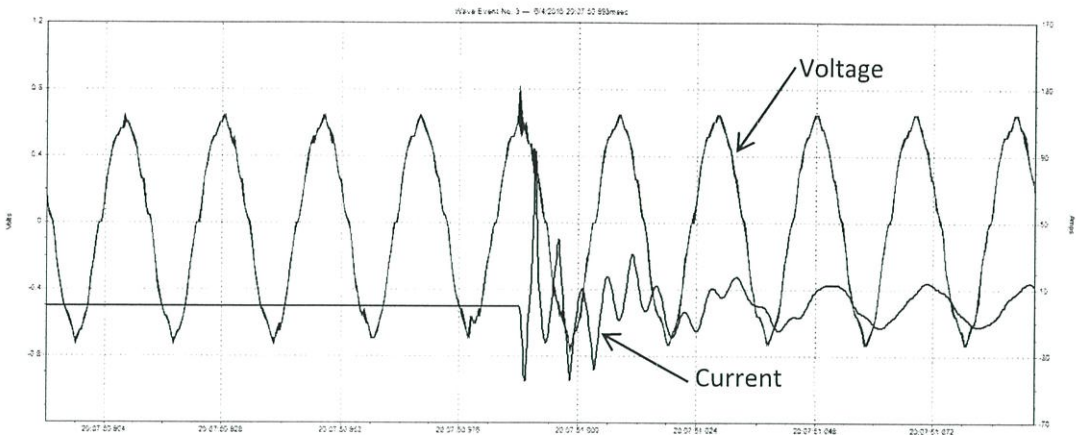
จากตารางที่ 4.2 ผลของกระแสไหลพุ่งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอกเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ว่าลำดับขนาดของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นเหมือนกับการทดลองในก่อนหน้านี้ คือขนาดกระแสไหลพุ่งที่ระดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดสูงสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมาตามลำดับ มีเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้นผลการทดลองได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 เช่นกัน โดยลำดับชั้นที่หนึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลพุ่งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีเหตุผลเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1



ก) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



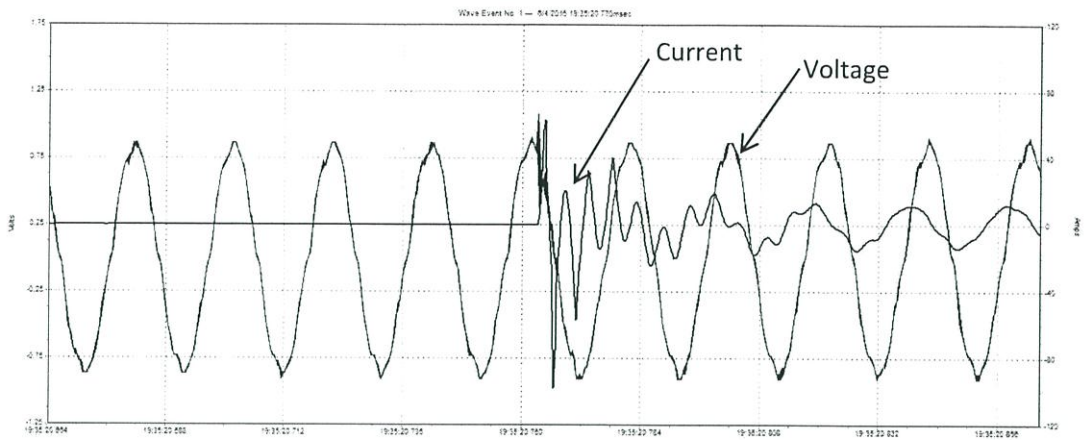
ข) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



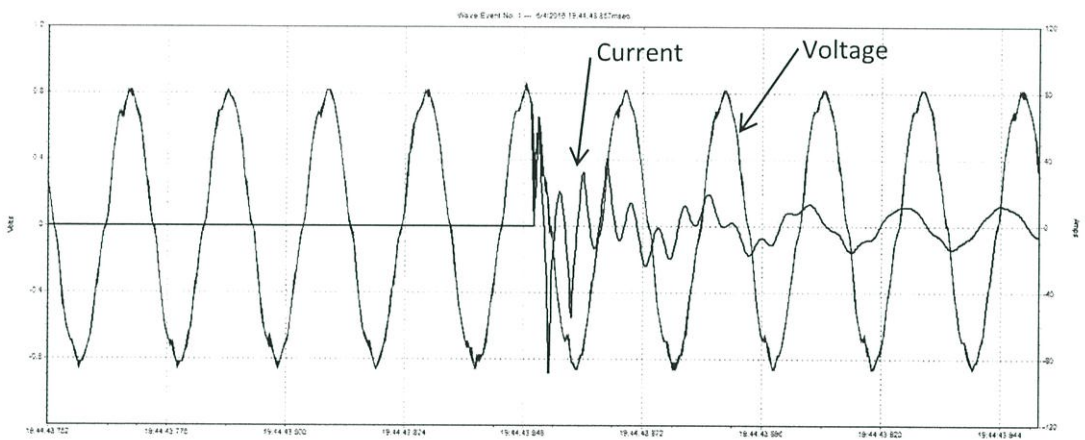
ค) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.13 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 90 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น

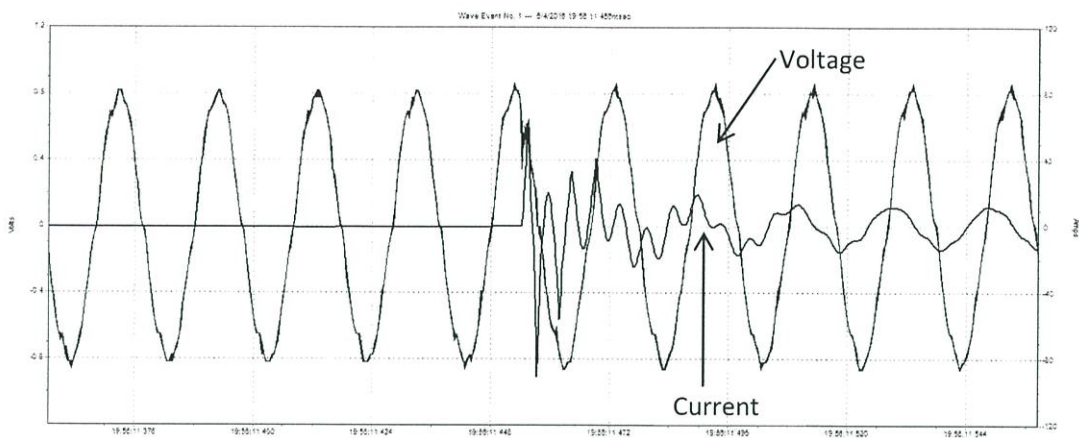
จากตารางที่ 4.2 ผลของกระแสไหลฟุ้งการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีการต่อรีแอคเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับ เห็นได้ว่าลำดับขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นเหมือนกับการทดลองที่มุมองศาทางไฟฟ้าก่อนหน้านี้ คือขนาดกระแสไหลฟุ้งที่ระดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดสูงสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมาตามลำดับ มีเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ขณะมีการตัดต่อตัวเก็บประจุที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละลำดับชั้นผลการทดลองได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 เช่นกัน โดยลำดับชั้นที่หนึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานสุดและลำดับชั้นสองและสามรองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลฟุ้งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีเหตุผลเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1



ก) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

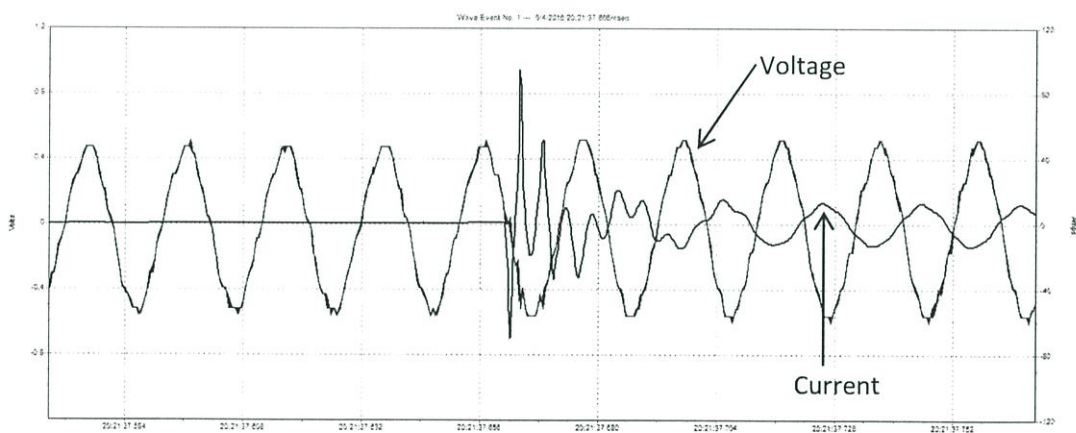


ข) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

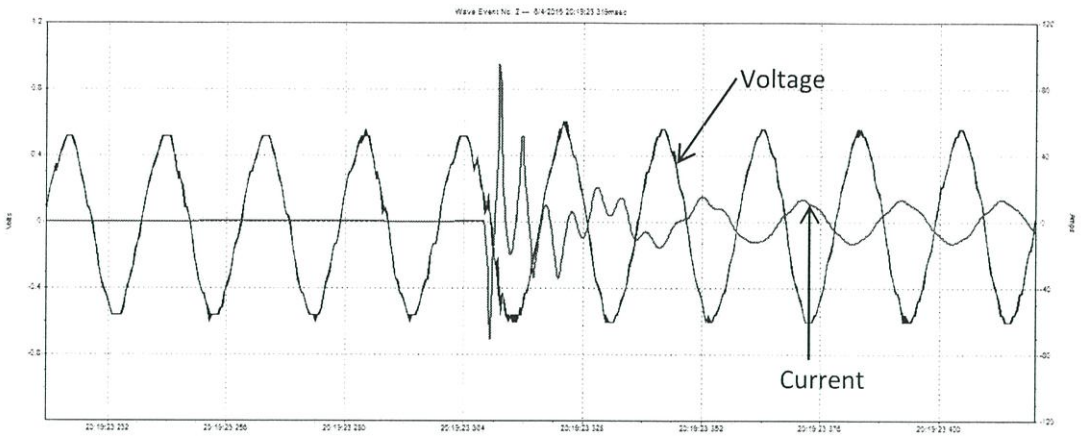


ค) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

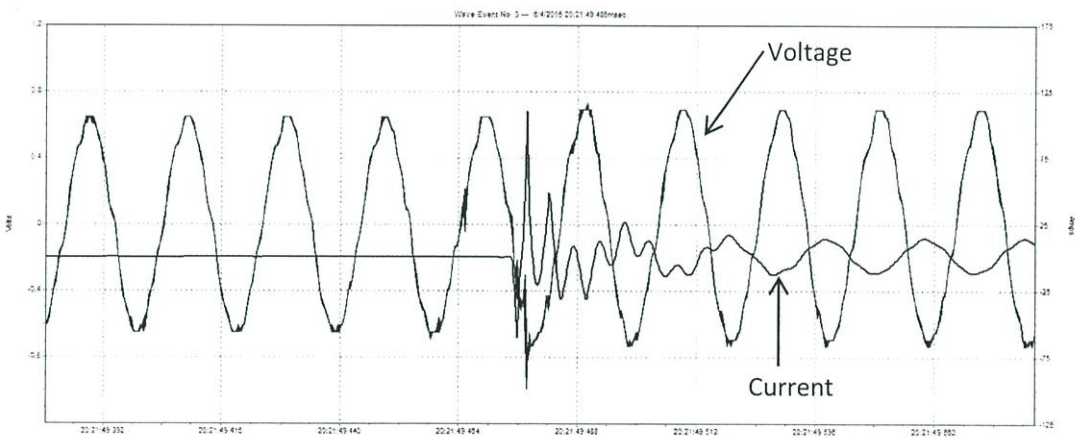
รูปที่ 4.14 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 135 องศา กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

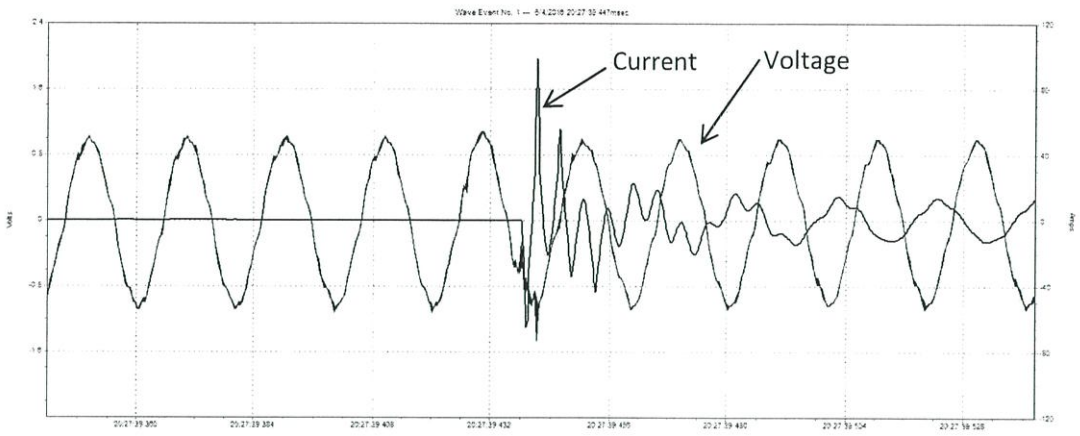


ข) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

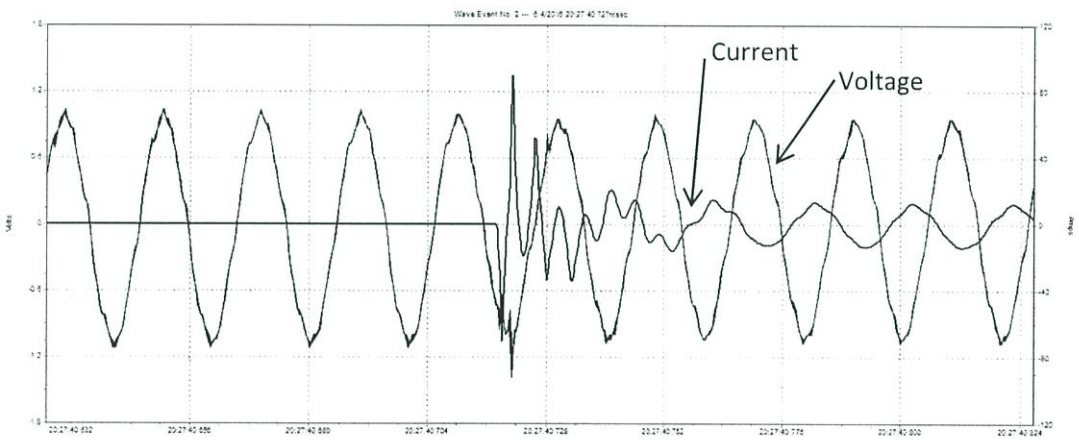


ค) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

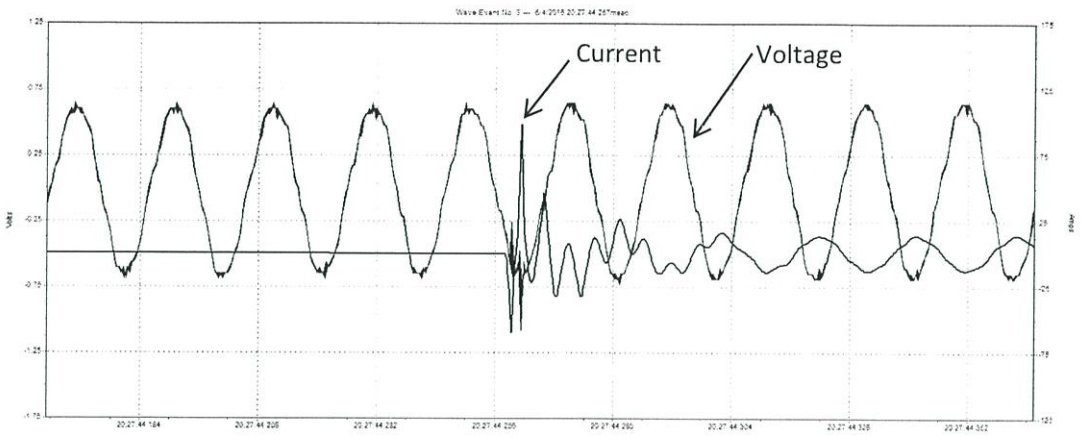
รูปที่ 4.15 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 180 องศา กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีมีการต่อรีเลย์แฉดเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

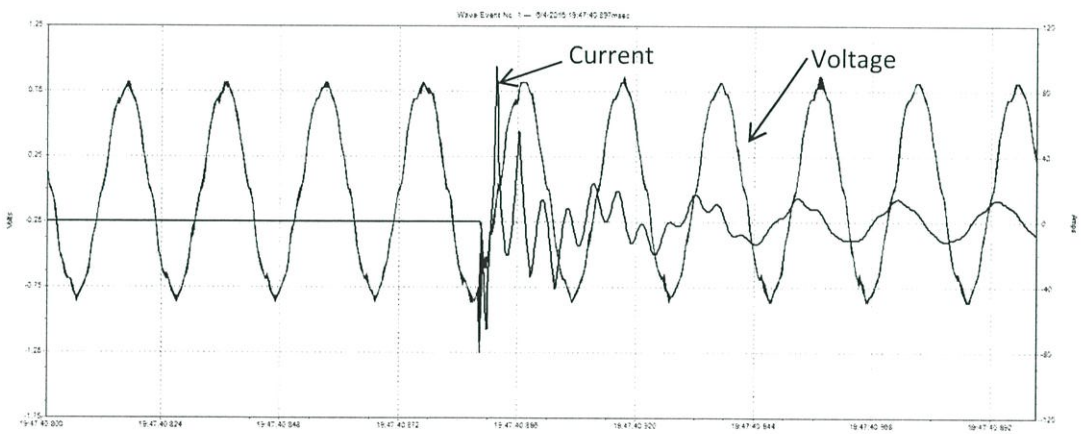


ข) กรณีมีการต่อรีเลย์แฉดเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

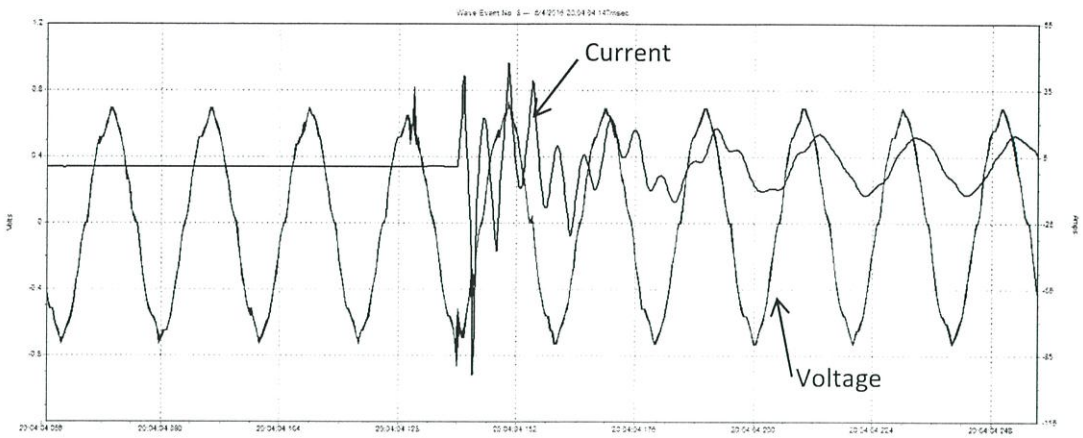


ค) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

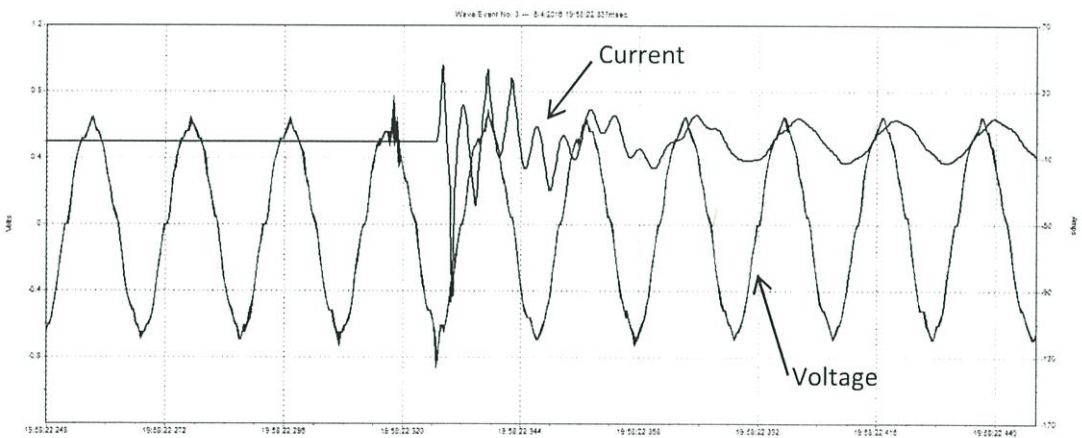
รูปที่ 4.16 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 225 องศา กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง

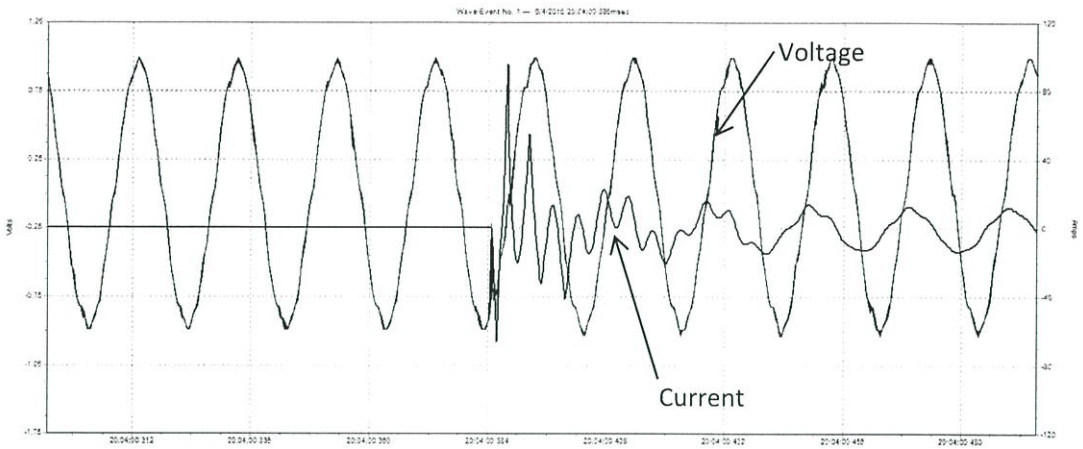


ข) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง

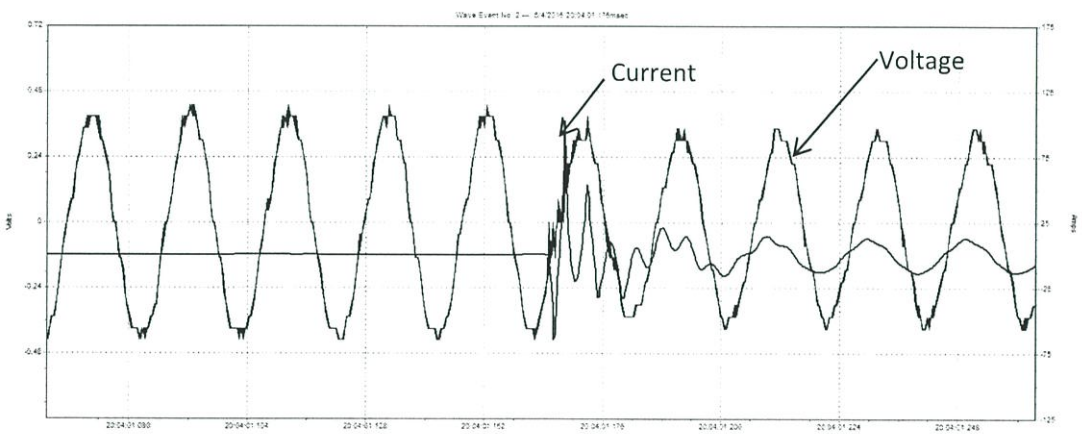


ค) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

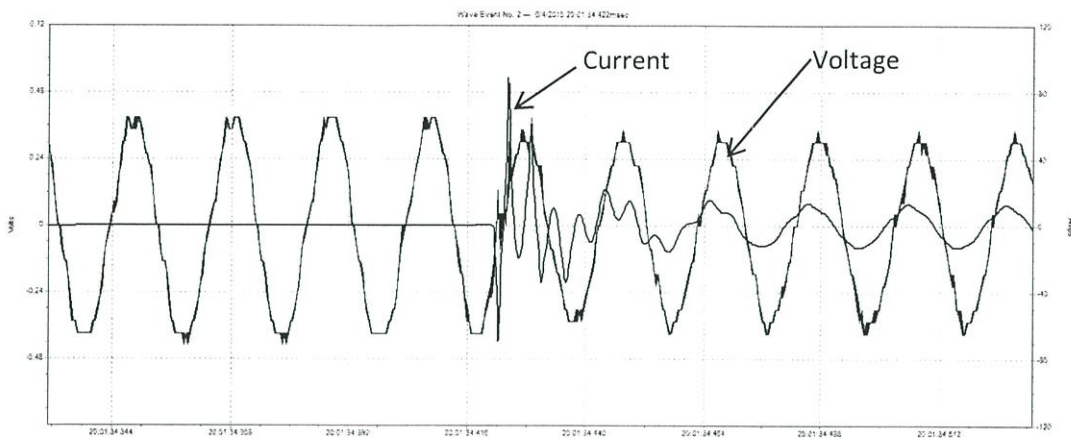
รูปที่ 4.17 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 270 องศา กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น



ก) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่หนึ่ง



ข) กรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สอง



ค) กรณีที่มีการต่อรีแอกเตอร์ลำดับชั้นที่สาม

รูปที่ 4.18 กระแสของเฟส A ในการตัดต่อที่มุม 315 องศา กรณีที่มีการต่อรีแอกเตอร์แต่ละลำดับชั้น

จากผลการทดลองการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุทั้งกรณีที่มีการต่อรีแอกเตอร์และไม่มี การต่อรีแอกเตอร์กับวงจรตัวเก็บประจุ จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้ เห็นว่าการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะมีและไม่มีรีแอกเตอร์ที่มุมทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามมุมทาง ไฟฟ้าที่ทำให้การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ โดยการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 90 และ 270 องศาทาง ไฟฟ้าทำให้เกิด กระแสไหลพุ่งที่มีขนาดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการตัดต่อที่มุมอื่นๆ และการตัดต่อ วงจรตัวเก็บประจุที่มุม 0 และ 180 องศาทางไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหลพุ่งที่มีขนาดต่ำสุดเมื่อ เปรียบเทียบกับการตัดต่อที่มุมอื่นๆ เหตุผลเนื่องจากมุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ϕ มีผลต่อการ เกิดกระแสไหลพุ่งดังสมการที่ 4.1

$$I_{inrush} = K \frac{1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}} \text{ sine}(\phi) \tag{4.1}$$

- เมื่อ I_{inrush} = ค่ากระแสไหลพุ่งสูงสุด (A)
- n = จำนวนวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่ออยู่ก่อนหน้า
- Q_n = กำลังไฟฟ้าเสมือนวงจรตัวเก็บประจุในลำดับชั้น (kVAR)

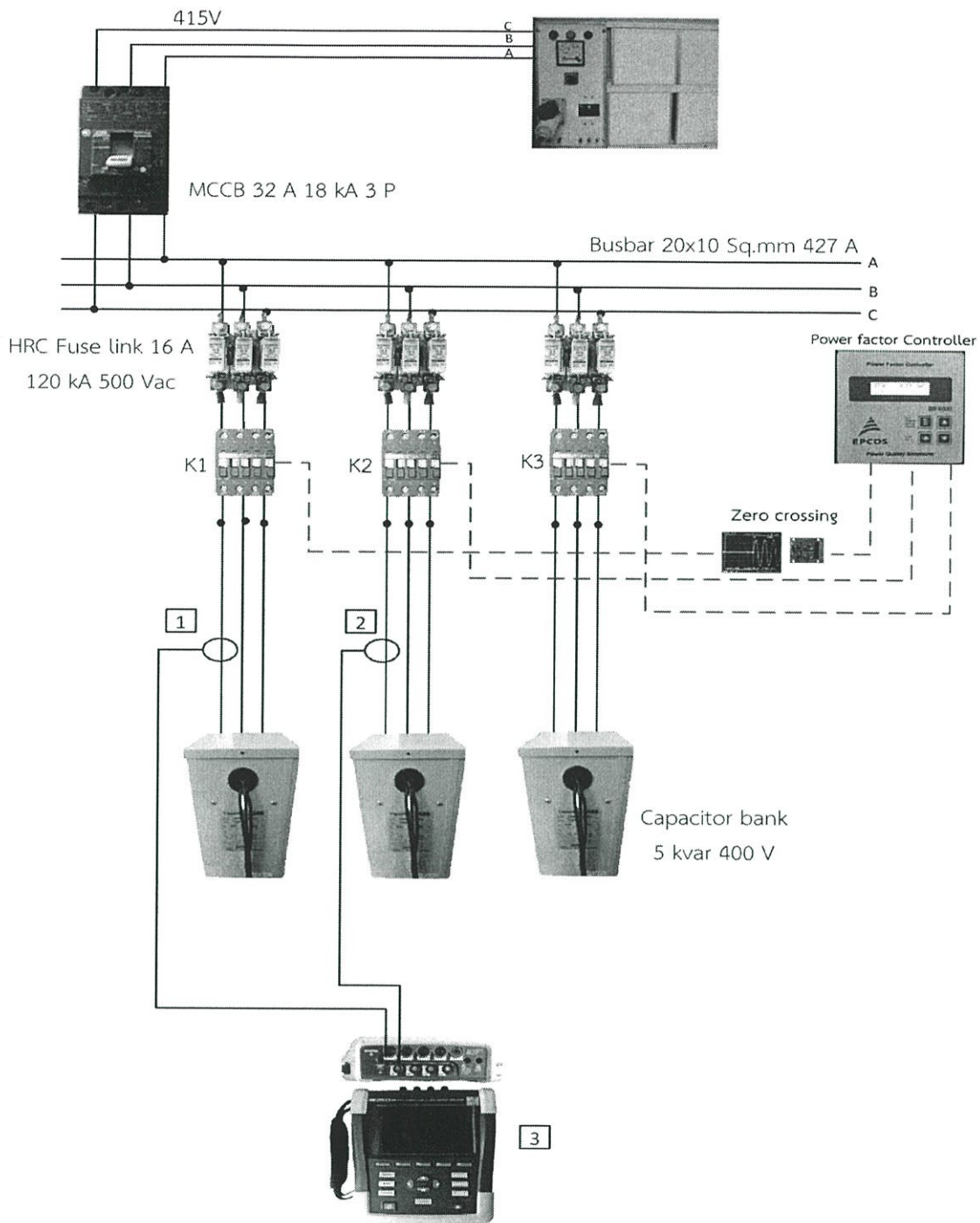
| | | | | | | |
|-------------|---|---|---|-------------|---|-------|
| Q_1 | = | Q_2 | = | Q_{\dots} | = | Q_n |
| U | = | แรงดันเฟส (V) | | | | |
| L_n | = | ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในลำดับชั้น (μH) | | | | |
| L_1 | = | L_2 | = | L_{\dots} | = | L_n |
| K | = | ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz | | | | |
| \emptyset | = | มุมในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ (องศา) | | | | |

และเมื่อพิจารณาที่มุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเดียวกันทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นกรณีที่มีการต่อรีแอกเตอร์มีขนาดที่ต่ำกว่าขนาดกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นกรณีไม่มีรีแอกเตอร์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากจากค่าพารามิเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในลำดับชั้น L_n จากสมการที่ 4.1 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการติดตั้งรีแอกเตอร์เชื่อมต่อกับวงจรตัวเก็บประจุ จึงส่งผลทำให้ขนาดกระแสไหลฟุ้งมีขนาดลดลง และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ที่มุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเดียวกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งรีแอกเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุทำให้กระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นใช้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่สั้นกว่ากรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งรีแอกเตอร์ เหตุผลเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นมีค่าแปรผันตรงตามขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่รองลงมา โดยเหตุผลของขนาดกระแสไหลฟุ้งและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีเหตุผลเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.1

4.3 พฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์

ในการทดลองที่ 4.3 การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุในลำดับชั้นที่หนึ่งโดยกำหนดการตัดต่อไว้ที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้า จากนั้นทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองต่อเนื่องจากลำดับชั้นที่หนึ่ง โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 0, 45 และ 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลฟุ้งของลำดับชั้นที่หนึ่งขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นที่สอง โดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ สำหรับการขั้นตอนในการเก็บผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายดังนี้

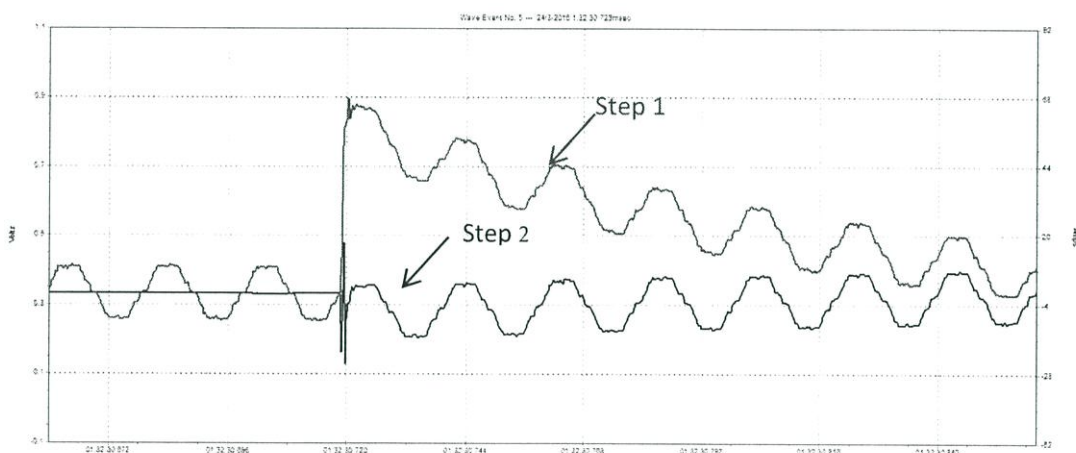
การทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ มีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ขั้นตอนทำการทดลองมีความคล้ายคลึงกับในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แตกต่างกันในหัวข้อนี้คือการกดคำสั่งตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเพียงสองลำดับชั้นได้แก่ ลำดับชั้นที่หนึ่งและสอง โดยการเชื่อมจุดวัดเหมือนกับในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แต่ลดเชื่อมจุดวัดแค่เพียงสองลำดับชั้นเท่านั้น สำหรับขั้นตอนในการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ได้ทำการควบคุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุแต่ละลำดับชั้นโดยกดคำสั่งที่ตัวควบคุมประกอบกำลังเพื่อให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดต่อวงจรที่ลำดับชั้นที่หนึ่งและลำดับชั้นที่สองต่อเนื่องกัน จากนั้นทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า และทำการจดบันทึกค่าพร้อมทั้งรูปกราฟกระแสไหลฟุ้งและแรงดันไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.19 ไดอะแกรมการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่
ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มุม 0 | 68.741 | 164 | 8.181 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มุม 0 | 79.587 | 184 | 8.254 | 41.564 | 161 | 8.938 |

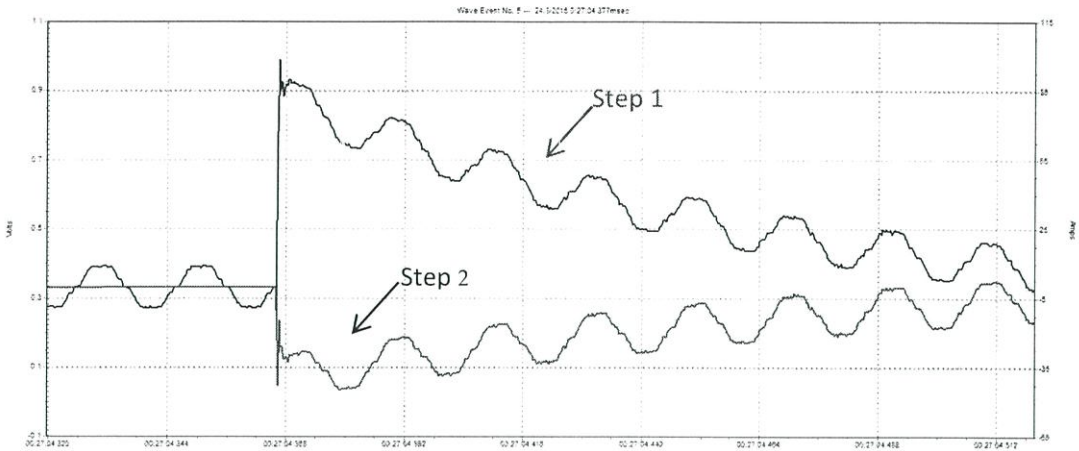


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับชั้นที่สองที่มุม 0 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีเกตอร์แอคเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มีม 0 องศาทางไฟฟ้า ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ มีผลทำให้กระแสไหลฟุ้งของตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม เนื่องจากมีกระแสที่อยู่ในวงจรตัวเก็บประจุจากลำดับชั้นเดิมอยู่ก่อนแล้วทำให้การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นถัดมามีผลทำให้กระแสที่อยู่ในวงจรตัวเก็บประจุจากลำดับชั้นก่อนหน้าเกิดการกระชากของกระแสไหลฟุ้งสูงขึ้นจากเดิม และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ เห็นได้ว่าเมื่อกระแสไหลฟุ้งของลำดับชั้นที่หนึ่งสูงขึ้นขณะทำการตัดต่อที่ลำดับชั้นที่สอง เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่ามากขึ้นด้วยเหตุผลเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นมีค่าแปรผันตรงตามขนาดของกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในบททดลองก่อนหน้า

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีเกตอร์แอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มีม 45 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มีม 0 | 72.214 | 187 | 8.189 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มีม 45 | 106.457 | 247 | 8.157 | -53.782 | 201 | 8.947 |

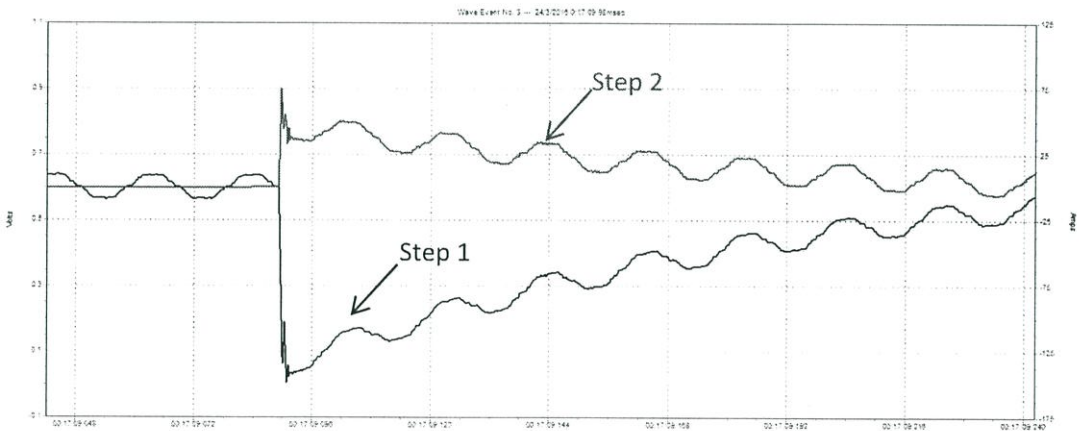


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับชั้นที่สองที่มุม 45 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.4 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลพุ่งขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้า ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อไปในระบบอยู่ มีผลทำให้กระแสไหลพุ่งของตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ และมีเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณีก่อนหน้านี้ และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ เห็นได้ว่าเมื่อกระแสไหลพุ่งของลำดับชั้นที่หนึ่งสูงขึ้นขณะทำการตัดต่อที่ลำดับชั้นที่สองด้วยเช่นกัน และมีสาเหตุเดียวกันดังที่กล่าวในการทดลองก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มุม 0 | -72.214 | 187 | 8.189 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มุม 90 | -165.312 | 541 | 8.254 | 136.524 | 410 | 8.972 |



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

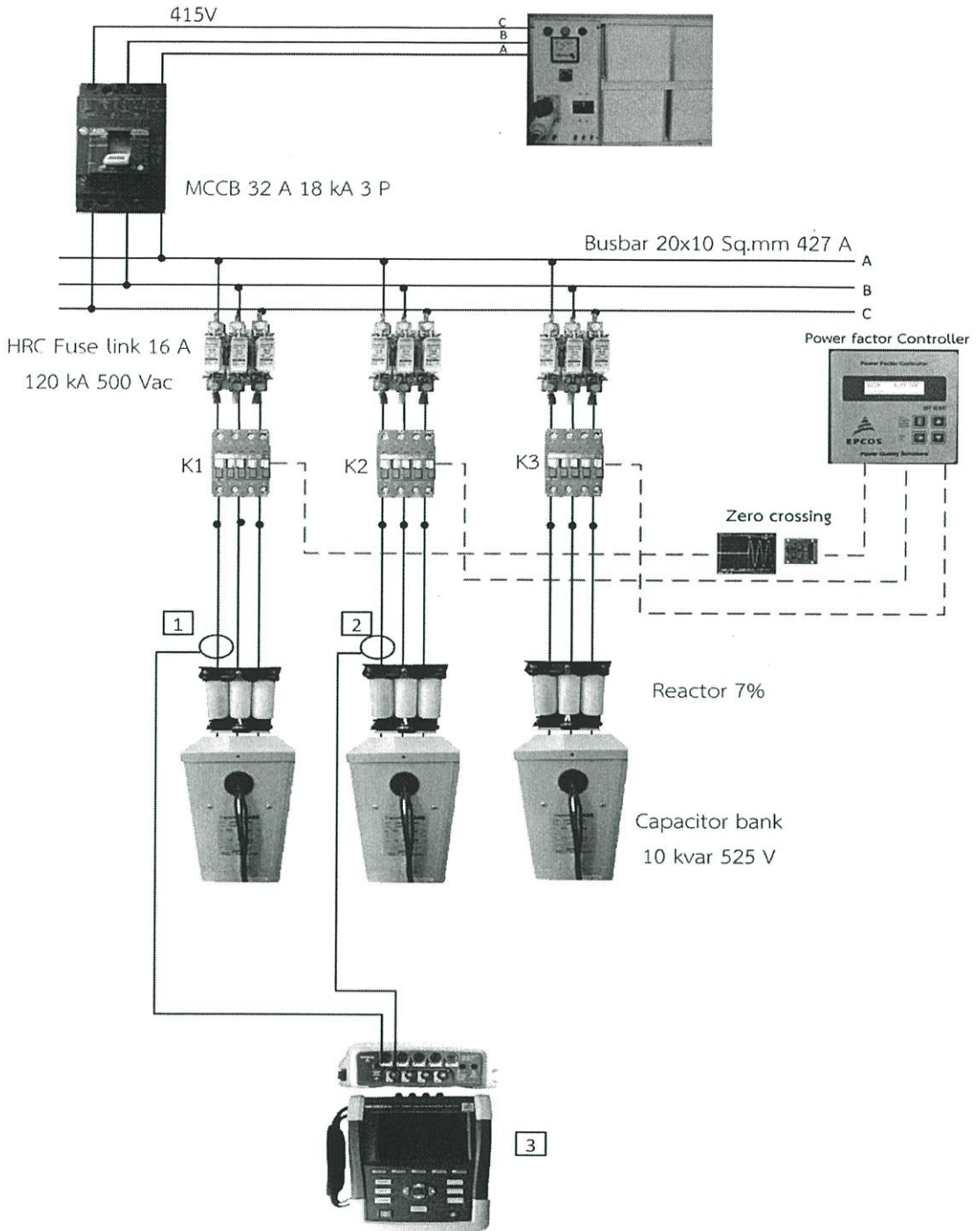
เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.5 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้า ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ มีผลทำให้กระแสไหลฟุ้งของตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเหมือนการทดลองที่มุม 0 และ 45 องศาทางไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ผลการทดลองเหมือนกรณี 0 และ 45 องศาทางไฟฟ้าเช่นกัน

4.4 พฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์

ในการทดลองที่ 4.4 การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุในลำดับชั้นที่หนึ่งโดยกำหนดการตัดต่อไว้ที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้า จากนั้นทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองต่อเนื่องจากลำดับชั้นที่หนึ่ง โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 0, 45 และ 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลฟุ้งของลำดับชั้นที่หนึ่งขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นที่สอง โดยมีการต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ สำหรับการขั้นตอนในการเก็บผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายดังนี้

การทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ มีไดอะแกรมที่ใช้การทดลองจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 โดยการเชื่อมจุดวัดและขั้นตอนในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.3 แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ในหัวข้อนี้มีการเพิ่มชุดรีแอคเตอร์ต่อเข้าอนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุก่อนที่จะเกิดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ

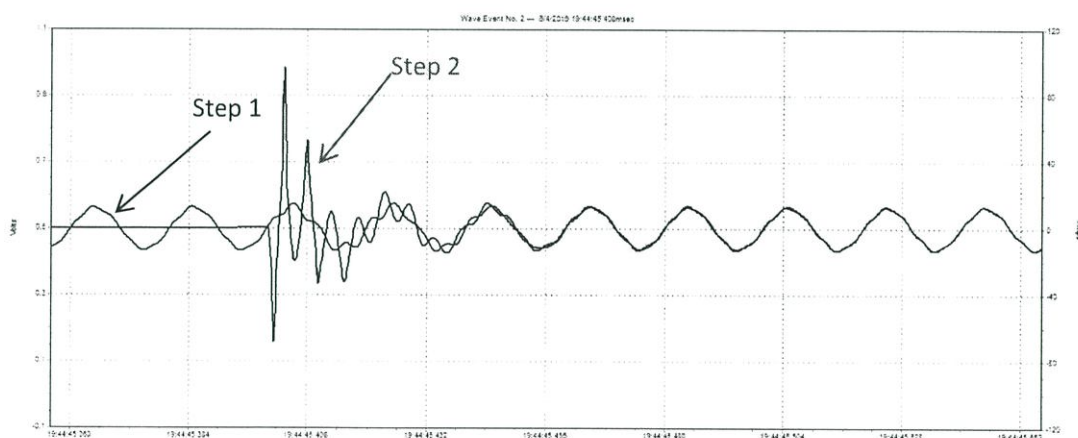
สำหรับขั้นตอนในการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ ได้ทำการควบคุมการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุแต่ละลำดับชั้นโดยกดคำสั่งที่ตัวควบคุม ประกอบกำลังเพื่อให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดต่อวงจรที่ลำดับชั้นที่หนึ่งและลำดับชั้นที่สองต่อเนื่องกัน จากนั้นทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า และทำการจดบันทึกค่าพร้อมทั้งรูปกราฟกระแสไหลฟุ้งและแรงดันไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.23 ไดอะแกรมการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่
ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มุม 0 | 94.544 | 74 | 12.487 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มุม 0 | 15.145 | 12 | 12.558 | 91.564 | 47 | 14.742 |

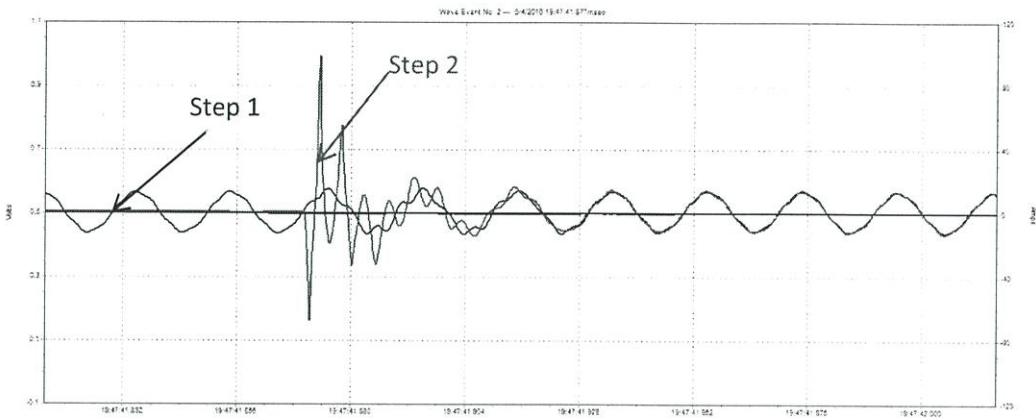


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับชั้นที่สองที่มุม 0 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.6 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 0 องศาทางไฟฟ้า ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ค่ากระแสไหลฟุ้งของลำดับชั้นที่หนึ่งไม่มีการเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากจากค่าพารามิเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในลำดับชั้น (L_n) จากสมการที่ 4.1 ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 4.1 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการติดตั้ง รีแอคเตอร์เชื่อมต่ออนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ จึงส่งผลทำให้ไม่เกิดกระแสไหลฟุ้งขึ้นขณะที่ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สอง และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อกระแสไหลฟุ้งของลำดับชั้นที่หนึ่งไม่เกิดขึ้นขณะทำการตัดต่อที่ลำดับชั้นที่สอง เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่จึงมีค่าน้อยมาก เหตุผลเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มุม 0 | 92.571 | 61 | 12.364 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มุม 45 | 15.131 | 10 | 12.219 | 92.287 | 59 | 14.812 |

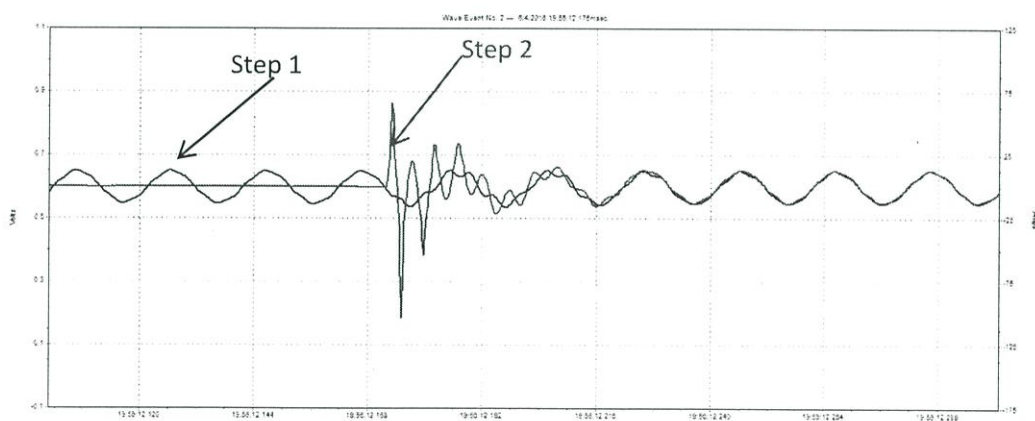


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีมีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับขั้นที่สองที่มุม 45 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับขั้นที่หนึ่ง

เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับขั้นถัดไปต่อเนื่องจากลำดับขั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอกเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.7 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สองที่มุม 45 องศาทางไฟฟ้า ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ค่ากระแสไหลฟุ้งของลำดับขั้นที่หนึ่งไม่มีการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสองกรณีก่อนหน้าและมีสาเหตุเหมือนกัน เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อกระแสไหลฟุ้งของลำดับขั้นที่หนึ่งไม่เกิดขึ้นขณะทำการตัดต่อที่ลำดับขั้นที่สองเช่นกัน เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่จึงมีค่าน้อยมาก เหตุผลเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ โดยกำหนดการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุของลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้า

| ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ | จุดวัดที่ลำดับชั้น 1 | | | จุดวัดที่ลำดับชั้น 2 | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) | กระแสไหลฟุ้ง (แอมแปร์) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (มิลลิวินาที) | กระแสที่สภาวะคงที่ (แอมแปร์) |
| ลำดับชั้น 1 ที่มุม 0 | 94.544 | 74 | 12.487 | - | - | - |
| ลำดับชั้น 2 ที่มุม 90 | 15.493 | 14 | 12.627 | -94.146 | 71 | 14.981 |



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีมีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

เมื่อทำการทดลองดูพฤติกรรมกระแสไหลฟุ้งที่เกิดขึ้นขณะตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ลำดับชั้นถัดไปเนื่องจากลำดับชั้นเดิมโดยมีการต่อรีแอคเตอร์ จากการทดลองตามตารางที่ 4.8 ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้งขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สองที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้า ผลการทดลองและเหตุผลเหมือนกับกรณีก่อนหน้า

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ปฏิญานินพจน์นี้เป็นการพัฒนาชุดสาคิตการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุที่จำลองมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก มีการคำนวณเปรียบเทียบขนาดของวงจรถั่วเก็บประจุ พิกัดของอุปกรณ์ประกอบในระบบ และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกกับชุดสาคิตในรูประบบต่อหน่วยเพื่อนำมาออกแบบและจัดสร้างชุดสาคิตวงจรถั่วเก็บประจุ การทดลองมีการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุเข้าสู่ระบบผ่านตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการตัดต่อของวงจรถั่วเก็บประจุ จากการศึกษาผลที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุเข้าใช้งานนั้น ลักษณะของแรงดันและกระแสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ลักษณะกระแสไหลพุ่งเกิดขึ้นนั้นมีขนาดและความถี่ที่สูงมากภายในระยะเวลาสั้น ปฏิญานินพจน์นี้ทำการออกแบบติดตั้งระบบป้องกัน เพื่อที่ลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในขณะที่การตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุ กระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้น ปฏิญานินพจน์นี้ได้ใช้รีแอคเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้าเข้ากับชุดสาคิตระบบการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุ เพื่อช่วยลดผลของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นขณะการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุ และจัดทำชุดวงจรถวจจับผ่านศูนย์ เพื่อควบคุมมุมที่ต้องการให้เกิดการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุ จากนั้นทำการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการลดผลกระทบกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้น และในกรณีที่มีการติดตั้งชุดรีแอคเตอร์จำกัดกระแสและกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันให้ชุดถั่วเก็บประจุ ซึ่งผลการทดลองสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

การตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์และมีการต่อรีแอคเตอร์จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุลำดับขั้นที่หนึ่งมีกระแสไหลพุ่งขนาดสูงสุดเมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและสามที่มีขนาดกระแสไหลพุ่งรองลงมาลำดับ และค่าของเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงที่ลำดับขั้นที่หนึ่งใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและสามที่มีการใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงที่รองลงมาลำดับ เมื่อพิจารณาค่ากระแสที่สภาวะคงที่ขณะทำการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุลำดับขั้นที่สามมีกระแสที่สภาวะคงที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและหนึ่งที่มีขนาดกระแสที่สภาวะคงที่รองลงมาลำดับ

การตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ที่มุมทางต่างๆ จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามมุมทางไฟฟ้าที่ทำการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่หลังการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุ โดยการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุที่มุม 0 และ 180 องศาทางไฟฟ้าเกิดกระแสไหลพุ่งที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดของกระแสไหลพุ่งต่ำสุดเมื่อเทียบกับการตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุที่มุมอื่นๆ การตัดต่อวงจรถั่วเก็บประจุที่มุม 90 และ 270 องศาทางไฟฟ้า เกิดกระแสไหลพุ่งที่มีขนาดสูงสุดและใช้เวลาในการเข้าสู่

สภาวะคงที่นานหลังจากทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุมอื่นๆ

การทดลองพฤติกรรมของกระแสไหลฟุ้งของแต่ละลำดับชั้น ในขณะที่ทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุถัดจากลำดับชั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์เชื่อมต่อ ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สอง ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ส่งผลให้กระแสไหลฟุ้งของตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่หนึ่งมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจาก และเมื่อมีรีแอคเตอร์เชื่อมต่อกับวงจรตัวเก็บประจุ ผลจากการวัดค่ากระแสไหลฟุ้ง แสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่สอง ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับชั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ส่งผลให้กระแสไหลฟุ้งของตัวเก็บประจุลำดับชั้นที่หนึ่งไม่มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม มา แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งรีแอคเตอร์อนุกรมเข้ากับวงจรตัวเก็บประจุสามารถลดขนาดกระแสไหลฟุ้งได้

5.2 ปัญหาที่พบ

1. ชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์พบปัญหาของการตัดต่ออิเล็กทรอนิกส์ และแมคเนติกคอนแทกเตอร์ที่ทำการเชื่อมต่อระบบล่าช้า ทำให้เกิดปัญหาความแม่นยำในการตรวจจับของชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มุมศูนย์องศาทางไฟฟ้าเกิดความคลาดเคลื่อน
2. การทดลองวงจรตรวจจับผ่านศูนย์เกิดปัญหาการเชื่อมต่อวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ระหว่างตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแมคเนติกคอนแทกเตอร์ที่มีความซับซ้อน
3. การทดลองพบปัญหาทางด้านเสียงที่เกิดจากหน้าสัมผัสของแมคเนติกคอนแทกเตอร์
4. การคำนวณออกแบบวงจรดีจูนฟิลเตอร์ส่งผลต่อค่าขนาดของวงจรตัวเก็บประจุเดิมที่ไม่เหมาะสมกับระบบหลังจากการติดตั้งรีแอคเตอร์เข้าระบบ ต้องทำการติดตั้งวงจรตัวเก็บประจุค่าใหม่ที่มีค่าไม่ตรงกับค่าที่คำนวณ
5. พื้นที่ในการจัดวางรีแอคเตอร์มีพื้นที่จำกัด

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ควรทดลองทำการต่อโหลดให้กับวงจรตัวเก็บประจุเพื่อดูผลของกระแสไหลฟุ้งและดูผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นทั้งกรณีที่มีการต่อรีแอคเตอร์ และไม่มีการต่อรีแอคเตอร์
2. ควรมีการพัฒนาชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการตรวจจับที่มุมศูนย์เพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1]. Grunbaum, R. "765KV Series Capacitors for Increasing Power Transmission Capacity to The Cape Region" **IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (Power Africa)**, July 9-13, 2012
- [2]. M.M. Aman, G.B. Jasmon, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, M. Karimi, Optimum shunt capacitor placement in distribution system—A review and comparative study, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 30, February 2014, Pages 429-439, ISSN 1364-0321,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.002>.
- [3]. J. C. Das, "Analysis and control of large shunt capacitor bank switching transients," **Conference Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference**, 2005., Jacksonville, FL, 2005, pp. 131-140.
- [4]. Mirza Softić, Amir Tokić, Ivo Uglešić, Measurement, Modeling and Simulation of Capacitor Bank Switching Transients, **IFAC Proceedings Volumes**, Volume 45, Issue 2, 2012, Pages 1254-1259, ISSN 1474-6670,
<http://dx.doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00222>.
- [5]. K. Tilakul, P. Buasri, A. Kaewrawang and J. Triyankulsri "Capacitor Location and Size Determination to Reduce Power Losses of a Distribution Feeder in Lao PDR" **International Journal of Computer and Electrical Engineering**, Vol.4, No.1, February 2012
- [6]. C. Rivera (PREPA), and R. Baretty (PREPA) "Energization Study Of 10.4MVAR Capacitor Bank in 38KV System" **University of Kentucky Master's Theses** 2011
- [7]. Durga Bhavan iMupparty "Capacitor Switching Transient Modeling and Analysis on An Electrical Utility Distribution System Using SIMULINK Software" **University of Kentucky Master's Theses** 2011
- [8]. P. E. Issouribehere, F. Issouribehere, G. A. Barbera and D. Gomez, "Measurements and Studies of Harmonics and Switching, Transients in Large HV Shunt Capacitor Banks," **Power Engineering Society General Meeting**, 2007. IEEE, Tampa, FL, 2007, pp. 1-8.
- [9]. A. Kalyuzhny "Switching Capacitor bank Back-to-Back to Underground Cables", **IEEE Transactions on Power Delivery**

- [10]. E. h. Camm “Shunt Capacitor Overvoltages and a Reduction Technique”, presented at the Panel Session on “Overvoltages: Analysis and Protection” **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**, New Orleans, LA April 14, 1999
- [11]. M. Ghadimi, A. Ramezani and K. Bozorgi, "Energy Efficiency and Power Quality Optimization Using a Modified Capacitor Bank: An Industrial Case Study," **Computer Modeling and Simulation**, 2009. EMS '09. Third UKSim European Symposium on, Athens, 2009, pp. 384-388.
- [12]. T. Ghanbari, E. Farjah and A. Zandnia, "Solid-state transient limiter for capacitor bank switching transients," in **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 7, no. 11, pp. 1272-1277, November 2013.
- [13]. A. Ruszczuk, K. Kóska and K. Janisz, "Solid-state switch for capacitors bank used in reactive power compensation," **2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)**, Lagow, 2015, pp. 1-5.
- [14]. B. M. Huhman and J. M. Neri, "Effect of Fuse Resistance on EML Capacitor Bank Solid-State Switching," **2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference**, Las Vegas, NE, 2008, pp. 89-92.
- [15]. Working Group 3.4.17 “Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications” **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 11, No. 4, October 1996
- [16]. Grebe, T.E. “Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality” **IEEE Transactions on Industry Applications**, May/June 1996
- [17]. Baloi, A. Kocewiak, L. ; Bak, C.L. ; Pana, A. “Experimental Determination of Harmonic Conditions Amplification in a Distribution Network by Capacitor Bank Switching” **13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**, 2012
- [18]. Ranjit Kumar, “Assuring Voltage Stability in the Smart Grid”, presented at the **ISGT Conference, Anaheim, CA** January 17-19, 2011.
- [19]. "IEEE Std C37", **IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks**
- [20]. Edmund O. Schweitzer, Jolene Schafman “UNIFIED SHUNT CAPACITOR BANK CONTROL AND PROTECTION” Presented before the **45TH Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia** May 1-3, 1991

- [21]. Michael Beanland, Thomas Speas, Joe Rostron "Pre-insertion Resistors in High Voltage Capacitor Bank Switching" Prepared for **Western Protective Relay Conference** October 19-21, 2004 Spokane, WA
- [22]. Tien-Ting Chang, Wei-Hsiang Chen "Pre-insertion Resistor of Switching Shunt Capacitor Banks" National Chin-Yi University of Technology
- [23]. Robert Frye, Jay Hicks, Elmo Price "Achieving Optimum Capacitor Bank Protection and Control" **65th Annual Conference for Protective Relaying Engineer**, April 2-5, 2012
- [24]. Kasztenny B., Brunello G., Wester C. "Capacitor Bank Fundamentals and Protection", Proceedings of the **56th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, TX** April 8-11, 2003
- [25]. BogdanKasztenny, Joe Schaefer, Ed Clark, "Fundamentals of Adaptive Protection of Large Capacitor Banks" **60th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, TX** March 27-29, 2007
- [26]. Mohammad A.S. Masoum and Ewald F. Fuchs, Chapter 10 - Optimal Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in the Presence of Harmonics, In **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)**, Academic Press, Boston, 2015, Pages 887-959, ISBN 9780128007822, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-800782-2.00010-5>.
- [27]. T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul and C. Pothisarn, "Inrush current analysis for switching large shunt capacitor bank in a 230 kV substation system," **Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, 2013 International Conference on, Busan, 2013, pp. 1325-1329.
- [28]. M. H. B. de Grijp and R. A. Hopkins, "Controlled switching of shunt capacitors," **AFRICON**, 1996., **IEEE AFRICON 4th**, Stellenbosch, 1996, pp. 874-879 vol.2.
- [29]. Smajo Bisanoovic, Mensur Hajro, Mersiha Samardzic, One approach for reactive power control of capacitor banks in distribution and industrial networks, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Volume 60, September 2014, Pages 67-73, ISSN 0142-0615, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.02.039>.
- [30]. Michael Beanland, Thomas Speas, Joe Rostron "Pre-insertion Resistors in High Voltage Capacitor Bank Switching" Prepared for **Western Protective Relay Conference**, October 19-21, 2004 Spokane, WA

- [31]. T. Suwanasri, S. Wattanawongpitak and C. Suwanasri, "Multi-step back-to-back capacitor bank switching in a 115 kV substation," **Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, 2010 International Conference on, Chaing Mai, 2010, pp. 459-463.
- [32]. BogdanKasztenny, Joe Schaefer, Ed Clark, "Fundamentals of Adaptive Protection of Large Capacitor Banks" **60th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, TX March 27-29, 2007**
- [33]. **ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าเนื่องจากการต่อ-ปลด Capacitor Bank**, ดร. อิชฎา บุญญาอรุณเนตร
- [34]. **Damping of Inrush Current in Low-Voltage PFC Equipment Application Note 2001**, EPCOS
- [35]. **การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าใน substation เนื่องจากสวิตช์ของคาปาซิเตอร์แบงค์**, สราวุธ ตั้งสุริยานนท์ สุรพงษ์ ธรรมพร เสกศักดิ์ ช่อปลัด ผ.ศ. จงรักษ์ บุญเสียง, 2542
- [36]. **ดร.อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล, ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 1 ปี 2552**
- [37]. **Application Guide Contactors for Capacitor Switching**, ABB

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการ

การพัฒนาชุดคาปาซิเตอร์เพื่อลดกระแสอินรัชขณะสวิตชิงคาปาซิเตอร์

Development of Experimental Capacitor Bank Set up for Reduce Inrush Current

ชวิน ตันทเลขา, ชาญชัย คำดี, โขติระวี ยนตราชีวะ และ ณัฐวัฒน์ สุขะโท

รศ.ดร.อรรถพล เน่าพิทักษ์กุล และ ผศ.ชายชาญโพธิสาร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ผลิตองกรู 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 0898588871 E-Mail: LuzioPiercer@gmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาชุดสาธิตการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ (Switching Capacitor) ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่จำลองมาจากระบบจริง โดยโครงการนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุและออกแบบติดตั้งระบบป้องกัน เพื่อที่ลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ สัญญาณชั่วขณะที่ทำการศึกษาได้แก่ กระแสไหลพุ่ง (Inrush Current) แรงดันชั่วขณะ เป็นต้น โครงการนี้ใช้รีแอคเตอร์ต่ออนุกรมทางไฟฟ้าเข้ากับชุดสาธิตระบบการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ เพื่อช่วยลดผลของกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นในขณะการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ และจัดทำชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมมุมที่ต้องการให้เกิดการสวิตซ์ตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ จากนั้นทำการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการลดผลกระทบกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้น และในกรณีที่มีการติดตั้งชุดรีแอคเตอร์จำกัดกระแสและกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันให้ชุดตัวเก็บประจุ

Abstract

This project aims to develop switching capacitor bank experimental setup that after capacitor bank system in substation. This project analyzed behavior of transient signal that occur when switching capacitor bank into system and also implement protection device. Transient phenomena that has been study such as Inrush current and Voltage transient. To reduce the effect of switching transient while switching the capacitor bank into the system. The current limiting reactor has been used in this project to reduce the inrush current. The zero crossing circuit has been designed implement into experimental setup to control switching angle of the capacitor bank. Analyzed data will be used to evaluate the effectiveness of protection devices in inrush current reduction comparing to in case of without protection devices. Obtaining data

can be used for designed and installed of protection system for capacitor bank system.

1. บทนำ

เนื่องในระบบไฟฟ้าปัจจุบันมีการใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พบว่ามีความต้องการไฟฟ้าที่มีความสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการใช้ไฟฟ้าที่ไม่มีประสิทธิภาพ การที่มีตัวประกอบกำลังไม่เหมาะสมเป็นเหตุผลหนึ่งที่ส่งผลทำให้มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของความต้องการไฟฟ้าที่อาจเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต จึงมีการใช้วิธีการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งระบบวงจรตัวเก็บประจุเป็นหนึ่งในระบบที่ผู้ผลิตไฟฟ้าและโรงงานให้ความสนใจ โดยใช้วงจรตัวเก็บประจุที่นำมาติดตั้งในระบบเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันวงจรตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในระบบนั้นก่อให้เกิดกระแสไหลพุ่ง (Inrush Current) ในขณะที่มีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าใช้งาน โดยกระแสดังกล่าวมีค่าที่สูงมากในช่วงระยะเวลาอันสั้น ซึ่งจะส่งผลทำให้วงจรตัวเก็บประจุนี้เองได้รับเสียหายที่เกิดจากกระแสไหลพุ่งดังกล่าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีป้องกันหรือลดกระแสไหลพุ่ง (Inrush Current) ที่เกิดขึ้นขณะมีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ โดยปรัชญาพื้นฐานนี้เป็นการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพในการลดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นด้วยการใช้ชุดดีจูนฟิลเตอร์

2. การพัฒนางจรตัวเก็บประจุเป็นดีจูนฟิลเตอร์

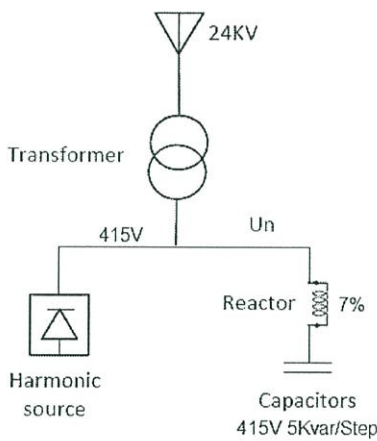
2.1 ดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter)

ดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter) ประกอบด้วยตัววงจรตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์ประกอบกันซึ่งการทำงานของดีจูนฟิลเตอร์ทำหน้าที่เหมือนวงจรตัวเก็บประจุทุกประการคือ การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและเสริมด้วยความสามารถในการแก้ปัญหาเรื่องการสั้นพ้องแบบขนานได้ โดยรีแอคเตอร์ทำหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกความถี่สูงไหลเข้าวงจรตัวเก็บประจุ โดยใช้หลักการทางไฟฟ้าเพิ่มความต้านทานให้สูงขึ้น เมื่อความถี่ของไฟฟ้า

สูงขึ้น เนื่องจากความต้านทานของรีแอกเตอร์นี้ จะสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นความต้านทานรวมของชุดคิจุณฟิลเตอร์หมายถึงความต้านทานของรีแอกเตอร์รวมกับความต้านทานของตัวเก็บประจุ ซึ่งสูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่มีความถี่สูงไหลเข้าสู่วงจรตัวเก็บประจุน้อยลง โดยคิจุณฟิลเตอร์เป็นส่วนสำคัญของความต้านทานของรีแอกเตอร์ต่อความต้านทานตัวเก็บประจุ

2.2 การคำนวณตัดแปลงวงจรตัวเก็บประจุให้เป็นคิจุณฟิลเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ของระบบประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้าของระบบ 415 V ขนาดของวงจรตัวเก็บประจุ 5 kVAR 415 V 3 เฟส ทำการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุโดยเลือกเลือกใช้รีแอกเตอร์ขนาด 7% ซึ่งในส่วนของกรคำนวณใช้สมการอ้างอิงในส่วนของทฤษฎีที่กล่าวไว้คำนวณได้ดังนี้



$$\begin{aligned} \text{แรงดันตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุ} &= \frac{400}{1-0.07} \text{ V} \\ &= 446.24 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ} &= \frac{5}{1-0.07} = 5.38 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าปาซิทีฟรีแอกแตนซ์} &= \frac{446.24^2}{5.38 \times 1000} = 37.01 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์} &= 0.07 \times 37.01 = 2.59 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุ(Xc) และค่าความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเหนี่ยวนำ(XL) ที่แต่ละความถี่ของฮาร์โมนิกดังนี้

ฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ความถี่ 50 Hz

$$X_{c1} = 37.01 \text{ } \Omega \quad X_{L1} = 2.59 \text{ } \Omega$$

ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ความถี่ 150 Hz

$$X_{c3} = 12.34 \text{ } \Omega \quad X_{L3} = 7.77 \text{ } \Omega$$

ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ความถี่ 250 Hz

$$X_{c5} = 7.40 \text{ } \Omega \quad X_{L5} = 12.59 \text{ } \Omega$$

ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ความถี่ 350 Hz

$$X_{c7} = 5.29 \text{ } \Omega \quad X_{L7} = 18.31 \text{ } \Omega$$

จากขีดจำกัดของแต่ละฮาร์โมนิกอ้างอิงในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่กำหนดไว้คือ U1 = 6%, U3=0.5%, U5=5% และ U7=5% คำนวณหากระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับที่เกิดขึ้นได้สูงสุดอ้างอิงสมการ 2.9 ในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

$$\text{ฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 } U_1=6\% \quad I_1 = 7.37 \text{ A}$$

$$\text{ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 } U_3=0.5\% \quad I_3 = 0.26 \text{ A}$$

$$\text{ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 } U_5=5\% \quad I_5 = 2.31 \text{ A}$$

$$\text{ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 } U_7=5\% \quad I_7 = 0.93 \text{ A}$$

$$\text{กระแสฮาร์โมนิกของฮาร์โมนิกทั้งหมด} = 7.78 \text{ A}$$

$$7\% \text{ รีแอกเตอร์ ที่มาติดตั้งต้องทนกระแสได้} = 8.17 \text{ A}$$

ดังนั้นจากการคำนวณข้างต้นต้องใช้ 7% รีแอกเตอร์ที่มีความต้านทาน 2.59 Ω หรือ ค่าความเหนี่ยวนำ 0.653 mH และต้องทนกระแสได้ 8.17 A ได้เป็นอย่างดีน้อย ส่วนชุดคิจุณฟิลเตอร์แต่ละสแต็ปต้องทนกระแสได้อย่างน้อย 7.78 A

การเลือกตัววงจรตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับ 7% รีแอกเตอร์และทนกระแสได้ไม่น้อยกว่าที่คำนวณไว้ สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือ แรงดันที่ตกคร่อมตัววงจรตัวเก็บประจุหลังจากติดตั้งติดตั้ง 7% รีแอกเตอร์แล้ว เมื่อวงจรตัวเก็บประจุเดิมขนาด 5 kVAR 415V มีค่าความต้านทานเท่ากับ 34.45 โอห์ม แต่เมื่อติดตั้ง 7% รีแอกเตอร์อนุกรมกับวงจรตัวเก็บประจุ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่รีแอกเตอร์ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมและค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุเป็น 446.24V และ 53kVAR ตามลำดับ ทำให้ค่าความต้านทานของ วงจรตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 37.01 โอห์ม จากค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับที่คำนวณไว้ข้างต้นกระแสดังกล่าวมา

ดูกับค่าความต้านทานเพื่อหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่ตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุอ้างอิงสมการที่ 2.10 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 } U_1=6\% \quad U_1 = 472.44 \text{ V}$$

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 } U_3=0.5\% \quad U_3 = 5.55 \text{ V}$$

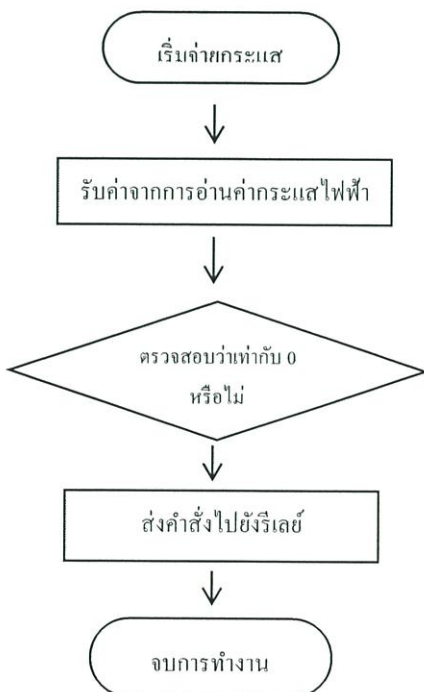
$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 } U_5=5\% \quad U_5 = 27.30 \text{ V}$$

$$\text{ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 } U_7=5\% \quad U_7 = 8.51 \text{ V}$$

แรงดันสูงสุดที่จะตกคร่อมวงจรตัวเก็บประจุเท่ากับ 513.8 V โดยแรงดันดังกล่าวรวมทั้งแรงดันที่เหนี่ยวนำจาก 7% ริแอกเตอร์และแรงดันที่เกิดขึ้นจากผลกระแส

ฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่วงจรตัวเก็บประจุ ต้องเลือกวงจรตัวเก็บประจุที่สามารถแรงดันสูงกว่า 513 V เนื่องจากในท้องตลาดประเทศไทยมีวงจรตัวเก็บประจุที่พิกัด 525V นำค่าแรงดันไฟฟ้านี้มาคำนวณเพื่อหาค่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรตัวเก็บประจุ สามารถคำนวณได้ 7.45 kVAR เมื่อมีการติดตั้งจูนฟิลเตอร์จึงทำการเลือกใช้วงจรตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับ 7.45 kVAR และเลือกใช้วงจรตัวเก็บประจุ 3 ลำดับชั้น โดยวงจรตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นรุ่น CLMD 43 จำนวน 3 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติมีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนขนาด 10 kVAR ที่ระดับแรงดัน 525 V ความถี่ 50 Hz

3.การออกแบบวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

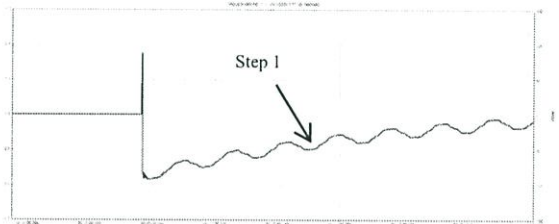


4. ผลการวิจัย

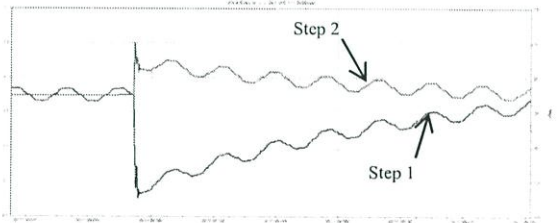
การทดลองชุดสาธิตระบบการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบในแต่ละลำดับชั้น โดยให้ตัวเก็บประจุเป็นโหลดของระบบ การเก็บข้อมูลทำโดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อมีการตัดต่อในแต่ละลำดับชั้นเพื่อนำข้อมูลวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- 1.ค่ามุมเฟสที่มีการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ
- 2.กระแสไหลพุ่ง
- 3.เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่
- 4.กระแสที่สภาวะคงที่

4.1 พฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นแต่ละลำดับชั้นของการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุโดยไม่มีการต่อรีแอกเตอร์



รูปที่ 2 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับชั้นที่หนึ่ง



รูปที่ 3 กราฟแสดงพฤติกรรมสัญญาณกระแสของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับชั้นที่สองต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับชั้นที่หนึ่ง

4.2 พฤติกรรมกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นแต่ละลำดับชั้นของการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุโดยไม่มีการต่อรีแอกเตอร์



รูปที่ 4 กราฟแสดงพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอกเตอร์ ลำดับชั้นที่หนึ่ง



รูปที่ 5 กราฟแสดงพฤติกรรมกระแสไหลพุ่งของเฟส A ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุกรณีไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ ลำดับขั้นที่สองต่อเนื่องหลังจากตัดต่อลำดับขั้นที่หนึ่ง

5. สรุปผลการวิจัย

การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์และมีการต่อรีแอคเตอร์ จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่หนึ่งมีกระแสไหลพุ่งขนาดสูงสุดเมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและสามที่มีขนาดกระแสไหลพุ่งรองลงมาตามลำดับ และค่าของเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ลำดับขั้นที่หนึ่งใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและสามที่มีการใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่รองลงมาตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่ากระแสที่สภาวะคงที่ขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สามมีกระแสที่สภาวะคงที่สูงสุด เมื่อเทียบกับลำดับขั้นสองและหนึ่งที่มีขนาดกระแสที่สภาวะคงที่รองลงมาตามลำดับ

การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุขณะไม่มีการต่อรีแอคเตอร์ที่มุมทางไฟฟ้าต่างๆ จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดกระแสไหลพุ่งที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามมุมทางไฟฟ้าที่ทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่หลังการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุ โดยการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 0 และ 180 องศาทางไฟฟ้าเกิดกระแสไหลพุ่งที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดของกระแสไหลพุ่งต่ำสุดเมื่อกับการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุมอื่นๆ การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่มุม 90 และ 270 องศาทางไฟฟ้า เกิดกระแสไหลพุ่งที่มีขนาดสูงสุด

การทดลองดูพฤติกรรมของกระแสไหลพุ่งของแต่ละลำดับขั้น ในขณะที่ทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุถัดจากลำดับขั้นเดิมโดยไม่มีการต่อรีแอคเตอร์เชื่อมต่อ ผลจากการวัดค่ากระแสไหลพุ่งแสดงให้เห็นว่าขณะทำการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สอง ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ส่งผลให้กระแสไหลพุ่งของตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่หนึ่งมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมากซึ่งถือเป็นการเกิดกระแสไหลพุ่งสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ข้างต้นที่กล่าวมา และเมื่อมีรีแอคเตอร์เชื่อมต่ออยู่กับวงจรตัวเก็บประจุ ผลจากการวัดค่ากระแสไหลพุ่งแสดงให้เห็นว่าขณะทำ

การตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่สอง ในขณะที่วงจรตัวเก็บประจุลำดับขั้นหนึ่งยังเชื่อมต่อในระบบอยู่ ส่งผลให้กระแสไหลพุ่งของตัวเก็บประจุลำดับขั้นที่หนึ่งไม่มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมา แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งรีแอคเตอร์อนุกรมเข้ากับวงจรตัวเก็บประจุสามารถลดขนาดกระแสไหลพุ่งได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Terakit Electric Solution. (2014). Capacitor Bank. Available: <http://www.faiadd.com/articles/42176996/การปรับปรุงค่า-Power-Factor-ในระบบไฟฟ้าด้วย-Capacitor-Bank.html>
- [2] Gustavo Brunello, Dr. Bogdan Kasztenny , Craig Wester. (2003). Shunt Capacitor Bank Fundamentals and Protection. Texas : Texas A&M University
- [3] IEEE Std C37, IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks
- [4] Arduino Store USA. (2016). Arduino Uno R3. Available : <http://store-usa.arduino.cc/products/a000066>

ประวัติผู้เขียน



นายชวิน ตันทเลขา (เกียรติ)

เกิดวันที่ 26 ธันวาคม 2536

ที่อยู่ 44/6-7 ถ.บุลำดวน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม

เบอร์โทรศัพท์ 087-4544488

E-mail address: rezone_extreme@hotmail.com



นายชาญชัย คำดี (ต่อ)

เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน 2536

ที่อยู่ 141/3 หมู่ที่ 5 ต.ห้วยโป่ง อ.โคกสำโรง จ.ลพบุรี 15120

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียน ราชนินิต มัธยม

เบอร์โทรศัพท์ 0972437090

E-mail address: ch.khamdee@gmail.com



นายโชติระวี ยนตราชีวะ (โชติ)

เกิดวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 711 ถ.รามคำแหง ต.หัวเตี้ยต อ.เมือง จ.ตาก 63000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนตากพิทยาคม

เบอร์โทรศัพท์ 0910254795

Email address: chotrawee_00123@hotmail.com



นายณวัฒน์ สุขะไท (ฟัน)

เกิดวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 7/200 หมู่ 6 ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา

เบอร์โทรศัพท์ 0898588871

Email address: LuzioPiercer@hotmail.com