

รหัสโครงการ SUT7-711-51-12-44



รายงานการวิจัย

การศึกษาโซลิตสแตตเบรกเกอร์สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
(Study of a Solid-State Breaker for a 22-kV Electric Power
Distribution System)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาโซลิตสเตรตเบรกเกอร์สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ (Study of a Solid-State Breaker for a 22-kV Electric Power Distribution System)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุศลรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

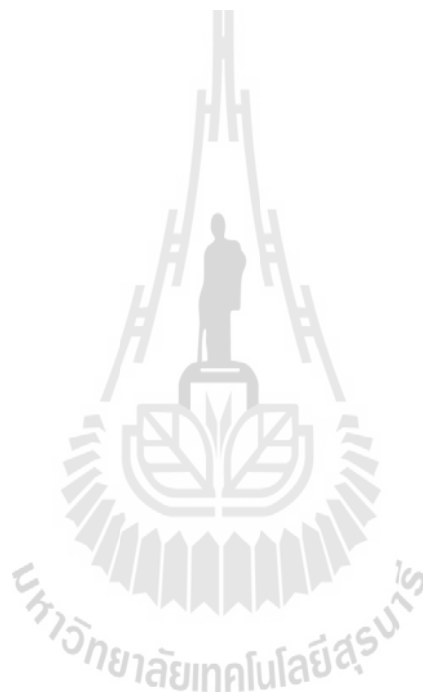
กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ร่วมงานทุกท่าน และหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



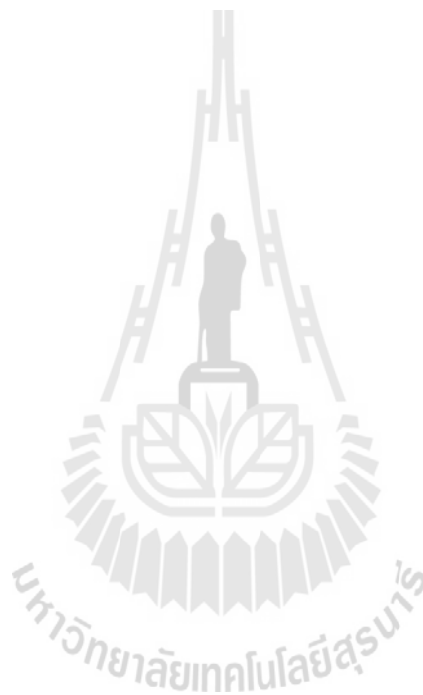
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองโซลิตสเตตเบรกเกอร์สำหรับใช้งานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ช่วยในการจำลองผล ทำการทดสอบกับระบบจ่ายไฟฟ้า 22 kV อย่างง่าย นอกจากนี้ได้สร้างชุดทดสอบโดยการลดทอนระดับแรงดันทำงานเพื่อใช้ในห้องทดลอง โดยเลือกระดับแรงดันให้ลดลงเหลือ 12 V เพื่อดำเนินการทดสอบ



ABSTRACT

This research project presents a study of solid-state circuit breakers for a 22-kV power distribution systems, especially for PEA (Provincial Electric Authority of Thailand). This study can be divided into 2 parts. The first part is to develop simulation modelling using MATLAB/Simulink software. This part employs a simple 22-kV power distribution system as a test case. The second part is to develop a laboratory-scaled implementation. The working voltage of this demonstration unit is reduced to 12 V in order to suit to the supply voltage in the laboratory.

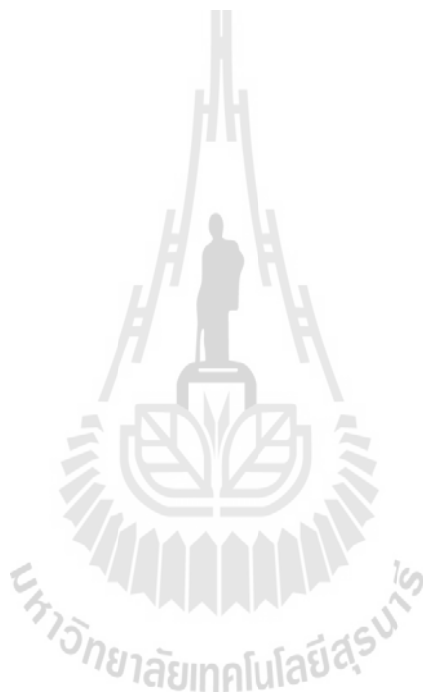


สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | จ |
| สารบัญภาพ..... | ฉ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 ความนำ..... | 4 |
| 2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง..... | 4 |
| 2.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง..... | 10 |
| 2.4 สรุป..... | 11 |
| บทที่ 3 แบบจำลอง การจำลองผล และการทดสอบ | |
| 3.1 กล่าวนำ..... | 12 |
| 3.2 แบบจำลองและการจำลองผล..... | 12 |
| 3.3 การตัดไฟอัตโนมัติแบบหน่วงเวลา..... | 20 |
| 3.4 ผลการทดลอง..... | 23 |
| 3.5 สรุป..... | 29 |
| บทที่ 4 สรุป | |
| 4.1 สรุป..... | 30 |
| บรรณานุกรม..... | 31 |
| ภาคผนวก ก. ผลผลิตจากงานวิจัย..... | 33 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาการตัดวงจรที่ออกแบบ..... | 21 |
| ตารางที่ 3.2 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว..... | 24 |
| ตารางที่ 3.3 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว..... | 26 |
| ตารางที่ 3.4 การตัดวงจรแบบทันทีและตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว | 27 |
| ตารางที่ 3.5 การตัดวงจรแบบทันทีโดยโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว..... | 29 |



สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 เฟสเซอร์แรงดัน 3 เฟสที่ไม่สมดุล..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบลำดับบวก..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบลำดับลบ..... | 6 |
| รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบลำดับศูนย์..... | 6 |
| รูปที่ 2.5 การรวมของส่วนประกอบสมมาตรเป็นส่วนประกอบไม่สมมาตร..... | 6 |
| รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของโซลิตสเตตเบรกเกอร์..... | 7 |
| รูปที่ 2.7 การ sampling สัญญาณเป็นช่วง ๆ..... | 7 |
| รูปที่ 2.8 Over-protected load..... | 8 |
| รูปที่ 2.9 Under-protected load..... | 8 |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรและสัญลักษณ์ของโซลิตสเตตเบรกเกอร์..... | 8 |
| รูปที่ 2.11 โซลิตสเตตเบรกเกอร์สำหรับการป้องกันสายป้อนจำหน่าย..... | 9 |
| รูปที่ 2.12 สวิตช์โอนย้ายโซลิตสเตต..... | 9 |
| รูปที่ 3.1 การป้องกันสายป้อนในระดับแรงดันปานกลาง..... | 12 |
| รูปที่ 3.2 โซลิตสเตตเบรกเกอร์และโครงสร้างวงจรควบคุมการจุดชนวน..... | 13 |
| รูปที่ 3.3 แบบจำลองโซลิตสเตตเบรกเกอร์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ MATLAB/Simulink..... | 13 |
| รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ SSCB..... | 14 |
| รูปที่ 3.5 หลักการสร้างสัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์อย่างง่าย..... | 14 |
| รูปที่ 3.6 แบบจำลองวงจรจุดชนวนสำหรับ SCCB..... | 15 |
| รูปที่ 3.7 การสร้างสัญญาณควบคุมการจุดชนวน..... | 15 |
| รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบและแบบจำลอง SCCB ที่ใช้ MATLAB/Simulink..... | 16 |
| รูปที่ 3.9 แรงดันคร่อมโหลด..... | 17 |
| รูปที่ 3.10 การตรวจวัดแรงดันอาร์เอ็มเอสคร่อมโหลด..... | 17 |
| รูปที่ 3.11 การแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย..... | 18 |
| รูปที่ 3.12 การแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (zoom in)..... | 18 |
| รูปที่ 3.13 การแสไฟฟ้าวัดที่จุดโหลด..... | 19 |
| รูปที่ 3.14 สัญญาณควบคุมวงจรจุดชนวน..... | 19 |
| รูปที่ 3.15 ลักษณะสมบัติเวลา-กระแสของรีเลย์กระแสเกิน..... | 20 |
| รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา..... | 22 |
| รูปที่ 3.17 ชุดทดลองโซลิตสเตตที่ใช้ทดสอบในห้องทดลอง..... | 22 |
| รูปที่ 3.18 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว..... | 23 |
| รูปที่ 3.19 สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.1..... | 24 |
| รูปที่ 3.20 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว..... | 25 |
| รูปที่ 3.21 สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.2..... | 25 |
| รูปที่ 3.22 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 1 ตัวและตัดวงจรแบบหน่วงเวลา 1 ตัว..... | 26 |
| รูปที่ 3.23 สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.3..... | 27 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.24 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 2 ตัว..... | 28 |
| รูปที่ 3.25 สวิตช์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.4..... | 28 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาที่สูงขึ้นจากอดีต ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด พลังงานไฟฟ้าได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาของประเทศทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมให้มีความรุดหน้าทั้งในแง่การสร้างความสะดวกสบาย ใช้เป็นกำลังหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ จึงมีอาจปฏิเสธได้ว่าพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสิ่งจำเป็นของประเทศที่จะยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้สุขสบายยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ทั้งภาครัฐและเอกชนที่รับผิดชอบในการจัดสรรพลังงานไฟฟ้า จะต้องพยายามรักษาเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบการจำหน่ายไฟฟ้า ให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า ให้ทำการตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันมิให้เกิดความเสียหายแก่ระบบโดยรวม อย่างไรก็ตามการตัดวงจรของระบบไฟฟ้าบริเวณที่เกิดความผิดปกติที่ไปนั้นไม่สามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากจะต้องคำนึงองค์ประกอบหลายอย่าง ซึ่งจะเป็นปัญหาในการพิจารณาดังนี้

1. ปัญหาเรื่องเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปลดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบที่มีกระแสจำนวนมากไหลอยู่ในขณะที่ลัดวงจร โดยความรุนแรงของอาร์คจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลในวงจร
2. ปัญหาเรื่องการปลดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบ ต้องใช้เวลาในการตัดวงจรน้อยที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในบริเวณส่วนที่เกิดความผิดปกติพร่องเกิดขึ้น
3. ปัญหาเรื่องความเร็วและแม่นยำ ของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส เมื่อเกิดความผิดปกติพร่องเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากปัญหาดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาอุปกรณ์ป้องกัน ที่ทำการปลดวงจรในขณะที่เกิดความผิดปกติพร่องขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งก็คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การนำเอาอุปกรณ์โซลิตสเตตเบรกเกอร์มาใช้งานในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายมาตรฐานของประเทศไทย เบรกเกอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ใหม่ที่ทำงานได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาสั้นในการปลดวงจรออกจากระบบ เพื่อลดปัญหาและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบ

จำหน่ายไฟฟ้าให้น้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อนำโซลิตสเตตเบรกเกอร์มาใช้งานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถควบคุมการทำงานให้เป็นตัวเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์แบบนุ่มนวล (soft starter) ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในสถานะเพื่อศึกษาการทำงาน การพัฒนาแบบจำลอง และการจำลองผลโซลิตสเตตเบรกเกอร์ ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
2. เพื่อออกแบบและสร้างชุดต้นแบบของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ รวมทั้งตัวควบคุมการทำงานที่มีประสิทธิภาพ
3. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการนำโซลิตสเตตเบรกเกอร์มาใช้งานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อสร้างแบบจำลองและการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ของการสับและปลดวงจรของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ เมื่อเกิดการผิดปกติของขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าในระบบแรงดัน 22 kV โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ และออกแบบตัวควบคุมการทำงานของ โซลิตสเตตเบรกเกอร์
2. ศึกษาการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันกับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส
3. สร้างแบบจำลองการทำงานของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่ทำการปลดวงจรด้วยโซลิตสเตตเบรกเกอร์
4. ทดสอบประเมินผลกับระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 22 kV นครราชสีมา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ได้หลักและแนวความคิดสำหรับการออกแบบการทำงานโซลิตสเตตเบรกเกอร์ ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
2. ได้แบบจำลองของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ ที่สามารถใช้ได้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV
3. ช่วยปรับปรุงคุณภาพของส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (22 kV) ให้ดียิ่งขึ้น

4. เสถียรภาพโดยรวมของพลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศดีขึ้น
5. ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังและปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง มีทั้งการลัดวงจรแบบสมมาตรหรือการลัดวงจรแบบสมดุล และการลัดวงจรแบบไม่สมดุล ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง(Power System Protection) ให้รอดพ้นอันตรายจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้านั้น มีความจำเป็นต้องทราบขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Divices) เช่น รีเลย์ป้องกัน เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณเพื่อหาแรงดัน และกระแสภายใต้สถานการณ์การลัดวงจรไว้ล่วงหน้า เพื่อจะได้เตรียมแผนการป้องกันได้อย่างถูกต้อง

ในการวิเคราะห์การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรนั้นเราจะใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) วิธีสำหรับการแก้ปัญหาระบบไม่สมดุลของ n เฟสเซอร์ที่มีความสัมพันธ์กันด้วยระบบ n เฟสเซอร์ที่สมดุลเรียกว่า ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์เดิม (Symmetrical Component of the Original Phaser) โดยแต่ละเฟสเซอร์ของ n เฟสเซอร์จะมีขนาดและมุมเฟสระหว่างเฟสเซอร์ที่อยู่ใกล้กันเท่านั้น ถึงแม้ว่าวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบที่ไม่สมดุลหลายเฟส แต่เราจะพิจารณาเฉพาะระบบ 3 เฟสเท่านั้น

ทฤษฎีของส่วนประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาระบบ 3 เฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ 3 เฟสสมดุล จะประกอบด้วยเฟสเซอร์ของส่วนประกอบต่อไปนี้

1. ส่วนประกอบลำดับบวก(Positive-Sequence Coponents) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (Phase Sequence)
2. ส่วนประกอบลำดับลบ(Negative-Sequence Coponents) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส ตรงข้ามกับเฟสเซอร์เดิม
3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์((Zero-Sequence Coponents) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน

ในระบบ 3 เฟส ที่มีลำดับเฟสของแรงดันและกระแสเป็น abc ดังนั้นลำดับเฟสของส่วนประกอบลำดับบวกของ V_a , V_b และ V_c คือ V_{a1} , V_{b1} และ V_{c1} ในทำนองเดียวกันส่วนประกอบลำดับลบคือ V_{a2} , V_{b2} และ V_{c2} และส่วนประกอบลำดับศูนย์คือ V_{a0} , V_{b0} และ V_{c0} สำหรับเฟสเซอร์ของกระแสจะเขียนด้วย I ในลักษณะเดียวกันของเฟสเซอร์แรงดัน

สำหรับเฟสเซอร์ของแรงดันที่ไม่สมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

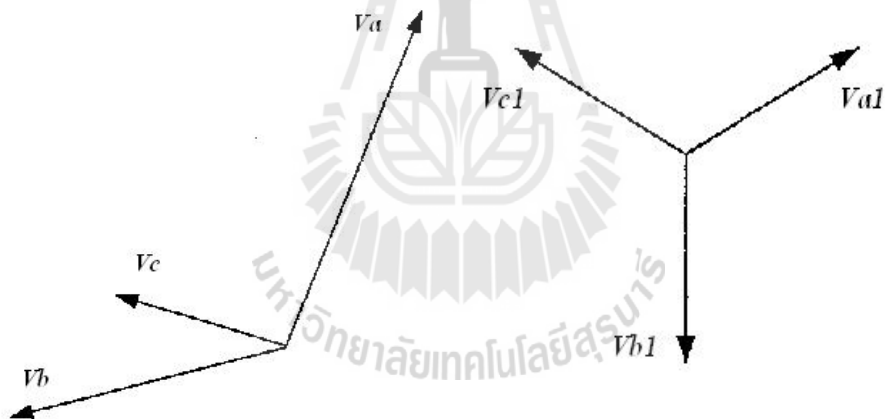
และในทำนองเดียวกันเฟสเซอร์กระแส

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

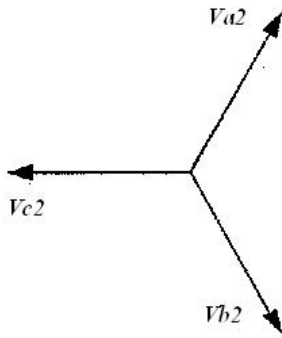
$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3}$$

วิธีการของส่วนประกอบสมมาตรนี้จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

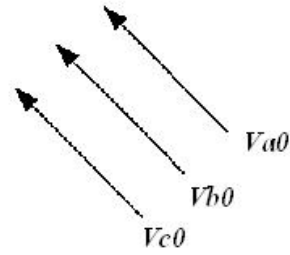


รูปที่ 2.1 เฟสเซอร์แรงดัน 3 เฟสที่ไม่สมดุล

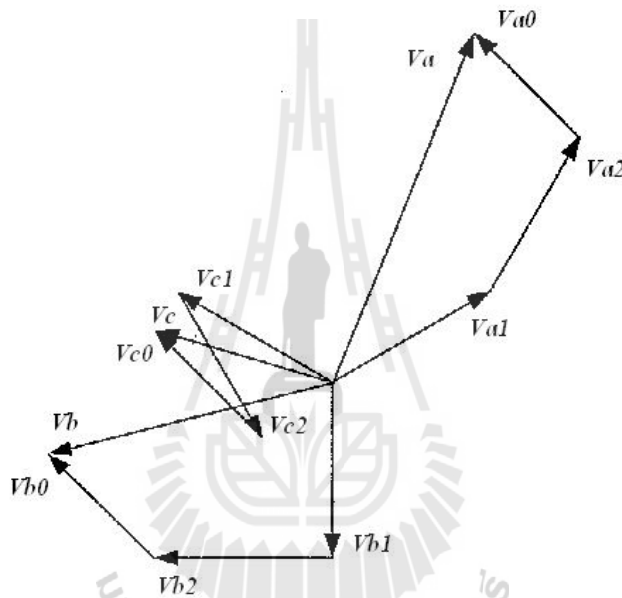
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบลำดับบวก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบลำดับลบ



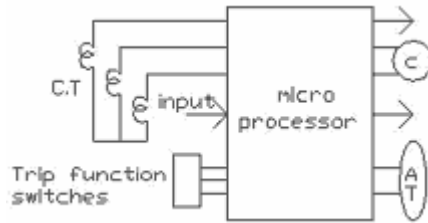
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบลำดับศูนย์



รูปที่ 2.5 การรวมของส่วนประกอบสมมาตรเป็นส่วนประกอบไม่สมมาตร

จะพบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้านำตัวประมวลผลที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดความผิดปกติ อาจจะเป็นหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน มาคำนวณตามหลักการของส่วนประกอบสมมาตร จะทำให้สามารถจำแนกรูปแบบและความรุนแรงของความผิดปกติดังกล่าวได้ เมื่อนำผลการประเมินไปสั่งการทำงานของเบรกเกอร์จะทำให้เบรกเกอร์ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีความสอดคล้องกับสถานการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เบรกเกอร์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า โซลิตสเตตเบรกเกอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

โซลิตสเตตเบรกเกอร์ (solid State Breaker) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดหนึ่งที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่วิเคราะห์กระแสเพื่อสั่งปลดวงจร



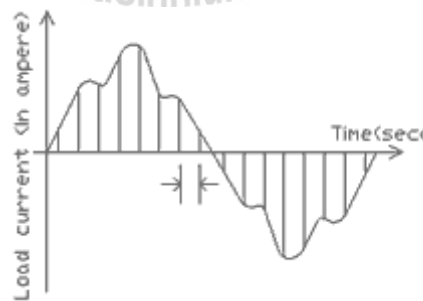
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของโซลิดสเตตเบรกเกอร์

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าหม้อแปลงกระแส (CT) อยู่ภายในตัว เซอร์กิตเบรกเกอร์ ทำหน้าที่ แปลงกระแส ให้ต่ำลง ตามอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส (CT) และมีไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) คอยวิเคราะห์กระแส หากมีค่าเกินกว่าที่กำหนด จะสั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการปลดวงจร

การวิเคราะห์กระแสของโซลิดสเตตเซอร์กิตเบรกเกอร์ มี 2 วิธีคือ

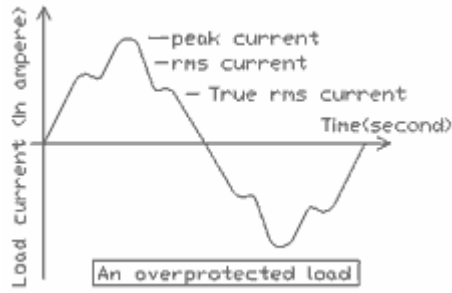
Peak Sensing เป็นการบันทึกค่ากระแสสูงสุด (I_{pk}) ที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์แล้วนำมาคำนวณหากระแส RMS แต่วิธีนี้จะวัดได้ถูกต้อง เมื่อสัญญาณคลื่นกระแสเป็น Sinusoidal เท่านั้น

True RMS Sensing วิธีนี้ใช้การ Sampling สัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นช่วง ๆ เพื่อหาค่า RMS ในแต่ละช่วงแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นกระแส RMS ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถนำไปใช้กับรูปคลื่นกระแสที่ไม่เป็น Sinusoidal เช่น อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดฮาร์มอนิก จำพวกเครื่องเชื่อมไฟฟ้า มอเตอร์ เป็นต้น

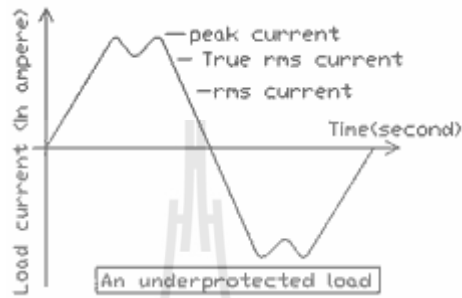


รูปที่ 2.7 การ Sampling สัญญาณเป็นช่วง ๆ

ตัวอย่างเปรียบเทียบการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่วิเคราะห์กระแสแบบ True RMS Sensing กับ Peak Sensing แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 และ 2.9

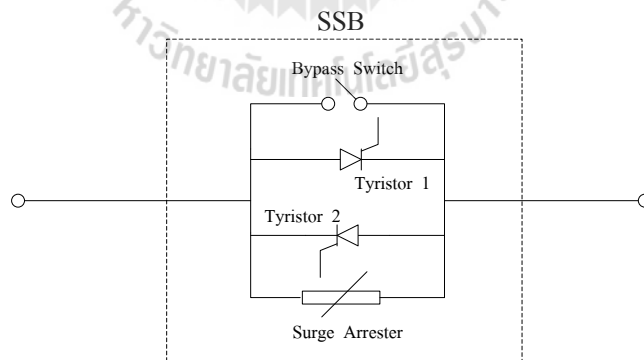


รูปที่ 2.8 Over-protected load



รูปที่ 2.9 Under-protected load

โครงสร้างทางวงจรของโซลิตสแตตเบรกเกอร์ต่อเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนได้แก่ ไทริสเตอร์ 2 ตัวแบบทางต่อหัว (anti-parallel connection) กับดักเสิร์จ (surge arrester) และสวิตช์บายพาส (bypass switch) สำหรับส่วนการควบคุมและตรวจจับไม่ได้แสดงไว้ในแผนภาพ



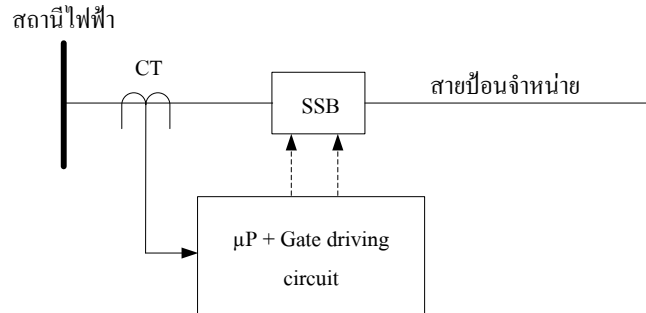
ก) โครงสร้างวงจร



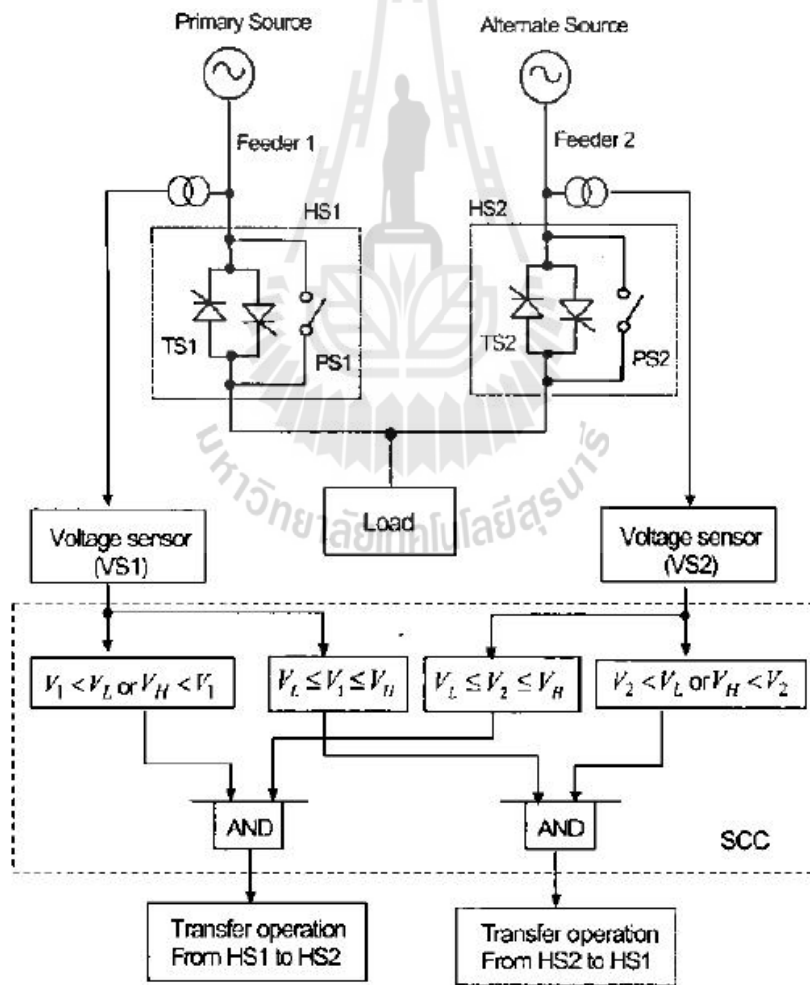
ข) สัญลักษณ์วงจร

รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรและสัญลักษณ์ของโซลิตสแตตเบรกเกอร์

จากรูป มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะถูกควบคุมด้วยตัวประมวลผลไมโครโปรเซสเซอร์ที่ถูกโปรแกรมมาอย่างดี การทำงานจะขึ้นอยู่กับ การตรวจจับสถานะการทำงาน ว่ามีเหตุผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โซลิตสแตตเบรกเกอร์สำหรับการป้องกันสายป้อนจำหน่าย



รูปที่ 2.12 สวิตช์โอนย้ายโซลิตสแตต

การป้องกันสายป้อนจำหน่ายด้วยโซลิตสแตตเบรกเกอร์นี้ ช่วยให้คุณภาพไฟฟ้ากำลังในระบบจำหน่ายดีขึ้น ลดปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับ การทำงานของเบรกเกอร์หรืออุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ มีความเชื่อถือได้เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การประยุกต์ที่ชัดเจนของโซลิตสแตตเบรกเกอร์ คือ สวิตช์โอนย้ายโซลิตสแตต (solid-state transfer switch: SSTS) จะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลดวิกฤต โหลดดังกล่าวจะรับไฟจากสายป้อนหลัก เมื่อเกิดปัญหาขึ้น SSTS จะทำหน้าที่ปลดวงจรสายป้อนหลักออกในขณะเดียวกัน SSTS จะดำเนินการต่อไฟจากสายป้อนสำรองเพื่อจ่ายโหลดทันที ทำให้มีความต่อเนื่องในการจ่ายโหลดดังรูปที่ 2.12

2.3 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) / สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับโซลิตสแตตเบรกเกอร์ โดยย่อได้ดังนี้

งานวิจัยของ Milind M.bhnoo (1998) ได้นำเสนอเกี่ยวกับ Static Transfer Switch (STS) ที่เป็น Solid State Switch ที่ต่อระหว่าง 2 แหล่งจ่าย เพื่อทำการจ่ายไฟให้กับโหลดและจะทำการสับเปลี่ยนระหว่างแหล่งจ่ายอย่างฉับไวระหว่างแหล่งจ่ายเมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นที่แหล่งจ่ายอีกอัน

Po-Tai Cong and Chia – Han Tsai (2003) ได้นำเสนองานวิจัยคล้ายๆ กับ Milind M.bhnoo คือ การเตรียมแหล่งจ่ายไฟไว้ 2 แหล่งจ่าย โดยมี Solid State Transfer Switch เป็นตัวสับเพื่อเลือกแหล่งจ่ายอีกตัวเข้ามาแทนในระบบเมื่อเกิดแรงดันตก(voltage sag) โดยจะเสนอในส่วนของตัวควบคุม STS ที่ได้จากการปรับปรุงเวลาในการตอบสนองของแรงดันตก ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ ที่มักเกิดขึ้นบ่อยในงานอุตสาหกรรม

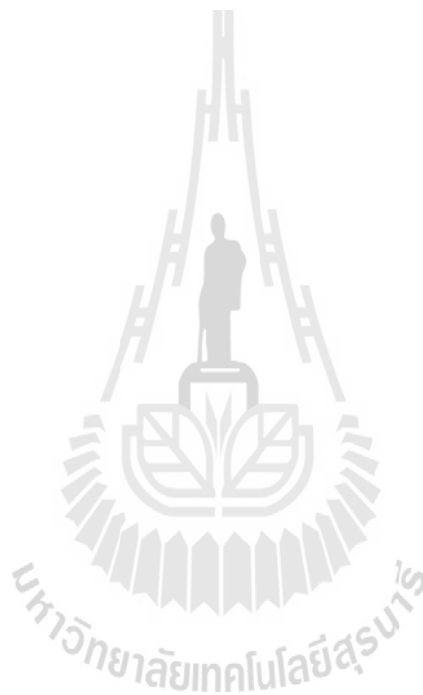
Bin chen, Alex Q, Mesut Baran, Chong Han and Wenchao Song (2006) ได้กล่าวถึง ลักษณะการทำงานของ Emitter Turn – Off ของอุปกรณ์ในการสับสวิตช์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ในระหว่างการปิดแบบชั่วคราว โดยอุปกรณ์นั้นคือ โซลิตสแตตเบรกเกอร์และตัวจำกัดกระแสฟอลต์(fault current limiter) ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและรองรับกระแสอินเตอร์รัฟสูงๆ ได้ มีการสูญเสียในด้านการนำไฟฟ้าน้อยและมีโครงสร้างที่แข็งแรง

Stefan Schroder, Christoph Meyer and Rik W. De Doncker (2002) ได้นำเสนองานวิจัยในเรื่องเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นก็คือ โซลิตสแตตเบรกเกอร์ ให้สามารถสับสวิตช์เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ไวพอ ที่จะคงค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ในสภาพที่ยอมรับได้สำหรับโหลดที่รับรู้ไว เช่น คอมพิวเตอร์ให้สามารถทำงานต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง และในปี 2004 ทีมงานนี้ได้ นำเสนองานวิจัยต่อในเรื่องเกี่ยวกับการนำเอาโซลิตสแตตเบรกเกอร์ มาใช้ในระบบ medium voltage 20kV ที่ใช้กันจริงในระบบสายส่งไฟฟ้า

Christoph Meyer and Rik W. De Doncker (2006) ได้นำเสนอ เกี่ยวกับวิธีการใหม่สำหรับ โข
ลิตสแตตเบรกเกอร์ ที่มีพื้นฐานมาจาก Actives Thyristor Topologies ซึ่งมีต้นทุนต่ำและกำลังสูญเสีย
น้อย เมื่อมีการปิดตัวจากกระแสลัดวงจร โยกล่าวถึงการออกแบบและการประเมินผลในงานวิจัยนี้

2.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึง การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดพ้องใน
ระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการ
ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรซึ่งจะได้กล่าวถึงใน บท
ที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

แบบจำลอง การจำลองผล และการทดสอบ

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาการทำงานของโซลิตสเตตเซอร์กิตเบรกเกอร์ในงานวิจัยนี้ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของการวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองจะใช้การดำเนินงานผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำให้การจำลองผลทำได้ง่าย ในส่วนที่สองของงานวิจัย ได้ดำเนินการสร้างชุดทดสอบขนาดเล็กเพื่อศึกษาหลักการการทำงานโดยลดทอนขนาดของกำลังไฟฟ้าให้มีขนาดต่ำลง การทดสอบใช้ระดับแรงดัน 12 V พิกัดกระแส 1 A เพื่อสร้างชุดทดสอบ

3.2 แบบจำลองและการจำลองผล

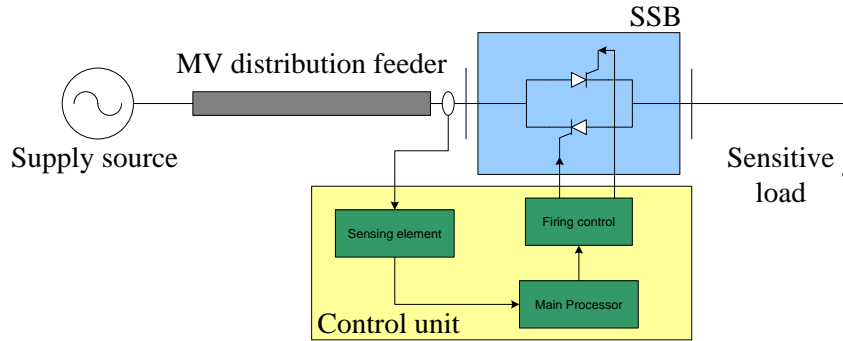
การสร้างแบบจำลองวงจรไฟฟ้าของโซลิตสเตตเบรกเกอร์นี้เพื่อนำมาใช้ตัดวงจรในสายป้อนระดับแรงดันปานกลาง (MV power feeder) การทำงานจะต้องสามารถตัดวงจรที่ค่ากระแสพิกัดได้ด้วยความสามารถตัดวงจรตามที่กำหนด พิจารณาจากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นสายป้อนที่ได้รับการติดตั้งเบรกเกอร์แบบปกติและโซลิตสเตตเบรกเกอร์เพื่อป้องกันวงจร



รูปที่ 3.1 การป้องกันสายป้อนในระดับแรงดันปานกลาง

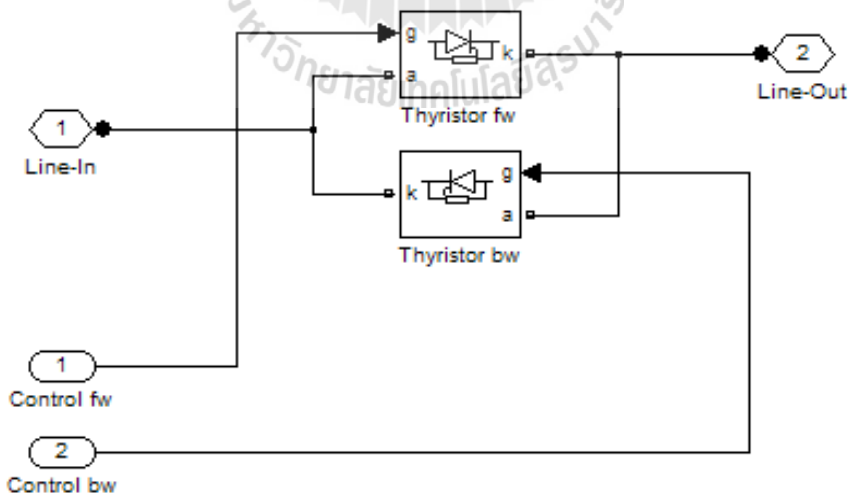
โซลิตสเตตเบรกเกอร์ถูกออกแบบโดยใช้ไทรสเตอร์ช่วยในการตัดต่อวงจร เนื่องจากไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีพิกัดการทนกระแสสูง ใช้งานได้ที่แรงดันสูง การทำงานเปิดปิดวงจรไม่มีการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส ไม่ทำให้เกิดการอาร์ก ไทรสเตอร์กำลังมีพิกัดการตัดกระแสได้สูงถึง 16 kA และมีกำลังงานสูญเสียต่ำในขณะนำกระแสไฟฟ้า การควบคุมการทำงานของสวิตช์ไทรสเตอร์กำลังนี้ใช้การสร้างสัญญาณจุดชนวน (firing signal) โดยสัญญาณจุดชนวนนี้จะถูกสร้างขึ้นจากวงจรตรวจจับกระแสลัดวงจรหรืออาจจะตรวจจับแรงดันตก ณ จุดเชื่อมต่อก็ได้ การควบคุมการจุดชนวนที่เหมาะสมจะทำให้ไทรสเตอร์กำลังประพฤติตัวเป็นเบรกเกอร์กำลังในระบบไฟฟ้ากำลังได้ นอกจากนี้ การทำงานของไทรสเตอร์ในการตัดต่อวงจรมีความไวสูง ทำให้การตัดต่อทำได้รวดเร็ว และหากต้องการหน่วงเวลาก็สามารถเพิ่มวงจรหน่วง

เวลาเข้ากับการจูดชนวนได้ ทำให้ง่ายต่อการสร้างวงจรควบคุม รูปที่ 3.2 นำเสนอโครงสร้างของวงจรควบคุมไทรสเตอร์กำลังที่ใช้งานเป็นโซลิตสเตรกเกอร์



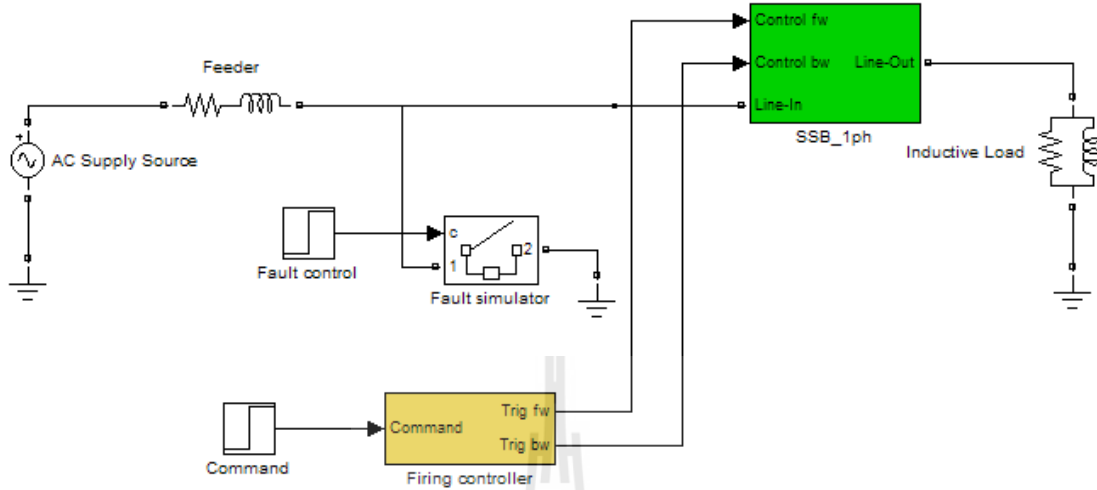
รูปที่ 3.2 โซลิตสเตรกเกอร์และโครงสร้างวงจรควบคุมการจูดชนวน

การสร้างแบบจำลองของโซลิตสเตรกเกอร์ในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink ช่วยในการวิเคราะห์ กล่องเครื่องมือของ MATLAB/Simulink มีอุปกรณ์ไทรสเตอร์กำลังให้เลือกใช้งาน การสร้างแบบจำลองของโซลิตสเตรกเกอร์สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับจำเป็นต้องใช้ไทรสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบทางต่อหัว (anti-parallel connection) เพื่อให้ไทรสเตอร์ทั้งสองตัวนำกระแสสลับกันในช่วงครึ่งคาบเวลา รายละเอียดของการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังใน MATLAB/Simulink จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ รูปที่ 3.3 นำเสนอแบบจำลองของโซลิตสเตรกเกอร์ที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Simulink ข้อต่อต่าง ๆ จะมีทั้งข้อต่อในวงจรกำลังและวงจรควบคุม Line-In และ Line-Out เป็นข้อต่อของสายกำลัง จากแหล่งจ่ายที่ต่อเข้ามาและข้อต่อไปยังโหลดตามลำดับ สำหรับ Control fw และ Control bw เป็นข้อต่อสัญญาณควบคุมการจูดชนวนของไทรสเตอร์ทั้งสอง



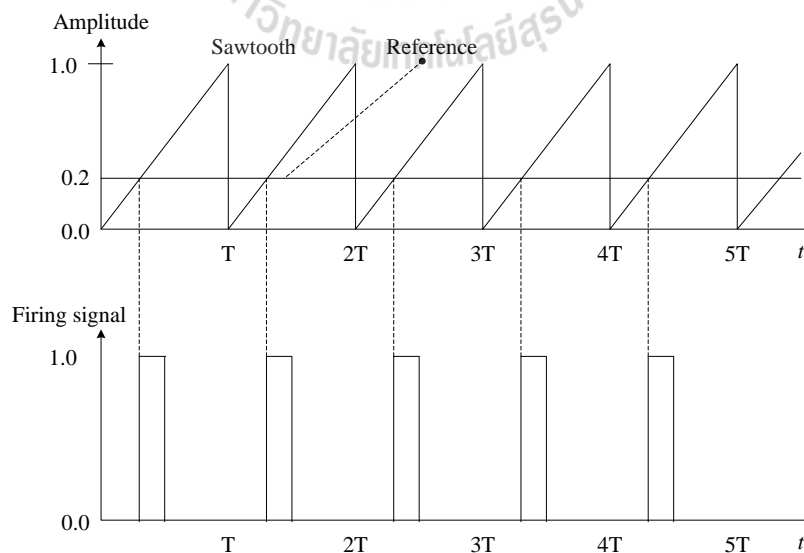
รูปที่ 3.3 แบบจำลองโซลิตสเตรกเกอร์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ MATLAB/Simulink

เมื่อนำ SSCB มาใช้งานป้องกันสายป้อนจะต้องดำเนินการสร้างส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่จำลองสถานีไฟฟ้า สายป้อนจำหน่าย โหลด และตัวจำลองการลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



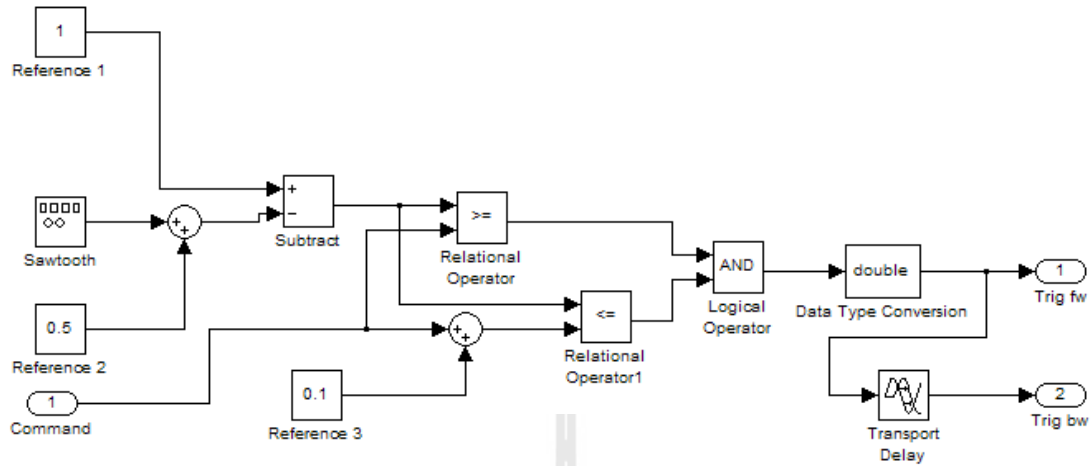
รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ SSCB

การสร้างสัญญาณจุดชนวนไทรสเตอร์ในที่นี้ใช้หลักการนำสัญญาณรูปฟันเลื่อยที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่กำลัง เนื่องจากใช้ไทรสเตอร์สองตัวให้น่ากระแสตัวละครึ่งคาบ แต่ให้ทำงานด้วยมุมจุดชนวนที่เท่ากันนับจากจุดตัดศูนย์ (zero crossing) การปรับมุมจุดชนวนทำได้โดยการสร้างสัญญาณ DC ที่เปลี่ยนค่าได้จาก 0 ไปจนถึงค่ายอดของสัญญาณรูปฟันเลื่อย ระดับของสัญญาณ DC ที่ปรับนี้เมื่อไปตัดกับสัญญาณฟันเลื่อยจะได้ตำแหน่งของมุมจุดชนวนขึ้น และสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนที่ตำแหน่งดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3.5



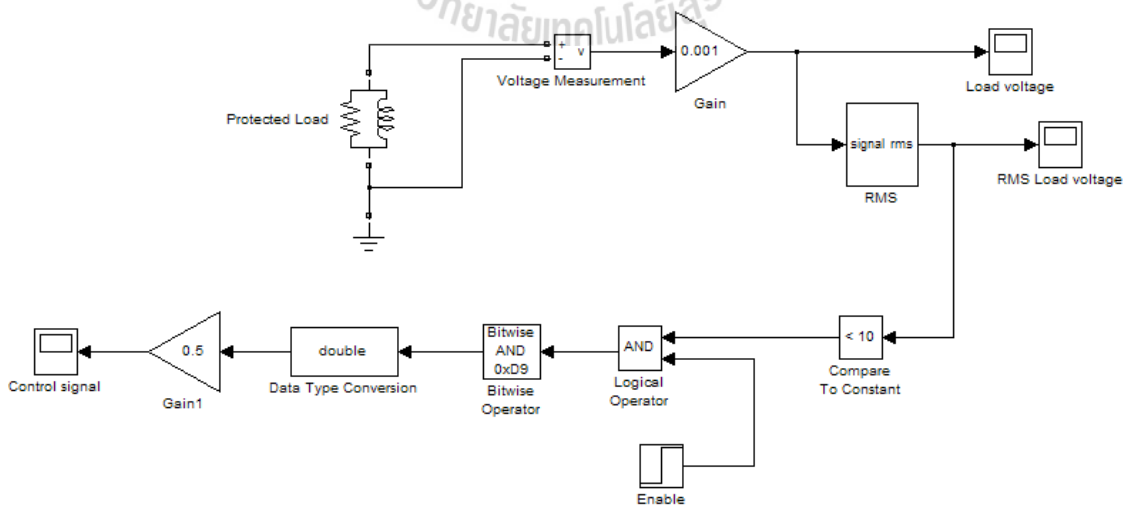
รูปที่ 3.5 หลักการสร้างสัญญาณจุดชนวนของไทรสเตอร์อย่างง่าย

โครงสร้างของวงจรจุดชนวนนี้นำมาประกอบเป็นวงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้โดยใช้ องค์ประกอบของกล่องสร้างสัญญาณและตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



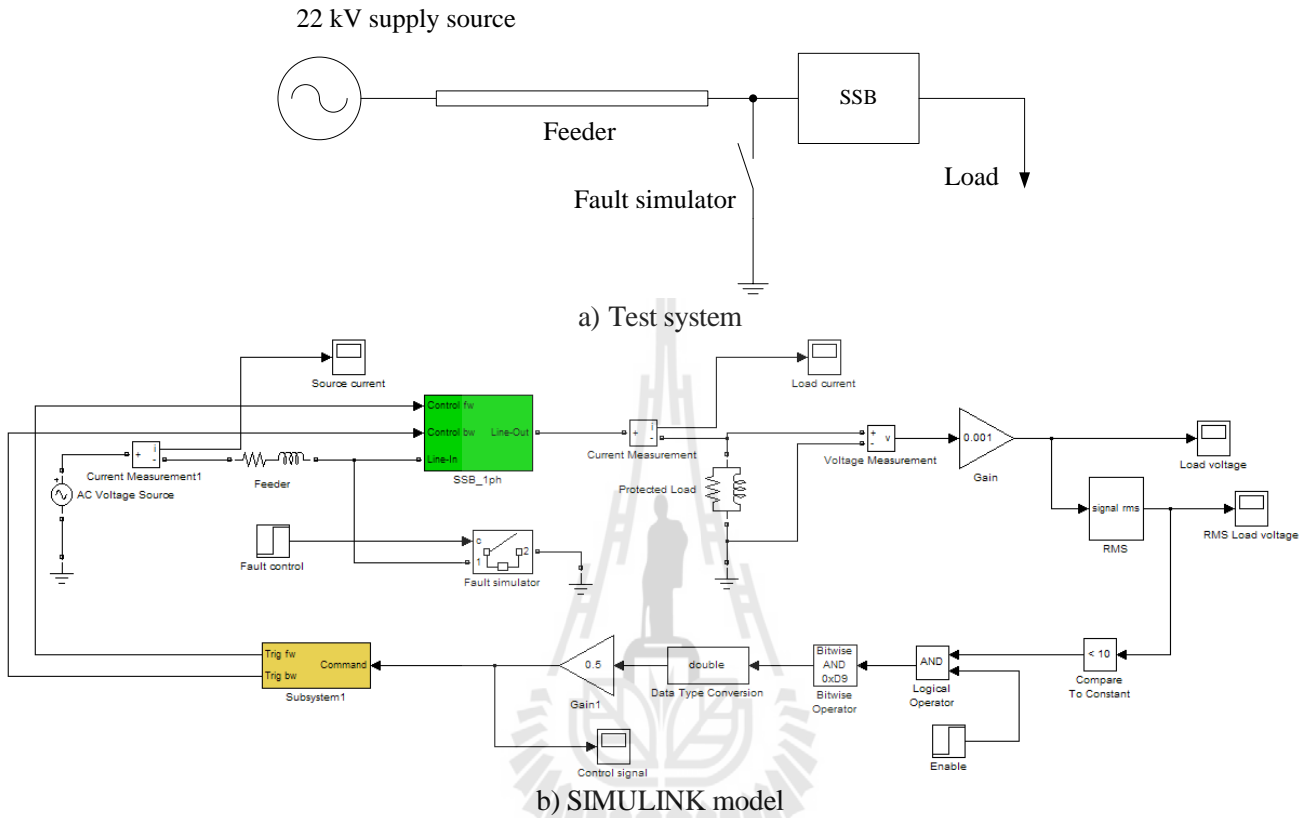
รูปที่ 3.6 แบบจำลองวงจรจุดชนวนสำหรับ SSCB

จากรูปที่ 3.6 การสร้างสัญญาณจุดชนวนเพื่อควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์จะต้องมีการ ตรวจสอบว่าเมื่อใดจะให้ไทรสเตอร์ตัดวงจรและเมื่อใดจะให้ต่อวงจร การตรวจวัดกระแสหรือแรงดันที่จุด เชื่อมต่อสามารถนำมาใช้ได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้การตรวจวัดแรงดันอาร์เอมเอส (rms voltage) เพื่อใช้เป็น คำสั่งในการควบคุมการทำงานดังกล่าว รูปที่ 3.7 แสดงถึงโครงสร้างการทำงานโดยการวัดแรงดันที่จุด เชื่อมต่อ เช่น ตำแหน่งโหลด จากนั้นนำมาคำนวณค่า rms ของสัญญาณ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าขีด- เริ่ม (threshold value) ที่ตั้งไว้เพื่อให้วงจรจุดชนวนกำเนิดสัญญาณในรูปแบบที่ต้องการ ก่อนที่จะนำมา ปรับระดับของสัญญาณให้เหมาะสมต่อวงจรจุดชนวนต่อไป



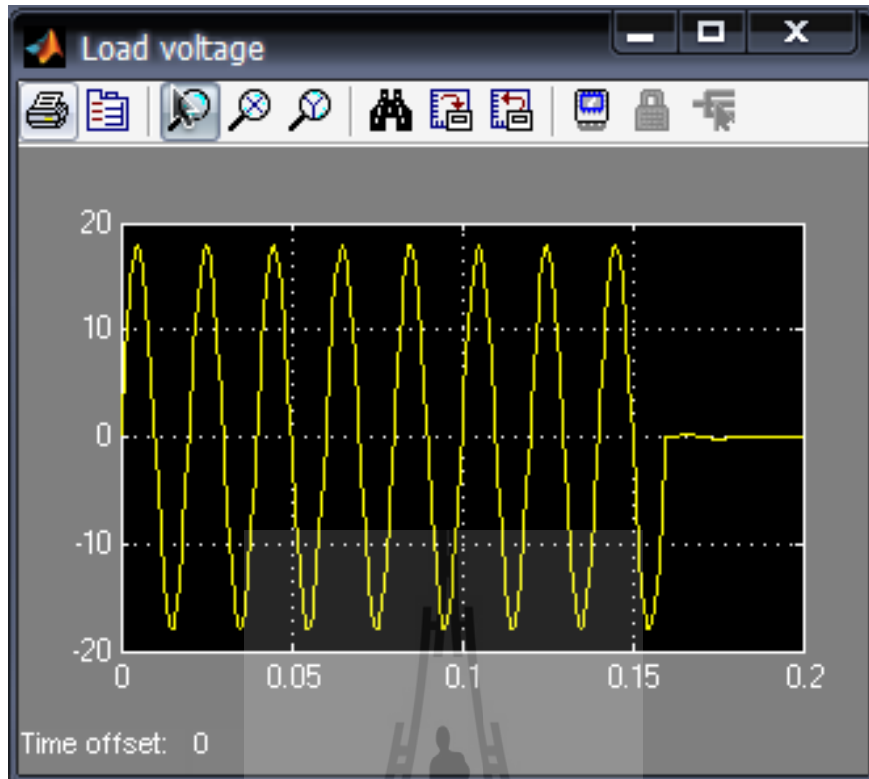
รูปที่ 3.7 การสร้างสัญญาณควบคุมการจุดชนวน

การจำลองผลดำเนินการโดยทดสอบกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จำลองโดยใช้ระบบสายป้อนอย่างง่ายมีโหลดเชื่อมต่อที่ปลายสายหนึ่งชุด และมีตัวจำลองการลัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.8

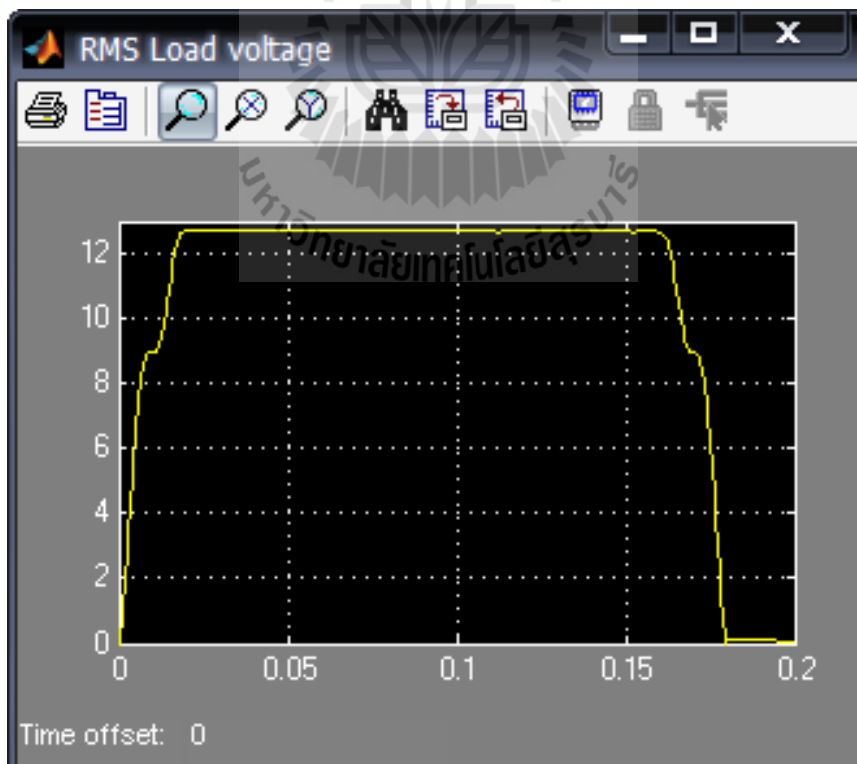


รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบและแบบจำลอง SSSCB ที่ใช้ MATLAB/Simulink

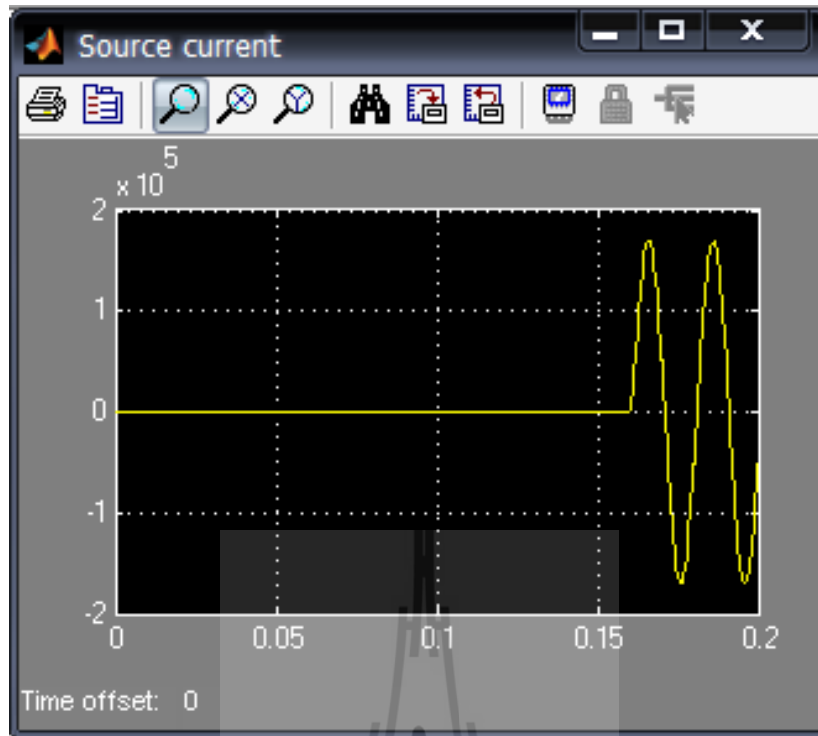
การจำลองผลดำเนินการโดยจ่ายไฟให้ระบบสายป้อน เนื่องจากกระบวนการตรวจวัดแรงดันใช้การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอส จำเป็นต้องใช้ข้อมูลครบคาบเวลา 20 ms จะได้ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสคงที่ จากนั้นดำเนินการจำลองการลัดวงจร กำหนดให้การลัดวงจรเกิดขึ้นที่เวลา 160 ms นับจากเริ่มจ่ายไฟแรงดันตกคร่อมโหลดที่แปรตามเวลาจากการจำลองผลแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และค่าการตรวจวัดสัญญาณแรงดันอาร์เอ็มเอสแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของโซลิดสเตตเบรกเกอร์ เมื่อจำลองการลัดวงจรขึ้นที่เวลา 160 ms อุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ต้องตัดวงจรในทันที ในที่นี้ทดสอบโดยการไม่หน่วงเวลา ให้วงจรตัดแหล่งจ่ายออกไปเมื่อแรงดันลดต่ำกว่าค่าที่กำหนด กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากแหล่งจ่ายไปที่โหลดจะต้องถูกตัดออกในเวลาที่ถูกตัด รูปที่ 3.11 แสดงกราฟกระแสจากแหล่งจ่ายที่แปรผันตามเวลา จะพบว่า ที่เวลาประมาณ 160 ms สัญญาณกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของการลัดวงจร รูปที่ 3.12 แสดงภาพในชัดเจนยิ่งขึ้นถึงขนาดของกระแสที่สูงขึ้น



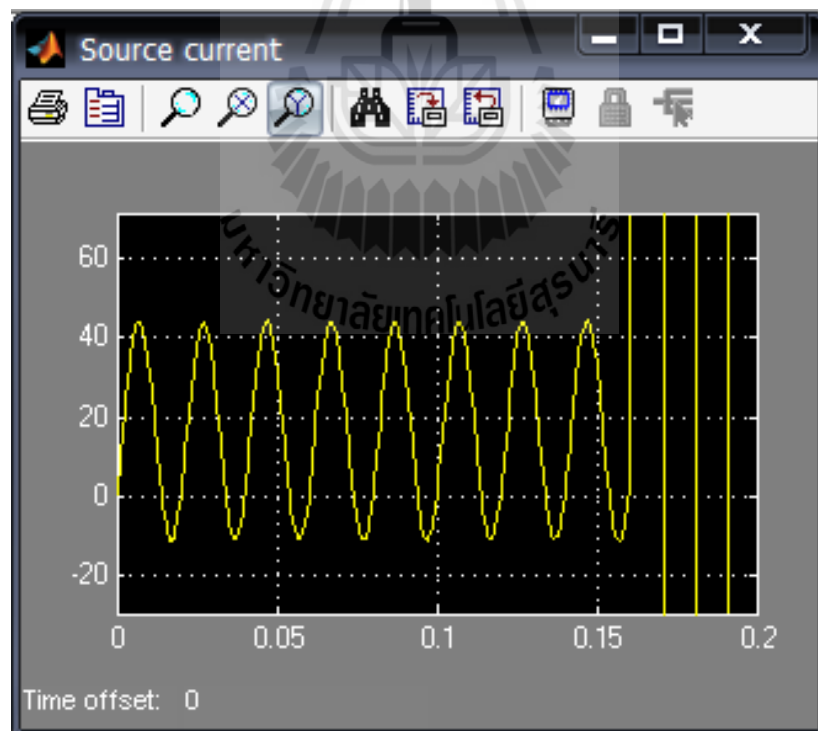
รูปที่ 3.9 แรงดันคร่อมโหลด



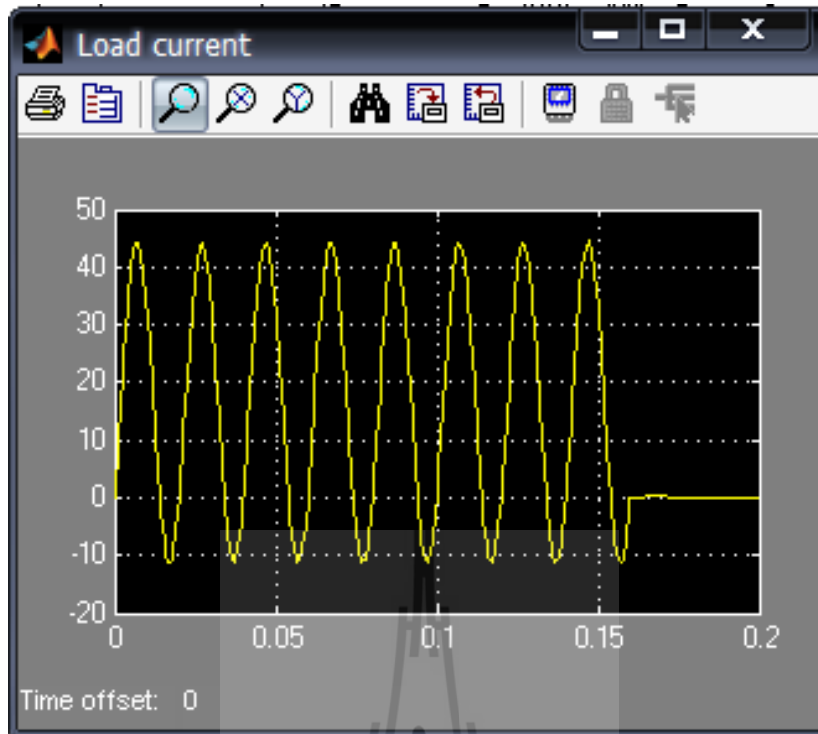
รูปที่ 3.10 การตรวจวัดแรงดันอาร์เอ็มเอสคร่อมโหลด



รูปที่ 3.11 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย



รูปที่ 3.12 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (zoom in)



รูปที่ 3.13 กระแสไฟฟ้าวัดที่จุดโหลด

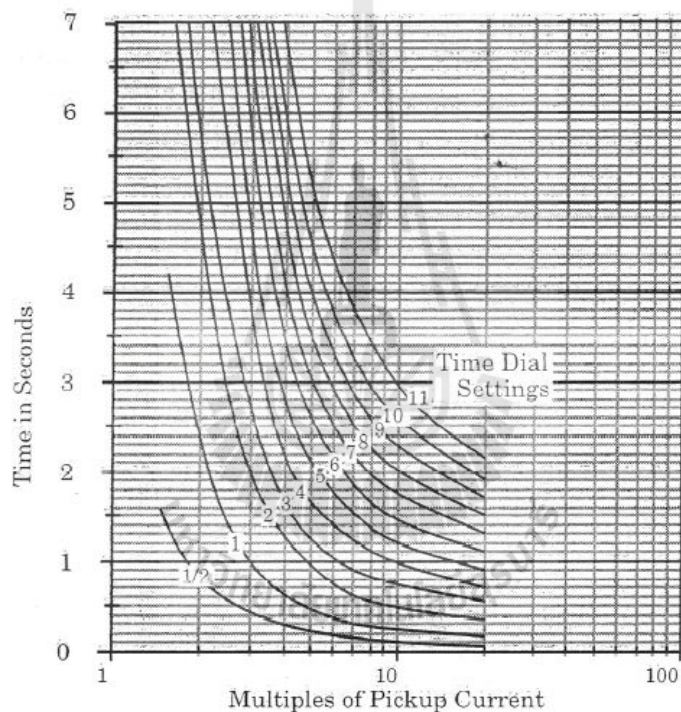


รูปที่ 3.14 สัญญาณควบคุมวงจรถนวน

กระแสไฟฟ้าที่วัดที่จุดโหลดแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 จะพบว่า เมื่อเกิดการลัดวงจร อุปกรณ์ป้องกัน โหลดสแตตเบรกเกอร์จะตรวจจับกระแสลัดวงจรได้และจะสั่งการจุดชนวนให้ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกตั้ง สัญญาณควบคุมการจุดชนวนในรูปที่ 3.14 ผลของการสั่งการนี้จะทำให้กระแสโหลดกลายเป็นศูนย์ในทันที ดังรูปที่ 3.13

3.3 การตัดไฟอัตโนมัติแบบหน่วงเวลา

การทำงานของโหลดสแตตเบรกเกอร์สามารถปรับตั้งการหน่วงเวลาได้เหมือนกับการทำงานของ รีเลย์กระแสเกิน การปรับเวลาการทำงานของโหลดสแตตเบรกเกอร์นี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการทำงาน ประสานสัมพันธ์กัน (coordination) ทำให้โหลดสแตตเบรกเกอร์และรีเลย์ตัวอื่น ๆ มีความสามารถในการ แยกแยะ (selectivity) เพื่อสั่งให้การเปิดปิดวงจรมีความเหมาะสม ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะสมบัติเวลา-กระแสของรีเลย์กระแสเกิน

การปรับตั้งการหน่วงเวลาของโหลดสแตตเบรกเกอร์ในที่นี้จะเลียนแบบการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกิน จากกราฟแสดงลักษณะสมบัติเวลา-กระแสของรีเลย์กระแสเกิน จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะแบบ ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อดูที่เส้นกราฟ Time Dial Settings เส้นต่ำที่สุดเท่ากับ 1/2 เมื่อค่ากระแสของ วงจรมากขึ้น ค่าหน่วงเวลาตัดวงจรลดลง แต่ค่าหน่วงเวลาตัดวงจรลดลงที่ละน้อย ซึ่งอาจจะส่งผลให้เห็น ความแตกต่างของการลดค่าหน่วงเวลาตัดวงจรได้ไม่ชัดเจนนัก และเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณหาค่า หน่วงเวลาตัดวงจร ดังนั้น ในงานวิจัยโครงการนี้ใช้กราฟเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการต่อไปนี้

$$t = \left(\frac{1}{1.1}\right)^{10 \times I_{rms}} \quad (3.1)$$

โดยที่

ค่า t = ค่าหน่วยเวลาก่อนตัดวงจรในหน่วยวินาที(s)

ค่า I_{rms} = ค่ากระแสของวงจรในหน่วย(A)

จากสมการสามารถแทนค่ากระแสของวงจร และได้ค่าหน่วยเวลาก่อนตัดวงจรดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาการตัดวงจรที่ออกแบบ

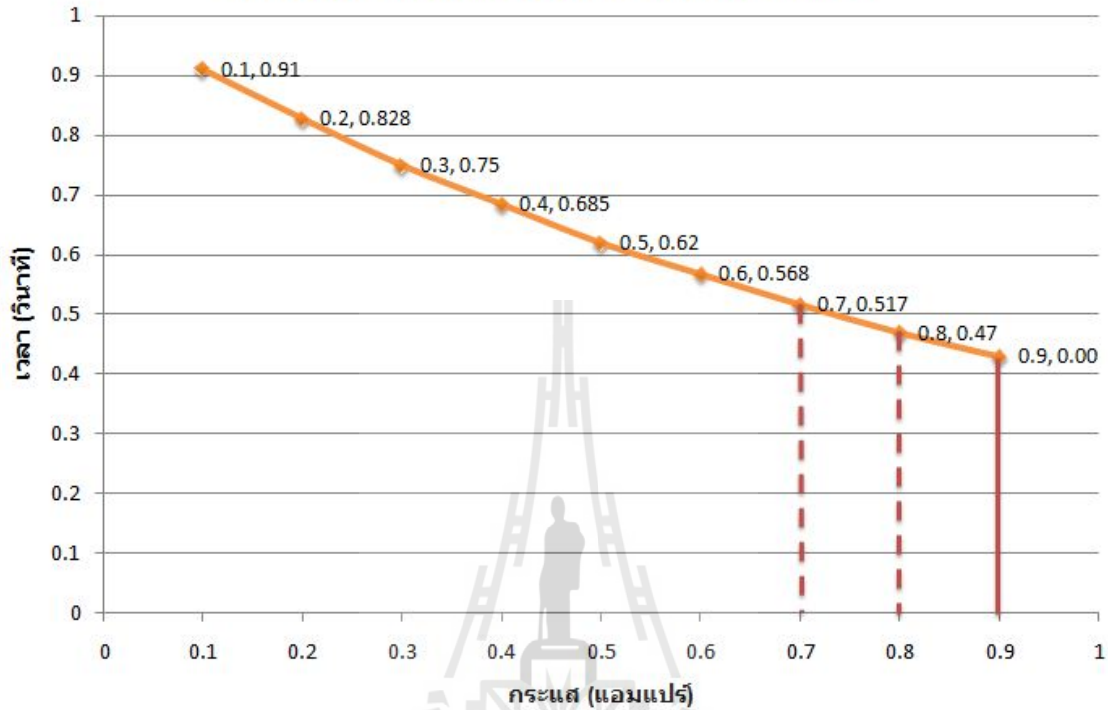
| I_{rms} (A) | t (s) |
|---------------|---------|
| 0.1 | 0.91 |
| 0.2 | 0.828 |
| 0.3 | 0.75 |
| 0.4 | 0.685 |
| 0.5 | 0.62 |
| 0.6 | 0.568 |
| 0.7 | 0.517 |
| 0.8 | 0.47 |
| 0.9 | 0 |

โดยที่กราฟจะสัมพันธ์กับค่าการทำงานดังต่อไปนี้

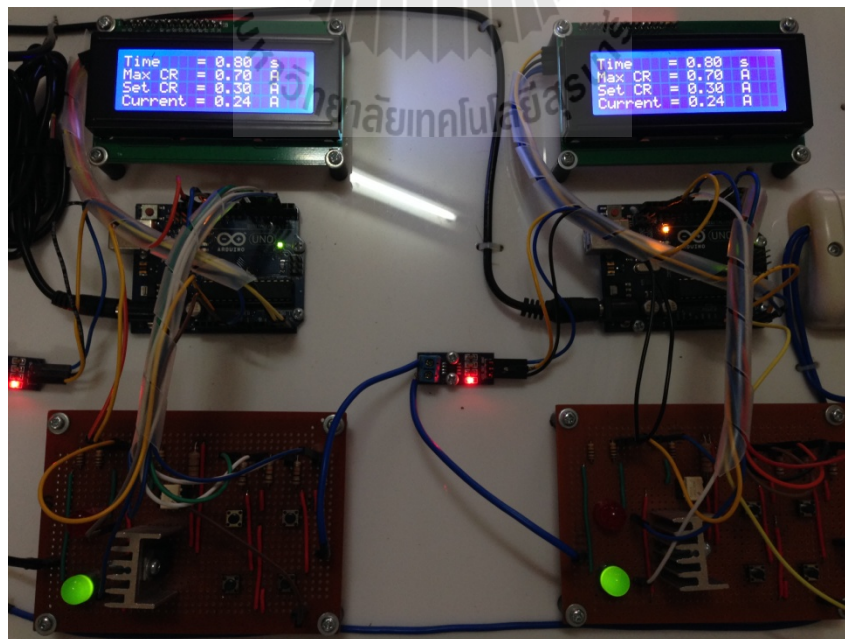
- ค่า Max CR (maximum current) หมายถึง ค่าพิกัดกระแสเกิน เมื่อกระแสของวงจรมีค่าเกินกว่าค่าพิกัดกระแสเกิน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งการให้ชุดตัดวงจร (ในที่นี้ออกแบบให้ใช้ออปโตคัปเปิลเลอร์สำหรับวงจรทดลอง) ตัดกระแสทันที โดยไม่มีการหน่วงเวลา
- ในการทดลอง สามารถตั้งค่าพิกัดกระแสเกิน (โดยการกดปุ่มไมโครสวิตช์) เพื่อเพิ่ม/ลดค่าพิกัดกระแสเกินได้ ซึ่งในการทดลองค่าพิกัดกระแสเกินมีค่าระหว่าง 0.7 – 0.9 A
- Set CR (set current) หมายถึง ค่าพิกัดกระแส เมื่อกระแสของวงจรมีค่าเกินกว่าค่าพิกัดกระแส ชุดควบคุม (ไมโครคอนโทรลเลอร์) จะสั่งชุดตัดวงจร (ออปโตคัปเปิลเลอร์) ตัดกระแสโดยมีการหน่วงเวลาตามกราฟรูปที่ 3.16

- การทดลองเป็นการจัดลำดับความสัมพันธ์การทำงานของชุดตัววงจร (ออปโตคัปเปิลอร์) ในการตัดกระแสของวงจร โดยใช้ชุดควบคุม (ในที่นี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3) ในการควบคุม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา



รูปที่ 3.17 ชุดทดลองโซลิตสแตตที่ใช้ทดสอบในห้องทดลอง

รายละเอียดการพัฒนาชุดทดลองได้นำเสนอไว้ใน ภาคผนวก ก. วงจรทดสอบในห้องทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.17

เมื่อเริ่มวงจร ให้กระแสไหลผ่าน จากแหล่งจ่าย 12 V และใช้โหลดความต้านทานทดสอบรวม 50.2 โอห์ม กระแสของวงจรมีค่า 0.24 A ทำการทดลองโดยการเปิดสวิตซ์ความต้านทาน ซึ่งจะทำความต้านทานของวงจรลดลง กระแสของวงจรจึงเพิ่มขึ้น รายละเอียดในการทดสอบแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

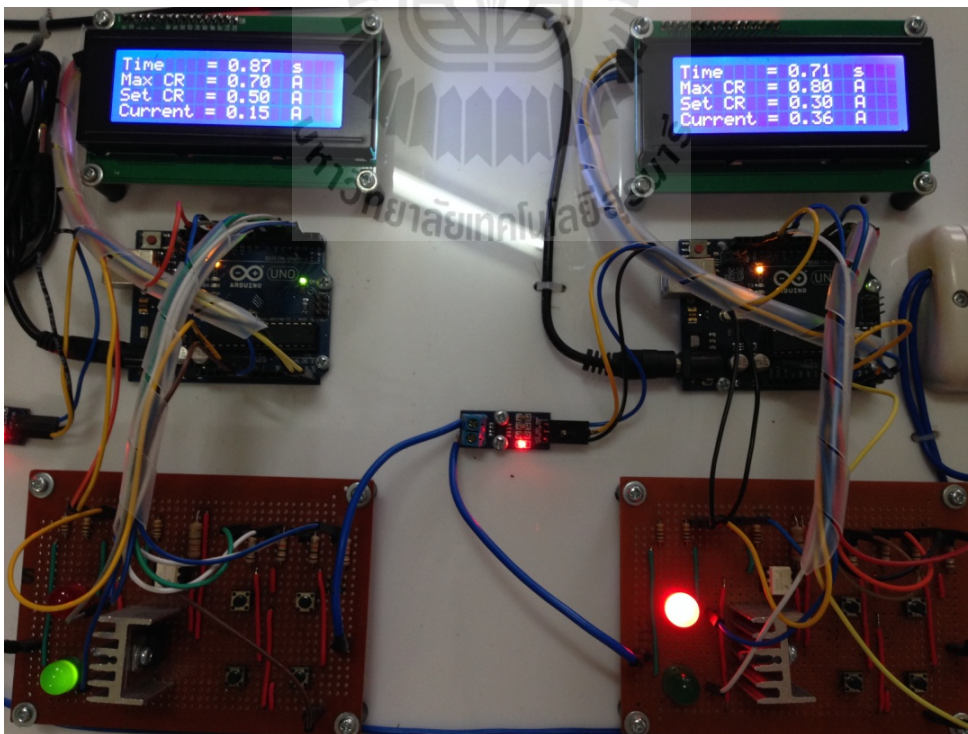
3.4 ผลการทดลอง

การทดลองชุดทดสอบโซลิตสเตตเบรกเกอร์แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลองย่อย ประกอบด้วย

- 3.4.1 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว
- 3.4.2 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว
- 3.4.3 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 1 ตัว และตัดวงจรแบบหน่วงเวลา 1 ตัว
- 3.4.4 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 2 ตัว

3.4.1 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว

การทดสอบนี้กำหนดให้การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาสำหรับโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 โดยกำหนดให้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 ไม่มีการตัดวงจร



รูปที่ 3.18 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว



รูปที่ 3.19 สวิตช์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.1

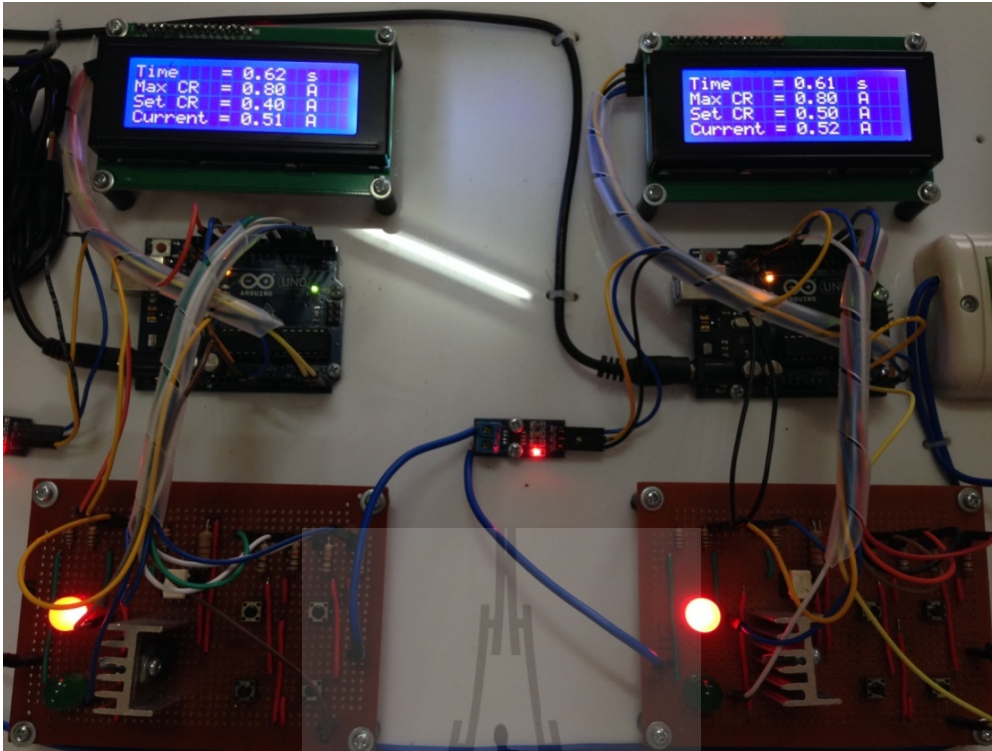
จากวงจรทดลองในรูปที่ 3.18 ทำการทดลองให้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 (แผงวงจรด้านซ้าย) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.7 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (แผงวงจรด้านขวา) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.8 A และค่าพิกัดกระแส 0.3 A แล้วทำการเปิดสวิตช์ตัวด้านทาน ดังในรูปที่ 3.19 จนกระแสของวงจรมีค่ามากกว่าค่าพิกัดกระแส 0.3 A ของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 1 ตัว

| ค่าพิกัดกระแส (A) | | ค่าพิกัดกระแสเกิน (A) | | ค่ากระแสของ วงจร (A) | ผลการทดลอง |
|-------------------|--------|-----------------------|--------|-------------------------|---|
| ตัวแรก | ตัวสอง | ตัวแรก | ตัวสอง | | |
| 0.5 | 0.3 | 0.7 | 0.8 | 0.36 | การทดลองนี้ใช้การหน่วงเวลา 0.71 s เมื่อตัดวงจรแล้วหน่วงเวลา 3 s แล้วให้เริ่มการทำงานใหม่ได้อีกครั้ง |

4.4.2 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว

การทดสอบนี้ทำการตัดวงจรแบบหน่วงเวลาสำหรับโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 และโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 โดยตัดวงจรพร้อมกัน



รูปที่ 3.20 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาที่ใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว



รูปที่ 3.21 สวิตช์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.2

จากรูปที่ 3.20 ทำการทดลองให้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 (แผงวงจรด้านซ้าย) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.8 A และค่าพิกัดกระแส 0.4 A โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (แผงวงจรด้านขวา) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.8 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A แล้วทำการเปิดสวิตซ์ตัวด้านทาน ดังรูปที่ 3.21 จนกระแสของวงจรมีค่ามากกว่าค่าพิกัด 0.5 A ของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 จะได้ผลการทดลองในตารางที่ 3.3

ตาราง 3.3 การตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว

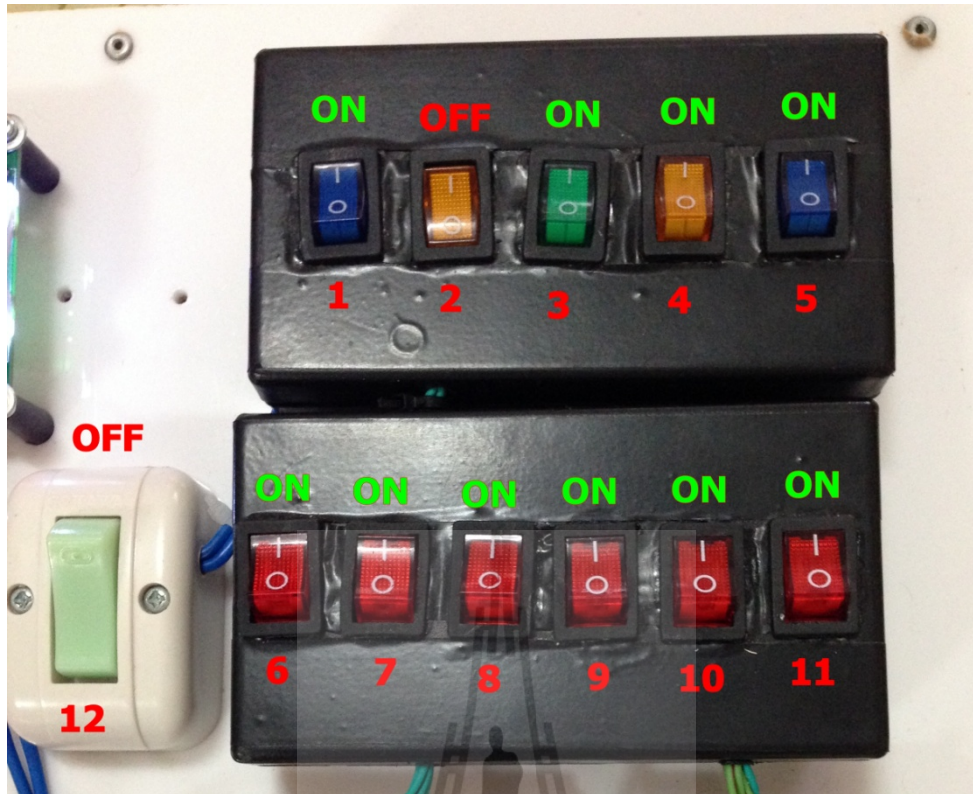
| ค่าพิกัดกระแส(A) | | ค่าพิกัดกระแสเกิน (A) | | ค่ากระแสของวงจร (A) | ผลการทดลอง |
|------------------|--------|-----------------------|--------|---------------------|---|
| ตัวแรก | ตัวสอง | ตัวแรก | ตัวสอง | | |
| 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.52 | การทดลองนี้ใช้การหน่วงเวลา 0.61 s เมื่อตัดวงจรแล้วหน่วงเวลา 3 s แล้วให้เริ่มการทำงานใหม่ได้อีกครั้ง |

3.4.3 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 1 ตัวและตัดวงจรแบบหน่วงเวลา 1 ตัว
การทดสอบนี้ทำการตัดวงจรแบบทันทีของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 และการตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2

จากรูปที่ 3.22 ทำการทดลองให้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 (แผงวงจรด้านซ้าย) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.7 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (แผงวงจรด้านขวา) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.9 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A แล้วทำการเปิดสวิตซ์ตัวด้านทานดังรูปที่ 3.23 จนกระแสของวงจรมีค่ามากกว่าค่าพิกัดกระแส 0.7 A ของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 จะได้ผลการทดลองในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.22 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 1 ตัวและตัดวงจรแบบหน่วงเวลา 1 ตัว



รูปที่ 3.23 สวิตช์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.3

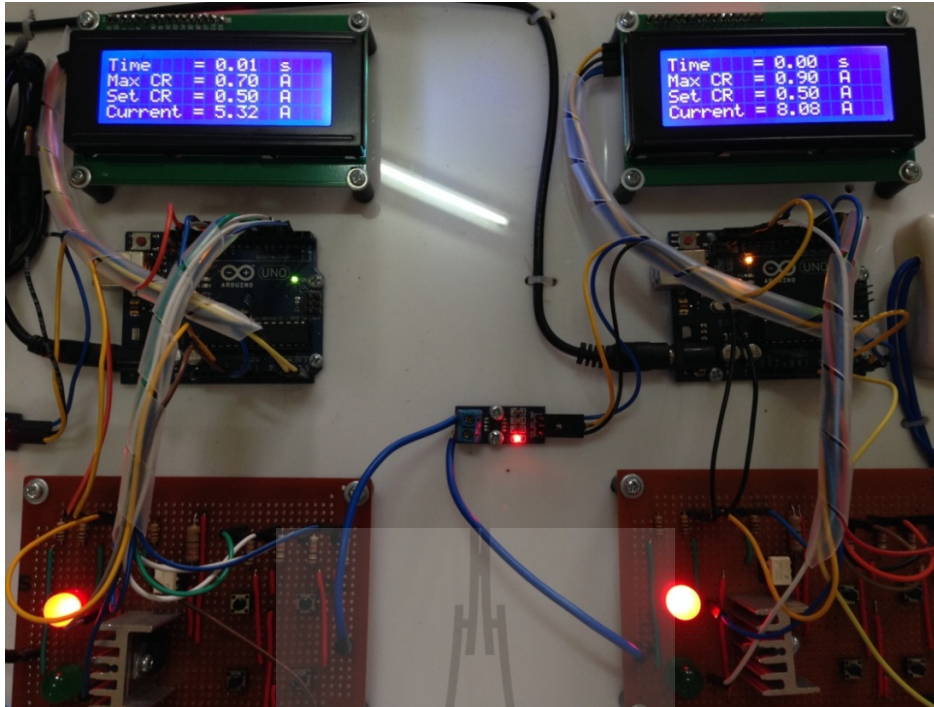
ตาราง 3.4 การตัดวงจรแบบทันที และตัดวงจรแบบหน่วงเวลาโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว

| ค่าพิกัดกระแส (A) | | ค่าพิกัดกระแสเกิน (A) | | ค่ากระแสของวงจร (A) | ผลการทดลอง |
|-------------------|--------|-----------------------|--------|---------------------|---|
| ตัวแรก | ตัวสอง | ตัวแรก | ตัวสอง | | |
| 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 0.81 | การทดลองนี้หน่วงเวลา 0.45 s เมื่อตัดวงจรแล้ว หน่วงเวลา 3 s ให้เริ่มการทำงานใหม่ |

3.4.4 การใช้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 2 ตัว

การทดสอบนี้ทำการตัดวงจรแบบทันทีของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 และโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2

จากรูปที่ 3.24 การทดลองนี้ทำการทดลองให้โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 (แผงวงจรด้านซ้าย) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.7 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A โซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (แผงวงจรด้านขวา) มีค่าพิกัดกระแสเกิน 0.9 A และค่าพิกัดกระแส 0.5 A แล้วทำการเปิดสวิตซ์ตัวด้านทาน ดังรูปที่ 3.25 จนกระแสของวงจรมีค่ามากกว่าค่าพิกัดกระแสเกิน 0.9 A ของโซลิตสเตตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 จะได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.24 การใช้ไลดสแตตเบรกเกอร์ตัดวงจรแบบทันที 2 ตัว



รูปที่ 3.25 สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.4.4

ตาราง 3.5 การตัดวงจรแบบทันทีโดยโซลิตสแตตเบรกเกอร์ตัดวงจร 2 ตัว

| ค่าพิกัดกระแส (A) | | ค่าพิกัดกระแสเกิน (A) | | ค่ากระแสของ วงจร (A) | ผลการทดลอง |
|-------------------|--------|-----------------------|--------|-------------------------|--|
| ตัวแรก | ตัวสอง | ตัวแรก | ตัวสอง | | |
| 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 5 A | การทดลองให้โซลิตสแตตเบรกเกอร์ทั้งสองตัวตัดวงจรทันที โดยไม่มีการหน่วงเวลา เมื่อตัดวงจรแล้วหน่วงเวลา 3 s ก่อนเริ่มการทำงานใหม่ |

การทดลองทั้ง 4 การทดลองย่อยนี้เป็นไปตามการจัดลำดับความสัมพันธ์การทำงานของโซลิตสแตตเบรกเกอร์ที่ใช้หลักการแบบเดียวกับรีเลย์กระแสเกินในการตัดกระแสของวงจร โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ในการควบคุมการทำงานของทดลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนของค่ากระแสของวงจร อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนความต้านทาน ค่าความต้านทานสายไฟ การต่อวงจร และอาจเกิดจากเซนเซอร์วัดกระแสที่ยังไม่ได้รับการปรับแก้ไข

3.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงการจำลองผลโซลิตสแตตเบรกเกอร์สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การจำลองผลดำเนินการโดยใช้การสร้างแบบจำลองด้วย MATLAB/Simulink โดยใช้ไทรสเตอร์กำลังและวงจรจุดชนวนที่เหมาะสม นอกจากนี้ได้นำเสนอชุดทดลองการทำงานของอุปกรณ์โซลิตสแตตเบรกเกอร์ที่ใช้อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 จำลองการทำงานเสมือนจริง

บทที่ 4

สรุป

4.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองผลโซลิตสแตตเบรกเกอร์สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การจำลองผลดำเนินการโดยใช้การสร้างแบบจำลองด้วย MATLAB/Simulink โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังและวงจรถูกขนาดที่เหมาะสม การตรวจจับความผิดปกติของใช้วิธีการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ โดยการคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มที่กำหนดไว้ทำให้การตรวจจับการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ได้นำเสนอชุดทดลองการทำงานของอุปกรณ์โซลิตสแตตเบรกเกอร์ที่ใช้อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 จำลองการทำงานเสมือนจริง การทดลองได้ดำเนินการทดลองปรับตั้งค่าการทำงานหน่วงเวลาเพื่อจัดลำดับความสัมพันธ์ในรูปแบบเสมือนทำงานเป็นรีเลย์กระแสเกินป้องกันสายป้อนได้อีกด้วย



บรรณานุกรม

1. M.M. Bhanoo, "ADVANCES IN HIGH SPEED SOLID – STATE TRANSFER SWITCH FOR CRITICAL POWER QUALITY AND RELIABILITY APPLICATIONS.", IEEE Fiber and Film Industry Technical Conference, pp. 5/1 -5 /8, July1998.
2. Chia-Han Tsai and Po-Tai Clierig, "An improved solid-state transfer switch controller for sensitive industrial loads", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 2514 - 2519, July 2003.
3. L. Palav and A.M.Gole, "On Using the Solid State Breaker in Distribution Systems", IEEE Electrical and Computer Engineering, pp. 693 - 696, May1998.
4. Christoph Meyer, Markus Hliing and Rik W. De Doncker, "Novel Solid-state Circuit Breaker Based on Active Thyristor Topologies", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2559 – 2564, Germany, 2004.
5. Chriistoph Meyer, "Design of Solid-state Circuit Breakers for Medium-Voltage Systems", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 798 - 803, Sept 2003.
6. Christoph Meyer, "Solid-State Circuit Breakers and Current Limiters for Medium-Voltage Systems Having Distributed Power Systems", IEEE Transcation on Power Electronics, pp. 1333-1340, Sept 2004.
7. Christoph Meyer, "Solid-State Circuit Breaker Based on Active Thyristor Topologies ", IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 450 - 458, March 2006.
8. Stefan Schroder, Christoph Meyer and Rik W. De Doncker, "Solid-state Circuit Breakers and Current-Limiting Devices for Medium-Voltage Systems", IEEE Power Electronics Congress, pp. 91 - 95, Oct 2002.
9. Marcel .PJ. Gaudreau and Michael A. Kempkes,"A Solid-State Switch for 13.8kV Power Distribution", Diversified Technologies, Inc. Bedford, MA USA.
10. Gregory F., Takeda, M. and Iyoda, I., " IMPROVED POWER QUALITY SOLUTIONS USING ADVANCED SOLID-STATE SWITCHING AND STATIC COMPENSATION TECHNOLOGIES", IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, pp. 1132 - 1137, 1998.

11. B. Hodges, J. Dvorak and Dr. C. Braun, "A Fault Control System Using Solid State Circuit Breakers and High Temperature Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Power Modulator Symposium, pp. 232-234, Jun 1996.
12. N Woodley, M Sarkozi, F Lopez, V Tahiliani and P Malkin, "Solid-state 13-kV Distribution Class Circuit Breaker: Planning, Development and Demonstration ", IEEE Trends in Distribution Switchgear, pp. 163-167, Nov1994.
13. Bin Chen, Alex Q. Huang, Mesut Baran, Chong Han and Wenchao Song, "Operation Characteristics of Emitter Turn-Off Thyristor (ETO) for Solid-State Circuit Breaker and Fault Current Limiter", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 174 - 178, March 2006.
14. M. Takeda and S. Jochi, "DEVELOPMENT OF ADVANCED SOLID-STATE TRANSFER SWITCH USING NOVEL HYBRID SWITCH DEVICES ", IEEE Advances in Power System Control, Operation and Management, pp. 535 – 540, Nov 2003.
15. A. Golland, F. Wakeman, I. McDonald, and T. Lakin, *Integrated 30 kV solid-state switch for pulse power applications*, Pulsed Power Plasma Science (PPPS-2001), Volume 2, 17-22 June 2001, pp. 1055 – 1058.
16. G.F. Reed, M. Takeda, and I. Iyoda, *Improved power quality solutions using advanced solid-state switching and static compensation technologies*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1999, Volume 2, 31 Jan-4 Feb 1999, pp. 1132 – 1137.
17. The MATHWORKS Inc., *Power system blockset for use with SIMULINK*, User Guider Version 1.0, 1999.

ภาคผนวก ก

ชุดทดสอบโซลิตสเตตเบรกเกอร์

ก.1 การออกแบบตัวต้านทานชนิดกระเบื้อง

เนื่องจากระบบใช้แรงดัน 12 โวลต์ โดยอาศัยการแปลงแรงดันของหม้อแปลง 220/12 V, 1A ฉะนั้นจะออกแบบตัวต้านทานจากสูตร

$$V = IR$$

โดยที่ V คือแรงดันไฟฟ้า(โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

R คือ ตัวต้านทาน (โอห์ม)

จากการออกแบบระบบมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 โวลต์, กระแสไฟฟ้า 1 แอมป์จะได้ R เท่ากับ 12 โอห์ม

แสดงว่าเมื่อ ตัวต้านทานมีขนาด 12 โอห์ม กระแสในวงจร จะมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์ เนื่องจากการออกแบบต้องการให้กระแสมีค่าน้อยกว่า 1 แอมป์ (พิกัดเข้าใกล้ 0 แอมป์) คือ ต้องมีตัวต้านทานในระบบมากกว่า 12 โอห์ม จากการคำนวณ ซึ่งออกแบบตัวต้านทาน เท่ากับ 50.2 โอห์ม จากสูตร $V=IR$ จะได้ $I = 12/50.2$, $I = 0.24$ แอมป์ และการออกแบบครั้งนี้จะต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้า

หาได้จากสูตร

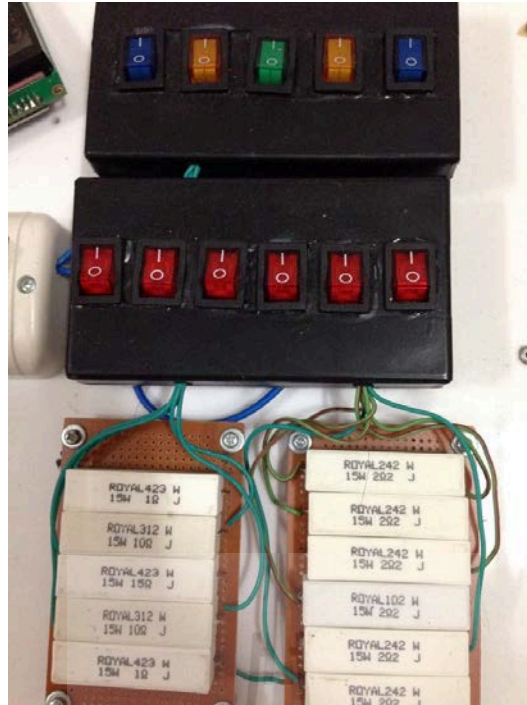
$$P = IV$$

P คือ ค่ากำลังไฟฟ้า(วัตต์)

I คือกระแสไฟฟ้า(แอมป์)

V คือแรงดันไฟฟ้า(โวลต์)

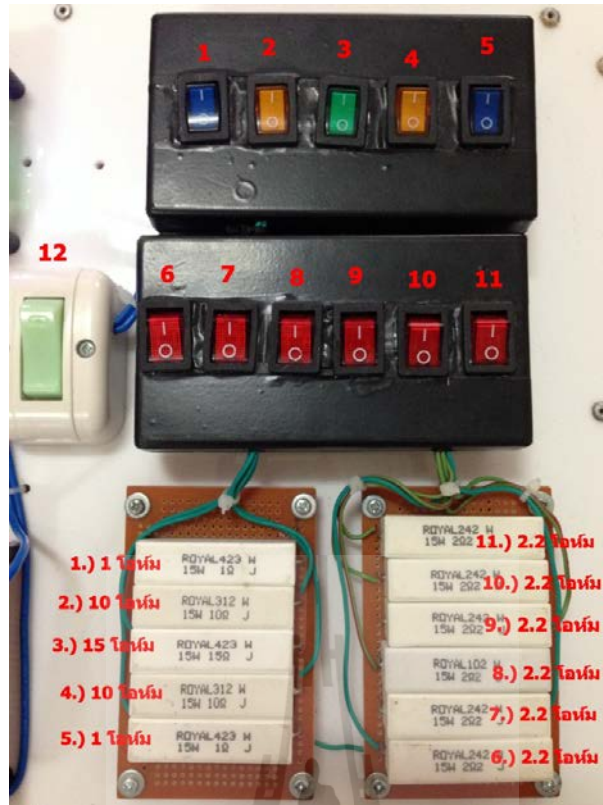
จากการออกแบบ $P = 1 \times 12 = 12$ วัตต์ ฉะนั้นเลือกตัวต้านทานขนาด 15 วัตต์
สรุปการออกแบบตัวต้านทานชนิดกระเบื้อง เป็น 50.2 โอห์ม 15 วัตต์



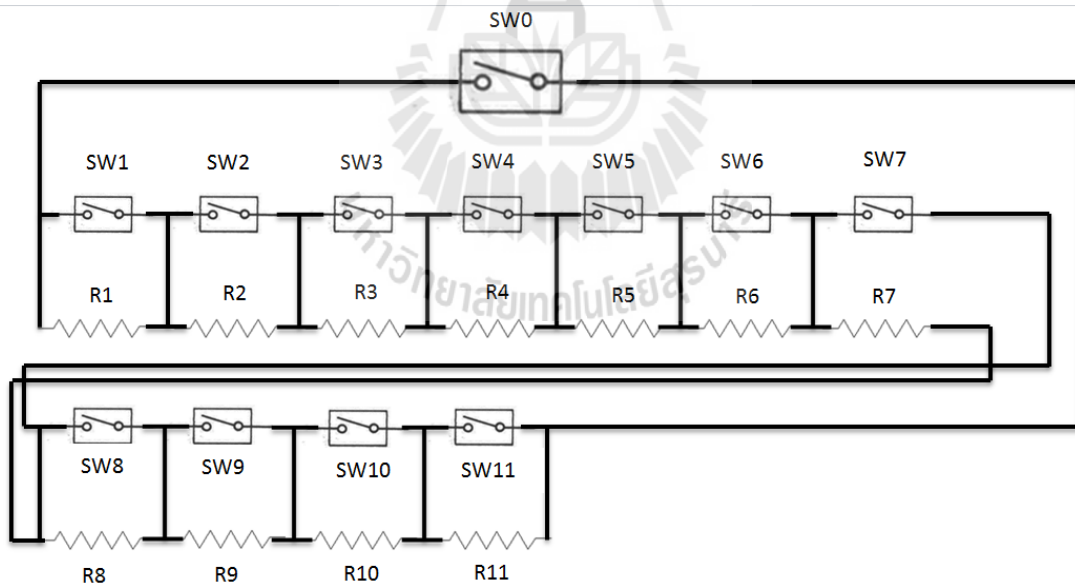
รูปที่ ก.1 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมมีสวิตช์ต่อक्रमตัวต้านทานแต่ละตัว

การออกแบบระบบสามารถเลือกค่าความต้านทานจากตัวต้านทานได้(การต่อตัวต้านทานเป็นแบบอนุกรม) โดยนำสวิตช์มาक्रमตัวต้านทานแต่ละตัว และมีสวิตช์หลังเต้าต่อครบสวิตช์ย่อยทั้งหมด อีกทั้ง โหลดความต้านทานรวมทั้งหมดมีค่า 50.2 โอห์ม โดยเกิดจากการนำความต้านทานมาต่ออนุกรมกันทั้งหมด 11 ตัว ได้แก่

| | | |
|----------------------------|----------------------|-------|
| สวิตช์ตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) | มีค่าความต้านทาน 1 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 2 (สีเหลือง) | มีค่าความต้านทาน 10 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 3 (สีเขียว) | มีค่าความต้านทาน 15 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 4 (สีเหลือง) | มีค่าความต้านทาน 10 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 5 (สีน้ำเงิน) | มีค่าความต้านทาน 1 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 6 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 7 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 8 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 9 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 10 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 11 (สีแดง) | มีค่าความต้านทาน 2.2 | โอห์ม |
| สวิตช์ตัวที่ 12 (หลังเต้า) | ใช้สำหรับลัดวงจร | |



รูปที่ ก.2 ตัวต้านทานชนิดกระเบื้องและการเชื่อมกับสวิตช์



รูปที่ ก.3 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมมีสวิตช์ต่อक्रमตัวต้านทานแต่ละตัว(สัญลักษณ์)

ก.2 การออกแบบแผงควบคุม

ใช้เป็นแผงสำหรับควบคุมระบบทั้งหมด ผ่านการสั่งการจากภายนอก(ปุ่มกด) ซึ่งใช้แผ่นวงจรอนเนกประสงค์เป็นฐานรองรับอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ เพื่อความสะดวกต่อการใช้ เนื่องจากลายตามขวางของ

แต่ละบรรทัดเชื่อมถึงกัน(หากไม่ต้องการใช้เชื่อมกันสามารถขูดออกได้) ออกแบบไว้เพื่อใช้ควบคุมระบบ

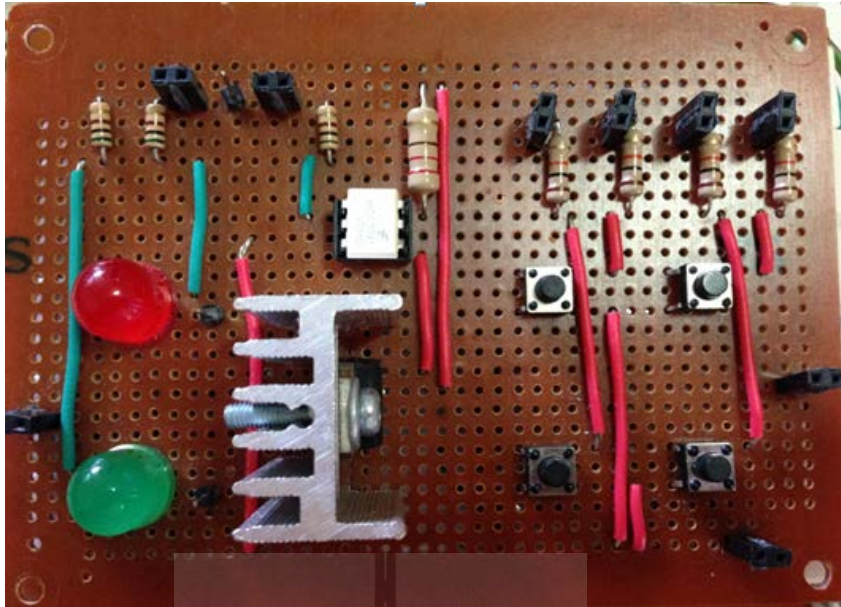
1. ไมโครสวิทช์ กดเพิ่มลดค่า Max CR (Max Current) และ Set CR (Set Current) ทำได้โดยการกดเพื่อเพิ่มค่าและลดค่าครั้งละ 0.05 A
2. ออปโตคัปเปลอร์ใช้ในการตัดวงจร โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม
3. ไตรแอกเป็นอุปกรณ์ที่ต่อจากกระแสไลน์โดยตรง ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความเสียหายแก่ออปโตคัปเปลอร์จากกระแสสูง
4. หลอดไฟ LED สีแดง จะทำงานเมื่อออปโตคัปเปลอร์ตัดวงจร เพราะกระแสของวงจรมากกว่าค่ากระแสสูงสุด หรือมากกว่าค่ากระแสหน่วงเวลาตัดวงจร
5. หลอดไฟ LED สีเขียว จะทำงานเมื่อไม่มีการตัดวงจร

แผงควบคุมของระบบประกอบไปด้วย

1. ปุ่มไมโครสวิทช์สำหรับกด 4 ปุ่ม
2. ตัวต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม 4 ตัว
3. ไตรแอก BTA10 - 600B
4. ออปโตคัปเปลอร์ MOC3041
5. ตัวต้านทานขนาด 220 โอห์มต่อกับขาที่ 4 ของออปโตคัปเปลอร์ MOC3041
6. หลอดไฟ LED 2 ตัว



รูปที่ ก.3 แผ่วงจรอนเนกประสงค์ชนิดลายตามขวางเชื่อมถึงกัน

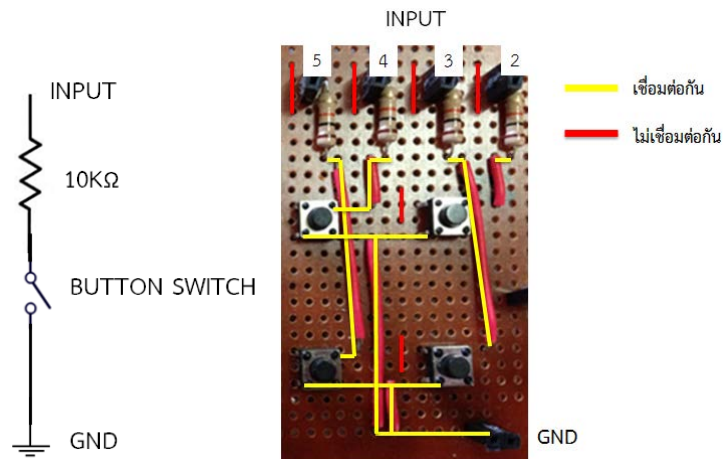


รูปที่ ก.4 รวมอุปกรณ์บนแผ่นวงจรอบเนกประสงค

ก.3 ปุ่มกดไมโครสวิตช์

การออกแบบไมโครสวิตช์ใช้ไมโครสวิตช์ทั้งหมดจำนวน 4 ตัว เพื่อกำหนดค่ากระแส (มีการหน่วงเวลาผกผันกับค่ากระแส) และเพดานกระแสเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและส่งให้ OPTO 3041 ตัดสัญญาณเกจที่ขา 4 หรือไม่ ซึ่งต่อกับไทรแอก BTA10-600B หากไม่มีสัญญาณเกตมาเข้าไทรแอก ไทรแอกก็จะไม่ทำงาน กระแสไฟฟ้าจึงไม่ไหล

ออกแบบให้ไมโครสวิตช์ 2 ตัว ตัวหนึ่งทำหน้าที่เพิ่มค่ากระแส อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่ลดค่ากระแส (มีการหน่วงเวลาผกผันกับค่ากระแส) กดหนึ่งครั้งเพิ่ม-ลด 0.5 แอมป์ และให้ไมโครสวิตช์ที่เหลือ 2 ตัว ตัวหนึ่งทำหน้าที่เพิ่มค่าเพดานกระแส อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่ลดค่าเพดานกระแส (ตัดกระแสทันที) กดหนึ่งครั้งเพิ่ม-ลด 0.5 แอมป์ เนื่องจากวางอุปกรณ์ต่อกับแผ่นวงจรอบเนกประสงคซึ่งทางขวางของแต่ละบรรทัดเชื่อมถึงกัน จึงมีการขุดทองแดงข้างล่างแผ่นเพื่อไม่ให้เชื่อมถึงกัน สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว จะต่อกับอินพุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวด้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม (K Ω) และกราวด์ตามลำดับดังรูป



รูปที่ ก.5 การต่อสวิตต์ในแบบสัญลักษณ์และรูปการเชื่อมต่อในแผ่นวงจรเอนกประสงค์

ก.4 หน้าจอ LCD 20x4 (I2C)

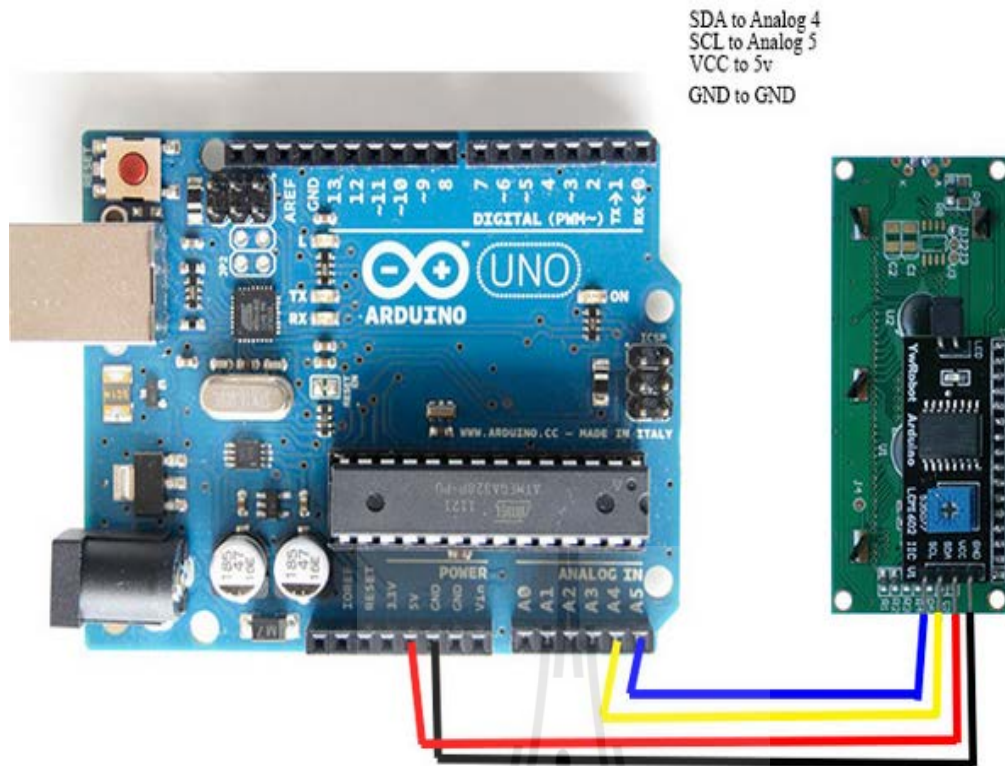
หน้าจอแสดงผลแบบ LCD ออกแบบให้แสดงข้อความได้ 20 ตัวอักษร 4 บรรทัด (20x4) เพื่อแสดงค่าต่าง ๆ จำนวน 4 บรรทัด ได้แก่

1. Time หมายถึง แสดงเวลาหน่วงเวลาก่อนการตัดวงจรในหน่วยวินาที (s)
2. ค่า Max CR (Max Current) หมายถึง ค่าพิกัดกระแสเกิน
3. Set CR (Set Current) หมายถึง ค่าพิกัดกระแส
4. Current หมายถึง ค่ากระแสของวงจร (I_{rms})

การออกแบบหน้าจอแสดงผล 20x4 ในครั้งนี้จะใช้สายไฟจำนวนมากในการต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ฝั่ง Digital) จึงได้ใช้ตัวอุปกรณ์ช่วยคือ I2C คือการเชื่อมต่อแบบ Serial ที่ทำให้การใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นและยังมาพร้อมกับ VR สำหรับปรับความเข้มของจอ ในรูปแบบ I2C จะใช้ขาในการเชื่อมต่อกับ Microcontroller เพียง 4 ขา (แบบ Parallel ใช้ 16 ขา) ซึ่งทำให้ใช้งานได้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น ขาที่เชื่อมต่อคือ ขาที่1ต่อ GND ขาที่2 ต่อไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ขาที่ 3 (SCA) ต่อกับ A4 (ANALOG IN) ขาที่ 4 (SCL) ต่อกับ A5 (ANALOG IN)



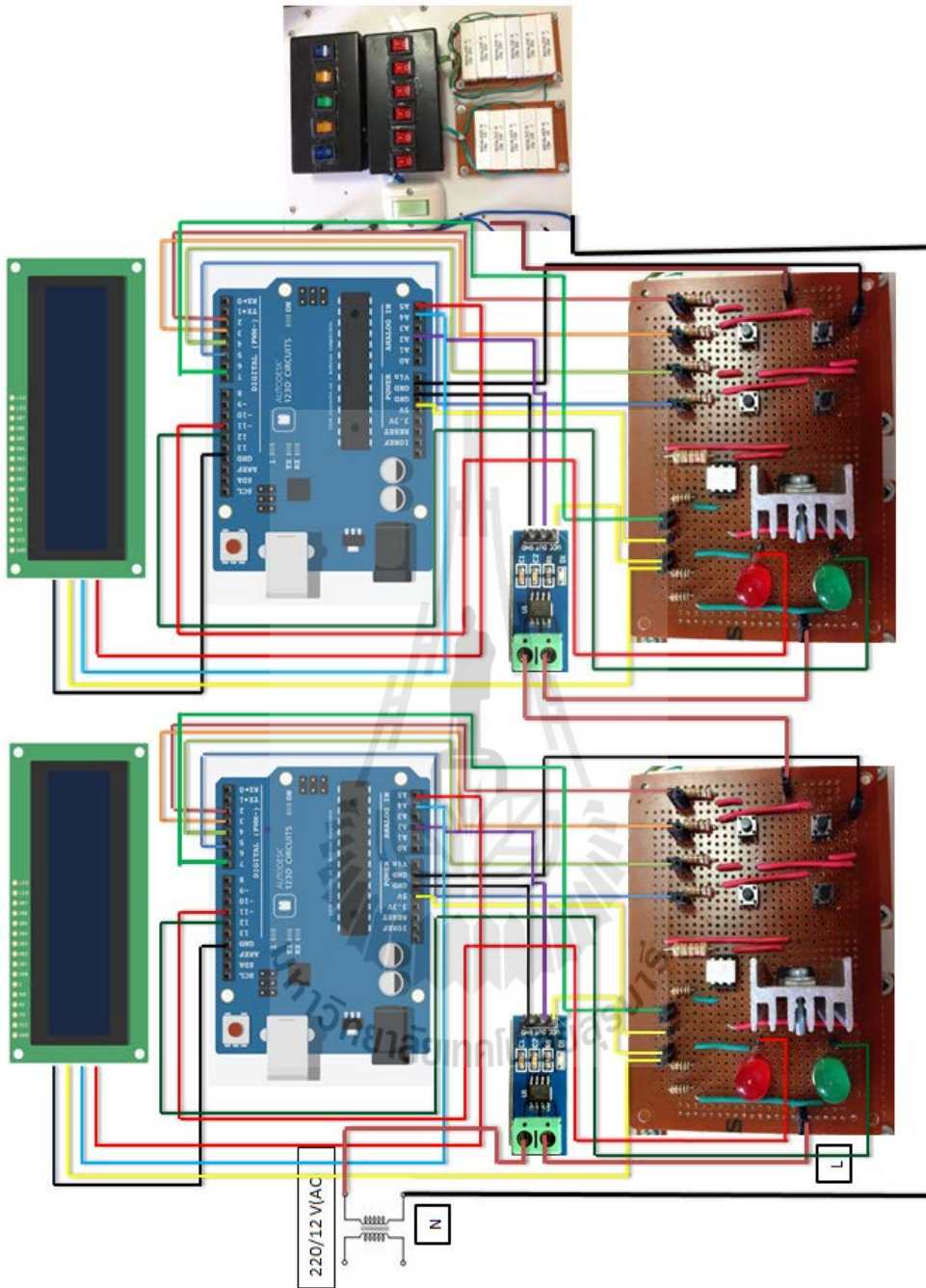
รูปที่ ก.6 หน้าจอ LCD 20x4



รูปที่ ก.7 หน้าจอ LCD 20x4(I2C)เชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ก.5 การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino board

วงจรตัดไฟอัตโนมัติใช้โหนดเป็นความต้านทานชนิดกระแสเบี่ยง เป็นตัวทดสอบวงจร ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดกระแสได้จากการเลือกใช้ค่าความต้านทานผ่านสวิตช์เปิด/ปิด เมื่อเซนเซอร์วัดกระแส (AC หรือกระแสสลับ) วัดกระแสได้เท่าไร จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้จากปุ่มไมโครสวิตช์ (ตั้งพิกัดกระแส ชีตจำกัดกระแส จะแสดงค่าที่ตั้งไว้บนจอแสดงผล LCD) แล้วประมวลผลผ่านบอร์ดควบคุมอัตโนมัติ จากนั้นบอร์ดควบคุมอัตโนมัติจะตัดสินใจว่าควรสั่งให้ไทรแอกตัดวงจร (ผ่านออปโต) หรือไม่ กระแสจะต้องตัดตามลำดับของการตั้งค่าอย่างถูกต้อง เมื่อมีการตัดไฟจะมีไฟ LED สีแดงปรากฏขึ้น หากไม่เกิดการตัดไฟจะมีไฟ LED สีเขียวปรากฏเช่นกัน รูปที่ ก.8 แสดงวงจรที่ออกแบบไว้ การเขียนโปรแกรมของภาษานี้ จะต้องเรียก Library ของอุปกรณ์ต่าง ๆ และมีโครงสร้าง 2 ส่วน 1. void setup () คือฟังก์ชันตั้งค่าเริ่มต้น กำหนดตำแหน่งอินพุตหรือเอาต์พุต และ 2. void loop () คือ ฟังก์ชัน การทำงานต่าง ๆ แบบวนรอบ จากความต้องการข้างต้นสามารถเขียนเป็น Flow chart และ Code ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.8 แผนภาพวงจรโซลิตสเตตเบรกเกอร์ที่ออกแบบ

Code ของวงจรตัดไฟอัตโนมัติทั้งหมด

```

#include <Wire.h> // นำ Library มาใช้
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // นำ Library ของตัวสื่อสาร I2C มาใช้
#include "EmonLib.h" // นำ Library ของเซนเซอร์กระแส มาใช้
EnergyMonitor emon1; // Create an instance
#define I2C_ADDR 0x27 // กำหนดตำแหน่ง Address ของ I2C เป็น 0x27
#define I2C_ADDR 0x3F // ในบางกรณี Address ของ I2C เป็น 0x3f
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 20, 4); // กรณี Address ของ I2C เป็น 0x3f ขนาด 20 ตัวอักษร 4 แถว
float c=0.3; // กำหนดให้ค่ากระแสหน่วงเวลาตัดวงจรเริ่มต้น c = 0.3 A
float m=0.7; // กำหนดให้ค่าเพดานกระแสเริ่มต้น m = 0.7 A
float t; // กำหนดให้ t คือค่าการหน่วงเวลา
float I; // กำหนดให้ I คือตัวแปรแทนกระแส
float T; // กำหนดให้ T คือตัวแปรใช้ในการหาค่าเวลา
void setup() {
  Serial.begin(9600); // เรียกบอร์ดเรท 9600 มาใช้
  emon1.current(2, 7); // Current: input pin, calibration.(อินพุตของเซนเซอร์กระแส
  // เป็น A2 และ ตัวปรับเทียบ = 7)
  lcd.begin(); // เริ่มจอ LCD
  lcd.backlight(); // เริ่มจอ LCD
  pinMode(2, INPUT_PULLUP); // กำหนดตำแหน่ง digital 2 เป็นอินพุต
  pinMode(3, INPUT_PULLUP); // กำหนดตำแหน่ง digital 3 เป็นอินพุต
  pinMode(4, INPUT_PULLUP); // กำหนดตำแหน่ง digital 4 เป็นอินพุต
  pinMode(5, INPUT_PULLUP); // กำหนดตำแหน่ง digital 5 เป็นอินพุต
  pinMode(7, OUTPUT); // กำหนดตำแหน่ง digital 7 เป็นเอาต์พุต
  pinMode(11, OUTPUT); // กำหนดตำแหน่ง digital 11 เป็นเอาต์พุต
  pinMode(12, OUTPUT); // กำหนดตำแหน่ง digital 12 เป็นเอาต์พุต
}
void loop() {
  int sensorVal = digitalRead(2); // อ่านค่าจากตำแหน่ง digital 2 เก็บไว้ที่ตัวแปร sensorVal
  int sensorVal2 = digitalRead(3); // อ่านค่าจากตำแหน่ง digital 3 เก็บไว้ที่ตัวแปร sensorVal2
  int sensorVal3 = digitalRead(4); // อ่านค่าจากตำแหน่ง digital 4 เก็บไว้ที่ตัวแปร sensorVal3
  int sensorVal4 = digitalRead(5); // อ่านค่าจากตำแหน่ง digital 5 เก็บไว้ที่ตัวแปร sensorVal4

```

```

double Irms = (emon1.calcIrms(1480)-0.02); // การคำนวณหาค่ากระแส Irms
I = Irms*10; // ค่ากระแสของวงจรคูณ10 เพื่อนำค่าเข้าสู่สมการการหา
ค่า เวลาตัดวงจร
T=pow(0.91,I); // คำนวณค่าเวลาตัดวงจร จากสมการ  $t = 0.91^I$ 
t=T * 1000; // นำค่าเวลาที่ได้ออกมาคูณ1000 เพื่อให้หน่วยเวลาได้ตามวินาที
if (c>=0 && c<=1){ // กำหนดให้การปรับกระแสอยู่ระหว่าง 0 - 1 A
  if (sensorVal == LOW) { // เมื่อกดสวิตช์ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้น 0.05 A
    c = c + 0.05;
    delay (0);
  }
  if (c>=0.01 && c<=1.01){ // กำหนดให้การปรับกระแสอยู่ระหว่าง 0 - 1 A
  if (sensorVal2 == LOW) { // เมื่อกดสวิตช์ ค่ากระแสจะลดลง 0.05 A
    c = c - 0.05;
    delay (0);
  }
  if (m>=0 && m<=1){ // กำหนดให้ค่าการปรับกระแสอยู่ระหว่าง 0 - 1 A
  if (sensorVal3 == LOW) { // เมื่อกดสวิตช์ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้น 0.05 A
    m = m + 0.05;
    delay (0);
  }
  if (m>=0.05 && m<1.06){ // กำหนดให้ค่าการปรับกระแสอยู่ระหว่าง 0 - 1 A
  if (sensorVal4 == LOW) { // เมื่อกดสวิตช์ ค่ากระแสจะลดลง 0.05 A
    m = m - 0.05;
    delay (0);
  }
  Serial.print(" "); // แสดงผลบน Serial Monitor
  Serial.print(Irms); // แสดงค่ากระแส Irms บน Serial Monitor
  Serial.print(" A "); // แสดงผลบน Serial Monitor
  Serial.print(T); // แสดงค่าการหน่วงเวลา บน Serial Monitor
  Serial.println(" s"); // แสดงผลบน Serial Monitor
  lcd.setCursor(0,3); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
  lcd.print("Current = A"); // แสดง Current = A ออกทางจอ LCD
  lcd.setCursor(10,3); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
  lcd.print(Irms); // แสดงผลค่ากระแสของวงจร
  lcd.setCursor(0,2); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd

```

```

lcd.print("Set CR = A"); // แสดงผล Max CR = A บนจอ lcd
lcd.setCursor(10,2); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
lcd.print(c); // แสดงผลค่ากระแสหน่วงเวลาตัดวงจร
lcd.setCursor(0,4); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
lcd.print("Time = s"); // แสดงผล Max CR = A บนจอ lcd
lcd.setCursor(10,4); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
lcd.print(T); // แสดงผลค่าการหน่วงเวลา
lcd.setCursor(0,1); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
lcd.print("Max CR = A"); // แสดงผล Max CR = A บนจอ lcd
lcd.setCursor(10,1); // ตั้งค่าการแสดงผลบนจอ lcd
lcd.print(m); // แสดงผลค่ากระแสตัดวงจรทันที
if(lrms > m){ // ใช้ if-else เปรียบเทียบค่ากระแสของวงจร กับค่ากระแส
// ตัดวงจรทันที ถ้าค่ากระแสของวงจรมากกว่าค่ากระแสตัด
// วงจรทันทีจะทำงานในลูป
digitalWrite(7, LOW); // สั่งให้ขา 7 หยุดทำงาน
digitalWrite(11, LOW); // สั่งให้ไฟ led สีแดงติด
digitalWrite(12, HIGH); // สั่งให้ไฟ led สีเขียวดับ
delay(3000); // ให้โปรแกรมหน่วงการทำงาน 3 วินาที
}else if(lrms > c) { // ใช้ if-else เปรียบเทียบค่ากระแสของวงจร กับค่ากระแส
// หน่วงเวลาตัดวงจร ถ้าค่ากระแสของวงจรมากกว่า
// ค่ากระแสหน่วงเวลาตัดวงจรจะทำงานในลูป
delay(t); // ให้โปรแกรมหน่วงเวลาการตัดวงจรจากเวลาจากกราฟ
digitalWrite(7, LOW); // สั่งให้ขา 7 หยุดทำงาน
digitalWrite(11, LOW); // สั่งให้ไฟ led สีแดงติด
digitalWrite(12, HIGH); // สั่งให้ไฟ led สีเขียวดับ
delay(3000); // ให้โปรแกรมหน่วงการทำงาน 3 วินาที
}
} // ถ้ากระแสของวงจร ยังมากกว่าค่ากระแสหน่วงเวลาตัด
// วงจร และค่ากระแสตัดวงจรทันที
digitalWrite(7, HIGH); // สั่งให้ขา 7 หยุดทำงาน
digitalWrite(11, HIGH); // สั่งให้ไฟ led สีแดงดับ
digitalWrite(12, LOW); // สั่งให้ไฟ led สีเขียวติด
} }

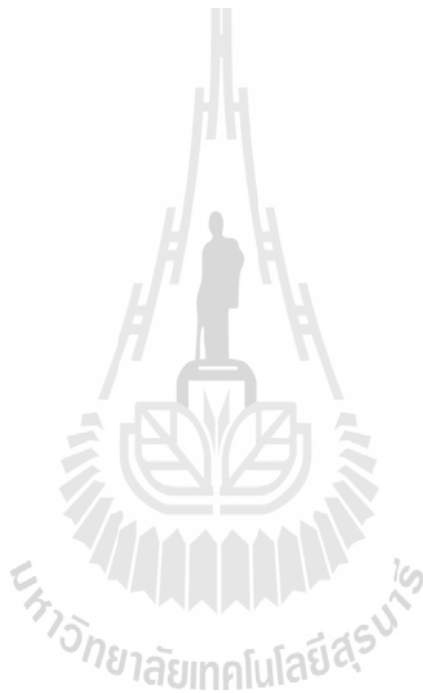
```

ภาคผนวก ข
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลิตผล ดังต่อไปนี้

บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

T. Kulworawanichpong, “Modeling of Solid-state Circuit Breakers using MATLAB’s Power System Blockset”, **INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION**, Issue 3, Volume 2, 2008, pp. 246 – 255



Modeling of Solid-state Circuit Breakers using MATLAB's Power System Blockset

T. Kulworawanichpong

Abstract—This paper contains a brief of model building for solid-state breakers (SSB) in electric power distribution systems by using GUI-based (graphic user interface) feature of MATLAB/SIMULINK. Utilization of MATLAB software simplifies problem solving complexity and also reduces working time. In this paper, a 22-kV power distribution feeder with a load having the SSB for protection was situated. The proposed circuit breaker used for modeling is a thyristor-controlled type. Detail of the power circuit and its firing control part was demonstrated in graphical diagrams using elements of the MATLAB's Power System Blockset (PSB). Test against fault conditions to verify its use was carried out. The results showed that, with a moderate sensing technique to monitor voltage and current of the protected feeder, the SSB can interrupt fault effectively.

Keywords—Solid-state circuit breaker, Thyristor-based switch, MATLAB/SIMULINK, Power system blockset

I. INTRODUCTION

WITH the growing of demand of electric power, the distribution system is expanding continuously. This results in the high level of short-circuit currents. Therefore, the electric distribution cost such as devices, installation, operation and maintenance increases gradually. Moreover, the high level of short circuit current becomes the serious problem. It may damage the electric devices or effect on machine operation. Continuity of power supply systems is very low because operations of protective devices under faulted conditions. Mechanical circuit breakers in power distribution systems give a safe handling of short-circuits under limited short-circuit power of the grid. Using delayed turn-off times, the circuit breakers can be coordinated with some other protective equipment. Hence, a high availability of the grid can be expected. However, when the short-circuit event occurs in a medium-voltage distribution feeder, voltages along the feeder line are suddenly sagged. Sensitive loads such as computers or electronic-control equipment will fail even if the voltage returns within a few seconds. A solid-state circuit breaker [1-3]

Manuscript received December 10, 2008; Revised version received December 24, 2008.

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

T. Kulworawanichpong is with Power System Research Unit, (PSRU), School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand (e-mail: thanatchai@gmail.com).

is able to switch at very high speed as fast as voltage or current sensing devices can response to the faulty signal. Although there exist a hundred of commercial software for simulation of electric circuits (e.g. PSPICE [4], ATP/EMTP [5], MATLAB's PSB [6]-[8], etc), MATLAB is one among them that contains several versatile built-in features in their various TOOLBOX, for example, optimization and control. This facility provided by MATLAB overcomes problem complexity that other commercial software cannot effort.

In this paper, a simple thyristor-based circuit breaker was briefly reviewed. Modelling using Power System Blockset [8] considering the requirements of a solid-state switch integrated into a 22-kV medium-voltage power distribution feeder was demonstrated. Based on the thyristor characteristics, triggering signal generation for firing control was also explained. It showed that solid-state breakers offer very fast interruption and can be used in modern medium-voltage power distribution systems. Also, when inverse time-current characteristics were applied to the SSB, it worked well as it was designed for this function.

Development of solid-state breakers has a long history. In literature, solid-state breakers are always embedded into two major useful categories in power system devices: i) solid-state transfer switch and ii) solid-state fault current limiter.

At present, electric power distribution systems are expanding continuously. This results in the high level of feeder current and short circuit current. Therefore, the electric distribution cost such as devices, installation, operation and maintenance increases gradually. Moreover, the high level of short circuit current becomes the serious problem. It may be damage the electric devices or effect to machines operation. The reliability of system is decreased because the operations of protection devices expand the outage area. To solve these problems, the recent study revealed the application of Solid State Fault Current Limiters (SSFCLs) [9] – [25], a vast portion of solid-state breaker applications can be found in literature.

The principles of fault current limitation by a resonant LC circuit was proposed by [17]. This research investigated the reduction of fault current by the insertion of a resonant LC circuit into the transmission line. The device consisted of a capacitor and a thyristor-switched inductance, tuned to the supply frequency. The thyristor switches were operated at zero-current-crossing to eliminate the generation of harmonics. A parametric study determined the effect of components and

network parameters on the current limiter operation, the results demonstrated that the device can reduce both transient and steady-state fault current significantly.

The reference [16] was presented a microprocessor-controlled variable impedance adaptive fault current limiter. The limiter consisted of an LC series circuit tuned to be of minimum impedance at the supply frequency. A thyristor controlled reactor was shunt connected across the capacitor. By varying the firing angle of a thyristor pair, the impedance of the limiter was varied to allow the necessary current limitation. Therefore, the system is protected and all circuit breaker relays can be operated. The new SSFCL for high voltage power system was proposed by [10]-[11].

Recent development of SSFCLs has been proved the advantage and performance. The fault-current limiter with thyristor-controlled impedance (FCL-TCI) was proposed by [21]. The FCL-TCI helps in improving the steady-state stability limit, while providing an effective reduction of short circuit current during the fault. Effects on improvement of stability limits and reduction of short-circuit current are shown using the experimental model. The economical benefits of the FCL-TCI were due to the extension of the useful life of the existing circuit breakers and transformers and to the improvement in the performance of the transmission line.

Reference [23] presented the need for a distribution current limiting device (DCLD) by the utility industry. The study has evaluated what specifications would be acceptable and what DCLD technique would supply the utility needs. There was no oscillation as well as over voltage excited by the limiter when the fault current was limited.

The principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation was proposed by [24]. The FCL components were series capacitor and reactor. A solid-state switch were connected in parallel with the capacitor controls either the ordinal series compensation or fault current limitation. The result of study was presented from the viewpoints of the transient stability improvement and device capacity. The FCL was useful protection device for large, high power transmission system.

The design synthesis of resonant fault current limiter for voltage sag mitigation and current limitation was proposed by [13]. This research presented the shortcomings (transient complications) introduced by the thyristor-controlled resonant FCL proposed by G. G. Karady in the literature. In addition, two modified version of the resonant FCL, with sag mitigation and fault current limiting capabilities, are proposed for use on distribution systems. Sensitivity analysis is the performed on the modified FCLs to determine the effects of component and network parameters on the current limiter performances.

Regarding to reference [13], the voltage quality improvement using the integration of FCL on power system was presented. The research focused on the proper selection and design of suitable solid-state FCL configurations for application on the power system to mitigated voltage sags in term of voltage magnitudes and phase angle jumps. Sensitivity

analysis was also performed to determine the effects of varying FCL parameters on its performance in term of voltage supporting capacity, phase angle jump reduction, and fault current reduction.

The power quality improvement application using SSFCL was proposed by [22]. The enhancement of the quality of supply in distribution networks by minimizing the disturbance to load during the occurrence of a fault was presented. Performance analysis of the proposed device shown that it also had the capability to improve the imbalance between phases during a single-phase to ground fault. This had significant effect on the performance of harmonic sensitive loads such as power electronic converters connected to the system.

The new fault current limiter (FCL) consists of a conventional SCR Bridge FCL was proposed by [19]. With this topology, a fault current let through reactor and a ZnO arrester. It overcame the limitation of both GTO FCL and SCR Bridge FCL.

The performance evaluation of SSFL in electric distribution system was proposed by [20]. The FCL is evaluated in terms of its performance in limiting fault current to the tolerable limit of the system, as well as the response of the FCL within a fraction of a cycle of about 2 ms. The effects of varying circuit parameters such as R, L, and C as part of the FCL device has been investigated. It has been noted that the inductive reactor, which is part of the FCL device, is suitable for limiting the fault current. Simulation results shown that the FCL was effective for reducing short circuit current and also can be used to protect bus bar from voltage sag when the system was subjected to various types of faults. Finally, the reduction of rating required for circuit breakers by employing series-connected fault current limiters was proposed by [15].

In the model of inductive FCL, a capacitance C_p consisting of a coil stray capacitance and a necessary additional capacitance was taken into account. The insertion of the resistive FCL and the inductive FCL with $C_p = 100$ nF into the power system proved to decrease the severity of the interrupting duty so that a lower-rated circuit breaker can be used.

The application of a fault current limiter to minimized distributed generation impact on coordinated relay protection was proposed by [18]. This FCL was applied to limit the effect of the distribution generation (DG) on the coordinated relay protection scheme in a radial system during a fault. This research shown that the FCL enhanced the stability of system and limited the transient stresses on the DG. The simulation results shown that in normal operation condition the limiter has no obvious effect on loads. When fault occurred, the bypass reactor was insert the fault line automatically without delay to limit the short circuit current. By the appropriate control strategies, the solid state bridge retreated from the fault line as soon as possible.

As can be seen from the literature given in this paper, majority of solid-state applications is in development of solid-state fault current limiters. However, in this paper, detail of

SSFCL is not included. It provides only useful information for computer-based simulation using MATLAB's power system blockset.

This paper was divided into eight main sections. Section II gave a general introduction to MATLAB's power system blockset to readers. Section III reviewed circuit breaker modeling in the power system blockset. Section IV illustrated solid-state circuit breakers and their model using the power system blockset. The next section, V, gave information for generating firing signals to control thyristor-based switches. Section VI showed algorithms for voltage and current detection to be used together with firing control scheme. Section VII and VIII were simulation results and conclusion.

II. MATLAB'S POWER SYSTEM BLOCKSET [6]

Interconnections of electric circuit components and electro-mechanical devices such as motors and generators form electrical power systems. The power systems themselves are intrinsically nonlinear. Although some special cases can be treated as linear system, it is limited to a very small area of applications. Engineers working in this particular field are continually asked to enhance the overall system performance to meet its various criteria. Requirements for considerably increased efficiency have forced power system engineers to employ power electronic devices and their sophisticated control systems. Furthermore, it is the fact that the system is often so nonlinear. The only way to understand it with less cost is computer-based simulation.

Power generation from hydroelectric, steam, or other gas engines, is not the only use of the MATLAB's power system blockset. A common attribute of this TOOLBOX is the use of power electronics and their control systems to achieve some desired objectives. The power system blockset was designed to provide a potential tool that will allow engineers to rapidly and easily build models that simulate power systems in various manners. The power system blockset uses the Simulink[®] environment, allowing a model to be built using simple *click and drag* procedures. Not only can the circuit topology be drawn rapidly, but the analysis of the circuit can include its interactions with mechanical, thermal, control, and other disciplines. This is possible because all of the electrical parts of the simulation interact with Simulink's extensive modeling library. Since Simulink uses MATLAB[®] as the computational engine, other efficient MATLAB's toolboxes can also be used by the designer. The power system blockset allows users to build and simulate their own electrical circuits containing linear and/or nonlinear elements. The circuit of Fig. 1 shows a simple power system feeding a 300 km transmission line. The line is compensated by a shunt inductor at its receiving end. A circuit breaker allows energizing and de-energizing of the line. In order to simplify the system, only one of the three phases is represented. This is a so-called "per-phase analysis". The parameters shown on the figure are typical of a 735 kV power system.

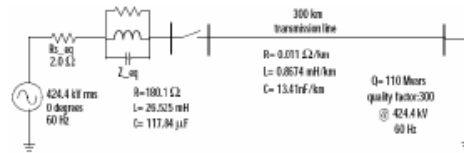


Fig. 1 simple power system to be built using MATLAB's power system blockset in Simulink environment

The graphic user interface makes use of the Simulink features to interconnect various electrical power system components. They are categorized and grouped in a special library called powerlib as shown in other separate window of Fig. 2.

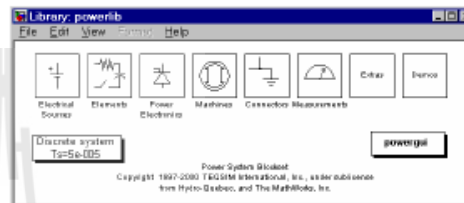


Fig. 2 powerlib of the power system blockset

In order to complete the circuit of Fig. 1, users need to add a source, a transmission line, a shunt reactor and other components. Also, with provision of other useful tools in control toolbox, measurement of some quantity can be made as simply as clicking and dragging the measurement boxes into the desired position and therefore making connection of signals. By neglecting to illustrate how to build this simple power system circuit, step-by-step, Fig. 3 shows a complete one of its power system blockset model including its measurement.

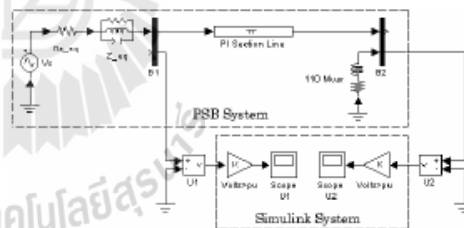


Fig. 3 simple power system model built using MATLAB's power system blockset in Simulink environment

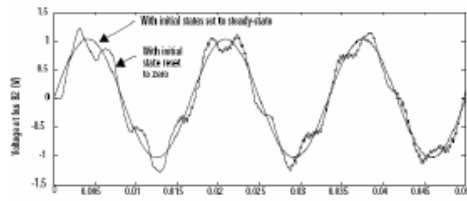


Fig. 4 example of time-domain simulation

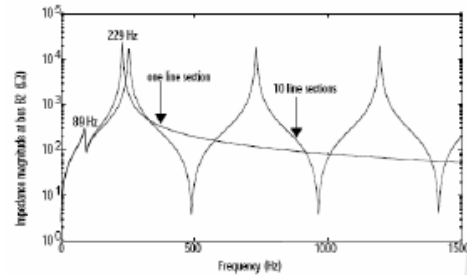


Fig. 5 example of frequency-swept analysis

To simulate the model just built, transient and steady-state analyses are available. With adequately adjusting all necessary simulation parameters, simulation results in time-domain or frequency-domain can be achieved. Fig. 4 and 5 give examples of plots for the receiving-end voltage and the frequency-dependent impedance of bus 2. No more explanation for these figures, they are placed here as an overview of using the power system blockset to simulate electrical power systems.

III. CIRCUIT BREAKERS IN MATLAB'S PSB

A circuit breaker is a switch used extensively in electrical power systems. It is an automatically-operated electrical switch designed to protect an electrical circuit from damage caused by any overload or short-circuit events. The circuit breaker must detect a fault condition. In low-voltage circuit breakers, this is usually done within the breaker enclosure. Circuit breakers for large currents or high voltages are usually equipped with pilot devices to sense a fault current and to operate the trip opening mechanism. Once a fault is detected, contacts within the circuit breaker must open to interrupt the circuit immediately or within desired time margin.

In the power system blockset, there exists the circuit breaker model as power system switches. The PSB's breaker block implements a circuit breaker that is controlled by a Simulink signal applied on its second input. The control signal must be either 0 or 1, 0 for open and 1 for closed. However, the breaker can be controlled internally by setting a switching time instead of being energized by an external control input. The arc extinction process is simulated by opening the breaker when the current passes through zero (first current zero-

crossing following the transition of the Simulink control input from 1 to 0). Fig. 6 presents the breaker block given in the power system blockset.

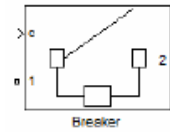


Fig. 6 PSB's breaker block

When the breaker is closed, it behaves as a series RL circuit. The R and L values can be set as small as necessary in order to be negligible compared with external components (typical values $R_{on} = 10 \text{ m}\Omega$, $L_{on} = 10 \text{ }\mu\text{H}$). When the breaker is open, it has an infinite impedance. All these parameters can be defined as shown in the dialog box of Fig. 7.



Fig. 7 dialog box of PSB's breaker block for parameter setting

It is noted as indicated in the user guide that users must use a stiff integration algorithm to simulate circuits with a circuit breaker. Ode15s usually gives the best simulation speed. To give a demonstration of using the breaker block, Fig 8 provides a test circuit for simple control. Its operating current as shown in Fig. 9 is simulated by applying the control signal of Fig. 10.

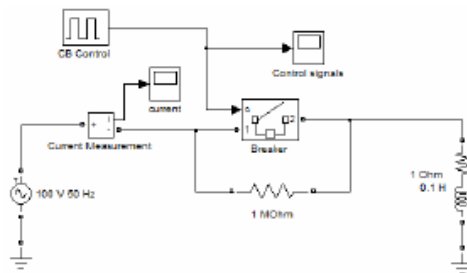


Fig. 8 test circuit for the breaker block

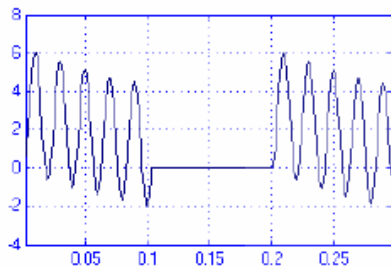


Fig. 9 operating current flowing through the circuit breaker

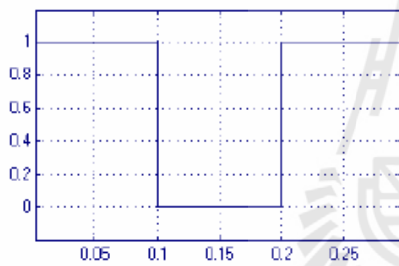


Fig. 10 control signal

IV. SOLID-STATE BREAKER AND ITS MODEL

A solid-state breaker is a circuit breaker in which a Zener diode, silicon controlled rectifier, or solid-state device is connected to sense when load terminal voltage exceeds a safe value. Until very recently, a few alternative to electromechanical and magnetic circuit breakers existed. Designers were forced to experience with such undesirable characteristics as arcing and switch bounce (with corresponding noise and wear), while accommodating large unwieldy packages in their high power systems. Solid state technology applied to this traditional device has resulted in circuit breakers free from arcing and switch bounce, that offer correspondingly higher reliability and longer lifetimes as well as faster switching times. A typical solid state circuit breaker

will switch in a matter of microseconds, as opposed to milliseconds or even seconds for a mechanical version. New solid state products currently on the market utilize the many benefits associated with power MOSFETs to deliver a product far superior to earlier silicon versions. These two types of solid-state breakers are schematically presented in Fig. 11. Power MOSFETs offer low on resistances (as compared to bipolar transistors), low voltage drops, low EMI, faster switching times and good thermal stability of key parameters.

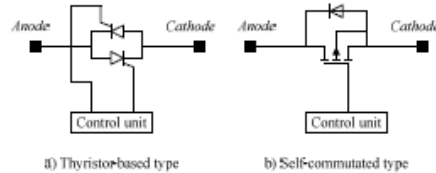


Fig. 11 structure of solid-state circuit breakers

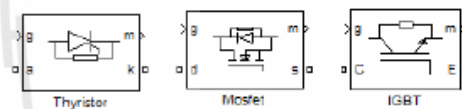


Fig. 12 model of power-electronic switches in the power system blockset

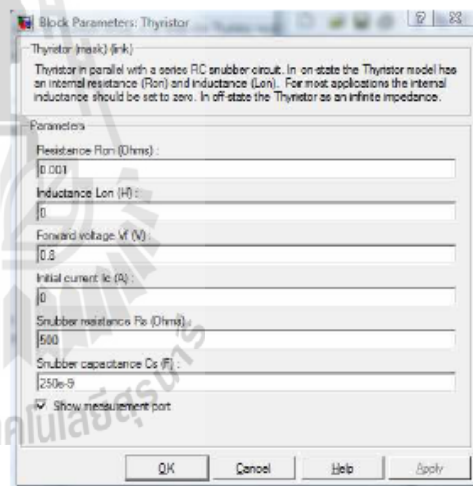


Fig. 13 dialog box of the thyristor switch

In MATLAB's power system blockset, power-electronic switches are available as in Fig. 12. Fig. 13 gives the dialog box of the thyristor switch for parameter setting. They can be used with other boxes to enable advanced control implementation for electrical power systems. Fig. 14 shows a

feeder circuit breaker of mechanical and solid-state types. Present designs of distribution feeder protection rely on expulsion fuses, which have to be reset manually. An solid-state breaker is used to protect sensitive loads by interrupting it if there exists a system fault on the supply feeder. This can be incorporated using thyristors [1].

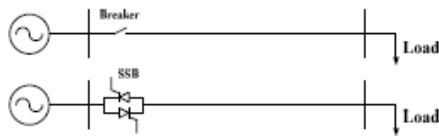


Fig. 14. feeder circuit breakers

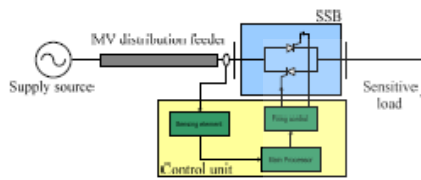


Fig. 15 control structure of the SSB

The solid-state breaker is designed using thyristors because the switch requires a continuous current carrying and a short-time overcurrent rating equal to the feeder faults level. Thyristors have a short-time rating up to 16-kA and also have low conduction losses [1]. The thyristors in the feeder are normally energized by continuous and synchronized firing control signal. On detection of voltage sags, these firing pulses are stopped to break the current. Fig. 16 explains the control structure of the SSB.

MATLAB's power system blockset (PSB) is a GUI-based tool for simulation works on power systems with power-electronic control. To create the SSB as described previously, a set of two thyristors connecting in anti-parallel fashion is required. It can be represented in a SIMULINK model using PSB as shown in Fig. 14. Line-In and Line-Out are two power ports connected to the supply side and the load side, respectively. Control fw and Control bw are two signal ports that transfer the firing signals to the upper and lower thyristors, respectively. The SSB block is controlled by signals from a firing controller. Fig. 17 shows a combination of the proposed SSB with some other PSB models to simulate a medium-voltage power feeder operating under the fault condition.

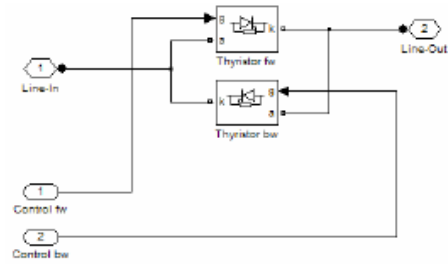


Fig. 16 SIMULINK model for an SSB (SSB_1ph)

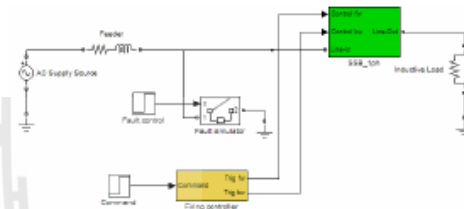


Fig. 17 SIMULINK model for an MV power feeder with an SSB

V. FIRING CONTROL

To generate firing signals to turn on the thyristors, a saw-tooth signal with a DC reference signal are compared. The result is the pulse signal used in the SSB block. The firing control block diagram created in simulink and the power system blockset is given in Fig. 18.

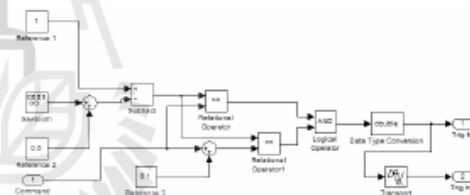


Fig. 18 SIMULINK model for a firing controller

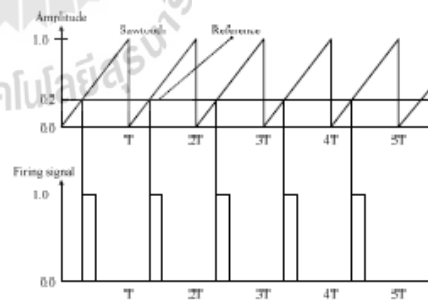


Fig. 19 firing signal generated from the firing control

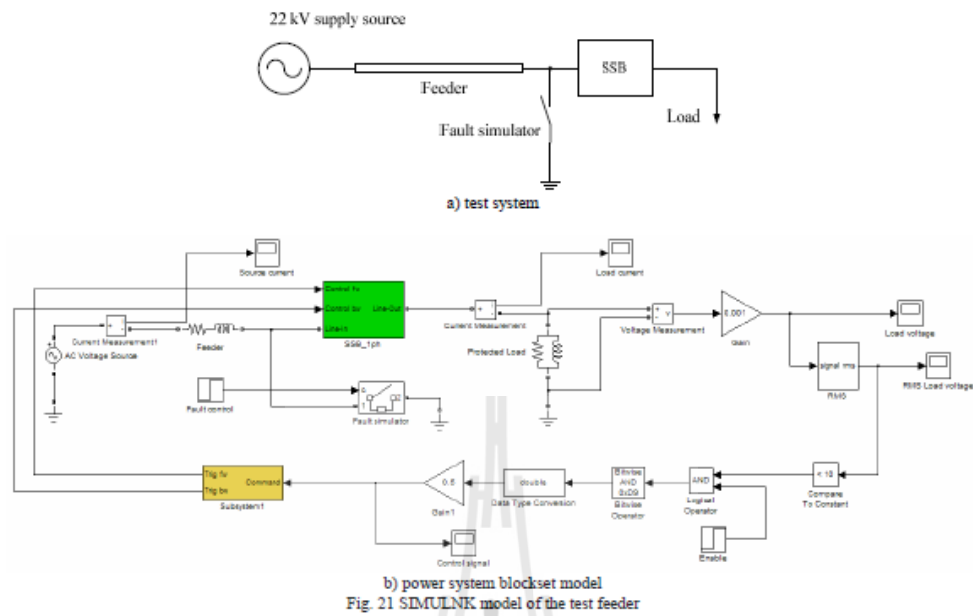


Fig. 21 SIMULNK model of the test feeder

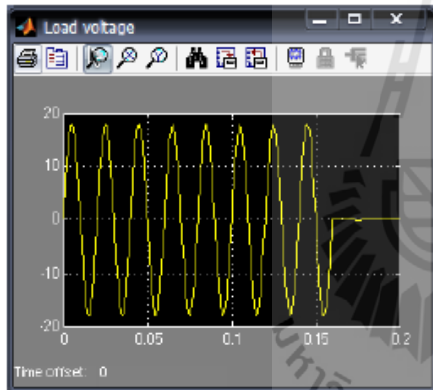


Fig. 22 load voltage (kV)

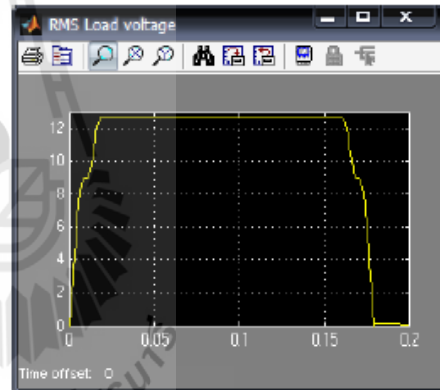


Fig. 23 rms load voltage (kV)

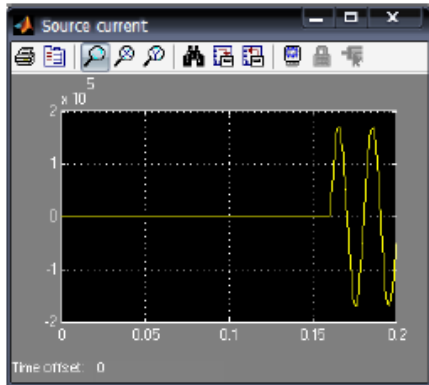


Fig. 24 source current (A)

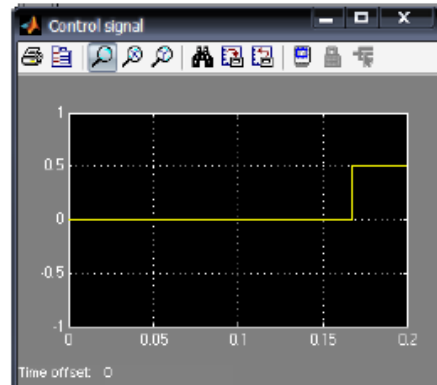


Fig. 27 command signal

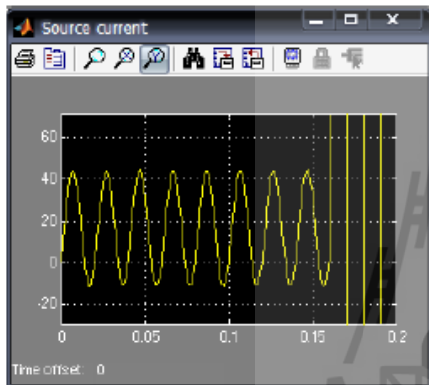


Fig. 25 source current (A), zoom in version

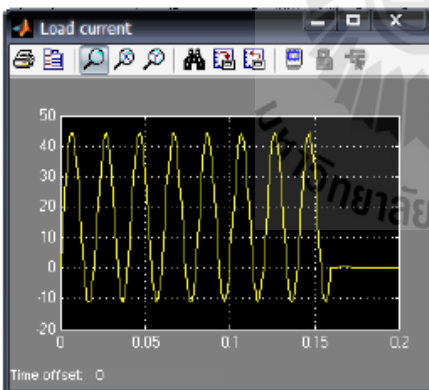


Fig. 26 load current (A)

VIII. CONCLUSION

This paper proposes detail of formulating solid-state breakers (SSB) in electric power distribution systems by using GUI-based environment of MATLAB/SIMULINK. In this paper, a 22-kV power distribution feeder with a load having the SSB for protection is situated using the power system blockset. Test against a fault condition to verify its use is carried out. As a result, with an appropriate sensing technique to monitor voltage and current of the protected feeder, the SSB can interrupt fault instantaneously.

REFERENCES

- [1] L. Palav, and A.M. Cole, On using the solid state breaker in distribution systems, in *Proc. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Volume 2, 24-28 May 1998, pp. 693 – 696.
- [2] A. Golland, F. Wakeman, I McDonald, and T. Lakin, *Integrated 30 kV solid-state switch for pulse power applications*, Pulsed Power Plasma Science (PPPS-2001), Volume 2, 17-22 June 2001, pp. 1055 – 1058.
- [3] G.F. Reed, M. Takeda, and I. Iyoda, *Improved power quality solutions using advanced solid-state switching and static compensation technologies*, in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1999*, Volume 2, 31 Jan-4 Feb 1999, pp. 1132 – 1137.
- [4] G. Chindris, O. Pop, G. Alin, and F. Hurgoi, "New PSPICE model for power MOSFET devices," presented at the 24th International Spring Seminar on Electronics Technology: Concurrent Engineering in Electronic Packaging, 5-9 May 2001, pp.158 – 162
- [5] B. Boribun, B., and T. Kulworawanichpong, "Fast transient fault-current detection based on PQR transformation technique for a solid-state fault current limiter," in *Proc. the 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, September 2007, Beijing, China, pp. 73-78.
- [6] The MATHWORKS Inc., *Power system blockset for use with SIMULINK*, User Guide Version 1.0, 1999.
- [7] K. Somsai, A. Oonsivilai, A. Srikaew, and T. Kulworawanichpong, "Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLAB's SIMULINK," in *Proc. the 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, September 2007, Beijing, China, pp. 30-35.
- [8] T. Kulworawanichpong, "Modeling and Simulation of a Solid-state Breaker for Medium-voltage Feeder Protection using MATLAB's Power System Blockset," in *Proc. 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference*, pp. 30-35

- [9] B. Korobeynikov, D. Ischenko, and A. Ischenko, "Solid-state fault current limiter for medium voltage distribution systems," in *Proc. 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference*, pp. 1468-1473.
- [10] C. Gang, J. Daozhao, L. Zhengyu, and W. Zhaolin, "A new proposal for solid state fault current limiter and its control strategies," in *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1468-1473.
- [11] C. Gang, J. Daozhao, L. Zhengyu, and W. Zhaolin, "Simulation study on a new solid state fault current limiter for high-voltage power systems," in *Proc. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004)*, pp. 156-160.
- [12] C. Meyer, P. Kollensperger, and R. W. De Doncker, "Design of a novel low loss fault current limiter for medium-voltage systems," in *Proc. Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04*, pp. 1825-1831.
- [13] C. S. Chang and P. C. Loh, "Design synthesis of resonant fault current limiter for voltage sag mitigation and current limitation," in *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 2482-2487.
- [14] C. S. Chang and P. C. Loh, "Integration of fault current limiters on power systems for voltage quality improvement," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 83-92, Mar 2001.
- [15] E. Calvete, Y. Yokomizu, H. Shimizu, T. Matsumura, and H. Fujita, "Reduction of rating required for circuit breakers by employing series-connected fault current limiters," *IEE Proc. Transm. Distrib.*, vol. 151, pp. 36-42, Apr. 2004.
- [16] E. F. King, A. Y. Chikhani, R. Hackam, and M. M. A. Salama, "A microprocessor-controlled variable impedance adaptive fault current limiter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, pp. 1830-1838, Oct 1990.
- [17] G. G. Karady, "Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, pp. 1-6, Jan. 1992.
- [18] G. Tang and M. R. Irvani, "Application of a fault current limiter to minimize distributed generation impact on coordinated relay protection," in *Proc. International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, pp. 1-6.
- [19] L. Zhengyu, J. Daozhao, and W. Zhaolin, "A new topology of fault-current limiter and its parameters optimization," in *Proc. 2003 IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03*, pp. 462-465.
- [20] M. A. Haman and A. Mohamed, "Performance evaluation of solid state fault current limiters in electric distribution system," in *Proc. Student Conference on Research and Development, 2003*, pp. 245-250.
- [21] M. M. A. Salama, H. Temraz, A. Y. Chikhani, and M. A. Bayoumi, "Fault-current limiter with thyristor-controlled impedance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1518-1528, Jul 1993.
- [22] M. M. R. Ahmed, G. A. Putrus, and L. Ram, "Power quality improvement using a solid-state fault current limiter," in *Proc. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, pp. 1059-1064.
- [23] P. G. Slade, J. L. Wu, E. J. Stacey, W. F. Stabler, R. E. Voshall, J. J. bonk, J. Porter, and L. Hong, "The utility requirements for a distribution fault current limiter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, pp. 507-515, Apr. 1992.
- [24] S. Sugimoto, J. Kida, J. H. Arita, C. Fukui, and T. Yamagiwa, "Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 842-847, Apr. 1996.
- [25] V. K. Sood and R. Amin, "EMTP RV-based study of solid-state fault current limiter for distribution systems," in *Proc. 2006 IEEE Power India Conference*, pp.

school. Again, he was promoted to be an assistant professor of electrical engineering as his current position up-to-now.

He became a member of several well-known academic societies, such as, WSEAS, IEEE, IET, IEEE, WASET, IASTED, etc. Also he has usually served these societies as their referee for reviewing submitted papers to their journals. His special fields of interest included electrical machines, power electronic control and drives, soft computing, modeling and simulation with advanced numerical techniques, and electrical power system analysis.



Thanatchai Kulworawanichpong was born in Nakhon Ratchasima, on January 20, 1975. He received his B.Eng. from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand in 1998 and his M.Eng. from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand in 2000, both in Electrical Engineering. He also got his Ph.D. from the University of Birmingham, England, 2004.

His employment experience started with teaching assistant in 1998 at School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology. In 2000, he was promoted to be a full-time lecturer of the same