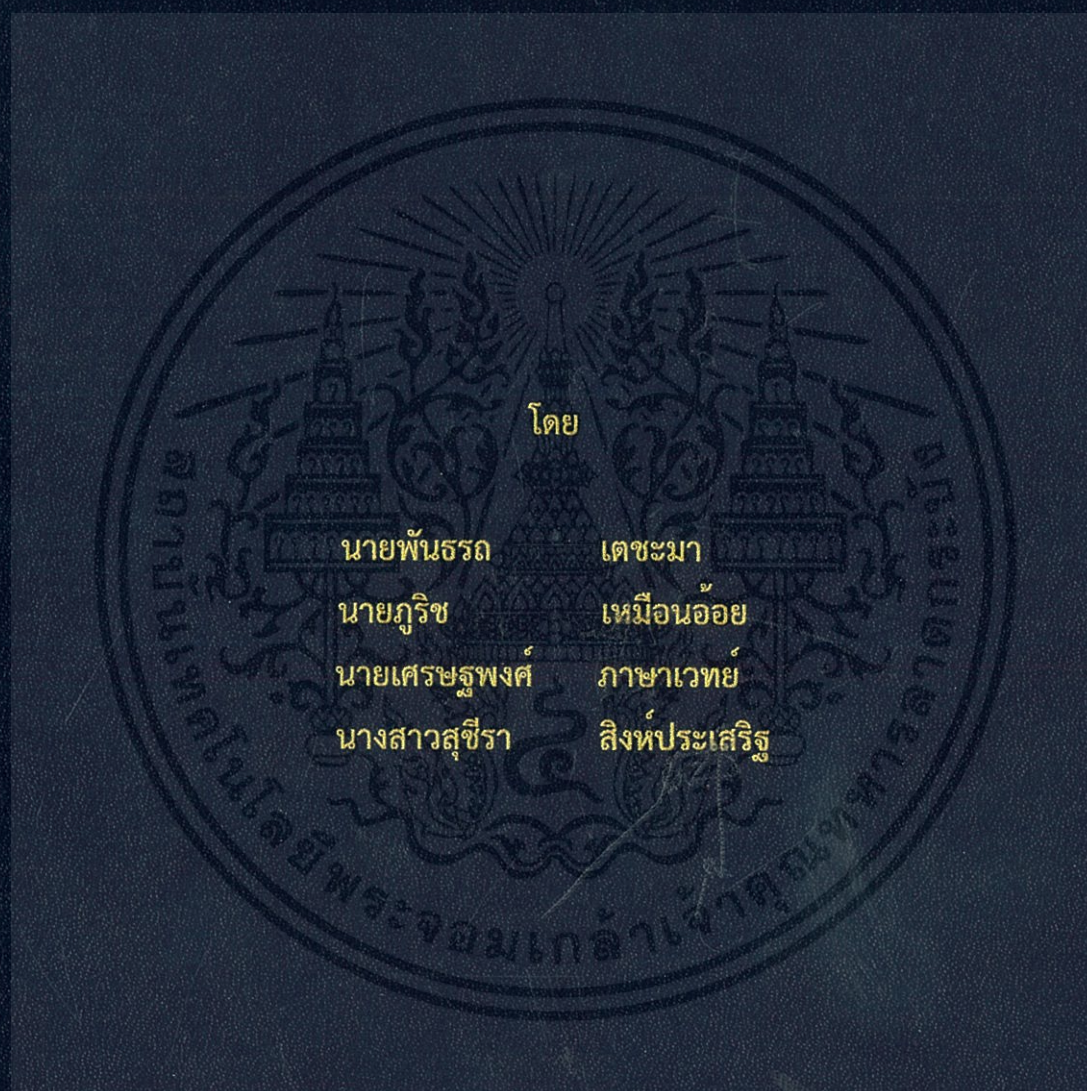


อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์
ซึ่งใช้รีแอกเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส
A MULTI-CELL BRIDGE-TYPE FAULT CURRENT LIMITER
WITH AC LIMITING REACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์
ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส
A MULTI-CELL BRIDGE-TYPE FAULT CURRENT LIMITER
WITH AC LIMITING REACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MULTI-CELL BRIDGE-TYPE FAULT CURRENT LIMITER
WITH AC LIMITING REACTOR



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์
ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส
A MULTI-CELL BRIDGE-TYPE FAULT CURRENT LIMITER
WITH AC LIMITING REACTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภาพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์จำกัดกระแสวงจรถ่วงจรรยาบริดจ์แบบหลายเซลล์ ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซี
ในการจำกัดกระแส

ผู้จัดทำ

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1. นายพันธฤ | เตชะมา |
| 2. นายภูริช | เหมือนอ้อย |
| 3. นายเศรษฐพงศ์ | ภาษาเวทย์ |
| 4. นางสาวสุชีรา | สิงห์ประเสริฐ |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Multi-Cell Bridge-Type Fault Current Limiter with AC Limiting Reactor

Mr.Pantarote Techama

Mr.Purich Maunaoy

Mr.Setthapong Pasavet

Ms.Sucheera Singprasert

Dr. Sompob Polmai Advisor

ABSTRACT

This engineering project proposes a solid-state fault current limiter. The solid-state fault current limiter composes of multiple cells of single-phase bridge controlled rectifier with DC reactor connecting in series and an AC reactor connected in parallel with cascaded rectifier cells performing current limiting. The proposed fault current limiter can be used in medium-voltage power system without power transformer so the system is more compact. With modular design of each rectifier cell, the construction and maintenance of the system could be simplified. In this report, the circuit designs, the computer simulation and the construction of the solid-state fault current limiter prototype are presented. The simulation and experimental results show that the proposed fault current limiter can properly operate.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญาโทฉบับนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ในห้องวิจัย Power application and energy conversion research (PEARL lab) ห้อง ECC407 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุน จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการ MEIDENSHA CORPORATION
ENDOWED COURSE IN KMITL

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	2
1.7 แผนการดำเนินงาน	
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร	4
2.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบสวิตซ์อนุกรม	6
2.3 อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบเรโซแนนท์	7
2.4 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์	8
2.4.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอกเตอร์เดี่ยว	8
2.4.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอกเตอร์	9
2.5 ที่มาของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร	13
2.5.1 การควบคุมแบบไหลวนอิสระ	14
2.5.2 การควบคุมแบบคืนพลังงานกลับสู่ระบบ	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสำหรับระบบแรงดันระดับปานกลาง	18
3.1 การพิจารณาอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสำหรับระบบแรงดันปานกลาง	18
3.1.1 การออกแบบรีแอกเตอร์เอซี(L_a)	18
3.1.2 การออกแบบรีแอกเตอร์ดีซี(L_d)	19
3.1.3 การออกแบบความต้านทานสร้างกระแสลัดวงจร(R_f)	19
3.1.4 การออกแบบโหลดของระบบ	20
3.2 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM	20
3.3 ผลการจำลองในระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงดันปานกลาง	22
3.3.1 การเกิดลัดวงจรแบบ Single Line to ground fault (SLGF)	22
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรหลายเซลล์ของเครื่องต้นแบบ	26
4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงาน	26
4.1.1 การออกแบบรีแอกเตอร์เอซี (L_a)	26
4.1.2 การออกแบบรีแอกเตอร์ดีซี (L_d)	26
4.1.3 การออกแบบความต้านทานสร้างกระแสลัดวงจร (R_f)	27
4.1.4 การออกแบบโหลดของระบบ	27
4.2 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM	28
4.2.1 ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเกทไทรสเตอร์ในสภาวะลัดวงจร	29
4.2.2 ชุดจำลองการลัดวงจร	29
4.3 โครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสในเครื่องต้นแบบ	30
4.3.1 วงจรบริดจ์	30
4.3.2 รีแอกเตอร์ดีซี	31
4.3.3 รีแอกเตอร์เอซี	31
4.3.4 วงจรนำขั้วเกท	32
4.3.5 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรมำขั้ว	33
4.3.6 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.7 ชุดสร้างการลัดวงจร	35
4.3.8 โหลดของระบบ	36
4.3.9 ตัวประมวลผลสัญญาณ Arduino Mega2560	37
บทที่ 5 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมและผลจากการทดลอง	38
5.1 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมและผลจากการทดลอง	38
5.1.1 กระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์	38
5.1.2 กระแสและแรงดันของรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีช่วงชาร์จ	40
5.1.3 กระแสของรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีทั้ง 4 สภาวะ	41
5.1.4 แรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งในสภาวะลัดวงจร	42
5.1.5 แรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์เอซีในสภาวะลัดวงจร	44
5.1.6 สัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์	46
5.1.7 แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ของแต่ละเซลล์	48
5.1.8 แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ของแต่ละเซลล์เมื่อต่อตัวต้านทานขนาน	51
5.1.9 แรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออกของอุปกรณ์	54
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นและระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	60
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	63
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	67
ประวัติผู้เขียน	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	4
2.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสประเภทต่างๆ	5
2.3 อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบสวิตช์อนุกรม	7
2.4 อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบวงจรรีโซแนนท์	7
2.5 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอกเตอร์เดี่ยว	8
2.6 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอกเตอร์เดี่ยว ในสภาวะลัดวงจร	9
2.7 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอกเตอร์	10
2.8 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอกเตอร์ ต่อผ่านหม้อแปลงระบบหนึ่งเฟส	11
2.9 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอกเตอร์ ต่อผ่านหม้อแปลงระบบสามเฟส	11
2.10 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ในสภาวะทำงานปกติ เมื่อ $i_{ac} > 0$	14
2.11 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ในสภาวะทำงานปกติ เมื่อ $i_{ac} < 0$	14
2.12 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ เมื่อควบคุมแบบโหวนอิสระ	15
2.13 สัญญาณเกทที่ควบคุมไทรสเตอร์ T1-T4 แบบโหวนอิสระ ในสภาวะลัดวงจร	16
2.14 สัญญาณเกทที่ควบคุมไทรสเตอร์ T1-T4 แบบคืนพลังงานกลับสู่ระบบ ในสภาวะลัดวงจร	16
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก	18
3.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์ สองรีแอกเตอร์	21
3.3 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์หลายเซลล์แบบหนึ่งเฟส	22
3.4 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์หลายเซลล์ระบบสามเฟส	22
3.5 รูปคลื่นกระแสไลน์ที่ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสและไม่ได้ติดตั้ง เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF	23
3.6 รูปคลื่นกระแสไลน์ที่ไหลในรีแอกเตอร์ดีซี และรีแอกเตอร์เอซี เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF	23
3.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรีแอกเตอร์เอซี เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF	24
3.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรีแอกเตอร์ดีซีต่อหนึ่งเซลล์ เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF	24
3.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่าย	25

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดแบบบริดจ์หลายเซลล์ด้วยโปรแกรม PSIM	29
4.2 ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเกทไทรสเตอร์ลัดวงจร	30
4.3 โครงสร้างการจำลองการลัดวงจร	31
4.4 วงจรบริดจ์ไทรสเตอร์ที่สร้างขึ้นในเครื่องต้นแบบ	31
4.5 วงจรนำขั้วเกท	32
4.6 ชุดวงจรนำขั้วเกทในเครื่องต้นแบบ	32
4.7 วงจรเรียงกระแส	33
4.8 ชุดวงจรเรียงกระแสในเครื่องต้นแบบ	33
4.9 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์	34
4.10 ชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ในเครื่องต้นแบบ	34
4.11 ชุดสร้างการลัดวงจร	35
4.12 ความต้านทานลัดวงจร (R_f)	35
4.13 โหลดความต้านทาน	36
4.14 โหลดตัวเหนี่ยวนำ	36
4.15 ตัวประมวลผลสัญญาณ Arduino Mega2560	37
5.1 วงจรของเครื่องต้นแบบสำหรับการทดลอง	38
5.2 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจาก PSIM	38
5.3 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจาก PSIM	39
5.4 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจากเครื่องต้นแบบ	39
5.5 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจากเครื่องต้นแบบ	39
5.6 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีช่วงชาร์จจาก PSIM	40
5.7 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซีช่วงชาร์จจากการทดลอง	40
5.8 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์เอซีช่วงชาร์จจากการทดลอง	41
5.9 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซี และรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM ทั้ง 4 สภาวะ	41
5.10 รูปคลื่นกระแสรีแอคเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งจาก PSIM	42
5.11 รูปคลื่นกระแสรีแอคเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งจากการทดลอง	43
5.12 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซีของแต่ละเซลล์จาก PSIM	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซีของแต่ละเซลล์จากการทดลอง	44
5.14 รูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM	44
5.15 รูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์เอซีจากการทดลอง	45
5.16 รูปคลื่นแรงดันของรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM	45
5.17 รูปคลื่นแรงดันของรีแอคเตอร์เอซีจากการทดลอง	46
5.18 รูปคลื่นสัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์และแรงดันแหล่งจ่ายจาก PSIM	46
5.19 รูปคลื่นสัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์จากการทดลอง	47
5.20 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM	48
5.21 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM	48
5.22 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM	49
5.23 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T4 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM	49
5.24 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลอง	50
5.25 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลอง	50
5.26 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลอง	50
5.27 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T4 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลอง	51
5.28 โครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรเมื่อต่อตัวต้านทานขนาดในแต่ละเซลล์	51
5.29 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน	52
5.30 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน	52
5.31 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน	53
5.32 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน	53
5.33 รูปคลื่นแรงดัน(บน)และกระแส(ล่าง)ทางด้านขาออกของอุปกรณ์	54
5.34 รูปคลื่นแรงดัน(บน)และกระแส(ล่าง)ทางด้านขาออกของอุปกรณ์	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานในระบบแรงดันปานกลาง	21
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานในเครื่องต้นแบบ	28



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล และขยะ (Biomass and waste power plant) เป็นต้น โครงข่ายไฟฟ้าจึงต้องขยายตัวตาม เพื่อรองรับการเชื่อมต่อของระบบส่งและจ่ายไฟฟ้า เมื่อโครงข่ายไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรในระบบมีค่าสูงขึ้น ระดับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ที่ถูกออกแบบและถูกติดตั้งไว้จะทำให้ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆที่เชื่อมต่ออยู่เกิดความเสียหาย การเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรใหม่นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง และมีความยุ่งยากในการปรับตั้งอุปกรณ์ของระบบป้องกันให้ทำงานร่วมกันใหม่ เทคโนโลยีของอุปกรณ์จำกัดกระแสจึงสามารถช่วยในการแก้ปัญหาเหล่านั้นได้

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบใช้โซลิดสเตทสวิตช์ ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง อุปกรณ์ยังสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงสามารถต่ออุปกรณ์ให้รับพิกัดกระแสหรือแรงดันที่สูงขึ้นได้ การควบคุมความร้อนที่ทำได้ง่าย ช่วยลดค่าใช้จ่ายในระบบควบคุมความร้อน อีกทั้งยังมีความน่าเชื่อถือสูง [1]

ต่อมามีการพัฒนาใช้โซลิดสเตทสวิตช์ต่อแบบบริดจ์ (Bridge-type FCL) ในสภาวะปกติ ไทริสเตอร์จะทำงานเป็นวงจรบริดจ์เรียงกระแสเต็มคลื่น เมื่อเกิดกระแสลัดวงจร ไทริสเตอร์จะถูกควบคุมม้วนนำกระแสให้เพิ่มขึ้นเพื่อบังคับกระแสลัดวงจรให้ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี ต่อมามีการออกแบบต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ในระดับแรงดันที่สูงขึ้น [2] แต่มีข้อเสียคือกระแสในสายส่งในสภาวะปกติจะต้องไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ซึ่งใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากและมีราคาแพง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและนำเสนอรูปแบบของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรโซลิดสเตทสวิตช์ต่อแบบบริดจ์ ซึ่งโดยทั่วไปการนำโซลิดสเตทสวิตช์มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์จำกัดกระแส โซลิดสเตทสวิตช์ไม่สามารถทนระดับแรงดันปานกลางและแรงดันสูงได้ จึงจำเป็นต้องมีการต่อในลักษณะอนุกรมเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้มากขึ้น

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรโซลิตสเททสวิทช์ โดยประยุกต์ใช้การต่อวงจรบริดจ์แบบอนุกรมมาใช้ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับรองการใช้งานในระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยไม่ต้องมีการต่ออุปกรณ์ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดระดับแรงดัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มศึกษาตั้งแต่ทฤษฎีการออกแบบรีแอคเตอร์ดีซี และรีแอคเตอร์เอซีที่ใช้ในการจำกัดกระแสลัดวงจร การทำงาน และการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์

1.4.2 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ โดยใช้โปรแกรม PSIM

1.4.3 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ สำหรับทดลองที่พิกัดแรงดัน 220V

1.4.4 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานและการออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ ซึ่งใช้รีแอคเตอร์ในการจำกัดกระแส

1.5.2 เข้าใจหลักการควบคุมการทำงานของสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ ซึ่งใช้รีแอคเตอร์ในการจำกัดกระแส

1.6 โครงสร้างปริญญาานิพนธ์

โครงสร้างปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 6 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบใช้โซลิตสเททแบบต่างๆ โครงสร้างหลักการทำงาน และข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์แต่ละชนิด

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร เพื่อทำการจำลองการทำงานและการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรมและจากการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1.7 แผนการดำเนินการ

ระยะเวลาในการดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2559

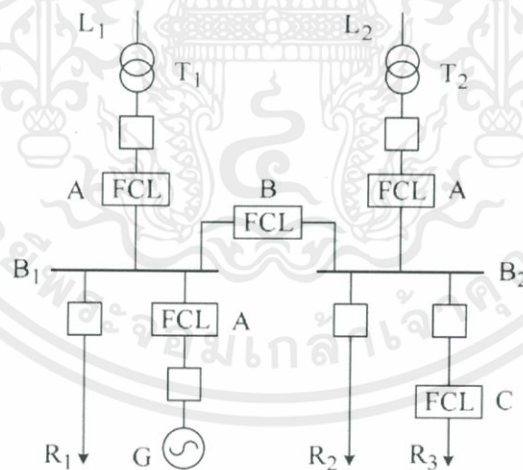
การดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย										
2.คำนวณ และออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร										
3.จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลอง										
4.สร้างแบบจำลองอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร										
5.จำลองผลการทดลองผ่านโปรแกรมและจากการทดลอง										
6.แก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้น										
7.สรุปผลการทำโครงการ										
8.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

อุปกรณ์จำกัดกระแส คืออุปกรณ์ที่สร้างมาเพื่อแก้ปัญหาระดับของกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้นจากการขยายตัวของระบบ โดยสภาวะปกติตัวอุปกรณ์จะไม่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ตัวอุปกรณ์จะแทรกความต้านทานเข้าระบบเพื่อลดและจำกัดระดับของกระแสลัดวงจรให้มีระดับตามที่ต้องการ ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับระบบไฟฟ้าจากกระแสลัดวงจรที่มีปริมาณมาก ประโยชน์ของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรได้แก่ [1]

1. ช่วยเพิ่มความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า
2. ช่วยลดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในพื้นที่ต่างๆ
3. ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้งานได้ครั้งเดียว เช่น ฟิวส์
4. ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือ เมื่อเชื่อมต่อกับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
5. ช่วยบรรเทาสภาวะแรงดันตกในบัส เมื่อเกิดการลัดวงจร



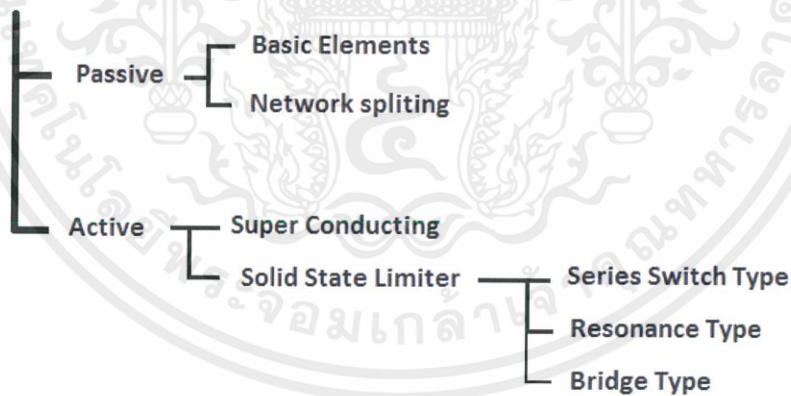
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1]

จากรูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในตำแหน่ง A จะช่วยลดกระแสลัดวงจรที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลง บรรเทาสภาวะแรงดันตกในบัสแรงดันสูง หม้อแปลงสามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนบัสแรงดันปานกลางได้ ใน

ตำแหน่ง B เมื่อเกิดลัดวงจรในบัสใดบัสหนึ่ง จะช่วยคงแรงดันในบัสที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจร ในตำแหน่ง C ช่วยป้องกันความเสียหายจากกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นกับอุปกรณ์ที่รับภาระมาก อีกทั้งระบบหรืออุปกรณ์ที่ยากต่อการเปลี่ยนแปลง เช่น สายไฟใต้ดิน หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ห้องใต้ดิน เป็นต้น อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [1]

1. มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำหรือเท่ากับศูนย์ระหว่างการทำงานในสภาวะปกติ (มีแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ใกล้เคียงศูนย์)
2. มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะจำกัดกระแสลัดวงจร
3. สามารถจำกัดระดับของกระแสลัดวงจรให้สอดคล้องกับค่าที่อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าสามารถทนได้
4. เปลี่ยนสภาวะการทำงานจากสภาวะปกติสู่สภาวะมีกระแสลัดวงจรได้อย่างรวดเร็ว (สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรได้ตั้งแต่ไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจร)
5. มีการฟื้นตัวที่รวดเร็ว ขณะกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งเมื่อกระแสลัดวงจรสิ้นสุดลง
6. ไม่มีผลกระทบกับอุปกรณ์อื่นในระบบไฟฟ้า เช่น ระบบรีเลย์ป้องกัน
7. มีความน่าเชื่อถือสูง เมื่ออุปกรณ์ทำงานผิดพลาดในการทำงาน ต้องไม่ส่งผลร้ายต่อระบบไฟฟ้า

Fault Current Limiter (FCL)



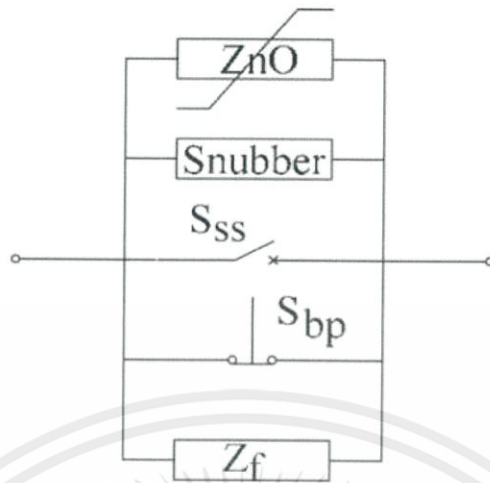
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 2.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรมาแบ่งได้ตามลักษณะของอิมพีแดนซ์ในตัวอุปกรณ์ คือแบบ Passive และแบบ Active ซึ่งแบบ Passive นั้นคือการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบไปอย่างถาวรทั้งในสภาวะปกติและสภาวะลัดวงจร จึงควรมีการคิดอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้ เช่น

วิธี Basic Element คือการอนุกรม Current Limiting Reactor ไปกับระบบที่จุดที่ต้องการ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่ารีแอคแตนซ์ให้กับระบบ, วิธี Networks splitting คือการลดการเชื่อมต่อแบบขนาน เช่นการแยกบัสเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่หากบัสนั้นไม่สามารถแยกได้ จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงสำหรับบัสชุดใหม่ ส่วนแบบ Active คืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์สามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร เช่น Super conducting จะใช้คุณสมบัติของตัวนำยิ่งยวดที่มีค่าความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อมีอุณหภูมิอยู่ที่จุดวิกฤติ แต่หากค่ากระแสหรือสนามแม่เหล็กเกินค่าวิกฤติ ตัวนำยิ่งยวดจะเปลี่ยนสถานะเป็นค่าที่มีความต้านทานเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจร ปัจจุบันมีงานการใช้งานอยู่ที่ 145kV อุปกรณ์จำกัดกระแสอีกประเภทที่น่าสนใจและเหมาะสมกับแรงดันปานกลาง คืออุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดสวิตช์โซลิดสเตท (Solid-state, SSFCL) ซึ่งปัจจุบันอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวดและชนิดใช้สวิตช์โซลิดสเตทกำลังเป็นที่สนใจและนิยมในการนำมาใช้งานจริง และการออกแบบพัฒนา แต่ด้วยเทคโนโลยีของตัวนำยิ่งยวด (Super conductor) ยังเป็นวัสดุที่ออกแบบและควบคุมการทำงานได้ยาก อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้เห็นการนำมาใช้งานในระบบแรงดันที่สูงเป็นส่วนมาก ส่วนอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดใช้สวิตช์โซลิดสเตทนั้น ด้วยความสามารถในการทนแรงดันของสวิตช์โซลิดสเตท เช่น SCR, GTO, GCT และ IGBT ในปัจจุบันยังไม่สูงพอที่จะรับแรงดันของระบบไฟฟ้าแรงสูงได้ ทำให้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดใช้โซลิดสเตท จะถูกประยุกต์ใช้ในระดับไฟฟ้าแรงดันต่ำถึงปานกลางเป็นส่วนมาก เนื่องจากออกแบบและควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือสูง ควบคุมความร้อนได้ง่าย และสามารถต่อเป็นชุดให้มีพิกัดที่สูงขึ้น

2.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบสวิตช์อนุกรม (Series Switch-Type FCL)

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรประเภทนี้ประกอบด้วย สวิตช์ที่ต่อแบบอนุกรมไปกับระบบไฟฟ้าที่สามารถแทนด้วยอุปกรณ์สวิตช์ต่างๆ ในสภาวะปกติกระแสไหลจะไม่ผ่านสวิตช์ เมื่อเกิดลัดวงจร สวิตช์จะเปิดวงจรทำให้กระแสลัดวงจรไหลผ่านมีรีซิสเตอร์ โดยมีวาร์ริสเตอร์ต่อขนานกับอุปกรณ์เพื่อป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นที่ตัวสวิตช์ ส่วนวงจรสแน็บเบอร์จะช่วยลด dv/dt ขณะที่สวิตช์ทำงานแสดงดังรูปที่ 2.3

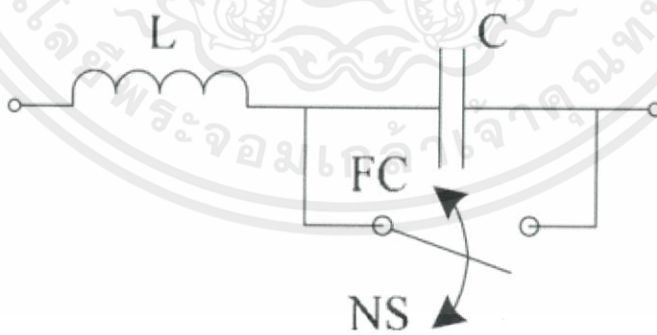


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบสวิตช์อนุกรม

เนื่องจากการจำกัดการลัดวงจรโดยให้ผ่านรีซิสเตอร์นั้น มีปัญหาจากความร้อนที่เกิดขึ้น จึงนิยมแทนด้วยรีแอคเตอร์ [1]

2.3 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบวงจรรีโซแนนซ์ (Resonance-Type FCL)

เป็นการใช้หลักวงจรรีโซแนนซ์ ในภาวะปกติจะออกแบบให้อิมพีแดนซ์ $X_L = X_C$ แสดงดังรูปที่ 2.4 อิมพีแดนซ์รวมจึงเป็น 0 เพื่อให้กระแสไหลดไหลผ่าน เมื่อเกิดการลัดวงจรคาปาซิเตอร์จะถูกปลดออกจากวงจรด้วยสวิตช์โซลิดสเตท ทำให้กระแสลัดวงจรถูกจำกัดด้วยรีแอคเตอร์เท่านั้น



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบวงจรรีโซแนนซ์

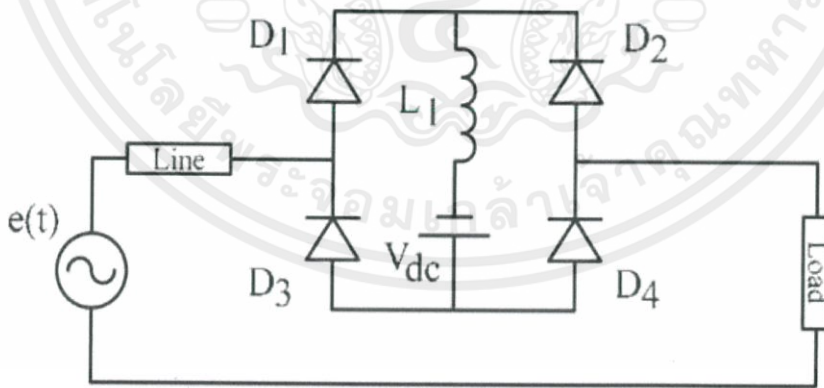
ข้อดีของอุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดนี้ คือมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง ลดภาระการจัดการกับความร้อนของอุปกรณ์ อย่างไรก็ตามการทำงาน โดยใช้หลักการรีโชนั้นยังทำให้เกิดแรงดันที่มีค่ายอดสูงบนอุปกรณ์จำกัดกระแส มากกว่านั้นคาปาซิเตอร์แบบคที่นำมาใช้นั้นมีขนาดใหญ่ ราคาสูง และต้องการปรับค่าได้อย่างแม่นยำ อุปกรณ์สวิตช์นั้นจะรับกระแสลัดวงจรตลอดเวลาทำให้ต้องใช้ อุปกรณ์สวิตช์ที่มีพิกัดกระแสสูง ปัจจุบันมีการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์จำกัดกระแสวงจรรีโชนั้นขนาด 23kV/400A กับระบบจำหน่าย ซึ่งสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรได้ แต่เกิดเฟโอรีโชนั้นขึ้นที่รีแอกเตอร์ และเกิดความผิดปกติของลูกคลื่นในสภาวะปกติ [2], [3]

2.4 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ (Bridge-Type FCL)

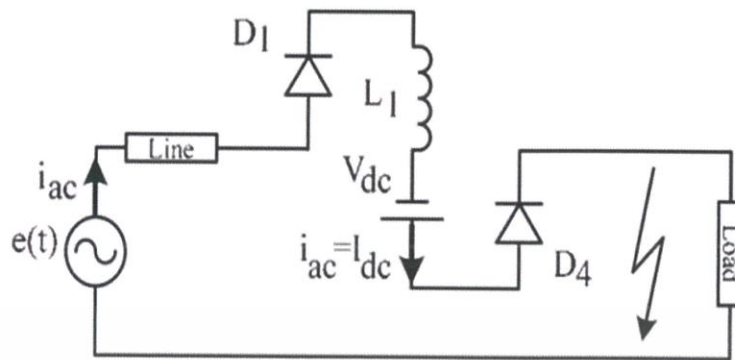
อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ มีลักษณะการทำงานคล้ายๆกันกับสวิตช์อนุกรม ซึ่งพื้นฐานจะประกอบด้วยสวิตช์สารกึ่งตัวนำ ต่อดวงจรรีดิคและมีรีแอกเตอร์ต่ออนุกรมกับระบบเพื่อจำกัดกระแส โครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสแบบบริดจ์นั้นถูกนำเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ 1980 [4] และมีการพัฒนางจรเป็นรูปแบบต่างๆ

2.4.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอกเตอร์เดี่ยว (Single-Reactor Rectifier Bridge FCL) [5]

เปลี่ยนวงจรพื้นฐานเริ่มต้นของการนำวงจรรีดิค มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร ประกอบด้วย วงจรรีดิคไดโอด รีแอกเตอร์ และแหล่งจ่ายดีซีไบโอส แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอกเตอร์เดี่ยว

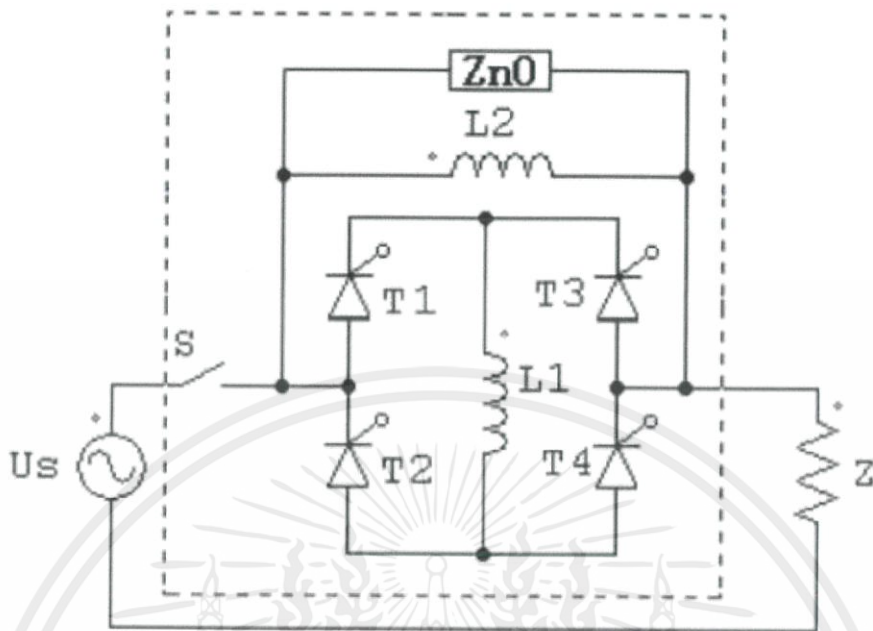


รูปที่ 2.6 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ รีแอคเตอร์เดี่ยว ในสภาวะลัดวงจร

ก่อนเริ่มสตาร์ทอุปกรณ์ แหล่งจ่ายดีซีจะชาร์จรีแอคเตอร์ L_1 ให้กระแสสูงกว่าค่ายอดของกระแสโหลดก่อนเมื่ออุปกรณ์ต่อเข้าระบบไดโอดจะนำกระแสเต็มคลื่น เมื่อเกิดลัดวงจรกระแสจะสูงกว่ากระแสแหล่งจ่ายดีซีรีแอคเตอร์ดีซีจะถูกสวิตช์เข้าระบบอัตโนมัติ และจำกัดทันทีภายในครึ่งไซเคิลแรก ครึ่งไซเคิลต่อมา กระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดด้วยรีแอคเตอร์ L_1 ดังรูปที่ 2.6 ข้อดีคือไม่จำเป็นต้องมีวงจรควบคุมสวิตช์ และวงจรตรวจจับกระแสลัดวงจร ข้อเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ รีแอคเตอร์จะมีความร้อนสูงขณะเกิดลัดวงจร เนื่องจากต้องรับกระแสลัดวงจรตลอดเวลา เมื่อระบบบริหารจัดการลัดวงจรออกแล้ว อุปกรณ์เข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้ง แต่พลังงานจากกระแสลัดวงจรในรีแอคเตอร์ดีซีนั้นยังคงมีอยู่ ทำให้รีแอคเตอร์นั้นไม่พร้อมที่รับการลัดวงจรซ้ำต่อเนื่อง หรืออาจเกิดความเสียหายที่รีแอคเตอร์ดีซีได้

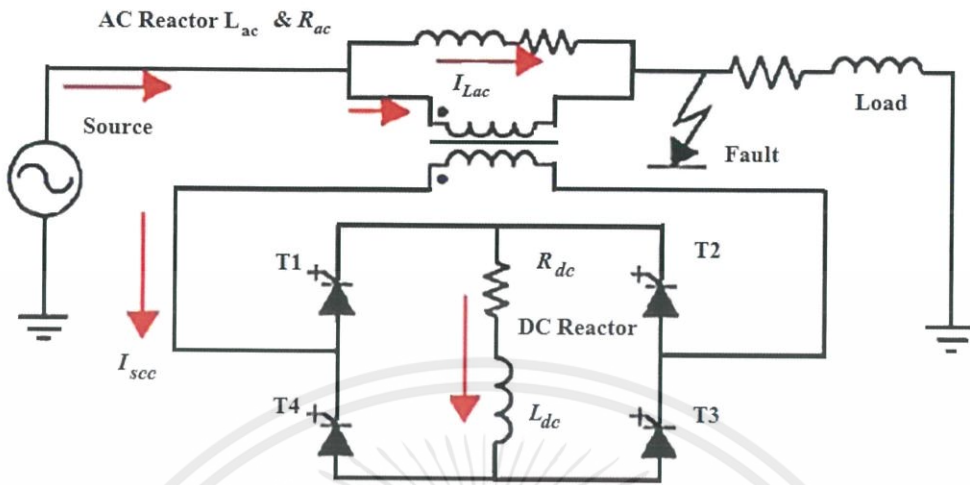
2.4.2 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอคเตอร์ (Two-Reactor SCR Bridge FCL)

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดนี้ ในหนึ่งเฟส จะประกอบด้วยไทริสเตอร์บริดจ์ (T1-T4) รีแอคเตอร์ดีซี (L_1) และรีแอคเตอร์เอซี (L_2) โดยมีวาริสเตอร์ (Z_nO) ต่อขนานกับอุปกรณ์ ดังรูปที่ 2.7 [6]

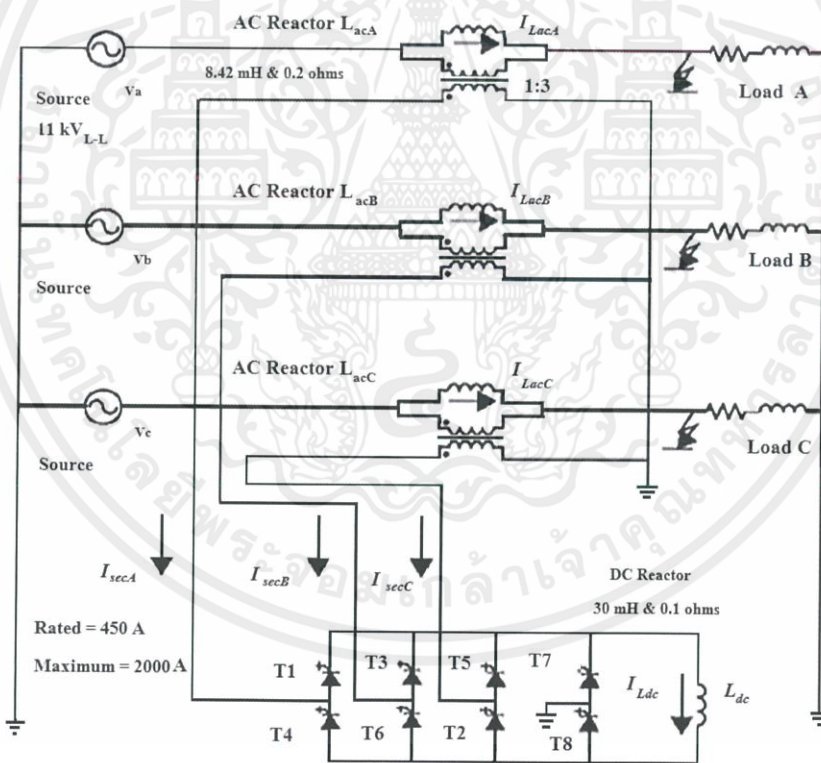


รูปที่ 2.7 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ สองรีแอคเตอร์

ก่อนเริ่มสตาร์ทอุปกรณ์รีแอคเตอร์ดีซีจะถูกชาร์จ ให้กระแสสูงกว่าค่ายอดของกระแสโหลดก่อน ซึ่งอาจใช้วงจรแหล่งจ่ายดีซีต่อขนานกับรีแอคเตอร์เอซี ในสภาวะปกติไทรริสเตอร์จะนำกระแสเต็มคลื่นเสมือนลัดวงจรเพื่อให้กระแสไหลลดไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซีจะมีกระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี เมื่อตรวจพบกระแสลัดวงจร วงจรควบคุมจะทำให้ไทรริสเตอร์ T1,T2 ไม่นำกระแส ทำให้กระแสลัดวงจรถูกบังคับให้ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี กระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดด้วยรีแอคเตอร์เอซีเท่านั้น ส่วนไทรริสเตอร์ T3,T4 นั้นยังคงนำกระแสต่อไปในลักษณะไหลวน เพื่อลดกระแสลัดวงจรที่รีแอคเตอร์ดีซีได้รับมาในช่วงลูกคลื่นแรกของกระแสลัดวงจร เมื่อกระแสลัดวงจรถูกขจัดออกไปจากระบบ ไทรริสเตอร์ T1-T4 จะกลับมานำกระแสเต็มคลื่นอีกครั้ง ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ รีแอคเตอร์ดีซีนั้น ได้รับกระแสลัดวงจรแค่ครึ่งไซเคิลแรกเท่านั้น ทำให้เกิดความเครียดของกระแสน้อย เนื่องจากกระแสลัดวงจรจะไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซีเป็นส่วนใหญ่ ทำให้อุปกรณ์ประเภทนี้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรในนานกว่ารีแอคเตอร์เอซีมีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็น แต่ข้อเสียคือความสามารถในการทนแรงดันของอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งมีพิกัดที่จำกัดหากต้องการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรประเภทนี้ ในระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง จึงมีการออกแบบและพัฒนาใหม่ ในลักษณะการต่อผ่านหม้อแปลงเพื่อลดระดับแรงดันให้สามารถใช้อุปกรณ์สวิตช์ ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ณ ปัจจุบันได้ แสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 [7], [8]



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ ส่องรีแอคเตอร์ ต่อผ่านหม้อแปลงระบบหนึ่งเฟส [9]



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ ส่องรีแอคเตอร์ ต่อผ่านหม้อแปลงระบบสามเฟส [9]

ขนาดของรีแอคเตอร์ L_a สำหรับใช้ในการจำกัดกระแสลัดวงจร สามารถคำนวณได้จากระดับกระแสลัดวงจรที่ยอมให้ผ่านได้กับค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์เอชี่ ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 X_L &= \frac{U_n}{I_{sc}} \\
 \omega L_a &= \frac{U_n}{I_{sc}} \\
 L_a &= \frac{U_n}{\omega I_{sc}}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

เมื่อ U_n คือแรงดันเฟสของระบบ ω คือความถี่เชิงมุม ส่วน I_{sc} คือกระแสลัดวงจรที่ยอมให้ผ่านได้

เมื่อพิจารณาถึงกระแสที่เพิ่มขึ้นในรีแอคเตอร์ดีซีในสภาวะลัดวงจร กรณีที่เลวร้ายที่สุดในเวลาครึ่งไซเคิลจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_m ซึ่งเป็นค่าของกระแสที่เพิ่มขึ้นในรีแอคเตอร์ดีซีเมื่อลัดวงจรและค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์ดีซี L_d ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า I_m ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \Delta i_m &= \frac{1}{L} \int_0^{T/2} U_{lm} \sin \omega t dt \\
 &= \frac{U_{lm}}{\omega L} (-\cos \omega t) \Big|_0^{T/2} \\
 &= \frac{U_{lm}}{\omega L} (-\cos \pi - \cos 0) \\
 &= \frac{U_{lm}}{\omega L} (-(-1) - 1) \\
 \Delta i_m &= \frac{2U_{lm}}{\omega L}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

เมื่อ U_{lm} คือค่าสูงสุดของแรงดันที่ตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซีสูงสุดที่สามารถเป็นไปได้ และ I_m คือกระแสที่ไหลเข้ารีแอคเตอร์ดีซีในสภาวะคงตัว เพื่อให้ได้ขนาดของ L_d ที่น้อยที่สุด ค่าของรีแอคเตอร์ดีซีควรออกแบบให้มีพลังงานสะสมในตัวน้อยที่สุด พลังงานสะสมในรีแอคเตอร์ดีซี ขณะเกิดสภาวะลัดวงจรแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{1}{2} L_d [I_m + \Delta i_m]^2 \tag{2.3}$$

หากนำสมการที่ 2.2 แทนในสมการ 2.3 ทำการหาอนุพันธ์ เพื่อหาค่าวิกฤติที่มีค่าต่ำสุด เพื่อให้ได้ L_d ที่ออกแบบให้มีพลังงานสะสมในตัวน้อยที่สุด และมีขนาดเล็กที่สุดด้วยดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{1}{2}L_d \left[I_m + \frac{2U_{lm}}{\omega L_d} \right]^2$$

$$E = \frac{1}{2}L_d \left[I_m^2 + \frac{4I_m U_{lm}}{\omega L_d} + \frac{4U_{lm}^2}{\omega^2 L_d^2} \right]$$

$$E = \frac{1}{2}L_d I_m^2 + \frac{2I_m U_{lm}}{\omega} + \frac{4U_{lm}^2}{\omega^2 L_d}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}I_m^2 + \frac{2U_{lm}^2}{\omega^2} \frac{d\left(\frac{1}{L_d}\right)}{dL_d}$$

$$0 = \frac{1}{2}I_m^2 - \frac{2U_{lm}^2}{\omega^2 L_d^2}$$

$$L_d^2 = \frac{4U_{lm}^2}{\omega^2 I_m^2}$$

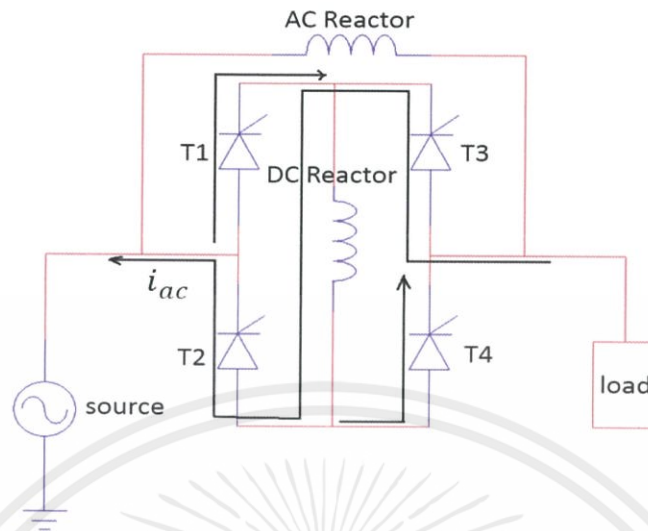
$$L_d = \frac{2U_{lm}}{\omega I_m}$$

(2.4)

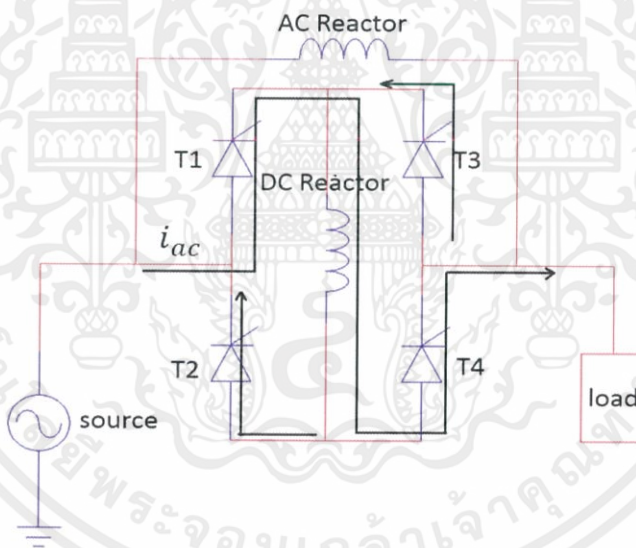
จากสมการที่ 2. 2 และ 2.4 ซึ่งจัดรูปใหม่ จะเห็นว่ากรอกแบบรีแอกเตอร์ดีซีนั้นควร ออกแบบให้ $I_m = i_m$ นั่นคือกระแสที่ไหลเข้ารีแอกเตอร์ดีซีภายในเวลาครึ่งไซเคิล หลังจากเกิดการ ลัดวงจรได้เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถสรุปการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของ รีแอกเตอร์ดีซีของวงจรบริดจ์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระดับของกระแสลัดวงจรที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

2.5 แนวทางการควบคุม

เมื่ออุปกรณ์เริ่มทำงานเริ่มต้น อุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรบริดจ์แทนด้วยไทรสเตอร์ซีเอสอาร์ ทั้งสี่ตัว T1-T4 จะทำงานในโหมดเรียงกระแสเต็มคลื่นที่มุม 0° ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 กระแสจะไหลเข้าบริดจ์และซาร์จรีแอกเตอร์เอชซึ่งกระแสในรีแอกเตอร์ดีซีอิมตัว อุปกรณ์จะเข้าสู่สภาวะ ปกติ โดยกรณี $i_{ac} > 0$ กระแส $i_{T1}, i_{T4} = i_{ac}$ ส่วน $i_{T2}, i_{T3} = i_{dc} - |i_{ac}|$ กรณี $i_{ac} < 0$ กระแส $i_{T2}, i_{T3} = i_{ac}$ ส่วน $i_{T1}, i_{T4} = i_{dc} - |i_{ac}|$ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น และวงจรตรวจพบกระแสเกินจากการลัดวงจร ตัวควบคุม ของวงจรบริดจ์จะปลดและแยกรีแอกเตอร์ดีซีออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อปล่อยให้รีแอกเตอร์เอชทำหน้าที่ จำกัดกระแสลัดวงจรเท่านั้น โดยแนวทางการควบคุมสามารถทำได้ 2 วิธี คือการให้กระแสของรีแอกเตอร์ ดีซีไหลวนอิสระและการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ โดยวิธีการคืนพลังงานกลับสู่ระบบนั้น สามารถทำให้ กระแสในรีแอกเตอร์ดีซีลดลง ได้รวดเร็วกว่า ทำให้มีระยะเวลาการฟื้นตัวที่สั้นกว่าเมื่ออุปกรณ์นั้นกลับเข้า สู่สภาวะปกติอีกครั้ง



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ในสถานะทำงานปกติ เมื่อ $i_{ac} > 0$

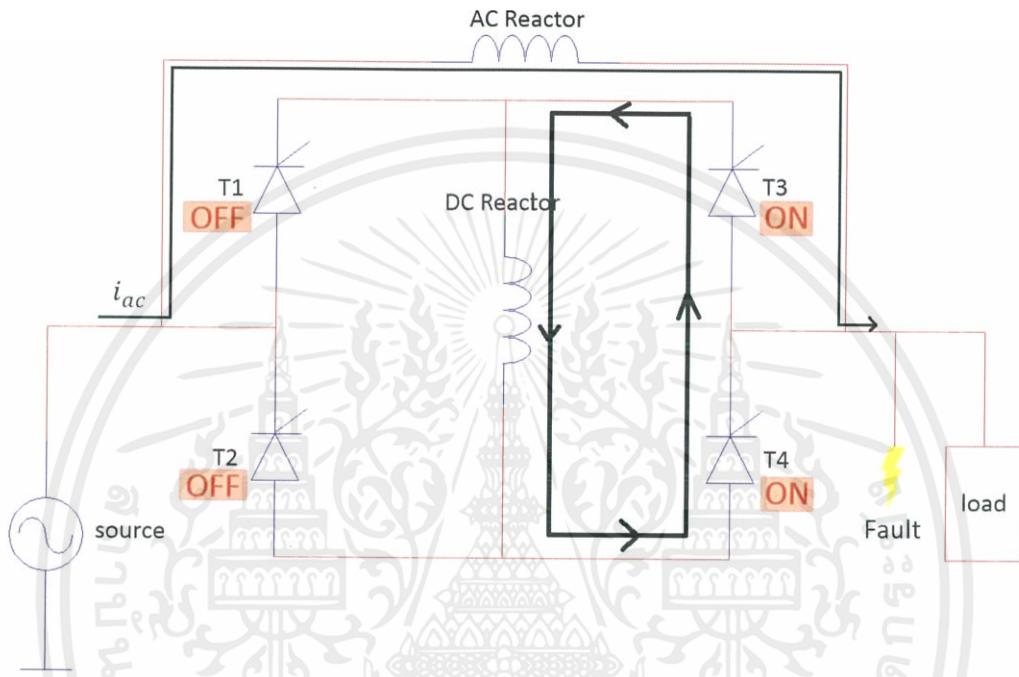


รูปที่ 2.11 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ในสถานะทำงานปกติ เมื่อ $i_{ac} < 0$

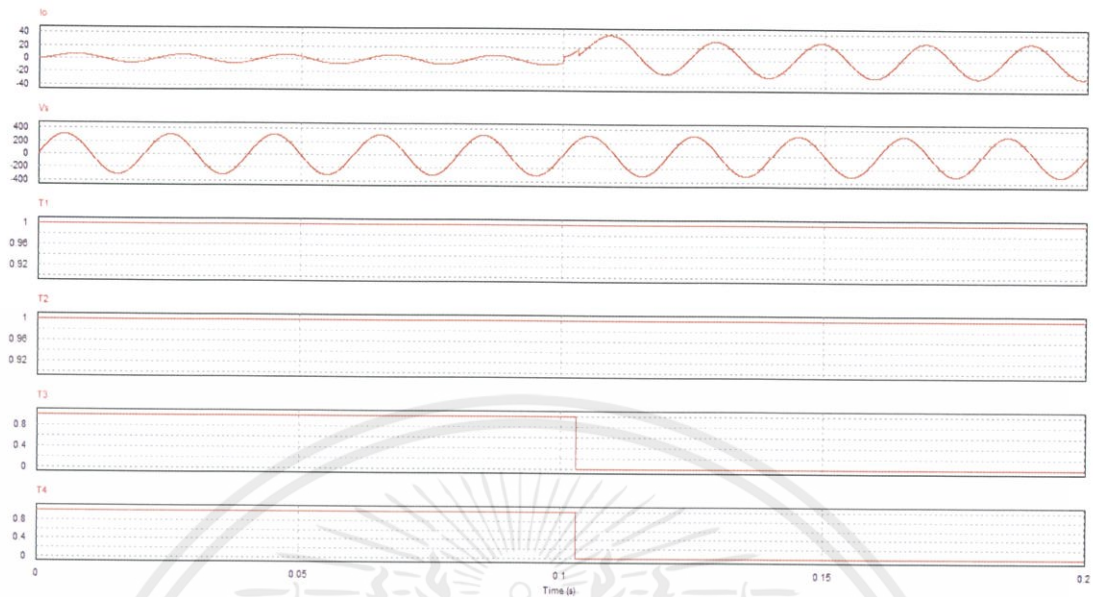
2.5.1 การควบคุมแบบไหลวนอิสระ

การควบคุมแบบไหลวนอิสระ คือเมื่อเกิดตรวจพบกระแสเกินจากการลัดวงจรขึ้น สัญญาณเกทของไทรสเตอร์ T1 และ T2 ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 จะถูกปลดออกให้กระแสลัดวงจรไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี ส่วนเกทของไทรสเตอร์ T3 และ T4 ยังคงนำกระแสต่อไปเพื่อให้กระแสลัดวงจรที่ค้างอยู่ในรีแอคเตอร์ดีซีนั้นลดลงด้วยความต้านทานภายในของรีแอคเตอร์ แต่เนื่องจากความต้านทานนี้มี

ค่าน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของกระแสจึงใช้เวลานาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่รีแอคเตอร์ดีซี กรณีที่กระแสลัดวงจรถูกขจัดออกจากระบบแล้ว อุปกรณ์กลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งรีแอคเตอร์ดีซี จะไม่สามารถรับกระแสลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นซ้ำ เมื่อพิจารณาปัจจัยดังกล่าว แนวทางการควบคุมนี้จึงไม่ถูกนำไปใช้



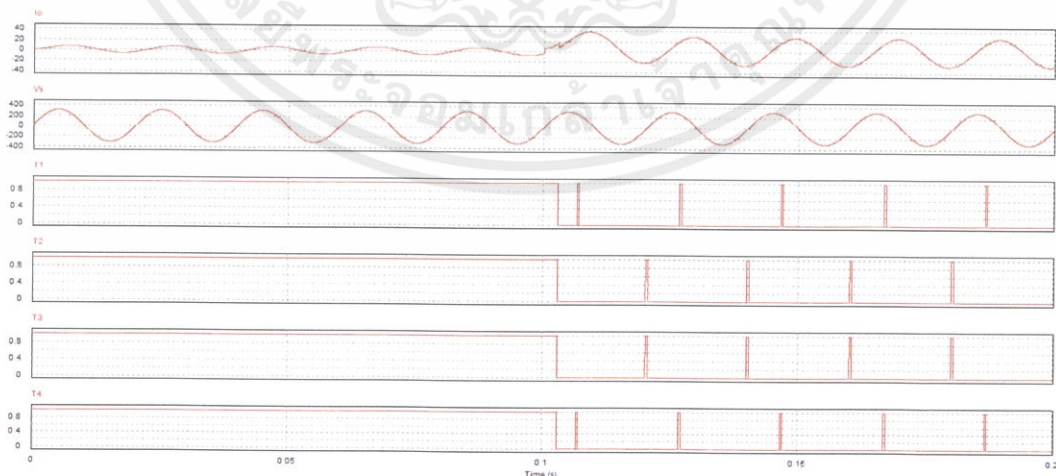
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ เมื่อควบคุมแบบไทวนอิสระ



รูปที่ 2.13 สัญญาณเกตที่ควบคุมไทรสเตอร์ T1-T4 แบบไหลวนอิสระ ในสภาวะลัดวงจร

2.5.2 การควบคุมแบบคืนพลังงานกลับสู่ระบบ

การควบคุมแบบคืนพลังงานกลับสู่ระบบ คือการทำให้วงจรบริดจ์คืนพลังงานภายในรีแอคเตอร์ดีซี กลับสู่ระบบในสภาวะที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น โดยการปรับมุมนำกระแสของสัญญาณเกตไทรสเตอร์ทั้งสองของวงจรบริดจ์ให้สูงกว่า $\frac{\pi}{2}$ ดังรูปที่ 2.14 ผลที่ตามมาคือกระแสที่อยู่ในรีแอคเตอร์ดีซี จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์ ช่วยไม่ให้เกิดความร้อนที่รีแอคเตอร์ดีซี และอุปกรณ์พร้อมที่จะรับกระแสลัดวงจรอีกครั้งในทันทีเมื่ออุปกรณ์กลับมาทำงานในสภาวะปกติ เมื่อพิจารณาแล้วจึงเลือกใช้แนวทางควบคุมนี้ในการจำลองการทำงาน



รูปที่ 2.14 สัญญาณเกตที่ควบคุมไทรสเตอร์ T1-T4 แบบคืนพลังงานกลับสู่ระบบ ในสภาวะลัดวงจร

เพื่อป้องกันความล้มเหลวของการคอมมิวเตท ในช่วงแรกของการคืนพลังงานต้องกำหนดมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ในการคืนพลังงานกลับเข้าสู่ระบบให้น้อยกว่าค่า α_{max} ซึ่งเป็นมุมนำกระแสสูงสุดของไทรสเตอร์ โดยไม่เกิดความล้มเหลวของการคอมมิวเตท สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{2X_c I_{dc}}{U_{lm}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ X_c คือค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านเอซี ซึ่งในที่นี้คือค่าความต้านทานภายในของรีแอคเตอร์เอซี ซึ่งสามารถวัดได้ ส่วน I_{dc} กระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซี โดยกำหนดให้มีค่ามากกว่า และ U_{lm} คือแรงดันดีซีสูงสุดที่เป็นไปได้



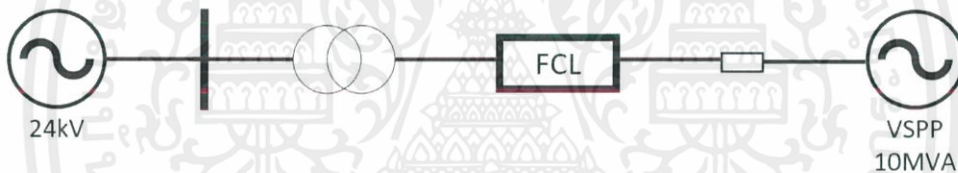
บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสำหรับระบบแรงดันระดับปานกลาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ สำหรับระบบแรงดันปานกลาง โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาผลเมื่อนำอุปกรณ์จำกัดกระแสไปประยุกต์ใช้ในระบบแรงดันปานกลาง

3.1 การพิจารณาอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสำหรับระบบแรงดันปานกลาง

การไฟฟ้ากำหนดให้ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีขนาดไม่เกิน 10MVA แรงดัน 11-33kV [10] โดยจะเลือกจำลองที่แรงดัน 24kV แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของฟีดเดอร์จึงอยู่ที่ 240A



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

เนื่องจากข้อจำกัดของฟีดเดอร์แรงดันทรานซิสเตอร์ เมื่อการนำอุปกรณ์มาใช้ในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ต้องการใช้หม้อแปลงเพื่อลดระดับแรงดัน จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์แบบบริดจ์มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถทนแรงดันของระบบได้ ในระบบไฟฟ้า 24kV ดังนั้นจำนวนของบริดจ์เซลล์ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่เสียหายกับค่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในสภาวะลัดวงจร หากพิจารณาจากฟีดเดอร์ทรานซิสเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน มีฟีดเดอร์แรงดันสูงสุดอยู่ที่ 6.5kV ที่ฟีดเดอร์กระแส 1,100A [11] เมื่อค่าแรงดันเฟสสูงสุดอยู่ที่ 19.59kV จะต้องใช้บริดจ์เซลล์จำนวน 4 ชุดต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถรับแรงดันเฟสสูงสุดได้

3.1.1 การออกแบบรีแอคเตอร์เอชซี (L_d)

ค่าของรีแอคเตอร์เอชซีนั้นขึ้นอยู่กับระดับของกระแสลัดวงจรที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ I_{sc} กำหนดที่ 5 เท่าของกระแสฟีดเดอร์แรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ U_n เท่ากับแรงดันเฟสของระบบเมื่อเกิด

ลัดวงจร ส่วนค่า คือความถี่เชิงมุมของระบบ $2\pi f$ ซึ่ง f ในที่นี้เป็นความถี่ระบบไฟฟ้าเท่ากับ 50Hz เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.1 จะได้

$$L_a = \frac{24 * 10^3}{2 * \pi * 50 * 1200} = 37mH$$

3.1.2 การออกแบบรีแอกเตอร์ดีซี (L_d)

ค่าของรีแอกเตอร์ดีซีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 โดย U_{lm} คือแรงดันกระแสตรงสูงสุด กำหนดให้มีจำนวนบริดจ์สี่เซลล์ ส่วน I_m คือค่ากระแสที่ไหลเข้ารีแอกเตอร์ดีซีในสภาวะคงตัวในที่นี่เลือกที่กระแสพิกัดคือ 240A เมื่อแทนในสมการ 2.4 จะได้

$$L_d(\text{total}) = \frac{2 * \left(\frac{\sqrt{2} * 24 * 10^3}{\sqrt{3}} \right)}{2 * \pi * 50 * (240\sqrt{2})} = 367mH$$

$$L_d = \frac{367mH}{4} = 91mH$$

3.1.3 การออกแบบความต้านทานสร้างกระแสลัดวงจร (R_f)

กำหนดกระแสลัดวงจรมากที่สุด I_f ที่ 20 เท่าของกระแสพิกัดคือ 4800 A ซึ่งคิดได้จากการลัดวงจรชนิดระหว่างสาย โดยกำหนดระยะเวลาของการเกิดลัดวงจรไว้ประมาณ 110ms เนื่องจากโดยทั่วไปเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปหลังจากเกิดการลัดวงจรประมาณ 5 ไซเคิล [4] ค่าความต้านทานลัดวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$R_f = \frac{U_{L-L}}{I_f} \quad (3.1)$$

ซึ่งค่า U_{L-L} คือค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า และ I_f คือกระแสลัดวงจรที่ต้องการสร้างขึ้น เมื่อแทนค่าสมการที่ 3.1 จะได้

$$R_f = \frac{24 * 10^3}{4800} = 5\Omega$$

3.1.4 การออกแบบโหลดของระบบ

กำหนดให้เป็นโหลด $R - L$ ที่มีค่าตัวประกอบกำลัง PF เท่ากับ 0.8 กระแสโหลดต่อเฟสกำหนดที่ 80 แอมป์ของพิกัดเท่ากับ 190A สามารถคำนวณค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 3.2 ถึง 3.5

$$Z_{total} = \frac{U_n}{I_{load}} \quad (3.2)$$

$$R_l = Z_{total} * \cos \theta = Z_{total} * \cos(\cos^{-1}(PF)) \quad (3.3)$$

$$X_l = Z_{total} * \sin \theta = Z_{total} * \sin(\cos^{-1}(PF)) \quad (3.4)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (3.5)$$

โดย Z_{total} คือค่าอิมพีแดนซ์รวมของโหลด I_{Load} คือกระแสโหลดเท่ากับ 190A ส่วน X_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ เมื่อแทนค่าต่างๆในสมการที่ 3.2-3.5 จะได้ขนาดของโหลด (กำหนดให้โหลดของระบบเป็น $R - L$ ต่อกัน)[12]

$$Z_{total} = \frac{24 * 10^3}{\frac{\sqrt{3}}{190}} = 72.92 \Omega$$

$$R_l = Z_{total} * \cos \theta = 72.92 * \cos(\cos^{-1}(0.8)) = 58.3 \Omega$$

$$X_l = Z_{total} * \sin \theta = 72.92 * \sin(\cos^{-1}(0.8)) = 43.74 \Omega$$

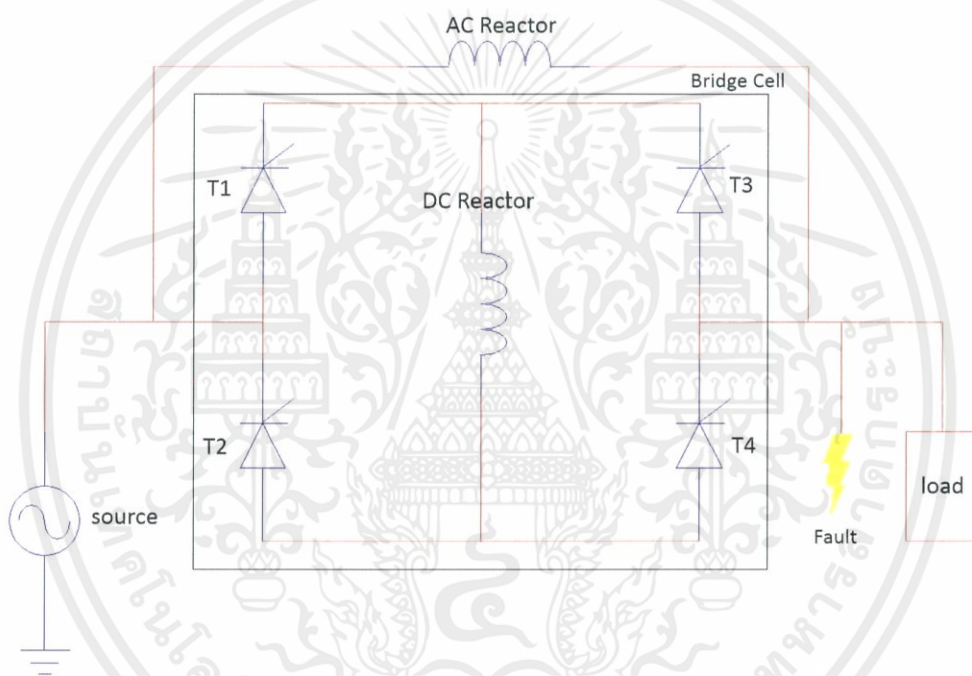
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{43.74}{2 * \pi * 50} = 139mH$$

3.2 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM

จากการกำหนดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ทั้งหมด จะนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาการทำงานการควบคุมและวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของอุปกรณ์เมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงดังตารางที่ 3.1

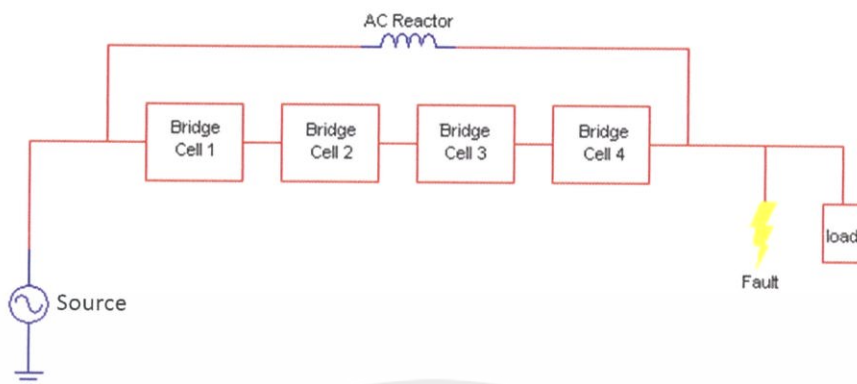
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานในระบบแรงดันปานกลาง

แรงดันไลน์	24kV
กระแสโหลด	190A
อิมพีแดนซ์โหลด ($R + jx$)	$58.3 + j43.74\Omega$
ความต้านทานลัดวงจร (R_f)	5Ω
รีแอคเตอร์เอซี (L_a)	37mH
รีแอคเตอร์ดีซี (L_d) ต่อ 1 วงจรบริดจ์	91mH

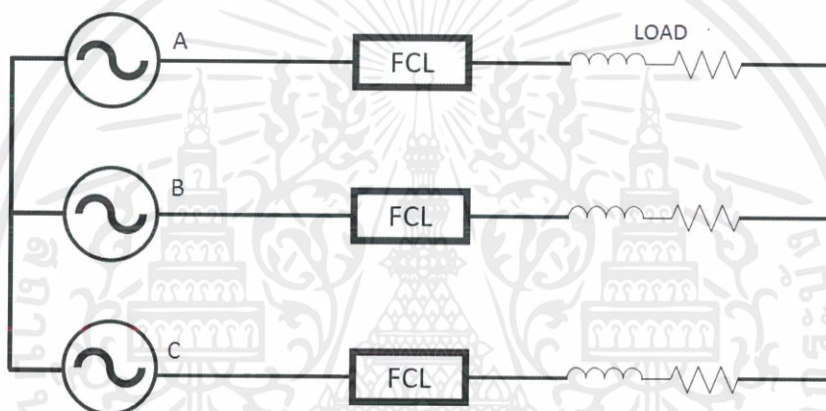


รูปที่ 3.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์ สองรีแอคเตอร์

ในสภาวะปกติ วงจรบริดจ์จะเชื่อมต่อกับระบบและทำงานในโหมดเรียงกระแส ในสภาวะลัดวงจรรีแอคเตอร์ดีซีจะถูกตัดออกจากระบบ หรือการควบคุมแบบคีนพลังงานกลับสู่ เมื่อกระแสลัดวงจรถูกขจัดออกจากระบบ วงจรบริดจ์จะกลับมาทำกระแสอีกครั้งทำให้ไม่เกิดแรงดันเกินในระบบ



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์หลายเซลล์แบบหนึ่งเฟส



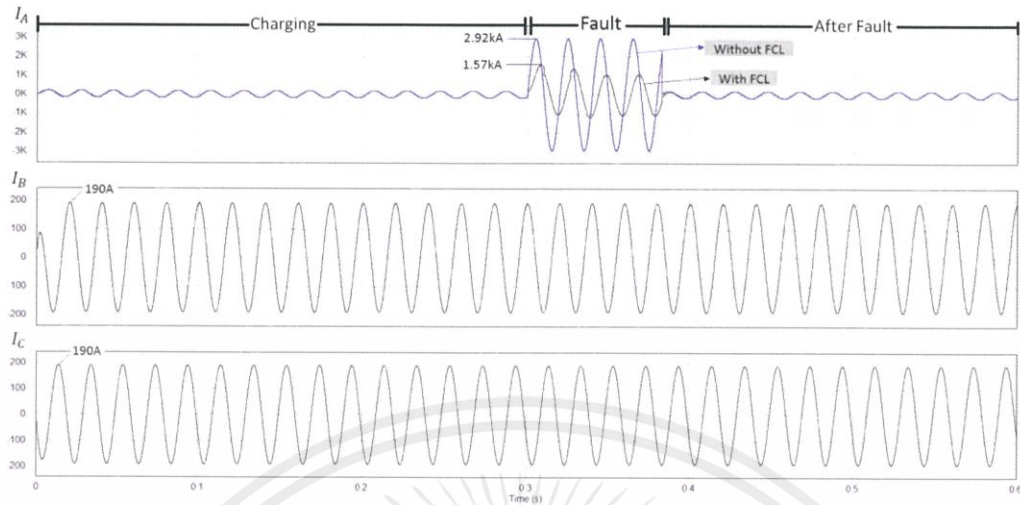
รูปที่ 3.4 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์หลายเซลล์ระบบสามเฟส

จากรูปที่ 3.2 ถึง 3.4 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ออกแบบให้มีจำนวนสปีบริดจ์เซลล์ เพื่อจำลองในระบบแรงดัน 24kV

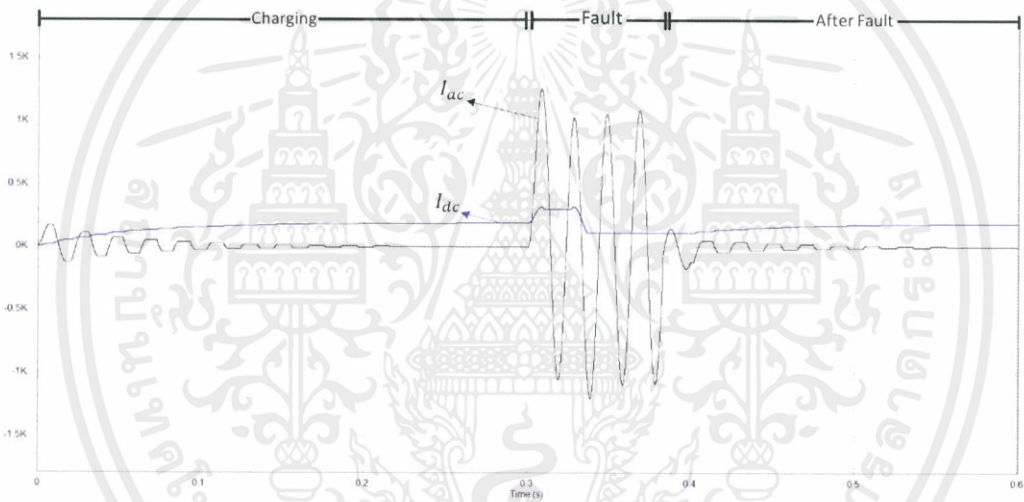
3.3 ผลการจำลองในระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงดันปานกลาง

3.3.1 การเกิดลัดวงจรแบบ Single line to ground fault (SLGF)

ในรูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เมื่อเกิดลัดวงจรในเฟส A จะพบว่ากระแสในไลน์เมื่อไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสมีค่าสูงสุดที่ 2.92kA แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสค่ากระแสในไลน์มีค่าสูงสุดที่ 1.57kA

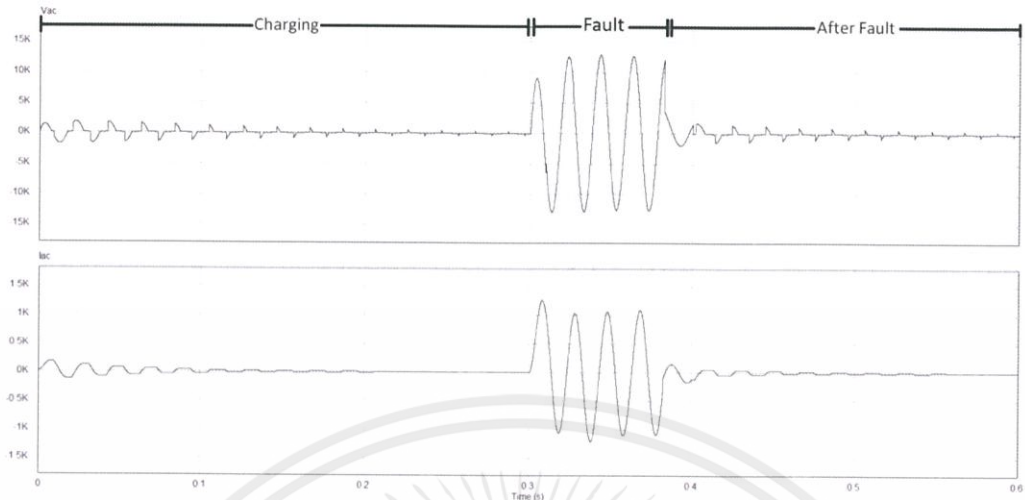


รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแสไลน์ที่ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสและไม่ได้ติดตั้ง เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF

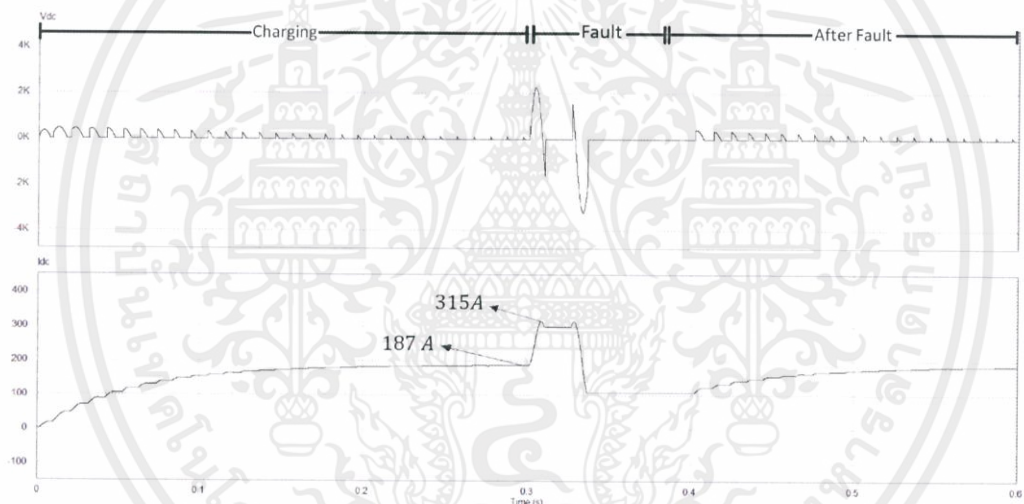


รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแสไลน์ที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซี และรีแอคเตอร์เอซี เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF

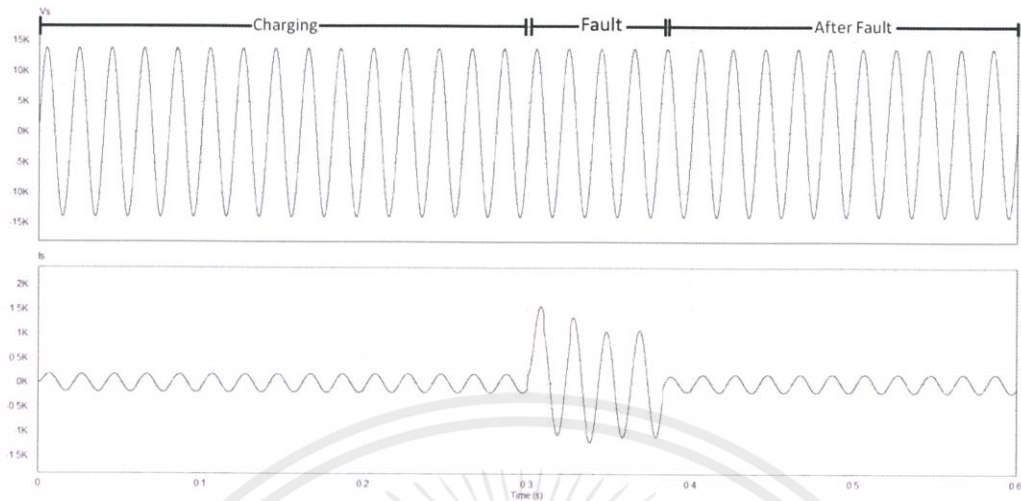
จากรูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์ที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซี และรีแอคเตอร์เอซีในช่วงที่อุปกรณ์ทำงานในสภาวะปกติ กระแสไหลสวนมากจะไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น (0.3s-0.38s) กระแสลัดวงจรในช่วง 1/4 ไซเคิลแรกจะไหลผ่านรีแอคเตอร์ทั้งสองและถูกจำกัดไม่ให้เพิ่มขึ้นทันทีโดยธรรมชาติของรีแอคเตอร์ หลังจากนั้นอุปกรณ์จะเข้าสู่โหมดคืนพลังงานกลับสู่ระบบ กระแสที่อยู่ในรีแอคเตอร์จะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกระแสลัดวงจรนั้นจะให้ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซีและระดับถูกจำกัดไว้ตามที่ออกแบบ หลังกระแสลัดวงจรหยุดลง(หลัง 0.38s) กระแสไหลดกำลังเข้ามาไหลในรีแอคเตอร์ดีซีอีกครั้ง



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรีแอคเตอร์เอซี เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรีแอคเตอร์ดีซีต่อหนึ่งเซลล์ เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ SLGF



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่าย จะพบว่าขณะที่อุปกรณ์ทำงานนั้นไม่ทำให้แรงดันระบบแกว่ง และอุปกรณ์สามารถจำกัดกระแสได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเฟสอื่นที่ไม่ได้เกิดลัดวงจร

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร ชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ สำหรับเครื่องต้นแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ เพื่อศึกษา ทดสอบการทำงานและการควบคุม โดยมีการทำงานสองส่วน ในส่วนแรกคือส่วนของวงจรบริดจ์ คอยควบคุมไทรสเตอร์ในวงจรบริดจ์ ให้ทำงานตามที่ต้องการ และส่วนที่สองคือส่วนของการลัดวงจร จะทำการจำลองการแทรกความต้านทานลัดวงจรเข้ามาในระบบ เพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์จำกัดกระแสทำงานได้ตามที่จำลองไว้ โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM

การจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม เป็นขั้นตอนการทดสอบก่อนที่จะนำไปทดสอบสร้างเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการ หนึ่งเฟส 220V ซึ่งจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ให้สามารถทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ ปลอดภัย และสะดวกต่อการทดลอง โดยใช้ระบบแรงดัน 220V กระแสไหล 5A ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 จำลองกระแสลัดวงจรที่ 15 เท่าของกระแสปกติ หรือ 75A เมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสแล้ว จะยอมให้กระแสไหลผ่านในสายส่งที่ 20A

4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงาน

4.1.1 การออกแบบรีแอคเตอร์เอซี (L_a)

ค่าของรีแอคเตอร์เอซีนั้น ขึ้นอยู่กับระดับของกระแสลัดวงจรที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ I_{sc} กำหนดที่ 20A แรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ U_n เท่ากับแรงดันเฟสของระบบเมื่อเกิดลัดวงจรคือ 220V ส่วนค่า ω คือความถี่เชิงมุมของระบบ มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ ซึ่ง f ในที่นี้เป็นความถี่ระบบไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 50Hz เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.1 จะได้

$$L_a = \frac{220}{2 * \pi * 50 * 20} = 35\text{mH}$$

4.1.2 การออกแบบรีแอคเตอร์ดีซี (L_d)

ค่าของรีแอคเตอร์ดีซีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 โดย U_{lm} คือค่าสูงสุดของแรงดันที่ตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซี การจำลองการทำงานนี้ กำหนดให้มีจำนวนบริดจ์ 4 เซลล์ ต่ออนุกรมกัน ทำให้แรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซีเท่ากับ $220\sqrt{2}/4$ และ I_m คือกระแสที่ไหลเข้ารีแอคเตอร์ดีซีในสภาวะคงตัว กำหนดให้มีค่าเท่ากับกระแสไหล 5A เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.4 จะได้

$$L_d = \frac{2 * \frac{220\sqrt{2}}{4}}{2 * \pi * 50 * 5\sqrt{2}} = 70\text{mH}$$

4.1.3 การออกแบบความต้านทานสร้างกระแสลัดวงจร (R_f)

กำหนดกระแสลัดวงจร I_f ที่ 75A โดยกำหนดระยะเวลาของการเกิดลัดวงจรไว้ 100ms เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการตัดวงจรหลังจากเกิดการลัดวงจรประมาณ 5ไซเคิล ค่าความต้านทานลัดวงจรสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1

$$R_f = \frac{U_n}{I_f} \quad (4.1)$$

ซึ่งค่า U_n คือค่าแรงดันในระบบไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 220V ส่วน I_f คือกระแสลัดวงจรที่ต้องการสร้างขึ้นคือ 75A เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้

$$R_f = \frac{220}{75} = 2.93\Omega$$

4.1.4 การออกแบบโหลดของระบบ

กำหนดให้เป็นรีแอกทีฟโหลด (R-L) ที่มีค่าตัวประกอบกำลัง PF เท่ากับ 0.8 กระแสโหลด 5A สามารถคำนวณค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ 4.2 ถึง 4.5

$$Z_{total} = \frac{U_n}{I_{load}} \quad (4.2)$$

$$R_L = Z_{total} * \cos \theta = Z_{total} * \cos(\cos^{-1}(PF)) \quad (4.3)$$

$$X_L = Z_{total} * \sin \theta = Z_{total} * \sin(\cos^{-1}(PF)) \quad (4.4)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (4.5)$$

โดย Z_{total} คือค่าอิมพีแดนซ์รวมของโหลด, I_{load} คือกระแสโหลด มีค่าเท่ากับ 5A ส่วน X_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.2 ถึง 4.5 จะได้ขนาดของรีแอกทีฟโหลด

$$Z_{total} = \frac{220}{5} = 44\Omega$$

$$R_L = Z_{total} * \cos \theta = 44 * \cos(\cos^{-1}(0.8)) = 35.2\Omega$$

$$X_L = Z_{total} * \sin \theta = 44 * \sin(\cos^{-1}(0.8)) = 26.4\Omega$$

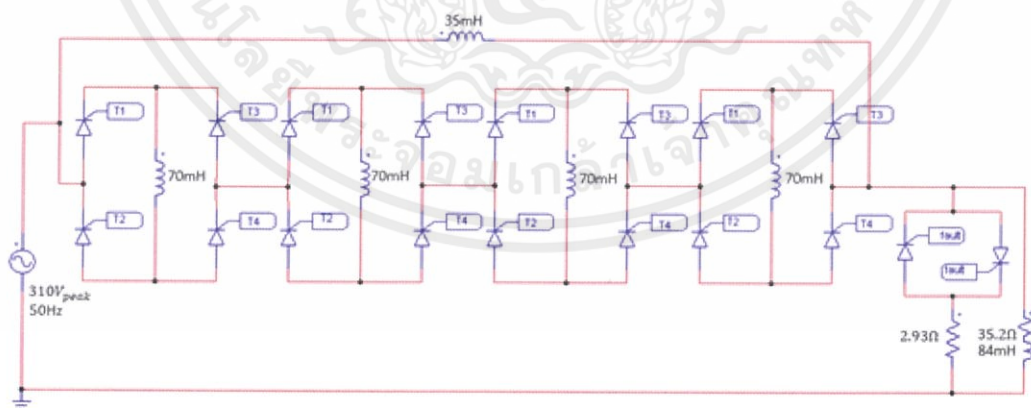
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{26.4}{2 * \pi * 50} = 84.03\text{mH}$$

4.2 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM

เมื่อกำหนดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดวงจรมอเตอร์แบบหลายเซลล์ได้แล้ว จะนำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาการทำงาน การควบคุม และวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของอุปกรณ์เมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานในเครื่องต้นแบบ

แรงดัน	220V
กระแสไหล	5A
อิมพีแดนซ์โหลด ($R + jx$)	$35.2 + j26.4\Omega$
ความต้านทานลัดวงจร (R_f)	2.93Ω
รีแอคเตอร์เอซี (L_a)	35mH
รีแอคเตอร์ดีซี (L_d) ต่อ 1 วงจรบริดจ์	70mH

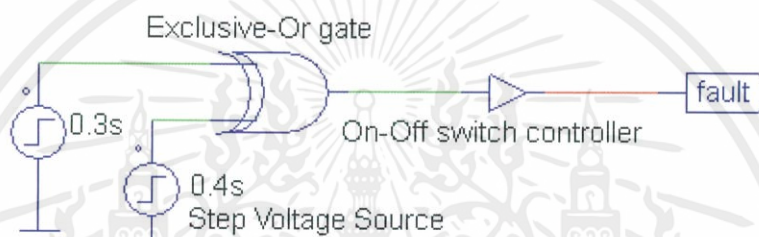


รูปที่ 4.1 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดแบบบริดจ์หลายเซลล์ด้วยโปรแกรม PSIM

จากรูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์จำกัดกระแสต่ออนุกรมกัน 4 โมดูล ซึ่งประกอบไปด้วย บริดจ์ไทรสเตอร์ 4 เซลล์ อนุกรมกับสายส่ง มีรีแอคเตอร์ดีซีต่ออยู่ด้านไฟตรงของวงจร บริดจ์แล้วมีรีแอคเตอร์เอซีต่อขนานกับวงจรบริดจ์ทั้งหมด

4.2.1 ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเกทไทรสเตอร์ในสภาวะลัดวงจร

ในสภาวะลัดวงจรนั้น จะเกิดการเปลี่ยนมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ทั้งสี่ตัวในวงจร บริดจ์ เพื่อให้พลังงานที่สะสมในรีแอคเตอร์ดีซีจ่ายคืนกลับสู่ระบบเพราะในสภาวะแรกของการเกิด ลัดวงจร จะมีกระแสลัดวงจร $\frac{1}{2}$ ไซเคิล ไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซีและสะสมในรีแอคเตอร์ดีซี แล้วทำการปลด รีแอคเตอร์ดีซีออกจากระบบเพื่อให้รีแอคเตอร์เอซีจำกัดกระแสลัดวงจร

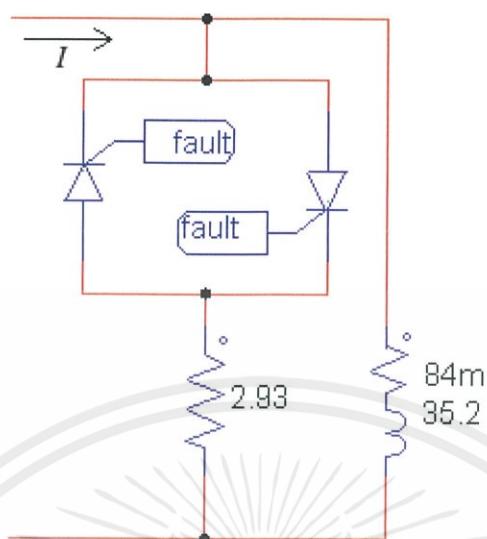


รูปที่ 4.2 ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเกทไทรสเตอร์ลัดวงจร

โดยในการจำลองสภาวะลัดวงจร จะทำการปล่อยสัญญาณเกทให้แก่ไทรสเตอร์ fault ทั้งสองที่เวลา 0.3-0.4s ใช้ Step Voltage Source ในการส่งสัญญาณโดยตั้งค่า $T_{step} = 0.3$ และ 0.4s แล้วต่อผ่าน Exclusive-Or gate เพื่อให้ส่งสัญญาณเกทในเวลา 0.3-0.4s แล้วต่อเข้า On-Off switch controller เพื่อแปลงสัญญาณเข้าไทรสเตอร์ fault

4.2.2 ชุดจำลองการลัดวงจร

ในแบบจำลองการทำงาน จะใช้การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสระหว่างสายไลน์และนิวตรอน โดยกำหนดช่วงเวลาของการเกิดลัดวงจรที่ 0.3-0.4s ทำให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน 2.93Ω ตามที่ได้ ออกแบบไว้



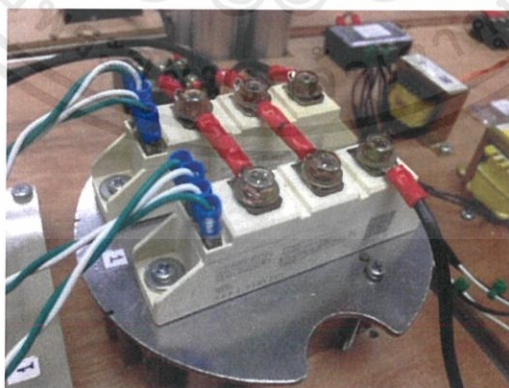
รูปที่ 4.3 โครงสร้างการจำลองการลัดวงจร

4.3 โครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสในเครื่องต้นแบบ

โครงสร้างของเครื่องต้นแบบ อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดบริดจ์หลายเซลล์ ประกอบด้วยชุดวงจรบริดจ์จำนวน 4 ชุด ชุดจับสัญญาณผ่านศูนย์ ตัวประมวลผลสัญญาณ Arduino Mega2560 และวงจรมอเตอร์

4.3.1 วงจรบริดจ์

วงจรบริดจ์ ประกอบด้วยไทรสเตอร์โมดูลหนึ่งกิ่ง เบอร์ SKKT92B/12E 2 ตัวต่อหนึ่งบริดจ์เซลล์ มีพิกัดกระแส 95A และพิกัดแรงดัน 1200V จำนวนทั้งหมด 8 ตัวเพื่อประกอบเป็นวงจรบริดจ์สี่เซลล์ แสดงดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรบริดจ์ไทรสเตอร์ที่สร้างขึ้นในเครื่องต้นแบบ

4.3.2 รีแอกเตอร์ดีซี

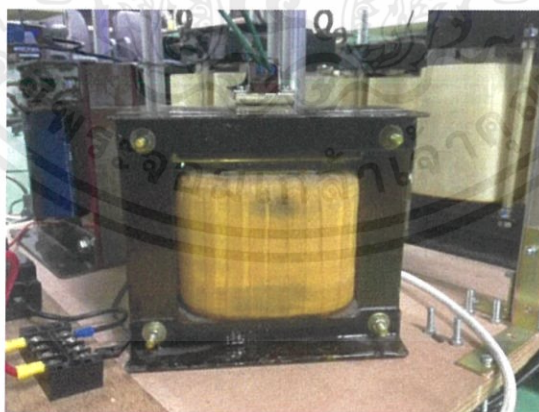
รีแอกเตอร์ดีซีในสภาวะปกติจะมีกระแสไหลผ่าน เมื่อเกิดการลัดวงจรจะทำการควบคุมแบบ inversion control เพื่อให้กระแสที่สะสมอยู่ดีสชาร์จอย่างรวดเร็ว ในเครื่องต้นแบบเลือกใช้รีแอกเตอร์ดีซีขนาด 70mH



รูปที่ 4.5 รีแอกเตอร์ดีซี

4.3.3 รีแอกเตอร์เอซี

รีแอกเตอร์เอซีมีหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสทั้งหมดจะไหลผ่านรีแอกเตอร์เอซี ในเครื่องต้นแบบเลือกใช้รีแอกเตอร์เอซีขนาด 35mH



รูปที่ 4.6 รีแอกเตอร์เอซี

4.3.4 วงจรนำขั้วเกท

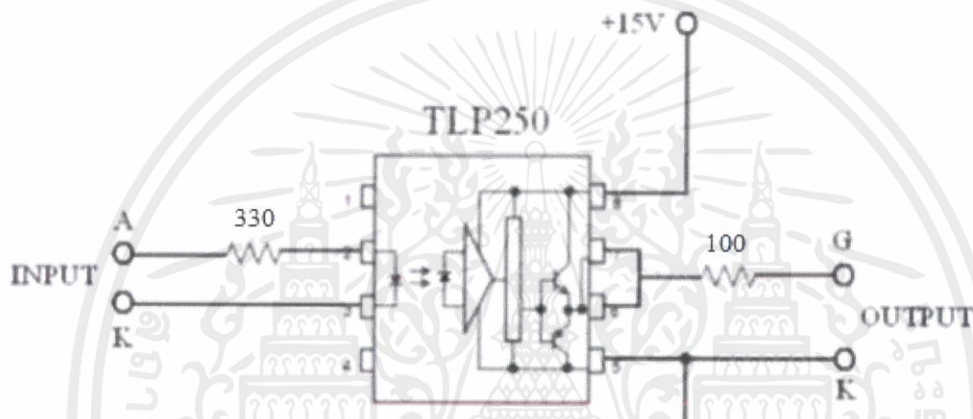
วงจรถูกนำขั้วเกทเลือกใช้ไอซี TLP250 แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งในการสร้างเครื่องต้นแบบนั้น ใช้ไอซีจำนวน 16 ตัว สำหรับวงจรถูกนำขั้ว และอีก 2 ตัว สำหรับชุดสร้างการลัดวงจร

ที่ขา 2 ของ TLP250 นั้นต้องการให้กระแสไหลผ่าน 10mA และมีแรงดันตกคร่อม

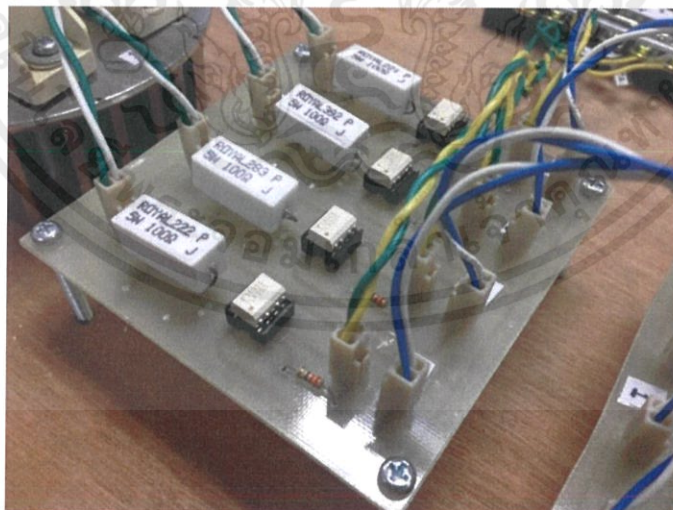
ภายใน 1.6V ความต้านทาน $\frac{5-1.6}{10 \times 10^{-3}} = 340\Omega$ เลือกใช้ความต้านทาน 330 Ω

ที่ขา 6, 7 ใช้ในการส่งสัญญาณขั้วเกททรานซิสเตอร์ ต้องการให้กระแสไหลผ่าน 150mA

จึงเลือกใช้ความต้านทาน $\frac{15}{150 \times 10^{-3}} = 100\Omega$



รูปที่ 4.7 วงจรถูกนำขั้วเกท

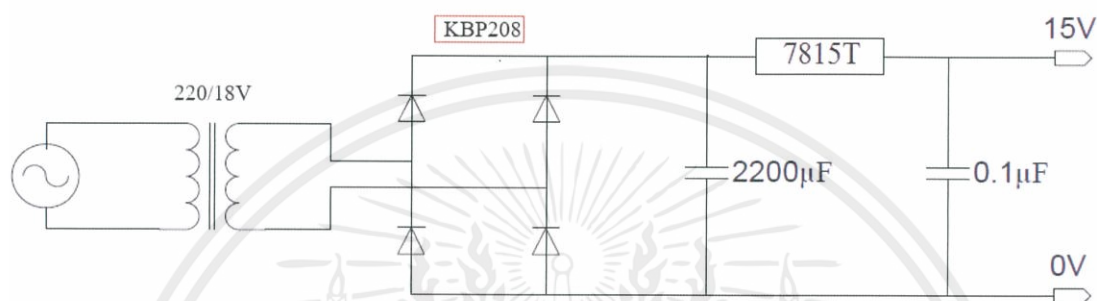


รูปที่ 4.8 ชุดวงจรถูกนำขั้วเกทในเครื่องต้นแบบ

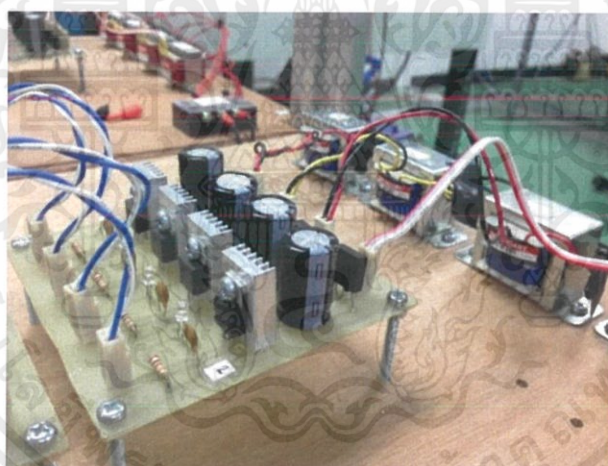
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรถ่าย

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220V ให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 15V เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงให้แก่วงจรนำขับ ซึ่งประกอบไปด้วย หม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าสลับจาก 220 เป็น 18V แล้วใช้อิซี KBP208 ซึ่งเป็นบริดจ์ไดโอด ในการเรียงกระแสให้กลายเป็นไฟตรง ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2200 μ F ในการกำจัดริบเปิ้ลที่เกิดขึ้น สุดท้ายใช้อิซี 7815T เพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟตรง 15V



รูปที่ 4.9 วงจรเรียงกระแส

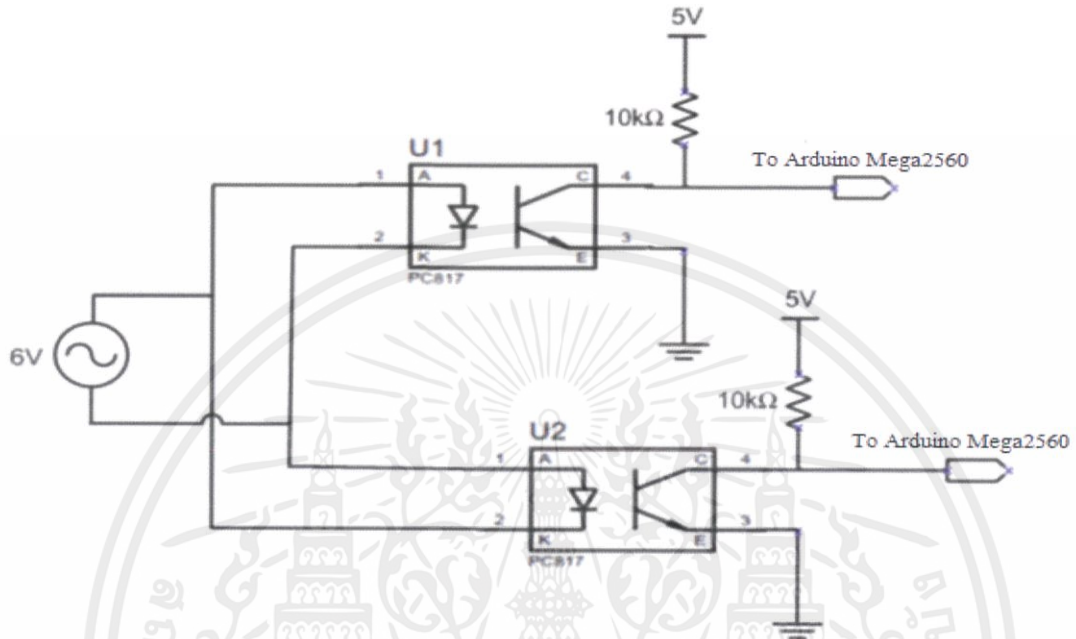


รูปที่ 4.10 ชุดวงจรเรียงกระแสในเครื่องต้นแบบ

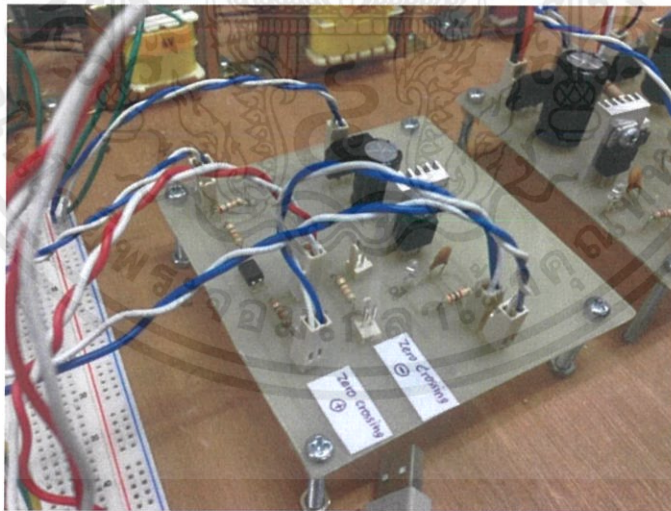
4.3.6 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ดังรูปที่ 4.11 เป็นวงจรตรวจจับและส่งสัญญาณ เมื่อสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ผ่านจุดศูนย์ อิซี PC817 ออปโตคัปเปิ้ล จะส่งสัญญาณไปยัง Arduino Mega2560 แล้วนำไปประมวลผลว่า ณ เวลานั้น มุมของแรงดันไฟฟ้าของระบบอยู่ที่ 0 องศา โดยการนำสัญญาณขา 3, 4 มาเป็นตัวอ้างอิง ในที่นี้จะเลือกใช้อิซี PC817 ออปโตคัปเปิ้ลจำนวนสองตัวเพื่อใช้ตรวจจับ

สัญญาณทั้งด้านซิกบวกละซิกลบ ตั้งแต่ขา 1-4 ของไอซีนี้ ต้องการให้กระแสไหลผ่านเล็กน้อย จึงเลือกใช้ความต้านทาน $20k\Omega$



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

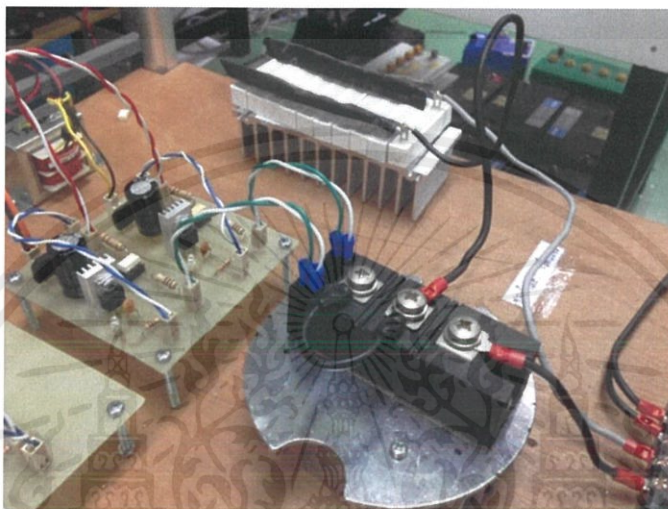


รูปที่ 4.12 ชุดวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ในเครื่องต้นแบบ

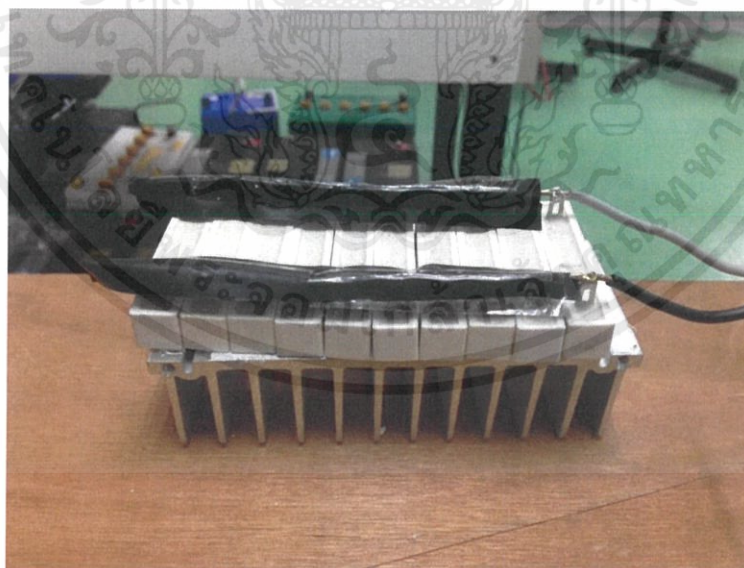
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 ชุดสร้างการลัดวงจร

ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ VSKT162/12PBF และวงจรขั้วเกท 2 ชุดในการสร้างการลัดวงจร เมื่อ Arduino mega 2560 ส่งสัญญาณลัดวงจรมา วงจรขั้วเกทจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์ on แล้วกระแสจะไหลผ่านความต้านทานลัดวงจร(R_f) จึงทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น



รูปที่ 4.13 ชุดสร้างการลัดวงจร

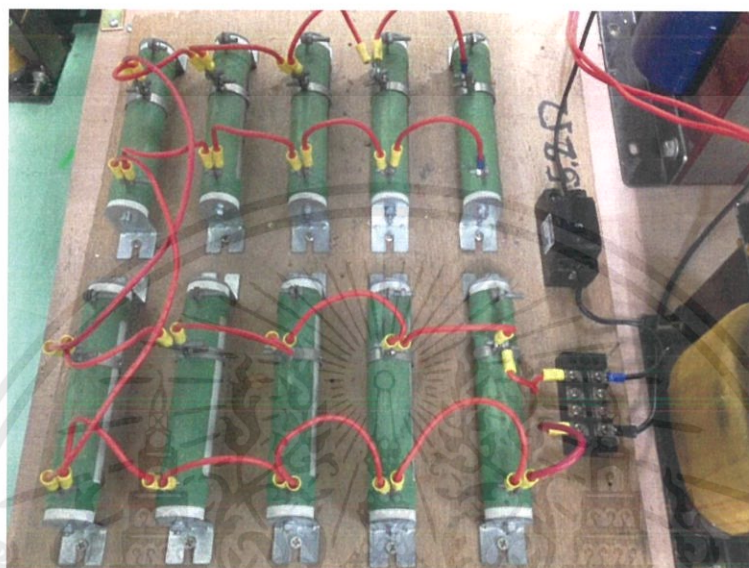


รูปที่ 4.14 ความต้านทานลัดวงจร (R_f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.8 โหลดของระบบ

ในการทดลอง ได้มีการใช้โหลด R และโหลด L ต่ออนุกรมกันเพื่อจำลองโหลดที่มี power factor เป็น lagging โดยโหลดที่ใช้ในการทดลองในเครื่องต้นแบบ มีค่า $35.2+j26.4\Omega$



รูปที่ 4.15 โหลดความต้านทาน

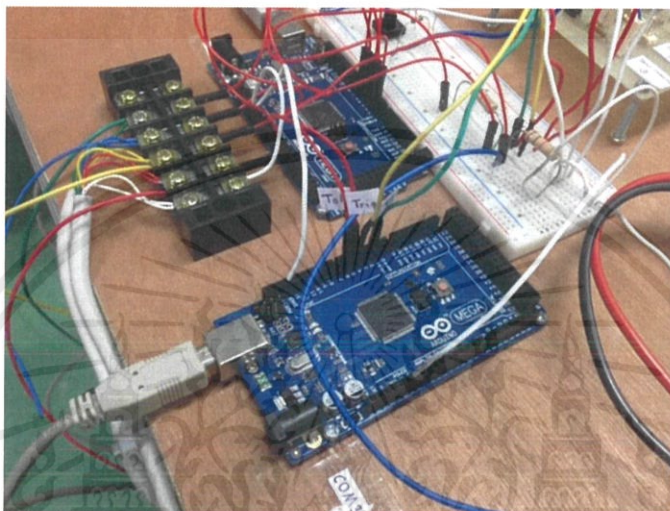


รูปที่ 4.16 โหลดตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.9 ตัวประมวลผลสัญญาณ Arduino Mega2560

ตัวประมวลผลสัญญาณ ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณชั้บเกทให้กับไทรสเตอร์ โดยจะรับสัญญาณจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์เพื่อให้รู้ถึงมุมของแรงดันทางไฟฟ้า แล้วคอยปล่อยสัญญาณเกทให้แก่ TLP250 เพื่อขับไทรสเตอร์ตามที้ออกแบบการควบคุมไว้

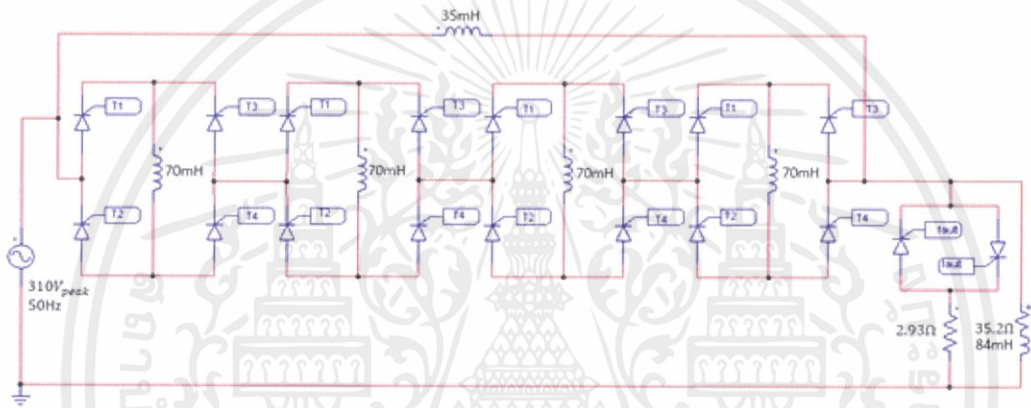


รูปที่ 4.17 ตัวประมวลผลสัญญาณ Arduino Mega2560

บทที่ 5

ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมและผลจากการทดลอง

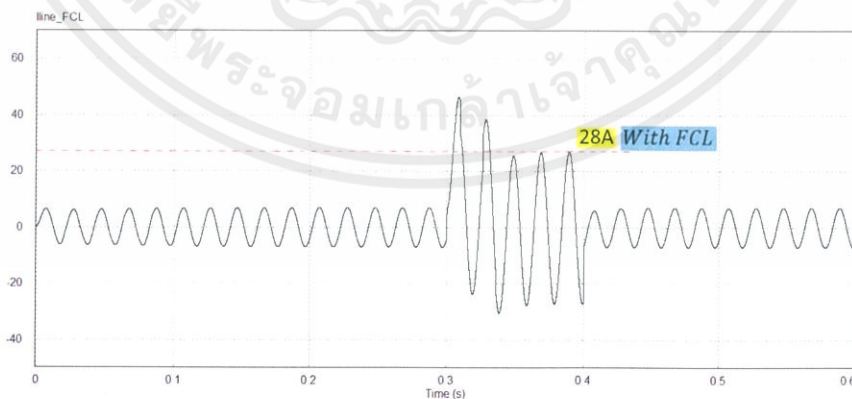
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม PSIM และผลการทดลองที่ได้จากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ โดยทดลองการทำงานของอุปกรณ์จำกัดกระแสในสภาวะปกติ และสภาวะลัดวงจร แล้วเปรียบเทียบกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส วงจรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมและทดลองในเครื่องต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5.1



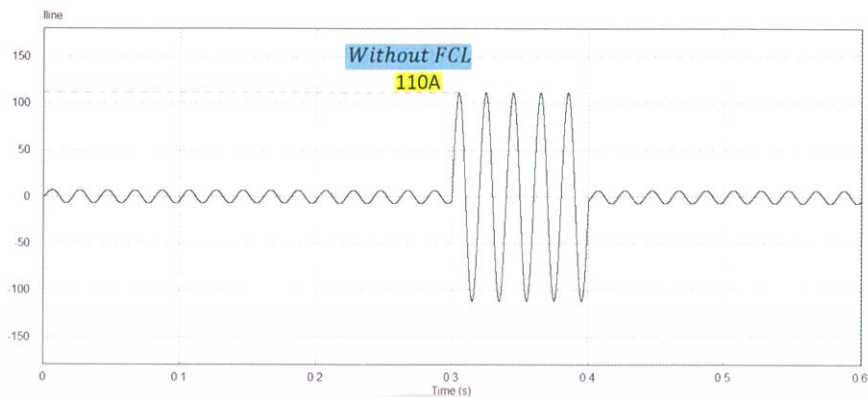
รูปที่ 5.1 วงจรของเครื่องต้นแบบสำหรับการทดลอง

5.1 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมและผลจากการทดลอง

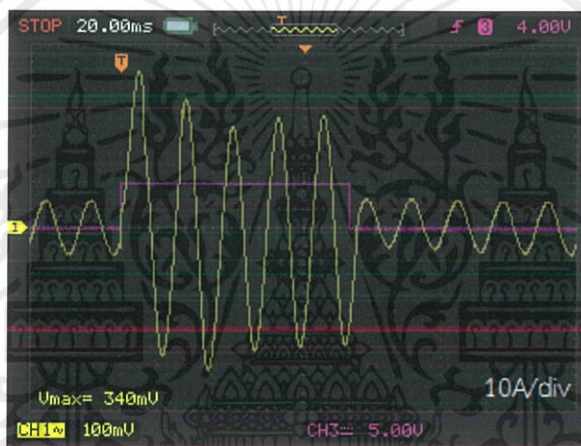
5.1.1 กระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์



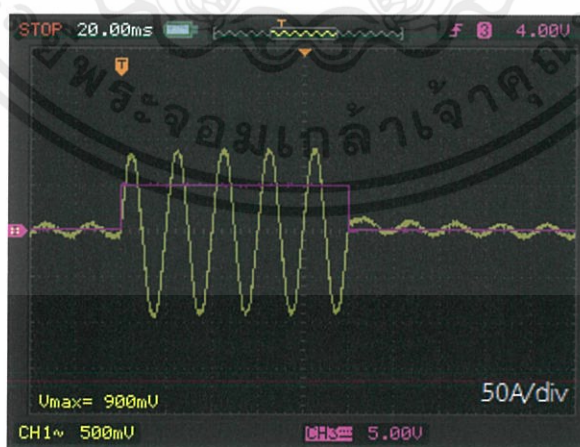
รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจาก PSIM



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจาก PSIM



รูปที่ 5.4 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจากเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจากเครื่องต้นแบบ

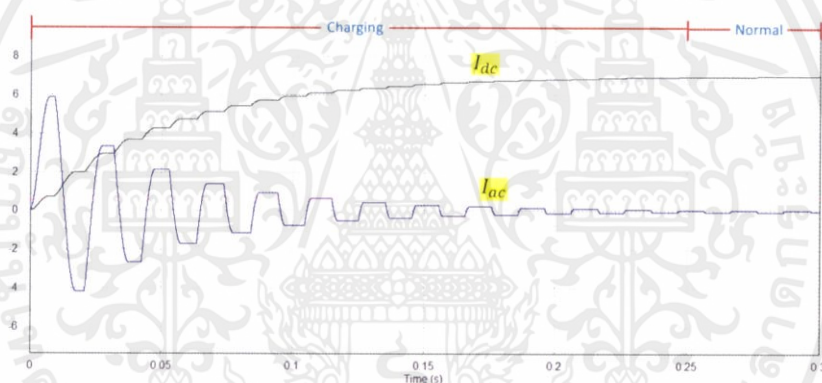
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ CH3 ที่อยู่ในกราฟที่ได้จากการทดลอง คือระยะเวลาในการเกิดการลัดวงจร เมื่อสัญญาณ CH3 อยู่ที่ 0 V จะอยู่ในสภาวะปกติ เมื่อสัญญาณ CH3 ถูกเปลี่ยนไปที่ 5 V จะอยู่ในสภาวะการลัดวงจร ดังภาพที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นได้ว่าจะเกิดการลัดวงจรเป็นเวลา 100 ms

จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบกระแสในสายส่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น (0.3-0.4s) ระหว่างติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส ซึ่งได้จากการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PSIM จะเห็นได้ว่ากระแสจะถูกจำกัดให้อยู่ที่ 20A (28Apeak) ตามที่ได้ออกแบบไว้

ส่วนรูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบกระแสในสายส่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ระหว่างติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสจากการทดลอง โดยใช้เครื่องต้นแบบและค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดค่าไว้ ผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากระแสจะถูกจำกัดให้อยู่ที่ 19A (27.2Apeak) แต่เมื่อไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส หากเกิดฟอลต์ กระแสจะไหลผ่าน 63A (90Apeak)

5.1.2 กระแสและแรงดันของรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีช่วงชาร์จ



รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีช่วงชาร์จจาก PSIM



รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซีช่วงชาร์จจากการทดลอง

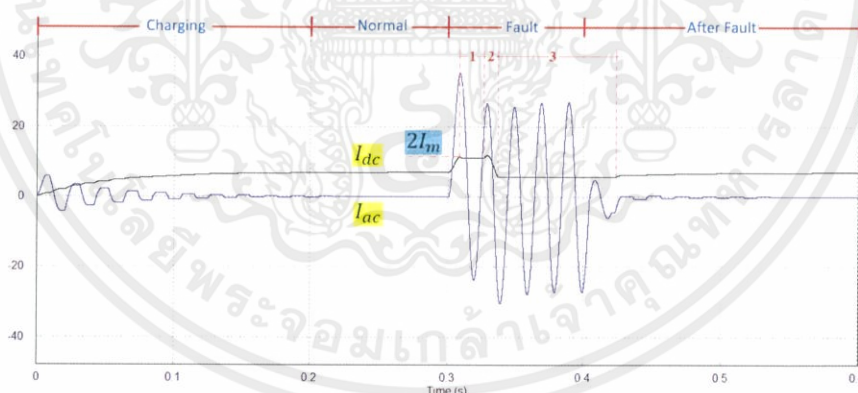
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์เอซีช่วงชาร์จจากการทดลอง

รูปที่ 5.6-5.8 แสดงรูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์ทั้งสองในช่วงเริ่มต้น สภาวะของรีแอคเตอร์ดีซีจะอยู่ในช่วงชาร์จ (Charging) โดยในช่วงแรกจะเห็นได้ว่ากระแส จะไหลผ่านทั้งรีแอคเตอร์ดีซีและเอซี เมื่อเวลาผ่านไป กระแสจะไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซีเพิ่มขึ้น และผ่านรีแอคเตอร์เอซีน้อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในสภาวะคงตัว

5.1.3 กระแสของรีแอคเตอร์ดีซีและเอซีทั้ง 4 สภาวะ



รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสที่ไหลในรีแอคเตอร์ดีซี และรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM ทั้ง 4 สภาวะ

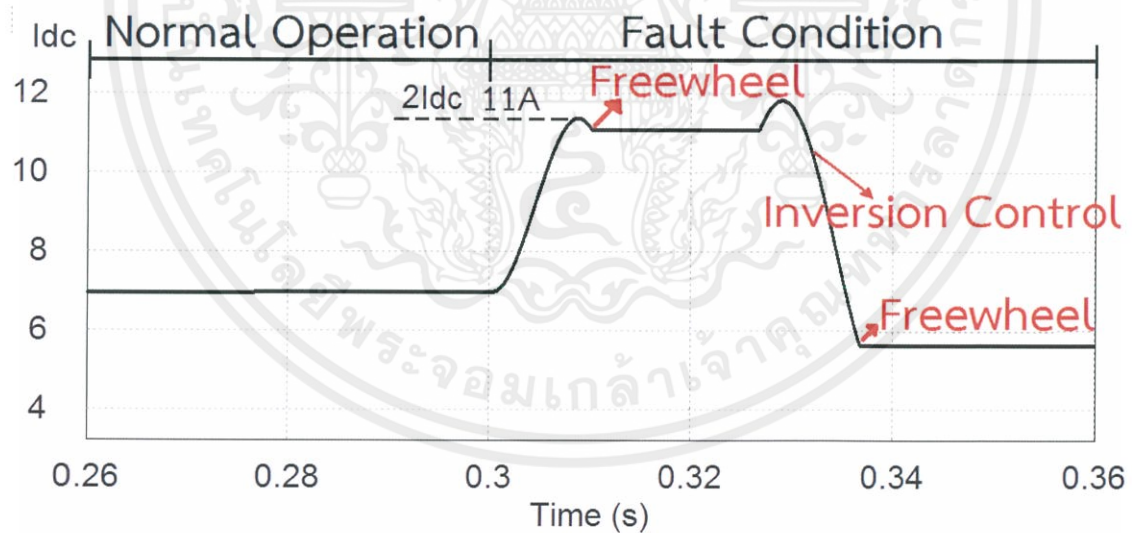
รูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์ทั้งสองตั้งแต่สภาวะชาร์จ (Charging) จนถึงสภาวะหลังเกิดฟอลต์ (After fault) ในสภาวะฟอลต์ช่วง $\frac{1}{2}$ ไซเคิลแรก กระแสลัดวงจรจะไหลผ่านทั้งรีแอคเตอร์ดีซีและเอซี ทำให้กระแสลัดวงจร ไปสะสมในรีแอคเตอร์ดีซี ซึ่งในสภาวะนี้ กระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะถูกต้านไว้ไม่ให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุปกรณ์ตรวจจับพบกระแสลัดวงจร จะเข้าสู่โหมด

การคืนพลังงานกลับสู่ระบบ (inversion control) เพื่อทำการดิสชาร์จรีแอคเตอร์ดีซี ซึ่งหากเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบในทันที จะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซี พุ่งเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในสมการที่ 2 ถึง 3 เท่าของกระแส I_m ในที่นี้จึงเลือกใช้การเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระก่อนที่จะเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซีเป็นไปตามที่กำหนดค่าไว้

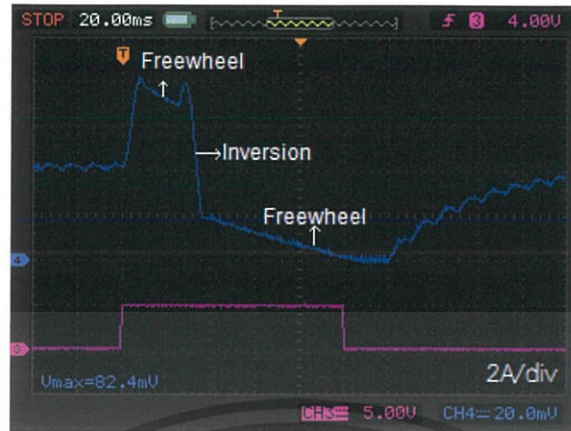
โดยเมื่ออุปกรณ์ตรวจจับกระแสลัดวงจรพบก็จะเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระก่อน (หมายเลข1) โดยให้ T1, T2 off และ T3, T4 on เพื่อปลดรีแอคเตอร์ดีซีออกจากระบบและเตรียมการดิสชาร์จด้วยโหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ แล้วให้รีแอคเตอร์เอซีทำการจำกัดกระแสแทน ในโหมดการไหลวนอิสระจะเป็นการดิสชาร์จรีแอคเตอร์ดีซีด้วยความต้านทานภายใน

หลังจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ(หมายเลข2)ในไซเคิลที่สอง โดยเลื่อนมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ T1, T4 ให้เป็น 120 องศา ในโหมดนี้ รีแอคเตอร์ดีซีจะดิสชาร์จกระแสที่เกิดจากกระแสฟลัดอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมภายในรีแอคเตอร์ดีซี แต่จะทำการดิสชาร์จแค่บางส่วน แล้วรักษาระดับของกระแสให้ใกล้เคียงกับกระแสในสายส่งในสภาวะปกติ เพื่อที่รีแอคเตอร์ดีซีไม่ต้องชาร์จกระแสใหม่ แล้วเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระอีกครั้งเพื่อรักษาระดับกระแส (หมายเลข3)ก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ

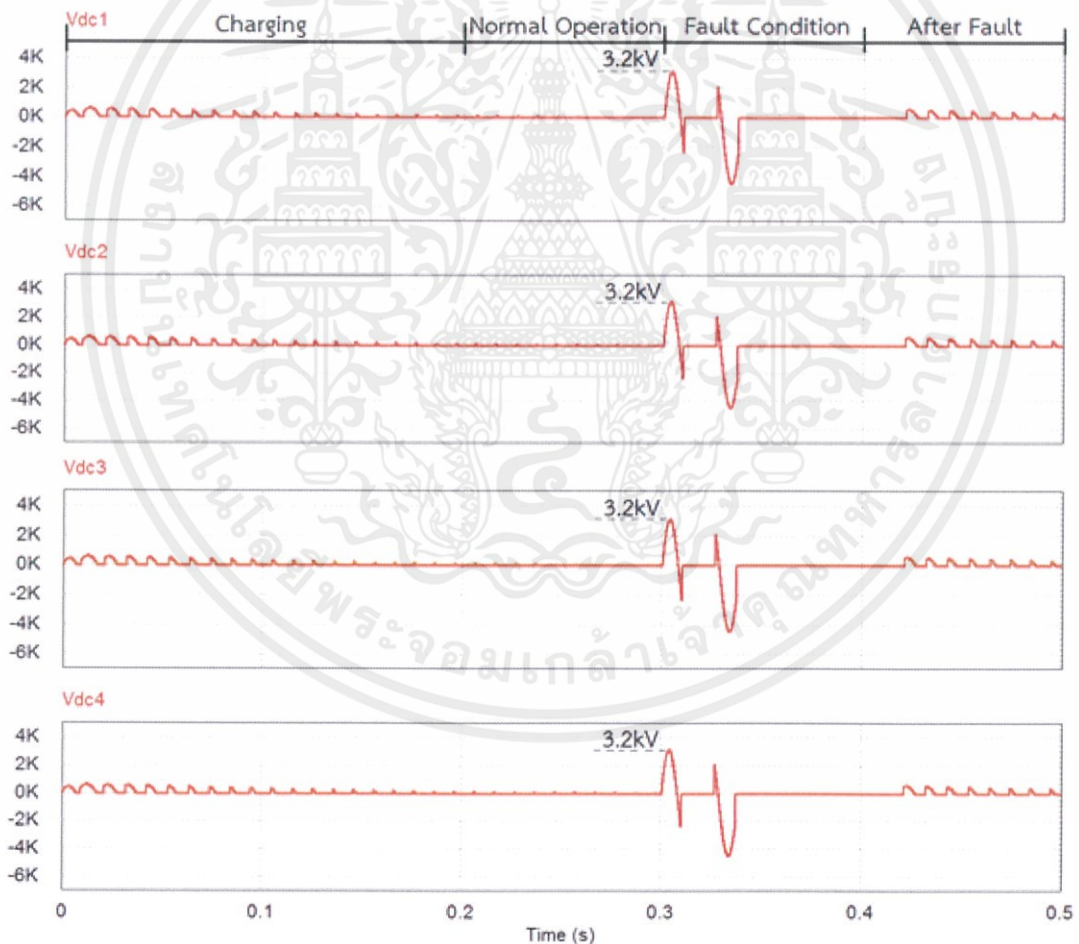
5.1.4 แรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งในสภาวะลัดวงจร



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นกระแสรีแอคเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งจาก PSIM

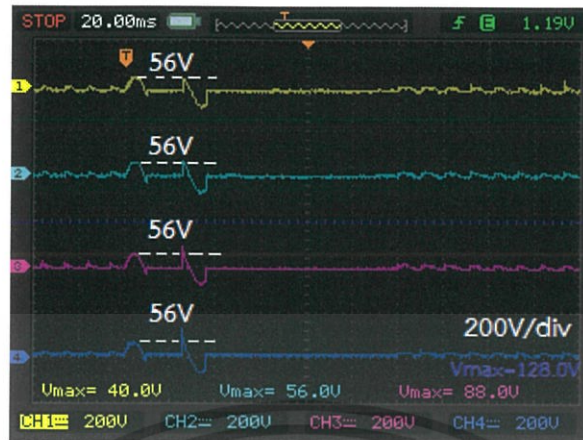


รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสแอกเตอร์ดีซีของเซลล์ที่หนึ่งจากการทดลอง



รูปที่ 5.12 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมรีแอกเตอร์ดีซีของแต่ละเซลล์จาก PSIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

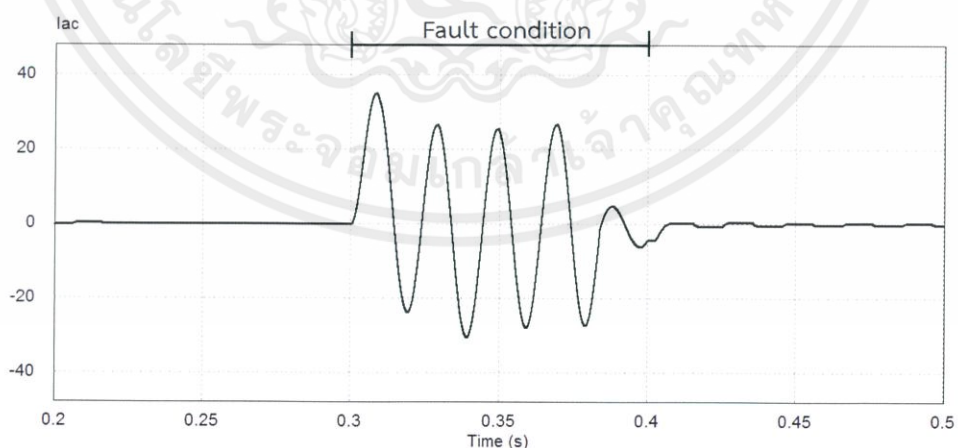


รูปที่ 5.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์ดีซีของแต่ละเซลล์จากการทดลอง

ในรูปที่ 5.10 และ 5.11 กระแสของรีแอคเตอร์ดีซีจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร และจะถูกจำกัดให้อยู่ที่ $2I_m$ ด้วยการควบคุมแบบ freewheeling และใช้การควบคุมแบบ inversion control เพื่อดิสชาร์จกระแสในรีแอคเตอร์ดีซีอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เกิดความร้อน กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ดีซีในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากัน

ในรูปที่ 5.13 และ 5.14 จะเห็นว่าแรงดันต่ำสุดและสูงสุดของรีแอคเตอร์ดีซี จะอยู่ที่ $1/4$ ของแรงดันที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ในลักษณะโมดูล คือให้แรงดันตกคร่อมในแต่ละโมดูลเท่ากัน

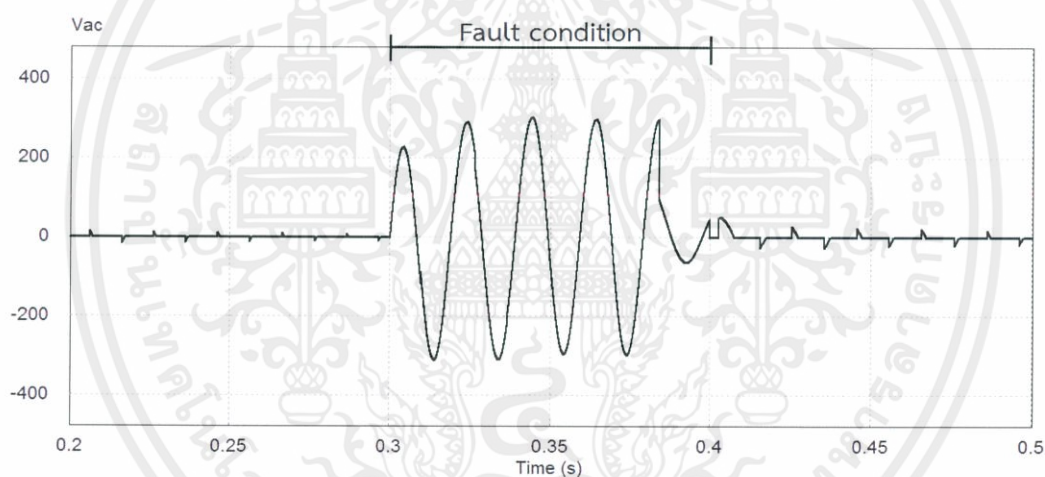
5.1.5 แรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์เอซีในสภาวะลัดวงจร



รูปที่ 5.14 รูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM



รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสของรีแอคเตอร์เอซีจากการทดลอง



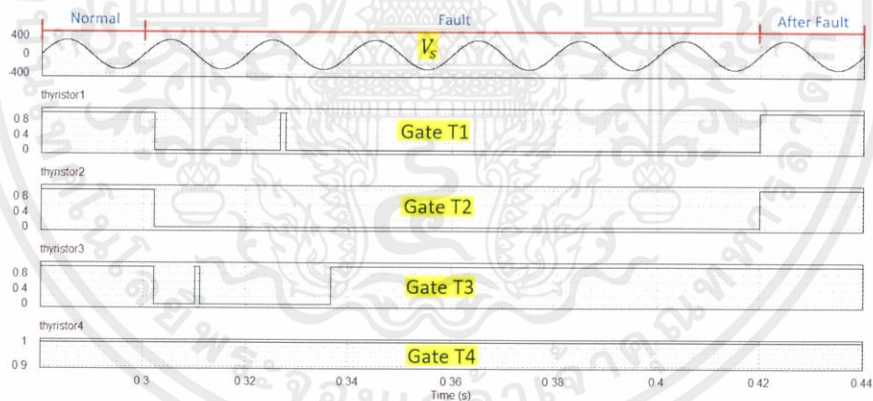
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นแรงดันของรีแอคเตอร์เอซีจาก PSIM



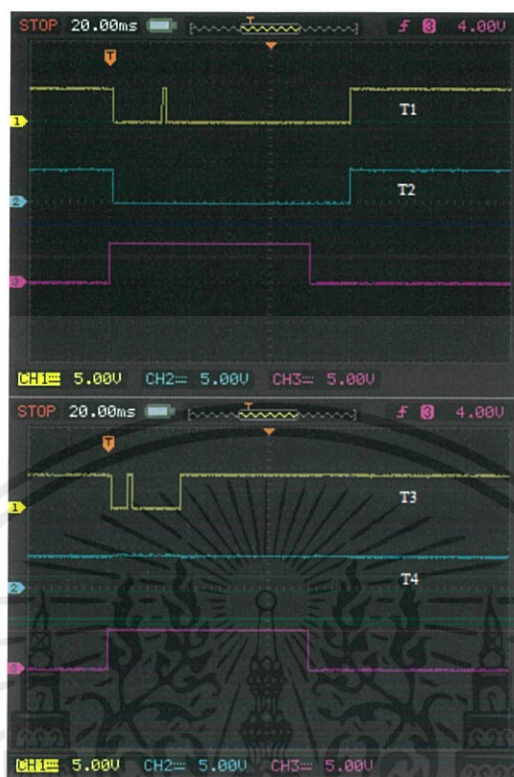
รูปที่ 5.17 รูปคลื่นแรงดันของรีแอคเตอร์เอซีจากการทดลอง

ในรูปที่ 5.14-5.17 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของรีแอคเตอร์เอซี ในสภาวะปกติจะมีแรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์เอซีเล็กน้อยเนื่องจากค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของรีแอคเตอร์ดีซี ในสภาวะลัดวงจร กระแสจะถูกบังคับให้ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซี

5.1.6 สัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์



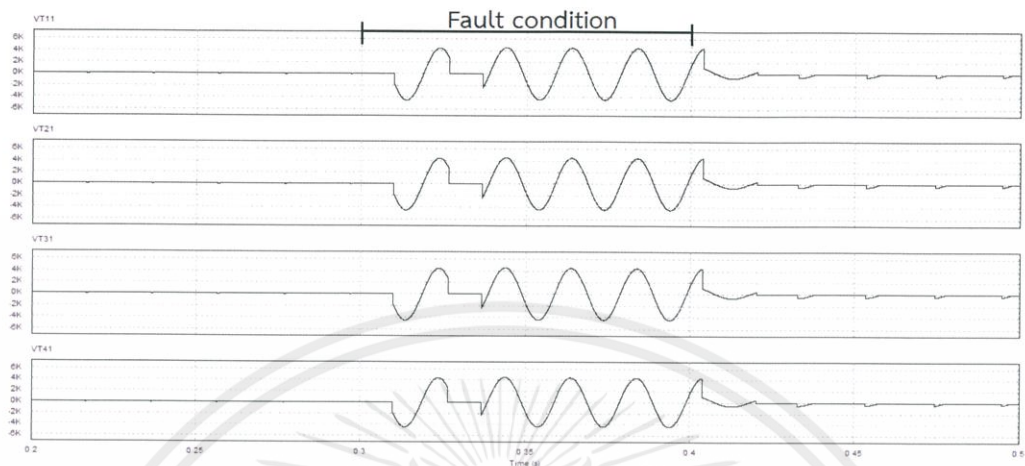
รูปที่ 5.18 รูปคลื่นสัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์และแรงดันแหล่งจ่ายจาก PSIM



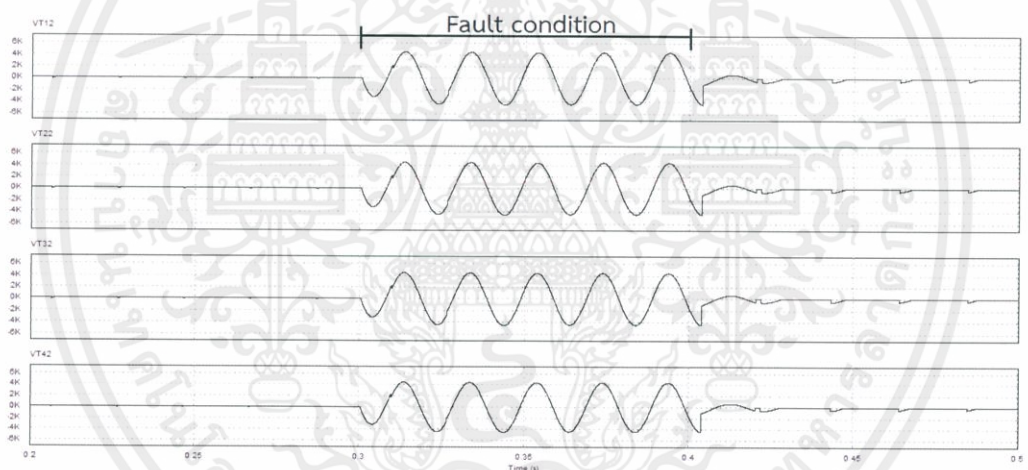
รูปที่ 5.19 รูปคลื่นสัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์จากการทดลอง

จากรูปที่ 5.18 และ 5.19 แสดงสัญญาณนำขั้วเกทไทรสเตอร์ 3 สภาวะ ในสภาวะปกติ ไทรสเตอร์ทั้งสี่จะอยู่ในสถานะ on เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นจะทำการส่งสัญญาณเกท T3, T4 ที่มุม 180 องศา เพื่อเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระ และเมื่อผ่านไปไซเคิลที่สอง ทำการส่งสัญญาณเกท T1, T4 ที่มุม 120 องศาเพื่อเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ แล้วทำการส่งสัญญาณเกท T3, T4 อีกครั้งที่มุม 0 องศาของไซเคิลที่สอง เพื่อเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระ ก่อนที่จะทำการ on ไทรสเตอร์ทุกตัวเมื่อฟอลต์ถูกกำจัดแล้ว

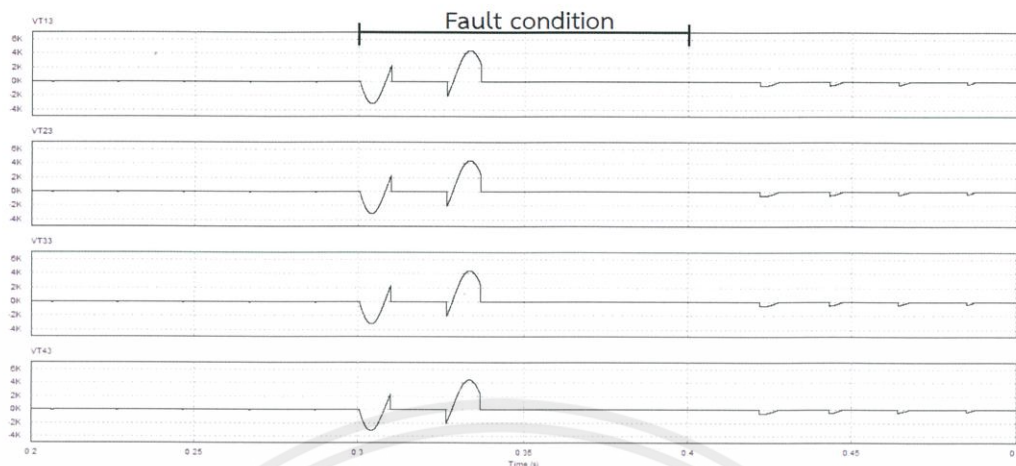
5.1.7 แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ของแต่ละเซลล์



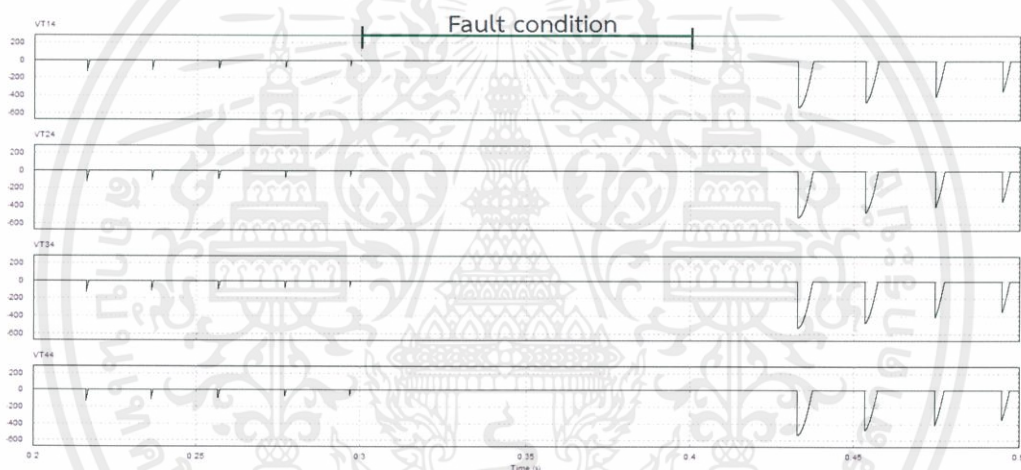
รูปที่ 5.20 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM



รูปที่ 5.21 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM



รูปที่ 5.22 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM

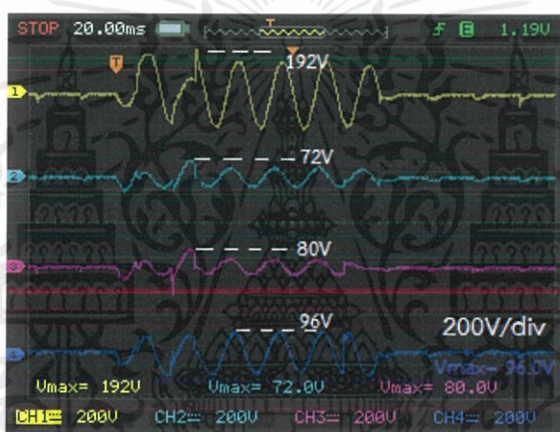


รูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T4 ของแต่ละเซลล์จาก PSIM

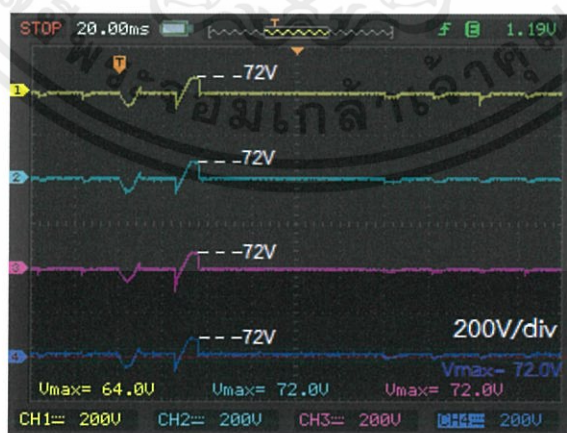
จากรูป 5.20 - 5.23 แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ทั้งสี่ของแต่ละเซลล์ ในทางทฤษฎีนั้น ออกแบบในลักษณะโมดูล ให้บริดจ์ทั้งสี่เซลล์ต่ออนุกรมกันเพื่อให้ทนแรงดันได้สูงขึ้น และมีการแบ่งแรงดันตกคร่อมในแต่ละเซลล์ด้วยขนาดแรงดันที่เท่ากัน จึงทำให้แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ของแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากัน แรงดันตกคร่อมสูงสุดของไทรสเตอร์แต่ละตัวมีค่าไม่เกิน 77V



รูปที่ 5.24 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของแต่ละเซลล์จากการทดลอง

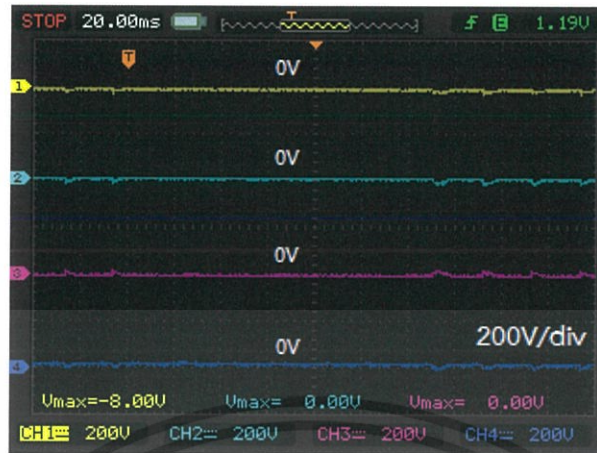


รูปที่ 5.25 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของแต่ละเซลล์จากการทดลอง



รูปที่ 5.26 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของแต่ละเซลล์จากการทดลอง

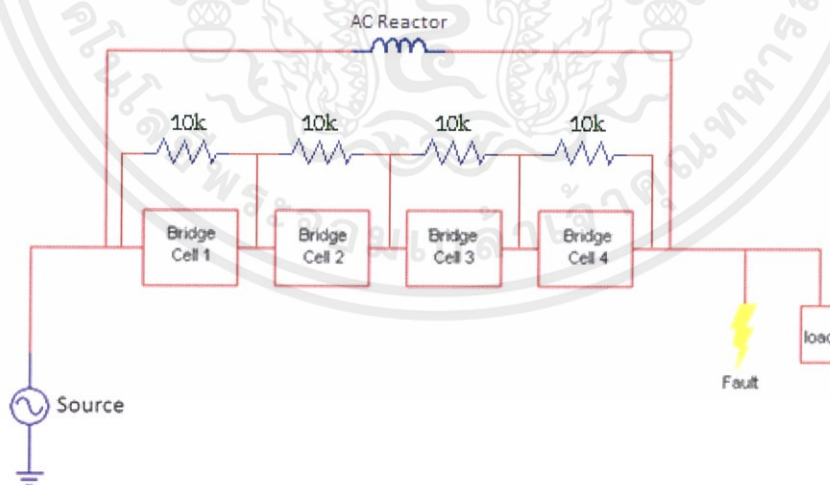
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T4 ของแต่ละเซลล์จากการทดลอง

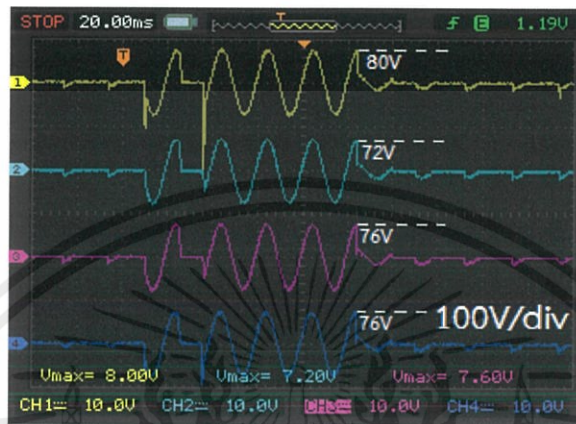
จากรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ทั้งหมด เมื่อต่อแบบบริดจ์เซลล์อนุกรมกัน 4 เซลล์ จากรูปคลื่นจะเห็นว่าในการทดลอง ไม่สอดคล้องกับทฤษฎี รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ รวมถึงแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมแต่ละไทรสเตอร์ มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละเซลล์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวต้านทานค่ามากต่อขนานในแต่ละเซลล์เพื่อแบ่งแรงดัน ให้แต่ละเซลล์มีแรงดันเท่ากัน

5.1.8 แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ของแต่ละเซลล์เมื่อต่อตัวต้านทานขนาน

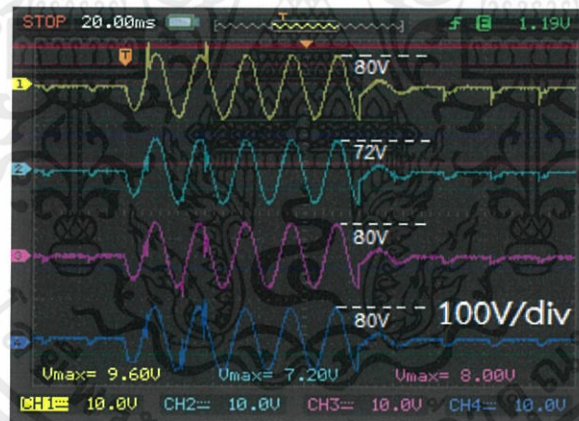


รูปที่ 5.28 โครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรเมื่อต่อตัวต้านทานขนานในแต่ละเซลล์

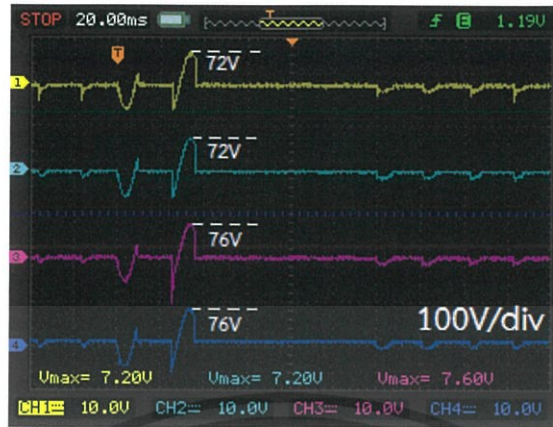
จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดการลัดวงจร แรงดันตกคร่อมในแต่ละเซลล์มีค่าไม่เท่ากัน จึงได้ทำการต่อความต้านทานขนาด $10\text{k}\Omega$ ขนานในแต่ละเซลล์ตามรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.29 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน



รูปที่ 5.30 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T2 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน



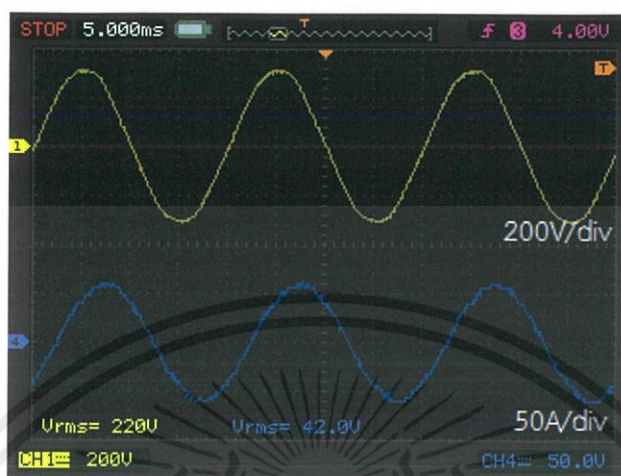
รูปที่ 5.31 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T3 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน



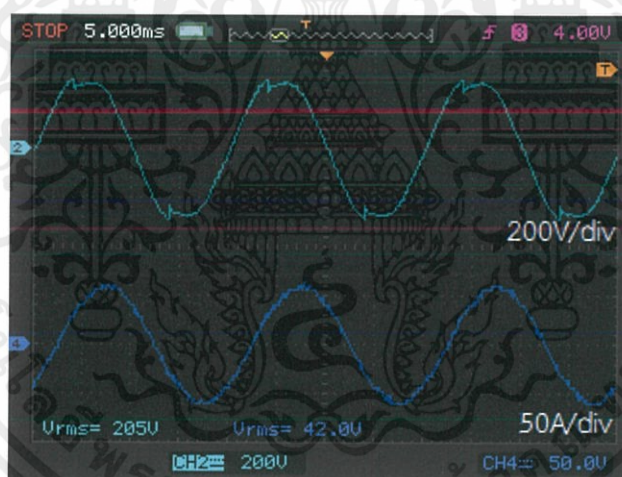
รูปที่ 5.32 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T4 ของทั้งสี่เซลล์จากการทดลองเมื่อต่อความต้านทาน

จากรูปที่ 5.29 – 5.32 เมื่อต่อตัวต้านทานขนาด $10k\Omega$ ขนานในแต่ละเซลล์ จะทำให้แรงดันตกคร่อมในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากัน

5.1.9 แรงดันและกระแสต้านเข้าและด้านออกของอุปกรณ์



รูปที่ 5.33 รูปคลื่นแรงดัน(บน)และกระแส(ล่าง)ทางด้านขาเข้าของอุปกรณ์



รูปที่ 5.34 รูปคลื่นแรงดัน(บน)และกระแส(ล่าง)ทางด้านขาออกของอุปกรณ์

จากรูปที่ 5.33 และ 5.34 แสดงรูปคลื่นแรงดันขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ แรงดันขาเข้ามีค่า 220Vrms แรงดันขาออกมีค่า 205Vrms ที่ด้านยอดของแรงดันขาออกเกิดดิสตอร์ชันขึ้น เกิดจากแรงดันที่ตกคร่อมไทรสเตอร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่เกิดปัญหาดิสตอร์ชัน และสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มวงจรรักษาขึ้นที่รีแอคเตอร์ดีซีในแต่ละเซลล์

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล และขยะ (Biomass and waste power plant) เป็นต้น โครงข่ายไฟฟ้าจึงต้องขยายตัวตาม เพื่อรองรับการเชื่อมต่อของระบบส่งและจ่ายไฟฟ้า เมื่อโครงข่ายไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรในระบบมีค่าสูงขึ้น ระดับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ที่ถูกออกแบบและถูกติดตั้งไว้จะทำให้ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆที่เชื่อมอยู่เกิดความเสียหาย การเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรใหม่นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง และมีความยุ่งยากในการปรับตั้งอุปกรณ์ของระบบป้องกันให้ทำงานร่วมกันใหม่ เทคโนโลยีของอุปกรณ์จำกัดกระแสจึงสามารถช่วยในการแก้ปัญหาเหล่านั้นได้

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแสที่ถูกออกแบบชนิดโซลิตสเตททคนิควงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ที่ใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยไม่ใช้หม้อแปลงกำลังซึ่งมีขนาดใหญ่และใช้พื้นที่ติดตั้งมาก มีโครงสร้างประกอบด้วยโมดูลวงจรบริดจ์ จำนวน 4 เซลล์ แต่ละเซลล์สามารถทนแรงดันได้ 6kV ทำให้อุปกรณ์ที่ออกแบบสามารถใช้งานได้ ในระดับแรงดัน 24kV โดยไม่ต้องใช้หม้อแปลง ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสในระดับแรงดัน 24kV พิกัด 8MVA และทำการจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSIM โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การบายพาสด้วยการนำกระแสเต็มคลื่นของวงจรบริดจ์ในสภาวะปกติ การทำงานในโหมดฟรีวิลของวงจรบริดจ์เมื่อตรวจจับกระแสลัดวงจรได้เพื่อแยกวงจรบริดจ์จากระบบไฟฟ้า ทำให้รีแอคเตอร์เอซีทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร หลังจากนั้นจะทำในโหมดคืนพลังงาน เพื่อลดกระแสในรีแอคเตอร์ดีซีลงจนถึงระดับที่ต้องการจึงเปลี่ยนกลับไปสู่วิธีฟรีวิลอีกครั้ง เพื่อรอกกลับไปทำงานในโหมดปกติต่อไป ผลการจำลองพบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ และสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรลงจาก 2.92kAp ลงมาที่ 1.57kAp ซึ่งเป็นปริมาณ 5 เท่าของกระแสของวงจรที่พิกัด

จากนั้นได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบที่ระดับแรงดัน 220V เพื่อทำการทดสอบการทำงานจริงของอุปกรณ์ ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ถูกตรวจสอบจากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลก่อนนำไปสร้างวงจรต้นแบบ ผลการทดลองจากอุปกรณ์ต้นแบบพบว่าสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรได้ตามที่ออกแบบแต่พบปัญหาการแบ่งแรงดันของไทรสเตอร์ที่ไม่เท่ากัน จึงได้แก้ปัญหาโดยการต่อตัวต้านทานเพื่อแบ่งแรงดันขนานเข้ากับวงจรบริดจ์ทั้งสิ้น ผลการทดลองพบว่าสามารถสมดุลแรงดันที่ไทรสเตอร์ได้

อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาแรงดันด้านโหลด มีความผิดเพี้ยนเนื่องจากการทำงานของไทริสเตอร์ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มวงจรประจุกระแสที่ตีซีรีแอคเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อม ไทริสเตอร์ขณะกระแส ซึ่งควรดำเนินการศึกษาและสร้างต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander Abramovitz and Keuye Ma Smedley, "Survey of Solid State Fault Current Limiters" *IEEE Transactions on Power Electronics.*, Vol. 27. no.6, June 2012. pp. 2770-2782.
- [2] Karady G.G. "Principle of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit" *Generation, Transmission and Distribution Proceedings of the IEC C.*, Vol.139. no. 1, Jan. 1992. pp. 1-6.
- [3] H.G. Sarmiento, "A fault current limiter based on an LC resonant circuit:Design, scale model and prototype field tests," *Proc. IREP Symp.- Bulk Power Syst. Dyn. Control – VII, Revitalizing Oper. Rel.*, Aug. 19-24, 2007, pp. 1-5.
- [4] H. J. Boenig and D. A. Paice. "Fault current limiter using a superconducting coil" *IEEE Trans. Magn.*, vol. 19, no.3, May 1983. pp. 1051-1053.
- [5] M. T. Hagh and M. Abapour. "DC reactor type transformer inrush current limiter" *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 1, no. 5. Sep. 2007. pp. 808-814.
- [6] Z. Lu, D. Jiang, and Z. Wu, "A new topology of fault-current limiter and its parameters optimization," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conf.* 2003, pp. 462-465.
- [7] V. K. Sood and S. Alam. "3-phase fault current limiter for distribution systems" *Proc. Int. Conf. Power Electronics, Drive and Energy Systems*, 2006, pp. 2-6.
- [8] นพดล สัจจาพันธ์, "อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดโซลิดสเตทแบบบริดจ์สำหรับหนึ่งเฟสซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส," *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2553.
- [9] Gang Chen, Daozhuo Jiang, Zhengyu and Zhaolin Wu, "A New Proposal for Solid State Fault Current Limiter and Its Control Strategies," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol.2. pp. 1468-1473, June 2004.
- [10] สำนักงานโครงการรับซื้อไฟฟ้า จากแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2016. *คู่มือการของจำหน่ายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*. [Online]. Available : <http://www.efe.or.th/pdf/PEA-VSPP.pdf>.
- [11] Powerex. 2015. *Discrete Thyristor*. [Online]. Available : <http://www.pwr.com/Product/TAKC651103DH>.

- [12] นรากร สามวัง, “อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.



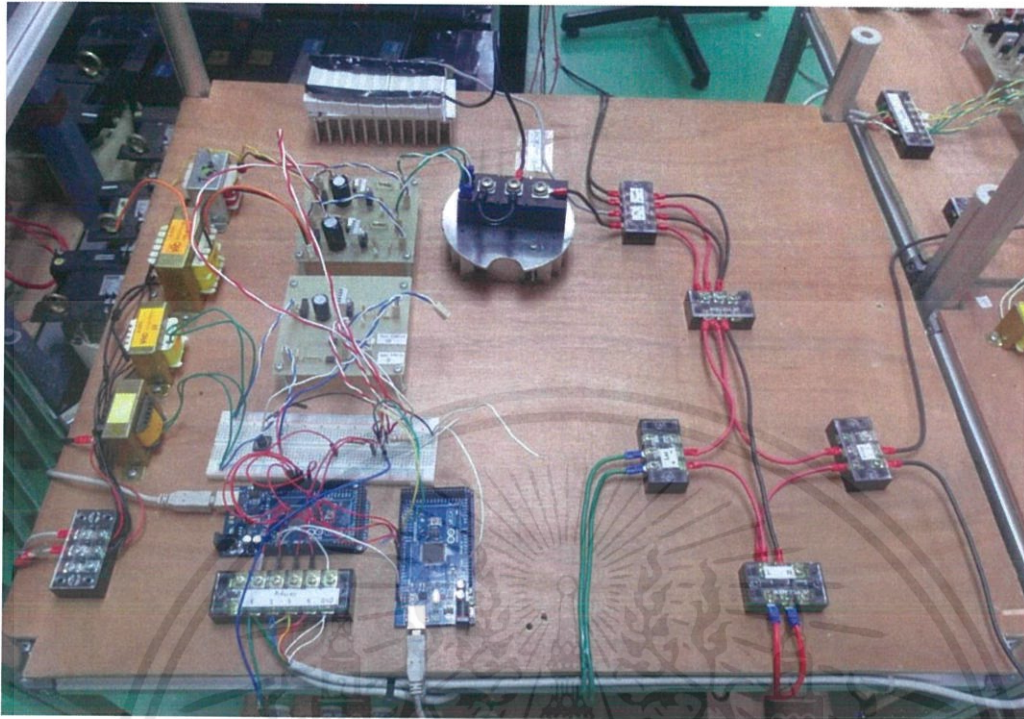
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



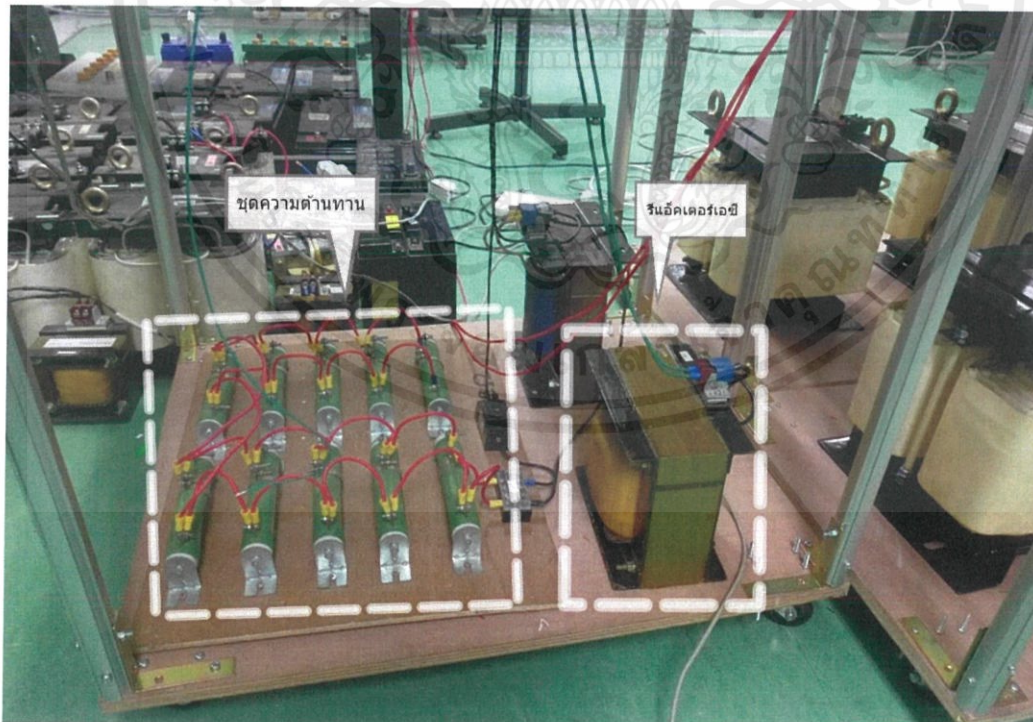
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

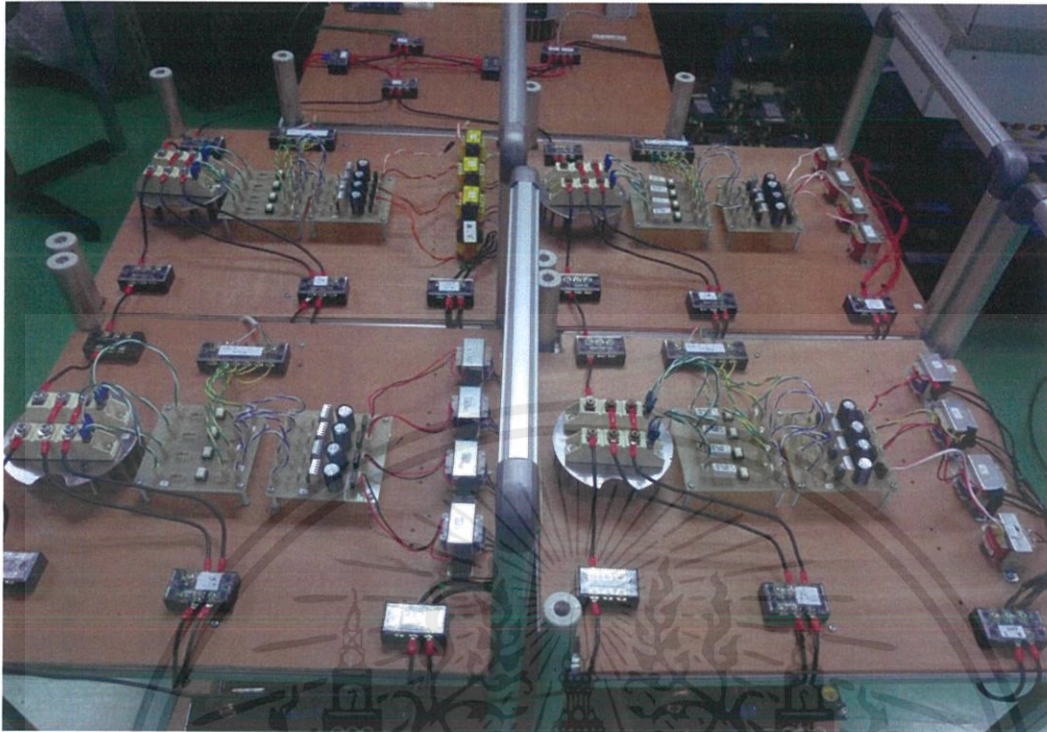


รูปที่ ก.1 ชุดวงจรควบคุม



รูปที่ ก.2 ความต้านทานลัดวงจรและรีเลย์แอคเตอร์เอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ชุดควบคุมสัญญาณเกทไทรสเตอร์

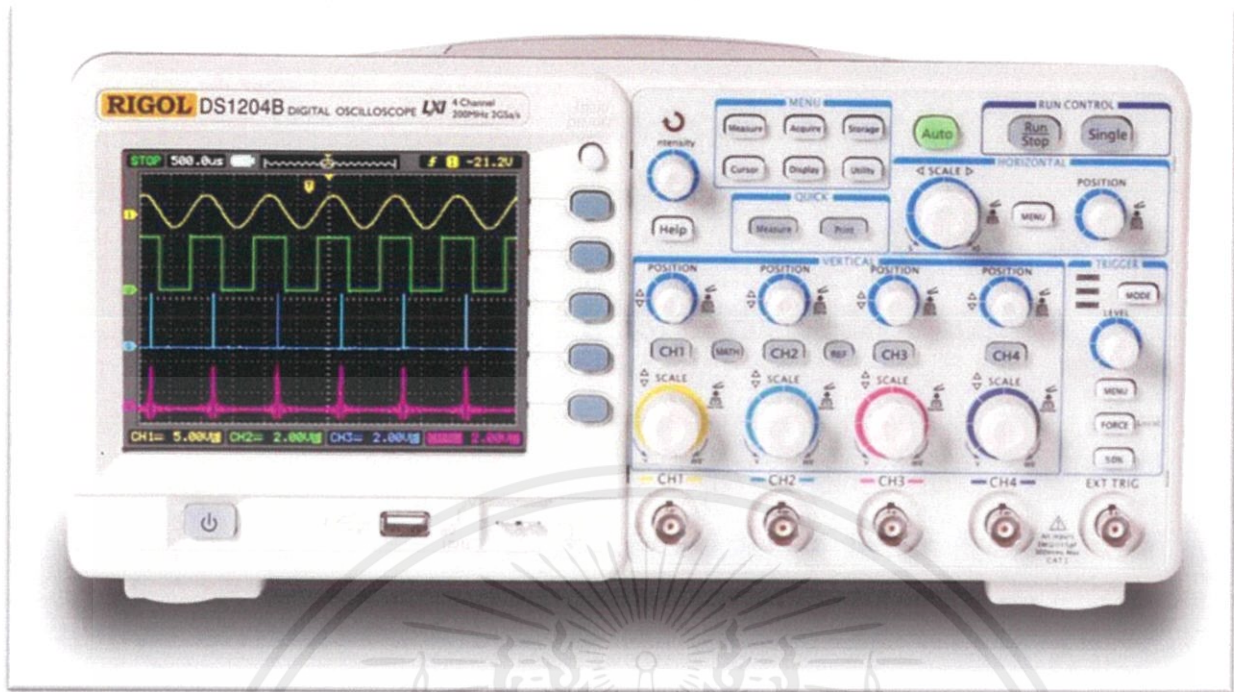


รูปที่ ก.4 รีแอกเตอร์ตีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 Digital Oscilloscope RIGOL รุ่น DS1204B



รูปที่ ข.2 Digital meter YOKOGAWA รุ่น 73402

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 Current Probe FRUKE รุ่น 80i-110s



รูปที่ ข.4 Current Probe HAMEG รุ่น HZO50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 Differential Probe Sapphire รุ่น SI-9110



รูปที่ ข.6 Differential Probe YOKOGAWA รุ่น 700625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรถับบริดจ์แบบหลายเซลล์ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส

A Multi-Cell Bridge-Type Fault Current Limiter with AC Limiting Reactor

พันธรด เตชะมา ภูริช เหมือนอ้อย เศรษฐพงษ์ ภาษาเวทย์ และ สุชีรา ลิงห์ประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail: sompob.po@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมนี้นำเสนออุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรโซลิดสเตทสวิทช์ อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรนี้ประกอบด้วยเซลล์ของวงจรถับกระแสชนิดควบคุมเฟสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสกับรีแอคเตอร์ดีซีหลายเซลล์ต่ออนุกรมกัน โดยมีรีแอคเตอร์เอซีต่อขนานกับวงจรถับกระแสทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรนี้สามารถใช้งานในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก การออกแบบในลักษณะ โมดูลาร์ทำให้การสร้างและซ่อมบำรุงทำได้ง่ายขึ้น ในรายงานนี้ได้แสดงการออกแบบการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบขึ้น ผลการจำลองและการทดลองจากอุปกรณ์ต้นแบบที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: จำกัดกระแสลัดวงจร บายพาสรีแอคเตอร์ สวิตช์โซลิดสเตท

Abstract

This engineering project proposes a solid-state fault current limiter. The solid-state fault current limiter composes of multiple cells of single-phase bridge controlled rectifier with DC reactor connecting in series and an AC reactor connected in parallel with cascaded rectifier cells performing current limiting. The proposed fault current limiter can be used in medium-voltage power system without power transformer so the system is more compact. With modular design of each rectifier cell, the construction and maintenance of the system could be simplified. In this report, the circuit designs, the computer simulation and the construction of the solid-state fault current limiter prototype are presented. The simulation and experimental results show that the proposed fault current limiter can properly operate.

Keywords: Fault Current Limiter, Bypass Reactor, Solid-State

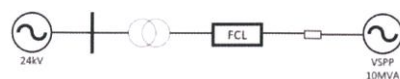
1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลและขยะ (Biomass and waste power plant) เป็นต้น โครงการจ่ายไฟฟ้าจึงต้องขยายตัวตาม เพื่อรองรับการเชื่อมต่อของระบบส่งและจ่ายไฟฟ้า เมื่อโครงข่ายไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรในระบบมีค่าสูงขึ้น [1] ระดับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ [2] ที่ถูกออกแบบและถูกติดตั้งไว้จะทำให้ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เชื่อมต่ออยู่เกิดความเสียหาย [3] การเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรใหม่นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง และมีความยุ่งยากในการปรับตั้งอุปกรณ์ของระบบป้องกันให้ทำงานร่วมกันใหม่ เทคโนโลยีของอุปกรณ์จำกัดกระแสจึงสามารถช่วยในการแก้ปัญหาเหล่านั้นได้

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบใช้โซลิดสเตทสวิทช์ ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง อุปกรณ์ยังสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงสามารถต่ออุปกรณ์ให้รับพิกัดกระแสหรือแรงดันที่สูงขึ้นได้ การควบคุมความร้อนที่ทำได้ง่าย ช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในระบบควบคุมความร้อน อีกทั้งยังมีความน่าเชื่อถือสูง [4]

ต่อมามีการพัฒนาใช้โซลิดสเตทสวิทช์แบบบริดจ์ (Bridge-type FCL) ในสภาวะปกติ ไทริสเตอร์จะทำงานเป็นวงจรถับบริดจ์เรียงกระแสเต็มคลื่น เมื่อเกิดกระแสลัดวงจร ไทริสเตอร์จะถูกควบคุมมุนนำกระแสให้เพิ่มขึ้นเพื่อบังคับกระแสลัดวงจรให้ไหลผ่านรีแอคเตอร์เอซีต่อมามีการออกแบบต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ในระดับแรงดันที่สูงขึ้น [5] แต่มีข้อเสียคือกระแสในสายส่งในสภาวะปกติจะต้องไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ซึ่งใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากและมีราคาแพง

2. อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรสำหรับระบบจำหน่ายแรงดัน

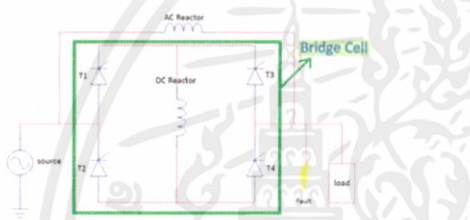


ปานกลาง

รูปที่ 1 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP)

รูปที่ 1 พิจารณาแผนภาพแรงดันสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 24kV และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer : VSPP) สามารถผลิตได้ ซึ่งกำหนดไว้ว่าสามารถผลิตได้ไม่เกิน 10MVA [6] ดังนั้น พิกัดกระแสของสายส่งจึงอยู่ที่ 240A ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์จำกัดกระแส จำกัดกระแสที่ 5 เท่าของพิกัดกระแสสายส่ง จะสามารถออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสได้

2.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดวงจรบริดจ์



รูปที่ 2 อุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดวงจรบริดจ์ สองรีแอคเตอร์

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบบริดจ์ซึ่งประกอบด้วยบายพาสรีแอคเตอร์เอชี่ ต่อขนานกับวงจรบริดจ์ ไทริสเตอร์ ซึ่งมีรีแอคเตอร์อีชี่ต่ออยู่ทางคานไฟฟ้ากระแสตรง

2.2 หลักการทำงาน

ในช่วงเริ่มต้น ไทริสเตอร์ T1-T4 จะนำกระแสเต็มคลื่น เพื่อชาร์จรีแอคเตอร์อีชี่จนเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ

ในสภาวะปกติ รีแอคเตอร์อีชี่จะเปรียบเสมือนลัดวงจร ทำให้กระแสไหลผ่านรีแอคเตอร์อีชี่ หลังจากที่อุปกรณ์ตรวจพบกระแสลัดวงจร รีแอคเตอร์เอชี่จะทำการแทรกเข้ามาในระบบอัตโนมัติเพื่อทำการจำกัดกระแสลัดวงจร ในช่วง ½ ไซเคิลแรก กระแสลัดวงจรจะไหลผ่านทั้งรีแอคเตอร์เอชี่และอีชี่ หลังจากนั้นเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ (inversion control) เพื่อทำการดิสชาร์จรีแอคเตอร์อีชี่ ซึ่งหากเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบในทันที จะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์อีชี่ พุ่งเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ในสมการที่ 2 ถึง 3 เท่าของกระแส I_m ในบทความนี้จะเลือกใช้การเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระก่อนที่จะเข้าสู่โหมดการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์อีชี่เป็นไปตามที่กำหนดค่าไว้

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น จะเริ่มเข้าสู่โหมดการไหลวนอิสระก่อนที่จะเข้าสู่โหมดคืนพลังงานกลับสู่ระบบใน ไซเคิลที่สอง โดยเลื่อนมุมนำกระแสของไทริสเตอร์ T1, T4 ให้เป็น 120 องศา [7] ในโหมดนี้รีแอคเตอร์อีชี่จะดิสชาร์จกระแสที่เกิดจากกระแสฟลลต่ออย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมภายในรีแอคเตอร์อีชี่

2.3 ตัวแปรและการกำหนดค่า

ค่าของรีแอคเตอร์เอชี่ L_a สำหรับจำกัดกระแสลัดวงจรสามารถคำนวณได้จากระดับกระแสลัดวงจรที่ยอมให้ผ่านได้ดังสมการ

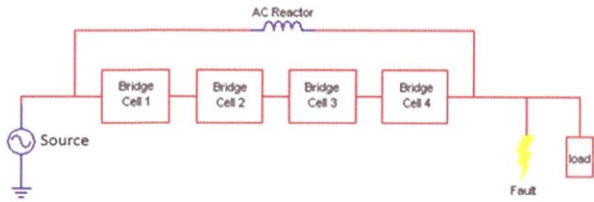
$$L_a = \frac{U_n}{\omega I_{Sc}} \tag{1}$$

เมื่อ U_n คือแรงดันเฟสของระบบ ω คือความถี่เชิงมุมและ I_{Sc} คือกระแสลัดวงจรที่ยอมให้ผ่านได้ ค่าของรีแอคเตอร์อีชี่ L_d เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม การออกแบบให้เก็บพลังงานน้อยเมื่ออยู่ในสภาวะลัดวงจร ซึ่งจะได้ค่ารีแอคเตอร์อีชี่ที่เหมาะสมดังสมการที่ 2 เมื่อ U_{Im} คือค่าแรงดันเป็นไปได้สูงสุดที่ตกคร่อมรีแอคเตอร์อีชี่ และ I_m คือกระแสที่ไหลเข้ารีแอคเตอร์อีชี่ในสภาวะคงตัว [8]

$$L_d = \frac{2U_{Im}}{\omega I_m} \tag{2}$$

3. อุปกรณ์จำกัดกระแสแบบหลายเซลล์

เนื่องจากข้อจำกัดของพิกัดแรงดัน ไทริสเตอร์ เมื่อนำอุปกรณ์จำกัดกระแสมาใช้ในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ต้องผ่านหม้อแปลงเพื่อลดระดับแรงดัน จึงต้องนำไทริสเตอร์แบบบริดจ์สัมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้น ที่แรงดันของระบบไฟฟ้า 24kV ดังนั้น จำนวนของบริดจ์เซลล์จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ไทริสเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่เสียหาย กับค่าแรงดันตกคร่อม ไทริสเตอร์ในสภาวะลัดวงจร หากพิจารณาจากพิกัด ไทริสเตอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน พิกัดแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 6.5 kV ที่พิกัดกระแส 1,110A [9] กับค่าแรงดันเฟสสูงสุดที่ 19.59 kV จะต้องใช้บริดจ์เซลล์จำนวน 4 ชุดต่ออนุกรมกัน เพื่อให้สามารถรับแรงดันเฟสสูงสุดได้ บทความนี้จะจึงเสนอการใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 อุปกรณ์จำกัดกระแสในลักษณะวงจรบริดจ์หลายเซลล์

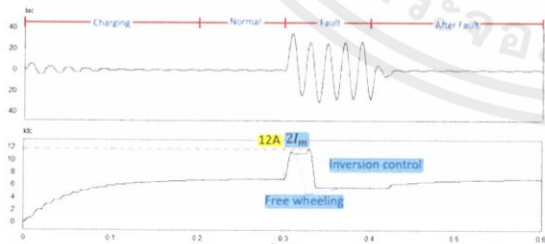
จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์จำกัดกระแสตัวจริงแบบบริดจ์สำหรับหนึ่งเฟส ต่อแบบหลายเซลล์เพื่อรองรับระบบไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลางของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ข้อดีของการใช้งานในรูปแบบหลายเซลล์คือออกแบบในลักษณะ Modular ทำให้สามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย, เพิ่มความน่าเชื่อถือให้แก่อุปกรณ์จำกัดกระแส อีกทั้งหากไม่ต่อผ่านหรือแปลงจะทำให้อุปกรณ์จำกัดกระแสมีขนาดเล็กลงและประหยัด เนื่องจากหม้อแปลงมีราคาที่สูงและใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก

4. การจำลองการทำงาน

จำลองการทำงานของอุปกรณ์จำกัดกระแสตัวจริงด้วยโปรแกรม PSIM โดยมีพิกัดแรงดัน 220V กระแสไหลด 5A ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 สร้างกระแสตัวจริง 75A ที่มุมเฟส 0 องศา

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน [4]

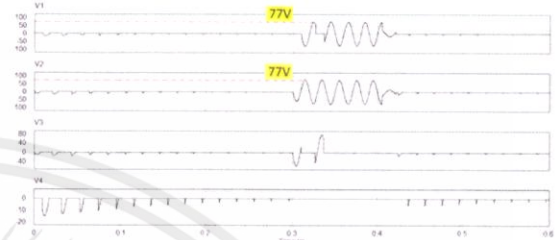
แรงดันไลน์	220V
กระแสไหลด	5A
อิมพีแดนซ์ไหลด	$35.2+j43.74\Omega$
ความต้านทานลัดวงจร	2.93Ω
รีแอคเตอร์เอชซี	35mH
รีแอคเตอร์ดีซีต่อ 1 วงจรบริดจ์	70mH



รูปที่ 4 รูปคลื่นกระแสในรีแอคเตอร์เอชซี (บน) และรีแอคเตอร์ดีซี (ล่าง)

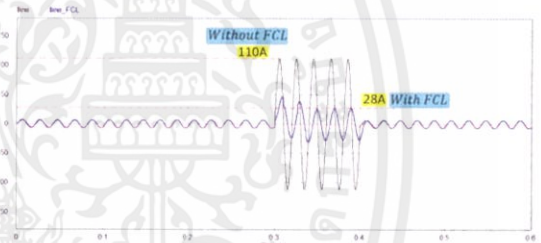
ในรูปที่ 4 สภาวะ Charging กระแสในรีแอคเตอร์ดีซีจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่กระแสในรีแอคเตอร์เอชซีจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเกิดฟอลต์ บริดจ์

ไทรสเตอร์จะควบคุมให้อยู่ในโหมดไหลวนอิสระและคืนพลังงานกลับสู่ระบบเพื่อลดฮาร์โมนิกกระแสในรีแอคเตอร์ดีซี ส่วนกระแสฟอลต์ทั้งหมดจะไหลผ่านรีแอคเตอร์เอชซี เมื่อฟอลต์ถูกกำจัดแล้ว บริดจ์ไทรสเตอร์จะนำกระแสเต็มคลื่นแล้วเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ T1-T4 ของบริดจ์หนึ่งเซลล์

ในรูปที่ 5 จะเห็นว่าในสภาวะฟอลต์ (ช่วง 0.3-0.4s) แรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์สูงสุดอยู่ที่ 77V ซึ่งสามารถเลือกใช้พิกัดแรงดันไทรสเตอร์ที่เหมาะสมได้



รูปที่ 6 รูปคลื่นกระแสในสายส่งเมื่อติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแส

จากรูปที่ 6 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสแล้ว กระแสในสายส่งจะมีขนาดลดลงจาก 110 เหลือ 28A ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอ โครงสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแสชนิดสวิตซ์โซลิดสเตทชนิดวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ ใช้สำหรับระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer : VSPP) ใช้ในระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง ใช้รีแอคเตอร์เอชซีในการจำกัดกระแสตัวจริง มีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM และสร้างเครื่องต้นแบบจำลองการทำงานที่แรงดัน 220V ผลการจำลองคือสามารถลดขนาดของกระแสตัวจริงจาก 110 เหลือ 28A เมื่อเกิดฟอลต์ กระแสตัวจริงจะถูกจำกัดในทันทีภายใน 1/2 ไซเคิลแรก ส่วนกระแสตัวจริง จะถูกจำกัดด้วยรีแอคเตอร์เอชซี ส่วนรูปแบบการต่อวงจรบริดจ์แบบหลายเซลล์ จะทำให้

แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะเกิดฟอลต์ลดลง ทำให้ไม่ต้องต่อผ่านหม้อหม้อใช้โนแรงดันปานกลาง แปลงกำลัง การต่อแบบหลายเซลล์มีข้อดีคือทำให้ดูแลรักษาและซ่อมบำรุงได้ง่ายกว่าขณะเป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่ แนวทางการควบคุม ใช้การไหลวนอิสระและการคืนพลังงานกลับสู่ระบบ ดิสชาร์จกระแสในรีแอคเตอร์ดีซีอย่างรวดเร็วและไม่เกิดความร้อน

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก คร. สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญาานิพนธ์นี้ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก โครงการ MEIDENSHA CORPORATION ENDOWED COURSE IN KMUTL

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander Abramovitz and Keuye Ma Smedley, "Survey of Solid-State Fault Current Limiters" IEEE Transactions on Power Electronics., Vol.27, no. 6, June 2012. Pp. 2770-2782
 - [2] "Using current-limiting fuses to increase short circuit current ratings of industrial control panels," Littelfuse, Des Plaines, ratings of industrial control panels," Littelfuse, Des Plaines, IL, USA, Applicat. Note, 2007. [Online]. Available: http://www.littelfuse.com/data/en/Short_Circuit_Current_Ratings_Literature/PF992UsingFusestoIncreaseYourSCCR.pdf.
 - [3] T.W. (Ted) Olsen, "Anatomy of a short circuit," Siemens Power Transmission and Distribution, Inc., Raleigh, NC, USA, TechTopics no. 44, rev. 01, Dec. 12, 2003.
 - [4] นรากร สามวัง, "อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดวงจรถับรีดจ์แบบหลายเซลล์ซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
 - [5] Gang Chen, Daozhao Jiang, Zhengyu and Zhaolin Wu, "A New Proposal for Solid State Fault Current Limiter and Its Control Strategies," IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.2. pp. 1468-1473, June 2004.
 - [6] สำนักงานโครงการรับซื้อไฟฟ้า จากแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2016. คู่มือการของจำหน่ายไฟฟ้ากับการไฟฟ้า
- ส่วนภูมิภาค.** [Online]. Available: <http://www.efe.or.th/pdf/PEA-VSPP.pdf>.
- [7] นพดล สัจจาพันธ์, "อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดโซลิดสเตทแบบบริดจ์สำหรับหนึ่งเฟสซึ่งใช้รีแอคเตอร์เอซีในการจำกัดกระแส." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
 - [8] Z. Lu, D. Jiang, and Z. Wu, "A new topology of fault-current limiter and its parameters optimization," in Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conf. 2003, pp. 462-465.
 - [9] Powerex (2015, July 18), "Discrete Thyristor." [Online]. Available: <http://www.pwr.com/Product/TAKC651103DH>.
- 

นายพันรต เตชะมา
ปัจจุบันศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่สนใจ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายกรีช เหมือนอ้อย
ปัจจุบันศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่สนใจ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายเศรษฐพงษ์ ภาษาวงษ์
ปัจจุบันศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่สนใจ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นางสาวสุชีรา สิงห์ประเสริฐ
ปัจจุบันศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่สนใจ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

	<p>นายพันธรถ เตชะมา วัน/เดือน/ปีเกิด 30 พฤษภาคม 2538 ที่อยู่ 79/37 หมู่บ้านมณีแก้ว ถนนแสนสุข ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัด ชลบุรี 20130 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิต “พิบูลบำเพ็ญ” มหาวิทยาลัยบูรพา Email : thai0530@hotmail.com</p>
	<p>นายกรวิช เหมือนอ้อย วัน/เดือน/ปีเกิด 26 กันยายน 2537 ที่อยู่ 24/6 หมู่ 2 ตำบลปากแพรก อำเภอ เมือง จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวิสุทธิรังสี Email : gap_d.angelo@hotmail.com</p>
	<p>นายเศรษฐพงศ์ ภาษาเวทย์ วัน/เดือน/ปีเกิด 11 พฤษภาคม 2538 ที่อยู่ 69 หมู่ 1 ตำบลหาดคำ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย 43000 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร Email : Setthapong38@hotmail.com</p>
	<p>นางสาวสุชีรา สิงห์ประเสริฐ วัน/เดือน/ปี 23 มีนาคม 2538 ที่อยู่ 370/8 หมู่ 5 ตำบลหนองกอมเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร Email : sucheera.ser@gmail.com</p>