

การศึกษาผลประโยชน์และผลกระทบของตัวจำกัดกระแสไฟฟร่องแบบตัวนำยิ่งยวด  
ในระบบ 115 กิโลโวลต์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Study on Benefits and Impacts of Superconducting Fault Current Limiter  
in 115 kV Systems

Mr. Worakiat Kraikiat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



วรเกียรติ ไกรเกียรติ : การศึกษาผลประโยชน์และผลกระทบของตัวจำกัดกระแสผิดพลาด  
แบบตัวนำยิ่งยวดในระบบ 115 กิโลโวลต์ (A Study on Benefits and Impacts of  
Superconducting Fault Current Limiter in 115 kV Systems) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 90 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลประโยชน์และผลกระทบของการใช้ตัวจำกัดกระแส  
ผิดพลาดแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting fault current limiter : SCFCL) ในระบบ 115 kV  
โดยจำลองเปรียบเทียบผลระหว่างระบบที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ด้วยโปรแกรม DigSILENT  
ซึ่งในส่วนผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL จะแสดง การลดกระแสไดนามิกส์ การลดกระแส  
ลัดวงจรในระบบ การลดกำลังไฟฟ้าจากการลัดวงจร การลดแรงดันตกชั่วขณะ และการลดกระแสฟุ้ง  
เข้าหม้อแปลง ในส่วนผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL จะแสดง การเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานของ  
รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน การจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความไม่สมดุลเมื่อ  
อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL เสียหาย สิ่งเหล่านี้เป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า  
ที่มีแผนจะติดตั้งอุปกรณ์ SCFCL



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

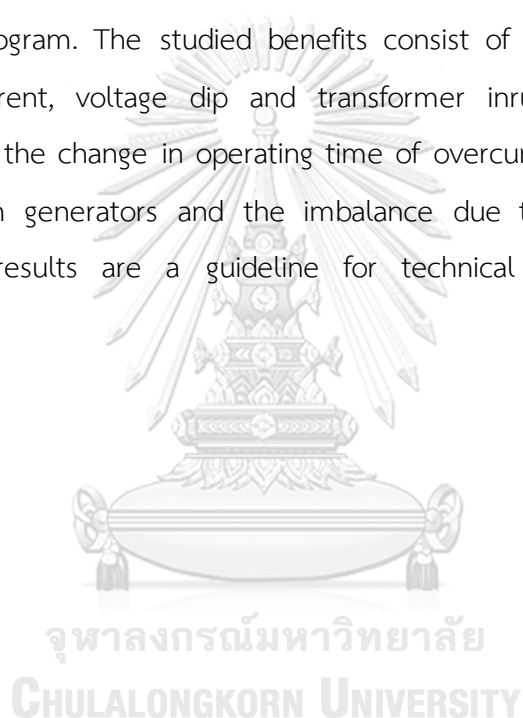
ปีการศึกษา 2560

# # 5870386921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER / DYNAMIC CURRENT /  
FAULT CURRENT / VOLTAGE DIP / INRUSH CURRENT

WORAKIAT KRAIKIAT: A Study on Benefits and Impacts of Superconducting  
Fault Current Limiter in 115 kV Systems. ADVISOR: CHANNARONG  
BANMONKOL, Ph.D., 90 pp.

This thesis presents a study on benefits and impacts of applying  
the superconducting fault current limiter (SCFCL) in a 115 kV system, using simulation  
with DlgSILENT program. The studied benefits consist of the reduction in dynamic  
current, fault current, voltage dip and transformer inrush current. The studied  
impacts consist of the change in operating time of overcurrent relay, the increase in  
fault current from generators and the imbalance due to superconductor failure.  
These obtained results are a guideline for technical consideration on SCFCL  
application



Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จะกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชัย เตชสุนันต์ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชชัย ชัยทัศนีย์ (กรรมการ) และดร.อรรถ พยอมหอม (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6.1 หลักการทำงานและการออกแบบ .....	3
1.6.2 การศึกษาการประยุกต์ใช้ SCFCL ในระบบไฟฟ้า.....	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน .....	5
2.1 ฟอลต์.....	5
2.1.1 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า .....	5
2.1.2 การเกิดฟอลต์แบบสามเฟส.....	5
2.1.3 การเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน.....	6
2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า .....	6
2.3 การป้องกันระบบไฟฟ้า .....	7

2.3.1 ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า .....	8
2.3.2 คุณสมบัติของระบบป้องกัน .....	8
2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง .....	9
2.4.1 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ (Active Method) .....	10
2.4.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ (Passive Method) .....	13
บทที่ 3 ระบบไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ และ Superconducting fault current limiter (SCFCL) ที่ ใช้ในการศึกษา .....	16
3.1 ระบบไฟฟ้าที่จะนำมาศึกษา .....	16
3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้า .....	17
3.3 แบบจำลองของ SCFCL .....	19
3.3.1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL .....	20
3.3.2 ระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL .....	21
3.3.3 ตรวจสอบแบบจำลองของ SCFCL .....	22
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์กรณีศึกษาผลประโยชน์ของ SCFCL บนระบบ 115 กิโลโวลต์ .....	25
4.1 การลดกระแสไดนามิกส์ .....	26
4.2 การลดกระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ .....	29
4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆ .....	33
4.4 การลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL .....	35
4.4.1 การลดพลังงานไฟฟ้าจากการลัดวงจร .....	42
4.4.2 พิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ภายในระบบ IPP .....	43
4.4.3 พิจารณาระยะการลดกระแสลัดวงจร .....	46
4.5 การลดแรงดันตกชั่วขณะ .....	49
4.6 การลดกระแสพุ่งเข้าห้อม้อแปลง .....	54



บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์กรณีศึกษาผลกระทบของ SCFCL ระบบ 115 กิโลโวลต์.....	58
5.1 การเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน .....	58
5.2 การจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	64
5.2.1 สาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น .....	67
5.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น .....	70
5.3 ความไม่สมดุลเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL เสียหาย.....	81
5.3.1 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส.....	81
5.3.2 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส.....	82
5.3.3 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส.....	83
บทที่ 6 สรุปผล และ ข้อเสนอแนะ.....	84
6.1 สรุปผล.....	84
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 กราฟแสดงค่ากระแสลัดวงจรแปรผันตามคาบเวลา .....	7
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ Superconducting Fault Current Limiter (Applied Materials) .....	10
รูปที่ 2.3 คุณสมบัติการทำงานของตัวนำยิ่งยวด a) เปลี่ยนสถานะตามปริมาณกระแส b) เปลี่ยนสถานะตามอุณหภูมิ c) เปลี่ยนสถานะตาม อุณหภูมิ สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของกระแส .....	11
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SCFCL .....	12
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลอุปกรณ์ Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL) .....	12
รูปที่ 2.6 ภาพแสดงลักษณะก่อนการแบ่งแยกบัส และหลังแบ่งแยกบัสตามลำดับ .....	13
รูปที่ 2.7 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวรตามลำดับ .....	14
รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันการทำงานของ VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limitation) ....	15
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่ติดตั้ง SCFCL ของ ระบบไฟฟ้า 115 kV ที่ใช้ในการศึกษา .....	16
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL .....	20
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานอุปกรณ์ SCFCL .....	20
รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL .....	22
รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบ 115 KV .....	23
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า กระแสผิดพลาดจำลอง (Prospective Fault Current) กระแสที่ไหลออกจาก SCFCL (Limited Current) กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ชานาน (Shunt Current) และ กระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด (SC Current) โดยที่รูป ก) ผลการทดสอบของผู้ผลิต และรูป ข) ผลการจำลองใน DigSILENT .....	24
รูปที่ 4.1 แบบจำลองศึกษาการทำงานของ SCFCL-1 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส GS4 .....	26
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการจำลองกระแสลัดวงจรเมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL .....	27
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงกระแสลัดวงจร $I_T$ $I_{sc}$ และ $I_{sh}$ เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดินที่บัส GS4 .....	27
รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรแบบ SCFCL และสวิตช์ ตามลำดับ .....	28

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบกระแสลัดวงจร $I_T$ ในกรณีติดตั้ง SCFCL และ $I_{T,sw}$ ในกรณีติดตั้ง สวิตช์ .....	28
รูปที่ 4.6 กระแสลัดวงจรสูงสุดกรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลง ดิน .....	29
รูปที่ 4.7 กระแสลัดวงจรสูงสุดกรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสลง ดิน .....	30
รูปที่ 4.8 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบสอง เฟส .....	30
รูปที่ 4.9 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบสอง เฟส .....	31
รูปที่ 4.10 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบ สองเฟสลงดิน .....	32
รูปที่ 4.11 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1 เมื่อลัดวงจรแบบ สองเฟสลงดิน .....	32
รูปที่ 4.12 ค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัสต่างๆ ในระบบไฟฟ้า .....	35
รูปที่ 4.13 ค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออก ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL .....	44
รูปที่ 4.14 ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL .....	45
รูปที่ 4.15 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายและที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ เมื่อลัดวงจร ที่ บัส 230kV_B/R1 ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL .....	47
รูปที่ 4.16 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายและที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ เมื่อเกิดการ ลัดวงจรที่บัส 115kV_AVG1 ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL .....	48
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 230kV_AV1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL .....	50
รูปที่ 4.18 บริเวณที่ SCFCL ช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV_AV1 .....	51
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 115kV_AVG1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL .....	52

รูปที่ 4.20 บริเวณที่ SCFCL ช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 115kV_A/G1.....	53
รูปที่ 4.21 แบบจำลองผลกระทบต่อกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง.....	54
รูปที่ 4.22 คุณลักษณะของการรื้อตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง KT1A ที่สมมุติขึ้น.....	55
รูปที่ 4.23 กระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL.....	55
รูปที่ 4.24 กระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่มีการติดตั้ง SCFCL.....	56
รูปที่ 5.1 แบบจำลองศึกษาผลกระทบต่อรีเลย์กระแสเกิน .....	59
รูปที่ 5.2 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส GS4.....	59
รูปที่ 5.3 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV_A/S1 .....	60
รูปที่ 5.4 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟส ที่บัส GS4.....	60
รูปที่ 5.5 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟส ที่บัส 230kV_A/S1.....	61
รูปที่ 5.6 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟสลงดิน ที่บัส GS4.....	61
รูปที่ 5.7 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV_A/S1 .....	62
รูปที่ 5.8 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่บัส GS4.....	62
รูปที่ 5.9 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV_A/S1 .....	63
รูปที่ 5.10 บริเวณที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น เมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV_B/R1.....	66
รูปที่ 5.11 บริเวณที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV_B.....	66

รูปที่ 5.12 ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV_B.....	67
รูปที่ 5.13 วงจรสมมูลอย่างง่ายกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV_B.....	68
รูปที่ 5.14 แสดงสาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวมากขึ้น .....	69
รูปที่ 5.15 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น เมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV_B/R1 และบัส 22kV_B.....	70
รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์หาสมการ $\Delta I$ กรณีไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV_B.....	71
รูปที่ 5.17 ภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบของ $Z_2$ ต่อ $\Delta I$ .....	73
รูปที่ 5.18 กราฟแนวโน้มของค่า $\Delta I$ ที่ค่า $Z_3/Z_1$ ต่างๆ.....	74
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า $\Delta I$ สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า $Z_2$ และ $Z_2$ ในกรณีที่ $Z_3 = 0.5 \Omega$ .....	76
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า $\Delta I$ สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า $Z_2$ และ $Z_2$ ในกรณีที่ $Z_3 = 1 \Omega$ .....	77
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า $\Delta I$ สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า $Z_2$ และ $Z_2$ ในกรณีที่ $Z_3 = 1.5 \Omega$ .....	79
รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์ค่าสูงสุดของ $\Delta I$ ด้วยหลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด.....	80
รูปที่ 5.23 แบบจำลองศึกษาผลกระทบจากการเสียหายของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL.....	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายส่ง.....	17
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	18
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบ 3 ขดลวด .....	18
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด .....	19
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของตัวจำกัดกระแสผิตรงแบบตัวนำยิ่งยวด (SCFCL) .....	21
ตารางที่ 3.6 ตารางเปรียบเทียบค่ายอดกระแสที่ได้จากการจำลองกับค่าทดสอบ SCFCL .....	23
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบการลดกระแสลัดวงจรในแต่ละช่วงของการเกิดลัดวงจรชนิด ต่างๆ.....	33
ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสและ 1 เฟสลงดินที่บัส กรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL.....	34
ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟส ลงดิน ที่บัส 230kV_B/R1 .....	36
ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่ บัส 230kV_B/R1 .....	37
ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟส และ 1 เฟส ลงดิน ที่บัส 230kV_AV1 .....	38
ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่ บัส 230kV_AV1 .....	39
ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟส และ 1 เฟส ลงดิน ที่บัส 115kV_AVG1.....	40
ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่ บัส 115kV_AVG1.....	41
ตารางที่ 4.9 ค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบเมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV_AV1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและ ติดตั้ง SCFCL .....	42

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 230kV_A/S1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL .....	50
ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 115kV_A/G1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL .....	51
ตารางที่ 5.1 การตั้งค่านิโวล์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV.....	58
ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV_B/R1.....	64
ตารางที่ 5.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 22kV_B .....	65
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่า $Z_3$ และ $Z_1$ .....	74
ตารางที่ 5.5 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส .....	81
ตารางที่ 5.6 ผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส .....	82
ตารางที่ 5.7 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส .....	82
ตารางที่ 5.8 ผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส .....	83
ตารางที่ 5.9 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส .....	83

## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวិธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยการเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตไฟฟ้าต้องจัดหาแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้สามารถรองรับต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้เพียงพอจึงมีการเพิ่มแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและการขยายตัวของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น การเพิ่มจำนวนหม้อแปลง การสร้างสายส่งไฟฟ้า การสร้างสถานีไฟฟ้า หรือการจ่ายไฟฟ้าที่เป็นระบบเครือข่ายนั้นจะส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าสูงขึ้นตามมา ค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นอาจสูงเกินกว่าความสามารถในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์หรืออาจสูงกว่าค่าพิกัดการทนกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ต่างๆ ส่งผลให้อุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าเสียหาย จึงมีการนำเสน่วิธีต่างๆ มาใช้เพื่อที่จะลดค่ากระแสลัดวงจร เช่น การแบ่งแยกบัส การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ที่นิวทรัล หรือการใช้หม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูงเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือการใช้ตัวจำกัดกระแสลัดวงจรแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting fault current limiter : SCFCL) ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรที่สูง เนื่องด้วยตัว SCFCL สามารถลดกระแสลัดวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วตั้งแต่ครั้งแรกของการเกิดลัดวงจร นอกจากนี้ตัว SCFCL ยังไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับแรงดันตกในสภาวะปกติ แต่ทั้งนี้การประพุดตัวของ SCFCL เพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจรนั้นอาจไปส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันได้ โดยจะเริ่มมีการใช้งาน SCFCL ในประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลประโยชน์และผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL ในระบบไฟฟ้า โดยการจำลองด้วยโปรแกรม DlgSILENT ซึ่งระบบที่ใช้เป็นระบบ 115 kV ของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer : IPP) แห่งหนึ่ง และแบบจำลองของ SCFCL ประกอบไปด้วย สวิตช์, อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Unit) รีแอคเตอร์ชานาน (Shunt Reactor) โดยการศึกษานี้จะจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์หาค่าผลเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ให้กับระบบที่มีการวางแผนที่จะนำอุปกรณ์ SCFCL มาประยุกต์ใช้



## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL บนระบบไฟฟ้า
2. ศึกษาผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL บนระบบไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. แบบจำลองระบบ 115 kV ที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer : IPP)
2. SCFCL ที่ใช้เป็นแบบ Resistive Type
3. ระบบ IPP ที่พิจารณาเป็นระบบที่ได้มีการวางแผนที่จะติดตั้ง SCFCL อยู่แล้วจึงไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้งและขนาดของ SCFCL

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ SCFCL ในระบบไฟฟ้า
2. ศึกษาแบบจำลองอุปกรณ์ SCFCL เงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ และฟังก์ชันการทำงาน
3. จำลองและตรวจสอบการทำงานของ SCFCL โดยเทียบกับผลการทดสอบจริงด้วย DigSILENT
4. จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าลงในโปรแกรม DigSILENT
5. จำลองสภาวะลัดวงจรของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้ง SCFCL
6. วิเคราะห์กรณีศึกษาด้านผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL
7. วิเคราะห์กรณีศึกษาด้านผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL
8. สรุปและวิเคราะห์ผลการจำลอง
9. เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถวิเคราะห์จำลองอุปกรณ์ SCFCL ที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบเพื่อศึกษาการทำงานของ SCFCL ในสภาวะเกิดการลัดวงจร และเนื่องจากความสามารถในการลดค่ากระแสลัดวงจรได้ตั้งแต่คาบแรกของการเกิดลัดวงจร ดังนั้นอุปกรณ์ SCFCL จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ
2. สามารถนำการวิเคราะห์ผลประโยชน์และผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ SCFCL จากวิทยานิพนธ์นี้ ไปเป็นแนวทางให้กับระบบที่มีการวางแผนที่จะนำอุปกรณ์ SCFCL มาประยุกต์ใช้

### 1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อหลัก คือ

1. หลักการทำงานและการออกแบบ SCFCL
2. การศึกษาการประยุกต์ใช้ SCFCL ในระบบไฟฟ้า โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1.6.1 หลักการทำงานและการออกแบบ

ในบทความวิจัยเรื่อง “Designing and Analysis of Power System with SFCL Module” [1] ได้เสนอวิธีการออกแบบ resistive type SFCL โดยใช้โปรแกรม Simulink-Matlab จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยการจำลองระบบภายใต้เงื่อนไขการลัดวงจรแบบต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ติดตั้ง SFCL กับไม่ได้ติดตั้ง ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้บ่งบอกว่า การติดตั้ง resistive type SFCL สามารถช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยการลดขนาดของกระแสลัดวงจรอย่างรวดเร็วตั้งแต่ครั้งแรกของการเกิดลัดวงจร นอกจากนี้ตัวอุปกรณ์ SFCL ในสภาวะปกติจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเนื่องด้วยมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมาก แต่ในสภาวะที่เกิดการลัดวงจรขึ้นอุปกรณ์ SFCL จะเพิ่มอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดกระแสลัดวงจรโดยขึ้นกับลักษณะของ SFCL นั้นๆ และยังสามารถคืนสภาพตัวนำกลับไปสู่สภาวะปกติได้เร็ว แนวคิดที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือแนวทางการออกแบบและหลักการทำงานของ SFCL

ในบทความวิจัยเรื่อง “Implementation of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiters in Electrical Grids: Performance Analysis and Measuring of Optimal Location” [2] ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมของการออกแบบ Resistive type SFCL ตาม E-J power characteristics ที่มีค่าความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ กับการออกแบบ Step-SFCL model โดยพิจารณาในช่วงการเกิดลัดวงจรเพื่อวิเคราะห์ดูกราฟลักษณะสมบัติของความสามารถการลดกระแส

ลัดวงจร และแรงดันที่บัส พบว่าทั้ง 2 แบบให้ผลต่างกันเล็กน้อย โดยการออกแบบตาม E-J power characteristics จะยืดหยุ่นกว่าสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง แต่ทั้งนี้การออกแบบ Step-SFCL model ก็เป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและส่งผลไม่ต่างกันมากโดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบของ Step-SFCL เพื่อนำมาวิเคราะห์หรือดูผลกระทบต่างๆ ด้วย นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการประมาณจำนวนของ SFCL ที่สามารถติดตั้งในระบบสำหรับเงื่อนไขการเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งผลลัพธ์บ่งบอกว่า SFCL ควรติดตั้งที่จุดเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการเกิดลัดวงจรที่ระบบจำหน่ายและที่ระบบไฟฟ้าของผู้ซื้อไฟ และสำหรับการเกิดลัดวงจรที่สายส่งควรติดตั้ง SFCL ที่สถานีหรือที่สายป้อน

### 1.6.2 การศึกษาการประยุกต์ใช้ SCFCL ในระบบไฟฟ้า

ในบทความวิจัยเรื่อง “A Review on Super Conducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power System” [3] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ SFCL ในด้านต่างๆ บนระบบไฟฟ้าเช่น การลดค่ากระแสลัดวงจร การเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์กับระบบไฟฟ้าและการยกระดับแรงดันตก โดยมีการกล่าวถึงข้อดีข้อเสียของวิธีลดค่ากระแสลัดวงจรอื่นๆ เช่น การแบ่งแยกบัส การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ที่นิวทรัล หรือการใช้หม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สูงเป็นต้น ซึ่งพบว่า SFCL เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการเกิดลัดวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถลดค่ากระแสลัดวงจรได้ตั้งแต่คาบแรกของการเกิดลัดวงจร

ในบทความวิจัยเรื่อง “Superconducting fault current limiter & its application” [4] ได้กล่าวถึงแนวคิดของ SFCL แบ่งตามวัสดุของตัวนำยิ่งยวดออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกคือ Resistive- SFCL ซึ่งต่ออนุกรมกับวงจรที่ต้องการป้องกัน และประเภทที่สอง Inductive-SFCL คือหม้อแปลงที่มีตัวนำยิ่งยวดแบบหลอดพันอยู่กับขดลวด นอกจากนี้เรายังศึกษาการใช้งาน SFCL เพื่อลดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันระดับของกระแสผิดพลาดได้กลายเป็นปัญหาร้ายแรงสำหรับการดำเนินงานทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้ SFCL สามารถช่วยลดความเครียดบนอุปกรณ์ในระบบ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อใหญ่ 2.1 ฟอลต์ [5] 2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า [5] 2.3 การป้องกันระบบไฟฟ้า [6] 2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง [7] [8] [9]

#### 2.1 ฟอลต์

เนื้อหาในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า การเกิดฟอลต์แบบสามเฟส และการเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน

##### 2.1.1 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

1. การลัดวงจร (Short circuit) ระหว่างเฟสต่อเฟส หรือเฟสกับดิน มีสาเหตุเนื่องมาจากการเสื่อมของฉนวนไฟฟ้าหรืออุบัติเหตุ
2. การเกิดภาวะแรงดันสูง (Over Voltage) มีสาเหตุเนื่องมาจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าผิดปกติ ฟิวส์หรือสวิตช์ซึ่งเสิร์จ (Switching Surge)
3. การเกิดความถี่ต่ำ (Under Frequency) มีสาเหตุเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้ไม่เพียงพอกับโหลด
4. การเกิด Out Of Step อันเนื่องมาจากระบบสายส่งไม่แข็งแรงพอ หรือเกิดการลัดวงจรที่ไม่สามารถกำจัดออกไปอย่างทันท่วงที ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ไม่สามารถทำงานประสานกันได้หรือการสูญเสียสถานะซิงโครนิส (Loss of Synchronism)
5. การโหลดเกิน (Over Load) มีสาเหตุเนื่องมาจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลัง

##### 2.1.2 การเกิดฟอลต์แบบสามเฟส

การเกิดฟอลต์แบบสามเฟสหรือเรียกว่าฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Three Phase Fault) โดยทั่วไปเกิดจากความประมาทในการทำงาน เช่นกรณีจำเป็นต้องเข้าไปซ่อมบำรุงบัสบาร์ทั้ง 3 เฟส และมีการตัดไฟออกแล้วลัดวงจรทั้งสามเฟสเพื่อการทำให้ประจุที่ยังตกค้างอยู่ในสายตัวนำเนื่องมาจากการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุที่คงค้าง (Stray Capacitor) และเมื่อซ่อมบำรุง

เสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ปฏิบัติงานอาจจะลืมปลดการลัดวงจรนี้ออก ดังนั้นเมื่อสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน (ON Circuit Breaker) เพื่อจ่ายไฟเข้ามา จึงเกิดฟอลต์แบบสามเฟสขึ้นได้

### 2.1.3 การเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน

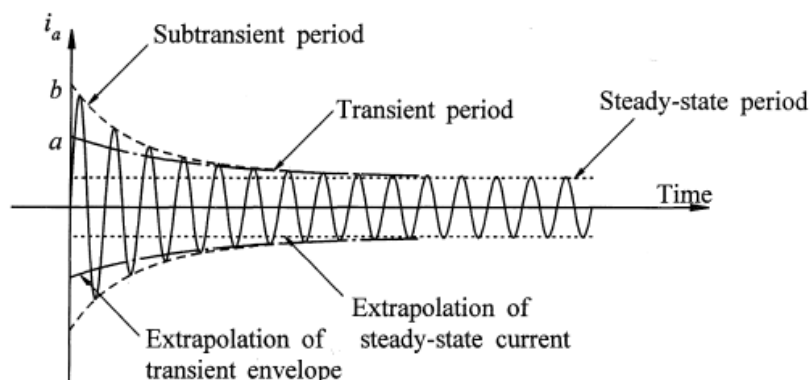
การเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single line ground fault) โดยทั่วไปการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินที่เกิดขึ้นในวงจรสายส่งนั้นมักจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดเพียงชั่วขณะ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการมีตัวนำมาพาดผ่านสาย เช่น ภูเขา ไม้ เป็นต้น และเมื่อสิ่งเหล่านั้นหลุดล่องไปแล้ว เหตุการณ์ฟอลต์ก็จะยุติลงได้

## 2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

การศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าแรงสูง การลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกันหลายแบบและสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ คือ การลัดวงจรแบบสมมาตรและการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร สาเหตุของการเกิดลัดวงจรคือปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่ คือ ฟอลต์อนุกรม (Series Fault) และฟอลต์ขนาน (Shunt Fault) โดยฟอลต์อนุกรมเป็นสภาวะผิดปกติในเฟสของระบบ เช่น สายส่งขาด หรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟส เป็นต้น ส่วนฟอลต์ขนานเป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับดิน (Ground) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบต่างๆ ฟอลต์ขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรม เพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์ถ้าหากไม่รีบกำจัดฟอลต์ออกจากระบบ การศึกษาฟอลต์ขนานก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบการป้องกัน เช่น ระบบบริเลย์ต่างๆ ส่วนการศึกษาฟอลต์อนุกรมนั้นมีประโยชน์เมื่อต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นช่วงไหนของระบบก็ได้แต่ส่วนใหญ่เกิดในสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead) ประมาณ 50-70 % ส่วนที่เหลือจะเป็นฟอลต์ในสายส่งใต้ดิน หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อย ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเริ่มแรกเกือบทั้งหมดเป็นฟอลต์แบบขนาน

กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลานับตั้งแต่เริ่มเกิดลัดวงจรจนกระทั่งกระแสลัดวงจรเข้าสู่ค่าคงที่ (Steady-State Value) การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบสองประการ คือ พารามิเตอร์ R,L,C ของระบบ และประการที่สองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในเครื่องจักรแบบซิงโครนัสหลังจากเกิดลัดวงจรขึ้น กระแสลัดวงจรประเภทกระแสสลับนั้นค่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลา แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยช่วงเวลาที่สำคัญและนำมาใช้ทางปฏิบัติจริงนั้นมีอยู่ 3 ช่วงเท่านั้นคือ



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงค่ากระแสลัดวงจรแปรผันตามคาบเวลา

- 1) ช่วงเกิดลัดวงจรเริ่มแรก (อุปกรณ์ป้องกัน เช่น เบรกเกอร์ หรือ ฟิวส์ ยังไม่เปิดวงจรออก) กระแสลัดวงจรมีค่าสูงมาก และอุปกรณ์ป้องกันสามารถทนได้ในช่วงเริ่มแรกนี้หรือไม่
- 2) ช่วงอุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจรออก ช่วงนี้จะเกิดอาร์คที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์กระแสลัดวงจรในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าตอนเกิดเริ่มแรก และอุปกรณ์ป้องกันสามารถตัดกระแสลัดวงจรในช่วงนี้ได้หรือไม่
- 3) ช่วงเกิดลัดวงจรคงที่ถ้าอุปกรณ์ป้องกันไม่เปิดวงจร ต้องพิจารณาถึงกระแสดังกล่าวเพื่อดูว่าก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบอย่างไร ถ้ามีกระแสลัดวงจรคงที่ขนาดดังกล่าวไหลผ่านตลอดเวลา

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นถึงวิธีการหากระแสลัดวงจร 3 ช่วง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการหากระแสลัดวงจร 3 ช่วงดังกล่าวว่ามีความสัมพันธ์กับรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรอย่างไรพิจารณากระแสลัดวงจรในรูปที่ 3 กระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงในช่วงแรก และลดลงจนมีค่าคงที่ (Steady-State) โดยกระแสลัดวงจรในส่วนที่มีค่าคงที่คือ ยอดสัญญาณจากจุด O ไปยังเส้นปะ และในช่วงที่เบรกเกอร์ หรือ ฟิวส์เปิดวงจรออกก็คือ หลังจากเกิดลัดวงจรไปแล้ว 2-3 คาบ (cycle)

### 2.3 การป้องกันระบบไฟฟ้า

เนื้อหาในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ความผิดปกติของระบบไฟฟ้าและคุณสมบัติของระบบป้องกัน

### 2.3.1 ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าขยายตัวมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ย่อมเกิดผลเสียหายต่อระบบการผลิตอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงมาก เพื่อที่จะป้องกันระบบไฟฟ้าให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นแก่ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้ากรณีระบบผิดปกติ นอกจากนี้ระบบป้องกันยังต้องมีความเชื่อถือได้ดีสำหรับความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆต่อไปนี้

- 1) การลัดวงจรระหว่างเฟสต่อเฟสหรือเฟสกับดิน มีสาเหตุเนื่องมาจากการเสื่อมของฉนวนไฟฟ้า
- 2) การเกิดภาวะแรงดันสูง มีสาเหตุเนื่องมาจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ปกติ อาจเกิดจากฟ้าผ่า หรือสวิตชิงเสิร์จ (Switching surge)
- 3) การเกิดความถี่ต่ำ มีสาเหตุเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอกับโหลด
- 4) การเกิดสภาวะโหลดเกิน มีสาเหตุเนื่องมาจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลัง

### 2.3.2 คุณสมบัติของระบบป้องกัน

ระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดีย่อมไม่เป็นผลกระทบกระเทือนต่อระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นหน้าที่ของระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดี คือต้องสามารถตัดระบบไฟฟ้าออกจากวงจรให้รวดเร็วที่สุดกรณีเกิดภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้า โดยคุณสมบัติที่ดีของระบบป้องกันมีดังนี้

1) Reliability หมายถึงความเชื่อถือได้ในความแน่นอนของรีเลย์ในขณะที่ทำงานว่าสามารถทำงานได้จริง ซึ่งเมื่อก้าวถึง Reliability จะสามารถแบ่งเป็นสองข้อย่อยได้คือ

(1) Dependability หมายถึงระบบป้องกันต้องทำงานได้ถูกต้องทุกครั้งที่เกิดความผิดปกติ และสามารถทำได้ทุกช่วงขณะที่ต้องการให้ทำงาน

(2) Security หมายถึงระบบป้องกันควรที่จะทำงานให้ถูกช่วงที่ต้องการ

2) Speed หมายถึงระบบป้องกันต้องสามารถตัดวงจรได้เร็วพอที่จะไม่ทำให้อุปกรณ์ต่างๆในระบบเกิดความเสียหาย ซึ่งโดยทั่วไประบบป้องกันยิ่งทำงานเร็วเท่าไรยิ่งดี แต่ในบางครั้งเพื่อให้มีการทำงานประสานกันจึงจำเป็นต้องมีการหน่วงเวลาบ้างโดยไม่ซ้ำเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะความรุนแรงของการเกิดความผิดปกติ ถ้าหากพิจารณาตามแบ่งประเภทของรีเลย์ตามความเร็วในการทำงานจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

- (1) Instantaneous Relay ซึ่งจะทำงานทันทีเหมือนมีสัญญาณ Trip เข้ามาโดยไม่มี การ  
หน่วงเวลา
- (2) Time Delay Relay ซึ่งจะทำงานโดยมีการหน่วงเวลาไว้ตั้งแต่ที่รับสัญญาณ Trip เข้า  
มาจนส่งออกไป
- 3) Selectivity การแบ่งพื้นที่การทำงานให้อยู่ในขอบเขตในระบบไฟฟ้าที่เรียกว่า Zone of  
Protection หรือก็คือการให้รีเลย์ทำงานในขอบเขตที่ต้องการให้ทำงาน โดยขอบเขตของการทำงาน  
จะถูกจำกัดตามบริเวณที่ติดตั้ง CT สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนอุปกรณ์ได้แก่
  - (1) อุปกรณ์ตัดตอน หรือก็คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์
  - (2) อุปกรณ์ตรวจจับ หรือก็คือ CT, VT และ รีเลย์
- 4) Simplicity หมายถึงรีเลย์ต้องมีโครงสร้างง่ายในการติดตั้ง ในการถอดเข้าออกเพื่อการ  
บำรุงรักษาและง่ายต่อการตรวจสอบความถูกต้อง
- 5) Economy ควรเลือกรีเลย์ป้องกันให้ถูกสุด แต่สามารถให้การป้องกันที่สมบูรณ์

## 2.4 วิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อเกิดปัญหาขนาดของกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าสูงเกินพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์  
การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเปลี่ยนเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้มีพิกัดของกระแสลัดวงจรสูงขึ้น อาจไม่ใช่วิธีการ  
ที่เหมาะสมเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในวงกว้าง และมีการลงทุนในค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง  
ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีลดค่ากระแสลัดวงจรสูงที่เกิดขึ้น โดยที่ระบบยังสามารถทำงานภายใต้  
เงื่อนไขที่ต้องการได้ วิธีลดค่ากระแสลัดวงจรสูงในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี สามารถ  
แบ่งแยกตามลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการ  
ทำงานของระบบ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท



### 2.4.1 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ (Active Method)

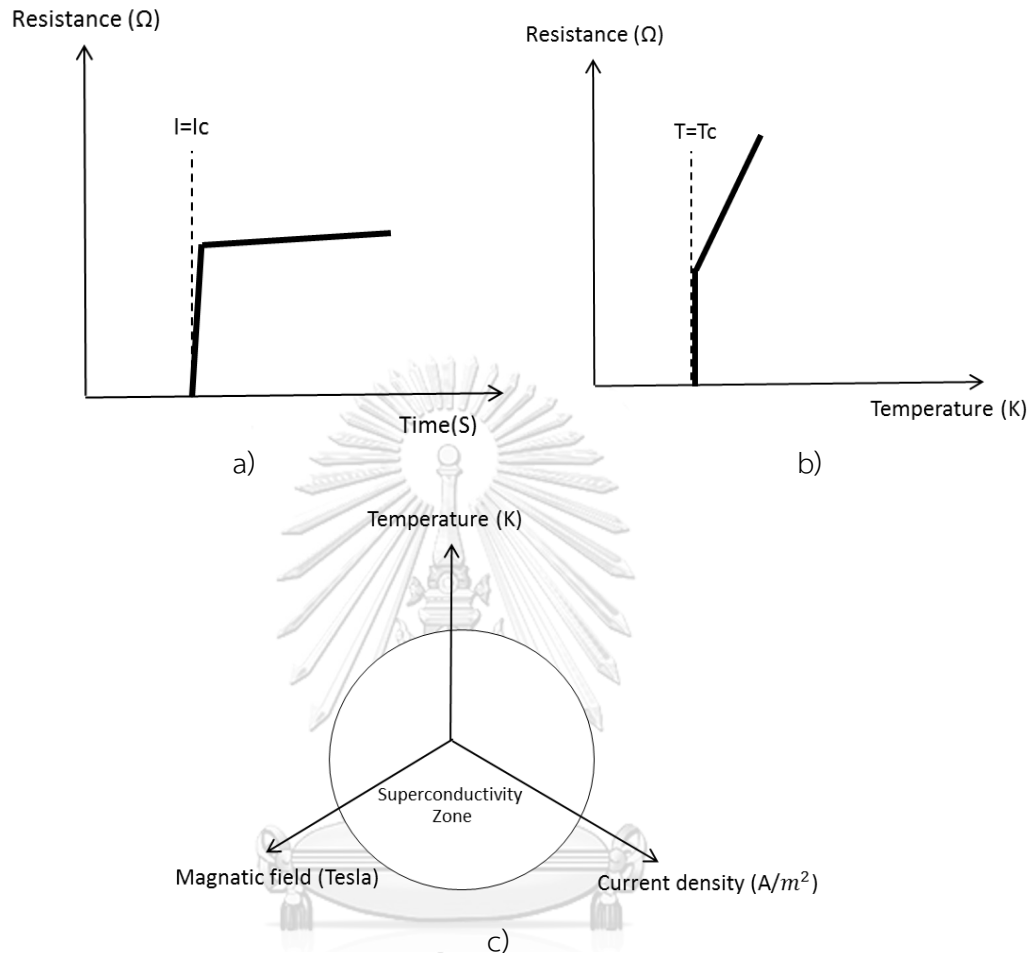
อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ (Normal Condition) อุปกรณ์จะมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ ส่วนในสภาวะที่ระบบเกิดการลัดวงจร (Fault Condition) อุปกรณ์จะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์จะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบที่สภาวะปกติ ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

1) การประยุกต์ใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting fault current limiter : SCFCL)

SCFCL คืออุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งอาศัยหลักการทำงานของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) เป็นอุปกรณ์ที่มีสภาพการนำไฟฟ้าโดยปราศจากความต้านทาน ที่อุณหภูมิ ปริมาณกระแส หรือสนามแม่เหล็กต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical level) และเมื่อมีค่าใดค่าหนึ่งเกินกว่าค่าวิกฤต อุปกรณ์ SCFCL จะเกิดการเปลี่ยนสถานะ (Quenching) จากสถานะตัวนำยิ่งยวด (Superconductor state) เป็นสถานะความต้านทาน (Resistive state) โดยกราฟคุณสมบัติและอุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด แสดงดังรูปที่ 2.3

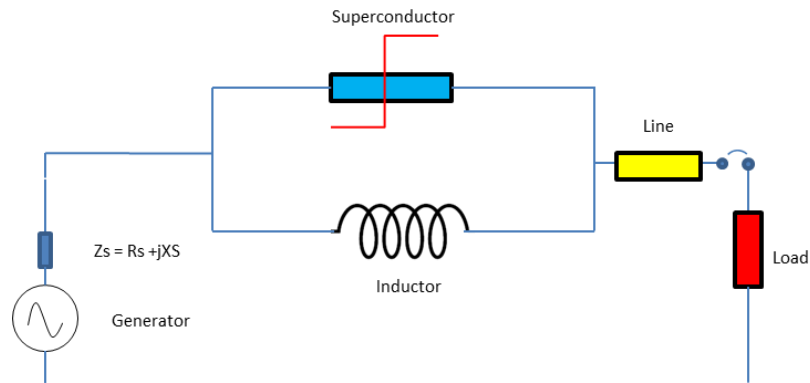


รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ Superconducting Fault Current Limiter (Applied Materials)



รูปที่ 2.3 คุณลักษณะการทำงานของตัวนำยิ่งยวด a) เปลี่ยนสถานะตามปริมาณกระแส b) เปลี่ยนสถานะตามอุณหภูมิ c) เปลี่ยนสถานะตาม อุณหภูมิ สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของกระแส

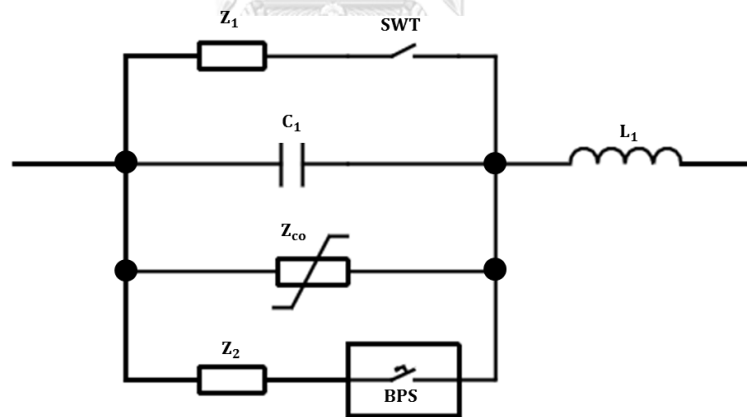
หลักการลดกระแสลัดวงจรของวิธีนี้อาศัยคุณสมบัติพิเศษของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานในระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งนำอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดไปต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) โดยในสภาวะการทำงานปกติ ค่ากระแสจะไหลผ่านอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดจะไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต ส่งผลให้อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเปลี่ยนสถานะจากสภาวะตัวนำยิ่งยวดเป็นสภาวะความต้านทานเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงมีการแบ่งไหลให้ตัวเหนี่ยวนำทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลง



รูปที่ 2.4 วงจรสมมุติระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SCFCL

## 2) การประยุกต์ใช้ Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL)

SSFCL เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีโครงสร้างโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสและแรงดัน และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ประกอบด้วย สวิตช์แบบโซลิดสเตต เช่น ทายริสเตอร์ สามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดกาลัดวงจรขึ้นในระบบ รายละเอียดโครงสร้างของ Solid-State Fault Current Limiter แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมุติอุปกรณ์ Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL)

ส่วนประกอบหลักของ SSFCL ประกอบไปด้วย คาปาซิเตอร์ ( $C_1$ ) และ รีแอคเตอร์ ( $L_1$ ) ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจร และ สวิตช์ ( $SW_1$ ) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยในช่วงสภาวะการทำงานปกติ กระแสจะไหลผ่าน  $C_1$  และ  $L_1$  ซึ่งเปรียบเสมือนไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในสภาวะการทำงานปกติ ส่วนในสภาวะที่เกิดการลัดวงจร กลไกการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จะทำงานอย่างรวดเร็วโดย  $SW_1$  จะทำการปิด

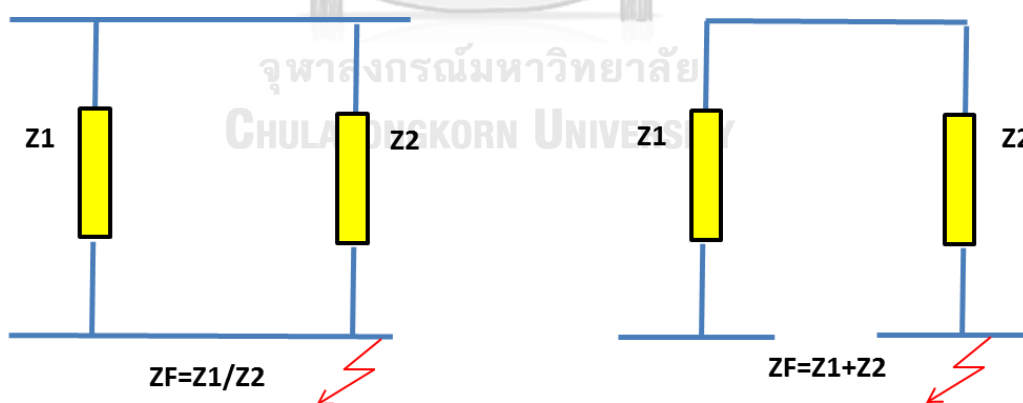
วงจรภายใน 3 ms ซึ่งจะลัดวงจร C1 ออกไป ทำให้กระแสลัดวงจรไหลผ่าน Z1 และ L1 จึงทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าลดลง นอกจากนี้ Z1 สามารถลดค่ากระแสกระชาก (Inrush Current) ที่ไหลผ่าน SW1 ได้อีกด้วย ซึ่งการติดตั้ง ZnO (Zinc-Oxide Arrester) ต่อขนาน แสดงดังรูปที่ 5 จะช่วยป้องกันแรงดันเกินให้ SSFCL และ BPS (Bypass Switch) เพื่อสำรองการทำงานของ SW1

#### 2.4.2 วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ (Passive Method)

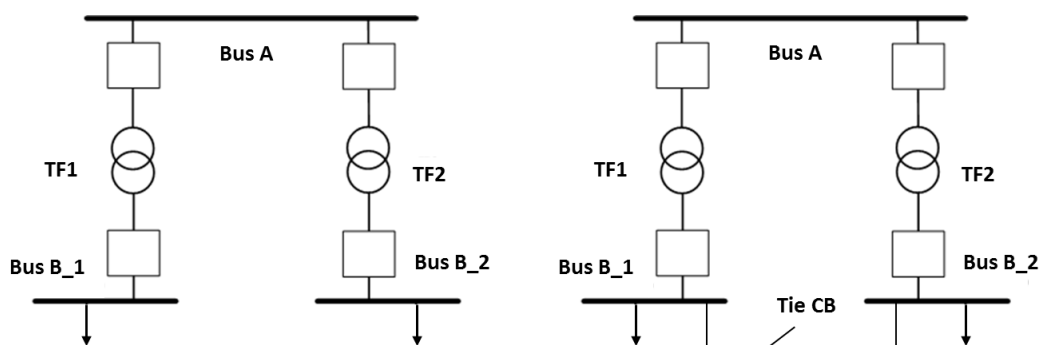
วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ มีคุณสมบัติทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร จึงต้องพิจารณาศึกษาระบบอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้งาน โดยวิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีรายละเอียดดังนี้

##### 1) การแบ่งแยกบัส (Bus Splitting)

วิธีการแบ่งแยกบัสเป็นเทคนิคการลดกระแสลัดวงจรโดยเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้ โดยลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการแบ่งแยกบัส การแบ่งแยกบัสภายในสถานีไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การแบ่งแยกบัสแบบถาวรและไม่ถาวร โดยการแบ่งแยกบัสแบบไม่ถาวรจะมี Tie circuit breaker ไว้ทำการเชื่อมต่อบัสในกรณีฉุกเฉิน แสดงดังรูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงลักษณะก่อนการแบ่งแยกบัส และหลังแบ่งแยกบัสตามลำดับ



รูปที่ 2.7 การแบ่งแยกบัสแบบถาวร และไม่ถาวรตามลำดับ

## 2) การปลดวงจรสายส่ง (Line Splitting)

การปลดวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในเวลาฉุกเฉินโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งในระบบ ส่งผลทำให้ระบบมีอิมพีแดนซ์โดยรวมเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้ขนาดกระแสลัดวงจรในระบบต่ำลง

## 3) การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ CLR (Current Limiter Reactor)

อุปกรณ์ CLR เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความต้านทานโดยรวมสูงขึ้น โดยมีลักษณะการต่อแบบอนุกรมเข้าในระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ CLR สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน หรือป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส เป็นต้น

## 4) การประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิมพีแดนซ์สูง

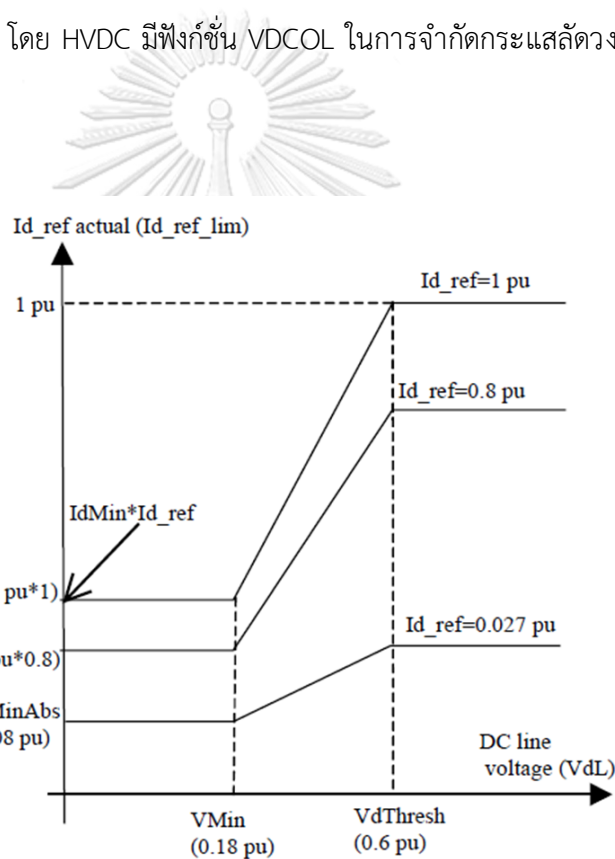
วิธีการนี้สามารถลดกระแสลัดวงจร โดยเพิ่มอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจำกัดขนาดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อมและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานในสภาวะปกติ และแรงดันที่ฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้องนอกจากนี้ราคาหม้อแปลงค่าอิมพีแดนซ์สูงมีราคาสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป

## 5) วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบอื่น (Other methods)

วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบอื่นเป็นวิธีการที่มีจุดประสงค์หลักในการนำมาประยุกต์ใช้ไม่ใช่เพื่อนำมาลดกระแสลัดวงจร แต่สามารถทำให้กระแสลัดวงจรลดลงได้ ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้

สายส่ง HVDC และการยกกระดัดแรงดันในการส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองวิธีมีจุดประสงค์หลักเพื่อยกระดับคุณภาพในการส่งจ่ายกำลังของระบบไฟฟ้า แต่สามารถทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลงได้เช่นกัน

(1) High Voltage Direct Current (HVDC) Zidi et al. (2005) HVDC เป็นอุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission System) ชนิดหนึ่งใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงในระยะทางไกล โดยมีหลักการคือ เปลี่ยนไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงส่งผ่าน สายส่ง HVDC แล้วจึงเปลี่ยนกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันเสริมอื่นๆ อีกเช่น ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง, ช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบ ควบคุมแรงดันที่สถานีไฟฟ้า และช่วยจำกัดค่ากระแสลัดวงจร เป็นต้น โดย HVDC มีฟังก์ชัน VDCOL ในการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยมีหลักการทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันการทำงานของ VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limitation)

(2) การยกกระดัดแรงดัน (Increasing Voltage Levels) การยกกระดัดแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้า มีจุดประสงค์เพื่อให้คุณภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดีขึ้น คือ มีการสูญเสียน้อยลง และมีความสามารถในการจ่ายระยะทางไกลๆ ได้ดีขึ้น เนื่องจากมีระดับแรงดันที่สูง และยังช่วยให้ค่ากระแสลัดวงจรทั้งระบบลดลงเนื่องจากค่าแรงดันในการส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

### บทที่ 3

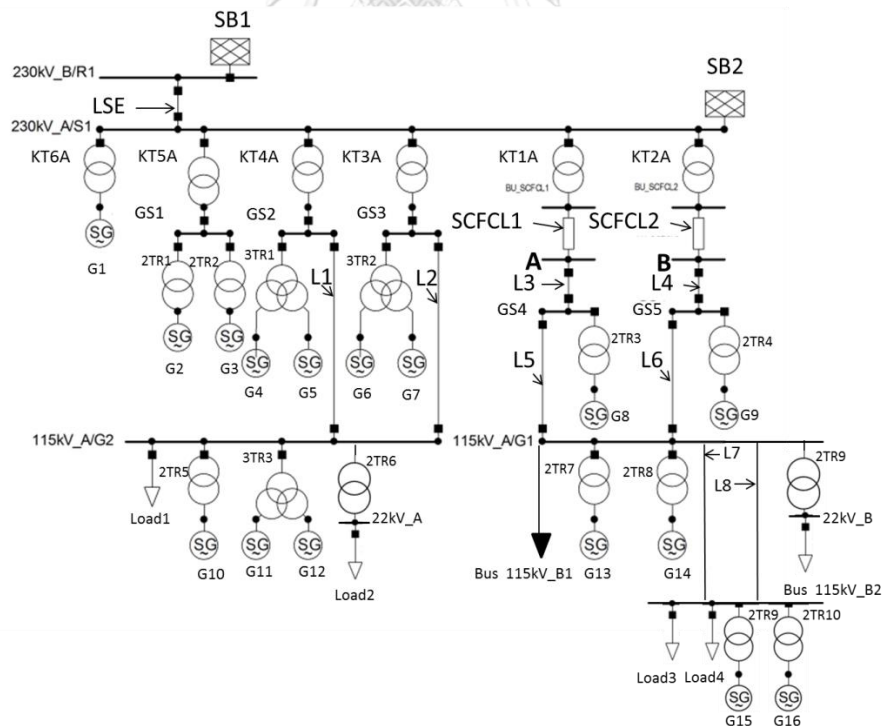
## ระบบไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ และ Superconducting fault current limiter (SCFCL) ที่ใช้ในการศึกษา

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยโปรแกรม DIgSILENT ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- 1) ระบบไฟฟ้าที่จะนำมาศึกษา
- 2) ข้อมูลระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer : IPP)
- 3) แบบจำลองของ SCFCL

### 3.1 ระบบไฟฟ้าที่จะนำมาศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่จะนำมาศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระแห่งหนึ่ง ที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง 230kV/115kV โดยมีการติดตั้ง SCFCL ที่ฝั่ง 115 kV ใกล้กับหม้อแปลง KT1A และ KT2A แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งระบบมีระดับแรงดันฝั่งโหลดอยู่ที่ 22 kV



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่ติดตั้ง SCFCL ของ ระบบไฟฟ้า 115 kV ที่ใช้ในการศึกษา

### 3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะแสดงถึงข้อมูลที่จำเป็นในการจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาผลประโยชน์และผลกระทบของ SCFCL โดยข้อมูลที่จำเป็นมีดังนี้

- 1) ข้อมูลความต้านทานของสายส่ง แสดงดังตารางที่ 3.1
- 2) ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 3.2
- 3) ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด และ 2 ขดลวด แสดงดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ
- 4) ข้อมูลและตำแหน่งของ SCFCL โดยในระบบ IPP นี้ได้ติดตั้ง SCFCL 2 ตัวคือ SCFCL-1 และ SCFCL-2 ที่ฝั่ง 115 kV ใกล้กับหม้อแปลง KT1A และ KT2A (บัสบาร์ A และ บัสบาร์ B)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายส่ง

สาย	แรงดันพิกัด (kV)	ความยาว (km)	อิมพีแดนซ์ (Ohm)
LSE	230	11.412	3.588
L1	115	0.01	0.0013
L2	115	0.01	0.0013
L3	115	0.17	0.0219
L4	115	0.2	0.0258
L5	115	0.01	0.0013
L6	115	0.01	0.0013
L7	115	3.2	0.2179
L8	115	3.2	0.2179



ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า (MVA)	แรงดัน (kV)
G1	823.5	23
G2	51.26	11.5
G3	51.26	11.5
G4	50.8	11.5
G5	50.8	11.5
G6	50.8	11.5
G7	50.8	11.5
G8	211.75	15.75
G9	211.75	15.75
G10	154.84	15.75
G11	50.8	11.5
G12	50.8	11.5
G13	308	20
G14	160	15.75
G15	45.53	11
G16	45.53	11

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบ 3 ขดลวด

หม้อแปลง 3 ขดลวด	กำลังไฟฟ้า (MVA)			แรงดัน (kV)			กลุ่ม เว็กเตอร์
	แรงสูง	แรงกลาง	แรงต่ำ	แรงสูง	แรงกลาง	แรงต่ำ	
3TR1	90	45	45	118	11.5	11.5	YN0d1d1
3TR2	90	45	45	118	11.5	11.5	YN0d1d1
3TR3	90	45	45	118	11.5	11.5	YN0d1d1

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

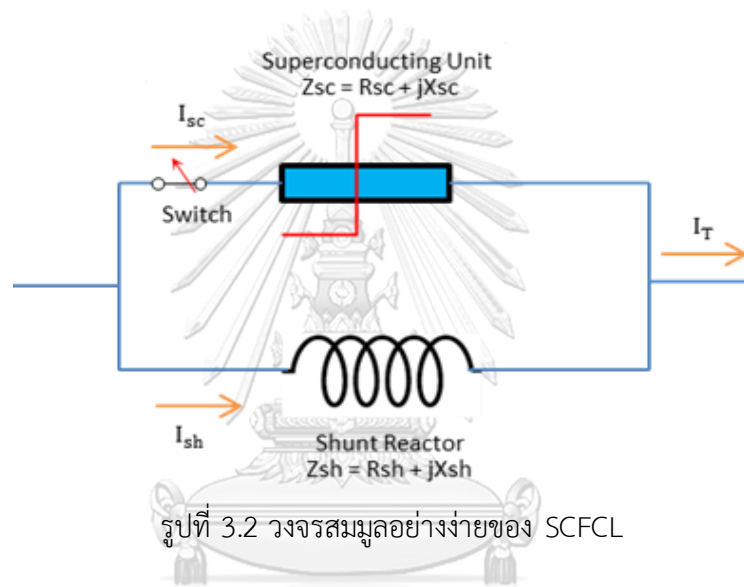
หม้อแปลง 2 ขดลวด	กำลังไฟฟ้า (MVA)	แรงดัน (kV)		กลุ่มเว็กเตอร์
		แรงสูง	แรงต่ำ	
KT1A	200	230	121	YNyn0
KT2A	200	230	121	YNyn0
KT3A	200	230	121	YNyn0
KT4A	200	230	121	YNyn0
KT5A	200	230	121	YNyn0
KT6A	875	245	23	YNd11
2TR1	51.5	118	11.5	YNd1
2TR2	51.5	118	11.5	YNd1
2TR3	215	118	15.75	YNd1
2TR4	215	118	15.75	YNd1
2TR5	155	118	15.75	YNd1
2TR6	50	112.5	23	YNd1
2TR7	325	115	20	YNd1
2TR8	175	115	15.75	YNd1
2TR9	50	112.5	23	YNd1
2TR10	50	123	11	YNd1
2TR11	50	123	11	YNd1

### 3.3 แบบจำลองของ SCFCL

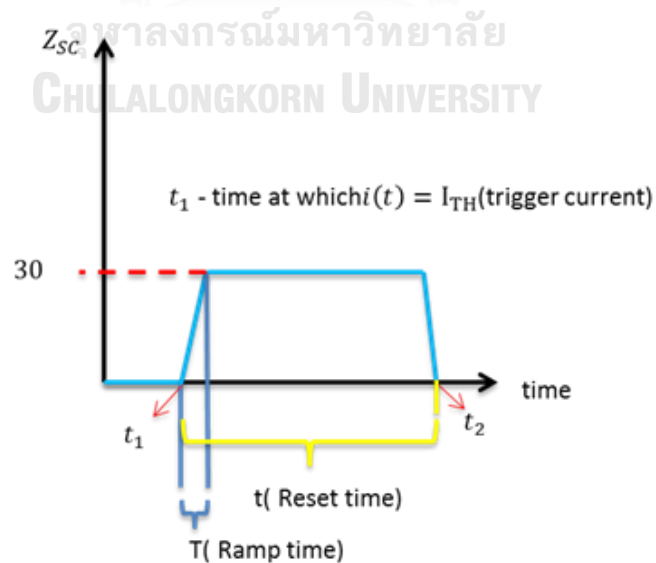
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของ SCFCL ที่จำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ วงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL ระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL และ การตรวจสอบการทำงานของ SCFCL

### 3.3.1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL ที่ใช้ในงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Unit) ซึ่งแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์แบบปรับค่าได้ตามปริมาณการไหลของกระแสไฟ 2) รีแอกเตอร์ขนาน (Shunt Reactor) คืออิมพีแดนซ์แบบคงที่ที่ต่อขนานกับอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวด ในสภาวะปกติอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดจะไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ แต่ในสภาวะเกิดการลัดวงจรจะมีการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ แสดงตามรูปที่ 3.3 โดยมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.5 และสมการการทำงาน แสดงดังสมการที่ 3.1 และ สมการที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ SCFCL



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ SCFCL

เกณฑ์การทำงานของ SCFCL ในสภาวะปกติ

$$I_{sc} < I_{TH} \quad Z_{sc} \approx 0 \Omega \quad (3.1)$$

เกณฑ์การทำงานของ SCFCL ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ

$$I_{sc} \geq I_{TH} \quad Z_{sc} = 30 \Omega \quad (3.2)$$

โดยที่	<b>T</b>	=	ค่าเวลาในการเพิ่มความต้านทาน (s)
	<b>t</b>	=	ค่าเวลาในการคืนตัว (s)
	<b>I<sub>sc</sub></b>	=	ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด (kA)
	<b>I<sub>sh</sub></b>	=	ค่ากระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ชานาน (kA)
	<b>I<sub>T</sub></b>	=	ค่ากระแสที่ไหลออกจาก SCFCL (kA)
	<b>I<sub>TH</sub></b>	=	ค่ากระแสกระตุ้นของตัวนำยิ่งยวด (kA)
	<b>Z<sub>sc</sub></b>	=	ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวนำยิ่งยวด ( $\Omega$ )
	<b>Z<sub>sh</sub></b>	=	ค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์ชานาน ( $\Omega$ )

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของตัวจำกัดกระแสผิดปกติแบบตัวนำยิ่งยวด (SCFCL)

อุปกรณ์	T (s)	t (s)	Z <sub>sc</sub> ( $\Omega$ )	I <sub>TH</sub> (kA)	แรงดัน (kV)	อิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์ชานาน	
			Z(min)/Z(max)			Rsh ( $\Omega$ )	Xsh ( $\Omega$ )
SCFCL	0.001	3	0/30	3	115	0.346	14.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3.2 ระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL

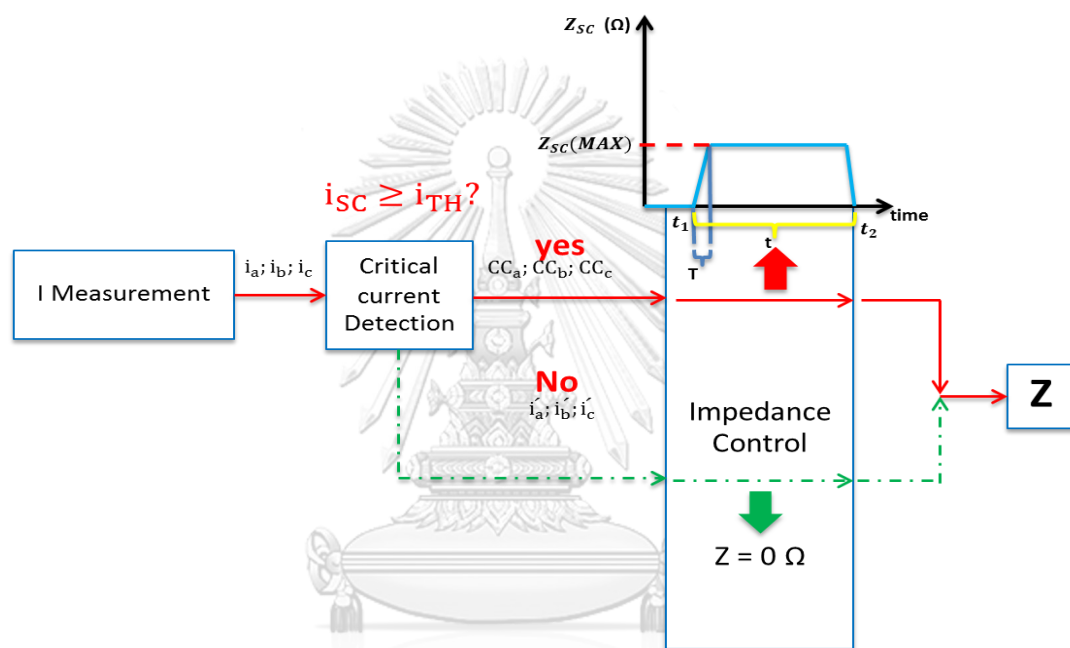
ในส่วนนี้ได้นำระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL [10] มาจำลองเลียนแบบลงในโปรแกรม DIGSILENT ตามรูปที่ 3.4 โดยระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL จะเป็นตัวช่วยให้แบบจำลอง SCFCL ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับของจริงยิ่งขึ้นเมื่อจำลองให้เกิดเหตุการณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า โดยระบบควบคุมการทำงานประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้

1) Measurement Unit ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสที่จุดเชื่อมต่อระหว่างบัสกับอุปกรณ์ SCFCL แล้วส่งสัญญาณขาออก **i<sub>a</sub>** **i<sub>b</sub>** และ **i<sub>c</sub>** ไปให้กับ Critical current Detection

2) Critical current Detection ทำหน้าที่เปรียบเทียบขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด (**I<sub>sc</sub>**) กับ ค่ากระแสกระตุ้นของตัวนำยิ่งยวด (**I<sub>TH</sub>**) โดยถ้าค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่ากระแสกระตุ้นของตัวนำยิ่งยวด Critical current Detection จะส่งสัญญาณ **CC<sub>a</sub>** **CC<sub>b</sub>** และ **CC<sub>c</sub>** ต่อไปให้กับ Impedance Control แต่ถ้าค่ากระแสที่ไหลผ่าน

ตัวนำยิ่งยวดมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสกระตุ้นของตัวนำยิ่งยวดจะส่งสัญญาณ  $I_a$   $I_b$  และ  $I_c$  ต่อไปให้กับ Impedance Control

3) Impedance Control เป็นตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ของตัวนำยิ่งยวด โดยถ้าได้รับสัญญาณ  $CC_a$   $CC_b$  และ  $CC_c$  Impedance Control จะสั่งให้ตัวนำยิ่งยวดเพิ่มขนาดอิมพีแดนซ์ตามกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดจากสภาวะปกติไปยังสภาวะเกิดการลัดวงจร แต่ถ้าได้รับสัญญาณ  $I_a$   $I_b$  และ  $I_c$  Impedance Control จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวนำยิ่งยวดจากค่าเดิมในสภาวะปกติหรือ  $Z = 0 \Omega$

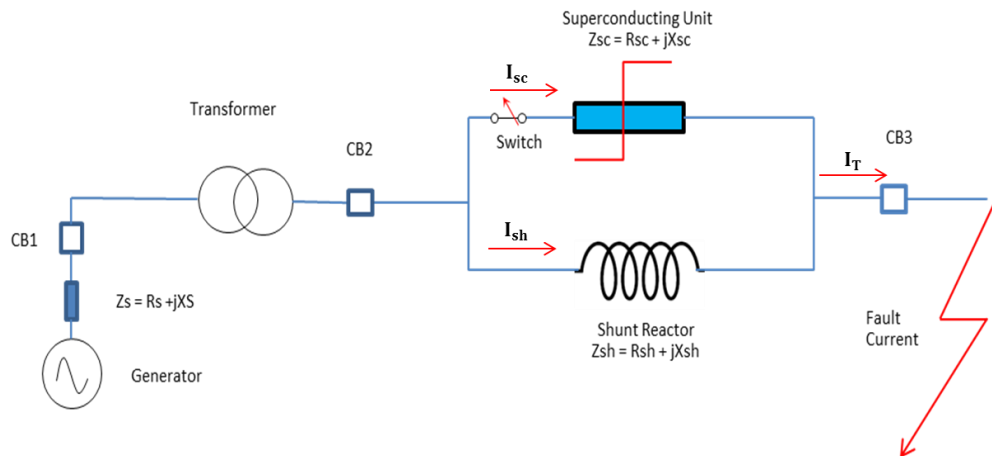


รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมการทำงานของ SCFCL

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.3.3 ตรวจสอบแบบจำลองของ SCFCL

เนื่องจากผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีข้อมูลการทดสอบของผู้ผลิต SCFCL ที่ระดับแรงดัน 115 kV โดยอุปกรณ์ SCFCL มี Shunt Reactor ขนาดเท่ากับ 13.56  $\Omega$  ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะที่เกิดการลัดวงจรที่มีค่ายอดกระแส ( $I_{peak}$ ) 15.26 KA ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลอง SCFCL ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาจำลองตามเหตุการณ์เดียวกับผู้ผลิต เพื่อตรวจสอบความสามารถในการลดกระแสลัดวงจรที่ค่าพิกัด โดยเปรียบเทียบค่ายอดกระแสและรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ SCFCL ของผู้ผลิต [11] กับผลการจำลองที่ได้ ตามตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.6

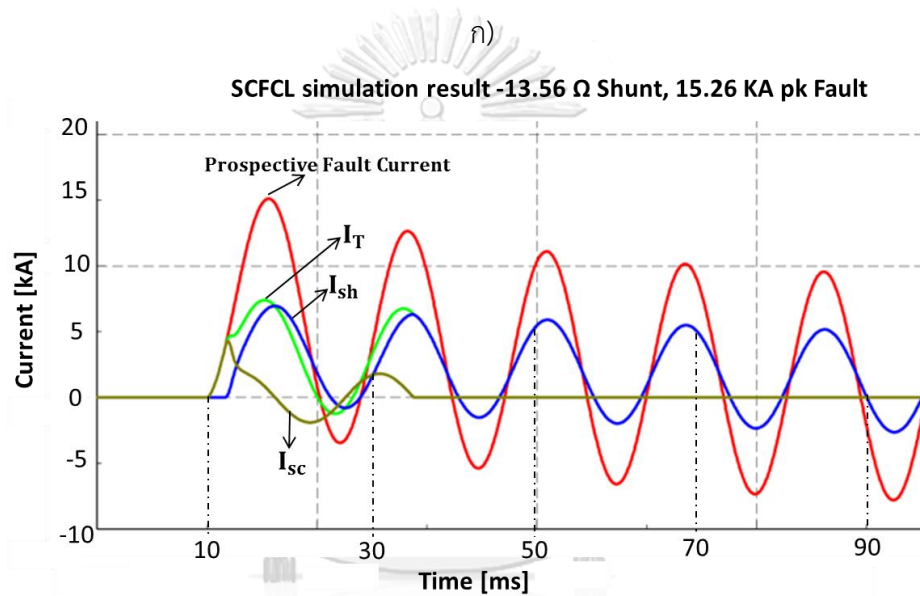
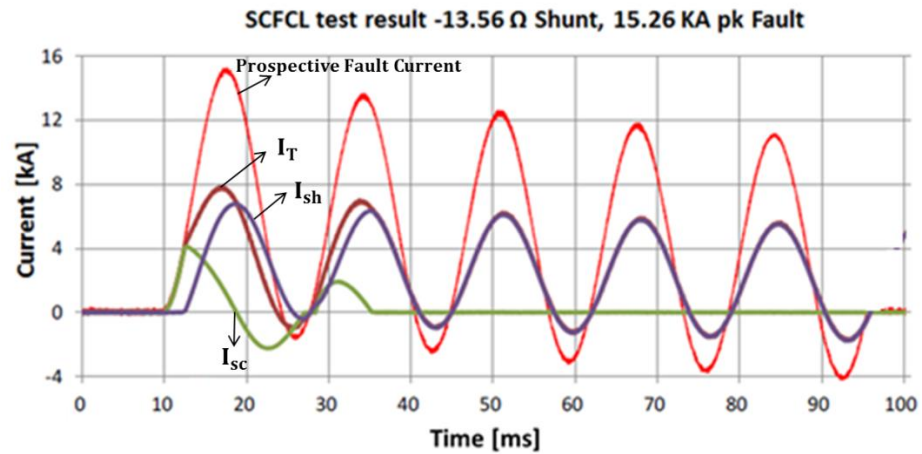


รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบ 115 KV

ตารางที่ 3.6 ตารางเปรียบเทียบค่ายอดกระแสที่ได้จากการจำลองกับค่าทดสอบ SCFCL

ค่าทดสอบ	ผลการทดสอบ	ผลการจำลอง	ค่าความผิดพลาด (%)
$I_T$ [kA Peak]	7.65	7.68	0.3
$I_{sh}$ [kA Peak]	6.54	6.85	4.7
$I_{sc}$ [kA Peak]	4.13	4.26	3.1

จากรูปที่ 3.6 กราฟแสดงกระแสที่ไหลออกจาก SCFCL กระแสที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ขนาน และกระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด และตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบค่ายอดของกระแสลัดวงจร พบว่า ค่ายอดของกระแสและรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าทดสอบของผู้ผลิต ดังนั้น สามารถแทนอุปกรณ์ SCFCL ด้วยแบบจำลองในโปรแกรม DigSILENT เพื่อนำไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า กระแสผิดพร้อมจำลอง (Prospective Fault Current) กระแสที่ไหลออกจาก SCFCL (Limited Current) กระแสที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนาน (Shunt Current) และกระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด (SC Current) โดยที่รูป ก) ผลการทดสอบของผู้ผลิต และรูป ข) ผลการจำลองใน DigSILENT

## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์กรณีศึกษาผลประโยชน์ของ SCFCL บนระบบ 115 กิโลโวลต์

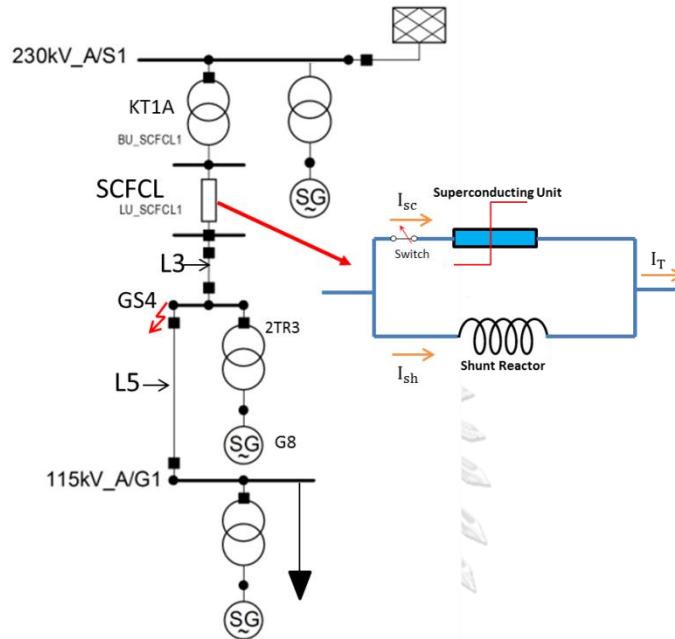
ในบทนี้จะศึกษาผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL บนส่วนหนึ่งในระบบ 115 kV ของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ โดยจำลองระบบไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ให้กับระบบที่มีการวางแผนที่จะนำอุปกรณ์ SCFCL มาประยุกต์ใช้ โดยมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรคือมาตรฐาน IEC 60909 ซึ่งในบทนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 6 ส่วน

- 4.1 การลดกระแสไดนามิกส์
- 4.2 การลดกระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ
- 4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆ
- 4.4 การลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL
  - 1) การลดพลังงานไฟฟ้าจากการลัดวงจร
  - 2) ค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP
  - 3) บริเวณการลดกระแสลัดวงจร
- 4.5 การลดแรงดันตกชั่วขณะ
- 4.6 การลดกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง



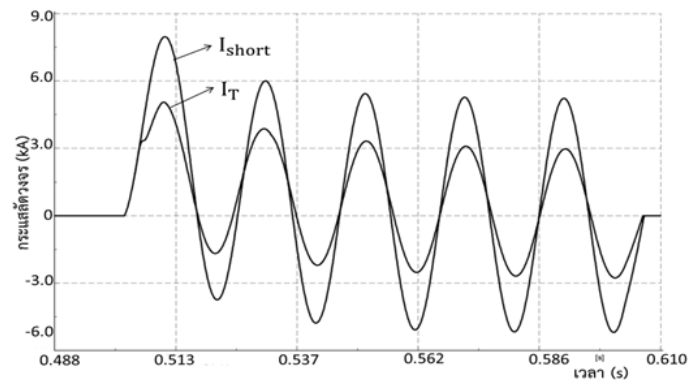
#### 4.1 การลดกระแสไดนามิกส์

ในหัวข้อนี้จะแสดงกระแสที่ไหลผ่าน SCFCL เพื่อวิเคราะห์ผลจากการติดตั้ง SCFCL ต่อกระแสไดนามิกส์ โดยจำลองให้เกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส GS4 ตามรูปที่ 4.1

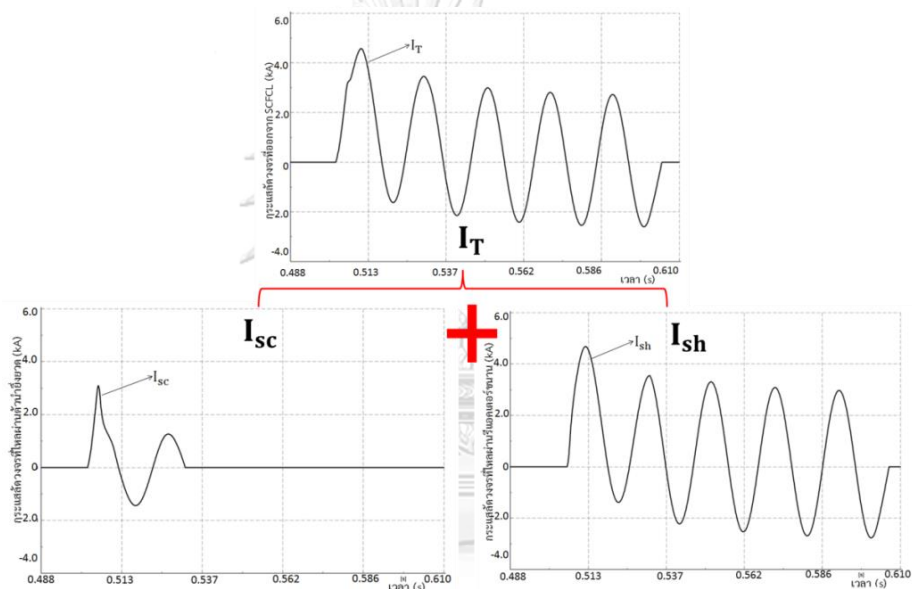


รูปที่ 4.1 แบบจำลองศึกษาการทำงานของ SCFCL-1 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส GS4

รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจร โดยที่ กราฟ  $I_{short}$  คือกระแสในระบบที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL, กราฟ  $I_T$  คือกระแสในระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL พบว่า SCFCL สามารถช่วยลดกระแสลัดวงจรได้ตั้งแต่คาบแรกของการเกิดลัดวงจร จึงส่งผลให้กระแสไดนามิกส์มีค่าลดลงด้วย เนื่องจากตัวนำยิ่งยวดมีการตอบสนองต่อกระแสลัดวงจรที่รวดเร็วและไม่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมจากภายนอก จึงทำให้สามารถลดกระแสไดนามิกส์ได้ทันที และนอกจากนี้ตัวนำยิ่งยวดจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติเพราะไม่มีความต้านทาน แต่จะมีความต้านทานที่สูงในสภาวะผิดปกติจึงทำให้ SCFCL มีความสามารถในการลดกระแสไดนามิกส์ที่สูงอีกด้วย



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการจำลองกระแสลัดวงจรเมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงกระแสลัดวงจร  $I_T$   $I_{sc}$  และ  $I_{sh}$   
เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดินที่บัส GS4

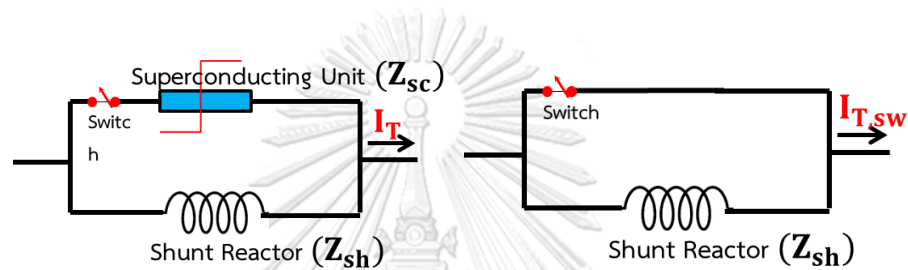
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงกระแสลัดวงจร  $I_T$  โดยประกอบไปด้วย กราฟ  $I_{sh}$  คือกระแสที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนาน และกราฟ  $I_{sc}$  คือกระแสที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด จะเห็นได้ว่า SCFCL มีวิธีการลดกระแสลัดวงจรตามนี้

- (1) ในช่วงต้นของการลัดวงจรกระแสลัดวงจรจะไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด เมื่อค่ากระแสลัดวงจรเกินค่ากระแสกระตุ้นของตัวนำยิ่งยวด ตัวนำยิ่งยวดจะมีค่าอิมพีแดนซ์ส่วนนี้ตามคุณลักษณะการทำงานเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจร
- (2) เนื่องจากตัวนำยิ่งยวดมีค่าอิมพีแดนซ์ กระแสลัดวงจรจึงมีการแบ่งไหลให้กับรีแอกเตอร์ขนาน เมื่อผ่านคาบแรกของการเกิดลัดวงจร สวิตช์ภายในอุปกรณ์ SCFCL จะทำการตัดวงจร

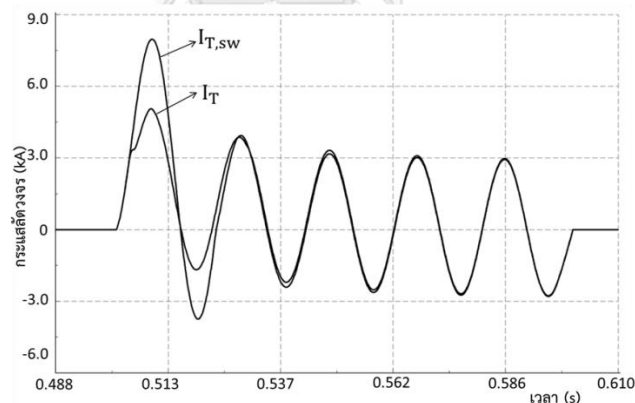
ส่วนตัวนำยิ่งยวดออกจากวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทำงานหนักจนได้รับความร้อนมากเกินไป

- (3) เมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดถูกตัดออกจากวงจร กระแสลัดวงจรจึงไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนานเพียงตัวเดียว ดังแสดงตามกราฟ  $I_{sc}$  และ  $I_{sh}$

จะเห็นได้ว่า SCFCL ช่วยลดกระแสลัดวงจรโดยเฉพาะอย่างยิ่งยอดแรกของการเกิดลัดวงจร โดยการลดค่ายอดแรกของการเกิดลัดวงจรจะส่งผลให้ความเครียดทางกลมีค่าลดลงและการลดค่าในสภาวะคงตัวของวงจรจะส่งผลให้ความเครียดทางความร้อนลดลง จึงทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายจากแรงในสภาวะลัดวงจรลดลง



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรแบบ SCFCL และสวิตช์ ตามลำดับ



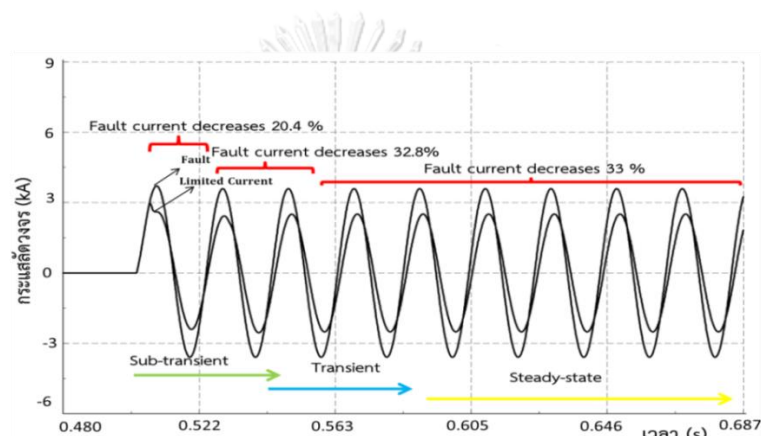
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบกระแสลัดวงจร  $I_T$  ในกรณีติดตั้ง SCFCL และ  $I_{T,sw}$  ในกรณีติดตั้งสวิตช์

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรแบบ SCFCL และแบบใช้สวิตช์เพียงอย่างเดียว โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการจำลองเพื่อเปรียบเทียบการลดกระแสไดนามิกส์ ซึ่งผลการจำลองแสดงตามกราฟที่ 4.5 พบว่า SCFCL มีความสามารถในการลดกระแสไดนามิกส์ได้ดีกว่าการใช้สวิตช์เพียงอย่างเดียวเนื่องจาก SCFCL มีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่ากระแสลัดวงจร

## 4.2 การลดกระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ

ในหัวข้อนี้จำลองให้เกิดการลัดวงจรตำแหน่งบัส GS4 ตามรูปที่ 4.1 แต่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของการเกิดการลัดวงจรเพื่อวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการลดค่ากระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ โดยชนิดของการเกิดการลัดวงจรที่จำลองมีดังนี้ การเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน การเกิดการลัดวงจรสามเฟสลงดิน การเกิดการลัดวงจรสองเฟสและการเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

### การเกิดการลัดวงจร แบบหนึ่งเฟสลงดิน

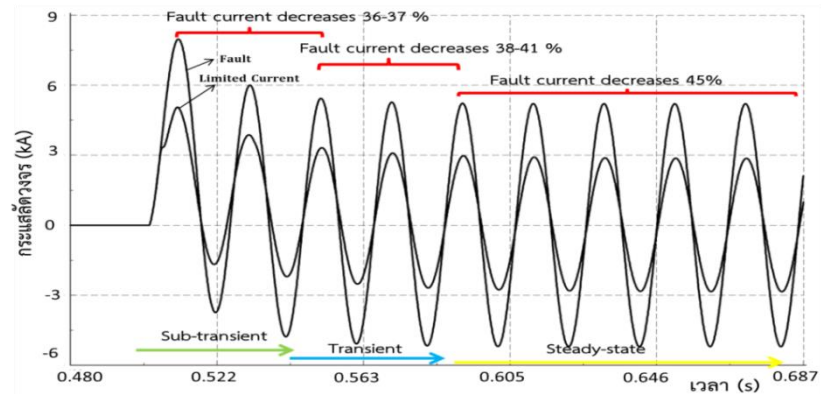


รูปที่ 4.6 กระแสลัดวงจรสูงสุดกรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1

เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

จากรูปที่ 4.6 ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 20.4% ช่วง Transient ลดได้ 32.8% และช่วง Steady-State ลดได้ 33% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการลดค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากในช่วง Sub-transient ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านตัวนำที่ยังยวดยาวและแบ่งไหลให้รีแอกเตอร์ขนาน ส่วนในช่วง Transient และ Steady-State ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนานเพียงตัวเดียว

### การเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน

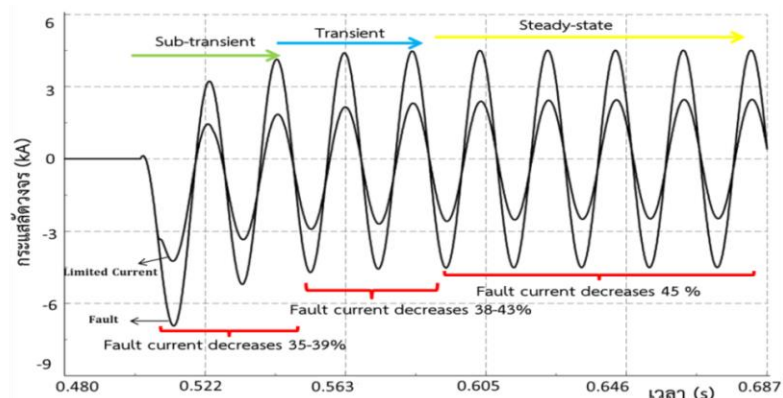


รูปที่ 4.7 กระแสลัดวงจรสูงสุดกรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1  
เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน

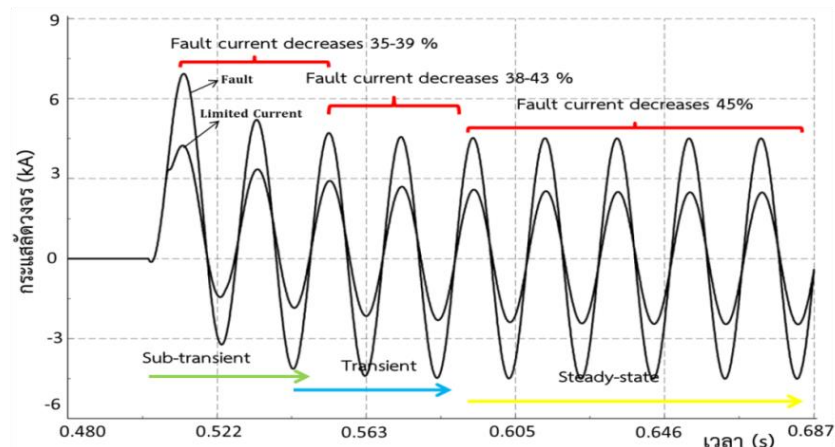
จากรูปที่ 4.7 ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 36-37% ช่วง Transient ลดได้ 38-41% และช่วง Steady-State ลดได้ 45% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการลดค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากในช่วง Sub-transient ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านตัวนำยิ่งยวดและแบ่งไหลให้รีแอกเตอร์ขนาน ส่วนในช่วง Transient และ Steady-State ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนานเพียงตัวเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟส



รูปที่ 4.8 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1  
เมื่อลัดวงจรแบบสองเฟส

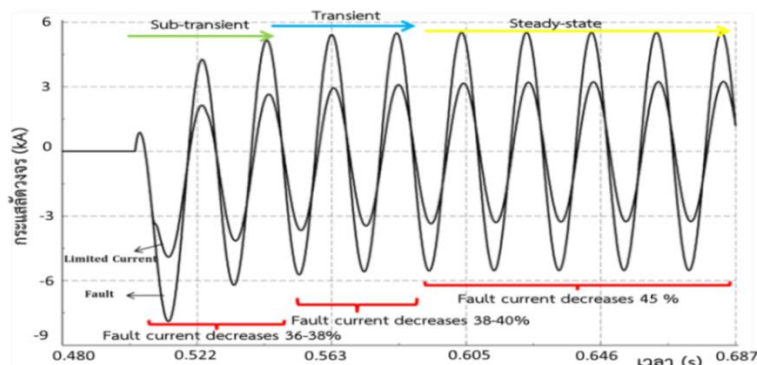


รูปที่ 4.9 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1

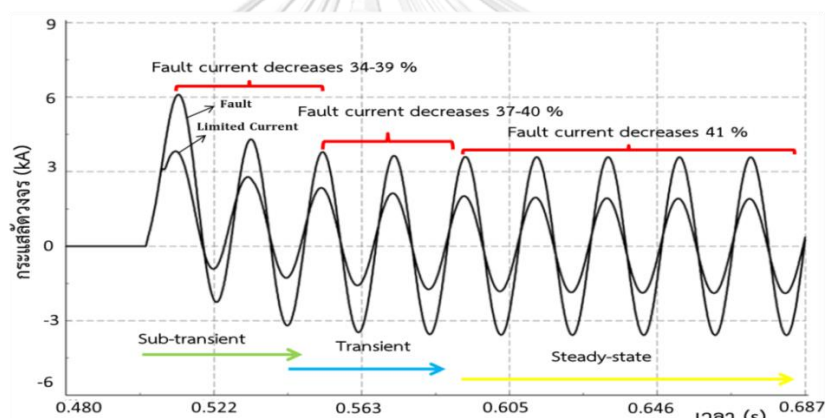
เมื่อลัดวงจรแบบสองเฟส

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.8 แสดงกระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟส พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 35-39% ช่วง Transient ลดได้ 38-43% และช่วง Steady-State ลดได้ 45% รูปที่ 4.9 แสดงกระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟส พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 35-39% ช่วง Transient ลดได้ 38-43% และช่วง Steady-State ลดได้ 45% ซึ่งจะเห็นได้ว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรได้เท่ากันทั้ง 2 เฟสที่เกิดการลัดวงจร โดยค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากในช่วง Sub-transient ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านตัวนำยิ่งยวดและแบ่งไหลให้รีแอกเตอร์ขนาน ส่วนในช่วง Transient และ Steady-State ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนานเพียงตัวเดียว

## การเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน



รูปที่ 4.10 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1  
เมื่อลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน



รูปที่ 4.11 กระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b กรณีมี SCFCL-1 กับไม่มี SCFCL-1  
เมื่อลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.10 แสดงกระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส a เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 36-38% ช่วง Transient ลดได้ 38-40% และช่วง Steady-State ลดได้ 45% รูปที่ 4.11 แสดงกระแสลัดวงจรสูงสุดเฟส b เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรในช่วง Sub-transient ลดได้ 34-39% ช่วง Transient ลดได้ 37-40% และช่วง Steady-State ลดได้ 41% ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับช่วง Sub-transient และช่วง Transient ของการเกิดลัดวงจรแบบ 2 เฟส SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรได้ใกล้เคียงกันทั้ง 2 เฟส แต่ช่วง Steady-State ของการเกิดลัดวงจรแบบ 2 เฟสลงดิน SCFCL จะลดค่ากระแสลัดวงจรเฟส a ได้ดีกว่าเฟส b โดยค่ากระแส



ลัดวงจรในแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากในช่วง Sub-transient ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านตัวนำที่ยาวและแบ่งไหลให้รีแอกเตอร์ขนาน ส่วนในช่วง Transient และ Steady-State ค่ากระแสลัดวงจรจะไหลผ่านรีแอกเตอร์ขนานเพียงตัวเดียว

#### เปรียบเทียบการลัดกระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในระบบที่ใช้ในงานวิจัยนั้น SCFCL สามารถลดกระแสลัดวงจรสำหรับการเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน แบบสองเฟส แบบสองเฟสลงดิน และหนึ่งเฟสลงดินได้ แต่ความสามารถในการลดกระแสของ SCFCL สำหรับการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินจะมีค่าแตกต่างจากการลัดวงจรแบบอื่นๆ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL ในสภาวะผิดปกติมีค่าเท่ากันสำหรับทุกๆ ชนิดของการเกิดการลัดวงจร ดังนั้นการลดกระแสลัดวงจรจะขึ้นกับปริมาณกระแสลัดวงจรในกรณีไม่ติดตั้ง SCFCL

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบการลดกระแสลัดวงจรในแต่ละช่วงของการเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ

ชนิดของการ ลัดวงจร	การลดกระแสลัดวงจรที่ช่วงเวลาต่างๆ		
	Sub-transient	transient	Steady-state
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	20.4%	32.8%	33%
การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน	36-37%	38-41%	45%
การลัดวงจรแบบสองเฟส	35-39%	38-43%	45%
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน	36-38%	38-40%	45%

#### 4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆ

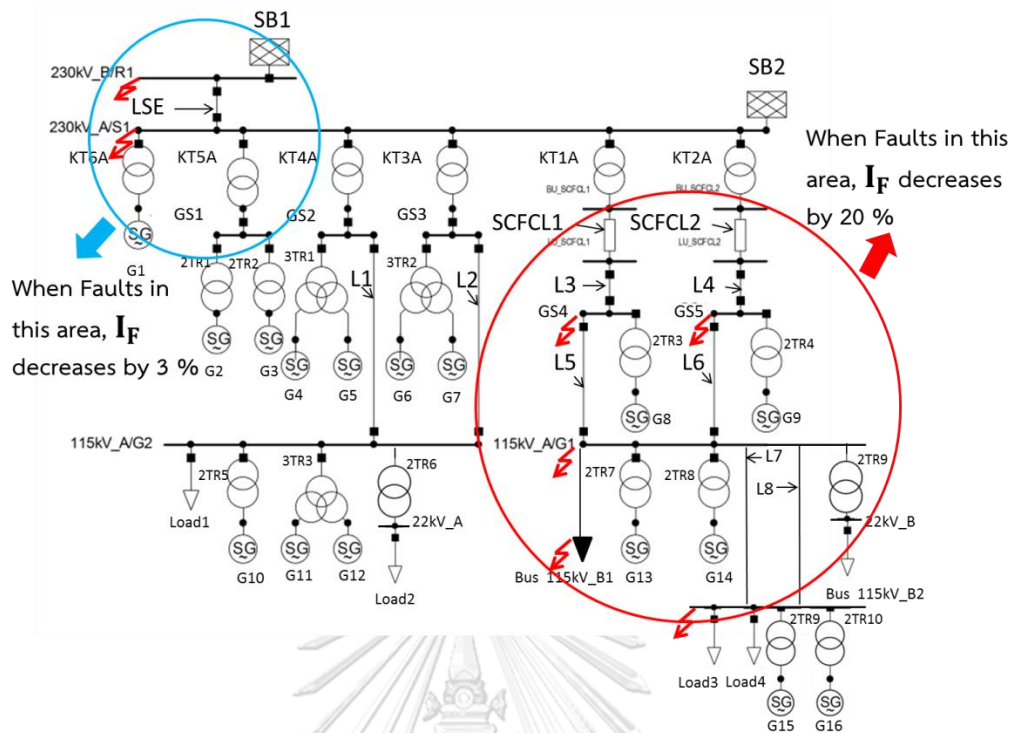
ในส่วนนี้จะดูค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งบัสต่างๆ ในกรณีติดตั้ง SCFCL และไม่ติดตั้ง SCFCL ในระบบไฟฟ้า ตามตารางที่ 4.2 เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งบัสที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบและตำแหน่งบัสที่ SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรได้มีประสิทธิภาพ



ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสและ 1 เฟสลงดินที่บัส กรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL

ตำแหน่งบัส ผิดพร้อม	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
230kV_B/R1	41.04	36.31	39.87	35.40
230kV_A/S1	34.72	41.73	33.11	39.89
GS1	6.66	7.42	6.64	7.41
GS2	16.09	19.01	16.01	18.93
GS3	16.09	19.01	16.01	18.93
GS4	25.59	31.79	20.51	26.07
GS5	25.59	31.79	20.51	26.07
115kV_A/G1	25.59	31.8	20.52	26.07
115kV_A/G2	16.09	19.31	16.01	18.93
115 kV_B1	24.80	30.74	20	25.36
115 kV_B2	24.13	30.53	20.02	25.26
22kV_A	7.24	0.03	7.23	0.03
22kV_B	7.56	0.03	7.44	0.03

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่บัส 230kV\_B/R1 มีค่าสูงสุดสำหรับกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่บัส 230kV\_A/S1 มีค่าสูงสุดสำหรับกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดิน โดยการติดตั้ง SCFCL ที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A และ KT2A สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_B/R1 และ 230kV\_A/S1 ได้ 3 % และที่ตำแหน่ง GS4, GS5, 115kV\_A/G1, 115kV\_B1 และ 115kV\_B2 ได้ 20 % จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรในบริเวณที่อยู่ใกล้กับ SCFCL ค่ากระแสลัดวงจรจะลดลงได้มากกว่าการลัดวงจรในบริเวณที่อยู่ไกลออกไปจาก SCFCL แสดงดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากการเกิดลัดวงจรในบริเวณบัสที่ใกล้กับ SCFCL จะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่าน SCFCL มากกว่าการเกิดลัดวงจรในบริเวณที่ไกลจาก SCFCL ก่อนไปรวมกันยังจุดที่เกิดการลัดวงจร



รูปที่ 4.12 ค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัสต่างๆ ในระบบไฟฟ้า

#### 4.4 การลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ผ่านสายส่งเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL โดยพิจารณาการเกิดลัดวงจรที่บริเวณการไฟฟ้า (บัส 230kV\_B/R1 และ บัส 230kV\_A/S1) และบริเวณผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (บัส 115kV\_A/G1)

##### กรณีที่ 1 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_B/R1

ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน และ 1 เฟสลงดิน ที่ตำแหน่งบัส 230kV\_B/R1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL โดยค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_B/R1

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
G1	52.34	29.85	53.32	30.57
G2	5.71	3.24	5.81	3.32
G3	5.65	3.21	5.75	3.29
G4	3.97	2.25	4.04	2.30
G5	3.96	2.24	4.03	2.30
G6	3.90	2.21	3.97	2.26
G7	3.89	2.20	3.96	2.25
G8	8.42	4.88	4.89	2.84
G9	8.47	4.91	4.92	2.86
G10	10.56	6.03	10.76	6.17
G11	3.90	2.21	3.97	2.26
G12	3.89	2.20	3.97	2.26
G13	7.35	4.18	4.27	2.43
G14	9.94	5.64	5.77	3.28
G15	3.37	1.82	1.95	1.06
G16	3.37	1.82	1.95	1.06

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_B/R1

สาย	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
LSE	5.750	10.79	5.164	10.30
L1	1.101	1.07	1.122	1.09
L2	1.104	1.08	1.125	1.10
L3	3.008	2.76	1.747	1.53
L4	3.007	2.76	1.746	1.53
L5	1.856	1.73	1.078	0.95
L6	1.848	1.72	1.072	0.95
L7	0.484	0.46	0.281	0.25
L8	0.484	0.46	0.281	0.25

จากผลการจำลองจะเห็นว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลจากฝั่งผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระไปยังฝั่งการไฟฟ้า หรือค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง LSE มีค่าลดลง 10 % เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟส และมีค่าลดลง 4.5 % เมื่อมีการลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน และค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง L3, L4, L5, L6, L7 และ L8 มีค่าลดลง 42 % สำหรับการเกิดลัดวงจรทั้ง 2 แบบ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G8, G9, G13, G14, G15 และ G16 ต้องผ่าน SCFCL จึงมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4.3 ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ ลดลง ตามตารางที่ 4.4

## กรณีที่ 2 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1

ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน และ 1 เฟสลงดิน ที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL โดยค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟส และ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_A/S1

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
G1	61.94	44.18	61.94	44.36
G2	6.75	4.79	6.75	4.80
G3	6.69	4.74	6.69	4.76
G4	4.70	3.32	4.70	3.33
G5	4.69	3.31	4.69	3.32
G6	4.61	3.26	4.61	3.27
G7	4.60	3.25	4.60	3.26
G8	9.96	7.20	5.68	4.11
G9	10.02	7.24	5.71	4.13
G10	12.50	8.91	12.50	8.94
G11	4.61	3.26	4.61	3.27
G12	4.61	3.26	4.61	3.27
G13	8.70	6.17	4.96	3.52
G14	11.76	8.33	6.70	4.75
G15	3.98	2.71	2.27	1.55
G16	3.98	2.71	2.27	1.55

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_A/S1

สาย	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
LSE	10.560	6.89	10.560	6.91
L1	1.304	1.48	1.304	1.47
L2	1.306	1.49	1.306	1.49
L3	3.560	3.84	2.029	2.11
L4	3.559	3.84	2.028	2.10
L5	2.196	2.39	1.252	1.31
L6	2.187	2.38	1.246	1.30
L7	0.573	0.63	0.326	0.34
L8	0.573	0.63	0.326	0.34

จากผลการจำลองพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง LSE มีค่าเท่าเดิมเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1 แม้มีการติดตั้ง SCFCL ในระบบไฟฟ้า เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง LSE ไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจรไม่ผ่าน SCFCL ใดๆก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง L3, L4, L5, L6 และ L7 มีค่าลดลง เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G8, G9, G13, G14 และ G15 ต้องผ่าน SCFCL จึงมีค่าลดลง ตามตารางที่ 4.5 ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ ลดลง ตามตารางที่ 4.6

### กรณีที่ 3 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 115kV\_A/G1

ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน และ 1 เฟสลงดิน ที่ตำแหน่งบัส 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL โดยค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟส และ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 115kV\_A/G1

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
G1	10.26	7.47	4.91	3.65
G2	1.12	0.81	0.54	0.40
G3	1.11	0.81	0.53	0.39
G4	0.78	0.56	0.37	0.28
G5	0.78	0.56	0.37	0.28
G6	0.76	0.55	0.37	0.27
G7	0.76	0.55	0.37	0.27
G8	22.17	16.31	22.17	16.64
G9	22.30	16.41	22.30	16.73
G10	2.07	1.51	0.99	0.74
G11	0.76	0.55	0.37	0.27
G12	0.76	0.55	0.37	0.27
G13	19.37	14	19.37	14.28
G14	26.18	18.89	26.18	19.27
G15	8.86	6.12	8.86	6.23
G16	8.86	6.12	8.86	6.23

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสและ 1 เฟสลงดิน ที่บัส 115kV\_A/G1

สาย	ไม่ติดตั้ง SCFCL		ติดตั้ง SCFCL	
	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)	SLG SC Current (kA)
LSE	1.749	1.16	0.838	0.57
L1	0.216	0.21	0.103	0.10
L2	0.216	0.21	0.104	0.10
L3	4.876	4.96	2.336	2.35
L4	4.875	4.96	2.335	2.35
L5	7.912	8.99	5.372	6.30
L6	7.928	9.02	5.388	6.33
L7	1.275	1.86	1.275	1.80
L8	1.275	1.86	1.275	1.80

จากผลการจำลองพบว่าการติดตั้ง SCFCL ช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง LSE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดค่ากระแสลัดวงจรจาก 1.749 kA เหลือ 0.838 kA สำหรับการเกิดลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน และ 1.16 kA เหลือ 0.57 kA สำหรับการเกิดลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน หรือกล่าวได้ว่า SCFCL ช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรได้ถึง 52 % ทั้งการเกิดลัดวงจรประเภท 3 เฟส และ 1 เฟสลงดิน เช่นเดียวกับค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่ง L1, L2, L3 และ L4 แต่สำหรับค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน L5 และ L6 มีค่าลดลงเพียง 32 % เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G10, G11 และ G12 ต้องผ่าน SCFCL จึงมีค่าลดลง ตามตารางที่ 4.7 ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ ลดลง ตามตารางที่ 4.8



#### 4.4.1 การลดพลังงานไฟฟ้าจากการลัดวงจร

ค่าพลังงานไฟฟ้าหมายถึงค่าพลังงานที่เกิดจากค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า หากพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้เนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป โดยเราสามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าได้จากค่ากระแสที่ไหลผ่าน CT และเวลาในการตัดวงจร ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230 kV\_A/S1 เปรียบเทียบระหว่างไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL

ตารางที่ 4.9 ค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบเมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV\_A/S1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL

ชนิดความผิดปกติ	พลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดลัดวงจร (kJ)	
	ไม่ติดตั้ง SCFCL	ติดตั้ง SCFCL
3-Phase Fault	12261	3946
2-Phase Fault	9759	3539
2-Phase to Ground Fault	12316	3948
Single line to Ground Fault	5045	3218

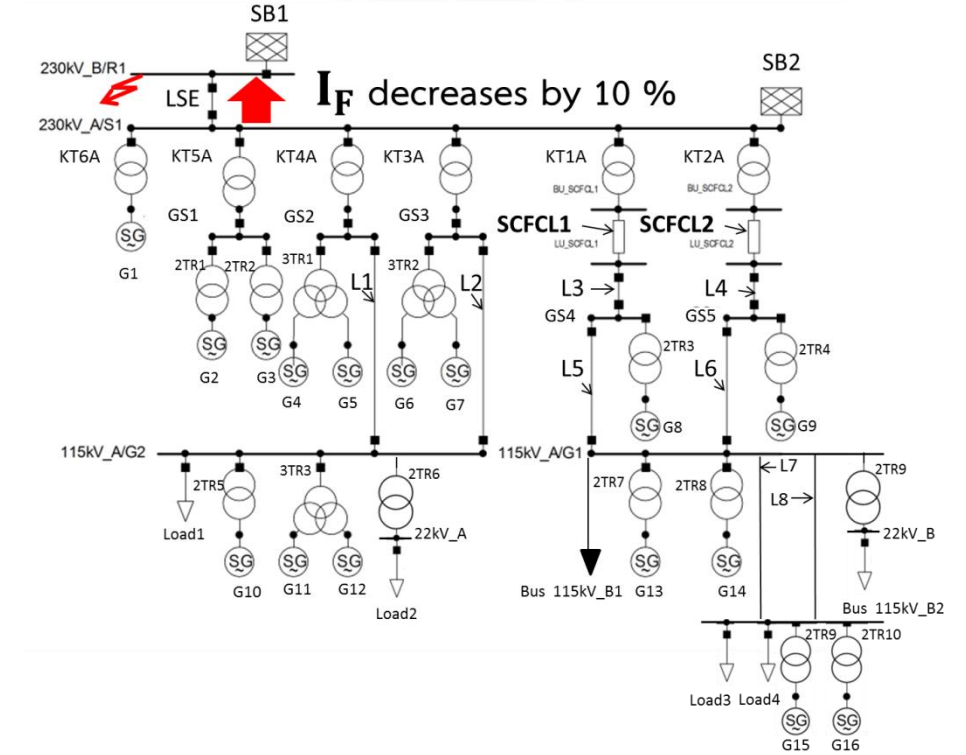
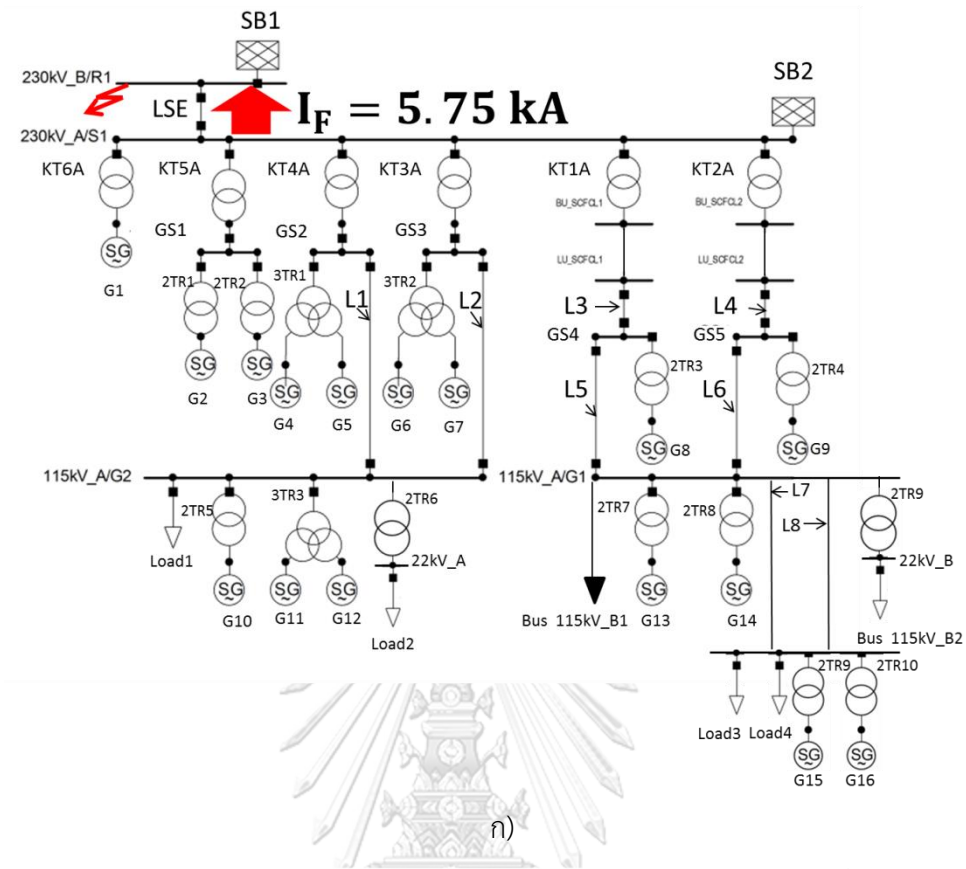
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่ไม่มีติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อเกิดการลัดวงจรต่างๆ ที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1 พบว่าการติดตั้ง SCFCL สามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 63-68 % สำหรับการเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงดิน 2 เฟส และ 2 เฟสลงดิน และลดพลังงานไฟฟ้าได้ 36 % สำหรับการเกิดการลัดวงจร 1 เฟสลงดิน ดังนั้นการติดตั้ง SCFCL สามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจร ทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายจากการเกิดลัดวงจรน้อยลง

#### 4.4.2 พิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP

ในส่วนนี้จะพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP แสดงตามรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

- (1) จากการจำลองกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_B/R1 ตารางที่ 4.4 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออก (กระแสที่ไหลผ่านสายส่ง LSE) มีค่าลดลง 10 % เมื่อมีการติดตั้ง SCFCL ดังรูปที่ 4.13
- (2) จากการจำลองกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1 และบัส 115kV\_A/G1 ตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.8 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP มีค่าลดลง 32 % เมื่อมีการติดตั้ง SCFCL ดังรูปที่ 4.14

จะเห็นได้ว่าการติดตั้ง SCFCL ที่ฝั่ง 115 kV หลังหม้อแปลง KT1A และ KT2A สามารถช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP ทำให้โหลดและอุปกรณ์ภายในระบบได้รับความเสียหายน้อยลง นอกจากนี้ในอนาคตถ้าหากมีการเพิ่มแหล่งจ่ายเนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น การติดตั้ง SCFCL จะช่วยให้ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มากขึ้นได้ เนื่องจากมี SCFCL ช่วยลดค่ากระแสลัดวงจร



รูปที่ 4.13 ค่ากระแสแอสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออก ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL



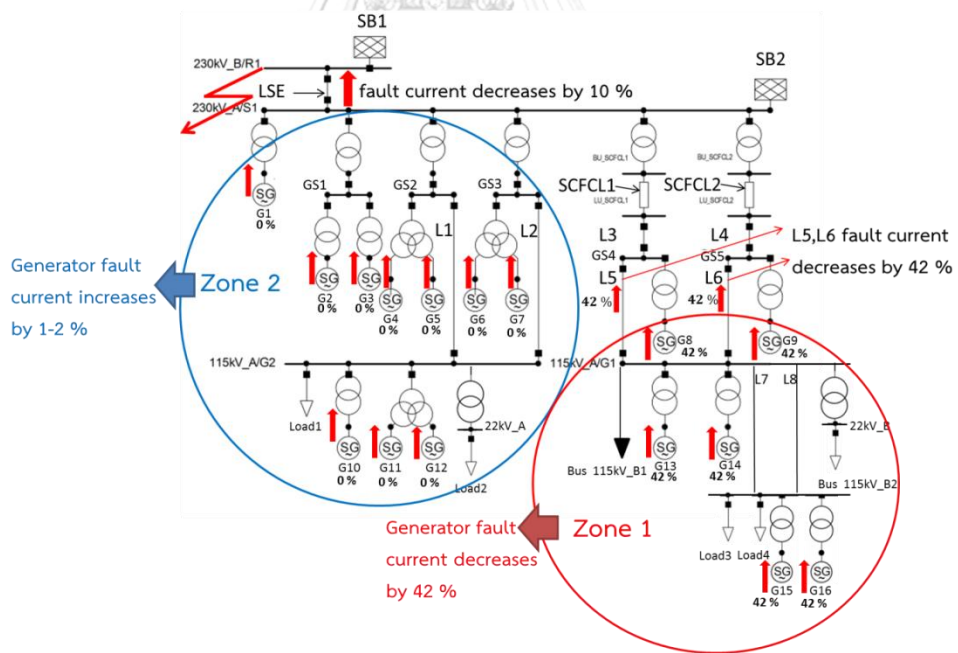
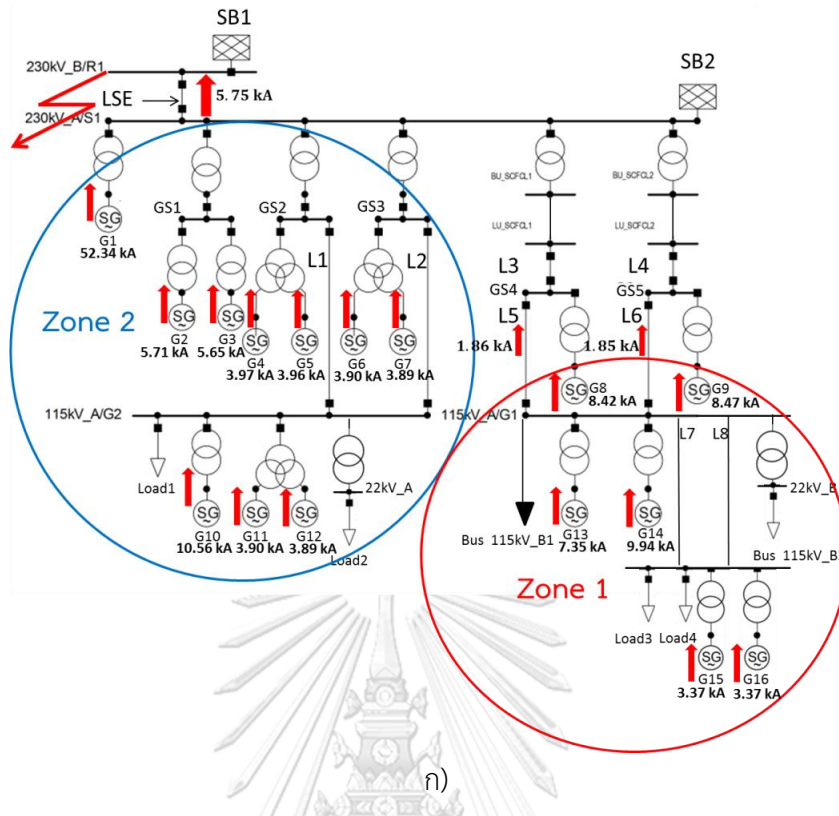
#### 4.4.3 พิจารณาบริเวณการลัดกระแสลัดวงจร

ในส่วนนี้จะพิจารณาบริเวณการลัดกระแสลัดวงจรจากค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งต่างๆ โดยแบ่งเป็น 2 กรณี ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

จากการจำลองกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_B/R1 แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 1 เพราะกระแสลัดวงจรที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 1 ต้องผ่าน SCFCL ในขณะที่กระแสลัดวงจรที่ไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 2 ไม่ผ่าน SCFCL จึงไม่มีผลต่อการลดกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 2 เช่นเดียวกับกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1

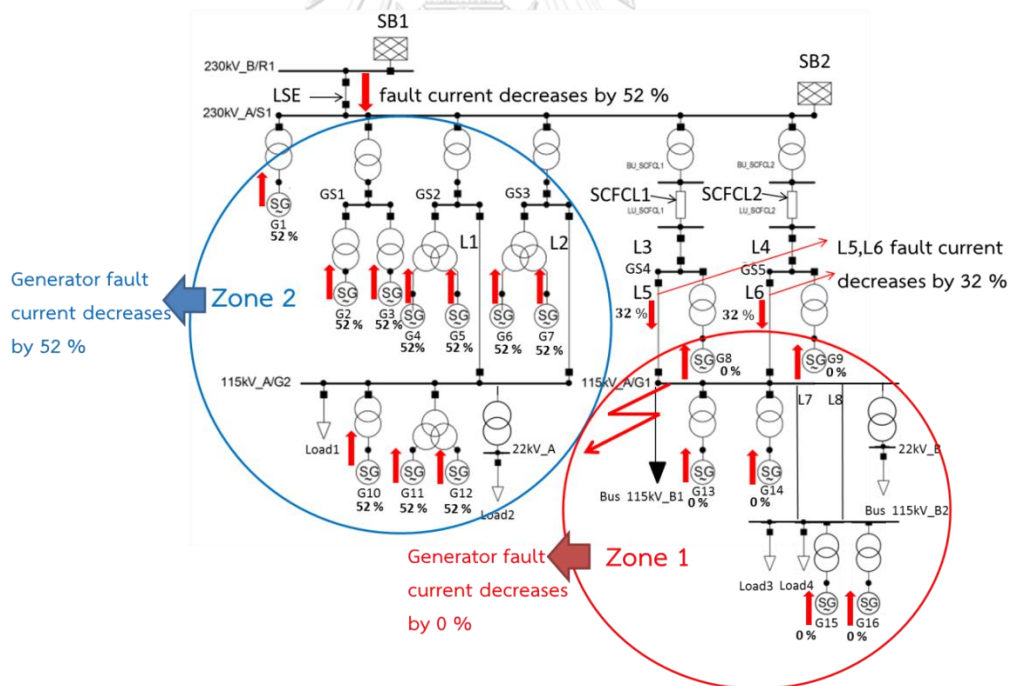
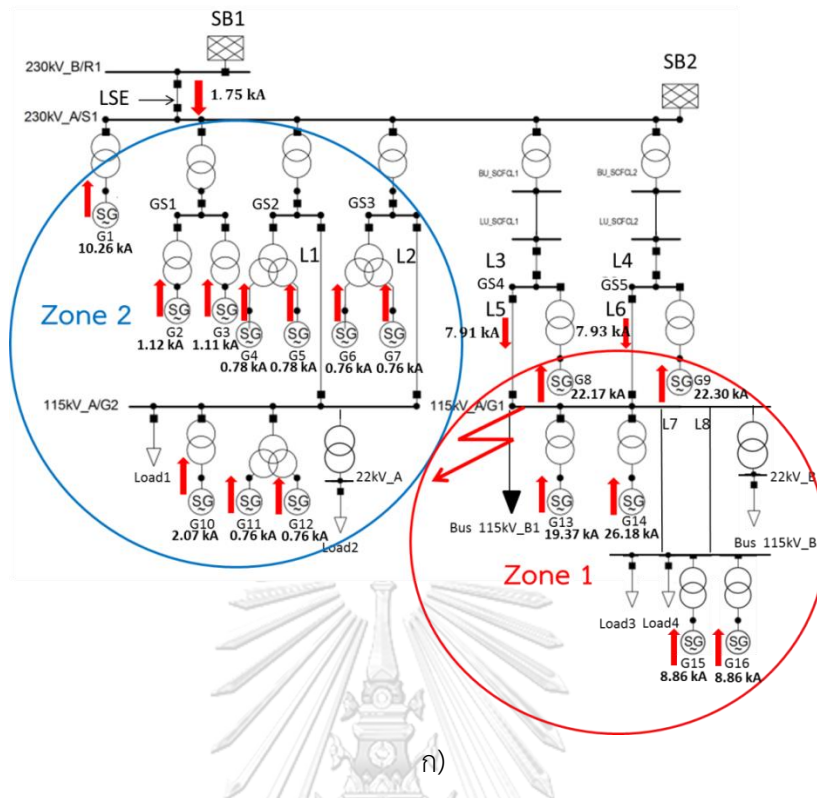
จากการจำลองกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 115kV\_AVG1 แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า SCFCL สามารถลดค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 2 เพราะกระแสลัดวงจรที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 2 ต้องผ่าน SCFCL ในขณะที่กระแสลัดวงจรที่ไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 1 ไม่ผ่าน SCFCL จึงไม่มีผลต่อการลดกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน Zone 1





ข)

รูปที่ 4.15 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายและที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ เมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV\_B/R1 ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL



รูปที่ 4.16 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายและที่ไหลผ่านสายส่งต่างๆ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 115kV\_A/G1 ก) ไม่ติดตั้ง SCFCL ข) ติดตั้ง SCFCL

จากรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาที่สายส่ง LSE พบว่าค่ากระแสลัดวงจรลดลงเพียงแค่ 10 % และที่สายส่ง L5 และ L6 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรลดลง 42 % และรูปที่ 4.16 ที่สายส่ง LSE พบว่าค่ากระแสลัดวงจรลดลง 52 % และที่สายส่ง L5 และ L6 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรลดลงแค่ 32 % จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งสายส่งต่างๆ หรือเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างกัน ประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL ก็จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผ่าน SCFCL มีค่ามากหรือน้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ผ่าน SCFCL แต่ไหนดั่งนั้นผู้ที่ติดตั้ง SCFCL ควรวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรในระบบว่ามีค่าสูงสุดบริเวณไหนและต้องการป้องกันบริเวณไหนมากที่สุดก่อนนำ SCFCL ไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

#### 4.5 การลดแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะคือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงชั่วขณะและมีขนาดเหลือประมาณ 0.1 ถึง 0.9 p.u.จากระดับแรงดันปกติภายในระยะเวลา 0.5 Cycle ถึง 1 นาที โดยงานวิจัยนี้จะแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดินในระบบที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เนื่องจากการลัดวงจรที่พบบ่อยในระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาดำเนินการเกิดลัดวงจรที่บริเวณการไฟฟ้า (บัส 230kV\_AV/S1) และบริเวณผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (บัส 115kV\_AV/G1)

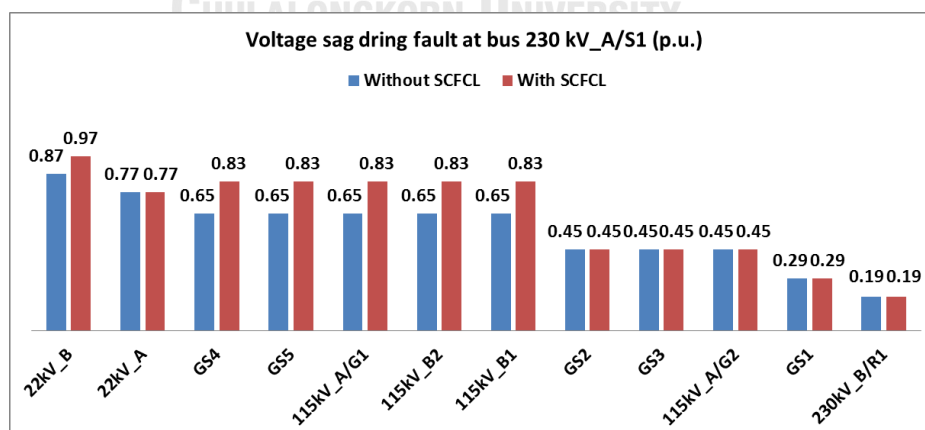
##### กรณีที่ 1 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_AV/S1

ผลการทดสอบค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_AV/S1 ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน แสดงตามตารางที่ 4.10

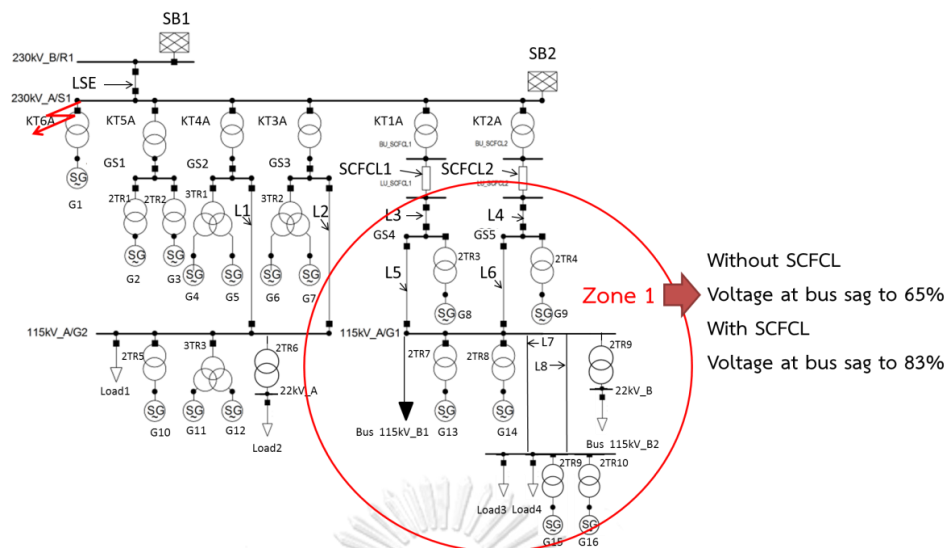


ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 230kV\_A/S1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL

ตำแหน่ง	Voltage Magnitude					
	ไม่ติดตั้ง SCFCL			ติดตั้ง SCFCL		
	Phase A (p.u.)	Phase B (p.u.)	Phase C (p.u.)	Phase A (p.u.)	Phase B (p.u.)	Phase C (p.u.)
230kV_B/R1	0.19	0.89	1.09	0.19	0.89	1.09
230kV_A/S1	0	0.82	1.02	0	0.82	1.03
GS2	0.45	0.93	1.02	0.45	0.93	1.02
GS3	0.45	0.93	1.02	0.45	0.93	1.02
GS4	0.65	0.97	1.02	0.83	1	1.03
GS5	0.65	0.97	1.02	0.83	1	1.03
115kV_A/G1	0.65	0.97	1.02	0.83	1	1.03
115kV_A/G2	0.45	0.93	1.02	0.45	0.93	1.02
GS1	0.29	0.91	1.03	0.29	0.91	1.03
115kV_B2	0.65	0.97	1.01	0.83	1	1.03
115kV_B1	0.65	0.97	1.01	0.83	1	1.03
22kV_A	0.77	0.72	1.13	0.77	0.71	1.13
22kV_B	0.87	0.84	1.13	0.97	0.86	1.13



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 230kV\_A/S1 ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งและติดตั้ง SCFCL



รูปที่ 4.18 บริเวณที่ SCFCL ช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะ  
เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV\_A/S1

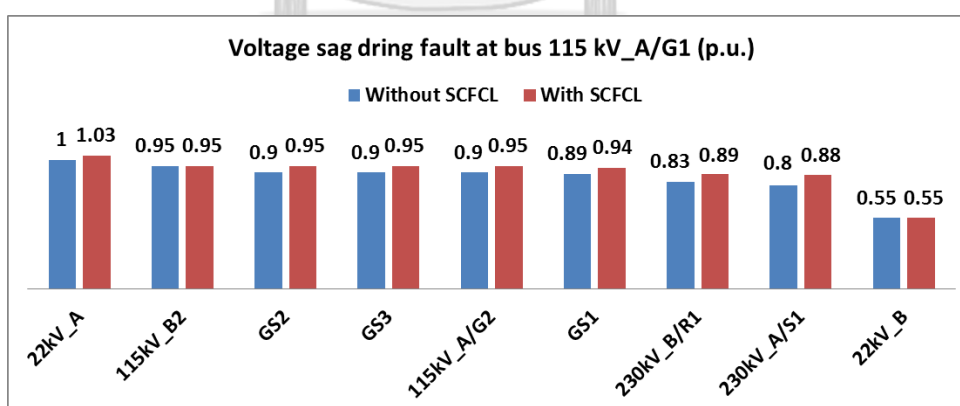
จากตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งบัสต่างๆ ในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 เมื่อไม่ติดตั้ง SCFCL พบว่า ค่าแรงดันที่บัส GS4, GS5, 115kV\_A/G1, 115kV\_B1 และ 115kV\_B2 ลดลงเหลือ 65 % และที่บัส 22kV\_B ลดลงเหลือ 87 % แต่เมื่อมีการติดตั้ง SCFCL จะทำให้ค่าแรงดันที่บัสลดลงเหลือ 83 % และ 97 % ตามลำดับ แสดงตามรูปที่ 4.17 และจากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 SCFCL จะช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บริเวณ Zone 1 ให้ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอิมพีแดนซ์ของ SCFCL ในสภาวะผิดปกติ จึงทำให้ค่าแรงดันที่ตำแหน่งหน้า SCFCL เพิ่มขึ้นหรือกล่าวได้ว่า SCFCL จะช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่ตำแหน่งหน้า SCFCL ให้ดีขึ้น

## กรณีที่ 2 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 115kV\_A/G1

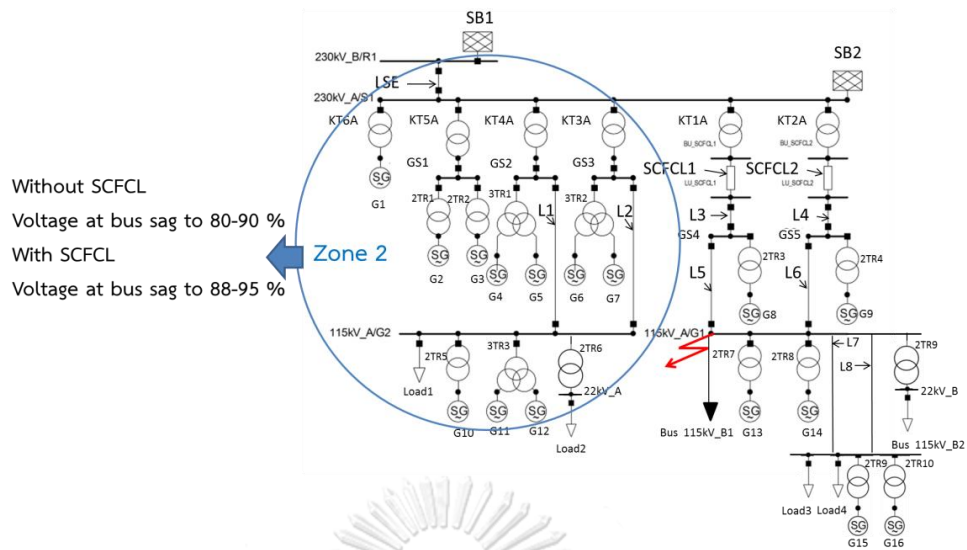
ผลการทดสอบค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ไม่มีติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน แสดงตามตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ไม่มีติดตั้งและติดตั้ง SCFCL

ตำแหน่ง	Voltage Magnitude					
	ไม่ติดตั้ง SCFCL			ติดตั้ง SCFCL		
	Phase A (p.u.)	Phase B (p.u.)	Phase C (p.u.)	Phase A (p.u.)	Phase B (p.u.)	Phase C (p.u.)
230kV_B/R1	0.83	0.93	0.94	0.89	0.94	0.95
230kV_A/S1	0.8	0.92	0.93	0.88	0.94	0.94
GS2	0.89	0.98	0.98	0.95	0.99	0.99
GS3	0.89	0.98	0.98	0.95	0.99	0.99
GS4	0	0.9	0.9	0	0.9	0.89
GS5	0	0.9	0.9	0	0.9	0.89
115kV_A/G1	0	0.9	0.9	0	0.9	0.89
115kV_A/G2	0.89	0.98	0.98	0.95	0.99	0.99
GS1	0.89	0.98	0.98	0.94	0.99	0.99
115kV_B2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
115kV_B1	0	0.9	0.9	0	0.9	0.89
22kV_A	1	1	1.07	1.03	1.03	1.07
22kV_B	0.55	0.56	1.06	0.55	0.55	1.06



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ เมื่อลัดวงจร 1 เฟสลงดินที่บัส 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ไม่มีติดตั้งและติดตั้ง SCFCL



รูปที่ 4.20 บริเวณที่ SCFCL ช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะ  
เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 115kV\_A/G1

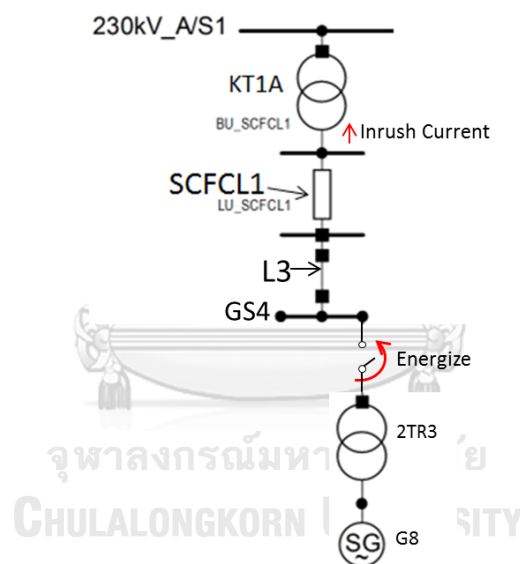
จากตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งบัสต่างๆ ในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่ตำแหน่ง 115kV\_A/G1 เมื่อไม่ติดตั้ง SCFCL พบว่า ค่าแรงดันที่บัส 230kV\_A/S1 ลดลงเหลือ 80 % ที่บัส 230 kV\_B/R1 ลดลงเหลือ 83 % และที่บัส GS1, GS2, GS3 และ 115kV\_A/G2 ลดลงเหลือ 90 % แต่เมื่อมีการติดตั้ง SCFCL จะทำให้ค่าแรงดันที่บัสลดลงเหลือ 88 %, 89 % และ 95 % ตามลำดับ แสดงตามรูปที่ 4.19 และจากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 115kV\_A/S1 SCFCL จะช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บริเวณ Zone 2 ให้ดีขึ้นเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 การลัดวงจรที่ตำแหน่งบัส 230kV\_A/S1

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV\_A/S1 และรูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 115kV\_A/G1 จะเห็นได้ว่าการติดตั้ง SCFCL ที่หลังหม้อแปลง KT1A และ KT2A ฝั่ง 115 kV จะมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะสำหรับการเกิดลัดวงจรที่บัส 230kV\_A/S1 ดีกว่าการเกิดลัดวงจรที่บัส 115kV\_A/G1 เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะเมื่อไม่มีการติดตั้ง SCFCL ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV\_A/S1 มีค่าต่ำกว่ากรณีที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 115kV\_A/G1

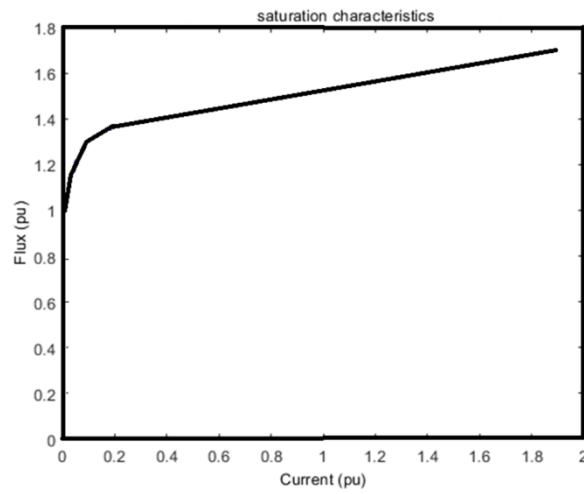
#### 4.6 การลดกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง

กระแสฟุ้งเข้าคือกระแสที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์อย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มทำงานหรือเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลง โดยค่ากระแสฟุ้งเข้าจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของแกนเหล็ก แรงดันเริ่มต้น (initial voltage) ที่จ่ายให้หม้อแปลง และสถานะของฟลักซ์ตกค้างในแกนเหล็ก (residual magnetic flux) ก่อนที่จะจ่ายแรงดันเข้าหม้อแปลง และอาจมีค่าสูงขึ้นถึง 5-6 เท่าของกระแส full load ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลงสามารถส่งผลกระทบต่อระบบได้ถ้าช่วงเวลาของการมีอยู่ของกระแสนี้ในระบบนานเพียงพอโดยประมาณ 200 ms หรือ 10 cycles

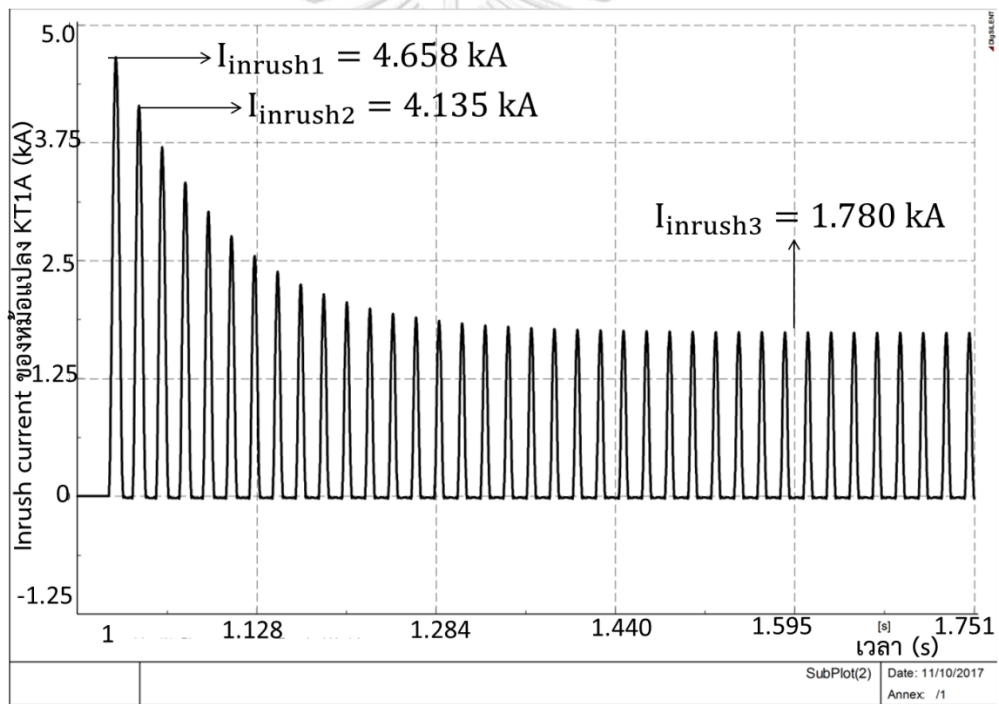
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลกระทบของ SCFCL ที่มีต่อกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง โดยจำลองระบบในกรณีที่ดีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL และจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลง KT1A แสดงดังรูปที่ 4.21 โดยกราฟคุณลักษณะของการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง KT1A [12] แสดงดังรูปที่ 4.22



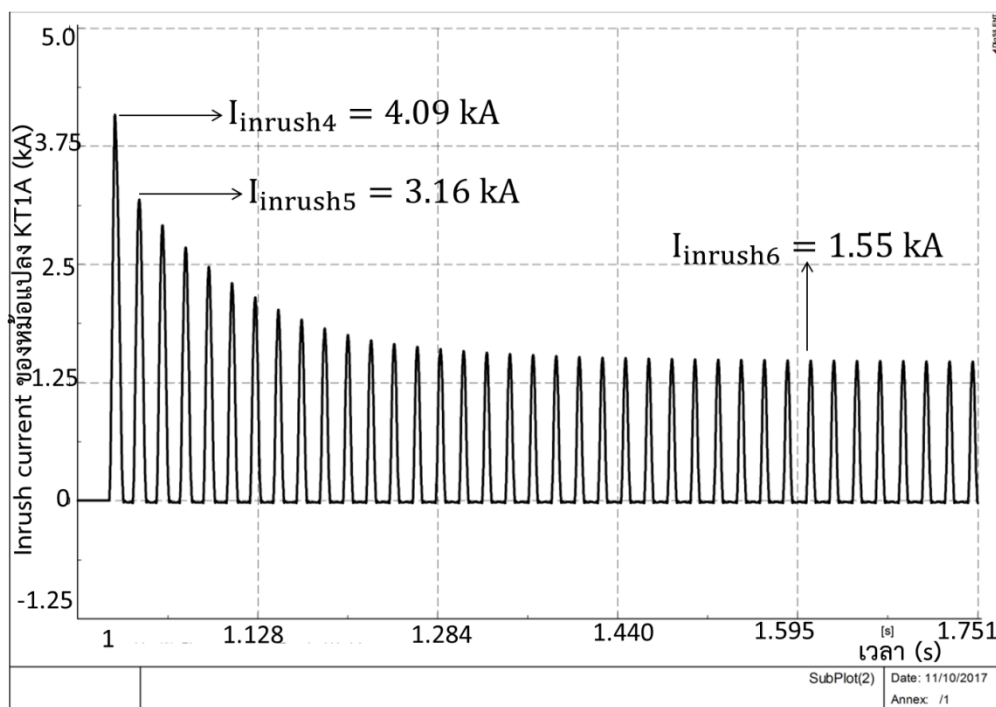
รูปที่ 4.21 แบบจำลองผลกระทบต่อกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง



รูปที่ 4.22 คุณลักษณะของการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง KT1A ที่สมมุติขึ้น



รูปที่ 4.23 กระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL



รูปที่ 4.24 กระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่มีการติดตั้ง SCFCL

รูปที่ 4.23 แสดงผลการจำลองค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL พบว่า ค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงยอดแรก ( $I_{inrush1}$ ) มีค่า 4.658 kA ยอดที่ 2 ( $I_{inrush2}$ ) มีค่า 4.135 kA และค่าในช่วงสภาวะคงตัวของกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง ( $I_{inrush3}$ ) มีค่า 1.780 kA

รูปที่ 4.24 แสดงผลการจำลองค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง KT1A ในกรณีที่มีการติดตั้ง SCFCL พบว่าค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงยอดแรก ( $I_{inrush1}$ ) มีค่า 4.09 kA ยอดที่ 2 ( $I_{inrush2}$ ) มีค่า 3.16 kA และค่าในช่วงสภาวะคงตัวของกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง ( $I_{inrush3}$ ) มีค่า 1.55 kA

จากผลการจำลองตามรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อติดตั้ง SCFCL ค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงยอดแรก ( $I_{inrush1}$ ) มีค่าลดลงจาก 4.658 kA เหลือ 4.09 kA ยอดที่ 2 ( $I_{inrush2}$ ) มีค่าลดลงจาก 4.135 kA เหลือ 3.16 kA และค่าในช่วงสภาวะคงตัวของกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง ( $I_{inrush3}$ ) มีค่าลดลงจาก 1.780 kA เหลือ 1.55 kA จะเห็นได้ว่าการติดตั้ง SCFCL สามารถช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลง โดยกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงอาจทำให้เกิดความร้อนขึ้นจนทำให้ฉนวนของหม้อแปลงได้รับความเสียหายได้ถ้าได้รับความร้อนมากเกินไป ซึ่งฉนวนนี้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็กและป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกันได้ ถ้าฉนวนเสียหายอาจทำให้ขดลวดเกิดการสัมผัสกันหรือสัมผัสกับแกนเหล็กอาจทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดได้ และค่าแรงกลของกระแสพุ่งเข้าจากการจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงสามารถทำให้ขดลวดของหม้อแปลงได้รับความเสียหายอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำให้อุปกรณ์ป้องกันที่ป้องกันหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้เพราะเข้าใจว่าเป็นความผิดปกติถ้ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงมีอยู่เป็นเวลานาน ดังนั้นการใช้ SCFCL จะช่วยทำให้หม้อแปลงได้รับค่ากระแสที่เกิดจากการจ่ายไฟเข้าสู่หม้อแปลงลดลง เนื่องจากการเพิ่มอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วในสภาวะผิดปกติของ SCFCL ส่งผลให้ขดลวดและฉนวนของหม้อแปลงได้รับความร้อนน้อยลงทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น



## บทที่ 5

### การทดสอบและวิเคราะห์กรณีศึกษาผลกระทบของ SCFCL ระบบ 115 กิโลโวลต์

ในบทนี้จะศึกษาผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL บนส่วนหนึ่งในระบบ 115 kV ของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ โดยจำลองระบบไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีแผนจะติดตั้งอุปกรณ์ SCFCL โดยมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรคือมาตรฐาน IEC 60909 ซึ่งในบทนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 ส่วน

- 5.1 การเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน
- 5.2 การจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 5.3 ความไม่สมดุลเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL เสียหาย

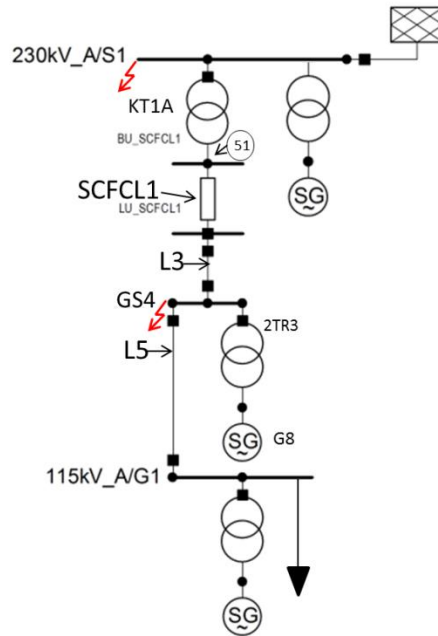
#### 5.1 การเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

ระบบ 115 kV นิยมติดตั้งรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay : 87) สำหรับการป้องกันหลักที่หม้อแปลงตัวใหญ่หรือมีความสำคัญและใช้รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay : 51) เป็นตัวป้องกันสำรอง ซึ่งการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรจะส่งผลต่อการทำงานของระบบป้องกันสำรอง

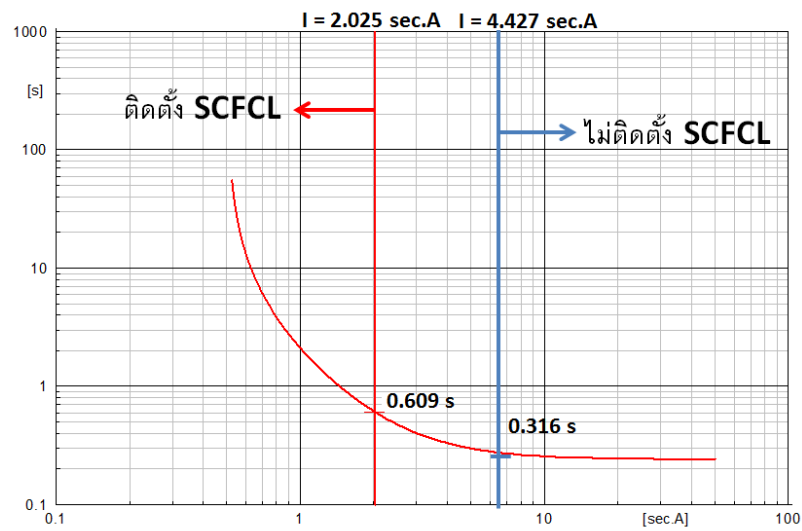
หัวข้อนี้จะแสดงเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV ตามรูปที่ 5.1 เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน 2 เฟส 2 เฟสลงดินและ 1 เฟสลงดินที่ตำแหน่งบัส GS4 และบัส 230kV\_A/S1 ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งและติดตั้ง SCFCL โดยรีเลย์กระแสเกินที่ใช้ในการจำลองมีค่า CT Ratio เท่ากับ 1200 : 1 และตั้งค่าตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การตั้งค่ารีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV

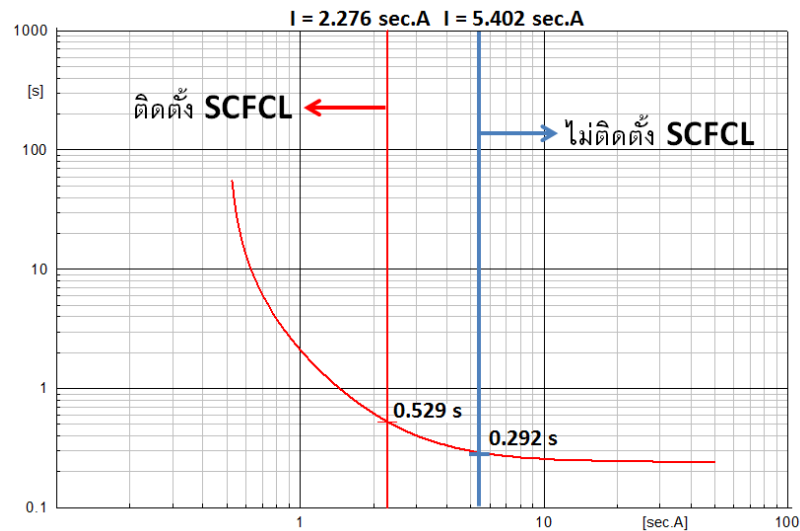
ระดับแรงดันไฟฟ้า (kV)	การตั้งค่ารีเลย์กระแสเกินชนิดเวลาผกผันกับกระแส		
	กระแสเริ่มต้นทำงาน (A)	Time Dial (s)	Charateristics Curve
115	1200	0.1	very Inverse



รูปที่ 5.1 แบบจำลองศึกษาผลกระทบต่อรีเลย์กระแสเกิน



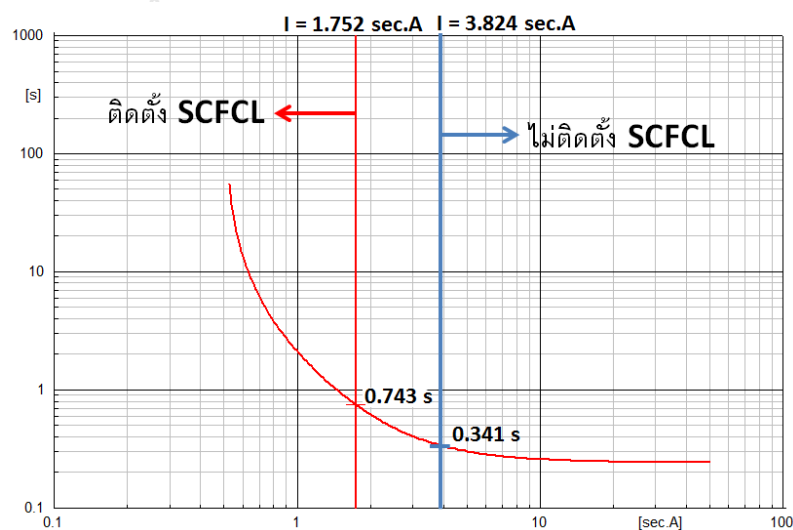
รูปที่ 5.2 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส GS4



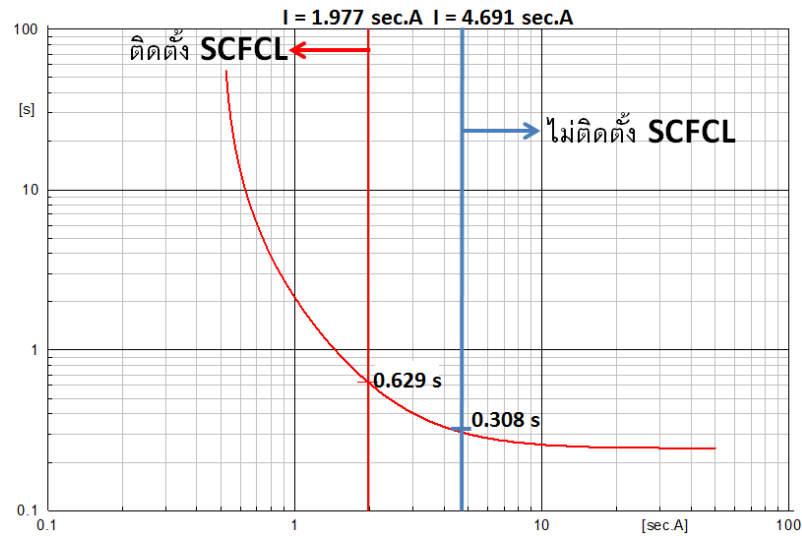
รูปที่ 5.3 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_A/S1

จากผลการจำลองรูปที่ 5.2 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.316 s และ 0.609 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง GS4 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับและรูปที่ 5.3 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.292 s และ 0.529 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับ พบว่าเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินจะช้าลงเนื่องจากการลดค่ากระแสลัดวงจรของ SCFCL

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



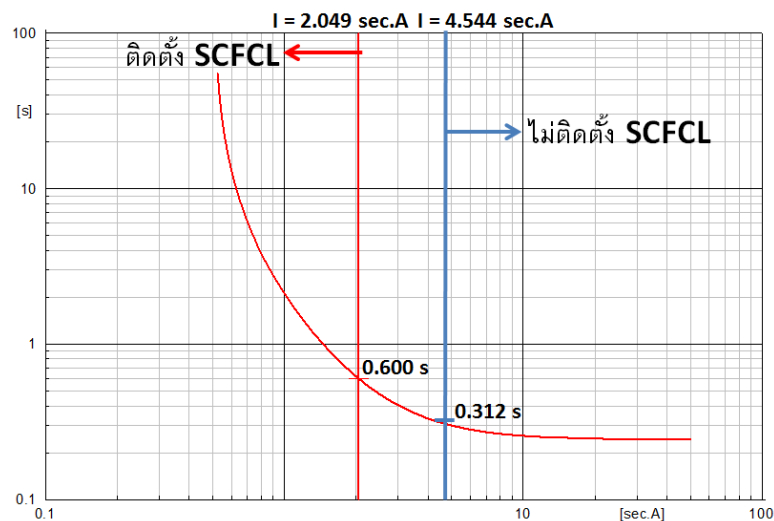
รูปที่ 5.4 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟส ที่บัส GS4



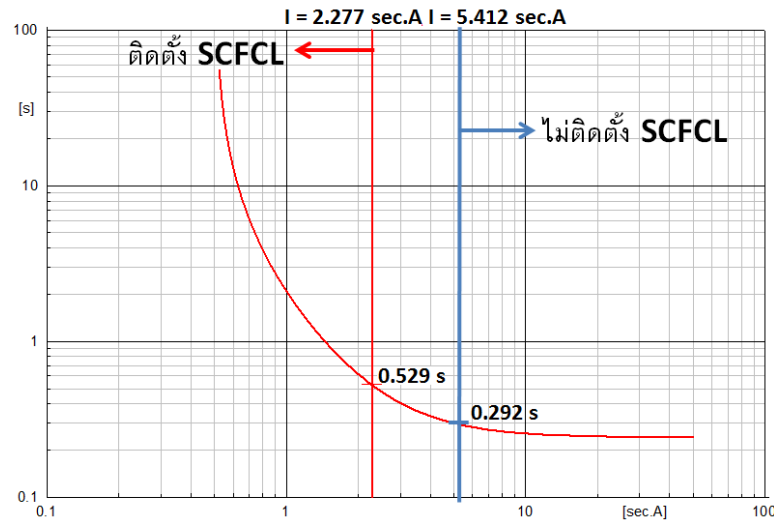
รูปที่ 5.5 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV ในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟส ที่บัส 230kV\_A/S1

จากผลการจำลองรูปที่ 5.4 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.341 s และ 0.743 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง GS4 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับและรูปที่ 5.5 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.308 s และ 0.629 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับ พบว่าเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินจะช้าลงเนื่องจากการลดค่ากระแสลัดวงจรของ SCFCL

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

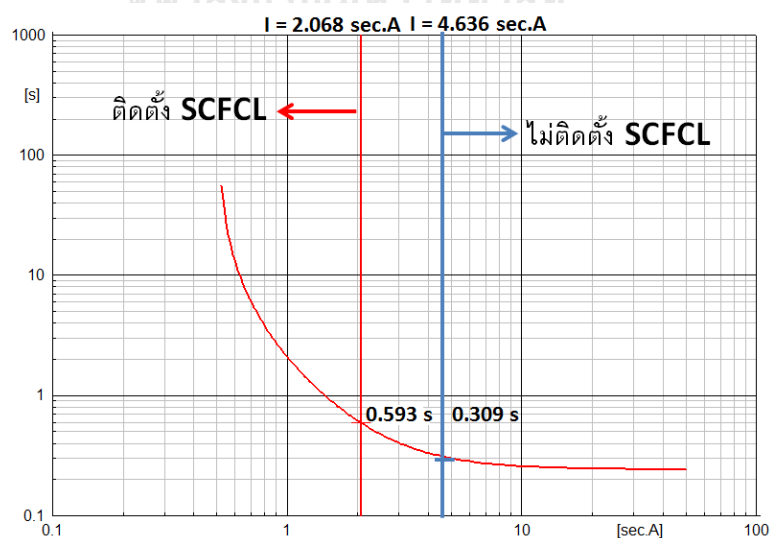


รูปที่ 5.6 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV ในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟสลงดิน ที่บัส GS4

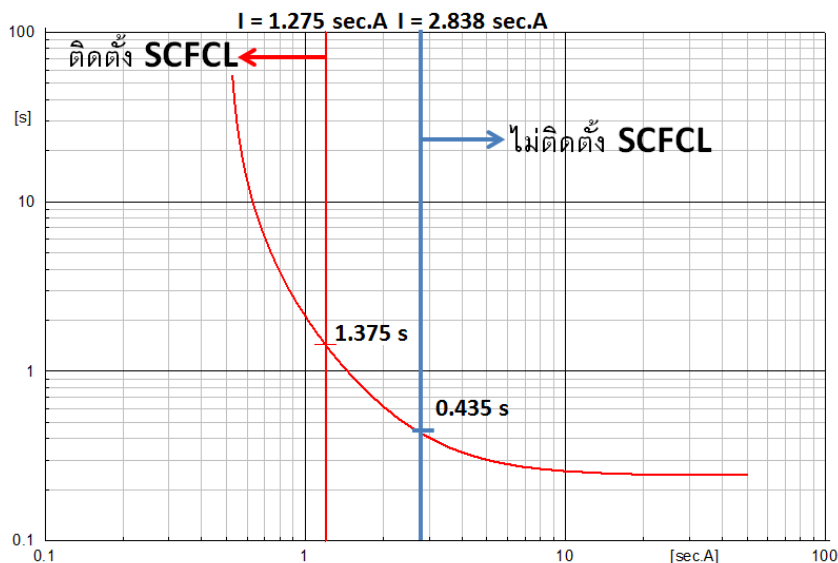


รูปที่ 5.7 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV ในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 2 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_A/S1

จากผลการจำลองรูปที่ 5.6 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.312 s และ 0.600 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง GS4 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับและรูปที่ 5.7 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.292 s และ 0.529 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับ พบว่าเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินจะช้าลงเนื่องจากการลดค่ากระแสลัดวงจรของ SCFCL



รูปที่ 5.8 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฟัง 115 kV ในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่บัส GS4



รูปที่ 5.9 ระยะเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลง KT1A ฝั่ง 115 kV ในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรประเภท 1 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_A/S1

จากผลการจำลองรูปที่ 5.8 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.309 s และ 0.593 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง GS4 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับและรูปที่ 5.9 แสดงเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งรีเลย์จะทำงานที่เวลา 0.435 s และ 1.375 s เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_A/S1 ในระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL ตามลำดับ พบว่าเวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินจะช้าลงเนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่ลดลงจากการเพิ่มอิมพีแดนซ์ในสถานะผิดพลาดของ SCFCL

จากการจำลองลัดวงจรทั้ง 4 แบบพบว่าการติดตั้ง SCFCL ในระบบทำให้เวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินช้าลง ซึ่งส่งผลให้การทำงานร่วมกับระบบป้องกันผิดพลาดได้หรือรีเลย์ที่อยู่ใกล้เคียงอาจทำงานแทนถ้ารีเลย์กระแสเกินทำงานช้าเกินไป ทำให้ระบบมีบริเวณที่ถูกตัดวงจรกว้างขึ้น ดังนั้นควรมีการปรับตั้งค่าของรีเลย์เพื่อรักษาเวลาการทำงานให้คงเดิม

## 5.2 การจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย ในกรณีที่ไม่วัดตั้งและวัดตั้ง SCFCL เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV\_B/R1 และ 22kV\_B ตามตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 ตามลำดับเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของ SCFCL ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย

ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 230kV\_B/R1

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ติดตั้ง SCFCL	ติดตั้ง SCFCL
	3-Phase SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)
G1	52.34	53.32
G2	5.71	5.81
G3	5.65	5.75
G4	3.97	4.04
G5	3.96	4.03
G6	3.90	3.97
G7	3.89	3.96
G8	8.42	4.89
G9	8.47	4.92
G10	10.56	10.76
G11	3.90	3.97
G12	3.89	3.97
G13	7.35	4.27
G14	9.94	5.77
G15	3.37	1.95
G16	3.37	1.95

ตารางที่ 5.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย เมื่อลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดิน ที่บัส 22kV\_B

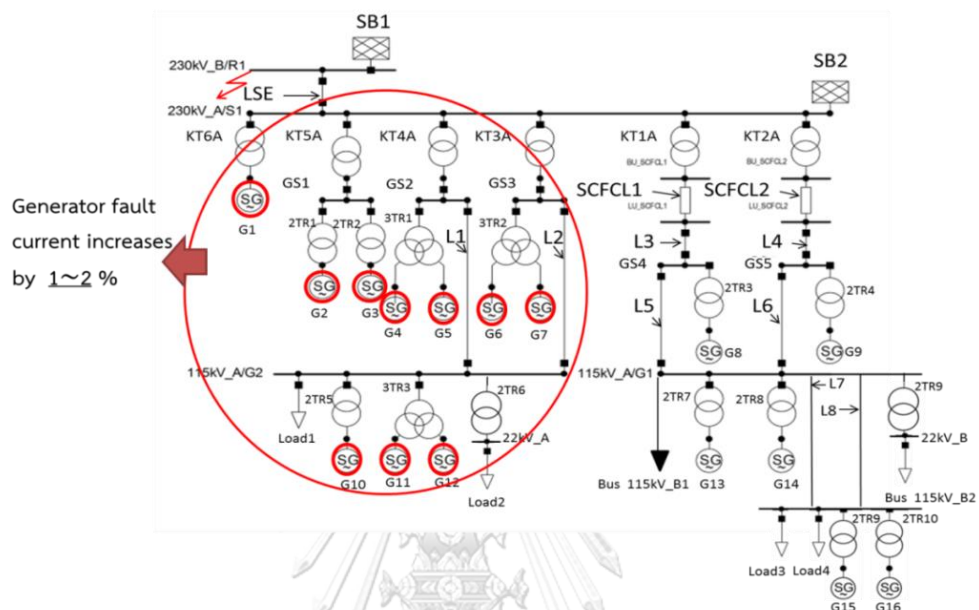
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ติดตั้ง SCFCL	ติดตั้ง SCFCL
	3-Phase SC Current (kA)	3-Phase SC Current (kA)
G1	0.62	0.36
G2	0.07	0.04
G3	0.07	0.04
G4	0.05	0.03
G5	0.05	0.03
G6	0.05	0.03
G7	0.05	0.03
G8	1.34	1.64
G9	1.35	1.65
G10	0.13	0.07
G11	0.05	0.03
G12	0.05	0.03
G13	1.17	1.44
G14	1.58	1.94
G15	0.54	0.66
G16	0.54	0.66

จากผลการจำลองตารางที่ 5.2 พบว่าในระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL จะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น 1-2% เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสลงดินที่ตำแหน่ง 230kV\_B/R1 โดยตำแหน่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบแสดงดังรูปที่ 5.10

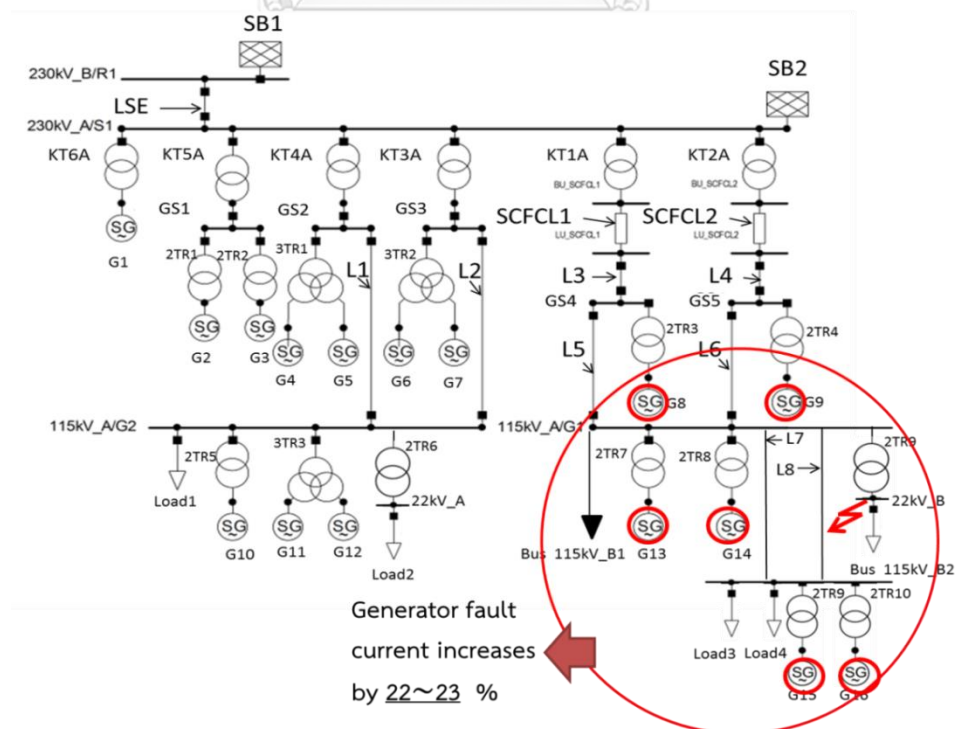
จากผลการจำลองตารางที่ 5.3 พบว่าในระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL จะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น 22-23% เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสที่ตำแหน่ง 22kV\_B ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่กระแสลัดวงจรไหลผ่านอาจได้รับความเสียหายได้ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่สูง โดยตำแหน่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบแสดงดังรูปที่ 5.11



จากรูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าการลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_B/R1 ในระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าในกรณีที่เกิดการลัดวงจรประเภท 3 เฟสที่ตำแหน่ง 22kV\_B



รูปที่ 5.10 บริเวณที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น เมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV\_B/R1



รูปที่ 5.11 บริเวณที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV\_B

แม้ว่าค่ากระแสลัดวงจรที่จุดผิดปกติจะลดลง แต่ยังคงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวที่จ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น ดังนั้นในส่วนต่อมาจะแสดงถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของ SCFCL ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น

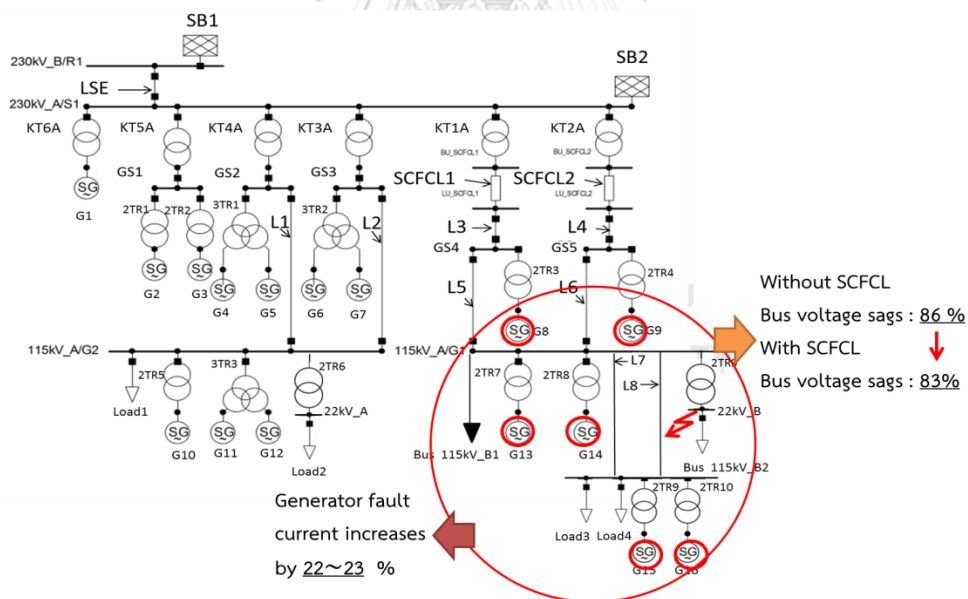
### วิเคราะห์ผลกระทบของ SCFCL ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น

ในหัวข้อนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ผลกระทบของ SCFCL ต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- (1) สาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
- (2) ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการเพิ่มของค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย

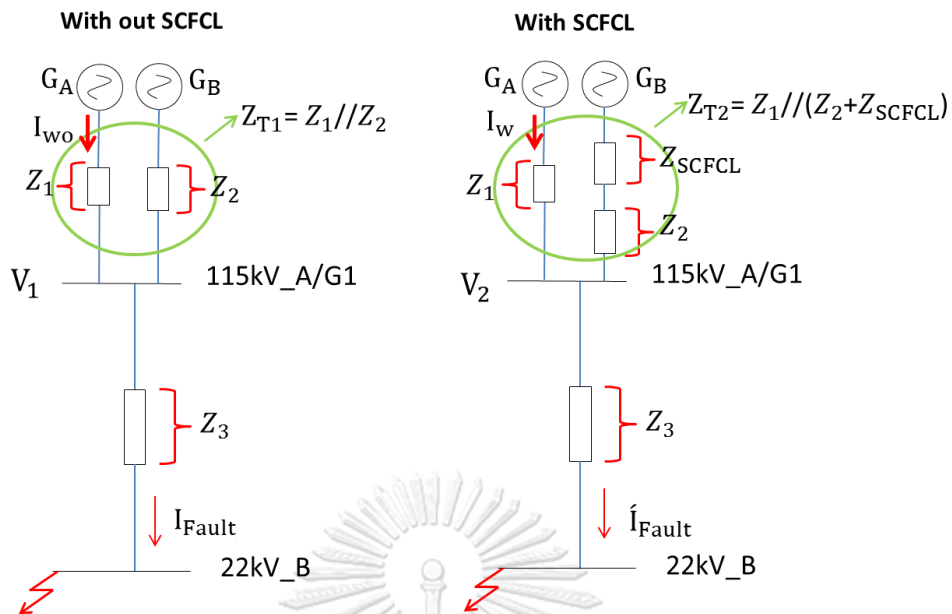
#### 5.2.1 สาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ในส่วนนี้ได้นำผลการจำลองในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 22kV\_B แสดงตามรูปที่ 5.12 มาวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV\_B

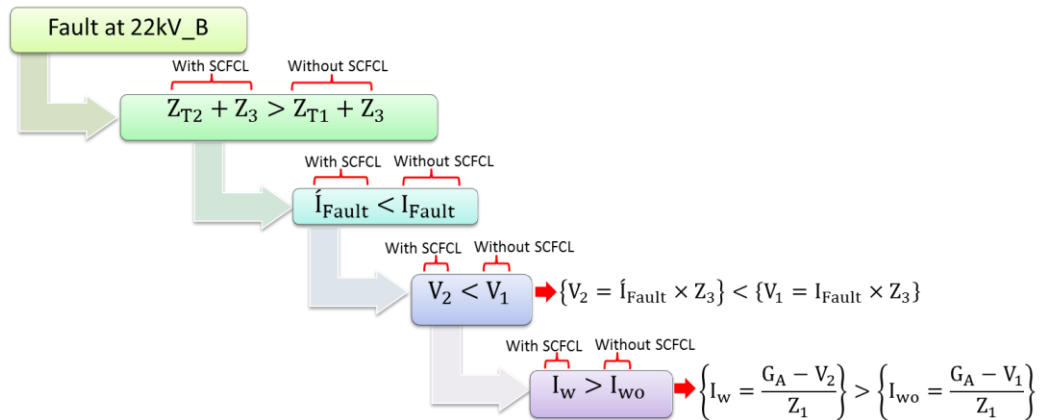
จากรูปที่ 5.12 ผลการจำลองเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 22kV\_B จะเห็นได้ว่า ในระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL นอกจากทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น 22-23% แล้วยังทำให้ค่าแรงดันที่บัส 115kV\_AVG1 ค่าแรงดันที่บัสลดลงเหลือ 83 % อีกด้วย



รูปที่ 5.13 วงจรสมมูลอย่างง่ายกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV\_B

รูปที่ 5.13 ได้นำระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 22kV\_B มาเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยประกอบไปด้วย

- (1)  $G_A$  เป็นตัวแทนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรไม่ผ่าน SCFCL เช่น G8, G9, G13, G14 และ G15
- (2)  $G_B$  เป็นตัวแทนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรผ่าน SCFCL เช่น SB1, SB2, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G10, G11 และ G12
- (3)  $V_1$  คือค่าแรงดันที่บัส 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ไม่ติดตั้ง SCFCL
- (4)  $V_2$  คือค่าแรงดันที่บัส 115kV\_A/G1 ในกรณีที่ติดตั้ง SCFCL
- (5)  $I_{Fault}$  คือค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 22kV\_B ในกรณีที่ไม่ติดตั้ง SCFCL
- (6)  $I_{Fault}$  คือค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 22kV\_B ในกรณีที่ติดตั้ง SCFCL
- (7)  $I_{wo}$  ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $G_A$  จ่ายออกในกรณีที่ไม่ติดตั้ง SCFCL
- (8)  $I_w$  ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $G_A$  จ่ายออกในกรณีที่ติดตั้ง SCFCL
- (9)  $Z_1$  คือผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ จาก  $G_A$  ถึงบัส 115kV\_A/G1
- (10)  $Z_{SCFCL}$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL
- (11)  $Z_2$  คือผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ จาก  $G_B$  ถึงบัส 115kV\_A/G1
- (12)  $Z_3$  คือผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ ที่อยู่ระหว่างบัส 115kV\_A/G1 กับ 22kV\_B



รูปที่ 5.14 แสดงสาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวมากขึ้น

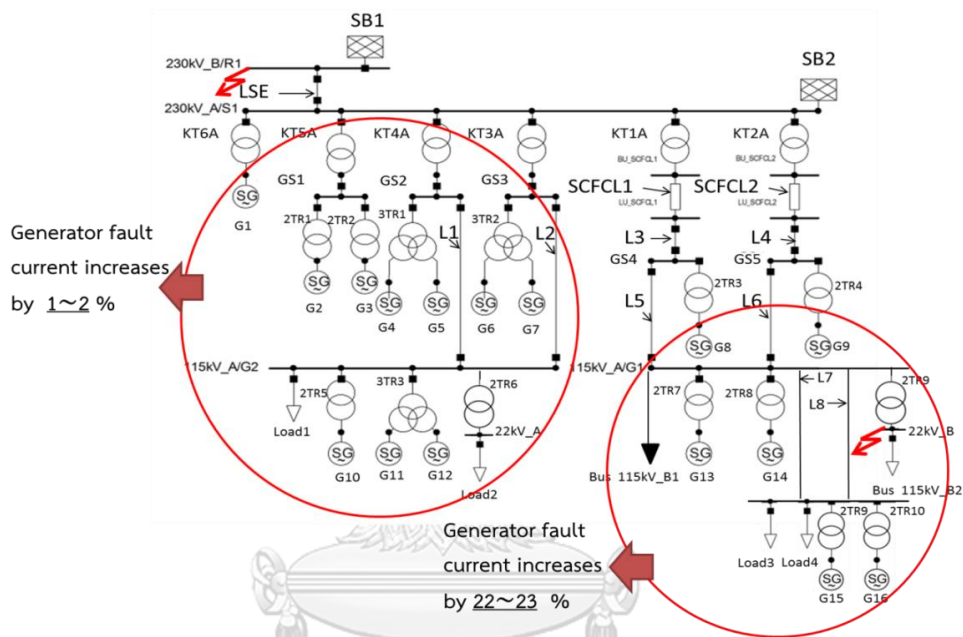
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 5.13 สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวในระบบไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น ได้ดังรูปที่ 5.14 โดยเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 22kV\_B พบว่า

- (1) ในวงจรที่มีการติดตั้ง SCFCL จะมีค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรมากกว่าในวงจรที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL หรือ  $Z_{T2} + Z_3 > Z_{T1} + Z_3$  เนื่องจากการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL
- (2) จาก  $Z_{T2} + Z_3 > Z_{T1} + Z_3$  ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{Fault}$ ) ในวงจรที่มีการติดตั้ง SCFCL น้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{Fault}$ ) วงจรที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL หรือ  $I_{Fault} < I_{Fault}$
- (3) จาก  $I_{Fault} < I_{Fault}$  ส่งผลให้ค่าแรงดันที่บัส 115kV\_A/G1 ( $V_2: I_{Fault} \times Z_3$ ) ในวงจรที่มีการติดตั้งมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันที่บัส 115kV\_A/G1 ( $V_1: I_{Fault} \times Z_3$ ) ในวงจรที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL  $V_2 < V_1$
- (4) จาก  $V_2 < V_1$  ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่  $G_A$  จ่ายออก ( $I_w: \frac{G_A - V_2}{Z_1}$ ) ในวงจรที่มีการติดตั้ง SCFCL มีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่  $G_A$  จ่ายออก ( $I_w: \frac{G_A - V_1}{Z_1}$ ) ในวงจรที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL หรือ  $I_w > I_{wo}$

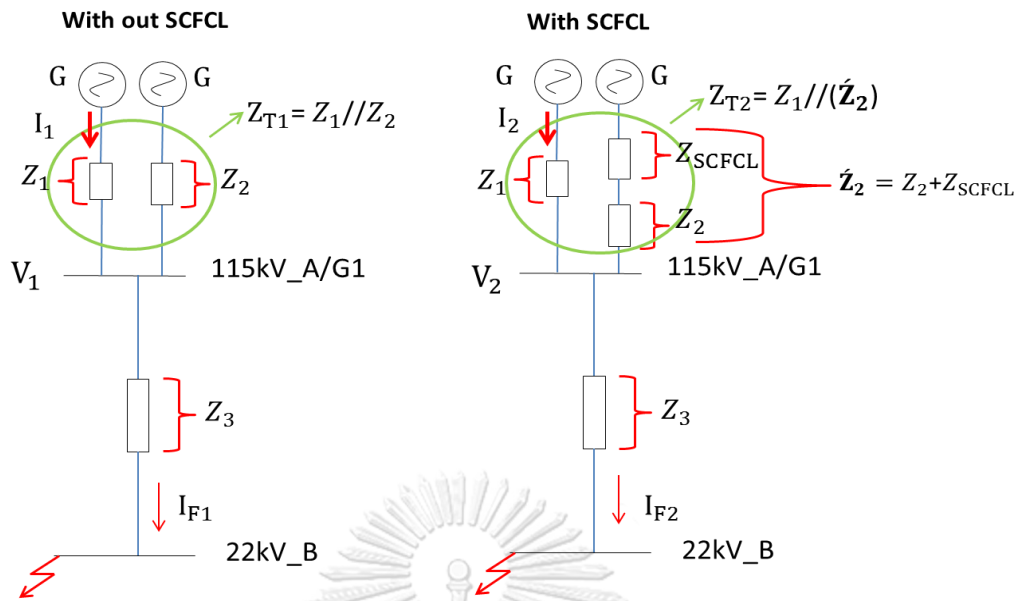
จะเห็นว่าถ้าวงจรสมมูลของการเกิดลัดวงจรมีลักษณะตามรูปที่ 5.13 สามารถทำให้ค่ากระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ผ่าน SCFCL มีค่าเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ เกาะอยู่มีค่าแรงดันลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอิมพีแดนซ์ของการลัดวงจรหรืออิมพีแดนซ์ของสายส่งหรือหม้อแปลงที่ต่ออยู่ก่อนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจรมันเอง

## 5.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น

จากผลการจำลองกระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับระหว่างไม่ติดตั้งกับติดตั้ง SCFCL โดยให้เกิดการลัดวงจรที่บัส 230kV\_B/R1 และ 22kV\_B แสดงตามรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อลัดวงจรที่ตำแหน่ง 230kV\_B/R1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อลัดวงจรที่ตำแหน่ง 22kV\_B ดังนั้นส่วนนี้จึงวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย



รูปที่ 5.15 ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น  
เมื่อลัดวงจรที่บัส 230kV\_B/R1 และบัส 22kV\_B



รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์หาสมการ  $\Delta I$  กรณีไม่ติดตั้งและติดตั้ง SCFCL เมื่อลัดวงจรที่บัส 22kV\_B

จากรูปที่ 5.16 สามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น ( $\Delta I$ ) แสดงดังสมการที่ 5.4 เพื่อไปใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น โดยมีการวิเคราะห์หาสมการดังนี้

จากสมการ  $I_1$  และ  $I_2$  แทนค่าลงในสมการ  $\Delta I$  จะได้สมการที่ 5.1

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{G-V_1}{Z_1}; \text{ กรณีไม่ติดตั้ง SCFCL} \\
 I_2 &= \frac{G-V_2}{Z_1}; \text{ กรณีติดตั้ง SCFCL} \\
 \Delta I &= \frac{G-V_2}{Z_1} - \frac{G-V_1}{Z_1} \\
 \Delta I &= \frac{V_1-V_2}{Z_1}
 \end{aligned}$$

(5.1)

จากสมการ  $V_1$  และ  $V_2$  แทนค่าลงในสมการที่ 5.1 จะได้สมการที่ 5.2

$$\begin{aligned} V_1 &= I_{F1} \times Z_3; \text{กรณีไม่ติดตั้ง SCFCL} \\ V_2 &= I_{F2} \times Z_3; \text{กรณีติดตั้ง SCFCL} \\ \Delta I &= \frac{Z_3(I_{F1}-I_{F2})}{Z_1} \end{aligned} \quad (5.2)$$

จากสมการ  $I_{F1}$  และ  $I_{F2}$  โดยที่  $V_{TH}$  คือค่าแรงดันเทวินินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แทนค่าลงในสมการที่ 5.2 จะได้สมการที่ 5.3

$$\begin{aligned} I_{F1} &= \frac{V_{TH}}{Z_{T1}+Z_3}; \text{กรณีไม่ติดตั้ง SCFCL} \\ I_{F2} &= \frac{V_{TH}}{Z_{T2}+Z_3}; \text{กรณีติดตั้ง SCFCL} \\ \Delta I &= \frac{Z_3\left(\frac{V_{TH}}{Z_{T1}+Z_3} - \frac{V_{TH}}{Z_{T2}+Z_3}\right)}{Z_1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

จากสมการ  $Z_{T1}$  และ  $Z_{T2}$  แทนค่าลงในสมการที่ 5.3 จะได้สมการของ  $\Delta I$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเพิ่มขึ้น แสดงดังสมการที่ 5.4

$$\begin{aligned} Z_{T1} &= \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}; \text{กรณีไม่ติดตั้ง SCFCL} \\ Z_{T2} &= \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}; \text{กรณีติดตั้ง SCFCL} \\ \Delta I &= V_{TH} \times \frac{Z_3}{Z_1} \times \left( \frac{1}{Z_3 + \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}} - \frac{1}{Z_3 + \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

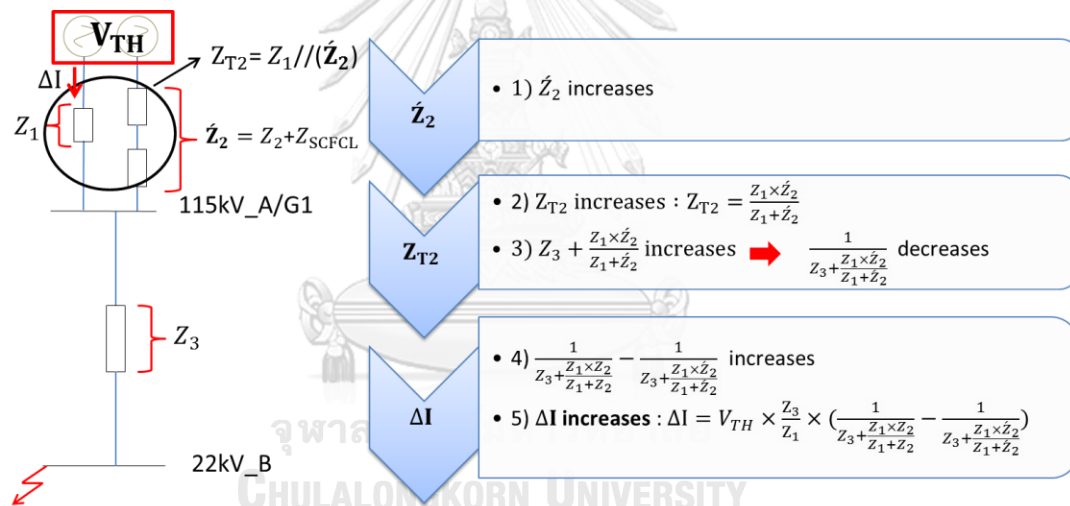
ในส่วนต่อมาจะทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

1. ผลกระทบของ  $Z_2$  ต่อ  $\Delta I$
2. ผลกระทบของ  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ต่อ  $\Delta I$

### ผลกระทบของ $Z_2$ ต่อ $\Delta I$

ในกรณีนี้จะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับ  $\Delta I$  จากการเปลี่ยนของค่า  $Z_2$  โดยอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL

จากสมการที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่า  $Z_2$  เพิ่มขึ้นจากทำให้พจน์  $\frac{1}{Z_3 + \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}}$  มีค่าลดลงจึงทำให้  $\frac{1}{Z_3 + \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}} - \frac{1}{Z_3 + \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}}$  มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้  $\Delta I$  มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ตามรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบของ  $Z_2$  ต่อ  $\Delta I$

### ผลกระทบของ $\frac{Z_3}{Z_1}$ ต่อ $\Delta I$

ในกรณีนี้จะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับ  $\Delta I$  จากการเปลี่ยนของค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  โดยค่า  $Z_3$  และ  $Z_1$  อาจเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอย่างเดียวหรือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกับหม้อแปลงรวมกันจึงทำให้  $\frac{Z_3}{Z_1}$  มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละระบบ

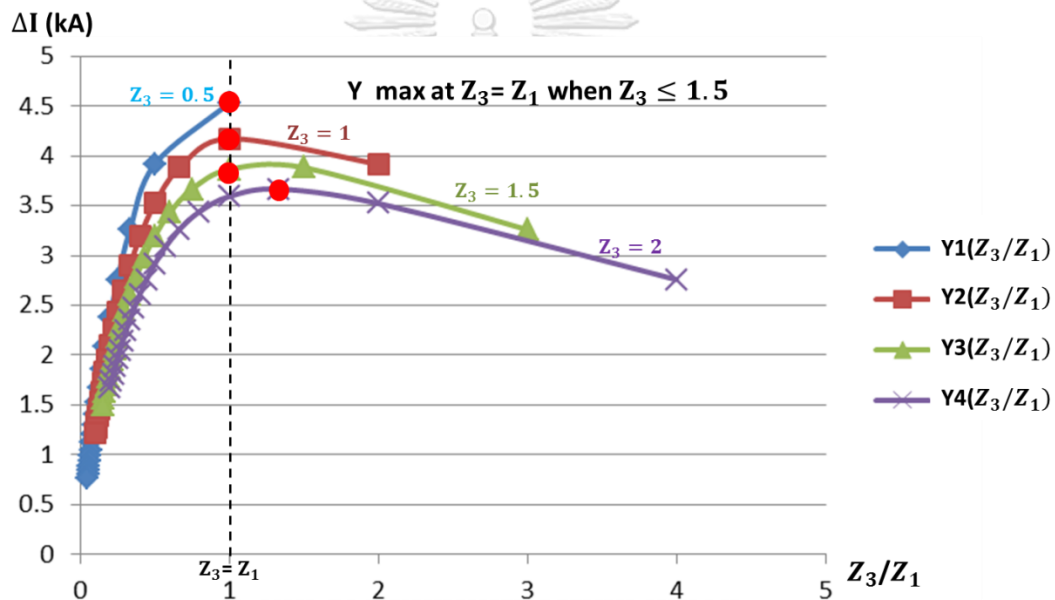
จากสมการที่ 5.4 สามารถดูแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  ได้จากการแทนค่าตัวแปรต้นเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรตามของสมการ โดยกำหนดตัวแปรบางตัวในสมการให้มีค่าคงที่ดังนี้  $V_{TH} = 66 \text{ kV}, Z_2 = 3 \Omega$



และ  $Z_2 = 30 \Omega$  จากนั้นจึงทำการปรับค่าตัวแปร  $Z_3$  และ  $Z_1$  ตามตารางที่ 5.4 เพื่อดูแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  ที่ค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.18

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่า  $Z_3$  และ  $Z_1$

กราฟฟังก์ชัน	$Z_3$	$Z_1$
$Y_1(Z_3/Z_1)$	0.5	{0.5, 1, 1.5, 2, ..., 10}
$Y_2(Z_3/Z_1)$	1	{0.5, 1, 1.5, 2, ..., 10}
$Y_3(Z_3/Z_1)$	1.5	{0.5, 1, 1.5, 2, ..., 10}
$Y_4(Z_3/Z_1)$	2	{0.5, 1, 1.5, 2, ..., 10}

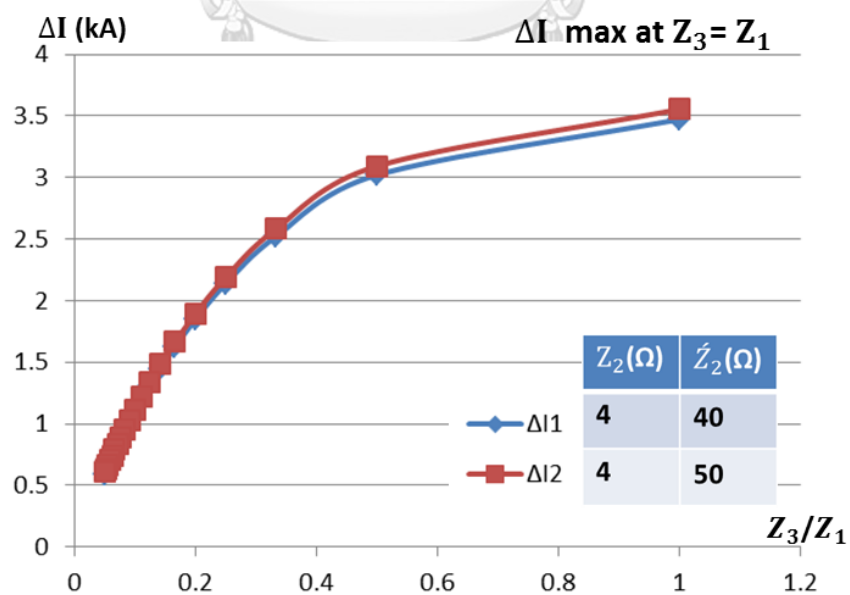
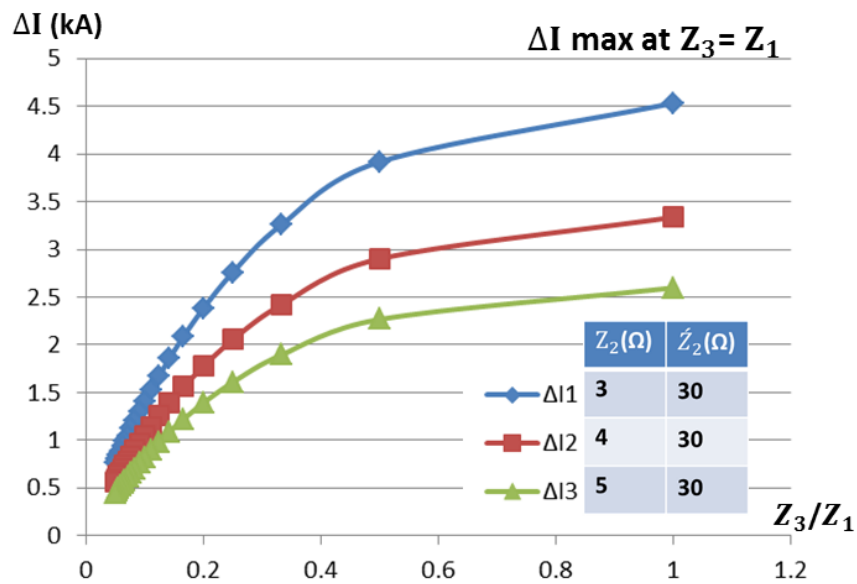


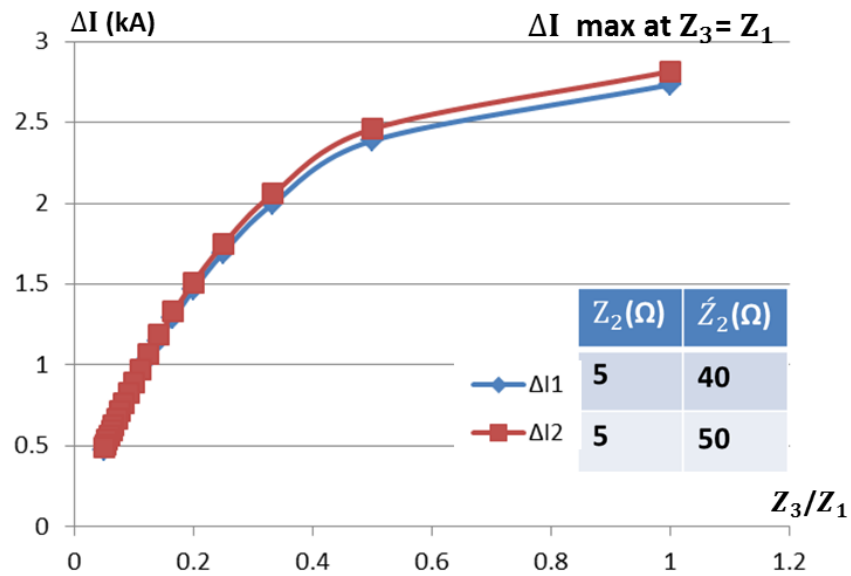
รูปที่ 5.18 กราฟแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  ที่ค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ต่างๆ

จากรูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\Delta I$  ที่ค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ต่างๆ จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  จะค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  และจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ โดยแปรผกผันกับค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า  $\Delta I$  จะมีค่าสูงสุดที่ค่า  $Z_3 = Z_1$  หรือ  $\frac{Z_3}{Z_1} = 1$  ก็ต่อเมื่อค่า  $0 < Z_3 \leq 1.5$  ซึ่งที่ค่า  $Z_3 = Z_1 = 0.5 \Omega$  จะทำให้ค่า  $\Delta I$  สูงถึง 4.5 kA จึงอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันบริเวณนั้นเสียหายได้ ทั้งนี้ค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  และค่าที่กล่าวมา จะทำให้เกิดค่า  $\Delta I$  สูงสุดก็ต่อเมื่อ  $Z_2 = 3 \Omega$  และ  $Z_2 = 30 \Omega$

จากสมการที่ 5.4 สามารถดูแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  ได้จากการแทนค่าตัวแปรต้นเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรตามของสมการดังแสดงตามรูปที่ 5.18 โดยในส่วนต่อมาจะทำการปรับค่าตัวแปร  $Z_2$  และ  $Z_3$  สำหรับการวิเคราะห์หาค่า  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ที่ทำให้ค่า  $\Delta I$  มีค่าสูงสุด เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการใช้ SCFCL ขนาดอื่นๆ โดยกำหนดให้  $V_{TH} = 66 \text{ kV}$  และมีการแบ่งตามค่า  $Z_3$  ออกเป็น 3 กรณีย่อยแสดงดังนี้ 1.  $Z_3 = 0.5 \Omega$  2.  $Z_3 = 1 \Omega$  3.  $Z_3 = 1.5 \Omega$

1)  $Z_3 = 0.5 \Omega$



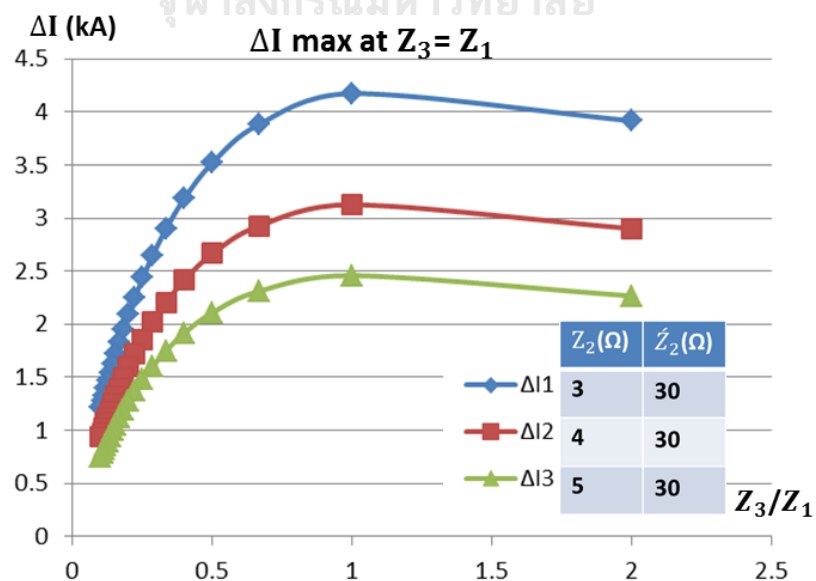


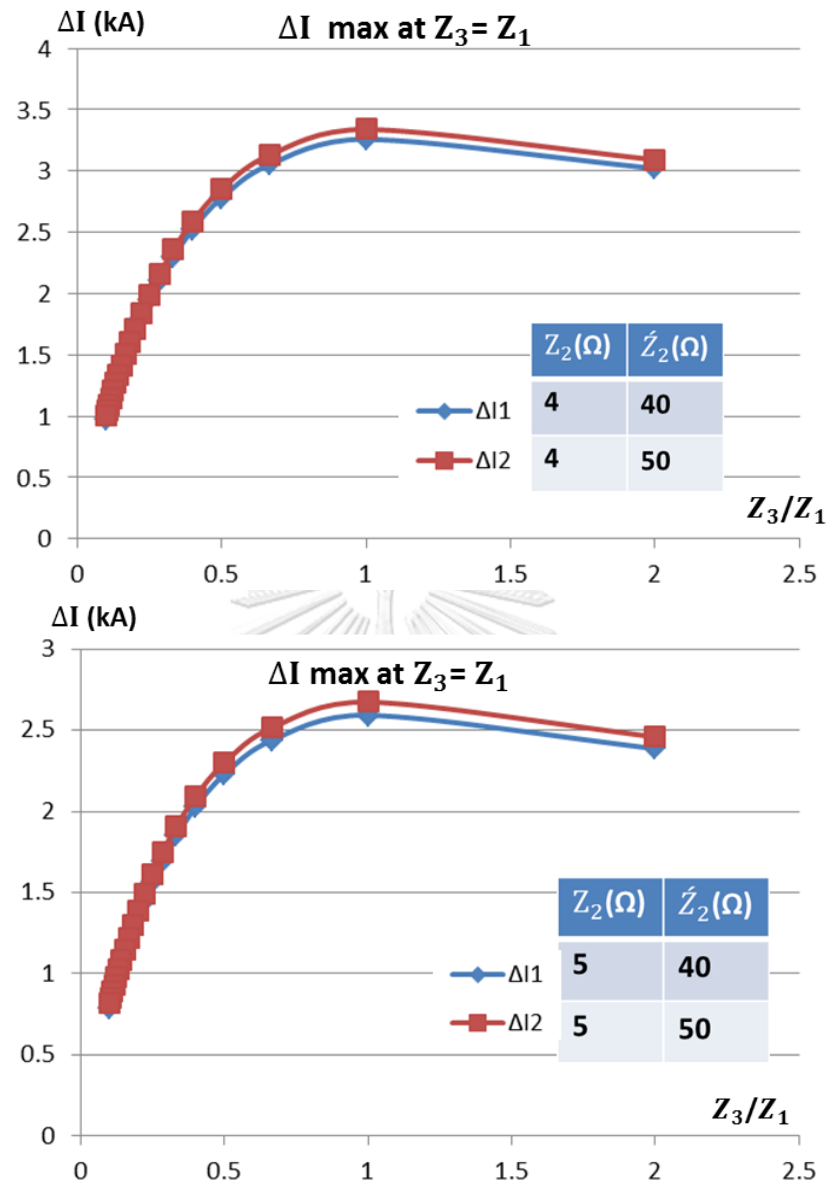
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า  $Z_2$  และ  $\hat{Z}_2$  ในกรณีที่  $Z_3 = 0.5 \Omega$

รูปที่ 5.19 แสดงถึงผลของการปรับเปลี่ยนค่า  $Z_2$  และ  $\hat{Z}_2$  โดยแบ่งออกเป็นสามรูปแบบดังนี้

1. ปรับค่า  $Z_2$  โดยที่  $\hat{Z}_2$  มีค่าคงที่ 2. ปรับค่า  $\hat{Z}_2$  โดยที่  $Z_2$  มีค่าคงที่และ 3. ปรับค่าตามรูปแบบที่ 2 แต่เปลี่ยนค่า  $Z_2$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ที่ทำให้ค่า  $\Delta I$  สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ  $Z_3 = Z_1$  ก็ต่อเมื่อ  $Z_3 = 0.5 \Omega$

2)  $Z_3 = 1 \Omega$



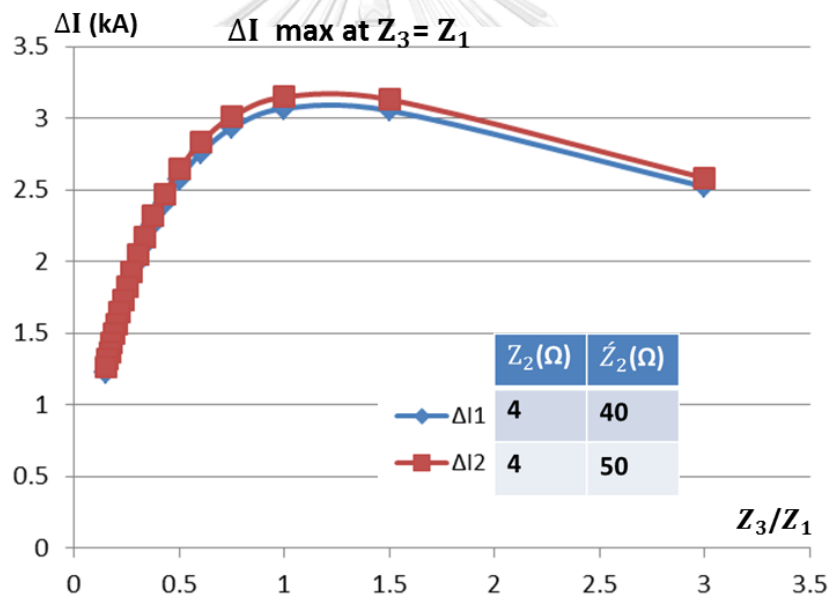
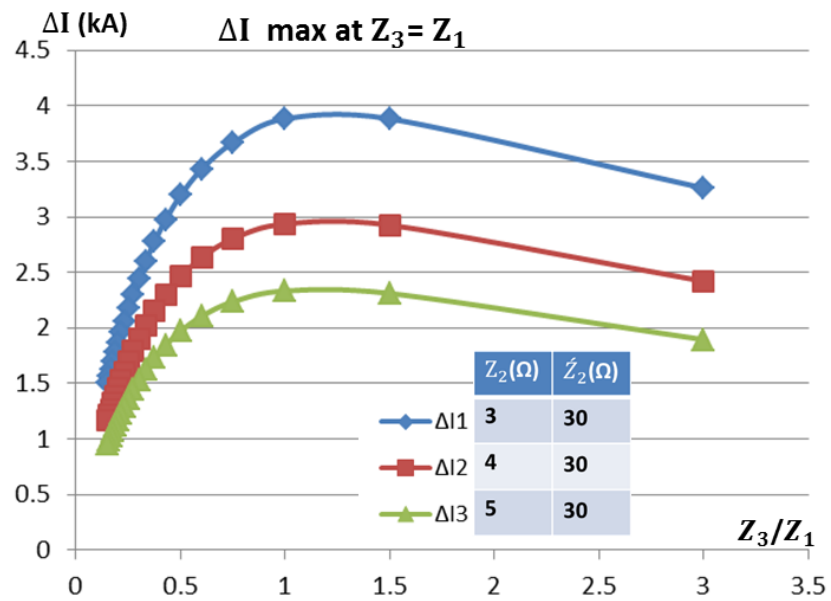


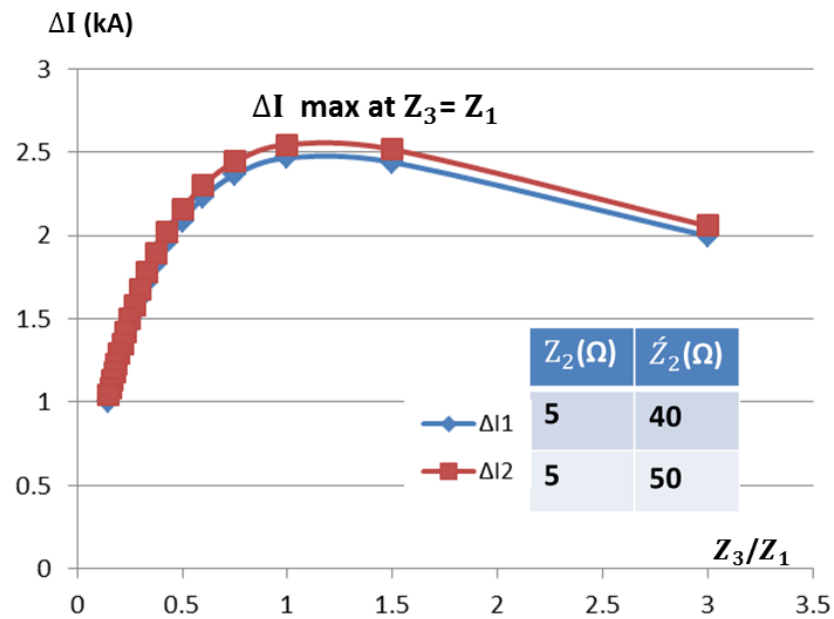
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า  $Z_2$  และ  $Z'_2$  ในกรณีนี้ที่  $Z_3 = 1 \Omega$

รูปที่ 5.20 แสดงถึงผลของการปรับเปลี่ยนค่า  $Z_2$  และ  $Z'_2$  โดยแบ่งออกเป็นสามรูปแบบดังนี้

1. ปรับค่า  $Z_2$  โดยที่  $Z'_2$  มีค่าคงที่ 2. ปรับค่า  $Z'_2$  โดยที่  $Z_2$  มีค่าคงที่และ 3. ปรับค่าตามรูปแบบที่ 2 แต่เปลี่ยนค่า  $Z_2$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ที่ทำให้ค่า  $\Delta I$  สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ  $Z_3 = Z_1$  ก็ต่อเมื่อ  $Z_3 = 1 \Omega$

3)  $Z_3 = 1.5 \Omega$



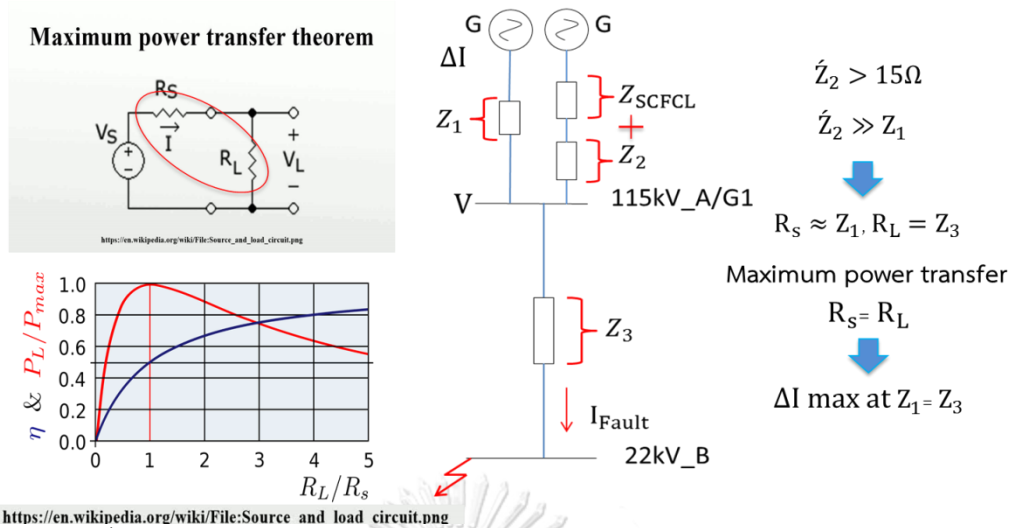


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงแนวโน้มของค่า  $\Delta I$  สูงสุดเมื่อมีการปรับค่า  $Z_2$  และ  $\hat{Z}_2$  ในกรณีที่  $Z_3 = 1.5 \Omega$

รูปที่ 5.21 แสดงถึงผลของการปรับเปลี่ยนค่า  $Z_2$  และ  $\hat{Z}_2$  โดยออกเป็นสามรูปแบบดังนี้

1. ปรับค่า  $Z_2$  โดยที่  $\hat{Z}_2$  มีค่าคงที่ 2. ปรับค่า  $\hat{Z}_2$  โดยที่  $Z_2$  มีค่าคงที่และ 3. ปรับค่าตามรูปแบบที่ 2 แต่เปลี่ยนค่า  $Z_2$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน  $\frac{Z_3}{Z_1}$  ที่ทำให้ค่า  $\Delta I$  สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ  $Z_3 = Z_1$  ก็ต่อเมื่อ  $Z_3 = 1.5 \Omega$

จากการแทนค่าทั้ง 3 กรณี จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  จะเกิดขึ้นเมื่อ  $Z_3 = Z_1$  สำหรับระบบที่มีค่า  $0 \Omega < Z_3 \leq 1.5 \Omega$  จึงสรุปได้ว่าถ้าระบบไฟฟ้ามีวงจรสมมูลของการเกิดลัดวงจรตามรูปที่ 5.16 และมีค่า  $0 \Omega < Z_3 \leq 1.5 \Omega$  ควรตรวจสอบค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกเพราะมีโอกาสที่ค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายในกรณีที่ติดตั้ง SCFCL เพิ่มขึ้นสูงมากกว่ากรณีที่ไม่มีติดตั้ง SCFCL ซึ่งอาจเพิ่มสูงจนเป็นอันตรายกับระบบไฟฟ้าได้ และสำหรับกรณีที่ค่า  $Z_3 > 1.5 \Omega$  เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ยังจ่ายค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นกว่ากรณีที่ไม่มีติดตั้ง SCFCL แต่ค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ตามค่า  $Z_3$  ที่เพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.18



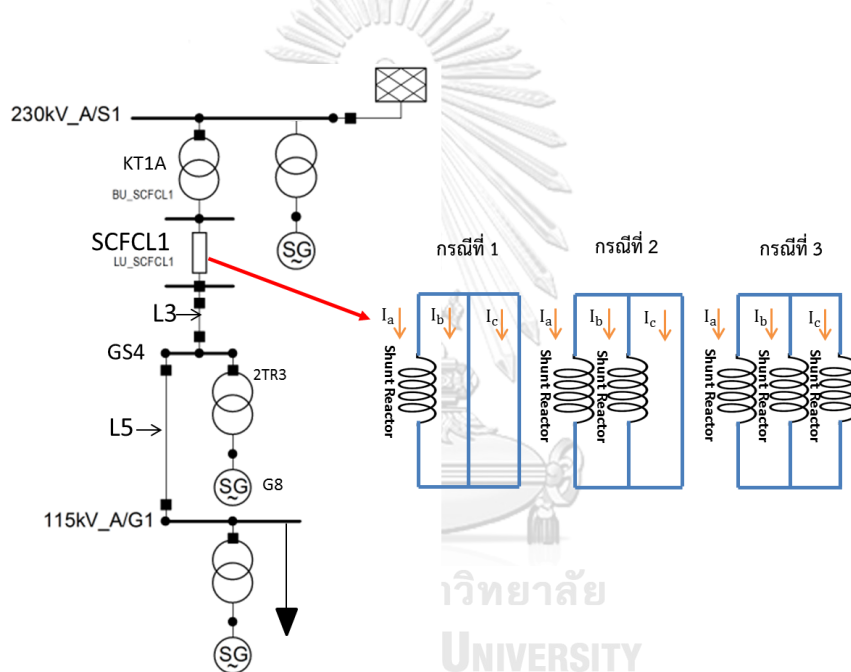
รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์ค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  ด้วยหลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

จากรูปที่ 5.22 แสดงการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  ด้วยหลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด จะเห็นได้ว่าจากค่าอิมพีแดนซ์รวมของฝั่งที่มีการติดตั้ง SCFCL จะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของฝั่งที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL อย่างมากจึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เทวินินของทั้งสองฝั่งมีค่าใกล้เคียงกับฝั่งที่ไม่มีการติดตั้ง SCFCL ( $Z_1$ ) และจากหลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อค่าอัตราส่วน  $R_s$  ต่อ  $R_L$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า  $\Delta I$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าอัตราส่วน  $Z_3$  ต่อ  $Z_1$  เท่ากับ 1

ในหัวข้อที่ 5.2 นี้ได้แสดงถึงสาเหตุที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการเพิ่มของค่ากระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย โดยในส่วนของสาเหตุนั้นจะสรุปไว้ว่าถ้าระบบไฟฟ้ามีวงจรสมมูลตามที่แสดงดังรูป 5.13 สามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวในระบบจ่ายค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นได้ และในส่วนของปัจจัยนั้นจะสรุปไว้ว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของฝั่งที่มีการติดตั้ง SCFCL จะแปรผันตรงกับค่า  $\Delta I$  และสามารถวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  ได้จากหลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งสำหรับระบบที่มีการติดตั้ง SCFCL นั้นค่าสูงสุดของ  $\Delta I$  จะเกิดเมื่อค่าอัตราส่วน  $Z_3$  ต่อ  $Z_1$  เท่ากับ 1 ซึ่งถ้าค่า  $\Delta I$  มากหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นมากจะส่งผลเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ เสียหายได้หรืออาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณนั้นเสียหายเนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าปกติ

### 5.3 ความไม่สมดุลเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL เสียหาย

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจากการเสียหายของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL ซึ่งอาจเกิดจากถังไนโตรเจนที่ช่วยในการหล่อเย็นตัวนำยิ่งยวดเสียหายทำให้ตัวนำยิ่งยวดเสื่อมสภาพจากความร้อน โดยการเสียหายของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดหรืออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดขาดออกจากวงจรจะทำให้มีรีแอกเตอร์ขนานหลุดเข้าไปในวงจรที่สภาวะปกติ ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านเฟสที่มีอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหายมีค่าลดลง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจำลองระบบเพื่อหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส โดยมีการแบ่งการศึกษาผลกระทบจากการเสียหายของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้ 1. อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส 2. อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส และ 3. อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส แสดงตามรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แบบจำลองศึกษาผลกระทบจากการเสียหายของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL

#### 5.3.1 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส

จากรูปที่ 5.23 กรณีที่ 1 แสดงกรณีศึกษาเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส ซึ่งทำให้มีรีแอกเตอร์หลุดเข้าไปในวงจร 1 เฟส โดยผลการจำลองค่ากระแสแต่ละเฟส แสดงตามตารางที่ 5.5 และผลการจำลองค่าแรงดันแต่ละเฟส แสดงตามตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส

กรณีศึกษา	$I_{rms,a}$ (A)	$I_{rms,b}$ (A)	$I_{rms,c}$ (A)	$I_{av}$ (A)	$I_{un}$ (%)	$I_r$ (A)
เสีย 1 เฟส	262∠111	524∠175	524∠-126	436	40	957∠-14



ตารางที่ 5.6 ผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส

กรณีศึกษา	$V_{rms,a}$ (kV)	$V_{rms,b}$ (kV)	$V_{rms,c}$ (kV)	$V_{av}$ (kV)	$V_{un}$ (%)
เสีย 1 เฟส	83	82	81	82	1.2

จากตารางที่ 5.5 แสดงผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส โดยที่  $I_{rms,a}$ ,  $I_{rms,b}$  และ  $I_{rms,c}$  คือค่ากระแสของ SCFCL แต่ละเฟส  $I_{av}$  คือค่ากระแสเฉลี่ยของทั้ง 3 เฟส  $I_{un}$  คือค่ากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลหาจาก ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของกระแส และ  $I_r$  คือค่ากระแสไฟรั่ว พบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL ที่เสียหาย 1 เฟส จะมีค่าต่ำกว่ากระแสอีก 2 เฟส เนื่องจากค่าของกระแสแต่ละเฟสไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส โดยความไม่สมดุลของกระแสจะทำให้โหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขดลวดและการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ร้อนเกินและไหม้ชำรุดได้ในกรณีที่มีการใช้โหลดเต็มที่ และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดกระแสไฟรั่ว ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายจากกระแสไฟฟ้าดูดเมื่อไปสัมผัสและอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินทำงานผิดพลาด

จากตารางที่ 5.6 แสดงผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส โดยที่  $V_{rms,a}$ ,  $V_{rms,b}$  และ  $V_{rms,c}$  คือค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส  $V_{av}$  คือค่าแรงดันเฉลี่ยของทั้ง 3 เฟส และ  $V_{un}$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลหาจาก ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของแรงดัน พบว่าค่าแรงดันแต่ละเฟสไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดัน โดยความไม่สมดุลของแรงดันอาจนำมาซึ่งปัญหาด้านคุณภาพของกำลังไฟฟ้า

### 5.3.2 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส

จากรูปที่ 5.23 กรณีที่ 2 แสดงกรณีศึกษาเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส ซึ่งทำให้มีรีแอกเตอร์หลุดเข้าไปในวงจร 2 เฟส โดยผลการจำลองค่ากระแสแต่ละเฟส แสดงตามตารางที่ 5.7 และผลการจำลองค่าแรงดันแต่ละเฟส แสดงตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส

กรณีศึกษา	$I_{rms,a}$ (A)	$I_{rms,b}$ (A)	$I_{rms,c}$ (A)	$I_{av}$ (A)	$I_{un}$ (%)	$I_r$ (A)
เสีย 2 เฟส	347∠118	348∠118	688∠180	460	49	1184∠-31

ตารางที่ 5.8 ผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส

กรณีศึกษา	$V_{rms,a}$ (kV)	$V_{rms,b}$ (kV)	$V_{rms,c}$ (kV)	$V_{av}$ (kV)	$V_{un}$ (%)
เสีย 2 เฟส	82	82	79	81	2.5

จากตารางที่ 5.7 แสดงผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส และจากตารางที่ 5.8 แสดงผลการจำลองค่าแรงดันของ SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส พบว่าค่ากระแสและแรงดันของ SCFCL ที่เสียหายทั้ง 2 เฟส จะไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลเช่นเดียวกับกรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส แต่จะมีความรุนแรงมากกว่า เนื่องจากค่า  $I_{un}$   $I_r$  และ  $V_{un}$  ในกรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 2 เฟส มีค่ามากกว่ากรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 1 เฟส ซึ่งถ้าค่าความไม่สมดุลของกระแสและแรงดันเกินระดับที่ยอมรับได้ของมอเตอร์ไฟฟ้า จะทำให้เกิดผลกระทบต่อมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อกับเมนไฟฟ้านั้นๆ อย่างมาก

### 5.3.3 อุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส

จากรูปที่ 5.23 กรณีที่ 3 แสดงกรณีศึกษาเมื่ออุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส ซึ่งทำให้มีรีแอกเตอร์หลุดเข้าไปในวงจร 3 เฟส โดยผลการจำลองค่ากระแสแต่ละเฟส แสดงตามตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส กรณีตัวนำยิ่งยวดเสียหาย 3 เฟส

กรณีศึกษา	$I_{rms,a}$ (A)	$I_{rms,b}$ (A)	$I_{rms,c}$ (A)
ไม่เสียหาย	425	425	425
เสียหาย 3 เฟส	201	201	201

จากตารางที่ 5.7 ผลการจำลองค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟสเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ตัวนำยิ่งยวดไม่เสียหายและเสียหาย 3 เฟส โดยที่ โดยที่  $I_{rms,a}$   $I_{rms,b}$  และ  $I_{rms,c}$  คือค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL แต่ละเฟส พบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่าน SCFCL ในกรณีที่ตัวนำยิ่งยวดเสียหายจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ตัวนำยิ่งยวดไม่เสียหาย ซึ่งจะส่งผลให้โหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

## บทที่ 6

### สรุปผล และ ข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในส่วนที่หนึ่งของบทนี้ จะกล่าวถึงข้อสรุปของกรณีต่างๆ ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ในส่วนที่สอง จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบในส่วนที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่ได้ทำการพิจารณา

#### 6.1 สรุปผล

สำหรับเนื้อหาในส่วนที่หนึ่งนั้น จะถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

- (1) สรุปผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL บนระบบ 115 kV
- (2) สรุปผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL บนระบบ 115 kV

รายละเอียดของหัวข้อการสรุปผล สามารถแจกแจงในแต่ละหัวข้อได้ ดังนี้

#### สรุปผลประโยชน์ของการติดตั้ง SCFCL บนระบบ 115 kV

- ✓ SCFCL สามารถลดกระแสลัดวงจรโดยเฉพาะอย่างยิ่งยอดแรกของการเกิดลัดวงจร จึงส่งผลให้ความเครียดทางกลและความเครียดทางความร้อนลดลง ทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายจากแรงในสภาวะลัดวงจรลดลง
- ✓ SCFCL มีความสามารถลดค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน แบบสองเฟส แบบสองเฟสลงดิน และแบบหนึ่งเฟสลงดิน โดยประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรจะขึ้นกับปริมาณกระแสลัดวงจรในกรณีไม่ติดตั้ง SCFCL เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของ SCFCL ในสภาวะผิดพ่วงมีค่าเท่ากัน สำหรับทุกๆ ชนิดของการเกิดการลัดวงจร
- ✓ การติดตั้ง SCFCL สามารถช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆ ในระบบได้ โดยการลัดวงจรที่บริเวณใกล้กับ SCFCL ค่ากระแสลัดวงจรจะลดลงได้มากกว่าการลัดวงจรที่บริเวณไกลออกไปจาก SCFCL
- ✓ การติดตั้ง SCFCL ในระบบ IPP สามารถช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรที่ระบบ IPP จ่ายออกและค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดภายในระบบ IPP ได้ นอกจากนี้ SCFCL ยังช่วยลดกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งอื่นๆ ภายในระบบได้อีกด้วย ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง

โดยที่ตำแหน่งสายส่งต่างๆ หรือเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างกัน ประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL ก็จะแตกต่างกันไป

- ✓ การติดตั้ง SCFCL จะช่วยปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะเมื่อเกิดการลัดวงจรให้ดีขึ้น โดยประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าแรงดันตกชั่วขณะจะขึ้นกับค่าแรงดันตกชั่วขณะเมื่อไม่มีการติดตั้ง SCFCL
- ✓ การติดตั้ง SCFCL สามารถลดค่ากระแสฟุ้งเข้าจากการจ่ายไฟเข้าสู่หม้อแปลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งยอดแรกของกระแสฟุ้งเข้าหม้อแปลง ส่งผลให้ขดลวดและฉนวนของหม้อแปลงได้รับแรงและความร้อนน้อยลงทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

#### สรุปผลกระทบของการติดตั้ง SCFCL บนระบบ 115 กิโลโวลต์

- ✓ การเพิ่มอิมพีแดนซ์เพื่อลดกระแสลัดวงจรของ SCFCL จะทำให้เวลาในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินช้าลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานร่วมกับระบบป้องกัน จึงควรมีการปรับตั้งค่าของรีเลย์เพื่อรักษาเวลาการทำงานให้คงเดิม
- ✓ แม้ว่าการติดตั้ง SCFCL จะช่วยให้ค่ากระแสลัดวงจรที่จุดผิดพลาดลดลง แต่อาจจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรไม่ผ่าน SCFCL จ่ายกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นได้ โดยสามารถใช้หลักการของการถ่ายโอนกำลังสูงสุดในการวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของกระแสที่เพิ่มขึ้นได้
- ✓ การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดภายใน SCFCL จะทำให้มีรีแอคเตอร์ที่ต่อขนานกับอุปกรณ์ตัวนำยิ่งยวดหลุดเข้าไปในวงจรส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสและแรงดัน อาจส่งผลให้โหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพและอาจทำให้มอเตอร์ร้อนเกินและไหม้ชำรุดในกรณีมอเตอร์ใช้โหลดเต็มที่ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกระแสไหลที่สายนิวทรัล ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายจากกระแสไฟฟ้าดูดเมื่อไปสัมผัสกับสายนิวทรัลและอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินทำงานผิดพลาด

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดตำแหน่งของการติดตั้ง SCFCL และเลือกใช้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า 115 kV แห่งหนึ่ง ดังนั้นการนำอุปกรณ์ SCFCL ไปติดตั้งบนระบบไฟฟ้าต่างๆ อาจทำให้ผลจากการจำลองมีค่าแตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ยังคงมีแนวโน้มเดียวกัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเป็นกรณีศึกษาต่างๆ ของผลกระทบโยชน์และผลกระทบของ SCFCL ต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ให้กับระบบ ที่ต้องการจะติดตั้ง SCFCL หรือเป็นแนวทางเลือกให้กับระบบไฟฟ้าที่กำลังมองหาเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงในระบบ ทั้งนี้ควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมทางด้านเศรษฐศาสตร์ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของ SCFCL เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด



### รายการอ้างอิง

- [1] P. Mahajan and P. Shah, "Designing and Analysis of Power System with SFCL Module," International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 3, no. 2.
- [2] X. Zhang, H. Ruiz, Z. Zhong, and T. Coombs, "Implementation of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiters in Electrical Grids: Performance Analysis and Measuring of Optimal Locations," arXiv preprint arXiv:1508.01162, 2015.
- [3] M. Nagarathna, H. V. Murthy, and R. Shashikumar, "A review on super conducting fault current limiter (SFCL) in power system," Int. J. of Eng. Research and General Science, vol. 3, no. 2, 2015.
- [4] B. Vaishnavi, R. Angelin Suji, D. Trivenishree, G. Sowmya, and N. Nabi, "Superconducting fault current limiter & its application," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, no. 5, 2016.
- [5] ช. ฉลาดสกุล, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. บริษัทวิทยพัฒน์ 2559.
- [6] ป. พิทยพัฒน์, การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [7] R. Adapa, "Fault current management guidebook," EPRI Technical Update, vol. 1012414, 2006.
- [8] T. Hazel, "Limiting short-circuit currents in medium-voltage applications," Schneider Electric, 2003.
- [9] H. G. Sarmiento, R. Castellanos, G. Pampin, C. Tovar, and J. Naude, "An example in controlling short circuit levels in a large metropolitan area," in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003, vol. 2, pp. 589-594: IEEE.
- [10] P. Lubicki, SCFCL Model in Power System Analysis. JOINT TNC CIGRE & IEEE PES SEMINAR on Understanding Superconducting Fault Current Limiters: Design and Application, 2015.
- [11] K. Tekletsadik, KEMA Test Results. Applied Materials Confidential, 2015.

- [12] T. MathWorks, Three-Phase Core-Type Transformer (ออนไลน์).  
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/.html> 1994-2018.







## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรเกียรติ ไกรเกียรติ เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2535 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2558

ระหว่างการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต นายวรเกียรติ ไกรเกียรติ มีผลงานตีพิมพ์และนำเสนอบทความ “ A STUDY ON BENEFITS AND IMPACTS OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER IN 115 kV SYSTEMS” งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟผ. ปี 2560 “Moving Toward The Electric Utility of The Future : The Challenges of 4.0 Era” ระหว่างวันที่ 13 - 14 ธันวาคม พ.ศ. 2560 ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์ ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ แจ้งวัฒนะ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY