

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวด ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง

Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) on High Voltage Power Transmission System

พีรินทร์ หยกเจริญ และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email : pheerin.y@gmail.com, fengksh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผู้ผลิตไฟฟ้าจำเป็นต้องจัดหาแหล่งผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า อีกทั้งนโยบายในการส่งเสริมพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทนใน อีก 10 ปีของภาครัฐ พ.ศ. 2555 – 2564 (AEDP 2012 – 2021) ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้ามีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีความซับซ้อนมากขึ้น การขยายตัวของระบบผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าส่งผลให้อิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลงและขนาดกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ ในระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น อาจสร้างความเสียหายต่อเซอร์กิตเบรกเกอร์หรืออุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Fault Current Limiter - SFCL) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ช่วยลดขนาดกระแสลัดวงจร ณ ตำแหน่งที่ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบโดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติ จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ บทความนี้ได้วิเคราะห์รูปแบบต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ SFCL เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาจากความสามารถในการจำกัดขนาดกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์

คำสำคัญ

กระแสลัดวงจร วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจร อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรชนิดตัวนำยิ่งยวด

Abstract

Nowadays, demand of electricity in Thailand is rapidly increasing. As a result, the generation sector has to provide the sources of electricity to serve the power demand growth. Moreover, the alternative energy development plan for the next 10 years of Thai government (AEDP 2012-2021) might affect the generation and transmission systems to expand more rapidly and more sophisticatedly. The expansion of the generation and transmission systems may result

in a higher short-circuit current that might be higher than the interrupting current of the circuit breakers or other protective devices in power systems. As a result, a high short-circuit current may cause severe damages on equipment of power systems. This paper proposes an application of superconducting fault current limiter (SFCL) on high voltage power transmission system in order to limit the fault without affecting the normal operation in power systems. The results from computer simulations on various configurations of using the SFCL are analysed in order to obtain more efficient use of the SFCL by considering the ability to limit the short-circuit current and the size of SFCL.

Keywords

fault current, fault current limiting method, superconducting fault current limiter

1. คำนำ

เนื่องจากการขยายตัวของระบบผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้า เช่น การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนหม้อแปลง หรือการจ่ายไฟที่เป็นระบบเครือข่ายนั้น ส่งผลให้อิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง และขนาดกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ ในระบบมีค่าสูงขึ้น อาจสร้างความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก [1]

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวมีงานวิจัย [2-4] ได้ศึกษาวิธีที่ช่วยจำกัดหรือลดขนาดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สามารถรองรับต่อขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ ตัวอย่างเช่น การแบ่งแยกบัส [5] วิธีดังกล่าวมีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น แต่มีข้อเสียในเรื่องของความเชื่อถือได้ของระบบมีค่าลดลง และการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจึงต้องมีการศึกษาการไหลของโหลดอย่างรอบคอบ เนื่องจากวิธีดังกล่าวส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณกว้าง วิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) [6],[7] วิธีดังกล่าวมีข้อดีคือในสภาวะปกตินั้นอุปกรณ์จะไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ โดยจะไม่ส่ง

ผลกระทบต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าและช่วงอุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์มีความยืดหยุ่นสูง แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง เนื่องจากอุปกรณ์ทำมาจากวัสดุประเภทตัวนำยิ่งยวด

บทความนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ SFCL ในการลดขนาดกระแสลัดวงจร เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ [8],[9] เหมาะสมต่อระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน และมีขนาดของกระแสลัดวงจรสูงเกินค่าพิกัดของตัวอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

2. หลักการทำงานของอุปกรณ์ SFCL

ภาพที่ 1 แสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร เมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) อุปกรณ์ SFCL จะทำงานในลักษณะปราศจากความต้านทาน สมการที่ (1) และ (2) แสดงการทำงานของ SFCL ในสภาวะปกติและสภาวะเมื่อเกิดลัดวงจร

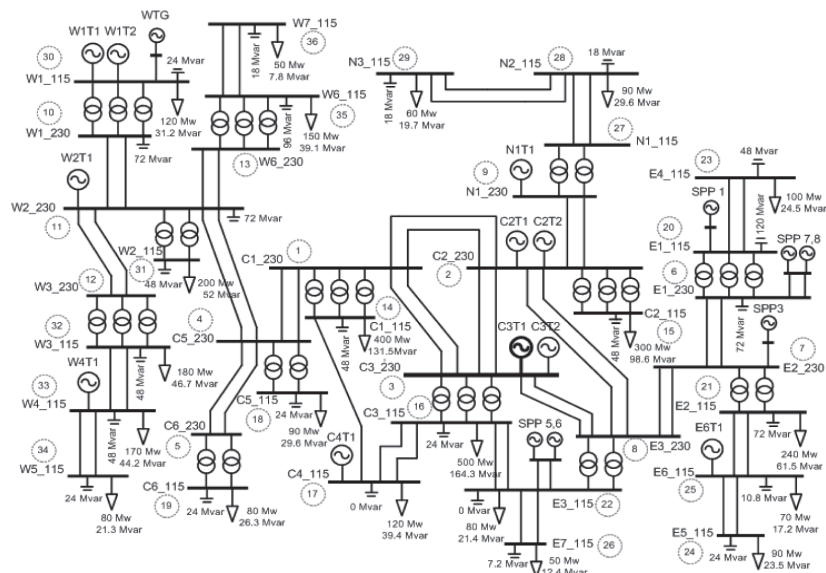
$$\text{สภาวะปกติ : } I_{LOAD} < I_{TH} ; Z_{SFCL} = 0 \quad (1)$$

$$\text{สภาวะลัดวงจร : } I_{LOAD} \geq I_{TH} ; Z_{SFCL} = Z_{SFCL} \quad (2)$$



ภาพที่1 วงจรสมมูลของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

8. โครงสร้างระบบไฟฟ้าที่ศึกษา



ภาพที่2 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษา (รายละเอียดข้อมูลระบบตามตารางที่1-3)

ตารางที่ 1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

GENERATION DATA													
Bus No.	Bus Name	Voltage (PU)	S MVA	PF.	Q min	Q max	Bus No.	Bus Name	Voltage (PU)	S MVA	PF.	Q min	Q max
30	W1T1	1.02	350.0	0.85	-105.0	192.5	9	N1T1	1.02	800.0	0.85	-240.0	440.0
30	W1T2	1.02	350.0	0.85	-105.0	192.5	25	E6T1	1.02	350.0	0.85	-105.0	192.5
11	W2T1	1.02	640.0	0.90	-125.6	251.2	30	WTG	1.00	136.0	0.85	-24.48	51.4
33	W4T1	1.02	350.0	0.85	-105.0	192.5	20	Spp1	1.00	145.0	0.85	-26.1	54.8
2	C2T1	1.02	800.0	0.85	-240.0	440.0	8	Spp3	1.00	145.0	0.85	-26.1	54.8
2	C2T2	1.02	800.0	0.85	-240.0	440.0	22	Spp5	1.00	145.0	0.85	-26.1	54.8
3	C3T1	1.03	1000.0	0.85	-300.0	550.0	22	Spp6	1.00	145.0	0.85	-26.1	54.8
3	C3T2	1.03	1000.0	0.85	-300.0	550.0	6	Spp7	1.00	145.0	0.85	-26.1	54.8

ตารางที่ 2 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า 230/115 kv

TRANSFORMER DATA													
Bus No.	Bus No.	No.	S MVA	ΔV % / Tap	$X_{1,2}$ (PU)	X_0 (PU)	Bus No.	Bus No.	No.	S MVA	ΔV % / Tap	$X_{1,2}$ (PU)	X_0 (PU)
10	30	2	300	1.25	0.14	0.14	1	14	1	200	1.25	0.14	0.14
10	20	1	200	1.25	0.14	0.14	2	15	3	200	1.25	0.14	0.14
11	31	2	300	1.25	0.14	0.14	3	16	3	300	1.25	0.14	0.14
12	32	2	300	1.25	0.14	0.14	4	18	2	200	1.25	0.14	0.14
12	32	1	200	1.25	0.14	0.14	5	19	2	200	1.25	0.14	0.14
13	35	3	200	1.25	0.14	0.14	6	20	3	300	1.25	0.14	0.14
9	27	2	300	1.25	0.14	0.14	7	21	2	300	1.25	0.14	0.14

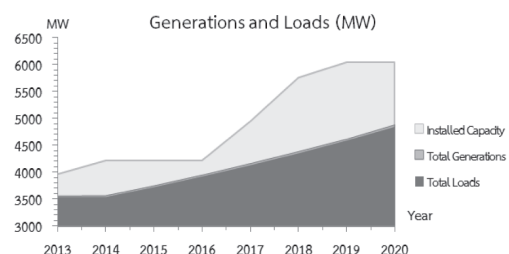
ตารางที่ 3 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า 115 kv และ 230 kv

LINE DATA (POS, NEG)													
Bus No	Bus No	Cct No	Dis km	R _{1,2} Ω/km/cct	X _{1,2} Ω/km/cct	B _{1,2} Ω/km/cct	Bus No	Bus No	Cct No	Dis km	R _{1,2} Ω/km/cct	X _{1,2} Ω/km/cct	B _{1,2} Ω/km/cct
3	8	2	70	0.056	0.491	2.835	20	23	2	50	0.045	0.293	3.997
1	2	2	50	0.028	0.308	3.772	7	8	2	80	0.028	0.308	3.772
1	3	2	50	0.028	0.308	3.772	21	25	2	20	0.045	0.293	3.997
14	17	1	40	0.089	0.394	2.960	22	26	2	20	0.089	0.394	2.960
1	4	2	80	0.056	0.491	2.835	24	25	2	20	0.045	0.293	3.997
2	3	2	50	0.028	0.308	3.772	27	28	2	50	0.045	0.293	3.997
2	8	2	80	0.028	0.308	3.772	28	29	2	120	0.089	0.394	2.960
2	9	2	160	0.028	0.308	3.772	10	11	2	80	0.056	0.491	2.835
16	17	2	20	0.089	0.394	2.960	11	12	2	80	0.056	0.491	2.835
16	22	2	60	0.089	0.394	2.960	11	13	2	100	0.056	0.491	2.835
4	5	2	120	0.056	0.491	2.835	32	33	2	20	0.089	0.394	2.960

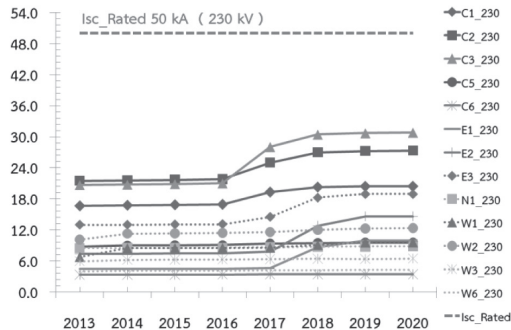
ในภาพที่ 2 แสดงระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ศึกษาเชื่อมต่อกันผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV และ 115 kV โดยศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะปกติและสถานะลัดวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 2013 ถึง ปี ค.ศ.2020 เพื่อพิจารณาวางแผนขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าให้สามารถรองรับต่อแหล่งผลิตไฟฟ้า และความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต จากระบบที่ศึกษานั้นกำหนดให้บัส C3_230 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า C3T1 มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 1,000 MVA ทำหน้าที่เป็นบัสอ้างอิงของระบบ โดยการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะปกตินั้นแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.98-1.05 p.u. และระบบยังคงรักษาเสถียรภาพอยู่ได้ภายใต้เงื่อนไข N-1 ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ

จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า ในปี ค.ศ.2013 – 2020 โดยสมมติให้อัตราความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปีละ 3-6% ส่งผลให้ระบบต้องขยายในส่วนของการผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยขนาดของกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมและโหลดการใช้ไฟฟ้ารวมที่เพิ่มขึ้นในปี ค.ศ.2013-2020 เป็นไปตามภาพที่ 3 เนื่องจากการขยายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบมีค่าลดลงเป็นเหตุผลให้ขนาดกระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ มีค่าสูงขึ้น โดยผลจากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะ

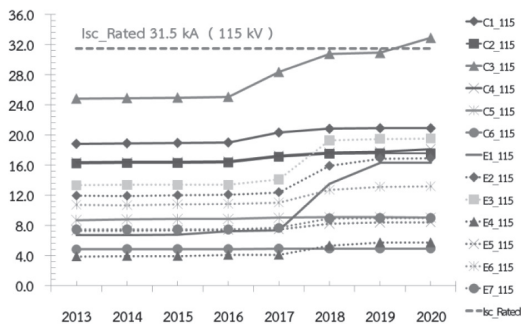
ปกติและสถานะลัดวงจร พบว่าในปี ค.ศ. 2018 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส C3_115 มีค่าประมาณ 30.8 kA คิดเป็น 98% ของค่าพิกัดการทนกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (พิกัดการทนกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ระดับแรงดัน 115 kV มีขนาด 31.5 kA) เนื่องจากความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบผลิตและระบบส่งไฟฟ้ามีการขยายตัวเป็นผลให้ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส C3_115 และบัสอื่นๆ ในระบบมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆ กับพิกัดการทนกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าตามภาพที่ 7 ซึ่งพบว่าที่บัส C3_115 มีค่าสูงที่สุดและใกล้เคียงกับพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการจำกัดหรือลดขนาดกระแสลัดวงจรโดยการติดตั้ง SFCL ที่บัส C3_115 เพื่อจำกัดหรือลดขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นเกินค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในปี ค.ศ.2020 ดังแสดงในภาพที่ 5



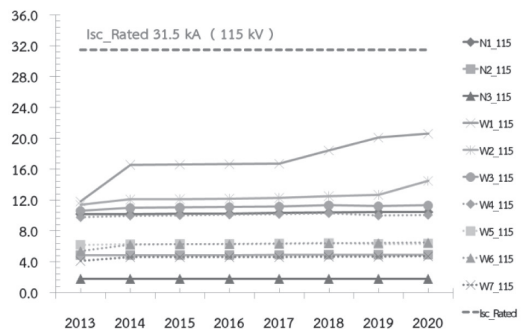
ภาพที่ 3 กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมและโหลดปี ค.ศ 2013-2020



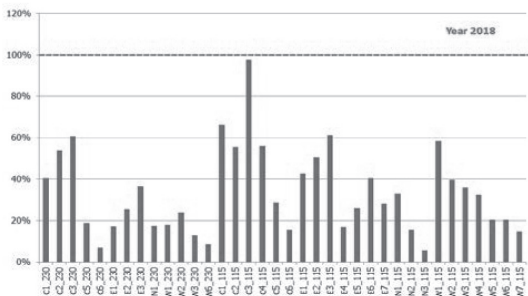
ภาพที่ 4 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส 230 kv



ภาพที่ 5 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส 115 kv



ภาพที่ 6 ขนาดกระแสลัดวงจรที่บัส 115 kv



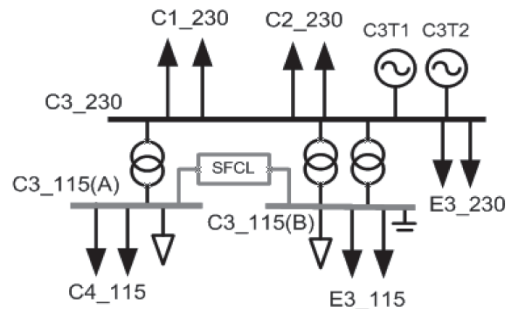
ภาพที่ 7 ขนาดกระแสลัดวงจรเทียบกับพิกัดของ เซอร์กิตเบรกเกอร์

4. การประยุกต์ใช้งาน SFCL

เนื่องจากความสามารถในการลดขนาดกระแสลัดวงจรของ SFCL ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการติดตั้งและขนาดอิมพีแดนซ์ของ SFCL ในบทความนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้งาน SFCL เพื่อลดขนาดกระแสลัดวงจรโดยติดตั้งที่บัส C3_115 ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 กรณีศึกษา ดังนี้

4.1 กรณีศึกษาที่ 1

ประยุกต์ใช้วิธีแบ่งแยกบัสร่วมกับการติดตั้ง SFCL โดยแบ่งแยกบัส C3_115 ออกเป็น บัส C3_115(A) และ C3_115(B) ติดตั้ง SFCL เชื่อมระหว่างบัส C3_115(A) และ C3_115(B) เพื่อรักษาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าให้คงเดิมดังแสดงในภาพที่ 8 ศึกษา ระบบเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115(A) และ C3_115(B)



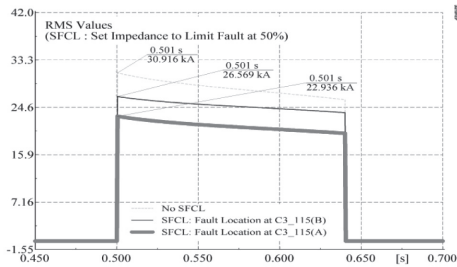
ภาพที่ 8 การติดตั้ง SFCL ตามกรณีศึกษาที่ 1

4.1.1 เกิดลัดวงจรบัส C3_115(A) ที่เวลา 0.5 วินาที เซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เวลาจำกัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที

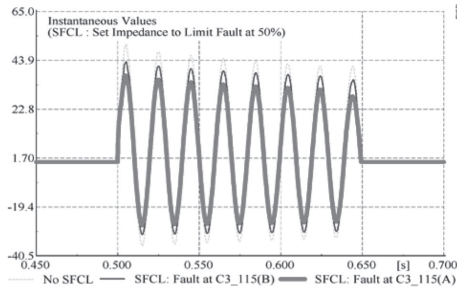
4.1.2 เกิดลัดวงจรบัส C3_115(B) ที่เวลา 0.5 วินาที เซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เวลาจำกัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที

จากผลการศึกษกรณี 4.1.1 และ 4.1.2 กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง เนื่องจากถูกจำกัดโดย SFCL ดังแสดงในภาพที่ 9 และมีขนาดลดลงตั้งแต่ค่ายอดแรก (First Peak) ดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อ

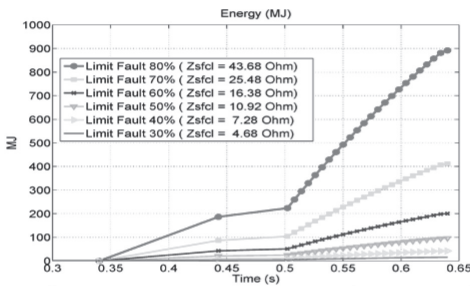
ปรับขนาดอิมพีแดนซ์ของ SFCL เพื่อลดขนาดกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เนื่องจากการจำกัดกระแสลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 11 และ 12



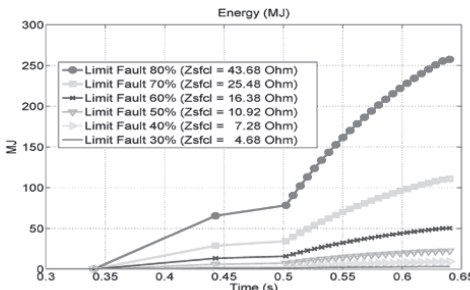
ภาพที่ 9 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS ในกรณี 1



ภาพที่ 10 กระแสลัดวงจรเป็นค่าชั่วขณะในกรณีที่ 1



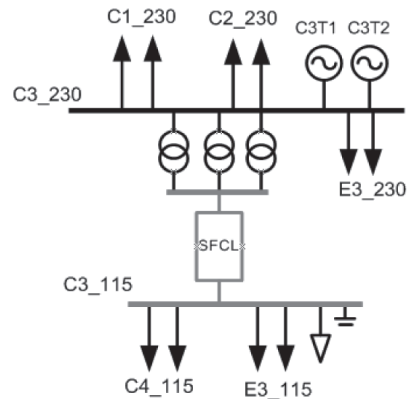
ภาพที่ 11 พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115(A) ในกรณีที่ 1



ภาพที่ 12 พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 (B) ในกรณีที่ 1

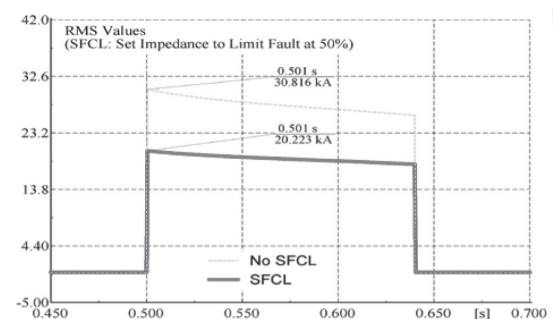
4.2 กรณีศึกษาที่ 2

ประยุกต์ใช้งาน SFCL โดยติดตั้งทางด้านแรงดันไฟฟ้า 115 kV ของหม้อแปลงไฟฟ้า 230/115 kV ระหว่างบัส C3_230 กับ บัส C3_115 ดังแสดงในภาพที่ 13

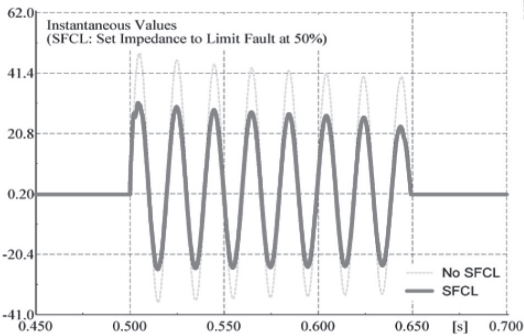


ภาพที่ 13 การติดตั้ง SFCL ตามกรณีศึกษาที่ 2

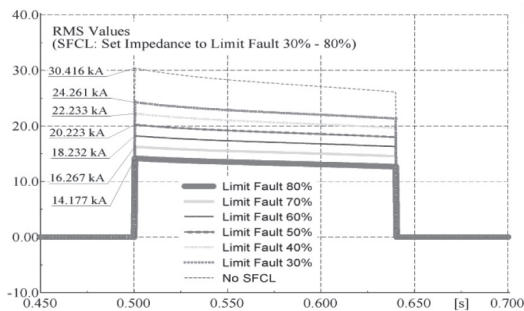
ศึกษาระบบเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ที่เวลา 0.5 วินาที เซอร์คิตเบรกเกอร์ใช้เวลาจำกัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที จากผลการศึกษากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง ดังแสดงในภาพที่ 14 และมีขนาดลดลงตั้งแต่ค่ายอดแรก (First Peak) ดังแสดงในภาพที่ 15 เมื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ SFCL เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง ดังแสดงในภาพที่ 16 เป็นผลให้พลังงานสูญเสียของ SFCL เนื่องจากการจำกัดกระแสลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 17



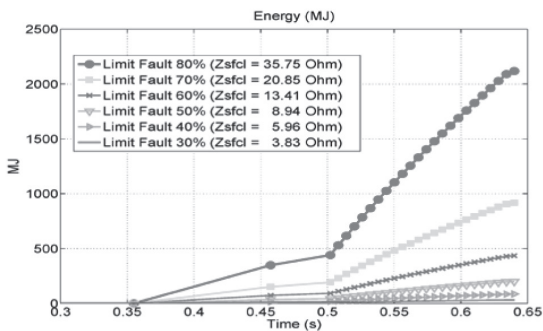
ภาพที่ 14 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS ในกรณีที่ 2



ภาพที่ 15 กระแสลัดวงจรเป็นค่าชั่วขณะในกรณีที่ 2



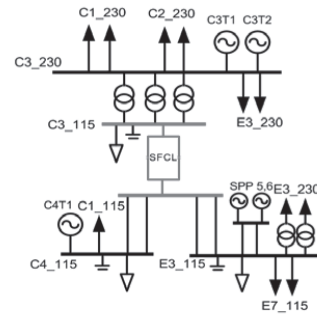
ภาพที่ 16 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS เมื่อปรับขนาดอิมพีแดนซ์จำกัดกระแสของ SFCL ในกรณีที่ 2



ภาพที่ 17 พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ในกรณีที่ 2

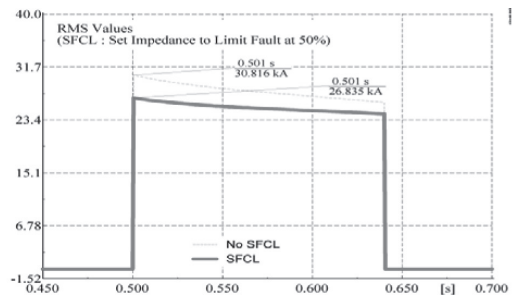
4.3 กรณีศึกษาที่ 3

ประยุกต์ใช้งาน SFCL โดยติดตั้งระหว่างบัส C3_115 กับสายส่ง 115 kV ดังแสดงในภาพที่ 18

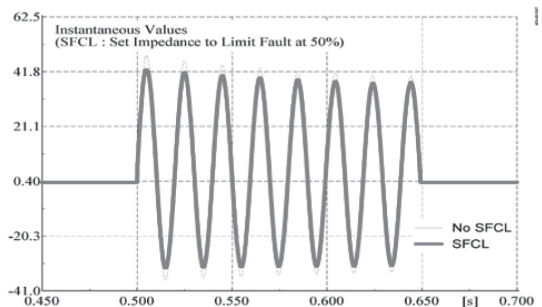


ภาพที่ 18 การติดตั้ง SFCL ตามกรณีศึกษาที่ 3

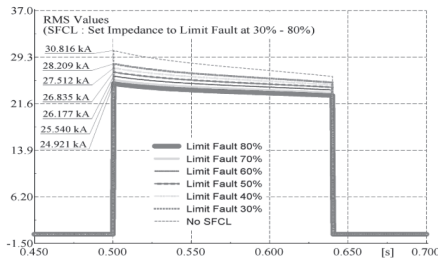
ศึกษาระบบเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ที่เวลา 0.5 วินาที เซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เวลากำจัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที จากผลการศึกษาระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลงดังแสดงในภาพที่ 19 และมีขนาดลดลงตั้งแต่ค่ายอดแรก (First Peak) ดังแสดงในภาพที่ 20 เมื่อปรับขนาดอิมพีแดนซ์ของ SFCL เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีขนาดลดลง ดังแสดงในภาพที่ 21 เป็นผลให้พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เนื่องจากการจำกัดกระแสลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 22



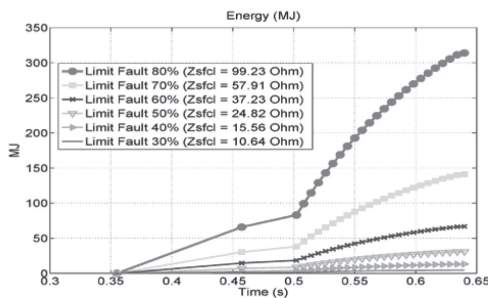
ภาพที่ 19 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS ในกรณีที่ 3



ภาพที่ 20 กระแสลัดวงจรเป็นค่าชั่วขณะในกรณีที่ 3



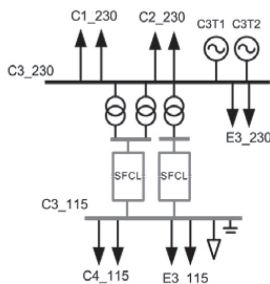
ภาพที่ 21 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS เมื่อปรับขนาดอิมพีแดนซ์จำกัดกระแสของ SFCL ในกรณีที่ 3



ภาพที่ 22 พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ในกรณีที่ 3

4.4 กรณีศึกษาที่ 4

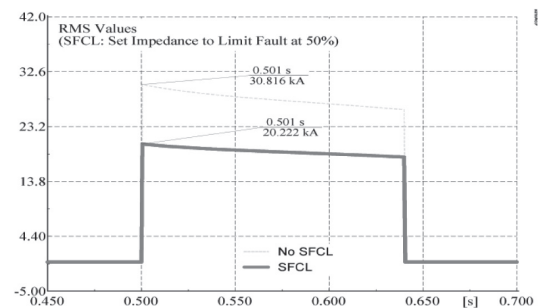
จากกรณีศึกษาที่ 2 ในข้อ 4.2 ถ้าพิจารณาถึงความมั่นคงของระบบในกรณีที่อุปกรณ์ SFCL เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงาน ส่งผลให้การทำงานของระบบไม่รองรับกรณีเกิดความเสียหาย 1 อุปกรณ์ภายในระบบ (N-1) ดังนั้นในกรณีศึกษานี้จึงประยุกต์ใช้งาน SFCL 2 ชุด ติดตั้งที่ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 23 ศึกษาระบบเมื่อเกิดลัดวงจร ตามกรณีศึกษา 4.4.1 SFCL ทั้ง 2 ชุดทำงานตามปกติ และ 4.4.2 SFCL 1 ชุดไม่สามารถทำงานได้สำเร็จเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ดังนี้



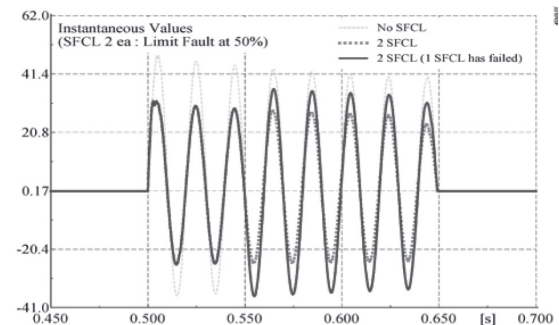
ภาพที่ 23 การติดตั้ง SFCL ตามกรณีศึกษาที่ 4

4.4.1 เกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ที่เวลา 0.5 วินาที เซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เวลาจำกัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที จากผลการศึกษา ขนาดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง ดังแสดงในภาพที่ 24 และมีขนาดลดลงตั้งแต่ค่ายอดแรก (First Peak) ดังแสดงในภาพที่ 25

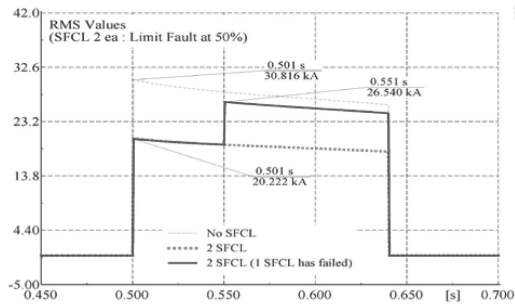
4.4.2 เกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ที่เวลา 0.5 วินาที SFCL 1 ชุด ทำงานล้มเหลว เมื่อเกิดลัดวงจรที่เวลา 0.55 วินาที และเซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เวลาจำกัดกระแสลัดวงจร 0.14 วินาที จากผลการศึกษา เมื่อ SFCL 1 ชุด ทำงานล้มเหลวที่เวลา 0.55 วินาที ขนาดกระแสลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าพิกัดการทนกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังแสดงในภาพที่ 25 และ 26 ส่งผลให้ระบบยังคงมีความมั่นคงรองรับ N-1 และพลังงานสูญเสียของ SFCL เนื่องจากการจำกัดกระแสลัดวงจร ชุดที่ 1 และ 2 มีขนาดดังแสดงในภาพที่ 28



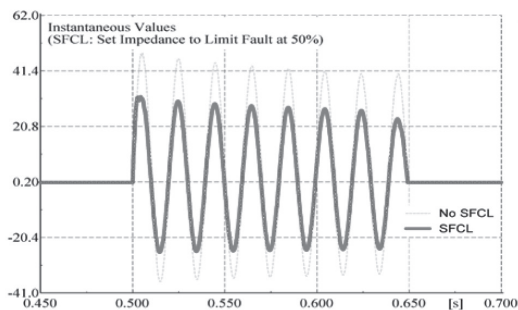
ภาพที่ 24 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS ในกรณีที่ 4



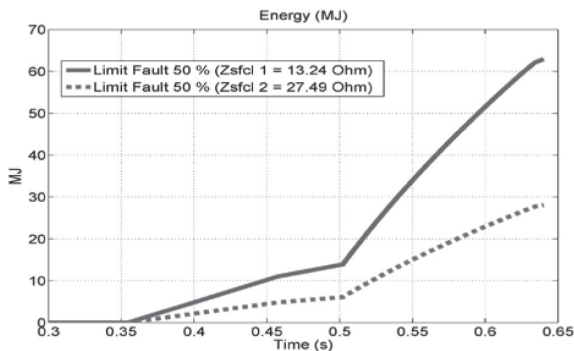
ภาพที่ 25 กระแสลัดวงจรเป็นค่าชั่วขณะในกรณีที่ 4



ภาพที่ 26 กระแสลัดวงจรเป็นค่า RMS โดย SFCL 1 ตัวไม่ทำงาน



ภาพที่ 27 กระแสลัดวงจรเป็นค่าชั่วขณะในกรณีที่ 4 โดย SFCL 1 ตัวไม่ทำงาน



ภาพที่ 28 พลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส C3_115 ในกรณีที่ 4

จากผลการศึกษาในกรณีศึกษาที่ 1-4 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ SFCL สามารถจำกัดหรือลดขนาดกระแสลัดวงจร ตั้งแต่ค่ายอดแรก (First peak) เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบ โดยขนาดกระแสลัดวงจรและพลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) เนื่องจากการจำกัดกระแสลัดวงจร ในกรณีศึกษาที่ 1-4 มีขนาดแตกต่างกัน

ขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งและขนาดอิมพีแดนซ์ของ SFCL และจากผลการศึกษาในกรณีที่ 1-4 นั้น เมื่อปรับขนาดอิมพีแดนซ์ของ SFCL เพื่อจำกัดหรือลดขนาดกระแสลัดวงจรลง 50% ขนาดกระแสลัดวงจรและพลังงานสูญเสียของ SFCL (MJ) ที่เกิดขึ้นมีขนาดดังแสดงผลในตารางที่ 4 (กระแสลัดวงจรก่อนติดตั้ง SFCL มีขนาด 30.816 kA)

ตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษารณีที่ 1-4

No.	Fault Location	Limit Fault (%)	Z_{SFCL} (Ω)	I_{SC} SFCL (kA)	Energy (MJ)
1	C3_115(A) C3_115(B)	50 50	10.921	22.936 26.494	95.79 22.48
2	C3_115	50	8.937	20.223	200.44
3	C3_115	50	24.819	26.763	31.04
4	C3_115	50(1) 50(2)	13.242(1) 27.489(1)	20.222	62.92(1) 28.03(2)

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาในกรณีศึกษาที่ 4 คือการประยุกต์ใช้งาน SFCL 2 ชุด มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากถ้า SFCL 1 ชุด เกิดความผิดพลาดไม่สามารถทำงานได้ กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะมีขนาด 26.54 kA ซึ่งยังคงต่ำกว่าขนาดฟักัดการทนกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และนอกจากนั้นพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเกิดลัดวงจรของ SFCL 1 และ SFCL 2 มีขนาดเพียง 62.92 MJ และ 28.03 MJ เป็นผลให้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง SFCL เพราะขนาดของ SFCL ขึ้นอยู่กับขนาด ระบบหล่อเย็น (Cooling System) ของอุปกรณ์ และระบบหล่อเย็นต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อรองรับพลังงานสูญเสีย (MJ) เมื่อเกิดลัดวงจร อย่างไรก็ตาม บทความนี้พิจารณาความเหมาะสมทางด้านเทคนิคเพียงเท่านั้น เพราะในปัจจุบันการประยุกต์

ใช้งาน SFCL ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ถึง 230 kV ยังเป็นโครงการนำร่องและอยู่ในช่วงพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ ส่งผลให้ราคาของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ แต่ในเบื้องต้นการประมาณราคาจะพิจารณาจาก 2 ส่วน คือ 1) เงินลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ (Investment Cost) เช่น ขนาดอิมพีแดนซ์ และระบบหล่อเย็นของ SFCL 2) เงินลงทุนในการปฏิบัติการและบำรุงรักษา (O&M Cost) โดยในอนาคตเมื่อเทคโนโลยี SFCL ถูกประยุกต์ใช้งานในระบบส่งกำลังไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย จึงควรมีการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางด้านเทคนิค เพื่อหาความเหมาะสมและคุ้มค่าในการประยุกต์ใช้งาน SFCL ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

๖ เอกสารอ้างอิง

- [1] Khorrami M, Nader M.S. and Nejhad N. K. 2010. Short Circuit Current Level Control and its Effects on Circuit Breakers Transient Studies, Hyper Sciences Publisher Journal of Electrical Engineering: Theory and Application 1(1):4-17.
- [2] Adapa R. 2006., Fault Current Management Guidebook, EPRI Solutions Inc.
- [3] Taylor T., Hanson A., Lubkeman D. and Mousavi M. 2005. Fault Current Review Study. ABB Inc.,
- [4] Sarmiento H. G., Castellanos R., Pampin G., Tovar C. and Naude J. 2003. An Example in Controlling Short Circuit Levels in a Large Metropolitan Area. , IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17. July 2003.
- [5] DTI Technology programme, 2004, The Performance of Networks Using Alternative Network Splitting Configurations, WS3.
- [6] Kovalsky L., Yuan X., Tekletsadik K., Keri A., Bock J. and Breuer F. 2005. Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. IEEE Transactions Applied Super-conductivity 15 (June 2005): 2130-2133
- [7] Power A. J. 2002. An Overview of Transmission Fault Current Limiters. Leatherhead : The National Grid Company plc.,
- [8] Mann T.L., Zeigler J.C. and Young T. R. 1997. Opportunities for Super- conductivity in the electric power industry, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp.239-244, June
- [9] Noe M.B. and Oswald R. 1999. Technical and Economic Benefits of Super-conducting Fault Current Limiters in Power System, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1347-1350, June 1999.