



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกันระยะทาง

The Impact of Fault Current Limiter on Distance Protection

นามผู้วิจัย

นายพิริยะ แสงไทร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์คมสันต์ หงษ์สมบัติ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสันทิ มตาวิตยาสัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกันระยะทาง

The Impact of Fault Current Limiter on Distance Protection

โดย

นายพิริยะ แสงไทร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิริยะ แสงไทร 2556: ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกัน
ระยะทาง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์คมสันต์ หงษ์สมบัติ, Ph.D. 51 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์จำกัดกระแส
ลัดวงจร(FCL) กับรีเลย์ป้องกันแบบระยะทางเมื่อเกิดความผิดปกติ โดยที่แบบจำลองของ
รีเลย์ระยะทางและ FCL ได้ถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการศึกษา มีการ
ปรับค่าพารามิเตอร์ของ FCL และตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติให้แตกต่างกัน ทำให้สามารถ
กำหนดเกณฑ์ต่างๆที่จะทำให้ FCL มีผลกระทบต่อการป้องกันระยะทาง ในการวิเคราะห์
ผลกระทบของการติดตั้ง FCL กับรูปแบบการป้องกันได้มีการใช้แนวความคิดของโซน
ป้องกัน จากผลการศึกษาเผยให้เห็นว่า FCL สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ
การป้องกันระยะทางโดยการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและทำให้เกิดความ
น่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นในระบบการป้องกัน

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Piriya Sangsai 2013: The Impact of Fault Current Limiter on Distance Protection. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering.
Thesis Advisor: Mr. Komsan Hongesombut, Ph.D. 51 pages.

This thesis presents the study of the impact of Fault Current Limitings (FCLs) on distance protection. The models of distance relay and FCL have been developed by Matlab/Simulink. By adjusting different FCL parameters and fault locations, a set of criteria is derived to qualify the potential impact of FCLs on the distance protection. The concept of protection zone is used to analyze the influences of FCLs on the protection schemes. The study results reveal that FCLs to enhance the performance of distance protection by reducing the magnitude of fault currents and increasing reliability of protection system.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้องหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี ที่กรุณาให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนทำการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ยศวีร์ วีระกำแพง ที่ได้กรุณาตรวจสอบความถูกต้องพร้อมทั้งให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงงานวิจัยเป็นอย่างดีมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ คุณณัฐชัย คชวัฒน์ สำหรับคำแนะนำดีๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงพี่ๆ ในกองอุปกรณ์ป้องกันและริเลย์ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งได้ให้การสนับสนุนทุกด้าน และให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนเพื่อนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้บรรลุผลสำเร็จ

พิริยะ แสงไทร

มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	28
ผล	28
วิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	39
สรุป	39
ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	41
ภาคผนวก	42
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	51

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบต่างๆ	13
2	เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น	25
3	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	28
4	ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$	31
5	ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$	31
6	ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$	35
7	ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$	35

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เขตการป้องกันของระบบไฟฟ้า	5
2 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบ 4 เขตการป้องกัน	6
3 ขอบเขตการเกิดฟลด์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์	7
4 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น	7
5 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง บนแผนภาพระยะทางเทียบกับเวลา	11
6 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางสำหรับป้องกันสายส่งบนระนาบอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ที่บัส G และบัส H ของระบบไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 5	12
7 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่างๆ	14
8 การเปรียบเทียบขนาดมุมของรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์	16
9 การเปรียบเทียบขนาดของรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์	17
10 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีจ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าปลายทาง	18
11 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line	19
12 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีมองเข้าหา กฟผ.	19
13 โครงสร้างการทำงานของ SFCL resistive	21
14 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยปกป้องสายส่งเป็นหลัก	21
15 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยเลือกป้องกันเฉพาะโหลดที่ต้องการ	22
16 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยการป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่ง	23
17 ระบบไฟฟ้าสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น	25
18 วงจรอุปกรณ์จำกัดกระแสแสดงวงจร	26
19 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์	26
20 จำลองระบบไฟฟ้าที่มีการต่อ FCL ในวงจร	27
21 โชนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 10 \%$	29
22 เปรียบเทียบขนาดของกระแสระหว่างมี FCL และไม่มี เมื่อ $x = 10 \%$	30
23 การทำงานของโชนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 10 \%$ $R_{FCL} = 100 \Omega$	32
24 ทำงานของโชนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 10 \%$ $R_{FCL} = 1000 \Omega$	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	โซนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 90\%$	34
26	การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$	36
27	การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$	37

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FCL	=	Fault Current Limiter (อุปกรณ์ จำกัดกระแสลัดวงจร)
CTR	=	อัตราส่วนการทดกระแส
DPL	=	Digsilent Programming Languages
I_0	=	Zero Sequence Current
I_{FP}	=	กระแสขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
I_R	=	กระแสที่รีเลย์วัดได้ทางด้านทุติยภูมิ
k	=	Residual Compensation Factor (สัมประสิทธิ์ชดเชยการลัดวงจรลงดิน)
VTR	=	อัตราส่วนการทดแรงดัน
V_{FP}	=	แรงดันขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
V_R	=	แรงดันที่รีเลย์วัดได้ทางด้านทุติยภูมิ
Z_0	=	Zero Sequence Impedance of Transmission Line
Z_1	=	Positive Sequence Impedance of Transmission Line
Z_p	=	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านปฐมภูมิ
Z_R	=	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ
R_{FCL}	=	ตัวต้านทานของ Fault Current Limiter (อุปกรณ์ จำกัดกระแสลัดวงจร)

ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกันระยะทาง

The Impact of Fault Current Limiter on Distance Protection

คำนำ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้าต่างๆทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมากในทุกๆพื้นที่ และก็ยังมีปัญหา ข้อผิดพลาดในระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ซึ่งทำให้เกิดกระแสลัดวงจรทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้และผู้อาศัยใกล้เคียง การที่จะรักษาประสิทธิภาพในการป้องกันนั้นจึงมีความสำคัญที่สุดที่ต้องมีแก่ผู้ใช้ โดยต้องไม่ทำให้อุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าพังเสียหาย อีกทั้งยังสร้างความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นๆให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ทั้งหมดนั้นระบบการป้องกันความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นๆจึงมีความสำคัญมาก และในส่วนที่จะเกิดอันตรายแก่ผู้ใช้หรืออุปกรณ์นั้นจะเป็นในส่วนของกระแส เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สูงมากที่จุดเกิดฟอลต์ แล้วกระแสที่สูงนี้เมื่อถูกตัดออกจากวงจรแล้วกระแสไฟฟ้าก็จะไหลแล้ววิ่งเข้าสู่อุปกรณ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นที่แหล่งจ่ายหรือผู้ใช้ไฟ โครงการนี้จึงใช้อุปกรณ์ จำกัดกระแสลัดวงจร (Fault Current Limiter, FCL) เข้ามาช่วยลดขนาดของกระแสเพื่อป้องกันทั้งแหล่งจ่ายและผู้ใช้ไฟ

งานวิจัยนี้จึงเป็นการมุ่งเน้นศึกษาวงจรไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink สร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้ากำลัง และสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ FCL เพื่อใช้เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับระบบจริงของการไฟฟ้าและจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่ได้ศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการทำงานพื้นฐานของระบบป้องกันระยะทาง
2. เพื่อเข้าใจกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ และตัวลดกระแส FCL (Fault Current Limiter)
3. เพื่อสามารถใช้โปรแกรม Matlab/Simulink สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า หม้อแปลงทดกระแส หม้อแปลงทดแรงดัน ฟอลต์ รีเลย์ระยะทาง และ FCL ได้
4. เพื่อเข้าใจพฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ ระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ
5. เพื่อเข้าใจพฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ ระหว่างการติดตั้งอุปกรณ์ FCL และไม่ได้ติดตั้ง ว่าแตกต่างกันอย่างไรและมีผลกับการมองเห็นของโซนป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์หรือไม่

การตรวจเอกสาร

ปรัชญาทั่วไปของระบบป้องกัน

ประสิทธิ์ (2549) ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบการป้องกัน (Protection System) ที่ดีเพื่อลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบ และป้องกันเหตุการณ์ต่างๆ ที่ไม่พึงประสงค์ที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยระบบป้องกันที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- Reliability, Dependability, Security
- Selectivity
- Speed
- Simplicity
- Economics

Reliability

หมายถึง ความเชื่อถือได้ความแน่นอนของรีเลย์ ในขณะที่ทำงานว่าจะสามารถทำงานได้จริง ซึ่งเมื่อกล่าวถึง Reliability แล้วต้องพูดถึงอีก 2 อย่าง คือ

Dependability

หมายถึง การที่ระบบป้องกันทำงานถูกต้องทุกครั้งที่เกิด Fault และต้องทำงานถูกต้องสำหรับ Fault ทุกแบบด้วย และต้องทำงานได้ในขณะที่ต้องการให้ทำงาน เช่น อาจต้องทำงานซ้ำๆ กัน หลายๆ ครั้ง ในช่วงเวลาสั้นๆ หรืออาจจะต้องทำงาน แม้จะไม่ได้ทำงานมาเป็นระยะเวลานานก็ตาม

Security

หมายถึง ระบบป้องกันต้องไม่ทำงาน เมื่อไม่ต้องการให้ทำงาน เช่น จะต้องไม่ทำงานในสถานะโหลตปกติหรือเกิดภาวะ Transients ชั่วขณะ หรือเมื่อเกิด Fault นอกเขตการป้องกัน (Zone Of Protection) การตัดวงจรโดยไม่จำเป็นจะส่งผลให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ หากมองในระบบไฟฟ้าแล้ว ทุกระบบพยายามที่จะทำให้มี Dependability สูง ซึ่งจะส่งผลให้ความสำคัญของ Security น้อยลง ซึ่งก็มาจากความเป็นจริงที่ว่า ระบบไฟฟ้าปัจจุบันมีความเป็น Network หรือ Ring

Main มากขึ้น ซึ่งพลังงานไฟฟ้ามีไว้หลายทาง ในระบบความต้องการที่จะ Clear Fault ให้ถูกต้อง โดยให้ส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับ Fault ยังคงใช้งานได้อยุ่นั้น มีความสำคัญมาเป็นอันดับแรก และการที่จะ Clear Fault ให้ได้ โดยไม่สนใจว่าจะมีกี่ส่วนที่ต้องดับไปด้วยนั้น เป็นความสำคัญที่รองลงมา ซึ่งปรัชญานี้ยังใช้ได้

Selectivity

หมายถึง Security ที่จำกัดพื้นที่ให้อยู่ในขอบเขตจำกัด หรือไม่จำกัด ในระบบไฟฟ้า ซึ่งเขตนี้เรียกว่า Zone of Protection ซึ่งจะเป็นแบบจำกัด (Close) หรือ ไม่จำกัด (Open) ก็ได้ หรืออาจกล่าวอีกแบบได้ว่า Selectivity คือ การที่รีเลย์ทำงานภายใน Zone ที่ออกแบบไว้ให้ทำงานนั่นเอง ซึ่งโดยมากขอบเขตของ Zone นี้จะมี 2 อุปกรณ์ที่สำคัญคืออุปกรณ์ตัดตอน ซึ่งมักหมายถึง Circuit Breaker และ Transmitter ซึ่งมักหมายถึง CT (Current Transformer) และขอบเขตของ Zone นี้จะถูกจำกัดโดยบริเวณที่ติดตั้งที่ติดตั้ง CT นั้นเอง ซึ่งการทำงานภายใน Zone คือ CT เป็นตัวรับสัญญาณ Fault มาแล้วมี Circuit Breaker เป็นตัวตัดตอนแยก Fault ออกจากระบบ

Speed

ระบบป้องกันจะต้องสามารถตัดวงจรได้รวดเร็วพอที่จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบยังไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยังทำงานเร็วเท่าไรอุปกรณ์ก็จะได้รับความปลอดภัย แต่ในบางครั้งเพื่อให้มีการทำงานประสานกันอาจจะต้องมีการหน่วงเวลาบ้างพอสมควร แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ไม่ควรช้าจนทำให้อุปกรณ์เสียหาย อย่างในกรณีที่เราอย่างแน่นนอนว่า การให้ Fault ที่เกิดขึ้น ถูก Clear ออกไปจากระบบให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในบางกรณี เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นไม่ใช่ Fault เช่นอาจเป็น Transients ในระบบไฟฟ้า หรือ การ Swing เนื่องจาก Tie Line ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้หากรีเลย์มองเป็น Fault แล้วทำงานทันที ผลที่เกิดขึ้น คือ ระบบไฟฟ้าจะขาด Security ไป ดังนั้นปรัชญาของรีเลย์ยุคใหม่ จึงมีการหน่วงเวลาให้ Trip ตามลักษณะความรุนแรงของ Fault ด้วย

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแบ่งประเภทของรีเลย์ตามความเร็วในการทำงานจะได้ดังนี้

1) Instantaneous Relay จะทำงานทันทีเมื่อมีสัญญาณ Trip เข้ามาโดยไม่มีการหน่วงเวลา อันเนื่องมาจาก Function การทำงานของตัวเอง

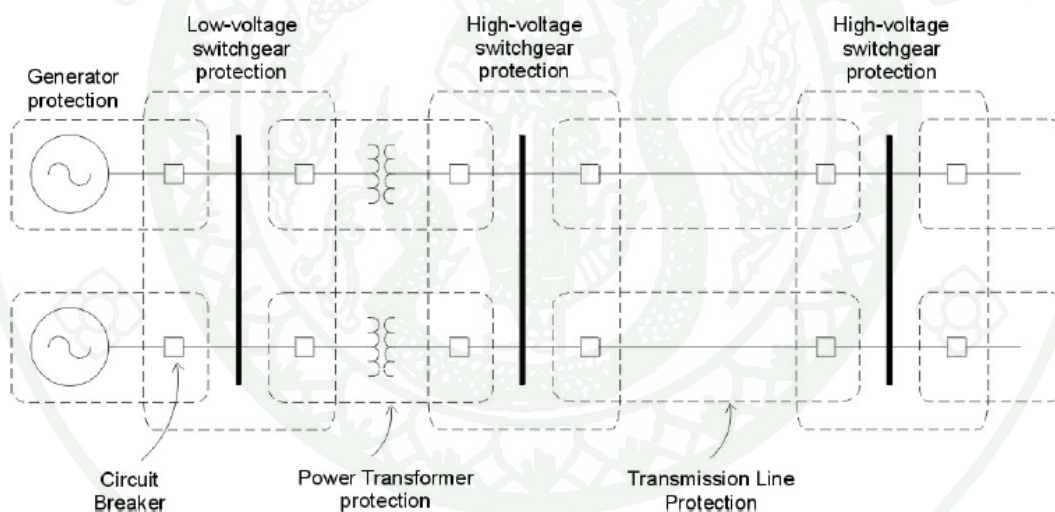
2) Time Delay Relay จะทำงานโดยมีการหน่วงเวลาเอาไว้ ตั้งแต่ที่ได้รับสัญญาณเข้ามา และก่อนที่จะส่งสัญญาณ Trip ออกไป

3) High Speed Relay จะทำงานภายในเวลาที่จำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งเป็น 50 ms

4) Ultra High-Speed Relay เป็นรีเลย์ที่ทำงานได้เร็วเป็นพิเศษ ซึ่งรีเลย์จะทำงานภายใน 4 ms

เขตการป้องกัน (Zone of Protection)

ความต้องการอย่างหนึ่งของระบบป้องกัน คือ การแบ่งระบบไฟฟ้าออกเป็น Protective Zone ซึ่งสามารถป้องกันระบบไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ และตัดส่วนของระบบไฟฟ้าออกให้น้อยที่สุด เมื่อเกิด Fault ระบบไฟฟ้าอาจแบ่งเป็น Protective Zone ได้ดังแสดงในภาพที่ 1

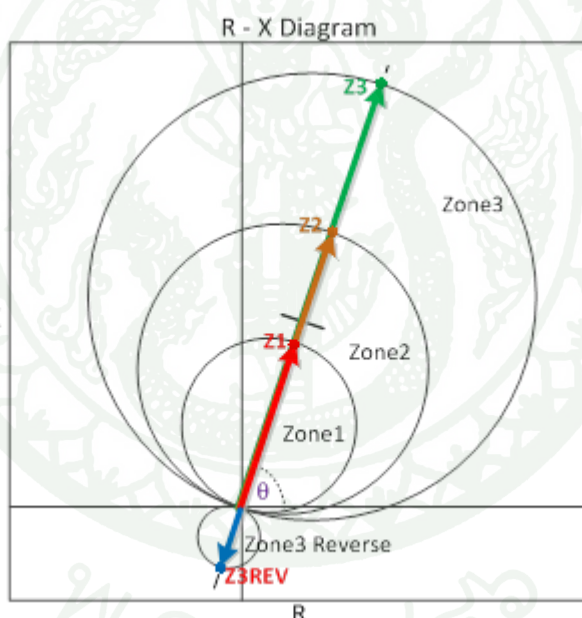


ภาพที่ 1 เขตการป้องกันของระบบไฟฟ้า

ที่มา : SANDRO (2006)

หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

สันติ (2526); Walter (1994) รีเลย์ระยะทางหรือบางทีเรียกว่าอิมพีแดนซ์รีเลย์ รีเลย์ชนิดนี้จะทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งโดยอาศัยอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแส ที่ได้มาจากหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดันที่ตำแหน่งที่ตั้งของรีเลย์ ตัวอย่างเช่น โมห์รีเลย์ จะทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้ กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน ถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในเขตการป้องกัน (ค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้) หรือภายนอกเขตการป้องกัน (ค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าที่ตั้งไว้) รีเลย์ก็จะส่งสัญญาณไปทริป Circuit Breaker ถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้นใน Zone 1 รีเลย์จะส่งสัญญาณทริปทันที ภาพที่ 2 แสดงคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์

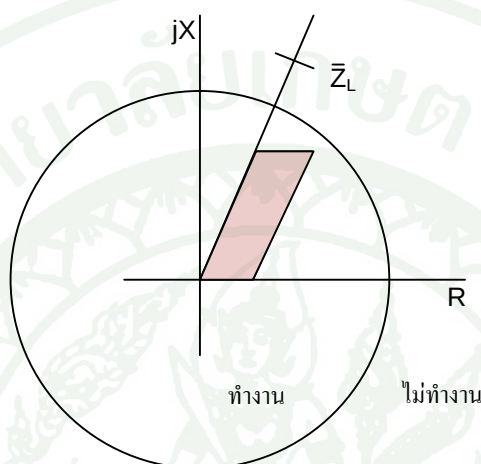


ภาพที่ 2 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบ 4 เขตการป้องกัน

ที่มา : Athula (2009)

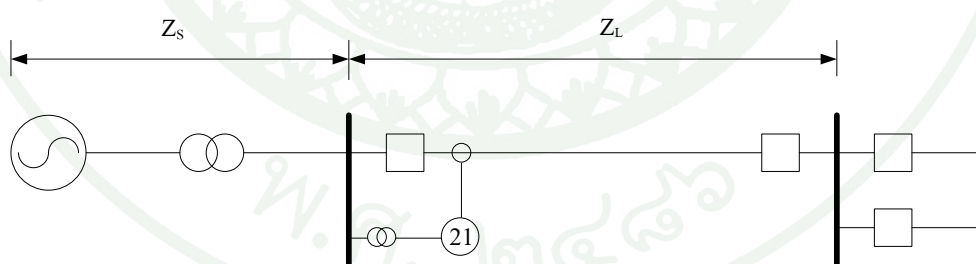
GEC Alsthom (1997) ในสภาวะการจ่ายไฟปกติ รีเลย์มองเห็นอิมพีแดนซ์เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งรวมกับโหลดดังภาพที่ 4 (ข) เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจากรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์ ดังภาพที่ 4 (ค) สามารถเขียนขอบเขตของการเกิด

พล็อตบนแผนภาพอิมพีแดนซ์ได้ดังภาพที่ 3 โดยวงกลมเป็นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ แบบดั้งเดิมที่ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนให้กับรีเลย์ ถ้าขอบเขตการเกิดฟอลต์อยู่ภายในวงกลมรีเลย์จะทำงาน และหากอยู่นอกวงกลมรีเลย์จะไม่ทำงาน



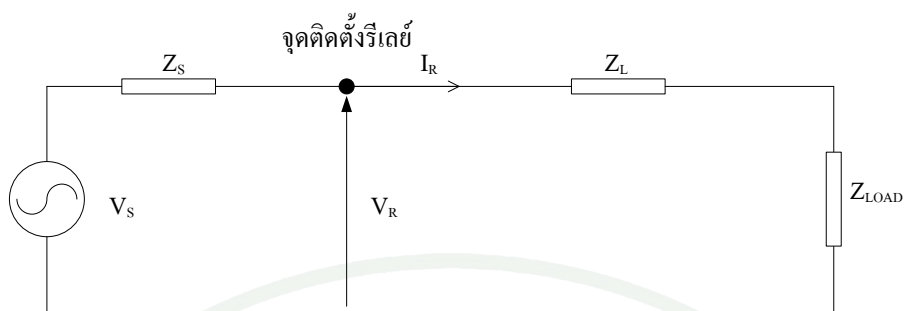
ภาพที่ 3 ขอบเขตการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์

ที่มา : GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)



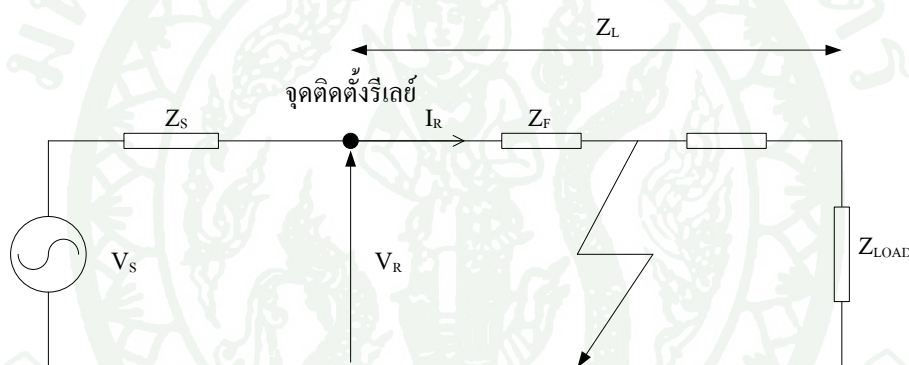
(ก) แผนภาพเส้นเดี่ยว

ภาพที่ 4 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น



อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น $Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_L + Z_{LOAD}$

(ข) กรณีจ่ายไฟปกติ



อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น $Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_F$

(ค) กรณีเกิดฟอลต์

ภาพที่ 4 (ต่อ)

ที่มา : GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

จากภาพที่ 4 รีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อ $Z_F < Z_{SETTING}$ ภายใต้เงื่อนไขนี้ รีเลย์ระยะทางจะส่งสัญญาณให้กับ Coil Trip เพื่อไปสั่งให้ Circuit Breaker เปิดวงจรเพื่อตัดส่วนที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ

ฤษฎี (2549) จากภาพที่ 4 (ก) ปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตป้อนให้กับรีเลย์ระยะทางคือแรงดันและกระแสทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_{FP}/VT \text{ Ratio}}{I_{FP}/CT \text{ Ratio}} = Z_P \times \frac{CT \text{ Ratio}}{VT \text{ Ratio}} \quad (1)$$

V_{FP}	คือ	แรงดันขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
I_{FP}	คือ	กระแสขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
Z_P	คือ	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านปฐมภูมิ
V_R	คือ	แรงดันที่รีเลย์วัดได้ทางด้านทุติยภูมิ
I_R	คือ	กระแสที่รีเลย์วัดได้ทางด้านทุติยภูมิ
Z_R	คือ	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ
VT Ratio	คือ	อัตราส่วนการทดแรงดัน
CT Ratio	คือ	อัตราส่วนการทดกระแส

เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง

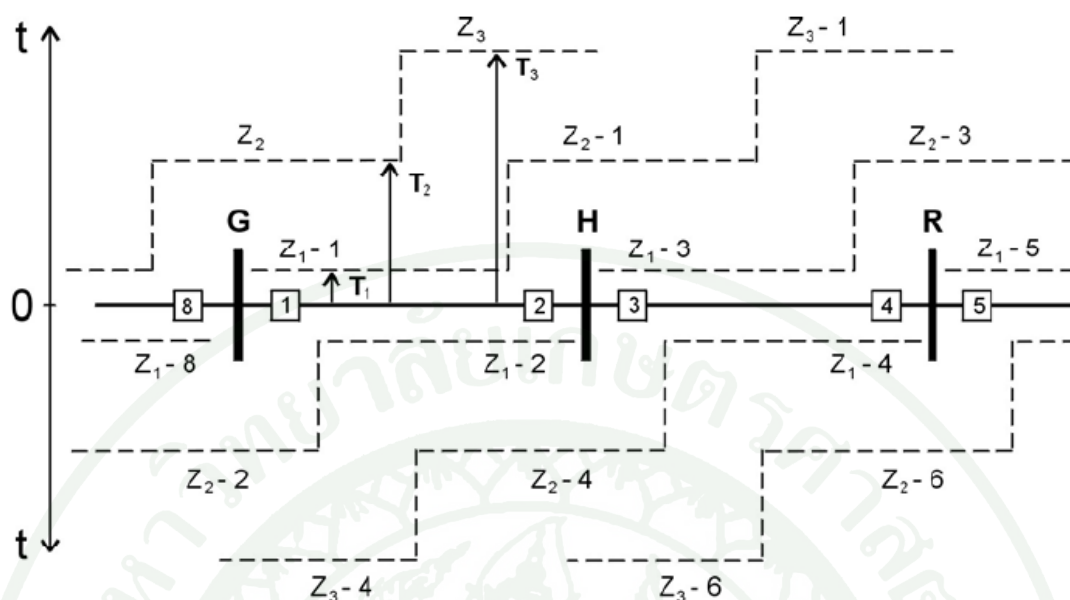
SANDRO (2006) เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางจะถูกกำหนดด้วยค่าอิมพีแดนซ์และระยะเวลาในการทำงานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละเขตการทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปรีเลย์ระยะทางจะประกอบไปด้วย 3 เขตการป้องกันแต่ทั้งนี้ ก็ต้องพิจารณาถึงลักษณะการใช้งาน เพราะว่าในฟังก์ชันของรีเลย์ระยะทางก็จะมีเขตการป้องกันที่นอกเหนือจากนี้ให้เลือกใช้งานด้วย ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง รีเลย์ระยะทางจะต้องตรวจจับการลัดวงจรที่เกิดขึ้นและสามารถจัดการลัดวงจรออกไปได้

อิมพีแดนซ์ที่ใช้สำหรับกำหนดเขตการป้องกันที่ 1 ของรีเลย์ระยะทางโดยปกติจะตั้งค่าที่ประมาณ 80% และ 85% ของอิมพีแดนซ์สายส่งที่ต้องการป้องกัน ในส่วนที่เหลืออีก 20% และ 15% จะเผื่อไว้เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากไม่เที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแรงดัน และกระแส และกระบวนการในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์เอง ซึ่งค่าผิดพลาดเหล่านี้จะทำให้รีเลย์

ระยะทางมองเห็นค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งไว้ (Over-Reach) เป็นเหตุทำให้รีเลย์ทำงานเพื่อกำจัดการลัดวงจรที่อยู่ภายนอกเขตการป้องกันของตัวเอง และเวลาในการทำงานของเขตการป้องกันที่ 1 จะไม่มีการหน่วงเวลาในการทำงาน

เขตการป้องกันที่ 2 ของรีเลย์ระยะทาง เวลาในการทำงานจะต้องมีการจัดลำดับความสัมพันธ์กับเวลาในการทำงานของเขตการป้องกันที่ 1 ในการกำหนดเขตการป้องกันที่ 2 จะต้องครอบคลุมความยาวของสายส่งส่วนที่เหลือที่ไม่ได้ป้องกันด้วยเขตการป้องกันที่ 1 และส่วนที่ยาวออกไปของสายส่งเส้นถัดไปบางส่วน ซึ่งโดยปกติในทางปฏิบัติจะกำหนดเขตการป้องกันที่ 2 ไว้ที่ 50% ของอิมพีแดนซ์สายส่งช่วงถัดไปที่สั้นที่สุด

ในส่วนของเขตการป้องกันที่ 3 จะใช้ในการป้องกันสำรองสำหรับการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่งช่วงถัดไป ในกรณีที่ระบบเป็นแบบเปิด (Radial System) โดยส่วนมากในทางปฏิบัติจะกำหนดเขตการป้องกันให้ครอบคลุมทั้ง 100 % ของความยาวสายส่งช่วงถัดไปที่สั้นที่สุด บางครั้งการกำหนดขอบเขตการป้องกันที่ 3 ก็อาจจะกำหนดถึง 120 % ของความยาวสายส่งช่วงถัดไปที่สั้นที่สุด ในกรณีที่มีสายส่งหลายเส้นที่ออกจากบัสบาร์ที่สถานีไฟฟ้าปลายทาง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง กระแสลัดวงจรจะไหลผ่านบัสบาร์ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในขณะลัดวงจรนี้จะถูกมองเห็นด้วยรีเลย์ระยะทางที่อยู่ที่สถานีไฟฟ้าต้นทางด้วยเช่นกัน ในภาพที่ 5 แสดงถึงรูปแบบของเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางทั่วไป โดยแสดงแบบระยะทางเทียบกับเวลา

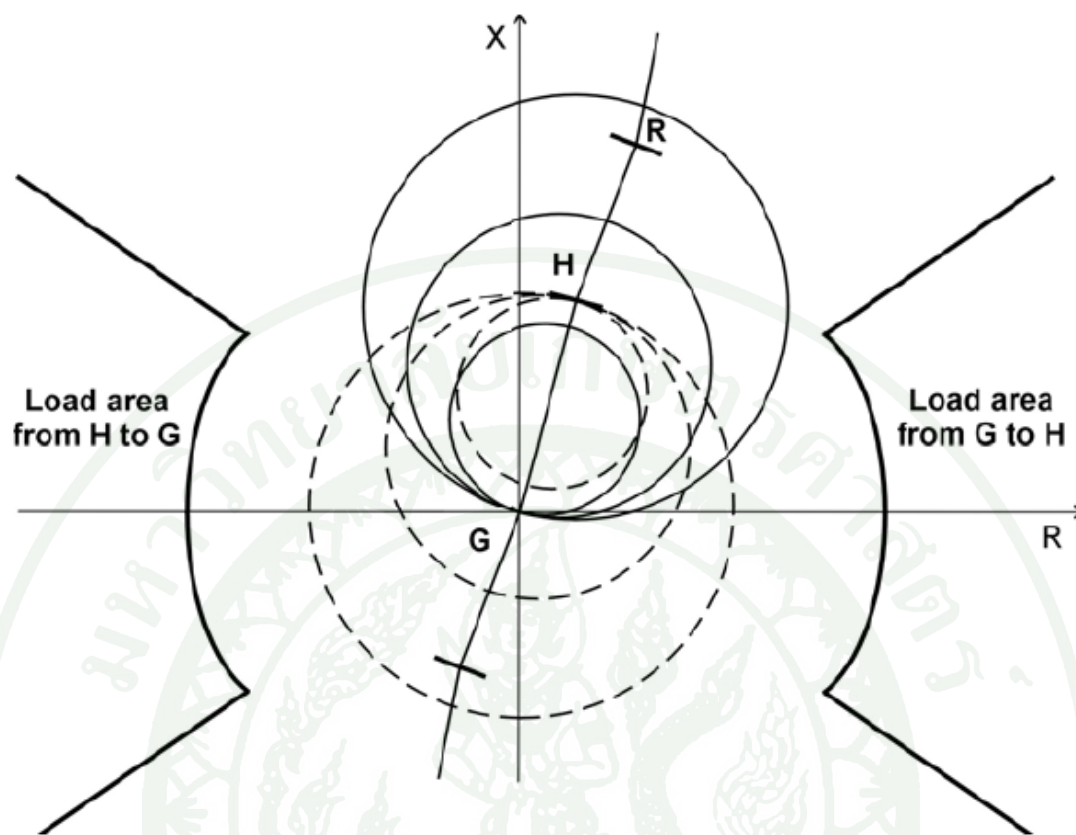


ภาพที่ 5 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง บนแผนภาพระยะทางเทียบกับเวลา

ที่มา : SANDRO (2006)

ในบางครั้ง เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางก็จะมี 4 เขตการป้องกัน ซึ่งเขตการป้องกันที่ 4 นี้จะถูกใช้เป็นการป้องกันสำรองให้กับบัสบาร์ภายในสถานีไฟฟ้า โดยปกติจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการป้องกันสายส่ง และจะกำหนดขอบเขตไว้ที่ 25% ของเขตการป้องกันที่ 1

และในภาพที่ 6 แสดงถึงแผนภาพอิมพีแดนซ์บนระนาบ R-X ที่มีคุณลักษณะของเขตการป้องกันแบบ 3 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางที่ บัส G (เส้นตรง) และ บัส H (เส้นประ) ของระบบไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 6 เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางสำหรับป้องกันสายส่งบนระนาบอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ที่ บัส G และบัส H ของระบบไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 5

ที่มา : SANDRO (2006)

สัญญาณอินพุตของรีเลย์ระยะทาง

Li-Cheng Wu et al. (2005) ปริมาณทางไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับเป็นอินพุตในการคำนวณหาค่า อิมพีแดนซ์ขณะที่เกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังของรีเลย์ระยะทางเมื่อเกิดการลัดวงจร รูปแบบต่างๆ สามารถหาค่าได้จากสูตรการคำนวณในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบต่างๆ

รูปแบบของการเกิดลัดวงจร	สูตรสำหรับคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร
AG	$V_A / (I_A + 3kI_0)$
BG	$V_B / (I_B + 3kI_0)$
CG	$V_C / (I_C + 3kI_0)$
AB หรือ ABG	$(V_A - V_B) / (I_A - I_B)$
BC หรือ BCG	$(V_B - V_C) / (I_B - I_C)$
CA หรือ CAG	$(V_C - V_A) / (I_C - I_A)$

ที่มา: Li-Cheng Wu et al. (2005)

โดยที่ $k = (Z_0 - Z_1) / Z_1$

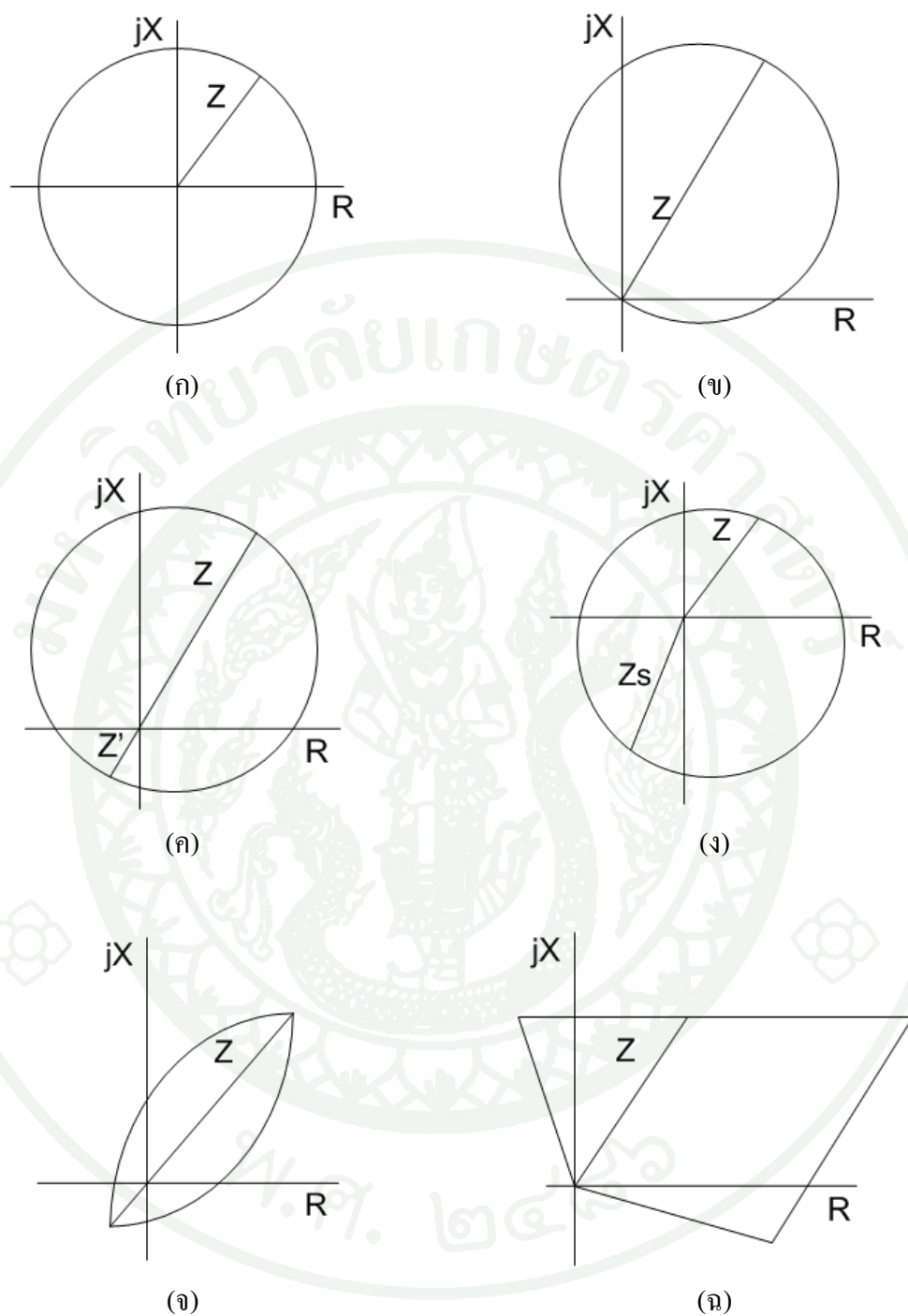
Z_0 = Zero Sequence Impedance of Transmission Line

Z_1 = Positive Sequence Impedance of Transmission Line

I_0 = Zero Sequence Current

คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

วิธีการตรวจสอบว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่งว่าอยู่ในขอบเขตการทำงานหรือไม่นั้น จะใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดเปรียบเทียบมุมของรีเลย์ระยะทาง หลักการดังกล่าว ทำให้เกิดคุณลักษณะการทำงานแบบต่างๆ ดังภาพที่ 7 (ก) รีเลย์แบบอิมพีแดนซ์ (Impedance) (ข) รีเลย์แบบโมห์ (Mho) (ค) รีเลย์แบบออฟเซต โมห์ (Offset Mho) (ง) รีเลย์แบบโมห์ ที่มีการโพลาไรซ์ข้าม (Cross-polarised mho) (จ) รีเลย์แบบเลนซ์ (Lenticular) (ฉ) รีเลย์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral) โดยคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทางแต่ละแบบก็จะถูกนำไปใช้งานในลักษณะงานที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่ต้องการป้องกัน



ภาพที่ 7 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่างๆ

ที่มา : GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

อุปกรณ์เปรียบเทียบสำหรับรีเลย์แบบระยะทาง

ประสิทธิ์ (2549); SANDRO (2006) โดยทั่วไปรีเลย์จะต้องทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรณีปกติและกรณีที่เกิดการลัดวงจรในสายส่ง และส่งสัญญาณเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น รีเลย์จะสามารถวัดความแตกต่างของกรณีปกติ และกรณีเกิดการลัดวงจรได้ เมื่อมีการเปรียบเทียบของปริมาณสัญญาณเข้ามากกว่า 1 สัญญาณ ซึ่งการเปรียบเทียบจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาด (Amplitude Comparator)

กำหนดให้ S_o และ S_R คือ ขนาดของสัญญาณที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบ โดยที่ S_1 คือ สัญญาณที่ส่งให้รีเลย์ทำงาน และ S_2 คือ สัญญาณที่ส่งให้รีเลย์ไม่ทำงาน การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาดนี้ จะมีเงื่อนไขการทำงานดังสมการที่ 2

$$|S_o| \geq |S_R| \quad (2)$$

2. การเปรียบเทียบโดยใช้เฟส (Phase Comparator)

กำหนดให้ S_1 และ S_2 คือ มุมของสัญญาณที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบ และจะมีค่าเป็นบวกก็ต่อเมื่อ $S_1 > S_2$ การเปรียบเทียบโดยใช้เฟสนี้ จะมีเงื่อนไขการทำงานดังสมการที่ 3

$$-90^\circ \leq \text{ang}(S_1) - \text{ang}(S_2) \leq 90^\circ \quad (3)$$

การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาดมุมของสัญญาณของรีเลย์ระยะทางแบบมอห์

SANDRO (2006) สัญญาณที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบขนาดของมุมเพื่อกำหนดการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบมอห์ (Mho Characteristic) สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$S_1 = -V_r \angle 0^\circ + Z_R \angle \theta \times I_r \angle -\phi_r \quad (4)$$

$$S_2 = V_r \angle 0^\circ \quad (5)$$

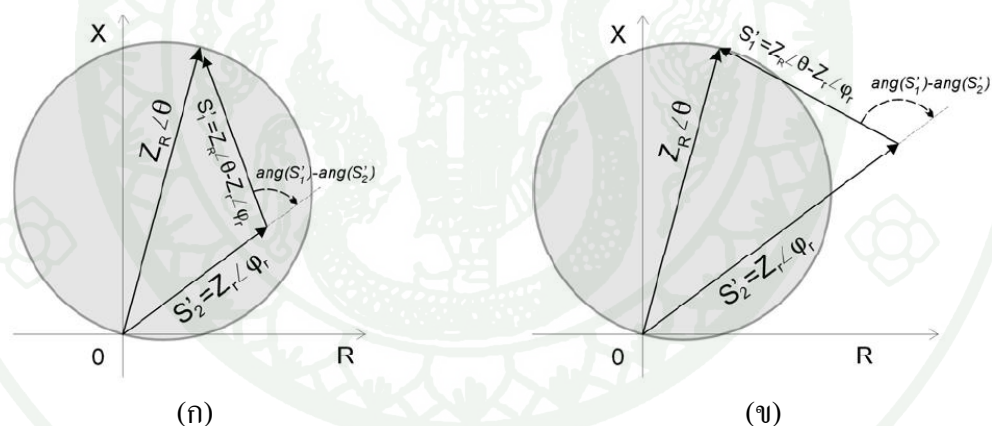
หารสมการที่ (4) และ (5) ด้วย $I_r \angle -\phi_r$ จะได้สมการที่ (6) และ (7)

$$S'_1 = -Z_r \angle \varphi_r + Z_R \angle \theta \quad (6)$$

$$S'_2 = Z_r \angle \varphi_r \quad (7)$$

ในภาพที่ 8 รีเลย์จะมีจุดเริ่มทำงานก็ต่อเมื่อมุมระหว่างอิมพีแดนซ์ S'_1 และ S'_2 มีค่าต่างกันเท่ากับ 90° กล่าวคือเมื่อไหร่ก็ตามที่เกิดการลัดวงจรขึ้นแล้วอิมพีแดนซ์ $Z_r \angle \varphi_r$ อยู่ภายในรูปวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 8 (ก) มุมระหว่าง S'_1 และ S'_2 ก็จะเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ 3 ทำให้รีเลย์ทำงาน และในภาพที่ 8 (ข) อิมพีแดนซ์ $Z_r \angle \varphi_r$ อยู่ภายนอกรูปวงกลม มุมระหว่าง S'_1 และ S'_2 จะไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ 2 รีเลย์ก็จะไม่ทำงาน

อิมพีแดนซ์ $Z_R \angle \theta$ ก็คือ คุณลักษณะการทำงานรูปวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่บนเส้นตรง $Z_R \angle \theta$ และมีส่วนของเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบขนาดมุมของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์

ที่มา : SANDRO (2006)

การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาดของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์

การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาดจะใช้สัญญาณ S_0 และ S_R เป็นสัญญาณอินพุตสำหรับการเปรียบเทียบสำหรับรีเลย์ระยะทางที่มีคุณลักษณะการทำงานแบบโมห์ ดังแสดงในภาพที่ 9

$$S_o = Z_R \angle \theta \times I_r \angle -\phi_r \quad (7)$$

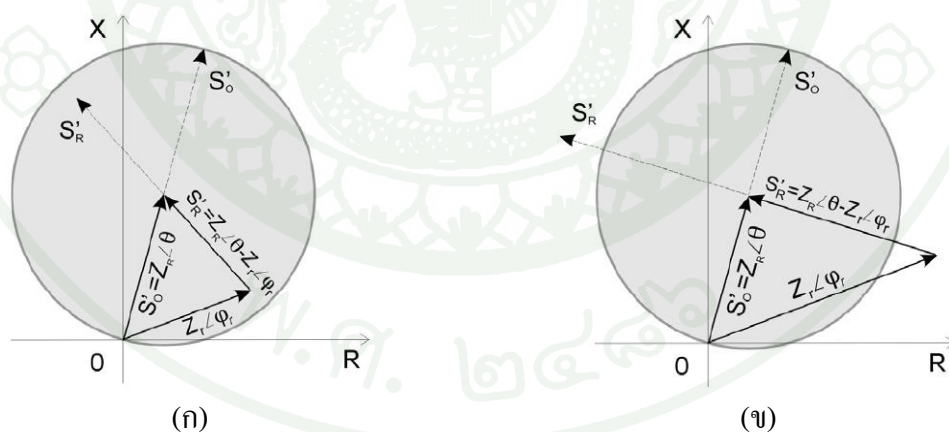
$$S_R = -V_r \angle 0^\circ + Z_R \angle \theta \times I_r \angle -\phi_r \quad (8)$$

หารสมการที่ (7) และ (8) ด้วย $I_r \angle -\phi_r$ จะได้สมการที่ (9) และ (10)

$$S'_o = Z_R \angle \theta \quad (9)$$

$$S'_R = -Z_r \angle \phi_r + Z_R \angle \theta \quad (10)$$

ในภาพที่ 9 เมื่อโหลดที่ตามที่เกิดการลัดวงจรขึ้นแล้วอิมพีแดนซ์ $Z_r \angle \phi_r$ อยู่ภายในรูปวงกลม ขนาดของอิมพีแดนซ์ S'_R จะมีค่าน้อยกว่าขนาดของอิมพีแดนซ์ S'_o ที่แสดงในภาพที่ 9 (ก) ก็จะเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ 1 ทำให้รีเลย์ทำงาน และในภาพที่ 9 (ข) อิมพีแดนซ์ $Z_r \angle \phi_r$ อยู่ภายนอกรูปวงกลม ขนาดของอิมพีแดนซ์ S'_R จะมีค่ามากกว่าขนาดของอิมพีแดนซ์ S'_o รีเลย์ก็จะไม่ทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 9 (ข)



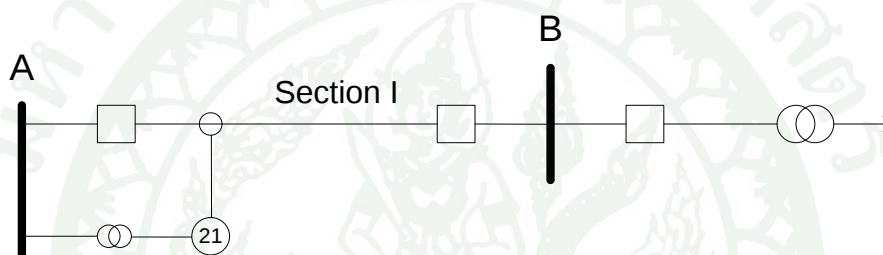
ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบขนาดของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์

ที่มา : SANDRO (2006)

การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์แบบระยะทางเพื่อป้องกันการสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ (2552) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ออกข้อกำหนดหลักเกณฑ์การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง 115 kV. เพื่อให้ผู้ออกแบบการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์มีความเข้าใจไปในทิศทางเดียวกัน และเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยข้อกำหนดดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีจ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าปลายทาง



ภาพที่ 10 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีจ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าปลายทาง

ที่มา : กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ (2552)

- Zone 1 = 85% of Line impedance section I
- Zone 2 = 100% of Line impedance section I + 20% of Transformer impedance at

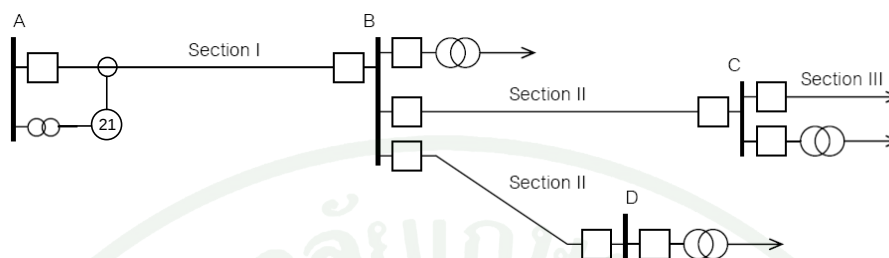
Remote end

- Zone 3 = 100% of Line impedance section I + 40% of Transformer impedance at

Remote end

- Zone 3 reverse = 15% of Zone 1 reach

กรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line

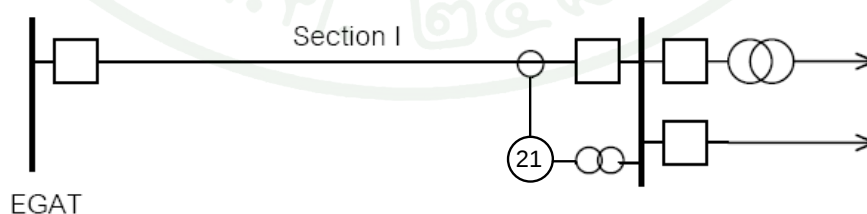


ภาพที่ 11 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line

ที่มา : กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ (2552)

- Zone 1 = 80% of Line impedance section I
- Zone 2 = 100% of Line impedance section I + 50% of Line impedance section II (shortest line) ทั้งนี้ต้องมากกว่า 120% of Line impedance section I
- Zone 3 = 100% of Line impedance section I + 120% of Line impedance section II (longest line) ทั้งนี้ต้องมากกว่า 100% of Line impedance section (I+II) + 25% of Line impedance section III แต่ต้องไม่เกิน 100% of Line impedance section I + 80% of Transformer impedance at Remote end
- Zone 3 reverse = 15% of Zone 1 reach

กรณีตั้งค่าการทำงานของรีเลย์แบบระยะทางโดยมองเข้าหาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



ภาพที่ 12 การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์แบบระยะทางกรณีมองเข้าหา กฟผ.

ที่มา : กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ (2552)

- Zone 1 = 80% of Line impedance section I
- Zone 2 = 120% of Line impedance section I
- Zone 3 = 150% of Line impedance section I

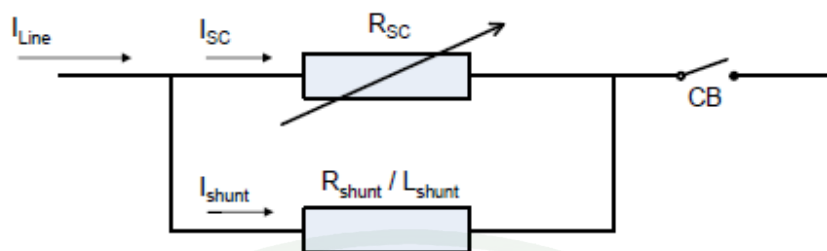
เวลาการทำงาน

- Zone 1 Operating time = Instantaneous
- Zone 2 Operating time = 300 ms
- Zone 3 Operating time = 600 ms

อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (FCL)

Eckroad (2009) อุปกรณ์ที่ช่วยจำกัดและลดกระแสลัดวงจร (Fault-Current Limiter ,FCL) ช่วยลดความเสียหายต่อ อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรเกิดขึ้น แนวคิดของการใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดเพื่อดำเนินการจำกัดกระแสนั้นเนื่องจาก ตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพ ในการนำกระแสไฟฟ้าตรงได้ 100% เนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อน ที่เกิดจากการต้านทาน ตัวนำยิ่งยวดที่เป็นที่รู้จักกันในปัจจุบันแบ่งเป็น ตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงและตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทั้ง 2 ชนิดจะต้องทำให้เย็นตัวลง ถึงอุณหภูมิเฉพาะตัวที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามความพยายามที่จะพัฒนาแนวคิดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ได้นี้มีข้อบกพร่องในด้านการออกแบบ เช่นขนาด ประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือภายใต้ภาระ หรือค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ที่ขัดขวางพวกเขาจากการเข้าถึงศักยภาพในเชิงพาณิชย์อย่างเต็มรูปแบบ

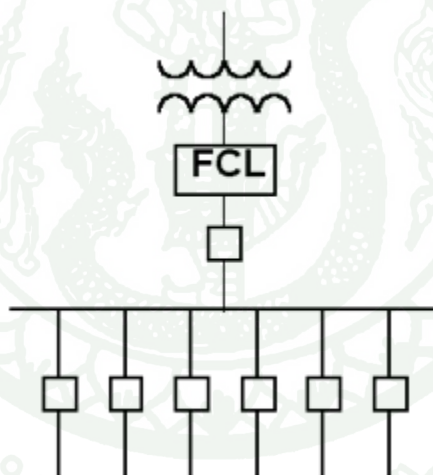
การออกแบบ FCL ส่วนใหญ่ใช้เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าภายในรอบแรก หลักการของการดำเนินงานจะแสดงให้เห็นในแผนภาพของภาพที่ 13 กล่าวคือเมื่อเกิดฟลัดขึ้นขดลวดตัวนำยิ่งยวด จะทำหน้าที่ในการรับกระแสที่เริ่มเกิดฟลัด เมื่ออุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นเส้นทางของกระแสก็จะเปลี่ยนไปที่ตัวต้านทานที่ต่อคร่อมตัวนำยิ่งยวดอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 13 โครงสร้างการทำงานของ SFCL resistive

ที่มา : S. Eckroad (2009)

WTEC (1997) ตัวจำกัดกระแสปัจจุบันสามารถนำไปใช้ในหลายพื้นที่ทั้งในส่วนของผู้จ่ายไฟและส่วนของสายส่ง โดยพื้นที่ที่มีการติดตั้งและใช้งานหลักจะแบ่งเป็น 3 แบบดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 14, 15, และ 16

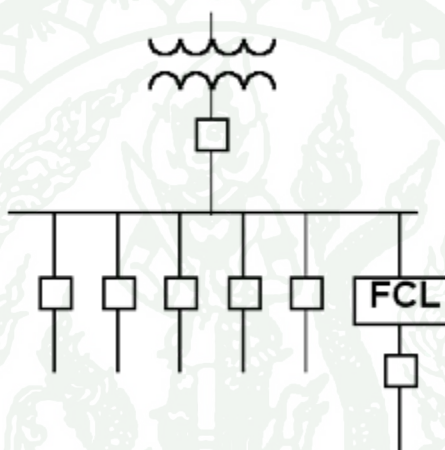


ภาพที่ 14 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยปกป้องสายส่งเป็นหลัก

ที่มา : WTEC (1997)

ติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยปกป้องสายส่งเป็นหลัก(ภาพที่ 14) ประโยชน์ของ FCL ในโปรแกรมนี้มีดังต่อไปนี้:

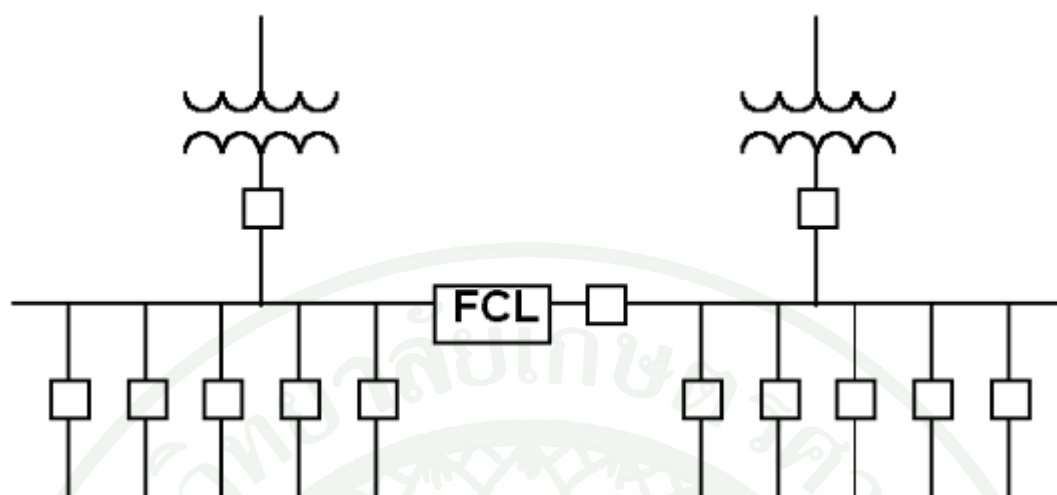
- หม้อแปลงขนาดใหญ่สามารถนำมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นบนโหลดได้โดยไม่ต้องอัปเกรดเบรกเกอร์
- สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่สมรรถภาพต่ำในระดับพลังงานใหม่ได้
- ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงถูก จำกัด
- ช่วยลดกระแสฟอลต์ในวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าระดับกลางได้



ภาพที่ 15 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยเลือกป้องกันเฉพาะโหลดที่ต้องการ

ที่มา : WTEC (1997)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการป้องกันเฉพาะโหลดที่ต้องการ (ภาพที่ 15) โดยเลือกใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสนขนาดเล็กและราคาไม่แพง สามารถใช้ในการป้องกันอุปกรณ์รุ่นเก่าหรือ สถานที่ที่เป็นเรื่องยากที่จะเปลี่ยน เช่นสายเคเบิลใต้ดินหรือหม้อแปลงในห้องใต้ดิน เป็นต้น



ภาพที่ 16 การติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยการป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่ง

ที่มา : WTEC (1997)

ติดตั้งตัวจำกัดกระแสโดยการป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่ง FCL สามารถใช้ในตำแหน่งที่บัสผูกกัน (ภาพที่ 16) จะส่งผลประโยชน์ต่อไปนี้:

- บัสแต่ละบัสที่แยกกันสามารถเชื่อมโยงกันได้ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดแหล่งจ่ายบัสใดบัสหนึ่งให้ใหญ่ขึ้น
 - ในช่วงเกิดฟอลต์ หรือแรงดันตกก็จะสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าบนบัสได้
 - สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหากรณีที่มีหม้อแปลงขนาดตัวใดตัวหนึ่งของระบบ
- สมรรถภาพต่ำได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

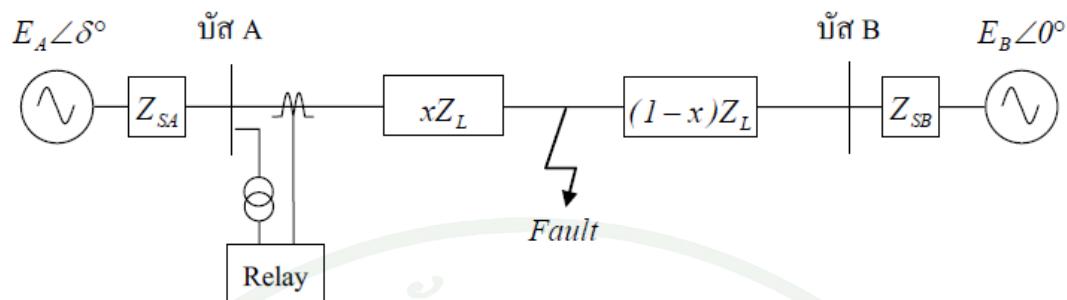
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP
3. โปรแกรม Microsoft Office 2007
4. โปรแกรม MatLab/Simulink

วิธีการ

การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบในโปรแกรม Matlab/Simulink

การกำหนดค่าและจำลองวงจรและค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ศึกษา

ระบบไฟฟ้าพร้อมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เป็นดังภาพที่ 17 โดยแบบจำลองนี้ออกแบบระบบกรณีที่ตำแหน่งฟอลต์อยู่ด้านหน้ารีเลย์ โดยสมมติว่าทั้งสองแหล่งจ่ายมีแรงดันเท่ากันและมีมุมเฟสเหมือนกัน โดยวิเคราะห์จากฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)



$$Z_{ISA} = 0.1Z_{IL}$$

$$Z_{OSA} = 3Z_{IL}$$

$$VTR = 3500 / 1$$

$$CTR = 320 / 1$$

$$kV = 400$$

$$Z_{IL} = 10 + j110 \, \Omega \, \text{pri.}$$

$$= 0.91 + j10.06 \, \Omega \, \text{sec.}$$

$$Z_{OL} = 3Z_{IL}$$

$$Z_{ISB} = Z_{ISA}$$

$$Z_{OSB} = Z_{OSA}$$

ภาพที่ 17 ระบบไฟฟ้าสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

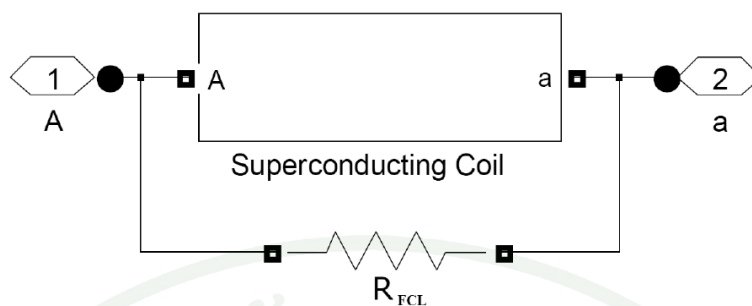
ที่มา: Roberts *et al.* (1993)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

ระบบไฟฟ้า	พอลต์	ตำแหน่งพอลต์
1 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์ $x = 0.1, 0.9$ ($R_f = 0$)

การออกแบบและจำลองระบบอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (FCL)

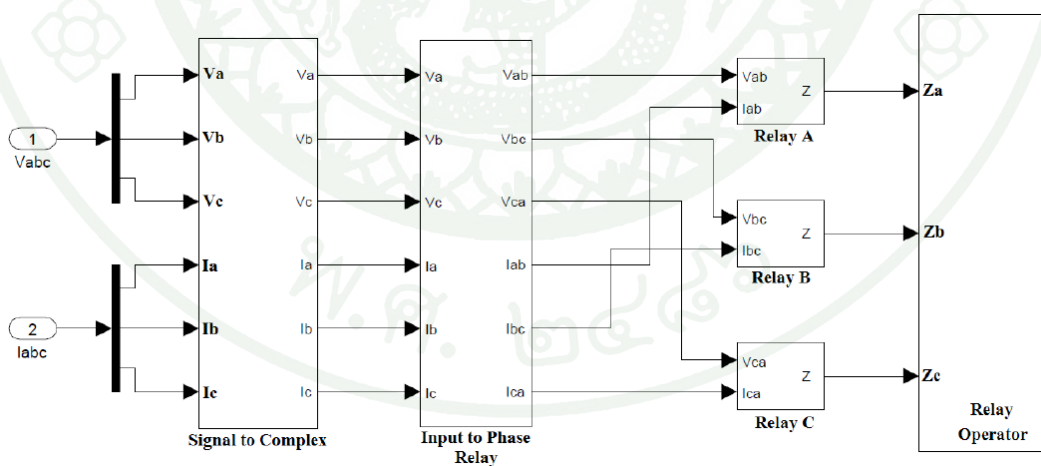
โดยตัวจำกัดกระแสนี้จะประกอบไปด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) และตัวต้านทาน ดังภาพที่ 18 โดยปกติกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดลวดตัวนำ จากนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบกระแสจะถูกบังคับให้ไหลผ่านตัวต้านทาน R จึงทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง



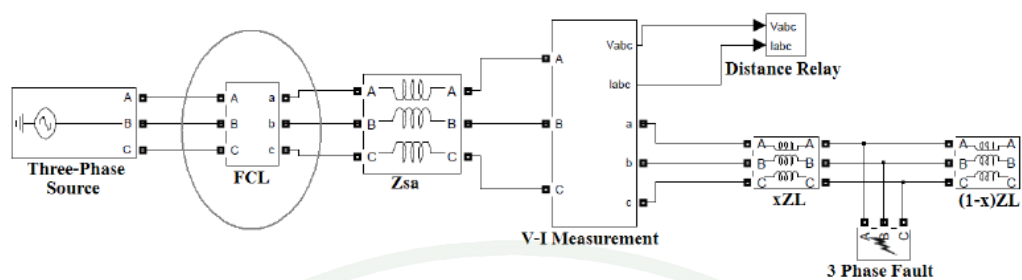
ภาพที่ 18 วงจรอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

การออกแบบและจำลองระบบปรีเลย์ระยะทาง

ในการออกแบบรีเลย์ระยะทางการรับสัญญาณของแรงดันและกระแสใน Matlab จะรับออกมาเป็นสัญญาณไซน์จึงต้องออกแบบวงจรแปลงให้เป็นปริมาณเชิงซ้อนเพื่อที่จะคูณค่า รีซิสแตนซ์ และ รีแอคแตนซ์ ($R+jx$) ดังภาพที่ 19 จากนั้นวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่ากระแสที่เกิดขึ้นทั้งในวงจรที่ไม่ได้ติดตั้ง FCL และวงจรที่ได้ติดตั้ง FCL โดยการนำอุปกรณ์ FCL มาใส่ในระบบไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 19 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมห์



ภาพที่ 20 จำลองระบบไฟฟ้าที่มีการต่อ FCL ในวงจร

ผลและวิจารณ์

ผล

ในงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างการทดลองกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) โดยกำหนดให้ค่า x ในวงจรคือ % ของระยะทางที่เกิดฟอลต์ในสายส่ง แล้วใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นขณะเกิดฟอลต์ที่ต้นทาง โดยกำหนดให้ $x = 10\%$ และขณะเกิดฟอลต์ที่ปลายทาง กำหนดให้ $x = 90\%$ ผลจากการทดลองจะได้ค่ารีซิสแตนซ์และรีแอคแตนซ์ ($R+jx$) ของวงจร เพื่อใช้ในการพิจารณาสัญญาณที่วิ่งเข้าสู่โซนป้องกันระยะทาง จากนั้นพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนค่า R_{FCL} โดยมีกำหนดให้ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ ตามลำดับ

ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า รีเลย์ ทั้ง 6 ชุด มองเห็นอิมพีแดนซ์เท่ากัน ถ้าไม่มี R_f

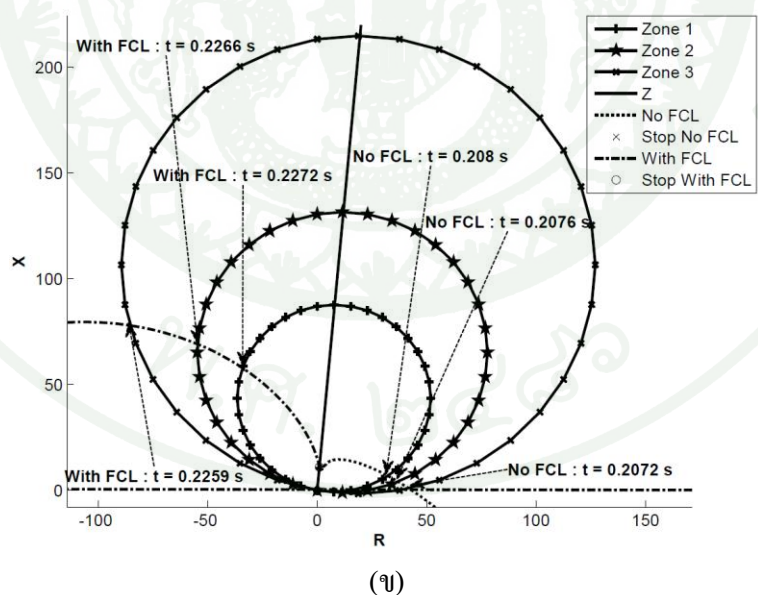
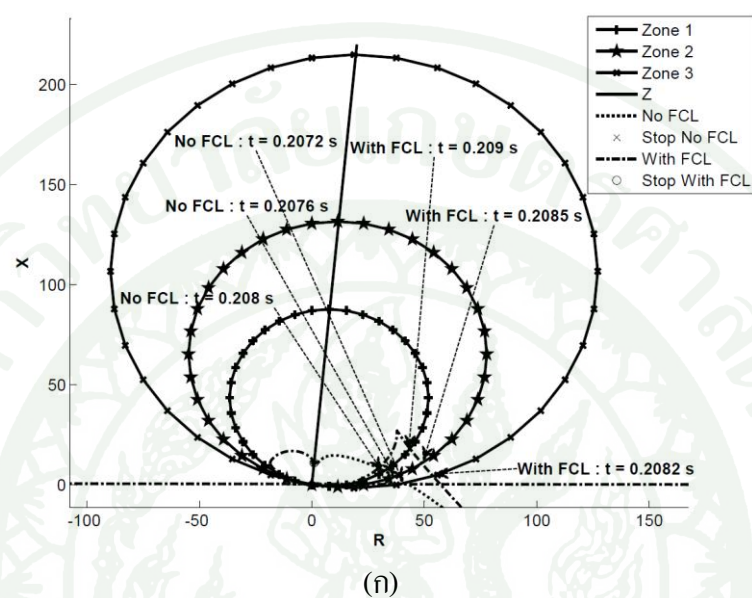
ตารางที่ 3 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
10 %	1.00	11.00	1.00	11.00	1.00	11.00	1.00	11.00	1.00	11.00	1.00	11.00
90 %	9.00	99.00	9.00	99.00	9.00	99.00	9.00	99.00	9.00	99.00	9.00	99.00

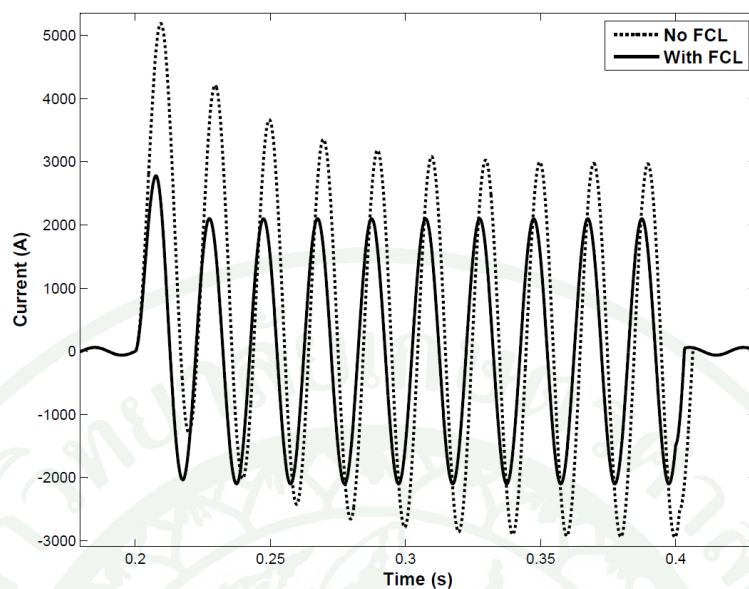
กรณีลัดวงจรที่ต้นทาง กำหนด $x = 10\%$

จากผลการทดลองโดยกำหนด $x = 10\%$ ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในระบบของวงจรปกติ และวงจรที่มี FCL รีเลย์จะมองเห็นฟอลต์แล้วทำงานในโซน 1

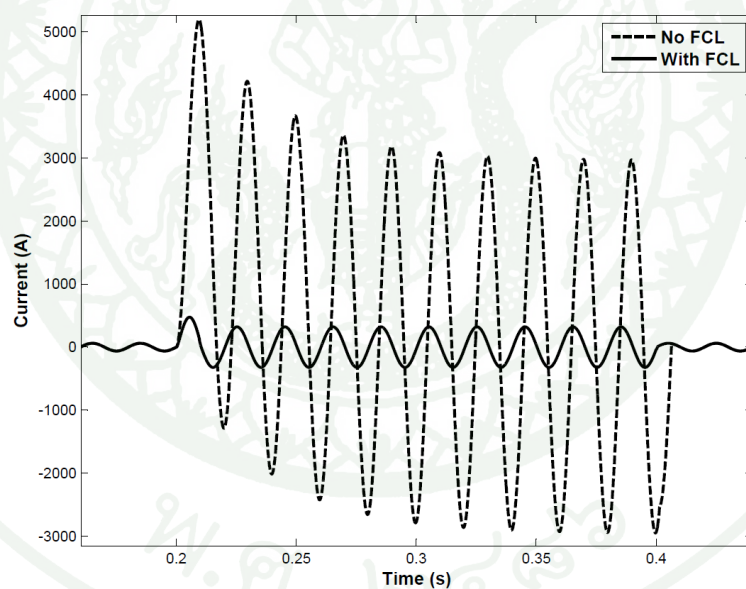
ได้ถูกต้อง ดังภาพที่ 21 (ก) $R_{FCL} = 100 \, \Omega$ และ 21 (ข) $R_{FCL} = 1000 \, \Omega$ และจะเห็นว่าวงจรไฟฟ้าที่มี FCL ต่อในวงจรนั้นขนาดของกระแสจะลดลง ดังภาพที่ 22 (ก) $R_{FCL} = 100 \, \Omega$ และ 22 (ข) $R_{FCL} = 1000 \, \Omega$



ภาพที่ 21 โชนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 10 \, \%$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 เปรียบเทียบขนาดของกระแสระหว่างมี FCL และไม่มี เมื่อ $x = 10\%$

ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และที่ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ เมื่อกำหนดเวลาที่เกิดฟลัดด์ที่ $t = 0.2\text{ s}$ จะได้ระยะเวลาที่สัญญาณเริ่มเข้าแต่ละโซนและเวลาที่จะต้องตัดของวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 100\ \Omega$ ดังตารางที่ 4 และวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ ดังตารางที่ 5

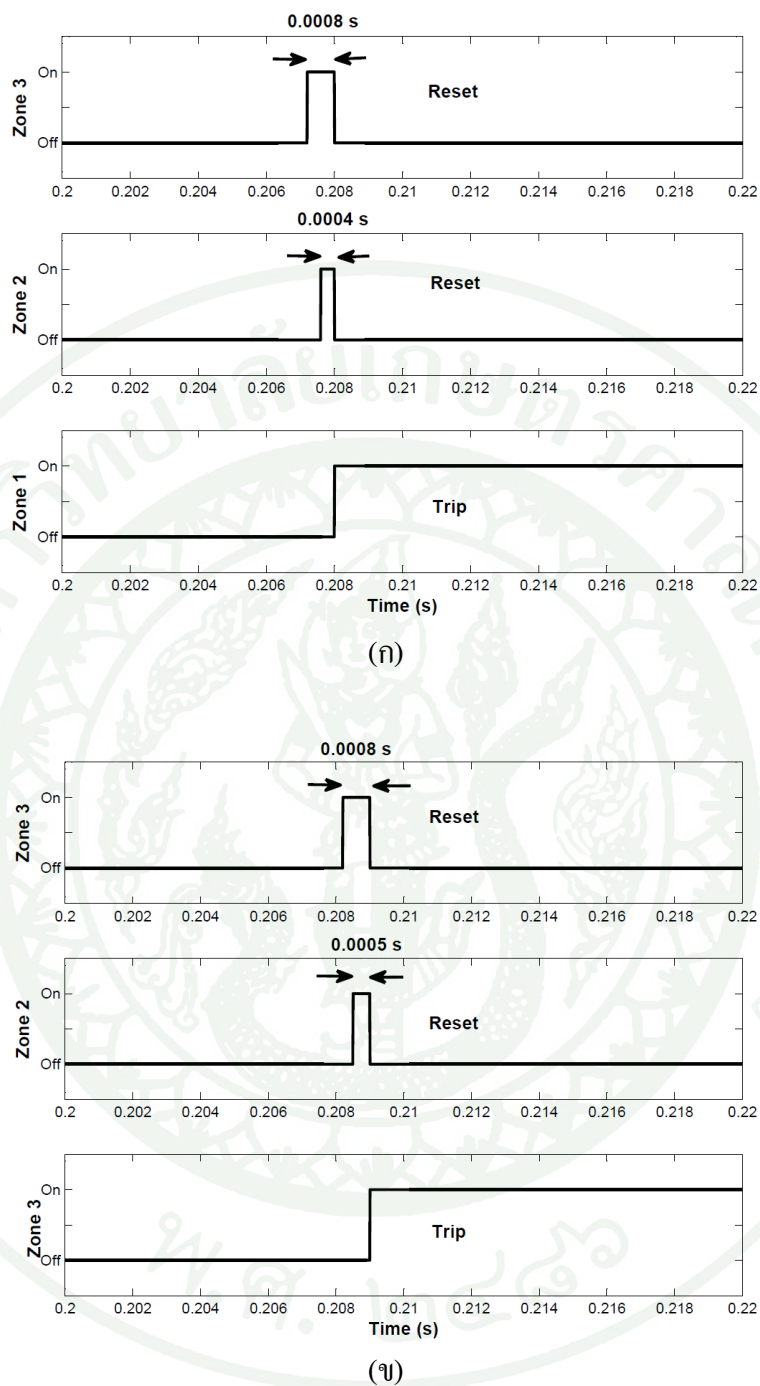
ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
โซน 3	0.2072	0.8072	No Trip	0.2082	0.8082	No Trip
โซน 2	0.2076	0.5076	No Trip	0.2085	0.5085	No Trip
โซน 1	0.208	0.208	Trip	0.209	0.209	Trip

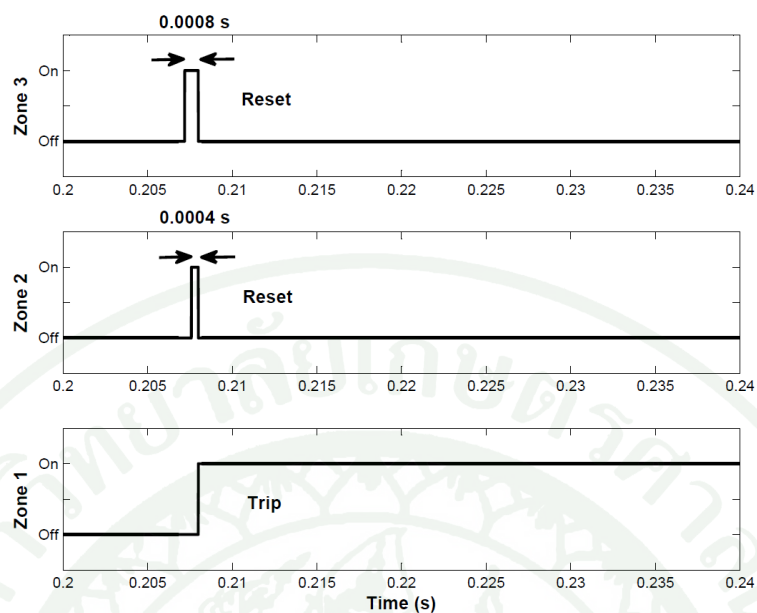
ตารางที่ 5 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้า Zone(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้า Zone(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
โซน 3	0.2072	0.8072	No Trip	0.2259	0.8259	No Trip
โซน 2	0.2076	0.5076	No Trip	0.2266	0.5266	No Trip
โซน 1	0.208	0.208	Trip	0.2272	0.2272	Trip

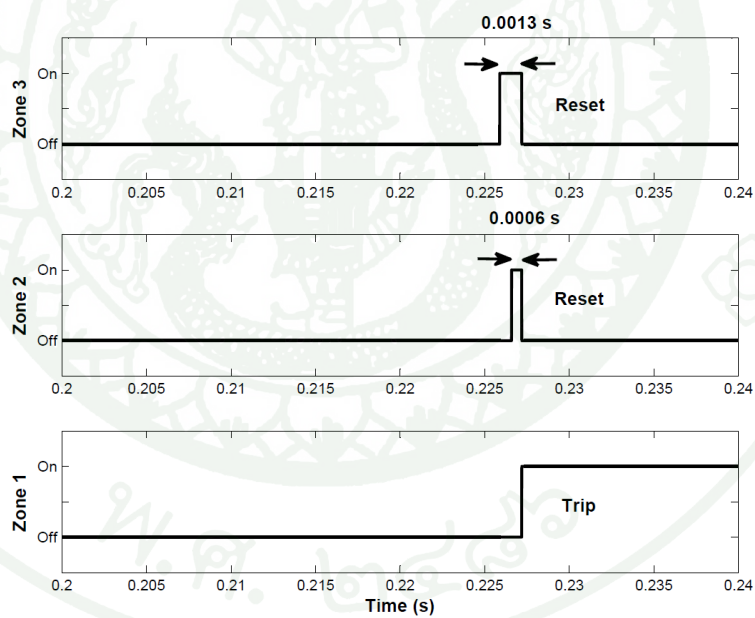
จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 เราจะสังเกตสัญญาณที่เริ่มเข้าโซน 3 และจับเวลาออกไปไม่ถึง 600 ms สัญญาณจะเข้าที่โซนที่ 1 ทำให้ระบบตัดวงจรทันที ดังนั้นการทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง ที่ $x = 10\%$ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 23 (ก) No FCL และ 23 (ข) With FCL และการทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง ที่ $x = 10\%$ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 24 (ก) No FCL และ 24 (ข) With FCL จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่วิ่งเข้าหาโซนป้องกัน จะสังเกตได้ว่าวงจรที่มี FCL จะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกันได้ช้ากว่าวงจรปกติแต่เวลาต่างกันไม่มากและวงจรที่มี FCL ขนาดของกระแสไฟฟ้าก็จะต่ำลงทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่เสียหาย



ภาพที่ 23 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 10\%$ $R_{FCL} = 100\ \Omega$



(ก)

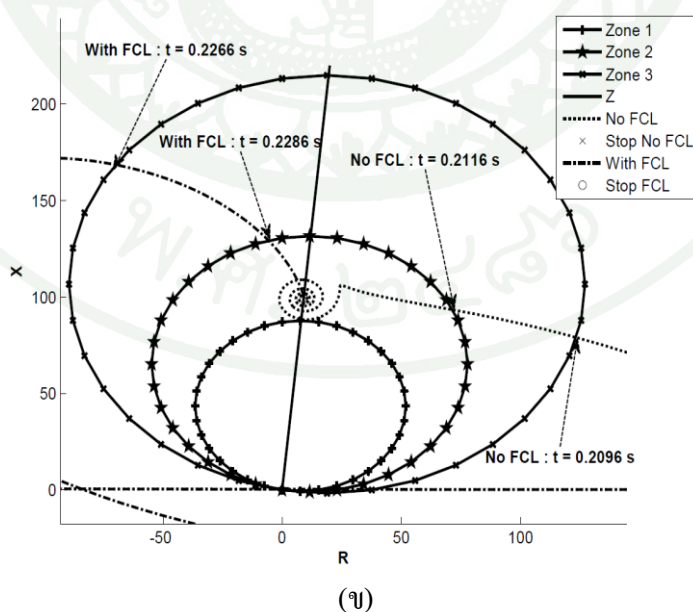
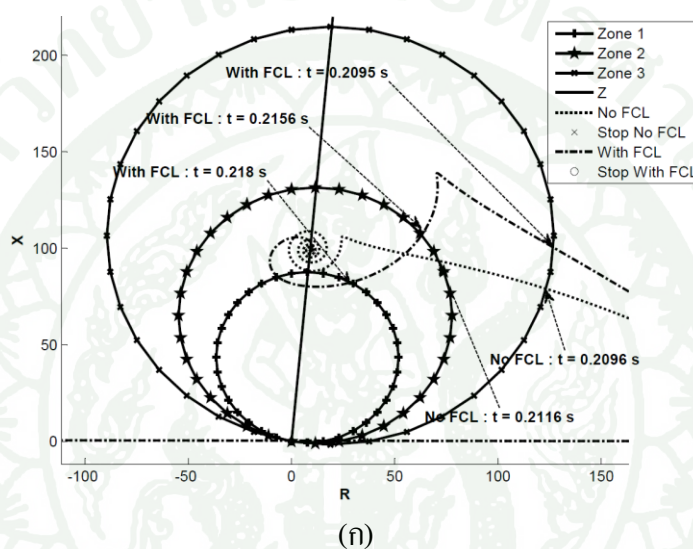


(ข)

ภาพที่ 24 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 10\%$ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$

กรณีลัดวงจรที่ปลายทาง กำหนด $x = 90\%$

จากผลการทดลองโดยกำหนด $x = 90\%$ ที่ $R_{FCL} = 100 \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000 \Omega$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในระบบของวงจรปกติ และวงจรที่มี FCL รีเลย์จะมองเห็นฟอลต์แล้วทำงานในโซน 1 ได้ถูกต้อง ดังภาพที่ 25 (ก) $R_{FCL} = 100 \Omega$ และ 25 (ข) $R_{FCL} = 1000 \Omega$ และวงจรไฟฟ้าที่มี FCL ต่อในวงจรนั้นขนาดของกระแสจะลดลงด้วยเช่นกันกรณีแรก



ภาพที่ 25 โซนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 90\%$

ที่ $R_{FCL} = 100 \Omega$ และที่ $R_{FCL} = 1000 \Omega$ เมื่อกำหนดเวลาที่เกิดฟอลต์ที่ $t = 0.2 \text{ s}$ จะได้ระยะเวลาที่สัญญาณเริ่มเข้าแต่ละโซนและเวลาที่จะต้องตัดของวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 100 \Omega$ ดังตารางที่ 6 และวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 1000 \Omega$ ดังตารางที่ 7

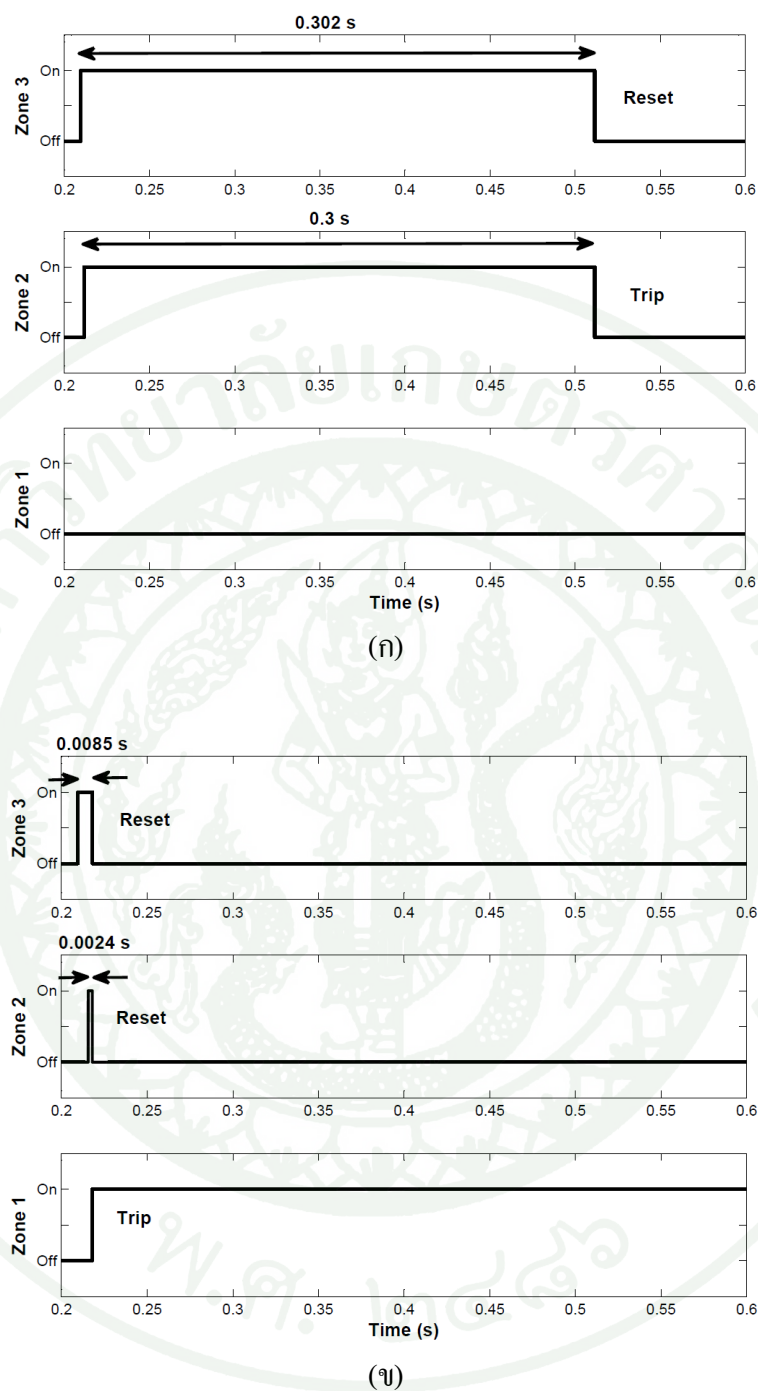
ตารางที่ 6 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100 \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
โซน 3	0.2096	0.8096	No Trip	0.2095	0.8095	No Trip
โซน 2	0.2116	0.5116	Trip	0.2156	0.5156	No Trip
โซน 1	-	-	-	0.218	0.218	Trip

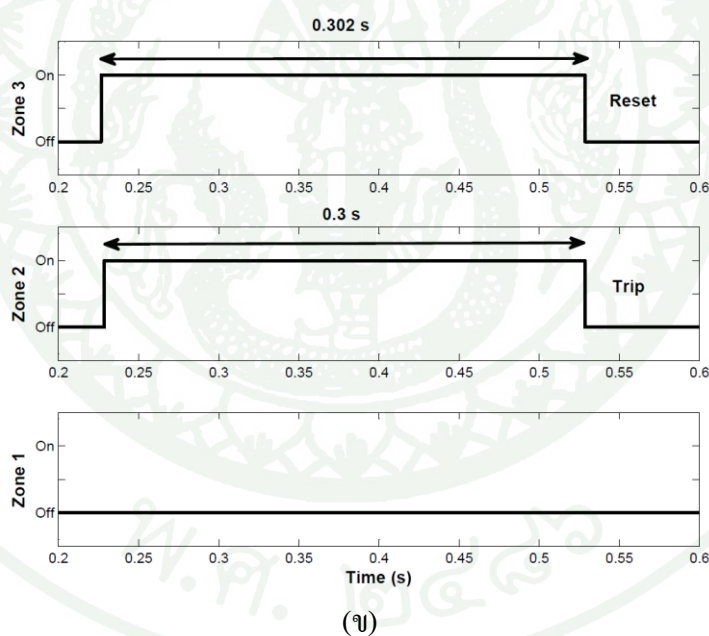
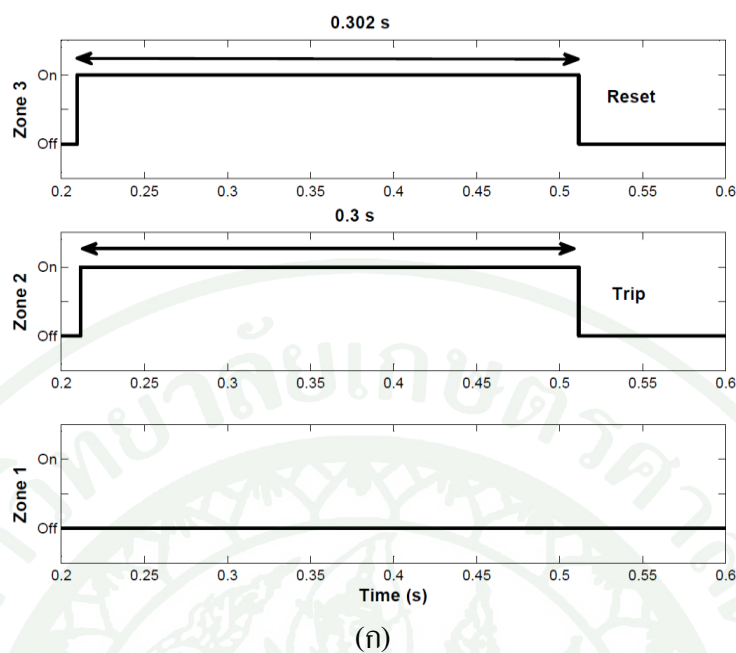
ตารางที่ 7 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000 \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
โซน 3	0.2095	0.8095	No Trip	0.227	0.827	No Trip
โซน 2	0.218	0.518	Trip	0.2296	0.5296	Trip

จากตารางที่ 6 และตารางที่ 7 การทำงานของโซนป้องกันรีเลย์ระยะทางที่ $x = 90\% R_{FCL} = 100 \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 26 (ก) No FCL และ 26 (ข) With FCL และการทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทางที่ $x = 90\% R_{FCL} = 1000 \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 27 (ก) No FCL และ 27 (ข) With FCL



ภาพที่ 26 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$



ภาพที่ 27 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$

ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ จะสังเกตได้ว่าวงจรปกติจะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกัน ได้ช้ากว่าวงจรที่ติดตั้ง FCL เพียงเล็กน้อยและวงจรที่ติดตั้ง FCL ก็ทำการตัดวงจรที่โซน 1 ซึ่งถือว่าตัดวงจรผิดโซน และที่ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ จะเห็นว่าวงจรปกติจะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกัน ได้เร็วกว่าวงจรที่ติดตั้ง FCL และจับเวลา

ออกไปอีกไม่ถึง 600 ms สัญญาณก็เข้าที่โซน 2 ทั้งสัญญาณของวงจรแบบปกติและวงจรที่มี FCL จะไม่ไปที่โซน 1 ทำให้ระบบตัดวงจรที่โซน 2

วิจารณ์

วิทยานิพนธ์นี้ การสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน เป็นแบบอุดมคติ ไม่ได้คำนึงถึงการอิ่มตัวของหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถเกิดเหตุการณ์นี้ได้ ทำให้ค่าที่ได้ทางด้านทฤษฎีจะมีความคลาดเคลื่อน อาจทำให้พฤติกรรมของรีเลย์เปลี่ยนไป การหาขนาดทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดันในวิทยานิพนธ์นี้ได้จากขนาดทางด้านปฐมภูมิหารด้วยอัตราทดกระแสหรืออัตราทดแรงดัน การหาขนาดทางด้านทฤษฎีที่ถูกต้อง จะต้องมีการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลที่คิดผลของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งหลักการนี้เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ควรจะนำมาศึกษาและทำเป็นงานวิจัยต่อไป

สำหรับคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอื่นๆ เช่น แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ก็สามารถทำได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณเช่นกัน สามารถสร้างเป็นไลบรารีของรีเลย์ระยะทางที่มีคุณลักษณะการทำงานแบบต่างๆ รวมถึงรีเลย์ชนิดอื่นๆ เก็บไว้ในโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในรูปแบบอื่นๆ ได้ต่อไป

ในการวิเคราะห์หาค่า R_{FCL} ที่เหมาะสมกับระบบนั้นจะต้องคำนึงถึงแหล่งจ่ายไฟ ระยะสายไฟ และโหลดที่ใช้งานด้วยซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปทางด้านการสำรวจโซนการป้องกันว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสตัววงจรแล้วรีเลย์จะสามารถทำงานนำด้ถูกโซนหรือไม่ค่า R_{FCL} ที่ใช้จึงเกิดจากการทดลองแทนค่าแล้วหาค่าที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่เกิดจากการคำนวณทั้งระบบนั้นจะเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ควรจะนำมาศึกษาและทำเป็นงานวิจัยต่อไป

ในการทดลองนี้ไม่ได้พิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการเลือกใช้อุปกรณ์จำกัดกระแส และยังไม่ได้คำนึงถึงขนาด R_{FCL} ขนาดเล็กสุดและขนาดใหญ่สุดที่สามารถหาได้ในท้องตลาด เพียงแต่ทดลองในการสมมุติค่า R_{FCL} ขนาดเล็กและขนาดใหญ่เพื่อมาพิจารณาเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือในการใช้งานเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจริงนั้นควรจะต้องพิจารณาในเรื่องของขนาด R_{FCL} เล็กสุดและใหญ่สุดที่ตลาดมีจริงด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโปรแกรมสำหรับตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง สำหรับแก้ไขปัญหาการทับซ้อนกันของเขตการป้องกันแบบอัตโนมัติจากการทดสอบการใส่อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (Fault current limiter, FCL) ในระบบนั้นทำให้สามารถลดขนาดของกระแสลัดวงจรลงได้ ซึ่งค่า R_{FCL} นั้นจะส่งผลในเรื่องการลดลงปริมาณของกระแสลัดวงจร และเวลาที่ทำให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นกระแสลัดวงจร โดยในกรณีที่ค่า R_{FCL} มีค่าน้อยเช่นกรณี $R_{FCL} = 100 \Omega$ จะทำให้เกิดการตัดวงจรผิดโซน ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับวงจรตัวอย่างนี้ ส่วนกรณีค่า R_{FCL} มากจะทำให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นกระแสลัดวงจรน้อยส่งผลให้ตัดวงจรออกได้ช้าลง แต่อันตรายที่เกิดจากปริมาณของกระแสที่มากขึ้นก็จะถูก R_{FCL} ลดขนาดลงจนอยู่ในระดับที่อุปกรณ์สามารถทนได้ และการตัดวงจรช้าลงจะเกิดผลดีต่อกรณีเกิดการลัดวงจรแบบชั่วคราวเพราะถ้าระบบสามารถกลับมาปกติได้ในเวลาที่รวดเร็วพอ จะทำให้ไฟฟ้าไม่ดับแล้วระบบยังสามารถทำงานต่อไปได้ จากการศึกษาทำให้รู้ว่า FCL สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ การป้องกันระยะทางโดยการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าและทำให้เกิดความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นในระบบการป้องกัน โดยขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่า R_{FCL} ให้เหมาะสมกับระบบซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไป

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก SPP (Small Power Producer) เชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งเป็นจำนวนมาก ดังนั้นควรมีการศึกษาการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ ที่เข้ามาเชื่อมต่อกับระบบส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วย

เนื่องจากเงื่อนไขในการตั้งค่าการทำงานแบบอัตโนมัติของรีเลย์ระยะทางที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีอยู่ 2 เงื่อนไข คือ 1.การตั้งค่าการทำงานกรณีจ่ายไฟแบบ Radial และ 2.การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีมองเข้าหาสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งทั้ง 2 เงื่อนไขนี้อาจจะยังไม่ครอบคลุมสำหรับรูปแบบการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นควรมีการเพิ่มเงื่อนไขสำหรับการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง ให้มีความเหมาะสมกับการจ่ายไฟในรูปแบบต่างๆ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. 2549. การป้องกันระบบไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3 บริษัท จี.บี.พี เซ็นเตอร์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

สันติ อัสวศรีพงษ์ธร. 2526. รีเลย์ป้องกันกับการป้องกันระบบกำลัง. ครั้งที่ 1. สมาคมศูนย์วิชาการ ไทย-ออสเตรเลีย, กรุงเทพฯ.

อุษชัย คชวัฒน์. 2549. การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์ พฤติกรรมของระบบป้องกันระยะทางระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และ ระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Eckroad, S. 2009. **Superconducting Fault Current Limiters**, Technology Watch.

GEC Alsthom Measurement Ltd. 1997. **Analysis and Protection of Power System Course. (Distance Protection: Basic Principles and Characteristics)**. GEC Alsthom Measurement Ltd. Stafford, England.

Rajapakse, A. 2009. Department of Electrical and Computer Engineering. University of Manitoba. **Distance Protection**. Power System Protection Presentation to PEA Thailand.

WTEC Hyper-Librarian. 1997, **FAULT-CURRENT LIMITERS (FCL) Published**.

Wu, L., C.Wen and C.Chen. 2005. **Modeling and Testing of a Digital Distance Relay Using MATLAB/SIMULINK**, pp. 253-259. In The Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium. 23-25 October 2005, IEEE, America.



ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกันระยะทาง

The Impact of Fault Current Limiter on Distance Protection

ปิริยะ แสงไทร และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10900

โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422

E-mail: piriya_sangsai@hotmail.com, fengksh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (Fault Current Limiter, FCL) กับรีเลย์ป้องกันแบบระยะทางเมื่อเกิดฟอลต์ โดยที่แบบจำลองของรีเลย์ระยะทางและ FCL ได้ถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของ FCL และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ให้แตกต่างกัน ทำให้สามารถกำหนดเกณฑ์ต่างๆที่ทำให้ FCL มีผลกระทบต่อการป้องกันระยะทาง ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้ง FCL กับรูปแบบการป้องกันได้มีการใช้แนวความคิดของโซนป้องกัน จากผลการศึกษาเผยให้เห็นว่า FCL สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบการป้องกันระยะทางโดยการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและทำให้เกิดความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นในระบบการป้องกัน

คำสำคัญ: รีเลย์ระยะทาง, การป้องกันระยะทาง, อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

Abstract

This paper presents the study of the impact of Fault Current Limitings (FCLs) on distance protection. The models of distance relay and FCL have been developed by Matlab/Simulink. By adjusting different FCL parameters and fault locations, a set of criteria are derived to qualify the potential impact of FCLs on the distance protection. The concept of protection zone is used to analyze the influences of FCLs on the protection schemes. The study results reveal that FCLs to enhance the performance of distance protection by reducing the magnitude of fault currents and increasing reliability of protection system.

Keywords: Distance Relay, Distance Protection, Fault current limiter

1. คำนำ

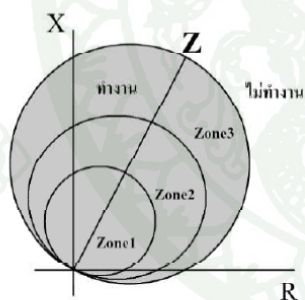
การเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้าต่างๆทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมากในทุกๆพื้นที่ และก็ยังมีปัญหาไฟฟ้าขัดข้องที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ไฟและผู้ปฏิบัติงานไฟฟ้า การที่จะรักษาประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือในการป้องกันนั้นจึงมีความสำคัญ โดยต้องไม่ทำให้อุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าพัง

เสียหาย สิ่งที่จะเกิดอันตรายแก่ผู้ใช้ไฟหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า นั้นจะเป็นในส่วนของการเสไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สูงมากที่จุดเกิดฟอลต์ และกระแสที่สูงนี้เมื่อถูกตัดออกจากวงจรแล้วกระแสไฟฟ้าจะไหลแล้ววิ่งเข้าสู่อุปกรณ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นที่แหล่งจ่ายหรือผู้ใช้ไฟ โครงการนี้จึงใช้อุปกรณ์ FCL เข้ามาช่วยลดขนาดของกระแสเพื่อป้องกันแหล่งจ่ายและผู้ใช้ไฟ [1]

ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรและรีเลย์ป้องกันระยะทางโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จากนั้นได้นำแบบจำลองนี้มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยสร้างความเข้าใจการทำงานของ FCL และผลกระทบของการติดตั้ง FCL ต่ออุปกรณ์ป้องกันระยะทางในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะประโยชน์ต่อการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไปในอนาคต

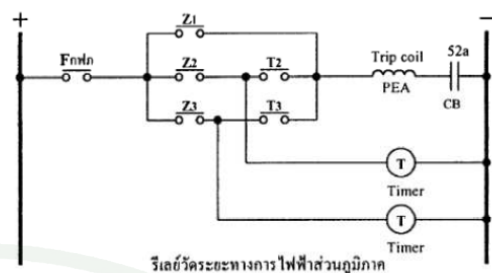
2. หลักการพื้นฐานของรีเลย์ระยะทาง

โซนป้องกัน [2] ในการป้องกันสายส่งแรงสูงในระบบจำหน่าย เรามักใช้รีเลย์กระแสเกินเป็นตัวป้องกัน เพราะทำได้ง่าย ราคาถูก สำหรับสายส่งแรงสูงนั้นเป็นระบบที่มีความสำคัญมาก และมีราคาแพง ดังนั้น ในการป้องกันระบบสายส่งแรงสูงจะต้องเลือกใช้รีเลย์ ในการป้องกันระบบที่มีความเชื่อถือได้จริงๆ ในทางปฏิบัติจะใช้รีเลย์ระยะทาง (Distance relay) เป็นตัวป้องกันกึ่งหน้าและรีเลย์กระแสเกินเป็นตัวป้องกันกึ่งหลัง ดังนั้น ในการป้องกันสายส่งแรงสูงที่จะกล่าวต่อไปนี้จะกล่าวถึง รูปแบบของ โมห์รีเลย์ (Mho relay) ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์แบบโมห์ (Mho)

การทำงานของรีเลย์ระยะทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3] โซนป้องกันของรีเลย์ระยะทางปกติจะใช้ป้องกันสายส่งโดยแบ่งเป็น 3 โซนต่อ 1 ด้านของสายส่ง คือ โซน 1 เมื่อเห็นสัญญาณลัดวงจรจะตัดวงจรทันที ในขณะที่โซน 2 และ 3 จะมีตัวหน่วงเวลา $T2$ และ $T3$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 2



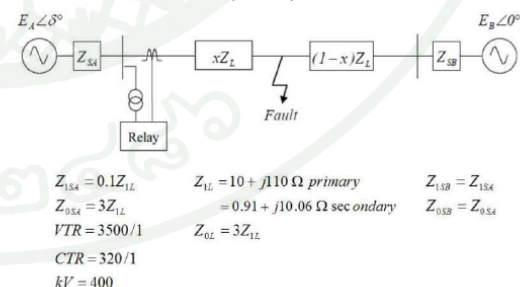
ภาพที่ 2 การทำงานของรีเลย์ระยะทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3]

โดยโซน 1 จะตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ไม่เกิน 80-90% ของสายส่ง ส่วนโซน 2 จะตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ประมาณ 120-150% ของความยาวสายส่งที่ป้องกัน เพื่อเป็นตัวสำรองให้โซน 1 และป้องกันส่วนที่โซน 1 มองไม่เห็น และโซน 3 ควรตั้งค่าให้มากกว่าโซน 2 เพื่อเป็นตัวสำรองให้โซน 1 และ 2 อีกที โดยระยะเวลาการทำงานของแต่ละโซนจะกำหนดให้โซน 1 ตัดวงจรทันทีทันใด โซน 2 ตัดวงจรหลังจากเห็นสัญญาณลัดวงจรนาน 300 ms และโซน 3 ตัดวงจรหลังจากเห็นสัญญาณลัดวงจรนาน 600 ms

3. การกำหนดค่าและจำลองของระบบที่ศึกษา

3.1 วงจรและค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ศึกษา

ระบบไฟฟ้าพร้อมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เป็นดังภาพที่ 3 [4] โดยแบบจำลองนี้ออกแบบระบบกรณีที่ตำแหน่งฟอลต์อยู่ด้านหน้ารีเลย์ โดยสมมติว่าทั้งสองแหล่งจ่ายมีแรงดันเท่ากันและมีมุมเฟสเหมือนกัน โดยวิเคราะห์จากฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

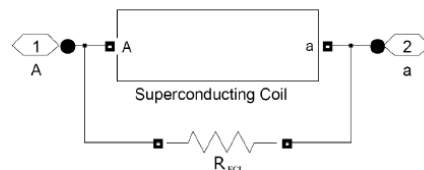


ภาพที่ 3 ระบบไฟฟ้าสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

3.2. การออกแบบและจำลองระบบ

3.2.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (FCL)

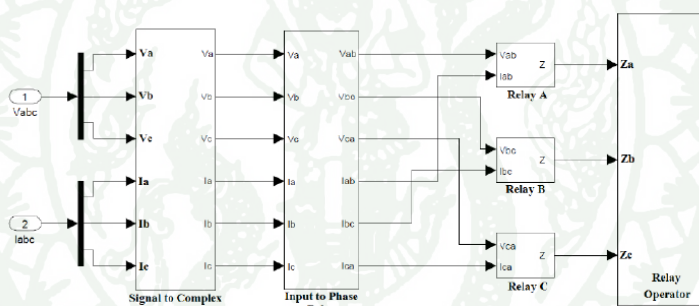
ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาเรื่องจุดกักเก็บทุนในการเลือกใช้อุปกรณ์ขดลวดตัวนำยิ่งยวด แต่จะเน้นไปที่คุณสมบัติของขดลวดตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากขดลวดตัวนำยิ่งยวดเป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าซึ่งมีความเชื่อถือได้ ดังนั้นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรนี้จะประกอบไปด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Coil) และตัวต้านทาน [5] ดังภาพที่ 4 โดยปกติกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดลวดตัวนำ จากนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบกระแสจะถูกบังคับให้ไหลผ่านตัวต้านทาน R จึงทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง



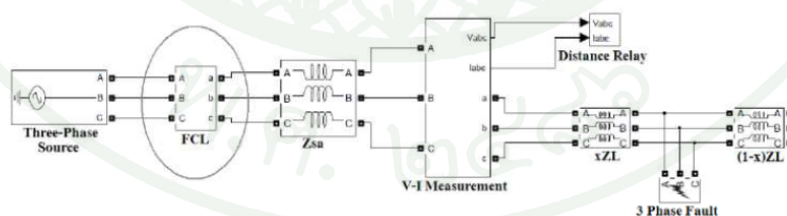
ภาพที่ 4 วงจรอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร

3.2.2. รีเลย์ระยะทาง

ในการออกแบบรีเลย์ระยะทางการรับสัญญาณของแรงดันและกระแสใน Matlab จะรับออกมาเป็นสัญญาณไซน์ จึงต้องออกแบบวงจรแปลงให้เป็นปริมาณเชิงซ้อนเพื่อที่จะดูค่า รีซิสแตนซ์ และ รีแอกแตนซ์ ($R+jx$) ดังภาพที่ 5 จากนั้นวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่ากระแสที่เกิดขึ้นทั้งในวงจรที่ไม่ได้ติดตั้ง FCL และวงจรที่ได้ติดตั้ง FCL โดยการนำอุปกรณ์ FCL มาใส่ในระบบไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์



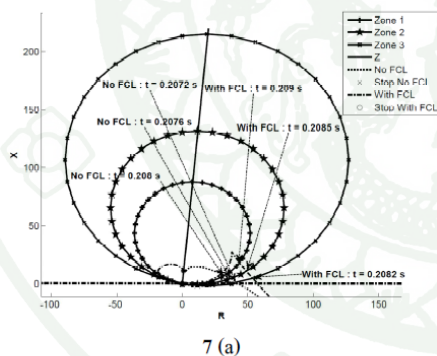
ภาพที่ 6 จำลองระบบไฟฟ้าที่มีการต่อ FCL ในวงจร

4. ผลการทดลอง

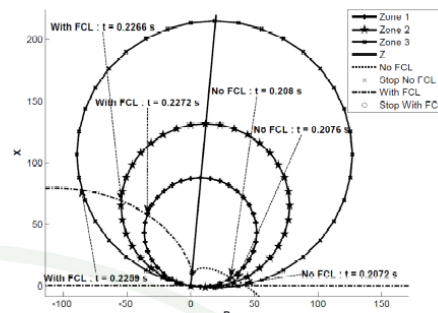
ในงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างการทดลองกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) โดยกำหนดให้ค่า x ในวงจรคือ % ของระยะทางที่เกิดฟอลต์ในสายส่ง แล้วใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นขณะเกิดฟอลต์ที่ต้นทางกำหนดให้ $x = 10\%$ และขณะเกิดฟอลต์ที่ปลายทางกำหนดให้ $x = 90\%$ ผลจากการทดลองจะได้ค่ารีซิสแตนซ์และรีแอคแตนซ์ ($R+jX$) ของวงจร [6] เพื่อใช้ในการพิจารณาสัญญาณที่วิ่งเข้าสู่โซนป้องกันระยะทาง จากนั้นพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนค่า R_{FCL} โดยที่มีกำหนดให้ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$

4.1 กรณีลัดวงจรที่ต้นทาง กำหนด $x = 10\%$

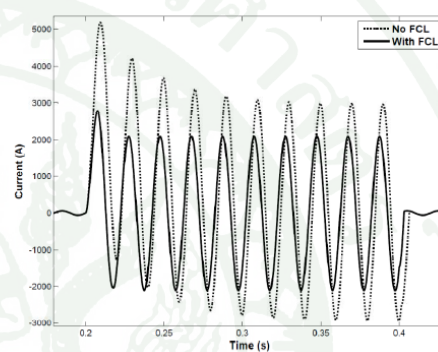
จากผลการทดลองโดยกำหนด $x = 10\%$ ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ ตามลำดับจะเห็นได้ว่า ในระบบของวงจรปกติ และวงจรที่มี FCL รีเลย์จะมองเห็นฟอลต์แล้วทำงานในโซน 1 ได้ถูกต้อง ดังภาพที่ 7 (a) $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ 7 (b) $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ และจะเห็นว่าวงจรไฟฟ้าที่มี FCL ต่อในวงจรนั้นขนาดของกระแสจะลดลง ดังภาพที่ 8 (a) $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และ 8 (b) $R_{FCL} = 1000\ \Omega$



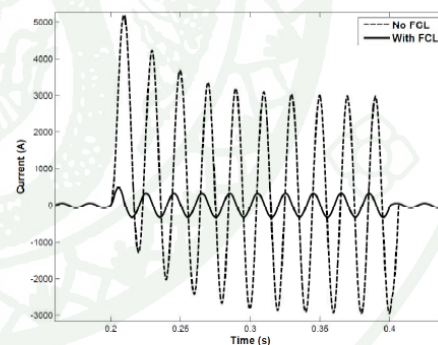
7 (a)



7 (b)

ภาพที่ 7 โซนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 10\%$ 

8 (a)



8 (b)

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบขนาดของกระแสระหว่างมี FCL และไม่มี

เมื่อ $x = 10\%$

ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ และที่ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ เมื่อกำหนดเวลาที่เกิดฟอลต์ที่ $t = 0.2\text{ s}$ จะได้ระยะเวลาที่สัญญาณเริ่มเข้าแต่ละโซนและเวลาที่จะต้องตัดของวงจรที่กำหนดค่า

$R_{FCL} = 100 \Omega$ ดังตารางที่ 1 และวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 1000 \Omega$ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10 \%$

และ $R_{FCL} = 100 \Omega$

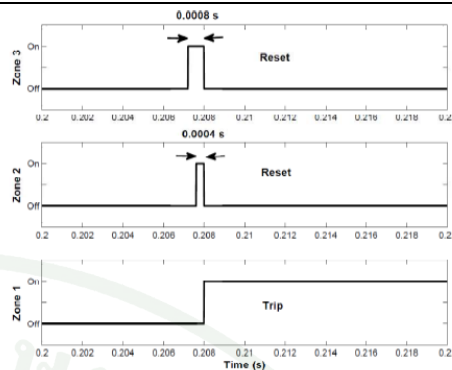
โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
3	0.2072	0.8072	No Trip	0.2082	0.8082	No Trip
2	0.2076	0.5076	No Trip	0.2085	0.5085	No Trip
1	0.208	0.208	Trip	0.209	0.209	Trip

ตารางที่ 2 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 10 \%$

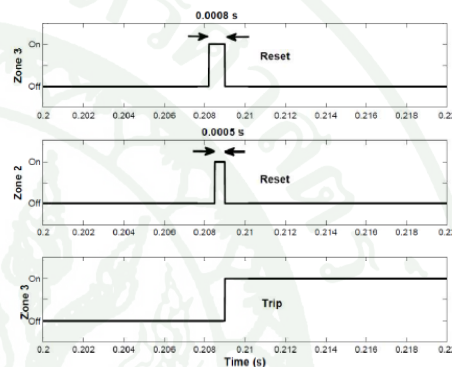
และ $R_{FCL} = 1000 \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้า Zone(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้า Zone(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
3	0.2072	0.8072	No Trip	0.2259	0.8259	No Trip
2	0.2076	0.5076	No Trip	0.2266	0.5266	No Trip
1	0.208	0.208	Trip	0.2272	0.2272	Trip

จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เราจะสังเกตสัญญาณที่เริ่มเข้าโซน 3 และจับเวลาออกไปไม่ถึง 600 ms สัญญาณจะเข้าสู่โซนที่ 1 ทำให้ระบบตัดวงจรทันที ดังนั้นการทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง ที่ $x = 10 \% R_{FCL} = 100 \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 9 (a) No FCL และ 9 (b) With FCL และการทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง ที่ $x = 10 \% R_{FCL} = 1000 \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 10 (a) No FCL และ 10 (b) With FCL จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่วิ่งเข้าหาโซนป้องกัน จะสังเกตได้ว่าวงจรที่มี FCL จะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกันได้ช้ากว่าวงจรปกติแต่เวลาต่างกันไม่มากและวงจรที่มี FCL ขนาดของกระแสไฟฟ้าก็จะต่ำลงทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่เสียหาย

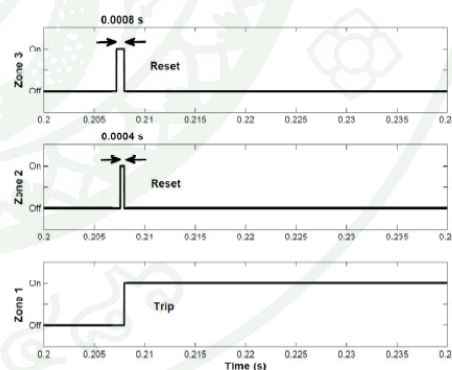


9 (a)

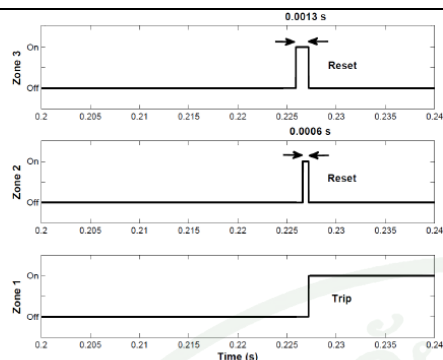


9 (b)

ภาพที่ 9 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทางเมื่อ $x = 10 \% R_{FCL} = 100 \Omega$



10 (a)

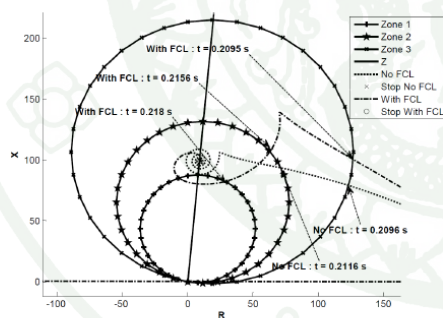


10 (b)

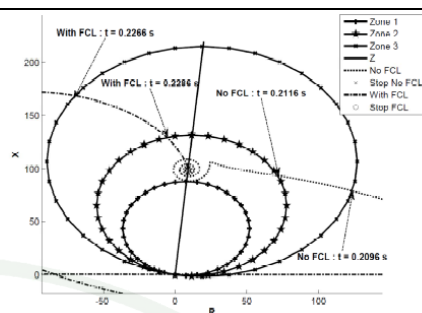
ภาพที่ 10 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง
เมื่อ $x = 10\%$ $R_{FCL} = 1000 \Omega$

4.2 กรณีลัดวงจรที่ปลายทาง กำหนด $x = 90\%$

จากผลการทดลองโดยกำหนด $x = 90\%$ ที่ $R_{FCL} = 100 \Omega$ และ $R_{FCL} = 1000 \Omega$ ตามลำดับจะเห็นได้ว่า ในระบบของวงจรปกติ และวงจรที่มี FCL รีเลย์จะมองเห็นฟอลต์แล้วทำงานในโซน 1 ได้ถูกต้อง ดังภาพที่ 11 (a) $R_{FCL} = 100 \Omega$ และ 11 (b) $R_{FCL} = 1000 \Omega$ และวงจรไฟฟ้าที่มี FCL ต่อในวงจรนั้นขนาดของกระแสจะลดลงด้วย



11 (a)



11 (b)

ภาพที่ 11 โซนป้องกันที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $x = 90\%$

ที่ $R_{FCL} = 100 \Omega$ และที่ $R_{FCL} = 1000 \Omega$ เมื่อกำหนดเวลาที่เกิดฟอลต์ที่ $t = 0.2 \text{ s}$ จะได้ระยะเวลาที่สัญญาณเริ่มเข้าแต่ละโซนและเวลาที่สั่งตัดของวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 100 \Omega$ ดังตารางที่ 3 และวงจรที่กำหนดค่า $R_{FCL} = 1000 \Omega$ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100 \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
3	0.2096	0.8096	No Trip	0.2095	0.8095	No Trip
2	0.2116	0.5116	Trip	0.2156	0.5156	No Trip
1	-	-	-	0.218	0.218	Trip

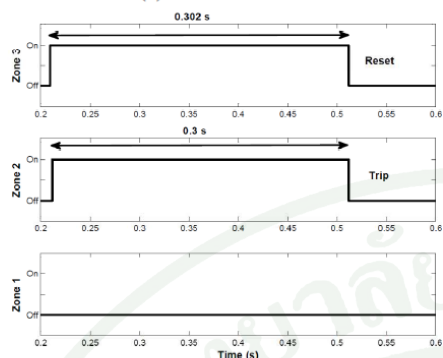
ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่สัญญาณเข้าสู่โซนป้องกันที่ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000 \Omega$

โซน	Non FCL			FCL		
	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ	เวลาเข้าโซน(s)	เวลาที่ trip(s)	สถานะ
3	0.2095	0.8095	No Trip	0.227	0.827	No Trip
2	0.218	0.518	Trip	0.2296	0.5296	Trip

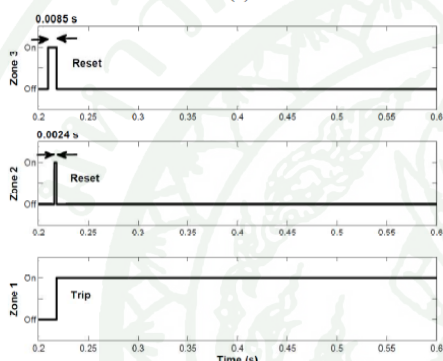
จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 การทำงานของโซนป้องกันรีเลย์ระยะทางที่ $x = 90\%$ $R_{FCL} = 100 \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 12 (a) No FCL และ 12 (b) With FCL และการทำงานของโซนป้องกันใน

รีเลย์ระยะทางที่ $x = 90\%$ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ จึงเป็นดังภาพที่ 13

(a) No FCL และ 13 (b) With FCL

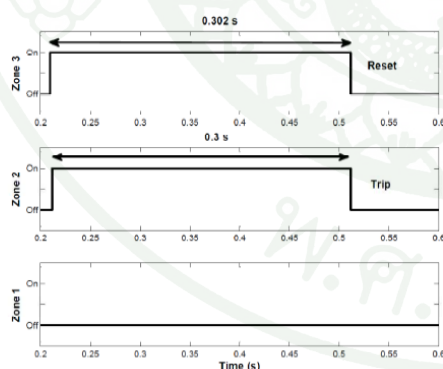


12 (a)

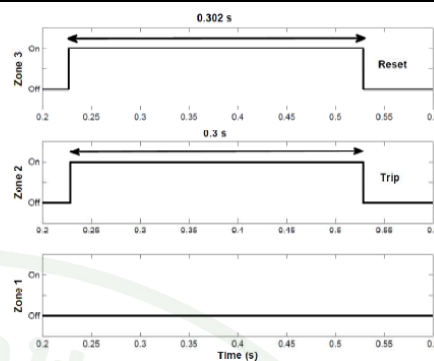


12 (b)

ภาพที่ 12 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง
เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 100\ \Omega$



13 (a)



13 (b)

ภาพที่ 13 การทำงานของโซนป้องกันในรีเลย์ระยะทาง เมื่อ $x = 90\%$ และ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$

ที่ $R_{FCL} = 100\ \Omega$ จะสังเกตได้ว่าวงจรปกติจะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกัน ได้ช้ากว่าวงจรที่ติดตั้ง FCL เพียงเล็กน้อยและวงจรที่ติดตั้ง FCL ก็ทำการตัดวงจรที่โซน 1 ซึ่งถือว่าดีวงจรผิดปกติ และที่ $R_{FCL} = 1000\ \Omega$ จะเห็นว่าวงจรปกติจะเริ่มเข้าสู่โซนป้องกัน ได้เร็วกว่าวงจรที่ติดตั้ง FCL และจับเวลาออกไปอีกไม่ถึง 600 ms สัญญาณก็เข้าสู่โซน 2 ทั้งสัญญาณของวงจรแบบปกติและวงจรที่มี FCL จะไม่ไปที่โซน 1 ทำให้ระบบตัดวงจรที่โซน 2

5. สรุป

จากการทดลองการใส่อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจร (Fault current limiter, FCL) ในระบบนั้นทำให้สามารถลดขนาดของกระแสลัดวงจรลงได้ ซึ่งค่า R_{FCL} นั้นจะส่งผลในเรื่องการลดลงปริมาณของกระแสลัดวงจร และเวลาที่ทำให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นกระแสลัดวงจร โดยในกรณีที่ค่า R_{FCL} มีค่าน้อยเช่นกรณี $R_{FCL} = 100\ \Omega$ จะทำให้เกิดการตัดวงจรผิดปกติ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับวงจรตัวอย่างนี้ ส่วนกรณีค่า R_{FCL} มากจะทำให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นกระแสลัดวงจรน้อยส่งผลให้ตัดวงจรออกได้ช้าลง [7] แต่อันตรายที่เกิดจากปริมาณของกระแสที่มากขึ้นก็จะถูก R_{FCL} ลดขนาดลงจนอยู่ในระดับที่อุปกรณ์สามารถทนได้ และการตัดวงจรช้าลงจะเกิดผลดีต่อกรณีเกิดการลัดวงจรแบบชั่วคราวเพราะถ้าระบบสามารถกลับมาปกติได้ในเวลาที่รวดเร็วพอ จะทำให้ไฟฟ้าไม่

ดับแล้วระบบยังสามารถทำงานต่อไปได้ จากการศึกษาทำให้รู้ว่า FCL สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ การป้องกันระยะทางโดยการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าและทำให้เกิดความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นในระบบการป้องกัน โดยขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่า R_{FCL} ให้เหมาะสมกับระบบซึ่งจะเป็นแนวทาง ในการพัฒนาระบบต่อไป

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Rio De J., 2007. **Impact of Fault Current Limiters on Existing Protection Schemes.**
- [2] สันติ อัสศรีพวงศรีธร. 1983. รีเลย์ป้องกันกับการป้องกันระบบกำลัง. ครั้งที่ 1. สมาคมศูนย์วิชาการ ไทย-ออสเตรเลีย.
- [3] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า ฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2546. หลักเกณฑ์ทั่วไปในการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [4] Roberts, J., A. Guzman and E.O. Schweitzer, III., 1993. **$Z = V/I$ does not make a distance relay.** October 19-21, 1993.
- [5] Sung-Hun L, Il-Kyoung Y., and Jae-Chul K. 2011. **Study on Peak Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using Its Third Winding.,** IEEE Transactions on applied Superconductivity, Vol . 21 , NO. 3, JUNE 2011
- [6] Kochawat R. , 2006. **Development of Matlab / Simulink Based Program for the Analysis on the Behavior of Mho Distance Relay during Varying Faults and System Conditions.**
- [7] Jäger J., 2008, **Interaction Between Fault Current Limiters and Protection – A Glance at the Final Report of CIGRE WG A3.16.,** IEEE PES General Meeting 2008, Pittsburgh, USA

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายพิริยะ แสงไทร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 กันยายน 2529
สถานที่เกิด	จ.กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-
บทความวิจัยในระดับชาติ	

1. พิริยะ แสงไทร และ คมสันต์ หงษ์สมบัติ. 2556. ผลกระทบของตัวจำกัดกระแสลัดวงจรต่อการป้องกันระยะทาง. วารสารวิศวกรรมสาร มก. (KU Engineering Journal).