

ชุดทดลองการวัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบมีดินและสายเคเบิลใต้ดิน
Short circuit experimental setup overhead and underground cable
distribution system



ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน
Short circuit experimental setup for overhead and underground cable
distribution system



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Short circuit experimental setup for overhead and underground cable distribution system



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

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน
Short circuit experimental setup for overhead and underground cable
distribution system



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ชายชาญ โปธิสาร

รศ.ดร.อรรถพล เ่ง่าพิทักษ์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย พัทธพล สมโชค
 2. นาย พิเชษฐ์ แก้วคำศรี
 3. นางสาว พิมพ์ชนก สันติชัยรัตน์
 4. นางสาว พิลาสลักษณ์ ยินดีทรัพย์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายชาญ โภธิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน

นาย พัทธพล สมโชค

นาย พิเชษฐ์ แก้วคำศรี

นางสาว พิมพ์ชนก สันติชัยรัตน์

นางสาว พิลาสลักษณ์ ยินดีทรัพย์

ผศ. ชายชาญ โทธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อรรถพล เเง้าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลัดวงจรในสายส่งเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดินของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Line) ระยะปานกลางแบบพาย (π - network) ซึ่งเกิดจากการลัดวงจรทั้งแบบสมมูล และไม่สมมูล โดยคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของเสาส่ง ขนาดของตัวนำ ชนิดของตัวนำ และการจัดเรียงตัวของสายส่ง เพื่อนำมาใช้ในการจำลองระบบ โดยแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลแบบพาย (π - network) ที่สามารถนำมาสร้างเป็นชุดทดลองสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการได้โดยไม่เกิดอันตราย อีกทั้งยังนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าลักษณะต่างๆ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่จำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation) ด้วยโปรแกรม ATPDraw 5.6 และเพื่อนำผลสรุปไปพัฒนา ระบบป้องกันการเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

Short Circuit Experimental Set up for Overhead and Underground Cable Distribution System

Mr.Pattapol

somchok

Mr.Pichet

Keawkumsri

Ms.Pimchanok

Santichairat

Ms.Piladelak

Yindeesap

Asst.Prof. Chaichan

Pothisarn

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Atthapol

Ngaopitakkul

Advisor

Year 2014

ABSTRACT

This thesis focuses on the short-circuit behavior in both overhead line and underground cable system, π -network type of medium distribution line, which is caused by both balance and unbalance. Calculation of parameters based on forms of distribution towers, size of conductor, types of conductor and arrangement of distribution line is carried out in order to convert the obtained values to an equivalent circuit of π -model; this can be applied to build practice set, which is safely used in electrical laboratory. It is also used to analyze the behavior of the short circuit in distribution system in different ways to be compared with the corresponding theory was simulated by program ATPDraw 5.6. The obtained results can be next used to develop short-circuit protection system in distribution system.

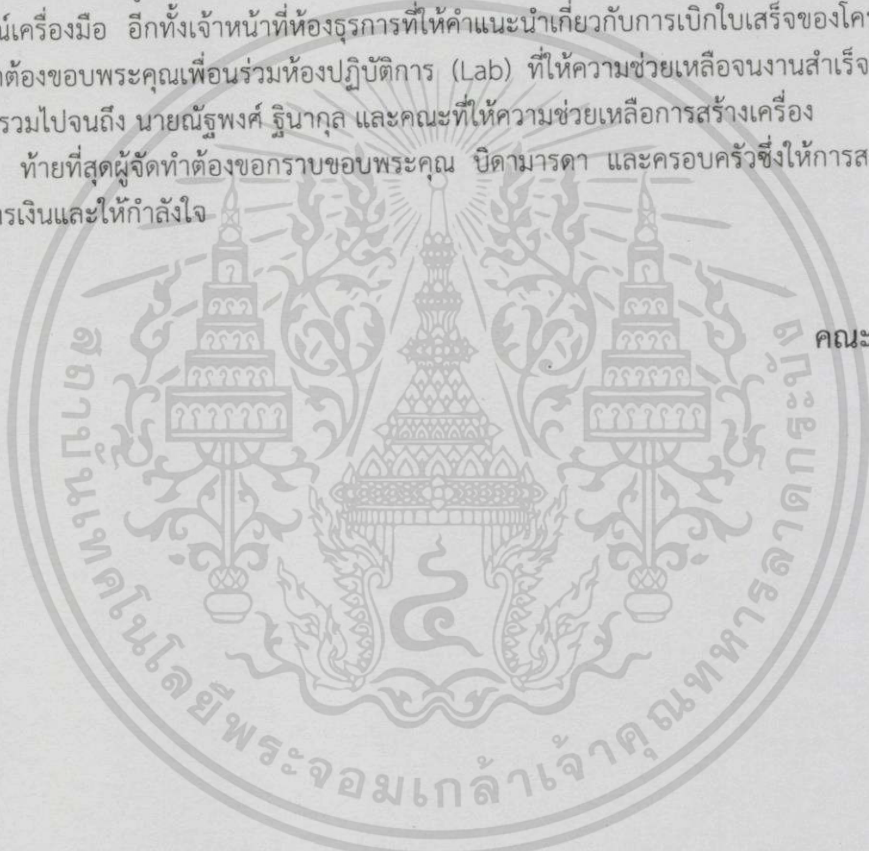
กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล และ ผศ. ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ คอยให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำ โครงการในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณ จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์ ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยแก้ปัญหา และช่วยเหลือ ในการให้ข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นต้นแบบในการจำลองระบบ

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความกรุณาเบิกใช้ อุปกรณ์เครื่องมือ อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการและ ผู้จัดทำต้องขอพระคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ (Lab) ที่ให้ความช่วยเหลือจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี รวมไปถึง นายณัฐพงศ์ ฐินาคูล และคณะที่ให้ความช่วยเหลือการสร้างเครื่อง

ท้ายที่สุดผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนใน ด้านการเงินและให้กำลังใจ



คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	9
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	9
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	9
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	10
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 พารามิเตอร์สายส่ง	12
2.2 ปริมาณเพอร์ยูนิต	13
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสายส่ง	13
2.4 ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า	14
2.5 ลักษณะการเกิดลัดวงจร	16
2.6 การศึกษาฟอลต์แบบสมมาตร	19
2.7 การศึกษาฟอลต์แบบไม่สมมาตร	20
2.8 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	26
2.9 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน	28
2.10 การลัดวงจรแบบสองเฟส	30
บทที่ 3 การออกแบบการจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า	32
3.1 การออกแบบชุดทดลองแบบจำลองสายส่งระบบจำหน่ายเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน30	
3.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ	36
3.1.2 การป้องกันชุดทดลอง	36
3.1.3 ชุดมาตรวัดภายนอก	38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.4 วงจรจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า	39
3.1.5 การใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing)	49
3.1.6 สวิตช์ปรับค่าพารามิเตอร์	51
3.1.7 โหลดของระบบสายส่ง	52
บทที่ 4 ผลการทดลอง	55
4.1 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน	57
4.1.1 ระยะเวลาความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง	57
4.1.1.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	57
4.1.1.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	63
4.1.1.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	70
4.1.1.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	76
4.1.2 ระยะเวลาความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง	86
4.1.2.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	86
4.1.2.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	92
4.1.2.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	99
4.1.2.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	105
4.1.3 ระยะเวลาความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง	115
4.1.3.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	115
4.1.3.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	121
4.1.3.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	127
4.1.3.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	134
4.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน	166
4.2.1 ระยะเวลาความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง	166
4.2.1.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	166
4.2.1.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	171
4.2.1.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	178
4.2.1.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	185

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง	194
4.2.2.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	194
4.2.2.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	199
4.2.2.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	206
4.2.2.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	212
4.2.3 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง	222
4.2.3.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	222
4.2.3.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)	227
4.2.3.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)	234
4.2.3.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)	241
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	274
เอกสารอ้างอิง	276
ภาคผนวก	281
ภาคผนวก ก	282
ภาคผนวก ข	287
ภาคผนวก ค	295
ภาคผนวก ง	308
ภาคผนวก จ	318
ภาคผนวก ฉ	321
ประวัติผู้เขียน	328

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความสัมพันธ์ของรายได้ประชาชาติ การใช้ไฟฟ้า และปี(พ.ศ.)	1
1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหลดสูงสุดกับปี(ค.ศ.)	2
1.3 หน้าต่างโปรแกรม ETAP	6
1.4 แบบจำลองสายส่งสามเฟส	7
1.5 แบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า	8
2.1 พารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า	12
2.2 วงจรสมมูลของสายส่งระยะกลางแบบ π	14
2.3 วงจรสำหรับการวิเคราะห์สภาวะทรานเซียน	17
2.4 ลักษณะกราฟของแรงดันและกระแสขณะเกิดการลัดวงจร	18
2.5 a) ไดอะแกรมเส้นเดียวของ Generator ขณะต่อกับโหลด b) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ Generator ขณะต่อกับโหลด	19
2.6 ไดอะแกรมของ Symmetrical Component	21
2.7 Balance Y connected load	22
2.8 แหล่งจ่าย 3 เฟสสมดุล และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย	25
2.9 Sequence Network ของ Generator ลำดับ 0, ลำดับ +, ลำดับ -	27
2.10 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินในแต่ละเฟส	27
2.11 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่เฟส a	27
2.12 Sequence Network of Single line to ground fault	28
2.13 ลักษณะการเกิดลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน	28
2.14 Sequence Network ของ Double line to ground fault	30
2.15 การลัดวงจรแบบสองเฟส	30
2.16 sequence network ของการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส	31
3.1 สายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดินของการไฟฟ้า 115 KV KV ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยพระนครใต้ถึง สถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธง	32
3.2 สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้า 115 KV ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงถึงสถานี ไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่	33
3.3 (ก) ตัวอย่างแผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายเหนือดิน (ข) แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง	34
3.4 โครงตู้ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่าย	35
3.5 ภาพรวมการออกแบบการป้องกันชุดทดลอง	36
3.6 ระบบการป้องกัน	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แผนผังการต่ออุปกรณ์ Fluke 435 Power Quality Analyzer	38
3.8 แนวความคิดการออกแบบวงจรจำลองสายส่งเบื้องต้น	39
3.9 (ก) แบบหน้าตู้วงจรจำลองสายส่ง	41
(ข) หน้าตู้วงจรจำลองสายส่งหลังประกอบแล้วเสร็จ	
3.10 (ก) สวิตช์เลือกปรับระดับค่าความเหนี่ยวนำหน้าตู้ทดลองตัวที่ 1 และ 3	42
(ข) แสดงการแถบเลือกค่าความเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์จริงตัวที่ 1 และ 3	
3.11 (ก) สวิตช์เลือกปรับระดับค่าความเหนี่ยวนำหน้าตู้ทดลองตัวที่ 2 และ 4	43
(ข) แสดงการแถบเลือกค่าความเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์จริงตัวที่ 2 และ 4	
3.12 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 560 mH	44
3.13 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรทดลอง	47
3.14 (ก) ค่าเก็บประจุขนาด 0.25 μF ต่อเฟสที่เกิดการต่ออนุกรมกันของ 0.1 μF 2 ตัว	47
(ข) รูปวงจรการต่อค่าตัวเก็บประจุให้ได้ 0.05 μF	
3.15 (ก) จุดทำงานทั้งหมดของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero crossing)	50
(ข) วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing)	
(ค) ไตอะแกรมการต่อแมกเนติกคอนแทคเตอร์และชุดวงจรควบคุม	
3.16 Multi-Step Rotating CAM Switch	51
3.17 แผนผังการต่อโหลดของระบบที่ใช้ในการทดลอง	52
3.18 โหลดของระบบที่ใช้ในการทดลอง	53
3.19 ตัวอย่างการต่อวงจรจำลองสายส่งโดยมีการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดินที่ 60 % ของความยาวสายส่ง	54
4.1 แผนภาพแสดงลำดับการทดลอง	56
4.2 ระยะเวลาความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	60
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.4	64
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.5	67
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.6	71
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.7	73
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.8	77
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.9	80
ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.10	87
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.11	89
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.12	93
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.13	96
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.14	100
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.15	102
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	
4.16	106
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	
4.17	109
ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	116
4.19 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	118
4.20 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	122
4.21 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	125
4.22 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	128
4.23 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	131
4.24 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	135
4.25 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	138
4.26 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90°	144
4.27 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 180°	144
4.28 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90	145
4.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 180°	146
4.30 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90°	147
4.31 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 180°	147
4.32 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน(SLG)ที่มุม90°	149

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	149
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่างๆของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน(SLG)ที่มุม 180°	
4.34	150
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90°	
4.35	151
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิด สองเฟส (L-L) ที่มุม 180°	
4.36	152
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90°	
4.37	152
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่างๆของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน(DLG)ที่มุม 180°	
4.38	153
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 90°	
4.39	154
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจาก ด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 180°	
4.40	155
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	
4.41	156
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	
4.42	157
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	
4.43	157
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	
4.44	158
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	
4.45	159
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	
4.46	160
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	
4.47	160
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	161
4.49 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	162
4.50 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	163
4.51 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	163
4.52 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	164
4.53 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	165
4.54 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	167
4.55 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	169
4.56 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	172
4.57 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	175
4.58 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	179
4.59 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	182
4.60 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	186
4.61 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	189
4.62 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	195

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.63 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	197
4.64 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	200
4.65 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	203
4.66 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	207
4.67 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	210
4.68 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	213
4.69 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	216
4.70 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	223
4.71 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	225
4.72 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	228
4.73 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	231
4.74 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	235
4.75 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	238
4.76 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	242
4.77 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	245

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.78	251
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90°	
4.79	251
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 180°	
4.80	252
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90°	
4.81	253
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 180°	
4.82	254
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90°	
4.83	254
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 180°	
4.84	256
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 90°	
4.85	256
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 180°	
4.86	257
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90°	
4.87	258
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด สองเฟส (L-L) ที่มุม 180°	
4.88	259
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90°	
4.89	259
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 180°	
4.90	260
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 90°	
4.91	261
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 180°	
4.92	262
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.93 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	263
4.94 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	264
4.95 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	264
4.96 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	265
4.97 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	266
4.98 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	267
4.99 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	267
4.100 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	268
4.101 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	269
4.102 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	270
4.103 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	270
4.104 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°	271
4.105 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°	272

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	11
3.1 ค่าความเหนียวนำของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายเหนือดินที่ระยะความยาวต่างๆ	46
3.2 ค่าความเหนียวนำของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินที่ระยะความยาวต่างๆ	46
3.3 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายเหนือดินที่ระยะความยาวต่างๆ	48
3.4 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินที่ระยะความยาวต่างๆ	48
4.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	59
4.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	62
4.3 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	65
4.4 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	69
4.5 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	72
4.6 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	75
4.7 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	79
4.8 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	82
4.9 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	84
4.10 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	85
4.11 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	88
4.12 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	91
4.13 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	98
4.15 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	101
4.16 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	104
4.17 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	108
4.18 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	111
4.19 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของ ความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm , มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	113
4.20 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของ ความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm , มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	114
4.21 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	117
4.22 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	120
4.23 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	123
4.24 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	126
4.25 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	129
4.26 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	133
4.27 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	136
4.28 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	141
4.30 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	142
4.31 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°	143
4.32 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°	145
4.33 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับบัลลาสต์ที่มุม 90° และ 180°	146
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 90° และ 180°	148
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90° และ 180°	150
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90° และ 180°	151
4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด สามเฟสลงดิน (3P) ที่มุม 90° และ 180°	153
4.38 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°	155
4.39 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม 90° และ 180°	156
4.40 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°	158
4.41 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°	159
4.42 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°	161
4.43 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.44 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°	164
4.45 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	168
4.46 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	171
4.47 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	174
4.48 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	177
4.49 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	180
4.50 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	184
4.51 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	187
4.52 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	190
4.53 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	192
4.54 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm มุมกระแสลัดวงจรที่ 180°	193
4.55 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	196
4.56 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	198
4.57 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	201
4.58 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	205

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.59 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	208
4.60 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	212
4.61 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	215
4.62 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	218
4.63 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	220
4.64 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมกระแสลัดวงจรที่ 180°	221
4.65 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	224
4.66 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	226
4.67 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	229
4.68 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	233
4.69 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	236
4.70 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	240
4.71 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	243
4.72 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	246
4.73 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°	248

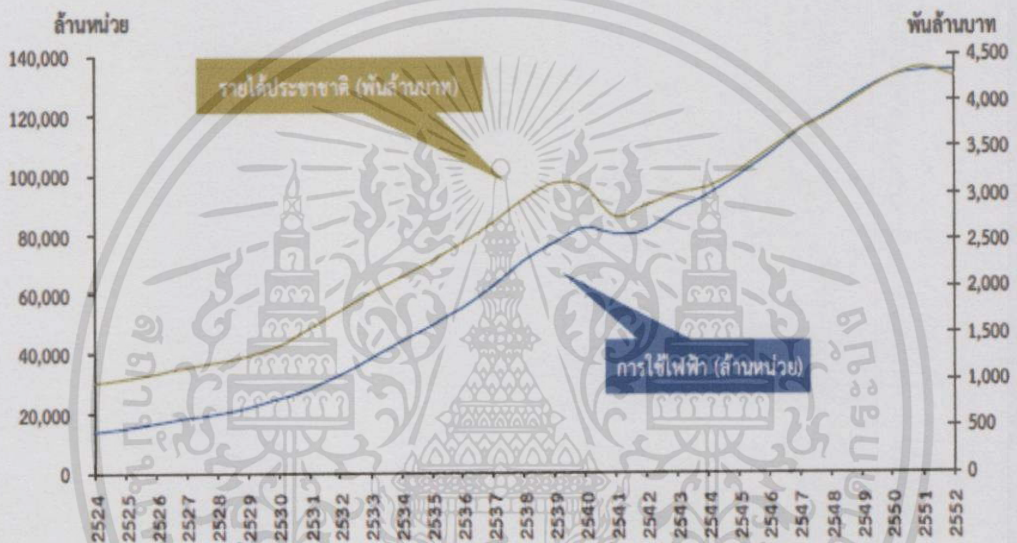
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.74 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°	249
4.75 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาว สายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัดที่มุม 90° และ 180°	250
4.76 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาว สายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัดที่มุม 90° และ 180°	252
4.77 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาว สายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัดที่มุม 90° และ 180°	253
4.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง กับโหลดต่างๆของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน(SLG) ที่มุม 90° และ 180°	255
4.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง กับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90° และ 180°	257
4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง กับโหลดต่างๆของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน(DLG)ที่มุม90°และ180°	258
4.81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง กับโหลดต่างๆของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟสลงดิน(3P)ที่มุม 90° และ180°	260
4.82 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ20%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180	262
4.83 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	263
4.84 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ40%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	265
4.85 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ50%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	266
4.86 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ60%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	268
4.87 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ70%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	269
4.88 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆที่ระยะ80%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม90°และ180°	271

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าถือว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งในด้านครัวเรือน เศรษฐกิจ และภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการขยายตัวของระบบไฟฟ้ามาโดยตลอด ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจของประเทศอย่างต่อเนื่อง จึงมีการลงทุนทั้งจากภายในประเทศและจากต่างชาติเข้ามามากขึ้น ส่งผลให้มีการสร้างฐานการผลิตและโรงงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้นตามลำดับ

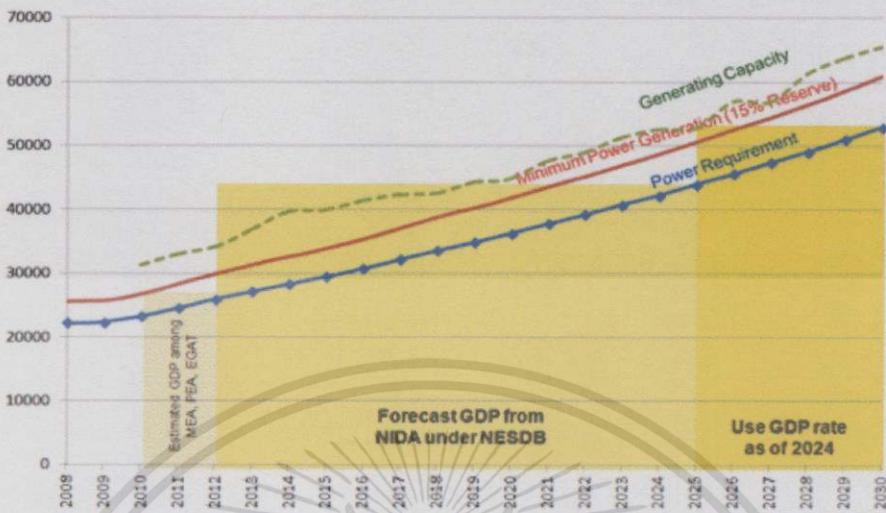


รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ของรายได้ประชาชาติ การใช้ไฟฟ้า และปี(พ.ศ.)

จะเห็นว่าที่ผ่านมาประเทศไทยมีอัตราการเติบโตของรายได้ประชาชาติเฉลี่ย ปีละประมาณ 4% และมีอัตราการเจริญเติบโตของการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยปีละประมาณ 4.2% การมีไฟฟ้าใช้อย่างทั่วถึงเพียงพอมีส่วนช่วยพัฒนาเศรษฐกิจ ขณะเดียวกัน การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจก็ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

2030 Forecast peak demand = 52,890 MW
(2.37 times higher than 2009)

Peak load (MW)



Note: By DSM program deployment, the load forecast of peak demand is reduced by 240 MW per year.

Source: EGAT, PDP2010

รูปที่ 1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหลดสูงสุดกับปี(ค.ศ.)

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการผลิตไฟฟ้าให้มีขนาดเพียงพอต่อความต้องการ และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของระบบไฟฟ้า นำมาซึ่งปัญหาการจัดการระบบที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการใช้ไฟฟ้าสูง ตัวอย่างเช่น พื้นที่เศรษฐกิจสำคัญ ถนน สีลม ถนนพหลโยธิน พญาไท สุขุมวิท ปทุมวัน จิตรลดา พระราม 3 และนนทบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้มีการใช้สายในระบบจำหน่ายแบบใต้ดินจึงเกิดความยุ่งยากในการดูแลและบำรุงรักษา และหากเกิดเหตุการณ์ผิดปกติของระบบขึ้นในเขตพื้นที่ดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นการเกิดความผิดปกติในระบบหรือในสายส่ง เกิดการลัดวงจรแบบต่างๆ จะส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับในบริเวณพื้นที่เศรษฐกิจดังกล่าวอีกด้วย ทำให้เกิดความสูญเสียทั้งทางด้านเศรษฐกิจและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และทำให้เศรษฐกิจของประเทศมีการเจริญเติบโตยิ่งขึ้น

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน (Overhead Line System) อาจเกิดความผิดปกติของวงจร (Fault) หรือเกิดการลัดวงจร (Short Circuit) มีสาเหตุมาจาก การพาดผ่านของต้นไม้หรือสิ่งมีชีวิต, การพาดระหว่างกันของสายตัวนำ, แรงดันไฟฟ้าเกินจากฟ้าผ่า, ความเสื่อมสภาพหรือความบกพร่องของฉนวนไฟฟ้า (Insulation Failure) และการเกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) จนทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ผ่านไปบนผิวของฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น เช่นเดียวกับกรณีของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) แต่จะไม่มีปัญหาการพาดผ่านของต้นไม้หรือสิ่งมีชีวิต

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของการเกิดสภาวะผิดปกติในระบบ หรือฟอลต์นั้นยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะทำการศึกษาวิจัยกัน ในต่างประเทศ และหัวข้อที่ทำการวิจัยจะเป็นภาพรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทำการศึกษาผ่าน อัลกอริทึมหรือสมการทางคณิตศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่น

การสร้างอัลกอริทึมด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) งานวิจัยของ A. Borghetti และคณะ[1] นำเสนอวิธีวิเคราะห์เวฟเลตอย่างต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาการระบุ ตำแหน่งฟอลต์ที่เกิดขึ้นชั่วคราวในระบบโดยใช้เวฟเลตของเวลาและความถี่ และยังเป็น การปรับปรุง ความแม่นยำของความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เวฟเลต โดยทำการจำลองผ่านโปรแกรม EMTP ที่มีความ แม่นยำสูงเพื่อแสดงผลของอัลกอริทึม พิจารณาการลัดวงจรแบบสองเฟส และทดลองกับระบบ จำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ซึ่งเป็นระบบจริง 132/20 kV ระยะความยาวสายส่ง 20.3 กิโลเมตร งานวิจัยของ Peyman Jafarian และคณะ[2] นำเสนอวิธีแปลงเวฟเลตที่มีประสิทธิภาพสูงและ หลักการวิเคราะห์ท้องถิ่นประกอบมาใช้ประเมินการป้องกันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานี ระยะทางสายส่ง 200 กิโลเมตร แล้วทำการจำลองผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งพบว่ามีความ น่าเชื่อถือ รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำ ครอบคลุมฟอลต์ทุกประเภท และปราศจากสัญญาณรบกวน โดย การจำลองจะพิจารณา บัส, องค์ประกอบลำดับ, การเกิดฟอลต์ที่ขนาดแรงดันสูง/ต่ำ, ฟอลต์ที่เกิด ภายใน/นอกระบบ, มุมที่เกิดการลัดวงจร งานวิจัยของ Tarlochan S. Sidhu and Zhihan Xu[3] เป็นการวิเคราะห์เวฟเลตในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อป้องกันและแยกประเภทฟอลต์ในระบบจำหน่าย เคเบิลใต้ดิน เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับการป้องกันการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้กับระบบจริง โดยทำการจำลองผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC กรณีที่ 1 ระบบจำหน่าย 10 kV มีสายส่งเคเบิลใต้ดิน 5 เส้น, สายส่งเหนือดิน 2 เส้น กรณีที่ 2 ใช้สาย ส่ง IEEE 13-node รวมกับสายส่งเคเบิลใต้ดิน 2 สาย, สายส่งเหนือดิน 8 เส้น กรณีศึกษาคือ ระยะทางที่เกิดฟอลต์, ชนิดฟอลต์, ฟอลต์อิมพีแดนซ์, ฟอลต์ระบบเคเบิลใต้ดินและเหนือดิน งานวิจัย ของ Joe-Air Jiang และคณะ[4] เป็นการนำเสนอกรอบการทำงานแบบไฮบริดจ์ผ่านอัลกอริทึมเพื่อ ทำการตรวจจับตำแหน่งฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่าย โดยเป็นการตรวจจับรูปคลื่นสัญญาณกระแส สามเฟสและรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินขนาด 735 kV ที่ระยะสาย ส่ง 1000 กิโลเมตร เชื่อมต่อกับเครื่องจักรซิงโครนัสขนาด 1500 MW และโหลดอื่นๆ และทำการ จำลองรูปแบบอัลกอริทึมสำหรับสัญญาณที่ไม่คงที่โดยโปรแกรมเวฟเลต และจำลองอัลกอริทึม WT ซึ่งเป็นรูปแบบสมการที่สามารถแยกสัญญาณที่ไม่คงที่และไม่เป็นคาบเวลาในโดเมนเวลาและความถี่ ซึ่งผลการจำลองระบบผ่านอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรมเวฟเลต พบว่าอัลกอริทึมดังกล่าวมีความ ถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์ถึง 99.9% และมีค่าความผิดพลาดในการหาตำแหน่งฟอลต์เฉลี่ยอยู่ที่ 0.54 งานวิจัยของ Nuwan Perera และคณะ[5] นำเสนอถึงการพัฒนา วิธีการป้องกันสำหรับระบบ ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีชุดขดเคเบิลสองวงจร โดยใช้กระแสชั่วคราว วิธีนี้วงจรฟอลต์จะสามารถถูกระงับได้ เฉพาะส่วน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตของกระแส โดยทำการจำลองระบบส่งจ่าย 500

kV, 50Hz ระยะความยาวสาย 400 กิโลเมตร ผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC การเปรียบเทียบระหว่างระยะทางและเฟสป้องกัน พบว่าวิธีนี้สามารถป้องกันได้เร็วขึ้นและน่าเชื่อถือสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีชุดชดเชยสองวงจร โดยพิจารณาชนิดฟอลต์, ระยะทาง, มุมที่เกิดการลัดวงจร

การสร้างอัลกอริทึมด้วยวิธีฟัซซี (Fuzzy) งานวิจัยของ Wen-Hui Chen[6] พบว่าเป็นการนำเทคนิคฟัซซีมาทำการวิเคราะห์ส่วนของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบจำหน่าย ผ่านรหัสไลเนอร์ที่ใช้ร่วมกับเมตริกซ์ โดยทำการประมาณฟอลต์ด้วย โครงข่ายระบบฟัซซี (FCE-Nets) โดยระบบที่นำมาใช้จำลองคือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส โดยที่สถานีไฟฟ้าย่อยมีระดับแรงดันที่ 69 kV ที่บัสบาร์ปฐมภูมิ และที่ 11.4 kV ที่บัสบาร์ทุติยภูมิ อีกทั้งวิธีนี้ยังเหมาะที่จะนำมาใช้ในระบบสการ์ดำ (SCADA) ซึ่งเป็นการออนไลน์ระบบตลอดเวลา งานวิจัยของ Tao Wang และคณะ[7] เป็นการนำเสนอแบบจำลองกราฟิก โดยการวิเคราะห์ฟอลต์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเหตุผลของฟัซซีที่จะช่วยป้องกันระบบนิรเวอร์ล P ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งฟอลต์กรณีเดียวและหลายกรณี ทั้งที่มี/ไม่มีข้อมูลสกาต้า (SCADA) ที่ไม่สมบูรณ์และไม่แน่นอน ซึ่งกรณีศึกษามี 7 กรณี รวมทั้งฟอลต์กรณีเดียวและหลายกรณี งานวิจัยของ Yixin Cai และคณะ[7] เป็นการสร้างโครงร่างแบบจำลองและการจำลองการเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยมีปัจจัยขึ้นกับสิ่งแวดล้อมซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดฟอลต์ เหตุ-ผลของความสัมพันธ์นี้ จะถูกแสดงโดยกฎของฟัซซี งานวิจัยนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบแต่ละท้องถิ่น งานวิจัยของ Krzysztof Solak และคณะ[8] ศึกษาการอ้อมตัวของหม้อแปลงกระแสสลับ(CT) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการปรับปรุงรีเลย์แบบดิฟเฟอเรนเชียลให้สามารถที่ตรวจสอบและป้องกันฟอลต์จากสาเหตุดังกล่าวได้ โดยจะทำการจำลองผ่านโปรแกรม ATP/EMTP ด้วยแบบจำลอง j.r.marti ที่ระยะความยาวสายส่ง 50 กิโลเมตร ระบบ 350MVA ร่วมกับสมการฟัซซี (Fuzzy) ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ภายในการอ้างอิงข้อมูลเพื่อใช้ในรีเลย์ดิฟเฟอเรนเชียล เพื่อปรับปรุงการทำงานของรีเลย์

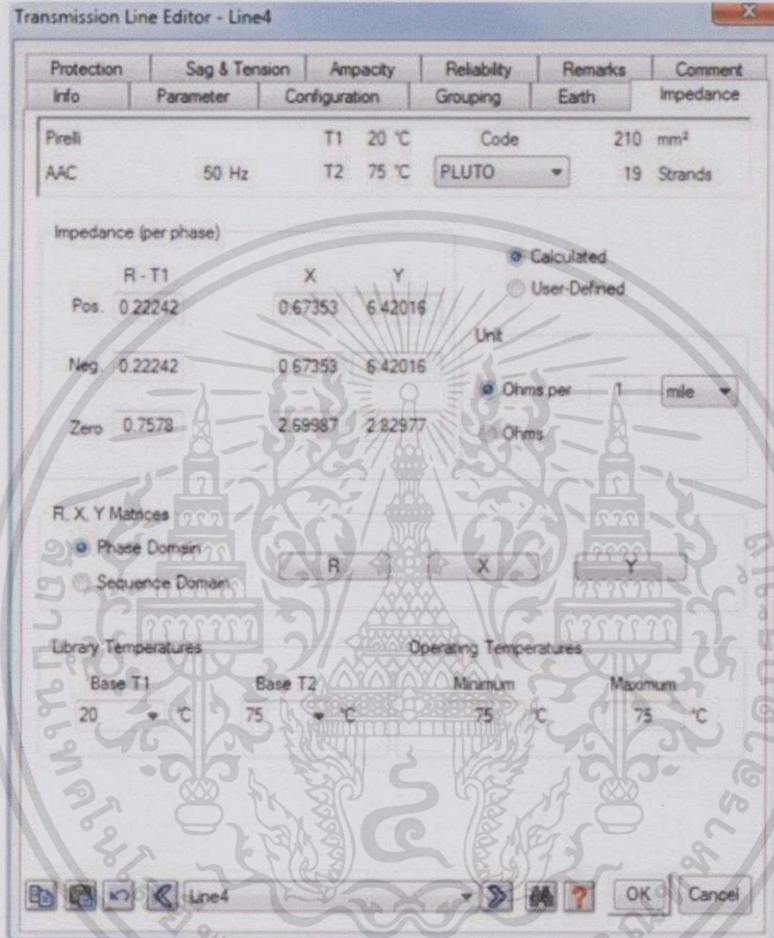
การสร้างอัลกอริทึมด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) งานวิจัยของ N. Perera and A. D. Rajapakse[9] นำเสนอการตัดสินใจด้วยวิธีต้นไม้รูปแบบมาร์คอฟ Markov model และความน่าจะเป็นของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อจำแนกสถานะชั่วคราวที่มาจากฟอลต์ซึ่งมาจากการสวิตชิงปกติ พิจารณารูปคลื่นของกระแสที่เกิดในกรณีต่างๆ เช่น ฟอลต์, สวิตชิงของโหลด, ตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) ทำการสวิตชิงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง ระบบ 230/345-kV, 12-bus ซึ่งถูกจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งพิจารณาถึงผลของอิมพีแดนซ์, สัญญาณรบกวน, การอ้อมตัวของหม้อแปลงกระแส, จุดอาร์กฟอลต์ แล้วทำการบันทึกรูปคลื่นผลการจำลอง พบว่าวิธีนี้มีความแม่นยำ 70-96% งานวิจัยของ H. O. Henriques และคณะ [10] นำเสนอการวินิจฉัยและการสนับสนุนเพื่อระบุตำแหน่งของฟอลต์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นการพัฒนาการประมวลผลข้อมูลนำเข้าสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม รวมทั้งเป็นการจำแนกประเภทของฟอลต์ วิธีนี้จำเป็นต้องได้รับข้อมูลนำเข้าและต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดและส่งข้อมูลแรงดัน โดยอุปกรณ์นี้เหล่านี้จะถูกติดตั้งระหว่างสายส่งในระบบจำหน่าย 138/13,8

kV. แล้วทำการเปรียบเทียบค่าและกราฟทั้งสามเฟส ข้อสรุปคือวิธีโครงข่ายประสาทเทียม เหมาะสำหรับการจัดการฟอลต์ที่เกิดชั่วคราว

การสร้างอัลกอริทึมด้วยการรวมหลายวิธีเข้าด้วยกัน งานวิจัยของ Meisam Pourahmadi-Nakhli and Ali Akbar Safavi[11] วิธีความถี่เฉพาะเส้นทาง โดยใช้เวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม เป็นการสร้างอัลกอริทึม เพื่อระบุตำแหน่งของการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย 6 บัส และ 11 บัส, ระยะความยาวสายส่ง 10 กิโลเมตร (การทดลองจะวัดระยะทางบัสถึงบัส) โหลดขนาด 18.5, 8, 30 MVA อิมพีแดนซ์ฟอลต์เท่ากับ 50,100,150 Ω มุมที่เกิดฟอลต์ คือ $\frac{2\pi}{3}, \frac{7\pi}{6}, \frac{3\pi}{2}$ เรเดียน พบว่าเส้นทางคลื่นฟอลต์จะมีทิศทาง 2 ทาง คือ ออกจากจุดเกิดฟอลต์ และการสะท้อนจากสายส่งปลายทาง หรือจุดต่อระหว่างสายส่ง ขึ้นอยู่กับทิศทางที่ตอบสนองผ่านสัญญาณชั่วคราวที่ความถี่เฉพาะเส้นทางของแต่ละโหมด แรงดันชั่วคราวจะถูกกำจัดโดยฟิวเจอร์ของเวฟเล็ต แล้วใช้วิธีโครงข่ายนิวรอลในการระบุตำแหน่งฟอลต์ แล้วจำลองผ่านโปรแกรม ATP/EMTP and MATLAB ตามลำดับ เพื่อแสดงพฤติกรรมของระบบ พบว่าตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จริงและตำแหน่งจากการจำลองที่บัส 1 มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความความผิดพลาดเท่ากับ 0.1355 กิโลเมตร งานวิจัยของ M. Jaya Bharata และคณะ[12] เป็นการนำเวฟเล็ตมาใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายสามเฟส ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมาก โดยใช้วิเคราะห์ร่วมกับระบบโครงข่าย (GPS) ผ่านกระแสเชิงโครโนซิสในสภาวะชั่วคราว (Transient state) บนพื้นฐานของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งอัลกอริทึม โครงข่ายประสาทเทียม-ฟัสซี (ANFIS) และการวิเคราะห์ความละเอียด (MRA) ใช้ร่วมกับโปรแกรมเวฟเล็ตนี้สามารถทำงานแบบเรียลไทม์ สำหรับการป้องกันระบบ โดยที่การวิเคราะห์นี้มีความแม่นยำสูง เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากอิมพีแดนซ์, ระยะทาง และมุมของฟอลต์ งานวิจัยของ Carlos Frederico M. Almeida and Nelson Kagan[13] นำเสนอการพัฒนาการวินิจฉัยตำแหน่งฟอลต์ในระบบจำหน่ายโดยใช้รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม โดยนำมาประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมพันธุกรรม (GAs) และทฤษฎีของฟัสซี (Fuzzy) ที่นำมาใช้จำลองปัญหาและข้อจำกัดของระบบ เพื่อลดจำนวนของมิเตอร์กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบให้มีจำนวนน้อยที่สุด และยังสามารถใช้ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าในระบบ และเหตุการณ์ต่างๆซึ่งจะนำไปสู่ความผิดปกติของระบบ เช่น แรงดันตก (Voltage sag) ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวนี้เป็นการทำการทดสอบระบบที่มีเครือข่ายสายส่งกำลังไฟฟ้า 154 บัส โดยทำการทดลองที่ฟอลต์ 4 กรณี คือ กรณีหนึ่งเฟสลงดิน, กรณีสองเฟสลงดิน, กรณีสามเฟสลงดิน และกรณีที่รวมกันของทั้งสามกรณี

จากงานวิจัยที่เสนอมาช่างต้นพบว่าโปรแกรมจำลอง (คอมพิวเตอร์) ที่ใช้วิเคราะห์คือ โปรแกรม PSCAD/EMTDC ในงานวิจัย[2,3,5,9], โปรแกรม ATP/EMTP ในงานวิจัย[7,11] โดย

โปรแกรม ATP มีข้อเสียในเรื่องของการจำลองระบบขนาดใหญ่ นั้น จะไม่สามารถให้ค่าที่ละเอียดได้
 ตั้งงานวิจัยของ Jiangtao Li และคณะ[14] นำเสนอโมเดลในการวิเคราะห์การเบรกคานว่นของฉนวน
 กรณีเกิดฟอลต์ในเคเบิล โปรแกรม EMTP ตัวโปรแกรมจะให้สร้างแบบจำลอง และทำการกำหนดค่า
 อิมพีแดนซ์ของระบบ ดังรูปที่ 1.3 [15] , โปรแกรม MATLAB ในงานวิจัย[11]



รูปที่ 1.3 หน้าต่างโปรแกรม EMTP[15]

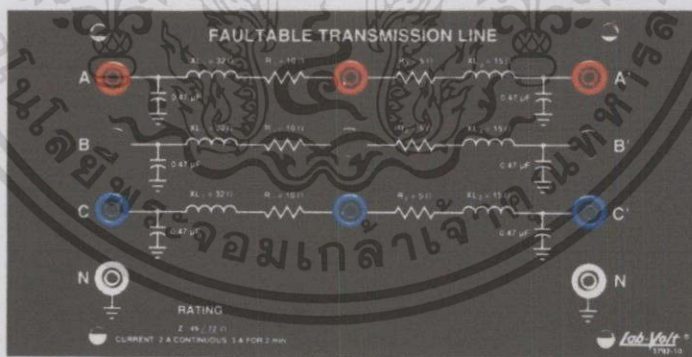
นอกเหนือจากงานวิจัยข้างต้น ตัวอย่างโปรแกรมจำลอง (คอมพิวเตอร์) อื่นที่นำมาใช้
 วิเคราะห์ คือ โปรแกรม PSS/E [16] เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อศึกษา
 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดัน กระแส ฯลฯ เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนจัดการระบบส่ง
 จ่ายกำลังไฟฟ้า รวมไปถึงการจัดการ และการออกแบบเพื่อสร้างเสถียรภาพให้แกระบบ โดยในสวน
 ของโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ผลของการไหลของโหลด (Load Flow), สภาวะพลวัต และการ
 ประมาณราคา ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chia-An Chang และคณะ[17] ศึกษาาระบบกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

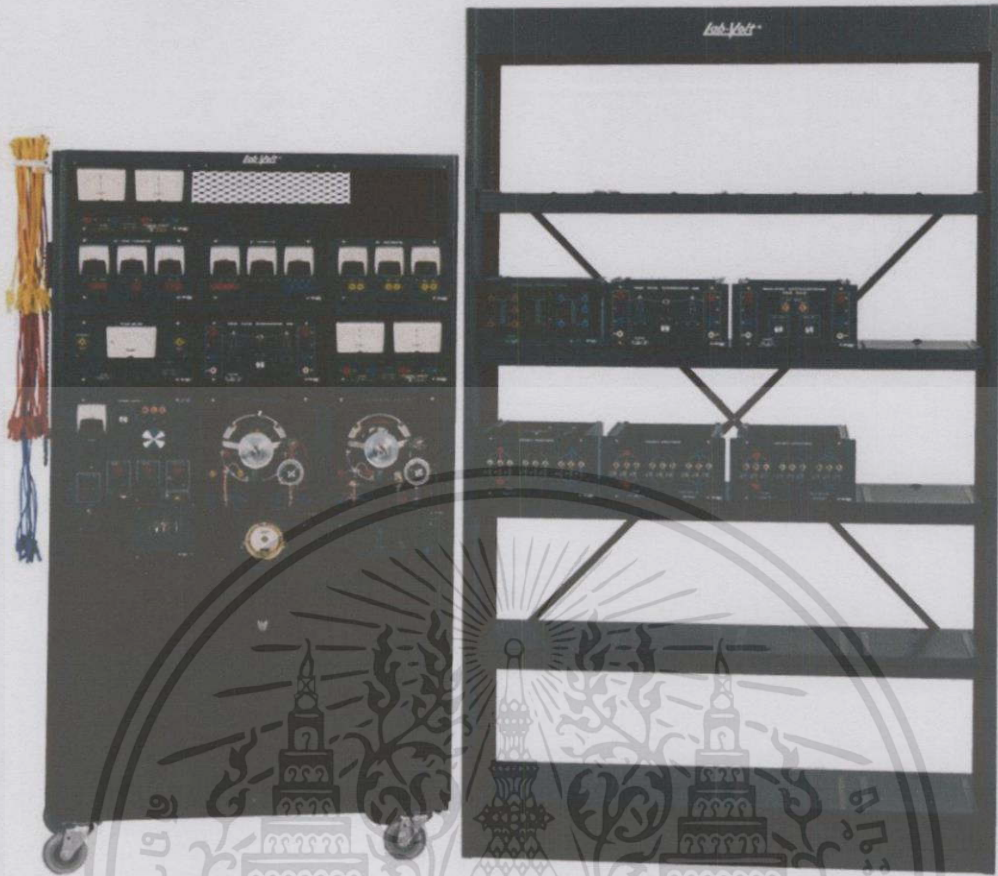
ของ Penghu ระบบ 69 kV โดยทำการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวและสภาวะเสถียรเพื่อกำหนดแผนป้องกันระบบ และกำหนดการทำงานของส่วนอื่นๆ โดยนำเสนอการไหลของโหลดภายใต้ความถี่ที่ลดลง ทำให้สามารถลดแรงดันตกและลดกำลังสูญเสียได้ งานวิจัยของ Jingzhe Tu และคณะ[18] ศึกษาแบบจำลองไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของจีน ขนาด 500 kV มี 3296 บัส, สายส่งกระแสสลับ 2537 เส้น และสายส่งกระแสตรง 4 เส้น โดยการวิเคราะห์ผลของการส่งจ่ายกระแสตรงในการจัดการจุดวิกฤตด้วยตัวเอง (SOC) โดยนำโปรแกรม PSS/E มาใช้วิเคราะห์ รวมทั้งวิเคราะห์ค่าความเสี่ยง(หน่วยเมกะวัตต์) ที่ระบบจะเกิดการล้มแบบขั้นบันได ส่งผลให้เกิดการแบล็กเอาต์ในที่สุด งานวิจัยของ Amir Mehrtash และคณะ[19] นำเสนอการหาค่าการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระบบส่งจ่าย ระหว่างวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดแต่ละจุด

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ความผิดพลาดทางคณิตศาสตร์ (Algorithm) จะใช้ร่วมกันกับโปรแกรมจำลองเฉพาะทางเช่น ATP, PSCAD ฯลฯ หรือร่วมกับโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์เช่น MATLAB เพื่อให้เกิดความแม่นยำและความถูกต้องในการคำนวณที่มากขึ้น

การที่จำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยโปรแกรมหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ผู้ที่ศึกษาไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมของระบบที่กำลังวิเคราะห์ได้ทั้งหมด จึงควรศึกษาพฤติกรรมความผิดพลาดของระบบด้วยชุดทดลองจริงๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น รวมไปถึงการหาวิธีป้องกันการเกิดความผิดพลาดในระบบ และการป้องกันอุปกรณ์ในระบบไม่ให้เกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ



รูปที่ 1.4 แบบจำลองสายส่งสามเฟส[20]



รูปที่ 1.5 แบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า[21]

แต่เนื่องจากชุดทดลองซึ่งเป็นการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ถ้าหากว่ามีความจำเป็นที่ต้องการใช้งานก็จะต้องทำการสั่งซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งอุปกรณ์ที่สั่งซื้อมานั้นก็มักจะเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปซึ่งจะไม่ค่อยเหมาะกับสถานศึกษาเนื่องจากมีราคาที่สูง [20,21] จึงทำให้เกิดปัญหานี้นี้ขึ้น โดยสร้างรูปแบบการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากระบบจำหน่าย และทำการสร้างชุดอุปกรณ์ที่สามารถจำลองการเกิดปัญหาดังกล่าวได้ สำหรับเป็นแนวทางในด้านการศึกษการเกิดลัดวงจรในระบบจำหน่ายและเพื่อให้เกิดความเข้าใจต่อการเกิดลัดวงจรในระบบจำหน่ายมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองที่สามารถจำลองการเกิดสภาวะลัดวงจรขึ้น อีกทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย โดยไม่จำเป็นที่จะต้องนำเข้าสู่ชุดทดลองที่มีลักษณะคล้ายกันจากต่างประเทศ และในอนาคตหากมีการศึกษาชุดทดลองดังกล่าวเพิ่มเติมและมีการนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาดังกล่าวไปต่อยอดซึ่งอาจจะนำไปสู่การพัฒนาการป้องกันระบบจำหน่ายให้มีประสิทธิภาพเพื่อลดระยะเวลาในการเกิดไฟฟ้าดับในระบบจำหน่าย ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นทางเศรษฐกิจ และทำให้การผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีความต่อเนื่อง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าให้มากขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทนี้จึงจำลองระบบจำหน่ายทั้งในส่วนของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน (Overhead Line System) และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดหรือฟอลต์ในระบบสายส่ง โดยการทำชุดทดลองเพื่อการศึกษานี้จะทำในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ค่าแรงดัน 380 โวลต์ และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความต้านทาน (R), ค่าความเหนี่ยวนำ (L), ค่าความเก็บประจุ (C) ซึ่งทำการแปลงระบบหนึ่งหน่วยลงมาจากระดับแรงดันใช้งานจริงของระบบจำหน่ายที่ 115 กิโลโวลต์ โดยจำลองออกมาในรูปของระบบสายส่งแบบพาย (TT) ที่ระยะความยาวต่างๆ ของระบบจำหน่าย

การทำชุดทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดพลาดในระบบสายส่งนี้ ต้องการจำลองระบบให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์และพฤติกรรมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยมีการอ้างอิงชิ้นงานบางส่วนจาก [22] ซึ่งเป็นการทดลองตรวจวัดความผิดพลาดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของสายส่งเหนือดินเท่านั้น แต่ด้วยปัญหาในชุดทดลองตาม [22] คือมีความยุ่งยากในการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับปรับเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการแก้ไขให้ใช้สวิตช์เป็นตัวปรับเลือกค่าพารามิเตอร์แทนการเชื่อมต่อสายไฟในชุดทดลองนี้ นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเพิ่มเติมในส่วน of สายส่งระบบจำหน่ายใต้ดิน และการปรับค่าระยะความยาวของสายส่งในระบบจำหน่ายในระยะต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัญหาการเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่ายโดยใช้ชุดการทดลอง
2. เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบหลังเกิดการลัดวงจร ว่ามีผลกระทบต่อระบบอย่างไรบ้าง
3. เพื่อใช้ในการศึกษาการลัดวงจรในห้องปฏิบัติการทดลอง และเพื่อสร้างความเข้าใจให้แก่

นักศึกษา

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้จะทำการจำลองระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบพาย (π - network) ซึ่งจำลองทั้งระบบส่งเหนือดิน (Overhead Line System) มีระยะทาง 80 กิโลเมตร และระบบส่งเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) มีระยะทาง 70 กิโลเมตร (base 115kV, 300MVA) โดยทำการทดลองที่ระยะความยาวสายที่ 20%-80% ของความยาวสายส่ง

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ เซอร์กิตเบรกเกอร์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ เป็นต้น
2. ศึกษาและเปรียบเทียบข้อมูลเกี่ยวกับกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม ATPDraw เพื่อวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติ (fault) ที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดิน (Overhead Line System) และระบบส่งเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System)

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาค้นหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
2. คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่ง เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ
3. ออกแบบชุดทดลอง จัดหาอุปกรณ์ และติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลอง
4. ทดลองการเกิดความผิดปกติประเภทต่างๆ ตามระยะต่างๆของสายส่ง และบันทึกผลการทดลอง
5. เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation) โดยโปรแกรม ATPDraw
6. สรุปและนำเสนอวิธีการ
7. จัดทำรูปเล่มโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ทางด้านวิศวกรรม

1. ทราบถึงพฤติกรรมของการเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าลักษณะต่างๆ
2. ชุดทดลองสามารถจำลองการเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งสายส่งเหนือดินและสายส่งเคเบิลใต้ดิน
3. ทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากทฤษฎีกับผลที่ได้จากชุดทดลอง
4. ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระแสลัดวงจร
5. เสริมสร้างทักษะทางด้านวิศวกรรมให้กับผู้ทดลอง เช่น การต่อวงจรสายส่งแบบพาย (π - network) ที่ความยาวสายระยะต่างๆ และการต่ออุปกรณ์อื่นๆ, การใช้เครื่องมือทางวิศวกรรม, การทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม และการแก้ไขปัญหา อุปสรรค ที่เกิดขึ้นระหว่างการศึกษาโครงการนี้
6. การสร้างชุดทดลองนี้ทำให้ผู้ศึกษามีความเข้าใจและเห็นภาพ มากกว่าการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือจากทฤษฎี

ทางการศึกษาและวิจัย

1. สามารถใช้เป็นชุดสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรในระบบจำหน่ายเหนือดินและเคเบิลใต้ดิน
2. สามารถประหยัดรายจ่ายจากการจัดซื้อชุดทดลองสำเร็จรูปจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงและคุณสมบัติในการใช้งานไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

เดือน การดำเนินงาน	ส.ค. 2557		ก.ย. 2557		ต.ค. 2557		พ.ย. 2557		ธ.ค. 2557		ม.ค. 2558		ก.พ. 2558		มี.ค. 2558		เม.ย. 2558		พ.ค. 2558	
	1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎี	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→
2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	
3. ออกแบบ จัดทำอุปกรณ์และ สร้างชุดทดลอง	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	
4. ทดลองการเกิดความผิดพร่อง และบันทึกผลการทดลอง	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	
5. เปรียบเทียบผลการทดลองจริง กับผลจากการจำลองทาง คอมพิวเตอร์	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	
6. สรุปผลและนำเสนอวิธีการ	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	
7. จัดทำรูปเล่มโครงการ	←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→		←→	

←---→ : ระยะเวลาปฏิบัติงาน

←→ : ระยะเวลาที่วางแผน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พารามิเตอร์ระบบส่ง [28]

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือนดินและเคเบิลใต้ดินจะมีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ค่าซึ่งมีผลกระทบต่อความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรงพารามิเตอร์เหล่านั้นคือ

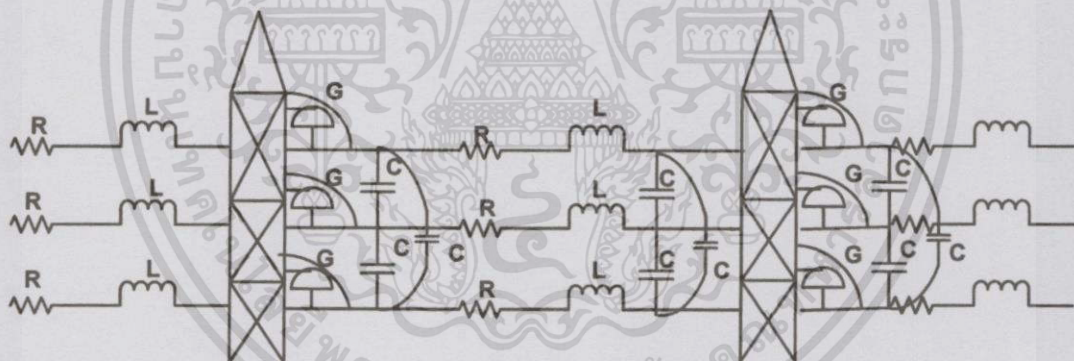
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance: R)

ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance: L)

ความจุไฟฟ้า (Capacitance: C)

ความนำไฟฟ้า (Conductance: G)

จากรูปที่ 2.1 สังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดความยาวสายซึ่งอยู่ในรูปอิมพีแดนซ์อนุกรม (Series Impedance) ในขณะที่ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance: G) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance: C) ที่อยู่ระหว่างสาย ตัวนำของสายไฟฟ้า 1 เฟสหรือระหว่างสายเฟสกับสายนิวทรัล (Neutral) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟสอยู่ในรูปของแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance) โดยปกติจะตัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) ทิ้งเพราะค่าความนำไฟฟ้านี้ส่งผลต่อค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance) น้อยมาก



รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า [22]

โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของระบบส่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าระยะทาง และลักษณะของการวิเคราะห้วงจร โดยเมื่อเกิดการลัดวงจร ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบส่งที่ระยะแหล่งกำเนิดจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจรจะเป็นค่ากำหนดกระแสลัดวงจร ถ้ายิ่งใกล้แหล่งกำเนิดก็จะมีค่ากระแสลัดวงจรมาก โดยปริญญาณิพนธ์นี้ ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันสูง (Transmission Line) ระยะกลางที่วิเคราะห์ห้วงจรแบบ π (Nominal - π) ซึ่งเกิดจากการลัดวงจรทั้งแบบสมมูล และไม่สมมูล โดยละเลยค่าความต้านทานของระบบส่ง (R) เนื่องจากค่าขนาดอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์คือค่า (R) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดยังไม่สามารถทนกระแสลัดวงจรได้

2.2 ปริมาณเพอร์ยูนิต [28]

ค่าเพอร์ยูนิต (Per Unit System) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าจริง (Actual Value) ต่อบุ้ค่าฐาน (Base Value) เขียนสมการได้เป็น

$$\text{Per unit value} = \frac{\text{Actual value}}{\text{Base value}} \quad (2.1)$$

แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์จะเกี่ยวข้องกับการเลือกค่าฐาน (Base Value) และจะต้องใช้ 2 ค่าเพื่อนำมาคำนวณค่าฐานที่เหลืออยู่อีก 2 ค่า โดยปกติค่าฐาน (Base) ที่กำหนด คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าและค่าฐานแรงดันไฟฟ้า และมาหาค่าฐานอิมพีแดนซ์และค่าฐานกระแสไฟฟ้า

$$\text{Base I} = \frac{\text{Base VA}_{3\phi}}{\sqrt{3}\text{Base V}_{LL}} \quad (\text{A/ph}) \quad (2.2)$$

$$\text{Base Z} = \frac{(\text{Base V}_{LL})^2}{\text{Base VA}_{3\phi}} = \frac{(\sqrt{3}\text{Base V}_{LN})^2}{\text{Base VA}_{3\phi}} \quad (\Omega/\text{ph}) \quad (2.3)$$

การเปลี่ยนค่าฐานของปริมาณเพอร์ยูนิต (Changing The Base Of Per Unit Quantities) บางครั้งต้องการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิต (Per - Unit Impedance) ของระบบหนึ่งให้ไปอยู่อีกระบบหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ทั้งหมดให้อยู่ในค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Impedance Base) สมการ

$$Z_{\text{pu}_{\text{new}}} = Z_{\text{pu}_{\text{old}}} \left(\frac{\text{base V}_{\text{old}}}{\text{base V}_{\text{new}}} \right)^2 \left(\frac{\text{base VA}_{\text{new}}}{\text{base VA}_{\text{old}}} \right) \quad (2.4)$$

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในระบบส่ง [28]

การคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดินและเคเบิลใต้ดิน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเขียนอยู่ในรูปสมการของค่าที่ปลายด้านส่ง (Sending-end Value) ซึ่งอยู่ในตัวแปรของค่าที่ปลายด้านรับ (Receiving-End Value) ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

เมื่อ

V_S คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดส่งต่อเฟส

V_R คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดรับต่อเฟส

I_S คือ กระแสไฟฟ้าที่จุดส่ง

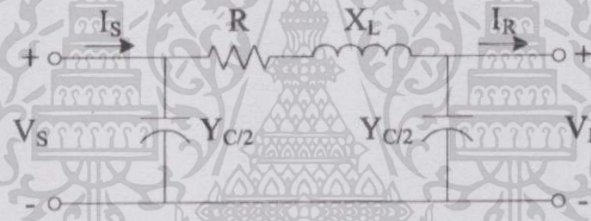
ระบบส่งระยะกลาง (Medium line) ความยาวสาย 80 -240 กิโลเมตร แต่การวิเคราะห์ระบบส่งระยะกลางนี้ต้องคำนึงถึงค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance) ด้วย โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าความจุไฟฟ้ามาใช้ในการคำนวณ เพราะระบบส่งมีความยาวเพิ่มมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้กระแสไฟฟ้าอัดประจุ (Charging current : I_C) มีผลต่อระบบ ด้วยเหตุนี้จึงมองข้ามค่าความจุไฟฟ้าไม่ได้ แต่สำหรับค่า ความนำไฟฟ้า (G) ซึ่งขนานอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า (C) นั้นมีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาคิด สำหรับระบบส่งระยะกลางนี้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถแยก วิเคราะห์เป็น 2 ลักษณะ คือ วงจรแบบ π (Norminal - π) และวงจรแบบ T (Norminal - T) ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะพิจารณาแต่วงจรแบบ π เท่านั้น เนื่องจากวงจรแบบ π มีความแม่นยำกว่าวงจรแบบ T

ลักษณะของการวิเคราะห์วงจรแบบ π (Norminal - π) จะนำเอาอิมพีแดนซ์อนุกรมรวม (Lumped Series Impedance) ที่อนุกรมกับระบบส่งวางไว้ตรงกลางของช่วงระบบส่ง และนำค่าความจุไฟฟ้ารวม (C) มาแบ่งเป็นส่วนเท่าๆกัน แล้วนำไปต่อในลักษณะขนานที่ปลายด้านส่งของระบบส่ง และปลายด้านรับของระบบส่งอย่างละหนึ่งตัว สำหรับการหาค่าคงที่ A B C และ D ของระบบส่งระยะกลาง พิจารณาจาก

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y + \frac{ZY^2}{4} & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของระบบส่งระยะกลางแบบ π

2.4 ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า [23,24]

พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม และเศรษฐกิจ ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าขยายตัวมากยิ่งขึ้น ถ้าหากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น ย่อมส่งผลเสียหายต่อระบบการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรก็จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบการป้องกันระบบไฟฟ้าให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นแก่ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าในกรณีที่ระบบมีความผิดปกติ เพื่อที่จะลดผลเสียทั้งในด้านชีวิตและทรัพย์สินอันเกิดจากสาเหตุดังกล่าว สำหรับความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆ ต่อไปนี้

2.4.1 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 10-90 % ของระดับแรงดันปกติเป็นเวลาไม่เกิน 1 นาทีโดยลักษณะตัวอย่างที่สังเกตได้คือ การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ เมื่อเริ่มสตาร์ท จะมีการกระพริบของหลอดไฟแสงสว่าง และเครื่องจักรบางส่วนอาจจะหยุดทำงาน

สาเหตุ

- อาจเกิดจากการลัดวงจรหรือ Fault ในระบบระบบส่งไฟฟ้ากำลังภายนอกอาคารหรือโรงงาน
- อาจเกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์พร้อมๆกัน หลายๆตัว
- หรืออาจเกิดจากการสตาร์ทของมอเตอร์ขนาดใหญ่

การแก้ไข

- ออกแบบระบบไฟฟ้าให้เป็น Underground Circuit
- ใช้ Ferroresonant Transformer
- ใช้ Power Conditioner (Voltage Stabiliser) หรือ Uninterrupted Power Supply (UPS)
- ปรับชุดควบคุมมอเตอร์ให้มีค่า Threshold ของ Voltage Sag Sensitivity ที่ต่ำ เพื่อป้องกันการ Trip โดยไม่จำเป็น

2.4.2 แรงดันไฟฟ้ากระชอกแบบช่วงยาว (Voltage Swell) เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเพิ่มขึ้นอีก 10% จากระดับแรงดันปกติ เป็นเวลา 1 นาที ซึ่งอาจจะทำให้เครื่องจักรอุปกรณ์ทำงานผิดปกติ และเกิดความเสียหายได้ ตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่น เมื่อทำการหยุดเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่พร้อมๆกัน จะมีการกระพริบของไฟแสงสว่างโดยจะสว่างขึ้นมากกว่าเดิมในช่วงที่มีแรงดันไฟฟ้าเกิน อาจส่งผลให้เครื่องจักรไฟฟ้าทำงานผิดปกติหรือแม้กระทั่งหยุดทำงานได้

สาเหตุ

- การหยุดเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่
- การต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบไฟฟ้า

การแก้ไข

- ใช้ Power Conditioner (Voltage Stabilizer) ที่มีค่า Sensivity สูง

2.4.3 แรงดันไฟฟ้ากระชอกช่วงสั้น (Voltage Transient) เป็นสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากทันทีทันใดในระยะเวลาที่สั้นมาก อาจส่งผลให้เครื่องจักรและอุปกรณ์เกิดการทำงานผิดปกติหรือเสียหายได้ ตัวอย่างเช่น เกิดฟ้าผ่าที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า ทำให้เกิดการกระชอกแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้เครื่องจักรทำงานผิดปกติหรือหยุดการทำงาน

สาเหตุ

- การเกิดฟ้าผ่าที่สายดินของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Overhead Ground Wire)
- เกิดจาก Electrostatic Discharge
- เกิดจาก Load Switching
- เกิดจาก การสับสวิตช์ Capacitor Bank

การแก้ไข

- ใช้ Isolation Transformer เพื่อแยกระบบ Ground ออกจากกันเพื่อลดการรบกวน

- ใช้ Surge Arrester หรือ Filter

2.4.4 แรงดันไฟฟ้าตก (Under Voltage) เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 90% ของระดับแรงดันปกติ เป็นผลให้มอเตอร์ดึงกระแสไฟฟ้ามากกว่าปกติ ส่งผลให้เกิดความร้อนสูง อาจหยุดหมุนและไหม้ หลอดไฟสว่างไม่เต็มที่ จนถึงอุปกรณ์เครื่องจักรหยุดการทำงาน

สาเหตุ

- อาจเกิดจากการที่เดินสายเคเบิลไปยังอุปกรณ์ที่ระยะทางไกลๆ ส่งผลให้เกิดแรงดัน Drop หรือแรงดันสูญเสียในสาย
- เกิดจากระบบไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ (Low Power Factor)

การแก้ไข

- ใช้สายเคเบิลขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟ
- ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น
- ใช้ Voltage Stabilizer

2.4.5 แรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นอีก 10% จากระดับแรงดันปกติเป็นเวลานานเกินกว่า 1 นาที ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงใน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และอาจทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุดและเสียหายได้

สาเหตุ

- อาจเกิดจาก การต่อคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น
- อาจเกิดจาก เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การแก้ไข

- ใช้ระบบควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ
- ใช้ Voltage Stabiliser

2.5 ลักษณะการเกิดลัดวงจร [25,26,27,29]

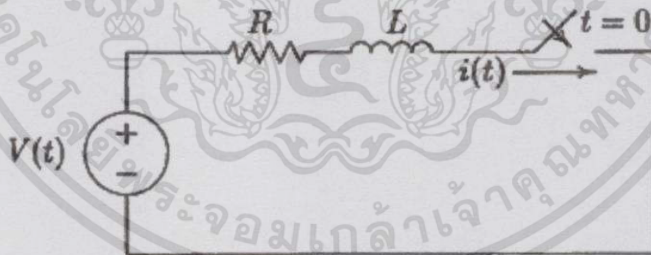
การลัดวงจรสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเนื่อฉนวนของตัวอุปกรณ์อาจเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากหลากหลายสาเหตุ เช่น มีแรงดันเกินเข้ามาในระบบเนื่องจากเกิดฟ้าผ่า, เกิด Surge เนื่องจากการสับอุปกรณ์สวิตช์กำลัง, ฉนวนไม่บริสุทธิ์เนื่องมาจากการกัดกร่อนของไอเกลือทะเล หรือสารเคมี, หรือสาเหตุทางกลอื่นๆ ในการพิจารณาหาค่ากระแสลัดวงจรนั้นจะพิจารณาจากแรงดันภายใน (Internal Voltage) ของเครื่องจักรกลเชิงโครนิส กับอิมพีแดนซ์ของระบบที่อยู่ระหว่างเครื่องจักรกลเชิงโครนิสกับจุดเกิด fault กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะมีขนาดของกระแสสูงกว่าค่ากระแสที่สภาวะปกติอยู่หลายเท่า ถ้าหากมีการไหลเข้ามาในระบบอาจจะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงแก่ตัวอุปกรณ์ เช่น ที่ตัวขดลวด หรือ ตัวบัสบาร์ ที่อาจจะเกิดการโค้งงอตัวเนื่องมาจากแรงทางแม่เหล็กปริมาณมากที่เกิดขึ้นขณะเกิด fault และอาจจะสร้างความเสียหายให้แก่ระบบได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเคลียร์ fault ออกจากระบบให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

โดยฟอลต์ (Fault) เป็นปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ

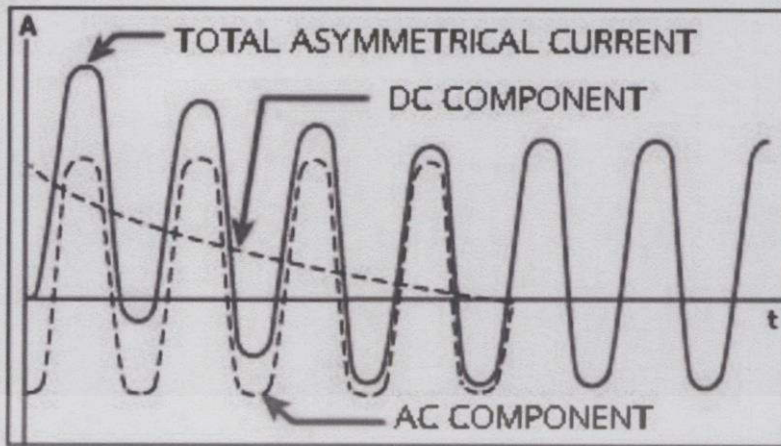
1. ฟอลต์อนุกรม (Series Fault) เป็นสภาวะผิดปกติในเฟสของระบบ เช่น ระบบส่งขาด หรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟสเป็นต้น โดยฟอลต์อนุกรมจะใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

2. ฟอลต์ขนาน (Shunt Fault) เป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับดิน (Ground) ได้แก่ การลัดวงจรแบบต่างๆ ฟอลต์ขนานมีความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรม เพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานจะมีสูงมากจนทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ประโยชน์ของการศึกษาฟอลต์ขนานนั้นจะใช้สำหรับการหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ เป็นต้น

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรด้วยวงจร R-L Transient พิจารณาจากวงจรความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (R-L circuit) ที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Sinusoidal Voltage Source) ดังรูปที่ 2.3 โดยปิดสวิตช์ที่ $t = 0$ ในการพิจารณาขั้นตอนแรกให้ประมาณการลัดวงจรเป็นแบบ 3 เฟสสมมูลที่ขั้วของ Synchronous Generator โดยที่ยังไม่พิจารณาผลของโหลด กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) มีค่าเท่ากับ 0, V_m ของ Generator คงที่ และมุมเริ่มต้นของ Generator เท่ากับ α ทำให้กระแสขณะเกิดการลัดวงจร อาจมีส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ซึ่งจะลดลงด้วยเวลาคงที่ที่เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของ X/R ของวงจร ปริมาณของส่วนประกอบกระแสตรงนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาหรือมุมบนรูปคลื่นไซน์ของแรงดันขณะเกิดการลัดวงจร กรณีเกิดการลัดวงจรในระบบชนิด 3 เฟสพร้อมๆกัน ขณะนั้นแรงดันไม่เท่ากันทุกเฟส มีอย่างน้อย 1 เฟส ที่มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย และจะมีค่ากระแสสูงสุดในเฟสที่มีแรงดันใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 2.3 วงจรสำหรับการวิเคราะห์สภาวะทรานเซียน



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของกระแสผิดพ้อง

จากรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายลักษณะของกระแสผิดพ้องหรือกระแสลัดวงจรได้ โดยขณะที่เกิดความผิดพ้องในระบบ ถ้าแรงดันของระบบขณะที่เกิดการลัดวงจรเท่ากับศูนย์ จะทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) เกิดขึ้น โดยส่วนประกอบกระแสตรงจะมีค่าสูงสุด และจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาจนหายไป หากแรงดันของระบบขณะที่เกิดการลัดวงจรมีค่าสูงสุด จะทำให้ไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรง (ดังรูปเส้นประ) แต่หากแรงดันของระบบขณะที่เกิดการลัดวงจรมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ก็จะมีส่วนประกอบกระแสตรงเกิดขึ้นอยู่ แต่มีค่าลดน้อยลงมา หรืออธิบายได้ดังสมการ

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \gamma) \quad (2.7)$$

โดยที่

I_m คือ ขนาดของกระแสสูงสุด ($I_m = V_m/Z$)

α คือ มุมการเกิดการลัดวงจรของรูปคลื่นแรงดัน

γ คือ มุมระหว่างแรงดันกับกระแส ($\tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$)

τ คือ ค่าคงที่ของเวลา (L/R)

ซึ่งสมการ 2.7 ประกอบไปด้วยส่วนประกอบกระแสสลับ (AC Component) ก็คือพจน์แรกของสมการ ($I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma)$) และส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ก็เป็นพจน์หลังของสมการ ($I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \gamma)$)

ส่วนประกอบกระแสตรงสามารถพิจารณาจากค่า α และ γ โดยที่ $\alpha - \gamma = 0$ ส่วนประกอบกระแสตรงจะไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าหาก $\alpha - \gamma = -\frac{\pi}{2}$ จะเกิดส่วนประกอบกระแสตรง ที่มีค่าสูงสุด

สรุป การศึกษาลัดวงจรมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประกอบในการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ รีเลย์ เป็นต้น ให้สามารถป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้อย่างสมบูรณ์ และตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ ตัดส่วนของระบบเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับจุดลัดวงจรออกให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเดือดร้อนในเรื่องดังกล่าว

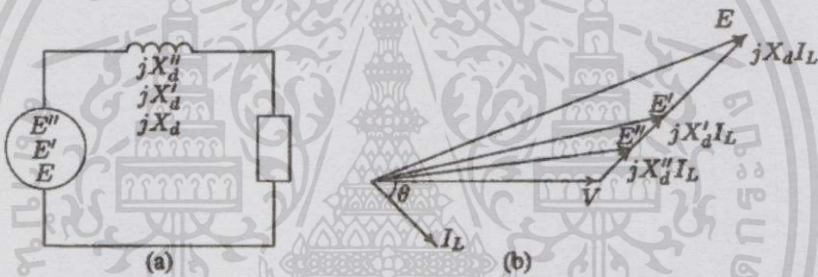
2.6 การศึกษาฟอลต์แบบสมมาตร [25,26,31]

ฟอลต์สมมาตรจัดว่าเป็นฟอลต์ที่มีความรุนแรงมากที่สุดเนื่องจากเกิดจากการลัดวงจรทั้ง 3 เฟสพร้อมๆกัน และมีขนาดของกระแสผิดพลาดมากที่สุด ในบรรดาฟอลต์ต่างๆ แต่มีโอกาสเกิดน้อยที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการคำนวณหากระแสลัดวงจรนั้นแบบสมมาตรนั้นมีหลายวิธี เช่น

1. คัดแรงดันภายในเครื่องจักรที่มีโหลดโดยมีสภาวะทรานเซียนต์ (Internal Voltage of Loaded Machines Under Transient Condition)
2. คัดจากหลักการของเทเวนิน (Thevenin)
3. คัดจากอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z bus)

วิธีที่ 1 คัดแรงดันภายในเครื่องจักรที่มีโหลดโดยมีสภาวะทรานเซียนต์ (Internal Voltage of Loaded Machines Under Transient Condition)

หลักการ : หาค่าแรงดันภายในของเครื่องจักรกลให้ได้ตามแต่ละช่วงเวลาที่ต้องการ จากนั้นหาค่ากระแสลัดวงจรจากกฎของโอห์ม



รูปที่ 2.5 a) ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของ Generator ขณะต่อกับโหลด
b) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ Generator ขณะต่อกับโหลด

จากนั้นทำการหาค่าแรงดันภายใน E_g จากการวน KVL ของวงจรในแต่ละช่วงเวลาต่างๆดังนี้

$$1. \text{Sub Transient : } E'' = V_T + jx_d'' I_L \tag{2.8}$$

$$2. \text{Transient : } E' = V_T + jx_d' I_L \tag{2.9}$$

$$3. \text{Steady State : } E = V_T + jx_d I_L \tag{2.10}$$

เมื่อได้ค่าแรงดันภายในที่ต้องการแล้วก็สามารถหาค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรได้จากกฎของโอห์มคือ

$$I_f = \frac{E}{z} \tag{2.11}$$

ข้อเสียของการคิดแบบวิธีแรงดันภายในคือ ถ้าหากหากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้เวลาในการคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์นานมาก

วิธีที่ 2 คัดจากหลักการเทเวนิน (Thevenin) หลักการ : วิธีเทเวนินจะมีคิดผลของกระแสโหลด โดยจะใส่ แหล่งจ่าย Source ในจุดเกิดฟอลต์ และจะทำการ ลัดวงจรแหล่งจ่าย (Short Source) ตัวอื่นๆในระบบให้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของวิธีเทเวนินคือมีความสะดวกและใช้เวลาน้อยอีกทั้งยังได้ผลลัพธ์เท่ากับการคำนวณแบบแรงดันภายใน และสามารถใช้ในการคำนวณระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

วิธีที่ 3 คิดจากอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z_{bus}) วิธีนี้จะยังคงอ้างอิงหลักการของเทเวนินอยู่ สำหรับการพิจารณานั้นจะต้องทำการแปลงระบบให้อยู่ในรูปของแบบฟอร์มเมทริกซ์ Z_{bus}

หลักการคำนวณวิธี Z_{bus}

1. ต้องทำการหาค่าแรงดันเริ่มต้นของแต่ละบัสในรูปเมทริกซ์ก่อน
2. หาเมทริกซ์ Z_{bus} ของระบบให้ได้
3. หาค่ากระแสฟลด์สมมาตร ณ บัสใดๆ จากสมการ

$$I_n(F) = \frac{V_n(F)}{Z_{nn} + Z_f} \quad (2.12)$$

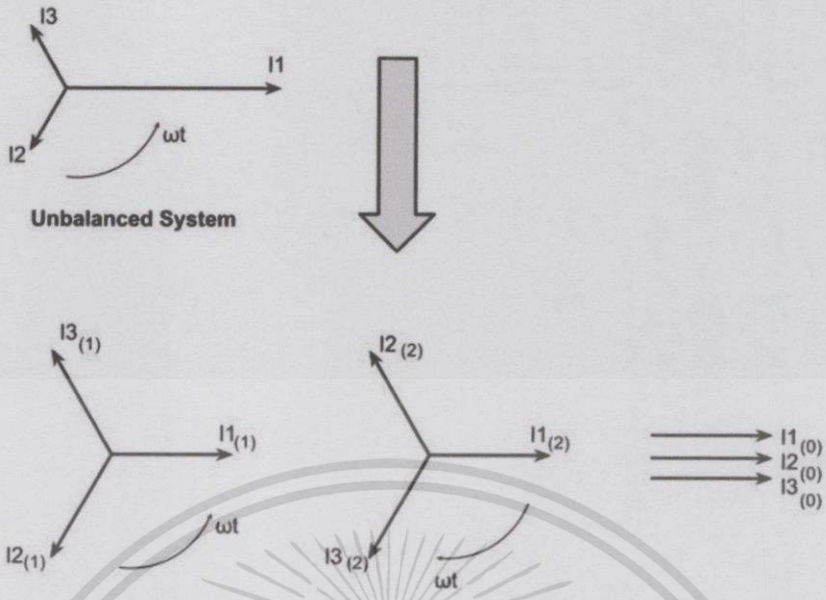
โดยที่ Z_{nn} หาได้จากเมทริกซ์ Z_{bus} และ n = บัสที่เกิดการลัดวงจร

ข้อดีของวิธีการ Z_{bus} คือสามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรได้อย่างสะดวกและรวดเร็วโดยใช้หลักการเดิมคือเทเวนิน แต่มีข้อเสียก็คือ การคำนวณจะมีความยุ่งยากมากขึ้นเมื่อระบบมีมากกว่า 3 บัสขึ้นไป

2.7 การศึกษาฟลด์แบบไม่สมมาตร [25,26,27,30,31]

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ฟลด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะเป็นฟลด์แบบไม่สมมาตร เนื่องจากโอกาสที่จะเกิดฟลด์พร้อมกันทีเดียว 3 เฟสมีความเป็นไปได้น้อย ซึ่งฟลด์ไม่สมมาตรอาจเกิดจาก สายตัวนำหนึ่งหรือสองเส้นเกิดขาดหรือโหดไม่สมดุลก็ได้ เมื่อเกิดฟลด์แบบไม่สมมาตรจะทำให้เกิดกระแสไม่สมดุลไหลเข้าระบบ การแก้ปัญหาของการเกิดฟลด์แบบไม่สมมาตรนั้นจะไม่สามารถทำได้เช่นเดียวกับฟลด์แบบสมมาตร เนื่องจากขณะเกิดฟลด์ไม่สมมาตรนั้น ค่าขนาดของกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสจะไม่เท่ากัน และมุมต่างเฟสจะไม่ต่างกัน 120° ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ฟลด์แบบไม่สมมาตรนั้นจะมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) และแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นมา (Augmented Component Model)

2.7.1 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) หลักการขององค์ประกอบสมมาตรคือ แก่ระบบ 3 เฟสที่ไม่สมดุลให้อยู่ในส่วนประกอบย่อยที่สมดุลโดยส่วนประกอบดังกล่าวประกอบด้วย ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence) ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของ Symmetrical Component

โดยกำหนดให้แต่ละเฟสห่างกัน 120 องศา
 ทำการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ให้ เฟส a = 1, b = 2, c = 3 ตามรูปที่ 2.18 จะได้

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} \tag{2.13}$$

$$\vec{I}_b = \vec{I}_{b1} + \vec{I}_{b2} + \vec{I}_{b0} \tag{2.14}$$

$$\vec{I}_c = \vec{I}_{c1} + \vec{I}_{c2} + \vec{I}_{c0} \tag{2.15}$$

และกำหนดให้ a operator คือ $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ จะได้

Positive sequence :

$$\vec{I}_{a1} = \vec{I}_{a1} \tag{2.16}$$

$$\vec{I}_{b1} = a^2 \vec{I}_{a1} \tag{2.17}$$

$$\vec{I}_{c1} = a \vec{I}_{a1} \tag{2.18}$$

Negative sequence :

$$\vec{I}_{a2} = \vec{I}_{a2} \tag{2.19}$$

$$\vec{I}_{b2} = a \vec{I}_{a2} \tag{2.20}$$

$$\vec{I}_{c2} = a^2 \vec{I}_{a2} \tag{2.21}$$

Zero sequence :

$$\vec{I}_{a0} = \vec{I}_{b0} = \vec{I}_{c0} = \vec{I}_{a0} \tag{2.22}$$

จากนั้นหาความสัมพันธ์ของลำดับเฟสเซอร์ในแต่ละเฟส
 ก่อนนำ Sequence มาพิจารณา :

$$\begin{aligned} \vec{I}_a &= \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_b &= \vec{I}_{b1} + \vec{I}_{b2} + \vec{I}_{b0} \\ \vec{I}_c &= \vec{I}_{c1} + \vec{I}_{c2} + \vec{I}_{c0} \end{aligned}$$

ภายหลัง Sequence มาพิจารณา :

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{I}_b = a^2 \vec{I}_{a1} + a \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} \quad (2.24)$$

$$\vec{I}_c = a \vec{I}_{a1} + a^2 \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} \quad (2.25)$$

จัดให้สมการที่ (2.26),(2.27),(2.28) อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\vec{I}_{abc} = A \vec{I}_{012} \quad (2.28)$$

$$\vec{I}_{012} = A^{-1} \vec{I}_{abc} \quad (2.29)$$

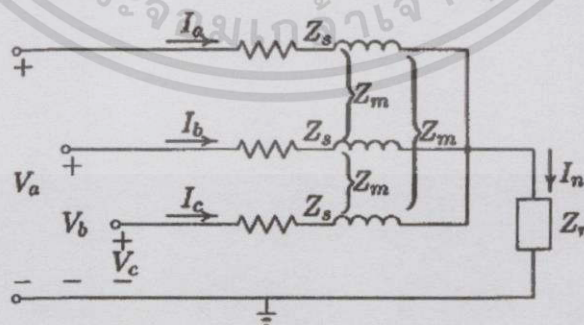
สำหรับแรงดันก็จะมีลักษณะที่คล้ายกันกับเมทริกซ์กระแสตั้งสมการที่ (2.30) กำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$S_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.30)$$

$$S_{3\phi} = 3[V_0 I_0^* + V_1 I_1^* + V_2 I_2^*] \quad (2.31)$$

2.7.2 แบบจำลองที่เพิ่มขึ้นมา (Augmented Component Model) เป็นการหาลำดับอิมพีแดนซ์ (Impedance Sequence) ของอุปกรณ์ต่างๆที่มีอยู่ในระบบเช่น Y-Balance Load, ระบบส่ง, หม้อแปลง 3 เฟส และ Generator ขอบเขตการพิจารณาสำหรับโครงการวิศวกรรมฉบับนี้จะเน้นไปที่อุปกรณ์ 3 ส่วนเท่านั้นคือ Balance Load ระบบส่ง และ Generator

1. Balance Load



รูปที่ 2.7 Balance

Y Connected

Load

จากรูปกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z_m : Mutual impedance

Z_s : Self impedance

Z_n : Neutral impedance

จากนั้นใช้กฎ KVL ในแต่ละเฟสตามวงจรจะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพีแดนซ์และกระแสออกมาในรูปของเมทริกซ์ ดังนี้

$$V_a = Z_s I_a + Z_m I_b + Z_m I_c + Z_n I_n \quad (2.32)$$

$$V_b = Z_m I_a + Z_s I_b + Z_m I_c + Z_n I_n \quad (2.33)$$

$$V_c = Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c + Z_n I_n \quad (2.34)$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.35)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[V_{abc}] = [Z_{abc}][I_{abc}] \quad (2.37)$$

ทำการคูณสมการที่ (2.40) ทั้ง 2 ข้างด้วย A เมทริกซ์ จะได้

$$\begin{aligned} [A][V_{012}] &= [Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}] &= [A^{-1}][Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}] &= [Z_{012}][I_{012}] \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$[Z_{012}] = [A^{-1}][Z_{abc}][A] \quad (2.39)$$

จะได้

$$\begin{aligned} [Z_{012}] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.40)$$

จากนั้นทำการเขียน Sequence Network ออกมาเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการลัดวงจรต่อไป

$$[V_{012}] = [Z_{012}][I_{012}]$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2. ระบบส่ง

กำหนดให้ Z_s : ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบส่ง, V_{a1} : แรงดันเฟส a ที่ต้นทาง, V_{a2} : แรงดันเฟส a ที่ปลายทาง
จากนั้นใช้กฎ KVL ในแต่ละเฟสตามวงจรจะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน
อิมพีแดนซ์และกระแสออกมาในรูปของสมการดังนี้

$$V_{a1} = Z_s I_a - Z_n I_n + V_{a2} \quad (2.42)$$

$$V_{b1} = Z_s I_b - Z_n I_n + V_{b2} \quad (2.43)$$

$$V_{c1} = Z_s I_c - Z_n I_n + V_{c2} \quad (2.44)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} V_n &= 0 + Z_n I_n \\ I_n + I_a + I_b + I_c &= 0 \end{aligned}$$

ทำการแทนค่า I_n กลับเข้าไปในสมการที่ (2.45),(2.46),(2.47) จากนั้นจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์
จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$[V_{abc1}] = [Z_{abc}] [I_{abc}] + [V_{abc2}] \quad (2.46)$$

คูณสมการ (2.49) ทั้ง 2 ข้างด้วย เมตริกซ์ A จะได้

$$\begin{aligned} [A][V_{012-1}] &= [Z_{abc}][A][I_{012}] + [A][V_{012-2}] \\ [V_{012-1}] &= [A^{-1}][Z_{abc}][A][I_{012}] + [V_{012-1}] \\ [V_{012-1}] &= [Z_{012}][I_{012}] + [V_{012-2}] \\ [Z_{012}] &= [A^{-1}][Z_{abc}][A] \end{aligned}$$

จากนั้นทำการแก้สมการเมตริกซ์เพื่อหาค่า Sequence Impedance เมตริกซ์

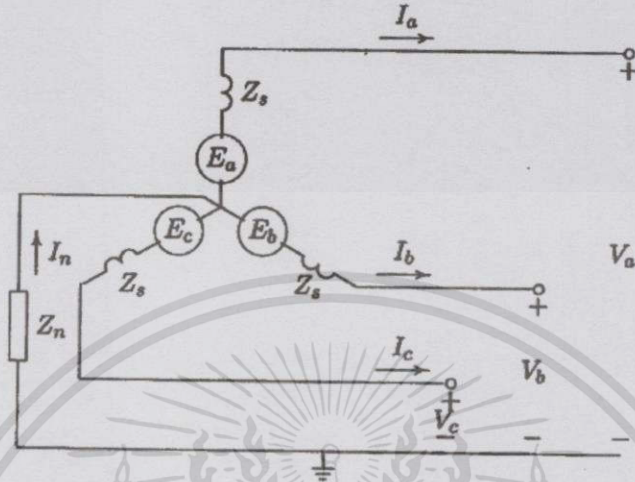
$$\begin{aligned} [Z_{012}] &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.47) \end{aligned}$$

จากนั้นทำการเขียน Sequence Network ออกมาเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการลัดวงจรต่อไป

$$[V_{012-1}] = [Z_{012}][I_{012}] + [V_{012-2}]$$

$$\begin{bmatrix} V_{0-1} \\ V_{1-1} \\ V_{2-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{0-2} \\ V_{1-2} \\ V_{2-2} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

3. Sequence Network of Balance Loaded Generator



รูปที่ 2.8 แหล่งจ่าย 3 เฟสสมดุล และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

ใช้หลักการ KVL วงในแต่ละเฟสจะได้อสมการออกมาดังนี้

$$V_a = E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \quad (2.49)$$

$$V_b = E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \quad (2.50)$$

$$V_c = E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \quad (2.51)$$

จากนั้นแทนค่า $I_n = I_a + I_b + I_c$ ในสมการที่ (2.52), (2.53), (2.54) จากนั้นจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

หรือ
$$V^{abc} = E^{abc} - Z^{abc} I^{abc} \quad (2.53)$$

จากนั้นทำการคูณ Symmetrical Component ของ Generator ทั้งสองข้างของสมการ ด้วยเมทริกซ์ A

$$AV_a^{012} = AE_a^{012} - Z^{abc} AI_a^{012} \quad (2.54)$$

แล้วทำการคูณกลับด้วยเมทริกซ์ A^{-1} จะได้

$$\begin{aligned} V_a^{012} &= E_a^{012} - A^{-1} Z^{abc} AI_a^{012} \\ V_a^{012} &= E_a^{012} - Z_a^{012} AI_a^{012} \end{aligned} \quad (2.55)$$

เมื่อกำหนดให้

$$[Z_{012}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

ทำการคูณเมทริกซ์ในสมการที่ (2.59) ทั้งหมดจะได้

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

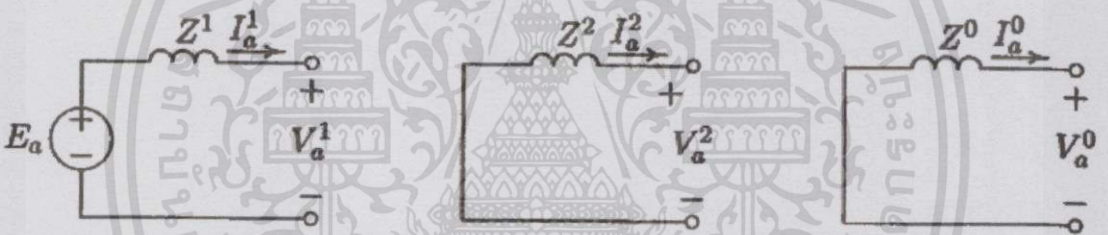
โดยที่

$$E_a^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

นำสมการที่ (2.60),(2.61) แทนค่ากลับในสมการที่ (2.58) จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

จากนั้นทำการเขียน Sequence Network ออกมาเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการลัดวงจรต่อไป

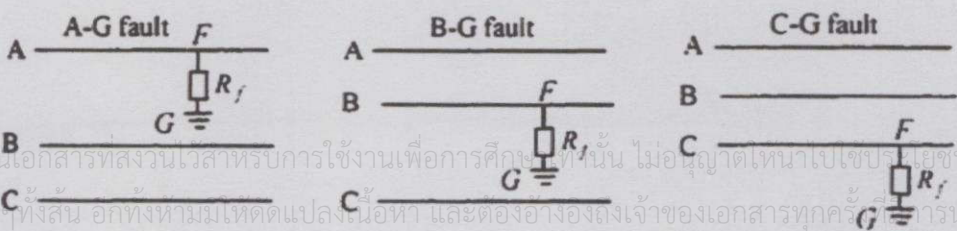


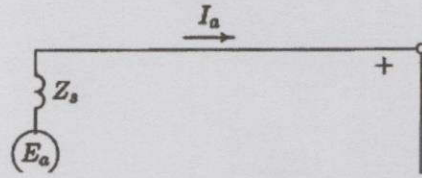
รูปที่ 2.9 Sequence Network ของ Generator ลำดับ 0, ลำดับ +, ลำดับ -

2.8 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน [26,27,30,31]

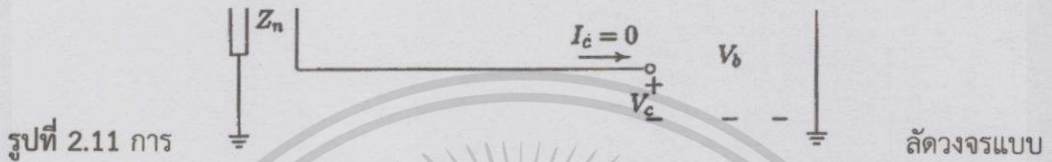
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นความผิดปกติอย่างหนึ่งที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุดและบ่อยที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีสาเหตุมาจากสายตัวนำของเฟสใดเฟสหนึ่งมีการไปพาดกับตัวโครงเสาหรือมีเส้นทางที่จะทำให้กระแสมีการไหลลงสู่ดิน ซึ่งอาจจะเกิดจากมนุษย์เช่น รถชนเสาไฟฟ้าทำให้ระบบส่งขาดไปพาดกับตัวโครงเสาไฟฟ้า หรือคนปีนเสาไฟฟ้า ช่างซ่อมบำรุงประสบบอุบัติเหตุโดยนำเอาส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายไปพาดกับเสาไฟฟ้าและสายตัวนำ หรือเกิดจากธรรมชาติเช่น เมื่อมีพายุฝนฟ้าคะนองอาจจะเกิดลมกรรโชกแรงส่งผลให้ต้นไม้หักโค่นไปพาดกับสายตัวนำ หรือเกิดจากฟ้าผ่าใส่ระบบส่งอาจทำให้เกิดการแฟลชข้ามลูกถ้วย เป็นต้น

ในการวิเคราะห์นั้นเราจะกำหนดให้เฟสใดเฟสหนึ่งของระบบมีการลัดวงจรลงดิน โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.10 จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาลำดับอิมพีแดนซ์ (Sequence Impedance) ต่อไป





รูปที่ 2.10 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินในแต่ละเฟส



รูปที่ 2.11 การ

หนึ่งเฟสลงดินที่เฟส a

กำหนดให้

$$I_a = I_f, I_b = I_c = 0, V_a = Z_f I_a \tag{2.60}$$

จากนั้นทำการแทนค่าเงื่อนไขต่างๆลงใน Symmetrical Component ของเมทริกซ์กระแส

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.61}$$

ได้ผลลัพธ์ออกมาดังนี้

$$\vec{I}_{a0} = \vec{I}_{a1} = \vec{I}_{a2} = \frac{1}{3} \vec{I}_a \tag{2.62}$$

แต่เนื่องจากว่า $I_b = I_c = 0$ แทนค่าใน Symmetrical Component ของระบบ

$$V_a = E_a - (Z_0 + Z_1 + Z_2) I_{a0} \tag{2.63}$$

จากรูปที่ 2.25 จะพบว่า $V_a = Z_f I_a$ ทำการแทนค่ากลับเข้าไปในสมการที่ (2.66)

$$3Z_f I_{a0} = E_a - (Z_0 + Z_1 + Z_2) I_{a0}$$

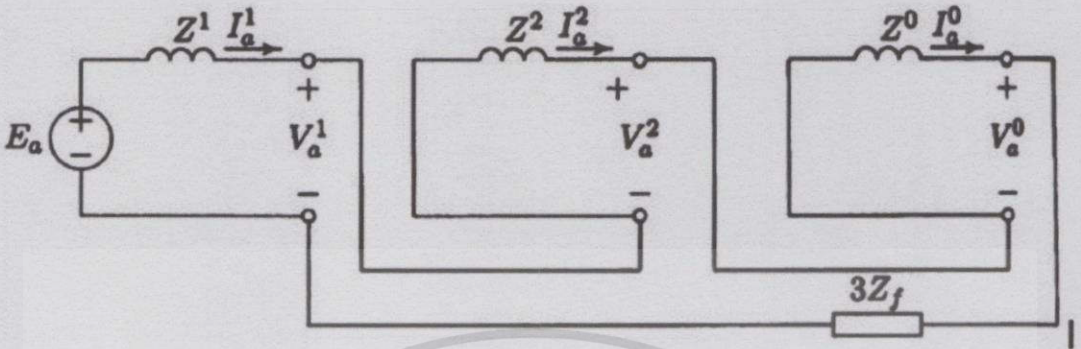
ทำการย้ายข้างสมการเพื่อที่จะหา I_{a0} ดังนี้

$$I_{a0} = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \tag{2.64}$$

ดังนั้นจะได้สมการสำหรับใช้หาค่ากระแสฟอลต์ดังนี้

$$I_a = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \tag{2.65}$$

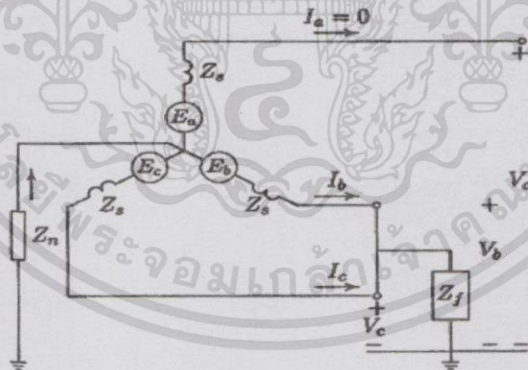
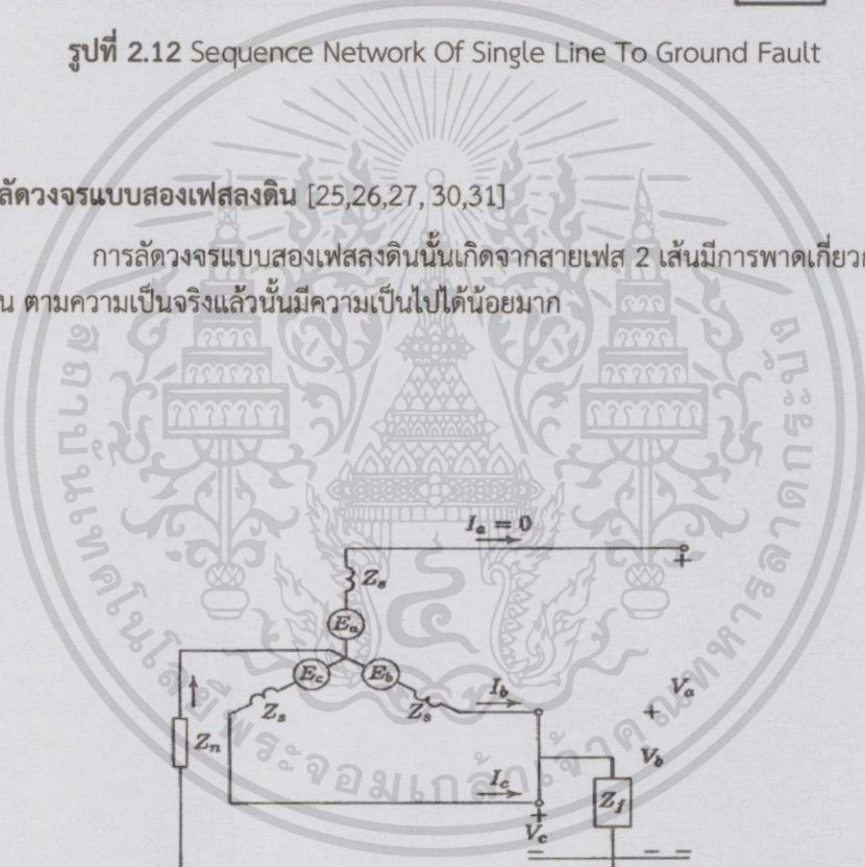
จากนั้นทำการเขียน Sequence Network เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาค่าแรงดันและกระแสของการลัดวงจรดังนี้



รูปที่ 2.12 Sequence Network Of Single Line To Ground Fault

2.9 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน [25,26,27, 30,31]

การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินนั้นเกิดจากสายเฟส 2 เส้นมีการพาดเกี่ยวกันแล้วจึงพาดลงดิน ตามความเป็นจริงแล้วนั้นมีความเป็นไปได้น้อยมาก



รูปที่ 2.13 ลักษณะ

การเกิดลัดวงจร

แบบสองเฟสลงดิน

เมื่อพิจารณาจากรูปแล้วสามารถเขียนสมการเงื่อนไขได้ดังนี้

$$V_b = V_c = Z_f(I_b + I_c), I_f = I_b + I_c \tag{2.66}$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \tag{2.67}$$

เนื่องจาก

$$V_b = V_c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\vec{V}_b = a^2\vec{V}_{a1} + a\vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} \quad (2.68)$$

$$\vec{V}_c = a\vec{V}_{a1} + a^2\vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} \quad (2.69)$$

จากสมการดังกล่าวจะได้

$$\vec{V}_{a1} = \vec{V}_{a2} \quad (2.70)$$

$$V_b = V_c = Z_f(I_b + I_c) \quad (2.71)$$

หลังจากนั้นให้ทำการแทนค่ากระแสของ Symmetrical Component ลงในสมการที่ (2.74)

$$\begin{aligned} V_b &= Z_f(a^2\vec{I}_{a1} + a\vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} + a\vec{I}_{a1} + a^2\vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0}) \\ &= Z_f(2\vec{I}_{a0} - \vec{I}_{a1} - \vec{I}_{a2}) \\ &= 3Z_f\vec{I}_{a0} \end{aligned} \quad (2.72)$$

จากนั้นนำค่า V_b ที่หาได้กลับไปแทนใน $\vec{V}_b = a^2\vec{V}_{a1} + a\vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0}$ และจากเงื่อนไขในสมการที่ (2.73) จะได้

$$3Z_f\vec{I}_{a0} = V_{a0} - V_{a1} \quad (2.73)$$

จากสมการ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

โดยมีที่มาจาก Sequence Network ของ Generator ให้ทำการนำค่า V_{a0}, V_{a1} มาแทนค่าในสมการด้านบน จะได้

$$I_{a0} = \frac{-(E_a - Z_1 I_{a1})}{Z_0 + 3Z_f} \quad (2.75)$$

$$I_{a2} = \frac{-(E_a - Z_1 I_{a1})}{Z_2} \quad (2.76)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (2.77)$$

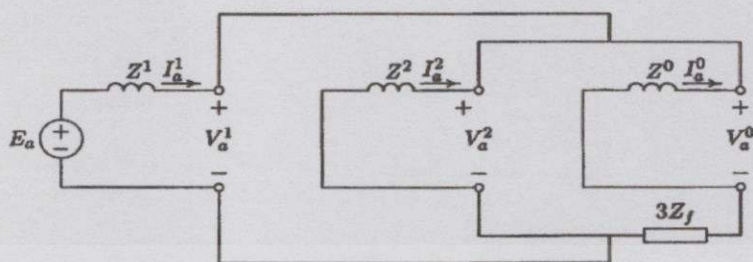
และเนื่องจากกระแสฟอลต์เกิดจาก $I_f = I_b + I_c$ ดังนั้นจาก Symmetrical Component ของกระแส

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

จะได้

$$I_f = I_b + I_c = 3I_{a0}$$

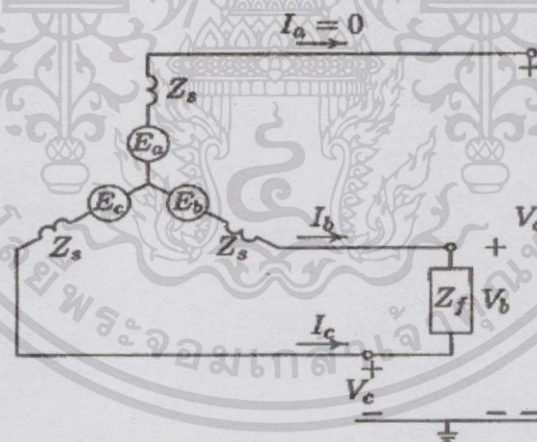
จากนั้นทำการเขียน Sequence Network เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาค่าแรงดันและกระแสของการลัดวงจรดังนี้



รูปที่ 2.14 Sequence Network Of Double Line To Ground Fault

2.10 การลัดวงจรแบบสองเฟส [25,26,27, 30,31]

การลัดวงจรแบบสองเฟสเกิดขึ้นจากการที่สายเฟสใดเฟสหนึ่งไปพาดกับสายเฟสอีกเฟส ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเกิดขึ้นต่ำ



รูปที่ 2.15 การ

เฟส

ลัดวงจรแบบสอง

เมื่อพิจารณาจากรูปแล้วสามารถเขียนสมการเงื่อนไขได้ดังนี้

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (2.79)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (2.80)$$

$$I_a = 0 \quad (2.81)$$

จากนั้นให้ทำการแทนค่าเงื่อนไขดังกล่าวลงใน Symmetrical Component ของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{I}_b \\ -\vec{I}_b \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

ทำการพิจารณาสมการที่ (2.85) จะได้

$$I_{a0} = 0 \quad (2.83)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \quad (2.84)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \quad (2.85)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.87) และ (2.88) จะพบว่า

$$-I_{a2} = I_{a1} \quad (2.86)$$

จาก Symmetrical Component ของแรงดันที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเริ่มต้นจะได้

$$V_b - V_c = (a^2 - a)(V_{a1} - V_{a2}) = Z_f I_b \quad (2.87)$$

จากการพิจารณาระบบพบว่า

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

ทำการแทนค่า V_{a1}, V_{a2} จากสมการดังกล่าวลงในสมการที่ (2.90) จะได้

$$(a^2 - a)(E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1}) = Z_f I_b \quad (2.89)$$

จากนั้นแทนค่า I_b ในสมการที่ (2.92) ด้วย I_b จากสมการที่ (2.87) จะได้

$$E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1} = Z_f \frac{3I_{a1}}{(a - a^2)(a^2 - a)} \quad (2.90)$$

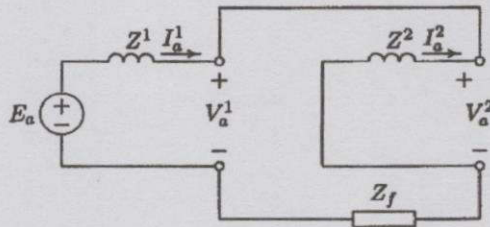
แก้สมการหาค่า I_{a1} จะได้

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.91)$$

ทำการหาค่ากระแสจริงของแต่ละเฟสจะได้

$$I_b = -I_c = (a^2 - a)I_{a1} = -j\sqrt{3}I_{a1} \quad (2.92)$$

จากนั้นทำการเขียน Sequence Network เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาค่าแรงดันและกระแสของการลัดวงจรดังนี้



รูปที่ 2.16 Sequence Network ของการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

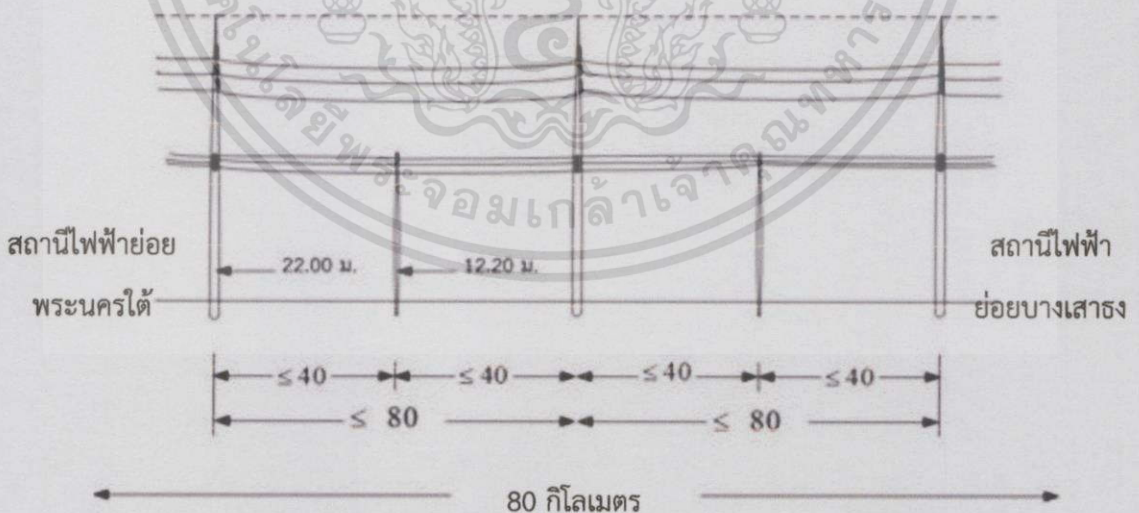
บทที่ 3

การออกแบบการจำลองการเกิดความพร้อมในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

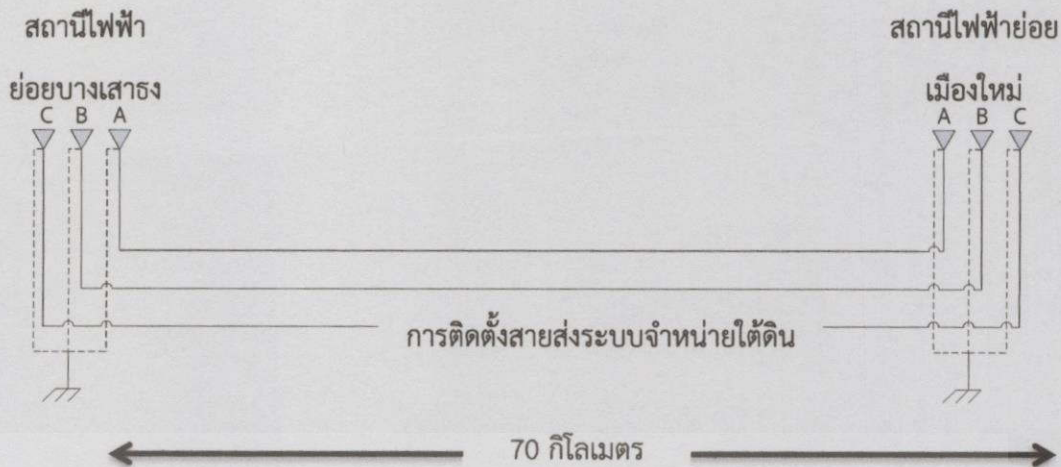
โครงการวิศวกรรมนี้จะทำการจำลองระบบสายส่งในระบบจำหน่ายจากบริเวณ สถานีไฟฟ้าพระนครใต้ – สถานีไฟฟ้าบางเสาธง สำหรับระบบสายส่งเหนือดิน และสถานีไฟฟ้าบางเสาธง - ถึงสถานีไฟฟ้าเมืองใหม่ สำหรับระบบสายส่งใต้ดิน โดยสถานีไฟฟ้างกล่าวอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) โดยช่วงสถานีดังกล่าวรับกำลังไฟฟ้าทั้งหมดจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยมีจุดแบ่งการรับผิดชอบที่เกี่ยวข้องกับสถานีไฟฟ้าทั้ง 2 คือที่สถานีไฟฟ้าเทพารักษ์ขนาด 300 MVA (KT 1A) โดยข้อมูลที่สำคัญของระบบคือ ขนาดแรงดันระบบจำหน่าย 115 kV ทำการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามพื้นที่รับผิดชอบในระยะทางหลายกิโลเมตรโดยแบ่งเป็นสายส่งเหนือดินและสายส่งใต้ดิน แต่สำหรับโครงการวิศวกรรมนี้จะทำการจำลองด้วยระยะทางเพียงแค่บางส่วนของระบบเท่านั้น โดยแบ่งระบบสายส่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) ระบบสายส่งเหนือดิน 115 กิโลโวลต์ ระยะทางสายส่ง 80 กิโลเมตร
- 2) ระบบสายส่งใต้ดิน 115 กิโลโวลต์ ระยะทางสายส่ง 70 กิโลเมตร

ซึ่งในโครงการวิศวกรรมนี้จะจำลองระบบสายส่งในรูปของวงจรสมมูลพายแบบระยะปานกลางของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยลักษณะการติดตั้งสายส่งในระบบจำหน่ายสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1-3.2 สำหรับสายส่งระบบจำหน่ายเหนือดินและระบบจำหน่ายใต้ดินตามลำดับ



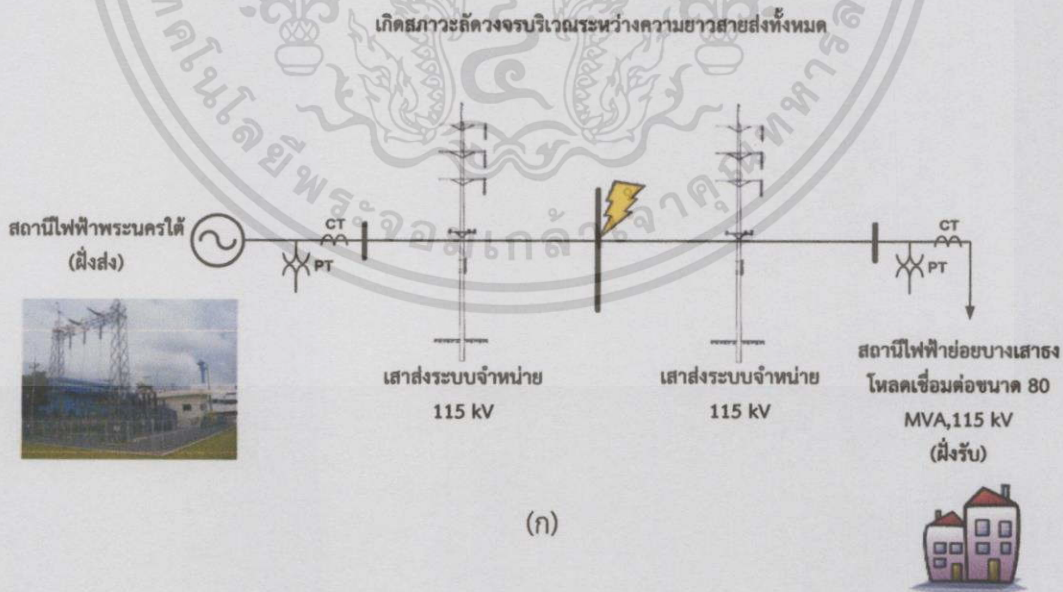
รูปที่ 3.1 สายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดินของการไฟฟ้า 115 kV ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยพระนครใต้ ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธง [35]



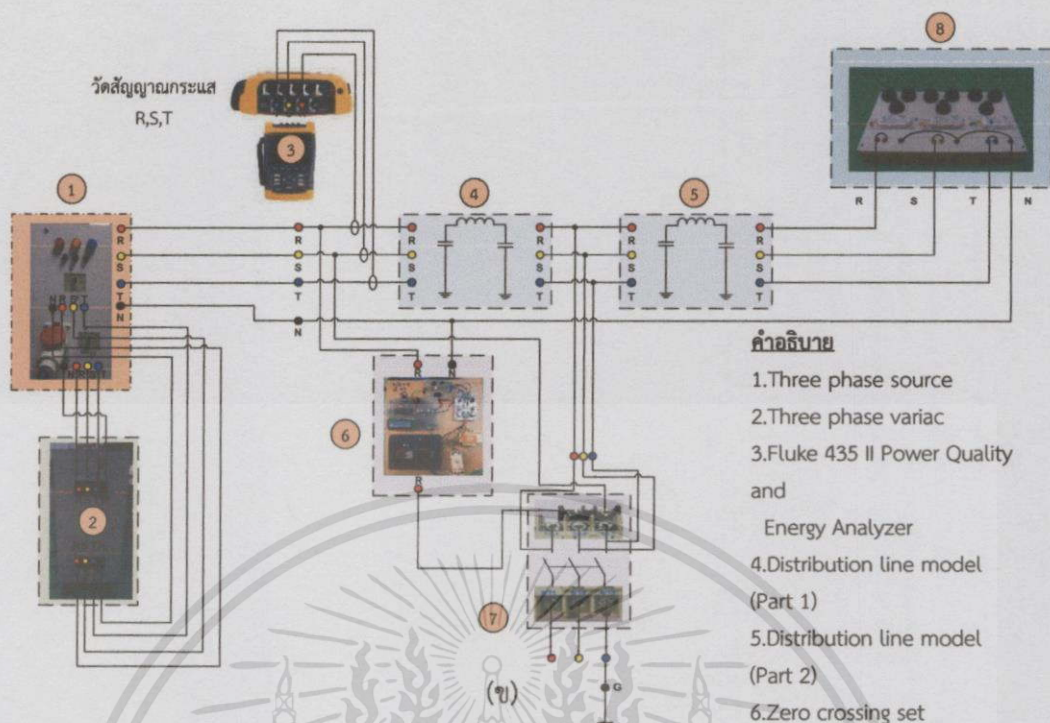
รูปที่ 3.2 สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้า 115 kV ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงถึงสถานีไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่ [36]

3.1 การออกแบบชุดทดลองแบบจำลองสายส่งระบบจำหน่ายเหนือดินและใต้ดิน

แนวความคิดในการออกแบบชุดทดลองดังกล่าวสามารถเขียนออกมาในรูปของแผนผังภาพเส้นเดียวและภาพรวมการออกแบบชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



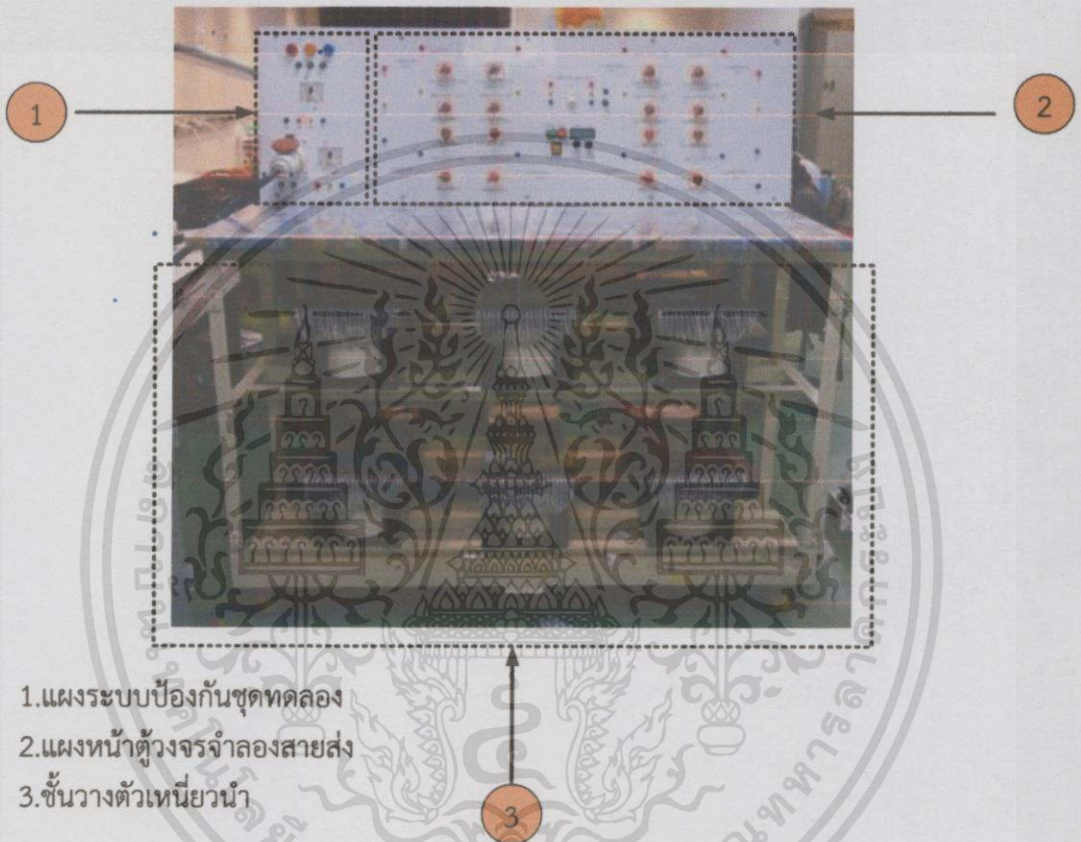
รูปที่ 3.3 (ก) ตัวอย่างแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายเหนือดิน

(ข) แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง

โดยสามารถอธิบายแนวคิดการออกแบบเบื้องต้นได้จากรูปที่ 3.3 (ก) โดยสายส่งของระบบจำหน่ายการไฟฟ้านครหลวงจะรับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยพระนครไต้จากนั้นจะถูกส่งจ่ายผ่านเสาสูงที่ขนาดแรงดัน 115 kV ไปยังโหลดขนาด 80 MVA, 115 kV และมีการเกิดสภาวะลัดวงจรที่บริเวณสายส่งขึ้น และจากรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งเป็นรูปของแผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลองโดยสามารถอธิบายได้คือชุดทดลองจะรับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสจากห้องปฏิบัติการขนาด 400 V (หมายเลข 1 รูปที่ 3.3 (ข)) จากนั้นจะถูกส่งต่อมายังหม้อแปลงปรับค่าได้แบบ 3 เฟส (หมายเลข 2 รูปที่ 3.3 (ข)) เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้แก่ชุดทดลองและเปรียบเสมือนเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยบริเวณฝั่งส่งเมื่อพิจารณาคู่กับรูปที่ 3.3 (ก) ลำดับถัดมากำลังไฟฟ้าก็จะถูกส่งย้อนกลับมายังส่วนป้องกันของชุดทดลอง (หมายเลข 1 รูปที่ 3.3 (ข)) หลังจากที่กำลังไฟฟ้าทั้งหมดไหลผ่านในส่วนของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดก็จะเข้าสู่ชุดเครื่องมือวัดที่มีการเชื่อมต่อจากภายนอก (หมายเลข 3 รูปที่ 3.3 (ข)) โดยจะทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ด้านฝั่งส่งของวงจร จากนั้นกำลังไฟฟ้าก็จะเข้าสู่วงจรจำลองสายส่งของระบบจำหน่ายส่วนแรกและส่วนที่สอง (หมายเลข 4,5 รูปที่ 3.3 (ข) ตามลำดับ) โดยที่จุดกึ่งกลางระหว่างวงจรจำลองสายส่งของระบบจำหน่ายส่วนแรกและส่วนที่สองจะทำการเชื่อมต่อกับ Magnetic Contactor (หมายเลข 7 รูปที่ 3.3 (ข)) ที่ถูกควบคุมมุมการลัดวงจรโดยชุด Zero Crossing (หมายเลข 6 รูปที่ 3.3 (ข)) เพื่อทำการจำลองการเกิดการลัดวงจรในสายส่ง และสุดท้ายกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งต่อไปยังโหลด (หมายเลข 8 รูปที่ 3.3 (ข)) โดยทำการคงค่าแรงดันหน้าโหลดไว้ที่ 400 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ชุดทดลองวงจรสมมูลแบบพายในโครงการวิศวกรรมนี้ จะมีการดัดแปลงโดยใช้โครงตู้เป็นเหล็กให้สามารถรองรับน้ำหนักของตัวเหนี่ยวนำได้ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งลักษณะชุดทดลองจะประกอบไปด้วยแผงระบบป้องกัน (หมายเลข 1 รูปที่ 3.4) แผ่นผนังหน้าต่างวงจรจำลองสายส่ง (หมายเลข 2 รูปที่ 3.4) โดยที่บริเวณด้านหลังจุดดังกล่าวจะเป็นที่ติดตั้งชั้นวางตัวเก็บประจุ แมกเนติกคอนแทคเตอร์และอุปกรณ์อื่นๆอีกด้วย สุดท้ายคือชั้นวางตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด 12 ตัว (หมายเลข 3 รูปที่ 3.4)



- 1.แผงระบบป้องกันชุดทดลอง
- 2.แผ่นหน้าต่างวงจรจำลองสายส่ง
- 3.ชั้นวางตัวเหนี่ยวนำ

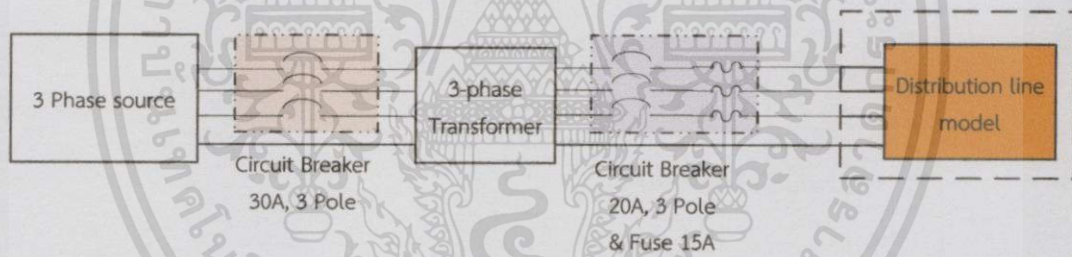
รูปที่ 3.4 โครงตู้ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่าย

3.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

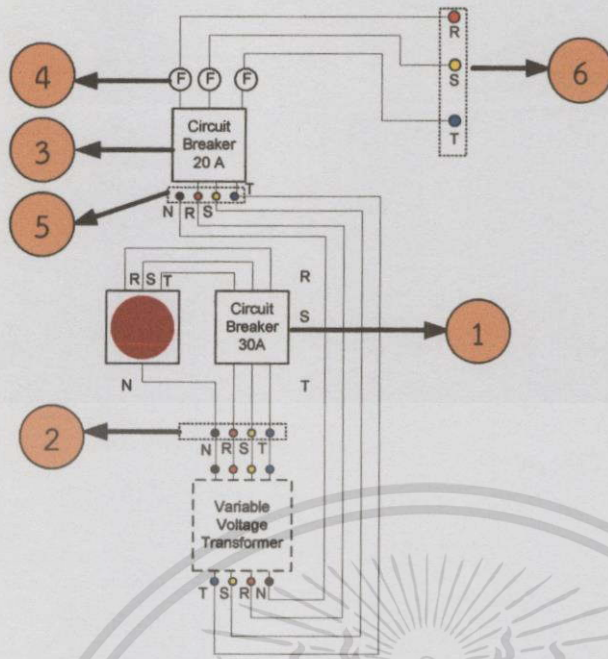
โครงการวิศวกรรมชิ้นนี้อาศัยแรงดันไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าเท่ากับ 400 V ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อกับหม้อแปลงปรับค่าได้แบบ 3 เฟส เพื่อที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่ชุดทดลองต่อไป ซึ่งสาเหตุที่ต้องใช้แหล่งจ่ายเป็นหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟสนั้น เนื่องจากขณะที่ทำการทดลองเปลี่ยนภาระของชุดทดลอง อาจจะทำให้แรงดันที่ฝั่งส่งของวงจรมีค่าเปลี่ยนไป จึงเป็นสาเหตุให้ต้องใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟสทำการปรับระดับแรงดันให้คงที่นั่นเอง โดยพิกัดของหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟสที่มีขนาดเท่ากับ 420 V_{ac} , 30 A 3 Phase

3.1.2 การป้องกันชุดทดลอง

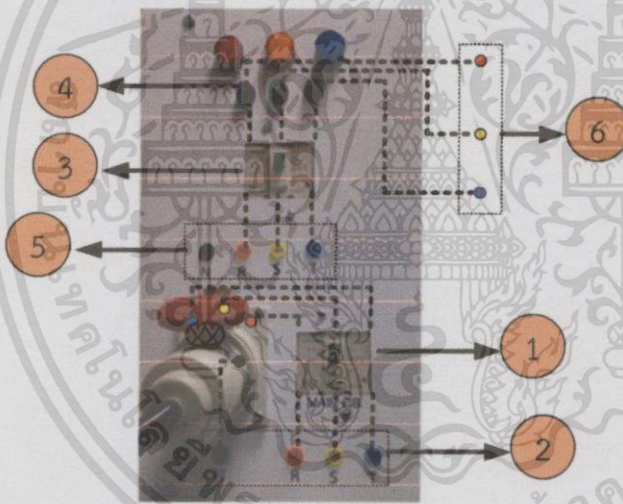
การป้องกันชุดทดลองของโครงการวิศวกรรมนี้จะใช้อุปกรณ์ 2 ชนิดในการป้องกัน คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ โดยที่สามารถเขียนแผนผังการป้องกันได้ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ภาพรวมการออกแบบการป้องกันชุดทดลอง



- 1.Circuit Breaker 30 A
- 2.Three Phase Variac (In)
- 3.Circuit Breaker 20 A
- 4.Fuse 15 A
- 5. Three Phase Variac (Out)
- 6.Terminal to PI Circuit



- Neutral : Black
- Phase R : Red
- Phase S : Yellow
- Phase T : Blue

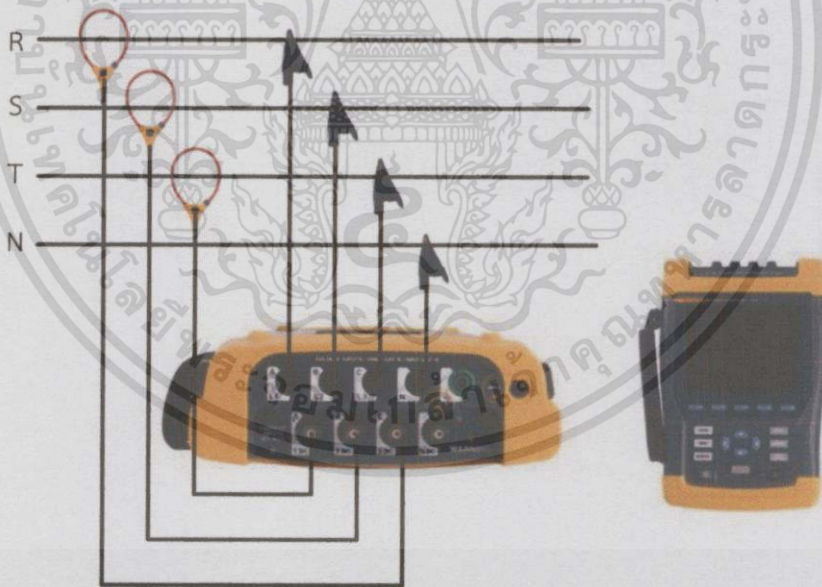
รูปที่ 3.6 ระบบการป้องกัน

จากผังการป้องกันสามารถสรุปได้ว่าส่วนของการป้องกันนั้นจะใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาด 30 A (หมายเลข 1 รูปที่ 3.6) ทำหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างห้องปฏิบัติการกับด้านขาเข้าของหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟส (หมายเลข 2 รูปที่ 3.6) ส่วนเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 20 A (หมายเลข 3 รูปที่ 3.6) และ ฟิวส์ขนาด 15 A (หมายเลข 4 รูปที่ 3.6) จะทำหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างด้านขาออกของหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟส (หมายเลข 5 รูปที่ 3.6) กับวงจรจำลองสายส่ง การเลือกใช้ขนาดของฟิวส์จะขึ้นอยู่กับภาระที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ฟิวส์จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ทำงานสำรองในสภาวะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่ทำงาน

หรือทำหน้าที่รองรับกระแสที่เกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราวซึ่งอาจจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง โดยฟิวส์จะหลอมหากกระแสที่สภาวะดังกล่าวมีค่าสูง เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้กระแสดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งอาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เสียหายได้ และกำลังไฟฟ้าทั้งหมดจะผ่านออกจากชุดป้องกัน (หมายเลข 6 รูปที่ 3.6) เพื่อเข้าไปสู่วงจรจำลองสายส่ง (หมายเลข 1 รูปที่ 3.9) ต่อไป

3.1.3 ชุดเครื่องวัดภายนอก

ชุดเครื่องมือวัดจากภายนอกมีหน้าที่ในการวัดปริมาณต่างๆทางไฟฟ้า สำหรับการทดลองนี้จะทำการติดตั้งเครื่องมือวัด 1 จุด คือที่บริเวณระหว่างหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟสกับวงจรจำลองสายส่ง (สาเหตุที่ทำการติดตั้ง 1 จุดนั้นสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก จ) โดยเครื่องมือวัดที่สำคัญซึ่งจะใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยโพรบวัดกระแส (Current Clamp Probe) ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณกระแสโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จากนั้นจะประมวลผลแปลงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยจะแสดงผลผ่าน Fluke 435 II Power Quality and Energy Analyzer และใช้บันทึกสัญญาณรูปคลื่นต่างๆทั้ง 3 เฟสลง SD Card เพื่อใช้สำหรับการนำเสนอต่อไป โดยแสดงแผนผังการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.7

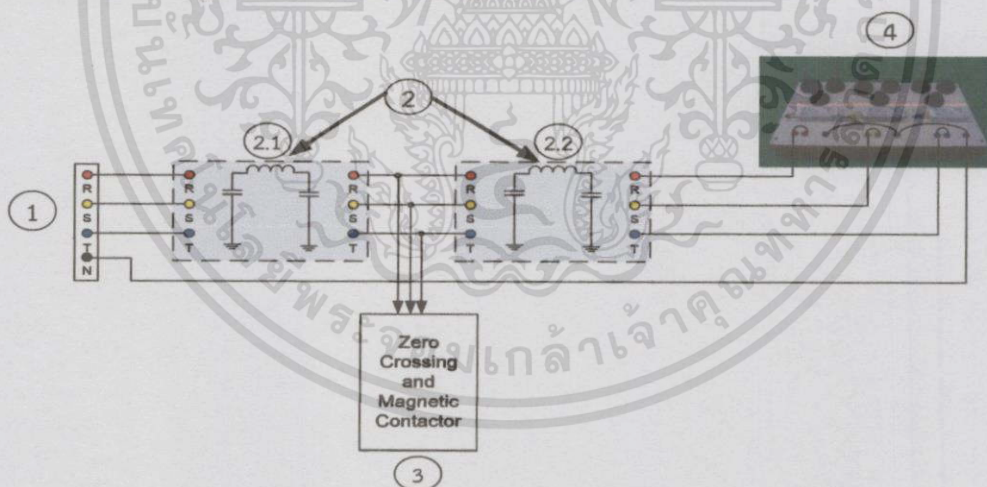


รูปที่ 3.7 แผนผังการต่ออุปกรณ์ Fluke 435 Power Quality Analyzer [37]

3.1.4 วงจรจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า

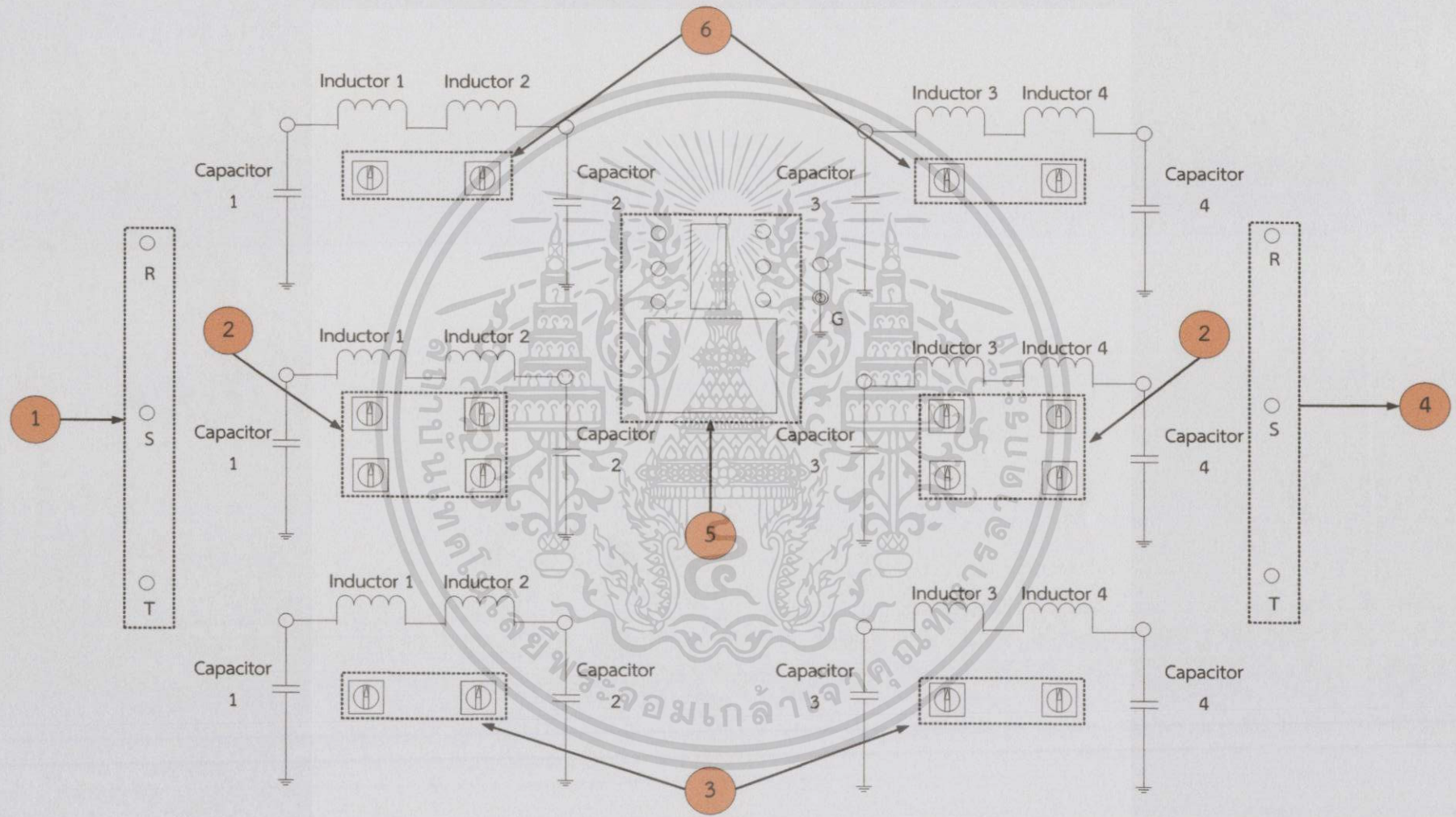
โครงการวิศวกรรมนี้ได้ทำการจำลองสายส่งของระบบจำหน่ายของของการไฟฟ้า นครหลวงแบบเหนือดินที่ความยาว 80 กิโลเมตร และแบบใต้ดินที่ความยาว 70 กิโลเมตร ซึ่งใช้วงจร สมมูลแบบพาย เพื่อใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยวงจรจำลองดังกล่าวได้ทำการแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสายส่งระบบจำหน่ายคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R), ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L), และค่าความจุไฟฟ้า (C) ด้วยวิธีการเทียบอัตราส่วนที่กำหนดไว้ (อัตราส่วนเปอร์ยูนิต) หลังจากที่ได้ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆเสร็จสิ้นแล้ว พบว่าพารามิเตอร์ค่าความต้านทานนั้น จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ (X_L)

อีกทั้งข้อจำกัดในการจัดหาตัวต้านทานที่สามารถทนค่าพิกัดแรงดัน และกระแสได้สูงๆนั้น ไม่สามารถหาได้จากท้องตลาดทั่วไป ต้องทำการสั่งทำพิเศษ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการละทิ้งการพิจารณาค่าความต้านทานในระบบออกไป โดยที่แนวคิดในการออกแบบวงจรจำลองสายส่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดยที่กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านชุดระบบป้องกัน (หมายเลข 6 รูปที่ 3.6) จะถูกส่งต่อมายังชุดวงจรจำลองสายส่ง (หมายเลข 1 รูปที่ 3.8) ผ่านเข้าสู่วงจรจำลองสายส่งแบบพายส่วนที่ 1 และ 2 (หมายเลข 2.1, 2.2 รูปที่ 3.8 ตามลำดับ) โดยที่ตรงกลางระหว่างวงจรจำลองสายส่งทั้ง 2 ส่วนจะใช้ชุด Zero Crossing และ Magnetic Contactor ในการลัดวงจรสุดท้ายกำลังไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกส่งต่อไปยังโหลด เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการคิดเบื้องต้นแล้วจึงได้ทำการเขียนแบบหน้าตู้วงจรจำลองสายส่งได้ดังรูปที่ 3.9

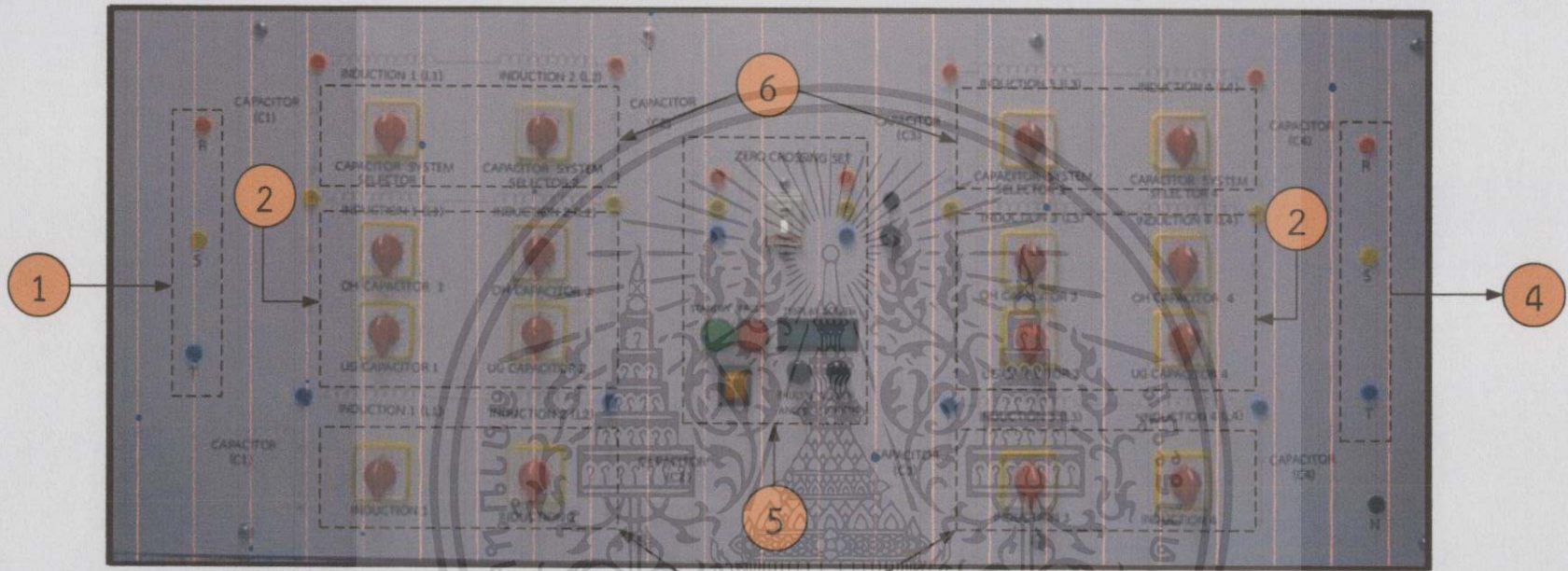


1. กำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่เข้าสู่แบบจำลองวงจรสายส่ง
2. วงจรจำลองสายส่งแบบพาย
3. ชุดวงจรผ่านศูนย์ Zero Crossing และ Magnetic Contactor
4. โหลดของชุดทดลอง

รูปที่ 3.8 แนวความคิดการออกแบบวงจรจำลองสายส่งเบื้องต้น



(ก)



1. ไฟฟ้า 3 เฟสที่เข้าสู่วงจรจำลองสายส่ง
2. สวิตช์ปรับเลือกค่าตัวเก็บประจุระบบจำหน่ายเหนือดิน(แถวบน)
สวิตช์ปรับเลือกค่าตัวเก็บประจุระบบจำหน่ายใต้ดิน(แถวล่าง)
3. สวิตช์ปรับเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ
4. ไฟฟ้า 3 เฟสที่ออกจากวงจรจำลองสายส่ง
5. แผงหน้าปัดสำหรับปรับค่ามุมกระแสลัดวงจรของชุดวงจรผ่านศูนย์
6. สวิตช์ปรับเลือกระบบจำหน่ายเหนือดินหรือใต้ดินสำหรับตัวเก็บประจุ

(ข)

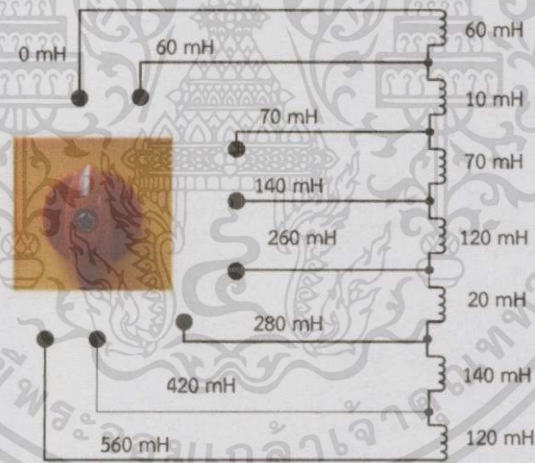
รูปที่ 3.9 (ก) แบบหน้าตู้วงจรจำลองสายส่ง

(ข) หน้าตู้วงจรจำลองสายส่งหลังประกอบแล้วเสร็จ

จากรูปที่ 3.9 ประกอบไปด้วยรูปที่ 3.9 (ก) แบบหน้าตู้วงจรจำลองสายส่ง และรูปที่ 3.9 (ข) หน้าตู้วงจรจำลองสายส่งหลังประกอบแล้วเสร็จที่รับกำลังไฟฟ้าที่ผ่านระบบป้องกันเข้าที่บริเวณหมายเลข 1 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) และออกจากฝั่งหน้าตู้วงจรจำลองสายส่งที่บริเวณหมายเลข 4 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) โดยที่หน้าตู้วงจรจำลองสายส่งสามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งเช่น ตัวเก็บประจุสามารถปรับเลือกค่าได้ด้วยชุดสวิตช์หมายเลข 2 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) หรือตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับเลือกค่าได้ด้วยชุดสวิตช์หมายเลข 3 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) และสามารถปรับค่ามุมในการลัดวงจรได้ด้วยชุดวงจร Zero Crossing ที่ตำแหน่งหมายเลข 5 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) และชุดทดลองดังกล่าวสามารถปรับเลือกค่าตัวเก็บประจุได้ทั้งระบบจำหน่ายเหนือดินและใต้ดินโดยการปรับสวิตช์เลือกระบบที่หมายเลข 6 รูปที่ 3.9 (ก),(ข) อีกด้วย และค่าพารามิเตอร์สายส่งที่สำคัญสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 3.1.4.1 – 3.1.4.2

3.1.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L)

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้กับชุดทดลองนี้จะใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ 4 ตัวต่อเฟส แบ่งเป็นด้านละ 2 ตัวของวงจรแบบพาย รวมทั้งหมด 12 ตัว ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งหมดมีขนาด 560 mH พิกัดกระแส 15 A มีขนาด กว้าง 6 นิ้ว ยาว 9 นิ้ว สูง 7.5 นิ้ว ดังรูปที่ 3.12



(ก)

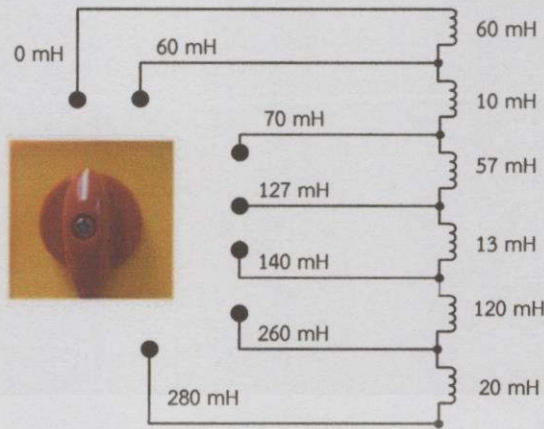


(ข)

รูปที่ 3.10 (ก) สวิตช์เลือกปรับระดับค่าความเหนี่ยวนำหน้าตู้ทดลองตัวที่ 1 และ 3

(ข) แสดงการแถบเลือกค่าความเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์จริงตัวที่ 1 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

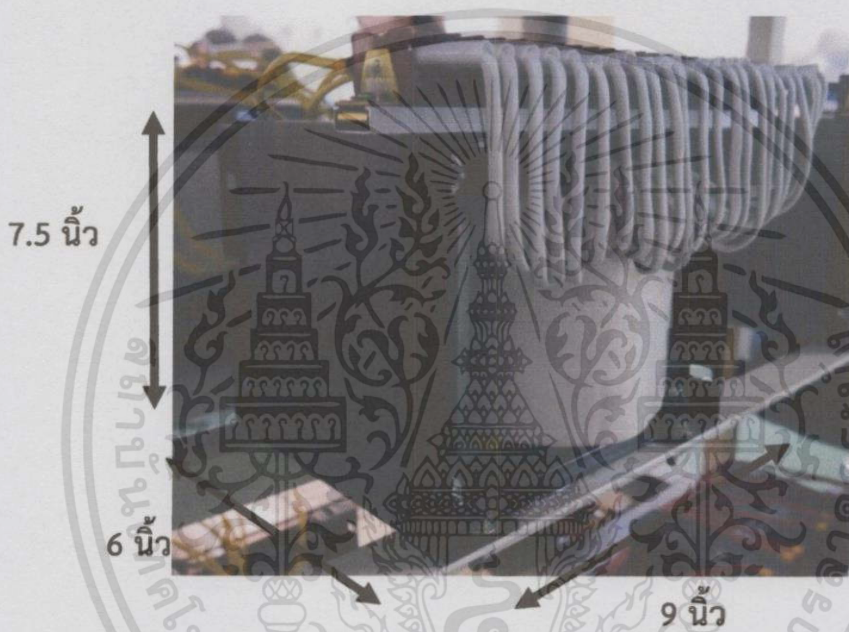


รูปที่ 3.11 (ก) สวิตช์เลือกปรับระดับค่าความเหนี่ยวนำหน้าตู้ทดลองตัวที่ 2 และ 4

(ข) แสดงการแถบเลือกค่าความเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์จริงตัวที่ 2 และ 4

จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 จะแสดงถึงแผนผังการปรับค่าตัวเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ โดยตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3 มีขนาดของค่าความเหนี่ยวนำตามลำดับดังนี้ 0 mH , 60 mH , 70 mH , 140 mH, 260 mH , 280 mH, 420 mH, 560 mH และความเหนี่ยวนำตัวที่ 2 และ 4 สามารถปรับแท็บได้ดังนี้ 0 mH , 60 mH , 70 mH, 127 mH, 140 mH, 260 mH , 280 mH

โดยตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรจำลองนั้นจะใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ E-I ดังรูปที่ 3.12 นอกจากนี้ตัวเหนี่ยวนำทุกตัวในวงจรจำลองจะต้องมีความสามารถทนกระแสที่เกิดขึ้นในการทดลอง และเนื่องจากการจำลองการเกิดลัดวงจรที่ 20 เเปอร์เซ็นต์นั้น มีค่ากระแสลัดวงจรที่สูง (ภาคผนวก ง) จึงทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดที่ใหญ่มากๆ อีกทั้งยังมีราคาแพง และจากการที่ได้ทำการพูดคุยกับที่ปรึกษาโครงการและทางสถานประกอบการที่ติดต่อให้ทำการพันตัวเหนี่ยวนำแล้วนั้น ได้ข้อสรุปว่าจะกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำทุกตัวมีพิกัดกระแสอยู่เพียงแค่ 15 A แต่ต้องทำการทดลองในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายของโครงการ อีกทั้งยังเป็นการลดขนาดและน้ำหนักของตัวเหนี่ยวนำอีกด้วย



รูปที่ 3.12 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 560 mH

เลือกขนาดแกนเหล็กจากค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด คือ 560 mH พิกัดกระแส 15 A และคำนวณตามสูตร

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} = \frac{\sqrt{VI}}{5.58} = \frac{\sqrt{(IZ)I}}{5.58} = \frac{\sqrt{(I \times 2\pi f L)I}}{5.58} \quad \text{นิ้ว}^2$$

$$A = \frac{\sqrt{(15 \times 2\pi \times 50 \times 560 \times 10^{-3})15}}{5.58} = 35.66 \quad \text{นิ้ว}^2$$

ดังนั้น เลือกแกนเหล็ก ขนาด 6 นิ้ว x 9 นิ้ว

การพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเลือกใช้ขดลวดเบอร์ 12 (พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 5,584 ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งสามารถทนกระแสได้ 18.03 แอมแปร์ และเลือกแกนเหล็ก ขนาด 6 นิ้ว x 9 นิ้ว กำหนดความกว้างของแก๊ปมีค่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2g}$$

การพันตัวเหนี่ยวนำขนาด 70 mH

$$70 \times 10^{-3} = \frac{N^2 (4\pi \times 10^{-7}) (2.54 \times 4 \times 2.54 \times 9 \times 10^{-4})}{2(1 \times 10^{-3})}$$

$$N \approx 57 \text{ รอบ}$$

$$\text{จำนวนรอบที่ใช้จริง} = 57 \times 2 = 114 \text{ รอบ}$$

การพันตัวเหนี่ยวนำขนาด 560 mH

$$560 \times 10^{-3} = \frac{N^2 (4\pi \times 10^{-7}) (2.54 \times 4 \times 2.54 \times 9 \times 10^{-4})}{2(1 \times 10^{-3})}$$

$$N \approx 160 \text{ รอบ}$$

$$\text{จำนวนรอบที่ใช้จริง} = 160 \times 2 = 320 \text{ รอบ}$$

และแสดงค่าความเหนียวน้ำทั้งระบบจำหน่ายเหนือดิน และใต้ดินในกรณีอื่นๆ ตามตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข,ค)

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนียวน้ำของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายเหนือดินที่ระยะความยาวต่างๆ

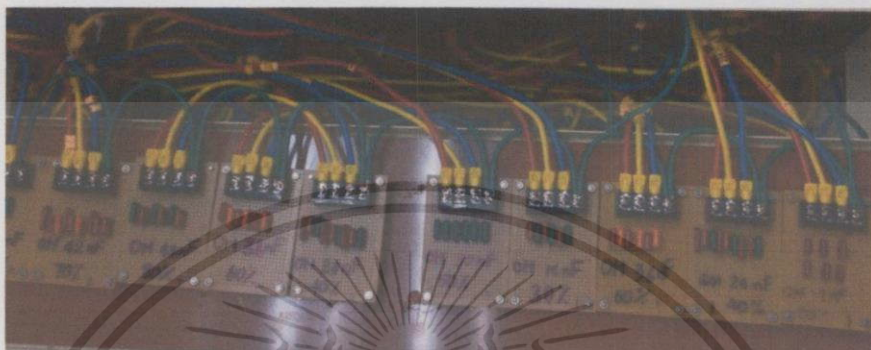
%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าความเหนียวน้ำที่คำนวณได้ (mH)	ค่าความเหนียวน้ำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	ค่าความเหนียวน้ำที่ใช้ในระบบจริง (mH)
20	130.9736	130	18.4112
30	196.4604	195	27.6168
40	261.9472	260	36.8224
50	327.4339	325	46.028
60	392.9208	390	55.2336
70	458.4076	455	64.4392
80	523.8944	520	73.6448
100	654.8679	650	92.056

ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนียวน้ำของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินที่ระยะความยาวต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าความเหนียวน้ำที่คำนวณได้ (mH)	ค่าความเหนียวน้ำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	ค่าความเหนียวน้ำที่ใช้ในระบบจริง (mH)
20	136.7913	140	7.6916
30	205.1869	210	11.5374
40	273.5825	280	15.3832
50	341.9782	350	19.229
60	410.3738	420	23.0748
70	478.7694	490	26.9206
80	547.1650	560	30.7664
100	683.9563	700	38.458

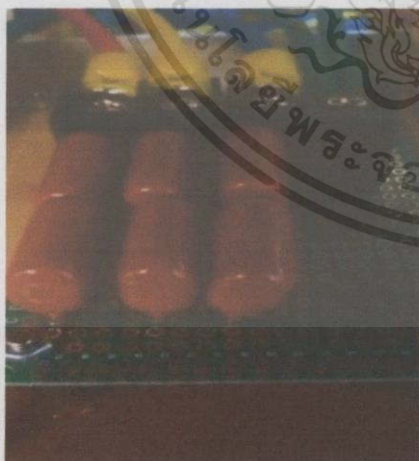
3.1.4.2 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C)

การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้านี้จะให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิด Silver Mica ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 350-1000V_{AC} ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีหลายขนาดที่มีขายในท้องตลาดมาทำการต่อวงจรให้ได้ค่าที่ต้องการ มาทำการต่อขนานหรืออนุกรมในบอร์ดโซลิดาเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.13

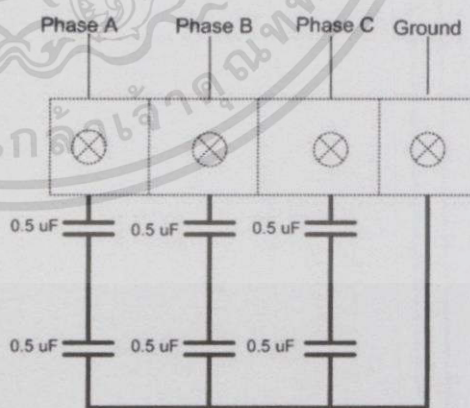


รูปที่ 3.13 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรทดลอง

ตัวอย่างการต่อค่าตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้ตามค่าที่ต้องการใช้ เช่น ต้องการใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ขนาด 0.25 μF ต่อเฟส แต่ค่าตัวเก็บประจุขนาด 0.25 μF นั้นไม่มีขายในในท้องตลาด จึงมีความจำเป็นต้องนำค่าตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF ที่มีขายในท้องตลาดมาทำการต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าตัวเก็บประจุขนาด 0.25F ตามที่ต้องการดังรูปที่ 3.14 (ก) และ (ข) โดยแสดงค่าความตัวเก็บประจุทั้งระบบจำหน่ายเหนือดิน และใต้ดินในกรณีอื่นๆ ตามตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข,ค)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 (ก) ค่าเก็บประจุขนาด 0.25 μF ต่อเฟสที่เกิดการต่ออนุกรมกันของ 0.1 μF 2 ตัว

(ข) รูปวงจรการต่อค่าตัวเก็บประจุให้ได้ 0.05 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายเหนือดินที่ระยะความยาวต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คำนวณได้ (nF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (nF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจริง (nF)
20	22.7024	24	161.5
30	34.0535	36	242.3
40	45.4047	48	323
50	56.7559	60	403.8
60	68.1071	72	484.5
70	79.4582	84	565.3
80	90.8094	96	646
100	113.5118	120	807.5

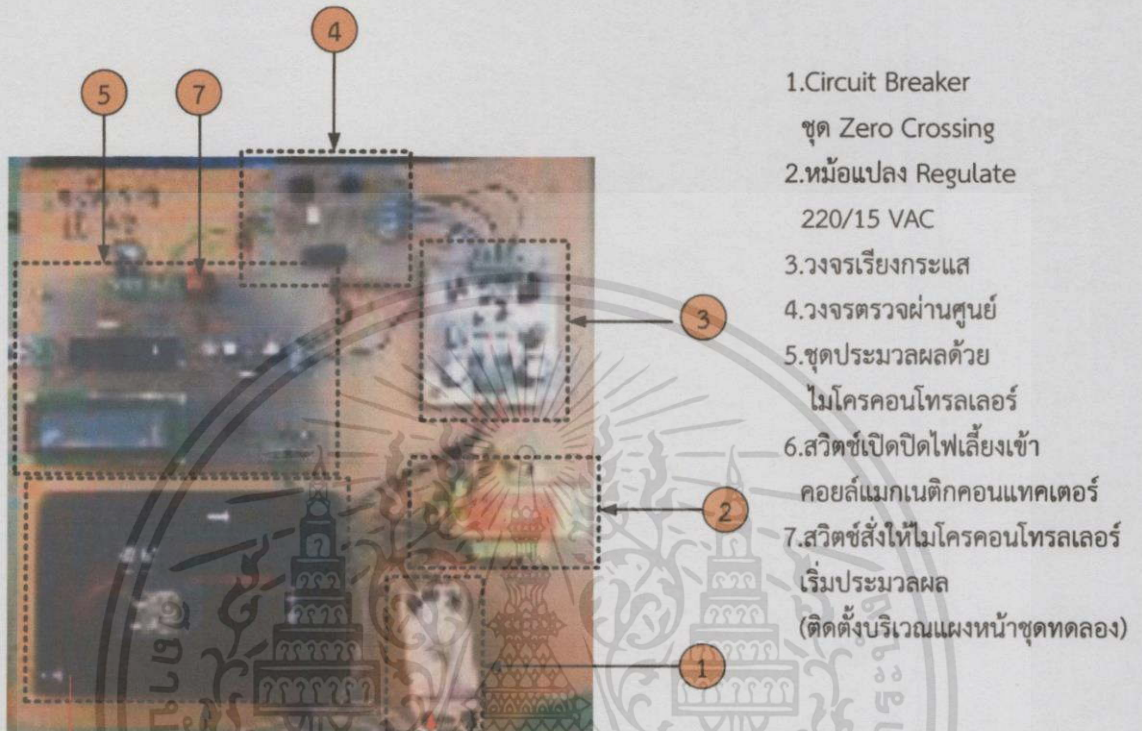
ตารางที่ 3.4 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินที่ระยะความยาวต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คำนวณได้ (μF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (μF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจริง (μF)
20	0.1832	0.2	3.2578
30	0.2748	0.3	4.8867
40	0.3664	0.4	6.5156
50	0.4579	0.5	8.1445
60	0.5495	0.6	9.7734
70	0.6411	0.7	11.4023
80	0.7327	0.8	13.0312
100	0.9159	1	16.289

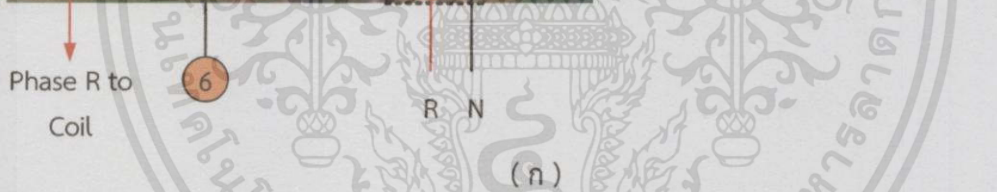
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing) เพื่อควบคุมการทำงานของ

แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)

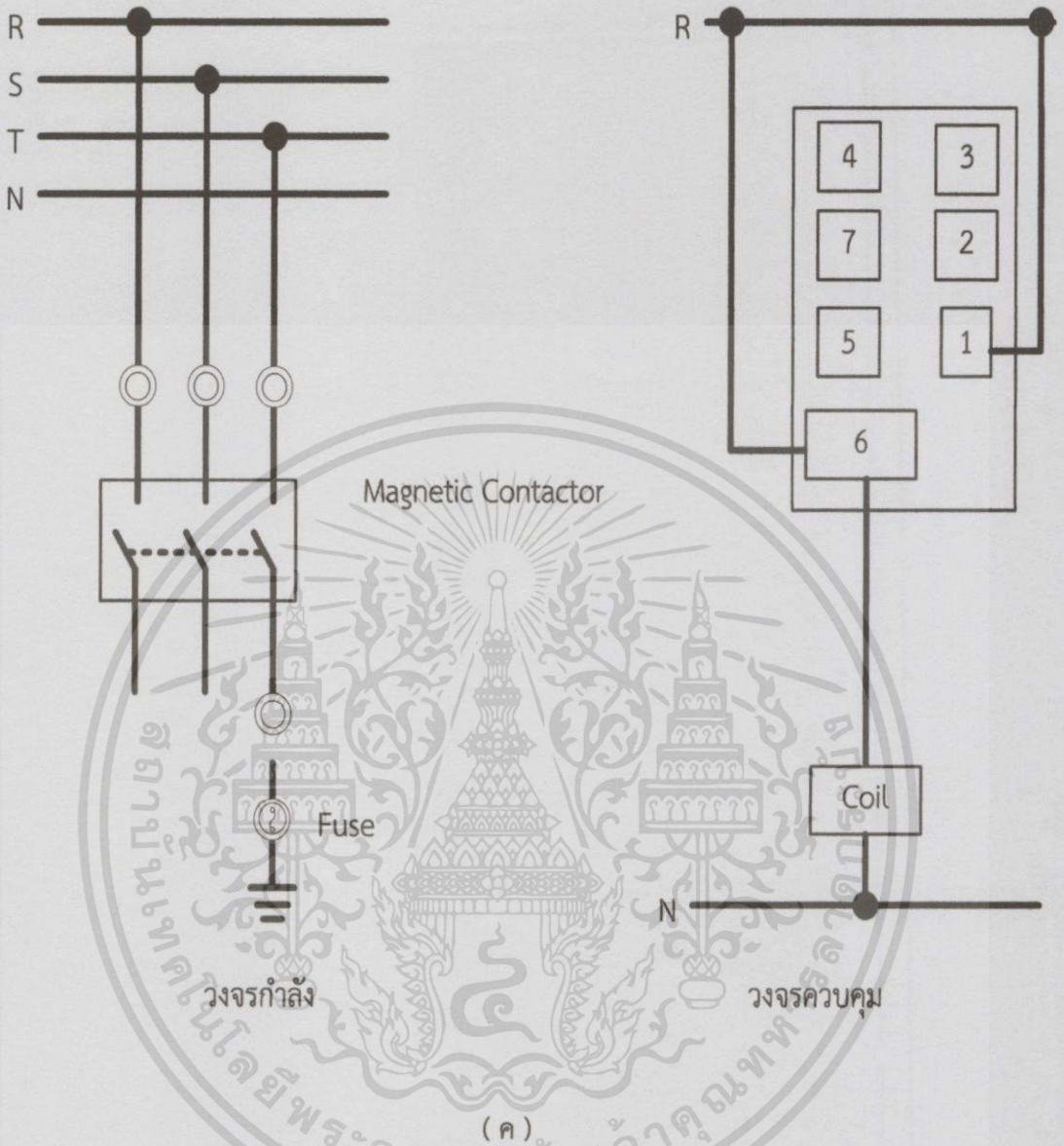


- 1.Circuit Breaker
- ชุด Zero Crossing
- 2.หม้อแปลง Regulate 220/15 VAC
- 3.วงจรเรียงกระแส
- 4.วงจรตรวจจับผ่านศูนย์
- 5.ชุดประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
- 6.สวิตช์เปิดปิดไฟเลี้ยงเข้าคอยล์แมกเนติกคอนแทคเตอร์
- 7.สวิตช์สั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มประมวลผล (ติดตั้งบริเวณแผงหน้าชุดทดลอง)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 (ก) ชุดทำงานทั้งหมดของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero crossing)
 (ข) วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing)
 (ค) ไดอะแกรมการต่อแมกเนติกคอนแทคเตอร์และชุดวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดวงจรตรวจจับสนัย (Zero Crossing) จะใช้เป็นชุดควบคุมการสั่งเปิดปิด ไฟเลี้ยงเข้าคอยล์ของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) ซึ่งกำหนดให้วงจรผ่านศูนย์ จะใช้แรงดันไฟฟ้าเฟส R ซึ่งเป็นเฟสเดียวกันกับเฟสที่จะเชื่อมต่อกับคอยล์ของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (หมายเลข 1 รูปที่ 3.15 (ก),(ค)) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ เมื่อทำการเปิด Circuit Breaker ของชุดตรวจจับสนัย (หมายเลข 1 รูปที่ 3.15 (ก),(ค)) ชุดวงจรตรวจจับสนัยจะได้รับ สัญญาณอินพุตจากหม้อแปลง 220/15 V (หมายเลข 2 รูปที่ 3.15 (ก),(ค)) ในลักษณะรูปคลื่นไซน์ จากนั้นสัญญาณไซน์อินพุตจะถูกทำการแปลงให้เป็นไฟกระแสตรงขนาด 5 VDC ด้วยวงจรเรียง กระแส (หมายเลข 3 รูปที่ 3.15 (ก),(ค))

ลำดับถัดมาสัญญาณไฟกระแสตรงดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังวงจรตรวจจับสนัย (หมายเลข 4 รูปที่ 3.15 (ก),(ค)) โดยผ่านความต้านทาน 10 k Ω จากนั้นสัญญาณจะถูกปรับขนาดให้ เหมาะสมด้วยออปแอมป์ UA741 ดังรูปที่ 3.15 (ข) เพื่อส่งไปให้กับชุดประมวลผลด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (หมายเลข 5 รูปที่ 3.15 (ก),(ค)) และเมื่อทำการกดสวิทช์ที่แผงหน้าตู้ (หมายเลข 7 รูปที่ 3.15 (ก),(ค) และ ภาคผนวก จ) จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวดังกล่าวจะทำการประมวลผลของสัญญาณแรงดันและพิจารณาว่ามีเงื่อนไขตรงกับชุดคำสั่งที่กำหนดหรือไม่ เมื่อ เงื่อนไขตรงกับชุดคำสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณไปยังชุดสวิทช์ควบคุมคอยล์แมก เนติกคอนแทคเตอร์ (หมายเลข 6 รูปที่ 3.15 (ค)) เพื่อสั่งให้สวิทช์ควบคุมไฟเลี้ยงเข้าคอยล์ของแมก เนติกคอนแทคเตอร์ในวงจรควบคุมดัง รูปที่ 3.15 (ค) ทำงานเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงเข้าคอยล์ของแมกเนติก คอนแทคเตอร์ส่งผลให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงาน

3.1.6 สวิตช์ปรับค่าพารามิเตอร์

สำหรับสวิทช์ที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายส่ง เช่น ค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ และใช้สำหรับเลือกระบบที่ต้องการนั้นจะต้องเป็นสวิทช์ที่มีความสามารถในการทน กระแสที่สูงเนื่องจากในการทดสอบการเกิดลัดวงจรบางกรณีค่ากระแสที่เกิดขึ้นอาจมีค่าสูงได้ และ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ได้ถูกออกแบบให้มีค่าเปลี่ยนไปตามระยะทางที่มีหลายค่า จึงทำให้สวิทช์ที่ นำมาใช้ปรับค่านั้นต้องมีการปรับแบบ step หลาย input ด้วย หลังจากการพิจารณาแล้วนั้นได้ทำ การเลือกสวิทช์ชนิด Rotating CAM Switch ของ Salzer ที่มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 15-20 A โดยมีทั้ง แบบ 3 Channel 3 Pole และ 8 Channel 3 Pole โดยสวิทช์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



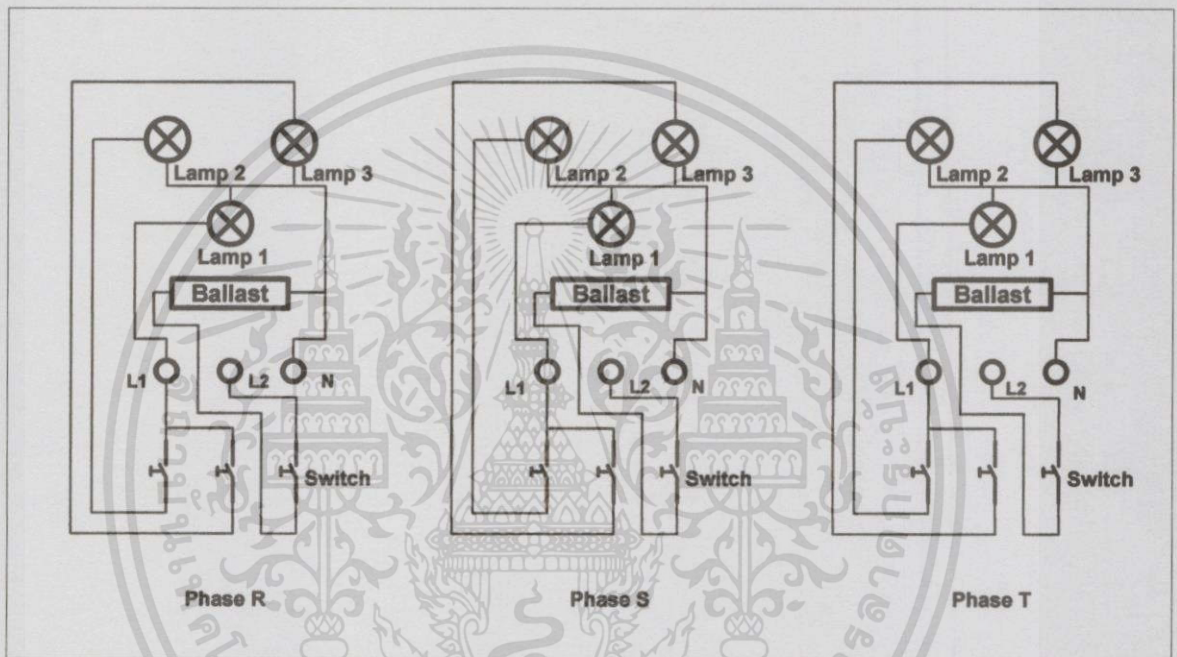
รูปที่ 3.16 Multi-Step Rotating CAM Switch [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 โหลดของระบบสายส่ง

โหลดของระบบจำลองนี้จะทำการกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟไม่สามารถปรับค่าได้จึงต้องทำการกำหนดโหลดให้เป็นค่าคงที่เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่ฝั่งรับคงที่ที่ 400 โวลต์

โหลดที่ใช้ในการทดสอบจะมีอยู่ 3 แบบ เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มและลดโหลด โดยมี หลอดไฟ 25 วัตต์ เฟสละ 2 หลอด, และโหลด R-L ใช้หลอดไฟ 25 วัตต์ 1 หลอด กับบัลลาสต์ 1 ชุด (ต่อ 1 เฟส) ดังรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.18

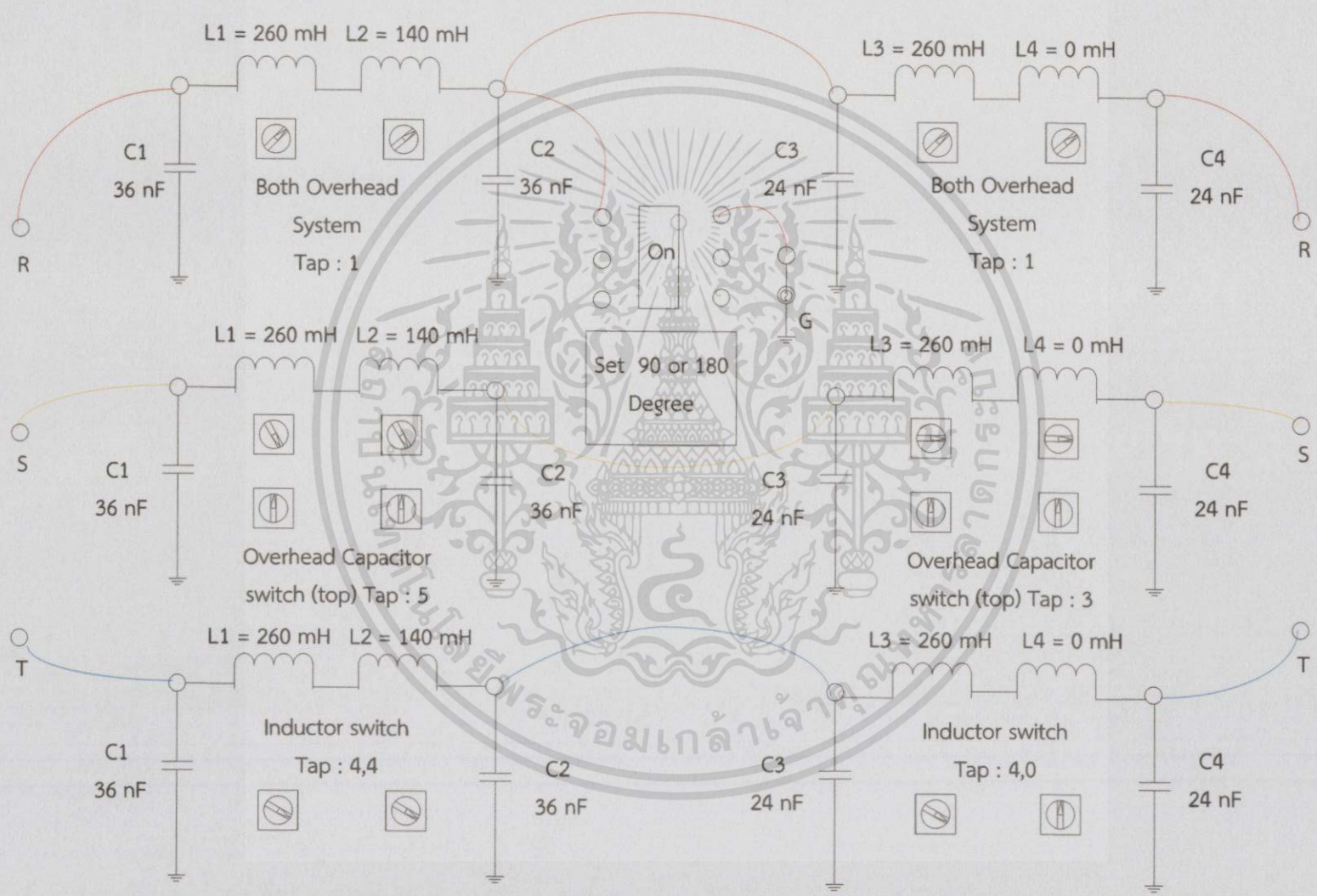


รูปที่ 3.17 แผนผังการต่อโหลดของระบบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.18 โหลดของระบบที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับตัวอย่างการต่อวงจรจ่ายส่งระบบจำหน่ายเหนือดินสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 โดยทำการแบ่งสายส่งระบบจำหน่ายออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกที่ระยะทาง 60 % ของความยาวสายส่งทั้งหมด ส่วนที่ 2 ที่ระยะทาง 40 % ของความยาวทั้งหมด จากนั้นทำการเชื่อมต่อชุดการลัดวงจรด้วย Zero Crossing โดยกำหนดให้เป็นการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดินที่เฟส A ที่มีกระแสลัดวงจร 90 องศา หรือ 180 องศาก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ทดลอง จะได้รับการต่อชุดวงจรสายส่งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวในลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการต่อวงจรจำลองสายส่งโดยมีการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงดินที่ระยะทาง 60 % ของความยาวสายส่ง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

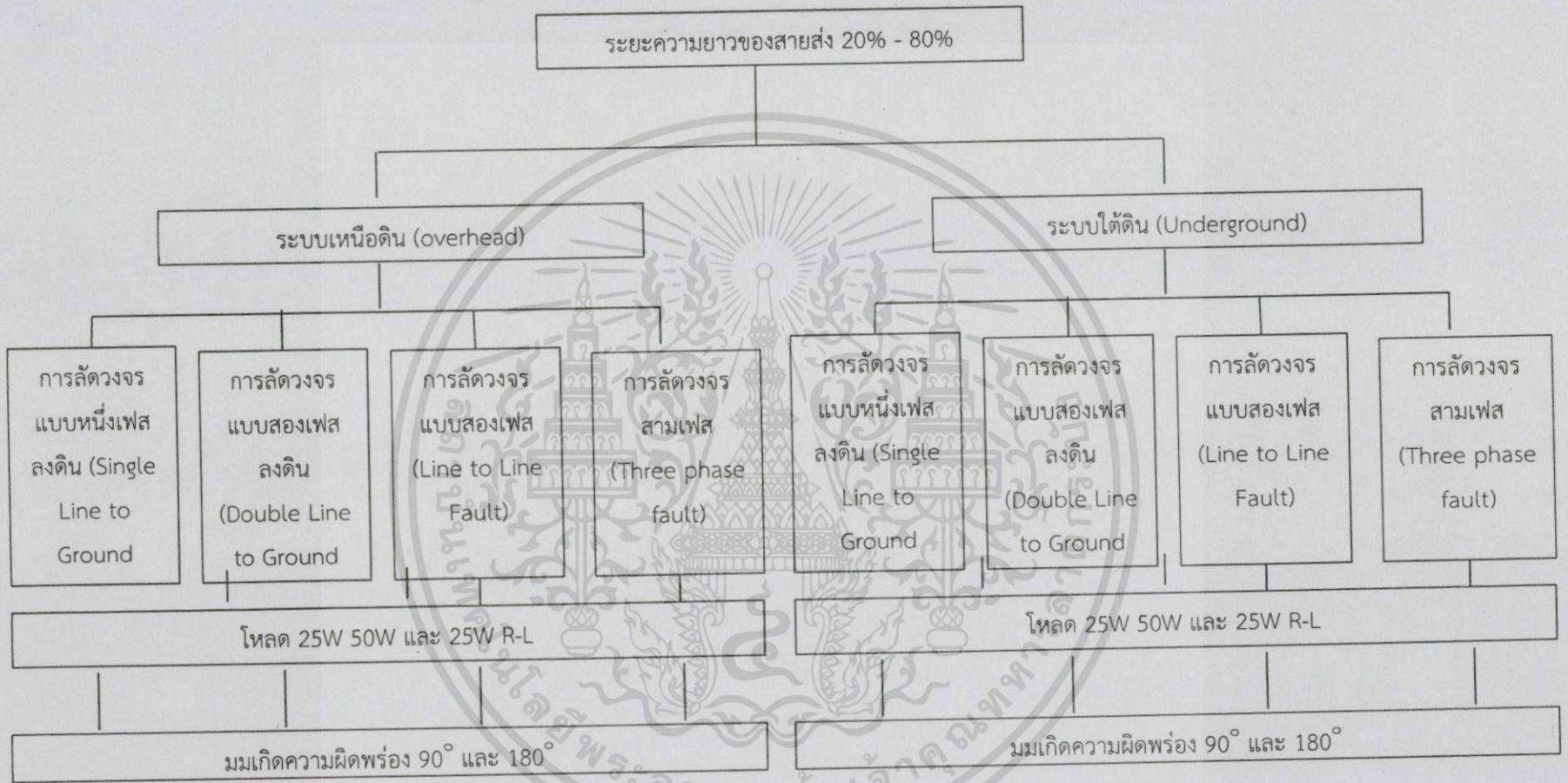
จากการทดลองการลัดวงจรในสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเหนื่อดินและใต้ดิน ผ่านการจำลองระบบรูปแบบพาย (π - network) ซึ่งจำลองระบบมาจากการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนื่อดินและใต้ดินบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธง - ถึงสถานีไฟฟ้าเมืองใหม่ ที่ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ที่ระยะทางดังนี้

- 1.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนื่อดิน ที่ระยะทางรวม 80 กิโลเมตร
- 2.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดิน ที่ระยะทางรวม 70 กิโลเมตร

โดยในการทำการทดลองจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลและศึกษาพฤติกรรมของการลัดวงจรของระบบจำหน่ายดังนี้

- 1.) ระบบที่ศึกษาการลัดวงจร คือ ระบบจำหน่ายเหนื่อดิน และใต้ดิน
- 2.) รูปแบบการลัดวงจร คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และการลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)
- 3.) ระยะทางของสายส่งระบบจำหน่ายที่ทำการลัดวงจรที่ระยะต่างๆ 7 ระยะ คือ 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% และ 80% แต่ในปริญญานิพนธ์นี้จะแสดงผลการทดลองเพียง 3 กรณีคือที่ 20% 60% และ 80% ของระยะทางสายส่งทั้งระบบจำหน่ายเหนื่อดินและใต้ดิน
- 4.) มุมในการเกิดลัดวงจร คือ การลัดวงจรที่มุม 90° และที่มุม 180°
- 5.) ขนาดโหลดที่เชื่อมต่อกับระบบที่ค่า 25 วัตต์, 50 วัตต์ และโหลด R-L

โดยในการทดลองทุกกรณีจะคงที่แรงดันทางด้านโหลดไว้ที่ 400 โวลต์ และใช้สัญญาณกระแสเฟส A เป็นคลื่นสัญญาณอ้างอิงในการเกิดกระแสลัดวงจร ผลการทดลองกำหนดให้สัญญาณสีด้า, สีแดง และสีน้ำเงิน เป็นสัญญาณของกระแสเฟส A, เฟส B และ เฟส C ตามลำดับและจะทำการวัดลुकคลื่นสัญญาณที่ฝั่งส่งเฉพาะลुकคลื่นสัญญาณกระแสเท่านั้นเนื่องจากลुकคลื่นสัญญาณแรงดันเมื่อมีการเกิดการลัดวงจรขึ้นจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มากนัก โดยกระบวนการทดลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงลำดับการทดลอง

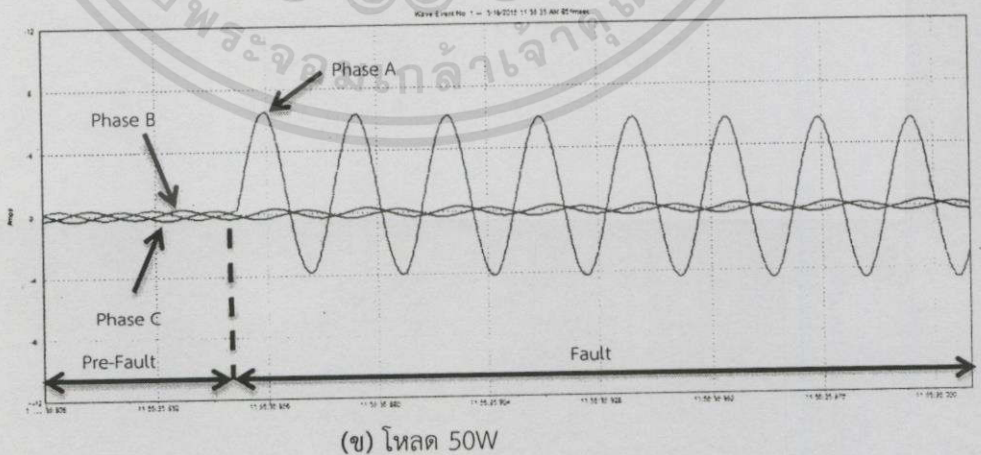
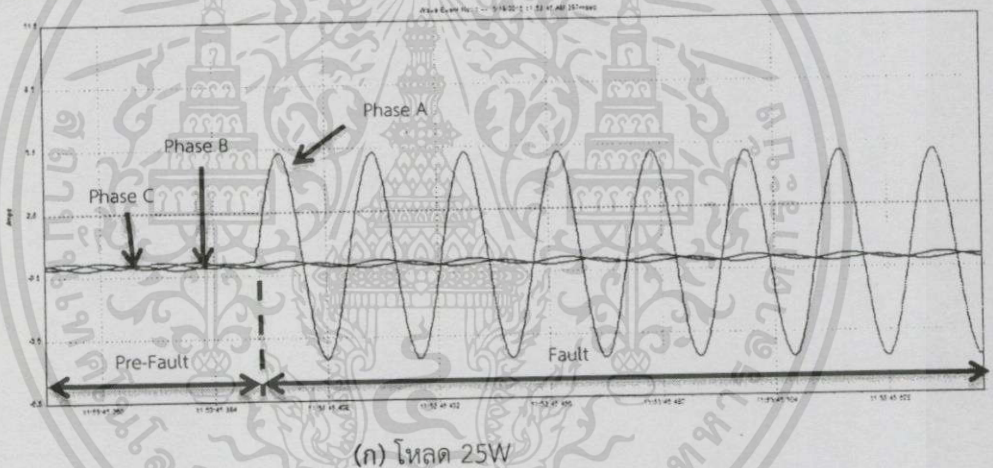
4.1 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน

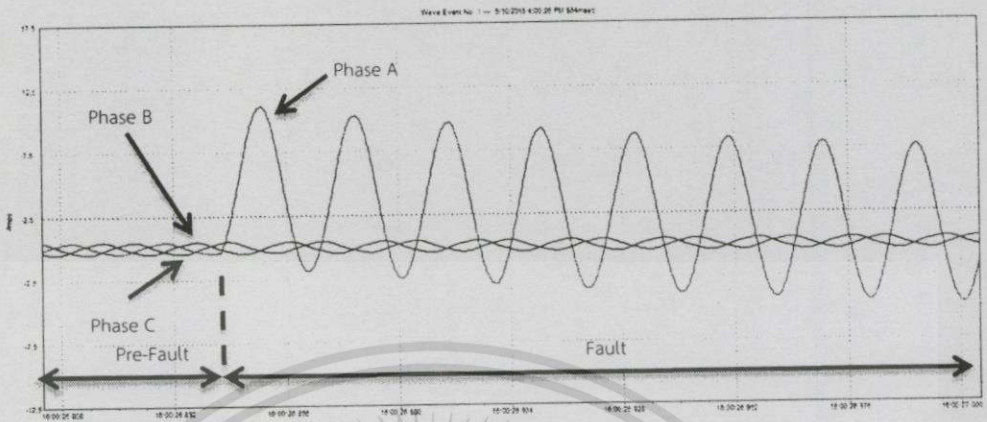
4.1.1 ระยะเวลาความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง

การลัดวงจรในชุดทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.1.1.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.2(ก), รูปที่ 4.2(ข) และรูปที่ 4.2(ค)





(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.2 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.2(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.2(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.2(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

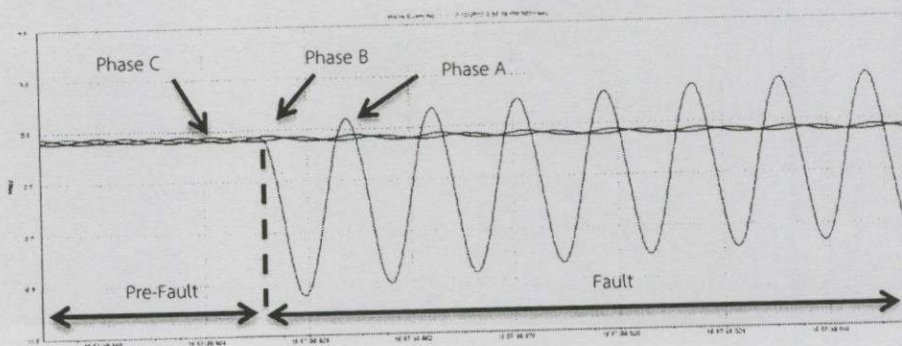
จากรูปที่ 4.2(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.2(ก) และรูปที่ 4.2(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรนั้นล้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

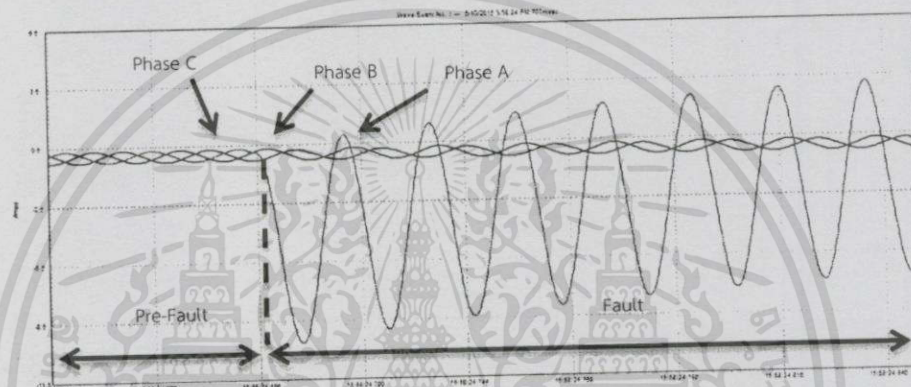
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหนด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.156	5.34	0.149	0.151	0.153	0.152
50W	0.294	6.56	0.29	0.286	0.298	0.275
R-L	0.431	11.402	0.492	0.492	0.488	0.488

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดที่ 25W, 50W และโหนด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาว่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหนด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหนดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหนดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

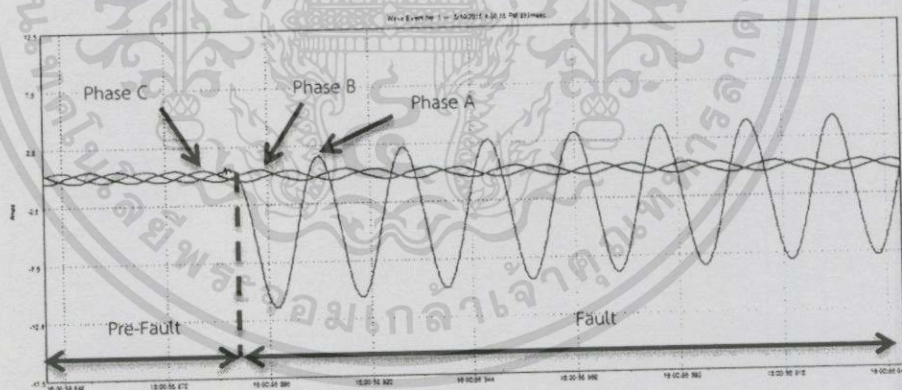
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหนด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.3(ก), รูปที่ 4.3(ข) และรูปที่ 4.3(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.3 ระยะเวลาการขยายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดการลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.3(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการ

เปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้น ค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.2(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.3(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.3(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.3(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการปรับแรงดันโวลต์เพิ่ม และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.2(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.3(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

จากรูปที่ 4.3(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.3(ก) และรูปที่ 4.3(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.2(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.3(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

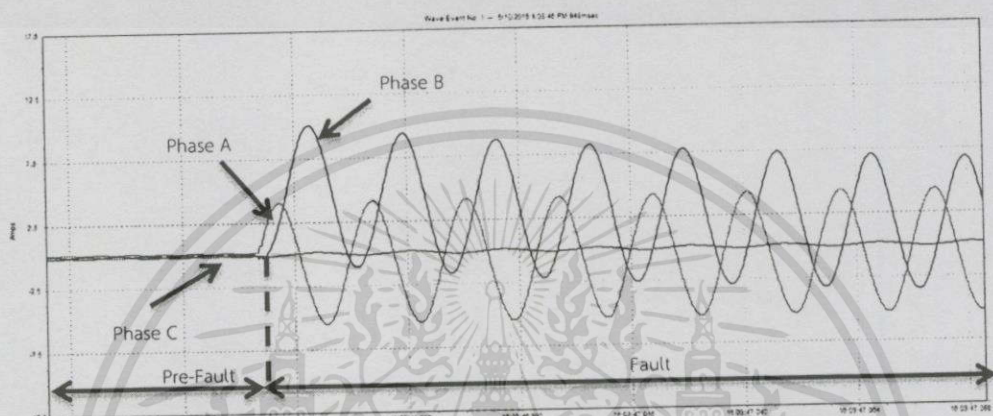
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.153	9.197	0.153	0.153	0.153	0.153
50W	0.29	9.651	0.301	0.301	0.298	0.301
R-L	0.465	9.805	0.492	0.492	0.488	0.488

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.1

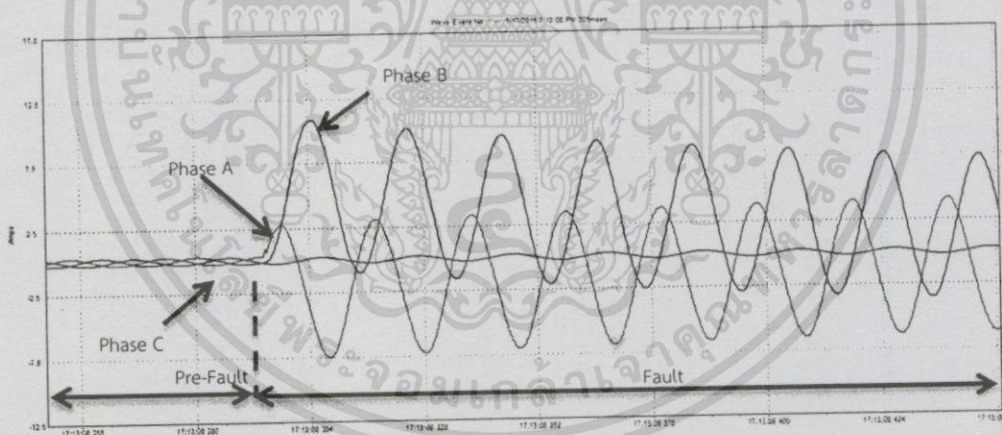
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.1.1.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

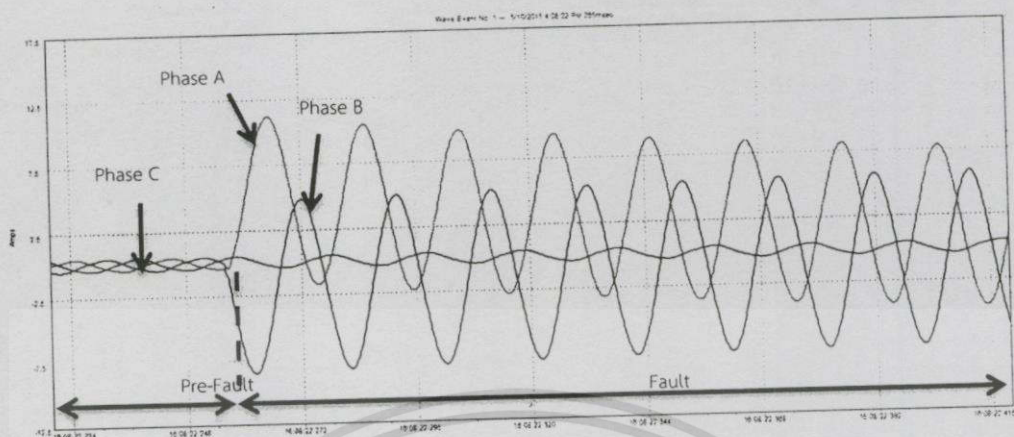
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ดังรูปที่ 4.4(ก), รูปที่ 4.4(ข) และรูปที่ 4.4(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.4 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.4(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าใกล้แกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.4(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.4(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.4(ค) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.4(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.4(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแอมพลิจูดเช่นเดียวกับรูปที่ 4.4(ก) และรูปที่ 4.4(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.4(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแอมพลิจูดเช่นเดียวกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันในขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

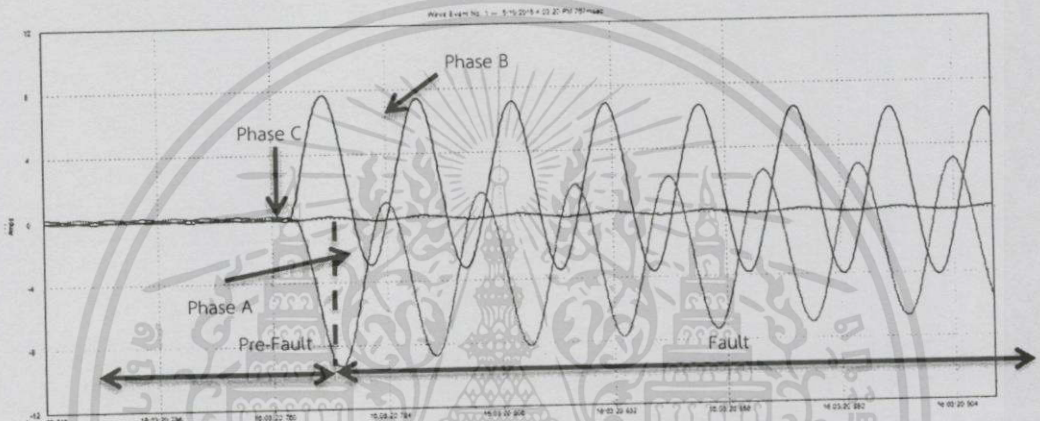
ตารางที่ 4.3 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.153	5.535	0.149	9.342	0.153	0.147
50W	0.294	7.519	0.294	9.628	0.294	0.294
R-L	0.469	11.574	0.481	8.514	0.484	0.484

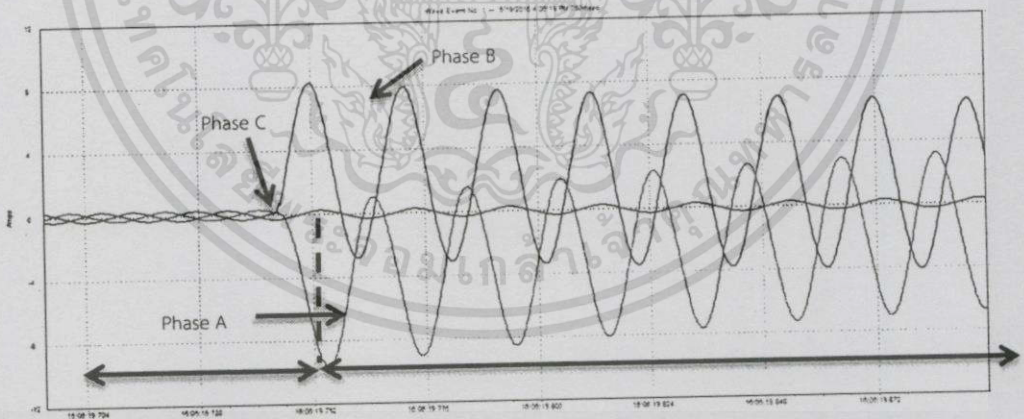
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.3 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

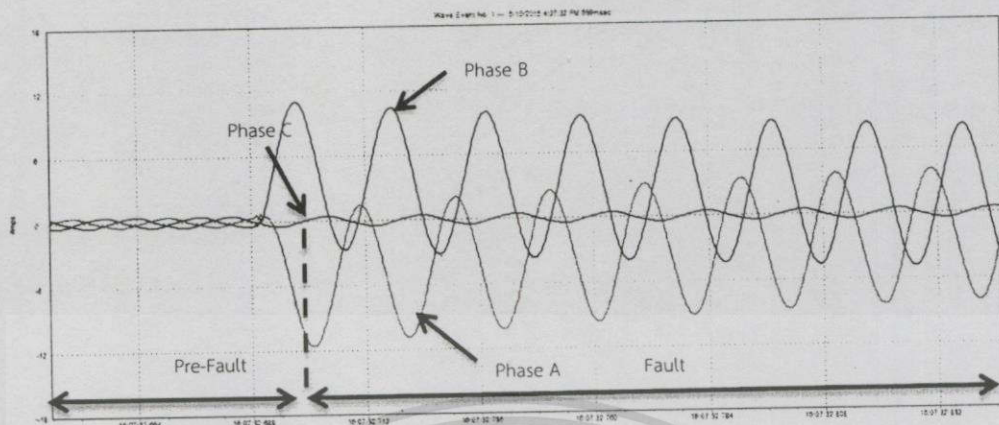
เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.5(ก), รูปที่ 4.5(ข) และรูปที่ 4.5(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ก) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.5 ระยะเวลาความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.5(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.4(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.5(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า ดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.5(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.5(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.5(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.4(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.5(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $50W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.5(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด $25W$ แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.5(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.5(ก) และรูปที่ 4.5(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ดังที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.4(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.5(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด $25W$ +บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.5(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด $25W$ และ $50W$ แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.4 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะเวลายาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

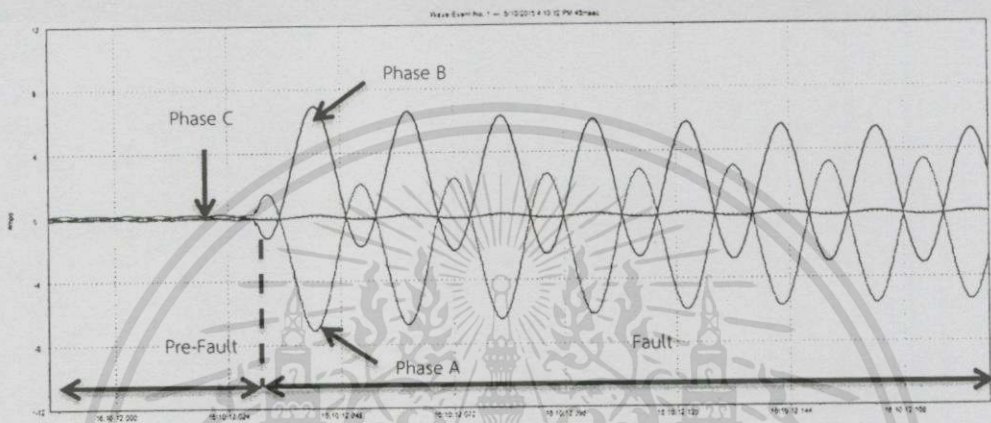
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหนด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	9.266	0.159	7.038	0.211	0.214
50W	0.301	10.26	0.302	8.083	0.336	0.336
R-L	0.432	10.989	0.45	10.903	0.469	0.469

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดที่ 25W, 50W และโหนด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหนด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อพิจารณาโหนดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหนด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้น

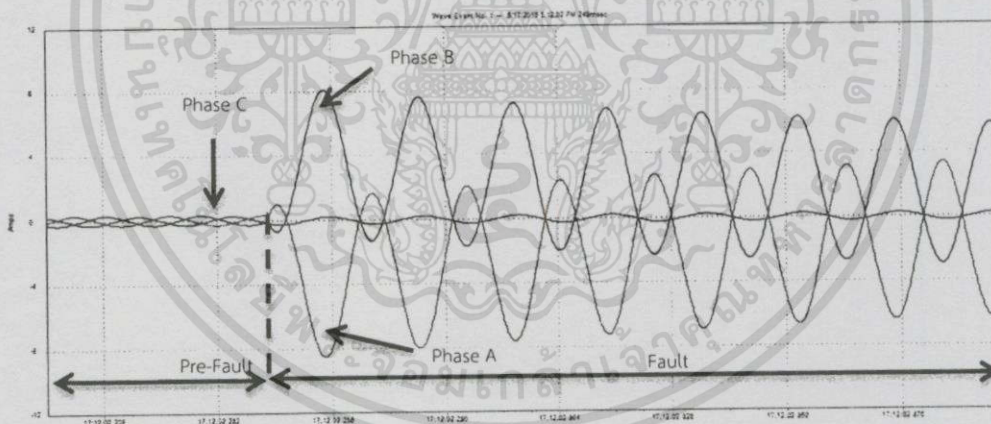
เมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.1.1.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

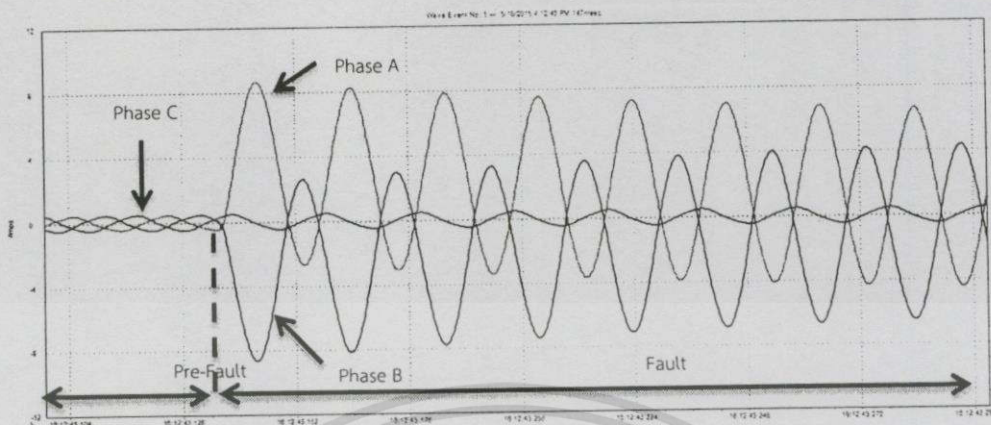
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.6(ก), รูปที่ 4.6(ข) และรูปที่ 4.6(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ก) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.6 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.6(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.6(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากการเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.6(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.6(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมมการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.6(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.6(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.6(ก)

และรูปที่ 4.6(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกับการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

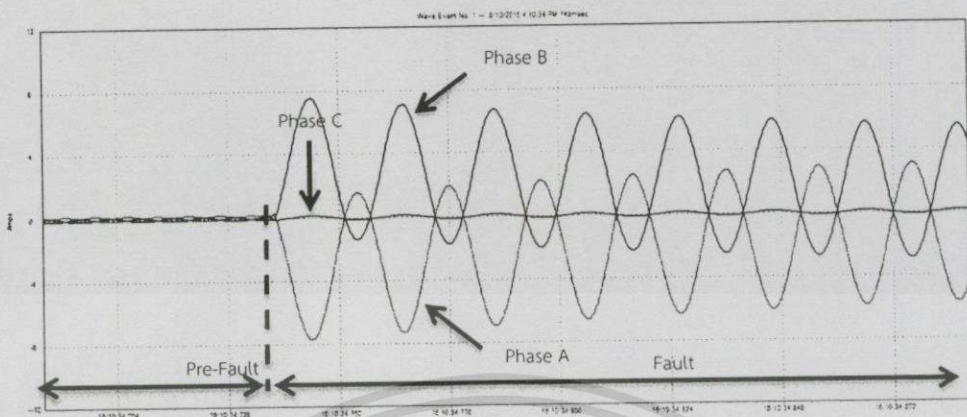
ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.6(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันในขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.5 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะเวลายาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

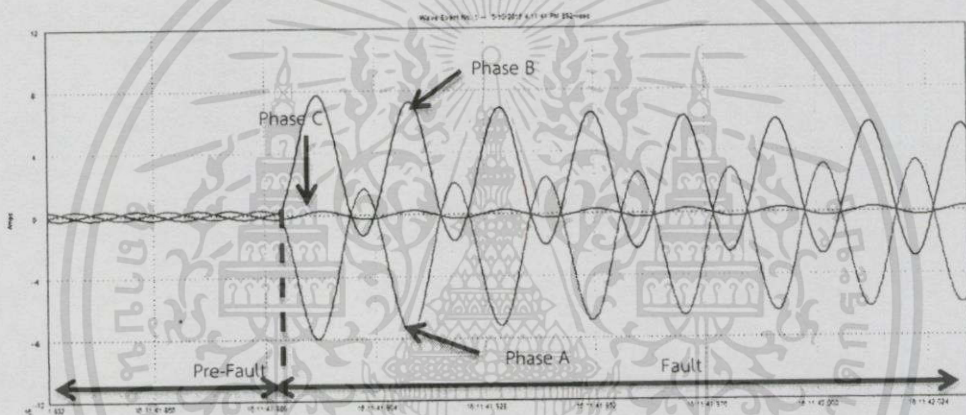
การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	5.58	0.159	5.44	0.201	0.202
50W	0.301	6.56	0.302	6.29	0.336	0.334
R-L	0.432	9.808	0.45	9.655	0.469	0.451

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อนแต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.5 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

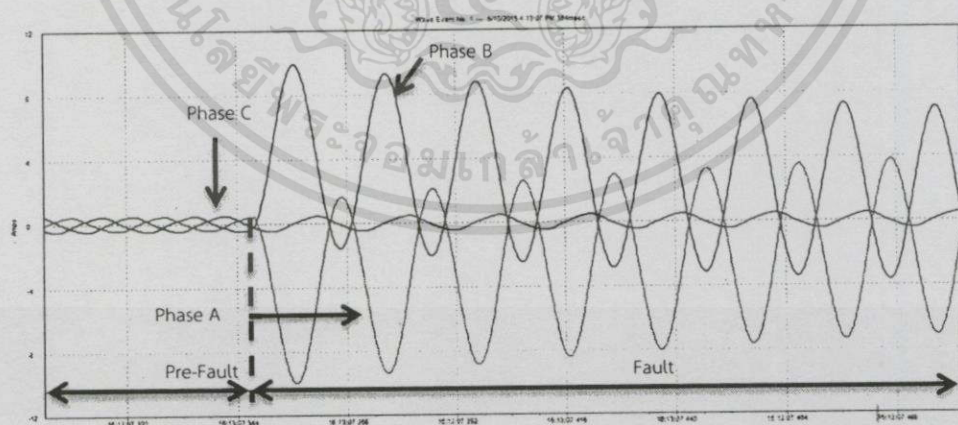
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.7(ก), รูปที่ 4.7(ข) และรูปที่ 4.7(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.7 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.6(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.7(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากรูปคลื่นอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.7(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B รวมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.7(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.7(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.6(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.7(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.7(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.7(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.7(ก) และรูปที่ 4.7(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูป

คลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น เช่นเดียวกับกับกรณี 4.5(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.6(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.7(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.7(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.6 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	7.023	0.159	6.87	0.192	0.195
50W	0.301	7.82	0.302	7.515	0.336	0.317
R-L	0.432	9.774	0.45	9.632	0.469	0.469

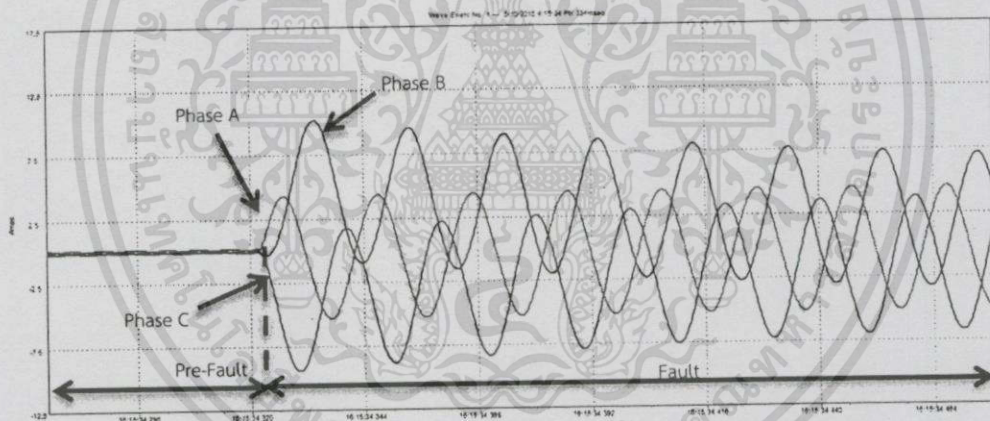
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

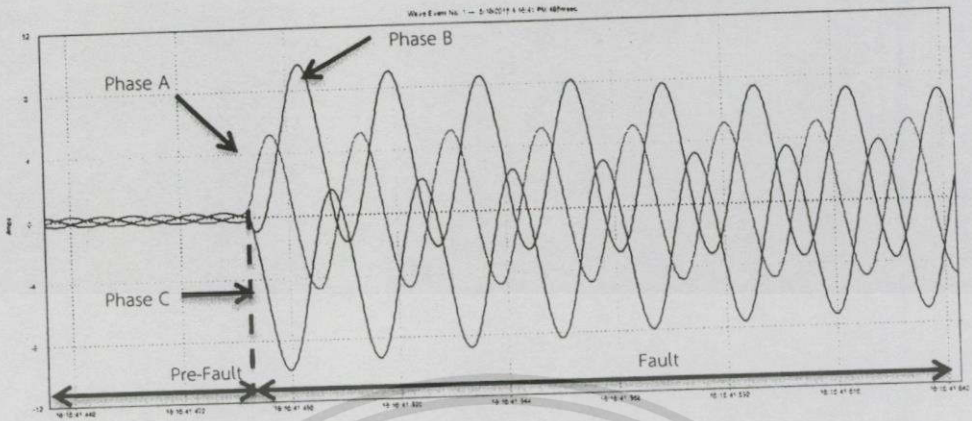
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.1.1.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

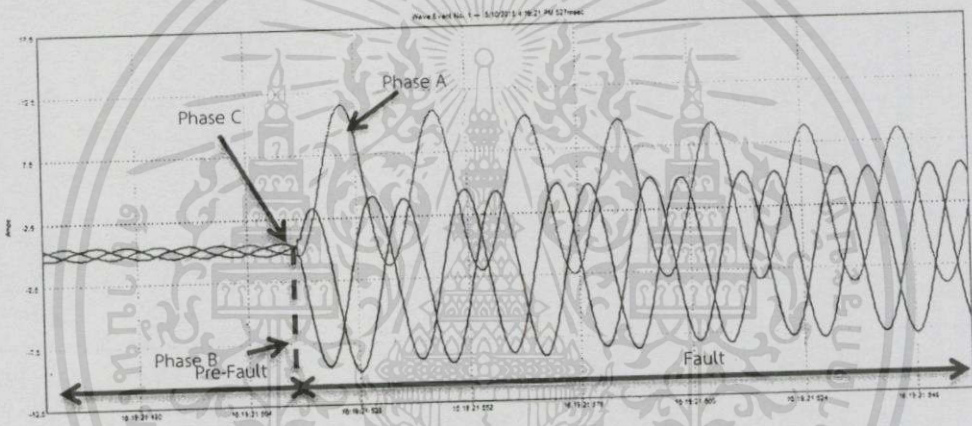
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.8(ก), รูปที่ 4.8(ข) และรูปที่ 4.8(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.8 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°)

จากรูปที่ 4.8(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.8(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้ม

และค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.8(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณตั้งอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.8(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.8(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.8(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณตั้งอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.8(ก) และรูปที่ 4.8(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสลัดหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.2(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.8(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

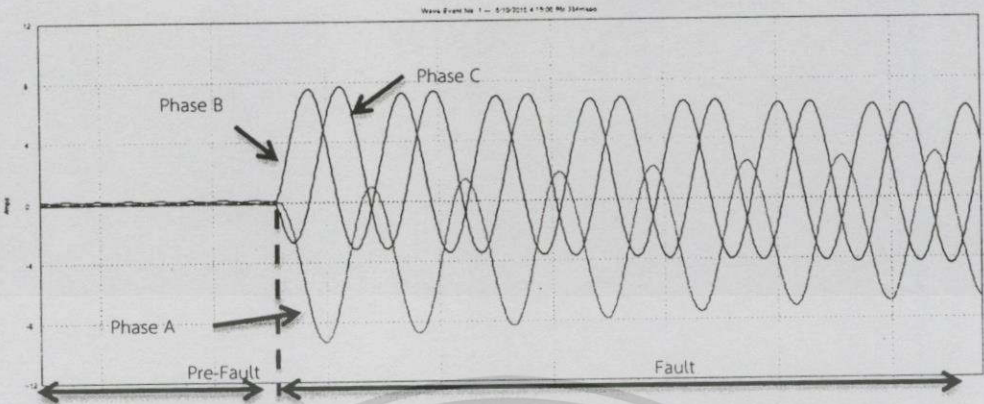
ตารางที่ 4.7 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 130 mH		C : 24 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	6.462	0.159	8.797	0.209	7.835
50W	0.301	7.24	0.302	7.55	0.336	10.24
R-L	0.432	11.265	0.45	8.694	0.469	9.834

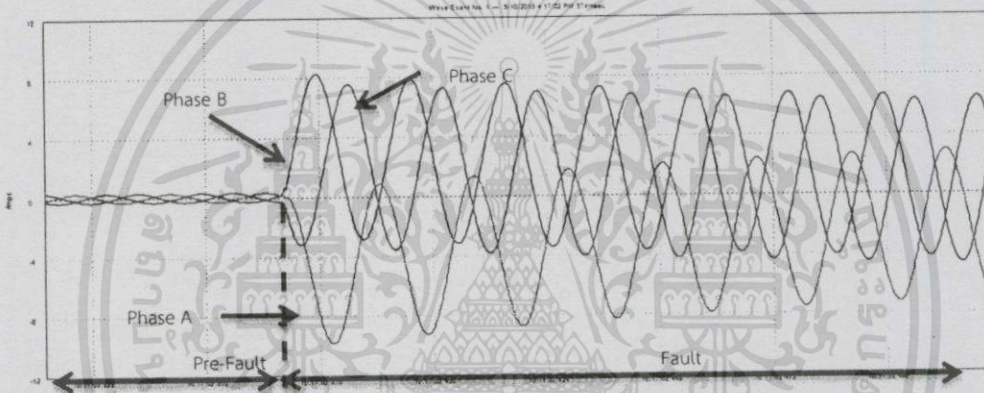
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.7 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

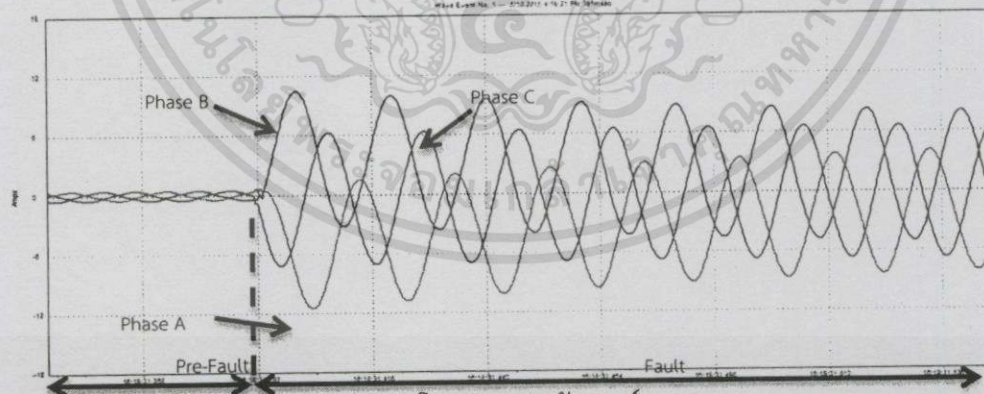
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.9(ก), รูปที่ 4.9(ข) และรูปที่ 4.9(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.9 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A ,เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.8(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.9(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดในระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด $25W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.9(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.9(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.9(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ $400V$ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.6(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.9(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $50W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.7(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด $25W$

จากรูปที่ 4.9(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.9(ก) และรูปที่ 4.9(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น เช่นเดียวกับกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.8(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.9(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างกรลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.9(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.8 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		80 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 18.4112 mH		C : 0.1615 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 130 mH		C : 24 nF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180 $^\circ$				
โหลด	I _A (A)		I _B (A)		I _C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	9.403	0.159	6.512	0.211	7.713
50W	0.301	10.274	0.302	7.687	0.336	7.282
R-L	0.432	11.154	0.45	11.127	0.469	7.053

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง

เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโพลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	5.249	5.939	11.436	6.944	6.81	11.089	5.58	6.56	9.808	6.462	7.24	11.265
I _B MAX	0.183	0.313	0.427	9.182	10.012	7.839	5.44	6.29	9.655	8.797	7.55	8.694
I _C MAX	0.206	0.332	0.452	0.206	0.336	0.464	0.202	0.334	0.451	7.835	10.24	9.834

จากตารางที่ 4.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดปกติ (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมกระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 16 กิโลเมตร หรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	9.109	9.533	9.698	9.266	10.26	10.989	7.023	7.82	9.774	9.403	10.274	11.154
I _B MAX	0.183	0.313	0.416	7.038	8.083	10.903	6.87	7.515	9.632	6.512	7.687	11.127
I _C MAX	0.206	0.336	0.456	0.214	0.336	0.469	0.195	0.317	0.469	7.713	7.282	7.053

จากตารางที่ 4.10 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 20%, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงร้นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.9 แต่ขนาดของกระแสและมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรดังที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

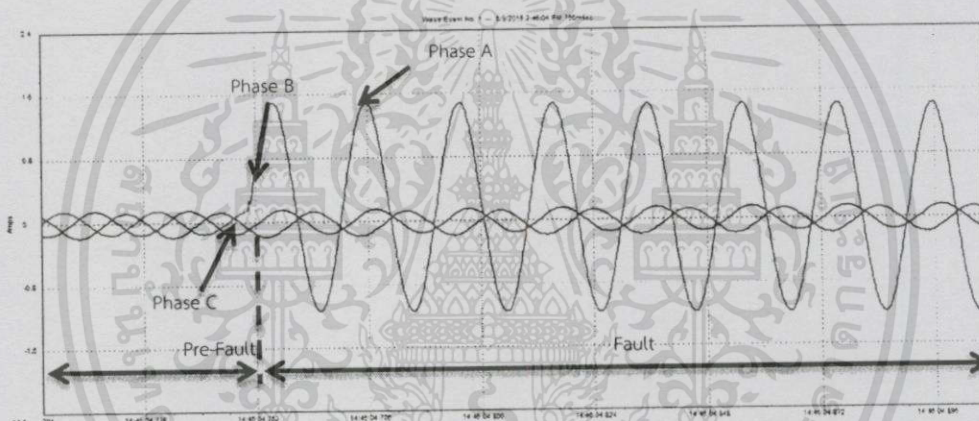
หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะรุนแรงที่สุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะเกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุด ในโครงการนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดังอธิบาย

4.1.2 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง

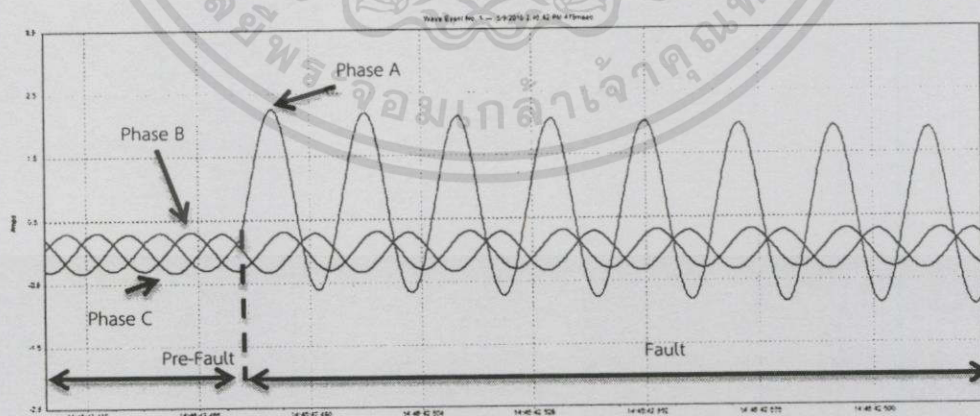
การลัดวงจรในชุดทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.1.2.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

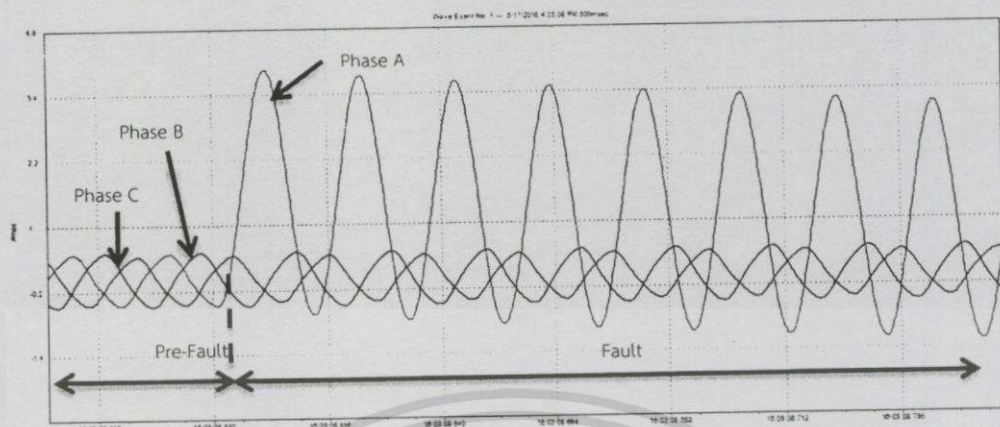
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.10(ก), รูปที่ 4.10(ข) และรูปที่ 4.10(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.10 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.10(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.10(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.10(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

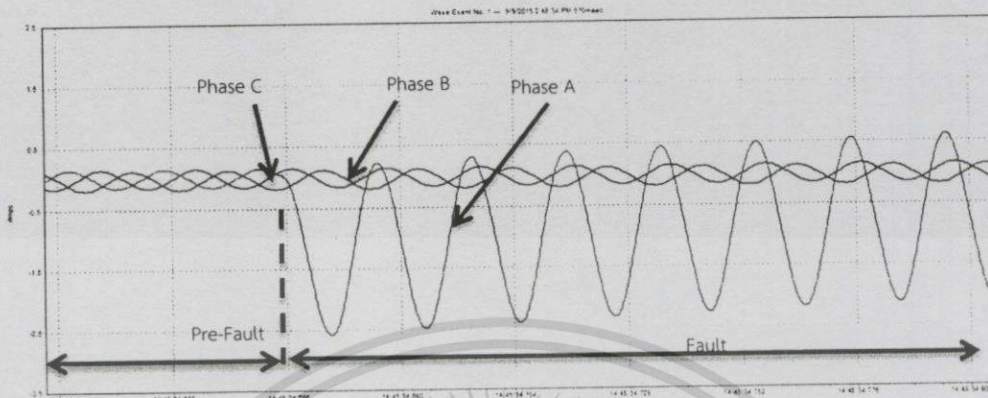
จากรูปที่ 4.10(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.10(ก) และรูปที่ 4.10(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.11 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

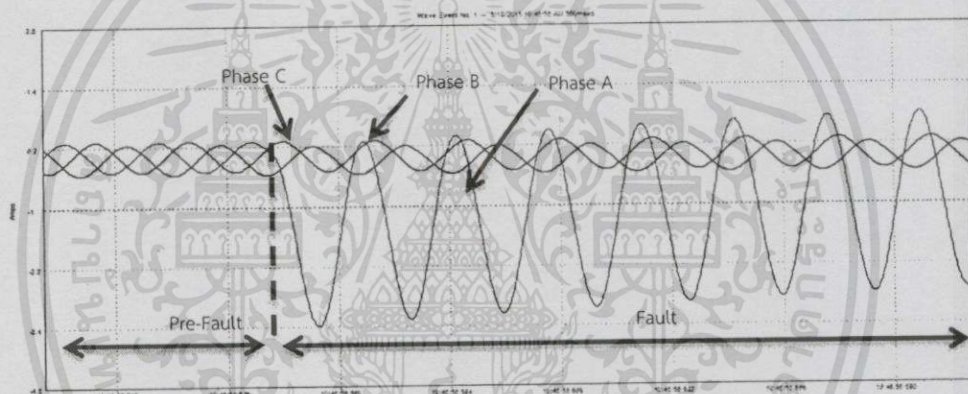
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหนด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	1.499	0.153	0.153	0.187	0.183
50W	0.294	2.254	0.305	0.305	0.34	0.34
R-L	0.431	3.82	0.454	0.454	0.481	0.481

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดที่ 25W, 50W และโหนด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด R-L นั้น จะมีความมากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหนด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหนดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหนดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

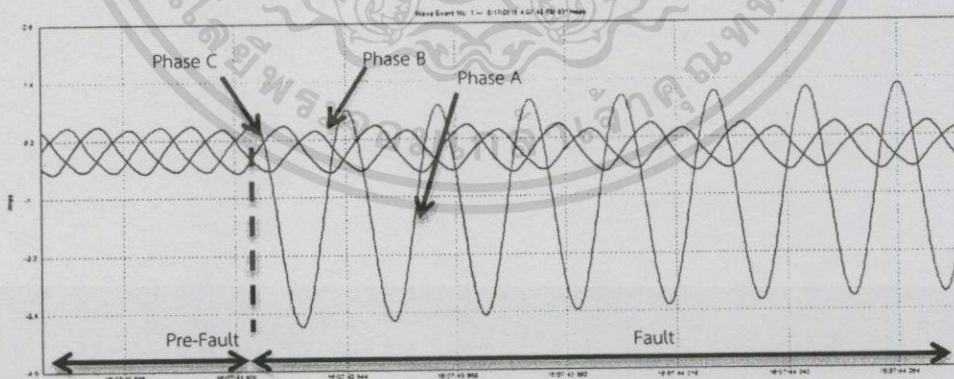
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหนด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.11(ก), รูปที่ 4.11(ข) และรูปที่ 4.11(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.11 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.11(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.11(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.3(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.11(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการปรับแรงดันโวลต์เพิ่ม และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.10(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.11(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$

จากรูปที่ 4.11(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.11(ก) และรูปที่ 4.11(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.10(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.11(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.12 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

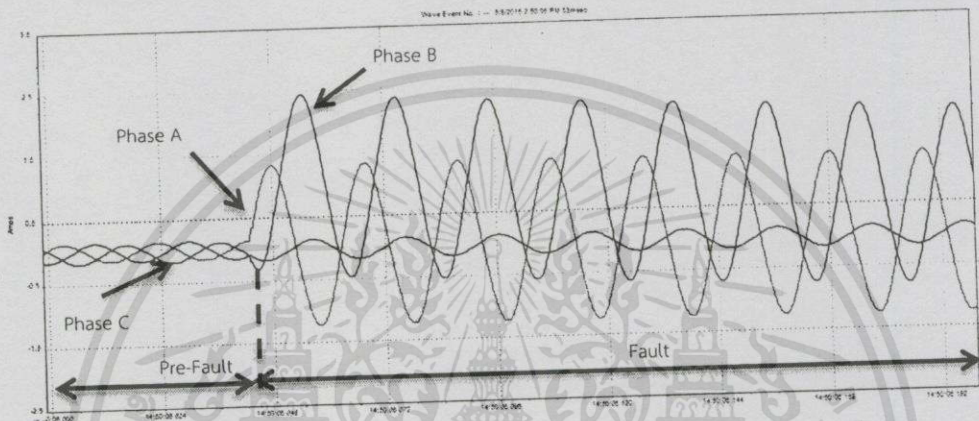
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	2.583	0.153	0.153	0.183	0.187
50W	0.301	3.395	0.305	0.301	0.332	0.332
R-L	0.427	3.55	0.454	0.454	0.484	0.488

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.11

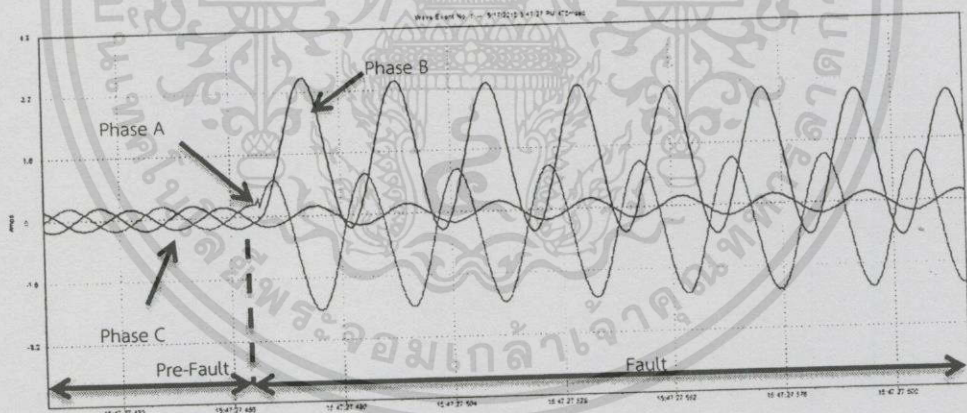
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.1.2.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

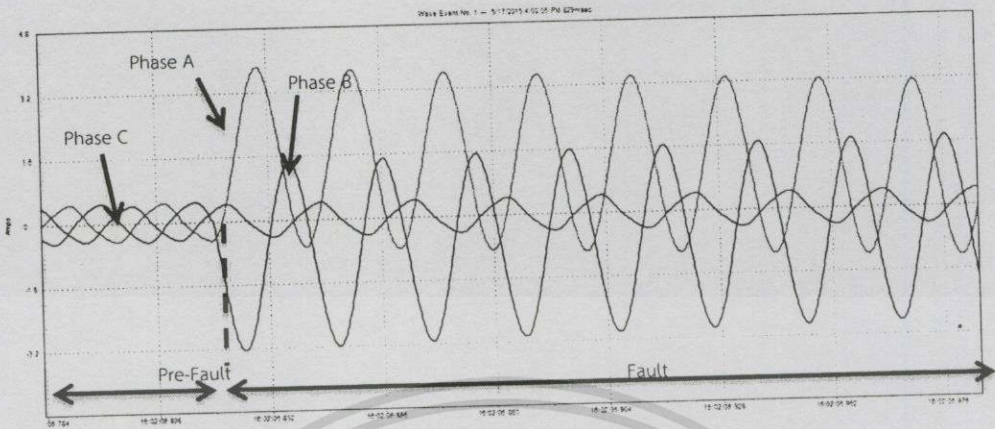
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.12(ก), รูปที่ 4.12(ข) และรูปที่ 4.12(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.12 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.12(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่ามีค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุมดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าใกล้แกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.12(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.12(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.12(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.12(ค) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.12(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.12(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.12(ก)และรูปที่ 4.12(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.12(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

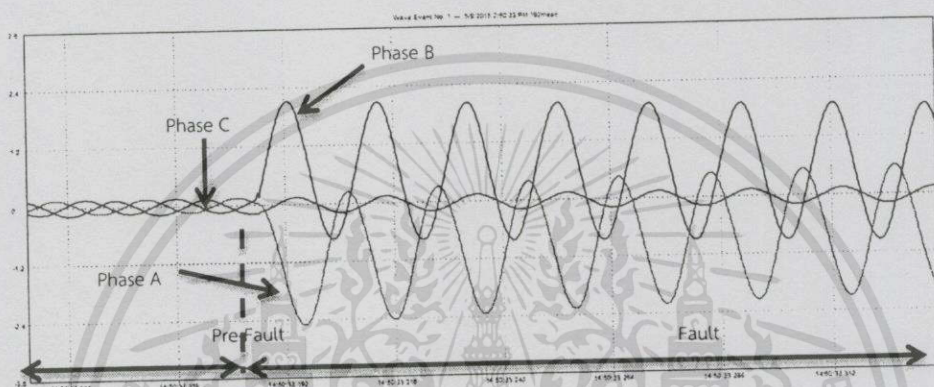
ตารางที่ 4.13 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	1.339	0.149	2.445	0.179	0.183
50W	0.298	2.46	0.305	3.57	0.332	0.332
R-L	0.431	3.83	0.454	3.25	0.484	0.484

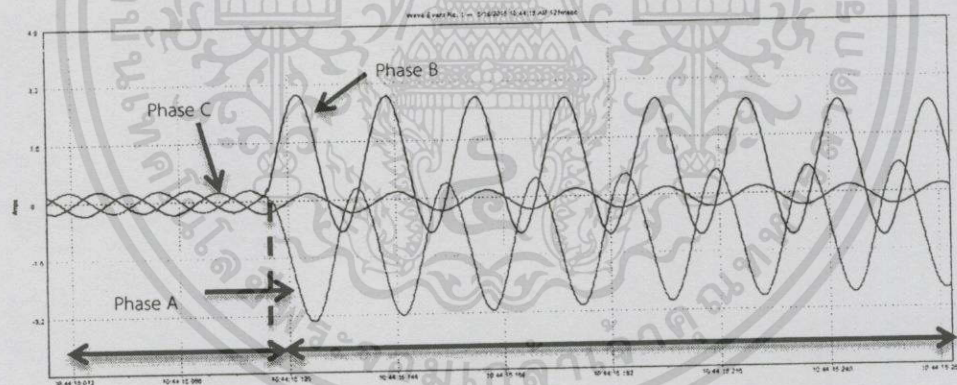
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.13 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

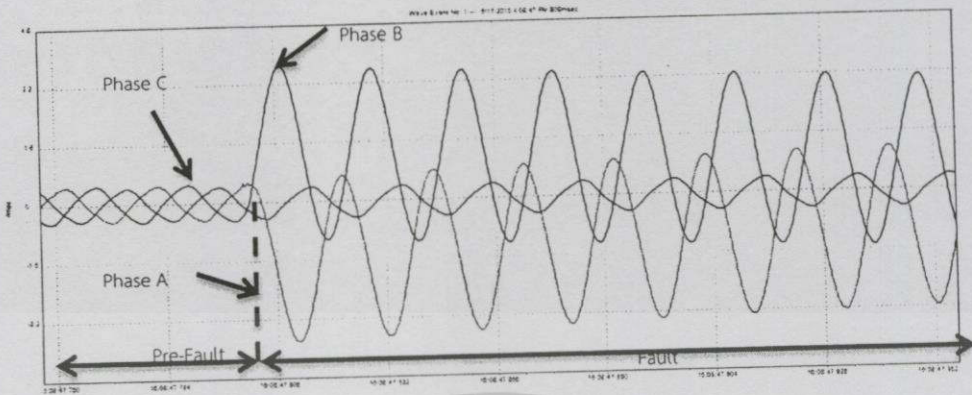
เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.13(ก), รูปที่ 4.13(ข) และรูปที่ 4.13(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.13 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.13(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.12(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.13(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า ดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.13(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B รวมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.13(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.13(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.12(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.13(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.13(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.13(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.13(ก) และรูปที่ 4.13(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ดังที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.12(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.13(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.13(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.14 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

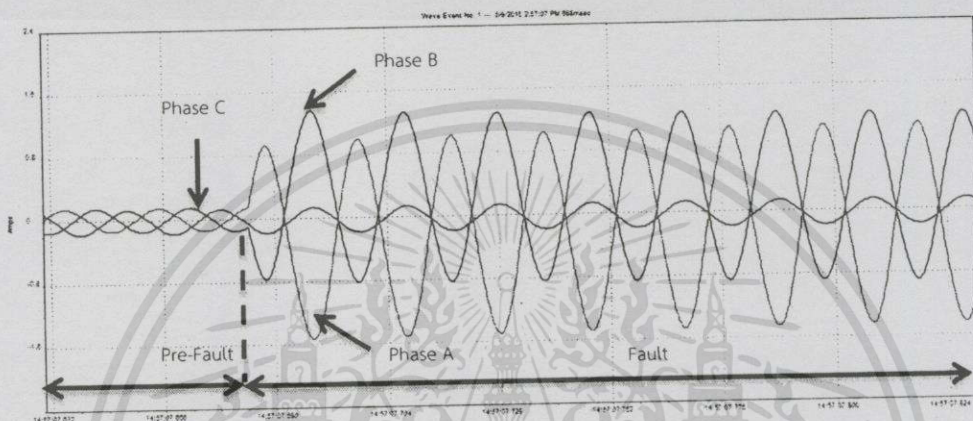
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.506	0.149	2.117	0.179	0.183
50W	0.301	3.61	0.304	2.922	0.332	0.332
R-L	0.431	3.81	0.458	3.7	0.488	0.477

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้น

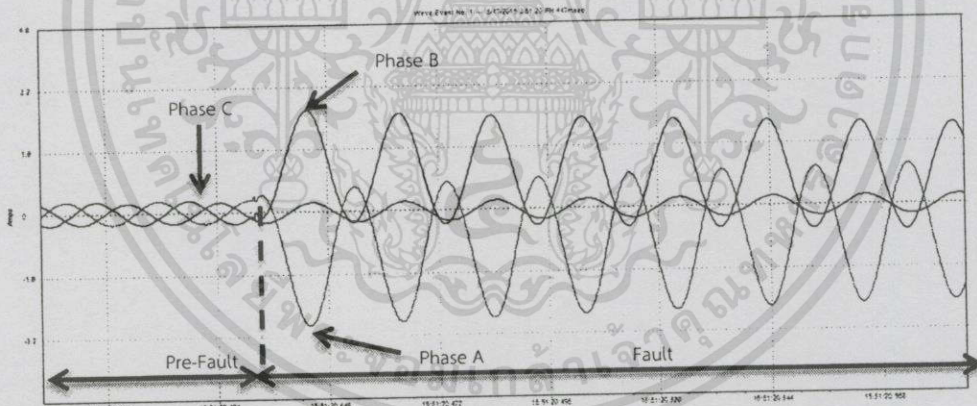
เมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.1.2.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

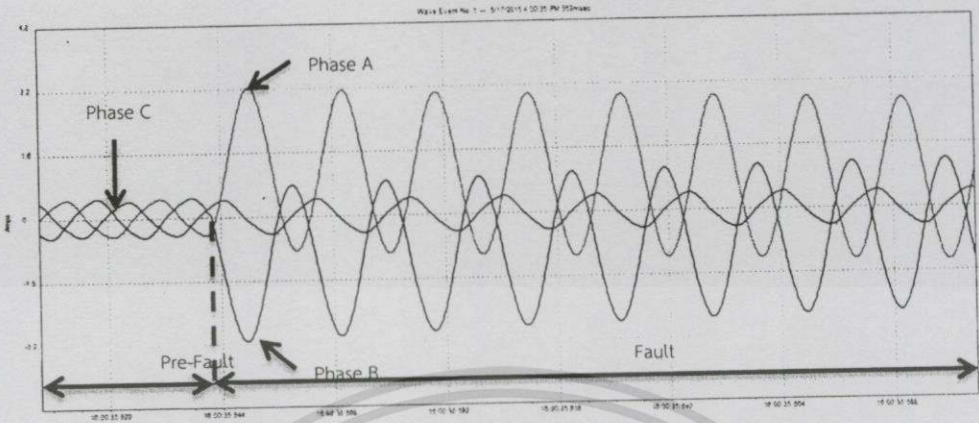
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.14(ก), รูปที่ 4.14(ข) และรูปที่ 4.14(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.14 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.14(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.14(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากการเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.14(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.14(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.14(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.14(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.14(ก)และรูปที่ 4.14(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

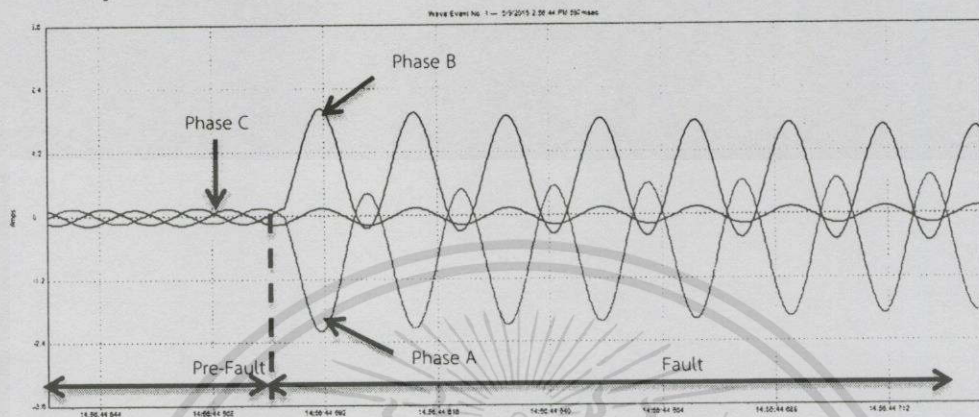
ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.14(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.15 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

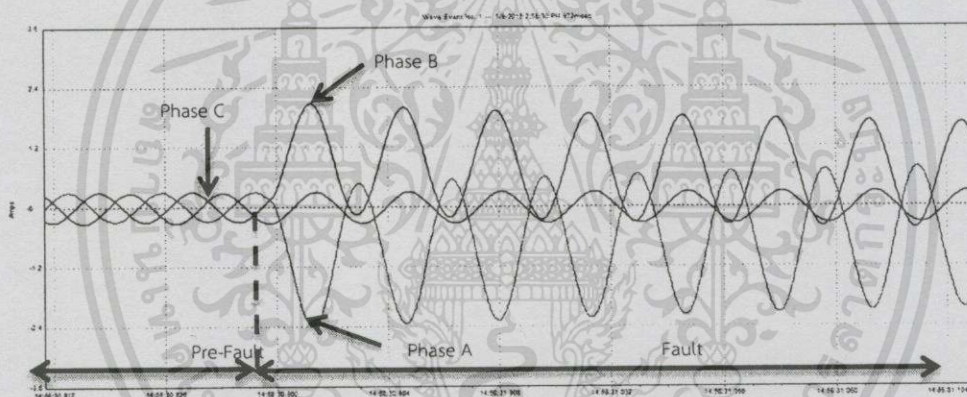
การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	1.534	0.149	1.354	0.179	0.179
50W	0.294	2.92	0.305	2.61	0.336	0.336
R-L	0.435	3.61	0.454	3.53	0.488	0.492

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อน แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.15 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

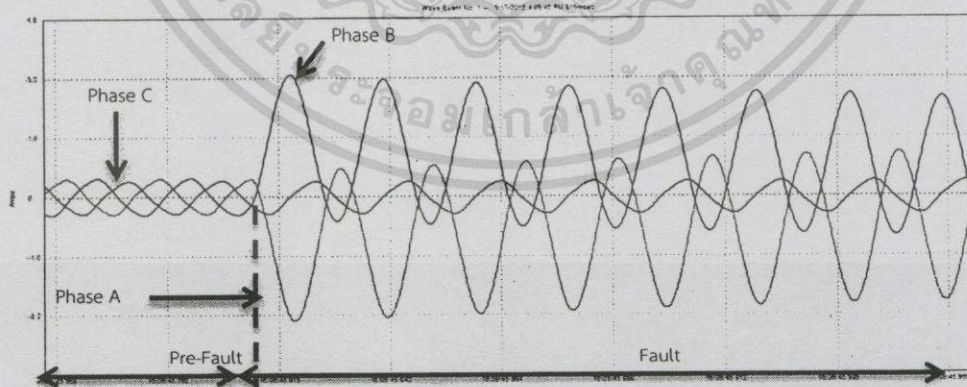
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.15(ก), รูปที่ 4.15(ข) และรูปที่ 4.15(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.15 ระยะเวลาขยายสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.15(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.14(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.15(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้เคียงกันมากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.15(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.15(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.15(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.14(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.15(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.15(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.7(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.15(ก)และรูปที่ 4.15(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูป

คลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น เช่นเดียวกับกับกรณี 4.13(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.14(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.15(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.15(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันในขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.16 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.197	0.153	2.026	0.179	0.179
50W	0.294	2.99	0.305	2.09	0.332	0.332
R-L	0.431	3.49	0.454	3.28	0.484	0.481

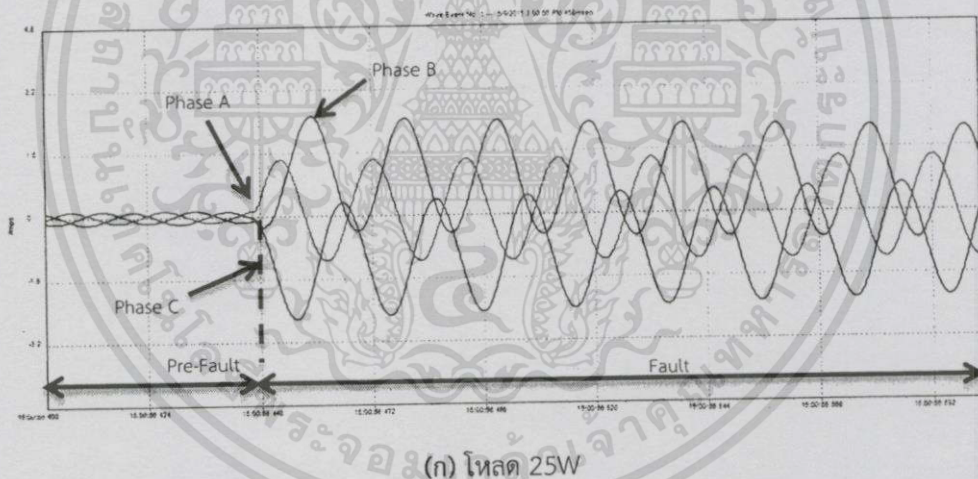
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

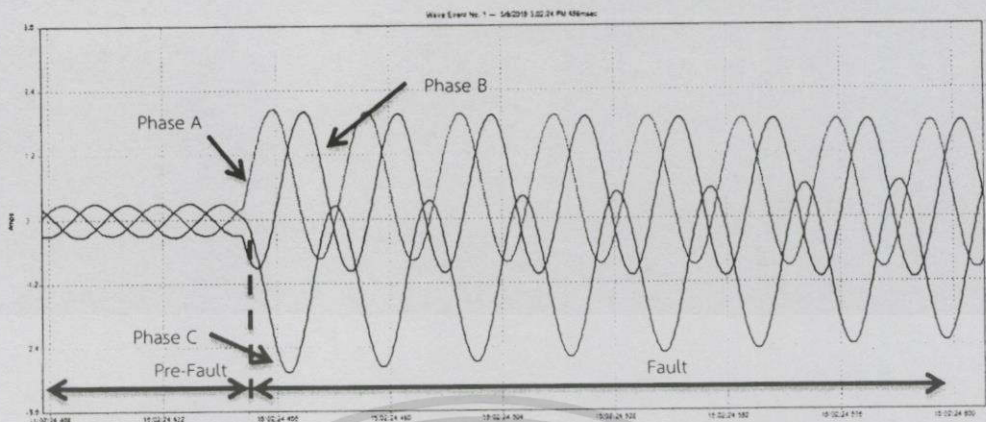
ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.16 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.15 และตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

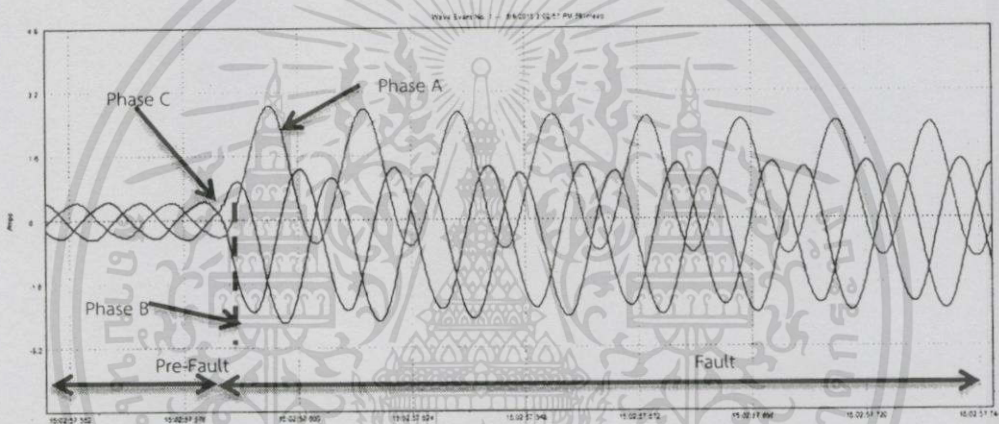
4.1.2.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.16(ก), รูปที่ 4.16(ข) และรูปที่ 4.16(ค)





(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัสลาค์

รูปที่ 4.16 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.16(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.16(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้ม

และค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.16(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.16(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.16(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.16(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.16(ก) และรูปที่ 4.16(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.10(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.16(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

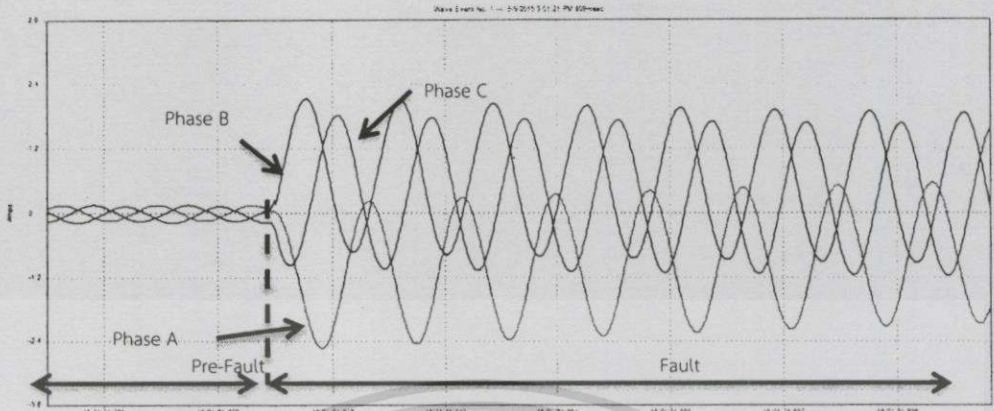
ตารางที่ 4.17 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 390 mH		C : 72 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	1.442	0.153	2.533	0.179	2.545
50W	0.298	2.052	0.305	2.003	0.332	2.769
R-L	0.435	3.86	0.458	2.49	0.484	3.52

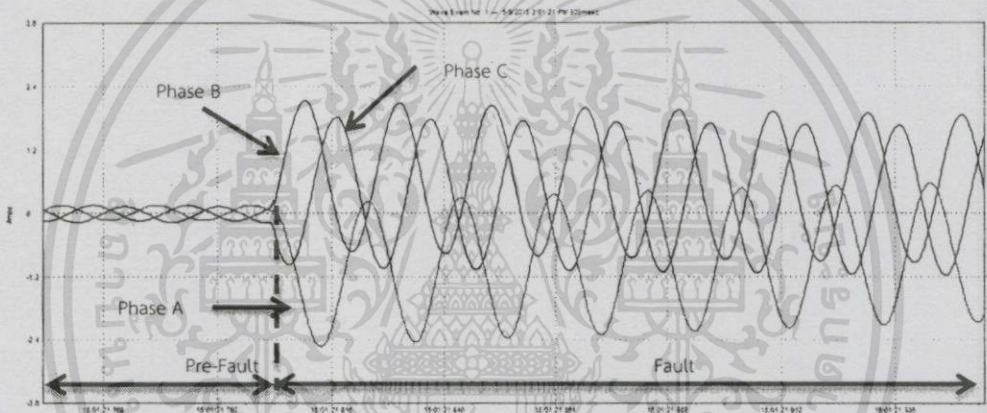
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปจนน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มีมุม 90° ตามตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.17 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

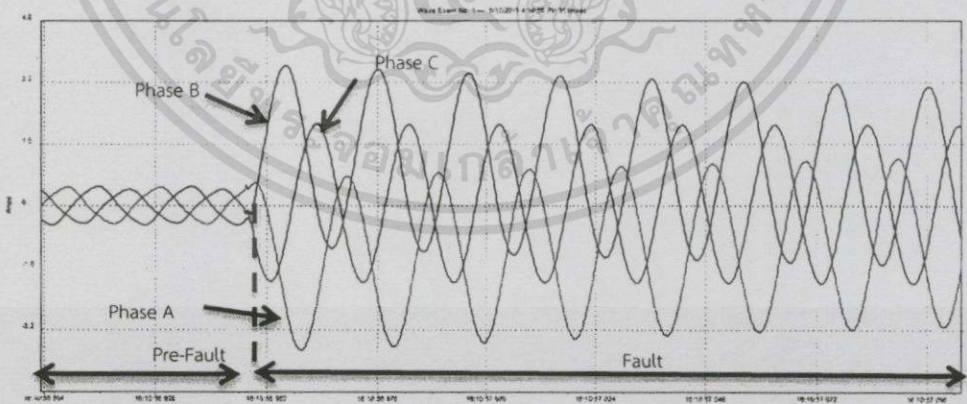
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มีมุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.17(ก), รูปที่ 4.17(ข) และรูปที่ 4.17(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.17 ระยะเวลาขยายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณาการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A ,เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.17(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.17(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด $25W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.17(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.17(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.17(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ $400V$

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.14(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.17(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $50W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.15(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด $25W$

จากรูปที่ 4.17(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.17(ก) และรูปที่ 4.17(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.16(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.17(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟส

อ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.11(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.17(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.18 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		80 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 55.2336 mH		C : 0.4845 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 390 mH		C : 72 nF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180 $^\circ$				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.629	0.153	2.136	0.179	1.82
50W	0.298	2.802	0.305	2.464	0.332	1.724
R-L	0.431	3.73	0.458	3.63	0.484	2.13

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.17 และตารางที่ 4.18 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง

เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหนดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.18 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°



ตารางที่ 4.19 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm , มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	1.499	2.254	3.82	1.339	2.46	3.83	1.534	2.92	3.61	1.442	2.052	3.86
I _B MAX	0.153	0.305	0.454	2.445	3.57	3.25	1.354	2.61	3.53	2.533	2.003	2.49
I _C MAX	0.183	0.34	0.481	0.183	0.332	0.484	0.179	0.336	0.492	2.545	2.769	3.52

จากตารางที่ 4.19 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดปกติ (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm, มุมกระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 48 กิโลเมตร หรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสาม เฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A , MAX	2.583	3.395	3.550	2.506	3.610	3.810	2.197	2.990	3.490	2.629	2.802	3.730
I _B , MAX	0.153	0.301	0.454	2.117	2.922	3.700	2.026	2.090	3.280	2.136	2.464	3.630
I _C , MAX	0.187	0.332	0.488	0.183	0.332	0.477	0.179	0.332	0.481	1.820	1.724	2.130

จากตารางที่ 4.20 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 60%, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงจรนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.19 แต่ขนาดของกระแสและมุมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรดังที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

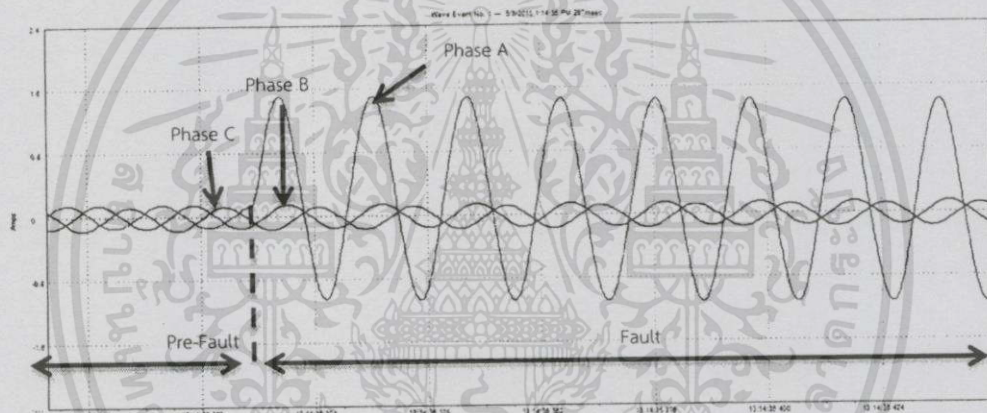
หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะรุนแรงที่สุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะเกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุด ในโครงการงานนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดังอธิบาย

4.1.3 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง

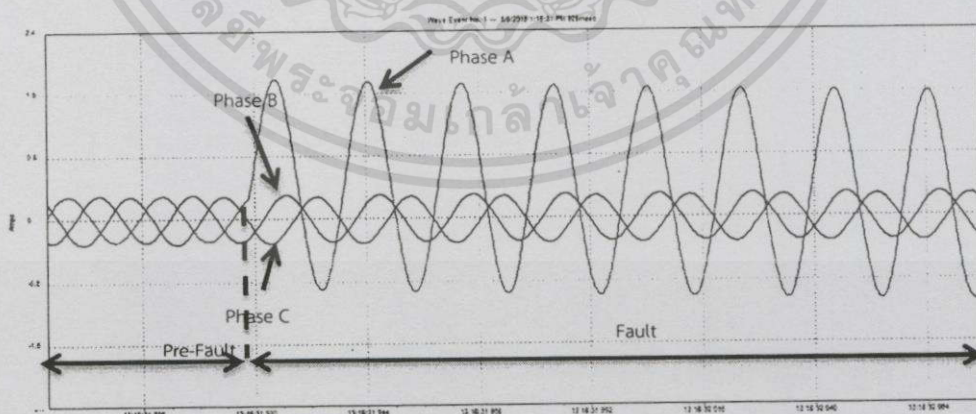
การลัดวงจรในชุดทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.1.3.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

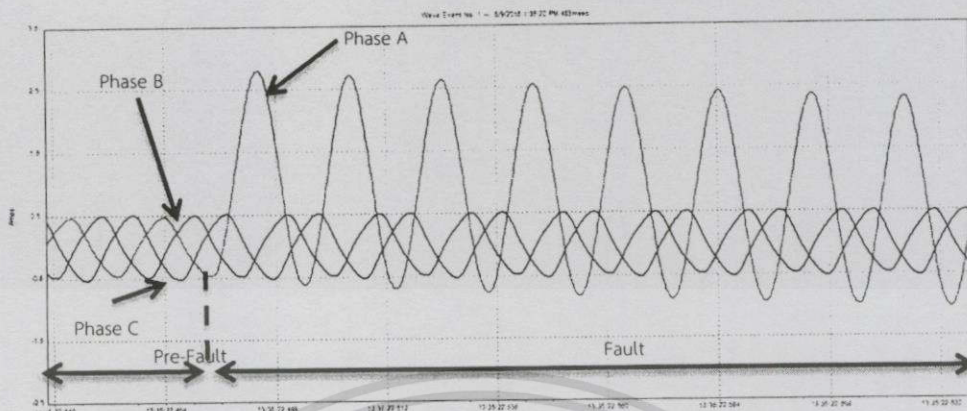
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.18(ก), รูปที่ 4.18(ข) และรูปที่ 4.18(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+ขั้วลลัสต์

รูปที่ 4.18 ระยะเวลาความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดการลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.18(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.18(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.18(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

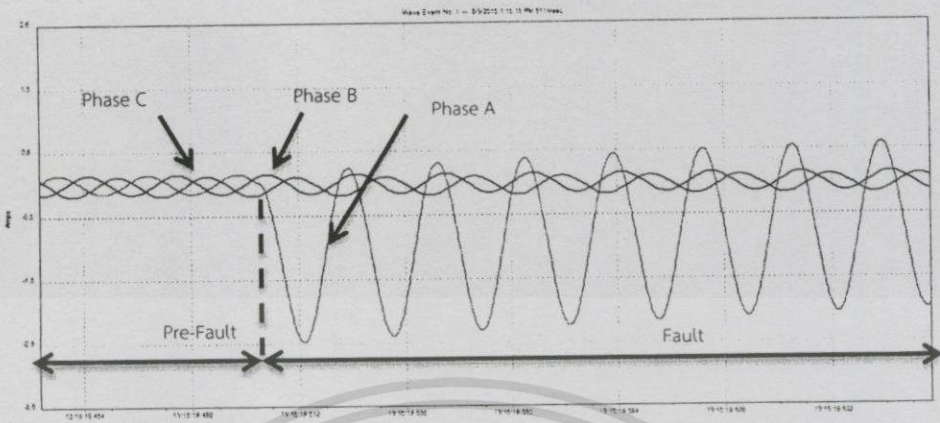
จากรูปที่ 4.18(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+ขั้วลลัสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.18(ก) และรูปที่ 4.18(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าช้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.21 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

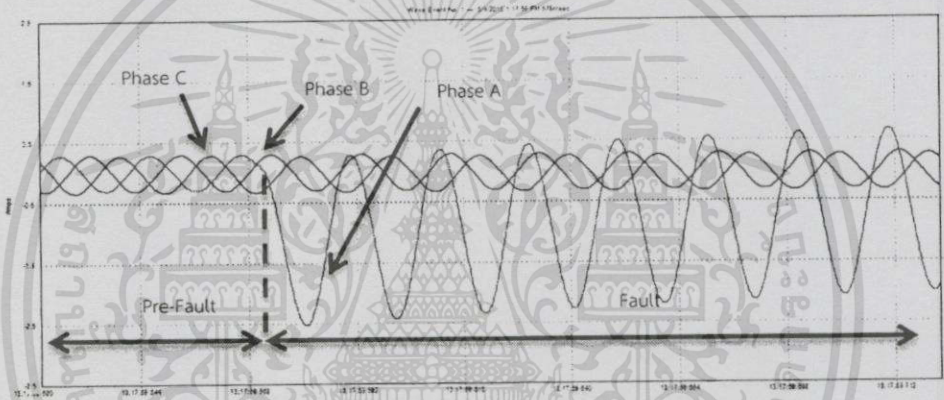
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 520 mH		C : 96 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	1.511	0.153	0.153	0.134	0.118
50W	0.294	1.789	0.305	0.298	0.328	0.278
R-L	0.469	2.800	0.496	0.496	0.557	0.557

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

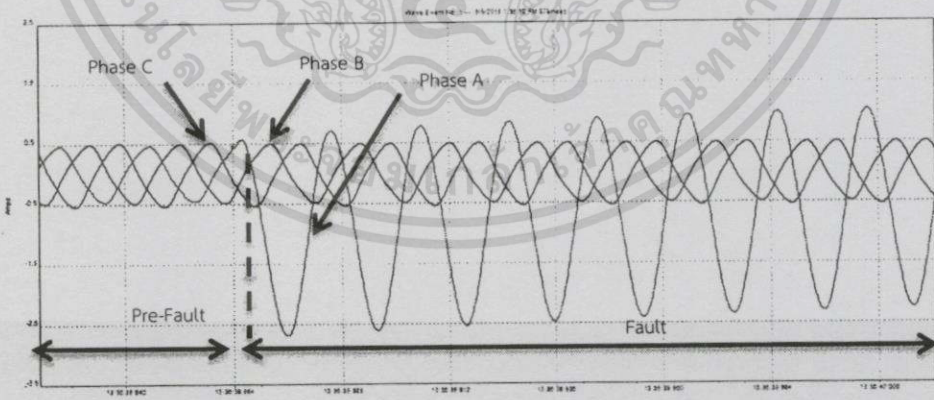
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.19(ก), รูปที่ 4.19(ข) และรูปที่ 4.19(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.19 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจาก นั้นค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.18(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.19(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่ พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.19(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.19(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการปรับแรงดันโหลดเพิ่ม และเมื่อทำการ เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.18(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.19(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$

จากรูปที่ 4.19(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W + \text{บัลลัสต์}$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.19(ก) และรูปที่ 4.19(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และจะเห็น ได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุม แตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลัสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลัง แรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W + \text{บัลลัสต์}$ เมื่อ เกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.18(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.19(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็น เฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบาย ไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.22 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

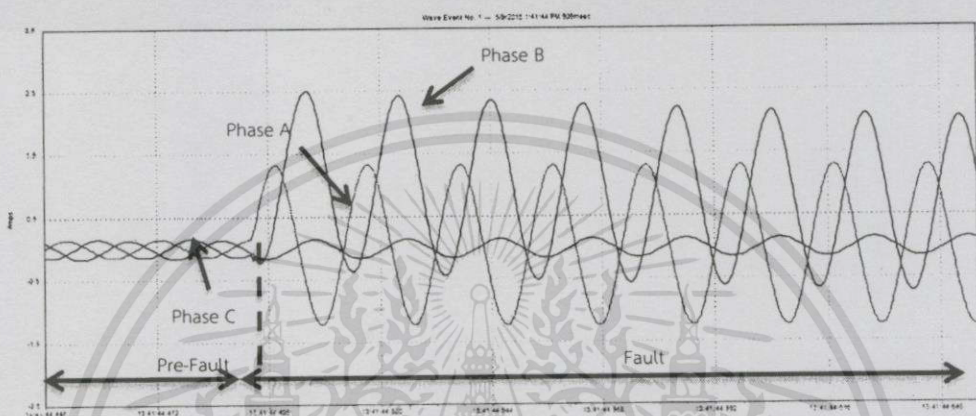
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 520 mH		C : 96 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.48	0.153	0.145	0.179	0.178
50W	0.298	2.522	0.298	0.298	0.324	0.324
R-L	0.469	2.725	0.496	0.496	0.538	0.538

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.21

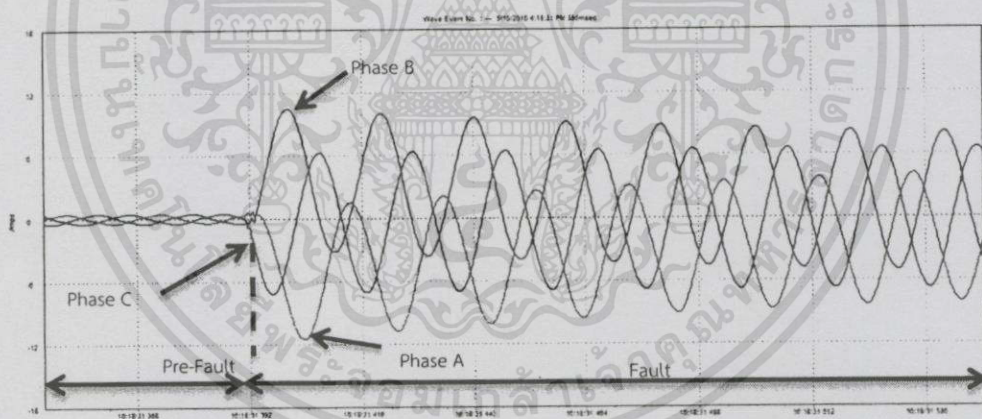
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.21 และตารางที่ 4.22 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.1.3.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

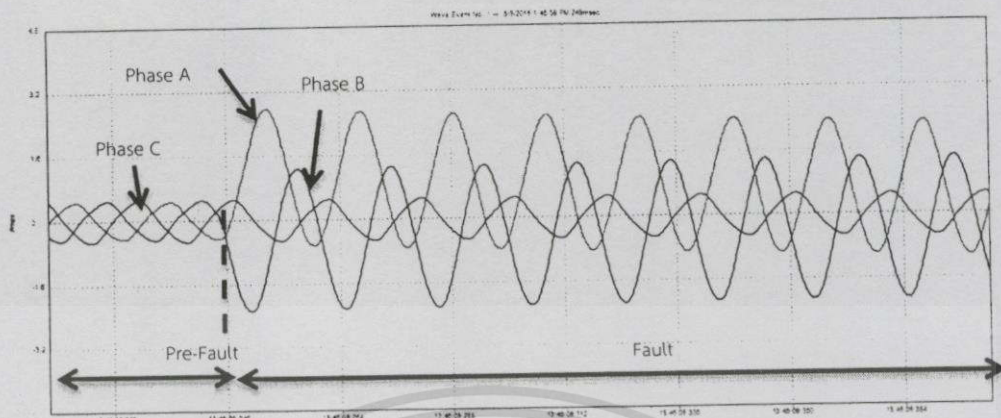
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.20(ก), รูปที่ 4.20(ข) และรูปที่ 4.20(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.20 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.20(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุมดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าใกล้แกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.20(ก) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.20(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.20(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.20(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.20(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.20(ก) และรูปที่ 4.20(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.20(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

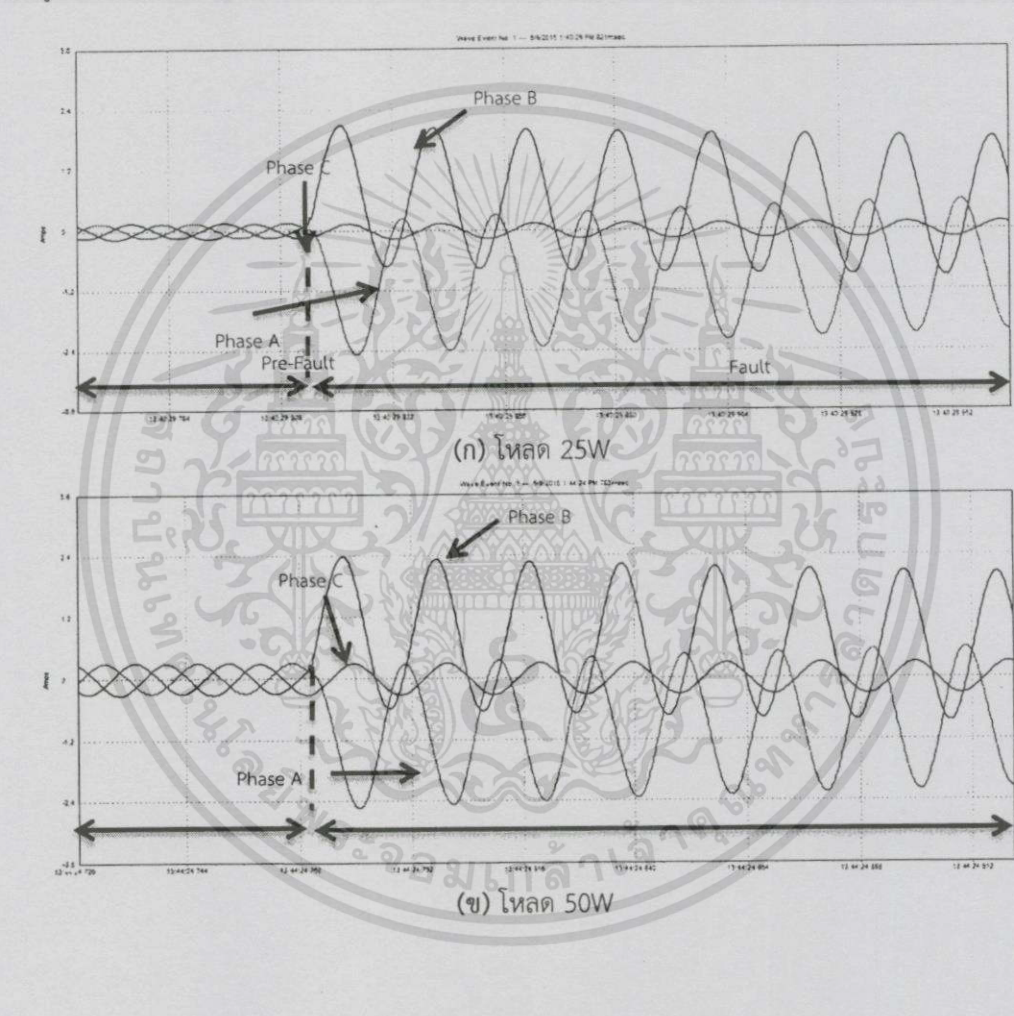
ตารางที่ 4.23 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

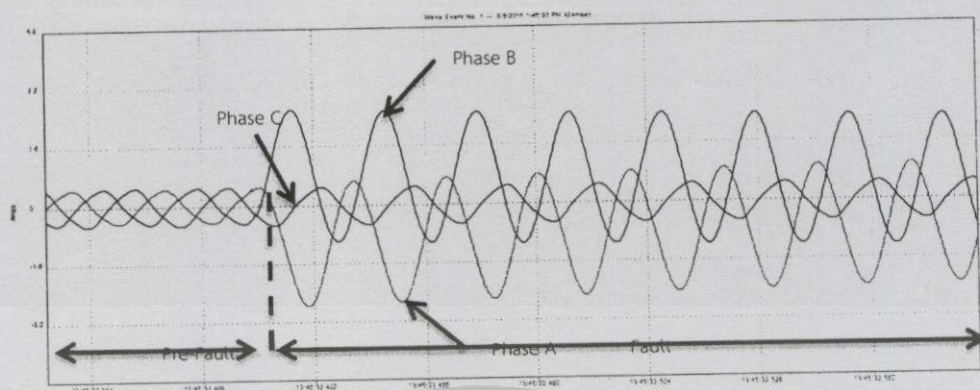
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		80 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 73.6488 mH		C : 0.646 μF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 520 mH		C : 96 nF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I _A (A)		I _B (A)		I _C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	1.328	0.153	2.50	0.134	0.145
50W	0.294	1.46	0.305	2.628	0.328	0.328
R-L	0.469	2.769	0.496	2.285	0.557	0.557

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.21 และ ตารางที่ 4.23 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.21(ก), รูปที่ 4.21(ข) และรูปที่ 4.21(ค)





(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.21 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.21(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.20(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.21(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.21(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.21(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.21(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.20(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.21(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.21(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.21(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.21(ก) และรูปที่ 4.21(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีความแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ดังที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.20(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.21(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.21(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.24 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

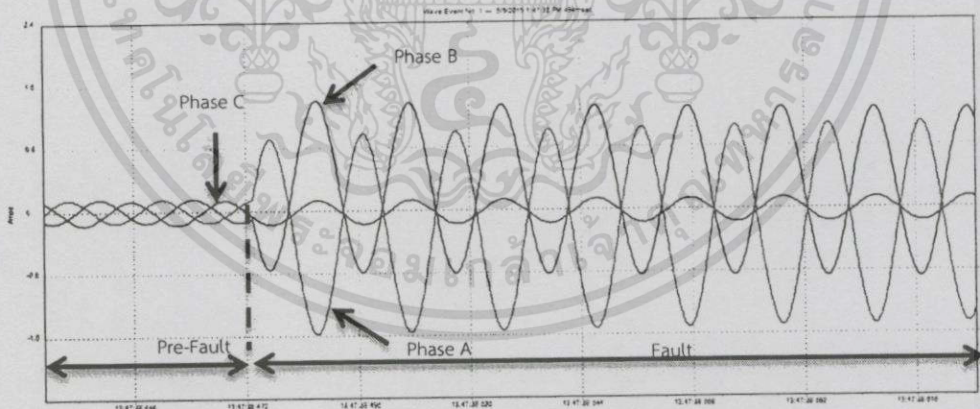
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง 115 kV 80 MVA						
Base ระบบจำลอง 400 V (L-L) 150 VA						
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง L : 73.6488 mH C : 0.646 μ F						
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง L : 520 mH C : 96 nF						
มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°						
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.476	0.153	2.09	0.179	0.172
50W	0.298	2.623	0.305	2.392	0.328	0.328
R-L	0.465	2.754	0.496	2.602	0.542	0.538

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มีลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.23 และตารางที่ 4.24 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มีมุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มีมุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้น

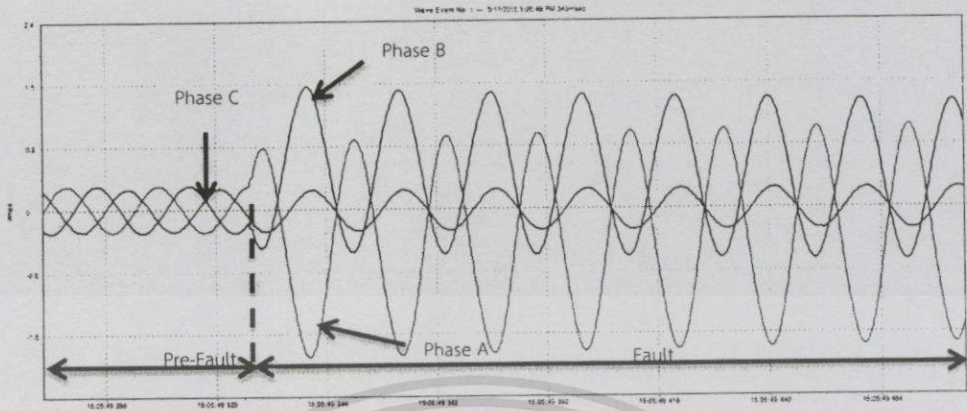
เมื่อพิจารณาที่มีมุม 180° จากตารางที่ 4.22 และตารางที่ 4.24 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.1.3.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

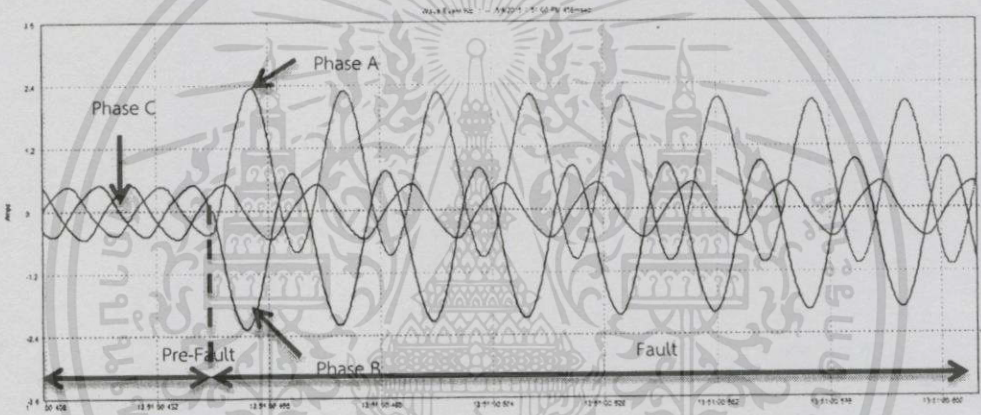
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มีมุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.22(ก), รูปที่ 4.22(ข) และรูปที่ 4.22(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.22 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.22(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.22(ก)

เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.22(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.22(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.22(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.22(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.22(ก) และรูปที่ 4.22(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

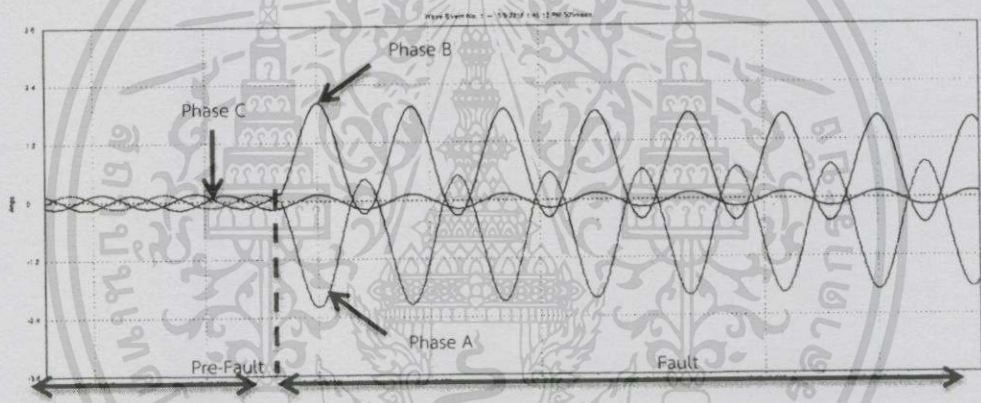
ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.22(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.25 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะเวลายาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

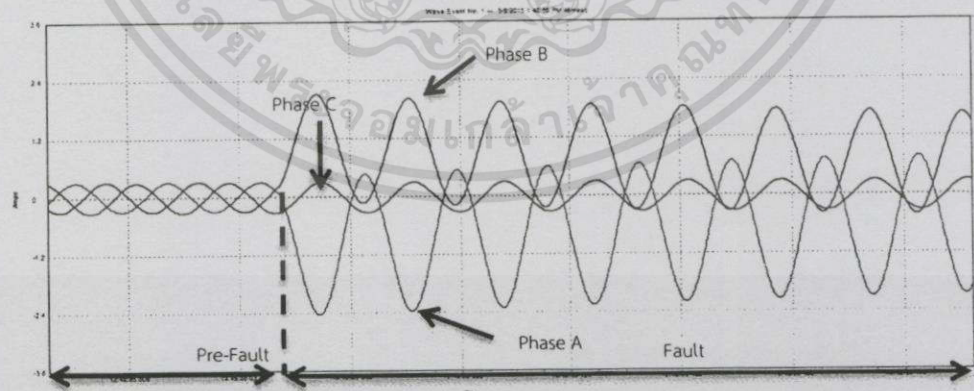
การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		80 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 520 mH		C : 96 nF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90 $^\circ$				
โหลด	I _A (A)		I _B (A)		I _C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	1.579	0.153	1.408	0.134	0.13
50W	0.298	1.89	0.305	1.57	0.328	0.328
R-L	0.469	2.731	0.496	2.277	0.557	0.557

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อน แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มีมุม 90° ตามตารางที่ 4.21 และ ตารางที่ 4.25 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

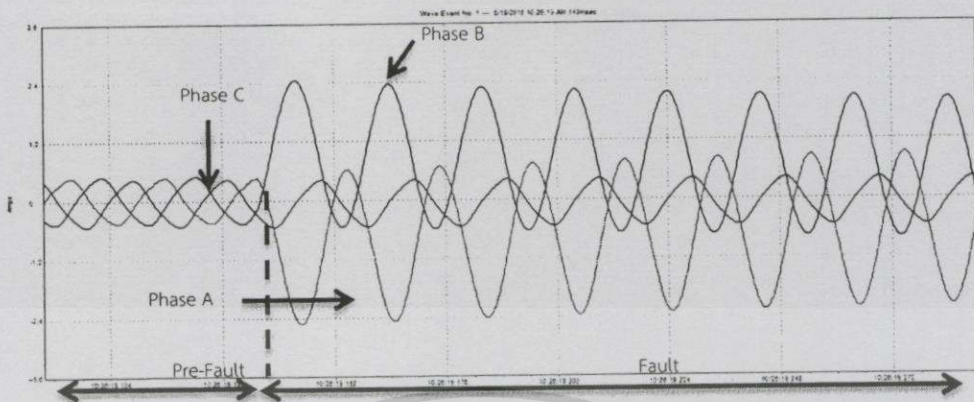
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มีมุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.23(ก), รูปที่ 4.23(ข) และรูปที่ 4.23(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลัสต์

รูปที่ 4.23 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.23(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดินทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.22(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.23(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้เคียงกันมากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.23(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.23(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.23(ก) แต่

มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.22(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.23(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.23(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.23(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.23(ก) และรูปที่ 4.23(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี 4.21(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.21(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.23(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.23(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.26 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะเวลาความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 520 mH		C : 96 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.174	0.153	2.026	0.179	0.175
50W	0.298	2.434	0.305	2.121	0.328	0.328
R-L	0.463	2.621	0.494	2.462	0.541	0.545

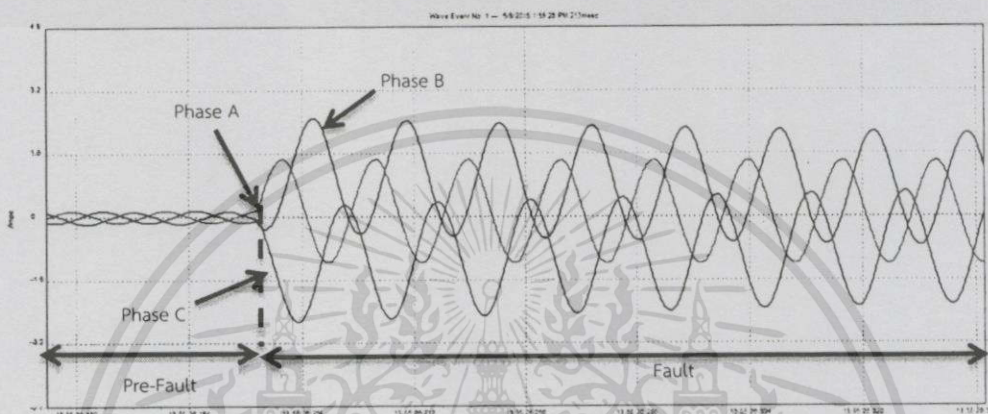
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.22 และตารางที่ 4.26 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

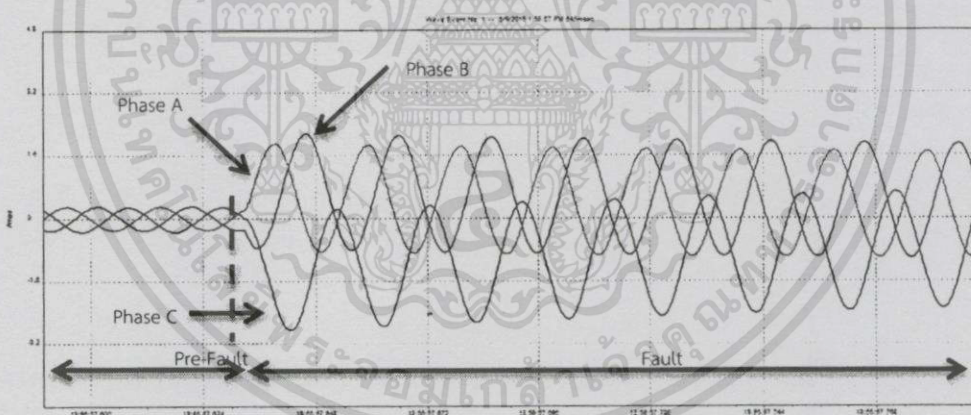
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26 พบว่า เมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.1.3.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

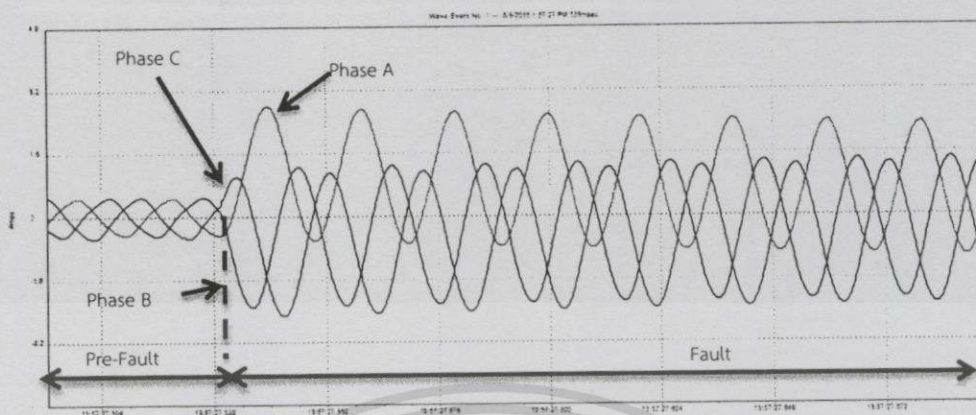
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.24(ก), รูปที่ 4.24(ข) และรูปที่ 4.24(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.24 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.24(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.24(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C รวมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.24(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.24(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีความคงที่ 400V ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.24(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.24(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.24(ก) และรูปที่ 4.24(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.18(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.24(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

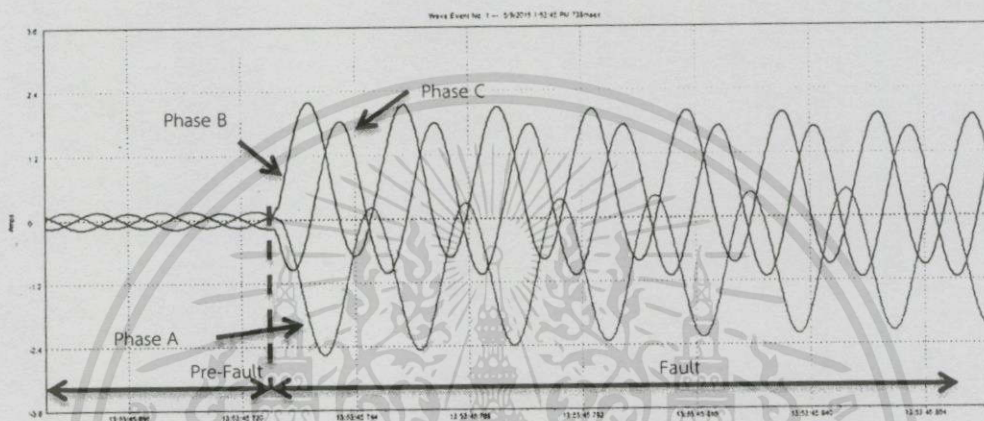
ตารางที่ 4.27 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะเวลาความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		80 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 520 mH		C : 96 nF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.149	1.465	0.153	2.502	0.134	2.595
50W	0.294	1.907	0.305	2.163	0.328	2.843
R-L	0.469	2.954	0.496	1.831	0.557	2.506

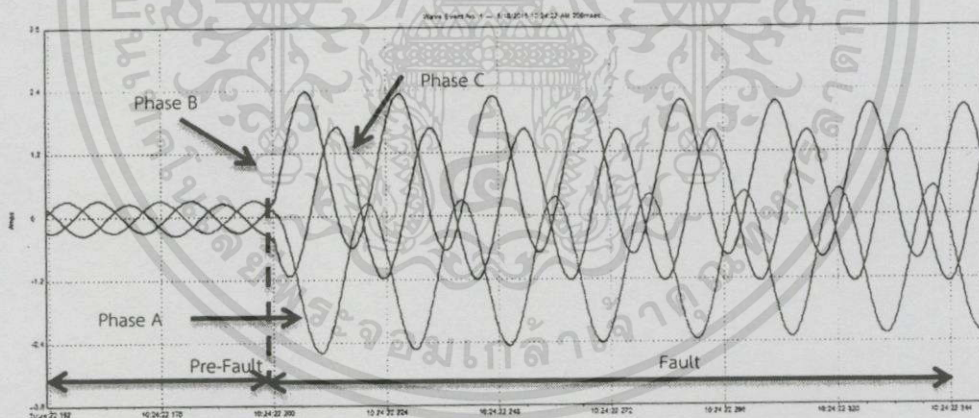
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.21 และ ตารางที่ 4.27 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

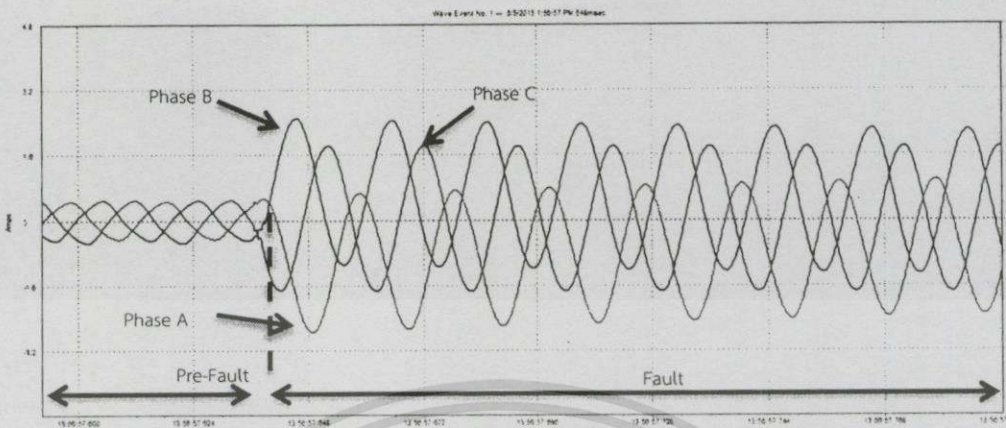
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.25(ก), รูปที่ 4.25(ข) และรูปที่ 4.25(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.25 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดการลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.25(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.24(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.25(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.25(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.25(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.25(ก) แต่

มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.22(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.25(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.23(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.25(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.25(ก) และรูปที่ 4.25(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.24(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.25(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.19(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.25(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.28 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		80 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 73.6488 mH		C : 0.646 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 520 mH		C : 96 nF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180 $^\circ$					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.145	2.612	0.153	2.193	0.179	1.839
50W	0.298	2.857	0.305	2.38	0.328	1.698
R-L	0.465	2.754	0.492	2.506	0.546	1.831

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.27 และตารางที่ 4.28 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบลลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.22 และตารางที่ 4.28 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

ตารางที่ 4.29 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
$I_{A, MAX}$	1.511	1.789	2.800	1.328	1.460	2.769	1.579	1.89	2.731	1.465	1.907	2.954
$I_{B, MAX}$	0.153	0.298	0.496	2.500	2.628	2.285	1.408	1.570	2.277	2.502	2.163	1.831
$I_{C, MAX}$	0.118	0.278	0.557	0.145	0.328	0.557	0.130	0.328	0.557	2.595	2.843	2.506

จากตารางที่ 4.29 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดปกติ (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.30 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง AASC 400 sq.mm มุมกระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 64 กิโลเมตร หรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A , MAX	2.480	2.522	2.725	2.476	2.623	2.754	2.174	2.434	2.621	2.612	2.857	2.754
I _B , MAX	0.145	0.298	0.496	2.090	2.392	2.602	2.026	2.121	2.462	2.193	2.38	2.506
I _C , MAX	0.178	0.324	0.538	0.172	0.328	0.538	0.175	0.328	0.545	1.839	1.698	1.831

จากตารางที่ 4.30 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 80%, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงจรนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.29 แต่ขนาดของกระแสและมุมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรตั้งที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะมีแรงดันสูงสุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะเกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุด ในโครงการนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดังอธิบาย

ผลการทดลองระบบเหนือดิน (Overhead)

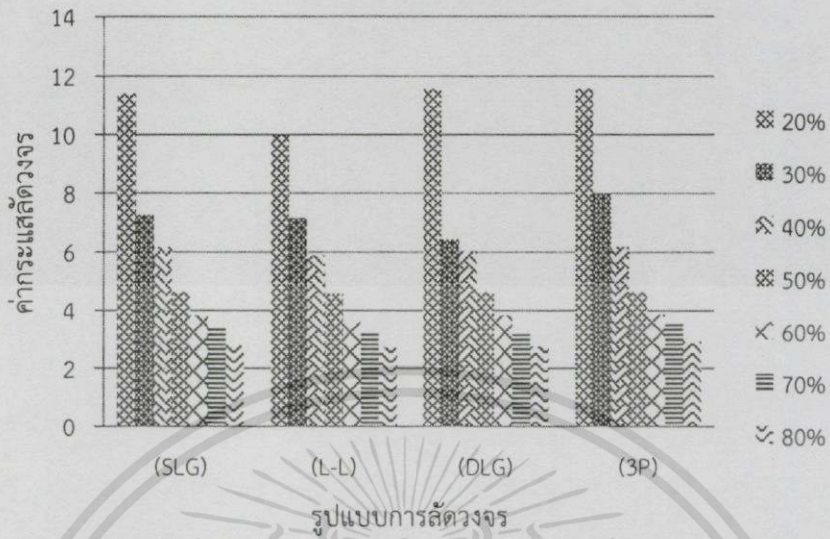
เพื่อทำการวิเคราะห์ภาพรวมของระบบ จึงได้ทำการเก็บผลการทดลองในกรณีดังต่อไปนี้

- ที่ระยะทางสายส่งตั้งแต่ 20%-80% ทั้งหมด 7 กรณีคือ ที่ 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% และ 80%
- ที่มุมลัดวงจร 90° และ 180°
- ที่รูปแบบการลัดวงจร 4 รูปแบบ คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault)
- ที่ค่าโหลด 25W, 50W และโหลด R-L ที่ค่า 25W และ บัลลัสต์

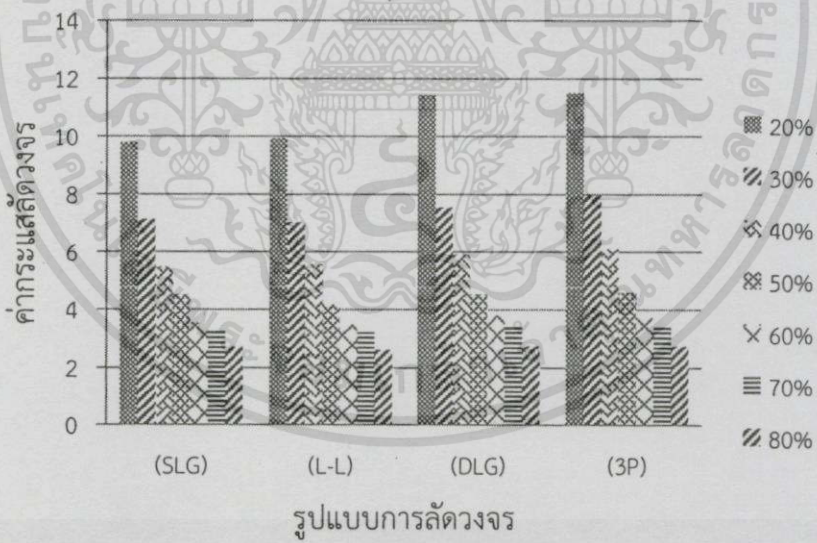
โดยพิจารณาเฉพาะค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้น และแสดงผลที่ได้ในรูปตาราง และแผนภูมิ เพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบได้ชัดเจนมากขึ้น

ตารางที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
	20%	5.34	9.197	7.126	7.717	9.342	10.098	9.518
30%	3.212	6.199	4.669	5.15	6.298	6.379	6.305	6.355
40%	2.636	5.023	3.574	4.105	4.142	5.131	4.473	5.024
50%	2.033	3.979	2.785	3.311	4.017	4.032	3.951	3.975
60%	1.499	2.583	1.534	2.197	2.445	2.506	2.545	2.629
70%	1.926	3.075	2.01	2.602	2.972	3.071	3.227	3.335
80%	1.511	2.48	1.579	2.174	2.50	2.576	2.595	2.613



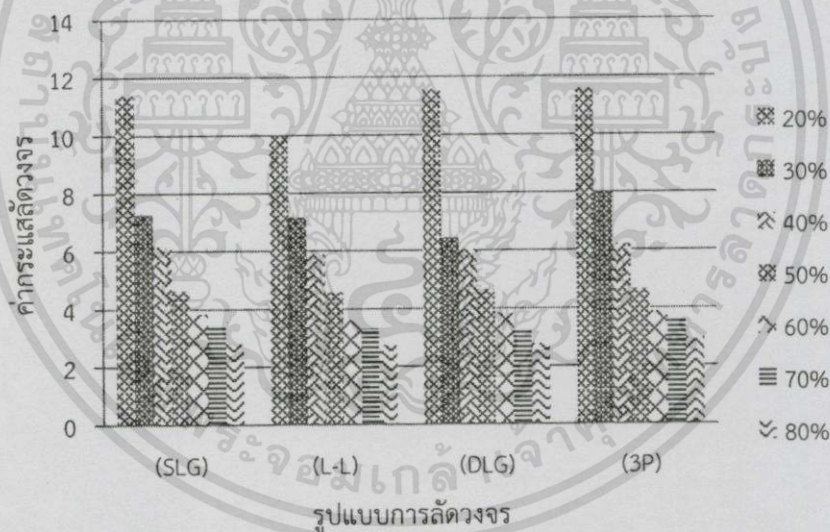
รูปที่ 4.26 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90°



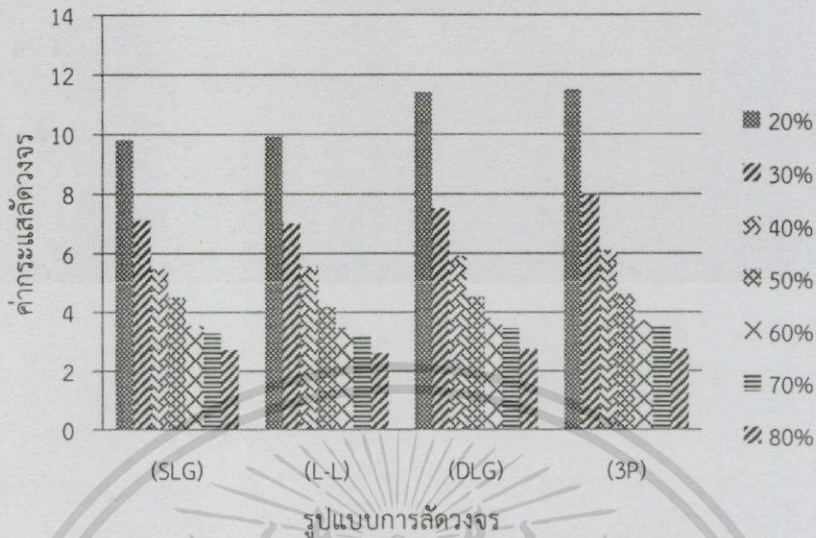
รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	1.789	2.522	1.89	2.434	2.62	2.623	2.843	2.857
30%	3.342	6.462	5.749	5.756	6.436	6.546	6.584	6.839
40%	3.559	5.268	4.07	4.551	4.318	5.329	4.663	5.337
50%	2.834	4.112	3.30	3.643	4.28	4.47	4.371	4.424
60%	2.254	3.395	2.92	2.99	3.57	3.61	2.769	2.802
70%	2.411	3.109	2.69	2.872	3.105	3.121	3.456	3.468
80%	1.789	2.522	1.89	2.434	2.62	2.623	2.843	2.857



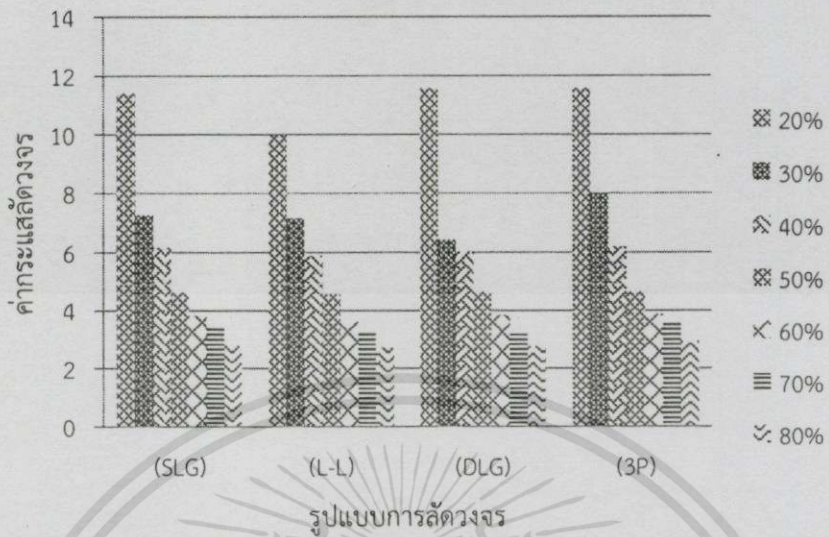
รูปที่ 4.28 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90°



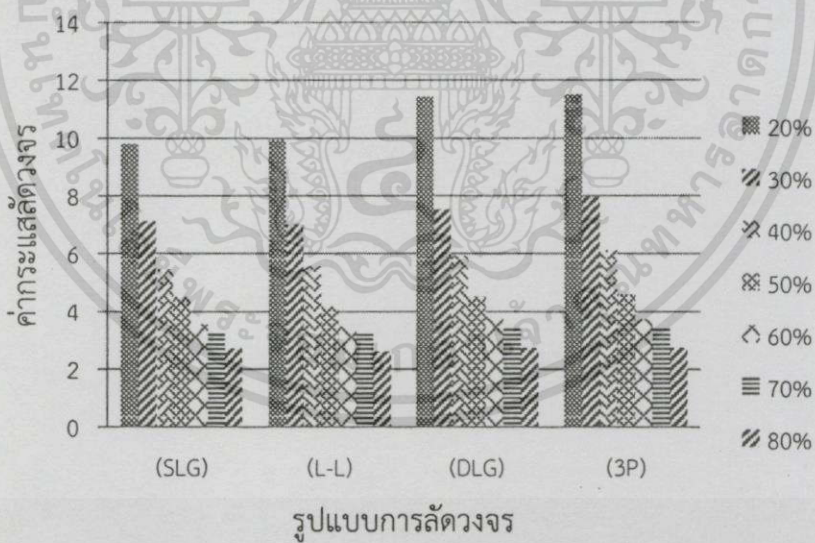
รูปที่ 4.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	11.402	9.805	9.975	9.933	11.574	11.43	11.578	11.517
30%	7.267	7.122	7.161	7.013	7.526	6.436	7.984	7.946
40%	6.176	5.473	5.891	5.559	6.042	5.913	6.188	6.112
50%	4.642	4.51	4.575	4.177	4.65	4.52	4.652	4.608
60%	3.82	3.55	3.61	3.49	3.83	3.81	3.86	3.73
70%	3.389	3.282	3.310	3.224	3.195	3.445	3.612	3.487
80%	2.8	2.725	2.731	2.621	2.769	2.754	2.954	2.754



รูปที่ 4.30 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90°



รูปที่ 4.31 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 180°

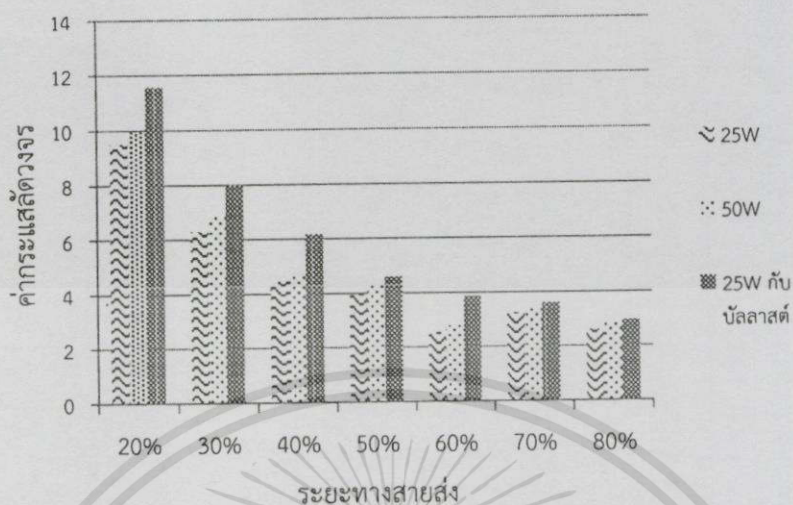
จากตารางที่ 4.41-4.43 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการลัดวงจรแบบต่างๆกับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรของโหลด 25 วัตต์ และ 50 วัตต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180 องศา มีค่ามากกว่ามุม 90 องศา ขณะที่โหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90 องศา มีค่ามากกว่ามุม 180 องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

แผนภูมิในรูปที่ 4.29-4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการลัดวงจรแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง โดยมีโหลด 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ จะเห็นได้ว่าระยะทางของสายส่งมีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร เช่นเดียวกับสูตร $I = \frac{VZ\delta}{Z\delta_0}$ คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่ารุนแรงน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังเช่นผลการทดลอง

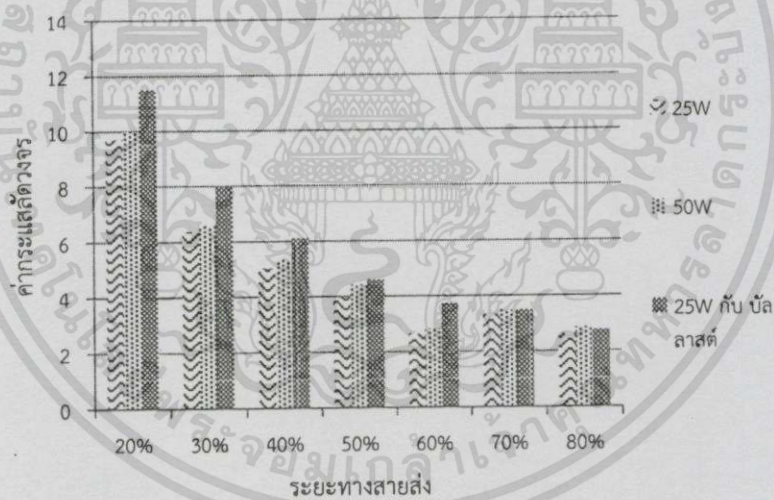
ต่อไปเป็นผลการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าที่เปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิด หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) , สองเฟส (L-L) , สองเฟสลงดิน (DLG) และ สามเฟสลงดิน (3P) ที่มุม 90° และ 180° ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิด หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	5.34	9.197	6.56	9.651	11.402	9.805
30%	3.212	6.199	3.342	6.462	7.267	7.122
40%	2.636	5.023	3.559	5.268	6.176	5.473
50%	2.033	3.979	2.834	4.112	4.642	4.51
60%	1.449	2.583	2.254	3.395	3.82	3.55
70%	1.926	3.075	2.411	3.109	3.389	3.282
80%	1.511	2.48	1.789	2.522	2.8	2.725



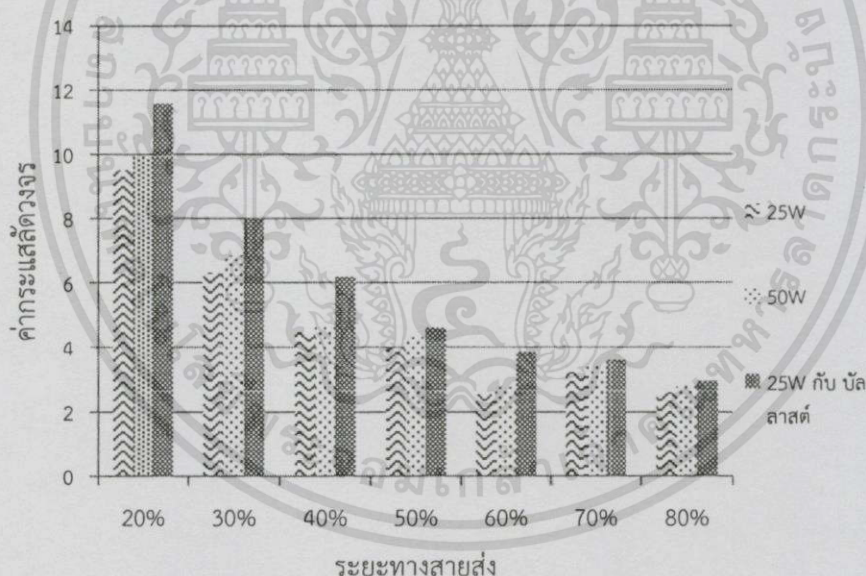
รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโวลต์ต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 90°



รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโวลต์ต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 180°

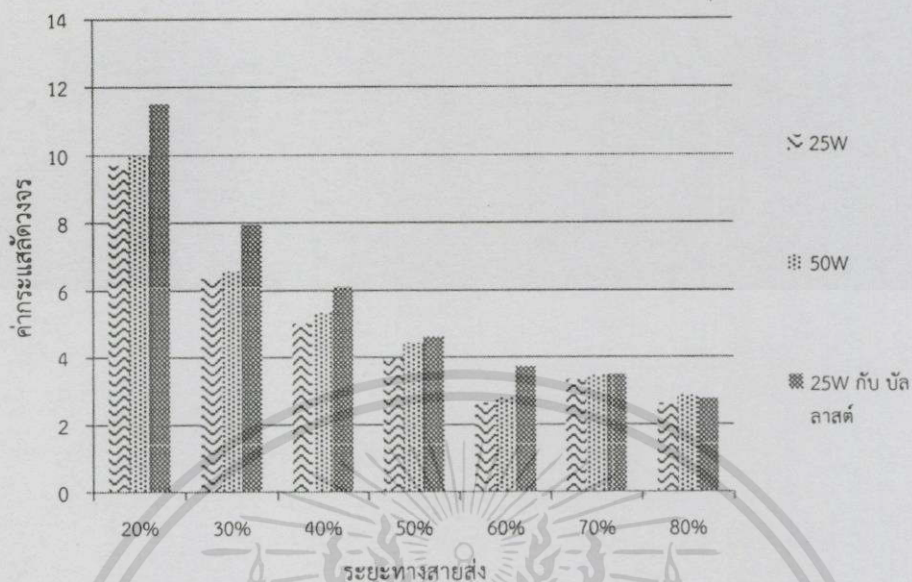
ตารางที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดร่องทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสาย ส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		50W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	7.126	7.717	8.495	8.745	9.975	9.933
30%	4.669	5.15	5.749	5.756	7.161	7.099
40%	3.574	4.105	4.07	4.551	5.891	5.559
50%	2.785	3.311	3.30	3.643	4.575	4.177
60%	1.534	2.197	2.92	2.99	3.61	3.49
70%	2.01	2.602	2.69	2.872	3.310	3.224
80%	1.579	2.174	1.89	2.434	2.731	2.621



รูปที่ 4.34 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดร่องทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90°

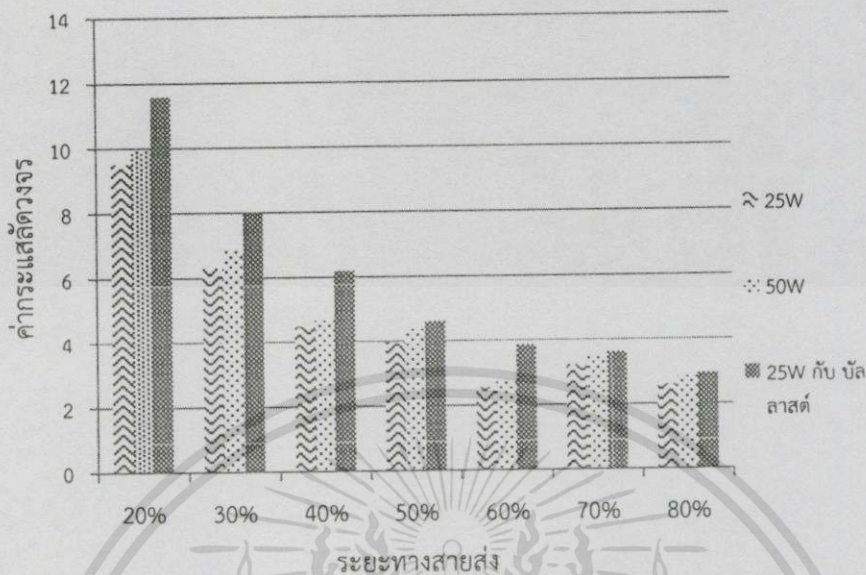
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



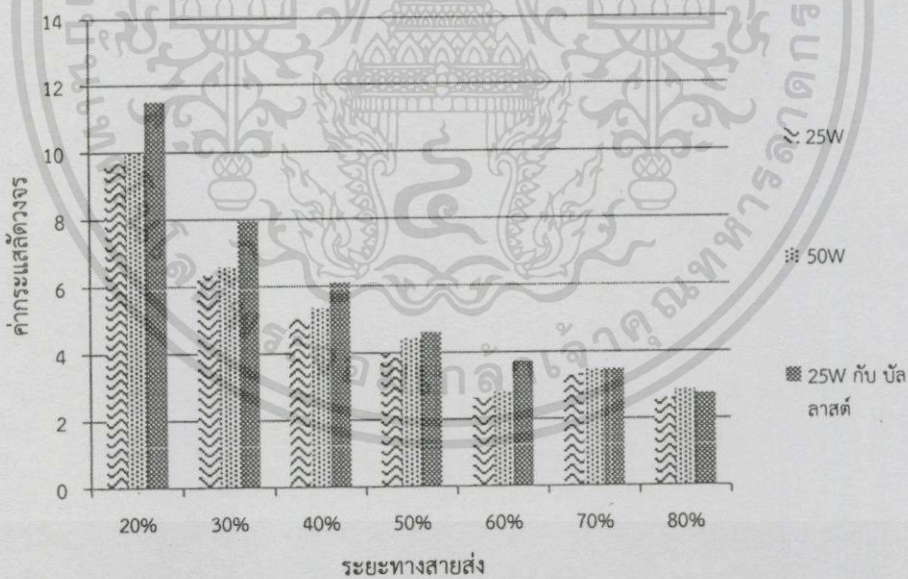
รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิด สองเฟส (L-L) ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับบัลลัสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	9.342	10.098	9.682	10.899	11.574	11.43
30%	6.298	6.379	6.436	6.546	7.694	7.526
40%	4.142	5.131	4.318	5.329	6.042	5.913
50%	4.017	4.032	4.28	4.47	4.65	4.52
60%	2.445	2.506	3.57	3.61	3.83	3.81
70%	2.972	3.071	3.105	3.121	3.487	3.445
80%	2.5	2.476	2.628	2.623	2.769	2.754



รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มีมุม 90°

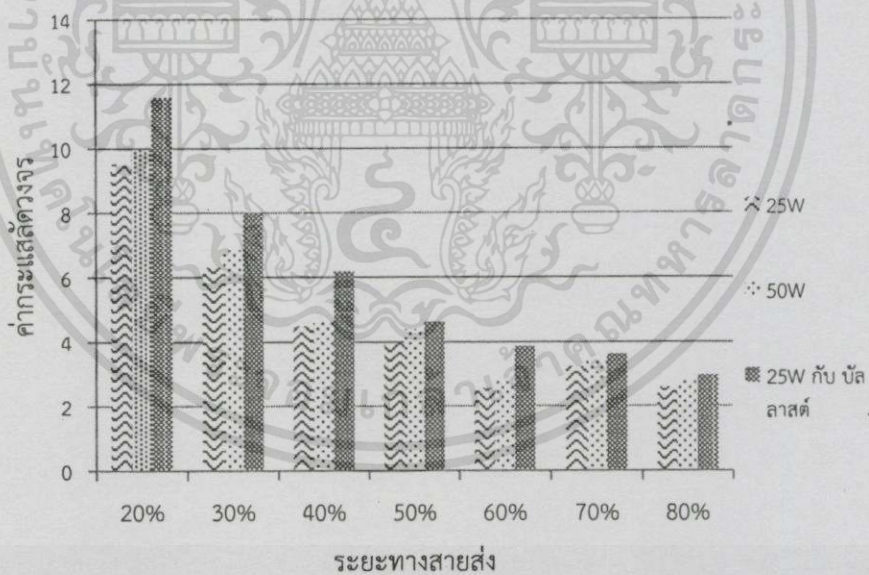


รูปที่ 4.37 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มีมุม 180°

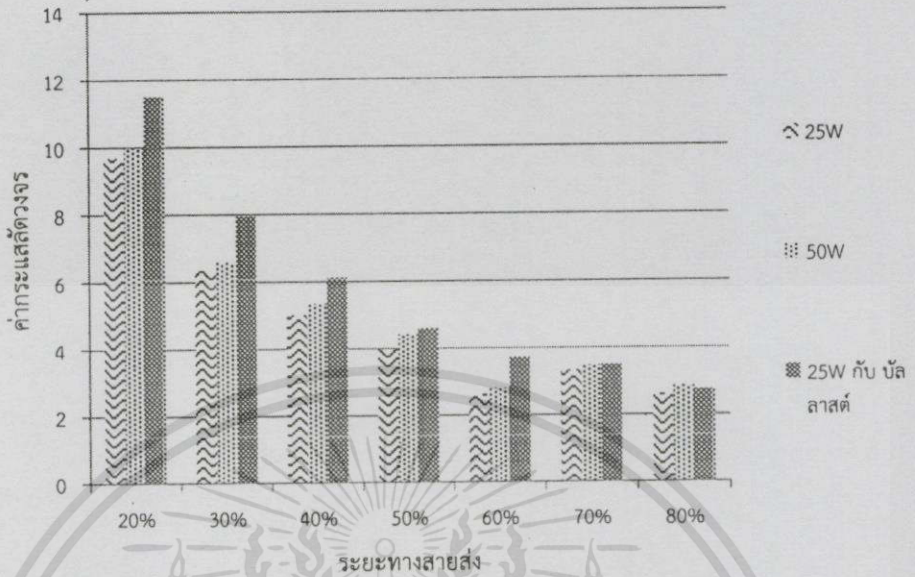
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิด สามเฟสลงดิน (3P) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	9.518	9.702	9.933	9.998	11.578	11.517
30%	6.305	6.355	6.839	6.584	7.984	7.946
40%	4.473	5.024	4.663	5.337	6.188	6.112
50%	3.951	3.975	4.371	4.424	4.608	4.608
60%	2.545	2.629	2.769	2.802	3.86	3.73
70%	3.227	3.335	3.456	3.468	3.612	3.487
80%	2.595	2.612	2.843	2.857	2.954	2.754



รูปที่ 4.38 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 90°



รูปที่ 4.39 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 180°

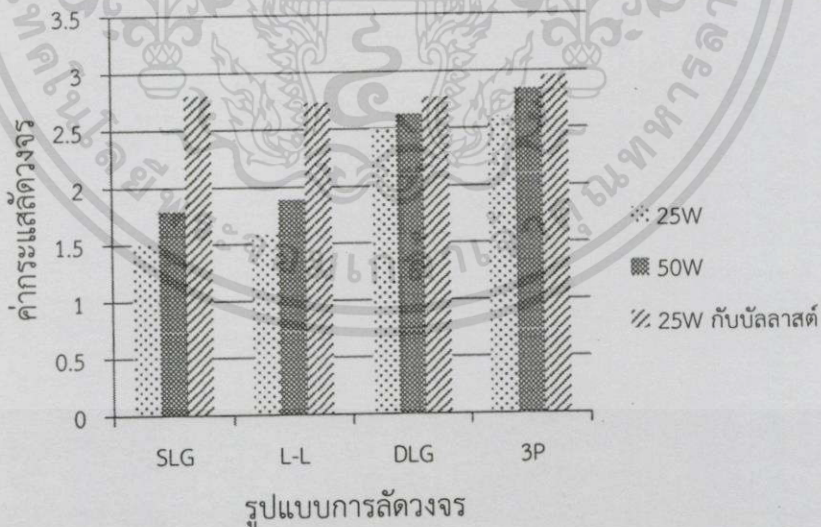
จากตารางที่ 4.44 - 4.47 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด กับโหลดต่างๆที่ 25 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลัสต์ และรูปแบบของการลัดวงจร พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส (3P) มีค่ากระแสลัดวงจรสูงที่สุด นอกจากนี้ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรแต่ละรูปแบบที่มุม 180 องศา มีค่าใกล้เคียงกับมุม 90 องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.32 - 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) , สองเฟส (L-L), สองเฟสลงดิน (DLG) และสามเฟส (3P) แสดงให้เห็นความรุนแรงของค่ากระแสลัดวงจรที่โหลดแต่ละค่าคือ 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลัสต์ ที่มุม 90° พบว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด 25W กับบัลลัสต์มีความรุนแรงมากที่สุด ตามมาด้วยโหลด 25 วัตต์ และ 50 วัตต์ เนื่องจากโหลด R-L นั้นมีบัลลัสต์ซึ่งทำให้ค่ามุมของกระแสเปลี่ยนไปจากเดิม ส่งผลให้แรงดันมีค่าเข้าใกล้แกนศูนย์มากขึ้น ทำให้เกิดส่วนประกอบของกระแสตรงกับกระแสลับมากขึ้นด้วย ทำให้ค่ากระแสมีค่าสูงสุด ขณะที่มุม 180° แนวโน้มเช่นเดียวกัน

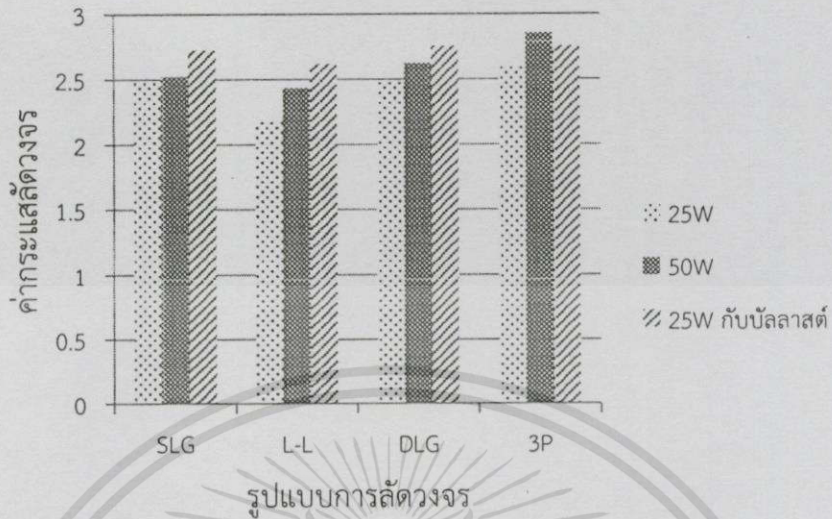
และสุดท้ายเป็นผลการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองการลัดวงจรแบบต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ,30% , 40% , 50% , 60%, 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180° ได้แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	5.34	9.197	6.56	9.651	11.402	9.805
สองเฟส (L-L)	7.126	7.717	8.495	8.745	9.975	9.933
สองเฟสลงดิน (DLG)	9.342	10.098	9.628	10.899	11.574	11.43
สามเฟสลงดิน (3P)	9.518	9.702	9.933	9.998	11.578	11.517



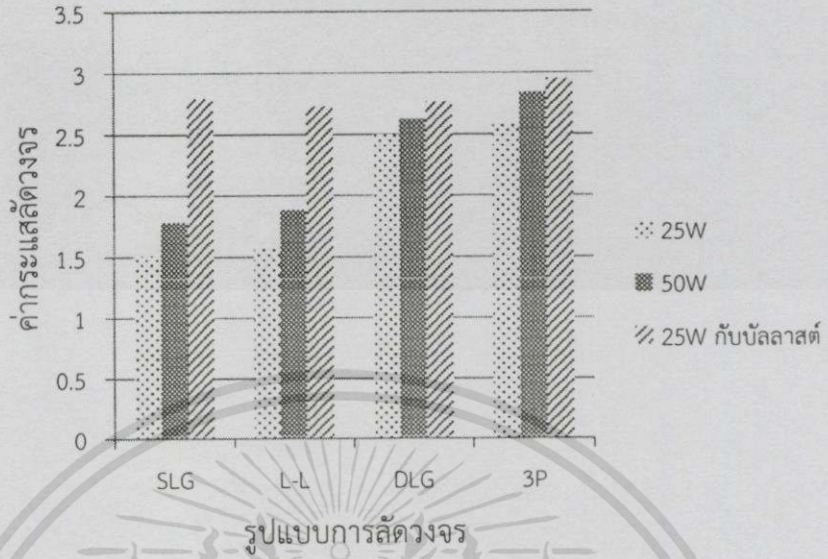
รูปที่ 4.40 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



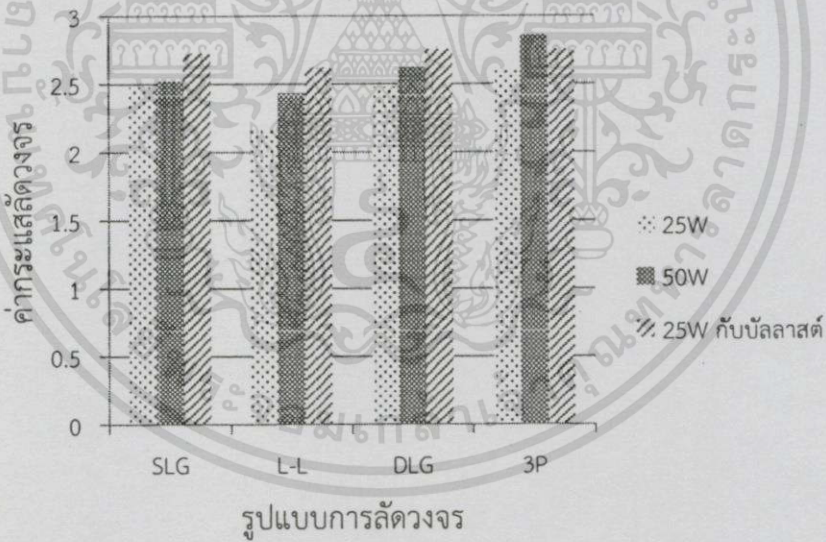
รูปที่ 4.41 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัสลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	3.212	6.119	3.342	6.462	7.267	7.122
สองเฟส (L-L)	4.669	5.15	5.749	5.756	7.161	7.013
สองเฟสลงดิน (DLG)	6.298	6.397	6.436	6.546	7.694	7.526
สามเฟสลงดิน (3P)	6.305	6.584	6.584	6.839	7.984	7.946



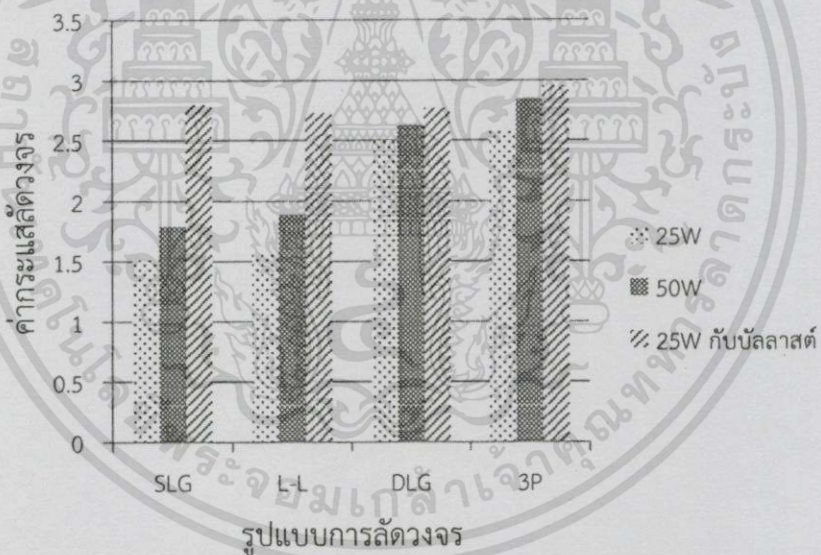
รูปที่ 4.42 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 90°



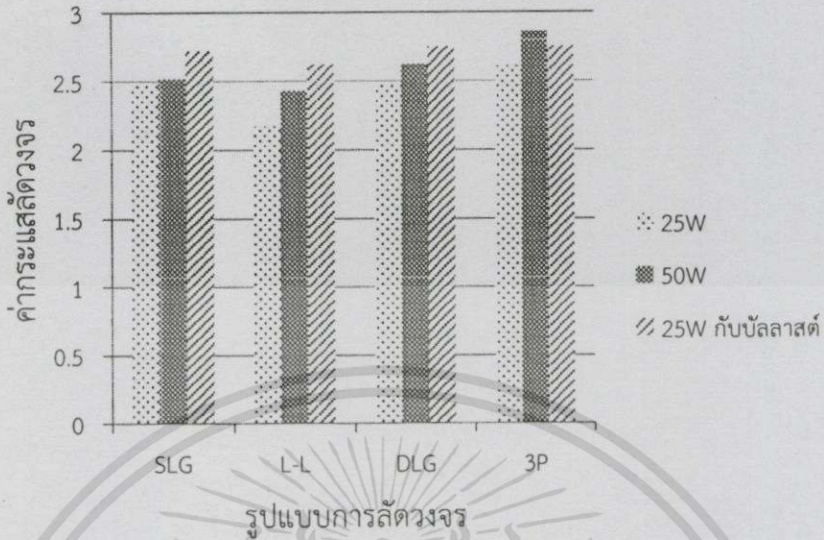
รูปที่ 4.43 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180°

ตารางที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	2.636	5.023	3.559	5.268	6.176	5.473
สองเฟส (L-L)	3.574	4.105	4.07	4.551	5.891	5.559
สองเฟสลงดิน (DLG)	4.142	5.131	4.318	5.329	6.042	5.913
สามเฟสลงดิน (3P)	4.473	5.024	4.663	5.337	6.188	6.112



รูปที่ 4.44 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°

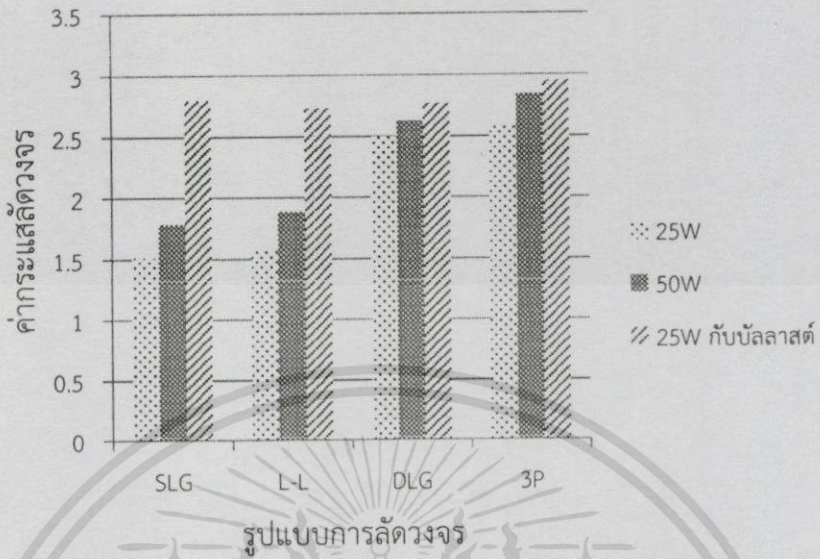


รูปที่ 4.45 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโพลชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180°

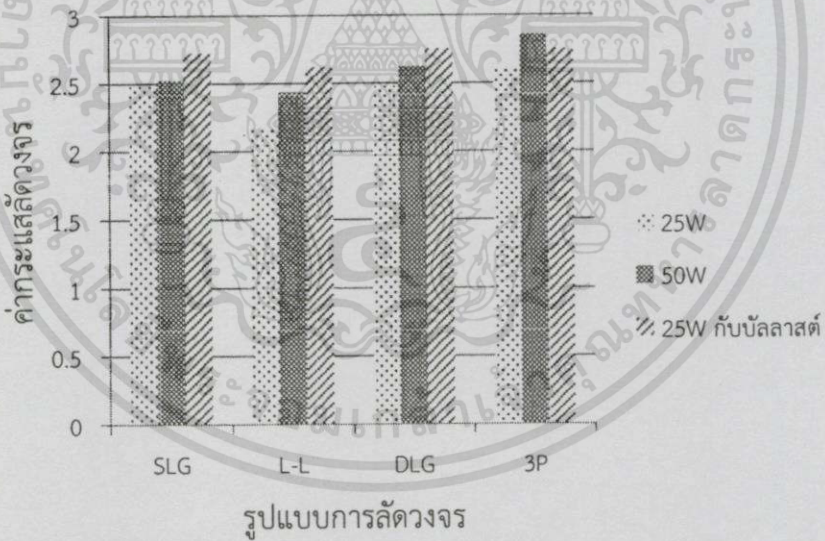
ตารางที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโพลชนิดต่างๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	2.033	3.979	2.834	4.112	4.642	4.112
สองเฟส (L-L)	2.785	3.311	3.30	3.643	4.575	4.177
สองเฟสลงดิน (DLG)	4.017	4.032	4.28	4.47	4.65	4.52
สามเฟสลงดิน (3P)	3.951	3.975	4.371	4.424	4.652	4.608

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



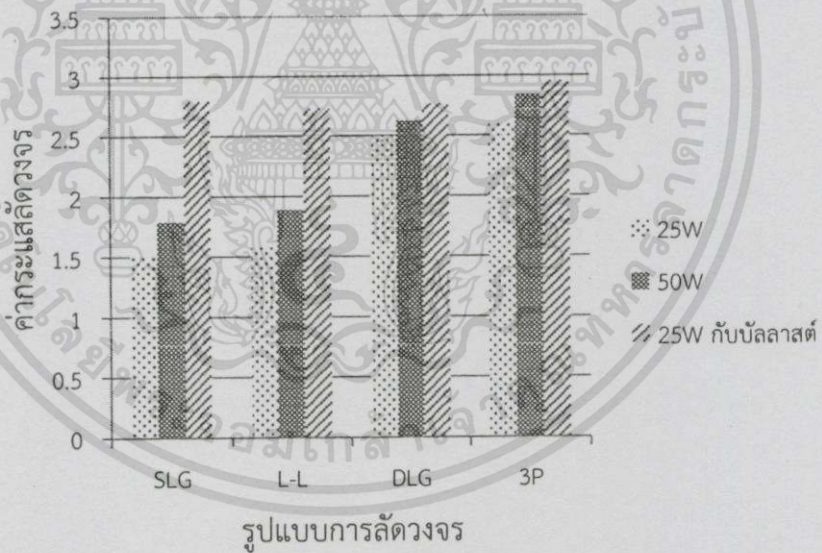
รูปที่ 4.46 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 90°



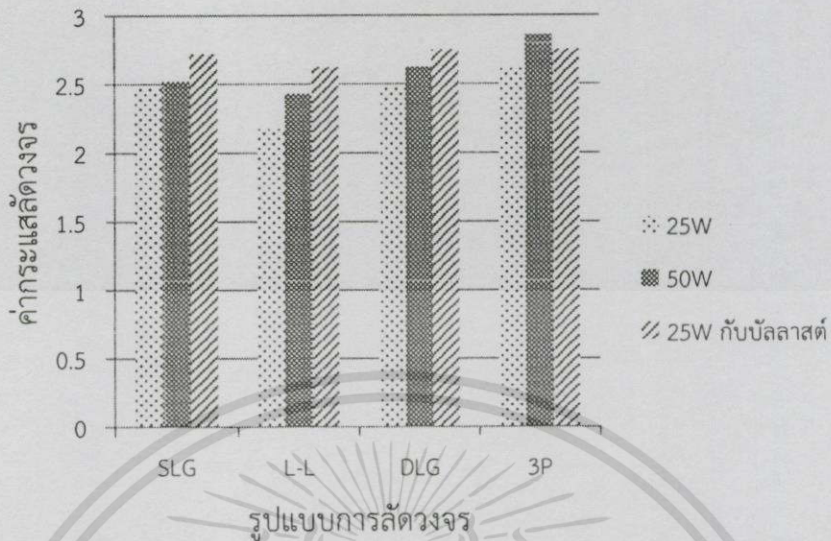
รูปที่ 4.47 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180°

ตารางที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.499	2.583	2.254	3.395	3.82	3.55
สองเฟส (L-L)	1.534	2.197	2.92	2.99	3.61	3.49
สองเฟสลงดิน (DLG)	2.445	2.506	3.57	3.61	3.83	3.81
สามเฟสลงดิน (3P)	2.545	2.629	2.769	2.802	3.86	3.73



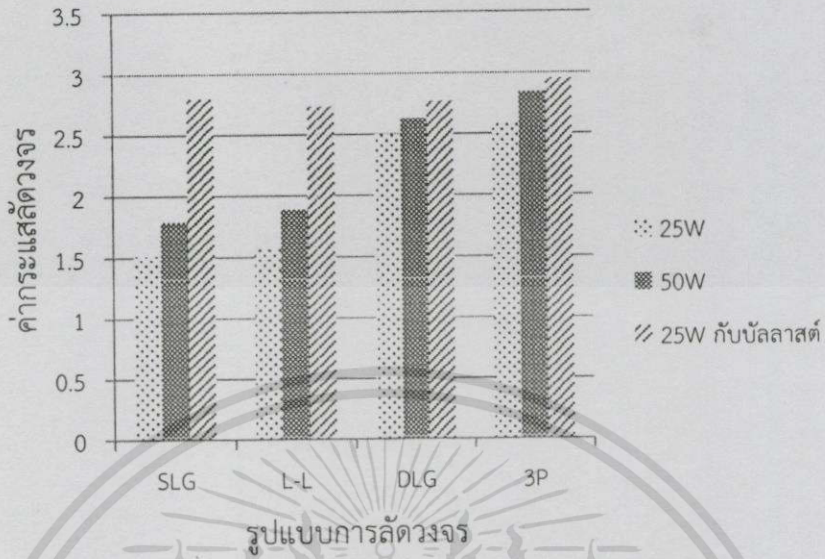
รูปที่ 4.48 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



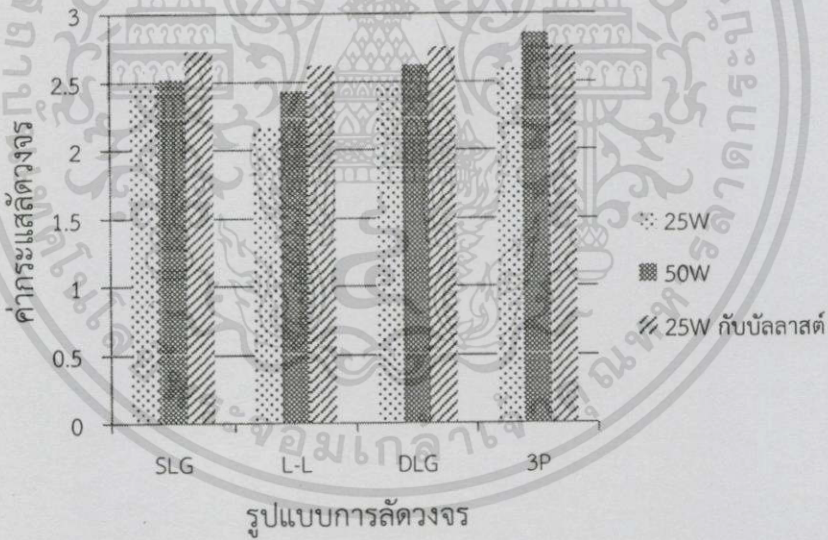
รูปที่ 4.49 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับบัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.926	3.075	2.411	3.109	3.389	3.282
สองเฟส (L-L)	2.01	2.602	2.69	2.872	3.310	3.224
สองเฟสลงดิน (DLG)	2.972	3.071	3.105	3.121	3.487	3.445
สามเฟสลงดิน (3P)	3.227	3.335	3.456	3.468	3.487	3.471



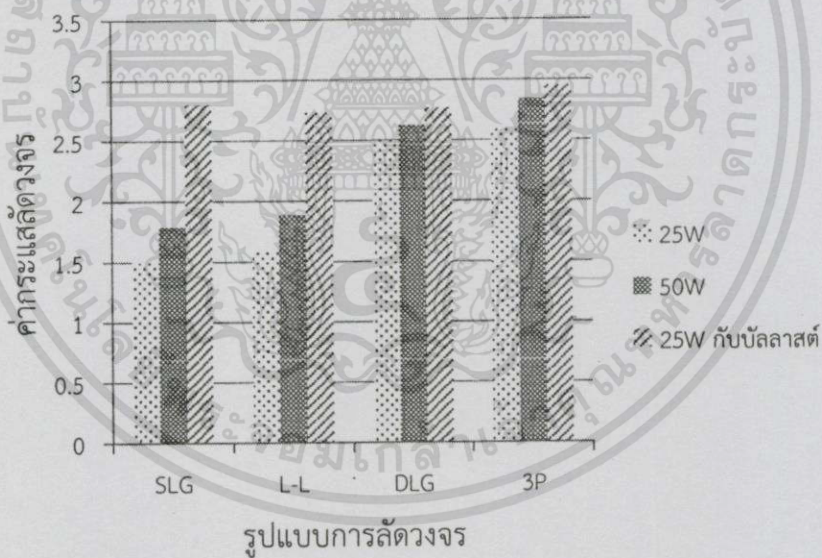
รูปที่ 4.50 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



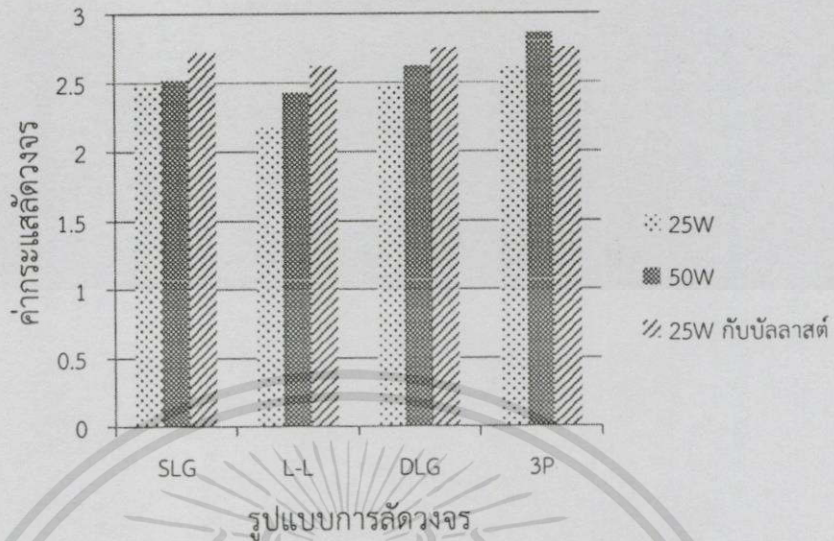
รูปที่ 4.51 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.511	2.48	1.789	2.522	2.8	2.725
สองเฟส (L-L)	1.579	2.174	1.89	2.434	2.731	2.621
สองเฟสลงดิน (DLG)	2.476	2.5	2.62	2.623	2.769	2.754
สามเฟสลงดิน (3P)	2.595	2.612	2.843	2.857	2.954	2.754



รูปที่ 4.52 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆกับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°



รูปที่ 4.53 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

จากตารางที่ 4.38 - 4.44 แสดงความสัมพันธ์ของการลัดวงจรแบบต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% , 30% , 40% , 50% , 60% , 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรทั้ง 4 รูปแบบ เมื่อพิจารณาที่โหลด 25W และ 50W กระแสลัดวงจรที่มุม 180° องศา มีค่ามากกว่ามุม 90° องศา ขณะที่เมื่อพิจารณาที่โหลด 25W+ บัลลาสต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° องศา มีค่ามากกว่ามุม 180° องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

แผนภูมิในรูปที่ 4.40 - 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการลัดวงจรแต่ละชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% , 30% , 40% , 50% , 60% , 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส เมื่อพิจารณาที่มุมการลัดวงจร 90° พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส (3P) นั้นมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด ตามมาด้วย สองเฟสลงดิน (DLG), สองเฟส (L-L) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่ค่าโหลด R-L, 100 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่มุมการลัดวงจร 180° พบว่าการลัดวงจรชนิดสามเฟส (3P), สองเฟสลงดิน (DLG) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) นั้นจะมีความใกล้เคียงกัน

ซึ่งเมื่อทำการศึกษาลักษณะการลัดวงจรที่เกิดขึ้นแล้วพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการลัดวงจรเช่นค่ากระแสลัดวงจรนั้นมีดังนี้ ปัจจัยแรกคือระยะของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร หากเกิดการลัดวงจรที่ระยะใกล้กับแหล่งจ่ายมากเท่าไรค่ากระแสการลัดวงจรนั้นจะมีค่าสูง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์

ในวงจรมีค่าน้อย ปัจจัยที่สองคือค่ามุมที่เกิดการลัดวงจร หากมุมที่แรงดันเกิดการลัดวงจรมีค่าเข้าใกล้แกนศูนย์มากเท่าไร ค่ากระแสลัดวงจรยิ่งมีค่าสูงเนื่องจากมีส่วนประกอบกระแสตรงมาก ปัจจัยที่สามคือรูปแบบการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการลัดวงจรที่มีค่าสูงที่สุดคือการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน รองลงมาคือ สองเฟสลงดิน (DLG) , สองเฟส (L-L) และหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ตามลำดับ

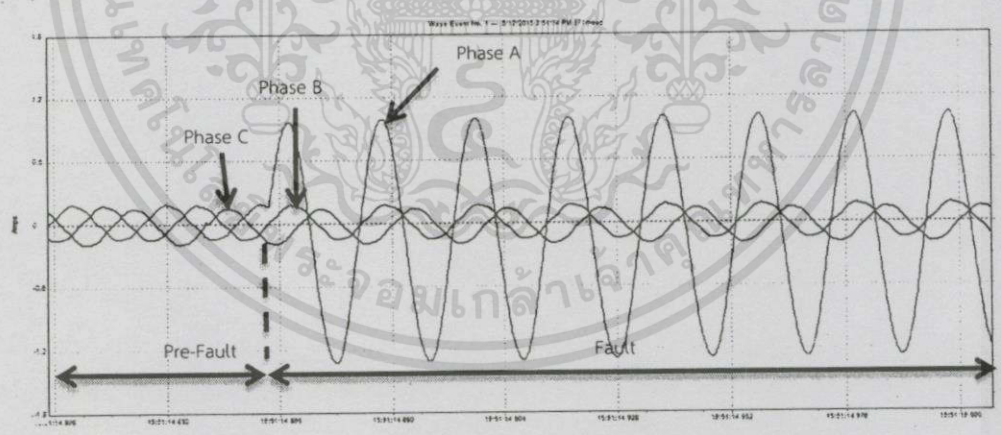
4.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

4.2.1 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง

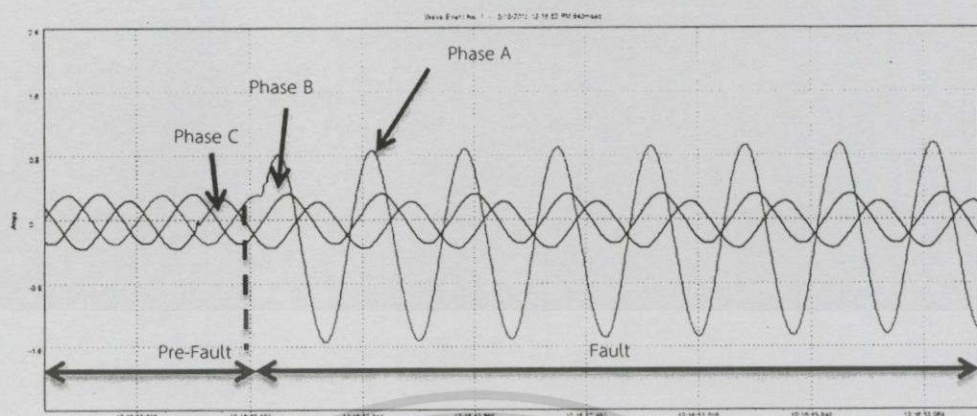
การลัดวงจรในชุดทดสอบนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.2.1.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

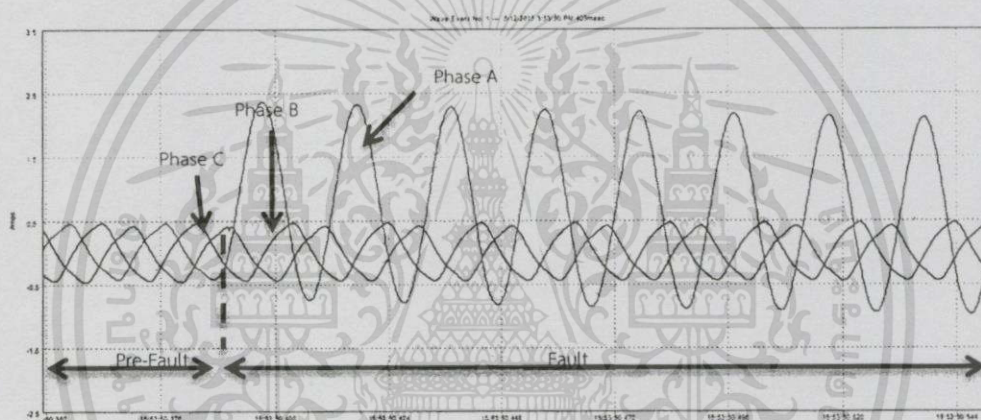
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.54(ก), รูปที่ 4.54(ข) และรูปที่ 4.54(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัสลัสต์

รูปที่ 4.54 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.54(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.54(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.54(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.45 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

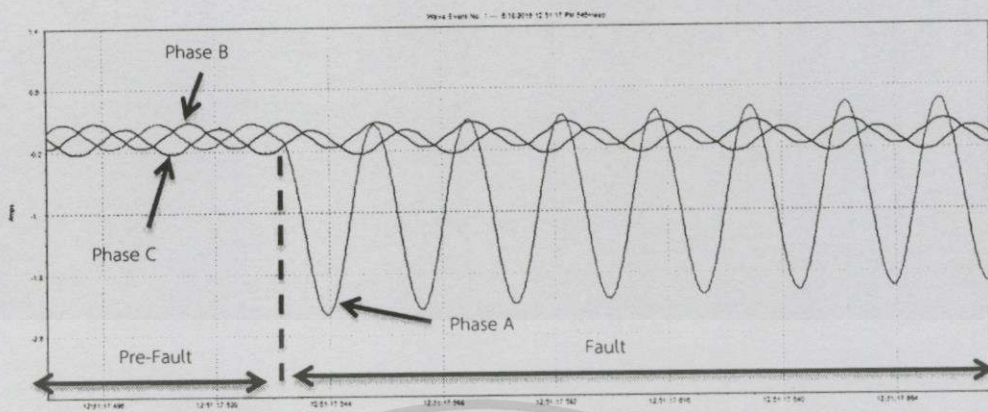
จากรูปที่ 4.54(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.54(ก) และรูปที่ 4.54(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.45 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

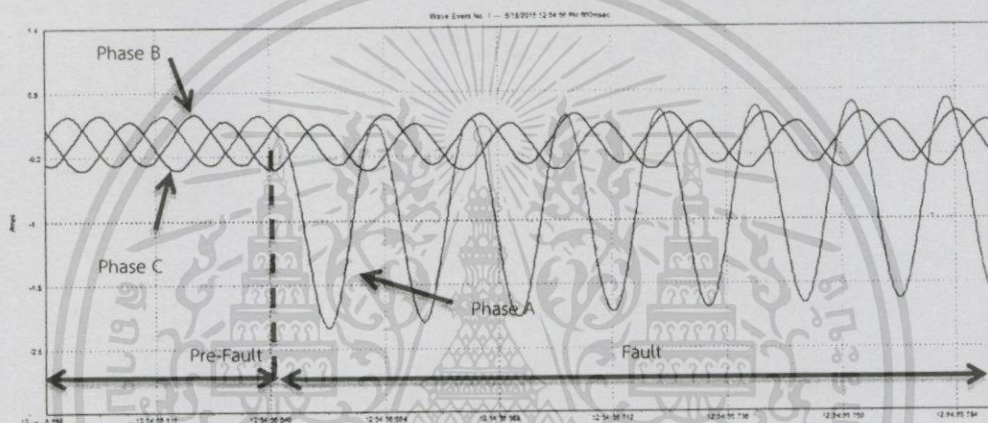
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตร ขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 7.6916 mH		C : 3.2578 uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 140 mH		C : 0.2 uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	1.324	0.159	0.175	0.211	0.195
50W	0.301	1.540	0.302	0.310	0.336	0.36
R-L	0.432	2.477	0.450	0.469	0.469	0.446

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

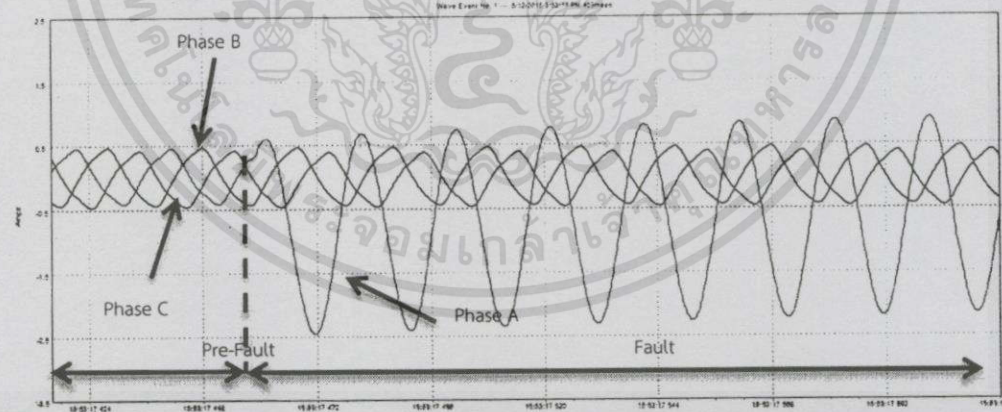
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.55(ก), รูปที่ 4.55(ข) และรูปที่ 4.55(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.55 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.55(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.54(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.55(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.55(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.55(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการปรับแรงดันโหลดเพิ่ม และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.54(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.55(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

จากรูปที่ 4.55(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.55(ก) และรูปที่ 4.55(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.54(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.55(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.46 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

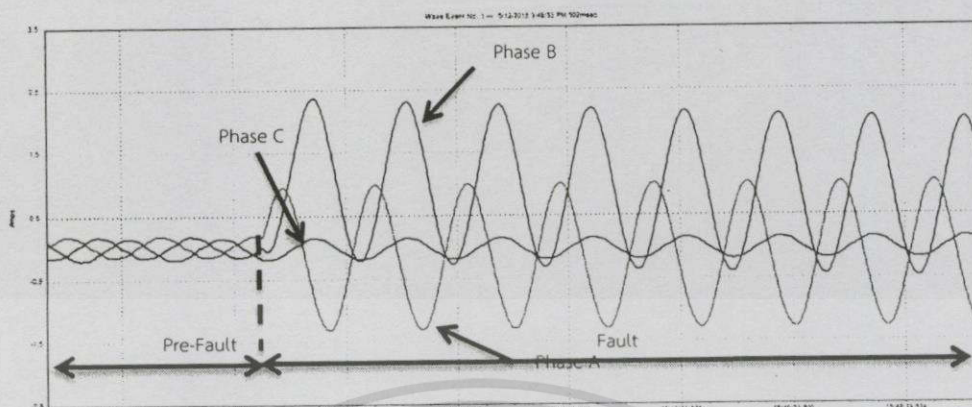
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 μ F			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	2.33	0.159	0.152	0.211	0.230
50W	0.301	2.350	0.302	0.320	0.336	0.340
R-L	0.432	2.453	0.420	0.469	0.500	4.469

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.45

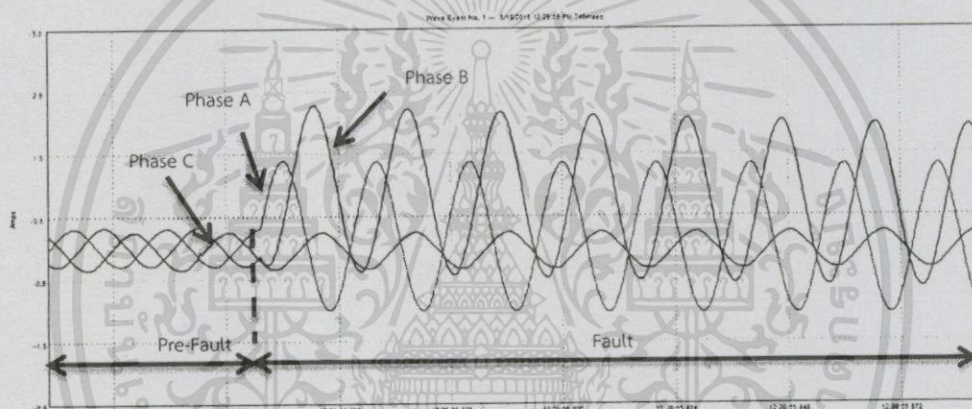
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.45 และตารางที่ 4.46 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มีมุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มีมุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.1.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

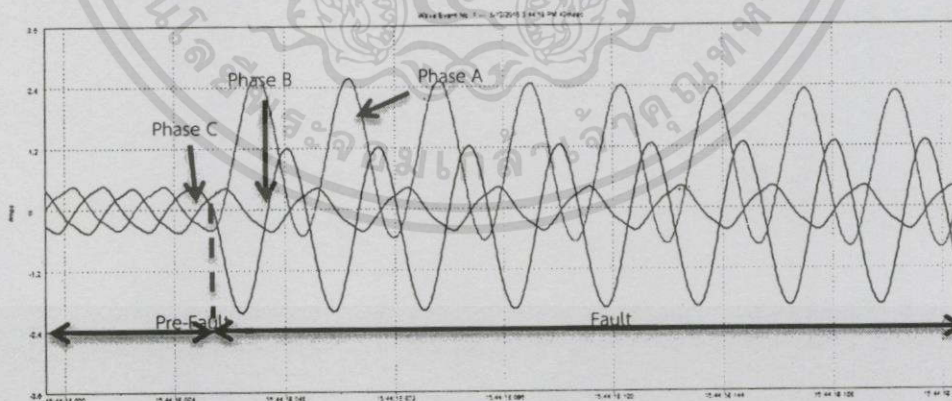
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มีมุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.56(ก), รูปที่ 4.56(ข) และรูปที่ 4.56(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.56 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.56(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุมดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าใกล้แกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.56(ก) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B รวมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.56(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.56(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.56(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.56(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.56(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.56(ก) และรูปที่ 4.56(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.56(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

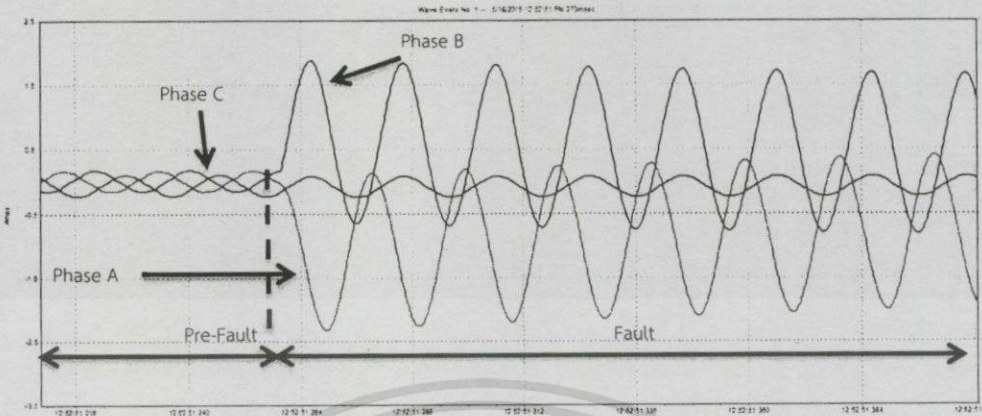
ตารางที่ 4.47 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	1.316	0.159	2.312	0.211	0.191
50W	0.301	1.390	0.305	2.350	0.343	0.336
R-L	0.433	2.570	0.450	2.030	4.469	0.446

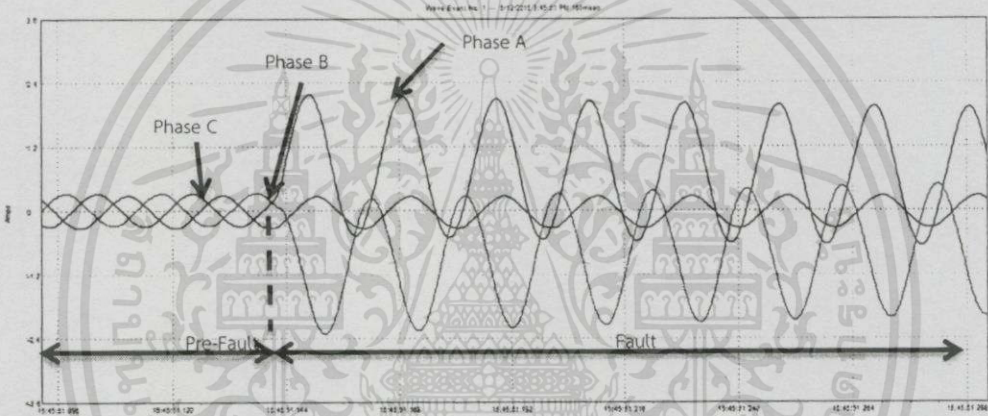
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.45 และ ตารางที่ 4.47 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

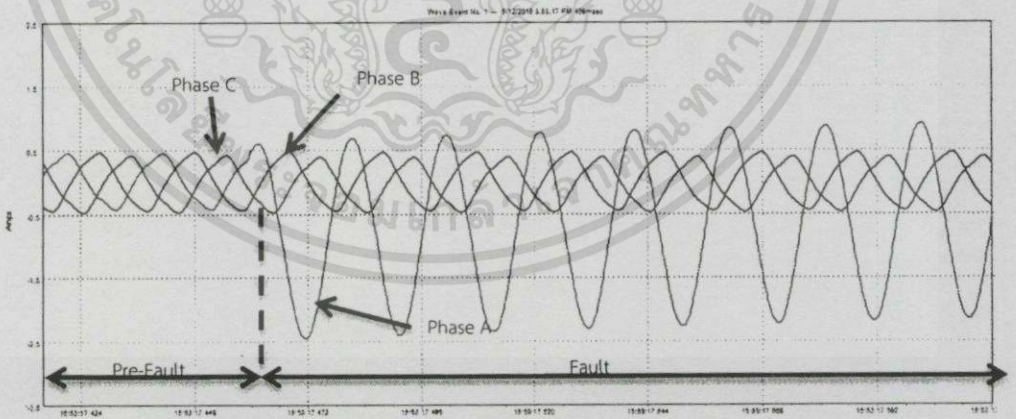
เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.57(ก), รูปที่ 4.57(ข) และรูปที่ 4.57(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.57 ระยะเวลายาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.57(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.56(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.57(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.57(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.57(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.57(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.56(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.57(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.57(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.57(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.57(ก) และรูปที่ 4.57(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ดังที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.56(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.57(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.57(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.48 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

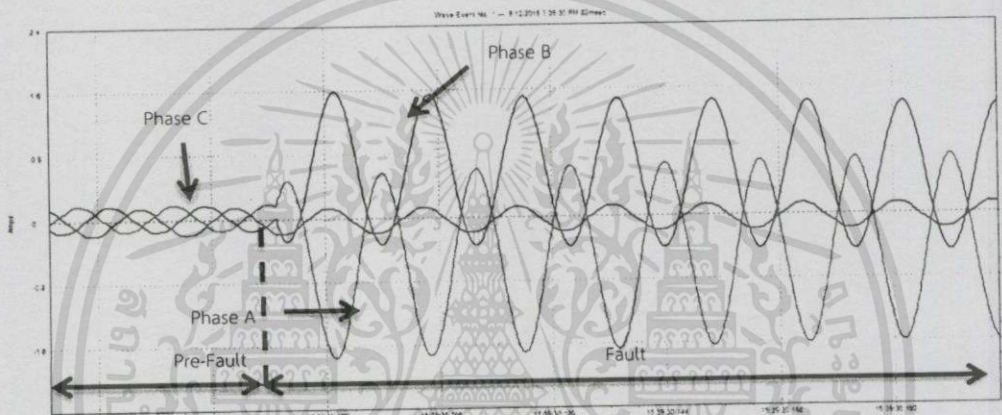
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 7.6916 mH		C : 3.2578 uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 140 mH		C : 0.2 uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	2.33	0.159	1.880	0.188	0.210
50W	0.298	2.390	0.302	2.178	0.336	0.340
R-L	0.434	2.445	0.423	2.351	0.501	0.469

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.47 และตารางที่ 4.48 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้น

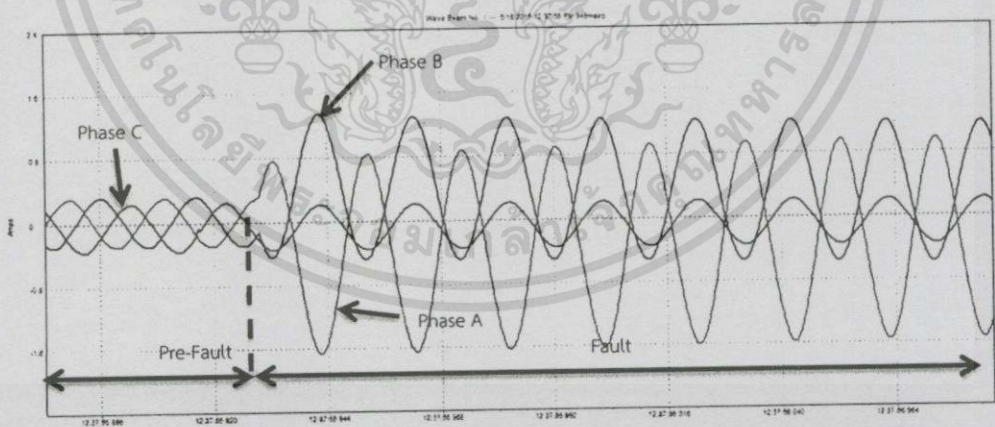
เมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.46 และตารางที่ 4.48 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.2.1.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

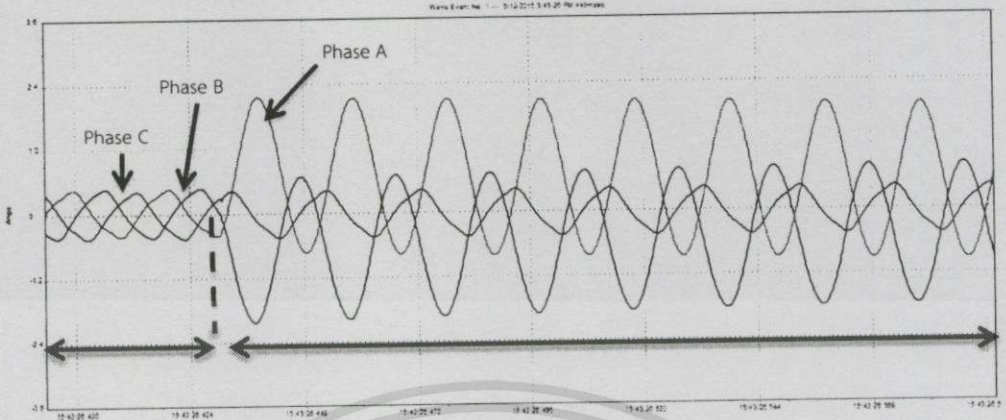
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลัสต์ ดังรูปที่ 4.58(ก), รูปที่ 4.58(ข) และรูปที่ 4.58(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.58 ระยะเวลายาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.58(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.58(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมกับและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากการเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.58(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.58(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.58(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.58(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.58(ก) และรูปที่ 4.58(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณา รูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.58(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.58(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

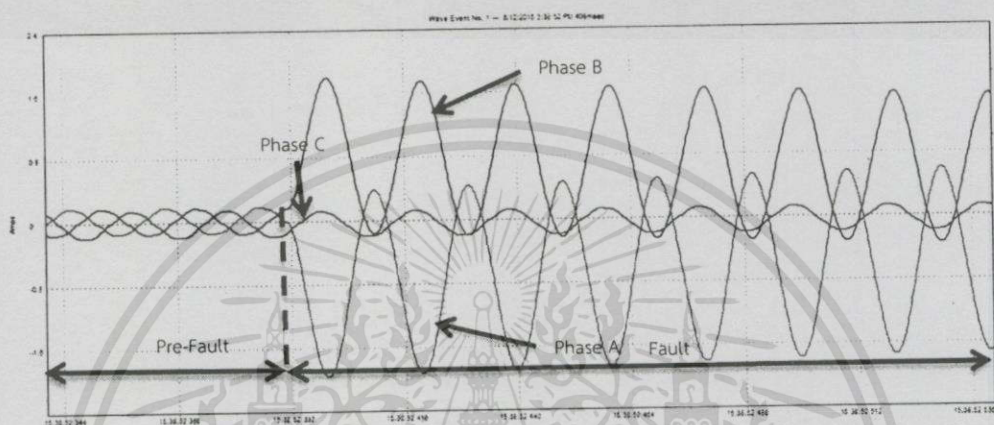
ตารางที่ 4.49 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 μ F			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	1.560	0.159	1.400	0.211	0.21
50W	0.301	1.670	0.305	1.350	0.341	0.346
R-L	0.435	2.463	0.450	2.033	0.468	0.458

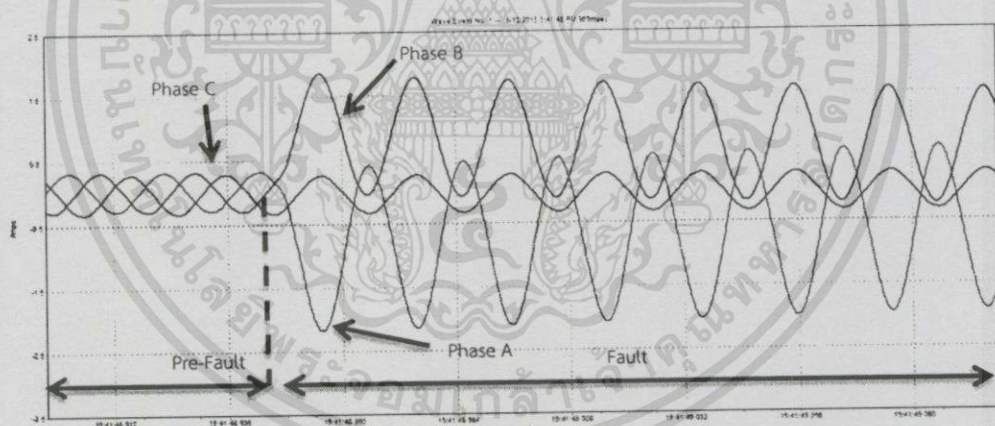
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มีลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อน แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรง

ของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.45 และ ตารางที่ 4.49 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

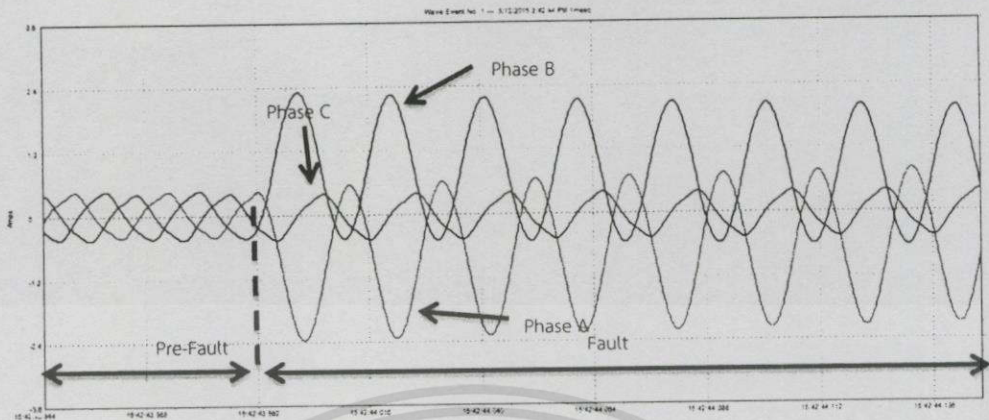
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.59(ก), รูปที่ 4.59(ข) และรูปที่ 4.59(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.59 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.59(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณตั้งอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดินทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.58(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.59(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสถานะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้เคียงกันมากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.59(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.59(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.59(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.58(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.59(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.59(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.59(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.59(ก) และรูปที่ 4.59(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี 4.57(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.58(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.59(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.59(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 4.50 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.153	1.965	0.159	1.808	0.212	0.195
50W	0.300	2.171	0.315	1.862	0.336	0.332
R-L	0.434	2.369	0.422	2.312	0.503	0.469

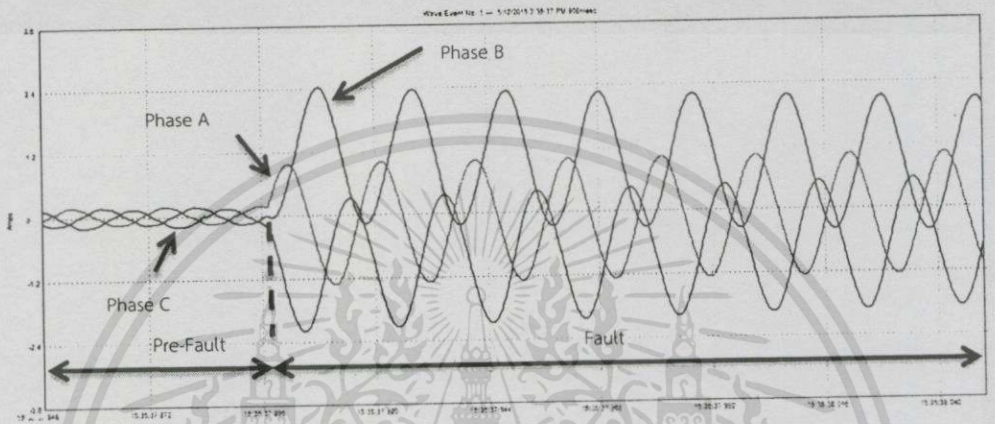
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีความมากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.46 และตารางที่ 4.50 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

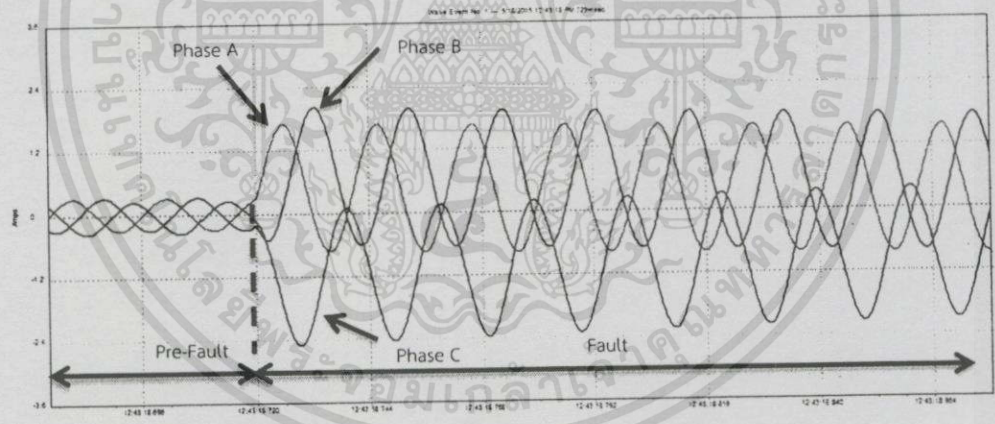
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.49 และตารางที่ 4.50 พบว่า เมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.1.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

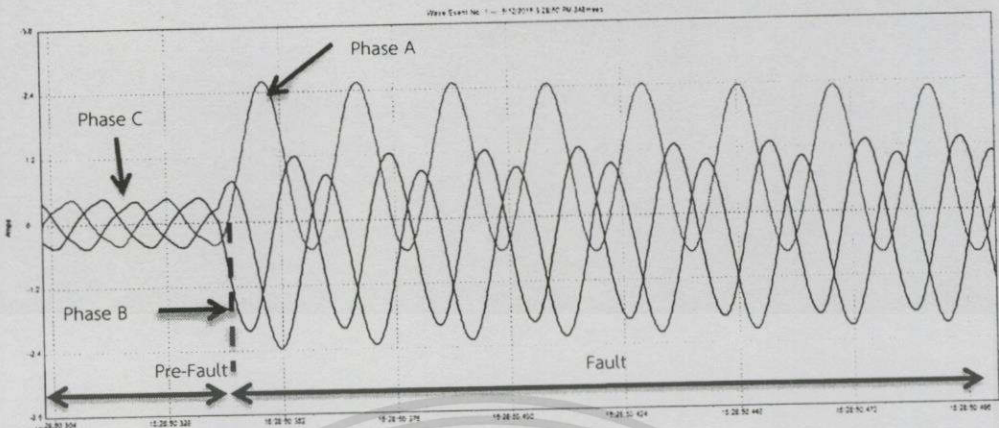
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.60(ก), รูปที่ 4.60(ข) และรูปที่ 4.60(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.60 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.60(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ก) และแบบสามเฟสลงดินดังรูปที่ 4.60(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.60(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.60(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.60(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.60(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.60(ก)

และรูปที่ 4.60(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างกรลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.54(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.60(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

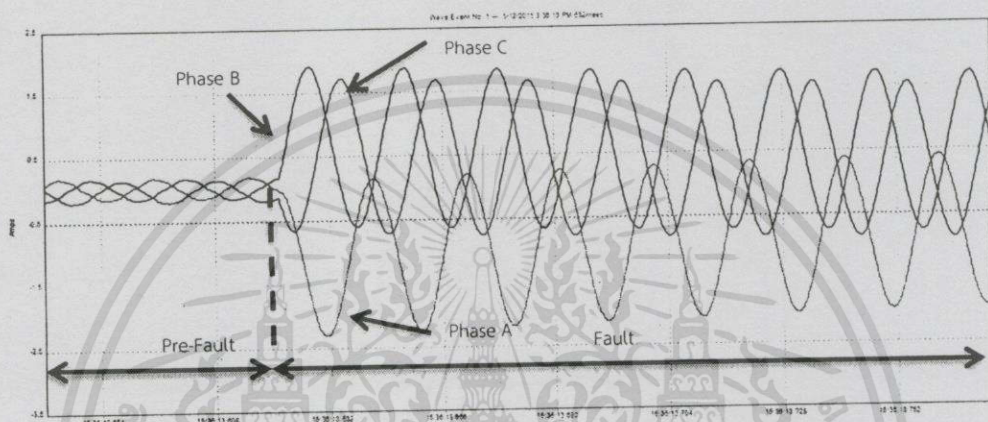
ตารางที่ 4.51 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดการลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 μ F			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 μ F			
มุมเกิดการลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	1.312	0.159	2.33	0.211	2.205
50W	0.301	1.700	0.305	2.030	0.342	2.510
R-L	0.431	2.625	0.450	2.033	0.467	2.369

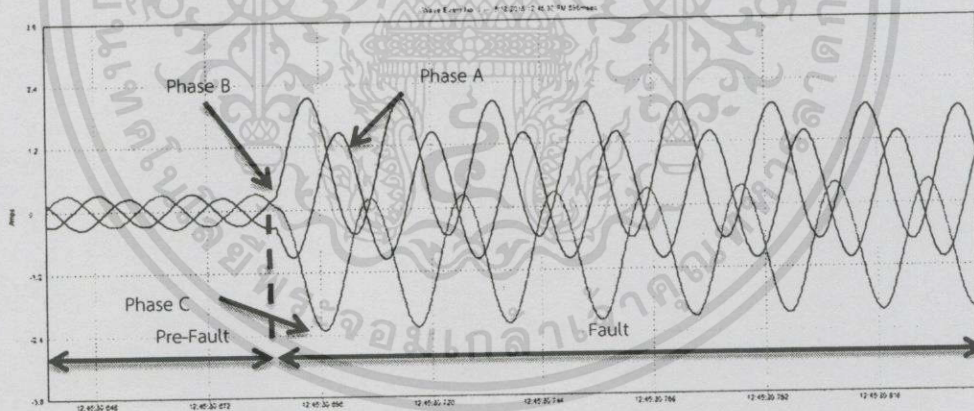
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.45 และ ตารางที่ 4.51 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

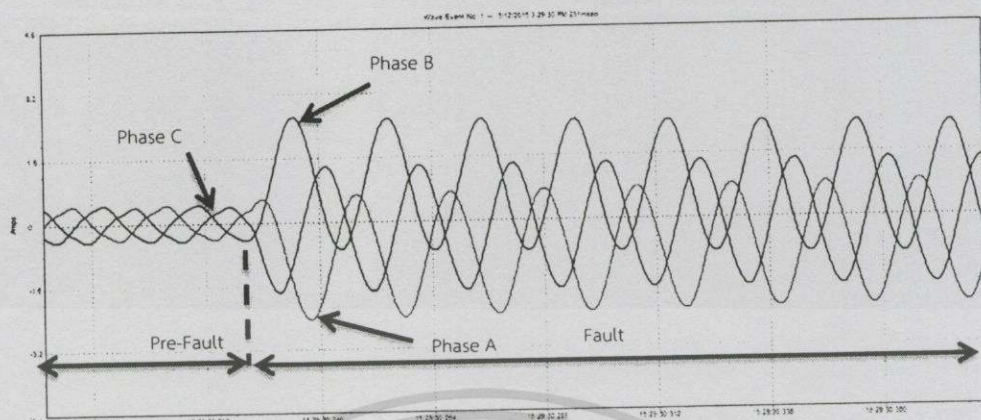
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.61(ก), รูปที่ 4.61(ข) และรูปที่ 4.61(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.61 ระยะความยาวสายที่ 20% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°)

จากรูปที่ 4.61(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A ,เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.60(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.61(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.61(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.61(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.61(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.58(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.61(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.59(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.61(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.61(ก) และรูปที่ 4.61(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.60(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.61(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.55(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.61(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

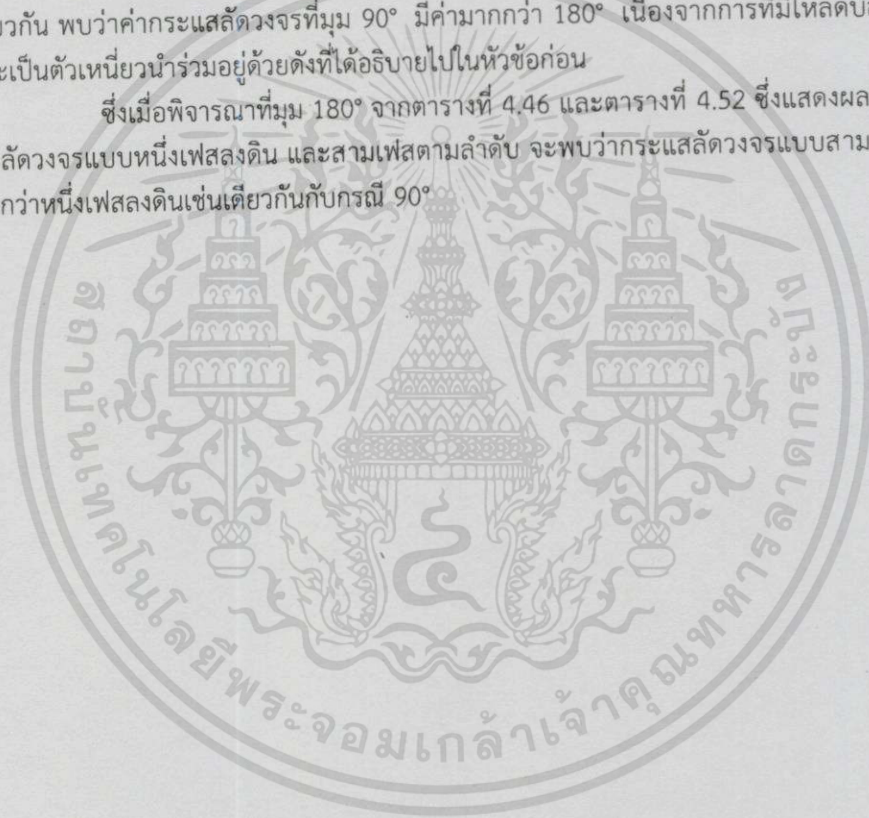
ตารางที่ 4.52 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะเวลายาวสายที่ 20% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 7.6916 mH		C : 3.2578 uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 140 mH		C : 0.2 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.158	2.420	0.159	1.915	0.189	1.724
50W	0.305	2.520	0.316	2.15	0.336	1.460
R-L	0.435	2.605	0.424	2.445	0.510	1.755

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.51 และตารางที่ 4.52 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.46 และตารางที่ 4.52 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°



ตารางที่ 4.53 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A , MAX	1.324	1.540	2.477	1.316	1.390	2.570	1.560	1.670	2.463	1.312	1.700	2.625
I _B , MAX	0.175	0.310	0.469	2.312	2.350	2.030	1.400	1.350	2.033	2.33	2.030	2.033
I _C , MAX	0.195	0.360	0.446	0.191	0.336	0.446	0.210	0.346	0.458	2.205	2.510	2.369

จากตารางที่ 4.53 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 20% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดปกติ (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.54 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm มุม
กระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 14 กิโลเมตรหรือ 20% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสาม เฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	2.330	2.350	2.453	2.330	2.390	2.445	1.965	2.171	2.369	2.420	2.520	2.605
I _B MAX	0.152	0.320	0.469	1.880	2.178	2.351	1.808	1.862	2.312	1.915	2.150	2.445
I _C MAX	0.230	0.340	0.469	0.210	0.340	0.469	0.195	0.332	0.469	1.724	1.460	1.755

จากตารางที่ 4.54 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 20% มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงร้นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิด
การลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.53 แต่ขนาดของกระแสและมุมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่ง
เฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรดังที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

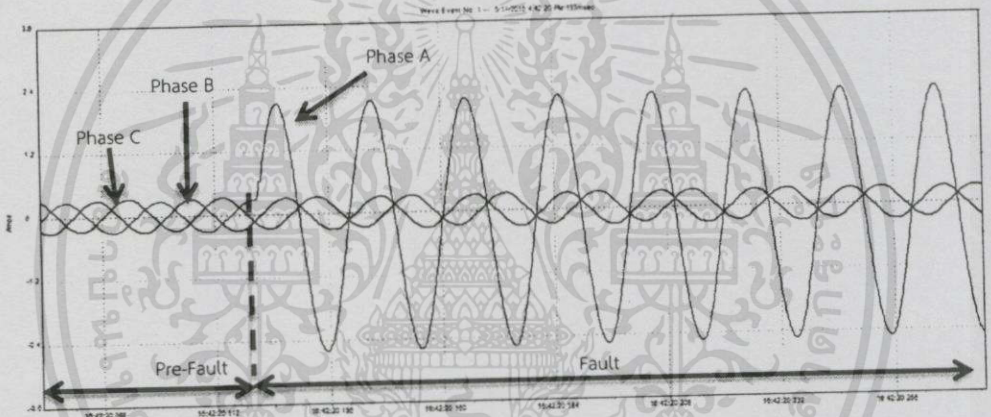
หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะมีแรงดันสูงสุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะ
เกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุด ในโครงการนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดัง
อธิบาย

4.2.2 ระยะเวลาความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง

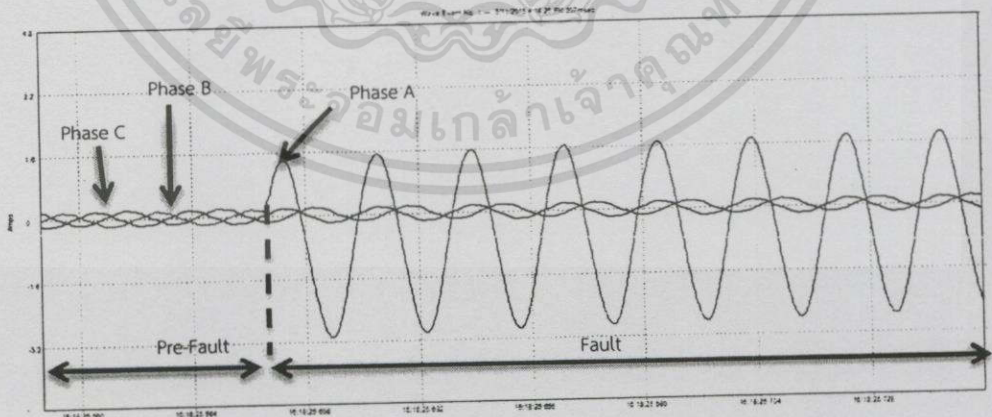
การลัดวงจรในชุดทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.2.2.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

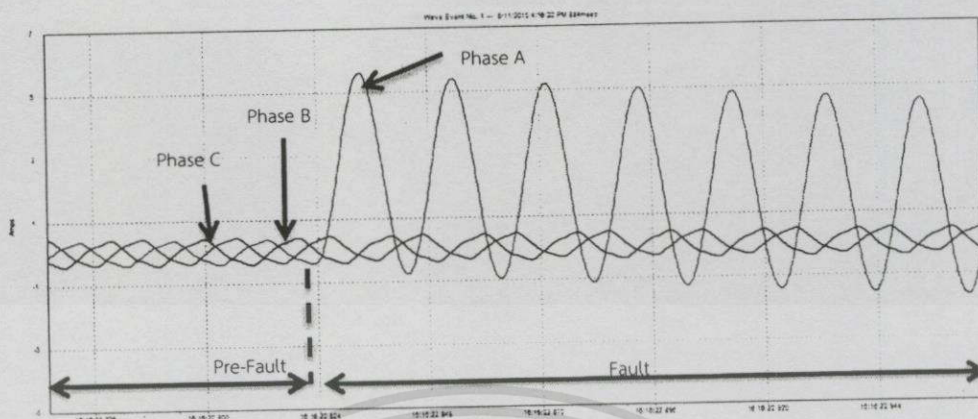
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.62(ก), รูปที่ 4.62(ข) และรูปที่ 4.62(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+ บัลลัสต์

รูปที่ 4.62 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดการลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.62(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.62(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.62(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.55 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

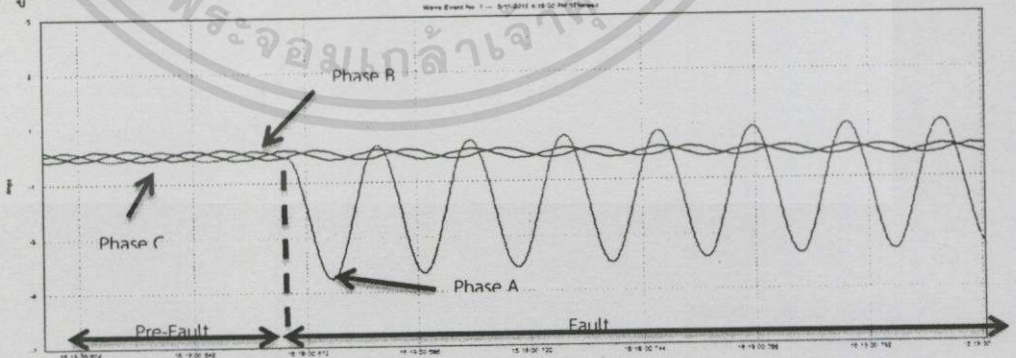
จากรูปที่ 4.62(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลัสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.62(ก) และรูปที่ 4.62(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.55 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

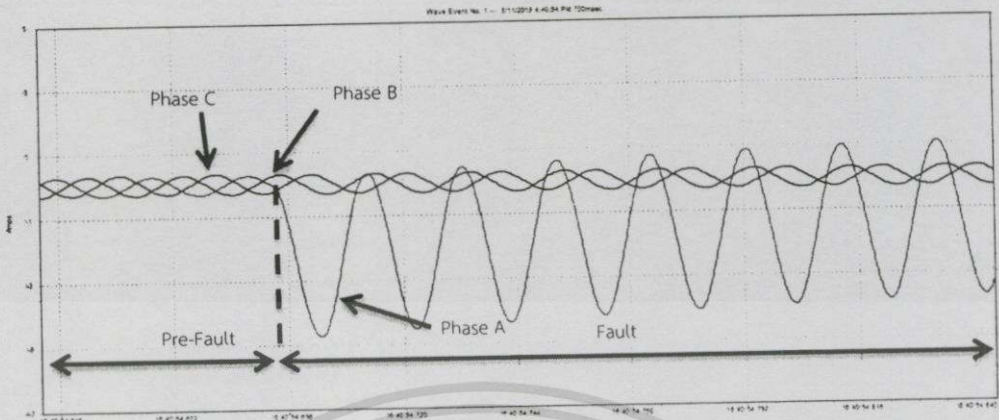
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	2.613	0.159	0.161	0.211	0.171
50W	0.301	3.178	0.302	0.179	0.336	0.306
R-L	0.432	5.619	0.450	0.458	0.469	0.477

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

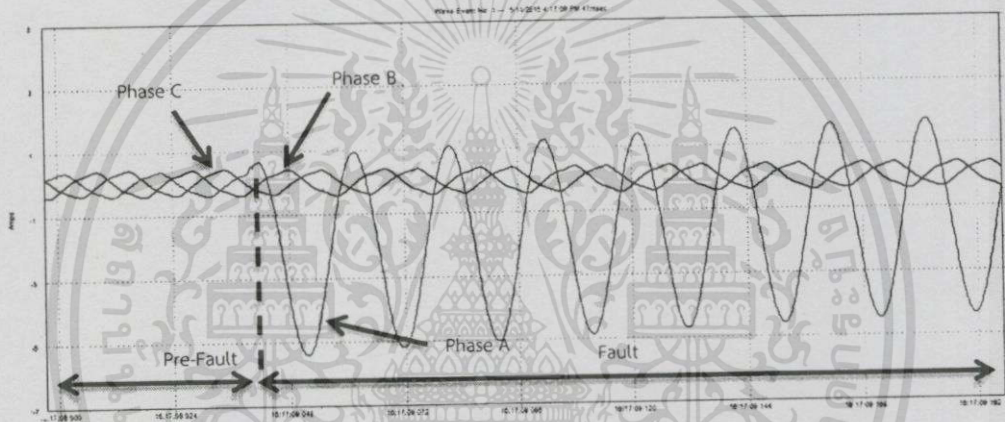
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มีมุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.63(ก), รูปที่ 4.63(ข) และรูปที่ 4.63(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.63 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.63(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.62(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.63(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.63(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.63(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการปรับแรงดันโหลดเพิ่ม และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.62(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.63(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

จากรูปที่ 4.63(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.63(ก) และรูปที่ 4.63(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าช้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.62(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.63(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.56 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะเวลาความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 23.0748 mH		C : 9.7734 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 420 mH		C : 0.6 μ F		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180 $^\circ$				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	4.505	0.159	0.179	0.211	0.202
50W	0.301	4.738	0.302	0.313	0.336	0.320
R-L	0.432	4.909	0.434	0.431	0.469	0.446

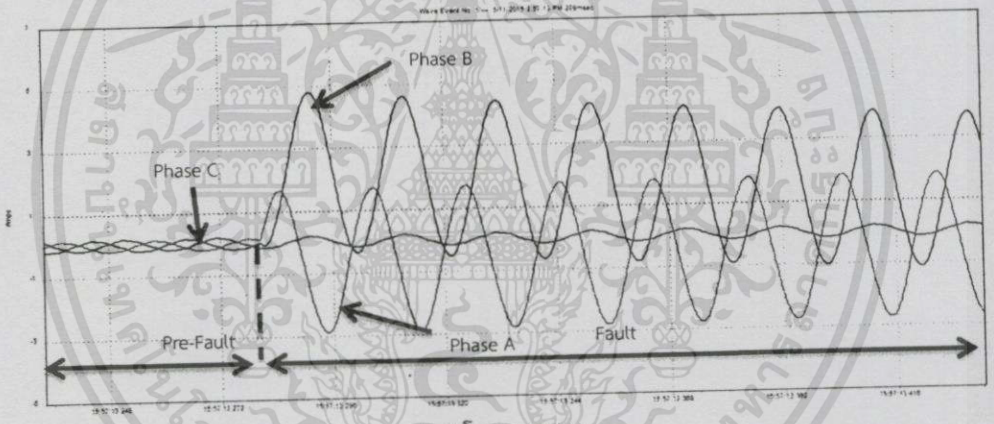
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่า

มากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.55

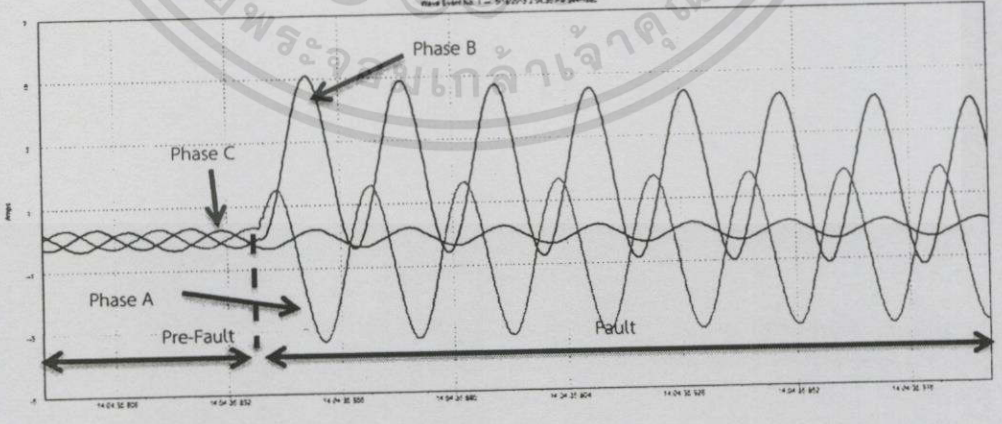
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.55 และตารางที่ 4.56 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มีมุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มีมุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.2.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

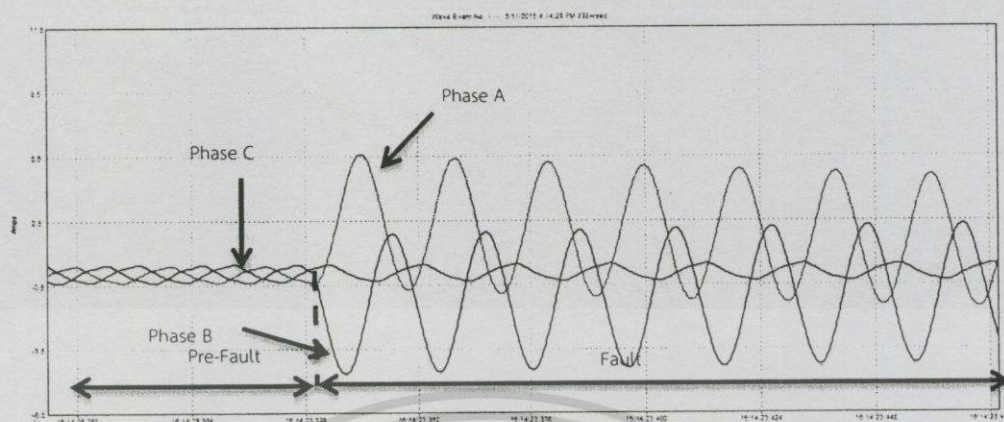
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มีมุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.64(ก), รูปที่ 4.64(ข) และรูปที่ 4.64(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.64 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.64(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุมดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าใกล้แกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.64(ก) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.64(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.64(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.64(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.64(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.64(ก) และรูปที่ 4.64(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.64(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

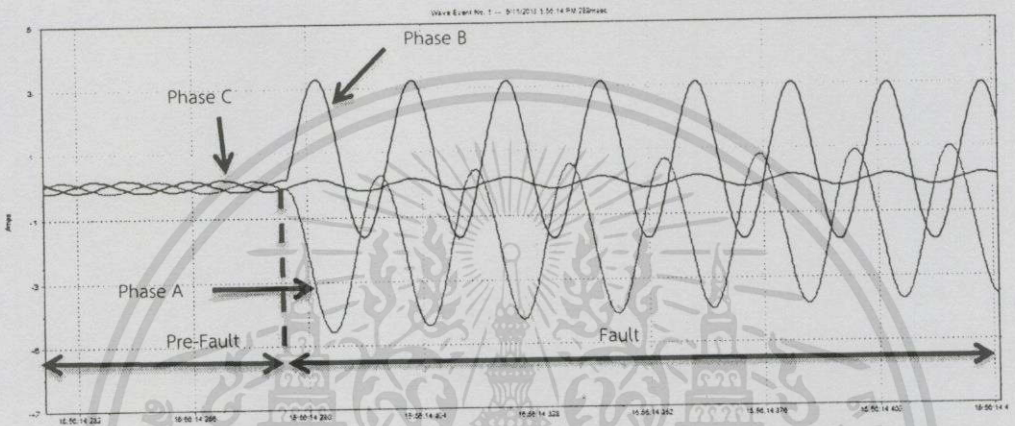
ตารางที่ 4.57 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	2.872	0.159	4.610	0.211	0.195
50W	0.301	3.363	0.302	5.101	0.336	0.343
R-L	0.432	5.615	0.450	4.665	0.469	0.465

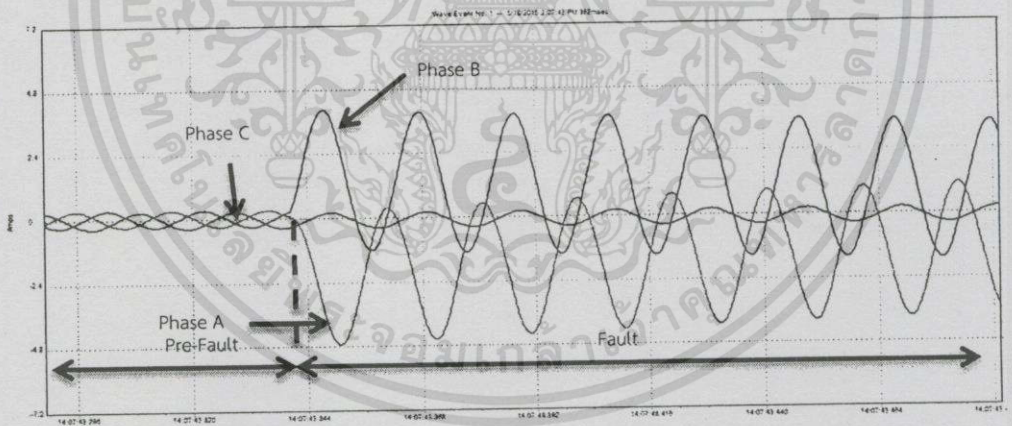
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.55 และ ตารางที่ 4.57 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

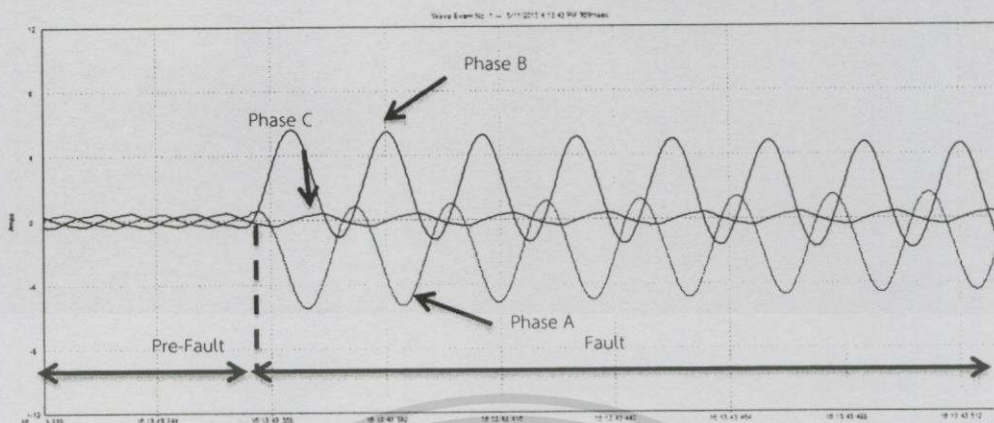
เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.65(ก), รูปที่ 4.65(ข) และรูปที่ 4.65(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.65 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดการลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.65(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.64(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.65(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดในช่วงคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.65(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.65(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.65(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.64(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.65(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.65(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.65(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.65(ก) และรูปที่ 4.65(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีความแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ดังที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.64(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.65(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.65(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.58 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

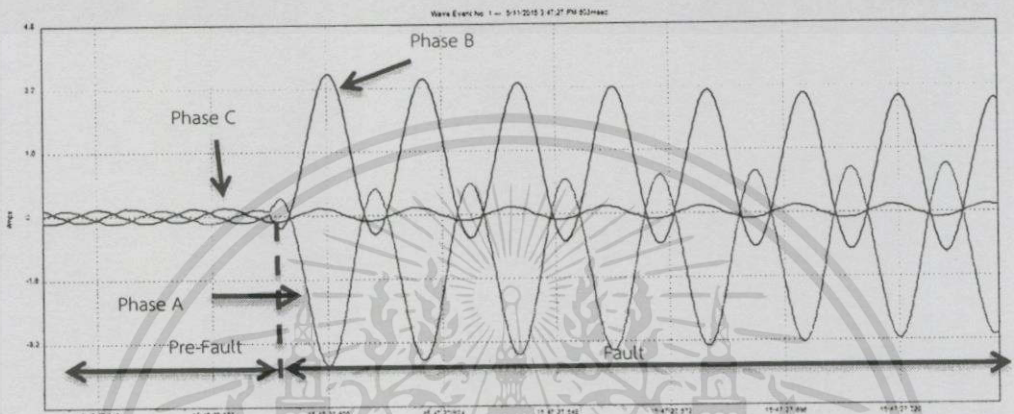
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	4.778	0.159	3.304	0.211	0.202
50W	0.301	5.105	0.302	4.060	0.336	0.320
R-L	0.432	5.474	0.450	5.650	0.469	0.446

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.57 และตารางที่ 4.58 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

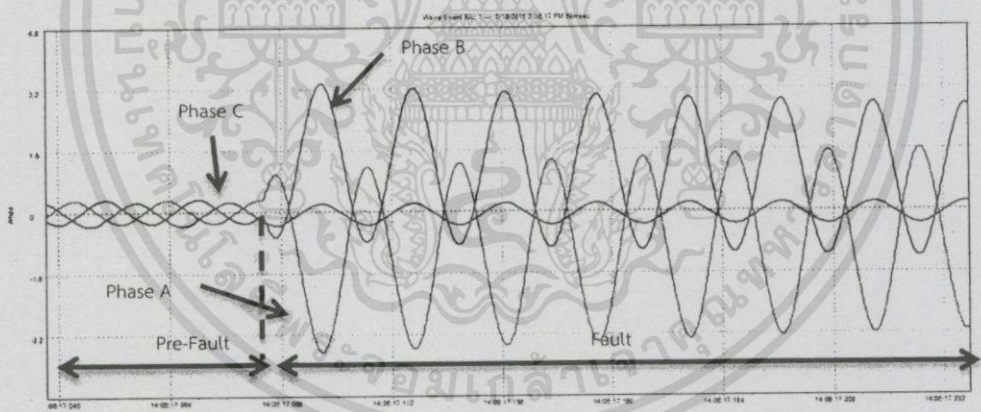
เมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.56 และตารางที่ 4.58 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.2.2.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

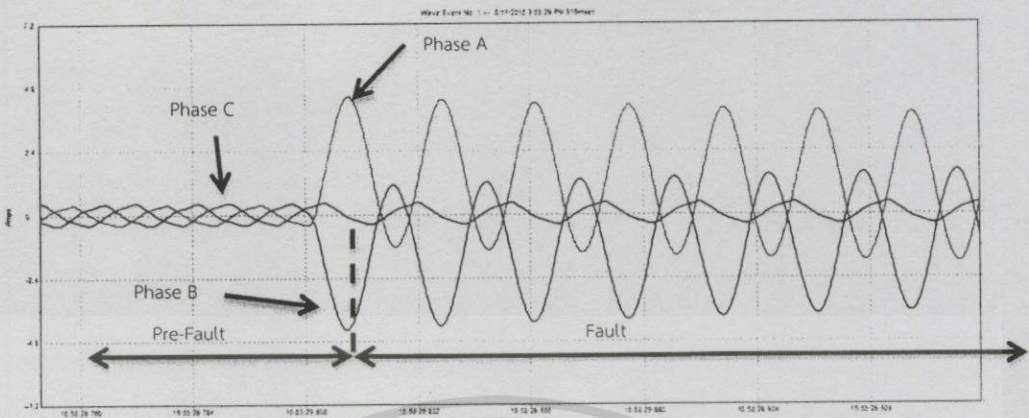
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.66(ก), รูปที่ 4.66(ข) และรูปที่ 4.66(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.66 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.66(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.66(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.66(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.66(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.66(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.66(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.66(ก)

และรูปที่ 4.66(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

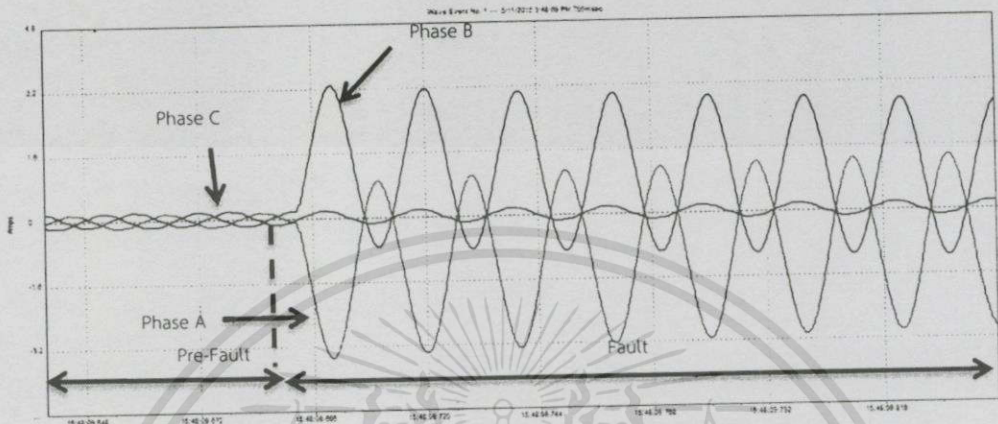
ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.66(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.59 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

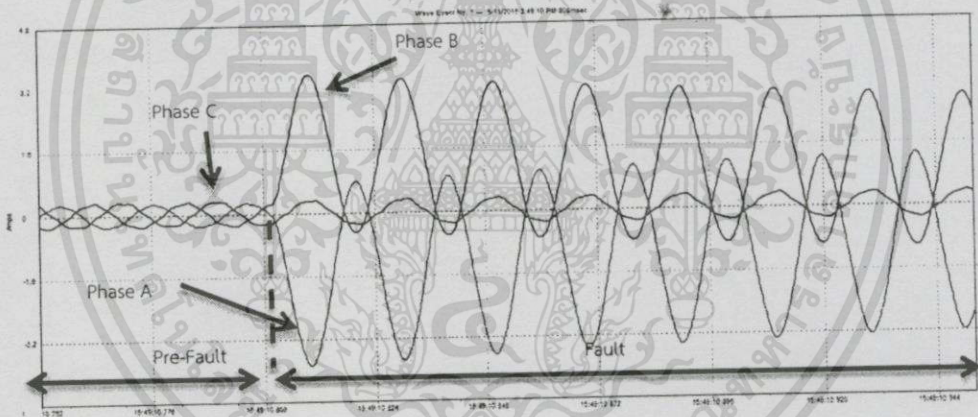
การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	3.361	0.159	3.182	0.211	0.206
50W	0.301	3.773	0.302	3.335	0.336	0.350
R-L	0.432	5.189	0.450	4.953	0.469	0.450

เมื่อทำการเปรียบเทียบกรณฑ์ตลอดทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อนแต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.55 และ ตารางที่ 4.59 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

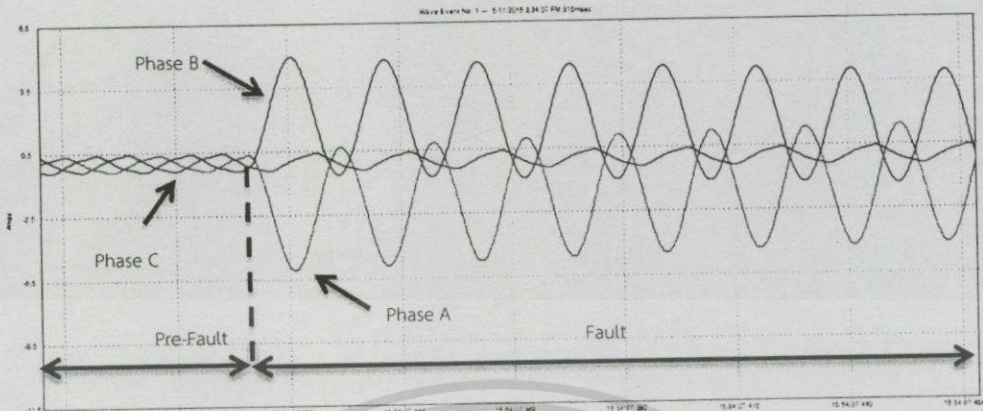
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.67(ก), รูปที่ 4.67(ข) และรูปที่ 4.67(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.67 ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.67(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.66(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.67(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสถานะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.67(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.67(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.7(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.66(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.67(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.67(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.67(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.67(ก) และรูปที่ 4.67(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี 4.65(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.6(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.67(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.3(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.67(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันในขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.60 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	3.487	0.159	3.296	0.211	0.206
50W	0.301	3.883	0.302	3.540	0.336	0.359
R-L	0.432	5.048	0.450	4.971	0.469	0.439

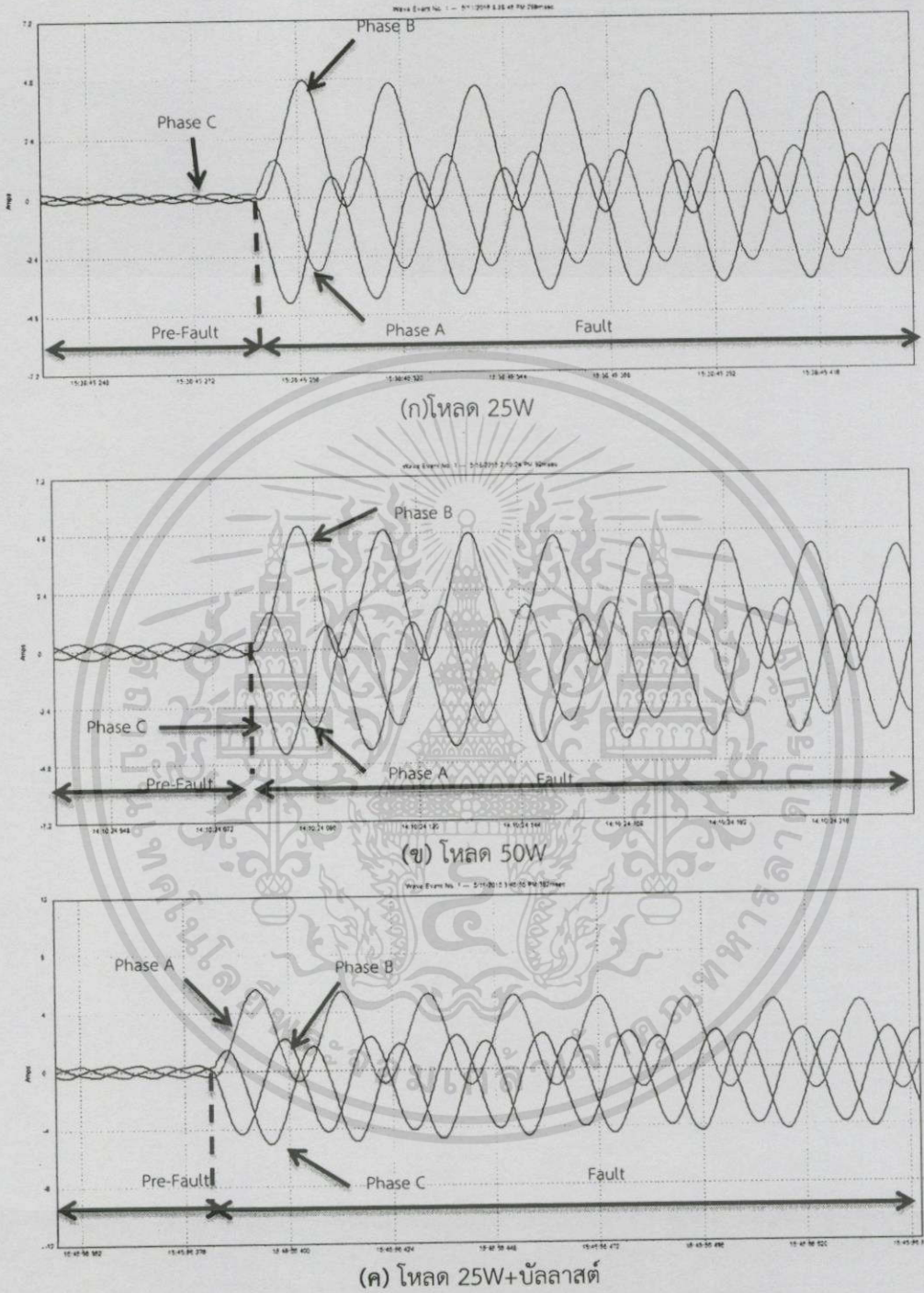
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.54 และตารางที่ 4.60 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.59 และตารางที่ 4.60 พบว่า เมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.2.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.68(ก), รูปที่ 4.68(ข) และรูปที่ 4.68(ค)



รูปที่ 4.68 ระยะเวลาความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.68(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด $25W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $25W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.68(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.68(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.68(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ $400V$ ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $50W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.68(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด $25W$ แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.68(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด $25W +$ บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.68(ก) และรูปที่ 4.68(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $25W +$ บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.62(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.68(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด $25W$ และ $50W$ แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

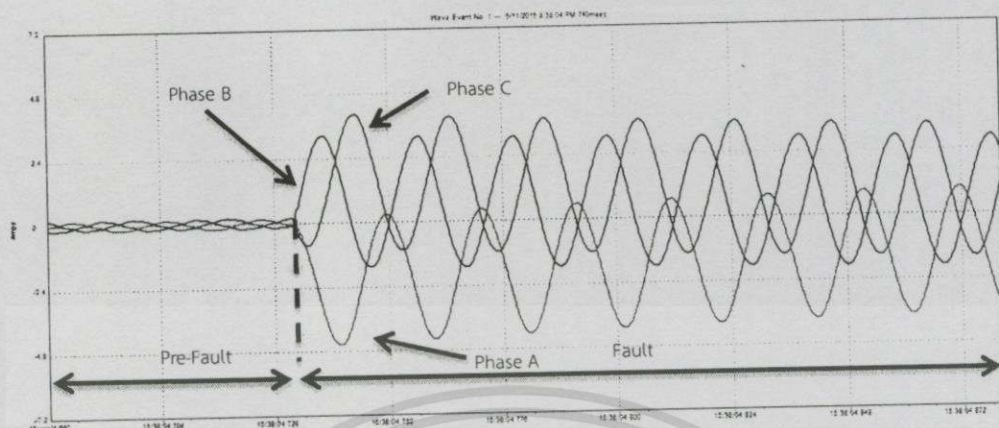
ตารางที่ 4.61 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหนด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	2.983	0.159	4.768	0.211	4.311
50W	0.301	3.281	0.302	4.905	0.336	4.360
R-L	0.432	5.862	0.450	4.337	0.469	5.054

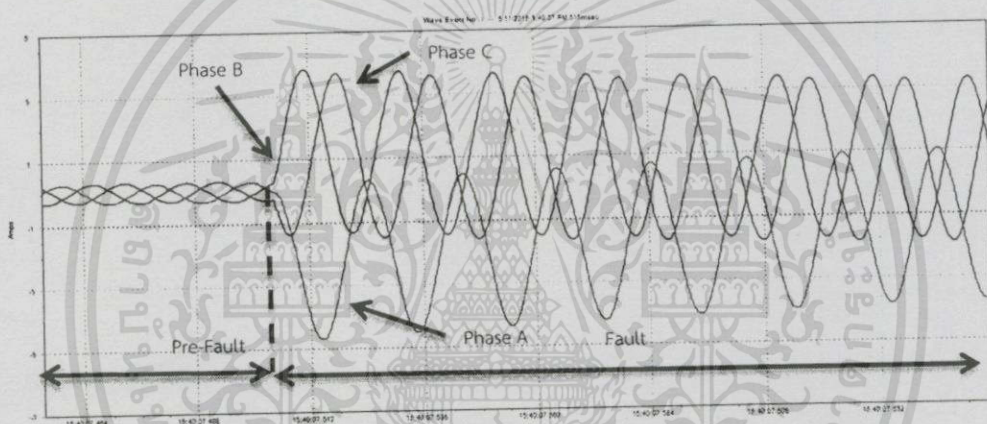
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดที่ 25W, 50W และโหนด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหนด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.55 และ ตารางที่ 4.61 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

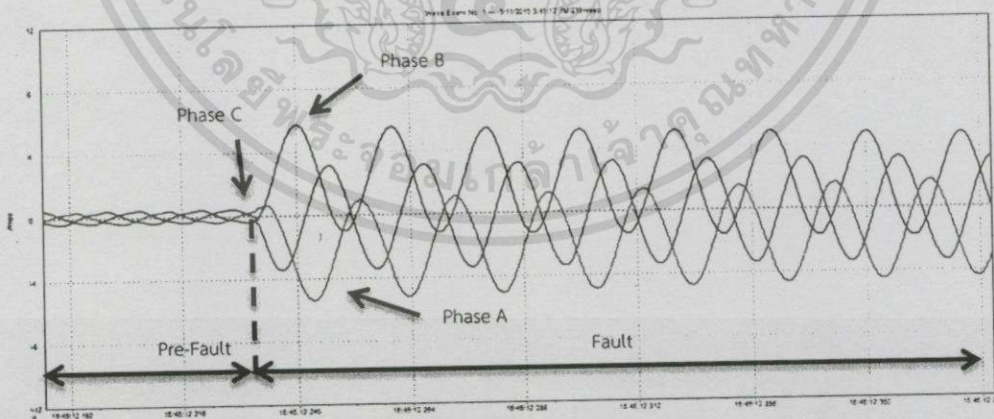
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหนด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.69(ก), รูปที่ 4.69(ข) และรูปที่ 4.69(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.69 ระยะเวลาการยาวสายที่ 60% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.69(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A ,เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.68(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.69(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.69(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.69(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.69(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.66(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.69(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.67(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W

จากรูปที่ 4.69(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.69(ก) และรูปที่ 4.69(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.68(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.69(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.63(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.69(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.62 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 60% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 23.0748mH		C : 9.7734uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 420 mH		C : 0.6 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	4.851	0.159	3.258	0.211	4.059
50W	0.301	4.996	0.302	3.834	0.336	3.689
R-L	0.432	5.753	0.450	5.413	0.469	3.448

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.61 และตารางที่ 4.62 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.56 และตารางที่ 4.62 ซึ่งแสดงผลการทดลอง
กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมี
ค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.63 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
$I_{A, MAX}$	2.613	3.178	5.619	2.872	3.363	5.615	3.361	3.773	5.189	2.983	3.281	5.862
$I_{B, MAX}$	0.161	0.179	0.458	4.610	5.101	4.665	3.182	3.335	4.953	4.768	4.905	4.337
$I_{C, MAX}$	0.171	0.306	0.477	0.195	0.343	0.465	0.206	0.350	0.450	4.311	4.360	5.054

จากตารางที่ 4.63 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% ของสายส่ง ที่มีมุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดพลาด (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.64 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุม
กระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 42 กิโลเมตรหรือ 60% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสาม เฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
$I_{A,MAX}$	4.505	4.738	4.909	4.778	5.105	5.474	3.487	3.883	5.048	4.851	4.996	5.753
$I_{B,MAX}$	0.179	0.313	0.431	3.304	4.060	5.650	3.296	3.540	4.971	3.258	3.834	5.413
$I_{C,MAX}$	0.202	0.320	0.446	0.202	0.320	0.446	0.206	0.359	0.439	4.059	3.689	3.448

จากตารางที่ 4.64 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 60%, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงร้นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิด
การลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.63 แต่ขนาดของกระแสและมุมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่ง
เฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรดังที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

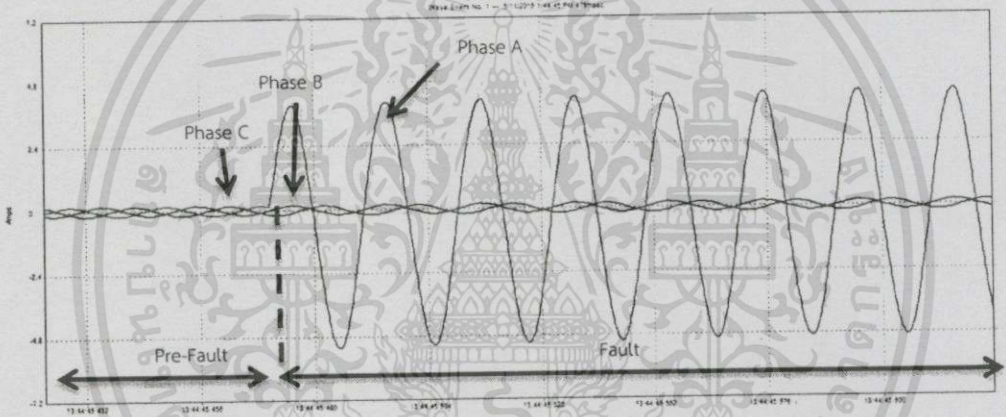
หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะมีแรงดันสูงสุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะ
เกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุดในโครงการนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดัง
อธิบาย

4.2.3 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง

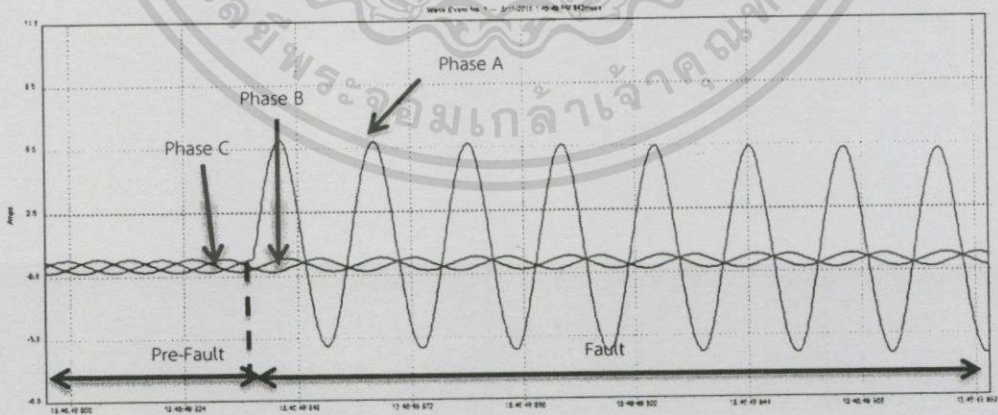
การลัดวงจรในชุดทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

4.2.3.1 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

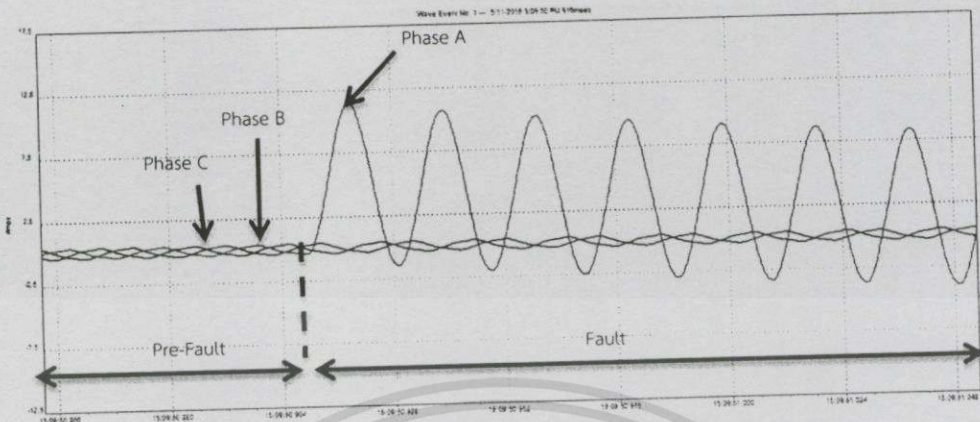
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าโหลดในระบบที่ 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.70(ก), รูปที่ 4.70(ข) และรูปที่ 4.70(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.70 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.70(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะลดลงและเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

จากรูปที่ 4.70(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.70(ค) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W ดังแสดงในตารางที่ 4.65 เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V เมื่อเพิ่มโหลดทำให้ค่าแรงดันมีค่าลดลง ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

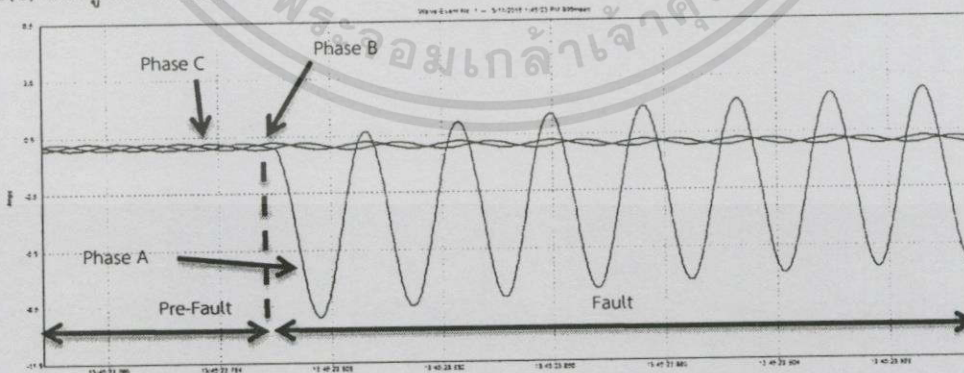
จากรูปที่ 4.70(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.70(ค) และรูปที่ 4.70(ข) อย่างไรก็ตามค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองกรณีก่อนหน้า แต่จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรที่มุม 90° เนื่องจากโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล้าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ตารางที่ 4.65 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

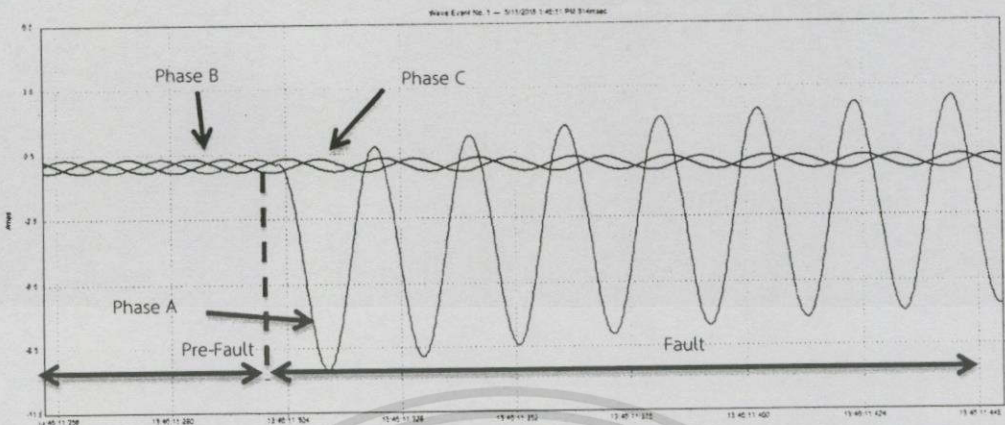
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115 kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 30.7664mH		C : 13.0312uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 560 mH		C : 0.8uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	90°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	5.249	0.159	0.183	0.198	0.206
50W	0.301	5.939	0.302	0.313	0.336	0.332
R-L	0.432	11.436	0.450	0.427	0.469	0.452

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร

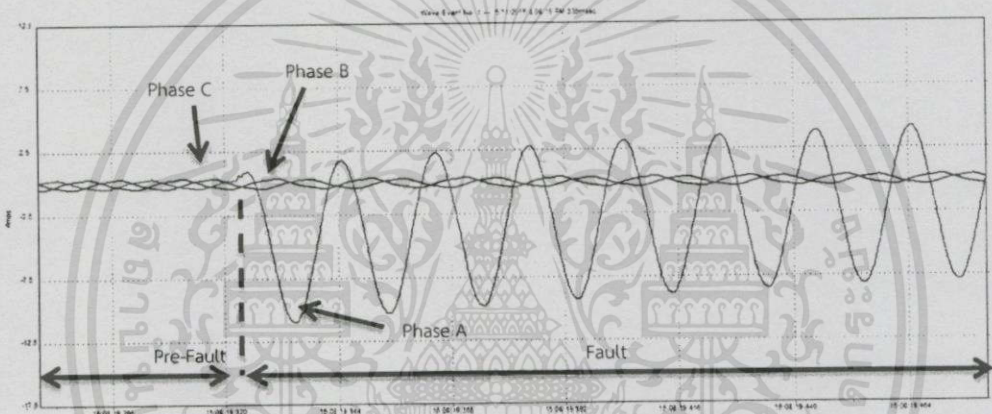
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.71(ก), รูปที่ 4.71(ข) และรูปที่ 4.71(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.71 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.71(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และค่ากระแสสูงสุดนั้นเกิดขึ้นในทิศทางลบ เนื่องจากที่มุม 180° ค่ากระแสนั้นเข้าสู่ช่วงลบ โดยที่ค่ากระแสที่เฟส B และเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A จะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.70(ก) กับ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.71(ก) พิจารณากระแสที่เฟส A พบว่าค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

จากรูปที่ 4.71(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.71(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการปรับแรงดันโวลต์เพิ่ม และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.70(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.71(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

จากรูปที่ 4.71(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.71(ก) และรูปที่ 4.71(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น โดยมุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.70(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.71(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.66 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ระยะเวลาขยายสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115 kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 30.7664mH		C : 13.0312 uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 560 mH		C : 0.8uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	9.109	0.159	0.183	0.211	0.206
50W	0.301	9.533	0.302	0.313	0.336	0.336
R-L	0.432	9.698	0.450	0.416	0.469	0.456

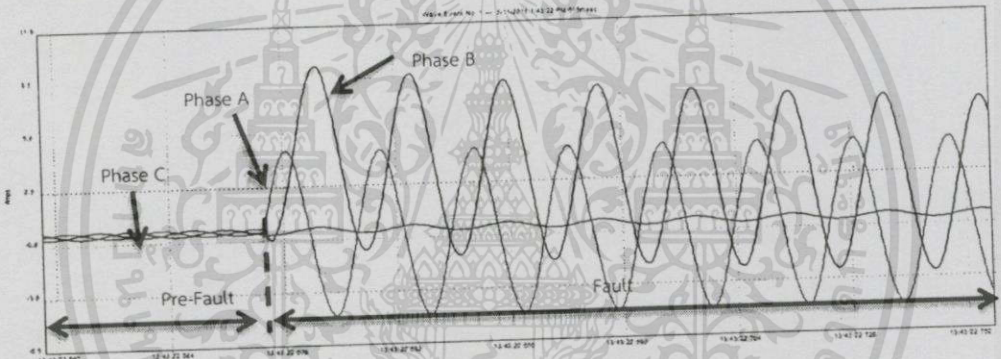
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้น

จะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปในตารางที่ 4.65

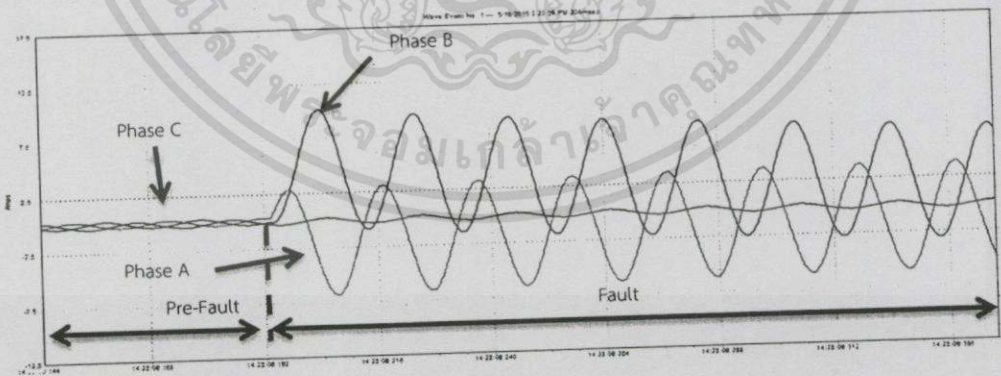
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.65 และตารางที่ 4.66 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มีมุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มีมุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.3.2 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

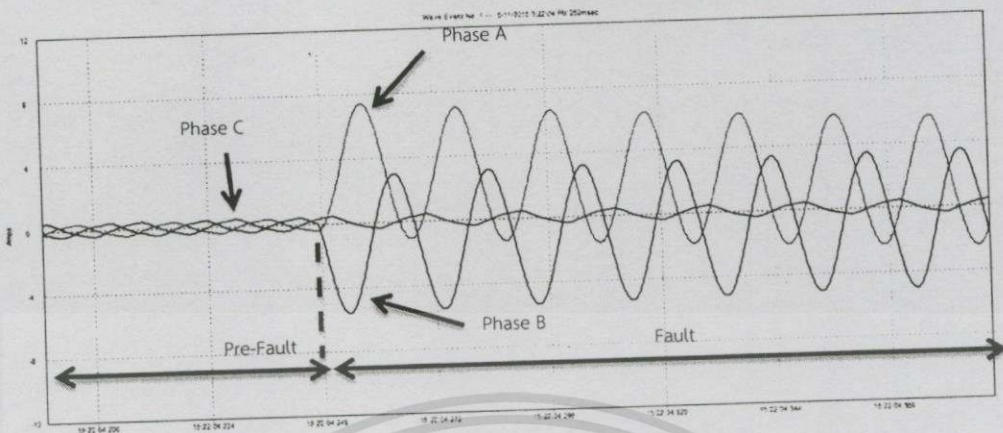
ในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ $400V$ (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มีมุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.68(ก), รูปที่ 4.68(ข) และรูปที่ 4.68(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.72 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.72(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และค่ามุมดังกล่าวส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B มีค่ามากกว่าเฟส A เนื่องจากมุมที่เกิดการลัดวงจร มีแรงดันเข้าโคลแกนศูนย์มากกว่าเฟส A ทำให้มีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ก) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.72(ก) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมุมลัดวงจรเริ่มที่มุม 90° พร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วย พบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.72(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.72(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลด

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.72(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่โหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า

จากรูปที่ 4.72(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.72(ก) และรูปที่ 4.72(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณา รูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามุมแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.72(ค) ที่กระแสลัดวงจรเฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

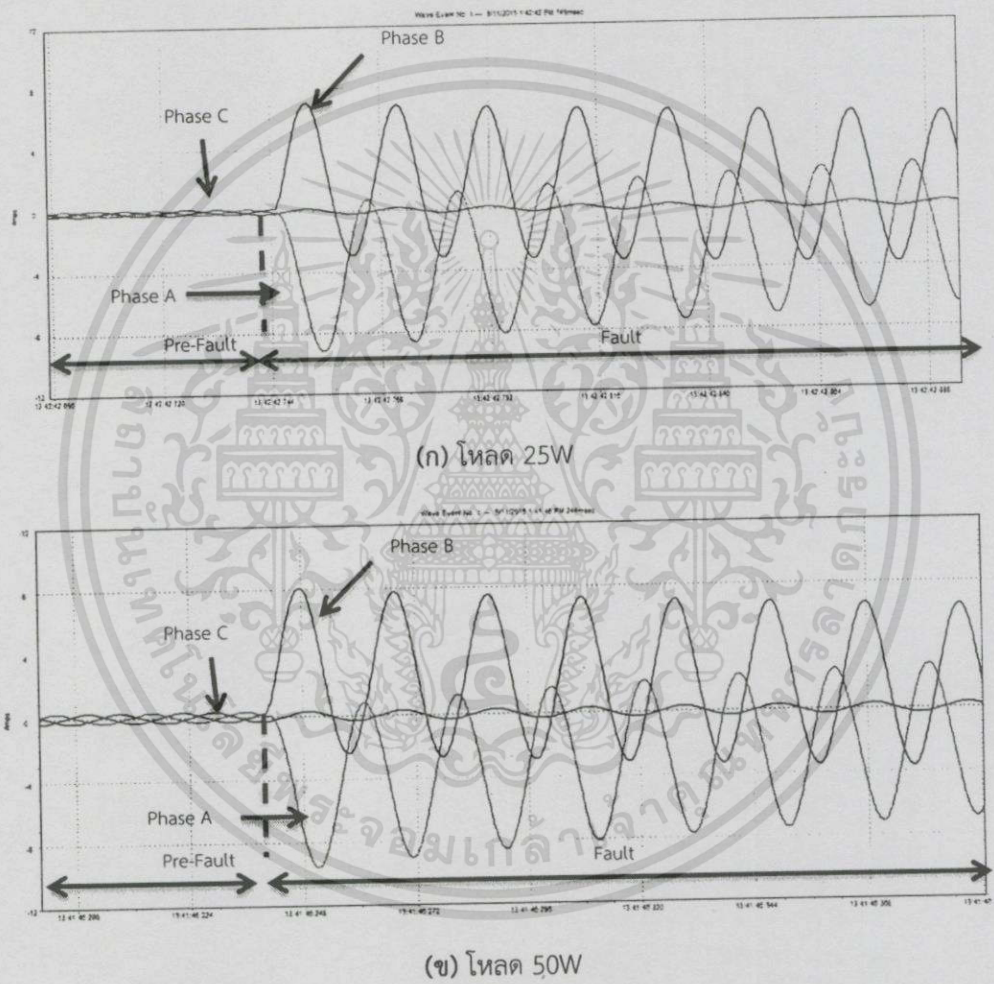
ตารางที่ 4.67 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะเวลายาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

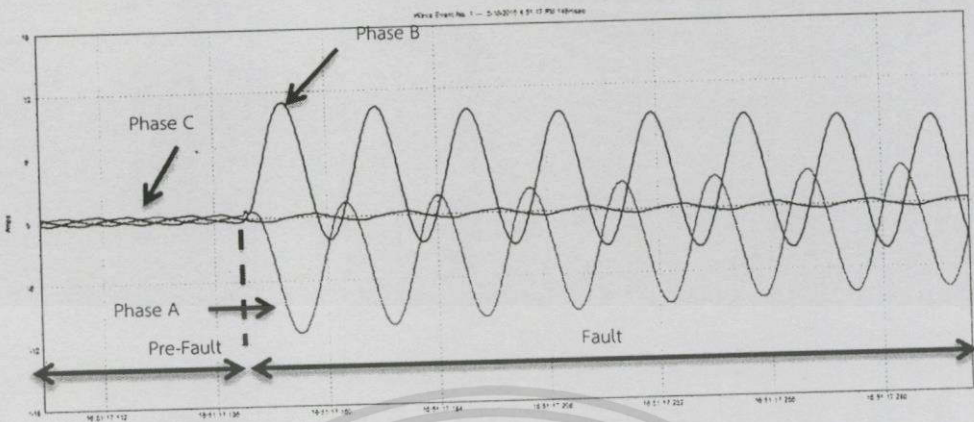
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 30.7664mH		C : 13.0312uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 560 mH		C : 0.8uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	6.944	0.159	9.182	0.201	0.206
50W	0.301	6.810	0.302	10.012	0.336	0.336
R-L	0.432	11.089	0.450	7.839	0.469	0.464

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยั้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.65 และ ตารางที่ 4.67 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

เมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.73(ก), รูปที่ 4.73(ข) และรูปที่ 4.73(ค)





(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.73 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.73(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ส่งผลให้มีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากมีส่วนประกอบของกระแสตรง เพราะแรงดันที่มุม 180° ของเฟส A เข้าใกล้ศูนย์มากกว่าที่เฟส B โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.72(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.73(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ก) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.73(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมกับและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.73 (ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณตั้งอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.73(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.72(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.73(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ข) กับแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.73(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.73(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณตั้งอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.73(ก) และรูปที่ 4.73(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีความแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำภายในบัลลาสต์ตั้งที่อธิบายในหัวข้อก่อน

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.72(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.5(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ค) และแบบสองเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.73(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.68 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

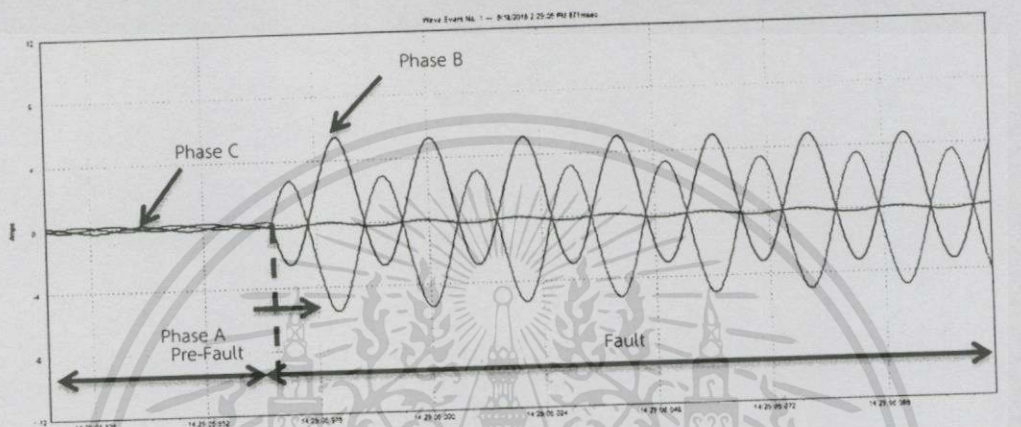
การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 30.7664mH		C : 13.0312uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 560 mH		C : 0.8uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหนด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	9.266	0.159	7.038	0.211	0.214
50W	0.301	10.260	0.302	8.083	0.336	0.336
R-L	0.432	10.989	0.450	10.903	0.469	0.469

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดที่ 25W, 50W และโหนด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหนด R-L, 50W และ 25W และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.67 และตารางที่ 4.68 พบว่าเมื่อพิจารณาโหนดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหนด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้น

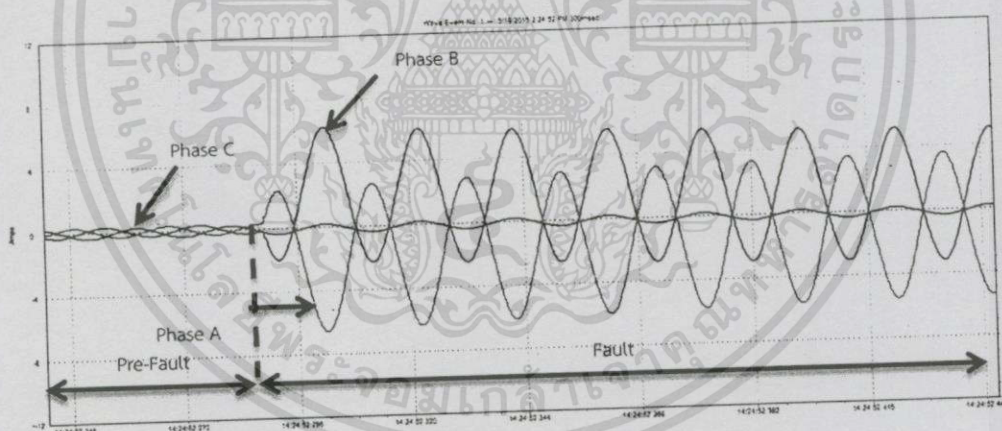
เมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.66 และตารางที่ 4.68 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

4.2.3.3 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault)

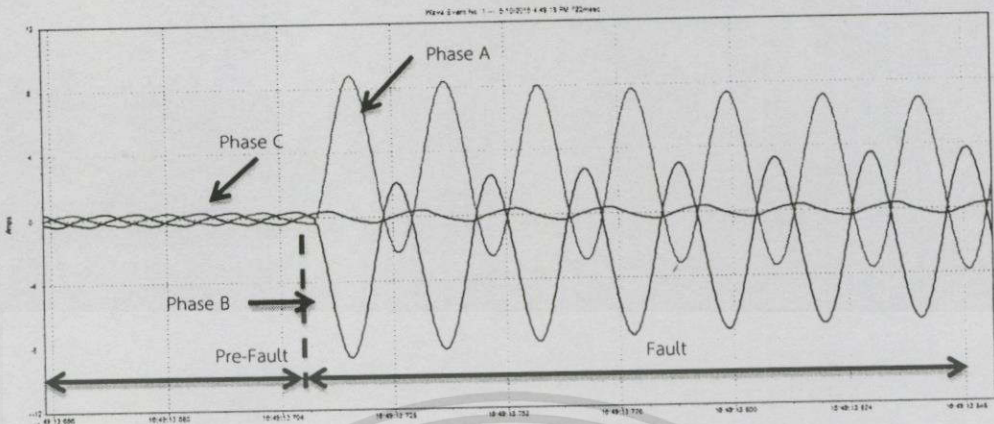
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสองเฟสที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.74(ก), รูปที่ 4.74(ข) และรูปที่ 4.74(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.74 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.74(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และมีค่ากระแสการลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะลดลงและเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.74(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสที่เฟส B มีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากการเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.74(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.74(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.74(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.74(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.74(ก) และรูปที่ 4.74(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณา รูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการ ลัดวงจรสองเฟสลงดิน

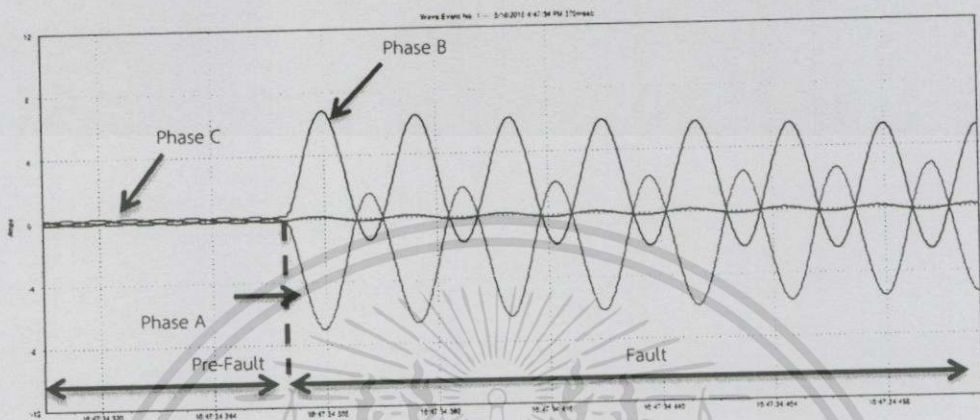
ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการ ลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.74(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่ โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟส ออกไปจาก 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

ตารางที่ 4.69 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

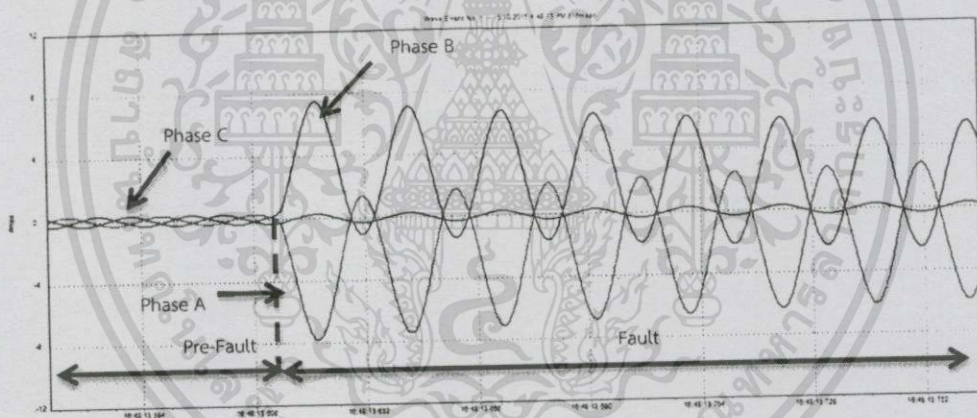
การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 30.7664mH		C : 13.0312 uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 560 mH		C : 0.8 uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อน ลัดวงจร	หลัง ลัดวงจร	ก่อน ลัดวงจร	หลัง ลัดวงจร	ก่อน ลัดวงจร	หลัง ลัดวงจร
25W	0.163	5.580	0.159	5.440	0.201	0.202
50W	0.301	6.560	0.302	6.290	0.336	0.334
R-L	0.432	9.808	0.450	9.655	0.469	0.451

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด และทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแส ลัดวงจรมากที่สุดไปย้งน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีก่อน แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดแต่ไม่มีการปรับเพิ่มแรงดันให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) ค่ากระแสจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรง ของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.65 และ ตารางที่ 4.69 พบว่าการลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่า มากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

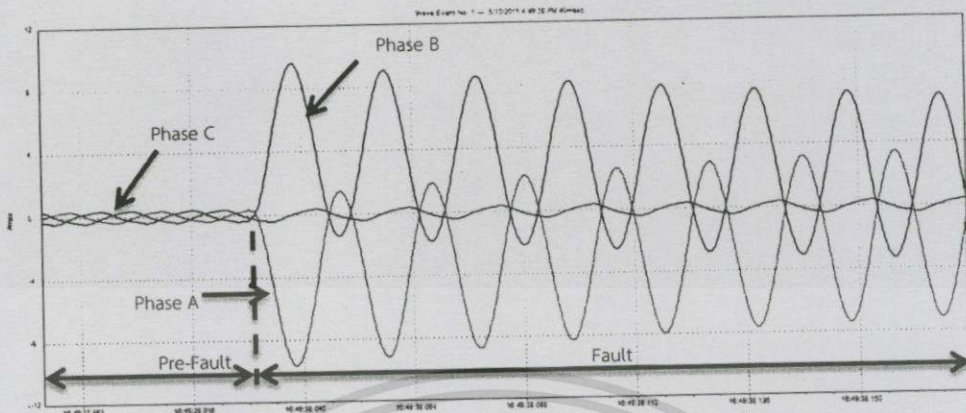
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.75(ก), รูปที่ 4.75(ข) และรูปที่ 4.75(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.75 ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.75(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A และเฟส B ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A มีค่ากระแสลัดวงจรใกล้เคียงกับที่เฟส B ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 60° เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยไม่มีสายดิน ทำให้กระแสลัดวงจรไหลวนในสายส่งทั้งสองเส้น ทำให้กระแสระหว่างเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากระแสที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A และเฟส B จะเข้าสู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.74(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.75(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสถานะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากมีค่าแรงดันเข้าใกล้เคียงกันมากกว่า ส่งผลให้มีส่วนประกอบกระแสตรงเข้ามารวมอยู่ด้วย

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ก) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.75(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B แบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสองเฟส

จากรูปที่ 4.75(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $50W$ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.75(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ตามเงื่อนไข

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $50W$ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.74(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.75(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด $25W$ แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า ดังที่อธิบายในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด $50W$ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ข) กับแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.75(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด $25W$

จากรูปที่ 4.75(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.75(ก) และรูปที่ 4.75(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด $25W$ และ $50W$ และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี 4.73(ข)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด $25W$ +บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.74(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.75(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำรวมอยู่ด้วย ดังนั้นค่ากระแสที่มุม 90° จึงมีค่ามากกว่าที่มุม 180° ในกรณีที่โหลด R-L

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด $25W$ +บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ค) และแบบสองเฟส ดังรูปที่ 4.75(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A และเฟส B พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด $25W$ และ $50W$ แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.70 การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง	115kV		200 MVA			
Base ระบบจำลอง	400 V (L-L)		150 VA			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง	L : 30.7664 mH		C : 13.0312 uF			
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง	L : 560 mH		C : 0.8 uF			
มุมเกิดกระแสลัดวงจร	180°					
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	7.023	0.159	6.87	0.192	0.195
50W	0.301	7.82	0.302	7.515	0.336	0.317
R-L	0.432	9.774	0.45	9.632	0.469	0.469

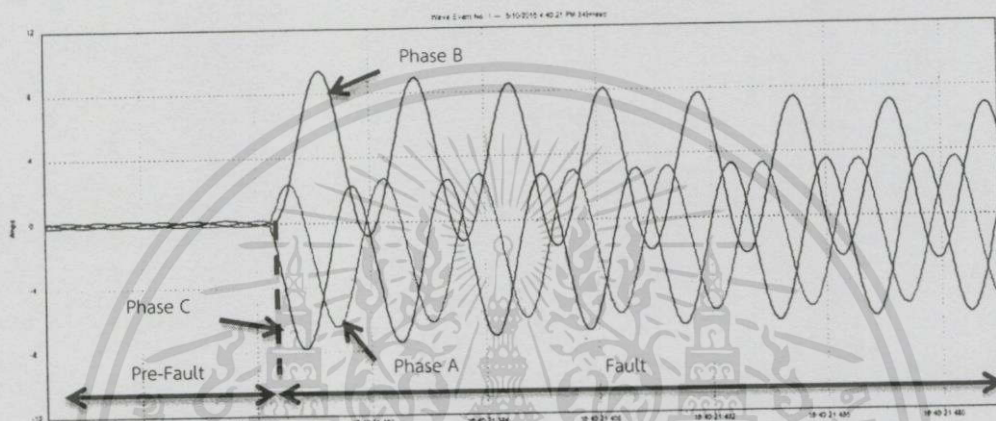
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสองเฟส ที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และ โหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.66 และตารางที่ 4.70 ซึ่งแสดงผลการทดลอง กระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสองเฟสมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°

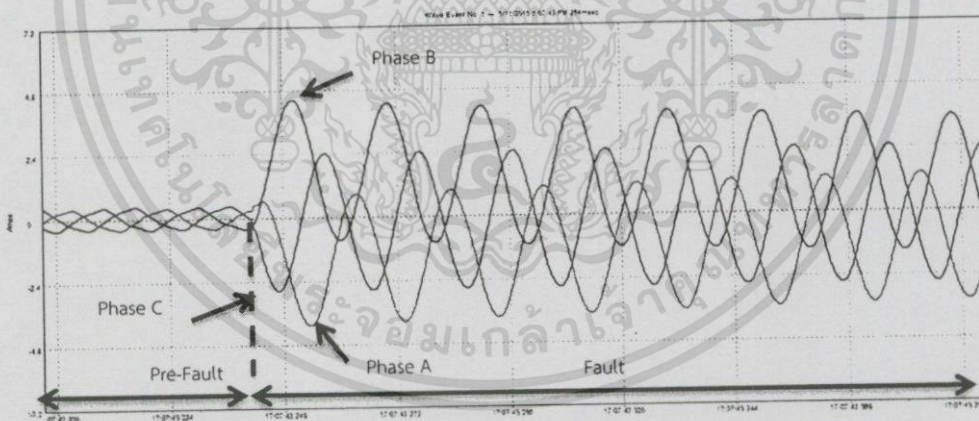
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.69 และตารางที่ 4.70 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

4.2.3.4 การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground Fault)

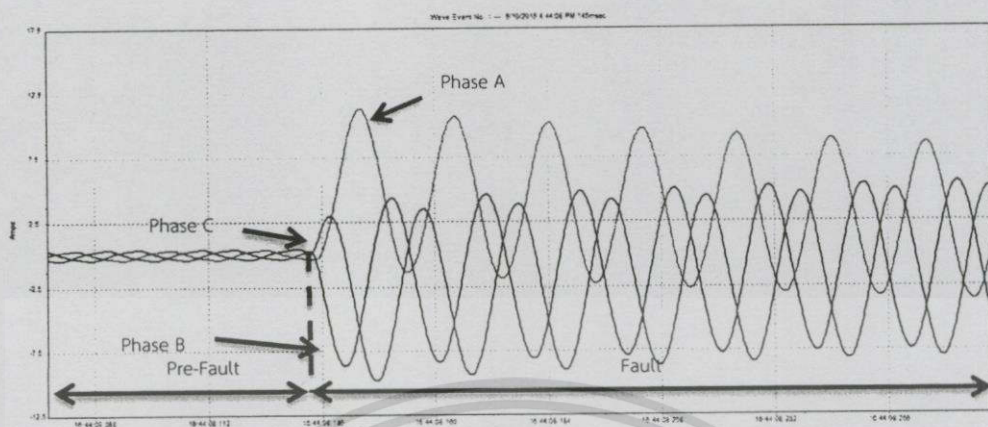
ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ทำการปรับแรงดันหน้าโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V (L-L) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.76(ก), รูปที่ 4.76(ข) และรูปที่ 4.76(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



(ค) โหลด 25W+บัลลาสต์

รูปที่ 4.76 ระยะเวลาขยายสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

จากรูปที่ 4.76(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A, เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่าค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ซึ่งมีเฟสเดียวกับกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 330° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A, เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สู่สถานะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

และทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.76(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 4.76(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.76(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V ตามที่ได้อธิบายไปในเบื้องต้น

และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมผลการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.76(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับโหลด 25W แต่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มแรงดันหน้าโหลดให้คงที่

จากรูปที่ 4.76(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.76(ก) และรูปที่ 4.76(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W เนื่องจากการปรับเพิ่มแรงดันเช่นเดียวกับทั้งสองรูปข้างต้น แลกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น มุมที่กระแสเกิดการลัดวงจรนั้นมีความแตกต่างกับมุมของแรงดัน เนื่องจากโหลดบัลลาสต์มีลักษณะตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่ากระแสนั้นล่าหลังแรงดัน แตกต่างกับสองกรณีแรกที่มีกระแสและแรงดันเฟสเดียวกัน

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.70(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.76(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A, เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 90° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

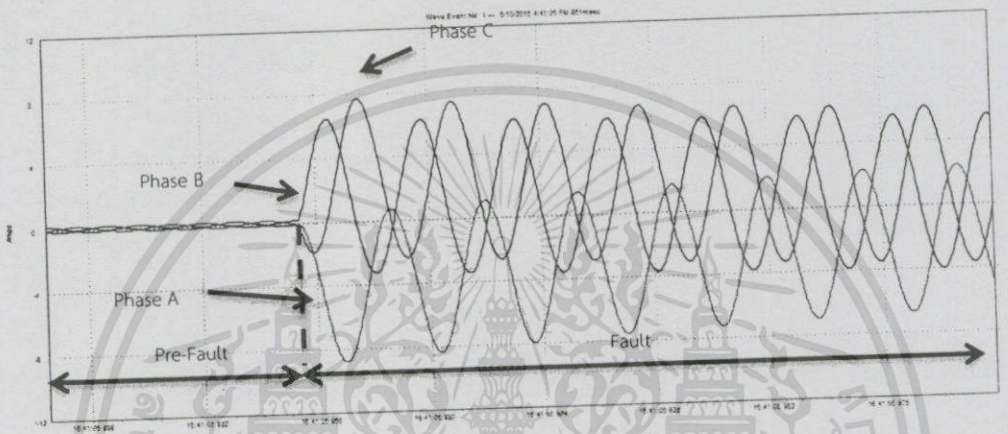
ตารางที่ 4.71 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 30.7664 mH		C : 13.0312 μ F		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 560 mH		C : 0.8 μ F		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		90°				
โหลด	I_A (A)		I_B (A)		I_C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	6.462	0.159	8.797	0.209	7.835
50W	0.301	7.24	0.302	7.55	0.336	10.24
R-L	0.432	11.265	0.45	8.694	0.469	9.834

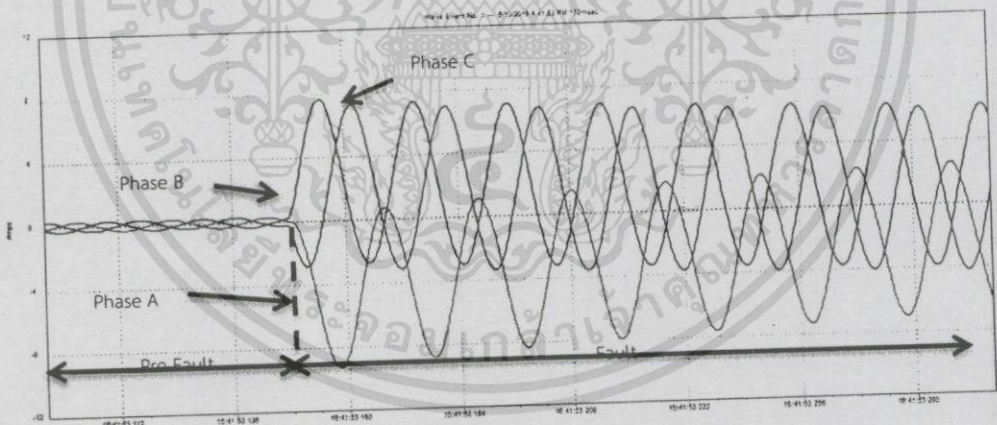
เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และพิจารณาเปรียบเทียบความรุนแรงของกระแสลัดวงจร ที่มุม 90° ตามตารางที่ 4.65 และ ตารางที่ 4.71 พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

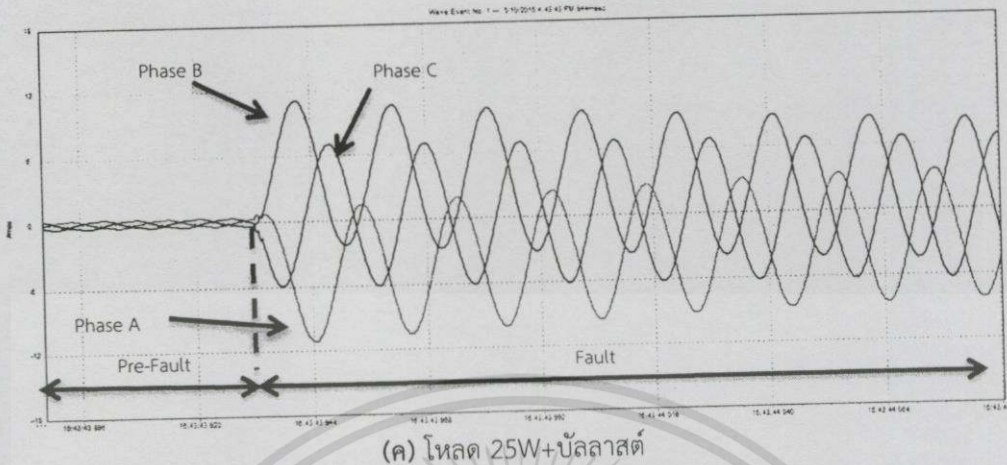
และเมื่อทำการทดสอบการลัดวงจรที่มุม 180° และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในระบบที่ค่าโหลด 25W, 50W และ 25W+บัลลาสต์ ดังรูปที่ 4.77(ก), รูปที่ 4.77(ข) และรูปที่ 4.77(ค)



(ก) โหลด 25W



(ข) โหลด 50W



รูปที่ 4.77 ระยะเวลาความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง, กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault), มุมเกิดการแสลัดวงจร 180°

จากรูปที่ 4.77(ก) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่าค่ากระแสที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อพิจารณามุมการลัดวงจรพบว่า ค่ากระแสที่เฟส A จะเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันเฟส A ขณะที่เฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 60° และเฟส C เกิดการลัดวงจรที่มุม 150° หลังจากนั้นค่ากระแสในเฟส A ,เฟส B และเฟส C จะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.77(ก) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.77(ก) พบว่าเมื่อพิจารณาที่กระแสเฟส A ค่ากระแสสูงสุดระหว่างรูปคลื่นทั้งสองมีทิศทางเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ที่มุม 90° จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงบวก เนื่องจากมุมลัดวงจรอยู่ในช่วงคลื่นสัญญาณบวก ขณะที่มุม 180° มีการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่นสัญญาณในทิศทางลบ และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของทั้งสองกรณีโดยไม่พิจารณาทิศทางของกระแส จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180° ในสภาวะชั่วคราว (Transient state) มีค่ามากกว่ามุม 90° เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และทำการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบพฤติกรรมกระแสลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ก) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.77(ก) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่า ค่ากระแสการลัดวงจรทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เฟส B และเฟส C ร่วมด้วยและพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส B และเฟส C แบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากเป็นค่ากระแสการลัดวงจรที่เกิดรวมกันระหว่างสามเฟส

จากรูปที่ 4.77(ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 50W โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.77(ก) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W เนื่องจากการคงค่าแรงดันที่ฝั่งโหลดให้มีค่าคงที่ที่ 400V

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 50W เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.74(ข) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.77(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีโหลด 25W และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 90° โหลด 50W แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ข) กับแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.75(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโหลด 25W

จากรูปที่ 4.77(ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณดังอธิบายเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ที่โหลด 25W+บัลลาสต์ โดยมีแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.77(ก) และรูปที่ 4.77(ข) แต่มีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มากกว่าที่โหลด 25W และ 50W และเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกรณีโหลด R-L นี้มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณี R-L อื่นๆ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่โหลด 25W+บัลลาสต์ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ดังรูปที่ 4.76(ค) และ ที่มุม 180° ดังรูปที่ 4.77(ค) โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงเช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากการที่มีโหลดบัลลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย

ขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของรูปแบบการลัดวงจรระหว่างการลัดวงจรที่มุม 180° โหลด 25W+บัลลาสต์ แบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.71(ค) และแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 4.77(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรที่เฟส A ,เฟส B และเฟส C พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่โหลด 25W และ 50W แตกต่างกันที่ขนาดกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับแรงดันหน้าโหลดให้คงที่ และมุมการลัดวงจรซึ่งมีการเลื่อนเฟสออกไปจาก 180° เนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำในบัลลาสต์

ตารางที่ 4.72 การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault) ระยะความยาวสายที่ 80% ของสายส่ง มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180°

การลัดวงจรสามเฟส (Three phase fault)						
ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรขนาดสาย All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm						
Base ระบบจริง		115kV		200 MVA		
Base ระบบจำลอง		400 V (L-L)		150 VA		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง		L : 30.7664mH		C : 13.0312 uF		
ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง		L : 560 mH		C : 0.8 uF		
มุมเกิดกระแสลัดวงจร		180°				
โหลด	I _A (A)		I _B (A)		I _C (A)	
	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร	ก่อนลัดวงจร	หลังลัดวงจร
25W	0.163	9.403	0.159	6.512	0.211	7.713
50W	0.301	10.274	0.302	7.687	0.336	7.282
R-L	0.432	11.154	0.45	11.127	0.469	7.053

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 180° และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 25W, 50W และโหลด R-L จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด R-L นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถเรียงลำดับค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้ดังนี้ โหลด R-L, 50W และ 25W เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปในข้างต้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.71 และตารางที่ 4.72 พบว่าเมื่อพิจารณาโหลดที่ 25W และ 50W โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง ค่ากระแสลัดวงจรเฟส A ที่มุม 180° มีค่ามากกว่า 90° ขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีโหลด R-L โดยมีค่าแรงดันเฟส A เป็นเฟสอ้างอิง เช่นเดียวกัน พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° มีค่ามากกว่า 180° เนื่องจากกรณีที่มีโหลดบัลลัสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วยดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อก่อน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่มุม 180° จากตารางที่ 4.66 และตารางที่ 4.72 ซึ่งแสดงผลการทดลองกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสตามลำดับ จะพบว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าหนึ่งเฟสลงดินเช่นเดียวกันกับกรณี 90°



ตารางที่ 4.73 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 90°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสามเฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	5.249	5.939	11.436	6.944	6.81	11.089	5.58	6.56	9.808	6.462	7.24	11.265
I _B MAX	0.183	0.313	0.427	9.182	10.012	7.839	5.44	6.29	9.655	8.797	7.55	8.694
I _C MAX	0.206	0.332	0.452	0.206	0.336	0.464	0.202	0.334	0.451	7.835	10.24	9.834

จากตารางที่ 4.73 เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 กรณี ภายใต้เงื่อนไข การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินที่ระยะทาง 80% ของสายส่ง ที่มุมลัดวงจร 90° ที่โหลด 25W , 50W และ 25W+บัลลาสต์ จะพบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละกรณี ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดความผิดปกติ (fault) ด้วย โดยระดับความรุนแรงของขนาดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) จะรุนแรงที่สุด การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault) และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) รุนแรงรองลงมาตามลำดับ

ตารางที่ 4.74 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm, มุม
กระแสลัดวงจรที่ 180°

การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 56 กิโลเมตรหรือ 80% ของความยาวสายส่ง All Aluminium Stranded Conductor 400 sq.mm												
	การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)			การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line Fault)			การลัดวงจรสาม เฟสลงดิน (Three phase to Ground fault)		
	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L	25W	50W	R-L
I _A MAX	9.109	9.533	9.698	9.266	10.26	10.989	7.023	7.820	9.774	9.403	10.274	11.154
I _B MAX	0.183	0.313	0.416	7.038	8.083	10.903	6.870	7.515	9.632	6.512	7.687	11.127
I _C MAX	0.206	0.336	0.456	0.214	0.336	0.469	0.195	0.317	0.469	7.713	7.282	7.053

จากตารางที่ 4.74 การลัดวงจรที่ความยาวสายส่ง 80%, มุมเกิดกระแสลัดวงจร 180° พบว่าค่ากระแสลัดวงร้นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการเกิด
การลัดวงจร ซึ่งเป็นรูปแบบเช่นเดียวกับตารางที่ 4.73 แต่ขนาดของกระแสและมุมลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลัดวงจรแบบหนึ่ง
เฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรแบบสองเฟส แสดงว่าขนาดกระแสที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมในการลัดวงจรตั้งที่ได้อธิบายมาตั้งแต่ข้างต้นแล้ว

หมายเหตุ : ในบางครั้งการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) อาจจะมีแรงดันสูงสุด เนื่องจากกรณีนี้โอกาสที่จะ
เกิดขึ้นมีน้อยมาก ส่วนใหญ่การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะพบบ่อยที่สุด ในโครงการนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในกรณีดัง
อธิบาย

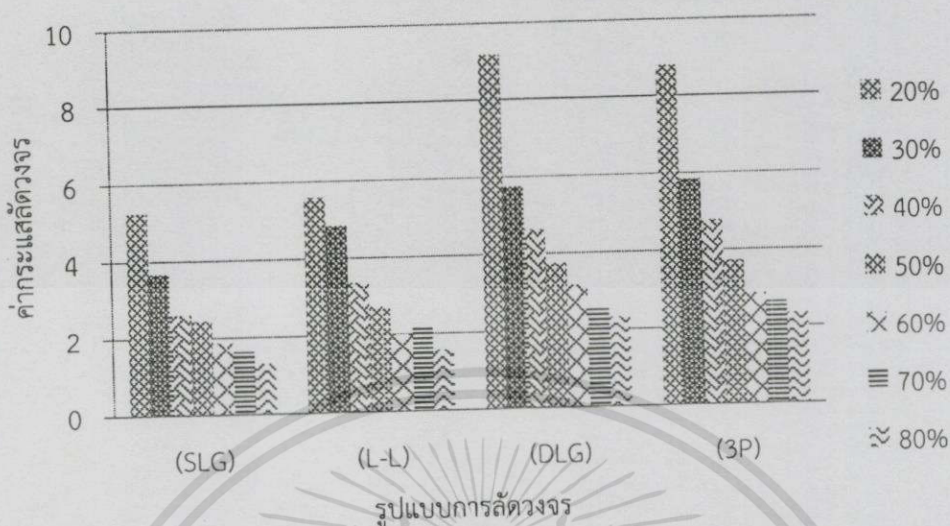
ผลการทดลองระบบใต้ดิน (Underground)

เพื่อทำการวิเคราะห์ภาพรวมของระบบ จึงได้ทำการเก็บผลการทดลองในกรณีดังต่อไปนี้

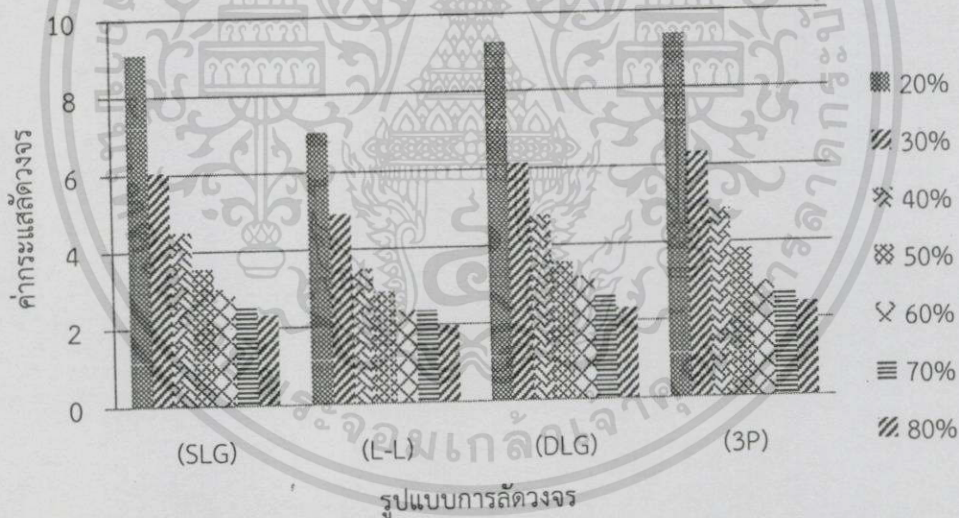
- ที่ระยะทางสายส่งตั้งแต่ 20%-80% ทั้งหมด 7 กรณีคือ ที่ 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% และ 80%
- ที่มุมลัดวงจร 90° และ 180°
- ที่รูปแบบการลัดวงจร 4 รูปแบบ คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault)
- ที่ค่าโหลด 25W, 50W และโหลด R-L ที่ค่า 25W และ บัลลาสต์

โดยพิจารณาเฉพาะค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้น และแสดงผลที่ได้ในรูปตาราง และแผนภูมิ เพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบได้ชัดเจนมากขึ้น ตารางที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	5.249	9.109	5.58	7.023	9.182	9.266	8.797	9.403
30%	3.674	6.054	4.844	4.913	5.745	6.145	5.836	6.336
40%	2.613	4.505	3.361	3.487	4.61	4.778	4.768	4.851
50%	2.453	3.544	2.731	2.884	3.742	3.563	3.722	3.812
60%	1.859	3.021	1.991	2.392	3.165	3.18	2.859	2.968
70%	1.621	2.597	2.216	2.364	2.544	2.678	2.646	2.683
80%	1.324	2.33	1.56	1.965	2.312	2.33	2.33	2.42



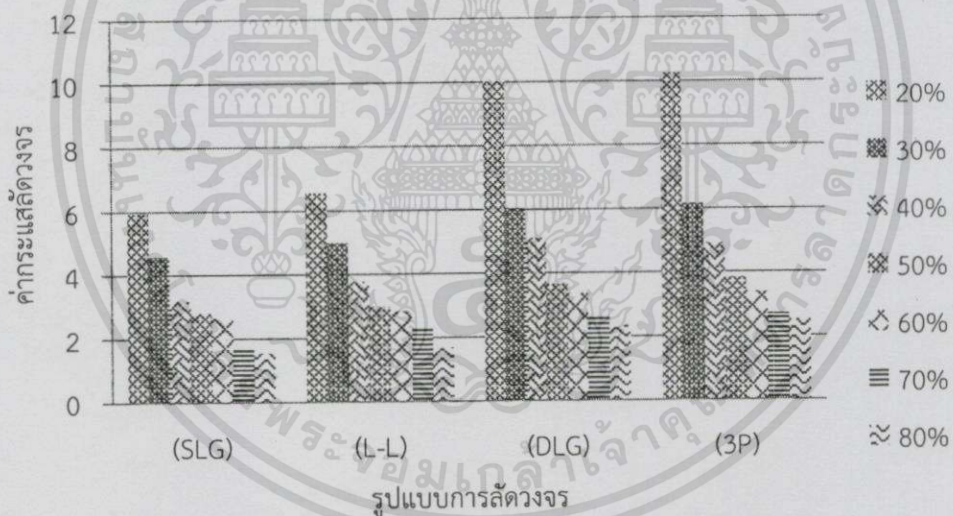
รูปที่ 4.78 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติพ่วงทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 90°



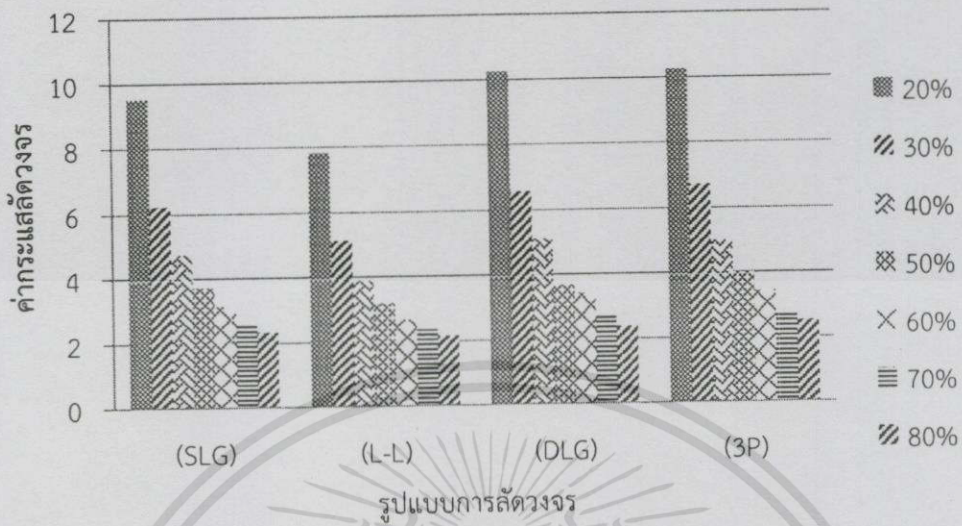
รูปที่ 4.79 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติพ่วงทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
ส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.76 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	5.939	9.533	6.56	7.82	10.012	10.26	10.24	10.274
30%	4.58	6.226	5	5.142	6.045	6.57	6.157	6.731
40%	3.178	4.738	3.773	3.883	5.101	5.105	4.905	4.996
50%	2.801	3.719	2.963	3.201	3.651	3.67	3.841	3.987
60%	2.66	3.15	2.821	2.686	3.37	3.41	3.38	3.42
70%	1.741	2.621	2.29	2.38	2.615	2.731	2.695	2.701
80%	1.54	2.35	1.67	2.171	2.35	2.39	2.51	2.52



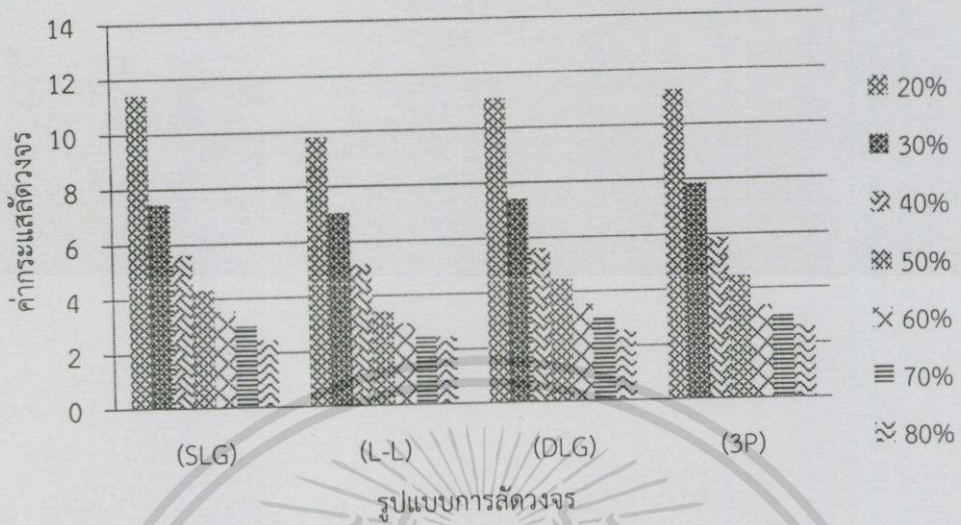
รูปที่ 4.80 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 90°



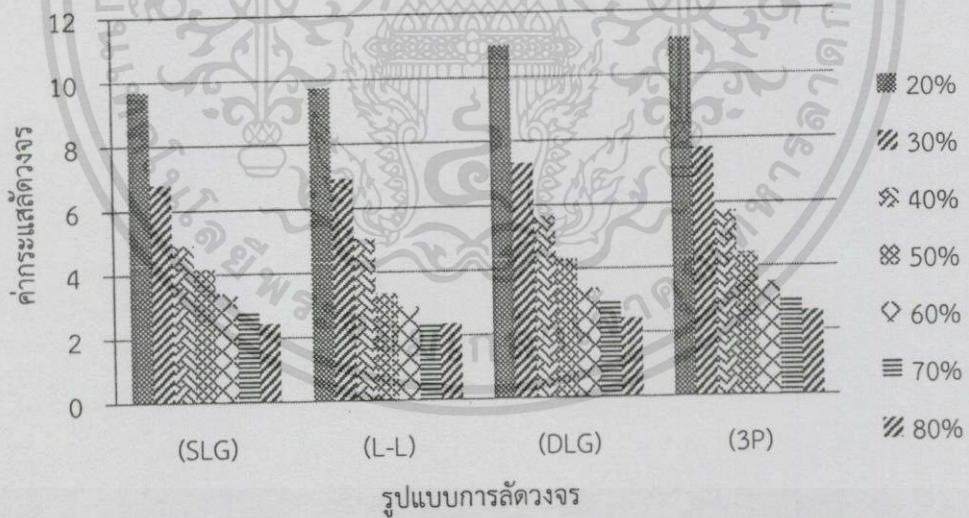
รูปที่ 4.81 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 50 วัตต์ ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.77 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดพลาดทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลัสต์ ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)		สองเฟส (L-L)		สองเฟสลงดิน (DLG)		สามเฟสลงดิน (3P)	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	11.436	9.698	9.808	9.774	11.089	10.989	11.265	11.154
30%	7.465	6.813	7.044	6.917	7.412	7.328	7.85	7.724
40%	5.619	4.909	5.189	5.048	5.615	5.65	5.862	5.753
50%	4.33	4.177	3.448	3.336	4.463	4.328	4.482	4.424
60%	3.536	3.407	2.969	2.918	3.555	3.399	3.38	3.503
70%	2.968	2.804	2.466	2.415	3.033	2.949	2.992	2.983
80%	2.477	2.453	2.463	2.369	2.57	2.445	2.625	2.605



รูปที่ 4.82 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
 สายที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มีมุม 90°



รูปที่ 4.83 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของชนิดความผิดปกติของทางไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสาย
 สายที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มีมุม 180°

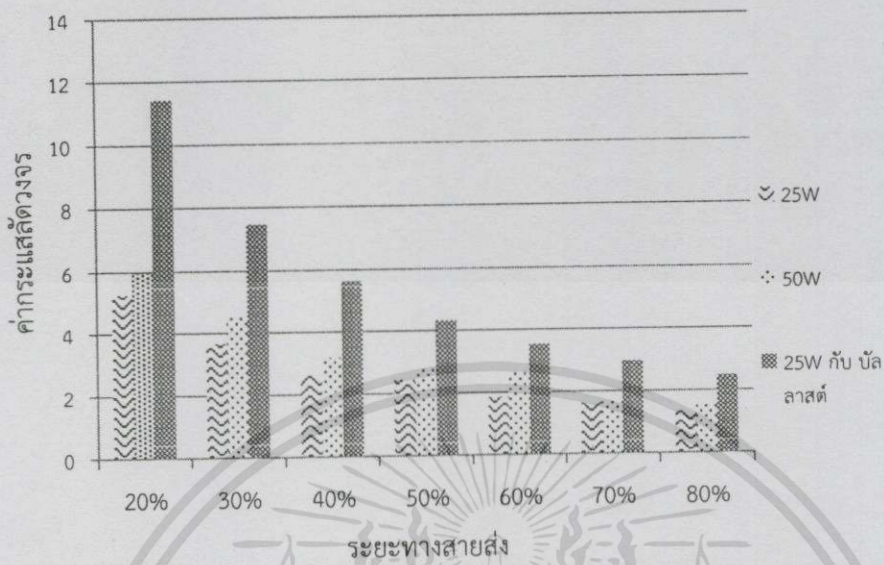
จากตารางที่ 5.75-5.77 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการลัดวงจรแบบต่างๆกับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรของโหลด 25 วัตต์ และ 50 วัตต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 180 องศา มีค่ามากกว่ามุม 90 องศา ขณะที่โหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90 องศา มีค่ามากกว่ามุม 180 องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

แผนภูมิในรูปที่ 4.78-4.83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการลัดวงจรแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง โดยมีโหลด 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ จะเห็นได้ว่าระยะทางของสายส่งมีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร เช่นเดียวกับสูตร $I = \frac{VZ_0}{Z_0}$ คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่ารุนแรงน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังเช่นผลการทดลอง

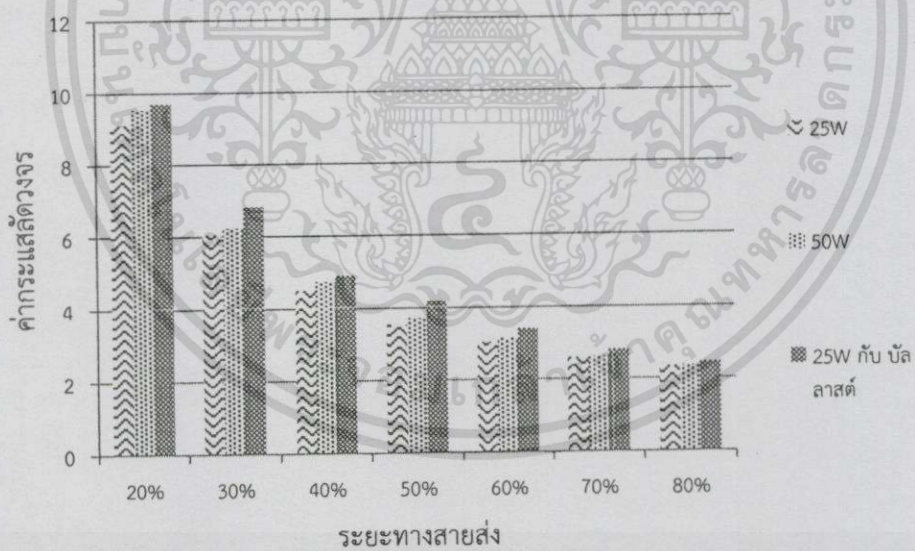
ต่อไปเป็นผลการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าที่เปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ,สองเฟส (L-L) , สองเฟสลงดิน (DLG) และ สามเฟสลงดิน (3P) ที่มุม 90° และ 180° ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	5.249	9.109	5.939	9.533	11.436	9.698
30%	3.674	6.054	4.58	6.226	7.465	6.813
40%	2.613	4.505	3.178	4.738	5.619	4.909
50%	2.453	3.544	2.801	3.719	4.33	4.177
60%	1.859	3.021	2.66	3.15	3.536	3.407
70%	1.621	2.597	1.741	2.621	2.968	2.804
80%	1.324	2.33	1.54	2.35	2.477	2.453



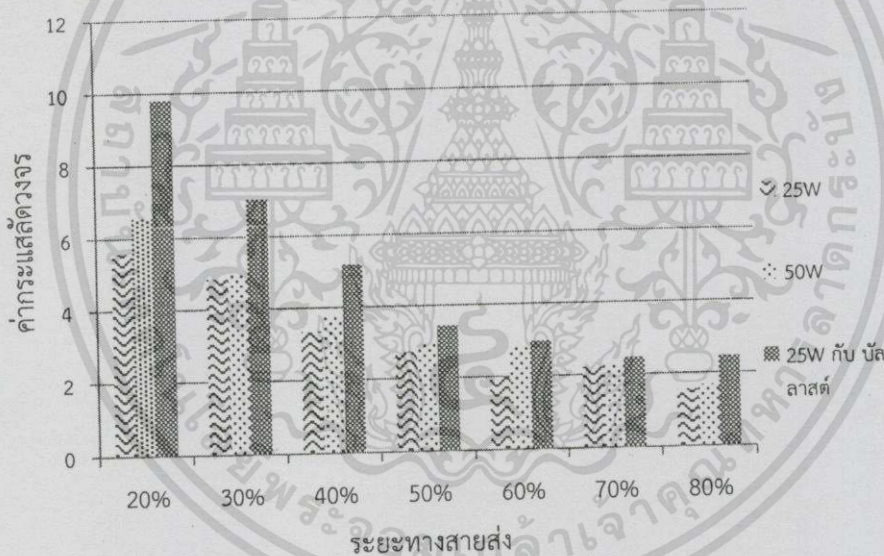
รูปที่ 4.84 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มีมุม 90°



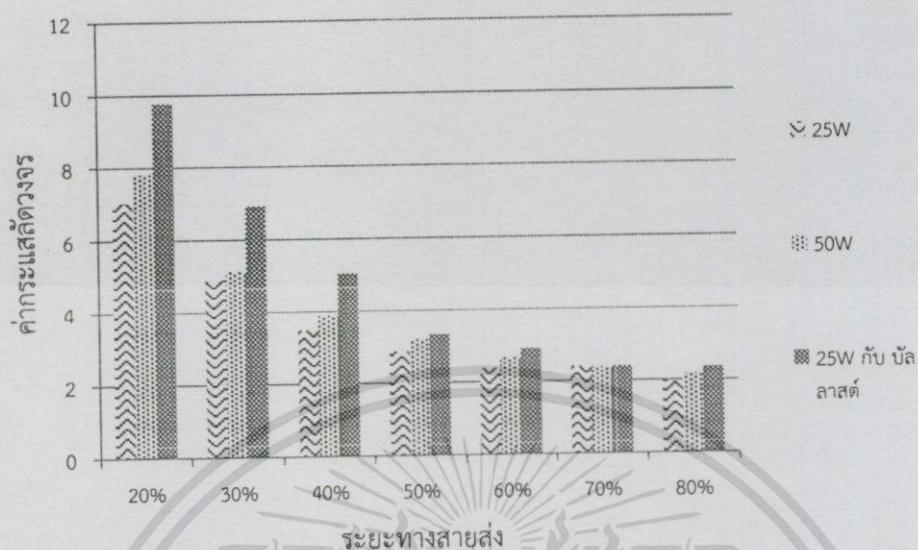
รูปที่ 4.85 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของความผิดพร่องทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่มีมุม 180°

ตารางที่ 4.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		50W กับ บัลลัสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	5.58	7.023	6.56	7.82	9.808	9.774
30%	4.844	4.913	5.00	5.142	7.044	6.917
40%	3.361	3.487	3.773	3.883	5.189	5.048
50%	2.731	2.884	2.963	3.201	3.448	3.336
60%	1.991	2.392	2.821	2.686	2.969	2.918
70%	2.216	2.415	2.29	2.38	2.466	2.415
80%	1.56	1.965	1.67	2.171	2.463	2.369



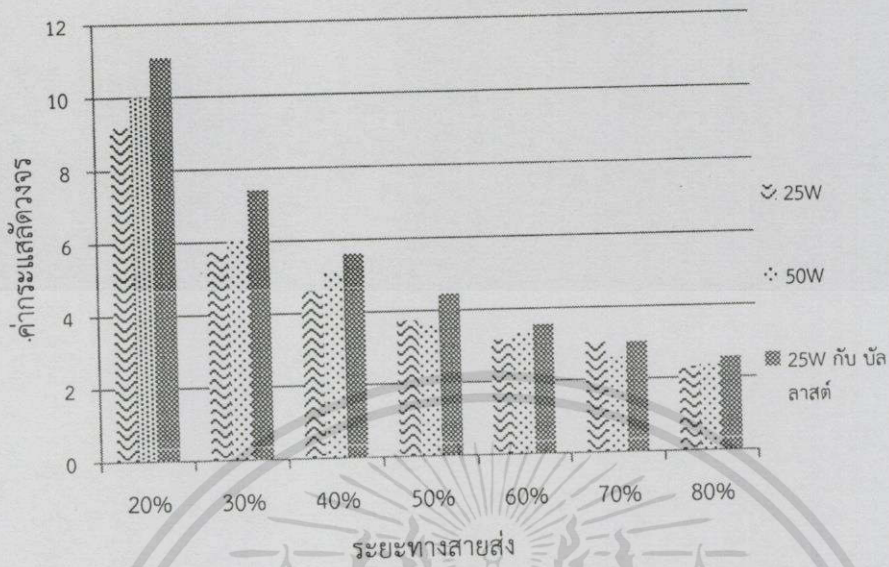
รูปที่ 4.86 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสองเฟส (L-L) ที่มุม 90°



รูปที่ 4.87 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิด สองเฟส (L-L) ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับบัสลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	9.182	9.266	10.012	10.26	11.089	10.989
30%	5.745	6.145	6.045	6.57	7.412	7.328
40%	4.61	4.778	5.101	5.105	5.615	5.65
50%	3.742	3.563	3.651	3.67	4.463	4.328
60%	3.165	3.18	3.37	3.41	3.555	3.677
70%	3.033	2.678	2.615	2.731	3.033	2.949
80%	2.312	2.33	2.35	2.39	2.57	2.445



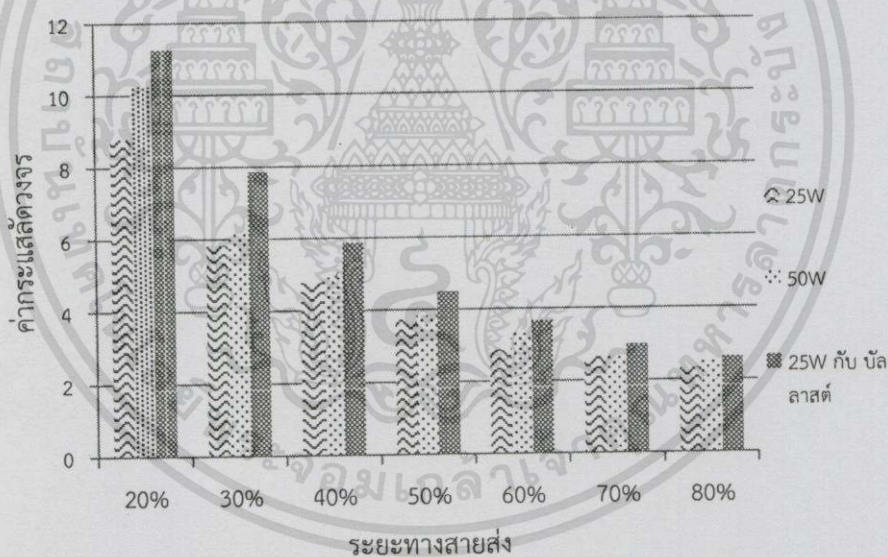
รูปที่ 4.88 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพียงทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 90°



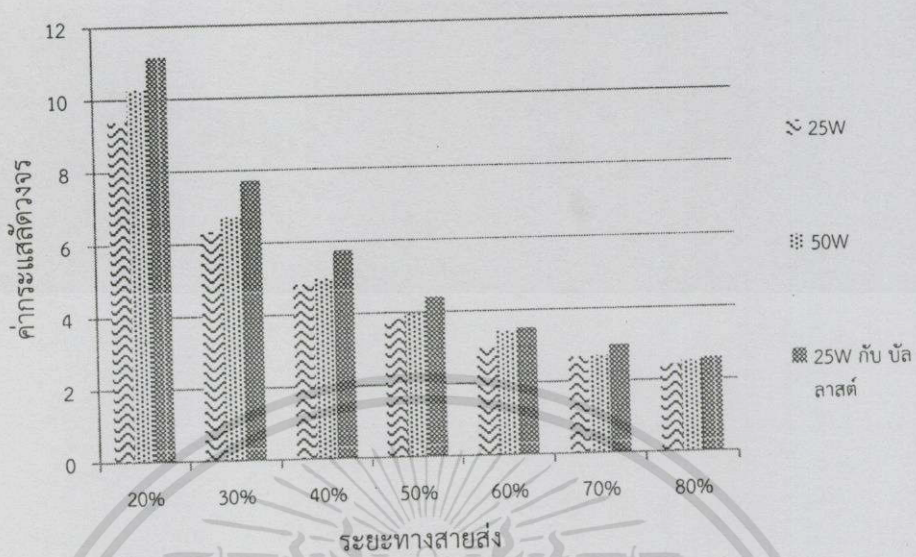
รูปที่ 4.89 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่าง ๆ ของความผิดพียงทางไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (DLG) ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิด สามเฟสลงดิน (3P) ที่มุม 90° และ 180°

ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
20%	8.797	9.403	10.24	10.274	11.265	11.154
30%	5.836	6.336	6.157	6.731	7.85	7.724
40%	4.768	4.851	4.905	4.996	5.862	5.753
50%	3.722	3.812	3.841	3.987	4.482	4.424
60%	2.859	2.968	3.38	3.42	3.668	3.503
70%	2.646	2.683	2.695	2.701	2.992	2.983
80%	2.33	2.42	2.51	2.52	2.625	2.605



รูปที่ 4.90 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหลดต่างๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 90°



รูปที่ 4.91 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดสามเฟส (3P) ที่มุม 180°

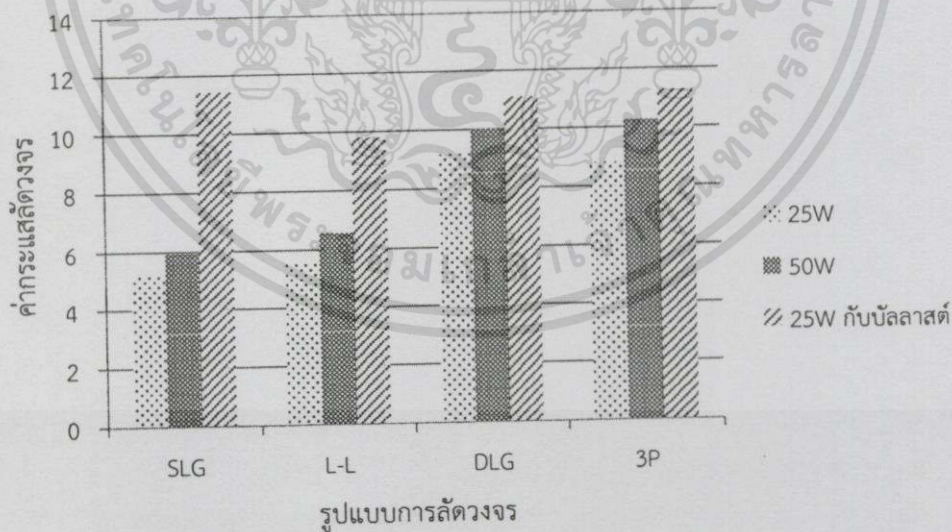
จากตารางที่ 4.78-4.81 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหนด กับโหนดต่างๆที่ 25 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลัสต์ และรูปแบบของการลัดวงจร พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส (3P) มีค่ากระแสลัดวงจรสูงที่สุด นอกจากนี้ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรแต่ละรูปแบบที่มุม 180 องศา มีค่าใกล้เคียงกับมุม 90 องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

จากแผนภูมิในรูปที่ 4.84 - 4.91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งกับโหนดต่าง ๆ ของการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) , สองเฟส (L-L), สองเฟสลงดิน (DLG) และสามเฟส (3P) แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของค่ากระแสลัดวงจรที่โหนดแต่ละค่าคือ 25 วัตต์ , 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลัสต์ ที่มุม 90° พบว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่โหนด 25W กับบัลลัสต์มีความรุนแรงมากที่สุด ตามมาด้วยโหนด 25 วัตต์ และ 50 วัตต์ เนื่องจากโหนด R-L นั้นมีบัลลัสต์ซึ่งทำให้ค่ามุมของกระแสเปลี่ยนไปจากเดิม ส่งผลให้แรงดันมีค่าเข้าใกล้แกนศูนย์มากขึ้น ทำให้เกิดส่วนประกอบของกระแสตรงกับกระแสกลับมาขึ้นด้วย ทำให้ค่ากระแสมีค่าสูงสุด ขณะที่มุม 180° แนวโน้มเช่นเดียวกัน

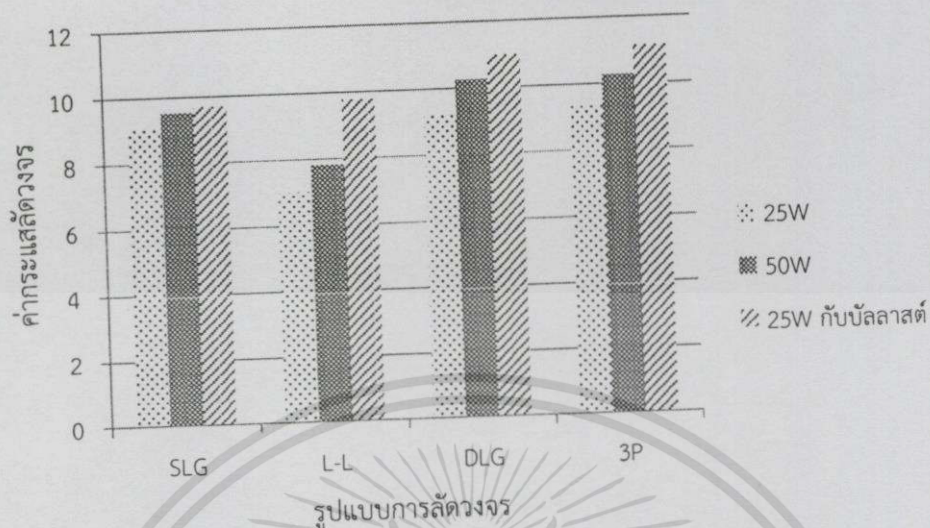
และสุดท้ายเป็นผลการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองการลัดวงจรแบบต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ,30% , 40% , 50% , 60%, 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180° ได้แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.82 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	5.249	9.109	5.939	9.533	11.436	9.698
สองเฟส (L-L)	5.58	7.023	6.56	7.82	9.808	9.774
สองเฟสลงดิน (DLG)	9.182	9.266	10.012	10.26	11.089	10.989
สามเฟสลงดิน (3P)	8.797	9.403	10.24	10.274	11.265	11.154



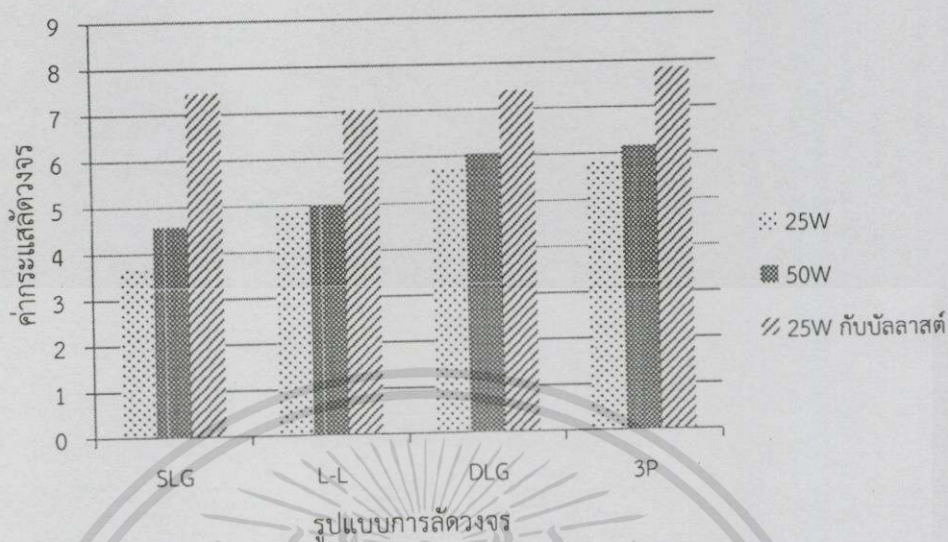
รูปที่ 4.92 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



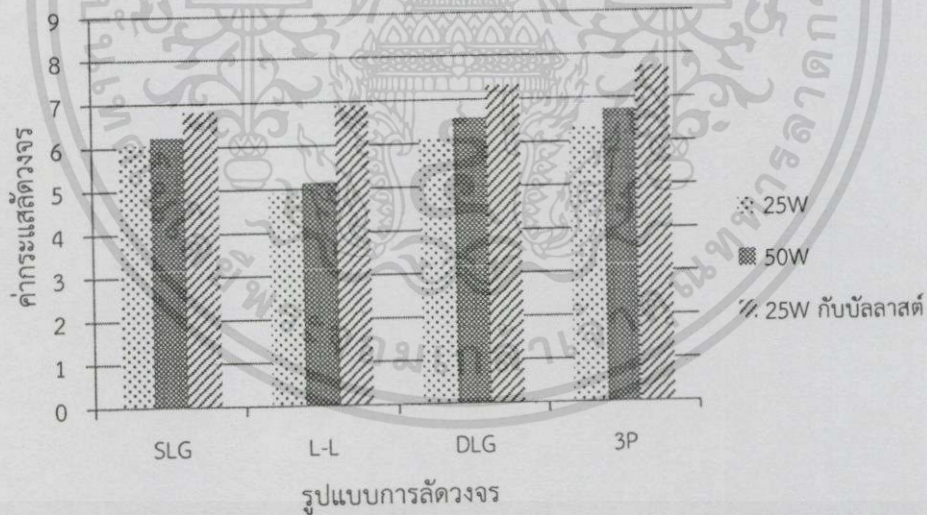
รูปที่ 4.93 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโวลตชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.83 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโวลตชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	3.674	6.054	4.58	6.226	7.465	6.813
สองเฟส (L-L)	4.844	4.913	5.00	5.142	7.044	6.917
สองเฟสลงดิน (DLG)	5.745	6.145	6.045	6.57	7.412	7.328
สามเฟสลงดิน (3P)	5.836	6.336	6.157	6.731	7.85	7.724



รูปที่ 4.94 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°

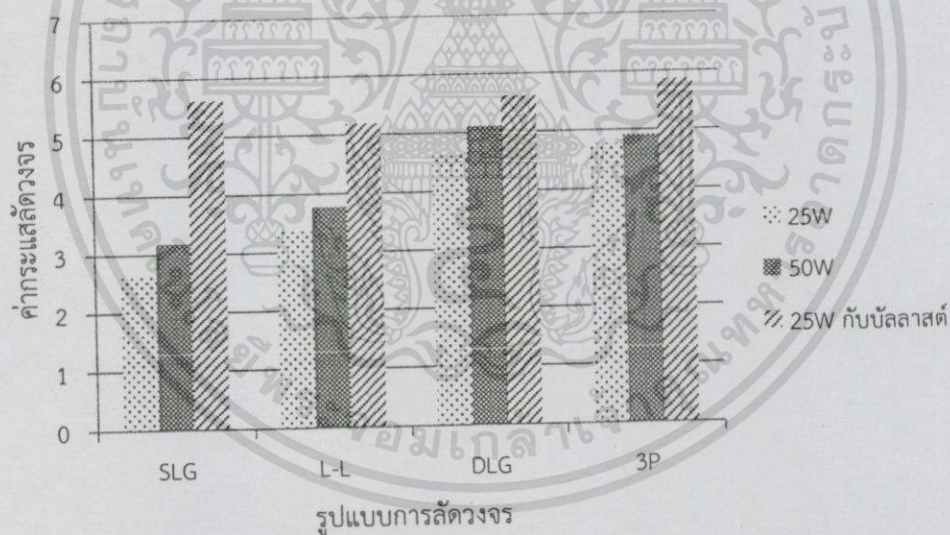


รูปที่ 4.95 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 30% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

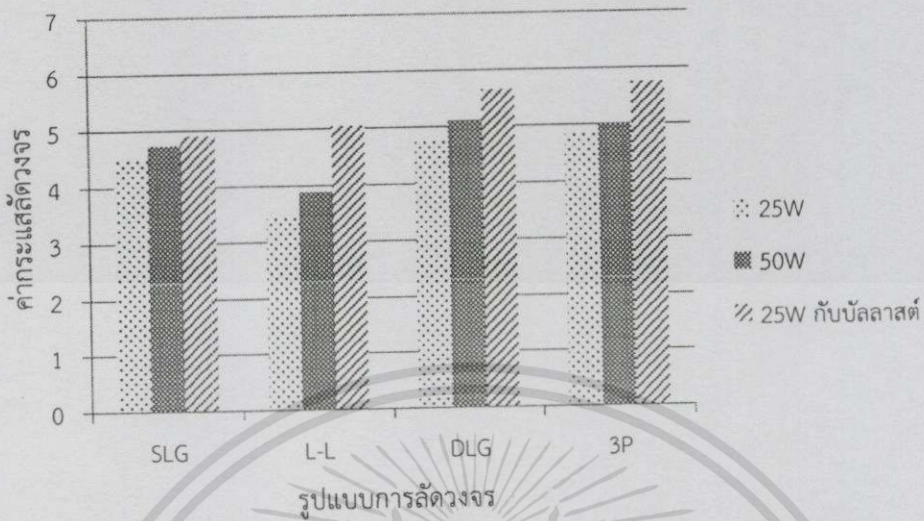
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.84 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดของไฟฟ้า	25W		50W		25W กับบัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	2.613	4.505	3.178	4.738	5.619	4.909
สองเฟส (L-L)	3.361	3.487	3.773	3.883	5.189	5.048
สองเฟสลงดิน (DLG)	4.61	4.778	5.101	5.105	5.615	5.65
สามเฟสลงดิน (3P)	4.768	4.851	4.905	4.996	5.862	5.753



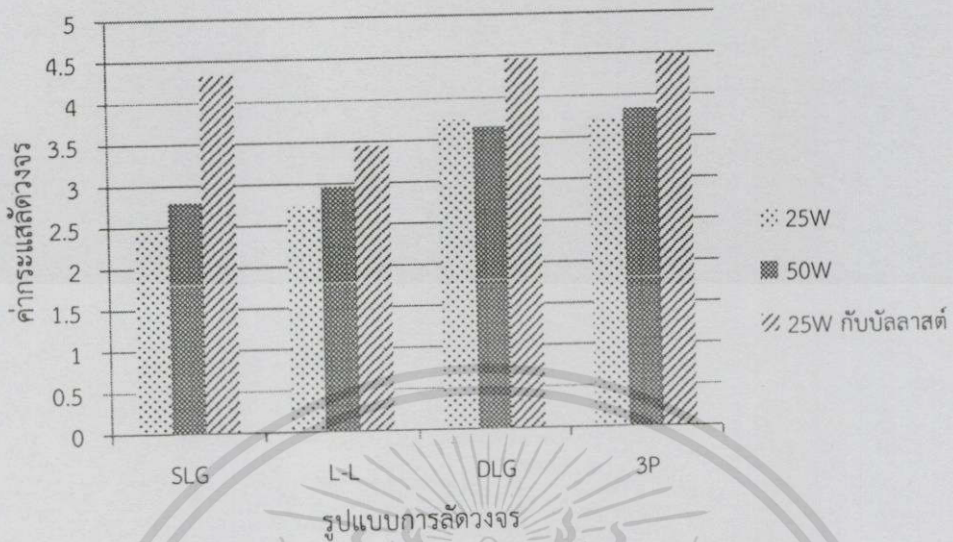
รูปที่ 4.96 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



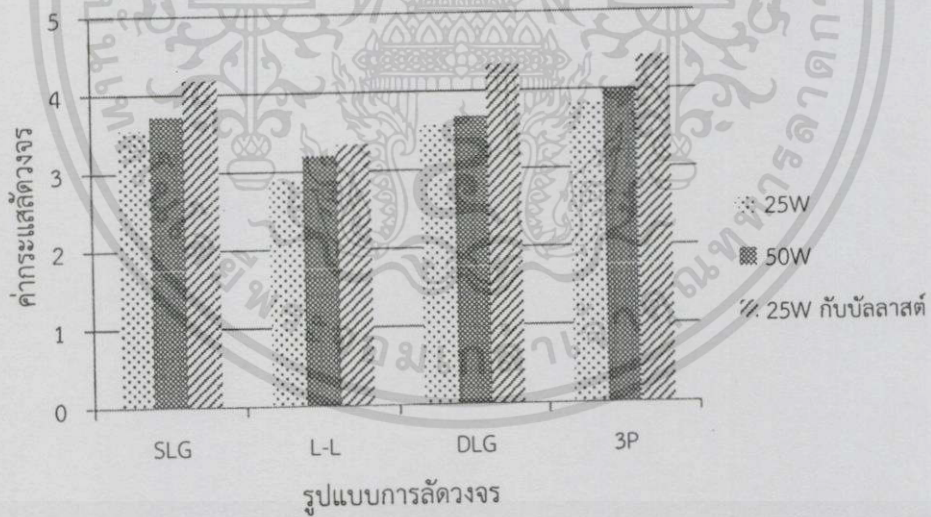
รูปที่ 4.97 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหนดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 40% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.85 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหนดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	2.453	3.544	2.801	3.719	4.33	4.177
สองเฟส (L-L)	2.731	2.884	2.963	3.201	3.448	3.336
สองเฟสลงดิน (DLG)	3.742	3.563	3.651	3.67	4.463	4.328
สามเฟสลงดิน (3P)	3.722	3.812	3.841	3.987	4.482	4.424



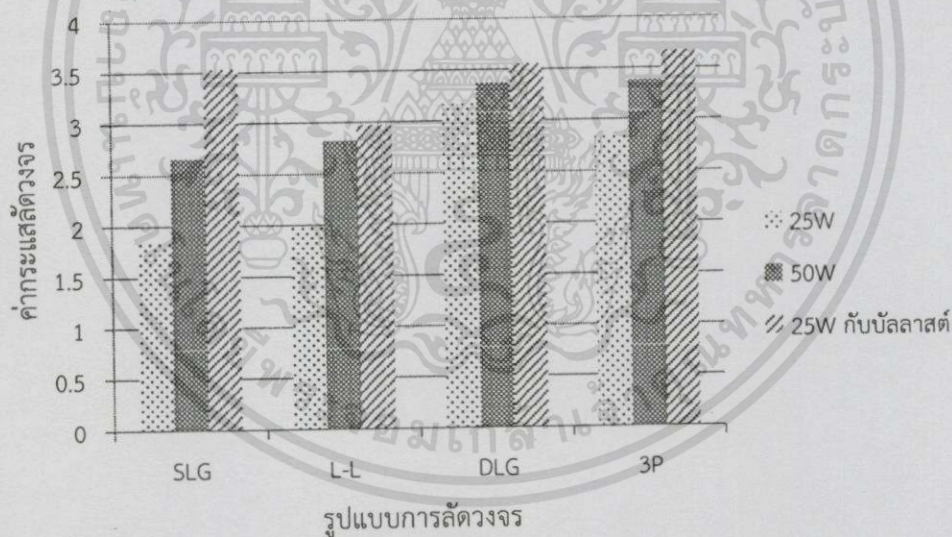
รูปที่ 4.98 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหนดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



รูปที่ 4.99 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหนดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 50% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

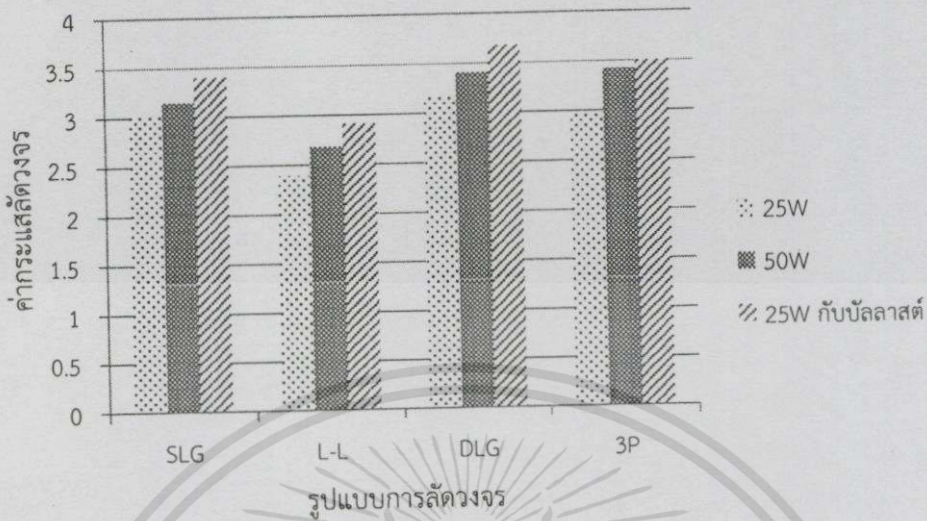
ตารางที่ 4.86 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.859	3.021	2.66	3.15	3.536	3.407
สองเฟส (L-L)	1.991	2.392	2.821	2.686	2.969	2.918
สองเฟสลงดิน (DLG)	3.165	3.18	3.37	3.41	3.555	3.677
สามเฟสลงดิน (3P)	2.859	2.968	3.38	3.42	3.668	3.503



รูปที่ 4.100 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°

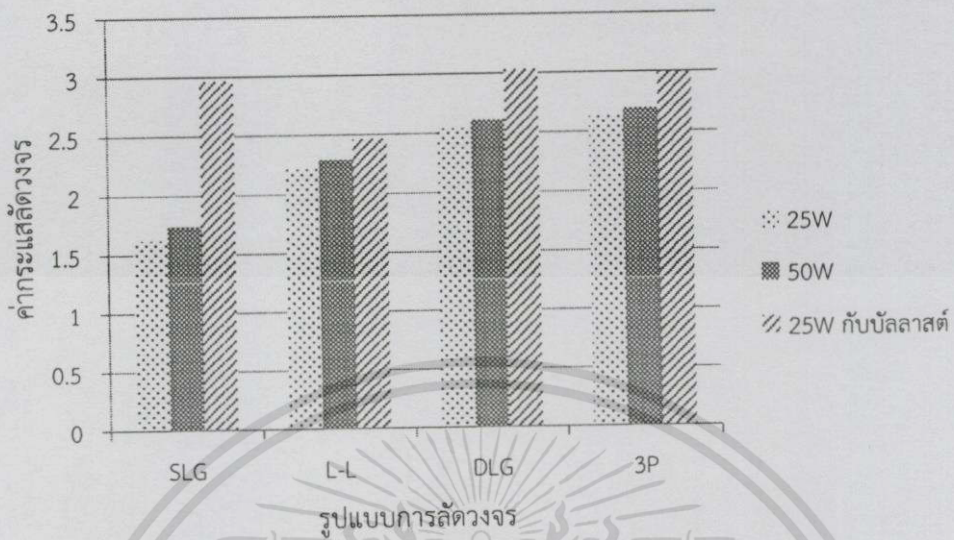
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



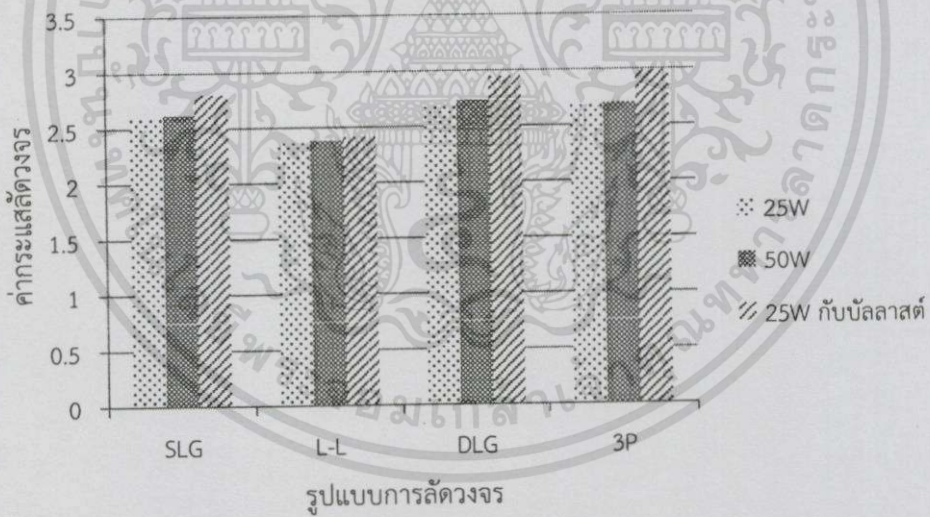
รูปที่ 4.101 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโวลตชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 60% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180°

ตารางที่ 4.87 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโวลตชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มีมุม 180° และ 90°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.621	2.597	1.741	2.621	2.968	2.804
สองเฟส (L-L)	2.216	2.364	2.29	2.38	2.466	2.415
สองเฟสลงดิน (DLG)	2.544	2.678	2.615	2.731	3.033	2.949
สามเฟสลงดิน (3P)	2.646	2.683	2.695	2.701	2.992	2.983



รูปที่ 4.102 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



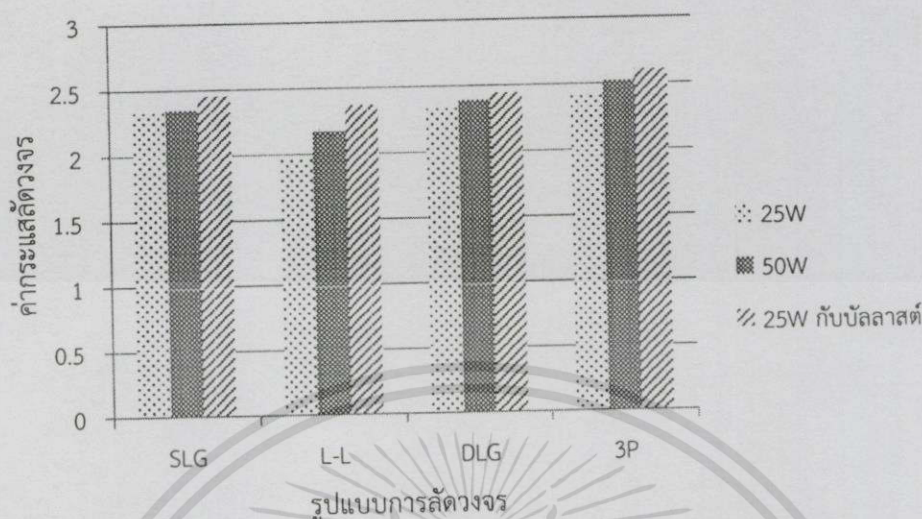
รูปที่ 4.103 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 70% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

ตารางที่ 4.88 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90° และ 180°

ชนิดของความผิดพลาดทางไฟฟ้า	25W		50W		25W กับ บัลลาสต์	
	90°	180°	90°	180°	90°	180°
หนึ่งเฟสลงดิน (SLG)	1.324	2.33	1.54	2.35	2.477	2.453
สองเฟส (L-L)	1.56	1.965	1.67	2.171	2.463	2.369
สองเฟสลงดิน (DLG)	2.312	2.33	2.35	2.39	2.57	2.445
สามเฟสลงดิน (3P)	2.33	2.42	2.51	2.52	2.625	2.605



รูปที่ 4.104 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ กับโหลดชนิดต่างๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 90°



รูปที่ 4.105 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง ที่มุม 180°

จากตารางที่ 4.82 - 4.88 แสดงความสัมพันธ์ของการลัดวงจรแบบต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% , 30% , 40% , 50% , 60% , 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรทั้ง 4 รูปแบบ เมื่อพิจารณาที่โหลด 25W และ 50W กระแสลัดวงจรที่มุม 180 องศา มีค่ามากกว่ามุม 90 องศา ขณะที่เมื่อพิจารณาที่โหลด 25W+ บัลลาสต์ พบว่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90 องศา มีค่ามากกว่ามุม 180 องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

แผนภูมิในรูปที่ 4.92 - 4.105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการลัดวงจรแต่ละชนิดต่าง ๆ กับโหลดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะ 20% , 30% , 40% , 50% , 60% , 70% และ 80% ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส เมื่อพิจารณาที่มุมการลัดวงจร 90° พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส (3P) นั้นมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด ตามมาด้วย สองเฟสลงดิน (DLG), สองเฟส (L-L) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ที่ค่าโหลด R-L, 100 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่มุมการลัดวงจร 180° พบว่าการลัดวงจรชนิดสามเฟส (3P), สองเฟสลงดิน (DLG) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) นั้นจะมีความใกล้เคียงกัน

ซึ่งเมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นแล้วพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของการลัดวงจรเช่นค่ากระแสลัดวงจรนั้นมีดังนี้ ปัจจัยแรกคือระยะของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร หากเกิดการลัดวงจรที่ระยะใกล้กับแหล่งจ่ายมากเท่าไรค่ากระแสการลัดวงจรนั้นจะมีค่าสูง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรมีค่าน้อย ปัจจัยที่สองคือค่ามุมที่เกิดการลัดวงจร หากมุมที่แรงดันเกิดการลัดวงจรมีค่าเข้าใกล้แกน

ศูนย์มากเท่าไร ค่ากระแสลัดวงจรยิ่งมีค่าสูงเนื่องจากมีส่วนประกอบกระแสตรงมาก ปัจจัยที่สามคือรูปแบบการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการลัดวงจรที่มีค่าสูงที่สุดคือการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน รองลงมาคือ สองเฟสลงดิน (DLG) , สองเฟส (L-L) และหนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ตามลำดับ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบแนวโน้มทั้งกรณีระบบจำหน่ายเหนือดินและใต้ดิน พบว่าทั้งสองกรณีมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการลัดวงจรในการส่งจ่ายไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution Line) ผ่านระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่สถานีบางเสาธง-บางเมืองใหม่ ซึ่งประกอบด้วยระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดิน (Overhead) และใต้ดิน (Underground) ที่ระดับแรงดัน 115 kV ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าของประเทศไทย เนื่องจากการลัดวงจรดังกล่าว ทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบมีค่าสูงขึ้นมาก ซึ่งกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนั้นสร้างผลกระทบต่างๆ ให้กับระบบไฟฟ้า ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและคุณภาพของไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ และนำไปประเมินความเสียหายเพื่อจัดทำและติดตั้งระบบป้องกัน ทำให้ระบบไฟฟ้าในอนาคตมีเสถียรภาพและความเชื่อมั่นที่ดีขึ้น

เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวมาในข้างต้น โครงการนี้จึงได้จัดทำชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายขึ้นเพื่อทำการศึกษผลกระทบของการลัดวงจรในรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงจนถึงการศึกษาปัจจัยต่างๆในระบบ โดยทำการทดลองผ่านชุดทดลองและวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ จากกรณีดังต่อไปนี้

- 1) การปรับเปลี่ยนค่ามุมเกิดการลัดวงจรในการทดลองที่มุม 90° และมุม 180°

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของผลการทดลองการลัดวงจรแบบต่างๆ ที่ระยะความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่งของโหลด 25 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90° และ 180° ของรูปคลื่นกระแส จะพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรของรูปแบบการลัดวงจรของโหลด 25 วัตต์ และ 50 วัตต์ ที่มุม 180° องศา มีค่ามากกว่ามุม 90° องศา ขณะที่โหลด 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ นั้น ค่ากระแสลัดวงจรที่มุม 90° องศา มีค่ามากกว่ามุม 180° องศา แสดงให้เห็นว่าผลของมุมมีผลกระทบต่อค่ากระแสการลัดวงจร

- 2) การปรับเปลี่ยนค่าโหลด ที่ค่าโหลด 25W, 50W และโหลด R-L ที่ค่า 25W และ บัลลาสต์

เมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองขณะทำการปรับเปลี่ยนโหลดแต่ละค่าคือ 25 วัตต์, 50 วัตต์ และ 25 วัตต์ กับ บัลลาสต์ ที่มุม 90° และมุม 180° พบว่า ค่าโหลดนั้นไม่มีผลต่อกระแสลัดวงจร หากไม่เพิ่มค่าแรงดันให้คงที่ที่ 400 V เมื่อทำการปรับเพิ่มโหลด

- 3) การปรับเปลี่ยนระยะทางของสายส่งที่ระยะทาง 20%-80%

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนระยะทางของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง จะเห็นได้ว่าระยะทางของสายส่งมีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร เช่นเดียวกับสูตร $I = \frac{V \angle \theta}{Z \angle \theta}$ คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่ารุนแรงน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่เพิ่มขึ้น

- 4) การปรับเปลี่ยนรูปแบบการลัดวงจร 4 รูปแบบ คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault), การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to line Fault) และ การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase to Ground Fault)

จากผลการทดลอง พบว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส (3P) นั้นมีค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุด ตามมาด้วย สองเฟสลงดิน (DLG), สองเฟส (L-L) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่มุมการลัดวงจร 180° พบว่าการลัดวงจรชนิดสามเฟส (3P), สองเฟสลงดิน (DLG) และ หนึ่งเฟสลงดิน (SLG) นั้นจะมีความใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีมุมลัดวงจรที่ 90°

5) การปรับเปลี่ยนระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน

จากผลการทดลอง พบว่าทั้งสองระบบมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบ การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 กรณีข้างต้น แต่ระบบใต้ดินจะมีแนวโน้มค่าแรงดันและกระแสสูงกว่า

ข้อเสนอแนะ

1. โหลดที่ได้นำมาใช้ในชุดทดลองมีค่าน้อย เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้ในวงจรมีค่าความต้านทานซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันตกเมื่อมีการจ่ายโหลดขนาดใหญ่ หรือการจ่ายโหลดซึ่งมีโครงสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่งผลให้ไม่สามารถคงแรงดันฝั่งโหลดที่ 400 V ได้ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจแก้ปัญหาได้โดยการนำหม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดันมาต่อทางหลังจากหม้อแปลงปรับค่าได้เพื่อให้สามารถคงที่ค่าแรงดันได้
2. ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจำลองมีค่าที่ไม่ตรงกับค่าจริง จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น
3. ข้อมูลลักษณะรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม ATPDraw และ ข้อมูลที่ได้จากชุดทดลองนั้นพบว่า ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient State) มีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากชุดทดลองในช่วงสภาวะชั่วคราวจะถูกยกขึ้นไป เนื่องมาจากผลของค่าตัวต้านทานภายในตัวอุปกรณ์เช่น ตัวเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ขึ้นในระบบ ซึ่งในการจำลองผลด้วยโปรแกรม ATPDraw นั้นไม่ได้พิจารณาในส่วนของตัวต้านทานในวงจรนี้เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ
4. การทำงานที่คลาดเคลื่อนของ Zero crossing ที่ไม่สามารถทำการตัดมุมกระแสลัดวงจรที่เที่ยงตรงได้ตลอด เนื่องจากค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในวงจรสัญญาณสวิตซ์ของ zero crossing

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Borghetti, M. Bosetti, C. A. Nucci, M. Paolone, and A. Abur, Fellow, "Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCTOBER 2010 , Page(s): 3139 – 3146.
- [2] Peyman Jafarian, and Majid Sanaye-Pasand, "A Traveling-Wave-Based Protection Technique Using Wavelet/PCA Analysis", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 2, APRIL 2010, Page(s): 588 – 599.
- [3] Tarlochan S. Sidhu, and Zhihan Xu, "Detection of Incipient Faults in Distribution Underground Cables", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 3, JULY 2010, Page(s): 1363 – 1371.
- [4] Joe-Air Jiang, Cheng-Long Chuang, Yung-Chung Wang, Chih-Hung Hung, Jiing-Yi Wang, Chien-Hsing Lee, and Ying-Tung Hsiao, "A Hybrid Framework for Fault Detection, Classification, and Location—Part I: Concept, Structure, and Methodology" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 3, JULY 2011, Page(s): 1988 – 1998.
- [5] Nuwan Perera, and Athula D. Rajapakse, "Series-Compensated Double-Circuit Transmission Line Protection Using Directions of Current Transients", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 28, NO. 3, JULY 2013, Page(s): 1566 – 1575.
- [6] Wen-Hui Chen, "Fault Section Estimation Using Fuzzy Matrix-Based Reasoning Methods", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011, Page(s): 205 – 213.
- [7] Yixin Cai, and Mo-Yuen Chow , "Cause-Effect Modeling and Spatial-Temporal Simulation of Power Distribution Fault Events", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, NO. 2, MAY 2011, Page(s): 794 – 801.

- [8] Solak, Waldemar Rebizant, and Andrzej (Andrew) Klimek Krzysztof, "Fuzzy Adaptive Transmission-Line Differential Relay Immune to CT Saturation", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 27, NO. 2, APRIL 2012, Page(s): 766 – 772.
- [9] N. Perera, and A. D. Rajapakse, "Recognition of Fault Transients Using a Probabilistic Neural-Network Classifier", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011, Page(s): 410 – 419.
- [10] H. O. Henriques, M. L. P. Peçanha, M. Z. Fortes, C. J. R. D'Avila, L. S. B. S. Leite and A. F. de Mello Neto, "Development of Transient Fault Management Methodology", *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 12, NO. 4, JUNE 2014, Page(s): 618 – 625.
- [11] Meisam Pourahmadi-Nakhli, and Ali Akbar Safavi, "Path Characteristic Frequency-Based Fault Locating in Radial Distribution Systems Using Wavelets and Neural Networks", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 2, APRIL 2011, Page(s): 772 – 781.
- [12] M. Jaya Bharata Reddy, D. Venkata Rajesh, Pathirikkat Gopakumar, and Dasmanta Kumar Mohanta "Smart Fault Location for Smart Grid Operation Using RTUs and Computational Intelligence Techniques", *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, VOL. 8, NO. 4, DECEMBER 2014, Page(s): 1260 – 1271.
- [13] Carlos Frederico M. Almeida and Nelson Kagan, "Using Genetic Algorithms and Fuzzy Programming to Monitor Voltage Sags and Swells", *Intelligent Systems, IEEE*, April 2011, Volume:26, Page(s): 46 – 53.
- [14] Jiangtao Li, Zhijie Zhao, Bin Shu, Xiaopeng Han, Xueliang Ma, Bin Bian, Jianhao Li, and Zheng Liang, "Fault Analysis for 110 kV HTS Power Cables", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 24, NO. 5, OCTOBER 2014, Article#: 5400405
- [15] Zhiqin He, Zhe Zhang, Wei Chen, O.P. Malik, Xianggen Yin, "Wide-Area Backup Protection Algorithm Based on Fault Component Voltage Distribution," *IEEE trans. Power Delivery.*, Vol.26, No.4, 2011, pp. 2752-2760.

- [16] PSS/E, (2012). "Transmission System Analysis and Planning," [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/transmission-grid/products/grid-analysis-tools/transmission-system-planning/pages/transmission-system-planning.aspx>. สืบค้น 1 สิงหาคม 2557.
- [17] Chia-An Chang, Yuan-Kang Wu, Wei-Tai Chen, and Bin-Kwie Chen, "A Novel Power System Defense Plan to Cope With 30% Wind Power Penetration in the Isolated Penghu System", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 49, NO. 4, pp. 1669-1667, JULY/AUGUST 2013.
- [18] Jingzhe Tu, Huanhai Xin, Zhen Wang, Deqiang Gan, and Zhilong Huang, "On Self-Organized Criticality of the East China AC-DC Power System—the Role of DC Transmission", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 3, Page(s): 3204 – 3214, AUGUST 2013.
- [19] Amir Mehrtash, Peng Wang, Member, and Lalit Goel, "Reliability Evaluation of Power Systems Considering Restructuring and Renewable Generators", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 1, Page(s): 243 – 250, FEBRUARY 2012 243.
- [20] lab-volt, (2012). "Faultable Transmission Line," [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.labvolt.com/solutions/63/_electricity_and_new_energy/50-3792-10_faultable_transmission_line. สืบค้น 2 สิงหาคม 2557.
- [21] lab-volt, (2012). "0.2-KW Electric Power Transmission Training System," [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://learning.labvolt.com/downloads/datasheet/dsa8055.pdf>. สืบค้น 2 สิงหาคม 2557.
- [22] ทรงพล ปัทมธรรม, ทักษพงษ์ วัลย์เครือ, ธัชสนัย สถาพรมงคลเลิศ และ ชีรพงศ์ สงครามยศ "ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า," ปรินญาณินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

- [23] กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, [ม.ป.ป.]. “ความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/swf_ind49/49_thai.swf. สืบค้น 8 สิงหาคม 2557.
- [24] คลังตัวอย่างเพื่อเสริมสร้างความเข้าใจการเรียนรู้ด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง, [ม.ป.ป.]. “บทที่ 2 วิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://ir.rmuti.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/237/chapter2.pdf?sequence=3>. สืบค้น 8 สิงหาคม 2557.
- [25] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye, **Power System Analysis & Design**, 5th Ed., Connecticut, Cengage Learning, 2012.
- [26] ศ.ดร.อิศรไชย งามหรุ, “ลักษณะการเกิดการลัดวงจร,” เอกสารประกอบการสอนวิชา Power System Analysis, กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล, **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**, ซีเอ็ด, 2553.
- [28] อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล, **ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล. กรุงเทพฯ
- [29] **ดุยพรรณ นวลหงษ์**, การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตก. สืบค้นจาก :http://www.aida-engineering.co.th/download/egat/egat_cal.pdf. สืบค้น 10 พฤษภาคม 2558
- [30] Steven McFadyen, (2013). “Fault Calculation - Symmetrical Components,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:<http://myelectrical.com/notes/entryid/213/fault-calculation-symmetrical-components>. สืบค้น 10 กันยายน 2557.
- [31] Hadi Saadat, **Power System Analysis Second Edition**, Singapore : Mc Graw Hill. 2004. pp 36-188.
- [32] A. Oyetunji Samson, “Real-Time Evaluation of System Dynamics to Improve Network Performance in Akure Electric Power Distribution System in Nigeria,” **Electrical and Electronic Engineering**, Vol.3, No.6, 2013, pp. 156-166.
- [33] Bare Conductor Bangkok Cable.CO,LTD, (2014). “ข้อมูลสายไฟฟ้าเหนือนดิน AAC,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.bangkokcable.com/product/backoffice/file_upload/140529_AAC_AL_Bare.pdf. สืบค้น 15 กันยายน 2557.

- [34] ABB.CO,LTD, (2014). “XLPE Land Cable Systems User's Guide,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/a8a42f36692365dcc1257a62003101ce/\\$file/XLPE+Land+Cable+Systems+-+User%C2%B4s+Guide.pdf](http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/a8a42f36692365dcc1257a62003101ce/$file/XLPE+Land+Cable+Systems+-+User%C2%B4s+Guide.pdf). สืบค้น 17 กันยายน 2557.
- [35] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, (2014). “คำแนะนำแบบมาตรฐานการก่อสร้างสายส่ง115kV ของกฟน.,” [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://bdm.mastergardz.com/JL/images/pdf/04.pdf>. สืบค้น 20 กันยายน 2557.
- [36] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, (2550). “ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground System กฟน.,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://bdm.mastergardz.com/JL/images/pdf/02.pdf>. สืบค้น 20 กันยายน 2557.
- [37] Fluke Corporation, [ม.ป.ป.]. “Fluke 435 Series II Power Quality and Energy Analyzer,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.fluke.com/fluke/then/power-quality-tools/logging-power-meters/fluke-435-series-ii.htm?PID=73939>. สืบค้น 2 ตุลาคม 2557.
- [38] Saelzer Electric GmbH, [ม.ป.ป.]. “Switch Catalogue,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://saelzer.com/html/pdf/en/kataloge/Catalogue_Rotary_Cam_Switches.pdf. สืบค้น 11 ตุลาคม 2557.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า Fault in electrical power distribution line practice set

พัทธพล สมโชค พิเชษฐ์ แก้วคำศรี พิมพ์ชนก สันติชัยรัตน์ และ พิลาดลักษ์ ยินดีทรัพย์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ดลоргกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 E-Mail: piladelak.y@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทำการศึกษาเรื่องการลัดวงจรในระบบจำหน่าย ทั้งในส่วนเหนือดินและใต้ดิน โดยทำการศึกษาผ่านชุดทดลองซึ่งได้จำลองระบบจำหน่ายจริงที่ 115 กิโลโวลต์ ซึ่งใช้หลักการเปอร์ยูนิตและนอร์มอลไลซ์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงมาสู่ระดับแรงดันที่ห้องปฏิบัติการที่ 400 โวลต์ และทำการเปรียบเทียบรูปสัญญาณที่ได้ร่วมกับโปรแกรม ATPDraw เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปคลื่นสัญญาณ จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรที่เกิดขึ้น เมื่อทำโดยปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เช่น มุมที่เกิดการลัดวงจร, ตำแหน่งการลัดวงจร, ชนิดการลัดวงจร และค่าโหลด ผลที่ได้จากชุดทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และนำไปใช้พัฒนาระบบป้องกันการลัดวงจรที่แรงดันสูงของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป

คำสำคัญ: ชุดทดลอง, การลัดวงจร, การทดลอง, ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

Abstract

This paper proposed the experimental setup in order to studying about the characteristics of fault in distribution line, both of overhead and underground system, which is caused of irregularity for stability. For studying by experimental set up, this transfers parameter from 115 kW, 400 V at laboratory voltage level. Then compare waveform from experiment with the ATP/EMTP for checking correct. The experimental setup will be useful in the development of short-circuit protection system in laboratory.

Keywords: Experimental, Fault, Transmission line, ATP/EMTP

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายเป็นระบบที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นระบบที่ทำการส่งกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งได้รับการแปลงระดับแรงดันลงมาจากที่แรงดันจำหน่ายเพื่อส่งจ่ายไปยังผู้ใช้ไฟ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าคิดค้น เช่น การลัดวงจร ที่เกิดขึ้นภายในระบบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อถึงคงตัวภาพและความเชื่อมั่นของระบบ แต่การศึกษาลัดวงจรในระบบจริงนั้นเป็นไปได้ยากและอันตรายเนื่องจากระดับแรงดันนั้นมีขนาดสูง ทำให้การศึกษาระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นจะทำการศึกษาใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการเบรกความของฉนวนเมื่อเกิดการลัดวงจร [1], การ

ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและคงตัวสภาพชั่วคราวเมื่อถูกรบกวน [2] หรือเป็นการจำลองระบบร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำวิธีคำนวณชุดคำสั่งวนซ้ำ[3], การนำอัลกอริทึม ACUSUM [4] มาใช้ตรวจจับการลัดวงจร ซึ่งการจำลองทั้งสองรูปแบบนั้นไม่สามารถให้ผลที่ครอบคลุมพฤติกรรมการลัดวงจรทั้งหมดได้ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณรบกวนหรือความไม่สมดุลของค่าแรงดันหรือกระแสที่เกิดขึ้นในระบบจริง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแบบผ่านชุดทดลองที่บริษัทต่างๆทำการผลิตขึ้นมาเพื่อจำหน่าย เช่น ชุดทดลองการลัดวงจรของการส่งกำลังไฟฟ้าระบบส่งจ่าย [5] และ ชุดทดลองที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของระบบจำหน่าย [6] จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าชุดทดลองนั้นมีลักษณะเฉพาะเรื่องและมีราคาที่สูงเกินไป ไม่เหมาะกับสถานศึกษา ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดลัดวงจร

ปัญหานี้จึงได้จัดทำชุดทดลองการลัดวงจรการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริงในระบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และชุดทดลองที่มีอยู่ ไม่สามารถแสดงออกมาได้ทั้งหมด เช่น สัญญาณรบกวน, ความผิดเพี้ยนของค่ากระแสจากความไม่สมดุลของแหล่งจ่าย และทำการศึกษารูปผลกระทบบนของเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบจำหน่าย คือ มุมที่เกิดการลัดวงจร, ระยะทางสายส่งที่เกิดการลัดวงจร, ค่าโหลดที่เชื่อมต่อกับระบบ และชนิดการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ว่ามีผลกระทบต่อพฤติกรรมและค่ากระแสการลัดวงจรอย่างไร

โดยการออกแบบชุดทดลองนี้ได้ทำการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ผ่านรูปแบบของวงจรมุมลบแบบ π และแปลงเปอร์ยูนิตเพื่อทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ลงมาสู่แรงดัน 400 โวลต์ ที่ห้องปฏิบัติการ และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ร่วมกับโปรแกรม ATPDraw เพื่อตรวจสอบและอ้างอิงแนวโน้มที่เกิดขึ้นของชุดทดลอง

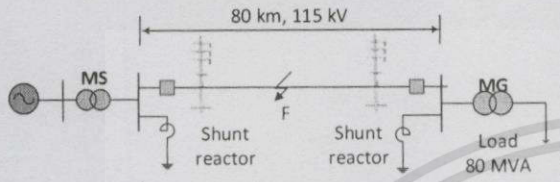
2. การออกแบบชุดทดลอง

การออกแบบชุดทดลองนี้ใช้รูปแบบจากสถานีส่งจ่ายไฟฟ้าบางเสาธง-เมืองใหม่ (รูปที่ 1) ที่ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์, 150 เมกะโวลต์-แอมแปร์ โดยทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านรูปแบบวงจร π (รูปที่ 2) และทำการแปลงเปอร์ยูนิตค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ไปสู่ระดับแรงดันที่ห้องปฏิบัติการที่ 400 โวลต์

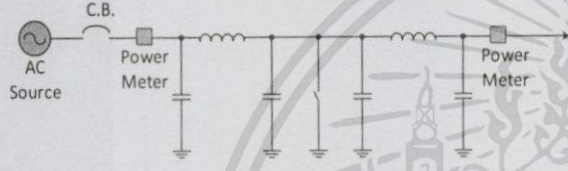
ในชุดทดลองจะใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ทำหน้าที่เป็นสถานีส่งจ่ายไฟฟ้า โดยต่อผ่านชุดอุปกรณ์ป้องกันคือ ฟิวส์ และเซอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ตัดต่อวงจร เปรียบเสมือนอุปกรณ์ป้องกันในระบบจริง จากนั้นจะทำการเชื่อมเข้ากับรูปแบบวงจร π ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (ต่ออนุกรม) และตัวเก็บประจุ (ต่อขนาน) ซึ่งทำหน้าที่แทนสายส่งที่ใช้ในระบบจริง โดยที่ค่าต่างๆในวงจร π สามารถเลือกค่าระบบที่ระยะต่างๆ ได้โดยซีเล็กเตอร์สวิตช์ จากนั้นจะส่งต่อไปยังส่วนสุดท้ายคือส่วนของโหลด ที่มีการนำค่าโหลดที่ 25 วัตต์/เฟส และ 50 วัตต์/เฟส เข้ามาใช้เพื่อพิจารณาผลกระทบและพฤติกรรมของกระแสลัดวงจรในชุดทดลอง



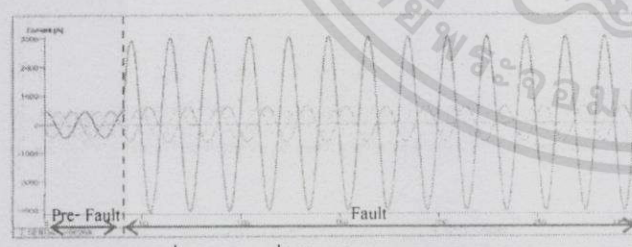
รูปที่ 1 สถานีไฟฟ้าบางเสาธง-บางเมืองใหม่



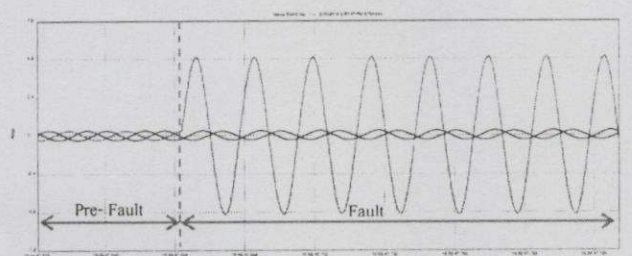
รูปที่ 2 วงจรสมมูลแบบ π

3. ผลการจำลองระบบ

จากชุดทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาโดยในผลการจำลองระบบนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ดังแสดงในรูปที่ 3(a) และ (b) ซึ่งเป็นการเกิดการลัดวงจรที่ระยะทาง 60% ของสายส่งโดยวัดจากทางแหล่งจ่าย ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม ATPDraw มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ตามรูปที่ 3(a) และ 3(b) ตามลำดับ ซึ่งในรูปที่ 3 เป็นการเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน



(a) รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP



(b) รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากชุดทดลอง

รูปที่ 3 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

นอกจากนี้ ชนิดการลัดวงจรในชุดทดลองเป็นการศึกษาพฤติกรรมของกระแสขณะเกิดการลัดวงจร ดังกรณีต่อไปนี้

- ค่ามุมที่เกิดการลัดวงจร ที่มุม 90° และ 180°
- ชนิดของการลัดวงจร แบบหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสลงดิน
- ตำแหน่งเกิดการลัดวงจรที่ระยะทาง 20% และ 60% ของสายส่ง
- ขนาดของโหลด ที่ 25 วัตต์ และ 50 วัตต์
- ระบบจำหน่ายเหนื่อดินและได้ดิน

และแสดงผลการทดลองที่ได้ในแต่ละกรณี

3.1 เปรียบเทียบผลของมุมการลัดวงจร

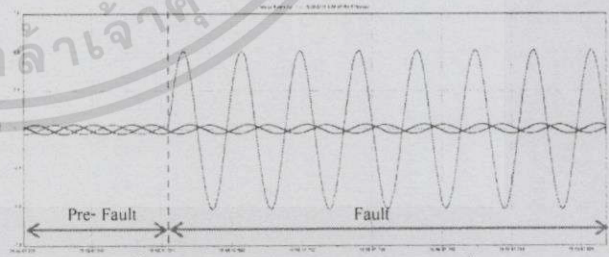
เมื่อทำการเปลี่ยนมุมเกิดการลัดวงจร ขณะเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% วัดจากฝั่งส่ง ที่ค่าโหลด 50 วัตต์/เฟส จะพบว่า ก่อนเกิดการลัดวงจรค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.294 แอมแปร์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ค่ากระแสที่เฟส A จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการลัดวงจรที่มุม 90° และรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการลัดวงจรที่มุม 180° ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ได้จากรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่ากระแสที่มุม 180° นั้นมีส่วนประกอบของกระแสตรงรวมอยู่ด้วย ขณะที่มุม 90° มีเพียงส่วนประกอบของกระแสสลับเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma) + I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma) \quad (1)$$

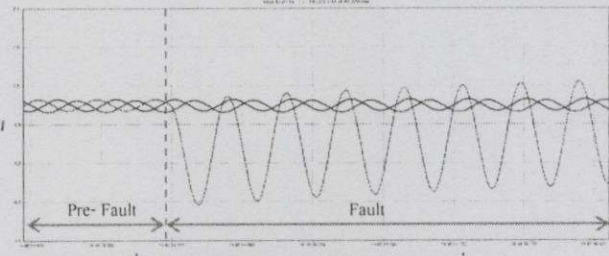
$$i_{ac}(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma)$$

$$\text{และ } i_{dc}(t) = I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma)$$

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ $\alpha - \gamma = 0$ คือกรณีที่ทำให้ส่วนประกอบของกระแสตรงเป็น 0 ซึ่งมุมดังกล่าวคือมุม 90° ขณะที่มุมลัดวงจร 180° ทำให้ส่วนประกอบสมการกระแสตรงมีค่าตามเวลา ส่งผลให้เกิดคลื่นแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับสูงสุด



รูปที่ 4 ผลจากชุดทดลอง กรณีมุมลัดวงจรที่ 90°



รูปที่ 5 ผลจากชุดทดลอง กรณีมุมลัดวงจรที่ 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนได้เห็นว่าเว็บไซต์นี้เกี่ยวข้องกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1: ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อเปลี่ยนมุมการลัดวงจร

มุมที่เกิดการลัดวงจร (°)	ค่ากระแสสูงสุด	
	ก่อนเกิดการลัดวงจร ที่เฟส A (แอมแปร์)	หลังเกิดการลัดวงจรที่ เฟส A (แอมแปร์)
90	0.294	2.254
180	0.298	2.598

3.2 เปรียบเทียบผลของชนิดการลัดวงจร

เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดการลัดวงจร ขณะเกิดการลัดวงจรที่ระยะทาง 60% วัดจากฝั่งส่ง ที่ค่าโหลด 50 วัตต์/เฟส จะพบว่า ก่อนเกิดการลัดวงจรค่ากระแสลัดวงจรแต่ละเฟส มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.294 แอมแปร์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น พิจารณาค่ากระแสที่เฟส A ของการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินที่เฟส A ดังรูปที่ 4 และการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน ดังรูปที่ 6 พบว่าเมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่เฟส A ของทั้งสองกรณีดังตารางที่ 2 ค่ากระแสลัดวงจรกรณีสามเฟสลงดินมีค่ามากกว่าการลัดวงจรกรณีหนึ่งเฟสลงดิน เนื่องจากระบบที่ทดสอบเป็นการต่อลงดิน ทำให้ Z_{th} มีค่าน้อย เมื่อพิจารณาาร่วมกับกระแสลัดวงจรคิงสมการที่ (2) และ (3)

$$I_a = \frac{3V_c}{2Z_{th1} + Z_{th0}} \quad (2)$$

$$I_a = \frac{V_c}{Z_{th1}} \quad (3)$$

โดยที่ $Z_{th0} < Z_{th1}$ ดังนั้นกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินจึงมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งเฟสลงดิน

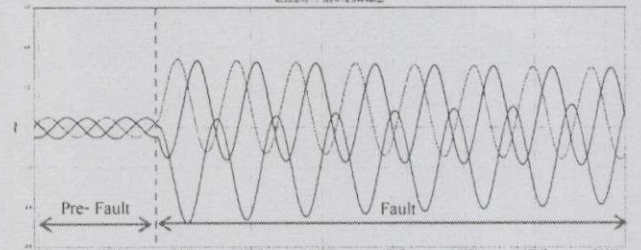
ตารางที่ 2: ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อเปลี่ยนชนิดการลัดวงจร

ชนิดการลัดวงจร	ค่ากระแสสูงสุด	
	ก่อนเกิดการลัดวงจร ที่เฟส A (แอมแปร์)	หลังเกิดการลัดวงจรที่ เฟส A (แอมแปร์)
หนึ่งเฟสลงดิน	0.294	2.254
สามเฟส	0.294	2.533

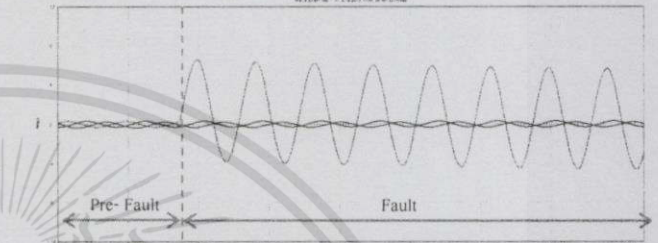
3.3 เปรียบเทียบผลของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ขณะเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% วัดจากฝั่งส่ง ที่ค่าโหลด 50 วัตต์/เฟส จะพบว่า ก่อนเกิดการลัดวงจรค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.294 แอมแปร์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นค่ากระแสแบบเฟสเดียวลงดินที่เฟส A จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันทั้งที่ระยะทาง 20% และ 60% ของสายส่ง ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงการลัดวงจรที่ระยะทาง 20% และรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการลัดวงจรที่ 60% โดยพิจารณาจากค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A ของทั้งสองกรณีตามตารางที่ 3 จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ 20% ของระยะสายส่งจะมีค่ามากกว่าที่ระยะทาง 60% เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งที่ระยะ 20% มีค่าน้อยกว่าที่ 60%

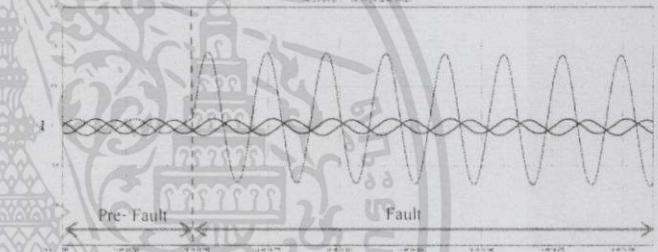
ทำให้ค่ากระแสที่ได้ที่ 20% ของระยะสายส่ง มีค่ามากกว่าที่ระยะ 60% ด้วย



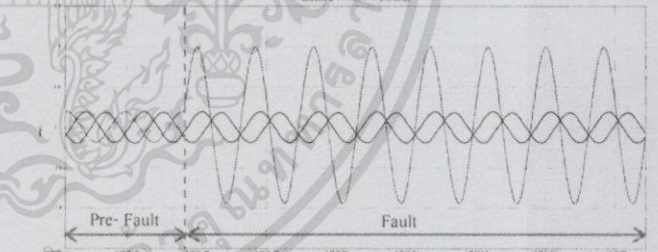
รูปที่ 6 ผลจากชุดทดลอง กรณีสามเฟสลงดิน กรณีมุมลัดวงจรที่ 90°



รูปที่ 7 ผลจากชุดทดลองการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน ระยะทาง 20%



รูปที่ 8 ผลจากชุดทดลอง กรณีโหลด 25w



รูปที่ 9 ผลจากชุดทดลอง กรณีส่งจ่ายแบบได้ดิน

ตารางที่ 3: ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทางสายส่ง

ระยะทางสายส่ง (%)	ค่ากระแสสูงสุด	
	ก่อนเกิดการลัดวงจร ที่เฟส A (แอมแปร์)	หลังเกิดการลัดวงจรที่ เฟส A (แอมแปร์)
20	0.294	4.902
60	0.294	2.254

3.4 เปรียบเทียบผลของค่าโหลดที่ต่อเข้ากับระบบ

เมื่อทำการเปลี่ยนค่าโหลดที่ต่อเข้ากับระบบ ขณะเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทาง 60% วัดจากฝั่งส่ง ที่ค่าโหลด 25 วัตต์/เฟส จะพบว่า ก่อนเกิดการลัดวงจรค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A มีค่า

โดยประมาณเท่ากับ 0.145 แอมแปร์ และที่โหลด 50 วัตต์/เฟส มีค่ากระแสก่อนเกิดลัดวงจรที่ 0.294 แอมแปร์ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ค่ากระแสแบบเฟสเดียวลงดินที่เฟส A จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกันทั้งที่โหลด 25 วัตต์/เฟส ดังรูปที่ 8 และ 50 วัตต์/เฟส ตามรูปที่ 4 หลังจากนั้นจึงเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยมีค่ากระแสลัดวงจรที่เฟส A ของทั้งสองกรณีดังตารางที่ 4 จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่โหลด 50 วัตต์/เฟส มีค่ามากกว่าที่โหลด 25 วัตต์/เฟส เนื่องจากขณะค่าโหลดเปลี่ยน จำเป็นต้องมีการปรับค่าแรงดันที่ส่งโหลดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ค่าโหลดที่เกิดการลัดวงจรจึงไม่มีผลกับค่ากระแสลัดวงจร

ตารางที่ 4: ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโหลด

โหลด (วัตต์)	ค่ากระแสสูงสุด	ค่ากระแสสูงสุด
	ก่อนเกิดการลัดวงจร ที่เฟส A (แอมแปร์)	หลังเกิดการลัดวงจรที่ เฟส A (แอมแปร์)
25	0.145	1.499
50	0.294	2.254

3.5 เปรียบเทียบระบบเหนื่อดินและได้ดิน

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ทั้งในระบบเหนื่อดินและได้ดิน พบว่ามีแนวโน้มแบบเดียวกันดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงรูปคลื่นกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่ระบบเหนื่อดิน และรูปที่ 9 ซึ่งแสดงรูปคลื่นกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่ระบบได้ดิน โดยพิจารณาจากรูปคลื่นกระแสที่เฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีขนาดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจึงลดลงเข้าสู่สภาวะคงตัว เนื่องจากวงจรสมมูลของระบบเหนื่อดินและได้ดินนั้นเป็นวงจร π เช่นเดียวกัน แตกต่างกันเพียงค่าพารามิเตอร์ คือ ตัวเหนื่อหน้าและตัวเก็บประจุเท่านั้น

4. สรุป

บทความนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลัดวงจรของการส่งจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยทำการศึกษาค้นคว้าทดลองซึ่งจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยที่สถานีไฟฟ้าบางเสาธง-เมืองใหม่ โดยการแปลงระบบด้วยวิธีเปอร์ยูนิตจากระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ลงมาสู่ระดับแรงดันที่ห้องปฏิบัติการที่ 400 โวลต์

ซึ่งเมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรที่เกิดขึ้นแล้วพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการลัดวงจร เช่น ค่ากระแสลัดวงจรนั้น มีดังนี้

- ปัจจัยแรก คือ ระยะของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร หากเกิดการลัดวงจรที่ระยะใกล้กับแหล่งจ่ายมากเท่าไรค่ากระแสการลัดวงรนั้นมีค่าสูง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรมีค่าน้อย

- ปัจจัยที่สอง คือ ค่ามุมที่เกิดการลัดวงจร หากมุมที่แรงดันเกิดการลัดวงรมีค่าเข้าใกล้แกนศูนย์มากเท่าไร ค่ากระแสการลัดวงรซึ่งมีค่าสูงเนื่องจากมีส่วนประกอบกระแสตรงมาก
- ปัจจัยที่สาม คือ ชนิดการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการลัดวงรแบบสามเฟสมีค่ากระแสการลัดวงรสูงกว่าการลัดวงรแบบหนึ่งเฟสลงดิน
- ขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่าโหลดไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงรนั้นขึ้นอยู่กับค่าการปรับแรงดันที่หน้าโวลต์ให้มีขนาดคงที่ 400 โวลต์ การปรับขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ปัจจัยดังกล่าวจึงถูกนำไปพิจารณาเพื่อวางระบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อทำการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiangtao Li, and the authors, "Fault Analysis for 110 kV HTS Power Cables", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 24, NO. 5, OCTOBER 2014 5400405
- [2] Matthias K. Bucher, and the authors, "Analytic Approximation of Fault Current Contributions from Capacitive Components in HVDC Cable Networks", IEEE TRANSACTIONS ON Power Delivery, VOL. 30, NO. 1, Page(s): 74 – 81, FEBRUARY 2015
- [3] André Luis Dalcastagné, Sidnei Noceti Filho, Hans Helmut Zürn, Senior Member, IEEE, and Rui Seara, "An Iterative Two-Terminal Fault-Location Method Based on Unsynchronized Phasors", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 4, OCTOBER 2008.
- [4] M. R. Noori and S. Mohammad Shahrtash, "Combined Fault Detector and Faulted Phase Selector for Transmission Lines Based on Adaptive Cumulative Sum Method," IEEE trans. Power Delivery., Vol.28, No.3, 2013, pp. 1779-1787.
- [5] lab-volt, (2012). "Faultable Transmission Line" [ออนไลน์]: https://www.labvolt.com/solutions/50-3792-10_faultable_transmission_line สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558.
- [6] lab-volt. "AC Power Transmission Training System" [ออนไลน์] https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/59-8010-B0_ac_power_transmission_training_system สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

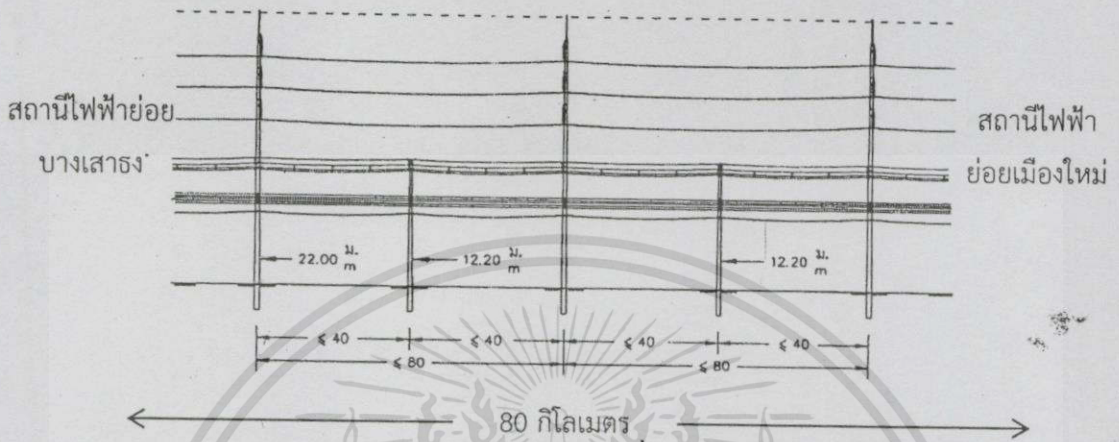


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข วิธีกรคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งระบบจำหน่าย

ข.1 ระบบจำหน่ายเหนือดิน

แผนผังที่ 1 โครงสร้างสายส่งทางตรง วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว และวงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่
 PLAN NO. TANGENT STRUCTURE FOR SINGLE CIRCUIT SINGLE CONDUCTOR AND SINGLE CIRCUIT DOUBLE CONDUCTOR



รูปที่ ข-1 สายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดินของการไฟฟ้า 115 kv ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงถึง สถานีไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่

การหาค่าความต้านทาน (R) [21]

ในการหาค่าความต้านทานสามารถหาได้จากคู่มือผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าชนิด All Aluminium Stranded Conductor ขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร ของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งสายไฟฟ้าชนิดดังกล่าวเป็นสายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเหนือดินที่แรงดัน 115 kv โดยใช้กับเสาส่งชนิดวงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว (SS) ซึ่งมีค่าความต้านทานที่ 50 Hz เท่ากับ 0.0742 Ω /km ดังนั้นค่าความต้านทานของสายทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$R = 0.0742 \times 80 \Omega$$

$$R = 5.936 \Omega$$



ALUMINIUM CONDUCTOR

AAC

ALL ALUMINIUM STRANDED CONDUCTOR



Construction
 1. Conductor : Stranded hard-drawn aluminium wires

Reference Standard :
 IEC 60853
 (Reference to IEC 60228)

Application
 For overhead transmission and distribution lines

Cross-section area (Nominal)	Cross-section area (Actual)	Number of wires	Diameter of wire (Nominal)	Overall diameter (Approx.)	Conductor resistance at 20°C (MΩ/km)	Rated tensile strength (kN)	Current rating in amp at 25°C (Approx.)	Conductor weight (kg/km)	Standard length (m)
16	15.89	7	1.70	5.10	1.6022	2.844	110	44	4,000
25	25.16	7	2.14	6.42	1.1273	4.314	110	44	1,500
35	34.91	7	2.52	7.56	0.8202	5.771	110	44	1,000
50	50.14	7	3.02	9.06	0.6711	7.891	110	44	1,000
50	49.97	19	1.83	9.18	0.5756	9.771	110	44	1,000
70	68.98	19	2.15	10.75	0.4171	13.8	110	44	1,000
95	94.76	19	2.52	12.60	0.3356	16.5	110	44	1,000
120	121.21	19	2.85	14.25	0.2374	19.4	110	44	1,000
150	147.12	37	2.25	15.75	0.1960	25.1	110	44	1,000
185	184.54	37	2.52	17.64	0.1563	30.2	110	44	1,000
240	242.54	61	2.28	20.25	0.1191	39.3	110	44	1,000
300	304.24	61	2.52	22.68	0.0945	47.2	110	44	1,000
400	359.14	61	2.85	25.65	0.0742	59.8	110	44	1,000

ค่าความต้านทานสายส่ง
 115 kV ตัวนำแบบ AAC
 400 mm
 มีค่า 0.0742 Ω/km

รูปที่ ข-2 ตารางหาค่าความต้านทานจากบริษัทผู้ผลิต

การหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L)

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \frac{H}{m} / \text{phase}$$

$$\begin{aligned} GMR &= 0.7788 \times r \\ &= 0.7788 \times 0.012825 \\ &= 0.009988 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GMD &= \sqrt[3]{D \times D \times D} \\ &= \sqrt[3]{2.5 \times 2.5 \times 5} \\ &= 3.1498 \text{ m} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 L &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{3.1498}{0.009988} \frac{\text{H}}{\text{m}} / \text{phase} \\
 &= 1.1507 \times 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} / \text{phase} \\
 &= 1.1507 \times 10^{-6} \times 80 \times 1000 \\
 &= 92.056 \text{ mH/phase}
 \end{aligned}$$

การหาค่าความจุไฟฟ้า (C)

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}}} \frac{\text{F}}{\text{m}} \text{ to neutral}$$

$$\text{GMR} = r$$

$$= 0.012825 \text{ m}$$

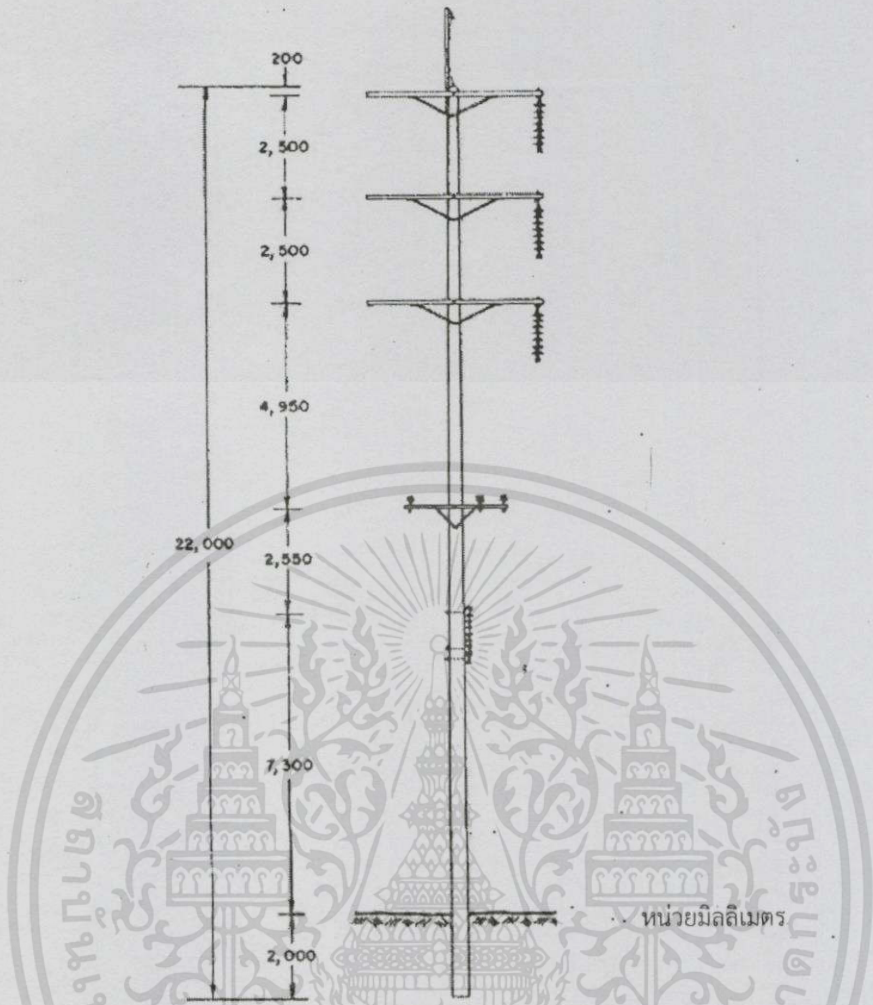
$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D \times D \times D}$$

$$= \sqrt[3]{2.5 \times 2.5 \times 5}$$

$$= 3.1498 \text{ m}$$

ดังนั้น

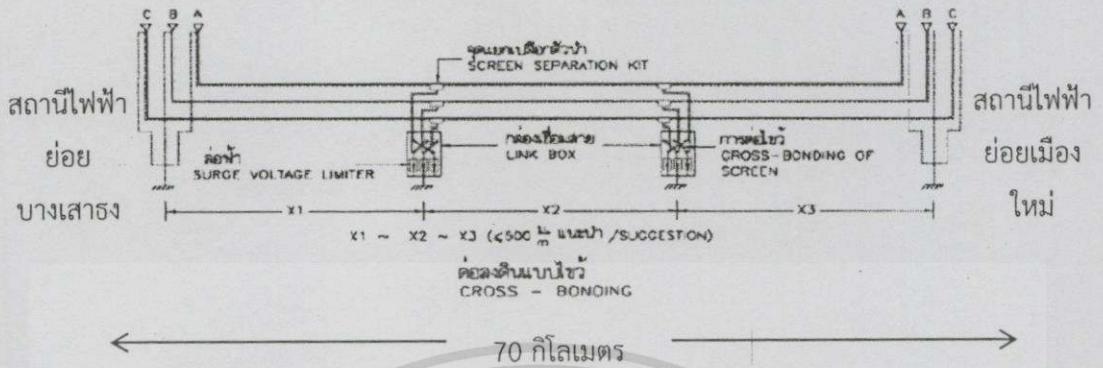
$$\begin{aligned}
 C &= \frac{2\pi \times 10^{-9}}{36\pi \times \ln \frac{3.1498}{0.012825}} \frac{\text{F}}{\text{m}} \text{ to neutral} \\
 &= 1.00942 \times 10^{-5} \frac{\mu\text{F}}{\text{m}} / \text{phase} \\
 &= 1.00942 \times 10^{-5} \times 80 \times 1000 \\
 &= 807.536 \text{ nF/phase}
 \end{aligned}$$



รูปที่ ข-3 โครงสร้างเสาส่งชนิดวงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว (SS)

ดังนั้นระบบจำหน่ายเหนือดินการไฟฟ้านครหลวงช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสา
 รงถึงสถานีไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่ ระยะทาง 80 กิโลเมตร มีความต้านทาน (R) ทั้งหมดบนสายส่ง
 กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 5.936 Ω /phase มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ทั้งหมดบนสายส่งกำลังไฟฟ้า
 เท่ากับ 92.056 mH/phase (28.9202 Ω) และมีค่าความจุไฟฟ้า (C) ทั้งหมดบนสายส่ง
 กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 807.536 nF/phase (3941.724 Ω)

ข.2 ระบบจำหน่ายใต้ดิน



รูปที่ ข-4 สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้า 115 kV ช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงถึงสถานีไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่ [24]

การหาค่าความต้านทาน (R) [22]

ในการหาค่าความต้านทานสามารถหาได้จากคู่มือผลิตภัณฑ์สายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE Land System Cable Guide โดยสายเคเบิลในระบบจำหน่ายใต้ดินที่พิกัดแรงดัน 115 kV นั้นจะใช้สายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตรชนิดตัวนำทองแดง ซึ่งการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินจะใช้แบบฝังดินและมีการจัดวางแบบ Flat ซึ่งมีค่าความต้านทานที่ 50 Hz เท่ากับ 0.032 Ω/km ดังนั้นค่าความต้านทานของสายเคเบิลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$R = 0.032 \times 70 \Omega$$

$$R = 2.24 \Omega$$

Nominal cross-sectional area of conductor			mm	400	630	800	1000	1200	1600	2000	2500
Electrical properties at 132kV and 50 Hz											
Aluminium conductor	Max. DC-resistance	at 20°C	Ω/km	0.0778	0.0469	0.0367	0.0291	0.0247	0.0186	0.0149	0.0127
	AC resistance	at 90°C, approx.	Ω/km	0.101	0.062	0.050	0.041	0.036	0.024	0.020	0.017
Copper conductor	Max. DC-resistance	at 20°C	Ω/km	0.0470	0.0283	0.021	0.0176	0.0151	0.0113	0.0090	0.0072
	AC resistance	at 90°C, approx.	Ω/km	0.062	0.039	0.032	0.024	0.021	0.017	0.014	0.012
DC-resistance of metallic sheath at Reactance			Ω/km	0.349	0.343	0.337	0.348	0.347	0.343	0.335	0.319
Metallic sheath op			Ω/km	0.142	0.128	0.123	0.118	0.115	0.106	0.102	0.099
Metallic sheath clc			Ω/km	0.190	0.175	0.167	0.159	0.154	0.135	0.133	0.127
Metallic sheath cld			Ω/km	0.226	0.211	0.202	0.194	0.189	0.164	0.159	0.153
Metallic sheath op			Ω/km	0.195	0.179	0.172	0.164	0.159	0.141	0.136	0.130
Metallic sheath clc			Ω/km	0.239	0.223	0.215	0.208	0.203	0.185	0.179	0.173
Metallic sheath cld			Ω/km	0.264	0.248	0.241	0.233	0.228	0.210	0.205	0.199
Operating capacitance			µF/km	0.16	0.19	0.21	0.22	0.24	0.27	0.29	0.32
Charging current			A/km	3.8	4.5	5.0	5.3	5.7	6.4	6.9	7.6

ค่าความต้านทานสายเคเบิล XLPE 115 kV ขนาด 800 mm มีค่า $0.032 \frac{\Omega}{km}$

รูปที่ ข-5 ตารางหาค่าความต้านทานจากบริษัทผู้ผลิตสายเคเบิล

การหาค่าความเหนี่ยวนำ (L)

$$L = 0.05 + 0.2 \cdot \ln\left(\frac{K \cdot s}{r_c}\right) \text{ [mH/km]}$$

$$L = 0.05 + 0.2 \times \ln\left(\frac{1.26 \times 162.4}{16.85}\right)$$

$$L = 0.5464 \times 70 \text{ mH/Phase}$$

$$L = 38.248 \text{ mH/Phase}$$

โดยที่

S : ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางตัวนำ

Trefoil : K= 1 , Flat : K=1.26

ϵ_r : Relative Permittivity ของฉนวน (2.5 สำหรับ XLPE)

r_o : รัศมีภายนอกของฉนวน (มิลลิเมตร)

r_i : รัศมีภายในของตัวนำรวมทั้ง screen ด้วย (มิลลิเมตร)

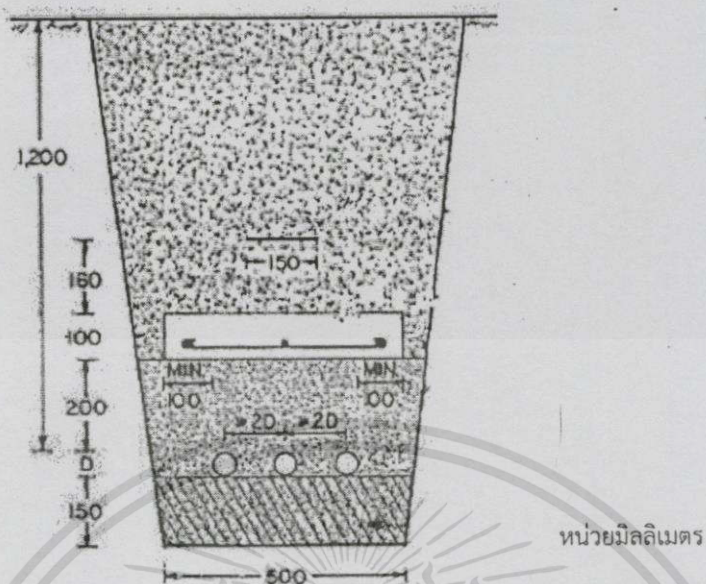
การหาค่าตัวเก็บประจุ (C)

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \text{ [\mu F/km]}$$

$$c = \frac{2.5}{18 \times \ln\left(\frac{81.2}{33.7 + 11}\right)} \frac{\mu F}{km} \text{ To Neutral}$$

$$c = 0.2327 \times 70 \mu F$$

$$c = 16.289 \mu F/Phase$$



รูปที่ ข-6 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินของระบบจำหน่าย

ดังนั้นระบบจำหน่ายใต้ดินการไฟฟ้านครหลวงช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงถึงสถานีไฟฟ้าย่อยเมืองใหม่ ระยะทาง 70 กิโลเมตร มีความต้านทาน (R) ทั้งหมดบนสายเคเบิลเท่ากับ $2.24 \Omega/\text{phase}$ มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ทั้งหมดบนสายเคเบิลเท่ากับเท่ากับ $38.248 \text{ mH}/\text{phase}$ (12.0159Ω) และมีค่าความจุไฟฟ้า (C) ทั้งหมดบนสายเคเบิลเท่ากับ $16.289 \mu\text{F}/\text{phase}$ (195.414Ω)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
การหาค่าพารามิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบจำลอง

ค การหาค่าพารามิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบจำลอง

วิธีที่ใช้สำหรับการคำนวณเพื่อจะจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายการไฟฟ้านครหลวงจากสถานีไฟฟ้าพระนครใต้-สถานีไฟฟ้าย่อยบางเสาธงมาสู่ระบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ค่าความจุไฟฟ้า (C) โดยการใช้ระบบเพอร์ยูนิต คืออัตราส่วนระหว่างค่าจริงต่อ (Actual value) ต่อค่าฐาน (Base value) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\text{Per unit value} = \frac{\text{Actual value}}{\text{Base value}}$$

ค.1 การหาค่าอัตราส่วนสำหรับใช้แปลงค่าระบบจริงมาเป็นค่าในระบบจำลองของระบบจำหน่ายระบบดิน

โดยให้ระบบจำลองของห้องปฏิบัติการมีค่าฐาน (Base value) คือ ค่ากำลังไฟฟ้า (150 VA) และค่าแรงดันไฟฟ้า (420 V) ค่าที่เปรียบเทียบคือ ค่า Z_{Base} โดย

Z_{base} ของระบบจำลอง

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 420^2}{150}$$

$$Z_{\text{base}} = 2036.8918 \Omega$$

Z_{Base} ของระบบจำลองมีค่าเท่ากับ 2036.8918 Ω

ค่าฐานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า แรงดันที่ (115 kV) กำลังไฟฟ้า (80 MVA) จะได้

Z_{base} ของระบบจริง

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 115^2}{80}$$

$$Z_{\text{base}} = 286.3296 \Omega$$

Z_{Base} ของระบบจริงมีค่าเท่ากับ 286.3296 Ω

จะได้ค่าอัตราส่วนของระบบจำลองต่อระบบจริง คือ

$$\text{อัตราส่วน} = \frac{2036.8918}{286.3296}$$

$$= 7.1138$$

อัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบระบบจำลอง = 7.1138

โดยในการทดลองจะจำลองระบบจำหน่ายการไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนคือ ระบบจำหน่ายบนดิน(สถานีพระนครใต้ - สถานีบางเสาธง)และระบบจำหน่ายใต้ดิน(กึ่งกลางระหว่างสถานีบางเสาธง-เมืองใหม่)

ส่วนที่ 1 ระบบจำหน่ายบนดิน (สถานีพระนครใต้ - สถานีบางเสาธง)

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ที่ใช้ติดตั้งทั้งหมดในระบบจำลองส่วนที่ 1 คือ

$$L = \text{อัตราส่วน} \times \text{ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าระบบจริงเมื่อคุณความยาวแล้ว}$$

$$L = 7.1138 \times 92.056$$

$$L = 654.8679 \text{ mH}$$

ที่ 20% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{20}{100}$$

$$= 130.9736 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 130 mH)

ที่ 30% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{30}{100}$$

$$= 196.4604 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 195 mH)

ที่ 40% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{40}{100}$$

$$= 261.9472 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 260 mH)

ที่ 50% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{50}{100}$$

$$= 327.4339 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 325 mH)

ที่ 60% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{60}{100}$$

$$= 392.9208 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 390 mH)

ที่ 70% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{70}{100}$$

$$= 458.4076 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 455 mH)

ที่ 80% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{80}{100}$$

$$= 523.8944 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 520 mH)

ที่ 100% ของระยะสายส่ง

$$L = 654.8679 \times \frac{100}{100}$$

$$= 654.8679 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 650 mH)

ส่วนค่าความจุไฟฟ้า (C) ที่ใช้ติดตั้งของส่วนที่ 1 ในระบบจำลอง คือ

$$C = \frac{1}{\text{อัตราส่วน}} \times \text{ความจุไฟฟ้าระบบจริงเมื่อคุณระยะทางแล้ว}$$

$$C = \frac{1}{7.1138} \times 0.8075$$

$$C = 113.5118 \text{ nF}$$

ที่ 20% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{20}{100}$$

$$= 22.7024 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 24 nF)

ที่ 30% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{30}{100}$$

$$= 34.0535 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 36 nF)

ที่ 40% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{40}{100}$$

$$= 45.4047 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 48 nF)

ที่ 50% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{50}{100}$$

$$= 56.7559 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 60 nF)

ที่ 60% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{60}{100}$$

$$= 68.1071 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 72 nF)

ที่ 70% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{70}{100}$$

$$= 79.4582 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 84 nF)

ที่ 80% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{80}{100}$$

$$= 90.8094 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 96 nF)

ที่ 100% ของระยะสายส่ง

$$C = 113.5118 \times \frac{100}{100}$$

$$= 113.5118 \text{ nF}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 120 nF)

ค.2 การหาค่าอัตราส่วนสำหรับใช้แปลงค่าระบบจริงมาเป็นค่าในระบบจำลองของระบบจำหน่าย
ได้ดิน

โดยให้ระบบจำลองของห้องปฏิบัติการมีค่าฐาน (Base value) คือ ค่ากำลังไฟฟ้า (150 VA)
และค่าแรงดันไฟฟ้า (420 V) ค่าที่เปรียบเทียบคือ ค่า Z_{Base} โดย

Z_{base} ของระบบจำลอง

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 420^2}{150}$$

$$Z_{\text{base}} = 2036.8918 \text{ } \Omega$$

Z_{Base} ของระบบจำลองมีค่าเท่ากับ 2036.8918 Ω

ค่าฐานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า แรงดันที่ (115 kV) กำลังไฟฟ้า (200 MVA) จะได้

Z_{base} ของระบบจริง

$$Z_{base} = \frac{\sqrt{3}V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{\sqrt{3} * 115^2}{200}$$

$$Z_{base} = 114.5319 \Omega$$

Z_{Base} ของระบบจริงมีค่าเท่ากับ 286.3296 Ω

จะได้ค่าอัตราส่วนของระบบจำลองต่อระบบจริง คือ

$$\text{อัตราส่วน} = \frac{2036.8918}{114.5319}$$

$$= 17.7845$$

อัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบระบบจำลอง = 17.7845

โดยในการทดลองจะจำลองระบบจำหน่ายการไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนคือ ระบบจำหน่ายบนดิน(สถานีพระนครใต้ - สถานีบางเสาธง)และระบบจำหน่ายใต้ดิน(กึ่งกลางระหว่างสถานีบางเสาธง-เมืองใหม่)

ส่วนที่ 2 ระบบจำหน่ายใต้ดิน (สถานีบางเสาธง - สถานีเมืองใหม่)

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ที่ใช้ติดตั้งทั้งหมดในระบบจำลองส่วนที่ 2 คือ

$$L = \text{อัตราส่วน} \times \text{ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าระบบจริงเมื่อคุณความยาวแล้ว}$$

$$L = 17.7845 \times 38.458$$

$$L = 683.9563 \text{ mH}$$

ที่ 20% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{20}{100}$$

$$= 136.7913 \text{ mH}$$

∴ (ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 140 mH)

ที่ 30% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{30}{100}$$

$$= 205.1869 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรถ้าลองเท่ากับ 210 mH)

ที่ 40% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{40}{100}$$

$$= 273.5825 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรถ้าลองเท่ากับ 280 mH)

ที่ 50% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{50}{100}$$

$$= 341.9782 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรถ้าลองเท่ากับ 350 mH)

ที่ 60% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{60}{100}$$

$$= 410.3738 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรถ้าลองเท่ากับ 420 mH)

ที่ 70% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{70}{100}$$

$$= 478.7694 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรถ้าลองเท่ากับ 490 mH)

ที่ 80% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{80}{100}$$

$$= 547.1650 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 560 mH)

ที่ 100% ของระยะสายส่ง

$$L = 683.9563 \times \frac{100}{100}$$

$$= 683.9563 \text{ mH}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 700 mH)

ส่วนค่าความจุไฟฟ้า (C) ที่ใช้ติดตั้งของส่วนที่ 1 ในระบบจำลอง คือ

$$C = \frac{1}{\text{อัตราส่วน}} \times \text{ความจุไฟฟ้าระบบจริงเมื่อคุณระยะทางแล้ว}$$

$$C = \frac{1}{17.7845} \times 16.289$$

$$C = 0.9159 \mu\text{F}$$

ที่ 10% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{10}{100}$$

$$= 0.0916 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.1 μF)

ที่ 20% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{20}{100}$$

$$= 0.1832 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.2 μF)

ที่ 30% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{30}{100}$$

$$= 0.2748 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.3 μF)

ที่ 40% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{40}{100}$$

$$= 0.3664 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.4 μF)

ที่ 50% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{50}{100}$$

$$= 0.4580 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.5 μF)

ที่ 60% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{60}{100}$$

$$= 0.5495 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.6 μF)

ที่ 70% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{70}{100}$$

$$= 0.6411 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.7 μF)

ที่ 80% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{80}{100}$$

$$= 0.7327 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 0.8 μF)

ที่ 100% ของระยะสายส่ง

$$C = 0.9159 \times \frac{100}{100}$$

$$= 0.9159 \mu\text{F}$$

(ค่าในวงจรจำลองเท่ากับ 1 μF)

ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะแสดงในตารางต่อไป

ค.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั้งระบบจริงและระบบจำลอง

จากทฤษฎีบทที่ 2 ได้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงจากการไฟฟ้า มาเป็นค่าในชุดทดลองซึ่งค่าพารามิเตอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ ข - 1 และ ข - 2

ส่วนที่ 1 ระบบจำหน่ายบนดิน

ตารางที่ ค - 1 ค่าความเหนี่ยวนำที่ระยะสายส่งต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ (mH)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจริง (mH)
20	130.9736	130	18.4112
30	196.4604	195	27.6168
40	261.9472	260	36.8224
50	327.4339	325	46.028
60	392.9208	390	55.2336
70	458.4076	455	64.4392
80	523.8944	520	73.6448
100	654.8679	650	92.056

ตารางที่ ค - 2 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ระยะสายส่งต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คำนวณได้ (nF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (nF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจริง (nF)
20	22.7024	24	161.5
30	34.0535	36	242.3
40	45.4047	48	323
50	56.7559	60	403.8
60	68.1071	72	484.5
70	79.4582	84	565.3
80	90.8094	96	646
100	113.5118	120	807.5

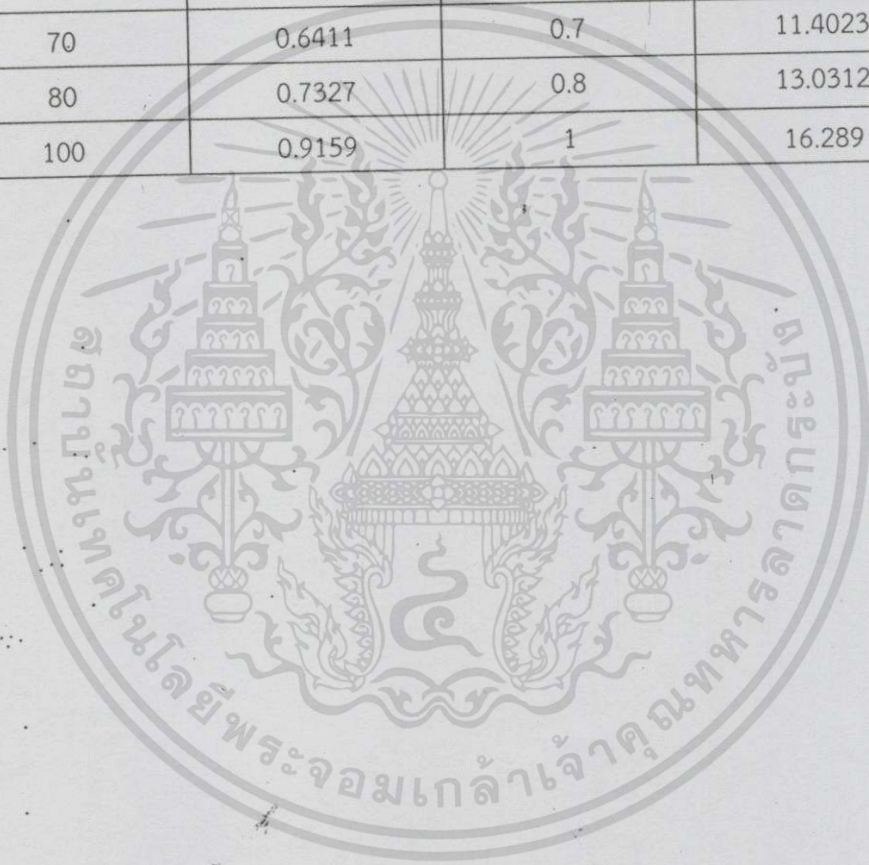
ส่วนที่ 2 ระบบจำหน่ายใต้ดิน

ตารางที่ ค - 1 ค่าความเหนี่ยวนำที่ระยะสายส่งต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ (mH)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจริง (mH)
20	136.7913	140	7.6916
30	205.1869	210	11.5374
40	273.5825	280	15.3832
50	341.9782	350	19.229
60	410.3738	420	23.0748
70	478.7694	490	26.9206
80	547.1650	560	30.7664
100	683.9563	700	38.458

ตารางที่ ค - 2 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ระยะสายส่งต่างๆ

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง (%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คำนวณได้ (μF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (μF)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจริง (μF)
20	0.1832	0.2	3.2578
30	0.2748	0.3	4.8867
40	0.3664	0.4	6.5156
50	0.4579	0.5	8.1445
60	0.5495	0.6	9.7734
70	0.6411	0.7	11.4023
80	0.7327	0.8	13.0312
100	0.9159	1	16.289





ภาคผนวก ง

การจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบพายด้วยโปรแกรม ATPDraw 5.6

ง การจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบพายด้วยโปรแกรม ATP / EMTP

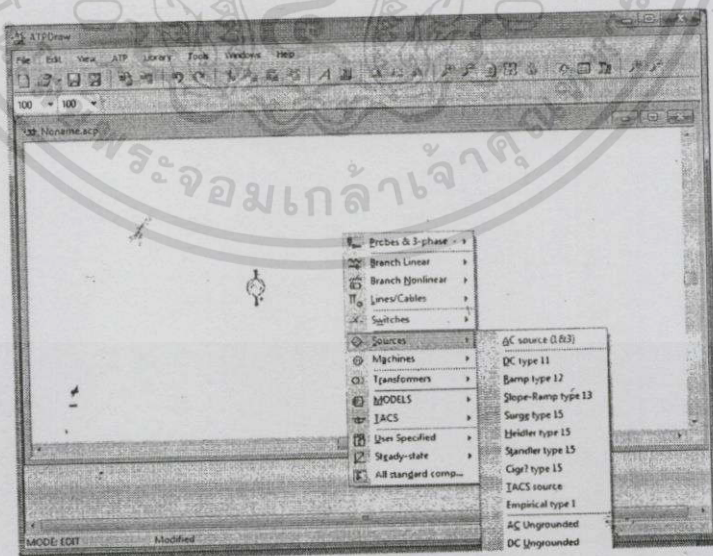
ง.1 การออกแบบวงจรที่ต้องการทำการจำลอง

1. เปิดโปรแกรม ATPDraw 5.6 กด file แล้วกด new เพื่อสร้างหน้าต่างขึ้นมา




รูปที่ ง - 1 หน้าต่างเปิดโปรแกรม ATP


2. คลิกเมาส์ด้านขวาเพื่อเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้า





รูปที่ ง - 2 การเลือกอุปกรณ์

2.1 เลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้า source ชนิด AC Source (1&3) 


2.2 เลือกค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในในสายส่ง


2.2.1 ค่าความต้านทาน R เลือก Branch Linear / Resistor 

2.2.2 ค่าความเหนี่ยวนำ L เลือก Branch Linear / Inductor 


2.2.3 ค่าความจุไฟฟ้า C เลือก Branch Linear / Capacitor 


2.3 เลือกเครื่องมือวัด

2.3.1 เครื่องวัดกระแส เลือก Probes & 3-phase / Probe Curr 

2.3.2 เครื่องวัดแรงดัน เลือก Probes & 3-phase / Probe Volt 

2.4 เลือกจุดเชื่อมต่อระหว่าง 3 เฟสเป็น 1 เฟส

เลือก Probes & 3-Phase / Splitter (3Phase) 

2.5 เลือกสวิตช์ที่ใช้ในการลัดวงจร Switches ชนิด time controlled 

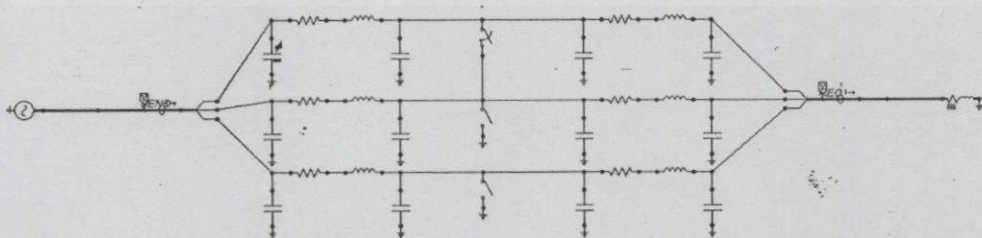
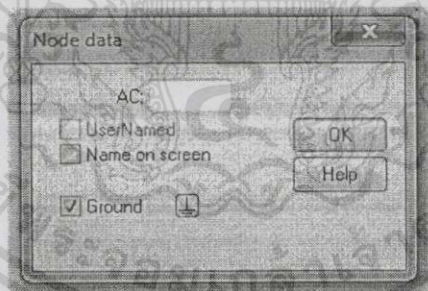
2.5 เลือกโหลดในการทดลองแบบ 3 เฟส (RLC 3-ph)

เลือก Branch Linear / RLC 3-ph 

2.6 จากนั้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันให้เป็นรูปร่างจรสมมูลพาย

คลิกเมาส์ด้านซ้ายเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

2.7 ดับเบิลคลิกที่ node คำของอุปกรณ์ที่ต้องการใส่ Ground เช็คร่องหมายถูกที่ Ground กด OK



รูปที่ ง - 3 การสร้างแบบจำลองวงจรสมมูลแบบพาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ดับเบิลคลิกที่อุปกรณ์เพื่อกำหนดค่าอุปกรณ์

3.1 กำหนดค่าแหล่งจ่าย source

3.1.1 Type of source เลือก Voltage

3.1.2 Num phases เลือก 3-phase

3.1.3 Angle unit เลือก Degrees

3.1.4 Amplitude เลือก RMS L-L

3.1.5 Grounding เลือก Grounded

3.1.6 ช่อง Data ให้ใส่ค่าการทดลองดังนี้

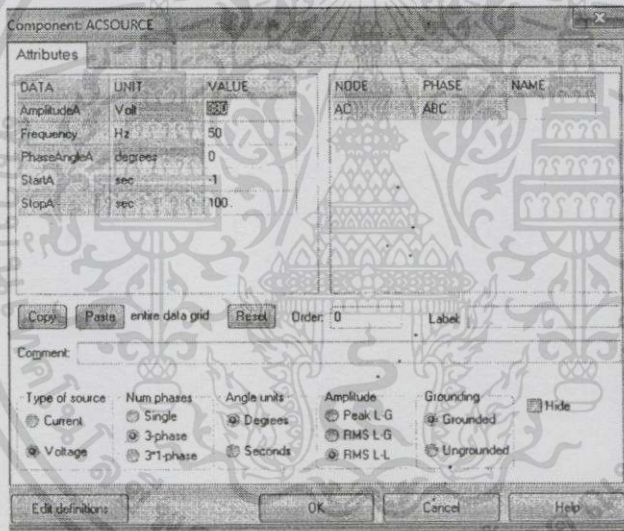
- Amplitude : Volt : ใส่ค่า 380

- Frequency : Hz : ใส่ค่า 50

- PhaseAngleA : degrees : ใส่ค่า 0

- StartA : sec : -1

- StopA : sec : 100



รูปที่ 4 กรอบข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้แก่แหล่งจ่าย

3.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทาน (R) : สำหรับค่าความต้านทานที่จะนำมาใช้นั้นคือค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำ สามารถวัดได้ก่อนการทดลอง

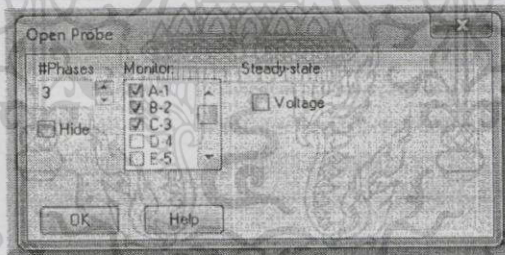
3.2.1 RES ใส่ค่าที่ได้จากความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละระยะความยาว

3.2.2 เมื่อใส่ค่าทั้งหมดแล้ว กด OK

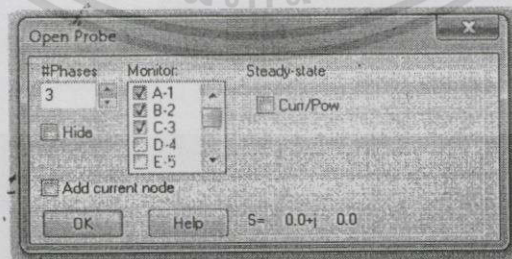
3.3 กำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำ (L)

3.3.1 L ใส่ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำในวงจรระยะต่าง ๆ เหนี่ยวนำในหน่วยมิลลิเฮนรี่

- 3.3.2 K_p ใส่ 0 คือค่าตัวประกอบความต้านทานที่ขนานร่วมกับค่าความ
- 3.3.3 เมื่อใส่ค่าทั้งหมดแล้ว กด OK
- 3.4 กำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความจุไฟฟ้า (C) กด Help เพื่ออ่านทำความเข้าใจใน
ช่องค่าที่จะใส่ค่า
- 3.4.1 C ใส่ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าในวงจรระยะต่าง ๆ ใน
หน่วยไมโครฟารัด
- 3.4.2 K_s ใส่ 0 คือค่าตัวประกอบความต้านทานที่อนุกรมร่วมกับค่าความจุ
ไฟฟ้า
- 3.4.3 เมื่อใส่ค่าทั้งหมดแล้ว กด OK
- 3.5 กำหนดค่าโหลดตามที่ได้มีการออกแบบไว้ : หลอดไฟ (R), บัลลาสต์ (L)
- 3.6 กำหนดค่าเวลาในการทำงานงานของสวิตช์
- 3.6.1 T-cl ใส่เวลาที่จะทำการสับสวิตช์เข้าให้เกิดการลัดวงจร
: ที่ได้จากการคำนวณหาค่าเวลาที่มุมการลัดวงจรที่ 90 และ 180 องศา
- 3.6.2 T-op ใส่เวลาที่จะทำการเปิดสวิตช์ออก
- 3.6.3 I_{mar} ใส่ค่า 0 คือส่วนเผื่อกระแส
- 3.6.4 3-ph ใส่ค่า 0
- 3.7 กำหนดค่าอุปกรณ์เครื่องมือวัด
- 3.7.1 Probe Volt ให้ทำการกำหนดค่าดังนี้



- 3.7.2 Probe Current ให้ทำการกำหนดค่าดังนี้

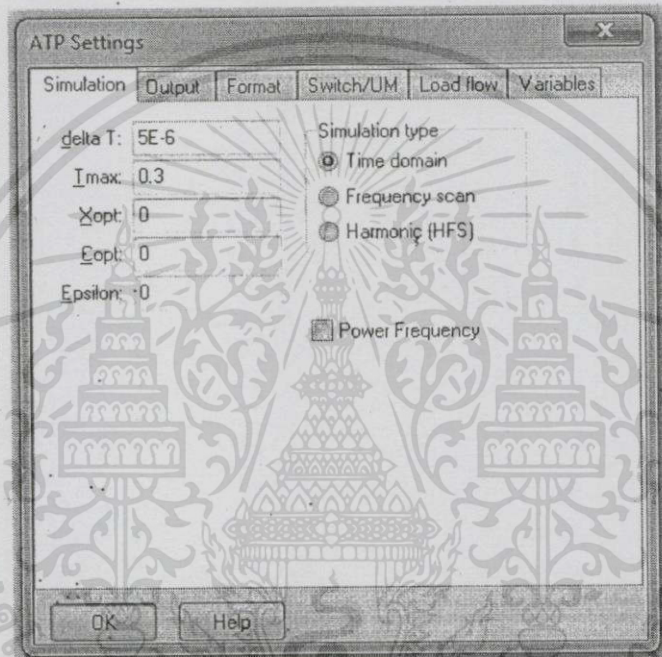


ที่ node ของ Probe Voltage หรือ Probe Current ของทั้งสองฝั่งข้อังวงจรให้ดับเบิล
คลิกพร้อมกับใส่ชื่อเป็น Send, Rec เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านค่าจากกราฟ

4. การตั้งค่าการรันโปรแกรม

4.1 กด ATP /setting

- 4.1.1 delta T ใส่เพื่อเลือกค่าคาบเวลาที่ต้องการ sampling (ใส่ค่า 5E-6)
- 4.1.2 T max ใส่ค่าเวลามากที่สุดที่จะให้โปรแกรมรัน (0.3 sec)
- 4.1.3 Xopt ใส่ค่า 0 เพื่อให้ค่าที่ใส่ใน inductor มีหน่วยเป็น mH
- 4.1.4 Copt ใส่ค่า 0 เพื่อให้ค่าที่ใส่ใน capacitor มีหน่วยเป็น μF
- 4.1.5 Epsilon ใส่ค่า 0
- 4.1.6 และเลือก simulation type / Time domain
- 4.1.7 เมื่อใส่ค่าทั้งหมดแล้ว กด OK



รูปที่ 5 - 5 การตั้งค่าการรันโปรแกรม

หมายเหตุ : หากมีข้อสงสัยในการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถใช้คำสั่ง Help เพื่ออธิบายช่องสำหรับใส่ค่าต่างๆได้

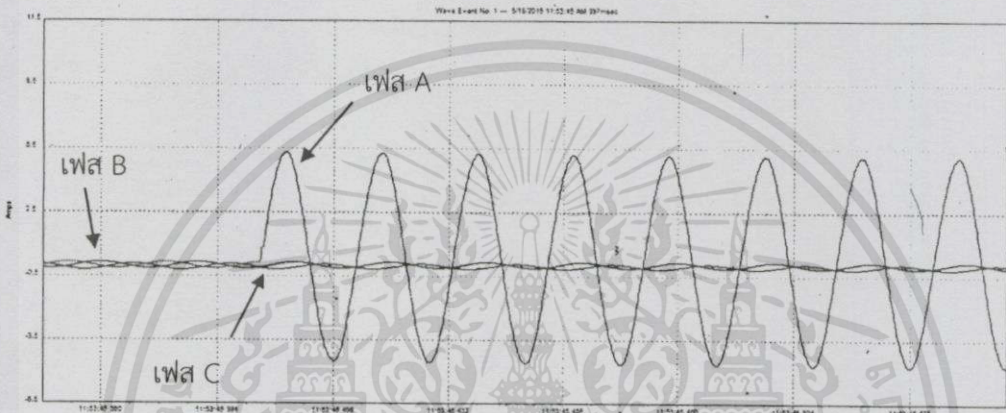
5. เมื่อรันค่าเสร็จจะได้ไฟล์ (name.pl4)

ใช้โปรแกรม PCPLOT เพื่อดูผลกราฟที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม ATPDraw 5.6 หรือสามารถเข้าจากตัวโปรแกรม ATPDraw 5.6 ก็ได้ (หากมีการตั้งค่าไว้แล้วที่ Tools/options/Preferences ที่ช่อง Plot Program) โดยเลือกจาก tab ด้านบน ATP/run plot

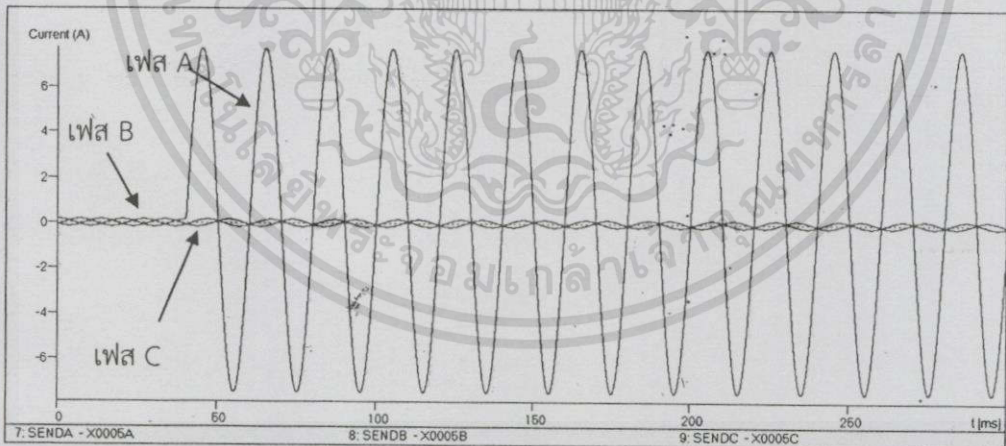
จ.2 การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสผิดพลาดของผลการทดลองจากชุดทดลองกับแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองจากชุดทดลองกับผลของแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw ได้นำค่าตัวอย่างผลการทดลองการลัดวงจรของระบบจำหน่ายเหนือดินที่ระยะ 20% ของสายส่งมาเทียบ เนื่องจากที่ระยะนี้จะเห็นรูปคลื่นของกระแสได้ชัดเจน เพราะมีค่ากระแสลัดวงจรสูง จึงเหมาะในการเปรียบเทียบ

1. ความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (Single line to ground fault) ที่ระยะ 20% ของสายส่ง โดยเกิดการลัดวงจรที่เฟส A และใช้โหลด 25 วัตต์



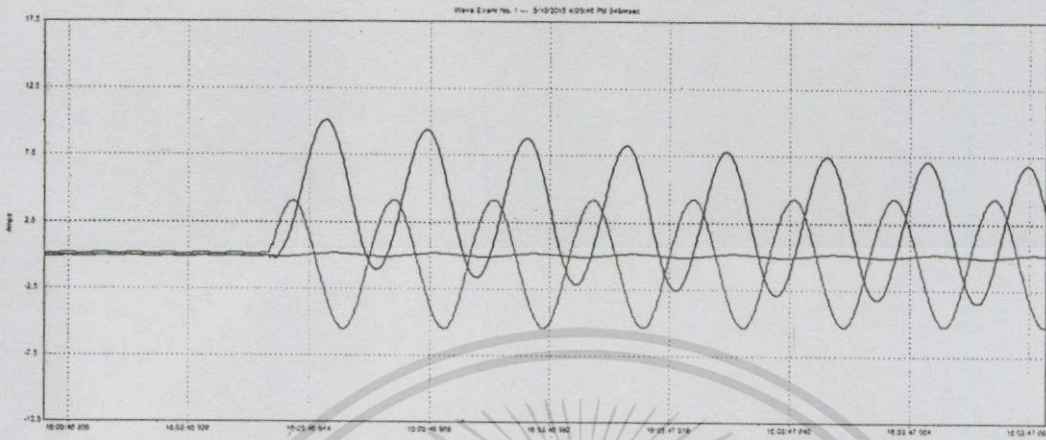
รูปที่ ง - 6 ผลของการทดลองจากชุดทดลองของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (Single line to ground fault)



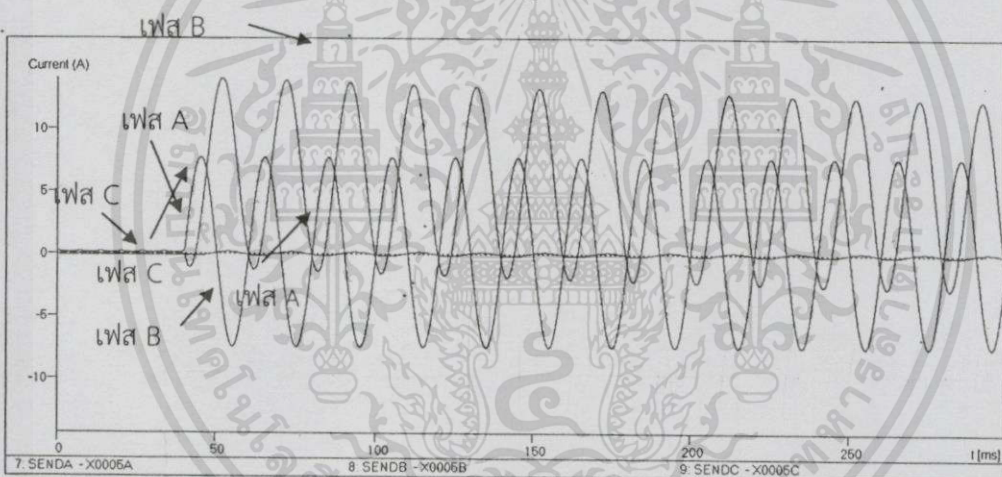
รูปที่ ง - 7 ผลของแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw ของความผิดพลาดทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (Single line to ground fault)

จากรูปที่ ง - 6 และ ง - 7 จะเห็นว่าลักษณะรูปคลื่นเหมือนกันคือการเกิดการลัดวงจรที่มุม 90° ของกระแสเฟส A จึงไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรง เพราะเป็นจุดที่แรงดันมีค่ามากที่สุดก่อนการเกิดความผิดพลาด จึงเหลือแต่ส่วนประกอบกระแสลับ

2. ความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (Double line to ground fault) ที่ระยะ 20% ของสายส่ง โดยเกิดการลัดวงจรที่เฟส A และ B และใช้โหลดตลอดไฟ 25 วัตต์



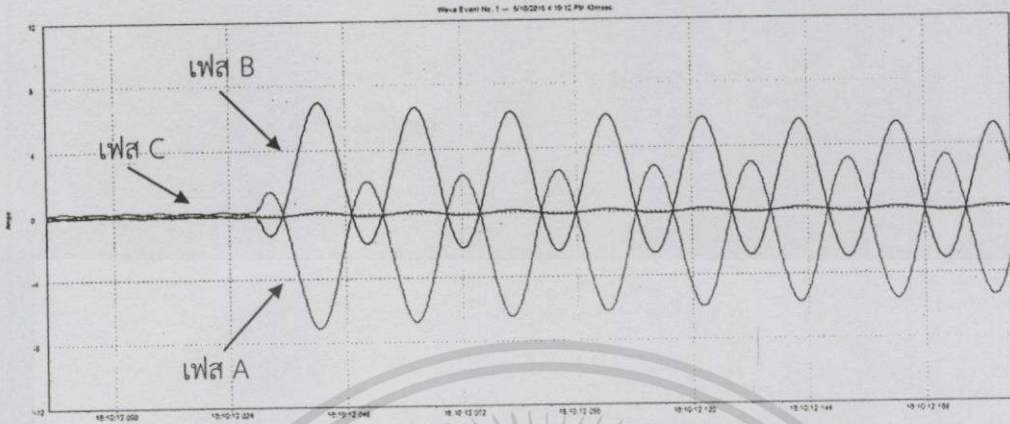
รูปที่ ๘ - 8 ผลของการทดลองจากชุดทดลองของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (Double line to ground fault)



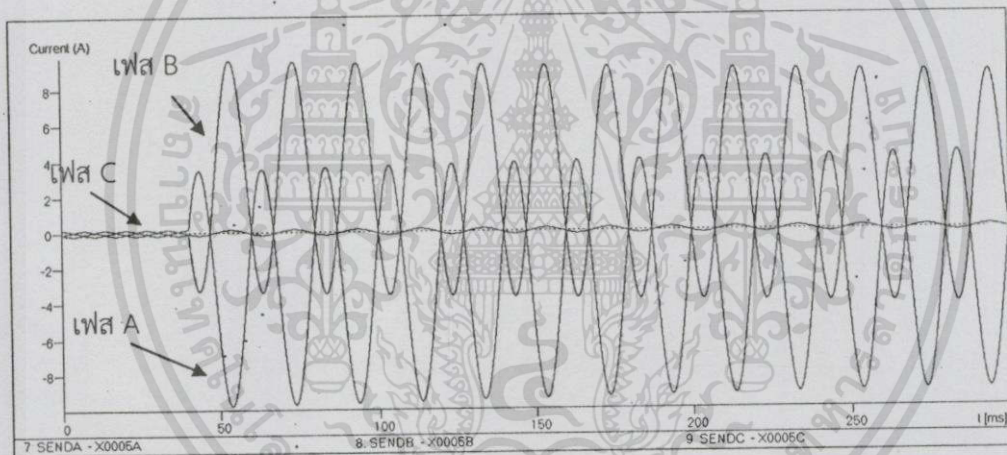
รูปที่ ๙ - 9 ผลของแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw ของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟสลงดิน (Double line to ground fault)

จากรูปที่ ๘ - 8 และ ๙ - 9 จะเห็นว่าลักษณะรูปคลื่นเหมือนกันคือที่กระแสเฟส A เกิดการลัดวงจรที่มุม 90° จึงไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรง เพราะเป็นจุดที่แรงดันของเฟส A มีค่ามากที่สุดก่อนการเกิดความผิดปกติ จึงเหลือแต่ส่วนประกอบกระแสสลับ แต่ส่วนของกระแสเฟส B เกิดการลัดวงจรที่มุม 210° ซึ่งระดับแรงดันของเฟส B มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จึงเกิดส่วนประกอบกระแสตรงที่มีค่ามาก

3. ความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟส (Line to line fault) ที่ระยะ 20% ของสายส่ง โดยเกิดการลัดวงจรที่เฟส A และ B และใช้โหลดหลอดไฟ 25 วัตต์



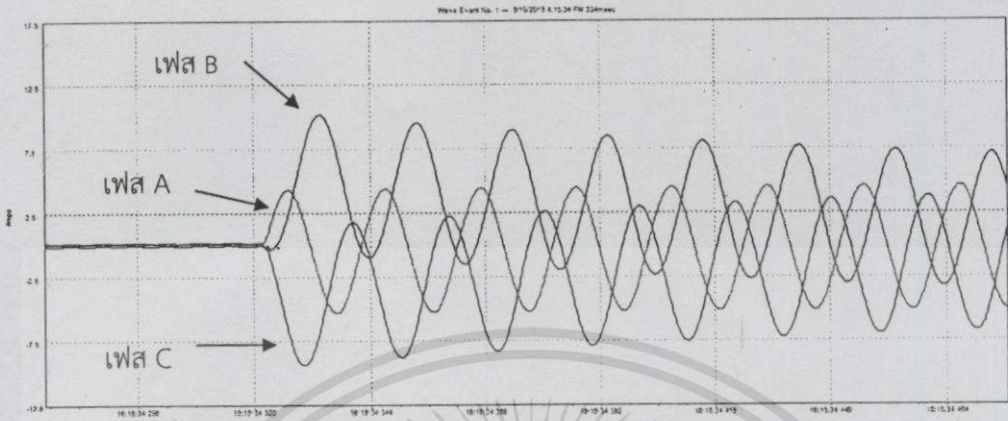
รูปที่ ง - 10 ผลของการทดลองจากชุดทดลองของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟส (Line to line fault)



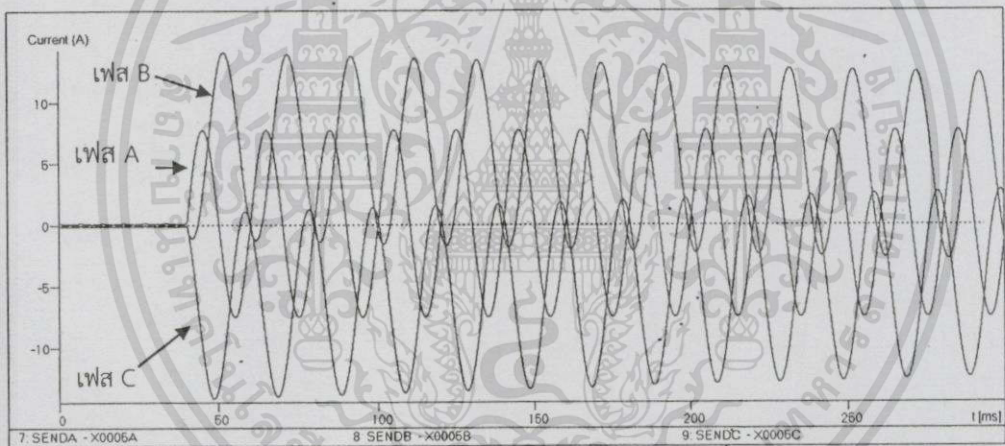
รูปที่ ง - 11 ผลของแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw ของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสองเฟส (Line to line fault)

จากรูปที่ ง - 10 และ ง - 11 จะเห็นว่าลักษณะรูปคลื่นเหมือนกันคือเป็นการลัดวงจรแบบ Line to Line fault ที่เฟส A และ B ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรของทั้งสองเฟสเท่ากันเพียงแค่มุมเฟสตรงข้ามกัน จึงทำให้ได้รูปดังนี้ ซึ่งเกิดการลัดวงจรที่มุม 180° ของกระแสเฟส A และเกิดการลัดวงจรที่มุม 300° ของกระแสเฟส B

4. ความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสามเฟส (Three phase fault) ที่ระยะ 20% ของสายส่ง โดยเกิดการลัดวงจรของทั้ง 3 เฟส และใช้โหลดหลอดไฟ 25 วัตต์



รูปที่ ง - 12 ผลของการทดลองจากชุดทดลองของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสามเฟส (Three phase fault)



รูปที่ ง - 13 ผลของแบบจำลองจากโปรแกรม ATPDraw ของความผิดปกติของไฟฟ้าชนิดสามเฟส (Three phase fault)

จากรูปที่ ง - 12 และ ง - 13 จะเห็นว่าลักษณะรูปคลื่นเหมือนกันคือที่กระแสเฟส A เกิดการลัดวงจรที่มุม 90° จึงไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรง เพราะเป็นจุดที่แรงดันของเฟส A มีค่ามากที่สุดก่อนการเกิดความผิดปกติ จึงเหลือแต่ส่วนประกอบกระแสสลับ แต่ส่วนของกระแสเฟส B และ C เกิดการลัดวงจรที่มุม 180° และ 330° ตามลำดับ ซึ่งระดับแรงดันของเฟส C มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จึงเกิดส่วนประกอบกระแสตรงที่มีค่ามาก

ภาคผนวก จ
 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณสำหรับการออกแบบการวัดผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

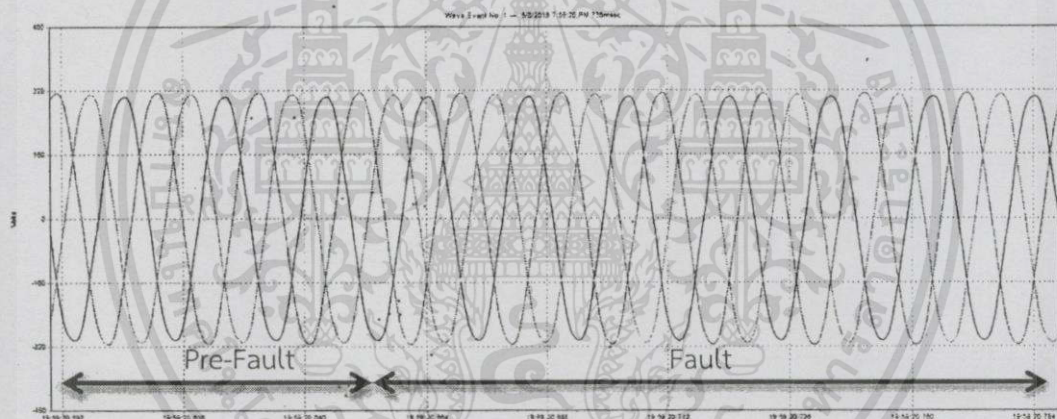
การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณสำหรับการออกแบบการวัดผลการทดลอง

จ การวิเคราะห์ลักษณะลูกคลื่นสัญญาณเพื่อออกแบบการวัดผลการทดลอง

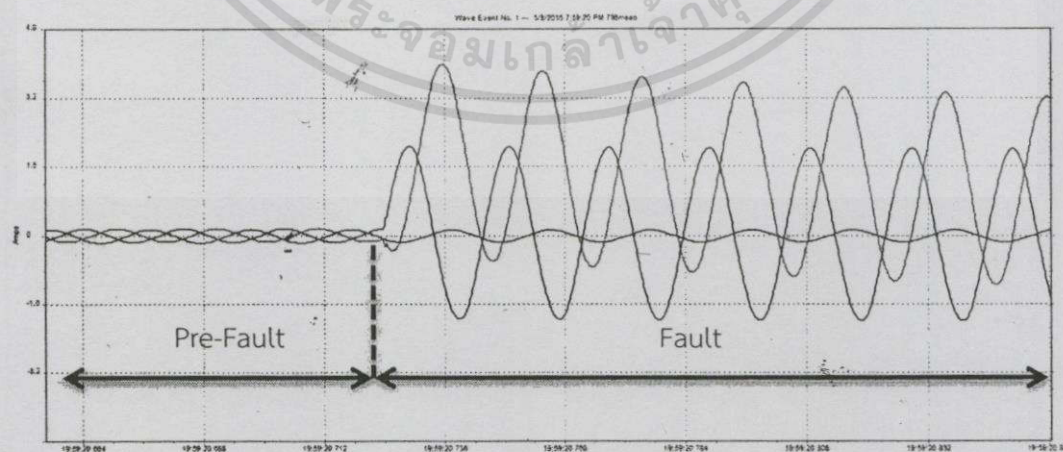
โดยทั่วไปแล้วลูกคลื่นสัญญาณมีความจำเป็นต่อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบไปด้วย ลูกคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแส ซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ รูปคลื่นสัญญาณดังกล่าวก็จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย โดยการวัดสัญญาณดังกล่าวนั้น ตามหลักการแล้วจะทำการวัดที่ต้นทางของสายส่ง (ฝั่งส่ง) และปลายทางของสายส่ง (ฝั่งรับ) เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณว่าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นสัญญาณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด ซึ่งพิจารณาได้จากตัวอย่างดังนี้

การลัดวงจรชนิดสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ที่ความยาว 50 % ของสายส่ง จากความยาวสายส่งทั้งหมด 80 กิโลเมตร สามารถวัดสัญญาณแรงดันและกระแสของทั้ง 2 ฝั่งได้ดังนี้

ฝั่งส่ง (Send)

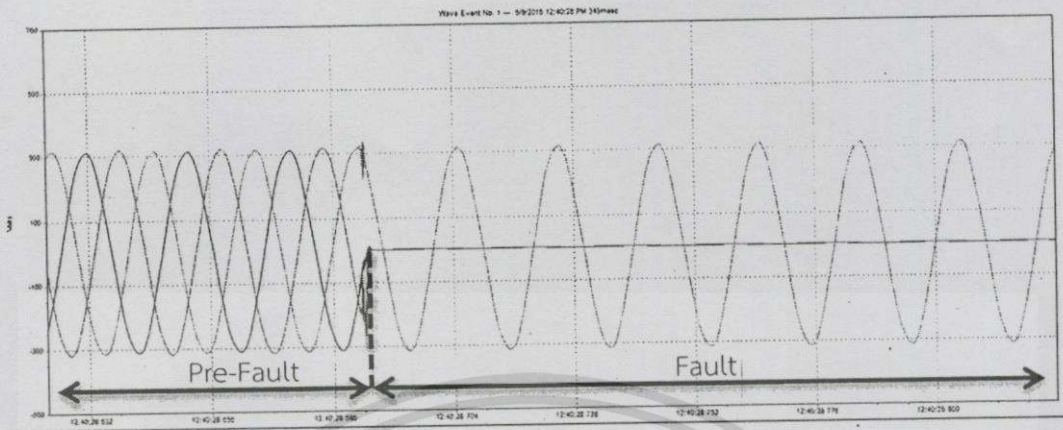


รูปที่ จ - 1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน

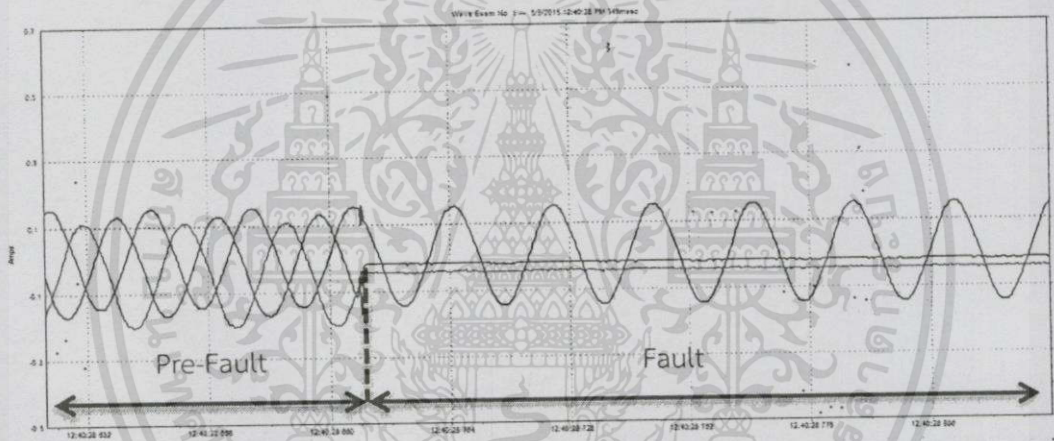


รูปที่ จ - 2 รูปคลื่นสัญญาณกระแส

ฝั่งรับ (Receive)



รูปที่ ๓ - 3 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน



รูปที่ ๔ - 4 รูปคลื่นสัญญาณกระแส

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น สัญญาณกระแสที่ฝั่งส่งนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ฝั่งรับนั้นจะมีค่าลดลงเหลือศูนย์เนื่องจากถูกตัดออก จากวงจร ยกเว้นเฟสที่ไม่ได้มีการลัดวงจรจะยังคงมีกระแสไหลอยู่ ส่วนสัญญาณแรงดันที่ฝั่งส่งแทบจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ฝั่งรับนั้นสัญญาณแรงดันก็จะมีค่าเป็นศูนย์ยกเว้นเฟสที่ไม่ได้มีการ ลัดวงจร จึงนำไปสู่การออกแบบการเก็บสัญญาณสำหรับการทดลอง โดยจะทำการเก็บลูก คลื่นสัญญาณเฉพาะลูกคลื่นสัญญาณกระแสที่ฝั่งส่งเท่านั้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น โดยจะมีการเพิ่มขึ้นของสัญญาณในลักษณะที่ แตกต่างกันไปตามลักษณะของการลัดวงจร ซึ่งจะแตกต่างจากสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันที่ ฝั่งรับที่ไม่ว่าจะมีการลัดวงจรชนิดใด ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเดิมเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.Switch เลือกค่าตัวเก็บประจุ

เป็นสวิตช์ปรับค่า 3 เฟสแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือระบบจำหน่ายเหนือดิน ติดตั้งบริเวณหน้าตู้แถวที่ 2 นับจากด้านบน มีด้วยกัน 4 สวิตช์ต่อ 1 ระบบดังที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3 และระบบจำหน่ายใต้ดิน ติดตั้งบริเวณหน้าตู้แถวที่ 3 นับจากด้านบน มีด้วยกัน 4 สวิตช์ต่อ 1 ระบบดังที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3 เช่นกัน โดยแต่ละแท็บของสวิตช์ดังกล่าวมีค่าตัวเก็บประจุดังนี้

ชุดระบบจำหน่ายเหนือดิน		ชุดระบบจำหน่ายใต้ดิน	
แท็บ	ค่าตัวเก็บประจุ (1/4 ส่วนของวงจรพาย) (nF)	แท็บ	ค่าตัวเก็บประจุ (1/4 ส่วนของวงจรพาย) (μ F)
0	6	0	0.05
1	12	1	0.1
2	18	2	0.15
3	24	3	0.2
4	30	4	0.25
5	36	5	0.3
6	42	6	0.35
7	48	7	0.4

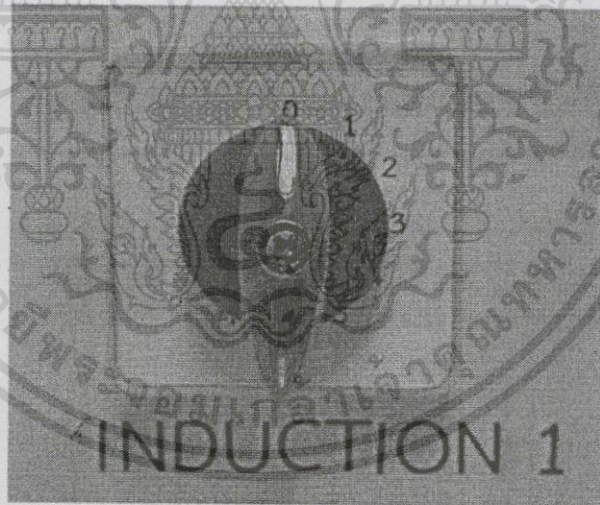


รูปที่ ๑ - 2 Switch เลือกค่าตัวเก็บประจุระบบจำหน่ายเหนือดิน

3.Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ

เป็นสวิตช์ปรับค่า 3 เฟสติดตั้งบริเวณหน้าตู้แถวล่างสุด นับจากด้านบน มีด้วยกัน 4 สวิตช์สำหรับตัวเหนี่ยวนำ 4 ตัวต่อ 1 เฟสดังที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยแต่ละแทปของสวิตช์ดังกล่าวมีค่าตัวเหนี่ยวนำดังนี้

สวิตช์ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3 (นับจากทางซ้าย)		สวิตช์ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2 และ 4 (นับจากทางซ้าย)	
แทป	ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH)	แทป	ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH)
0	Off (ไม่ต่อเข้ากับวงจร)	0	0 (ใช้เป็นทางผ่าน)
1	64.55	1	64.55
2	70.30	2	70.30
3	141.10	3	127.33
4	258.40	4	141.10
5	279.60	5	258.40
6	421.50	6	288.30
7	563	7	



รูปที่ ๓ - 3 Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ

ฉ.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ชุดทดลองให้เหมาะสม

จากภาคผนวก ข ที่ได้ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆไว้แล้วนั้น จะต้องมีการปรับเลือกค่าให้เป็นไปตามที่ได้คำนวณไว้ โดยการปรับค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุที่สวิตซ์ให้ ซึ่งสามารถปรับค่าได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ระบบจำหน่ายเหนื่อดิน

ตัวเหนี่ยวนำ :

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง(%)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	แทป Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องปรับ		ผลรวมค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
		Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวที่ 1,3	Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวที่ 2,4	
20	130	2	1	134.55
30	195	2	3	197.63
40	260	4	0	258.40
50	325	4	2	328.7
60	390	4	4	399.5
70	455	6	1	486.05
80	520	4	5	516.8

ตัวเก็บประจุ :

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง(%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (nF)	Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวที่ 1 และ 2 กับ 3 และ 4
20	24	1
30	36	2
40	48	3
50	60	4
60	72	5
70	84	6
80	96	7

ระบบจำหน่ายใต้ดิน

ตัวเหนี่ยวนำ :

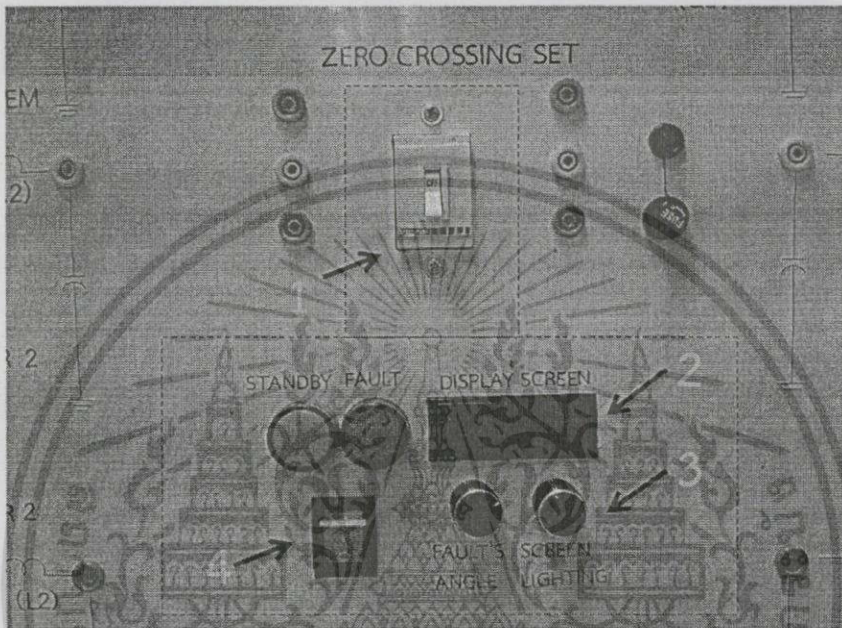
%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง(%)	ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบจำลอง (mH)	แทป Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องปรับ		ผลรวมค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
		Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวที่ 1,3	Switch เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวที่ 2,4	
20	140	3	0	141.10
30	210	3	2	211.4
40	280	5	0	279.6
50	350	5	2	349.9
60	420	6	0	421.5
70	490	6	2	491.8
80	560	7	0	563

ตัวเก็บประจุ :

%ของความยาวสายส่งที่วัดจากด้านส่ง(%)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำลอง (μF)	Switch เลือกค่าตัวเก็บประจุ ตัวที่ 1 และ 2 กับ 3 และ 4
20	0.2	1
30	0.3	2
40	0.4	3
50	0.5	4
60	0.6	5
70	0.7	6
80	0.8	7

ฉ.3 Zero Crossing

ชุดทดลองการลัดวงจรนี้จะใช้ชุด Zero Crossing (ในกรอบเส้นประ) เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของ Magnetic Contactor เพื่อสามารถกำหนดมุมการเกิดลัดวงจรได้ โดยแผงควบคุมในกรอบเส้นประ สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ ฉ - 4 แผงชุดควบคุมการทำงานของชุด Zero Crossing

คำอธิบาย

1. Circuit Breaker สำหรับใช้เปิด/ปิดชุด Zero Crossing
2. จอ LED แสดงมุมการลัดวงจรที่ต้องการ
3. สวิตช์หมุนปรับค่ามุมการลัดวงจร (Fault's Angle) และความสว่างของจอ LED (Screen Lighting)
4. ปุ่มสำหรับสั่งให้เกิดการลัดวงจรที่ควบคุมด้วย Zero Crossing

ประวัติผู้เขียน



นาย พัชพล สมโชค เกิดวันที่ 19 สิงหาคม 2535
 ที่อยู่ 234/1 หมู่ 9 ต. หมู่มั่น อ. เมือง
 จ. อุตรธานี 41000
 โทรศัพท์ 086-224-4025 Email : pattapol5@hotmail.com



นาย พิเชษฐ์ แก้วคำศรี เกิดวันที่ 19 สิงหาคม 2535
 ที่อยู่ 1918 ถ. เดชอุดม ต. ในเมือง อ. เมือง
 จ. นครราชสีมา 30000
 โทรศัพท์ 081-995-1054 Email : moskmit150@gmail.com



นางสาว พิมพ์ชนก สันติชัยรัตน์ เกิดวันที่ 12 กรกฎาคม 2535
 ที่อยู่ 625/1 ซ. พระงาม 4 ถ. ทางรถไฟตะวันตก
 ต. พระปฐมเจดีย์ อ. เมือง จ. นครปฐม 73000
 โทรศัพท์ 090-014-1103 Email : superbstreetwear@gmail.com



นางสาว พิลาสลักขณ์ ยินดีทรัพย์ เกิดวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2536
 ที่อยู่ 2107/3 หมู่ 7 ต. เทพารักษ์ อ. เมือง
 จ. สมุทรปราการ 10270
 โทรศัพท์ 084-326-4888 Email : piladelak.y@hotmail.com