

การเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง  
โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติพร้อมแบบดิจิทัลทั้งสองปลาย



นายยศวินทร์ บุรีทาน

ศูนย์วิทยพัทยากร  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACCURACY IMPROVEMENT ON LINE FAULT CLASSIFICATION AND LOCATION  
USING DIGITAL FAULT RECORDER DATA FROM BOTH ENDS



Mr Yossawin Bureetan

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทและตำแหน่งของ  
การลัดวงจรบนสายส่ง โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึก  
ความผิดปกติแบบดิจิทัลทั้งสองปลาย

โดย

นายยสวินทร์ นุรีทาน

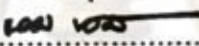
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

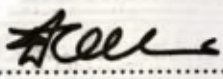
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

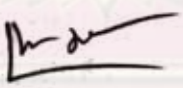
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ

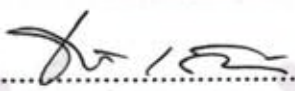
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสัตถอนันต์)

 ..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)

ศูนย์วิทยุโทรพัสดุภัณฑ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยศวินทร์ บุรีทาน : การเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทและตำแหน่งของการ  
ลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลทั้งสอง  
ปลาย. (ACCURACY IMPROVEMENT ON LINE FAULT CLASSIFICATION  
AND LOCATION USING DIGITAL FAULT RECORDER DATA FROM BOTH  
ENDS) อ. ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก: ศศ. คร. แนนบุญ หุนเจริญ, 75 หน้า.

อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE C37.114-2004 การระบุตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่ง  
ด้วยขั้นตอนวิธีแบบสองปลายจะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีแบบปลาย  
เดียว เนื่องจากไม่มีการละเลยผลของความต้านทานลัดวงจรและไม่จำเป็นต้องทราบประเภท  
ของการลัดวงจรก่อน อย่างไรก็ตาม การคำนวณด้วยวิธีดังกล่าว อาจมีความคลาดเคลื่อนสูงหาก  
เวลาของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลจากทั้งสองปลายไม่ตรงกัน วิทยานิพนธ์นี้ ทำ  
การทดสอบการระบุตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่งด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรง [1]  
ที่ได้มีการแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนทางเวลาด้วยวิธีเชิงวนซ้ำ โดยใช้ข้อมูลจากการจำลอง  
แบบเชิงพลวัตของการลัดวงจรบนสายส่งที่แปรค่าผลของความคลาดเคลื่อนทางเวลา และ  
ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลที่ติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่าย  
ผลิตแห่งประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรง สามารถระบุ  
ตำแหน่งของการลัดวงจรได้อย่างแม่นยำมาก นอกจากนี้ ได้เสนอวิธีปรับปรุงการคำนวณค่า  
เริ่มต้นเพื่อให้คำตอบที่ได้ผู้เข้าสู่คำตอบที่ถูกต้องในทุกการคำนวณ สุดท้ายได้นำเสนอขั้นตอน  
การประมวลผลข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติอย่างเป็นระบบโดยองค์รวมเพื่อที่จะ  
สามารถนำขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรงไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งและ  
ประเภทของการลัดวงจรบนสายส่งแบบอัตโนมัติเมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่งได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติศ.....  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

## 5170435321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DIGITAL FAULT RECORDER/ TWO-TERMINAL FAULT LOCATION/  
AUTOMATIC FAULT ANALYSIS/ TWO-TERMINAL FAULT CLASSIFICATION/  
UNSYNCHRONIZED MEASUREMENTS

YOSSAWIN BUREETAN : ACCURACY IMPROVEMENT ON LINE FAULT  
CLASSIFICATION AND LOCATION USING DIGITAL FAULT RECORDER  
DATA FROM BOTH ENDS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. NAEBBOON  
HOONCHAREON, Ph.D., 75 pp.

According to the standard IEEE c37.114-2004, two-terminal algorithm gives more accurate answer in locating fault on a transmission line than that of one-terminal algorithm since the effect of fault resistance needs not be neglected and the knowledge of fault type not be required. Nevertheless, the result maybe significantly incorrect unless the recorded data are well synchronized. This thesis examines performance of the accurate two-terminal fault location algorithm [1], in which it corrects the un-synchronization problem employing iterative technique, testing on both simulated data with varying time error, and on field measurements from digital fault recorders (DFR) installed at Electricity Generating Authority of Thailand transmission network. Test results confirm that the algorithm yields very accurate fault location. Additionally, an alternative initialization method has been proposed which assures convergence to the right answer in all cases. Finally, this thesis proposes the overall flows for processing DFR data so that the accurate fault location algorithm can be applied to an automated system for fault location and classification, when the data from both ends are available.

Department : ..Electrical Engineering.....  
Field of Study : ..Electrical Engineering.....  
Academic Year : .....2009.....

Student's Signature .....  
Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณสำหรับความช่วยเหลือ เป็นอย่างดียิ่งของ ผศ. ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แรงกระตุ้น แรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย อีกทั้งข้อคิด ประสบการณ์ เกี่ยวกับการ ดำเนินชีวิต และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย ศ. ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผศ. ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ และ รศ. ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ที่ได้เสียสละเวลา ตรวจสอบ และแก้ไขในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในวิชาเรียนที่เปิดสอน และให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ปัญหาที่เกี่ยวกับงานวิจัย

ขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาด้านความรู้ และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการ วิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

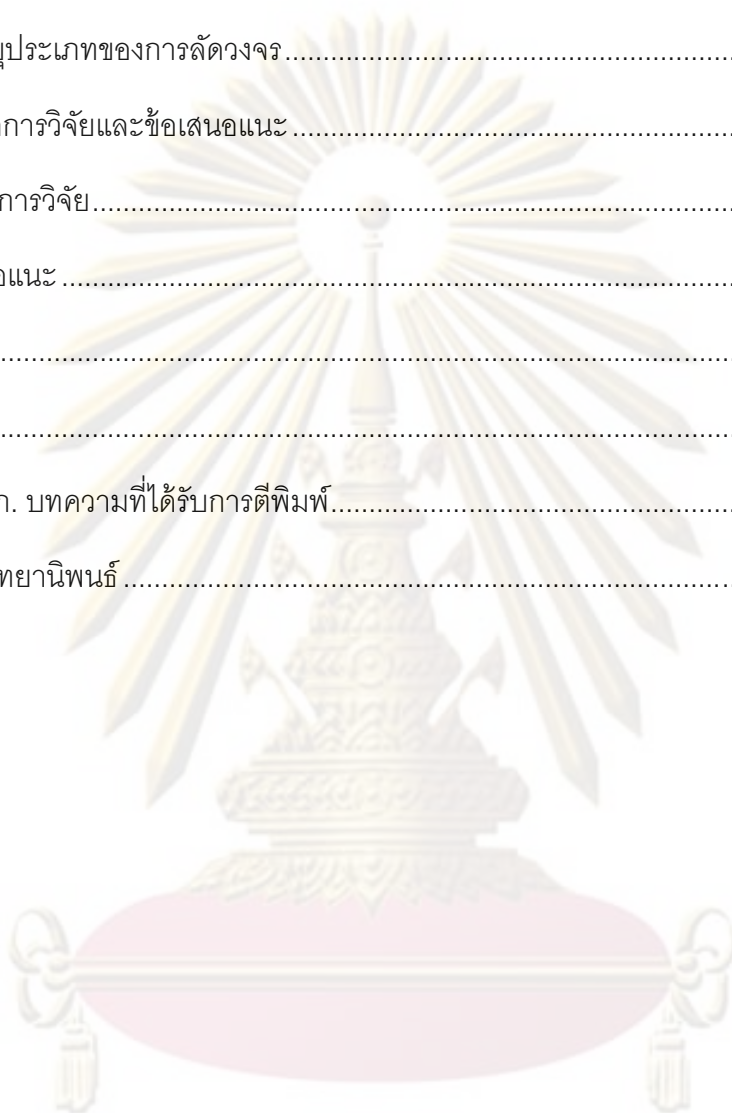
หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์ .....	4
บทที่ 2 การระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรบนสายส่ง .....	6
2.1 ส่วนประกอบลำดับ .....	6
2.2 การระบุตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง(Line Fault Location) .....	8
2.2.1 ขั้นตอนวิธีปลายเดี่ยวแบบมาตรฐาน .....	8
2.2.2 ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน .....	13
2.2.3 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงขั้นตอนวิธีแบบสองปลาย .....	15
2.2.4 ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ .....	17
2.3 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการระบุประเภทของการลัดวงจรบนสายส่ง .....	22
บทที่ 3 ระบบวิเคราะห์การลัดวงจรแบบอัตโนมัติ .....	25

3.1 การบันทึกข้อมูลความผิดปกติด้วยเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล .....	25
3.1.1 เครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล .....	25
3.1.2 การทำงานของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล .....	25
3.1.3 ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล .....	26
3.2 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติ .....	30
3.3 กระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ .....	31
3.3.1 การแปลงข้อมูลดิบ .....	32
3.3.2 การระยะเวลาของการลัดวงจร .....	34
3.3.3 การระบุลำดับของการลัดวงจรในการบันทึกข้อมูล .....	37
3.4 การระบุว่า การลัดวงจรเป็นการลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลาย .....	38
บทที่ 4 กระบวนการคำนวณเมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง .....	41
4.1 การเลือกช่วงในการคำนวณแบบสองปลาย .....	41
4.2 การระบุตำแหน่งของการลัดวงจร .....	43
4.2.1 การเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร .....	43
4.2.2 การคำนวณหามุมต่างระหว่างข้อมูล .....	44
4.3 การระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย .....	45
4.3.1 คุณลักษณะของการลัดวงจรบนสายส่ง .....	45
4.3.2 การระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง .....	51
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	55
5.1 ระบบทดสอบ .....	55
5.1.1 ข้อมูลการลัดวงจรที่ได้จากระบบจำลองการลัดวงจรชั่วคราว .....	55
5.1.2 ข้อมูลการลัดวงจรที่ได้จากระบบจริง .....	56
5.2 การทดสอบการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร .....	56



5.2.1 ผลการทดลองกับค่าจากระบบจำลอง.....	57
5.2.2 ผลจากข้อมูลจริง.....	61
5.3 การระบุประเภทของการลัดวงจร.....	65
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	75



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สูตรในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร .....	13
ตารางที่ 3.1	ตัวอย่างสัญญาณแอนาล็อกที่ DFR บันทึกค่าของสถานีไฟฟ้าบ้านค่าย.....	28
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างสัญญาณดิจิทัลที่ DFR บันทึกค่าของสถานีไฟฟ้าบ้านค่าย.....	28
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ลัดวงจรของการลัดวงจรแต่ละชนิด.....	47
ตารางที่ 4.2	ค่ากระแสการลัดวงจรในการลัดวงจรแต่ละประเภท .....	48
ตารางที่ 4.3	คุณลักษณะการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แบบสองเฟส และแบบสองเฟสลงดิน.	49
ตารางที่ 4.4	คุณลักษณะกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบสามเฟส และแบบสามเฟสลงดิน.	50
ตารางที่ 5.1	ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย .....	62
ตารางที่ 5.2	การเปรียบเทียบระหว่างวิธีขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรงกับขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	63
ตารางที่ 5.3	การทดสอบการระบุประเภทของการลัดวงจร.....	66

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรของส่วนประกอบลำดับ .....	7
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลการลัดวงจรบนสายส่ง .....	8
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบ เฟส a ลงดิน .....	9
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c .....	10
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดิน .....	12
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรโดยการพิจารณาขนาดของแรงดัน ....	16
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลการลัดวงจรเมื่อคิดผลของความไม่ตรงกันทางเวลา .....	18
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของสายส่งระหว่างเกิดการลัดวงจรเมื่อพิจารณาแบบจำลองสายส่งระยะยาว .....	19
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลในไฟล์โครงร่างของการเก็บข้อมูลการลัดวงจร .....	27
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน .....	29
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบสองเฟส .....	29
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน .....	30
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการคำนวณหาค่าตอบเมื่อมีข้อมูลการลัดวงจร .....	31
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในกระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ .....	32
รูปที่ 3.7 กราฟกระแสของสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร .....	34
รูปที่ 3.8 แผนภาพการระบุเวลาของการลัดวงจร .....	37
รูปที่ 3.9 การลัดวงจรที่มีการปิดกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ .....	38
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงกระบวนการในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสองปลาย .....	41
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรที่มีผลของการเปิดวงจรที่เวลาต่างกันของเบรกเกอร์ .....	42
รูปที่ 4.3 แผนภูมิการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจร .....	43
รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่ง .....	45

รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลในการคำนวณกระแสขณะเกิดการลัดวงจร .....	46
รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดิน .....	50
รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรบนสายส่ง .....	52
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ประเภทของการลัดวงจร .....	53
รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวระบบที่ใช้ในการจำลองการลัดวงจรแบบชั่วคราว .....	55
รูปที่ 5.2 การศึกษาผลของกระทบของตำแหน่งการลัดวงจรต่อความถูกต้อง .....	58
รูปที่ 5.3 การศึกษาผลของความต้านทานลัดวงจรต่อความถูกต้อง .....	60
รูปที่ 5.4 การวัดระยะทาง $x$ ในการคำนวณบนสายส่ง .....	64
รูปที่ 5.5 แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนสายส่ง ที่ได้จากการคำนวณในกรณีศึกษาที่ 2 .....	64
รูปที่ 5.6 แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนสายส่ง ที่ได้จากการคำนวณในกรณีศึกษาที่ 8 .....	65



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งไฟฟ้า เป็นระบบที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปริมาณมากจากระบบผลิตไฟฟ้าไปยังระบบจำหน่าย ความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้าที่ทำให้สายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้อาจส่งผลกระทบต่อปัจจัยต่างๆ ในระบบส่งไฟฟ้าเช่น ความน่าเชื่อถือของระบบ กำลังสูญเสียในระบบ การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพของระบบส่งไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการแก้ปัญหาของความผิดปกติให้เร็วที่สุด จึงจำเป็นในระบบส่งไฟฟ้า

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้า เช่น การเกิดการลัดวงจรเนื่องจากมีวัตถุไปพาดถูกสายไฟฟ้านั้น จะต้องได้รับการแก้ไขโดยผู้ปฏิบัติการ การที่จะสามารถเข้าไปแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นโดยที่ไม่ทราบประเภทและตำแหน่งโดยประมาณของความผิดปกติเป็นเรื่องยาก ในหลายๆกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้น ไม่สามารถหาสาเหตุของความผิดปกตินั้นได้ เนื่องจากการระบุประเภทและตำแหน่งของความผิดปกติมีความคลาดเคลื่อนสูง การส่งเริ่มการใช้งานสายส่งเส้นที่เกิดความผิดปกติโดยยังไม่ผ่านการแก้ไขความผิดปกติเป็นเรื่องที่มีความเสี่ยงสูง ดังนั้นการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรที่แม่นยำ จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติการสามารถแก้ไขปัญหาของความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

ระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบัน ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกความผิดปกติที่เรียกว่าเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล(Digital Fault Recorder:DFR) เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้า เครื่องบันทึกจะทำการเก็บค่าสัญญาณกระแส แรงดัน และสัญญาณดิจิทัล เช่น สัญญาณรีเลย์ โดยสัญญาณกระแสและแรงดันที่บันทึกได้นั้น สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่งได้

ในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ การคำนวณโดยใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียวของสายส่ง(One-Terminal Algorithm) การคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง (Two-Terminal Algorithm) และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากหลายๆ สถานีไฟฟ้า (Multi-Terminal Algorithm) โดยส่วนมากข้อมูลที่ได้จากการบันทึกของอุปกรณ์บันทึกความผิดปกตินั้น จะเป็นข้อมูลเพียงปลายเดียวของ

สายส่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อข้อมูลของการลัดวงจรจากทั้งสองปลายของสายส่ง การระบุตำแหน่งและประเภทของการเกิดการลัดวงจร ควรจะมีความถูกต้องมากขึ้น

ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่ง มีมาตรฐาน IEEE C37.114-2004 [2] อธิบายถึงการคำนวณโดยใช้ข้อมูลเพียงหนึ่งปลายของสายส่ง แต่เนื่องจากการใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียวของสายส่ง จะให้ข้อมูลที่ไมเพียงพอต่อการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร จึงทำให้การคำนวณจะต้องมีการประมาณว่าค่าความต้านทานลัดวงจรมีค่าเป็นศูนย์และกระแสจากทั้งสองปลายมีมุมเฟสตรงกัน ดังนั้น หากเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีขนาดความต้านทานลัดวงจรสูงหรือกระแสจากทั้งสองปลายมีมุมเฟสที่ต่างกันจะทำให้การคำนวณมีความคลาดเคลื่อน

ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่งที่เกิดการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE C37.114-2004 [2] นั้น จะไม่คำนึงถึงชนิดของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น เนื่องจากในการคำนวณได้มีการคิดรวมผลของแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรไว้แล้ว จึงทำให้ความต้านทานลัดวงจรมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้อย แต่เนื่องจากสมการที่สนใจมี 3 สมการ (สมการเฟส a b และ c หรือ สมการลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์) ในขณะที่คำตอบที่สนใจมีเพียงตำแหน่งของการลัดวงจร ดังนั้นในบทความ [3] จึงเสนอการใช้การประมาณกำลังสองน้อยสุดในการหาคำตอบของระยะการลัดวงจร แต่อย่างไรก็ดี การคำนวณทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา จะมีความผิดพลาดมาก หากเครื่องบันทึกทั้งสองปลายมีความคลาดเคลื่อนทางเวลา

เพื่อแก้ปัญหาด้านเวลา มีบทความ [3-12] ได้เสนอการคำนวณโดยที่เวลาของเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลายของสายส่งไม่จำเป็นต้องตรงกัน แต่ในการปัญหาสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะต้องใช้การคำนวณแบบวนซ้ำในการหาคำตอบ ซึ่งการคำนวณแบบวนซ้ำอาจจะให้คำตอบในการคำนวณที่ผิด หรือไม่สามารให้คำตอบออกมาได้

ส่วนในการระบุประเภทของการลัดวงจร มีหลายวิธีการที่ได้ถูกนำเสนอ เช่น การใช้การแปลงเวฟเลข [13-16], การใช้ขนาดของกระแสเฟสและกระแสลำดับศูนย์ [17], การใช้ขนาดและมุมเฟสของกระแสลำดับ [18], การประยุกต์เครือข่ายประสาทเทียม [19,20], หรือการประยุกต์พีชชีลอจิก [16,21,22] แต่อย่างไรก็ดี การระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียวของสายส่ง จะต้องมีการประมาณในการวิเคราะห์ ดังนั้น จึงทำให้ผลการวิเคราะห์มีความผิดพลาดในบางเงื่อนไขของการลัดวงจร

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรงกับทั้งข้อมูลที่ได้จากการจำลองการลัดวงจรบนสายส่ง และกับข้อมูลที่ได้จากการเครื่องบันทึกความผิดพลาดแบบดิจิทัล ที่ติดตั้งในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง

ประเทศไทย และได้นำเสนอการคำนวณค่าตั้งต้นของมูลค่าความคลาดเคลื่อนทางเวลาของเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลาย เพื่อให้คำตอบที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำในทุกเงื่อนไขการลัดวงจร จากนั้น ได้เสนอการระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง แล้วจึงนำเสนอระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการลัดวงจรแบบอัตโนมัติ ที่จะสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงกับระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยที่มีการติดตั้งเครื่องบันทึกความผิดปกติไว้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำตรงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองและข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล
2. เพื่อนำวิธีการวิเคราะห์แบบ 2 ปลาย ไปใช้ในระบบวิเคราะห์หาตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรแบบอัตโนมัติ ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้จริงในระบบไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. จะสมมติให้มีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่งที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
2. การวิเคราะห์ทำบนระบบส่งไฟฟ้า
3. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากการบันทึกของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลหรือข้อมูลจากการจำลองที่มีอัตราการสุ่มข้อมูลที่เท่ากัน
4. ไม่พิจารณาผลของกรณีที่เกิดการลัดวงจรมากกว่า 1 ตำแหน่งในเวลาเดียวกัน
5. พิจารณาเฉพาะการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่งทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร โดยไม่พิจารณาการลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า
6. ไม่พิจารณาผลของการลัดวงจรที่มีการพัฒนาประเภทของการลัดวงจร

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการทำการวิจัย มีขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาเครื่องบันทึกความผิดปกติของแบบดิจิทัลและการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึก
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณการลัดวงจร, การระบุประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง
3. ศึกษาการจำลองการลัดวงจรแบบชั่วคราว
4. รวบรวมข้อมูลการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย
5. ทดสอบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่งด้วยวิธีตามมาตรฐาน และวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง
6. พัฒนาระบบการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร
7. พัฒนาระบบการเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทของการลัดวงจร
8. พัฒนาระบบในการวิเคราะห์ข้อมูลการลัดวงจรบนสายส่งแบบอัตโนมัติ
9. ทำการทดสอบกับข้อมูลการลัดวงจรจริงที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้า
10. วิเคราะห์ผลสรุปผลงานวิจัย
11. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำที่ปรับปรุงแล้ว ไปประยุกต์ใช้กับระบบการวิเคราะห์หาประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจรแบบอัตโนมัติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติของแบบดิจิทัลซึ่งติดตั้งไว้ในระบบส่งไฟฟ้าได้

## 1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน: กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน และการศึกษางานวิจัยในอดีต ซึ่งประกอบไปด้วย การระบุตำแหน่งการลัดวงจรและการระบุประเภทของการลัดวงจร

บทที่ 3 ระบบวิเคราะห์การลัดวงจรแบบอัตโนมัติ จะกล่าวถึงการเครื่องบันทึกความผิดปกติของแบบดิจิทัลและการเก็บข้อมูลของเครื่อง จากนั้นจึงอธิบายระบบในการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อมี



การบันทึกข้อมูลการลัดวงจรเกิดขึ้น แล้วจึงกล่าวถึงการจัดการข้อมูล ก่อนที่จะนำไปคำนวณในกระบวนการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรต่อไป

บทที่ 4 การคำนวณเมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง จะอธิบายถึงวิธีการที่จะใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะประกอบไปด้วย วิธีการในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร และวิธีการในการระบุประเภทของการลัดวงจร

บทที่ 5 จะนำเสนอการทดสอบระบบ โดยจะอธิบายถึงข้อมูลที่จะใช้ในการทดสอบ แล้วจึงแสดงผลการทดสอบรวมถึงการวิเคราะห์ผลต่อไป

บทที่ 6 นำเสนอบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรบนสายส่ง

ข้อมูลแรงดันและกระแสที่บันทึกได้ขณะเกิดการลัดวงจร สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรได้ ในการวิเคราะห์จะทำการแปลงข้อมูลเฟสเซอร์ที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบส่วนประกอบลำดับ โดยการแปลงส่วนประกอบลำดับ จะมีรายละเอียดในการคำนวณแสดงในหัวข้อที่ 2.1 จากข้อมูลเฟสเซอร์ จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของการลัดวงจรได้ด้วยการคำนวณดังแสดงในหัวข้อที่ 2.2 และหลักการต่างๆ ที่ใช้ในการระบุประเภทของการลัดวงจร จะมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 2.3

#### 2.1 ส่วนประกอบลำดับ

ในการคำนวณการลัดวงจรในระบบส่ง จะใช้การคำนวณด้วยส่วนประกอบลำดับ ซึ่งจะคิดผลของความเหนี่ยวนำกันระหว่างเฟสไว้แล้วในการคำนวณ และเนื่องจากการคำนวณในส่วนประกอบลำดับ จะไม่มีการเหนี่ยวนำกันระหว่างแต่ละส่วนประกอบในระบบที่สมดุล ความยุ่งยากในการคำนวณลดลง การแปลงจากแรงดันและกระแสลำดับ ไปเป็นแรงดันและกระแสเฟส จะมีสมการในการแปลงดังนี้

$$V^{abc} = TV_a^{012} \quad (2.1)$$

$$I^{abc} = TI_a^{012} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ และ } a = 1 \angle 120^\circ$$

จากการแปลงแรงดันและกระแสในส่วนประกอบลำดับไปเป็นแรงดันและกระแสเฟส ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนประกอบลำดับจะสามารถหาได้โดย

$$V^{abc} = Z^{abc} I^{abc} \quad (2.3)$$

$$TV_a^{012} = Z^{abc} TI_a^{012} \quad (2.4)$$

$$V_a^{012} = T^{-1} Z^{abc} TI_a^{012} \quad (2.5)$$

$$V_a^{012} = Z_a^{012} I_a^{012} \quad (2.6)$$

ดังนั้น

$$Z^{012} = T^{-1} Z^{abc} T \quad (2.7)$$

เมื่อคิดผลของความเหนี่ยวนำของสายส่ง และสมมุติให้สายส่งมีความสมมาตร จะได้ค่าเฟสอิมพีแดนซ์ของสายส่งในปริมาณเฟสคือ

$$Z_L^{abc} = \begin{bmatrix} z_L^s & z_L^m & z_L^m \\ z_L^m & z_L^s & z_L^m \\ z_L^m & z_L^m & z_L^s \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $z_L^s$  คือค่าอิมพีแดนซ์จากตัวเอง และ  $z_L^m$  คือค่าอิมพีแดนซ์จากการเหนี่ยวนำระหว่างเฟส

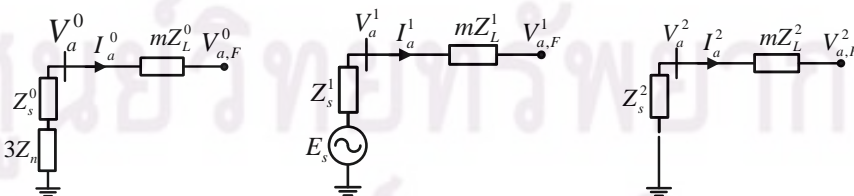
แทนค่าสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.7) จะสามารถเขียนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งในส่วนประกอบลำดับได้เป็น

$$Z_L^{012} = \begin{bmatrix} z_L^0 & 0 & 0 \\ 0 & z_L^1 & 0 \\ 0 & 0 & z_L^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\text{เมื่อ } z_L^0 = z_L^s + 2z_L^m, z_L^1 = z_L^s - z_L^m, z_L^2 = z_L^s - z_L^m$$

จากสมการที่ (2.9) พบว่า แม้ค่าอิมพีแดนซ์เฟสในระบบสมมาตรที่มีความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งในส่วนประกอบลำดับไม่มีการเหนี่ยวนำระหว่างกัน ดังนั้นจึงลดความซับซ้อนในการคำนวณการลัดวงจร

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบลำดับขณะเกิดการลัดวงจร จะสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.1



a) ส่วนประกอบลำดับศูนย์ b) ส่วนประกอบลำดับบวก c) ส่วนประกอบลำดับลบ

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรของส่วนประกอบลำดับ

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการกระแสและแรงดันขณะเกิดการลัดวงจรในส่วนประกอบลำดับได้ดังนี้

$$V_a^0 = I_a^0 m Z_L^0 + V_{a,F}^0 \quad (2.10)$$

$$V_a^1 = I_a^1 m Z_L^1 + V_{a,F}^1 \quad (2.11)$$

$$V_a^2 = I_a^2 m Z_L^2 + V_{a,F}^2 \quad (2.12)$$

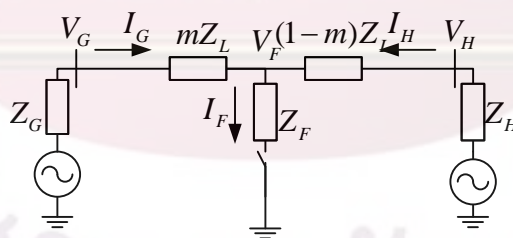
ค่าของแรงดันที่คำนวณได้นี้ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณการระบุตำแหน่งการลัดวงจร ด้วยวิธีการต่างๆ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 2.2 การระบุตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง (Line Fault Location)

การคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่งในโครงข่ายวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาวิธีการคำนวณ 2 แบบ คือ การคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบปลายเดียวและการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแบบสองปลาย ซึ่งการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐานและขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐานจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 และในหัวข้อที่ 2.2.2 ตามลำดับ ส่วนในหัวข้อที่ 2.2.3 จะกล่าวสรุปการทบทวนงานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย แล้วจึงอธิบายหลักการในการคำนวณโดยด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำในหัวข้อที่ 2.2.4

### 2.2.1 ขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน

หลักการในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว จะใช้วงจรสมมูลที่แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลการลัดวงจรบนสายส่ง

สมมติให้ในการลัดวงจรที่เกิดขึ้น มีข้อมูลการลัดวงจรจากฝั่ง G เพียงฝั่งเดียว จะสามารถเขียนสมการแรงดันและกระแสโดยใช้ข้อมูลจากปลาย G ได้เป็น

$$V_G = m Z_L I_G + Z_F I_F \quad (2.13)$$

$$\frac{V_G}{I_G} = m Z_L + Z_F \frac{I_F}{I_G} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) สมมุติให้อิมพีแดนซ์ลัดวงจรเป็นความต้านทาน และกระแส  $I_F$  และ  $I_G$  มีเฟสตรงกัน จะสามารถหาค่า  $m$  ได้ดังนี้

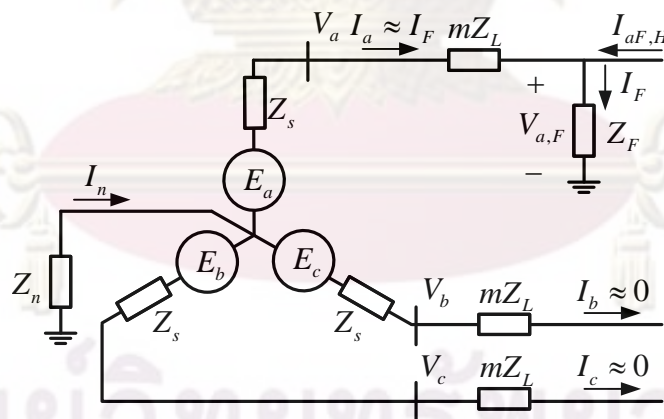
$$m = \frac{\text{imag}(V_G / I_G)}{\text{imag}(Z_L)} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) ค่า  $m$  คือค่าอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่เกิดการลัดวงจรต่อความยาวสายทั้งหมด ทั้งนี้ค่าอัตราส่วน  $V_G / I_G$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของการลัดวงจร ดังจะแสดงรายละเอียดในการคำนวณต่อไป

จากสมการที่ (2.10)-(2.12) เป็นสมการเงื่อนไขการลัดวงจรของสายส่ง ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณร่วมกับเงื่อนไขในการเกิดการลัดวงจร ณ จุดที่เกิดการลัดวงจรต่อไป เงื่อนไขในการคำนวณ ณ จุดเกิดการลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจร โดยจะแบ่งเป็น การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แบบสองเฟส แบบสองเฟสลงดิน และแบบสามเฟส ซึ่งแต่ละชนิดของการลัดวงจรจะมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

#### การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่มีการลัดวงจรที่เฟส a สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบ เฟส a ลงดิน

จากรูปที่ 2.3 จะสามารถเขียนสมการเงื่อนไขการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรได้เป็น

$$V_{a,F} = I_F Z_F \quad (2.16)$$

นำสมการที่ (2.10), (2.11) และ (2.12) มาบวกกัน จะได้

$$V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 = I_a^0 mZ_L^0 + I_a^1 mZ_L^1 + I_a^2 mZ_L^2 + V_{a,F}^0 + V_{a,F}^1 + V_{a,F}^2 \quad (2.17)$$

จากสูตรการแปลง จะได้

$$V_{a,F} = V_{a,F}^0 + V_{a,F}^1 + V_{a,F}^2 \quad (2.18)$$

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (2.19)$$

แทนค่าสมการที่ (2.18) และ (2.19) ลงใน (2.17) จะได้

$$V_a = I_a^0 mZ_L^0 + I_a^1 mZ_L^1 + I_a^2 mZ_L^2 + V_{a,F} \quad (2.20)$$

สมมติให้  $Z_L^2 = Z_L^1$  และ แรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรมีค่าน้อยมาก จะสามารถจัดรูปสมการที่ (2.20) ใหม่ได้เป็น

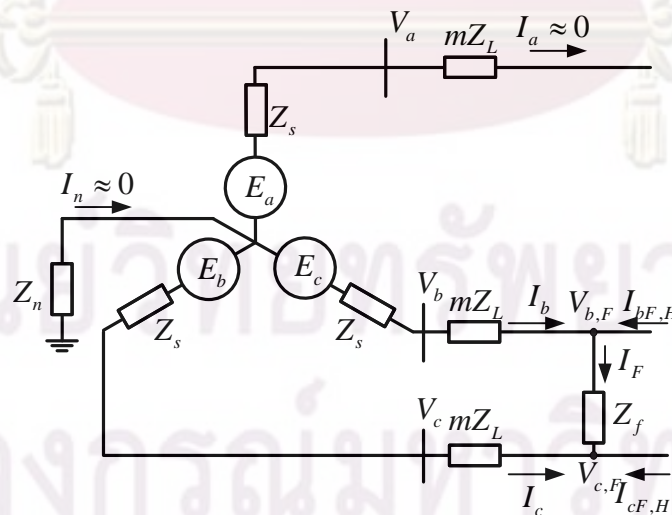
$$V_a = I_a^0 m(Z_L^0 - Z_L^1) + mZ_L^1 I_a^1 \quad (2.21)$$

$$mZ_L^1 = \frac{V_a}{I_a^0 + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1) I_a^0}{Z_L^1}} \quad (2.22)$$

ในการลัดวงจรที่มีเฟส b หรือเฟส c เป็นเฟสที่ลัดวงจร สมการที่ (2.22) จะใช้กระแสและแรงดันของเฟสที่เกิดการลัดวงจรในการคำนวณ

### การลัดวงจรแบบสองเฟส

การลัดวงจรแบบสองเฟสที่มีการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c

จากรูปที่ 2.4 เมื่อพิจารณา ณ จุดเกิดการลัดวงจรสามารถเขียนเงื่อนไขการลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_{b,F} - V_{c,F} = I_F Z_F \quad (2.23)$$

$$I_{a,F} = 0 \quad (2.24)$$

$$I_{b,F} = -I_{c,F} = I_F \quad (2.25)$$

แทนค่า  $V_{b,F}$  และ  $V_{c,F}$  จากสมการการแปลง ลงใน สมการที่ (2.23) จะได้

$$(a^2 - a)(V_{a,F}^1 - V_{a,F}^2) = I_F Z_F \quad (2.26)$$

แทนสมการที่ (2.11) และ (2.12) ลงในสมการที่ (2.26) และประมาณให้  $Z_F \approx 0$  และ  $Z_L^1 = Z_L^2$  จะได้

$$(a^2 - a)[V_a^1 - V_a^2 - mZ_L^1 I_a^1 - mZ_L^2 I_a^2] = 0 \quad (2.27)$$

$$[V_a^1 - V_a^2 - mZ_L^1 I_a^1 - mZ_L^2 I_a^2] = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{V_a^1 - V_a^2}{I_a^1 - I_a^2} = mZ_L^1 \quad (2.29)$$

จากสูตรการแปลง จะสามารถเขียนกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับลบได้เป็น

$$I_a^1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2 I_c) \quad (2.30)$$

$$I_a^2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + aI_c) \quad (2.31)$$

นำสมการที่ (2.30) ลบสมการที่ (2.31) จะได้

$$I_a^1 - I_a^2 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2 I_c - I_a - a^2 I_b - aI_c) \quad (2.32)$$

$$I_a^1 - I_a^2 = \frac{1}{3}[(a - a^2)I_b - (a - a^2)I_c] \quad (2.33)$$

$$I_a^1 - I_a^2 = \frac{1}{3}(a - a^2)(I_b - I_c) \quad (2.34)$$

จากสูตรการแปลง ทำการแก้สมการในลักษณะเดียวกัน จะได้สมการแรงดันเป็น

$$(V_a^1 - V_a^2) = \frac{1}{3}(a - a^2)(V_b - V_c) \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการที่ (2.34) และ (2.35) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$mZ_L^1 = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} \quad (2.36)$$

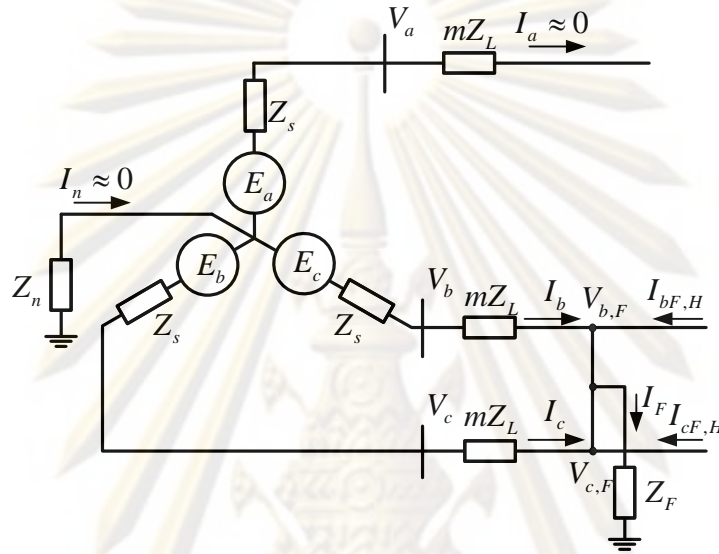
ดังนั้นจะได้สมการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c คือ

$$m = \text{Im} \left( \frac{V_{bc}}{I_{bc}} \right) / \text{Im}(Z_L^1) \quad (2.37)$$

ในการลัดวงจรที่มีเฟสอื่นเป็นที่ลัดวงจร จะใช้ค่ากระแสและแรงดันระหว่างเฟสที่เกิดการลัดวงจรในการคำนวณ

### การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

การลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดินสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดิน

จากรูปที่ 2.5 หากพิจารณา ณ จุดเกิดการลัดวงจร สามารถเขียนเงื่อนไขการลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_{b,F} = V_{c,F} = Z_F (I_{b,F} + I_{c,F}) \quad (2.38)$$

$$I_{a,F} = I_{a,F}^0 + I_{a,F}^1 + I_{a,F}^2 = 0 \quad (2.39)$$

จากสมการการแปลง สามารถเขียน  $V_{b,F}$  และ  $V_{c,F}$  อยู่ในรูปส่วนประกอบลำดับได้ดังนี้

$$V_{b,F} = V_{a,F}^0 + a^2 V_{a,F}^1 + a V_{a,F}^2 \quad (2.40)$$

$$V_{c,F} = V_{a,F}^0 + a V_{a,F}^1 + a^2 V_{a,F}^2 \quad (2.41)$$

จาก  $V_{b,F} = V_{c,F}$  จะได้

$$V_{a,F}^0 + a^2 V_{a,F}^1 + a V_{a,F}^2 = V_{a,F}^0 + a V_{a,F}^1 + a^2 V_{a,F}^2 \quad (2.42)$$

$$V_{a,F}^1 = V_{a,F}^2 \quad (2.43)$$

แทนค่าสมการที่ (2.11) และ (2.12) ลงในสมการที่ (2.43) จะได้

$$V_a^1 - I_a^1 m Z_L^1 = V_a^2 - I_a^2 m Z_L^2 \quad (2.44)$$



ให้  $Z_L^1 = Z_L^2$  จัดรูป (2.44) จะได้

$$mZ_L^1 = \frac{V_a^1 - V_a^2}{I_a^1 - I_a^2} \quad (2.45)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.45) เป็นสมการเดียวกับสมการที่ (2.29) ดังนั้น จึงสามารถเขียนสูตรในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจร ของการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินได้เหมือนกับการลัดวงจรแบบสองเฟสดังแสดงในสมการที่ (2.37)

ในการลัดวงจรแบบสมมาตร จะพิจารณาเหมือนกรณีการลัดวงจรแบบสองเฟสแต่จะสามารถใช้ค่ากระแสและแรงดันระหว่างเฟสใดๆ ก็ได้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2.1

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสรุปสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรในสายส่งโดยแยกตามประเภทของการลัดวงจร ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร

ลักษณะการลัดวงจร	Positive-sequence impedance equation ( $mZ_L^1 =$ )
a-g	$V_a / (I_a + kI_R)$
b-g	$V_b / (I_b + kI_R)$
c-g	$V_c / (I_c + kI_R)$
a-b หรือ a-b-g	$V_{ab} / I_{ab}$
b-c หรือ b-c-g	$V_{bc} / I_{bc}$
a-c หรือ a-c-g	$V_{ca} / I_{ca}$
a-b-c หรือ a-b-c-g	เลือกอันใดก็ได้ $V_{ab} / I_{ab}, V_{bc} / I_{bc}, V_{ca} / I_{ca}$

โดยที่  $k = (Z_L^0 - Z_L^1) / 3Z_L^1$  และ  $I_R = 3I_a^0$

ในการคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจร จะทำการหาค่า  $m$  จากสูตรในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของระยะการลัดวงจรต่อความยาวสายทั้งหมด มาหาตำแหน่งของการลัดวงจรซึ่งจากสมการที่ได้พิสูจน์มาแล้วจะพบว่า วิธีการนี้จะมีความแม่นยำเมื่อความต้านทานการลัดวงจรมีค่าต่ำหรือกระแสของเฟสที่ลัดวงจรขณะเกิดการลัดวงจรมีเฟสตรงกัน

## 2.2.2 ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน

ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรในสายส่งเมื่อมีข้อมูลจากปลายทั้งสองด้านของสายส่ง สูตรที่ใช้ในการคำนวณจะไม่ขึ้นกับชนิดของการลัดวงจร โดยค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณอาจจะเป็นค่าในส่วนประกอบลำดับ หรือเป็นค่าในเชิงเฟส การคำนวณการลัดวงจรที่

เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีข้อมูลทั้งสองด้านของสายส่งสามารถเขียนสมการแสดงจากวงจรสมมูลรูปที่ 2.2 ได้ดังนี้

$$V_G^{abc} = mZ_L^{abc} I_G^{abc} + V_F \quad (2.46)$$

$$V_H^{abc} = (1-m)Z_L^{abc} I_H^{abc} + V_F \quad (2.47)$$

นำสมการที่ (2.46) ลบสมการที่ (2.47) เพื่อกำจัดพจน์  $V_F$  จะได้

$$V_G^{abc} - V_H^{abc} = mZ_L^{abc} I_G^{abc} - (1-m)Z_L^{abc} I_H^{abc} \quad (2.48)$$

จากสมการค่าในเชิงเฟสสามารถแทนได้ด้วยค่าในส่วนประกอบลำดับ ดังนี้

$$V_G^{abc} = TV_G^{012} \quad (2.49)$$

$$V_H^{abc} = TV_H^{012} \quad (2.50)$$

$$I_G^{abc} = TI_G^{012} \quad (2.51)$$

$$I_H^{abc} = TI_H^{012} \quad (2.52)$$

$$TV_G^{012} - TV_H^{012} = mZ_L^{abc} TI_G^{012} - (1-m)Z_L^{abc} TI_H^{012} \quad (2.53)$$

$$V_G^{012} - V_H^{012} = mT^{-1}Z_L^{abc} TI_G^{012} - (1-m)T^{-1}Z_L^{abc} TI_H^{012} \quad (2.54)$$

$$T^{-1}Z_L^{abc} T = Z_L^{012} \quad (2.55)$$

$$V_G^{012} - V_H^{012} = mZ_L^{012} I_G^{012} - (1-m)Z_L^{012} I_H^{012} \quad (2.56)$$

$$V_G^{012} - V_H^{012} + Z_L^{012} I_H^{012} = mZ_L^{012} (I_G^{012} + I_H^{012}) \quad (2.57)$$

จากสมการที่ (2.57) ในบทความ [3] ได้เสนอให้ใช้เทคนิคการประมาณกำลังสองน้อยสุดในการแก้สมการ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} Y^0 \\ Y^1 \\ Y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 \\ M^1 \\ M^2 \end{bmatrix} m = \bar{Y} = \bar{M} m \quad (2.58)$$

โดยที่

$$\bar{Y} = V_G^{012} - V_H^{012} + Z_L^{012} I_H^{012}$$

$$\bar{M} = Z_L^{012} (I_G^{012} + I_H^{012})$$

จากการประมาณกำลังสองน้อยสุดจะได้

$$m = (\bar{M}^+ \bar{M})^{-1} \bar{M}^+ \bar{Y} \quad (2.59)$$

โดยที่  $\bar{M}^+$  คือ conjugate transpose ของ  $\bar{M}$

จากสมการจะพบว่า คำตอบที่ได้จะไม่ขึ้นกับชนิดของการลัดวงจรหรือความต้านทานลัดวงจร อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนทางเวลาระหว่างเครื่องบันทึกทั้งสองปลาย มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจร

### 2.2.3 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงขั้นตอนวิธีแบบสองปลาย

จากมาตรฐาน IEEE c37.114-2004 การระบุตำแหน่งของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลทั้งสองปลายของสายส่ง การคำนวณสามารถกระทำได้โดยไม่มีการประมาณในการคำนวณ แต่เวลาของเครื่องเก็บข้อมูลทั้งสองต้องตรงกันอย่างมาก ดังนั้น จึงมีหลายบทความเสนอวิธีในการพัฒนาการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

#### ใช้การคำนวณแบบวนซ้ำ

ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE c37.114 ตัวแปรเพียงตัวเดียวที่ไม่ทราบค่าคือ ตำแหน่งของการลัดวงจร ( $m$ ) และหากพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนทางเวลา จะทำให้มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น คือ มุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาหรือมุมที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนทางเวลาระหว่างเครื่องบันทึกทั้งสองปลาย ( $e^{j\delta}$  หรือ  $\delta$ ) ดังนั้น ใน [3] จึงเสนอให้ใช้สมการจากทั้งสามเฟสในการคำนวณ และเนื่องจากสมการที่ได้มี 3 สมการ แต่ตัวแปรที่ต้องการทราบค่ามีเพียง 2 ตัวแปร จึงใช้เทคนิคการประมาณกำลังสองน้อยสุดในการแก้สมการ

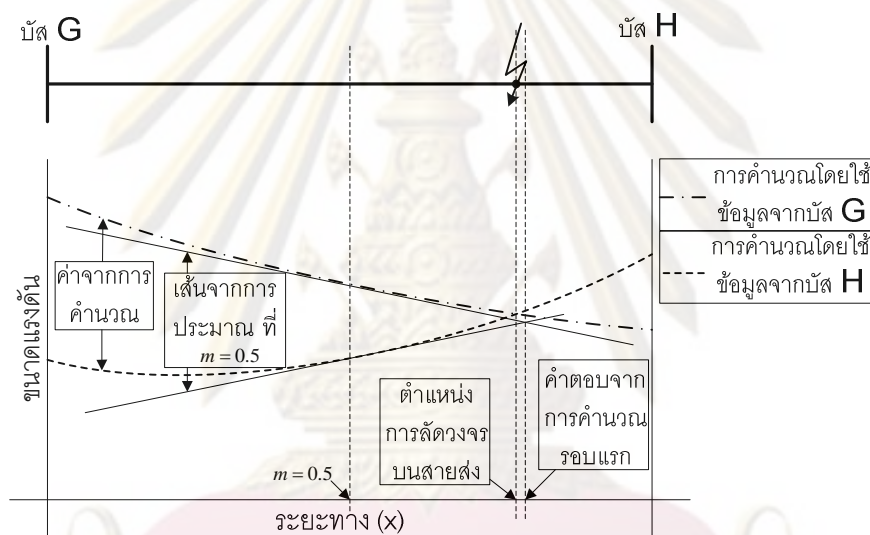
ในลักษณะเดียวกัน บทความ [4] เสนอการใช้ส่วนประกอบลำดับบวกในการคำนวณ ซึ่งจากสมการของแรงดันและกระแสของส่วนประกอบลำดับบวก จะสามารถแยกสมการออกได้เป็น 2 สมการคือ สมการส่วนจริงและสมการส่วนจินตภาพ จึงทำให้ได้ 2 สมการในการคำนวณหาคำตอบของ 2 ตัวแปร ซึ่งในบทความ [4] เสนอการใช้การคำนวณแบบวนซ้ำของ Newton-Raphson ในการคำนวณหาค่า  $\delta$  ออกมาก่อน แล้วจึงนำค่า  $\delta$  ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจร ( $m$ ) ต่อไป

จากที่ได้กล่าวมา ทั้งสองวิธีใช้แบบจำลองสายส่งเป็นแบบสายส่งระยะสั้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ละเลยผลของค่าตัวเก็บประจุของสายส่ง จึงทำให้การคำนวณมีความผิดพลาด เมื่อใช้ในการคำนวณ กรณีที่สายส่งมีความยาวปานกลางถึงยาว หรือแรงดันพิกัดของสายส่งเส้นดังกล่าวมีค่าสูง

## ใช้การคำนวณหาขนาดของแรงดัน

การเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกความผิดพลาด จะมีการเก็บข้อมูลทั้งข้อมูลกระแสและข้อมูลแรงดัน แรงดันที่จุดต่างๆ บนสายส่งจะสามารถคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลเพียงด้านเดียวของสายส่ง ดังนั้นในบทความ [5, 6] จึงเสนอการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจร โดยมีหลักการคือ ในการคำนวณแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนสายส่งโดยใช้ข้อมูลขณะเกิดการลัดวงจรในการคำนวณ โดยปกติแล้ว จะมีเพียงตำแหน่งเดียวที่ค่าแรงดันจากการคำนวณด้วยข้อมูลทั้งสองปลายจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวคือตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

จากหลังการดังกล่าว ใน [5, 6] ได้ใช้การคำนวณแบบวนซ้ำในการหาจุดที่ข้อมูลทั้งสองปลายให้ขนาดแรงดันที่เท่ากัน โดยมีตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรโดยการพิจารณาขนาดของแรงดัน

จากรูปที่ 2.6 ให้ค่าเริ่มต้นในการคำนวณคือระยะกึ่งกลางของสายส่ง จากนั้น จะทำการประมาณให้แรงดันที่ระยะดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ซึ่งตำแหน่งของการลัดวงจรจากการคำนวณรอบแรกคือจุดตัดระหว่างเส้นประมาณด้วยข้อมูลจากบัส G และบัส H จากนั้น จะทำการคำนวณจนคำตอบที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อย

จากวิธีดังกล่าว สามารถให้คำตอบที่แม่นยำเนื่องจากการคำนวณหาแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ จะใช้แบบจำลองสายส่งแบบกระจายในการคำนวณ แต่เนื่องจากในการคำนวณ จะพิจารณาเฉพาะขนาดของแรงดัน ดังนั้นหากกราฟขนาดแรงดันจากทั้งสองปลายมีจุดตัดสองจุด จะไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าจุดใดเป็นคำตอบที่ถูกต้อง

## พิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ของสายส่ง

เนื่องจากการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกความผิดพลาด จะมีการเก็บข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจรมาด้วย ดังนั้น ในบทความ [7,9] ได้เสนอการใช้ข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร เพื่อช่วยในการเพิ่มสมการในการคำนวณอีกสองสมการเชิงซ้อน หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ของสายส่ง ตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบจากการคำนวณจะประกอบไปด้วย 1.ตำแหน่งของการลัดวงจร ( $m$ ) 2.มุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา ( $\delta$ ) 3.ค่าความต้านทานของสายส่ง ( $r$ ) 4.ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง ( $x$ ) 5.ค่าความเก็บประจุของสายส่ง ( $b$ ) จากนั้น จึงใช้การคำนวณแบบวนซ้ำด้วยเทคนิคการประมาณกำลังสองน้อยสุดในการคำนวณหาคำตอบ

ด้วยหลักการเดียวกัน บทความ [8, 9] เสนอการใช้ส่วนประกอบลำดับลบ แทนการใช้ข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร ซึ่งจะสามารถให้คำตอบจากการคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่สมการในการคำนวณ จะขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจร

จากวิธีที่กล่าวมาทั้งสอง มีการเพิ่มสมการและตัวแปรในการคำนวณ ซึ่งในบางครั้งการคำนวณจะไม่สามารถให้คำตอบของการคำนวณได้

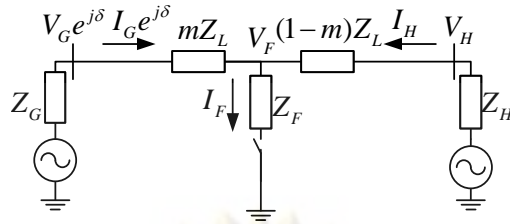
นอกจากนี้ การระบุตำแหน่งของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่ง ยังสามารถพิจารณาในกรณีที่มีข้อมูลการลัดวงจรจากหลายปลาย ดังที่เสนอไว้ในมาตรฐาน IEEE C37.114-2004 [2] และในบทความ [3]

### 2.2.4 ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแมนตรง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการปรับปรุงการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรที่ได้เสนอไว้โดย J. Lzykowski, et al. [1] ซึ่งจะใช้การคำนวณแบบวนซ้ำในการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเนื่องจากส่วนประกอบลำดับบวกจะปรากฏในการลัดวงจรทุกชนิด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ส่วนประกอบลำดับบวกในการคำนวณ เพื่อลดผลของความผิดพลาดจากการระบุประเภทของการลัดวงจร การคำนวณจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ 1. การคำนวณค่าเริ่มต้น 2. การคำนวณแบบวนซ้ำและ 3. การสิ้นสุดการคำนวณ ดังจะอธิบายรายละเอียดต่อไป

#### การคำนวณค่าเริ่มต้น

กระบวนการในการคำนวณค่าเริ่มต้น จะใช้การกำหนดสมการในการคำนวณดังแสดงไว้ใน [4] โดยจะใช้แบบจำลองสายส่งเป็นแบบสายส่งระยะสั้น ดังแสดงวงจรสมมูลระหว่างเกิดการลัดวงจรได้รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลการลัดวงจรเมื่อคิดผลของความไม่ตรงกันทางเวลา

จากรูปที่ 2.7 เมื่อคิดผลของความคลาดเคลื่อนทางเวลาของเครื่องบันทึกทั้งสองปลาย จะสามารถเขียนสมการแสดงแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลแต่ละด้านของสายส่งได้ดังนี้

$$V_F^G(m, \delta) = [V_G - mZ_L I_G] e^{j\delta} \quad (2.60)$$

$$V_F^H(m) = V_H - (1-m)Z_L I_H \quad (2.61)$$

เมื่อ

$m$  = อัตราส่วนระหว่างระยะทางการลัดวงจรจากฝั่ง G กับความยาวรวมของสายส่ง

$\delta$  = มุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา

$V_F^G$  = แรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรเมื่อคำนวณจากทางปลาย G

$V_F^H$  = แรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรเมื่อคำนวณจากทางปลาย H

เนื่องจากแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรเป็นแรงดันเดียวกัน ดังนั้นแรงดันที่ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรเมื่อคำนวณจากทั้งสองฝั่งต้องมีค่าเท่ากัน คือ

$$V_F^G(m, \delta) = V_F^H(m) \quad (2.62)$$

$$[V_G - mZ_L I_G] e^{j\delta} = V_H - (1-m)Z_L I_H \quad (2.63)$$

จากสมการที่ (2.63) จะสามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$A \cos(\delta) + B \sin(\delta) = C \quad (2.64)$$

เมื่อ

$$A = \text{imag} \left( Z_L^* \left( (V_H - Z_L I_H) I_G^* - V_G I_H^* \right) \right)$$

$$B = \text{real} \left( -Z_L^* \left( (V_H - Z_L I_H) I_G^* + V_G I_H^* \right) \right)$$

$$C = \text{imag} \left( -Z_L^* \left( (V_H - Z_L I_H) I_H^* - V_G I_G^* \right) \right)$$

$x^*$  คือ conjugate ของ  $x$

จัดรูปสมการที่ (2.64) ใหม่ เพื่อที่จะหาค่า  $\delta$  จะได้

$$\sin(\delta + \alpha) = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2.65)$$

$$\text{เมื่อ } \sin(\alpha) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \cos(\alpha) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

ควอดแดนต์ของ  $\alpha$  สามารถหาได้จากการพิจารณาเครื่องหมายของ A และ B หลังจากนั้น จึงนำค่าของ  $\alpha$  ที่ได้ มาคำนวณหาค่า  $\delta$  ได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - \alpha \quad (2.66)$$

คำตอบที่ได้จากฟังก์ชัน  $\arcsin$  จะมี 2 คำตอบ ในขั้นต้น จะนำคำตอบที่ได้ทั้ง 2 ไปคำนวณหาค่าตำแหน่งของการลัดวงจรดังสมการที่ (2.67)

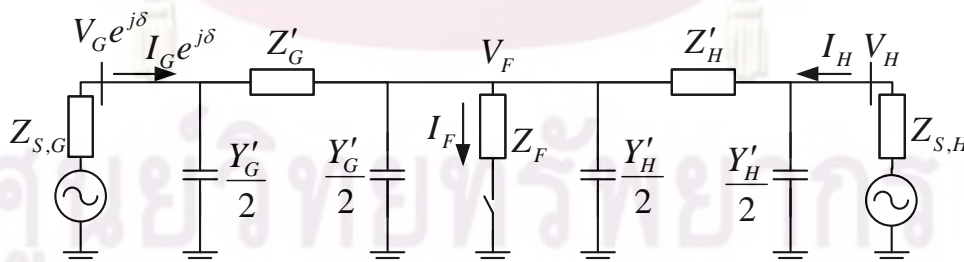
$$m = \text{real}\left(\frac{V_G e^{j\delta} - (V_H - Z_L I_H)}{Z_L (I_G e^{j\delta} + I_H)}\right) \quad (2.67)$$

การเลือกค่าเริ่มต้นในการคำนวณแบบวนซ้ำจะเลือกค่าของ  $\delta$  ที่ให้ค่าของ  $m$  ที่มีความสมจริงมากกว่า คือ  $0 < m < 1$  หรือตำแหน่งโดยประมาณของการลัดวงจร อยู่ในช่วงของความสายส่งเส้นที่สนใจ แล้วจึงเลือกค่า  $\delta$  ดังกล่าว และค่า  $m$  ที่สอดคล้องกัน เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

เมื่อได้ค่า  $\delta_0$  และค่า  $m_0$  จะนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณแบบวนซ้ำในหัวข้อต่อไป

### การคำนวณแบบวนซ้ำ

ในการคำนวณแบบวนซ้ำจะพิจารณาสายส่งที่มีพารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed parameter Line Model) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของสายส่งระหว่างเกิดการลัดวงจรเมื่อพิจารณาแบบจำลองสายส่งระยะยาว

เมื่อ

$$Z'_G = Z_C \sinh(\gamma ml), \quad \frac{Y'_G}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh(\gamma ml)$$

$$Z'_H = Z_C \sinh(\gamma(1-m)l), \quad \frac{Y'_H}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh(\gamma(1-m)l)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{z_L}{y_L}}, \quad \gamma = \sqrt{z_L y_L}$$

$z_L$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ( $\Omega / km$ )

$y_L$  คือ แอดมิตแตนซ์ของสายส่ง ( $S / km$ )

$l$  คือ ความยาวรวมของสายส่ง ( $km$ )

จากรูปที่ 2.8 สามารถเขียนสมการแสดงกระแสและแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรเมื่อคิดผลของมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา ( $\delta$ ) ได้ดังนี้

$$V_F^G(m, \delta) = (V_G \cosh(\gamma ml) - Z_C I_G \sinh(\gamma ml)) e^{j\delta} \quad (2.68)$$

$$V_F^H(m) = V_H \cosh(\gamma(1-m)l) - Z_C I_H \sinh(\gamma(1-m)l) \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.68) และสมการที่ (2.69) แรงดันที่จุดเกิดการลัดวงจรเมื่อคิดจากทั้งทางฝั่ง G และทางฝั่ง H จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$F(\delta, m) = V_F^G(\delta, m) - V_F^H(m) = 0 \quad (2.70)$$

$$F(\delta, m) = (V_H \cosh(\gamma(1-m)l) - Z_C I_H \sinh(\gamma(1-m)l)) - (V_G \cosh(\gamma ml) - Z_C I_G \sinh(\gamma ml)) e^{j\delta} \quad (2.71)$$

จากสมการที่ (2.70) ซึ่งเป็นสมการเชิงซ้อน จึงสามารถแยกออกได้เป็น 2 สมการคือ สมการส่วนจริง และสมการส่วนจินตภาพ และจากสมการดังกล่าว จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยกัน 2 ตัวคือ  $m$  และ  $\delta$  จากสมการไม่เชิงเส้น 2 สมการและตัวแปรไม่ทราบค่า 2 ตัว จะใช้การคำนวณแบบวนซ้ำของ Newton-Raphson ซึ่งมีสมการในการคำนวณคือ

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(F_n) \times F_n \quad (2.72)$$

โดยที่

$$X_{n+1} = \begin{bmatrix} m_{n+1} \\ \delta_{n+1} \end{bmatrix}, \quad X_n = \begin{bmatrix} m_n \\ \delta_n \end{bmatrix}, \quad F_n = \begin{bmatrix} F_{real}(m_n, \delta_n) \\ F_{imag}(m_n, \delta_n) \end{bmatrix}$$

$$J(F_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{real}(m_n, \delta_n)}{\partial m} & \frac{\partial F_{real}(m_n, \delta_n)}{\partial \delta} \\ \frac{\partial F_{imag}(m_n, \delta_n)}{\partial m} & \frac{\partial F_{imag}(m_n, \delta_n)}{\partial \delta} \end{bmatrix}$$

$n$  คือตัวเลขรอบปัจจุบันที่กำลังทำการคำนวณ

แทนค่า  $F_{real}(m_n, \delta_n)$  และ  $F_{imag}(m_n, \delta_n)$  ในสมการ (2.72) จะสามารถเขียนสมการแสดงค่าต่างๆ ในเมตริก  $J$  ได้ดังนี้

$$\frac{\partial F_{real}(m_n, \delta_n)}{\partial m} = \text{real}[\gamma l (W_n^G + W_n^H)] \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial F_{real}(m_n, \delta_n)}{\partial \delta} = -\text{real}[V_{F,n}^G] \sin(\delta_n) - \text{imag}[V_{F,n}^G] \cos(\delta_n) \quad (2.74)$$



$$\frac{\partial F_{imag}(m_n, \delta_n)}{\partial m} = imag \left[ \gamma l (W_n^G + W_n^H) \right] \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial F_{imag}(m_n, \delta_n)}{\partial \delta} = -imag \left[ V_{F,n}^G \right] \sin(\delta_n) + real \left[ V_{F,n}^G \right] \cos(\delta_n) \quad (2.76)$$

เมื่อ

$$V_{F,n}^G = V_G \cosh(\gamma m_n l) - Z_C I_G \sinh(\gamma m_n l)$$

$$W_n^G = (V_G \sinh(\gamma m_n l) - Z_C I_G \cosh(\gamma m_n l)) e^{j\delta_n}$$

$$W_n^H = V_H \sinh(\gamma(1-m_n)l) - Z_C I_H \cosh(\gamma(1-m_n)l)$$

การคำนวณจะใช้สมการที่ (2.72) คำนวณแบบวนซ้ำ จนกระทั่งคำตอบที่ได้เข้าเงื่อนไขในการหยุดการคำนวณ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### เงื่อนไขในการหยุดการคำนวณ

ในการคำนวณแบบวนซ้ำจะมีเงื่อนไขในการหยุดการคำนวณด้วยกัน 2 เงื่อนไขคือ

1. เมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบของสมการ

ในกรณีนี้การคำนวณแบบวนซ้ำจะหยุดการคำนวณเมื่อค่าตำแหน่งของการลัดวงจรจากการคำนวณใน 2 รอบที่ติดกันมีค่าน้อยกว่าค่าค่าหนึ่ง โดยจะได้คำตอบจากการคำนวณพร้อมกันทั้ง 2 ตัวแปลคือ มุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา ( $\delta$ ) และตำแหน่งของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ( $m \times l$ ) ตัวอย่างเช่น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้การคำนวณแบบวนซ้ำหยุดการคำนวณเมื่อตำแหน่งการลัดวงจร ( $m$ ) จากการคำนวณ 2 ครั้งที่ติดกันมีค่าต่างกันน้อยกว่า  $10^{-4}$  ( $m_n - m_{n-1} < 10^{-4}$ )

2. เมื่อจำนวนรอบในการคำนวณมากกว่าจำนวนรอบที่กำหนดไว้

เนื่องจากในบางกรณี การคำนวณแบบวนซ้ำจะไม่สามารถเข้าสู่คำตอบที่ถูกต้อง ซึ่งอาจจะมีผลมาจากการกำหนดค่าเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสมหรือสมการนั้นไม่สามารถหาคำตอบที่แท้จริงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดใช้ในการคำนวณ โดยให้พิจารณาว่าหากจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเกิดค่าค่าหนึ่ง การคำนวณนั้น จะไม่สามารถเข้าสู่คำตอบที่ถูกต้องได้แล้ว และในกรณีนี้ จะไม่พิจารณาคำตอบที่ได้จากการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเกิน 100 รอบ จะถือว่าการคำนวณนั้นไม่สามารถให้คำตอบที่ถูกต้องได้อีก

เมื่อการคำนวณสิ้นสุดลง คำตอบที่ได้จากการคำนวณคือมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา และตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งสามารถแปลงเป็นระยะทางจริง ( $l_1$ ) โดย

$$l_1 = m \times l \quad (2.77)$$

ตำแหน่งของการลัดวงจรที่คำนวณได้ เป็นระยะทางที่วัดจากสถานีไฟฟ้า G ระยะทางที่ได้จากการคำนวณนี้ได้มีการรวมผลของการหย่อนของสายส่งแล้ว ซึ่งปรากฏอยู่ในค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ดังนั้น ระยะทางที่คำนวณได้จึงถือเป็นระยะทางตามแนวราบที่ผู้ปฏิบัติการสามารถคำนวณได้จากผลรวมระยะห่างของเสาส่งแต่ละต้น

### 2.3 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการระบุประเภทของการลัดวงจรบนสายส่ง

ประเภทการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มคือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน, การลัดวงจรแบบสองเฟส, การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน และการลัดวงจรแบบสามเฟส จากงานวิจัยในอดีต จะมีหลักการต่างๆ ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของการลัดวงจรบนสายส่ง มีดังนี้

#### 1) การใช้การแปลงเวฟเลข

การใช้การแปลงเวฟเลขจะมีหลักการคือ ในเฟสที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันอย่างรวดเร็ว และจะเกิดความถี่สูงขึ้นในเวลาเริ่มต้นของการลัดวงจร ซึ่งการแปลงเวฟเลข จะสามารถแยกความถี่บางช่วงออกมาได้ ดังนั้นเมื่อนำเฟสที่มีการลัดวงจรมาทำการแปลงเวฟเลขจะมีค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลขเกิดขึ้นในช่วงความถี่สูง ในการระบุประเภทของการลัดวงจร จะหาค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์เวฟเลขของเฟสใดที่มีค่าเกินค่าที่กำหนดไว้ จะระบุได้ว่าเฟสนั้นเป็นเฟสที่เกิดการลัดวงจร และหาค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์เวฟเลขของกระแสลำดับศูนย์เกินค่าที่กำหนดไว้ จะได้ว่าการลัดวงจรนั้นเป็นการลัดวงจรแบบลงดิน [13-16]

#### 2) การใช้เฟสเซอร์ของกระแส

ในการใช้เฟสเซอร์ของกระแสจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีย่อยคือ

##### 2.1) การใช้ขนาดของกระแสขณะเกิดการลัดวงจร

กระแสที่ใช้ในการระบุประเภทของการลัดวงจรคือ กระแสเฟส และกระแสลำดับศูนย์ คือ หาค่ากระแสเฟสของเฟสใดเกินค่าที่กำหนดไว้ ( $I_{TH1}$ ) จะได้ว่าเฟสนั้นคือเฟสที่เกิดการลัดวงจร และหาค่ากระแสลำดับศูนย์เกินค่าที่กำหนดไว้ ( $I_{TH2}$ ) จะได้ว่าการลัดวงจรเป็นการลัดวงจรแบบลงดิน [17] ตัวอย่างเช่น หากทำการคำนวณจากข้อมูลแล้วได้  $|I_a| > I_{TH1}$ ,  $|I_b| > I_{TH1}$  และ  $|I_a^0| > I_{TH2}$  จะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลดังกล่าว เป็นลัดวงจรระหว่างเฟส a และเฟส b ลงดิน

## 2.2) การใช้ขนาดและมุมเฟสของกระแสลำดับขณะเกิดการลัดวงจร

การจำแนกประเภทของการลัดวงจรด้วยวิธีนี้จะใช้กระแสลำดับในการวิเคราะห์ โดยจะมีค่าดัชนีที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกัน 3 กลุ่มคือ 1. มุมระหว่างกระแสลำดับบวกและกระแสเฟสของแต่ละเฟส 2. มุมระหว่างกระแสลำดับบวกและลำดับลบของแต่ละเฟส 3. อัตราส่วนขนาดของกระแสลำดับศูนย์และกระแสลำดับลบต่อกระแสลำดับบวก [18] ตัวอย่างเช่นการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดินจะมีค่าดัชนีเป็น

$$\begin{aligned} |\arg(I_a^1) - \arg(I_a^2)| &= 0^\circ \\ |\arg(I_b^1) - \arg(I_b^2)| &= 120^\circ \\ |\arg(I_c^1) - \arg(I_c^2)| &= 120^\circ \\ \frac{|I^0|}{|I^1|} > k, \quad \frac{|I^0|}{|I^2|} > k_1 \end{aligned}$$

จากค่าที่ระบุนั้นเป็นค่าในอุดมคติของการลัดวงจร ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น ค่ากระแสไหลด ขนาดของความต้านทานลัดวงจร ทำให้ค่ามุมต่างมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าในอุดมคติ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ จะใช้ค่าของมุมเป็นช่วง เช่น ใช้มุม  $0^\circ - 30^\circ$  แทนค่ามุม  $0^\circ$

## 3) การประยุกต์เครือข่ายประสาทเทียม

การใช้เครือข่ายประสาทเทียม จะต้องใช้กระบวนการในการเรียนรู้จากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งอาจมาจากข้อมูลการลัดวงจรจริงที่เกิดขึ้นจริง หรือข้อมูลการลัดวงจรที่ได้จากการจำลอง ยิ่งข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้มีปริมาณมาก จะยิ่งเพิ่มความถูกต้องในการระบุประเภทของการลัดวงจร [19-20] แต่หากการลัดวงจรที่เกิดขึ้น มีลักษณะที่แตกต่างไปจากข้อมูลที่ได้ใช้ในการเรียนรู้มา กระบวนการนี้จะไม่สามารถระบุประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้

## 4) การประยุกต์ฟuzzyลอจิก

การประยุกต์ฟuzzyลอจิก เป็นการประยุกต์รูปแบบในการตัดสินใจ ซึ่งอาจใช้ร่วมกับวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้ง 3 วิธี โดยจะคิดผลของความไม่แน่นอนของดัชนีที่ใช้ มาตั้งเป็นกฎในการระบุประเภทของการลัดวงจร เช่น ในบทความที่ [16, 21, 22] ได้นำการประยุกต์ฟuzzyลอจิกมาใช้ร่วมกับวิธีในหัวข้อที่ 2) จะได้กฎการวิเคราะห์การลัดวงจรแบบเฟส a ลงดินเป็น

ถ้า

$$\begin{aligned} |\arg(I_a^1) - \arg(I_a^2)| & \text{มีค่าประมาณ } 30^\circ \\ |\arg(I_b^1) - \arg(I_b^2)| & \text{มีค่าประมาณ } 150^\circ \\ |\arg(I_c^1) - \arg(I_c^2)| & \text{มีค่าประมาณ } 90^\circ \\ \frac{|I^0|}{|I^1|} & \text{มีค่าประมาณ } 1 \text{ และ } \frac{|I^0|}{|I^2|} & \text{มีค่าประมาณ } 1 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์ใช้พีชคณิตเชิงซ้อนเกี่ยวกับการแปลงเวฟเลตดังที่เสนอไว้ในบทความ [16] หรือยังมีการประยุกต์ใช้พีชคณิตเชิงซ้อนเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมดังที่เสนอไว้ในบทความ [22]

จากวิธีการที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว จะมุ่งเน้นในการระบุประเภทของการลัดวงจร โดยการใช้ข้อมูลจากปลายเดียวของสายส่ง เนื่องจากบางวิธีการที่ใช้จะมีหลักการทางทฤษฎีที่ไม่แน่ชัด หรืออาจจะต้องมีการประมาณในการคำนวณ จึงทำให้ในการประยุกต์ใช้งานจริง ยังคงมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ แต่เมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง การระบุประเภทของการลัดวงจรจะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเสนอการระบุประเภทของการลัดวงจรโดยการใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายไว้หัวข้อ 4.3 ต่อไป

จากหลักการวิเคราะห์ที่ได้มีการเสนอไว้แล้วในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายถึงนำการวิเคราะห์ทั้งตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรมาทำการพัฒนา เพื่อให้สามารถวิเคราะห์เหตุการณ์การลัดวงจรแบบอัตโนมัติได้ ดังจะอธิบายรายละเอียดในบทถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ระบบวิเคราะห์การลัดวงจรแบบอัตโนมัติ

เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบส่ง เครื่องบันทึกความผิดปกติที่สามารถตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบได้ จะทำการบันทึกข้อมูลของสัญญาณต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าที่เครื่องบันทึกนั้นได้ติดตั้งไว้ โดยรายละเอียดของการบันทึกข้อมูลจะถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นจึงนำข้อมูลการลัดวงจรมาเข้าสู่ระบบวิเคราะห์การลัดวงจรแบบอัตโนมัติ ดังจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งในเมื่อข้อมูลเข้าสู่ระบบการวิเคราะห์แล้ว จะผ่านกระบวนการในการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ ดังมีรายละเอียดอธิบายในหัวข้อที่ 3.3

#### 3.1 การบันทึกข้อมูลความผิดปกติด้วยเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย จะมีการบันทึกไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆ ด้วยเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.1.1 และรายละเอียดการทำงานของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลจะอยู่ในหัวข้อที่ 3.1.2 ส่วนในหัวข้อที่ 3.1.3 จะแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการบันทึก

##### 3.1.1 เครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล

ในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบันได้มีการติดตั้งเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลหรือที่เรียกว่า Digital Fault Recorder (DFR) ไว้ที่สถานีไฟฟ้าที่สำคัญ เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น เครื่องบันทึกความผิดปกติที่ตรวจพบความขัดข้องได้ จะทำการบันทึกค่าสัญญาณต่างๆ ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ เพื่อที่จะใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับวิเคราะห์ด้วยผู้เชี่ยวชาญต่อไป

ช่องสัญญาณที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกความผิดปกติจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1. ช่องสัญญาณสำหรับเก็บข้อมูลอะนาล็อก ได้แก่ ข้อมูลแรงดันของสายส่ง แรงดันของบัส กระแสของสายส่ง กระแสของอุปกรณ์ต่างๆ กระแสขดลวดตติยภูมิของหม้อแปลง และ 2. ช่องสัญญาณสำหรับเก็บข้อมูลดิจิทัล ได้แก่ สถานะการทำงานของเบรกเกอร์ สัญญาณการทำงานของรีเลย์ป้องกันชนิดต่างๆ สัญญาณจากเซนเซอร์

##### 3.1.2 การทำงานของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล

เงื่อนไขในการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกความผิดปกติจะเป็นการกำหนดค่าขีดจำกัดของขนาดของแรงดันต่ำ (Undervoltage Threshold) ขนาดของกระแสสูง (Overcurrent

Threshold) และการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสัญญาณดิจิทัล หากมีสัญญาณใดเข้าเงื่อนไขการทำงานที่ตั้งไว้ เครื่องบันทึกความผิดปกติจะทำการบันทึกค่าสัญญาณทุกสัญญาณภายในสถานีไฟฟ้านั้นที่ได้ถูกนำเข้ามาในช่องสัญญาณของเครื่อง ในกรณีที่ในสถานีไฟฟ้ามีเครื่องบันทึกความผิดปกติมากกว่า 1 เครื่อง สัญญาณทุกสัญญาณที่ถูกนำเข้ามาในช่องสัญญาณของเครื่องทุกเครื่องจะถูกบันทึกเมื่อเครื่องบันทึกความผิดปกติเครื่องใดเครื่องหนึ่งตรวจพบความผิดปกติในระบบ

ช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการเกิดความผิดปกติแต่ละครั้ง ในเหตุการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลาคือ 1. ช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ (Pre-fault) 2. ช่วงระหว่างการเกิดความผิดปกติ (During-fault) และ 3. ช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติ (Post-fault) เนื่องจากความยาวของช่วงระหว่างการเกิดความผิดปกติจะขึ้นอยู่กับความผิดปกติแต่ละครั้งที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการปรับตั้งค่าของเครื่องบันทึกผู้ปฏิบัติการจะเป็นผู้กำหนดความยาวของเวลาในการบันทึกช่วงก่อนเกิดความผิดปกติและช่วงหลังเกิดความผิดปกติ แต่หากช่วงระหว่างการเกิดความผิดปกติมีความยาวมาก เครื่องบันทึกจะบันทึกข้อมูลจนถึงค่าความสูงสุดของแต่ละเหตุการณ์ที่เครื่องจะบันทึกได้

โดยทั่วไปเครื่องบันทึกความผิดปกติจะถูกตั้งค่าพารามิเตอร์ในการบันทึกเหตุการณ์ดังนี้

- ขีดจำกัดแรงดันต่ำ: 85% ของค่าแรงดันพิกัด
- ขีดจำกัดกระแสสูง: 120% ของค่าพิกัดของวงจรนั้นๆ
- ช่วงเวลาก่อนเกิดความผิดปกติ: 150 มิลลิวินาที
- ช่วงเวลาหลังเกิดความผิดปกติ: 2 วินาที

โดยทั่วไประยะเวลาโดยรวมของทั้ง 3 ช่วง ในแต่ละเหตุการณ์ จะยาวประมาณ 4 วินาที

### 3.1.3 ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล

ไฟล์ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติจะมีมาตรฐานในการเก็บข้อมูลที่เรียกว่า common format for transient data exchange (COMTRADE IEEE C37.111.1999) [23] ซึ่งไฟล์ข้อมูลจะเป็นไฟล์ชนิดที่มีการแบ่งข้อมูลด้วยสัญลักษณ์ลูกน้ำ ที่มีความถี่ในการสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกันไปตามข้อจำกัดของแต่ละผู้ผลิต ตั้งแต่ 3000-12800 Hz การเก็บข้อมูลตามมาตรฐาน จะมีไฟล์ที่ได้จากการเก็บข้อมูลทั้งหมด 4 ไฟล์ คือ ไฟล์หัว(Header File) ไฟล์โครงร่าง (Config File), ไฟล์ข้อมูล(Data File) และไฟล์รายละเอียด(Information File) ซึ่งไฟล์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย ไฟล์โครงร่างและไฟล์ข้อมูล

ไฟล์โครงร่าง เป็นไฟล์ที่ระบุถึงรายละเอียดของข้อมูลที่เกิดขึ้นได้ในไฟล์ข้อมูล เช่น สถานีไฟฟ้าที่ทำการเก็บข้อมูล ชื่อสัญญาในแต่ละคอล์มน์ของไฟล์ข้อมูล เวลาที่เก็บข้อมูล และมีตัวอย่างของข้อมูลในไฟล์โครงร่าง แสดงในรูปที่ 3.1

38.TTK_1	13,80812 BF LO TR/BIN13,0
44.12A.32D	14,80832 BF LO TR/BIN14,0
1.V80BUS-2ABS----.A.TS10-3.V.11.57487716,0.0.-32767,32767	15,80312 BKR. TRIP/BIN15,0
2.V80BUS-2BBS----.B.TS11-1.V.11.57487716,0.0.-32767,32767	16,80322 BKR. TRIP/BIN16,0
3.V80BUS-2CBS----.C.TS11-2.V.11.57487716,0.0.-32767,32767	17,80332 BKR. TRIP/BIN1,0
4.I80CYP-2ALN----.A.TS7-3.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	18,80712 BKR. TRIP/BIN2,0
5.I80CYP-2BLN----.B.TS8-1.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	19,80732 BKR. TRIP/BIN3,0
6.I80CYP-2CLN----.C.TS8-2.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	20,80812 BKR. TRIP/BIN4,0
7.I80TL3-2ALN----.A.TS9-3.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	21,80832 BKR. TRIP/BIN5,0
8.I80TL3-2BLN----.B.TS10-1.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	22.NS#1 CAR REC/BIN6,0
9.I80TL3-2CLN----.C.TS10-2.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	23.NS#2 CAR REC/BIN7,0
10.I80NS--1ALN----.A.TS5-2.A.0.5231147310,0.0.-32767,32767	24.AT1#1 CAR REC/BIN8,0
11.I80NS--1BLN----.B.TS5-3.A.0.5549973940,0.0.-32767,32767	25.AT1#2 CAR REC/BIN9,0
12.I80NS--1CLN----.C.TS6-1.A.0.5612719876,0.0.-32767,32767	26.CYP#1 CAR REC/BIN10,0
1,230 BUS2 LO TR/BIN1,0	27.CYP#2 CAR REC/BIN11,0
2.D80CYP-2-94P---,0	28.TL3#1 CAR REC/BIN12,0
3.CYP#2 BU RY TR/BIN3,0	29.TL3#2 CAR REC/BIN13,0
4.D80TL3-2-94P---,0	30.SPARE/BIN14,0
5.D80TL3-2-94P---,0	31.SPARE/BIN15,0
6.D80TL3-2-94BU--,0	32.SPARE/BIN16,0
7.TL3#2 RC OP/BIN7,0	50
8.80312 BF LO TR/BIN8,0	1
9.80322 BF LO TR/BIN9,0	12800,28544
10.80332 BF LO TR/BIN10,0	04/15/07,18:30:56.284
11.80712 BF LO TR/BIN11,0	04/15/07,18:30:56.434
12.80732 BF LO TR/BIN12,0	ASCII

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลในไฟล์โครงร่างของการเก็บข้อมูลการลัดวงจร

จากตัวอย่างไฟล์โครงร่างรูปที่ 3.1 เป็นการเก็บข้อมูลการลัดวงจรจากเครื่องบันทึก ที่ติดตั้ง ณ สถานีไฟฟ้า TTK ซึ่งจะมีการรายละเอียดของไฟล์ดังนี้ สถานีไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องแสดงในบรรทัดที่ 1 และในบรรทัดที่ 2 เป็นการระบุถึงจำนวนของช่องสัญญาที่ทำการบินที่ ซึ่งประกอบไปด้วย สัญญาณอนาล็อก 12 ช่องสัญญา และสัญญาณดิจิทัล 32 ช่องสัญญา รวมเป็น 44 ช่องสัญญา ในลำดับถัดไป จะเป็นลำดับของสัญญาที่บันทึกในไฟล์ข้อมูลและรายละเอียดของสัญญานั้นๆ โดยจำนวนของข้อมูลที่บันทึกจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิต บรรทัดที่ 4 จากด้านล่าง บอกถึงความถี่ในการสุ่มข้อมูลของสัญญาที่เก็บมา และจำนวนการสุ่มข้อมูลทั้งหมดของแต่ละช่องสัญญา ส่วนสองบรรทัดก่อนบรรทัดสุดท้าย บอกถึงเวลาในการเริ่มบันทึกข้อมูล และเวลาที่สิ้นสุดการบันทึกข้อมูล ตามลำดับ ซึ่งเวลาดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับการตั้งเวลาของผู้ปฏิบัติการ หรืออาจเป็นการรับค่าเครื่องมือบอกเวลาที่ติดตั้งเพิ่มเติม

ตัวอย่างการตั้งชื่อช่องสัญญาณอนาล็อก และช่องสัญญาณดิจิทัลที่บันทึกเข้ามาใน DFR แสดงในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างสัญญาณแอนาล็อกที่ DFR บันทึกค่าของสถานีไฟฟ้าบ้านค่าย

ชนิดของสัญญาณ	ระดับแรงดัน	ชื่ออุปกรณ์	ลำดับที่	เฟส	ชนิดของอุปกรณ์
V	80	BUS-	1	A	BUS
V	80	BUS-	1	B	BUS
V	80	BUS-	1	C	BUS
V	80	BUS-	2	A	BUS
V	80	BUS-	2	B	BUS
V	80	BUS-	2	C	BUS
I	80	CT--	1	A	LINE
I	80	CT--	1	B	LINE
I	80	CT--	1	C	LINE

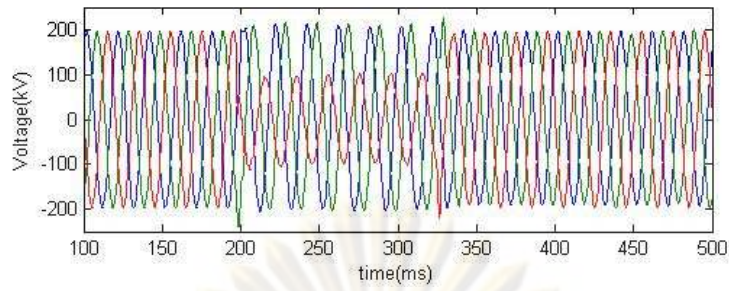
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างสัญญาณดิจิทัลที่ DFR บันทึกค่าของสถานีไฟฟ้าบ้านค่าย

ชนิดของสัญญาณ	ระดับแรงดัน	ชื่ออุปกรณ์	ลำดับที่	เฟส	ชนิดของอุปกรณ์
D	80	PDG-	1	3P	94Primary
D	80	PDG-	1	3P	94Backup
D	80	CT--	1	3P	94Primary
D	80	CT--	1	3P	94Backup

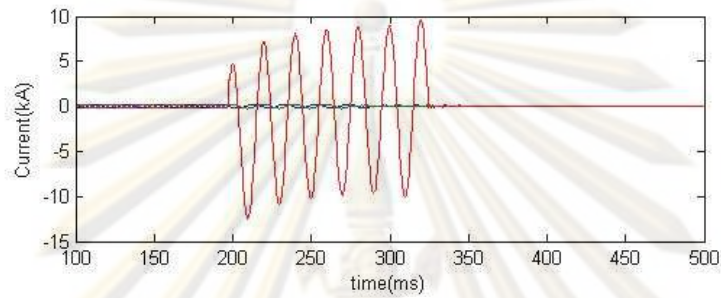
จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 คอลัมน์ที่ 1 แสดงชนิดของสัญญาณนั้น โดย I แทนสัญญาณกระแส V แทนสัญญาณแรงดัน และ D แทนสัญญาณดิจิทัล คอลัมน์ที่ 2 แสดงระดับแรงดัน โดย 80 แทนระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ คอลัมน์ที่ 3 แสดงชื่อของอุปกรณ์หรือสถานีไฟฟ้าปลายทางในกรณีที่อุปกรณ์นั้นเป็นสายส่ง คอลัมน์ที่ 4-6 แสดงลำดับของอุปกรณ์นั้น เฟส และชนิดของอุปกรณ์ที่นำเข้ามาในช่องสัญญาณนั้น ตามลำดับ

ตัวอย่างข้อมูลที่เครื่องบันทึกความผิดปกติของบันทึกได้เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินแบบสองเฟส และแบบสองเฟสลงดิน ที่ได้จากการบันทึกข้อมูลที่ระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์แสดงดังรูปที่ 3.2 ถึง รูปที่ 3.4 ตามลำดับ



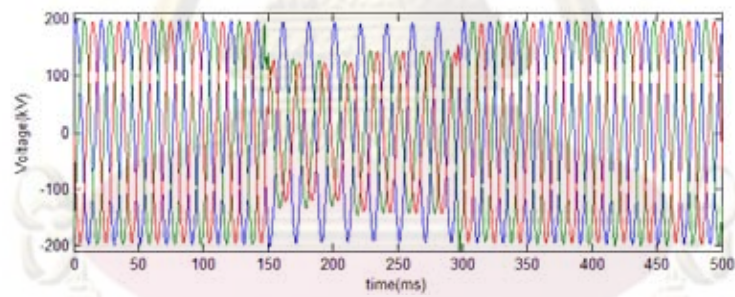


ก. สัญญาณแรงดัน 3 เฟส

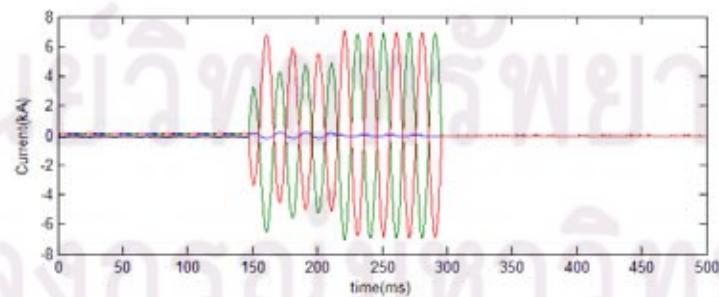


ข. สัญญาณกระแส 3 เฟส

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

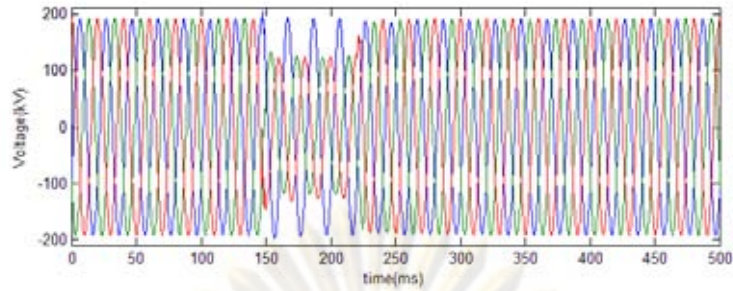


ก. สัญญาณแรงดัน 3 เฟส

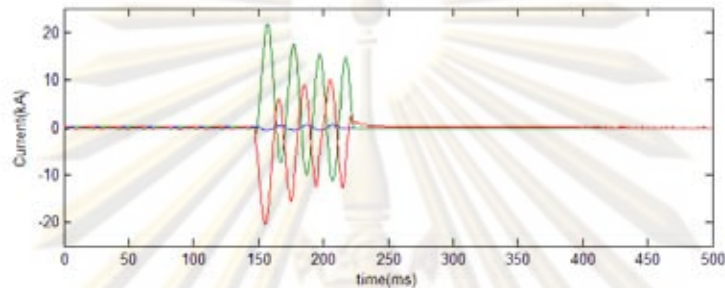


ข. สัญญาณกระแส 3 เฟส

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบสองเฟส



ก. สัญญาณแรงดัน 3 เฟส



ข. สัญญาณกระแส 3 เฟส

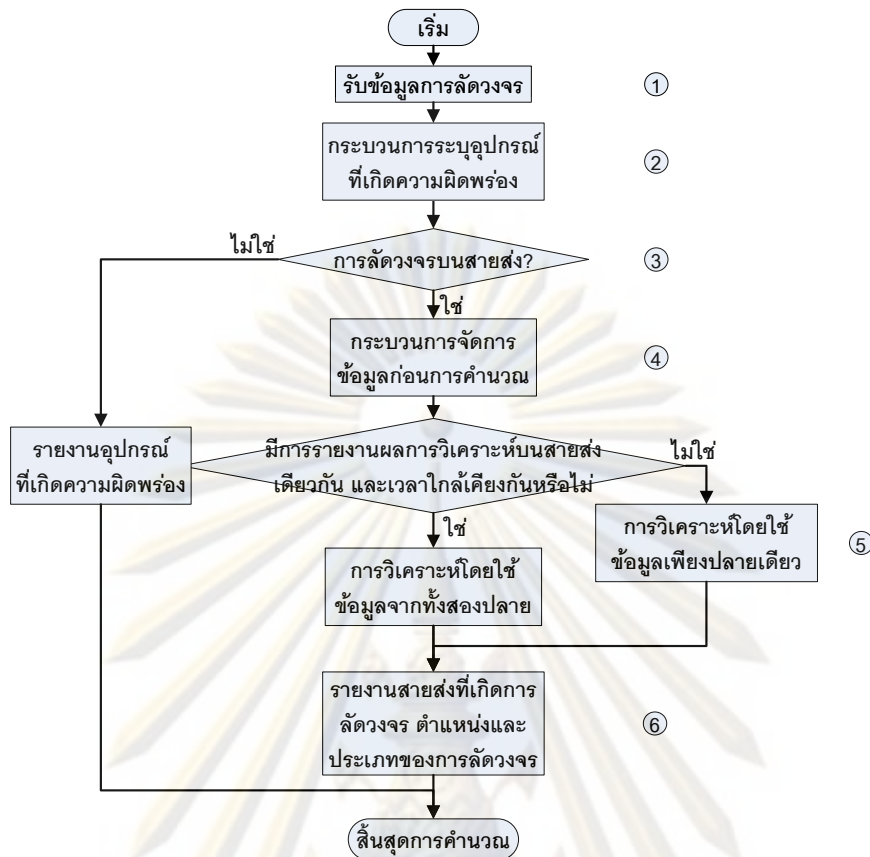
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

ข้อมูลกระแสและแรงดันที่ได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติ เป็นข้อมูลแบบสุ่ม ณ เวลาชั่วขณะ ที่แสดงถึงระดับของสัญญาณขณะนั้นในแต่ละช่องสัญญาณ โดยในการวิเคราะห์ จะต้องทำการเปลี่ยนข้อมูลดิบที่ได้ ให้เป็นข้อมูลเฟสเซอร์ก่อน ดังนั้น จึงต้องมีการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ เพื่อให้ได้ช่วงของข้อมูลที่เหมาะสม ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 3.2 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติ

กระบวนการวิเคราะห์การลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



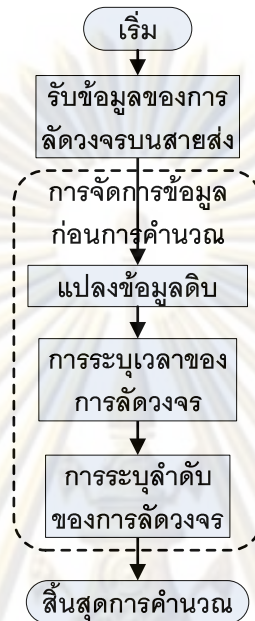
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการคำนวณหาค่าตอบเมื่อมีข้อมูลการลัดวงจร

จากรูปที่ 3.5 เมื่อมีข้อมูลการลัดวงจรเข้ามาในระบบ ระบบวิเคราะห์ข้อมูลจะเริ่มจากการวิเคราะห์หาอุปกรณ์ที่เกิดความผิดปกติ ซึ่งหากความผิดปกติที่เกิดขึ้น ไม่ใช่การลัดวงจรบนสายส่ง ระบบก็จะรายงานอุปกรณ์ที่เกิดความผิดปกติและจะสิ้นสุดการวิเคราะห์ แต่ถ้าหากข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลการลัดวงจรบนสายส่ง ข้อมูลนั้นก็จะถูกป้อนเข้ามาบล็อกรที่ 4 ตามรูปที่ 3.5 ซึ่งคือ กระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ ดังจะมีรายละเอียดอธิบายในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นจะนำข้อมูลการลัดวงจรที่ได้ ไปทำการตรวจสอบกับรายงานการวิเคราะห์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปแล้ว เพื่อระบุว่าข้อมูลที่เข้ามา เป็นการลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่งหรือไม่โดยเงื่อนไขและกระบวนการในการระบุจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 แล้วจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณในกระบวนการคำนวณโดยใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียว หรือกระบวนการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

### 3.3 กระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ

ในการบันทึกข้อมูล ข้อมูลที่ได้จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร ช่วงขณะเกิดการลัดวงจร และช่วงหลังเกิดการลัดวงจร ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง ที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ข้อมูลเฟสเซอร์ของทั้งช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรและ

ข้อมูลเฟสเซอร์ของช่วงเวลาขณะเกิดการลัดวงจร ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการในการจัดการข้อมูล เพื่อให้ช่วงของข้อมูลที่ได้ เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการจะนำไปใช้ในการแปลงเฟสเซอร์ ซึ่งกระบวนการจัดการข้อมูลจะมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในกระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ

จากรูปที่ 3.6 กระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณจะประกอบไปด้วย กระบวนการย่อยดังต่อไปนี้คือ

### 3.3.1 การแปลงข้อมูลดิบ

ก่อนที่จะสามารถเลือกช่วงในการคำนวณได้ จะต้องมีการแปลงค่ากระแสจากข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องบันทึก ให้เป็นค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ซึ่งจะใช้ 2 กระบวนการในการแปลงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ 2 แบบคือ

1. การแปลงเป็นค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง โดยให้ 1 คาบการแปลงเท่ากับ 20 มิลลิวินาที ซึ่งมีสูตรในการแปลงดังนี้

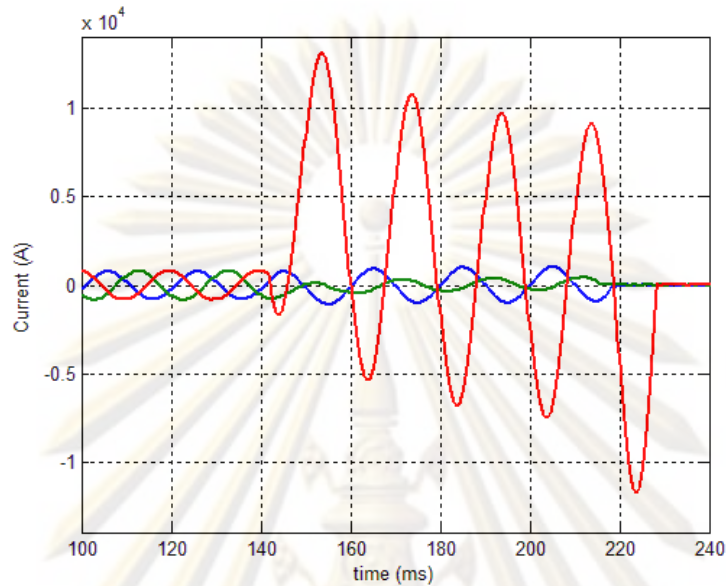
$$I_{RMS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i[n]^2 \quad (3.1)$$

2. ขนาดของการแปลงฟูเรียร์ที่ความถี่มูลฐาน(50 เฮิรตซ์) ซึ่งจะมีสูตรในการแปลงคือ

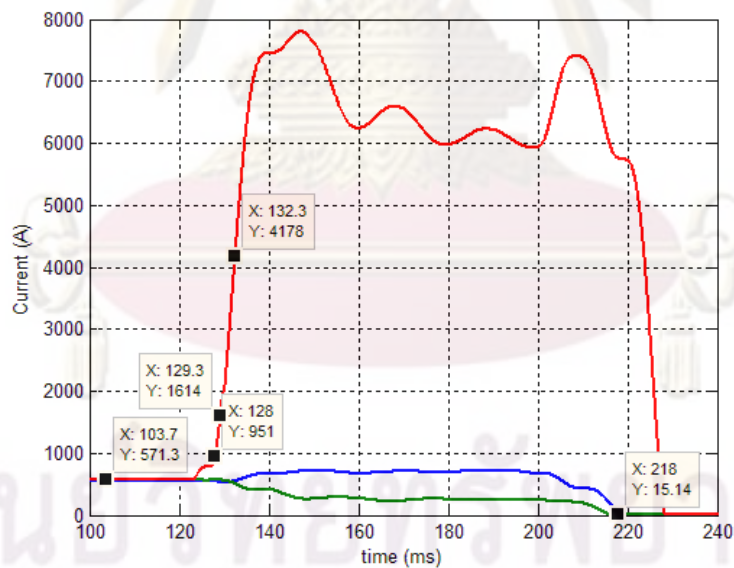
$$I_{DFT} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N i[n] e^{-j2\pi n} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนจุดข้อมูลต่อหนึ่งคาบ

ในการแปลงด้วยกระบวนการทั้งสอง จะทำการแปลงแบบหน้าต่างเลื่อน โดยจะเลื่อนหน้าต่างในการแปลงไปที่ละจุดข้อมูล และจะทำการแปลงจนครบทุกข้อมูลดิบที่รับเข้ามา เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงทั้งสองมาทำการวาดกราฟเทียบกับข้อมูลดิบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.7

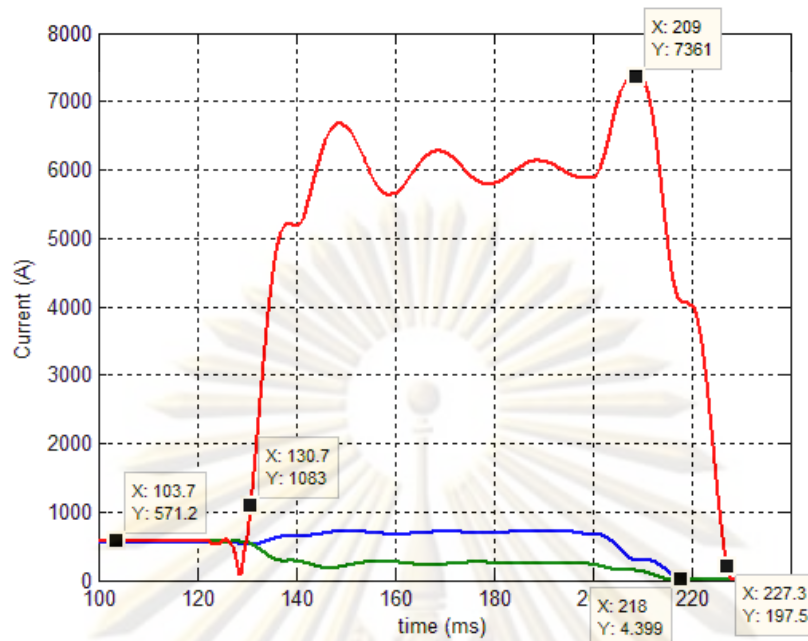


ก. ค่ากระแสอย่างทันที



ข. ค่ากระแสรวมที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค. ค่ากระแสฟลูเรียร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

รูปที่ 3.7 กราฟกระแสของสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร

เมื่อได้ค่าจากการแปลงเป็นค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองทั้งสองวิธีแล้ว จะทำการระบุเวลาของการลัดวงจรดังจะมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อถัดไป

### 3.3.2 การระบุเวลาของการลัดวงจร

จากการที่เครื่องบันทึกข้อมูล ได้แบ่งการบันทึกข้อมูลออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร ช่วงขณะเกิดการลัดวงจร และช่วงหลังจากเกิดการลัดวงจร ซึ่งในช่วงขณะเกิดการลัดวงจร จะเป็นช่วงที่มีกระแสเฟสที่มีขนาดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น กระแสของเฟสที่เกิดการลัดวงจร หรือทั้ง 3 เฟส จะลดลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งคุณลักษณะดังที่กล่าวมา จะสามารถใช้ในการเลือกช่วงในการคำนวณได้

การเลือกช่วงในการคำนวณ จะทำการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ได้ทำการแปลงเป็นค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยแล้ว ซึ่งตำแหน่งของเวลาที่ต้องการในการวิเคราะห์จะมีด้วยกัน 3 ตำแหน่ง ดังนี้

#### การระบุเวลาเริ่มต้นการลัดวงจร

ในการระบุเวลาเริ่มต้นการลัดวงจร จะมีเงื่อนไขว่า เวลาดังกล่าว จะเป็นเวลาเริ่มต้นการลัดวงจร ( $t_{start\_fault}$ ) ก็ต่อเมื่อ

$$I_{RMS}(t_{start\_fault}) > 0.5(I_{max} + I_{pre}) \quad (3.3)$$

หรือ

$$\left( (I_{RMS}(t_{start\_fault}) > I_{pre} + 0.05(I_{max} - I_{pre})) \text{ or } (I_{RMS}(t_{start\_fault}) > I_{pre} + 0.15(I_{max} - I_{pre})) \right) \\ \text{and} \left( \frac{dI_{RMS}(t_{start\_fault})}{dt} > \sigma \right) \quad (3.4) \\ \text{and} (I_{RMS}(t_{start\_fault} + 40ms) > 0.5(I_{max} + I_{pre}))$$

โดยที่

$$\sigma = (I_{max} - I_{pre}) / (50ms)$$

จากรูปที่ 3.7 ข. คือ จุดเวลาที่เข้าเงื่อนไขที่กล่าวมา คือ จุดเวลาที่ค่าของกระแสมีค่ามากกว่า 908.8 หรือ 1588 แอมแปร์ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสมากกว่า 135 กิโลแอมแปร์ต่อวินาที หรือค่าของกระแสมีค่ามากกว่า 3965 แอมแปร์ ซึ่งเป็นเวลาประมาณ 128, 129.3 และ 132.3 มิลลิวินาทีในข้อมูลที่บ้านที่กมา ตามลำดับ ซึ่งในรูปนี้ จะได้เวลาจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรที่เวลา 128 มิลลิวินาทีในข้อมูลที่บ้านที่กมา

เนื่องจากในการแปลงข้อมูล 1 ค่า จะใช้ข้อมูลดิบ ในช่วงเวลา 20 มิลลิวินาที จึงทำให้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะสามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงได้ก่อนการลัดวงจรจริงที่เกิดขึ้นประมาณ 20 มิลลิวินาที ดังนั้น ค่าที่ได้จากการระบุตำแหน่งเริ่มต้นของการลัดวงจร จะต้องบวกเวลาเพิ่มไปอีก 20 มิลลิวินาที จึงจะได้ตำแหน่งเริ่มต้นของการลัดวงจรที่แท้จริง

เมื่อได้เวลาเริ่มต้นของการลัดวงจร เฟสที่เข้าเงื่อนไขดังกล่าว จะถูกบันทึกไว้ชั่วคราวว่าเป็นเฟสที่เกิดการลัดวงจร เพื่อจะนำไปใช้ในการเลือกเวลาสิ้นสุดของการลัดวงจรต่อไป

### การเลือกเวลาสิ้นสุดการลัดวงจร

ในการเลือกเวลาสิ้นสุดการลัดวงจร จะแบ่งจุดที่สนใจออกเป็น 2 จุด คือ จุดที่มีเฟสที่กระแสเป็นศูนย์ ( $t_{end\_fault1}$ ) และจุดสิ้นสุดการลัดวงจร ( $t_{end\_fault2}$ ) ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

จุดที่มีกระแสเป็นศูนย์ ( $t_{end\_fault1}$ ) คือจุดเวลาที่

$$I_{DFT}(t_{end\_fault1}, k) < 5A \quad (3.5)$$

เมื่อ  $k$  แสดงเฟส a หรือ b หรือ c

จุดของเวลาที่ได้จากสมการ (3.5) จะถูกบันทึกไว้ แต่จะยังไม่ถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการลัดวงจร ซึ่งค่าเวลานี้ อาจนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว ส่วนเงื่อนไขที่ใช้ระบุจุดสิ้นสุดการลัดวงจร คือ จุดเวลาที่ให้ค่า

$$(I_{DFT}(t_{end\_fault2}, Fault\ Phase) < 0.5I_{pre}) \quad (3.6)$$

และจะต้องมีเงื่อนไขเพิ่มว่าเวลาที่เข้าเงื่อนไขสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.6) จะต้องอยู่ถัดจากเวลาเริ่มต้นของการลัดวงจรโดยไม่มีเวลาสิ้นสุดของการลัดวงจรมาขึ้นกลาง

จากรูปที่ 3.7 ค. จุดเวลาที่เข้าเงื่อนไขที่กล่าวมา คือ จุดเวลาที่ค่าของกระแสมีค่าน้อยกว่า 5 หรือค่าของกระแสมีค่าน้อยกว่า 284.6 แอมแปร์ซึ่งเป็นเวลาประมาณ 218 และ 227.3 ตามลำดับ ดังนั้น จุดเวลาสิ้นสุดของการลัดวงจรคือเวลา 227.3 มิลลิวินาทีของข้อมูลที่บันทึก

จากเมื่อสามารถระบุช่วงของข้อมูลระหว่างเกิดการลัดวงจรจากข้อมูลดิบได้แล้ว จะทำให้สามารถเลือกช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจรได้ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

#### การเลือกช่วงเวลาของข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร

หลังจากได้ข้อมูลระหว่างเกิดการลัดวงจรแล้ว จะทำการเลือกจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจรดังนี้

$$t_{start\_pre} = \text{mod}(t_{start\_fault}, 20ms) \quad (3.7)$$

$$t_{end\_pre} = t_{start\_pre} + 20ms \quad (3.8)$$

เมื่อ  $t_{start\_pre}$  คือ เวลาเริ่มต้นของข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร

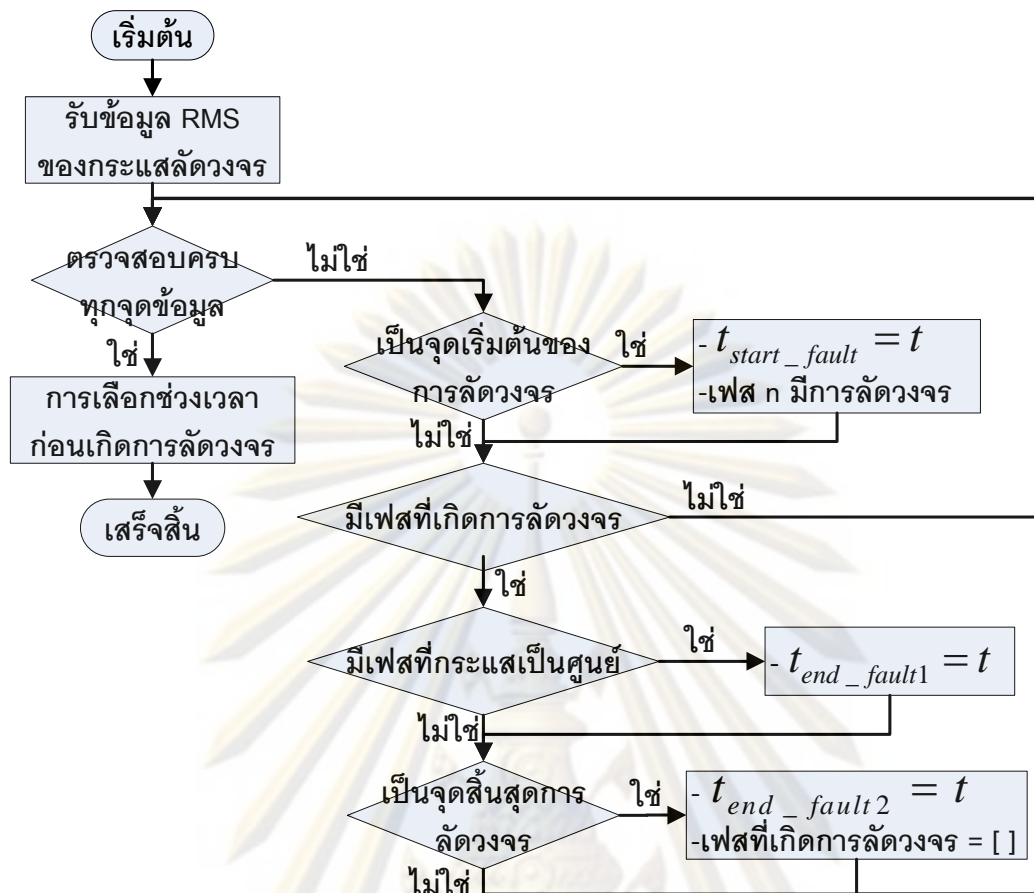
$t_{end\_pre}$  คือ เวลาสิ้นสุดของข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร

ตัวอย่างเช่น หากสามารถเลือกตำแหน่งเริ่มของการลัดวงจรและตำแหน่งสิ้นสุดของการลัดวงจรได้เป็น 146 กับ 200.3 มิลลิวินาที ของข้อมูลการลัดวงจร ตามลำดับ จะได้ช่วงเวลาของข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจรที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงระหว่าง 6 ถึง 26 มิลลิวินาที ของข้อมูลดิบที่บันทึก

จากการระบุเวลาที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถเขียนแผนภาพแสดงกระบวนการในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.8 แผนภาพการระบุเวลาของการลัดวงจร

จากรูปที่ 3.8 กระบวนการระบุเวลาของการลัดวงจรจะวนตรวจสอบในข้อมูลที่ผ่านการแปลงแล้วจนครบทุกจุดข้อมูล โดยจะเริ่มจากการหาจุดเริ่มต้นการลัดวงจร เมื่อได้จุดเริ่มต้นการลัดวงจรแล้ว จะทำการบันทึกค่าเฟสที่เกิดการลัดวงจร เมื่อการตรวจสอบตรวจพบว่ามีเฟสที่เกิดการลัดวงจรแล้ว จะเพิ่มขึ้นขั้นตอนการตรวจหาจุดสิ้นสุดของการลัดวงจร ขณะตรวจสอบหาจุดสิ้นสุดการลัดวงจรหากพบจุดที่มีเฟสที่กระแสเป็นศูนย์ จะทำการบันทึกค่าเวลาดังกล่าวไว้ และเมื่อตรวจพบจุดสิ้นสุดของการลัดวงจร จะถือว่าเป็นที่สิ้นสุดของการลัดวงจรนี้แล้ว และจะเริ่มการหาตำแหน่งเริ่มการลัดวงจรใหม่ เมื่อวนจนครบทุกจุดข้อมูลแล้ว ก็จะนำค่าจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรมาใช้ในการเลือกช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

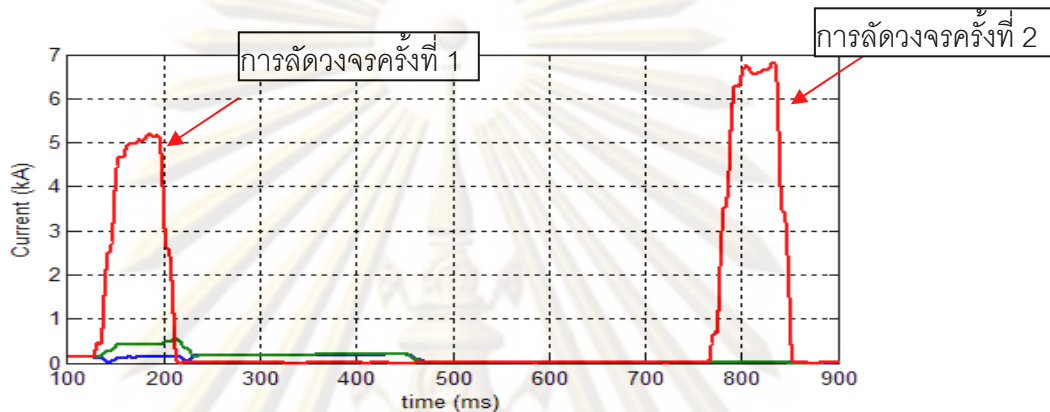
### 3.3.3 การระบุลำดับของการลัดวงจรในการบันทึกข้อมูล

เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบนสายส่ง ระบบป้องกันสายส่งจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการเปิดวงจร และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง ระบบป้องกันก็จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจรอีกครั้ง ซึ่งหากการลัดวงจรที่เกิดขึ้น เป็นการลัดวงจรแบบชั่วคราว ระบบก็จะสามารถกลับไปทำงาน

เป็นปกติได้อีกครั้ง แต่หากเหตุการณ์ดังกล่าว เป็นการลัดวงจรแบบถาวร เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทำการเปิดวงจรอย่างถาวร

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ในหนึ่งการบันทึกข้อมูลการลัดวงจร อาจมีจำนวนครั้งของการลัดวงจรมากกว่าหนึ่งครั้ง ซึ่งลำดับของการลัดวงจรในการบันทึกข้อมูล จะเป็นตัวที่สามารถระบุได้ว่าการลัดวงจรที่บันทึกได้จากทั้งสองปลาย เป็นการลัดวงจรเดียวกันหรือไม่

ตัวอย่างการระบุลำดับของการลัดวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การลัดวงจรที่มีการปิดกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากรูปที่ 3.9 การระบุลำดับของการลัดวงจรในการบันทึกข้อมูล จะใช้จุดสิ้นสุดของการลัดวงจรในการระบุ โดยลำดับของการสิ้นสุดของการลัดวงจร ในการบันทึกข้อมูล จะเป็นลำดับของการลัดวงจร ในการบันทึกข้อมูลนั้น

#### 3.4 การระบุว่าการลัดวงจรเป็นการลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลาย

เมื่อได้ข้อมูลการลัดวงจรที่เกิดขึ้น เข้ามาในระบบแล้วผ่านกระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณแล้ว จะนำข้อมูลที่ได้จากการลัดวงจรที่กำลังทำการวิเคราะห์ ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการลัดวงจรที่ได้มีการรายงานผลแล้วในอดีต เนื่องจากข้อมูลของการลัดวงจรจะเข้ามาในกระบวนการวิเคราะห์ไม่พร้อมกัน ดังนั้น เมื่อข้อมูลปลายใดปลายหนึ่งของการลัดวงจร เข้ามาสู่กระบวนการวิเคราะห์ ข้อมูลนั้นจะถูกวิเคราะห์ในกระบวนการแบบปลายเดียว แล้วเมื่อข้อมูลอีกปลายได้เข้ามาสู่กระบวนการวิเคราะห์และสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นเหตุการณ์ลัดวงจรเดียวกัน ข้อมูลชุดดังกล่าว จึงจะถูกวิเคราะห์ในกระบวนการแบบสองปลาย

เงื่อนไขในการระบุว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีข้อมูลจากทั้งสองปลาย จะมีดังนี้

### 1. เวลาในการเริ่มต้นของการลัดวงจร

เนื่องจากเวลาของเครื่องบันทึกความผิดพลาดในบางกรณี จะถูกตั้งค่าโดยผู้ปฏิบัติการ ดังนั้น เวลาที่ตั้งค่าให้กับเครื่องบันทึกความผิดพลาด อาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะตั้งสมมุติฐานว่าผู้ปฏิบัติการ จะสามารถตั้งค่าเวลาได้โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 วินาที อีกทั้งในการระบุการเริ่มต้นของการลัดวงจรในข้อมูลการลัดวงจร อาจมีการผิดพลาดขึ้นได้เล็กน้อย ดังนั้น จะสามารถระบุได้ว่า

ข้อมูลการลัดวงจรสองครั้งใดๆ จะเป็นข้อมูลจากเหตุการณ์เดียวกันเมื่อสองข้อมูลนั้น มีเวลาที่เริ่มต้นของการลัดวงจรต่างกันไม่เกิน 1 วินาที

ทั้งนี้ค่าเวลาที่ระบุมา อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการตั้งเวลาเครื่องบันทึกของผู้ปฏิบัติการ ซึ่งค่าช่วงเวลา จะเป็นสองเท่าของความผิดพลาดจากการตั้งเวลา แต่ความผิดพลาดจากการตั้งเวลาของผู้ปฏิบัติการ จะต้องไม่เกิน  $1/4$  ของช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึก

### 2. สายส่งที่เกิดการลัดวงจร

การจะนำสองข้อมูลใดๆ ไปวิเคราะห์ในกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสองปลาย สองข้อมูลนั้น จะต้องเป็นข้อมูลของสายส่งเส้นเดียวกัน ดังนั้นจึงระบุได้ว่า

ข้อมูลการลัดวงจรสองครั้งใดๆ จะเป็นข้อมูลจากเหตุการณ์เดียวกันเมื่อสองข้อมูลนั้น ระบุถึงสายส่งที่เกิดการลัดวงจรเส้นเดียวกัน และเป็นการเก็บข้อมูลจากทั้งสองปลาย

### 3. ลำดับของการลัดวงจรในข้อมูลที่บันทึก

โดยปกติแล้ว การปิดวงจรกลับของเบรกเกอร์ จากทั้งสองปลาย จะถูกตั้งค่าให้ปิดวงจรกลับในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้น้อยที่การลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง จะเป็นข้อมูลที่เกิดจากปิดวงจรกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถระบุได้ว่า

ข้อมูลการลัดวงจรสองครั้งใดๆ จะเป็นข้อมูลจากเหตุการณ์เดียวกันเมื่อสองข้อมูลนั้น เป็นเหตุการณ์ลัดวงจรครั้งแรกที่เกิดขึ้นในข้อมูลที่บันทึก

จากเงื่อนไขทั้ง 3 เงื่อนไขที่กล่าวมา หากข้อมูลการลัดวงจรคู่ใด เข้าเงื่อนไขครบทุกเงื่อนไข ข้อมูลการลัดวงจรคู่นั้น จะถือเป็นข้อมูลการลัดวงจรจากเหตุการณ์เดียวกันที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง

เมื่อข้อมูลการลัดวงจรได้ผ่านกระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณและการระบุว่าเป็นการลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลายหรือไม่แล้ว ข้อมูลการลัดวงจรมัน จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งและตำแหน่งของการลัดวงจร ซึ่งจะวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อธิบายถึงการระบุประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจร เมื่อมีข้อมูลการลัดวงจรจากทั้งสองปลายของสายส่ง ดังจะมีรายละเอียดอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

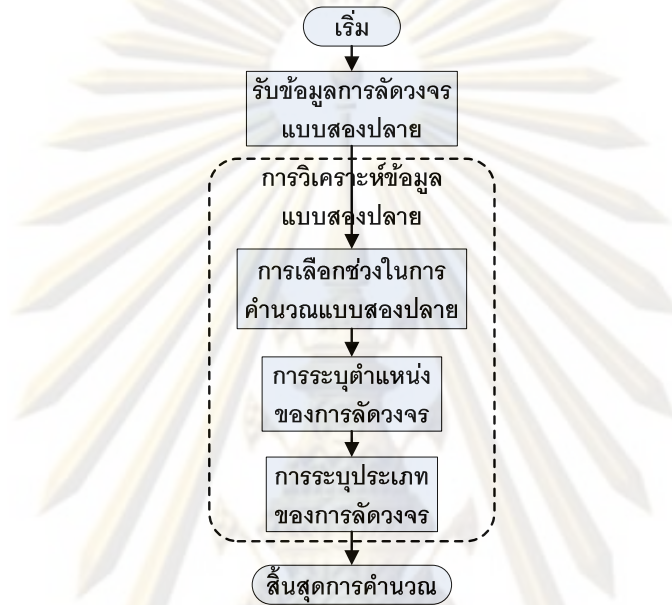


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### กระบวนการคำนวณเมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง

กระบวนการในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสองปลาย มีกระบวนการในการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



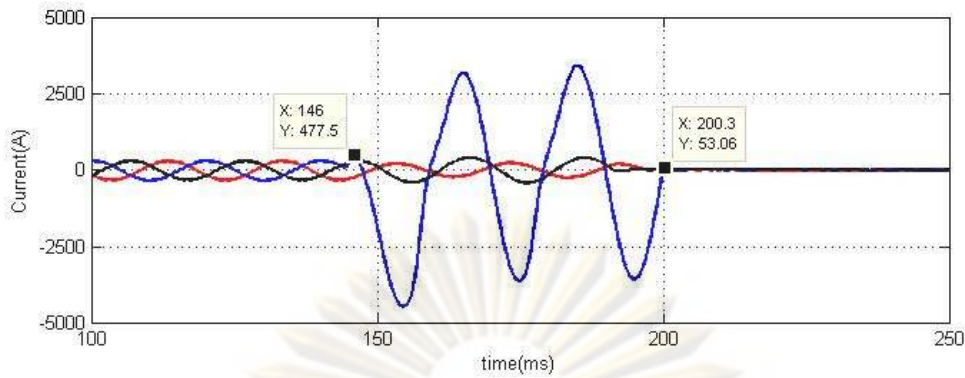
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงกระบวนการในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสองปลาย

จากรูปที่ 4.1 เมื่อสามารถระบุได้ว่า การลัดวงจรที่เกิดขึ้น เป็นการลัดวงจรที่มีข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง ข้อมูลดิบและรายละเอียดของเหตุการณ์ จะถูกนำมาใช้ในการเลือกช่วงในการคำนวณซึ่งรายละเอียดของกระบวนการจะถูกอธิบายในหัวข้อ 4.1 แล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปเข้ากระบวนการในการระบุตำแหน่ง และประเภทของการลัดวงจร ดังจะแสดงรายละเอียดการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2 และหัวข้อที่ 4.3 ตามลำดับ

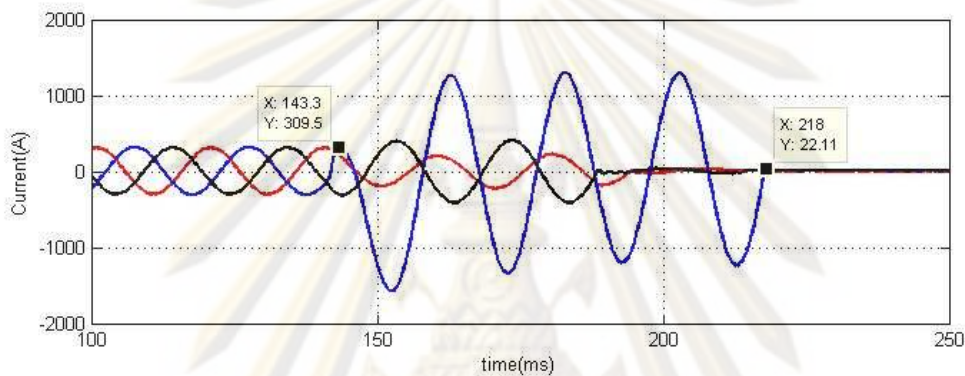
#### 4.1 การเลือกช่วงในการคำนวณแบบสองปลาย

การเลือกช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแบบสองปลายจะใช้ช่วงเวลาระหว่างเกิดการลัดวงจรของข้อมูลการลัดวงจรที่สั้นกว่าจากข้อมูลการลัดวงจรทั้งสองข้อมูล เป็นช่วงเวลาระหว่างเกิดการลัดวงจรของการลัดวงจรนั้น

ตัวอย่างสัญญาณกระแสในรูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรที่บันทึกได้จากสายส่งกระบี่-พังงา โดยรูปที่ 4.2 a) เป็นการบันทึกข้อมูลจากสถานีไฟฟ้ากระบี่ และรูปที่ 4.2 b) เป็นการบันทึกข้อมูลจากสถานีไฟฟ้าพังงา



a) กระแสลัดวงจรที่บันทึกได้จากสถานีไฟฟ้ากระบี่



b) กระแสลัดวงจรที่บันทึกได้จากสถานีไฟฟ้าพังงา

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลการลัดวงจรที่มีผลของการเปิดวงจรที่เวลาต่างกันของเบรกเกอร์

จากรูปที่ 4.2 จะได้ช่วงช่วงเวลาระหว่างเกิดการลัดวงจรจากสถานีไฟฟ้ากระบี่และพังงา เป็น 54.3 ms และ 74.7 ms ตามลำดับ จากการเลือกช่วงเวลาในการวิเคราะห์จะได้ช่วงเวลา ระหว่างเกิดการลัดวงจรของการลัดวงจรนี้คือ 54.3 ms ดังนั้น จะได้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูล จากสถานีไฟฟ้ากระบี่เป็นเวลาตั้งแตวินาทีที่ 146-200.3 ms และช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูล จากสถานีไฟฟ้าพังงาเป็นเวลาตั้งแตวินาทีที่ 143.3-197.6 ms ส่วนช่วงของข้อมูลก่อนเกิดการ ลัดวงจร จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการเลือก

เพื่อความแม่นยำในการคำนวณ ข้อมูลที่นำไปแปลงเป็นปริมาณเฟสเซอร์ ควรจะเป็นช่วง ของข้อมูลที่เข้าสู่สภาวะมั่นคงแล้ว และเพื่อหลีกเลี่ยงการเลือกช่วงที่มีข้อมูลหลังจากการเปิดวงจร ของเบรกเกอร์แล้วมาใช้ในการคำนวณ จึงใช้ข้อมูลช่วงก่อนคาบสุดท้ายจากช่วงที่ได้เลือกมาแล้ว ในการแปลงเป็นปริมาณเฟสเซอร์เพื่อใช้ในการคำนวณแต่หากช่วงขณะเกิดการลัดวงจรมีขนาดสั้น กว่า 3 คาบ ก็จะใช้ข้อมูลทั้งหมด (ที่เป็นจำนวนเต็มของคาบ) ในการแปลงเป็นปริมาณเฟสเซอร์

เมื่อได้ช่วงเวลาระหว่างเกิดการลัดวงจรและช่วงเวลาก่อนเกิดการลัดวงจรแล้ว จึงทำการ เลือกค่าให้เป็นจำนวนเต็มคาบ เพื่อจะนำข้อมูลดิบที่ได้ มาทำการแปลงเป็นปริมาณเฟสเซอร์ ด้วย

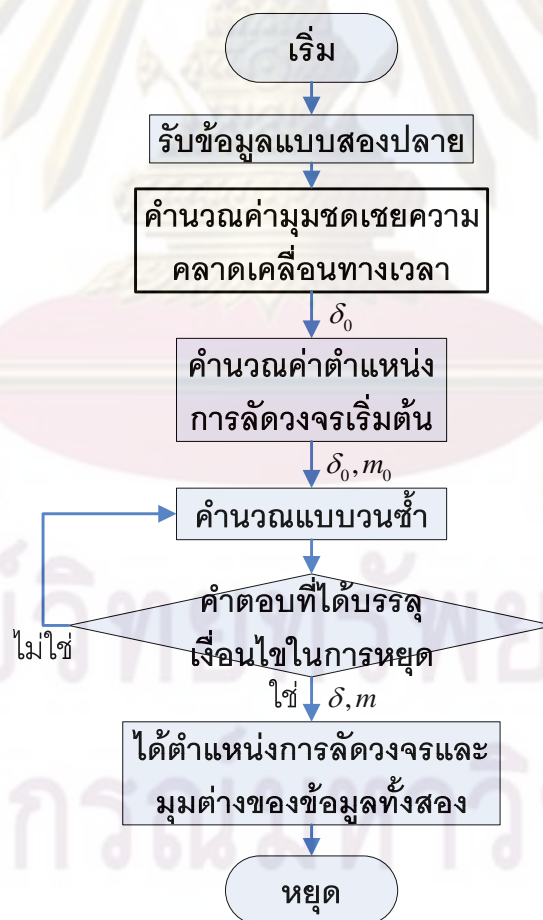
วิธีการแปลงฟูรีเยร์ด้วยสูตรในการแปลงดั่งสมการที่ (3.2) แล้วจึงนำข้อมูลเฟสเซอร์ไปใช้ในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจร ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 4.2 การระบุตำแหน่งของการลัดวงจร

เมื่อได้ข้อมูลเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันขณะเกิดการลัดวงจรที่เหมาะสมแล้ว จะนำข้อมูลดังกล่าว มาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะมีกระบวนการในการคำนวณอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.1 และจะอธิบายถึงรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณหามุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาที่ได้นำเสนอ เพื่อช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ ในหัวข้อที่ 4.2.2

### 4.2.1 การเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร

การพัฒนาการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรที่ได้นำเสนอ จะมีขั้นตอนการคำนวณดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภูมิการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจร

ในรูปที่ 4.3 การคำนวณจะเริ่มต้นด้วยการรับข้อมูลที่ผ่านการพิจารณาแล้วว่าเป็นข้อมูลการลัดวงจรแบบสองปลายเข้ามา แล้วจึงใช้การคำนวณหาค่าตั้งต้นของมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาที่ได้นำเสนอ ดังจะอธิบายการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.2 จากนั้นจึงนำค่ามุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาไปใช้ในการคำนวณหาค่าตั้งต้นของตำแหน่งของการลัดวงจร ( $m_0$ ) และกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำตามที่ได้เสนอไว้ในบทความที่ [1] ต่อไป

#### 4.2.2 การคำนวณหามุมต่างระหว่างข้อมูล

จากปัญหาที่การคำนวณหาค่าตั้งต้น ตามวิธีที่ได้นำเสนอไว้ใน [1] ในเงื่อนไขการลัดวงจร จะทำให้การคำนวณแบบวนซ้ำเข้าสู่ค่าตอบที่ผิด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงเสนอกำหนดหามุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาที่จะใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณ ที่จะทำให้ทุกการคำนวณแบบวนซ้ำ เข้าสู่ไปยังค่าตอบที่ถูกต้องเสมอ

การคำนวณหามุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาที่เสนอ จะใช้ข้อมูลก่อนเกิดการลัดวงจร ในการคำนวณ โดยใช้การเปรียบเทียบมุมต่างระหว่าง มุมของแรงดันจากบัสปลายทาง ที่ได้จากการคำนวณ กับมุมของแรงดันของบัสปลายทางที่ได้จากการวัดจริง การหาค่าแรงดันที่บัสปลายทาง จะต้องใช้ข้อมูลแรงดัน และกระแสจากบัสต้นทางในการคำนวณร่วมกันค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง และจะใช้แบบจำลองของสายส่งเป็นแบบจำลองแบบกระจาย เพื่อความแม่นยำของคำตอบ ดังนั้น จะได้มุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา คือมุมต่างระหว่างมุมของแรงดันที่บัสปลายทางที่คำนวณได้ กับมุมของบัสปลายทางจากการวัด ดังแสดงในสมการด้านล่างนี้

$$V_H^G = \cosh(\gamma l)V_G + Z_C \sinh(\gamma l)I_G \quad (4.1)$$

$$\delta_0 = \angle V_H^H - \angle V_H^G \quad (4.2)$$

จากการคำนวณใน (4.1) และ (4.2) จะทำให้การระบุตำแหน่งของการลัดวงจรให้คำตอบที่แม่นยำและถูกต้องในทุกเงื่อนไขของการลัดวงจร

ในการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรโดยการใช้ข้อมูลแบบสองปลาย สามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องถึงชนิดของการลัดวงจร และหลังจากที่ได้ตำแหน่งของการลัดวงจรและมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาแล้ว จะนำคำตอบที่ได้ ไปใช้ในการปรับปรุงข้อมูลการลัดวงจร เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการระบุประเภทโดยใช้ข้อมูลแบบสองปลาย ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



### 4.3 การระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย

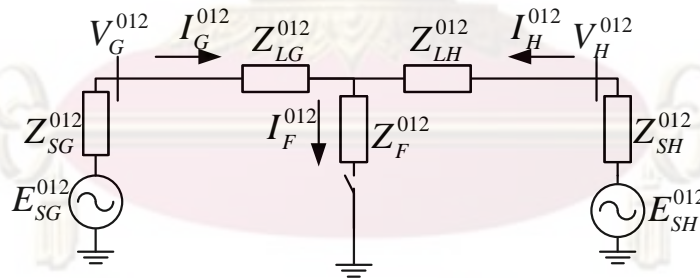
นอกจากข้อมูลตำแหน่งของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ผู้ปฏิบัติการยังต้องการทราบประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นด้วย เพื่อที่จะทำให้ผู้ปฏิบัติการ สามารถหาสาเหตุและแก้ไขความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการระบุประเภทของการลัดวงจร โดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้คุณลักษณะของการลัดวงจรบนสายส่ง ดังอธิบายในหัวข้อที่ 4.3.1 ไปกำหนดเงื่อนไขของการลัดวงจรประเภทต่างๆ ดังจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.2 ต่อไป

#### 4.3.1 คุณลักษณะของการลัดวงจรบนสายส่ง

การลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าแต่ละประเภท จะมีคุณลักษณะที่ต่างกัน ดังนั้นหากเข้าใจถึงคุณลักษณะของการลัดวงจร ก็จะสามารถบอกถึงประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้ เพื่อให้สมการเป็นสมการที่สะดวกในการคำนวณกระแสลัดวงจร จึงใช้การคำนวณด้วยส่วนประกอบลำดับในการคำนวณหาค่ากระแสขณะเกิดการลัดวงจร โดยที่การคำนวณโดยใช้กระแสลำดับ ได้คิดรวมผลของการเหนี่ยวนำระหว่างเฟสแล้ว

#### แอดมิตแตนซ์ลัดวงจรในการลัดวงจรแต่ละประเภท

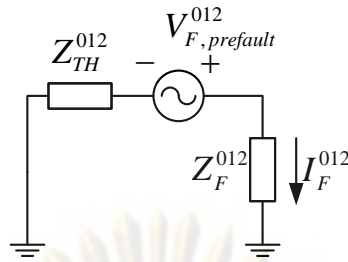
การลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จะสามารถเขียนแผนภาพเส้นเดียวของวงจรลำดับได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่ง

จากรูปที่ 4.4 หากพิจารณาจุดเกิดการลัดวงจร ในการพิจารณาค่ากระแสขณะเกิดการลัดวงจร จะสามารถเขียนรูปวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้เป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลในการคำนวณกระแสขณะเกิดการลัดวงจร

เมื่อ  $V_{F,prefault}^{012}$  เป็นแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจร ณ จุดลัดวงจร และ  $Z_{TH}^{012}$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์เทวินินเมื่อพิจารณาจากจุดเกิดการลัดวงจร และ  $Z_F^{012}$  คือค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร ดังนั้นจากรูปที่ 4.5 จะสามารถเขียนสมการแสดงกระแสขณะเกิดการลัดวงจรได้ดังนี้

$$I_F^{012} = (Z_F^{012} + Z_{TH}^{012})^{-1} V_{F,prefault}^{012} \quad (4.3)$$

หรือ

$$I_F^{012} = Y_F^{012} (U + Z_{TH}^{012} Y_F^{012})^{-1} V_{F,prefault}^{012} \quad (4.4)$$

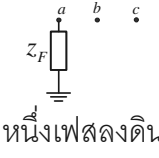
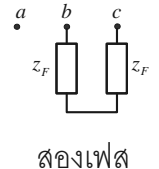
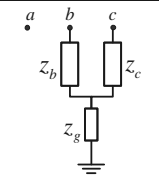
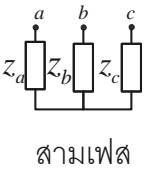
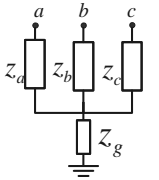
หากพิจารณาให้ระบบมีความสมมาตร และแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรมีค่าสมมาตร ดังนั้น

$$Z_{TH}^{012} = \begin{bmatrix} z_{TH}^0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{TH}^1 & 0 \\ 0 & 0 & z_{TH}^2 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V_{F,prefault}^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{F,prefault}^1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ลัดวงจร ( $Z_F^{012}, Y_F^{012}$ ) จะขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจร แต่เนื่องจากในบางกรณีของการลัดวงจร จะไม่สามารถค่าหาอิมพีแดนซ์ลัดวงจรในส่วนประกอบลำดับได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ (4.4) ในการคำนวณหากระแสลัดวงจรซึ่งจะมีค่า แอดมิตแตนซ์ลัดวงจรแบ่งตามประเภทของการลัดวงจรแสดงในตารางที่ 4.1

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ลัดวงจรของการลัดวงจรแต่ละชนิด

ประเภทการลัดวงจร	$Y_F^{012}$
 <p>หนึ่งเฟสลงดิน</p>	$\frac{1}{3z_F} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
 <p>สองเฟส</p>	$\frac{1}{2z_F} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$
 <p>สองเฟสลงดิน</p>	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} z_b + z_c & a(z_b + az_c) & a(z_c + az_b) \\ a(z_c + az_b) & a^2(az_b - z_g + az_c + 2az_g - a^2z_g) & a^2(z_c + z_g - 2az_g + a^2z_b + a^2z_g) \\ a(z_b + az_c) & a^2(z_b + z_g - 2az_g + a^2z_c + a^2z_g) & a^2(az_b - z_g + az_c + 2az_g - a^2z_g) \end{bmatrix}$ <p><math>;\Delta = 3(z_b z_c + z_b z_g + z_c z_g)</math></p>
 <p>สามเฟส</p>	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (a-1)^2(-a^2z_a + (1+a)z_b + (1+a)z_c) & (a-1)^2(a^2z_a + z_b(a+1)^2z_c) \\ 0 & (a-1)^2(a^2z_a + z_b(a+1)^2z_c) & (a-1)^2(-a^2z_a + (1+a)z_b + (1+a)z_c) \end{bmatrix}$ <p><math>;\Delta = 3(z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c)</math></p>
 <p>สามเฟสลงดิน</p>	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c & \rho & \lambda \\ \lambda & z_b z_c + z_a z_b + z_a z_c + 3\beta & \rho - 3(a^2 z_b z_g + a z_c z_g + z_a z_g) \\ \rho & \lambda - 3(z_a z_g + a z_b z_g + a^2 z_c z_g) & z_b z_c + z_a z_b + z_a z_c + 3\beta \end{bmatrix}$ <p><math>;\Delta = 3(z_a z_b z_c + z_a z_b z_g + z_a z_c z_g + z_b z_c z_g)</math>, <math>\beta = (z_a z_g + z_b z_g + z_c z_g)</math>,  <math>\lambda = a^2 z_a z_b + a z_a z_c + z_b z_c</math>, <math>\rho = a^2 z_a z_c + a z_a z_b + z_b z_c</math></p>

ในการลัดวงจรแต่ละประเภท จะมีคุณลักษณะของกระแสลัดวงจรที่แตกต่างกัน ซึ่งในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงคุณลักษณะของกระแสลัดวงจร

#### กระแสลำดับในการลัดวงจรแต่ละประเภท

เมื่อพิจารณากระแสลำดับลัดวงจร จะสามารถระบุถึงประเภทของการลัดวงจรได้ ซึ่งกระแสลำดับของการลัดวงจร จะสามารถคำนวณได้จากการนำค่า  $y_F^{012}$  จากในตารางที่ 4.1 แทนค่าลงใน (4.4) เมื่อพิจารณาให้ระบบก่อนเกิดการลัดวงจรเป็นระบบที่สมดุล ซึ่งคำตอบที่ได้จะแตกต่างกันไปตามประเภทของการลัดวงจร ดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสการลัดวงจรในการลัดวงจรแต่ละประเภท

TYPE	กระแสลัดวงจร ( $[I_F^0 \ I_F^1 \ I_F^2]^T$ )
หนึ่งเฟสลง ดิน	$\frac{1}{(z_{TH}^0 + z_{TH}^1 + z_{TH}^2 + 3z_F)} \begin{bmatrix} V_{F,pre}^1 \\ V_{F,pre}^1 \\ V_{F,pre}^1 \end{bmatrix}$
สองเฟส	$\frac{1}{(z_{TH}^1 + z_{TH}^2 + 2z_F)} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{F,pre}^1 \\ -V_{F,pre}^1 \end{bmatrix}$
สองเฟสลง ดิน	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (-z_{TH}^2 + az_c + z_b)V_{F,pre}^1 \\ (z_b + z_c + z_{TH}^0 + z_{TH}^2 + 3z_g)V_{F,pre}^1 \\ (-3z_g - z_{TH}^0 + a^2z_b + az_c)V_{F,pre}^1 \end{bmatrix}; \Delta = \begin{pmatrix} z_{TH}^0 z_{TH}^1 + z_{TH}^0 z_{TH}^2 + z_{TH}^1 z_{TH}^2 + (z_b + z_c)(z_{TH}^0 + z_{TH}^1 + z_{TH}^2) \\ + 3(z_{TH}^1 + z_{TH}^2)z_g + 3(z_b z_c + z_b z_g + z_c z_g) \end{pmatrix}$
สามเฟส	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 0 \\ (a-1)^2 [(1+a)(z_b + z_c + z_s^2) - a^2(z_a - 2z_s^2)]V_{F,pre}^1 \\ (a-1)^2 [(1+2a)z_c + a^2(z_a + z_c) + z_b]V_{F,pre}^1 \end{bmatrix}; \Delta = 3(B(z_s^1 + z_s^2) + A + 3z_s^1 z_s^2)$ $A = (z_a z_b + z_b z_c + z_a z_c)$ $B = (z_a + z_b + z_c)$
สามเฟสลง ดิน	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} z_s^2 [-3z_a + (1+a-2a^2)z_b + (1-2a+a^2)z_c + 9(a^2 z_a z_c + az_a z_b + z_b z_c)]V_{F,pre}^1 \\ 3[3z_g B + A + B(z_s^0 + z_s^2) + 9z_g z_s^0 + 3z_s^0 z_s^2]V_{F,pre}^1 \\ \{3(az_a z_c + a^2 z_a z_b + z_b z_c) - 9z_a z_g - 3z_a z_s^0 + (3z_g + z_s^0)[(-2a^2 + a + 1)z_c + (a^2 - 2a + 1)z_b]\}V_{F,pre}^1 \end{bmatrix}$ $; \Delta = 3[3z_g(A + B(z_s^1 + z_s^2)) + BX + EA + 3z_a z_b z_c + 9z_g z_s^1 z_s^2 + 3z_s^0 z_s^1 z_s^2]$ $A = (z_a z_b + z_b z_c + z_a z_c)$ $B = (z_a + z_b + z_c)$ $X = (z_s^0 z_s^1 + z_s^1 z_s^2 + z_s^0 z_s^2)$ $E = (z_s^0 + z_s^1 + z_s^2)$

จากตารางที่ 4.2 จะสามารถพิจารณาคุณลักษณะของกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแต่ละประเภทได้ดังนี้

ในการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แบบ สองเฟส และแบบสองเฟสลงดิน เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่า  $X \gg R$  ส่วนอิมพีแดนซ์ของการลัดวงจร มีแนวโน้มที่จะมีค่า  $R \gg X$  ดังนั้นค่าตัวเศษจึงไม่มีการหักล้างกันจนกลายเป็นศูนย์ จึงสามารถสรุปคุณลักษณะของการลัดวงจรแบบ หนึ่งเฟสลงดิน แบบสองเฟส และแบบสองเฟสลงดินได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แบบสองเฟส และแบบสองเฟสลงดิน

ประเภทการลัดวงจร	$ I_F^0 $	$ I_F^1 $	$ I_F^2 $
หนึ่งเฟสลงดิน	$> 0$	$> 0$	$> 0$
สองเฟส	$= 0$	$> 0$	$> 0$
สองเฟสลงดิน	$> 0$	$> 0$	$> 0$

ส่วนในการลัดวงจรแบบสามเฟสจะพบว่า หากค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร  $z_a = z_b = z_c = z_F$  จะสามารถจัดรูปสมการของกระแสลำดับได้เป็น

$$I_F^2 = (a-1)^2 [(1+2a)z_F + a^2(z_F + z_F) + z_F] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.6)$$

$$I_F^2 = (a-1)^2 [(1+2a)z_F + 2a^2z_F + z_F] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.7)$$

$$I_F^2 = (a-1)^2 (2az_F + 2a^2z_F + 2z_F) V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.8)$$

$$I_F^2 = (a-1)^2 (a^2 + a + 1)(2z_F + 2z_F + 2z_F) V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.9)$$

$$I_F^2 = 0 \quad (4.10)$$

เมื่อ  $\Delta \neq 0$

ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน จะสามารถจัดรูปสมการของกระแสลำดับศูนย์ของการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินได้เป็น

$$I_F^0 = z_s^2 [-3z_F + (1+a-2a^2)z_F + (1-2a+a^2)z_F + 9(a^2z_Fz_F + az_Fz_F + z_Fz_F)] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.11)$$

$$I_F^0 = z_s^2 [-3z_F + (1+a-2a^2)z_F + (1-2a+a^2)z_F + 9(a^2 + a + 1)z_Fz_F] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.12)$$

$$I_F^0 = z_s^2 [(-3+1+1)z_F + (a-2a)z_F + (-2a^2+a^2)z_F + 9(a^2+a+1)z_Fz_F] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.13)$$

$$I_F^0 = z_s^2 [(-1-a-a^2)z_F + 9(a^2+a+1)z_Fz_F] V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.14)$$

$$I_F^0 = 0 \quad (4.15)$$

เมื่อ  $\Delta \neq 0$

และกระแสลำดับศูนย์ของการลัดวงจรแบบสามเฟสลงดินจะสามารถจัดรูปได้เป็น

$$I_F^2 = \{3(az_Fz_F + a^2z_Fz_F + z_Fz_F) - 9z_Fz_g - 3z_Fz_s^0 + (3z_g + z_s^0)[(-2a^2+a+1)z_F + (a^2-2a+1)z_F]\} V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.16)$$

$$I_F^2 = \{3(a+a^2+1)z_Fz_F - 9z_Fz_g - 3z_Fz_s^0 + (3z_g + z_s^0)[(-a^2-a+2)z_F]\} V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.17)$$

$$I_F^2 = \{-9z_Fz_g - 3z_Fz_s^0 + (3z_g + z_s^0)(3z_F)\} V_{F,pre}^1 / \Delta \quad (4.18)$$

$$I_F^2 = 0 \quad (4.19)$$

เมื่อ  $\Delta \neq 0$

ดังนั้น จึงสามารถสรุปคุณลักษณะของการลัดวงจรสามเฟสและแบบสามเฟสลงดินได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบสามเฟส และแบบสามเฟสลงดิน

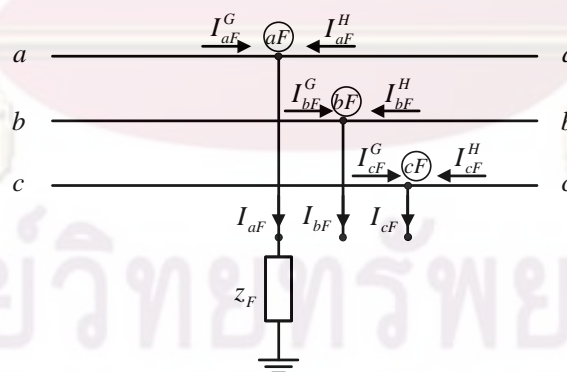
ประเภทการลัดวงจร	$z_a \neq z_b \neq z_c$			$z_a = z_b = z_c$		
	$ I_F^0 $	$ I_F^1 $	$ I_F^2 $	$ I_F^0 $	$ I_F^1 $	$ I_F^2 $
สามเฟส	= 0	> 0	> 0	= 0	> 0	= 0
สามเฟสลงดิน	> 0	> 0	> 0	= 0	> 0	= 0

จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจุดที่เกิดการลัดวงจรจะพบว่าในการลัดวงจรแต่ละประเภท จะมีกระแสลำดับบวกเกิดขึ้น และหากการลัดวงจรเป็นการลัดวงจรที่มีการลงดิน ก็จะทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ขึ้น แต่หากการลัดวงจร เป็นการลัดวงจรแบบสมมาตร ก็จะไม่มีการไหลของกระแสลำดับศูนย์และลำดับลบจ่ายไปยังจุดเกิดการลัดวงจร

เมื่อคุณลักษณะของกระแสลำดับบวกจากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 มาพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะของกระแสเฟสในการลัดวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป จะทำให้สามารถระบุประเภทของการลัดวงจรเมื่อมีข้อมูลจากทั้งสองปลายได้

### กระแสเฟสในการลัดวงจรแต่ละประเภท

ตัวอย่างการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ในการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดิน จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดิน

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟท์ จะสามารถเขียนสมการกระแส ณ โหนด  $aF$ ,  $bF$  และ  $cF$  ในรูปที่ 4.6 ได้ดังนี้

$$I_{aF} = I_{aF}^G + I_{aF}^H \quad (4.20)$$

$$I_{bF} = I_{bF}^G + I_{bF}^H \quad (4.21)$$

$$I_{cF} = I_{cF}^G + I_{cF}^H \quad (4.22)$$

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า เนื่องจากการลัดวงจรเกิดขึ้นที่เฟส a ดังนั้น จะมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นที่เฟส a เท่านั้นเมื่อแทนค่ากระแสลัดวงจรกลับเข้าไปใน (4.20)-(4.22) จะได้

$$I_{aF} = I_{aF}^G + I_{aF}^H \quad (4.23)$$

$$0 = I_{bF}^G + I_{bF}^H \quad (4.24)$$

$$0 = I_{cF}^G + I_{cF}^H \quad (4.25)$$

ตัวอย่างที่กล่าวมาในรูปที่ 4.6 และ (4.23)-(4.25) จึงสามารถสรุปเป็นคุณลักษณะของกระแสเฟสขณะเกิดการลัดวงจรได้ว่า เฟส  $k$  เป็นเฟสที่ลัดวงจรและเฟส  $n$  เป็นเฟสที่ไม่มีการลัดวงจรเมื่อ

$$|I_{kF}^G + I_{kF}^H| > 0 \quad (4.26)$$

$$|I_{nF}^G + I_{nF}^H| = 0 \quad (4.27)$$

เมื่อ  $k$  และ  $n$  แสดงเฟส a, b หรือ c โดยที่  $k \neq n$

จากการคำนวณที่เสนอมานี้ จะพบว่า การประมาณที่เกิดขึ้นในการคำนวณคือ การประมาณว่าระบบเป็นระบบที่สมมาตร และการประมาณว่า แรงดันก่อนเกิดการลัดวงจร เป็นแรงดันที่มีเฉพาะส่วนประกอบลำดับบวก ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะระบบส่งไฟฟ้าจะพบว่า การประมาณดังกล่าว เป็นการประมาณที่สมเหตุสมผล จึงส่งผลให้เงื่อนไขการคำนวณดังกล่าว เป็นเงื่อนไขที่เพียงพอในการระบุประเภทของการลัดวงจร

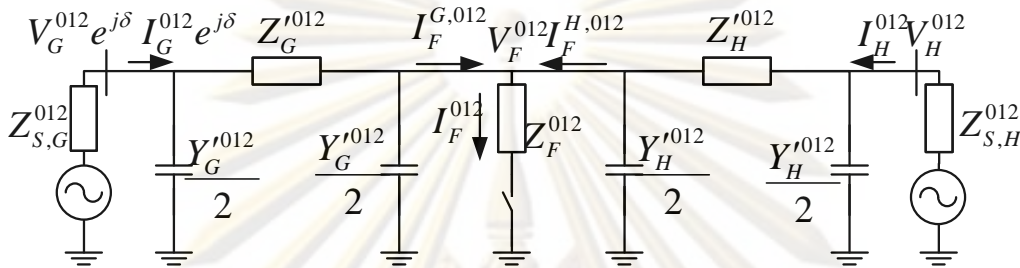
จากคุณลักษณะในการเกิดการลัดวงรดังกล่าว จะสามารถตั้งเงื่อนไขในการระบุประเภทของการลัดวงจรได้ ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.2 การระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง

จากข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล เมื่อได้ค่าของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรและมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา จะสามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่แน่นอนได้ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของการลัดวงจรแต่ละประเภท จะสามารถตั้งเงื่อนไขในการระบุประเภทของการลัดวงจรได้ ซึ่งจะอธิบายกระบวนการในการวิเคราะห์ดังนี้

### การคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติ

เนื่องจากการคำนวณในส่วนประกอบลำดับ เป็นการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน และได้คิดรวมผลของความเหนี่ยวนำระหว่างเฟสแล้ว จึงใช้การคำนวณในส่วนประกอบลำดับเพื่อหากระแส ณ จุดเกิดการลัดวงจร โดยเมื่อพิจารณาสายส่งที่มีพารามิเตอร์เป็นแบบกระจาย แผนภาพเส้นเดียวขณะเกิดการลัดวงจรของสายส่งเมื่อคิดผลของความไม่ตรงกันทางเวลาของเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลาย จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรบนสายส่ง

จากรูปที่ 4.7 กระแสขณะเกิดการลัดวงจรที่จ่ายจากฝั่ง G และฝั่ง H สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_F^{G,012} = \left[ -\frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma ml) V_G^{012} + \cosh(\gamma ml) I_G^{012} \right] e^{j\delta} \quad (4.28)$$

$$I_F^{H,012} = -\frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma(1-m)l) V_H^{012} + \cosh(\gamma(1-m)l) I_H^{012} \quad (4.29)$$

โดยค่า  $m$  และ  $\delta$  จะได้จากกระบวนการในการระบุตำแหน่งการลัดวงจร

และกระแสลำดับขณะเกิดการลัดวงจรคือ

$$I_F^{012} = I_F^{G,012} + I_F^{H,012} \quad (4.30)$$

และจะได้กระแสเฟสขณะเกิดการลัดวงจรคือ

$$I_F^{abc} = T I_F^{012} \quad (4.31)$$

เมื่อ  $T$  คือเมตริกซ์การแปลง

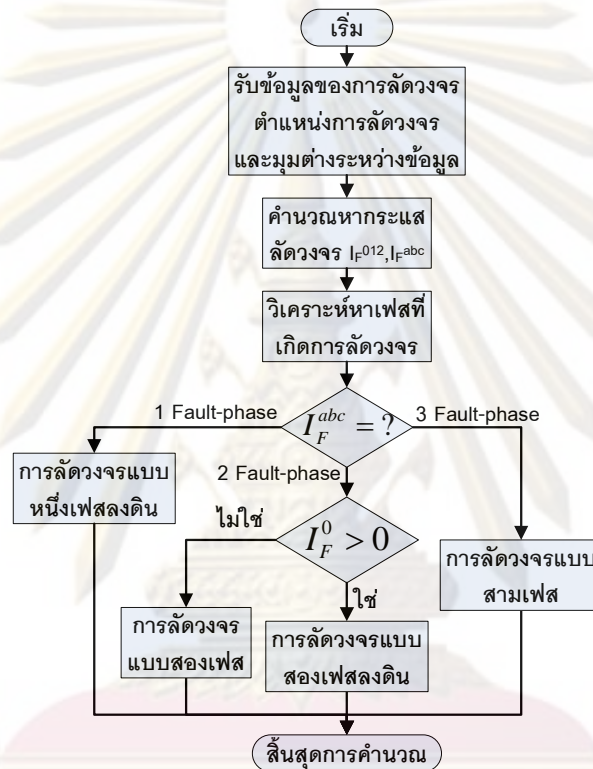
จาก (4.30) จะพบว่า การคำนวณ จะสามารถกระทำได้อีกต่อเมื่อ ทราบตำแหน่งของการลัดวงจรที่ถูกต้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2 ก่อน จึงจะสามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรได้



จากการคำนวณดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณากระแสเฟสและกระแสลำดับจะสามารถระบุประเภทของการลัดวงจรได้และเฟสของการลัดวงจรได้ โดยใช้กระบวนการดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

### กระบวนการในการระบุประเภทของการลัดวงจร

ในการระบุประเภทของการลัดวงจร จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์กระแสเฟส และการวิเคราะห์กระแสลำดับ โดยจะมีแผนภาพแสดงการวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ประเภทของการลัดวงจร

จากรูปที่ 4.8 หลังจากได้ตำแหน่งของการลัดวงจรและมุมต่างระหว่างข้อมูลทั้งสองปลาย จะทำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหากระแสลำดับและกระแสเฟสลัดวงจร เมื่อได้กระแสเฟสลัดวงจรแล้ว จะนำมาวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดการลัดวงจร และจำนวนของเฟสลัดวงจร จากจำนวนของเฟสที่เกิดการลัดวงจร จะสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น 3 กรณีตามจำนวนของเฟสที่เกิดการลัดวงจร คือ

#### มีการลัดวงจร 1 เฟส

ในกรณีนี้มีเพียงเฟสเดียวที่เกิดการลัดวงจร จะสามารถสรุปได้ว่าการลัดวงจรนั้น เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินซึ่งเฟสที่เกิดการลัดวงจรจะมาจากกรณีวิเคราะห์ในกระบวนการข้างต้น

### มีการลัดวงจร 2 เฟส

หากมีการลัดวงจรเกิดขึ้น 2 เฟส ประเภทของการลัดวงจรที่เป็นไปได้คือ การลัดวงจรแบบสองเฟส หรือ การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน ความแตกต่างระหว่างการลัดวงจรทั้งสองประเภทนี้คือ การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินจะมีกระแสลำดับศูนย์จ่ายไปยังจุดเกิดการลัดวงจร ดังนั้น หากพบว่ามีการลัดวงจร 2 เฟสแล้วขนาดกระแสลำดับศูนย์ลัดวงจรมีค่ามากกว่าศูนย์ จะสามารถสรุปได้ว่าเป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แต่หากค่ากระแสลำดับศูนย์ลัดวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ การลัดวงจรจะเป็นการลัดวงจรแบบสองเฟส ซึ่งเฟสที่เกิดการลัดวงจรจะสามารถระบุได้จากกระบวนการก่อนหน้า

### มีการลัดวงจร 3 เฟส

ในกรณีที่มีเฟสที่เกิดการลัดวงจร 3 เฟสจะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการลัดวงจรนั้น เป็นข้อมูลการลัดวงจรแบบสามเฟส

ในการประยุกต์ใช้การระบุประเภทตามที่ได้เสนอมานี้ การจะระบุว่าไม่มีกระแสลัดวงจร จะเป็นการระบุว่าขนาดของกระแสมีค่าน้อยกว่าค่าขนาดเล็กๆ เนื่องจากในทางปฏิบัติ จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ทำให้ขนาดกระแสของเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรมีค่ามากกว่า 0 เล็กน้อย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดให้ค่ากระแสมีค่าเป็นศูนย์หากขนาดของกระแสมีค่าน้อยกว่า 5% ของขนาดกระแสสูงสุดในเฟสหรือส่วนประกอบลำดับ

กระบวนการในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายที่ได้เสนอมานี้ได้ถูกนำมาทดสอบ ซึ่งจะมีรายละเอียดของผลการทดสอบแสดงในบทที่ 5 ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

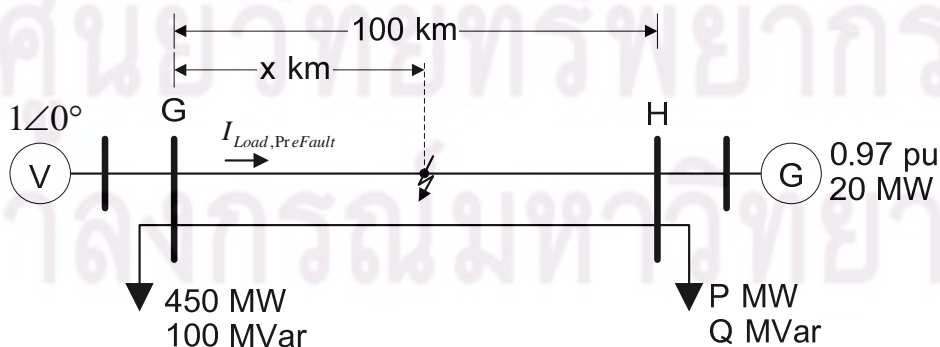
วิธีการที่ได้นำเสนอมาในบทที่ผ่านมา ได้ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพกับข้อมูลที่ทราบคำตอบของทั้งตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจร โดยระบบที่ในใช้การทดสอบจะมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 5.1 ส่วนผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลจากกระบวนการในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรและการระบุประเภทของการลัดวงจร จะแสดงในหัวข้อที่ 5.2 และหัวข้อที่ 5.3 ตามลำดับ

#### 5.1 ระบบทดสอบ

ในการทดสอบจะแบ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1. ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และ 2. ข้อมูลที่บันทึกจากเครื่องบันทึกความผิดปกติ ที่ติดตั้งไว้ในระบบส่งไฟฟ้า โดยรายละเอียดของแต่ละระบบจะอยู่ในหัวข้อที่ 5.1.1 และ 5.1.2 ตามลำดับ

##### 5.1.1 ข้อมูลการลัดวงจรที่ได้จากระบบจำลองการลัดวงจรชั่วคราว

ระบบจำลองการลัดวงจรแบบชั่วคราวที่ใช้ในการทดสอบสามารถแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้า 2 แห่ง (บัส G, H) เชื่อมโยงผ่านสายส่ง จำนวน 4 เส้น จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และแบบจำลองจากกล่องเครื่องมือ SimPowerSystems โดยบัส G เชื่อมต่อกับบัสอ้างอิง แทนด้วยบัสอนันต์ บัส H เชื่อมต่อกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส สายส่งแทนด้วยแบบจำลองสายส่งที่ใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed parameter Line Model) จุดทำงานก่อนเกิดลัดวงจรและตำแหน่งการลัดวงจรเป็นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวระบบที่ใช้ในการจำลองการลัดวงจรแบบชั่วคราว

ในการจำลอง จะทำการปรับเปลี่ยนในการลัดวงจรต่างๆ เช่น กระแสไหลตกก่อนเกิดการลัดวงจร ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร และประเภทของการลัดวงจร ทั้งนี้ เงื่อนไขในการจำลองต่างๆ จะอธิบายไว้ในบททดสอบแต่ละหัวข้อ

### 5.1.2 ข้อมูลการลัดวงจรที่ได้จากระบบจริง

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นข้อมูลที่บันทึกจากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล ที่ติดตั้งไว้ที่สถานีไฟฟ้าต่างๆ ทั่วประเทศ โดยในที่นี้ เลือกใช้ชุดข้อมูลที่มีการวิเคราะห์หาประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจรโดยเจ้าหน้าที่ทั้งฝ่ายวิเคราะห์และฝ่ายปฏิบัติการแล้ว เหตุการณ์ที่ได้เลือกมาทั้งหมด เป็นเหตุการณ์ที่มีหลักฐานของการเกิดลัดวงจรที่น่าเชื่อถือ ประกอบไปด้วย 8 เหตุการณ์ ทุกเหตุการณ์เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ซึ่งจะนำมาใช้ในการทดสอบกระบวนการในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรต่อไป

## 5.2 การทดสอบการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร

ในการทดสอบนี้ จะทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการคำนวณ 3 วิธีคือ การคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน การคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน และการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ ซึ่งคำตอบที่ได้ จะนำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ทราบ โดยจะใช้สมการในการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$error(\%) = \frac{|actual\ location - calculated\ location|}{transmission\ line\ length} \times 100 \quad (5.1)$$

เมื่อ

*calculated location* : ตำแหน่งการลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณ

*actual location* : ตำแหน่งการลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริง

*transmission line length* : ความยาวรวมของสายส่ง

ในการทดสอบกับค่าที่ได้จากการจำลอง จะทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ ต่อเวลาที่ต่างกันของเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลาย ในเงื่อนไขการลัดวงจรต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

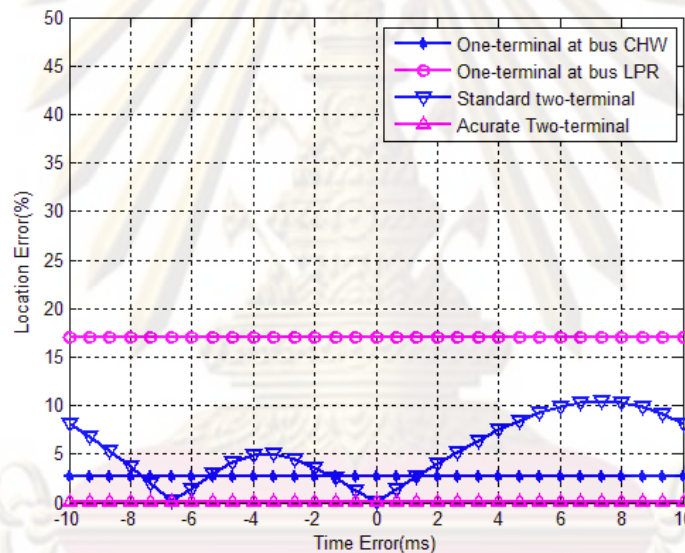
1. การศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการลัดวงจรต่อความถูกต้อง ในการทำสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการลัดวงจร เป็น 10, 50 และ 90 กิโลเมตรจากบัส 1 โดยจะให้ค่าความต้านทานลัดวงจรมีค่า 10 โอห์ม

2. การศึกษาผลกระทบของความต้านทานลัดวงจร ในการทดสอบจะให้ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรเป็น 80 กิโลเมตรจากบัส G โดยจะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานลัดวงจร เป็น 0, 10, 20 และ 50 โอห์ม

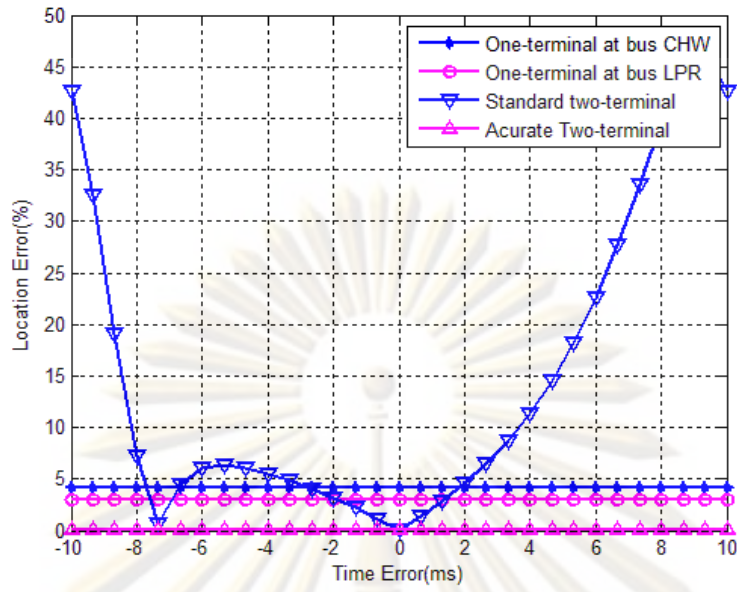
การจำลองในการทดสอบการระบุตำแหน่งนี้ จะควบคุมกระแสไหลตก่อนเกิดการลัดวงจร ให้มีค่าเท่ากับคือ 200 แอมแปร์ และให้การลัดวงจรเป็นแบบเฟส a ลงดินในทุกกรณี ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ จะแสดงในหัวข้อถัดไป

### 5.2.1 ผลการทดลองกับค่าจากระบบจำลอง

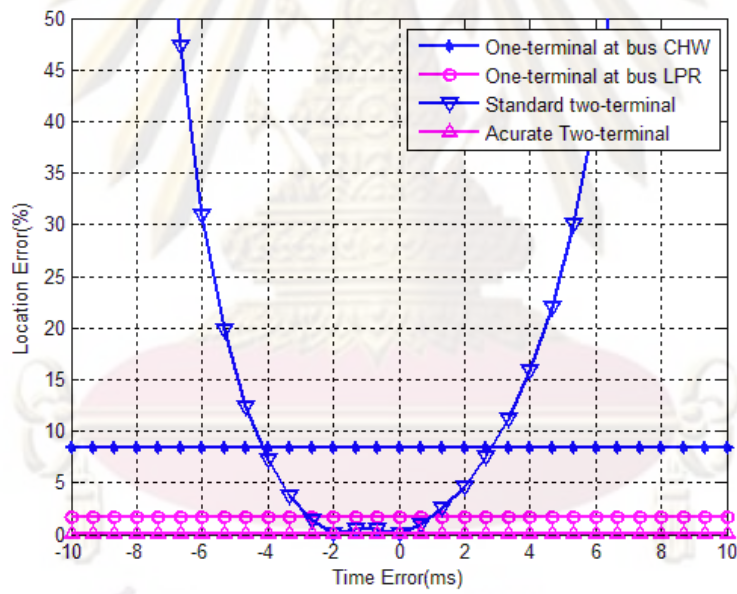
ผลการทดสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางเวลาระหว่างเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลาย จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3



ก. เกิดการลัดวงจรที่ 10 กิโลเมตรจากบัส G

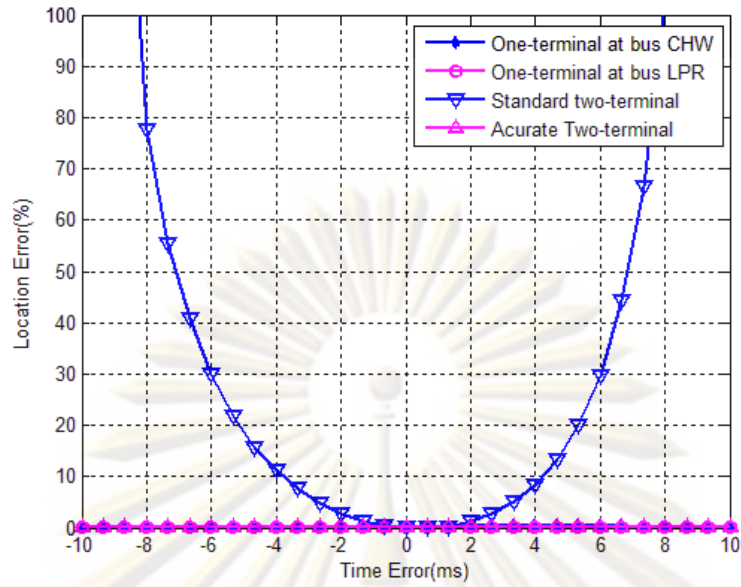


ข. เกิดการลัดวงจรที่ 50 กิโลเมตรจากบัส G

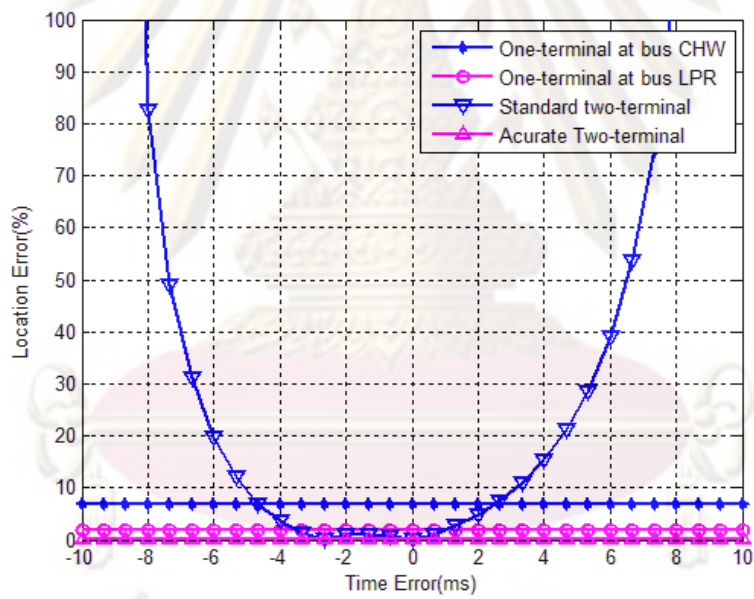


ค. เกิดการลัดวงจรที่ 90 กิโลเมตรจากบัส G

รูปที่ 5.2 การศึกษาผลของกระทบของตำแหน่งการลัดวงจรต่อความถูกต้อง

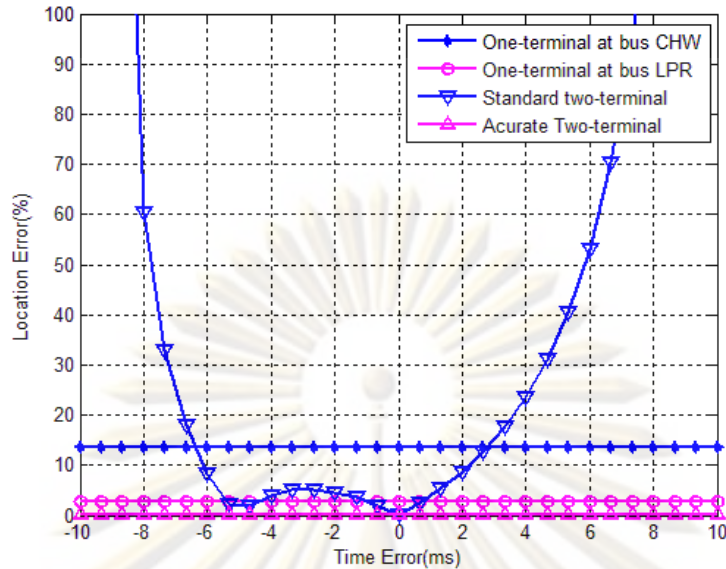


ก. ความต้านทานลัดวงจรประมาณ 0 โอห์ม

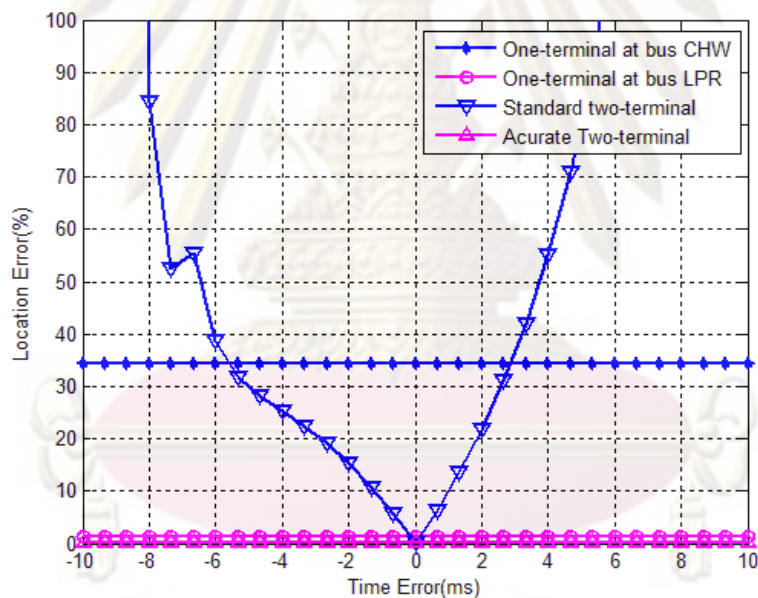


ข. ความต้านทานลัดวงจรเป็น 10 โอห์ม

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค. ความต้านทานลัดวงจรเป็น 20 โอห์ม



ง. ความต้านทานลัดวงจรเป็น 50 โอห์ม

รูปที่ 5.3 การศึกษาผลของความต้านทานลัดวงจรต่อความถูกต้อง

จากรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน จะไม่ขึ้นกับความคลาดเคลื่อนทางเวลาระหว่างเครื่องบันทึก แต่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งการลัดวงจรอยู่ห่างมากขึ้นจากบัสที่นำข้อมูลมาคำนวณ และจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของความต้านทานลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น ในการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐานจะมีความแม่นยำมากในทุกเงื่อนไขการลัดวงจร หากข้อมูลที่ได้มีเวลา



ของเครื่องบันทึกที่ตรงกัน แต่หากเวลาของเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลายมีความคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งการลัดวงจรมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานลัดวงจรเพิ่มขึ้น และตำแหน่งการลัดวงจรอยู่ห่างจากบัส G มากขึ้น ส่วนการคำนวณด้วยวิธีการสองปลายแบบ แม่นตรงจะให้คำตอบที่มีความแม่นยำในทุกเงื่อนไขการคำนวณ ถึงแม้ว่าเวลาของเครื่องบันทึก จากทั้งสองปลายจะมีความคลาดเคลื่อนกัน

ในการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน จะใช้ข้อมูลในการคำนวณเพียง ปลายเดียว ดังนั้นหากกระบวนการเลือกข้อมูลในการคำนวณ เลือกช่วงของการลัดวงจรที่เข้าสู่ สภาวะมั่นคงแล้ว คำตอบที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าเท่ากันเสมอ แต่เนื่องจากการคำนวณมี การประมาณให้  $\text{Im}\left(R_F \frac{I_F}{I_G}\right) = 0$  เมื่อ  $I_G$  คือกระแสที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นเมื่อตำแหน่งการ ลัดวงจรอยู่ห่างจากบัสที่นำข้อมูลมาใช้ในการคำนวณ จะทำให้กระแสลัดวงจรจากอีกปลายมีค่า เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มุมเฟสกระแสลัดวงจรและกระแสที่ใช้ในการคำนวณมีความต่างกันมากขึ้น ซึ่งทำให้ ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณมีค่ามากขึ้น และหากความต้านทานลัดวงจรมีค่ามากขึ้น จะทำ  $\text{Im}\left(R_F \frac{I_F}{I_G}\right)$  มีค่ามากขึ้น จึงทำให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน

จากวิธีการคำนวณขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน ได้มีการรวมผลของแรงดันที่ ตำแหน่งการลัดวงจรไว้แล้ว ดังนั้น หากข้อมูลที่ใช้คำนวณ เป็นข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลที่มี เวลาตรงกันทั้งสองเครื่อง จะทำให้คำตอบที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำสูง โดย ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณจะเหลือเพียงผลจากการประมาณแบบจำลองสายส่งเป็นแบบ ระยะสั้น ซึ่งจะมีผลเมื่อความยาวของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่เครื่องบันทึกข้อมูลจากทั้ง สองปลายมีความต่างกันทางเวลา ความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสขณะเกิดการ ลัดวงจรมีค่าลดลง

ในการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ ได้มีการรวมผลของทั้งแรงดันที่ ตำแหน่งการลัดวงจร และความไม่ตรงกันทางเวลาของเครื่องบันทึกข้อมูล ไว้แล้วในการคำนวณ ดังนั้น คำตอบที่ได้จากการคำนวณจึงมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก แม้กระแสขณะเกิดการ ลัดวงจรจะมีค่าน้อย ความต้านทานลัดวงจรมีค่ามาก หรือมีความคลาดเคลื่อนกันทางเวลา ระหว่างเครื่องบันทึกจากทั้งสองปลาย ก็ตาม

## 5.2.2 ผลจากข้อมูลจริง

การทดสอบกระบวนการในการวิเคราะห์แบบอัตโนมัติ เพื่อหาตำแหน่งของการลัดวงจร บนสายส่ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งการลัดวงจรโดยการใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย

Case	Line Length (km)	Reported Location (km)	Std. One-End		Std. Two-End		Accurate Two-End	
			Location (km)	Error (%)	Location (km)	Error (%)	Location (km)	Error (%)
1	41.92	39.44	42.40	7.056	41.78	5.575	39.51	0.158
2	97.50	66.43	37.13	30.055	66.87	0.451	66.42	0.012
3	76.68	38.39	40.56	2.826	41.68	4.289	38.74	0.456
4	76.68	67.60	77.12	12.419	72.70	6.657	67.95	0.459
5	76.68	38.39	39.50	1.450	41.15	3.595	39.11	0.938
6	139.3	19.40	18.59	0.580	17.81	1.141	18.76	0.457
7	97.90	49.55	63.87	14.625	52.02	2.526	49.63	0.078
8	136.7	135.06	149.35	10.453	143.73	6.345	12.01	90.017

ในตารางที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้ในการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน และขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ กับค่าตอบที่ได้จากการรายงานของฝ่ายปฏิบัติการ ความยาวทั้งหมดของสายส่งที่เกิดการลัดวงจรแสดงในคอลัมน์ที่ 2 และตำแหน่งการลัดวงจรจากการรายงานของฝ่ายปฏิบัติการแสดงในคอลัมน์ที่ 3 การคำนวณตำแหน่งการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน สองปลายแบบมาตรฐาน และสองปลายแบบแม่นยำ สามารถแสดงได้ดังในคอลัมน์ที่ 4, 6 และ 8 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 5, 7 และ 9 แสดงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณดังกล่าว (5.1)

จากตารางที่ 5.1 พบว่า ผลที่ได้จากการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบจริงมีความสอดคล้องการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบจำลอง คือการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวแบบมาตรฐาน จะให้ค่าตอบในการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งการลัดวงจรจริงมาก ในหลายๆ เหตุการณ์การลัดวงจร และการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบมาตรฐาน จะให้ตำแหน่งของการลัดวงจรที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า หากเทียบกับการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียว ส่วนการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ จะให้ค่าตอบในการคำนวณที่มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรจริงในเกือบทุกกรณี ยกเว้นในกรณีที่ 8 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณสูง

จากกระบวนการที่ได้นำเสนอ เมื่อนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำในการคำนวณกับขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำ จะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำกับขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว

Case	Line Length (km)	Report Location (km)	Original Initialization				Proposed Initialization			
			Location (km)	Error (%)	No. of Iter.	$ V_F^G - V_F^H $ (p.u.)	Location (km)	Error (%)	No. of Iter.	$ V_F^G - V_F^H $ (p.u.)
1	41.92	39.44	39.51	0.158	2	2.E-05	39.51	0.158	3	2.E-05
2	97.50	66.43	66.41	0.016	4	7.E-06	66.42	0.012	4	1.E-05
3	76.68	38.39	38.75	0.470	1	3.E-05	38.74	0.456	3	4.E-05
4	76.68	67.60	67.96	0.466	2	4.E-05	67.95	0.459	4	9.E-06
5	76.68	38.39	39.11	0.933	2	3.E-06	39.11	0.938	4	3.E-05
6	139.3	19.40	18.77	0.455	2	1.E-04	18.76	0.457	2	4.E-04
7	97.90	49.55	49.63	0.079	2	2.E-06	49.63	0.078	4	6.E-06
8	136.7	135.06	12.01	90.017	2	1.E-05	135.08	0.016	2	1.E-03

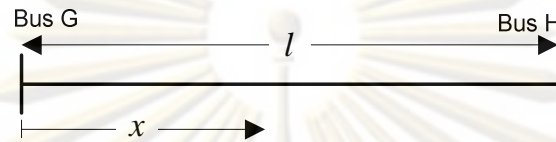
ในตารางที่ 5.2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคำนวณระหว่างขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำและขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำที่ได้รับการปรับปรุงการคำนวณค่าเริ่มต้น โดยได้มีการแสดงจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณแบบวนซ้ำและขนาดของความต่างระหว่างแรงดันที่ตำแหน่งการลัดวงจรจากการคำนวณด้วยข้อมูลจากฝั่ง G กับฝั่ง H ในคอลัมน์ที่ 6, 10 และ 7, 11 ตามลำดับ

จากตารางที่ 5.2 ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำที่ได้รับการปรับปรุงการคำนวณค่าตั้งต้น จะให้ผลการคำนวณตำแหน่งการลัดวงจรที่มีความเท่ากับขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำดั้งเดิม ยกเว้นในกรณีที่ 8 ที่วิธีการที่นำเสนอจะให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งการลัดวงจรจริงมากกว่า ซึ่งค่าในคอลัมน์ 7, 11 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันที่ตำแหน่งการลัดวงจรเมื่อคำนวณด้วยข้อมูลจากปลาย G และปลาย H ของทั้งสองวิธีจะมีค่าที่สอดคล้องกัน ( $V_F^G \approx V_F^H$ ) และความเร็วในการคำนวณถือว่าอยู่ในระดับที่เร็ว อย่างไรก็ตาม การคำนวณด้วยวิธีการที่นำเสนอ จะใช้จำนวนรอบในการคำนวณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม

ในขณะที่เกิดการลัดวงจรขึ้น ตำแหน่ง  $x$  ที่จะทำให้เงื่อนไข  $V_x^G(x) = V_x^H(1-x)$  เป็นจริง ก็ต่อเมื่อ  $x$  เป็นตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นหากการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำถูกใช้ ตำแหน่งของการลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณจะเป็นคำตอบที่ถูกต้องแสดงในตารางที่ 5.2 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การลัดวงจรเกิดขึ้นใกล้กับปลายใดปลายหนึ่งของสายส่ง กระแสลัดวงจรจากปลายดังกล่าวจะมีค่าสูง ซึ่งในกรณีดังกล่าว อาจทำให้ตำแหน่งที่ทำให้เงื่อนไข

$V_x^G(x) = V_x^H(1-x)$  เป็นจริง มีมากกว่า 1 ตำแหน่ง ดังในกรณีที่ 8 คำตอบที่เป็นไปได้จากข้อมูลการลัดวงจรคือ  $m \times l = 12.01 \text{ km}$  และ  $m \times l = 135.07 \text{ km}$  ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองคำตอบมีความสัมพันธ์กับค่ามุมคลาดเคลื่อนเริ่มต้น ( $\delta_0$ ) ทั้งสองค่าจากการคำนวณด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ดังนั้น หากเลือกค่ามุมคลาดเคลื่อนเริ่มต้นที่ผิด การคำนวณแบบวนซ้ำจะเข้าสู่คำตอบที่ผิด

รูปที่ 5.4 แสดงการวัดระยะทาง  $x$  จากบัส  $G$  บนสายส่งยาว  $l$  แรงดันที่ตำแหน่ง  $x$  ต่างๆ บนสายส่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

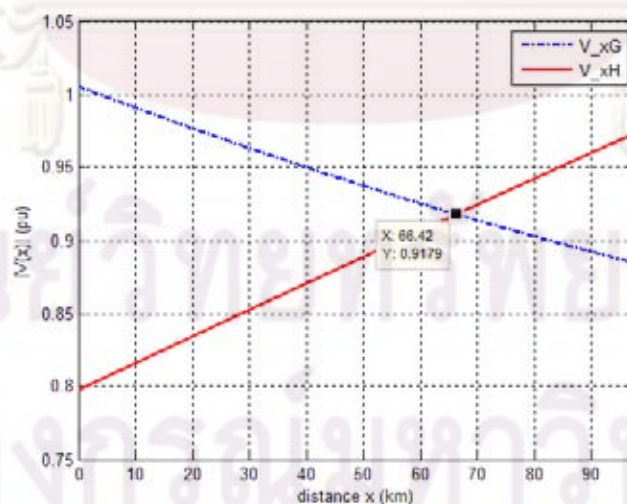


รูปที่ 5.4 การวัดระยะทาง  $x$  ในการคำนวณบนสายส่ง

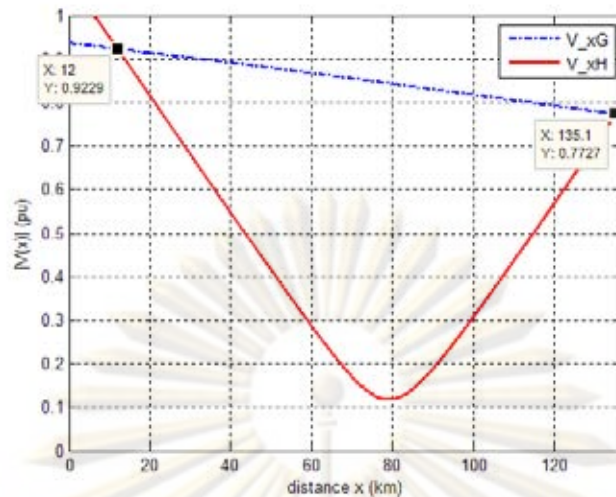
$$V_x^G(x) = V_G \cosh(\gamma x) - I_G Z_C \sinh(\gamma x) \quad (5.2)$$

$$V_x^H(x) = V_H \cosh(\gamma(1-x)) - I_H Z_C \sinh(\gamma(1-x)) \quad (5.3)$$

จาก (5.2), (5.3) หากการลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีกระแสลัดวงจรมีค่าไม่สูงและสายส่งมีความยาวไม่มาก ตำแหน่ง  $x$  ที่ทำให้เงื่อนไข  $V_x^G(x) = V_x^H(x)$  เป็นจริง จะมีเพียงคำตอบเดียว อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การลัดวงจรเกิดขึ้นบนสายส่งที่มีความยาวตั้งแต่ขนาดกลาง และมีกระแสลัดวงจรปลายใดปลายหนึ่งมีค่าสูง เมื่อค่า  $x$  เพิ่มขึ้น จะทำให้พจน์  $\sinh(\gamma x)$  มีอิทธิพลในการคำนวณมาก ซึ่งจะทำให้ขนาดของแรงดันที่คำนวณได้มีค่ามากขึ้น เมื่อ  $x$  มีค่ามากขึ้น ในกรณีนี้ อาจทำให้ระยะทาง  $x$  ที่ทำให้เงื่อนไข  $V_x^G(x) = V_x^H(x)$  มีมากกว่า 1 คำตอบได้



รูปที่ 5.5 แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนสายส่ง ที่ได้จากการคำนวณในกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5.6 แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนสายส่ง ที่ได้จากการคำนวณในกรณีศึกษาที่ 8

รูปที่ 5.5 และ รูปที่ 5.6 แสดงการคำนวณขนาดของแรงดันที่ระยะทาง  $x$  ต่างๆ บนสายส่งในกรณีศึกษาที่ 2 และ 8 ตามลำดับ โดยแกนตั้งแสดงขนาดของแรงดันที่คำนวณได้ และแกนนอนแสดงระยะห่างจากบัส G จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า จากการใช้ค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 ในการคำนวณ ค่าระยะทาง  $x$  ที่เป็นคำตอบจะมีเพียงค่าเดียวคือ  $x = 66.42 \text{ km}$  ในขณะที่ การคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาที่ 8 จะมีค่าระยะทาง  $x$  ที่เป็นคำตอบได้ 2 ค่าคือ  $x = 12.01 \text{ km}$  และ  $x = 135.08 \text{ km}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.6 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าตั้งต้นที่ได้จากขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำดั้งเดิมจะทำให้การคำนวณที่ลู่อู่อู่ค่า  $x = 12.01 \text{ km}$  ส่วนการคำนวณค่าตั้งต้นด้วยวิธีที่ได้นำเสนอจะทำให้การคำนวณแบบวนซ้ำลู่อู่อู่ค่า  $x = 136.06 \text{ km}$  ซึ่งระยะลัดวงจรจากการรายงานของฝ่ายปฏิบัติการคือระยะ  $x = 136.06 \text{ km}$

วิธีการคำนวณค่าเริ่มต้นที่นำเสนอ จะให้คำตอบของมุลคลาดเคลื่อนระหว่างปลายทั้งสองเพียงค่าเดียว แม้ว่าคำตอบที่ได้ จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม แต่จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า มุลคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้นี้ จะทำให้การคำนวณแบบวนซ้ำลู่อู่อู่ค่าที่ถูกต้องในทุกครั้งของการคำนวณ

### 5.3 การระบุประเภทของการลัดวงจร

หลังจากที่สามารถคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรและมุลคลาดเคลื่อนทางเวลาระหว่างเครื่องบันทึกเหตุขัดข้องทั้งสองปลายได้แล้ว ข้อมูลทั้งหมด จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาประเภทของการลัดวงจรดังเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ได้ จากวิธีดังกล่าว จึงได้นำมาทำการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบจำลองและกับข้อมูลที่ได้จากการบันทึกข้อเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติพร้อม ซึ่งเงื่อนไขของระบบทดสอบมีดังนี้

ในทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง จะทำการศึกษาผลของขนาดของกระแสไหลดบนสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร และค่าความต้านทานลัดวงจร โดยจะทำการปรับค่ากระแสไหลดก่อนเกิดการลัดวงจรเป็น 0.2, 0.5, 1, และ 1.5 กิโลแอมแปร์ และจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานลัดวงจรเป็น 0, 10, 20 และ 50 โอห์ม ทุกการจำลองจะให้ตำแหน่งการลัดวงจรห่างจากบัส G เป็นระยะทาง 90 กิโลเมตร แต่จะไม่พิจารณากรณีที่กระแสไหลดก่อนเกิดการลัดวงจรมีค่ามากกว่ากระแสขณะเกิดการลัดวงจร นั่นคือกรณีที่กระแสไหลดมีค่าตั้งแต่ 1 กิโลแอมแปร์ขึ้นไปที่มีความต้านทานลัดวงจร 50 โอห์ม ในทุกประเภทของการลัดวงจร

ส่วนข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกความผิดพลาดจะประกอบไปด้วย 8 เหตุการณ์ โดยเป็นชุดของเหตุการณ์เดียวกันที่ใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่งการลัดวงจร และจะใช้คำตอบของการลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณ ในการคำนวณหากระแสลัดวงจร แล้วจึงนำคำตอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากผู้เชี่ยวชาญและรายงานจากฝ่ายปฏิบัติการ

ผลการทดสอบกับระบบทั้งสองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การทดสอบการระบุประเภทของการลัดวงจร

ที่มา/ประเภทของการลัดวงจร		จำนวนเหตุการณ์	ความถูกต้อง(ร้อยละ)
จากการจำลอง	หนึ่งเฟสลงดิน	14	100
	สองเฟส	14	100
	สองเฟสลงดิน	14	100
	สามเฟส	14	100
จากระบบจริง / หนึ่งเฟสลงดิน		8	100

จากตารางที่ 5.3 วิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบของการลัดวงจรที่แม่นยำในทุกประเภทของการลัดวงจร เนื่องจากในการระบุประเภทของการลัดวงจร จะใช้ตำแหน่งและมุมชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลา ในการคำนวณหากระแสที่ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร จากการที่การคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยการใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลาย มีความแม่นยำในการคำนวณสูง จึงทำให้การคำนวณหากระแสลัดวงจรมีความแม่นยำด้วย โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำให้กระแสในเฟสหรือลำดับที่ไม่มีการลัดวงจรมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จะมาจากความคลาดเคลื่อนในการประมาณของแบบจำลองสายส่ง การเลือกช่วงในการคำนวณ ที่ยังไม่เข้าสู่สภาวะมั่งคั่งโดยสมบูรณ์ หรือความไม่สมมาตรของแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจร ซึ่งในทางปฏิบัติ จะต้องมีการปรับค่าขีดแบ่งในการพิจารณาว่าขนาดกระแสลัดวงจรมีค่ามากกว่าศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ จากการทดลองด้วยข้อมูลจริงในจำนวนที่มากขึ้นต่อไป

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบการระบุตำแหน่งการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีแบบแมนตรงกับทั้งข้อมูลที่ได้จากการจำลองการลัดวงจร และข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลที่มีการติดตั้งไว้ในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้เสนอการคำนวณค่าตั้งต้นของมอดูลเซชความคลาดเคลื่อนทางเวลา ที่จะทำ ให้ได้คำตอบจากการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำในทุกเงื่อนไขการคำนวณ จากนั้นได้เสนอกระบวนการในการระบุประเภทของการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากทั้งสองปลายของสายส่ง รวมถึงได้เสนอระบบที่ใช้ในการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรแบบอัตโนมัติ ที่จะเริ่มจาก การจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ เพื่อให้ได้ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการแปลงข้อมูลดิบ ให้เป็นข้อมูล เฟสเซอร์ของกระแสและแรงดัน ทั้งก่อนและขณะเกิดการลัดวงจร และเมื่อระบุได้ว่าการลัดวงจรที่ เกิดขึ้น มีข้อมูลจากทั้งสองปลายหรือไม่แล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งและ ประเภทของการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวหรือสองปลายต่อไป

ในการจัดการข้อมูลก่อนการคำนวณ จะแปลงข้อมูลดิบ แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ทำการแปลง แล้ว มาใช้ในการระบุเวลาต่างๆ ของการลัดวงจร เมื่อได้เวลาของการลัดวงจรแล้ว จะสามารถระบุ ถึงลำดับของการลัดวงจรในข้อมูลที่บันทึกมาและสายส่งที่เกิดการลัดวงจรได้ หากข้อมูลของเวลา การเริ่มการลัดวงจร ลำดับของการลัดวงจร และสายส่งที่เกิดการลัดวงจรเข้าเงื่อนไขของการ ลัดวงจรแบบสองปลาย จะทำการนำข้อมูลทั้งหมด ไปประมาณผลในการวิเคราะห์แบบสองปลาย ต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบสองปลาย จะเริ่มจากการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร ในการ ระบุตำแหน่งของการลัดวงจร จะใช้ปริมาณลำดับบวกในการคำนวณ ซึ่งจะไม่ขึ้นกับชนิดของการ ลัดวงจร การวิเคราะห์สามารถแบ่งการคำนวณได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ 1.การคำนวณค่าเริ่มต้น ซึ่งใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอการหาค่าตั้งต้นของมอดูลเซชความคลาดเคลื่อนทางเวลา โดยการ ใช้ ค่ากระแสและแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรในการคำนวณ แล้วจึงนำค่ามอดูลที่ได้ ไปใช้ในการค่าตั้ง ต้นของตำแหน่งการลัดวงจร ซึ่งค่าทั้งสองนี้ จะถูกใช้เป็นในการคำนวณแบบวนซ้ำ 2.ในการ คำนวณแบบวนซ้ำจะใช้แบบจำลองสายส่งเป็นแบบกระจาย และใช้การคำนวณวนซ้ำ แบบ Newton-Raphson ในการคำนวณหาค่าตอบ ที่ประกอบไปด้วยตำแหน่งและมอดูลคลาดเคลื่อน

ระหว่างข้อมูล 3. การคำนวณแบบวนซ้ำจะหยุดการคำนวณเมื่อค่าจากการคำนวณเข้าเงื่อนไขในการหยุดการคำนวณ

การระบุประเภทของการลัดวงจร จะใช้คำตอบที่ได้จากการระบุตำแหน่งของการลัดวงจร มาใช้ร่วมกับข้อมูลการลัดวงจร โดยจะทำการปรับค่ามุมของกระแสและแรงดันทั้งสองปลาย ให้มีความสอดคล้องกัน จากนั้น ใช้ข้อมูลที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว ในการคำนวณหากระแสที่จ่ายไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร แล้วจึงนำค่ากระแสที่ได้ มาตรวจสอบกับเงื่อนไขของการลัดวงจรแต่ละประเภท

จากระบบที่ได้นำเสนอนี้ ได้ถูกนำมาทำการทดสอบกับข้อมูลการลัดวงจรทั้งกับข้อมูลที่ได้จากระบบในการจำลอง และข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงของเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ระบบที่เสนอ สามารถให้ตำแหน่งของการลัดวงจร ที่มีความใกล้เคียงกับคำตอบจากการรายงานของฝ่ายปฏิบัติการ และให้ประเภทของการลัดวงจรที่ถูกต้องตามที่ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการวิเคราะห์ไว้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาการระบุตำแหน่งและประเภทของการลัดวงจรแบบอัตโนมัติมีดังนี้

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้การขีดเส้นแบ่งในการหาเวลาที่เริ่มต้นการลัดวงจรและเวลาที่สิ้นสุดการลัดวงจร จากการวิเคราะห์ข้อมูลรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ซึ่งในการคำนวณข้อมูลดังกล่าว จะต้องใช้ข้อมูลจำนวน 1 คาบในการคำนวณ จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสขณะเริ่มเกิดการลัดวงจรมีค่าลดลง ดังนั้นหากสามารถหากระบวนการที่ใช้ในการแปลงข้อมูลที่ละเอียดแล้วสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ จะทำให้สามารถระบุเวลาของการลัดวงจรได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณแบบสองปลาย

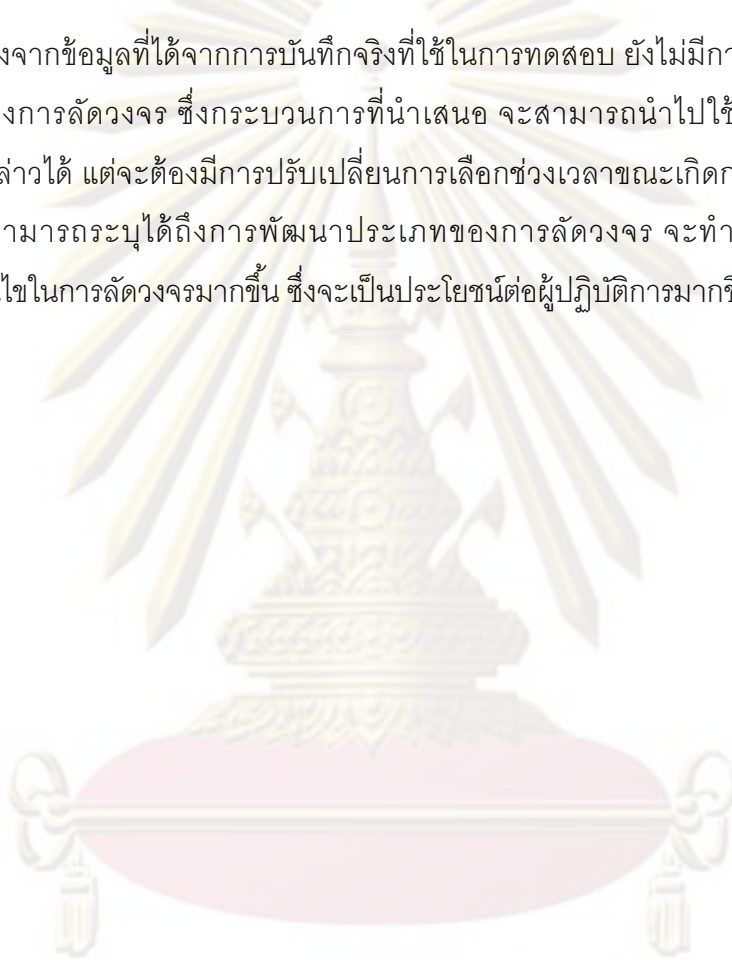
2. จากกระบวนการในการระบุตำแหน่งของการลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายแบบแม่นยำนั้น เป็นการคำนวณโดยตั้งสมมุติฐานว่าข้อมูลที่บันทึกได้มีความถูกต้อง ซึ่งในทางปฏิบัติข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกความผิดปกติ อาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ เช่น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากหม้อแปลง ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเครื่องบันทึกความผิดปกติ หรือความคลาดเคลื่อนจากการส่งสัญญาณจากหม้อแปลงมายังเครื่องบันทึกความผิดปกติ ดังนั้น



หากสามารถหาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนและลดผลของความคลาดเคลื่อนได้ จะทำให้คำตอบที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3. เนื่องจากในการระบุประเภทของการลัดวงจร จะมีการตั้งค่าของกระแสในการตัดสั้นเฟสที่มีการลัดวงจร ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าที่ได้จากการบันทึกจริงของเครื่องบันทึกพบว่า ในบางกรณี ขนาดของกระแสที่คำนวณได้ในเฟสที่ไม่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น ยังคงมีค่าสูง ทั้งนี้ หากมีข้อมูลการลัดวงจรที่เพียงพอ จะทำให้สามารถตั้งค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมในการระบุเฟสที่เกิดการลัดวงจร

4. เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจริงที่ใช้ในการทดสอบ ยังไม่มีการลัดวงจรที่มีการพัฒนาชนิดของการลัดวงจร ซึ่งกระบวนการที่น่าเสนอ จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ดังกล่าวได้ แต่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนการเลือกช่วงเวลาขณะเกิดการลัดวงจร ซึ่งในอนาคต หากสามารถระบุได้ถึงการพัฒนาประเภทของการลัดวงจร จะทำให้การวิเคราะห์ครอบคลุมเงื่อนไขในการลัดวงจรมากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติการมากขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Izykowski, J., Molag, R., Rosolowski, E., and Saha, M.M. Accurate Location of Faults on Power Transmission Lines With Use of Two-End Unsynchronized Measurements. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 21, April 2006: pp.627-633
- [2] IEEE Std C37.114-2004 IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines, Jan. 2005
- [3] Girgis, A.A., Hart, D. G., and Peterson, W.L. A new fault location technique for two- and three terminal lines. IEEE Trans. Power Delivery Vol. 7, No. 1 Jan. 1992.: pp. 98–107.
- [4] Novosed, D., Hart, D.G., Udren, E., and Garitty, J. Unsynchronized two-terminal fault location estimation. IEEE Trans. on Power Delivery Vol.11, No.1 Jan. 1996: pp.130-138
- [5] Dalcastagne, A.L., Filho, S.N., Zurn, H.H., and Seara, R. A Two-terminal Fault Location Approach Based on Unsynchronized Phasors. International Conference on Power System Tecnology 2006
- [6] Dalcastagne, A.L., Filho, S.N., Zurn, H.H., and Seara, R. An Iterative Two-Terminal Fault-Location Method Based on Unsynchronized Phasors. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, Oct. 2008: pp. 2318-2329
- [7] Liao, Y., and Kezunovic, M. Optimal Estimate of Transmission Line Fault Location Considering Measurement Errors. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No.3, July 2007: pp. 1335-1341
- [8] Liao, Y. Algorithm For Fault Location And Line Parameter Estimation Utilizing Voltage and Current Data During the Fault. 40th Southeastern on System Theory University of New Orleans. New Orleans, LA, USA. March, 2008.
- [9] Liao, Y., and Kang, N. Fault-Location Algorithms Without Utilizing Line Parameters Based on the Distributed Parameter Line Model. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 24, No. 2, April 2009: pp. 579-584

- [10] Izykowski, J., Rosolowski, E., Balcerek, P., Fulczyk, M., and Saha, M.M. Accurate Noniterative Fault-Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. IEEE Trans. On Power Delivery. 2009
- [11] Balcerek, P., and Izykowski, J. Improved unsynchronized two-end algorithm for locating faults in power transmission lines. IEEE Bologna PowerTech Conf. Bologna, Italy, Jun. 2003.
- [12] Zamora, I., Minambres, J.F., Mazon, A.J., Alvarez-Isasi, R., and Lazaro, J. Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 143, No. 1, Jan. 1996: pp.1-6
- [13] Silva, K.M., Souza, B.A., and Brito N.S.D. Fault Detection and Classification in Transmission Lines based on Wavelet Transform and ANN. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 21, No. 4, October 2006: pp. 2058-2063.
- [14] Youssef, O.A.S. Fault classification based on wavelet transforms. Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001 IEEE/PES. Vol.1 2001:pp. 531-536.
- [15] Silveira, P.M., Seara, R., and Zurn, H.H. An approach using wavelet transform for fault type identification in digital relaying. Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. IEEE Vol.2 1999:pp. 937-942
- [16] Youssef, O.A.S. Combined Fuzzy-Logic Wavelet-Based Fault Classification Technique for Power System Relaying. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 19, No.2, April 2004: pp. 582-589.
- [17] Sachdev, M.S., Das, R., and Sidhu, T.S. Determining Locations of Faults in Distribution Systems. Developments in Power System Protection, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 434) 1997:pp. 188-191
- [18] Adu, T. An Accurate Fault Classification Technique for Power System Monitoring Devices. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 17, No. 3, July 2002: pp. 684-690.
- [19] Mahanty, R.N., and Gupta, P.B.D. Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines. 2004 IEE Proc. Gen., Trans. and Dist. Vol. 151, No. 2: pp. 201-212.

- [20] Dalstein T., and Kulicke, B. Neural Network Approach to Fault Classification for High Speed Protective Relaying. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 10, No. 2, April 1995: pp. 1002-1011.
- [21] Das, B., and Reddy, J.V. Fuzzy-Logic-Based Fault Classification Scheme for Digital Distance Protection. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 20, No. 2, April 2005: pp. 609-616.
- [22] Huisheng, W., and Keerthipala, W.W.L. Fuzzy-Neuro Approach to Fault Classification for Transmission Line Protection. IEEE Trans. On Power Delivery Vol. 13, No.4, October 1998: pp. 1093-1104.
- [23] IEEE Std C37.111-1999 IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power, Mar. 1999



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



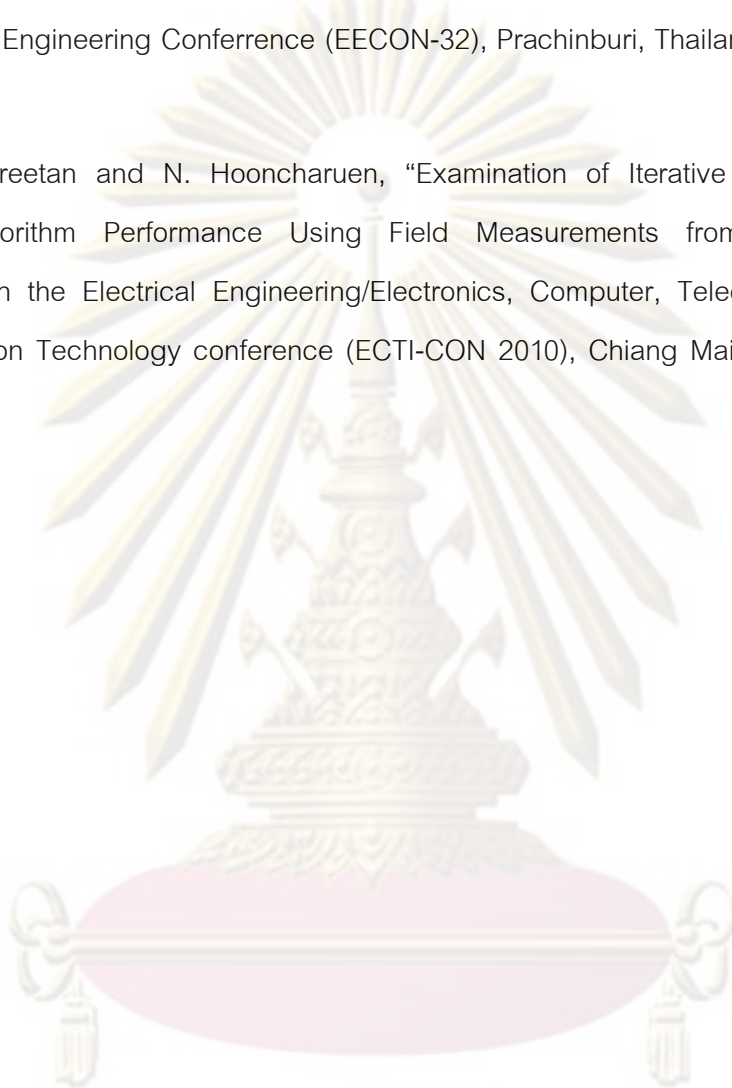
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

Y. Bureetan, W. Triwittayanon and N. Hooncharuen, "Improvement of Fault Classification Algorithm for Transmission System Using Sequence Components," in the 32<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Prachinburi, Thailand, Oct 28 – 30, 2009.

Y. Bureetan and N. Hooncharuen, "Examination of Iterative Two-End Fault Location Algorithm Performance Using Field Measurements from Digital Fault Recorders," in the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology conference (ECTI-CON 2010), Chiang Mai, Thailand, May 19-21, 2010.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายยสวินทร์ บุรีทาน เกิดวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย