

ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายสายส่ง

นายวุฒิกร ตรีวิทยานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์

ดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

AUTOMATIC FAULT ANALYSIS ALGORITHMS FOR TRANSMISSION
NETWORK

Mr. Wutthikorn Threevithayanon

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

สาขาวิชา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาด

แบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายสายส่ง

นายวุฒิกทร ตรีวิทยานนท์

วิศวกรรมไฟฟ้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชะสอนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร)

วุฒิก ร ตรีวิทยานนท์ : ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบอัตโนมัติสำหรับ
เครือข่ายสายส่ง (AUTOMATIC FAULT ANALYSIS ALGORITHMS FOR
TRANSMISSION NETWORK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 92 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบ
อัตโนมัติสำหรับเครือข่ายส่งไฟฟ้า ประกอบด้วย เงื่อนไขการเลือกขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหา
ระยะลัดวงจร ขั้นตอนวิธีการหาระยะลัดวงจร และการหาระยะเวลาในการกำจัดความผิดพลาด โดยใน
ส่วนของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาระยะลัดวงจร นำเสนอขั้นตอนวิธีแบบใหม่สองวิธี กล่าวคือ
ขั้นตอนวิธีการหาระยะลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลปลายเดี่ยว และพารามิเตอร์ในบัสฮิมพีแดนซ์เมตริกซ์
(Z_{bus}) ซึ่งวิธีนี้มีจุดเด่นคือให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำแม้ในกรณีที่ฟอลต์ฮิมพีแดนซ์มีค่าสูง สมการหา
ระยะลัดวงจรไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของการลัดวงจร ใช้ข้อมูลในการคำนวณน้อยและใช้เฉพาะปริมาณ
เชิงลำดับบวกเท่านั้น ส่วนอีกวิธีหนึ่งได้แก่ ขั้นตอนวิธีการหาระยะลัดวงจรแบบมีข้อมูลหลายปลาย
ด้วยการประยุกต์วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีจุดเด่นคือสามารถใช้ข้อมูลขณะเกิดความผิด
พลาด ณ จุดบันทึกค่าหลายตำแหน่งมาช่วยในการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจรบนสายส่งได้ โดยไม่จำเป็นต้อง
ต้องมีข้อมูลครบทั้งสองปลาย

ในกระบวนการวิจัยทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอนี้โดยอาศัยข้อมูลจากการ
จำลองแบบความผิดพลาดบน ระบบไฟฟ้าทดสอบ IEEE 14 บัส รวมถึงข้อมูลความผิดพลาดที่บันทึก
ได้จริงจากระบบส่งไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการคำนวณ
หาระยะลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลปลายเดี่ยวและองค์ประกอบในบัสฮิมพีแดนซ์เมตริกซ์ให้คำตอบที่แม่นยำ
มากเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบปลายเดี่ยวมาตรฐานที่ใช้อยู่ทั่วไปใน ทางปฏิบัติอย่างไรก็ตาม ความ
แม่นยำของการคำนวณหาระยะลัดวงจรขึ้นอยู่กับความถูกต้องของบัสฮิมพีแดนซ์เมตริกซ์ซึ่งต้องสะท้อน
สภาพความเป็นจริงของระบบในขณะเกิดการลัดวงจร ในส่วนของ ผลการศึกษาการคำนวณหาระยะ
ลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลหลายปลายโดยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดให้คำตอบที่แม่นยำ เมื่อเทียบ
กับขั้นตอนวิธี ปลายเดี่ยว มาตรฐาน แต่มีความแม่นยำน้อยกว่า ขั้นตอนวิธี แบบ สอง ปลาย มาตรฐาน
อย่างไรก็ดีเป็นขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ และในอนาคตยังสามารถนำวิธี
ดังกล่าวมาใช้สอบเทียบความคลาดเคลื่อนหรือความไม่ตรงกันทางเวลาของเครื่องมือวัดในระบบส่ง
ไฟฟ้าได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2554

4971876021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FAULT LOCATION/ DIGITAL FAULT RECORDER/ AUTOMATIC FAULT ANALYSIS.

WUTTHIKORN THREEVITHAYANON : AUTOMATIC FAULT ANALYSIS ALGORITHMS FOR TRANSMISSION NETWORK . ADVISOR: ASST.PROF. NAEB-BOON HOONCHAREON, Ph.D., 92 pp.

This thesis proposes methods to enhance performance of the automatic fault analysis system for transmission network. These consist of three main aspects, which are how to select a suitable fault location algorithm, the newly proposed algorithms, and how to determine fault clearing time, more correctly. The two newly proposed fault location algorithms include a one-terminal fault location algorithm based on the principle of short circuit calculation, in which it has the advantages of yielding accurate fault location even for a case of high fault impedance, employing the single formula regardless of fault types. In addition, it requires less measurements and parameters associated only with positive sequence components. The other algorithm is an optimization based algorithm, utilizing data from multi-terminals. This method will relax the constraint of having complete information from both ends of the faulty line.

In this research, performances of the proposed algorithms have been verified using data obtained from fault simulation on the IEEE 14 bus test system, as well as field measurements from the Electricity Generation Authority of Thailand's transmission system. An accurate one-terminal fault location algorithm based on the principle of short circuit calculation gives much better accuracy when compared to that obtained from the standard one terminal simple reactance method. Nonetheless, the accuracy depends on correctness of the bus impedance matrix which should well represent the system condition during fault period. For the case of optimization based algorithm, it will give an accurate result when compared to that obtained from the one terminal simple reactance method; yet, less accurate than that of the two terminal fault location technique in a repetitive case. However, this proposed algorithm can be applied to a real system which normally has no complete data. In the future, it can also be used to calibrate errors and time unsynchronization of various monitoring devices in the transmission network.

Department: . . . Electrical Engineering **Student's Signature**
Field of Study: . . . Electrical Engineering **Advisor's Signature**
Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ ที่ได้ เสียสละเวลา ตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สุทธิพร ปทุมเทวาภิบาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรัช วงศ์ไพบุลย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพจน์ พัฒนวิจิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ ดร. พจมาน พจนสมบูรณ์ อาจารย์ ศุภวัฒน์ เจริญวิกรม ที่ให้การช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ ที่กรุณาสับสนุนทุนการศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสมพล ชำนาญนิชกุล คุณนิทานันท์ เอกะกุลานันต์ คุณยสวินทร์ บุรีทาน และ คุณพลศักดิ์ พงษ์ประยูร และฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาสับสนุน การสืบค้นข้อมูล ให้คำปรึกษา และให้ ทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ครอบครัวที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ	ฎ
บทที่รู้	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	1
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์	3
2 การหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง	4
2.1 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวของสายส่ง (One-terminal fault location)	5
2.1.1 การคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแทนซ์อย่างง่าย	5
2.1.2 การชดเชยด้วยกระแสไหลต่อก่อนเกิดความผิดพลาด	8
2.1.3 การคำนวณด้วยการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด	11
2.1.4 การคำนวณด้วยเงื่อนไขแบบจำลอง ฟลท้อิมพีแดนซ์แบบ ความต้านทานเพียง อย่างเดียว	11
2.2 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายของสายส่ง (Two-terminal fault location)	12
2.2.1 การคำนวณแบบมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด	12
2.2.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองสายส่งระยะไกล	14
2.2.3 การคำนวณด้วยข้อมูลสุ่มโดยตรง	17
2.2.4 การชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยการปรับแก้มุมเฟสและวิธีแบบวนซ้ำ	18
2.2.5 การชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยการละลายมุมเฟสและวิธีแบบวนซ้ำ	20
2.2.6 การคำนวณแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งและชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกัน โดยอาศัยข้อมูลก่อนเกิดความผิดพลาด	22
2.3 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลมากกว่าสองปลาย	23
3 ระบบวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบอัตโนมัติ	25
3.1 เครื่องบันทึกข้อมูลขณะเกิดความผิดพลาดในระบบส่งไฟฟ้า	25
3.2 ข้อมูลป้อนเข้าและการประมวลผลขั้นต้น	30
3.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ	31
3.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบเชิงฮาร์ดแวร์	31

บทที่	หน้า
3.3.2 โครงสร้างและองค์ประกอบเชิงซอฟต์แวร์	32
3.4 สรุป	36
4 การเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบวิเคราะห์ความผิดปกติแบบอัตโนมัติ	37
4.1 การเลือกขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง	37
4.2 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวและองค์ประกอบในบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z_{bus})	40
4.3 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท	43
4.4 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลหลายปลายด้วยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด	45
4.4.1 กรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล	46
4.4.2 กรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน	48
4.4.3 กรณีลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส	50
4.4.4 กรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน	52
4.5 การเลือกช่วงข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ และระยะเวลาการลัดวงจร	54
4.6 สรุป	57
5 การทดสอบสมรรถนะ	59
5.1 ระบบทดสอบ	59
5.1.1 ระบบทดสอบ EGAT 5 บัส	59
5.1.2 ระบบทดสอบ IEEE 14 bus	60
5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวมาตรฐาน	67
5.3 การวิเคราะห์ผลของเวลาไม่ตรงกันต่อสมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐาน	68
5.4 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้องค์ประกอบในบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์	71
5.5 การทดสอบ สมรรถนะ ของ ขั้นตอนวิธี ที่ ใช้ ข้อมูล หลาย ปลาย ด้วย การ แก้ ปัญหา ค่าเหมาะสมที่สุด	71
6 บทสรุป	85
6.1 สรุปผล	85
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	86
รายการอ้างอิง	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปสมการการคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอกแตนซ์อย่างง่าย	9
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งของ EGAT 5 บัส	60
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า EGAT 5 บัส	60
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งของ IEEE 14 บัส	62
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 14 บัส	62

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวที่มีการลัดวงจรบนสายส่ง	5
ภาพที่ 2.2 วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร A-G	6
ภาพที่ 2.3 วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร AB	8
ภาพที่ 2.4 วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร ABG	9
ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูล Superimposed ที่ใช้หา d_s	9
ภาพที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างสายส่งที่ใช้ในการคำนวณแบบสามปลาย	23
ภาพที่ 3.1 ภาพแสดงสายส่งกำลังไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าที่มีการติด DFR จะอยู่ใน กรอบสี่เหลี่ยมเช่น IDM,BEN,R และ H ซึ่งเป็นชื่อย่อของบริษัทผู้ผลิตเครื่อง . .	26
ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงข้อมูลที่บันทึกได้จาก DFR ที่ความถี่สุ่ม 6.4kHz วัดที่สถานีไฟฟ้าวังน้อย	28
ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงข้อมูลกระแสที่บันทึกได้จาก DFR ที่มีการเพื่อค่ากระแสสูงสุดไว้สูงทำ ให้ค่ากระแสช่วง pre-fault ที่วัดได้มีความละเอียดต่ำลง	29
ภาพที่ 3.4 ภาพ แสดง โครงข่าย คอมพิวเตอร์ เฉพาะ บริเวณ(LAN)ที่ใช้ ในการ ดึง ข้อมูล จาก เครื่องจัดเก็บข้อมูลในระบบทั่วทั้งไป	32
ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงโครงข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า แบบอัตโนมัติ (Automatic Fault Analysis: AFA)	33
ภาพที่ 3.6 ภาพแสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูลที่ค้นได้จากคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูล [31] .	34
ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูลที่ค้นได้จากคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูลจาก งานของ Kezunovic และคณะ [32]	34
ภาพที่ 3.8 ภาพ แสดง ระบบ โดยรวม ของ ระบบวิเคราะห์ ความผิด พ้อง ใน ระบบ ไฟฟ้า แบบ อัตโนมัติจากงานของ Kezunovic และคณะ [32]	35
ภาพที่ 4.1 ภาพแสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจร	38
ภาพที่ 4.2 ภาพแสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจรส่วนต่อ	38
ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงระบบอย่างง่าย	39
ภาพที่ 4.4 Short-circuit on transmission lines	42
ภาพที่ 4.5 ภาพคลื่น กระแส และภาพคลื่น ค่าพลังงาน หลัง ผ่าน การ ทำ เวฟ เลท ทราน ฟอรั่ม แล้วรีคอนสตรัคกลับมาเป็นภาพคลื่นองค์ประกอบความถี่สูง	44
ภาพที่ 4.6 ภาพคลื่นแรงดันก่อนและหลังชดเชยเวลา	45
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างอย่างง่าย	46
ภาพที่ 4.8 วงจรอย่างง่ายแบบ โครงสร้างแบบ π	46
ภาพที่ 4.9 วงจรแสดงการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส	50
ภาพที่ 4.10 กรณีการลัดวงจรแบบ ABG	52
ภาพที่ 4.11 แรงดันและกระแส RMS วัดที่สถานีไฟฟ้าอ่างทอง1 บนสายส่ง อ่างทอง1 ไป ทำ ลาน1 แสดงเส้นสมมุติในการเปรียบเทียบเพื่อหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการลัดวงจร	54
ภาพที่ 4.12 การหาค่ากระแสสูงสุดและเวลาที่เกิดกระแสสูงสุด	55
ภาพที่ 4.13 การหาเวลาเริ่มต้นการลัดวงจร	56
ภาพที่ 4.14 การหาเวลาสิ้นสุดการลัดวงจร	56

ภาพที่ 4.15	พื้นที่ใต้กราฟ <i>Area1</i> และพื้นที่ใต้กราฟ <i>Area2</i> ที่เกิดจากการหาพื้นที่ใต้กราฟของภาพคลื่นกระแสในช่วงเวลาที่มากที่สุดที่ได้จากการเทียบกับ $1\%I_{max}$	57
ภาพที่ 5.1	EGAT 5 บัส	59
ภาพที่ 5.2	IEEE 14 บัส	61
ภาพที่ 5.3	มุมของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรที่มาจากบัส 13	63
ภาพที่ 5.4	มุมของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรที่มาจากบัส 14	63
ภาพที่ 5.5	มุมของแรงดันที่บัส 13	64
ภาพที่ 5.6	มุมของแรงดันที่บัส 14	64
ภาพที่ 5.7	มุมของแรงดันที่จุดเกิดการลัดวงจร	65
ภาพที่ 5.8	ภาพคลื่นของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส 13 และ บัส 14 โดยจุดเกิดการลัดวงจรห่างจากบัส 13 0.1 PU	65
ภาพที่ 5.9	ภาพคลื่นของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส 13 และ บัส 14 โดยจุดเกิดการลัดวงจรห่างจากบัส 13 0.9 PU	66
ภาพที่ 5.10	ผลทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีปลายเดียวมาตรฐาน	67
ภาพที่ 5.11	กรณี ลัด วงจร แบบ สาม เฟส สมดุล ด้วยการ คำนวณ แบบ มาตรฐาน แก้ ปัญหา ค่า ผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท	69
ภาพที่ 5.12	กรณี ลัด วงจร แบบ เฟส เดียว ลง ดิน ด้วยการ คำนวณ แบบ มาตรฐาน แก้ ปัญหา ค่า ผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท	69
ภาพที่ 5.13	กรณีลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟสด้วยการคำนวณแบบมาตรฐานแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท	70
ภาพที่ 5.14	กรณี ลัด วงจร แบบ สอง เฟส ลง ดิน ด้วยการ คำนวณ แบบ มาตรฐาน แก้ ปัญหา ค่า ผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท	70
ภาพที่ 5.15	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี การเพิ่มสมรรถนะการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งแบบมีข้อมูลปลายเดียวโดยใช้ Z_{bus}	72
ภาพที่ 5.16	ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG) .	73
ภาพที่ 5.17	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)	73
ภาพที่ 5.18	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดียวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)	74
ภาพที่ 5.19	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดียวโดยคิดผลของกระแสไหลในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)	74
ภาพที่ 5.20	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)	75
ภาพที่ 5.21	ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (AG) . . .	76
ภาพที่ 5.22	ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)	76

ภาพที่ 5.23 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบเฟส เดี่ยวลงดิน(AG)	77
ภาพที่ 5.24 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณี ลัดวงจรแบบเฟสเดี่ยวลงดิน(AG)	77
ภาพที่ 5.25 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบเฟส เดี่ยวลงดิน(AG)	78
ภาพที่ 5.26 ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสองเฟส (AB)	79
ภาพที่ 5.27 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB) . . .	79
ภาพที่ 5.28 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสอง เฟส(AB)	80
ภาพที่ 5.29 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณี ลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)	80
ภาพที่ 5.30 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสอง เฟส(AB)	81
ภาพที่ 5.31 ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (ABG) . .	82
ภาพที่ 5.32 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG) 82	
ภาพที่ 5.33 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสอง เฟสลงดิน(ABG)	83
ภาพที่ 5.34 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณี ลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)	83
ภาพที่ 5.35 ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสอง เฟสลงดิน(ABG)	84

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

- V_G แรงดันไฟฟ้าที่จุด G เป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (V)
- V_H แรงดันไฟฟ้าที่จุด H เป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (V)
- V_K แรงดันไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร K เป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (V)
- I_G กระแสป้อนจากปลาย G เป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (A)
- I_H กระแสป้อนจากปลาย H เป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (A)
- I_K กระแสลัดวงจรเป็นปริมาณ เฟสเซอร์ (A)
- r_f ความต้านทานการลัดวงจร (Ω)
- $Re(.)$ ส่วนจริงของค่านั้นๆ
- $Im(.)$ ส่วนเสมือนของค่านั้นๆ
- l ตัวแปรแทนความยาวสายส่ง (km.)
- m ตัวแปรแทนความยาวสายส่งที่ห่างจากจุดอ้างอิง (km.)
- r ตัวแปร แทน ความ ยาว สายส่ง ที่ ห่าง จาก จุด อ้างอิง ต่อ หนึ่ง หน่วย ความ ยาว สายส่ง $r = \frac{m}{l}$ (PU.)
- z^0 อิมพีแดนซ์เชิงลำดับศูนย์ ของสายส่งต่อความยาวสายเป็นกิโลเมตร ($\frac{\Omega}{km.}$)
- z^1 อิมพีแดนซ์เชิงลำดับบวกของสายส่งต่อความยาวสายเป็นกิโลเมตร ($\frac{\Omega}{km.}$)
- Z^0 อิมพีแดนซ์เชิงลำดับศูนย์ ของสายส่ง (Ω)
- Z^1 อิมพีแดนซ์เชิงลำดับบวกของสายส่ง (Ω)
- z_L อิมพีแดนซ์ ของสายส่ง ($\frac{\Omega}{km.}$)
- Z_L อิมพีแดนซ์ ของสายส่ง (Ω)
- Z_{KG} อิมพีแดนซ์ ของสายส่งจากปลาย G ถึง ตำแหน่ง K บนสายส่ง (Ω)
- Z_s อิมพีแดนซ์ ของสายส่ง (Ω)
- Z_m mutual อิมพีแดนซ์ ของสายส่ง (Ω)
- V_G^A แรงดันไฟฟ้าที่ปลาย G เฟส A (V)
- V_G^B แรงดันไฟฟ้าที่ปลาย G เฟส B (V)
- V_G^C แรงดันไฟฟ้าที่ปลาย G เฟส C (V)
- V_K^A แรงดันไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร K เฟส A (V)
- V_K^B แรงดันไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร K เฟส B (V)
- V_K^C แรงดันไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร K เฟส C (V)
- I_G^A กระแสป้อนจุดลัดวงจรจากปลาย G เฟส A (A)
- I_G^B กระแสป้อนจุดลัดวงจรจากปลาย G เฟส B (A)
- I_G^C กระแสป้อนจุดลัดวงจรจากปลาย G เฟส C (A)
- I_L กระแสไหลตกก่อนเกิดลัดวงจร(A)
- $d_s = |d_s| \angle \beta$ ค่าแสดงการกระจายของกระแส (current distribution factor)
- $n_s = |n_s| \angle \gamma$ ค่าแสดงการกระจายของไหลตก(current distribution factor)
- Z_S, Z_R อิมพีแดนซ์ ของแหล่งจ่ายจากปลาย G และ ปลาย H ตามลำดับ (Ω)

- $Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$ characteristic อิมพีแดนซ์ ในแบบจำลองสายส่งระยะยาว(Ω)
 V_G^{pre} แรงดันไฟฟ้าปลาย G ก่อนเกิดการลัดวงจร(V)
 I_G^{pre} กระแสป้อนจากปลาย G ก่อนเกิดการลัดวงจร(A)
 Z_{KK} อิมพีแดนซ์ ของระบบเมื่อมองจากจุดลัดวงจร $K(\Omega)$
 $Arg(.)$ มุมของปริมาณ เฟสเซอร์ นั้นๆ ($rad.$)
 I_K^0 กระแสลัดวงจร เชิงลำดับศูนย์(A)
 I_K^1 กระแสลัดวงจร เชิงลำดับบวก(A)
 I_K^2 กระแสลัดวงจรเชิงลำดับลบ(A)
 ΔI^{12} ผลรวมกระแสที่ช้อนปริมาณเชิงลำดับบวกและปริมาณเชิงลำดับลบ(A)
 R ความต้านทาน เป็น พารามิเตอร์ ของสายส่ง ใน แบบจำลอง สายส่ง ระยะยาว
 $(\frac{\Omega}{km.})$
 L ค่าอินดักแตนซ์ เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งในแบบจำลองสายส่งระยะยาว
 $(\frac{H}{km.})$
 G ค่าคอนดักแตนซ์ เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งในแบบจำลองสายส่งระยะยาว
 $(\frac{S}{km.})$
 C ค่าคาปาซิแตนซ์ เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งในแบบจำลองสายส่งระยะยาว
 $(\frac{F}{km.})$
 V_S แรงดันไฟฟ้าด้านส่ง(V)
 V_R แรงดันไฟฟ้าด้านรับ(V)
 I_S กระแสป้อนจากปลายด้านส่ง(A)
 I_R กระแสป้อนจากปลายด้านรับ(A)
 α_m มุมของแรงดันปลาย G ที่ได้จากการวัด ($rad.$)
 β_m มุมของแรงดันปลาย H ที่ได้จากการวัด ($rad.$)
 δ มุมชดเชยความเหลื่อมของเวลา (time unsynchronized) ของทั้งแรงดันและ
 กระแส ($rad.$)
 r_R ความต้านทานค่าจริงต่อความยาวสายส่ง ($\frac{\Omega}{km.}$)
 x_L ความต้านทานค่าเสมือนต่อความยาวสายส่ง ($\frac{\Omega}{km.}$)
 $V_{H,calc.}$ แรงดันไฟฟ้าปลาย H ที่คำนวณได้ช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร (V)
 $V_{H,mea.}$ แรงดันไฟฟ้าปลาย H ที่ได้จากการวัดช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร (V)
 $\xi_{v,mag}$ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ในการตรวจสอบค่าวัดจากสองปลาย
 $\xi_{v,angle}$ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ในการตรวจสอบค่าวัดจากสองปลาย
 x ตัวแปรแทนไม่ทราบค่าในสมการสถานะ (state equation)
 $J(x)$ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 $max(.)$ ค่าสูงสุดของปริมาณนั้นๆ
 $min(.)$ ค่าต่ำสุดของข้อมูลนั้นๆ
 n ลำดับข้อมูล
 n_{dat} ลำดับข้อมูลสุดท้าย
 I_{max} ค่ากระแสสูงสุด

- f_s ความถี่สุ่ม (Hz)
- μ ปริมาณตัวคูณกับกระแสสูงสุดเพื่อใช้เป็นตัวเทียบในการหาเวลาการลัดวงจร
- t เวลา (msec.)
- t_{start} เวลาเริ่มเกิดลัดวงจร (msec.)
- t_{stop} เวลาสิ้นสุดการลัดวงจร (msec.)
- n_{start} ลำดับข้อมูลเริ่มต้นการเกิดการลัดวงจร
- n_{stop} ลำดับข้อมูลสิ้นสุดการลัดวงจร
- $Area_1$ พื้นที่ใต้กราฟที่เป็นตัวเทียบโชนการลัดวงจร (msec.A)
- $Area_2$ พื้นที่ใต้กราฟของกระแสเพื่อใช้เทียบในการหาโชนการลัดวงจร (msec.A)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อมีการลัดวงจรบนสายส่ง วิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องหาสาเหตุของความผิดปกติก่อนทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าในระบบนั้น ดังนั้นระยะเวลาในการหาตำแหน่งลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าเข้าในระบบ ซึ่งหาระยะเวลาในการหาตำแหน่งลัดวงจรสั้น ก็จะช่วยให้ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นได้

ในระบบส่งการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งจะต้องหาสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจรก่อนจากนั้นจึงทำการคำนวณตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งเส้นที่เกิดปัญหา โดยทั่วไปแล้วในสถานีไฟฟ้าแต่ละแห่งจะมีเครื่องมือตรวจจับและบันทึกสัญญาณผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเรียกว่า Digital Fault Recorder (DFR) เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติในระบบ DFR จะทำการบันทึกข้อมูลของสัญญาณต่างๆ แล้วส่งมายังส่วนกลางเพื่อให้วิศวกรทำการวิเคราะห์ที่ตั้งสมมติฐาน และแจ้งเจ้าหน้าที่เพื่อทำการตรวจสอบตลอดแนวสายส่งเพื่อหาสาเหตุ ของการลัดวงจร ทำการแก้ไข และแจ้งกลับเพื่อให้เจ้าหน้าที่ประจำสถานีไฟฟ้าทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ

จะพบว่าในระบบที่มีความซับซ้อนมาก จำนวนข้อมูลที่ได้จาก DFR จะมีจำนวนมากทำให้ต้องใช้บุคลากรจำนวนมากในการทำงาน หากบุคลากรมีจำนวนน้อยไม่เพียงพอ ทำให้การวิเคราะห์และตรวจสอบ ก็จะเกิดความล่าช้าในการนำสายส่งเข้าระบบ(Restoration) ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในเชิงเศรษฐศาสตร์มากขึ้น ดังนั้นหากมีระบบคัดกรองและวิเคราะห์ปัญหาพื้นฐานจากข้อมูลที่ได้จาก DFR จะทำให้วิศวกรและเจ้าหน้าที่สามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็วขึ้นความสูญเสียก็จะลดน้อยลง และสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ได้อีกทางหนึ่งด้วย

ในระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้า จะทำการวิเคราะห์ตามข้อมูลที่ได้จาก DFR หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ที่มีในระบบนั้นความถูกต้องแม่นยำของคำตอบขึ้นอยู่กับความถูกต้องข้อมูลที่วัดเป็นสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ ความแม่นยำและความรวดเร็ว ในการหาตำแหน่งการลัดวงจรบนระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมมาตรฐาน
2. พัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะการคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่ง

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบอัตโนมัติในการวิเคราะห์ตำแหน่งการลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้า (AFA)
2. วิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการคำนวณหาตำแหน่งของการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการกำหนดตำแหน่งของการลัดวงจรแบบไม่สมดุล ได้แก่ การลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน การลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส และการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟสลงดิน
4. การลัดวงจรพร้อมกันหลายจุดจะไม่ถูกพิจารณาในงาน
5. พัฒนาระเบียบวิธีเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบวิเคราะห์ความผิดปกติของแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายส่งไฟฟ้า
6. ทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมวิเคราะห์หาตำแหน่งของการลัดวงจรทั้งกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบ และข้อมูลจริงในระบบส่งไฟฟ้าที่บันทึกได้ด้วย DFR

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างองค์ประกอบและการทำงานของระบบอัตโนมัติเพื่อการวิเคราะห์ตำแหน่งของการลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้า
2. ศึกษาตำราเอกสารงานวิจัยในอดีตในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ตำแหน่งในการระบบส่งกำลังไฟฟ้า
3. จำลองแบบระบบเชิงเวลา (Time-domain simulation) ระบบส่งขนาดเล็กที่มีการลัดวงจรทั้งแบบสมดุลสามเฟส และการลัดวงจรแบบไม่สมดุล โดยใช้ Matlab Simulink เพื่อใช้ในการทดสอบความถูกต้องของ อัลกอริทึมการหาตำแหน่งการลัดวงจรในระบบส่ง
4. ทดสอบอัลกอริทึมมาตรฐานในการหาตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทำการจำลองแบบ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อ ความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งของการลัดวงจร
5. ออกแบบวิธีการเพิ่มสมรรถนะของอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่ง
6. ทดสอบความถูกต้องนำเชื่อถือได้ของอัลกอริทึมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น กับข้อมูลระบบจำลอง
7. ปรับแก้อัลกอริทึมให้สมบูรณ์
8. เรียบเรียงเอกสารเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. รู้เงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกขั้นตอนวิธีในการหาตำแหน่งลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้า
2. ได้ขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งลัดวงจรที่ง่ายและแม่นยำแม้ความต้านทานการลัดวงจรมีค่าสูง
3. ได้ขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งลัดวงจรที่สามารถใช้ข้อมูลหลายปลายมาช่วยในการหาตำแหน่งลัดวงจรได้อย่างแม่นยำ
4. ได้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการหาเวลาการกำจัดการลัดวงจรที่แม่นยำขึ้น

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 การหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง: กล่าวถึงระเบียบวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการหาตำแหน่งลัดวงจรสายส่ง ประกอบไปด้วย การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวของสายส่ง การคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายของสายส่ง และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลมากกว่าสองปลาย

บทที่ 3 ระบบวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ: กล่าวถึงเครื่องบันทึกข้อมูลขณะเกิดความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้า ข้อมูลป้อนเข้าและการประมวลผลขั้นต้น และ โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบวิเคราะห์ความผิดปกติแบบอัตโนมัติ

บทที่ 4 ระเบียบวิธีหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งแบบใหม่: กล่าวถึงการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ Z_{bus} และการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสม (optimization) ในการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบมีข้อมูลปลายเดียวและมีข้อมูลแวลลุ่มอื่น การหาระยะเวลาในการลัดวงจร (fault clearing time) โดยการเปรียบเทียบแบบหลายค่า

บทที่ 5 ระบบทดสอบและผลการทดลองการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยระเบียบวิธี การหาตำแหน่งลัดวงจรแบบมีข้อมูลปลายเดียวโดยใช้ Z_{bus} และผลการทดลองหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสม

บทที่ 6 บทสรุป

บทที่ 2

การหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง

ในระบบส่งหากมีความผิดพลาดเกิดการลัดวงจรบนสายส่งขึ้นเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องจะต้องทำการหาสาเหตุและแก้ปัญหาเพื่อที่จะสามารถ นำระบบกลับมาใช้งานได้ ความรวดเร็วในการแก้ปัญหาขึ้นอยู่กับความสามารถหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ความแม่นยำในการหาตำแหน่งการลัดวงจร ไม่ควรเกิน 300 เมตร ซึ่งเป็นความยาวระหว่างช่วงเสาของสายส่งโดยทั่วไป จะพบว่าการเข้าถึงและป็นเสาเพื่อหาสาเหตุ การลัดวงจรไม่ใช่เรื่องง่ายนักหาก สายส่งพาดผ่านป่าหรือภูเขาสูง ดังนั้นจึงการคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้นเท่าไรยิ่งง่ายและรวดเร็วต่อการแก้ปัญหา เพื่อให้สามารถจ่ายไฟเข้าระบบได้

การคำนวณ หาตำแหน่งลัดวงจรในสายส่ง สามารถแยกประเภทได้หลายกลุ่มตามหลักการและข้อมูลที่นำมาใช้ การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันในระดับความถี่ของระบบ (50Hz-60Hz) การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ความถี่สูงโดยใช้หลักการ เคลื่อนที่ของคลื่น (traveling wave) การหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลสองปลาย การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลเชิงเวลา(real time) หรือ การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ ข้อมูลเฟสเซอร์ เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการใช้ข้อมูลแบบเฟสเซอร์ ที่ความถี่มูลฐาน(50Hz) เป็นหลักซึ่งข้อมูลจะได้มาจากเครื่องบันทึกข้อมูลการลัดวงจร หรือ DFR ข้อดีของการใช้ข้อมูลความถี่ฐานคือไม่ต้องการเครื่องมือพิเศษใดเพิ่มเติม และเป็นข้อมูลที่มีการบันทึกอยู่โดยทั่วไปอยู่แล้ว

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาระเบียบวิธีที่ใช้ในการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจากปลายเดียว สองปลาย และ หลายปลายของสายส่ง

การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว (One-terminal fault location)จะสะดวกและง่าย เพราะมีข้อมูลเพียงปลายเดียวนำมาใช้งานอย่างไรก็ตาม จะพบว่าความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับสภาพการลัดวงจร คือถ้าการลัดวงจรมีความรุนแรง (หมายถึงค่าความต้านทานการลัดวงจร r_f ต่ำ) ก็จะได้คำตอบที่ค่อนข้างแม่นยำ แต่ถ้าสภาพการลัดวงจรไม่รุนแรง กล่าวคือความต้านทานการลัดวงจรมีค่าสูงก็จะมีความผิดพลาดมาก ซึ่งรายละเอียดในหัวข้อย่อยจะแสดงให้เห็นถึงที่มาของผลลัพธ์ที่ผิดพลาด

ในส่วนของการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลสองปลาย(Two-terminal fault location) และการหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลหลายปลาย (Multi-terminal fault location)จะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้นถ้าข้อมูลทั้งหมดที่นำมาประมวลผลมีความคาดเคลื่อนทางเวลา ที่บันทึกข้อมูลน้อยหรือไม่เลย [1] และ [2] แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระเบียบวิธี One-terminal และ Two-terminal ที่มีผลมาจากขนาดของความต้านทานการลัดวงจรในกรณีมีข้อมูลปลายเดียว และการคาดเคลื่อนทางเวลาในกรณีสองปลาย

ในหัวข้อย่อยในบทนี้จะแบ่งเป็นส่วนหลักๆ คือ การหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว การหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลสองปลาย และการหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลหลายปลาย และการหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยวิธีอื่นๆ

2.1 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวของสายส่ง (One-terminal fault location)

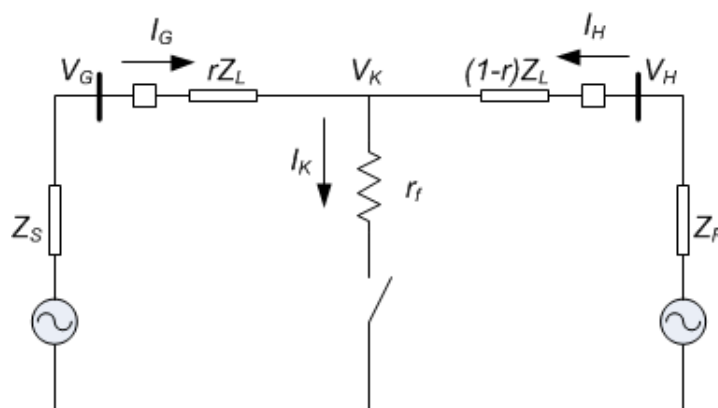
ในกรณีการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลปลายเดียว จะมีข้อมูลเพียงปลายเดียวของสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร เนื่องจากปัญหาที่มีตัวแปรไม่ทราบค่า มากกว่าจำนวนสมการที่จะสามารถสร้างขึ้นมาได้ ดังนั้นการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรในกรณีนี้จึงขึ้นอยู่กับสมมติฐาน ในการตัดทอนตัวแปรไม่ทราบค่าลงเพื่อให้ยังคง สามารถหาตำแหน่งของการลัดวงจรได้อยู่ เช่นในกรณีการคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแดนซ์อย่างง่าย จะประมาณว่าค่าความต้านทานการลัดวงจรมี ค่าต่ำมากจึงทำให้แรงดันตำแหน่งลัดวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงเหลือเพียงตัวแปรเดียวคือระยะลัดวงจรเป็นต้น งานวิจัยในเรื่องเก่าที่สุดที่ค้นได้เป็นงาน ของ Takagi และคณะตีพิมพ์ในปี 1982 งานวิจัยในหัวข้อนี้ยังคงมีมาอย่างต่อเนื่องถึง ปี 2010

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะอ้างอิงจาก IEEE Std. C37.144 [3](มาตรฐานการหาตำแหน่งลัดวงจรบนระบบส่งและระบบจำหน่าย ปี 2004)เป็นหลัก และจะเพิ่มเติมด้วยบทความใหม่ที่ที่น่าสนใจเช่นการนำการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimisation technique) เข้ามาช่วยในการหาตำแหน่งลัดวงจรเป็นต้น

2.1.1 การคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแดนซ์อย่างง่าย

การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งด้วยวิธี การคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแดนซ์อย่างง่าย เป็นวิธีมาตรฐานที่นำเสนออยู่ใน IEEE Std. C37.114-2004 ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันปลายใดปลายหนึ่งของสายส่งที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น ข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียวเพื่อหาตำแหน่งการ ลัดวงจรบนสายส่งอย่างไรก็ตามความแม่นยำลดน้อยลงเนื่องจากข้อมูลที่ประมาณขึ้นมาเพื่อให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งได้ ในกรณีนี้จำเป็นจะต้องรู้ประเภทของการลัดวงจรเพื่อเลือก สมการที่เหมาะสมในการคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจร จากภาพ 2.1 เราสามารถตั้งสมการโดยใช้แบบจำลองสายส่งระยะสั้นได้ดังนี้

$$V_G = rZ_L I_G + r_f I_K \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1: วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวที่มีการลัดวงจรบนสายส่ง

โดยที่ V_G คือระดับแรงดันที่จุดวัด G , r คือระยะลัดวงจรจากปลาย G , Z_L คือพารามิเตอร์ของสายส่งระหว่างบัส G และ บัส H , I_G คือกระแส ป้อนจุดลัดวงจรวัดที่จุด G บนสายส่ง GH , r_f คือความต้านทานการลัดวงจร, I_K คือกระแสลัดวงจร

จากสมการ (2.1) สามารถหา Z_{KG} ได้ดังนี้

$$Z_{KG} = \frac{V_G}{I_G} = rZ_L + r_f \frac{I_K}{I_G} \quad (2.2)$$

โดยทั่วไปแล้วในระบบส่งความต้านทานการลัดวงจรจะมีค่าต่ำต้งนั้นหากละเอียดระดับแรงดันลัดวงจร $r_f I_K$ จะพบว่าเราสามารถแก้สมการหาระยะลัดวงจร m ได้ดังนี้

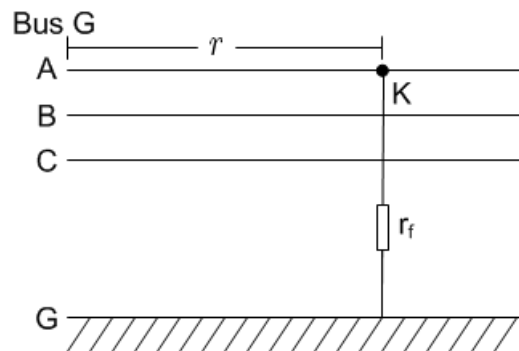
$$r = \frac{Z_{KG}}{Z_L} \quad (2.3)$$

r ที่ได้จากสมการ (2.3) เป็นค่า per unit ดังนั้นจึงต้องคูณด้วยความยาวสายส่งก็จะได้ระยะลัดวงจร m (km .) อย่างไรก็ตามจะพบว่าสายส่งมักจะมีค่า ความต้านทานต่ำ ดังนั้นตามมาตรฐานจะใช้ค่าเสมือนเพื่อหาระยะลัดวงจรเพื่อลดความผิดพลาดในการคำนวณ จึงได้สมการหาตำแหน่งลัดวงจรดังนี้

$$r = \frac{Im\{Z_{KG}\}}{Im\{Z_L\}} \quad (2.4)$$

โดยที่ $Im\{.\}$ หมายถึงส่วนเสมือน การคำนวณหาค่า Z_{KG} จะต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของการลัดวงจรซึ่งจะพิสูจน์ให้เห็นต่อไป

2.1.1.1 การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรกรณีการลัดวงจรแบบ เฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 2.2: วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร A-G

$$\begin{bmatrix} V_G^A \\ V_G^B \\ V_G^C \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G^A \\ I_G^B \\ I_G^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_K^A \\ V_K^B \\ V_K^C \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$V_G^A = r(Z_s I_G^A + Z_m I_G^B + Z_m I_G^C) + V_K^A \quad (2.6)$$

ให้ $I_G^R = I_G^A + I_G^B + I_G^C$, $Z^0 = Z_s + 2Z_m$ และ $Z^1 = Z_s - Z_m$ ดังนั้น สมการ (2.6) จะเท่ากับ สมการ

$$V_G^A = rZ^1(I_G^A + kI_G^R) + V_K^A \quad (2.7)$$

โดยที่ $k = \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1}$ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$V_G^A = r(Z^1 I_G^A + Z^1 \left(\frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} \right) (I_G^A + I_G^B + I_G^C)) + V_K^A \quad (2.8)$$

$$V_G^A = r((Z_s - Z_m)I_G^A + \frac{Z_s + 2Z_m - Z_s + Z_m}{3}(I_G^A + I_G^B + I_G^C)) + V_K^A \quad (2.9)$$

$$V_G^A = r((Z_s - Z_m)I_G^A + Z_m(I_G^A + I_G^B + I_G^C)) + V_K^A \quad (2.10)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (2.11)เท่ากับสมการที่ (2.6) จะพบว่าหากแรงดันไฟฟ้าที่จุดเกิดการลัดวงจร K มีค่าใกล้ศูนย์ ($V_K^A \approx 0$)จะได้คำตอบระยะลัดวงจร r ดังนี้

$$r = \frac{V_G^A}{Z^1(I_G^A + kI_G^R)} \quad (2.11)$$

ดังนั้นสมการตำแหน่งลัดวงจรสำหรับการลัดวงจรแบบ A-G สามารถหาได้จาก

$$r = \frac{Im\left(\frac{V_G^A}{I_G^A + kI_G^R}\right)}{Im(Z^1)} \quad (2.12)$$

ในกรณีการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินแบบ BG และ CG สามารถหาระยะลัดวงจรได้ดังนี้

$$r = \frac{Im\left(\frac{V_G^B}{I_G^B + kI_G^R}\right)}{Im(Z^1)} \quad (2.13)$$

$$r = \frac{Im\left(\frac{V_G^C}{I_G^C + kI_G^R}\right)}{Im(Z^1)} \quad (2.14)$$

2.1.1.2 การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรกรณีการลัดวงจรแบบ เฟสต่อเฟส

จากสมการ (2.7) เราสามารถเขียนสมการในภาพเฟส A และเฟส B ได้ดังนี้

$$V_G^A = rZ^1(I_G^A + kI_G^R) + V_K^A \quad (2.15)$$

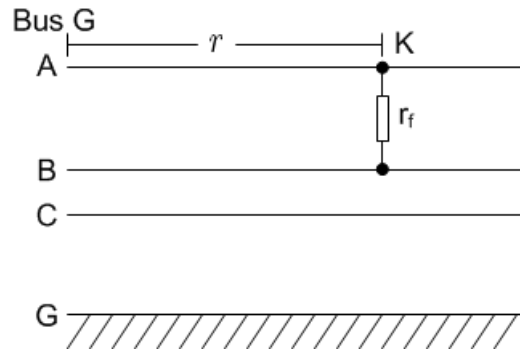
$$V_G^B = rZ^1(I_G^B + kI_G^R) + V_K^B \quad (2.16)$$

นำสมการที่ (2.15)ลบออกจาก สมการ (2.16)

$$V_G^A - V_G^B = rZ^1((I_G^B + kI_G^R) - (I_G^A + kI_G^R)) + V_K^A - V_K^B \quad (2.17)$$

ให้ $V_G^{AB} = V_G^A - V_G^B$, $I_G^{AB} = I_G^A - I_G^B$ และ $V_K^{AB} = V_K^A - V_K^B$ จะได้

$$V_G^{AB} = rZ^1 I_G^{AB} + V_K^{AB} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.3: วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร AB

แรงดันไฟฟ้า ณ จุดลัดวงจรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($V_K^{AB} \approx 0$) แก้สมการหา r

$$r = \frac{V_G^{AB}}{Z^1 I_G^{AB}} \quad (2.19)$$

ดังนั้นระยะลัดวงจรในกรณี AB และ ABG สามารถหาได้ดังนี้

$$r = \frac{\text{Im} \left(\frac{V_{AB}}{I_{AB}} \right)}{\text{Im}(Z^1)} \quad (2.20)$$

กรณีการลัดวงจรแบบ BC, BCG, CA และ CAG สามารถหาได้ดังนี้

$$r = \frac{\text{Im} \left(\frac{V_{BC}}{I_{BC}} \right)}{\text{Im}(Z^1)} \quad (2.21)$$

$$r = \frac{\text{Im} \left(\frac{V_{CA}}{I_{CA}} \right)}{\text{Im}(Z^1)} \quad (2.22)$$

2.1.1.3 การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรกรณีการลัดวงจรแบบ เฟสต่อเฟสลงดิน

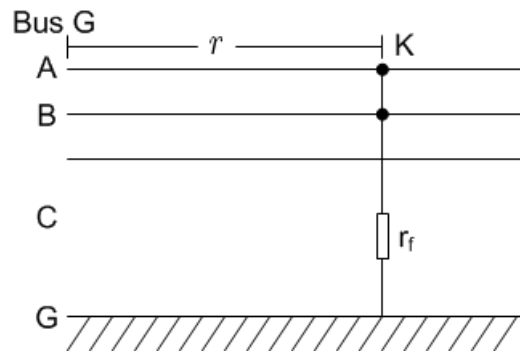
ในกรณีนี้หากเราประมาณ $r_f \approx 0$ จะพบว่าสมการตั้งต้นเหมือนกับกรณี การลัดวงจรแบบ เฟสต่อเฟส ดังนั้นเราสามารถใส่สมการที่(2.20)ถึง สมการที่ (2.22) เพื่อหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งได้เหมือนกัน

จากสมการการหาตำแหน่งลัดวงจรข้างต้นเราสามารถสรุปการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งไฟฟ้าได้ตามลักษณะการเกิดการลัดวงจรดังแสดงในตาราง 2.1 โดยที่ $k = (Z^0 - Z^1)/3Z^1$ และ

$$I_G^R = I_G^A + I_G^B + I_G^C$$

2.1.2 การชดเชยด้วยกระแสไหลตกก่อนเกิดความผิดปกติ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดการปรับปรุงการหาระยะลัดวงจรให้มีความแม่นยำขึ้น ซึ่งสรุปมาจากมาตรฐาน IEEE Std. C37.114–2004 งานของ Takagi และคณะ[4] งานของ Erikson และคณะ[5] และ งานของ Novosel และคณะ[6]

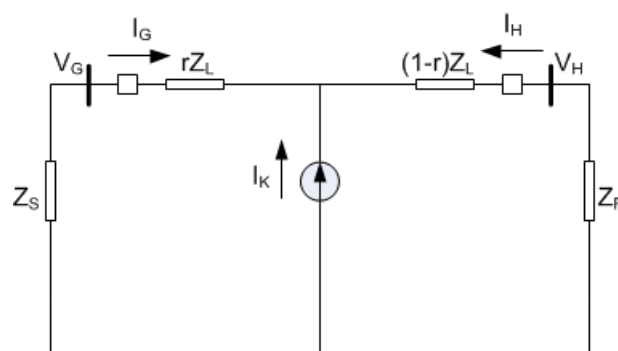


รูปที่ 2.4: วงจร องค์ประกอบสมมาตร สำหรับการลัดวงจร ABG

ตารางที่ 2.1: ตารางสรุปสมการการคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแทนได้อย่างง่าย

Type of Fault	Positive sequence impedance Z_{KG}
<i>AG</i>	$\frac{V_A}{I_A + kI_R}$
<i>BG</i>	$\frac{V_B}{I_B + kI_R}$
<i>CG</i>	$\frac{V_C}{I_C + kI_R}$
<i>AB or ABG</i>	$\frac{V_{AB}}{I_{AB}}$
<i>BC or BCG</i>	$\frac{V_{BC}}{I_{BC}}$
<i>CA or CAG</i>	$\frac{V_{CA}}{I_{CA}}$
<i>ABC</i>	$\frac{V_{AB}}{I_{AB}}$ or $\frac{V_{BC}}{I_{BC}}$ or $\frac{V_{CA}}{I_{CA}}$

Takagi และคณะเป็นกลุ่มแรกที่น่ากระแสไหลลดก่อนการเกิดการลัดวงจรมาช่วยคำนวณระยะลัดวงจรบนสายส่ง โดยกำหนดให้ I_L เป็นกระแสที่ไหลจาก G ไป H ช่วงเกิด การลัดวงจร ดังนั้นจะได้กระแส superimposed $\Delta I_G = I_G - I_L$ ดังนั้นสมการ(2.2)สามารถเขียนเป็น



รูปที่ 2.5: วงจรสมมูล Superimposed ที่ใช้หา d_s

$$Z_{KG} = \frac{V_G}{I_G} = rZ_L + r_f \frac{1}{d_s n_s} \quad (2.23)$$

โดยที่ d_s และ n_s คือ

$$d_s = \frac{\Delta I_G}{I_K} = \frac{Z_R + (1-r)Z_L}{Z_R + Z_L + Z_S} = |d_s| \angle \beta \quad (2.24)$$

$$n_s = \frac{I_G}{\Delta I_G} = |n_s| \angle \gamma \quad (2.25)$$

หากพิจารณา กระแสลัดวงจรมีค่ามากเมื่อเทียบกับ กระแสโหลด ($I_G \gg I_L$) ดังนั้น γ จะมีค่าน้อยใกล้ศูนย์ ในขณะที่ d_s ถูกกำหนดโดย impedance ของระบบ (Z_S, Z_R) ดังนั้น β ก็มีค่าใกล้ศูนย์ พิจารณา $r_f \frac{1}{d_s n_s}$ จะพบว่าผลของการรวมมุม ($\beta + \gamma$) เป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานเสมือนที่มีผลมาจาก r_f

พิจารณาสมการ(2.1) อีกครั้งเราสามารถแทนค่า I_K ได้ด้วย $\frac{\Delta I_G}{d_s}$ จะได้

$$V_G = rZ_L I_G + r_f \frac{\Delta I_G}{d_s} \quad (2.26)$$

ทำการคูณ สมการที่(2.26) ด้วย conjugate ΔI_G^* แล้วใช้เฉพาะส่วนเสมือนจะได้

$$\text{Im}(V_G \Delta I_G^*) = r \cdot \text{Im}(Z_L I_G \Delta I_G^*) + r_f \cdot \text{Im}\left(\frac{1}{d_s}\right) \quad (2.27)$$

จะพบว่า $\text{Im}\left(\frac{1}{d_s}\right) \approx 0$ ดังนั้นจาก สมการที่(2.27) จะสามารถหาระยะลัดวงจรได้ดังนี้

$$r = \frac{\text{Im}(V_G \Delta I_G^*)}{\text{Im}(Z_L I_G \Delta I_G^*)} \quad (2.28)$$

Novosel และคณะ ใช้ข้อสมมติฐานที่ว่าค่าองค์ประกอบลำดับลบของ d_s มีเฉพาะค่าจริง ดังนั้นในกรณีการลัดวงจรแบบ ไม่สมดุลจึงไม่จำเป็นต้องใช้ ค่าช่วงก่อนการเกิดลัดวงจรมาช่วยในการคำนวณ ระเบียบวิธีหาตำแหน่งของการลัดวงจรในหมวดนี้ จะกำหนดให้ $\frac{1}{d_s}$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าความต้านทานการลัดวงจรจะถูกตัดออกจากสมการโดยปริยาย อย่างไรก็ตามหาก $\frac{1}{d_s}$ ไม่เป็นศูนย์ก็จะมีผลความผิดพลาดได้

มีงานอีกกลุ่มหนึ่งทำการตัดแปลงระเบียบวิธีของ Takagi โดยการใส่ กระแส องค์ประกอบลำดับศูนย์ ($I^R = I^A + I^B + I^C$) แทนการใช้กระแสทับซ้อน (superposition current) (ΔI_G) และหา ค่า (β) จากอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ซึ่งจะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$r = \frac{\text{Im}(V_G I_R^* e^{-j\beta})}{\text{Im}(Z_L I_G I_R^* e^{-j\beta})} \quad (2.29)$$

Eriksson และ คณะ พัฒนา ระเบียบวิธี หาตำแหน่ง ลัด วงจร บน สายส่ง แบบ ปลายเดียว โดยใช้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย จากสองปลายของสายส่งเข้ามาช่วยในการคำนวณ นำสมการที่ (2.24) และ (2.26) จัดภาพสมการได้ดังนี้

$$r^2 - r k_1 + k_2 - k_3 r_f = 0 \quad (2.30)$$

โดยที่ k_1, k_2 และ k_3 เป็นสมการคอมเพล็กซ์ ที่ประกอบไปด้วย $V_G, I_G, \Delta I_G$ ความต้านทานแหล่งจ่าย Z_S, Z_R และ อิมพีแดนซ์สายส่ง Z_L สมการที่ได้สามารถแยกได้เป็นสองสมการ คือ สมการค่าจริงและสมการค่าเสมือน มีตัวแปรไม่ทราบค่าสองตัวแปร คือ r_f และ r ทำการแก้ปัญหสมการกำลังสอง (quadratic equation) ก็จะได้คำตอบระยะลัดวงจรออกมา ในกรณีนี้ความแม่นยำขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ที่ต้องรู้ค่า

2.1.3 การคำนวณด้วยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

ปี 2006 Calos และคณะ [7] ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสม (optimization) มาคำนวณหาระยะลัดวงจรบนสายส่ง ในบทความมีข้อกำหนดว่าต้องรู้โครงสร้างของระบบทั้งหมด เนื่องจากระเบียบวิธีนี้ต้องใช้อิมพีแดนซ์ ของระบบมาช่วยในการหาค่าตอบ แบบจำลองสายส่งระยะไกลถูกนำมาใช้และทำการตั้งสมการให้เหลือตัวแปรไม่รู้ค่าเพียงสองตัวคือ ความต้านทานการลัดวงจร r_f และ ระยะลัดวงจรจากปลายที่ทำการวัดค่ากระแสและแรงดัน m พิจารณาภาพที่ (2.1) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_K = A(m)V_G - B(m)I_G \quad (2.31)$$

โดยที่

$$A(m) = \cosh(\gamma m) \quad (2.32)$$

และ

$$B(m) = Z_c \sinh(\gamma m) \quad (2.33)$$

$$V_K = r_f I_K \quad (2.34)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ในกรณีนี้คือ

$$G(m, r_f) = |A(m)V_G - B(m)I_G - r_f I_K| \quad (2.35)$$

โดยที่ I_K สามารถเขียนให้อยู่ในภาพความสัมพันธ์ระหว่าง pre fault value V_G^{pre}, I_G^{pre}, m และ อิมพีแดนซ์ช่วงเกิดการลัดวงจร Z_{KK}

$$V_{th}(m) = A(m)V_G^{pre} - B(m)I_G^{pre} \quad (2.36)$$

ดังนั้นจะได้

$$I_K = \frac{V_{th}(m)}{Z_{th}(m) + r_f} \quad (2.37)$$

จะพบว่าฟังก์ชันจุดประสงค์ในสมการที่ (2.35) จะมีตัวแปรเหลือเพียงสองตัวคือ m และ r_f จากนั้นทำการหาค่า m และ r_f ที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ มีค่าต่ำที่สุดก็จะได้คำตอบระยะลัดวงจร กับค่าความต้านทานการลัดวงจรออกมา อย่างไรก็ตามประเภทของการลัดวงจรจะทำให้ค่า I_K มีสมการที่ต่างกันดังนั้นระเบียบวิธีนี้จำเป็นต้องรู้ประเภทของการลัดวงจรก่อน

2.1.4 การ คำนวณ ด้วย เงื่อนไข แบบจำลอง ฟลอร์ทอิมพีแดนซ์แบบ ความ ต้านทาน เพียง อย่างเดียว

ปี 2010 Zhen Yu Xu และคณะ [8] นำเสนอระเบียบวิธีใหม่ในการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง โดยใช้ แนวความคิดที่ว่า มุมของกระแสป้อนจะลัดวงจรเท่ากับมุมของแรงดันที่จุดลัดวงจร กรณีนี้จะ

เป็นจริงต่อเมื่อความต้านทานการลัดวงจรมีเฉพาะค่าจริง สมการต่อไปนี้เป็นกรหาระยะลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินปริมาณ แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ไม่ใช่องค์ประกอบสมมาตร (symmetrical component) จะเป็น ปริมาณในเฟสที่เกิดการลัดวงจร (V_G, I_G, V_K, I_K)

$$\text{Arg}(V_K) = \text{Arg}(I_K) \quad (2.38)$$

โดยที่ $\text{Arg}(\cdot)$ หมายถึงมุมของตัวแปรนั้นๆ

$$I_K^1 = I_K^2 = I_K^0 = \frac{1}{3}I_K \quad (2.39)$$

$$\Delta I^{12} = (C_1 + C_2)\frac{1}{3}I_K \quad (2.40)$$

โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าจริง (positive and negative-sequence current distribution factors)

$$\text{Arg}(V_K) = \text{Arg}(\Delta I^{12}) \quad (2.41)$$

$$V_K = V_G - mz_L(I_G + 3kI^0) \quad (2.42)$$

โดยที่ $k = \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1}$

$$\frac{\text{Im}(\Delta I^{12})}{\text{Re}(\Delta I^{12})} = \frac{\text{Im}(V_G - mz_L(I_G + 3kI^0))}{\text{Re}(V_G - mz_L(I_G + 3kI^0))} \quad (2.43)$$

โดยที่ $\text{Re}(\cdot)$ หมายถึงส่วนจริงของค่านั้นๆ จากสมการ (2.43)จะพบว่าสามารถแก้สมการหาระยะลัดวงจรได้ดังนี้

$$m = \frac{\text{Im}(\Delta I^{12})\text{Re}(V_G) - \text{Re}(\Delta I^{12})\text{Im}(V_G)}{\text{Im}(\Delta I^{12})\text{Re}(Z^1(I_G + 3kI^0)) - \text{Re}(\Delta I^{12})\text{Im}(Z^1(I_G + 3kI^0))} \quad (2.44)$$

2.2 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายของสายส่ง (Two-terminal fault location)

การหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลสองปลายของสายส่งจะแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ การใช้ข้อมูลที่ไม่ตรงกันเชิงเวลา (time unsynchronize) กัน กับวิธีที่ใช้ข้อมูลที่ตรงกันเชิงเวลา เป็นหลัก เป็นที่รู้กันทั่วไปว่าหากข้อมูลที่วัดไม่ตรงกันทางเวลาจะส่งผลให้การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรผิดพลาด งานวิจัยส่วนหนึ่งจึงมุ่งเน้นไปยังการหาทางชดเชยความเหลื่อมกันทางเวลา เช่น [1] ส่วนงานวิจัยในกลุ่มที่กำหนดให้ข้อมูลตรงกันเชิงเวลา (time synchronize) กันจะเน้นไปที่สิ่งที่จะได้เพิ่มเติมจากข้อมูลที่มีเช่น การหาตำแหน่งลัดวงจรโดยไม่ต้องใช้พารามิเตอร์สายส่ง เป็นต้น [9]

2.2.1 การคำนวณแบบมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด

การหาตำแหน่ง ลัด วงจร บน สายส่ง แบบ สอง ปลาย ตาม มาตรฐาน อ้างอิง ตาม IEEE Std. C37.114–2004 นั้น จะกำหนดให้ข้อมูลสองปลาย ตรงกันทางเวลา การคำนวณจะตั้งสมการในลักษณะเดียว กันกับวิธี ปลายเดียว โดยตั้งสมการจากทั้งสองปลาย ในกรณีนี้เนื่องจากมีสองสมการ

จะทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก r_f ค่าความต้านทานการลัดวงจรหายไป จากภาพที่ 2.1 เมื่อพิจารณาแบบจำลองสายส่งแบบระยะใกล้ จะสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_G^A \\ V_G^B \\ V_G^C \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G^A \\ I_G^B \\ I_G^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_K^A \\ V_K^B \\ V_K^C \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\begin{bmatrix} V_H^A \\ V_H^B \\ V_H^C \end{bmatrix} = (1-r) \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_H^A \\ I_H^B \\ I_H^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_K^A \\ V_K^B \\ V_K^C \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

นำชุดสมการที่(2.45)ลบออกจากชุดสมการที่(2.46) เพื่อกำจัดตัวแปรไม่ทราบค่า V_K^{ABC} จะได้

$$\begin{bmatrix} V_G^A \\ V_G^B \\ V_G^C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_H^A \\ V_H^B \\ V_H^C \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G^A \\ I_G^B \\ I_G^C \end{bmatrix} - (1-r) \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_H^A \\ I_H^B \\ I_H^C \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

ดังนั้นสมการ Two terminal สามารถเขียนในภาพองค์ประกอบสมมาตร ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_G^0 \\ V_G^1 \\ V_G^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_H^0 \\ V_H^1 \\ V_H^2 \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_G^0 \\ I_G^1 \\ I_G^2 \end{bmatrix} - (1-r) \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_H^0 \\ I_H^1 \\ I_H^2 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$V_G^{012} - V_H^{012} = rZ^{012}I_G^{012} - (1-r)Z^{012}I_H^{012} \quad (2.49)$$

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} r = \bar{Y} = \bar{M}r \quad (2.50)$$

โดยที่

$$\bar{Y} = V_G^{012} - V_H^{012} + Z^{012}I_H^{012} \quad (2.51)$$

$$\bar{M} = Z^{012}(I_G^{012} + I_H^{012}) \quad (2.52)$$

$$r = (\bar{M}^+ \bar{M})^{-1} \bar{M}^+ \bar{Y} \quad (2.53)$$

โดยที่ \bar{M}^+ คือ ทรานสโพสคอนจูเกตของ M ในกรณีนี้คือการพยายามใช้สมการองค์ประกอบสมมาตร ทั้งสามสมการในการหาค่าตอบระยะลัดวงจร อย่างไรก็ตามจะพบว่าจำนวนสมการมีมากกว่าจำนวนตัวแปรมาก ดังนั้นสามารถใช้เฉพาะสมการใดสมการหนึ่งในองค์ประกอบสมมาตร ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจรได้

ข้อควรระวังคือสมการ องค์ประกอบลำดับศูนย์ จะมีปัญหาในกรณีเป็นการลัดวงจรแบบ สามเฟสสมดุลย์ทั้งนี้เนื่องมาจาก I_G^0 และ I_H^0 จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะส่งผลให้วิธีที่แสดงไว้ข้างต้น มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในหลายบทความจึงแนะนำใช้เฉพาะสมการองค์ประกอบเชิงลำดับบวก หรือ สมการองค์ประกอบเชิงลำดับลบ ในการหาค่าตำแหน่งลัดวงจร ซึ่งจะให้คำตอบที่ดีกว่า

ในกรณีการหาระยะลัดวงจรแบบสองปลายไม่จำเป็นต้องเลือกสมการที่ใช้เหมือนกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียว เนื่องจากตัวแปรไม่ทราบค่า แรงดัน ณ จุดลัดวงจร V_K ถูกจำกัดทิ้งไประหว่างการแก้สมการ อย่างไรก็ตามปริมาณที่วัด V_G, I_G, V_H, I_H จะต้องมีค่าเข้ากันได้เชิงเวลา (time synchronization) หากค่าที่วัดมีความผิดพลาดเชิงเวลาจะทำให้คำตอบผิดไปจากคำตอบจริงเป็นอย่างมาก

การหาตำแหน่งลัดวงจรที่แสดงไว้ในหัวข้อนี้ใช้แบบจำลองสายส่งระยะสั้นในกรณีสายส่งระยะปานกลางและระยะยาวสามารถใช้แนวคิดเดียวกันในการแก้ปัญหาได้ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในกรณีที่สายส่ง ค่าคาปาซิทีฟของสายส่งเป็นปริมาณมาก

2.2.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองสายส่งระยะไกล

หัวข้อที่แล้วกล่าวถึงการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลสองปลายแบบมาตรฐานซึ่งใช้แบบจำลองสายส่งแบบระยะสั้นในการคำนวณ งานวิจัยสมัยใหม่ส่วนใหญ่จะนิยมใช้แบบจำลองสายส่งระยะไกลเพิ่มความแม่นยำให้กับระเบียบวิธี ในหัวข้อนี้จะนำเสนองานของ Joe-Air Jiang (2000) และคณะ [10] โดยข้อมูลสองปลายจะได้จาก PMU (Phasor Measurement Unit) ซึ่งจะทำให้ค่าที่วัดจากทั้งสองปลายเท่ากันทางเวลา กัน

2.2.2.1 กรณี เฟสเดียว

พิจารณาสายส่งที่ปกติที่ไม่มีการลัดวงจร เราสามารถเขียนสมการแสดง แรงดันและกระแสในแต่ละจุดบนสายส่งได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.55)$$

โดยที่ R, L, G และ C คือ ความต้านทาน อินดักแตนซ์ คอนดักแตนซ์ และ คาปาซิแตนซ์ ต่อความยาวสายส่งตามลำดับ ภายใต้สภาวะเสถียร (sinusoidal steady state condition) $\frac{\partial}{\partial t}$ สามารถแทนได้ด้วย $j\omega$ ดังนั้นคำตอบของสมการข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในภาพ

$$V = Ae^{+\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (2.56)$$

$$I = \frac{(Ae^{+\gamma x} + Be^{-\gamma x})}{Z_c} \quad (2.57)$$

โดยที่ $Z_c = \sqrt{\frac{(R+j\omega L)}{(G+j\omega C)}}$ มีหน่วยเป็น Ω เรียกว่า ค่าต้านทานเฉพาะเจาะจง (characteristic impedance or surge impedance) และ $\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$ เรียกว่า (propagation constant of the transmission line) A และ B เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จาก สภาพขอบเขต (boundary condition) ของด้านส่งและด้านรับของสายส่ง

กำหนดให้ r เป็นระยะใดๆ ต่อความยาวสายส่งจากปลายด้านรับ, l เป็นความยาวสายส่งทั้งเส้น ดังนั้นตำแหน่งที่ $K = rl$ กิโลเมตรจากสายส่งด้านรับ สามารถหาแรงดันและกระแส

ได้จาก

$$\begin{aligned} V_K &= \frac{1}{2e^{\gamma l}}(V_S + Z_c I_S)e^{r l} + \frac{1}{2}e^{\gamma L(V_S - Z_c I_S)}e^{-r l} \\ V_K &= \frac{V_R + Z_c I_R}{2}e^{r l} + \frac{V_R - Z_c I_R}{2}e^{-r l} \end{aligned} \quad (2.58)$$

สมการที่ (2.58) แสดงการหา แรงดันตำแหน่ง K จากปลายสายส่งด้านรับ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการเพื่อหาแรงดันตำแหน่ง K จากปลายสายส่งอีกด้านได้ โดยให้ระยะเป็น $1 - r$ ดังนั้นเราสามารถแก้สมการหา r ได้ดังต่อไปนี้

$$r = \ln(N/M)2\gamma l \quad (2.59)$$

โดยที่

$$N = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} - \frac{V_S - Z_c I_S}{2}e^{\gamma l} \quad (2.60)$$

และ

$$M = \frac{V_S + Z_c I_S}{2}e^{-\gamma l} - \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \quad (2.61)$$

จากสมการข้างต้นการแก้ปัญหสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) ไม่ได้มีข้อสมมุติใดใด ดังนั้นค่า r ที่ได้จะไม่ขึ้นต่อ ตัวแปรอื่นเช่นอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย, การเปลี่ยนแปลงของโหลด, ค่าความต้านทานของฟอลต์ (fault resistance) ,มุมของแรงดันที่เกิดการลัดวงจร หรือ ประเภทของการลัดวงจร ในเอกสารงานวิจัยของ Joe Air Jiang และคณะ ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระเบียบวิธีนี้

2.2.2.2 กรณี 3 เฟส

ในส่วนนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแก้ปัญหการหาระยะลัดวงจรที่แสดงไว้ในหัวข้อก่อน หน้านี้กับระบบสามเฟส เราไม่สามารถใช้สมการที่แสดงในส่วนที่แล้วได้กับกรณีสามเฟส เพราะระบบสามเฟส จะมีผลที่เกิดจากกระแสเฟสอื่นทำให้แรงดันเปลี่ยน (coupling effect)

พิจารณาระบบส่งแบบสามเฟส โดยให้ A, B, C เป็นสัญลักษณ์แสดงค่าต่างๆ ในแต่ละเฟสเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L}\frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} = \mathbf{G}\mathbf{v} + \mathbf{C}\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \quad (2.63)$$

ในกรณีนี้ \mathbf{v} และ \mathbf{i} เป็นเวกเตอร์ขนาด 3×1 , ตัวแปร $\mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{G}$ และ \mathbf{C} เป็นเมตริกค่าพารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 3×3

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_S & L_m & L_m \\ L_m & L_S & L_m \\ L_m & L_m & L_S \end{bmatrix} \quad [H/km] \quad (2.64)$$

ภายใต้สภาวะสถานะคงตัว (steady state) สมการ (2.62,2.63) สามารถเขียนอยู่ในภาพ

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{Y}\mathbf{V} \quad (2.66)$$

ใช้ Clark tranformation เพื่อตัดั้บเป็้ล ปริมาณทางเฟสให้้ง่ายในการทำงานต่อไป

$$\begin{bmatrix} V^A \\ V^B \\ V^C \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} V^0 \\ V^\alpha \\ V^\beta \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$\begin{bmatrix} I^A \\ I^B \\ I^C \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} I^0 \\ I^\alpha \\ I^\beta \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

โดยที่ Clarke tranformation matrix a คือ

$$a = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

แทนค่าสมการ (2.67,2.68,2.69) ลงในสมการที่ (2.65,2.66) จะได้สมการคำตอบ แรงดัน และกระแส ณ จุดใดๆ บนสายส่งดังนี้

$$\mathbf{V}_r = e^{\Gamma x} \mathbf{A} + e^{-\Gamma x} \mathbf{B} \quad (2.70)$$

$$\mathbf{I}_r = e^{\Gamma x} \mathbf{Z}_c^{-1} \mathbf{A} - e^{-\Gamma x} \mathbf{Z}_c^{-1} \mathbf{B} \quad (2.71)$$

โดยที่

$$\Gamma = \sqrt{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T}} \quad (2.72)$$

$$\mathbf{Z}_c = \sqrt{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}} \quad (2.73)$$

Γ และ \mathbf{Z}_c เป็นเมตริกซ์ขนาด 3x3 ที่มีค่าสมาชิกแนวทแยงมุม ทำการเขียนสมการหา V_K จากสองปลาย และแก้สมการจะได้คำตอบระยะล้ดวงจรตั้งสมการ

$$\mathbf{r}_i = \frac{\ln\{[\mathbf{A}(i) - \mathbf{C}(i)]/[\mathbf{E}(i) - \mathbf{B}(i)]\}}{2\Gamma(i, i)l} \quad i \equiv 0, \alpha, \beta \quad (2.74)$$

$\mathbf{A}(i), \mathbf{B}(i), \mathbf{C}(i)$ และ $\mathbf{E}(i)$ เป็นคอลัมเวคเตอร์ขนาด 3x1 ของเมตริกซ์ $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ และ \mathbf{E} โดยที่ $i = 1, 2, 3$ แทนส่วนที่เป็นค่า $0, \alpha, \beta$ ของสัญญาณ, $\Gamma(i, i)$ เป็นเมตริกซ์ขนาด 3x3ที่

มีสมมติฐาน เฉพาะแนวแท่งมุม เรียกว่า โมดอลพรอพเพอเกชันคอนสแตนต์เมตริกซ์ (modal propagation constant matrix) รายละเอียดของค่าต่างในสมการ (2.74) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(i) = \frac{1}{2}[\mathbf{V}_{\mathbf{Rr}}(i) + \mathbf{Z}_c(i)\mathbf{I}_{\mathbf{Rr}}(i)] \quad (2.75)$$

$$\mathbf{B}(i) = \frac{1}{2}[\mathbf{V}_{\mathbf{Rr}}(i) - \mathbf{Z}_c(i)\mathbf{I}_{\mathbf{Rr}}(i)] \quad i \equiv 0, 1\alpha, \beta \quad (2.76)$$

$$\mathbf{C}(i) = \frac{1}{2}e^{[-\Gamma(i,i)]}[\mathbf{V}_{\mathbf{Sr}}(i) + \mathbf{Z}_c(i)\mathbf{I}_{\mathbf{Sr}}(i)] \quad (2.77)$$

$$\mathbf{E}(i) = \frac{1}{2}e^{[-\Gamma(i,i)]}[\mathbf{V}_{\mathbf{Sr}}(i) - \mathbf{Z}_c(i)\mathbf{I}_{\mathbf{Sr}}(i)] \quad (2.78)$$

เนื่องจากเราใช้ คลากทรานโฟเมชัน (Clarke transformation) เพื่อแยกออกจากกัน (decouple) ปริมาณทางเฟสทำให้คำตอบที่ได้ในแต่ละโหมด ของ $0, \alpha, \beta$ มีความไม่แม่นยำต่อประเภทของการลัดวงจรซึ่งงานของ Joe Air Jiang และคณะได้สรุปไว้ใน [10]

2.2.3 การคำนวณด้วยข้อมูลสุ่มโดยตรง

ในกรณีนี้ จะ ออก นอก กรอบ ของ วิทยานิพนธ์ เนื่องจาก ไม่ได้ ใช้ ค่าเฟสเซอร์ มา ทำ การคำนวณเพื่อให้ได้ระยะลัดวงจรแต่เป็นการใช้ค่าสุ่มแต่ละจุดมาหาระยะลัดวงจร แต่อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหานี้ของ Kezunovic และคณะ [11] มีความน่าสนใจจึงเพิ่มเติมขึ้นมาในส่วนนี้

แบบจำลองสายส่งที่ใช้ในกรณีนี้เป็นแบบจำลองสายส่งระยะสั้น ซึ่งมีตัวแปรความต้านทานของสายส่ง $R(\Omega)$ และอินดักเตอร์ $L(H)$

$$\Delta\mathbf{I}(t) = \mathbf{I}_G(t) + \mathbf{I}_H(t) \quad (2.79)$$

$$\Delta\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_G(t) - \mathbf{V}_H(t) + l \left[\mathbf{R}\mathbf{I}_H(t) + \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{I}_H(t)}{\partial t} \right] \quad (2.80)$$

ในกรณีปกติไม่มีเหตุการณ์ลัดวงจรจะพบว่า $\Delta\mathbf{I}(t) = 0$ และ $\Delta\mathbf{V}(t) = 0$ สำหรับกรณีที่มีเหตุการณ์ลัดวงจรจะพบว่า

$$\Delta\mathbf{I}(t) = \mathbf{I}_K(t) \quad (2.81)$$

และ

$$\Delta\mathbf{V}(t) = r \left[\mathbf{R}\mathbf{I}_K(t) + \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{I}_K(t)}{\partial t} \right] \quad (2.82)$$

จากสมการข้างต้น (2.81) และ (2.82) $\mathbf{I}_K(t)$ ถูกแทนที่ และได้

$$\Delta\mathbf{V}(t) - r \left[\mathbf{R}\Delta\mathbf{I}(t) + \mathbf{L} \frac{\partial \Delta\mathbf{I}(t)}{\partial t} \right] = 0 \quad (2.83)$$

ถ้าข้อมูลถูกวัดด้วยความถี่สุ่ม f_s และให้ n เป็นลำดับของข้อมูล ดังนั้น ณ เวลา t ใดใดจะเท่ากับ $t = n/f_s$ สมการที่ (2.79),(2.80) จะสามารถเขียนอยู่ในเทอมของตัวแปรลำดับของข้อมูลที่ n ได้ดังนี้

$$\Delta \mathbf{I}_n = \mathbf{I}_{Gn} + \mathbf{I}_{Hn} \quad (2.84)$$

$$\Delta \mathbf{V}_n = \mathbf{V}_{Gn} - \mathbf{V}_{Hn} + r [\mathbf{R}\mathbf{I}_{Hn} + f_s \mathbf{L} (\mathbf{I}_{Hn} - \mathbf{I}_{H(n-1)})] \quad (2.85)$$

2.2.4 การชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยการปรับแก้มุมเฟสและวิธีแบบวนซ้ำ

ในหัวข้อนี้ได้สรุปงานของ Novosel และคณะ [12] โดยข้อมูลที่ได้จากทั้งสองปลายจะมีความเหลื่อมของเวลาอยู่ทำให้ มุมของแรงดันไฟฟ้า และมุมของกระแสเชิงสัมพันธ์ผิดไปจากความเป็นจริงดังนั้นในการตั้งสมการ เพื่อหาระยะลัดวงจรจะเพิ่มมุมชดเชย δ เพิ่มเข้ามา เนื่องจากการหาระยะลัดวงจรจำนวนสมการมีมากกว่าจำนวนตัวแปรอยู่แล้ว การเพิ่มตัวแปรมุมชดเชยเข้ามา ก็ยังสามารถหาระยะลัดวงจรได้ ในกรณีนี้จะได้สองสมการสองตัวแปรระเบียบวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำจะถูกนำมาใช้เพื่อหาคำตอบ

แบบจำลองของสายส่งในกรณีนี้เป็นแบบจำลองสายส่งระยะสั้น สมการของแรงดันไฟฟ้า ณ จุดลัดวงจรจะถูกเขียนอยู่ในภาพ แรงดันและกระแสที่วัด มาจากทั้งสองปลาย (G, H) ดังแสดงในสมการ (2.86) และ (2.87)

$$V_K = V_G - m z_L I_G \quad (2.86)$$

$$V_K = V_H - (1 - m) z_L I_H \quad (2.87)$$

กำจัดตัวแปรแรงดัน ณ จุดลัดวงจรซึ่งไม่ทราบค่า (V_K) จะได้

$$V_G - V_H + z_L I_H = m z_L (I_G + I_H) \quad (2.88)$$

ในกรณีที่ข้อมูลสองปลายไม่ตรงกันเชิงเวลา (time unsynchronized) กันจะพบว่าต้องชดเชยมุมของข้างใดข้างหนึ่งจะได้

$$V_G = V_G(\alpha_m + \delta); \quad V_H = V_H(\beta_m) \quad (2.89)$$

โดยที่ α_m และ β_m คือ มุมที่ได้จากการวัด ส่วน δ คือมุมที่ต้องชดเชยให้ให้กับค่าที่วัดได้จากปลาย G ดังนั้นสมการที่ (2.88) สามารถเขียนอยู่ในภาพที่ชดเชยมุมด้วย δ ได้ดังนี้

$$V_G \cdot e^{j\delta} - V_H + z_L I_H = m z_L (I_G \cdot e^{j\delta} + I_H) \quad (2.90)$$

แยกสมการที่ (2.90) ให้อยู่ในภาพเฉพาะค่าจริง และค่าเสมือนจะได้

$$\text{Re}\{V_G\} \sin(\delta) - \text{Im}\{V_H\} \cos(\delta) - \text{Im}(V_H) + C_4 = m(C_1 \sin(\delta) + C_2 \cos(\delta) + C_4) \quad (2.91)$$

$$\text{Re}\{V_G\} \cos(\delta) - \text{Im}\{V_H\} \sin(\delta) - \text{Re}(V_H) + C_3 = m(C_1 \cos(\delta) - C_2 \sin(\delta) + C_3) \quad (2.92)$$

โดยที่ C_1, C_2, C_3 และ C_4 มีค่าดังนี้ ให้ $z_L = r_R + jx_L$

$$C_1 = r_R \cdot \text{Re}(I_G) - x_L \cdot \text{Im}(I_G) \quad (2.93)$$

$$C_2 = r_R \cdot \text{Im}(I_G) + x_L \cdot \text{Re}(I_G) \quad (2.94)$$

$$C_3 = r_R \cdot \text{Re}(I_H) - x_L \cdot \text{Im}(I_H) \quad (2.95)$$

$$C_4 = r_R \cdot \text{Im}(I_H) + x_L \cdot \text{Re}(I_H) \quad (2.96)$$

หารสมการที่ (2.91) ด้วย (2.92) ทำการจัดภาพสมการใหม่จะได้

$$a \cdot \sin(\delta) + b \cdot \cos(\delta) + c = 0 \quad (2.97)$$

โดยที่

$$a = -C_3 \text{Re}(V_G) - C_4 \text{Im}(V_G) - C_1 \text{Re}(V_H) - C_2 \text{Im}(V_H) + C_1 C_3 + C_2 C_4 \quad (2.98)$$

$$b = C_4 \text{Re}(V_G) - C_3 \text{Im}(V_G) - C_2 \text{Re}(V_H) + C_1 \text{Im}(V_H) + C_2 C_3 - C_1 C_4 \quad (2.99)$$

$$c = C_2 \text{Re}(V_G) - C_1 \text{Im}(V_G) - C_4 \text{Re}(V_H) + C_3 \text{Im}(V_H) \quad (2.100)$$

สมการอยู่ในภาพ สองสมการสองตัวแปร ระเบียบวิธีแบบ Newton Raphson ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาโดย

$$\delta_{k+1} = \delta_k - \frac{F(\delta_k)}{F'(\delta_k)} \quad (2.101)$$

$$F(\delta_k) = b \cdot \cos(\delta_k) + a \cdot \sin(\delta_k) + c \quad (2.102)$$

$$F'(\delta_k) = a \cdot \cos(\delta_k) - b \cdot \sin(\delta_k) + c \quad (2.103)$$

ระยวงจรมหาสามารถหาได้จากสมการที่ (2.91) หรือ (2.92) ดังนี้

$$m = \frac{\text{Re}(V_G) \sin(\delta) + \text{Im}(V_G) \cos(\delta) - \text{Im}(V_H) + C_4}{C_1 \sin(\delta) + C_2 \cos(\delta) + C_4} \quad (2.104)$$

$$m = \frac{\text{Re}(V_G) \cos(\delta) - \text{Im}(V_G) \sin(\delta) - \text{Re}(V_H) + C_3}{C_1 \cos(\delta) - C_2 \sin(\delta) + C_3} \quad (2.105)$$

จากชุดสมการตั้งที่พิสูจน์มาเป็นสมการแบบเฟสเดียวซึ่งในกรณี ลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน ปริมาณกระแสลัดวงจรจะต้องถูกชดเชยตัว ปริมาณ องค์ประกอบลำดับศูนย์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ สามารถทำการคำนวณในแบบ องค์ประกอบสมมาตร โดยการแปลงปริมาณที่วัดได้ให้อยู่ใน ภาพ องค์ประกอบลำดับบวก, องค์ประกอบลำดับลบ และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ ก่อนซึ่งสมการ ที่เขียนข้างต้นสามารถใช้ได้ได้เลยเพียงให้ปริมาณแต่ละค่าอยู่ในภาพ symmetrical component นั้นๆ อย่างไรก็ตามพึงหลีกเลี่ยงการใช้ องค์ประกอบลำดับศูนย์ ในการหาคำตอบเนื่อง จากมีความไม่แน่นอนสูง ในกรณีลัดวงจรแบบสมดุล 3 เฟสควรใช้ องค์ประกอบลำดับบวก ในกรณีการลัดวงจรแบบไม่สมดุลอื่นๆ แนะนำให้ใช้ องค์ประกอบลำดับลบ

2.2.5 การชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยการละเลยมุมเฟสและวิธีแบบวนซ้ำ

ในหัวข้อนี้จะตัวอย่างการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย โดยข้อมูลสองปลายไม่ตรงกันเชิงเวลา และใช้แบบจำลองสายส่งระยะไกล Dalcastangne และคณะ 2006 [13], Dalcastangne และคณะ 2008 [14]

เนื่องจากข้อมูลสองปลายไม่ตรงกันเชิงเวลาดังนั้นจะพบว่า Dalcastangne และคณะจะใช้เพียงขนาดของแรงดัน ณ จุดลัดวงจร มาใช้ในการแก้ปัญหา ขนาดของแรงดัน ณ จุดลัดวงจรจะหาจากข้อมูลในแต่ละปลาย (G, H) โดยการขยับจุดลัดวงจรไปที่ละน้อย จุดตัดกันของขนาดของแรงดัน ณ จุดลัดวงจรที่ได้มาจากการคำนวณของทั้งสองข้างคือจุดที่เกิดลัดวงจรจริง เทคนิคการหาค่าเหมาะสม(optimization technique)ถูกนำมาประยุกต์ใช้

$$V(x) = V_G \cosh(\gamma x) - I_G Z_c \sinh(\gamma x), \quad (2.106)$$

โดยที่

$$\gamma = \sqrt{Y_u Z_u} \quad (2.107)$$

และ

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_u}{Y_u}} \quad (2.108)$$

$$V(y) = V_H \cosh(\gamma y) - I_H Z_c \sinh(\gamma y). \quad (2.109)$$

โดยที่ $x = m$ คือระยะลัดวงจรจากปลาย G และ $y = l - m$ คือระยะลัดวงจรจากปลาย H l คือความยาวสายส่งทั้งหมด ดังนั้นจะได้สมการที่เท่ากันสองด้านคือ

$$V(x)|_{x=m} = V(y)|_{y=l-m} \quad (2.110)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$m = \frac{\tanh^{-1}(-B/A)}{\gamma} \quad (2.111)$$

โดยที่

$$A = Z_c \cosh(\gamma l) I_H - \sinh(\gamma l) V_G + Z_c I_G \quad (2.112)$$

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ปริมาณทาง เฟสเซอร์ ไม่เท่ากันทางเวลา (time unsynchronize) กันนั้นจะแก้ปัญหาโดยใช้เพียงขนาดของแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรเท่านั้นดังนั้น จึงได้สมการ

$$|V(x)|_{x=m} = |V(y)|_{y=l-m} \quad (2.113)$$

แทนสมการข้างต้นด้วยตัวแปรข้อมูลที่วัดได้จากทั้งสองปลายจึงได้สมการ

$$|V_G \cosh(\gamma m) - I_G Z_c \sinh(\gamma m)| = |V_H \cosh(\gamma(l - m)) - I_H Z_c \sinh(\gamma(l - m))| \quad (2.114)$$

การหาค่าตำแหน่งลัดวงจรจะสามารถหาได้โดยสมการที่ (2.114) โดยใช้เทคนิค optimization ชั้นแรกทำการหาค่าเริ่มต้นดังนี้ ให้ประมาณค่าสมการของ $|V(x)|$ และ $|V(y)|$ เป็นสมการเส้นตรงซึ่งจะได้

$$V_1 = a_1x + b_1 \quad (2.115)$$

และ

$$V_2 = a_2x + b_2 \quad (2.116)$$

a_1 และ a_2 ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นตรงสามารถหาได้จาก

$$a_1 = \frac{\Delta|V(x)|}{\Delta x} = \frac{|V(x)|_{x=0.001l} - |V(x)|_{x=0}}{0.001l} \quad (2.117)$$

และ

$$a_2 = \frac{\Delta|V(y)|}{\Delta x} = \frac{|V(y)|_{y=0} - |V(y)|_{y=0.001l}}{0.001l} \quad (2.118)$$

b_1 และ b_2 หาได้จาก

$$b_1 = |V(x)|_{x=0} \quad (2.119)$$

$$b_2 = |V(y)|_{y=0} - a_2l \quad (2.120)$$

จุดตัดระหว่างสองเส้นของ V_1 และ V_2 คือคำตอบของการประมาณค่าเริ่มต้นในการหาค่าเหมาะสม เรียกว่า $m'(0)$ ซึ่งคือ

$$m'(0) = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (2.121)$$

เพื่อจะหาระยะลัดวงจรที่แท้จริงจะตั้งสมการรอบที่ k ได้ดังนี้

$$V_1 = a_1[x - m'(k-1)] + b_1 \quad (2.122)$$

และ

$$V_2 = a_2[x - m'(k-1)] + b_2 \quad (2.123)$$

โดยที่

$$a_1 = \frac{|V(x)|_{x=1.001m'(k-1)} - |V(x)|_{x=m'(k-1)}}{0.001m'(k-1)} \quad (2.124)$$

$$a_2 = \frac{|V(y)|_{y=[l-1.001m'(k-1)]} - |V(y)|_{y=[l-m'(k-1)]}}{0.001m'(k-1)} \quad (2.125)$$

$$b_1 = |V(x)|_{x=m'(k-1)} \quad (2.126)$$

$$b_2 = |V(y)|_{y=[l-m'(k-1)]} \quad (2.127)$$

ดังนั้นคำตอบระยะลัดวงจรจะหาได้จาก

$$m'(k) = \frac{(a_1 - a_2)m'(k-1) + b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (2.128)$$

เงื่อนไขในการหยุด เมื่อคำตอบลู่อเข้าสู่รอบที่ $k = n$

$$|m'(n) - m'(n-1)| \leq ql \quad (2.129)$$

โดยที่ $0 < q \ll 0$ คำตอบคือ

$$\hat{m} = m'(n) \quad (2.130)$$

2.2.6 การคำนวณแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งและชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันโดยอาศัยข้อมูลก่อนเกิดความผิดพลาด

ในหัวข้อนี้เป็นแนวคิดที่นำเสนอโดย Yoan Liao และคณะตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 [9],[15],[16],[17],[18] ข้อมูลสองปลายไม่จำเป็นต้องตรงกันเชิงเวลา แบบจำลองสายส่งเป็นแบบจำลองสายส่งระยะไกล ต้องมีข้อมูลช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร ตัวแปรที่เป็นคำตอบของสมการคือ ระยะลัดวงจร m (km.) มุมชดเชยความไม่ตรงกันเชิงเวลา δ (rad.) ค่าความต้านทานสายส่ง r_R ($\frac{\Omega}{km.}$) ค่าความต้านทานเสมือนของสายส่ง(ส่วนจินตภาพ) a ($\frac{\Omega}{km.}$) และค่าความนำไฟฟ้าของสายส่ง (ส่วนจินตภาพ) b ($\frac{S}{km.}$)

$$f_1(X) = V_G^1 - Z_c \sinh(\gamma l) I_G^1 + \sinh(\gamma l) \tanh(\gamma l/2) V_G^1 - V_H^1 e^{j\delta} = 0 \quad (2.131)$$

$$f_2(X) = I_G^1 - \tanh(\gamma l/2) V_G^1 / Z_c + I_H^1 e^{j\delta} - \tanh(\gamma l/2) V_H^1 e^{j\delta} / Z_c = 0 \quad (2.132)$$

$$Z_c = \sqrt{(r + ja)/(jb)} \quad (2.133)$$

$$\gamma = \sqrt{(r + ja)(jb)} \quad (2.134)$$

$$X = [m, \delta, r, a, b]^T \quad (2.135)$$

$$f_3(X) = V_{fG}^1 - Z_{GK} \left(I_{fG}^1 - V_{fG}^1 \frac{Y_{GK}}{2} \right) - \left[V_{fH}^1 - Z_{HK} \left(I_{fH}^1 - V_{fH}^1 \frac{Y_{HK}}{2} \right) \right] e^{j\delta} = 0 \quad (2.136)$$

$$Z_{GK} = Z_c \sinh(\gamma m) \quad (2.137)$$

$$Z_{HK} = Z_c \sinh[\gamma(l - m)] \quad (2.138)$$

$$Y_{GK} = \frac{2}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma m}{2}\right) \quad (2.139)$$

$$Y_{HK} = \frac{2}{Z_c} \tanh\left[\frac{\gamma(l - m)}{2}\right] \quad (2.140)$$

ให้ $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ เป็นฟังก์ชันเวกเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย สมการจริง และสมการเสมือนหกสมการ

$$\mathbf{F}_{2i-1}(\mathbf{X}) = \text{Re}(\mathbf{f}_i(\mathbf{X})), \quad i = 1, \dots, 3 \quad (2.141)$$

$$\mathbf{F}_{2i}(\mathbf{X}) = \text{Im}(\mathbf{f}_i(\mathbf{X})), \quad i = 1, \dots, 3 \quad (2.142)$$

จากจำนวนสมการหกสมการ ห้าตัวแปรสามารถหาคำตอบได้จะระเบียบวิธีมาตรฐาน least square ดังนี้

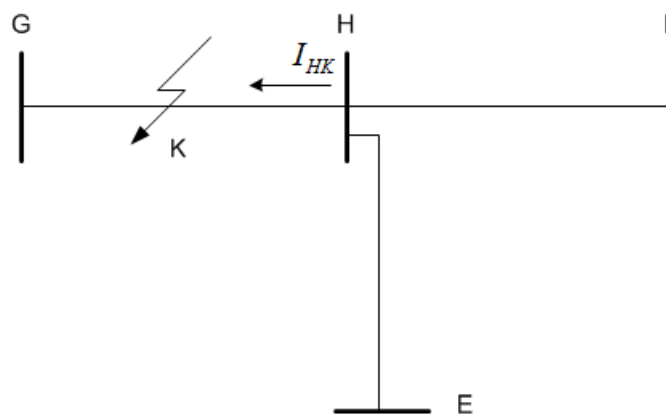
$$\mathbf{X}_{v+1} = \mathbf{X}_v + \Delta \mathbf{X} \quad (2.143)$$

$$\Delta \mathbf{X} = -(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} [\mathbf{H}^T \mathbf{F}(\mathbf{X}_v)] \quad (2.144)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\partial(\mathbf{X}_v)}{\partial \mathbf{X}} \quad (2.145)$$

โดยที่ X_v, X_{v+1} คือเวกเตอร์ตัวแปรใน iteration ที่ v^{th} , v รอบที่เริ่มจาก 1, ΔX ตัวแปรที่ใช้ปรับค่า, H jacobian matrix ในกลุ่มนี้ยังสามารถจำแนกเป็นส่วนที่ใช้แต่ข้อมูลช่วง during fault ในกรณีที่ข้อมูลช่วง pre fault ไม่สามารถหาได้อีกด้วย แต่จะต้องรู้ประเภทของการลัดวงจรมาช่วยในการ ตั้งสมการเพิ่ม

2.3 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลมากกว่าสองปลาย



รูปที่ 2.6: ลักษณะโครงสร้างสายส่งที่ใช้ในการคำนวณแบบสามปลาย

การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งแบบมีข้อมูลมากกว่าสองปลาย เริ่มมีการนำเสนองานในช่วงเวลาใกล้เคียงกับการนำเสนอการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย งานของ Adly A. Girgis และคณะตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1992 [19] เป็นงานยุคบุกเบิกในการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งโดยมีข้อมูลสามปลาย โดยให้ระบบทดสอบเป็นภาพตัว T ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.6 ข้อกำหนดเบื้องต้นคือรู้ข้อมูลสามปลาย คือปลาย G L และ E ระเบียบวิธีหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายถูกนำมาใช้เพื่อหาสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร โดยนำข้อมูลปลาย G และ L ทำการคำนวณครั้งทีหนึ่ง ถ้าพบว่า ตำแหน่งเกิดการลัดวงจรอยู่ห่างจากปลาย G ไม่เกินความยาวของ GH จะสรุปได้ว่าเกิดการลัดวงจรในสายส่ง GH ถ้าหากตำแหน่งลัดวงจรเกิน ความยาวสายส่ง GH ให้ทำการคำนวณแบบสองปลายหาตำแหน่งลัดวงจรระหว่าง L และ E ถ้าผลลัพธ์ที่ได้อยู่ห่างจากปลาย L ไม่เกินความยาว LH จะสรุปได้ว่าเกิดการลัดวงจรในสายส่ง LH ถ้าหากตำแหน่งลัดวงจรเกินความยาวสายส่ง LH สรุปได้ว่าเกิดการลัดวงจร บนสายส่ง EH จากนั้นให้หาแรงดันที่ปลาย H และหากระแสป้อนจุดลัดวงจรซึ่งเป็นผลรวมของกระแสที่ไหลจากสองปลายบนสายส่งเส้นที่ไม่ลัดวงจร ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจรแบบสองปลายอีกครั้งก็จะได้ คำตอบที่แม่นยำ

บทความในชั้นหลังได้นำแนวคิดนี้ไปต่อยอดเพื่อหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งกรณีที่มีการข้อมูลจำนวนที่ปลายก็ได้ทราบเมื่อโครงสร้างของสายส่งเป็นตัว T ที่ต่อออกไปเรื่อยๆ [20] อีกแนวคิดหนึ่งคือการนำ source impedance มาช่วยในการหาตำแหน่งการลัดวงจรมีการวัดข้อมูลเพียงสองปลายบนโครงสร้างสายส่งลักษณะตัว T [21]

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบหลายปลายที่กล่าวมาข้างต้นตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า จุดเชื่อมต่อตรงกลางไม่มีโหนดหากจุดเชื่อมต่อตรงการมีโหนดจะทำให้การหาตำแหน่งลัดวงจรผิดทันที ทั้งนี้เนื่องมาจากกระแสป้อนจุดลัดวงจรไม่ใช่ผลรวมของกระแสจากสายส่งเส้นที่ลัดวงจรเท่านั้น หากยังต้องนำไปลบออกจากโหนด ณ จุดเชื่อมต่ออีกด้วย ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาต่อไป

บทที่ 3

ระบบวิเคราะห์ความผิดปกติแบบอัตโนมัติ

ในบทนี้จะนำเสนอ ภาพรวมของการรวบรวมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เริ่มจากแหล่งที่มาของข้อมูล คุณภาพของข้อมูล โครงสร้างการรวบรวมข้อมูล แนวทางการนำข้อมูลมาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบ

3.1 เครื่องบันทึกข้อมูลขณะเกิดความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะมีอุปกรณ์บันทึกค่าแรงดัน กระแส และสถานะของตัวตัดต่อวงจร (Breaker) เพื่อให้เจ้าหน้าที่วิเคราะห์ หาสาเหตุและแก้ไข เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นมาในระบบ อุปกรณ์เพื่อการบันทึกเหล่านี้อาจแบ่งได้สี่ประเภทดังนี้

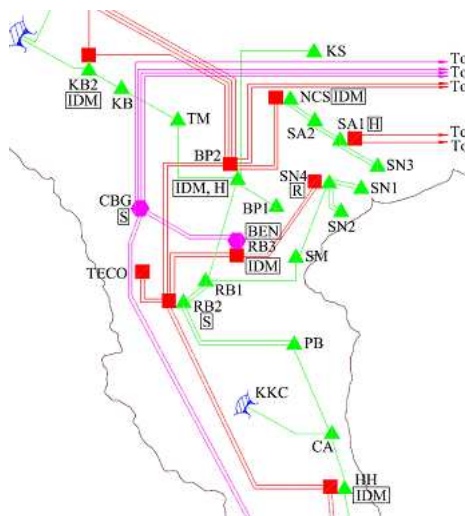
ประเภทที่ 1 เครื่องบันทึกความผิดปกติ (Digital Fault Recorder: DFR)

ประเภทที่ 2 อุปกรณ์ป้องกันรีเลย์ (Protective Relay)

ประเภทที่ 3 อุปกรณ์เพื่อตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter)

ประเภทที่ 4 อุปกรณ์วัดแรงดัน และกระแสเป็นเฟสเซอร์ (phasor) แบบทันเวลา (Real time) และมีความเข้ากันได้ของข้อมูลเชิงเวลา (Phasor Measurement Unit: PMU)

DFR คือเครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่ตามสถานีไฟฟ้าหลัก เพื่อใช้ในการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ในสถานีไฟฟ้าแต่ละแห่ง DFR จะมีช่องสัญญาณเพื่อบันทึกข้อมูลเมื่อตรวจพบว่า เกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบ โดยแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นสองลักษณะ คือ สัญญาณ Analog เพื่อบันทึกค่าแรงดัน และกระแสในสายส่ง ของทั้งสามเฟส (อาจรวมถึงค่ากระแส Polarized ที่ไหลในขดลวดตติยภูมิ (Tertiary Winding)) ณ สถานีไฟฟ้านั้นๆ และ สัญญาณ Digital เพื่อบันทึกสถานะการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Circuit Breaker: CB) และสถานะการทำงานของรีเลย์ป้องกันชนิดต่างๆ ขณะเกิดเหตุขัดข้อง เงื่อนไขการตรวจจับการลัดวงจร หรือเหตุขัดข้องในลักษณะอื่นในระบบ ของ DFR เพื่อทำการบันทึกสัญญาณ โดยทั่วไป กระทำโดยการตั้งค่า Threshold ของขนาดแรงดันตก (Undervoltage: UV) และขนาดกระแสเกิน (Overcurrent: OC) ในแต่ละเฟส หรือ ตรวจจับจากสถานะการทำงานของ CB และรีเลย์ป้องกัน ซึ่งหากเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง DFR ก็ทำการบันทึกสัญญาณทุกช่องสัญญาณที่เชื่อมต่อใช้งานอยู่ ณ ขณะนั้นไว้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก DFR แต่ละชุด มีจำนวนช่องบันทึกสัญญาณที่จำกัด ในบางกรณีจึงไม่สามารถเก็บค่าสัญญาณได้ครบถ้วนทุกสัญญาณ ขึ้นอยู่กับลำดับความสำคัญของสัญญาณ ซึ่งวิศวกรผู้ดูแลระบบเป็นผู้กำหนด ความถี่ในการสุ่มสัญญาณ (Sampling Frequency) ของ DFR ของแต่ละผู้ผลิต อาจจะไม่เท่ากัน ผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าความถี่ในการสุ่มสัญญาณเองได้ โดยไม่เกินค่าความถี่สูงสุดที่ผู้ผลิตแต่ละรายกำหนด โดยทั่วไป การบันทึกค่าสัญญาณชั่วขณะ (Instantaneous



รูปที่ 3.1: ภาพแสดงสายส่งกำลังไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง DFR จะอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมเช่น IDM,BEN,R และ H ซึ่งเป็นชื่อย่อของบริษัทผู้ผลิตเครื่อง

Value) ของกระแสและแรงดัน ความถี่พิกัด 50 Hz ขณะเกิด Fault กพผ. จะตั้งค่าความถี่ในการส่มสัญญาณของ DFR ที่ 2000 Hz หรือ 3000 Hz (ค่าสูงสุดที่พบใช้งานอยู่ คือ 12,800 Hz) ทั้งนี้ ความถี่ที่เหมาะสมในการส่มสัญญาณขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม การตั้งค่าความถี่ในการส่มสัญญาณยังต้องคำนึงถึงขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลนอกจากนี้ คำแนะนำในการตั้งค่าความถี่ในการส่มสัญญาณ สำหรับการใช้งาน DFR ในแต่ละกรณี อาจได้จากคู่มือการใช้งาน DFR ของผู้ผลิต ระยะเวลาในการบันทึกค่าในแต่ละเหตุการณ์ ของ DFR ขึ้นอยู่กับความยาวของช่วงเวลาในการเกิดเหตุขัดข้องนั้นๆ เป็นสำคัญ ซึ่งในแต่ละเหตุการณ์ DFR จะทำการบันทึกค่าโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาย่อยกล่าวคือ ช่วงก่อนเกิดเหตุขัดข้อง (Pre-fault) ช่วงระหว่างเกิดเหตุขัดข้อง (During-fault) และช่วงเวลาหลังเกิดเหตุขัดข้อง (Post-fault) โดยผู้ผลิตจะระบุข้อกำหนดของเวลาที่สามารถปรับตั้งค่าได้ ในช่วง ก่อนเกิดการลัดวงจร และ หลังเกิดการลัดวงจร มาให้ ตัวอย่างเช่น

Pre-fault Time: 2 - 300 cycle

Post-fault Time: 8 - 30 sec.

ในส่วนของช่วงเวลา ขณะเกิดการลัดวงจร ขึ้นอยู่กับการดำรงอยู่ของเงื่อนไขการตรวจจับการลัดวงจร ที่กำหนด จนถึง ขนาดจำนวนสูงสุดของข้อมูลที่สามารถบันทึกได้ของ DFR ชุดนั้น โดยทั่วไป เพื่อให้ขนาดไฟล์ข้อมูลไม่ใหญ่จนเกินไป การบันทึกข้อมูลช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร และ หลังเกิดการลัดวงจร ควรจะสั้นที่สุดเท่าที่ยังสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ข้อมูล Pre-fault จะใช้เพื่อระบุสถานะของระบบส่งไฟฟ้าก่อนเกิดเหตุขัดข้องได้แก่ ขนาดกระแส แรงดัน และการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้นเป็นเท่าใด การบันทึกข้อมูลจะอยู่ในช่วง 5-20 ลูกคลื่น (100 - 400 msec) ในส่วนช่วงเวลาขณะเกิดการลัดวงจร ความยาวของข้อมูลจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการตัดวงจรของ CB รวมถึงเวลาการ

ทำงานของ Reclose Circuit Breaker (RCB) ซึ่งน่าจะสามารถประมาณกรณีที่ยาวที่สุดได้จากระยะเวลาการตัดวงจรของ CB ที่นานที่สุด รวมกับระยะเวลาในการ Reclose และระยะเวลาการตัดวงจรของ CB ในครั้งที่สอง ช่วงหลังเกิดการลัดวงจร สามารถระบุได้ในสองลักษณะ คือ เมื่อเงื่อนไขในการตรวจจับเหตุขัดข้องทุกเงื่อนไขหายไป หรือ เมื่อเงื่อนไขในการตรวจจับเหตุขัดข้องบางเงื่อนไข เช่น ขนาดแรงดันตก หายไป แต่บางเงื่อนไขยังคงดำรงอยู่ เช่น สถานะการทำงานของ CB ยังคงเปิดวงจรอยู่ (อาจมีสาเหตุจากการ Lock-tripped หลังการ Reclose แล้วพบว่าการลัดวงจรยังคงอยู่) ในกรณีแรกการบันทึกข้อมูลช่วงหลังเกิดการลัดวงจร จะมีความยาวตามที่ผู้ใช้กำหนด เช่น 2 sec ส่วนในกรณีหลัง ผู้ใช้อาจระบุให้ DFR บันทึกข้อมูลช่วงหลังเกิดการลัดวงจร ต่อไปจนถึงขนาดความยาวสูงสุดที่ DFR จะบันทึกข้อมูลได้ โดยทั่วไปแล้ว ในการใช้งาน DFR จะปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลของ DFR แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะการใช้งาน ดังนี้

1) Fast Scan เพื่อตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจรบนสายส่ง โดยทั่วไปจะตั้งค่าพารามิเตอร์ในการบันทึกข้อมูลของ DFR ดังนี้

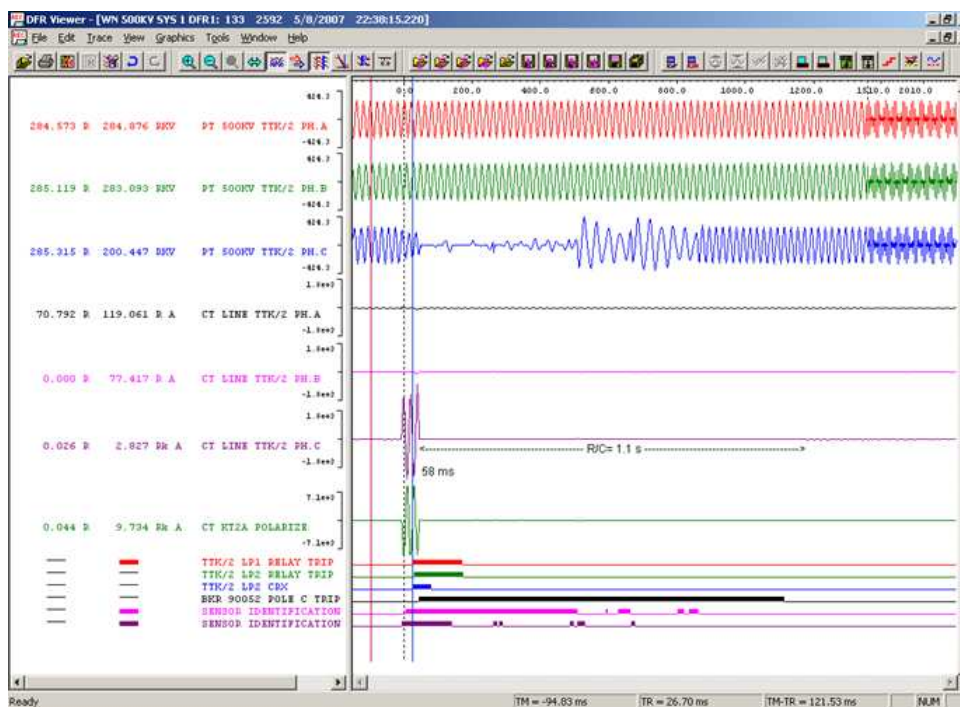
- UV threshold: 85
- OC threshold: 120
- Sampling frequency: 2000 Hz หรือ 3000 Hz (สามารถตั้งค่าได้)
- Pre-fault time: 150 msec
- Post-fault time: 2 sec
- (ระยะเวลาโดยรวมของทั้ง 3 ช่วง ในแต่ละเหตุการณ์ ความยาวประมาณ 4 sec)

2) Slow Scan เพื่อตรวจจับค่าความถี่ของระบบ ในกรณีที่รีเลย์ป้องกันความถี่ต่ำ (Underfrequency Relay: UF) ทำงาน ในกรณีนี้ จะใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณต่ำกว่ากรณีแรกมาก เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ในช่วงระยะเวลานานขึ้นในระดับนาฬิกา หรือชั่วโมง โดยทั่วไปจะตั้งค่าพารามิเตอร์ในการบันทึกข้อมูลของ DFR ดังนี้

- UF threshold: 0.2 Hz
- Sampling frequency: 30 – 50 Hz (หรือแล้วแต่ผู้ผลิตกำหนดไว้เป็นค่าคงที่)
- (ระยะเวลาโดยรวมของทั้ง 3 ช่วง ในแต่ละเหตุการณ์ ความยาวประมาณ 30 นาที)

ข้อมูลที่บันทึกในหน่วยความจำของ DFR แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สัญญาณ Analog ได้แก่ ขนาดแรงดัน และกระแส ของทั้ง 3 เฟส ที่สุ่มได้ ณ ขณะเวลานั้นๆ (Sampling Instantaneous Values) และ สัญญาณ Digital ได้แก่ สถานะการทำงานของ CB และรีเลย์ป้องกัน (นอกจากนี้ ยังมีสัญญาณประเภทเซนเซอร์ ซึ่งบันทึกค่าเป็น 0 หรือ 1 เช่นกัน) ซึ่งชนิดของข้อมูลที่บันทึกจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดของจำนวนช่องสัญญาณของ DFR นั้นๆ ด้วย (พบว่าในบางกรณีที่จำนวนช่องสัญญาณจำกัด ผู้ปฏิบัติงานอาจนำเอาสัญญาณมากกว่า 1 สัญญาณ ผ่าน Logic OR เพื่อบันทึกค่าสัญญาณเหล่านั้นเก็บไว้ในช่องสัญญาณเดียวกันได้ แต่โดยมากมักใช้กับสัญญาณที่มีลำดับความสำคัญไม่สูงนัก และมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงพร้อมกันน้อย)

ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะข้อมูลที่จัดเก็บได้จาก DFR ซึ่งมีภาพคลื่นของแรงดัน สามเฟส กระแสสามเฟส และ ข้อมูลดิจิทัลที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลดิจิทัลเป็นเส้น และมีสี่เหลี่ยมในกรณีที่สัญญาณนั้นทำงาน) เนื่องจาก DFR และเครื่องมือวัดอื่นๆ มีหลายผู้ผลิตดังนั้นจึง



รูปที่ 3.2: ภาพแสดงข้อมูลที่บันทึกได้จาก DFR ที่ความถี่สุ่ม 6.4kHz วัตที่สถานีไฟฟ้าวังน้อย

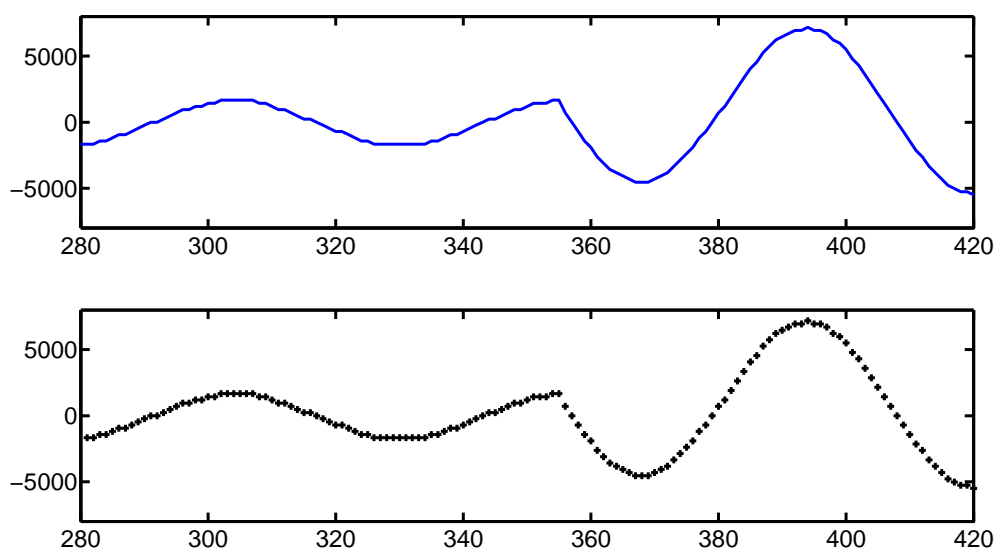
มีมาตรฐานกลางเพื่อให้สามารถเข้าใจและสามารถใช้งานข้อมูลร่วมกันได้ซึ่งเรียก มาตรฐานการจัดเก็บข้อมูลต่างๆ ทางไฟฟ้าว่า Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE IEEE C37.111.1999) [22]

อุปกรณ์ป้องกันรีเลย์ เป็นเครื่องมือวัดและควบคุมอุปกรณ์ตัดต่อไฟฟ้าเพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเช่น รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงแรงดัน รีเลย์ป้องกันสายส่ง เป็นต้น [23],[24] เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันสมัยใหม่จะมีโปรแกรมจัดการซึ่งสามารถส่งออกข้อมูลให้อยู่ในภาพ COMTRADE ได้จึงสามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลอีกทางหนึ่งได้ รีเลย์จะทำการวัดกระแส และแรงดันของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันอยู่ทำการคำนวณและถ้าค่าที่คำนวณอยู่ในระดับที่ตั้งไว้ก็จะทำการส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ตัดวงจรเพื่อแยกวงจรออก เพื่อป้องกันอุปกรณ์นั้นๆ โดยทั่วไปรีเลย์จะมีความถี่สุ่มต่ำกว่า DFR ความถี่สุ่มของรีเลย์จะอยู่ในช่วง 0.6kHz ถึง 1kHz สัญญาณดิจิทัลของรีเลย์ชนิดต่างๆ จะถูกป้อนเข้า DFR อยู่แล้ว โดยปกติในกรณีนี้ที่สถานีไฟฟ้านั้นๆ มี DFR อยู่อย่างไรก็ตาม DFR เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงดังนั้นสถานีไฟฟ้าบางแห่งอาจไม่มีการติดตั้ง DFR อย่างไรก็ตามตามข้อกำหนดการสร้างสถานีไฟฟ้าสมัยใหม่มีแนวโน้มจะบังคับให้มีการติดตั้ง DFR ทุกสถานีดังนั้นจำนวน DFR จะมีเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องจากรีเลย์เป็นอุปกรณ์ป้องกันควบคุมจึงมีการติดตั้งทุกสถานีและมีจำนวนเท่ากับจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันดังนั้นข้อมูลจากรีเลย์สามารถใช้เป็น ข้อมูลทางเลือกในกรณีที่ไม่สามารถหาข้อมูลจาก DFR ได้ ลักษณะข้อมูลที่ได้จากรีเลย์จะเหมือนกับ DFR คือมีค่าช่วง pre-fault,during-fault และ post-fault แต่รีเลย์จะมีหน่วยความจำน้อยกว่า ดังนั้นจะบันทึกได้ไม่

ก็เหตุการณ์ ถ้าไม่มีการนำข้อมูลออกจากรีเลย์ข้อมูลเก่าก็จะถูกลบทิ้ง

อุปกรณ์เพื่อการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter) เป็นเครื่องมือวัดที่มีความถี่สูงเพื่อศึกษาความบิดเบี้ยวของแรงดันหรือกระแส ความถี่สูงของ PQ meter จะอยู่ในช่วง 3.2kHz ถึง 12.8KHz ดังนั้นทำให้ DFR ของบางผู้ผลิตสามารถใช้งานในการตรวจสอบคุณภาพทางไฟฟ้าได้ด้วยโดยทั่วไปในระบบส่งมักจะไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องคุณภาพไฟฟ้า ยกเว้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบส่งแบบ HVDC ดังนั้น PQ meter มักจะไม่ค่อยมีติดตั้งในระบบส่งมากเท่ากับระบบจำหน่าย

PQ meter มักจะมีลักษณะจำกัดคือวัดแค่ปริมาณแรงดันและกระแสสามเฟสเท่านั้น แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับเครื่องของแต่ละผู้ผลิตด้วย เนื่องจาก PQ meter ถูกออกแบบมาวัดข้อมูลกระแสและแรงดันในช่วงปกติต่างจาก DFR และ รีเลย์ดังนั้น PQ meter จะให้ค่าที่ดีในช่วงปกติในช่วงที่มีเหตุการณ์ผิดปกติ ปริมาณกระแสอาจมีลักษณะโดนตัดก่อนบนบทิ้งได้ ในทางตรงกันข้าม DFR และรีเลย์ ข้อมูลกระแสในช่วงปกติอาจมีความไม่ละเอียดเมื่อเทียบกับ PQ meter ภาพที่ 3.3 เป็นค่ากระแสที่ได้จากอุปกรณ์วัด DFR ซึ่งมีการตั้งค่าสูงสุดไว้สูงทำให้ข้อมูลช่วงก่อนเกิดการ ลัดวงจรมีค่าความละเอียดต่ำจะเห็นเป็นขั้นๆ



รูปที่ 3.3: ภาพแสดงข้อมูลกระแสที่บันทึกได้จาก DFR ที่มีการเพื่ค่ากระแสสูงสุดไว้สูงทำให้ค่ากระแสช่วง pre-fault ที่วัดได้มีความละเอียดต่ำลง

PMU เป็นเครื่องมือวัดที่ให้ค่าเป็น เฟสเซอร์ คือขนาดและมุมของสัญญาณนั้นๆ ข้อดีของ PMU คือการันตีการความเข้ากันได้เชิงเวลา(time synchronize)ของข้อมูลที่วัดต่างที่กัน เนื่องจากการวัดแรงดัน หรือกระแส ที่จุดวัดต่างกันหากเวลาของเครื่องมือวัดสองที่ไม่เท่ากัน เมื่อทำการคำนวณเพื่อแปลงค่าให้อยู่ในภาพ เฟสเซอร์ แล้วจะพบว่าทำให้มุมที่ได้ต่างกัน ดังนั้นเครื่องมือวัดประเภท PMU จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือประเภท GPS เพื่อ ทำให้เวลาของเครื่องมือวัดตรงกันดังนั้นค่า เฟสเซอร์ ที่ได้จะสามารถเทียบกันได้และนำไปคำนวณ

ต่อไปได้อย่างถูกต้อง จากบทที่สองจะเห็นว่า การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย จะต้องมีการทำให้ข้อมูลเข้ากันได้เชิงเวลา (time synchronize) DFR ของบางผู้ผลิตสามารถปรับใช้เป็น PMU ได้

3.2 ข้อมูลป้อนเข้าและการประมวลผลขั้นต้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อมูลป้อนเข้าและการประมวลผลขั้นต้น จากหัวข้อที่แล้วจะพบว่า ลักษณะข้อมูลป้อนเข้าจะมาจากหลากหลายเครื่องมือวัด ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่คือ

- ข้อมูลในลักษณะภาพคลื่น
- ข้อมูลในลักษณะเฟสเซอร์

ข้อมูลในลักษณะเฟสเซอร์สามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลใดๆ ส่วนข้อมูลในลักษณะภาพคลื่นจำเป็นต้องมีการประมวลผลให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์ ก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งเรียกว่าการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform : DFT) สมการต่อไปนี้เป็นสมการแปลงข้อมูลในลักษณะภาพคลื่นให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์ [25]

$$Re(S) = f_s \sum_{n=0}^{N-1} s \left(\frac{n}{Nf_0} \right) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \quad (3.1)$$

$$Im(S) = f_s \sum_{n=0}^{N-1} s \left(\frac{n}{Nf_0} \right) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right), \quad (3.2)$$

s คือ สัญญาณใดๆ, S คือ ค่า เฟสเซอร์ ของสัญญาณนั้นๆ, N คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดในหนึ่งภาพคลื่นที่ถูกเลือกมาแปลง, f_0 คือ ความถี่มูลฐาน 50 Hz และ f_s คือ ความถี่สุ่มข้อมูล

เมื่อได้ ปริมาณ เฟสเซอร์ ของแรงดันไฟฟ้า และ กระแส แล้ว ก็สามารถนำ ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในบทที่สองมาใช้งานเพื่อหาระยะลัดวงจรได้ต่อไป อย่างไรก็ตามข้อมูลที่นำมาแปลงเป็นเฟสเซอร์นั้นต้องอยู่ในช่วงเกิดการลัดวงจร ซึ่งจำเป็นจะต้องหาเวลาในการเกิดการลัดวงจรก่อน แล้วเลือกภาพคลื่นหลังเวลานั้นๆ หนึ่งลูกคลื่นเพื่อแปลงเป็นปริมาณเฟสเซอร์ ขั้นตอนการหาเวลาเริ่มการลัดวงจรสามารถหาได้หลายวิธี เช่นการ เปรียบเทียบค่าขนาดของ กระแสกับปริมาณร้อยละของขนาดกระแสสูงสุดก็จะได้เวลาในการเกิดการลัดวงจร หรืออาจจะทำการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องที่ละคาบเวลาตลอดความยาวข้อมูลที่วัด แล้วทำการเลือกที่ค่าขนาด กระแสสูงสุดก็เป็นได้

ข้อมูลที่ได้จากการวัดเมื่อแปลงให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์แล้วจะเป็นข้อมูลของเฟสที่มีการวัด ในหลายกรณีเราใช้องค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณดังนั้นสมการที่ (3.3) จะถูกใช้ในการ

แปลงข้อมูลเฟสให้อยู่ในภาพองค์ประกอบสมมาตร

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่ $a = 1\angle 120^\circ$ และ S เป็นสัญลักษณ์แทนปริมาณใดๆ

3.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ

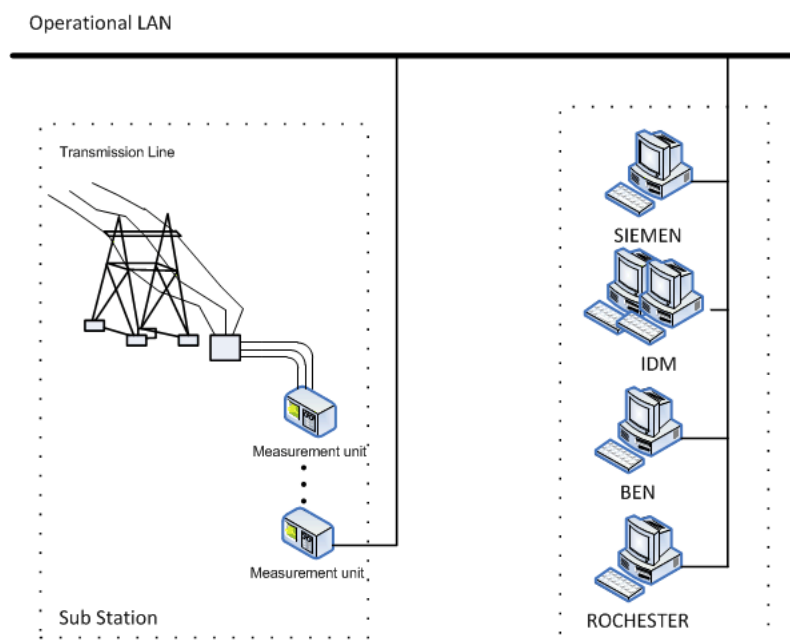
ในหัวข้อนี้จะแบ่งเป็นสองหัวข้อย่อยคือโครงสร้างและองค์ประกอบเชิงฮาร์ดแวร์ ซึ่งจะกล่าวถึงฮาร์ดแวร์ที่ใช้โดยทั่วไปและส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบอัตโนมัติได้ กับโครงสร้างและองค์ประกอบเชิงซอฟต์แวร์ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีในการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบอัตโนมัติ

3.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบเชิงฮาร์ดแวร์

ในระบบส่งไฟฟ้าจะมีเครื่องมือวัดจำนวนมาก การรวบรวมข้อมูลจำเป็นต้องอาศัยระบบสื่อสารข้อมูล และระบบจัดเก็บข้อมูลเพื่อ รอการวิเคราะห์หาความผิดปกติโดยวิศวกร หรือผู้ชำนาญการต่อไป ในเครื่องมือวัดสมัยใหม่ระบบสื่อสารจะใช้โครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะบริเวณ (LAN) ดังแสดงในภาพ 3.4 โดยทั่วไปเครื่องมือวัดของแต่ละผู้ผลิตจะมี โปรแกรมลงในคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ข่ายเพื่อใช้ในการติดต่อกับเครื่องมือวัด ดึงข้อมูลและจัดเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ รวมทั้งยังใช้ ในการวิเคราะห์ข้อมูลอีกด้วย

จะพบว่าในระบบไฟฟ้ามีอุปกรณ์เครื่องมือวัดของหลายผู้ผลิต การจัดเก็บข้อมูลของแต่ละผู้ผลิตจะไม่เหมือนกันดังนั้น จึงมีภาพแบบข้อมูลมาตรฐาน COMTRADE เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลจากเครื่องมือวัดในแต่ละประเภทและแต่ละผู้ผลิตได้ M. Kezunovic และคณะ ได้นำเสนอหลายบทความที่กล่าวถึงระบบรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลแบบอัตโนมัติในระบบไฟฟ้ามาตั้งแต่ ค.ศ. 1999 ถึง ค.ศ. 2010 [26],[27],[28] ในบทความจะกล่าวถึงการรวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ในสถานีไฟฟ้าเช่น Digital Protective Relay (DPR), Digital Fault Recorder (DFR), Phasor Measurement Unit (PMU), Circuit Breaker Manangement (CBM) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้สามารถเรียกรวมกันได้ในชื่อ Intelligent Electronic Device (IED)มาไว้ที่เครื่องแม่ข่ายกลาง และมีโปรแกรมประยุกต์ใช้ข้อมูลดังกล่าวเช่น Digital Protective Relay Analysis (DPRA), Digital Fault Recorder Analysis (DFRA) และ Circuit Breaker Recorder Analysis (CBRA) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามในการใช้ข้อมูลจากแหล่งๆ ต่างรวมกันก็จะมีปัญหาในด้านความเข้ากันได้ของข้อมูล เช่น ความเข้ากันได้เชิงเวลา (time synchronization) ความแม่นยำในการวัด (meter class) ความละเอียดของข้อมูล (Data Sampling frequency) รวมทั้งการตั้งค่าตัวคูณของเครื่องมือวัด คุณภาพของหม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดันที่ใช้ในเครื่องมือวัดและ อื่นๆ ดังนั้นในปี ค.ศ. 2007 A.P.Sakis Meliopoulos และคณะได้นำเสนอแนวคิดเรื่องการปรับ



รูปที่ 3.4: ภาพแสดงโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะบริเวณ(LAN)ที่ใช้ในการดึงข้อมูลจากเครื่องจัดเก็บข้อมูลในระบบทั่วทั้งไป

เทียบข้อมูล (Supercalibrator concept) [29],[30] โดยการนำข้อมูลที่วัดได้จากทุกจุด มาทำการประเมินค่าสถานะ (state estimation) เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลในแต่ละจุดที่วัด

ภาพที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติในระบบจะประกอบไปด้วย เครื่องมือวัดที่อยู่ตามสถานีไฟฟ้าต่าง คอมพิวเตอร์แม่ข่ายของแต่ละผู้ผลิตที่ใช้ในการดึงข้อมูลจากเครื่องมือวัด และทำหน้าที่แปลงข้อมูลให้อยู่ในมาตรฐาน COMTRADE เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่มีโปรแกรมประยุกต์ เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูล เครื่องบริการเว็บ ไฟร์วอลล์

ลักษณะ โครงสร้าง และ องค์ประกอบ เซิง ฮาร์ดแวร์ จะไม่ต่างกัน มากนัก ใน แต่ละ ระบบ ขึ้น อยู่ กับ งบประมาณ และ ความ ต้องการ ของ ผู้ดูแล โครงข่าย ไฟฟ้า นั้น ว่า ต้องการ ความ มี เสถียรภาพ ความปลอดภัยของ ข้อมูล ความปลอดภัยของการเข้าถึงข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่ง ค่าใช้จ่ายในการลงทุนก็จะเพิ่มตามความต้องการนั้นๆ

3.3.2 โครงสร้างและองค์ประกอบเซิงซอฟต์แวร์

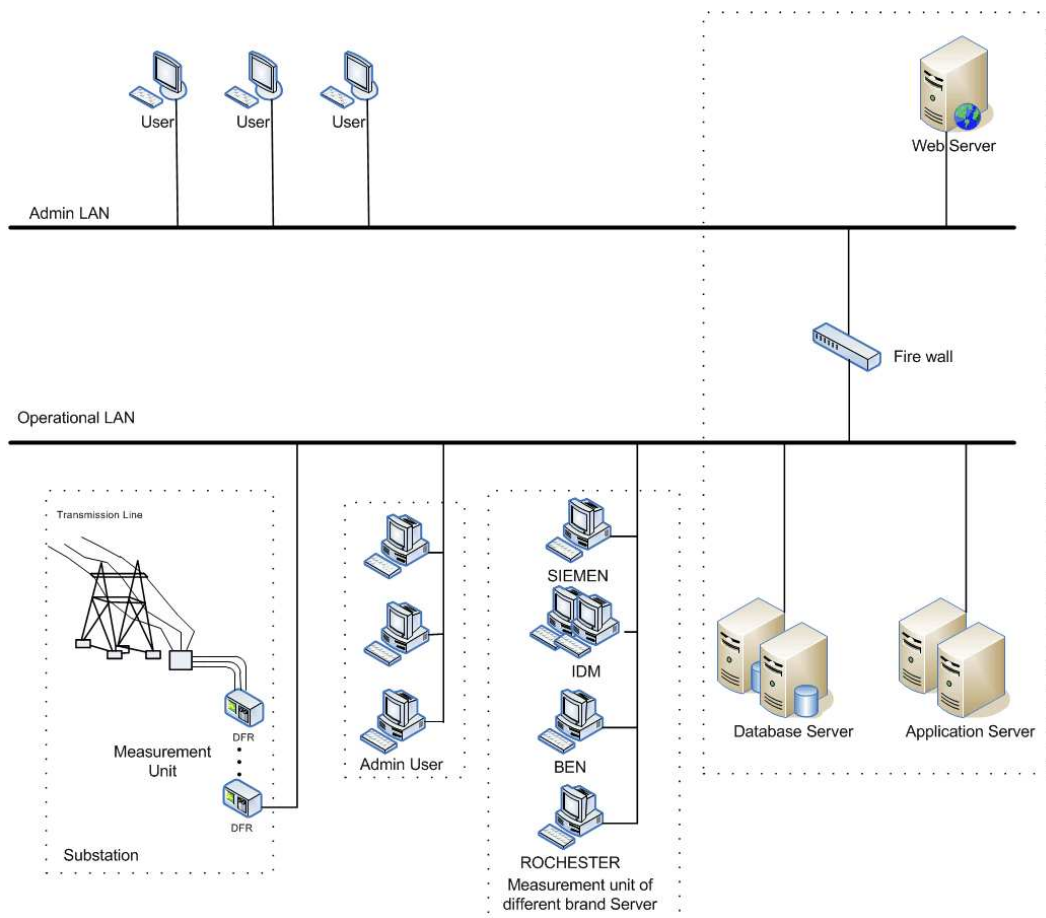
ขั้นตอนการทำงานของระบบโดยคร่าว

- คอมพิวเตอร์แม่ข่ายของแต่ละผู้ผลิตจะทำการเช็คข้อมูลที่เครื่องมือวัด เมื่อมีข้อมูลใหม่ จะทำการดึงข้อมูลมาจัดเก็บที่ตัวเครื่องแม่ข่าย

- โปรแกรมย่อยจะทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาพแบบมาตรฐาน COMTRADE

- โปรแกรมประยุกต์จะทำการตรวจสอบข้อมูลและแปลงให้อยู่ในมาตรฐาน XML

- โปรแกรมประยุกต์จะทำการบันทึกชื่อไฟล์ข้อมูล วัน เวลา ลงในฐานข้อมูล และทำการ

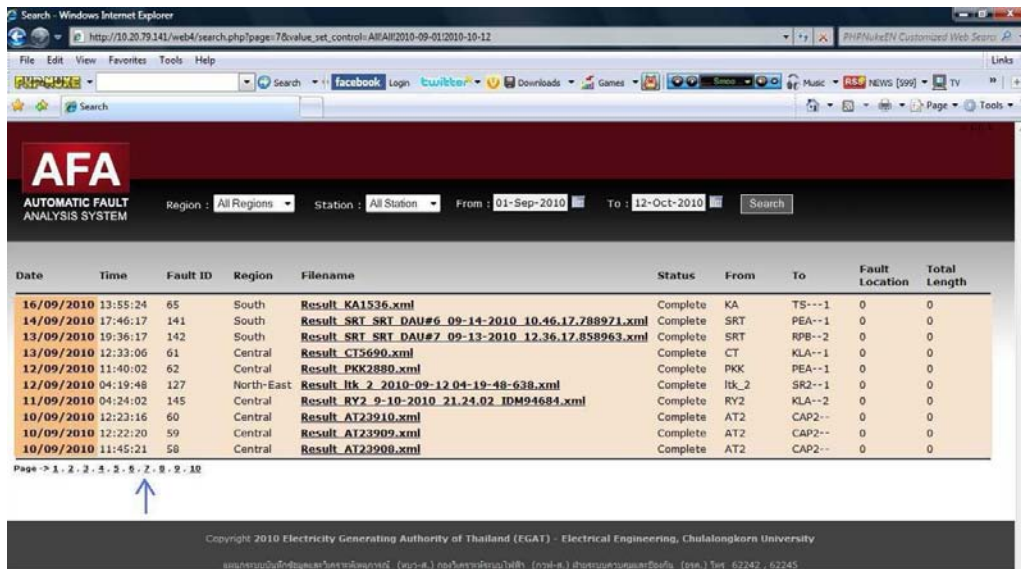


รูปที่ 3.5: ภาพแสดงโครงข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (Automatic Fault Analysis: AFA)

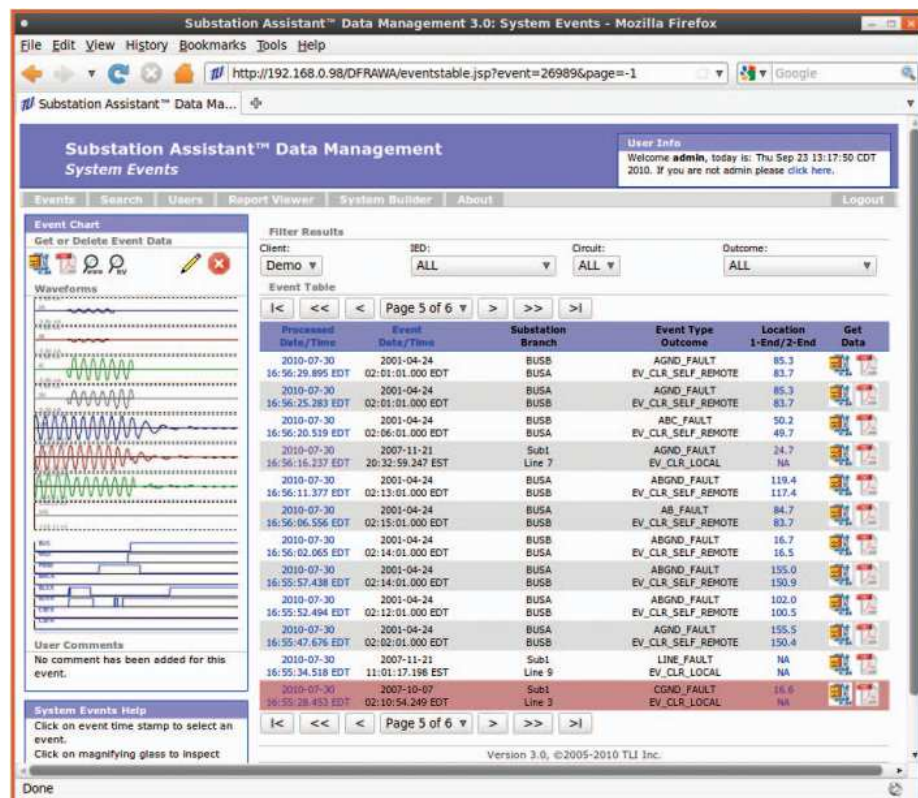
ย้ายข้อมูล XML ไปจัดเก็บที่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูล

- โปรแกรมประยุกต์ในคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Application sever) จะทำการนำข้อมูลใหม่มาทำการวิเคราะห์และเก็บผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ลงในคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูล
- เมื่อมีการเรียกดูข้อมูลผ่านเว็บ เครื่องบริการเว็บจะทำการค้นข้อมูลจากคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูลและนำข้อมูลรวมทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ขึ้นมานำเสนอ

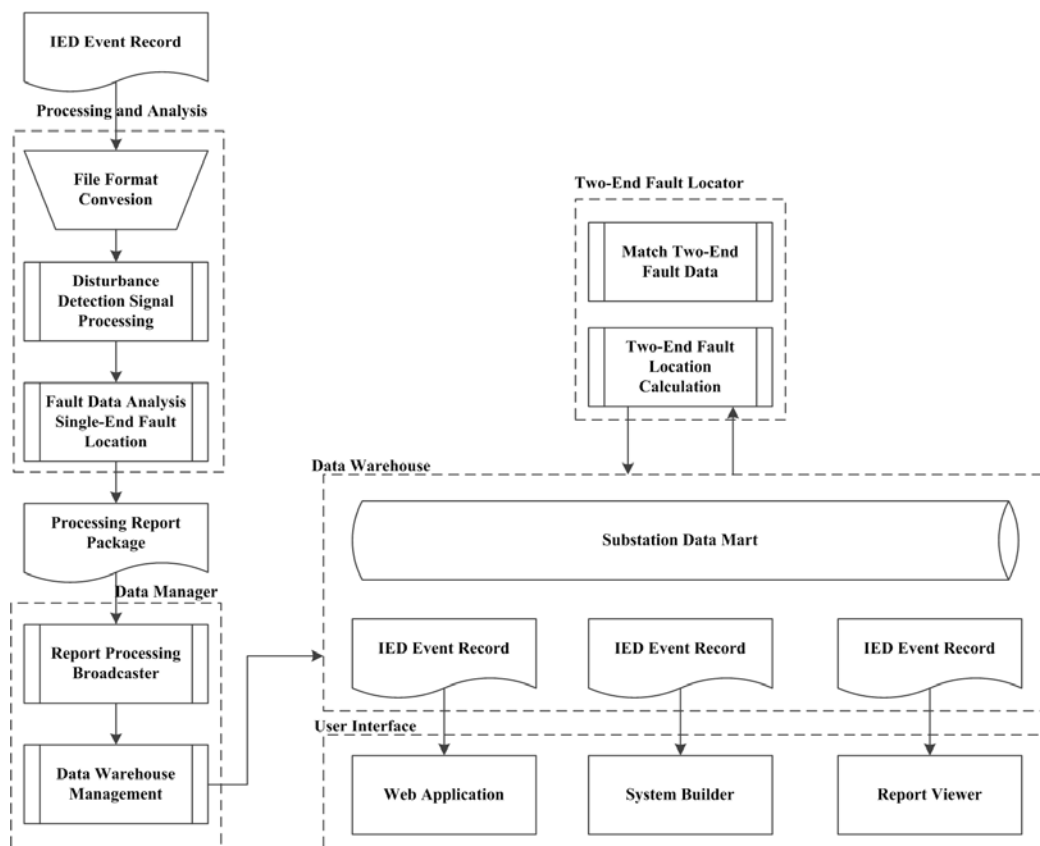
ภาพที่ 3.6 แสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูล ที่ค้นได้จากฐานข้อมูลกลางของระบบวิเคราะห์ความผิดปกติแบบอัตโนมัติ (AFA) (ที่มวิจัยจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พัฒนาให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต) จะบอกชื่อไฟล์ข้อมูลวันที่ และเวลาที่เกิดเหตุการณ์ สถานีไฟฟ้าที่ทำการบันทึกข้อมูล สามารถเข้าไปดูภาพคลื่นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถวิเคราะห์เหตุการณ์นำไปสู่การแก้ไขระบบได้อย่างถูกต้องต่อไป ภาพที่ 3.7 แสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูลในฐานข้อมูลในลักษณะเดียวกับที่ที่มวิจัยทำให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งพัฒนาโดย Kezunovic และคณะในชื่อ Substation Assistant Data Management ภายใต้บริษัท Test Laboratories International, Inc. www.tli-inc.com



รูปที่ 3.6: ภาพแสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูลที่ค้นได้จากคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูล [31]



รูปที่ 3.7: ภาพแสดงหน้าเว็บที่นำเสนอข้อมูลที่ค้นได้จากคอมพิวเตอร์แม่ข่ายฐานข้อมูลจากงานของ Kezunovic และคณะ [32]



รูปที่ 3.8: ภาพแสดงระบบโดยรวมของระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติจากงานของ Kezunovic และคณะ [32]

จากภาพที่ 3.8 จะพบว่าโครงสร้างในระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ ที่ Kezunovic และคณะนำเสนอแบ่งออกได้เป็นห้าส่วนหลักคือ

- ส่วนจัดการและวิเคราะห์ (Processing and Analysis)
- ส่วนจัดการข้อมูล (Data Manager)
- ส่วนจัดเก็บข้อมูล (Data Warehouse)
- ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface)
- การหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย (Two-End Fault Locator)

เมื่อมีข้อมูลเข้ามาในระบบ ข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน จากนั้นจะผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ความผิดปกติ ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจรแบบปลายเดียว จากนั้นเก็บข้อมูลให้อยู่ในภาพรายงานที่พร้อมใช้งาน ทำการจัดเก็บรายงานลงฐานข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถติดต่อกับฐานข้อมูลได้สามช่องทางหลักคือ ผ่าน web application ผ่าน Report Viewer หรือผ่านทาง System builder กระบวนการวิเคราะห์หาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายจะดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลทำการหาระยะลัดวงจร แล้วบันทึกกลับไปยังฐานข้อมูล

จะเห็นว่าระบบ ที่ทีมวิจัย พัฒนา ให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต มีความ คล้ายคลึง กับ งานที่ Kezunovic และคณะนำเสนอ ปัญหาหลักคือความหลากหลายของข้อมูล จะต้องถูกแปลง

ให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันที่สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ หัวใจของงานคือการจัดการข้อมูลให้อยู่ในสภาพที่จะใช้ประโยชน์ร่วมกันได้ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญหลายสาขาในการพัฒนาระบบ

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงระบบรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์แก้ปัญหาในระบบไฟฟ้า โดยแหล่งข้อมูลมาจากเครื่องมือวัดที่หลากหลาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาพมาตรฐาน และควรมีการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานฐานข้อมูลควรรองรับการเก็บข้อมูลที่หลากหลายเพื่อให้สามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำขึ้น และสามารถรันระยะเวลาของ ผู้ปฏิบัติการในการหาสาเหตุ นำไปสู่การแก้ไขระบบไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วและผิดพลาดน้อยลง

บทที่ 4

การเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบวิเคราะห์ความผิดปกติแบบอัตโนมัติ

ในบทนี้จะนำเสนอโครงสร้างระบบหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอหลักการในการเลือกระเบียบวิธีหาระยะลัดวงจรมาใช้ และได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการหาระยะลัดวงจร ทั้งแบบมีข้อมูลปลายเดียวโดยอาศัยบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z_{bus}) มาช่วยในการคำนวณ และแบบมีข้อมูลปลายเดียวกับข้อมูลแวลลุ่มอื่นเพิ่มเติม ซึ่งประยุกต์ระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสมมาใช้ในการหาระยะลัดวงจร แต่อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีนี้จะถือว่าข้อมูลมีความตรงกันเชิงเวลา (Time Synchronize) ส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปการนำเสนอในบทนี้

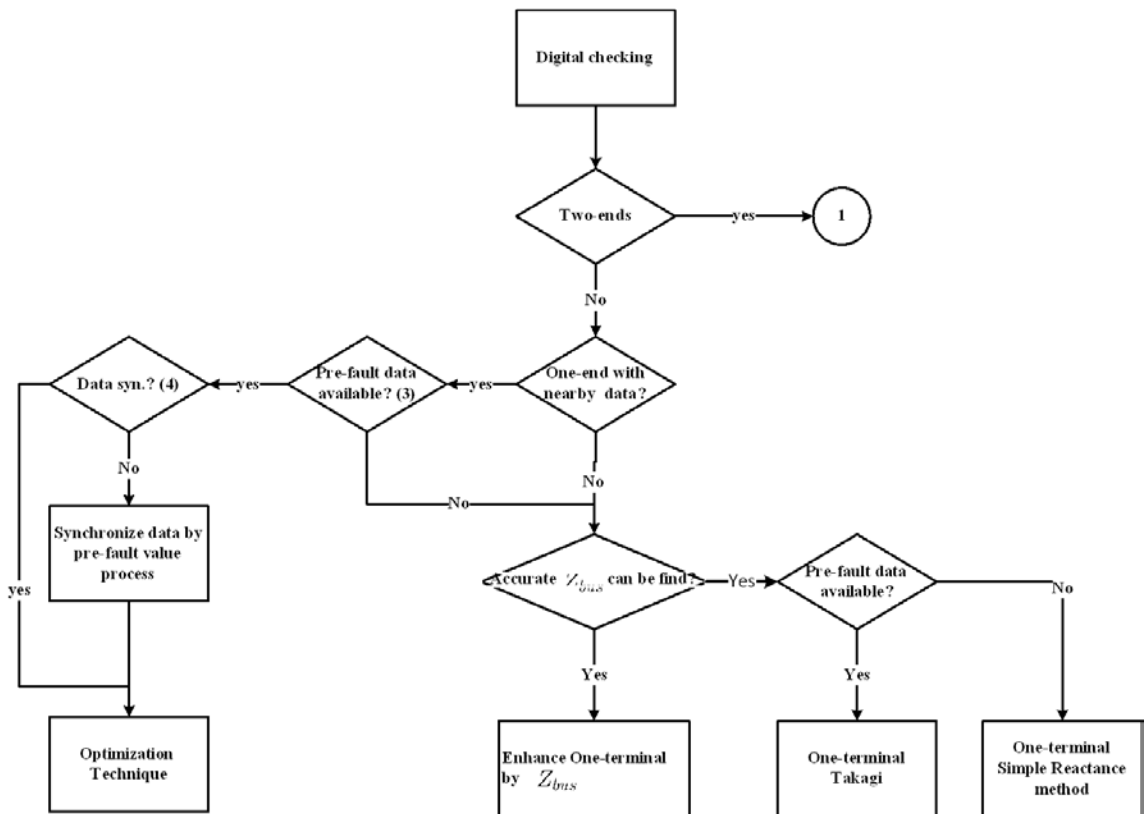
4.1 การเลือกขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่ง

ในการวิเคราะห์หาสาเหตุความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจะเริ่มจากข้อมูลดิบซึ่งได้รวบรวมไว้ในฐานข้อมูล ข้อมูลใหม่ที่ยังไม่ผ่านการวิเคราะห์จะมีตัวแปรบ่งชี้ (flag) อยู่ในฐานข้อมูล ข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มแยกตามวันเวลาที่บันทึกข้อมูล จากนั้นข้อมูลจะถูกวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธี "การวิเคราะห์อุปกรณ์ผิดปกติบนเครือข่ายระบบส่งไฟฟ้า โดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ" [24] ถ้าคำตอบจากระบบระบุว่าเป็นการผิดปกติบนสายส่ง หมายถึงมีการลัดวงจรบนสายส่ง ข้อมูลจะถูกส่งต่อมายังขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจร ซึ่งแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.3 และ 4.2 ระบบจะเริ่มด้วยการรับค่าจากขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์อุปกรณ์ผิดปกติบนเครือข่ายระบบส่งไฟฟ้า โดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ ค่าจะระบุชื่อต้นทางและปลายทางของสายส่งเพื่อค้นหาข้อมูลแรงดันและกระแสที่ถูกบันทึกไว้ในระบบฐานข้อมูล ขั้นตอนวิธีจะตรวจสอบว่ามีข้อมูลสองปลาย ปลายเดียว หรือหลายปลายเพื่อที่จะเลือกโปรแกรมการวิเคราะห์ย่อยต่อไป

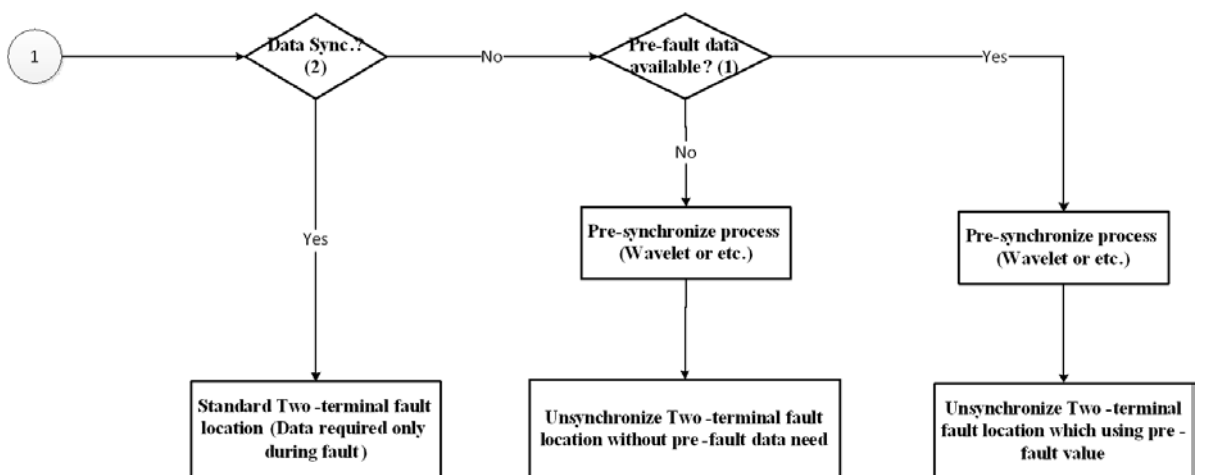
เพื่อให้สามารถเลือกขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการคำนวณหาระยะลัดวงจรผู้วิจัยเสนอระเบียบวิธีในการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้ข้อมูลช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรดังนี้

- การตรวจสอบการมีอยู่ของค่าช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร และสามารถใช้ได้ (Pre-fault data available?) (1) จะทำการเลือกภาพคลื่นและกระแสช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรมาแปลงเป็นค่าเฟสเซอร์ นำข้อมูลปลาย G มาหาขนาดแรงดันปลาย H $|V_{H,calc}^{\circ}|$ หากขนาดแรงดันปลาย H ที่คำนวณได้มีค่าต่างจาก แรงดันปลาย H ที่วัดได้ $|V_{H,mea}^{\circ}|$ ไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ $\xi_{v,mag}$ ถือว่าค่าช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรถูกวัดมาอย่างถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่อไปได้ ในการตรวจสอบควรทำทั้งกระแสและแรงดันของ องค์ประกอบเชิงลำดับศูนย์ องค์ประกอบเชิงลำดับบวก และ องค์ประกอบเชิงลำดับลบ ทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณในขั้นต่อไป จะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง

$$\|V_{H,calc}^{\circ} - V_{H,mea}^{\circ}\| < \xi_{v,mag} \quad (4.1)$$



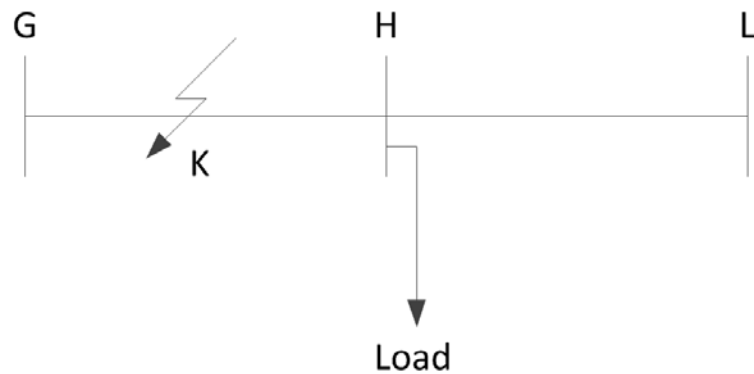
รูปที่ 4.1: ภาพแสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจร



รูปที่ 4.2: ภาพแสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาระยะลัดวงจรส่วนต่อ

$$\|I_{H,calc}^{\circ} - I_{H,mea}^{\circ}\| < \xi_{I,mag} \tag{4.2}$$

- การตรวจสอบการเท่ากันเชิงเวลาของข้อมูลสองปลาย (Data sync.? (2)) จะทำการ



รูปที่ 4.3: ภาพแสดงระบบอย่างง่าย

เลือกภาพคลื่นและกระแสช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรมาแปลง เป็นค่าเฟสเซอร์ นำข้อมูลปลาย G มาหามุมของแรงดันปลาย H $|arg(V_{H,calc.}^{\circ})|$ ถ้ามุมของแรงดันปลาย H ที่คำนวณได้ มีค่าต่างจาก แรงดันปลาย H ที่วัดได้ $|arg(V_{H,mea.}^{\circ})|$ ไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ $\xi_{v,angle}$ ถือว่าค่า ช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรวัดมาอย่างถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่อไปได้ ในการตรวจสอบควรทำทั้งกระแสและแรงดันของ องค์กรประกอบเชิงลำดับศูนย์ องค์กรประกอบเชิง ลำดับบวก และ องค์กรประกอบเชิงลำดับลบ ทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณในขั้นต่อไป จะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง

$$\|arg(V_{H,calc.}^{\circ}) - arg(V_{H,mea.}^{\circ})\| < \xi_{v,angle} \quad (4.3)$$

$$\|arg(I_{H,calc.}^{\circ}) - arg(I_{H,mea.}^{\circ})\| < \xi_{I,angle} \quad (4.4)$$

- การตรวจสอบการมีอยู่ของค่าช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร และสามารถใช้ได้ (Pre-fault data available? (3)) จะทำการเลือกภาพคลื่นและกระแสช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรมาแปลง เป็นค่าเฟสเซอร์ นำข้อมูลปลาย G มาหาขนาดแรงดันปลาย H $|V_{H,G,calc.}^{\circ}|$ นำข้อมูลปลาย L มาหาขนาดแรงดันปลาย H $|V_{H,L,calc.}^{\circ}|$ หากขนาดแรงดันที่คำนวณได้ทั้งสองค่ามีค่าต่างกัน ไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ $\xi_{v,mag}$ ถือว่าค่าช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรวัดมาอย่างถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่อไปได้ แรงดันของ องค์กรประกอบเชิงลำดับศูนย์ องค์กรประกอบเชิงลำดับ บวก และ องค์กรประกอบเชิงลำดับลบ ควรถูกตรวจสอบทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณใน ขั้นต่อไป จะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง

$$\|V_{H,G,calc.}^{\circ} - V_{H,L,calc.}^{\circ}\| < \xi_{v,mag} \quad (4.5)$$

- การตรวจสอบการเท่ากันเชิงเวลาของข้อมูลสองปลาย (Data sync? (4)) จะทำ การเลือกภาพคลื่นและกระแสช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรมาแปลง เป็นค่าเฟสเซอร์ นำข้อมูล ปลาย G มาหามุมของแรงดันปลาย H $|arg(V_{H,G,calc.}^{\circ})|$ นำข้อมูลปลาย L มาหามุมของ แรงดันปลาย H $|arg(V_{H,L,calc.}^{\circ})|$ ถ้ามุมของแรงดันปลาย H ที่คำนวณได้มีค่าต่างกัน ไม่

เกินค่าที่ตั้งไว้ $\xi_{v,angle}$ ถือว่าค่าช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรถูกวัดมาอย่างถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่อไปได้ ในการตรวจสอบควรทำทดสอบแรงดัน องค์กรประกอบเชิงลำดับศูนย์ องค์กรประกอบเชิงลำดับบวก และ องค์กรประกอบเชิงลำดับลบ ทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณในขั้นต่อไปจะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง

$$||\arg(V_{H,G,calc.}^\circ) - \arg(V_{H,L,mea.}^\circ)|| < \xi_{v,angle} \quad (4.6)$$

โปรแกรมการวิเคราะห์ย่อยมีดังต่อไปนี้

- การคำนวณแบบมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดซึ่ง อธิบายไว้ในบทที่สอง

- การชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยการปรับแก้มุมเฟสและวิธีแบบวนซ้ำซึ่ง ประยุกต์งานของ Balcerak และ คณะ [33] ที่ปรับปรุงโดย ยสวินทร์ บุรีทาน [34] [35]

- การชดเชยด้วยกระแสไหลตกก่อนเกิดความผิดพลาดซึ่ง อธิบายไว้ใน บทที่สอง

- การคำนวณด้วยองค์กรประกอบรีแอกแตนซ์อย่างง่ายซึ่ง อธิบายไว้ใน บทที่สอง

- การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวและองค์กรประกอบในบัสอิมพีแดนซ์เมตริก (Z_{bus} ซึ่งจะนำเสนอในส่วนถัดไป

- การคำนวณโดยใช้ข้อมูลหลายปลายด้วยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

อย่างไรก็ตาม การ ทดสอบ ที่ กล่าว มา ข้างต้น นั้น แปล ว่า เรา เชื่อ อย่าง แท้จริง ว่า ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งและแบบจำลองสายส่งที่ใช้ในสมการเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ณ อีกปลายหนึ่งถูกต้องเสมอ และจะพบว่า มุมชดเชยความเหลื่อมกันเชิงเวลา δ ก็คือ $|\arg(V_{H,G,calc.}^\circ) - \arg(V_{H,L,mea.}^\circ)|$ นั่นเอง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\delta = |\arg(V_{H,G,calc.}^\circ) - \arg(V_{H,L,mea.}^\circ)| \quad (4.7)$$

ดังนั้นหากพิจารณาการใช้สมการการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบมาตรฐานสองปลาย แล้วทำการชดเชยมุมด้วย δ จะได้

$$m = \frac{(V_G \angle \theta_{V_G} - V_H \angle (\theta_{V_H} + \delta)) + z_L \angle \theta_{z_L} I_H \angle (\theta_{I_H} + \delta)}{z_L \angle \theta_{z_L} (I_G \angle \theta_{I_G} + I_H \angle (\theta_{I_G} + \delta))} \quad (4.8)$$

หากมองในมุมกลับถ้าข้อมูลปลาย G และ H ได้มาจากเครื่องมือวัดประเภท PMU ซึ่งการันตีความถูกต้องของมุมที่วัดจากทั้งสองปลายและผลการทดสอบพบว่า δ มีค่ามาก ก็จะสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง หรือ แบบจำลองสายส่งผิดไปจากของจริง

4.2 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลปลายเดียวและองค์กรประกอบในบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z_{bus})

การหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วที่สุดเนื่องจากใช้ข้อมูลเพียงชุดเดียวที่สถานีไฟฟ้า ในขณะที่ การหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย หรือ หลายปลายจำเป็นต้องใช้ระบบสื่อสารเข้ามาช่วย และต้องคำนึงถึงความถูกต้องเข้ากันได้ของ

ข้อมูล คือข้อมูลทุกจุดมีความตรงกันเชิงเวลา หรือระเบียบวิธีต้องชดเชยความเลื่อมกันของเวลาให้

อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า การคำนวณตำแหน่งลัดวงจร แบบปลายเดียวมีข้อจำกัดอยู่มาก สูตรคำนวณขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจรหากการหาประเภทการลัดวงจรผิดพลาดก็จะทำให้การหาตำแหน่ง ลัดวงจรผิดพลาดไปโดยปริยายเนื่องจากการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวมีข้อมูลจำกัด ดังนั้น ระเบียบวิธีที่มีการนำเสนอในอดีตมักจะใช้ข้อมูลอื่นช่วยเช่น Takagi และคณะ ใช้ข้อมูลก่อนการเกิดลัดวงจรมาช่วยในการคำนวณ Eriksson และคณะ ใช้ อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย เข้ามาช่วยในการคำนวณ หรือ Zhen Yu นำแนวคิดเรื่องมุมของแรงดัน ณ จุดลัดวงจร กับมุมของกระแสลัดวงจรมีค่าเท่ากันมาช่วยเป็นต้น

การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวทั้งหมดในอดีตต้องอาศัยประเภทของการลัดวงจรมาช่วยเพื่อเลือกระเบียบวิธีในการคำนวณ ต่างกับกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายที่ไม่จำเป็นต้องรู้ประเภทของการลัดวงจร ก็สามารถหาตำแหน่งลัดวงจรได้ถูกต้องในระดับหนึ่ง เนื่องจากสมการแบบสองปลายมีจำนวนสมการเกินจำนวนตัวแปรในขณะที่สมการแบบปลายเดียวมีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการดังนั้นจึงต้องใช้ข้อสมมุติฐานต่าง ๆ มาตัดทอน เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง เช่นกรณีการคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอดแดนซ์อย่างง่าย จะทำการตัดแรงดันลัดวงจรออกจากสมการเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้

$$V_G = mz_L I_G + V_K \quad (4.9)$$

($V_K \approx 0$ หรือ $Im(\frac{I_K r_f}{I_G}) \approx 0$) ดังนั้นในกรณีลัดวงจรแบบอื่นๆ ค่าองค์ประกอบลำดับบวก (positive sequence) ของแรงดัน ณ จุดลัดวงจรจะรวมผลของแรงดันที่ไม่ได้ถูกลัดวงจรไปด้วยทำให้การอนุมานว่า ($V_K \approx 0$ หรือ $Im(\frac{I_K r_f}{I_G}) \approx 0$) ไม่เป็นจริงจึงต้องมีการเปลี่ยนสมการให้อยู่ในภาพของเฟสที่มีการลัดวงจรนั้นๆ ดังแสดงในบทที่สอง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกรณิการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบมีข้อมูลสองปลายแล้วจะพบว่า การใช้สองสมการสามารถตัดผลของ V_K ได้โดยปริยาย

$$V_G = mz_L I_G + V_K \quad (4.10)$$

$$V_H = (1 - m)z_L I_H + V_K \quad (4.11)$$

ดังนั้นเพียงสมการองค์ประกอบลำดับบวก หรือ องค์ประกอบลำดับลบ เพียงสมการเดียวสามารถหาตำแหน่งลัดวงจรได้ ยกเว้นกรณี องค์ประกอบลำดับศูนย์ ซึ่งจะพบว่าไม่สามารถใช้ได้กับประเภทการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมูลย์

ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอในต่อไปนี้จะใช้ Z_{bus} เข้ามาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจร ซึ่งตัวแปรไม่ทราบค่า ΔV_K จะถูกตัดทิ้งไปเหมือนกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายทำให้ ระเบียบวิธีที่เสนอจะไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของการลัดวงจร กล่าวคือทุกประเภทของการลัดวงจรใช้สูตรคำนวณชุดเดียวกัน และใช้เพียงค่าองค์ประกอบลำดับบวกในการคำนวณ อย่างไรก็ตามความถูกต้องของคำตอบจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของ Z_{bus} ที่นำมาใช้ในการคำนวณ

พิจารณาสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจร แรงดันตก และ สมาชิกใน Z_{bus}

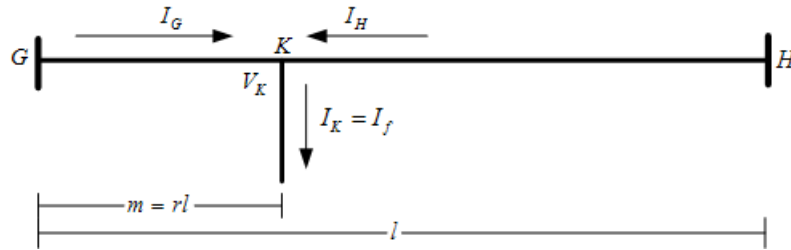
ณ จุดลัดวงจร

$$-I_f = \frac{\Delta V_K}{Z_{KK}} \quad (4.12)$$

จากนั้นพิจารณาสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ณ จุดวัด G และแรงดัน ณ จุดลัดวงจร K จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\Delta V_G = \frac{Z_{GK}}{Z_{KK}} \Delta V_K \quad (4.13)$$

สองสมการข้างต้นจะประกอบไปด้วยสมาชิกของ Z_{bus} ซึ่งโดยปกติไม่รู้ค่า Z_{KK} , Z_{GK} และ Z_{HK} ทั้งนี้เนื่องมาจาก เป็นสมาชิกใหม่ที่เกิดจากการเพิ่ม บัสลัดวงจรเข้าไปในระบบเดิม จากงานของ HAN [36] ในปี ค.ศ. 1982 จะพบว่าเราสามารถหาสมาชิกของ Z_{bus} ที่จุดใดๆ ก็ได้จากสมาชิก Z_{bus} เดิมที่มีอยู่ พิจารณาภาพที่ 4.4 ปลาย G มีเครื่องมือวัด ปลาย H ไม่มีเครื่องมือวัด จุด K เป็นจุดลัดวงจรที่ m กิโลเมตรห่างจากปลาย G ความยาวสายส่งเท่ากับ l กิโลเมตร และ r เป็นระยะลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยความยาวสายส่ง จะพบว่าเราสามารถประยุกต์สมการของ HAN เพื่อให้ได้สมาชิกของ Z_{bus} ที่สัมพันธ์กับจุดลัดวงจร K ซึ่งห่างเป็นระยะ r จากปลาย G ดังสมการที่ (4.14)



รูปที่ 4.4: Short-circuit on transmission lines

$$\begin{bmatrix} Z_{GK} \\ Z_{KK} \\ Z_{HK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-r & r & 0 \\ (1-r)^2 & 2r(1-r) & r^2 \\ 0 & (1-r) & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{GG} \\ Z_{GH} \\ Z_{HH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r(1-r) \\ 0 \end{bmatrix} Z_l \quad (4.14)$$

โดยที่ Z_l คือค่าพารามิเตอร์ของสายส่งทั้งความยาวสายส่ง เขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกที่จุดวัด G และจุดลัดวงจร K จะได้สมการที่ (4.15)

$$\Delta V_G = r Z_l \Delta I_G + \Delta V_K \quad (4.15)$$

แรงดันตก ณ ตำแหน่งที่มีเครื่องมือวัด G ΔV_G หาได้จากผลต่างของ แรงดันขณะเกิดการลัดวงจร V_G^F และแรงดันในสภาวะปกติ V_G°

$$\Delta V_G = V_G^F - V_G^\circ \quad (4.16)$$

กระแสลัดวงจรที่ป้อนจากปลาย G ΔI_G สามารถหาได้จากผลต่างของ กระแสขณะเกิดการลัดวงจร I_G^F และกระแสไหลตดในสภาวะปกติ I_G^o

$$\Delta I_G = I_G^F - I_G^o \quad (4.17)$$

แรงดันตก ณ จุดลัดวงจร ΔV_K คือ

$$\Delta V_K = V_K^F - V_K^o \quad (4.18)$$

จำกัดปริมาณไม่ทราบค่า ΔV_K โดยใช้สมการที่(4.13) กับสมการที่(4.15) จะได้

$$\frac{\Delta V_G}{\Delta I_G} = \frac{Z_{GK} \cdot r \cdot Z_l}{Z_{GK} - Z_{KK}} \quad (4.19)$$

จากสมการ(4.14) สามารถเขียนตัวแปรไม่ทราบค่า Z_{GK} และ Z_{KK} ในเทอมของตัวแปรที่ทราบค่า Z_{GG}, Z_{GH} และ Z_{HH} จากนั้นแทน ค่าตัวแปรลงในสมการ (4.19) ทำการแก้สมการ จะสามารถหาระยะลัดวงจร r ได้ตั้งสมการที่ (4.21)

$$r = \frac{\frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(Z_{GG} - Z_{GH} - Z_l) - Z_l Z_{GG}}{Z_l(Z_{GH} - Z_{GG}) - \frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(2Z_{GH} - Z_{GG} - Z_{HH} + Z_l)} \quad (4.20)$$

$$r = Re \left(\frac{\frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(Z_{GG} - Z_{GH} - Z_l) - Z_l Z_{GG}}{Z_l(Z_{GH} - Z_{GG}) - \frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(2Z_{GH} - Z_{GG} - Z_{HH} + Z_l)} \right) \quad (4.21)$$

$$o = Im \left(\frac{\frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(Z_{GG} - Z_{GH} - Z_l) - Z_l Z_{GG}}{Z_l(Z_{GH} - Z_{GG}) - \frac{\Delta V_G}{\Delta I_G}(2Z_{GH} - Z_{GG} - Z_{HH} + Z_l)} \right) \quad (4.22)$$

โดยความเป็นจริงแล้วผลลัพธ์ของสมการที่ (4.20) ควรเป็นค่าจริงอย่างไรก็ตามหากค่า o ในสมการที่ (4.22) มีค่ามากแสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณไม่เป็นจริง

4.3 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท

เป็นที่ทราบดีว่าการใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งปลายในการหาระยะลัดวงจรจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีหากข้อมูลที่วัดมาไม่ตรงกันเชิงเวลา ดังนั้นระเบียบวิธีที่นำเสนอนี้จะชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันเพื่อให้สามารถใช้ในการคำนวณแบบมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดได้ถูกต้อง

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

$$m = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{\tau} \right) \quad (4.23)$$

โดยที่ m คือระยะลัดวงจรห่างจากปลาย G T_1 คือเวลาที่ปลาย G เห็นองค์ประกอบความถี่สูงนับจากเวลาเกิดการลัดวงจร T_2 คือเวลาที่ปลาย H เห็นองค์ประกอบความถี่สูงนับจากเวลาเกิดการลัดวงจร τ คือความเร็วของคลื่นตลอด ความยาวสายส่ง

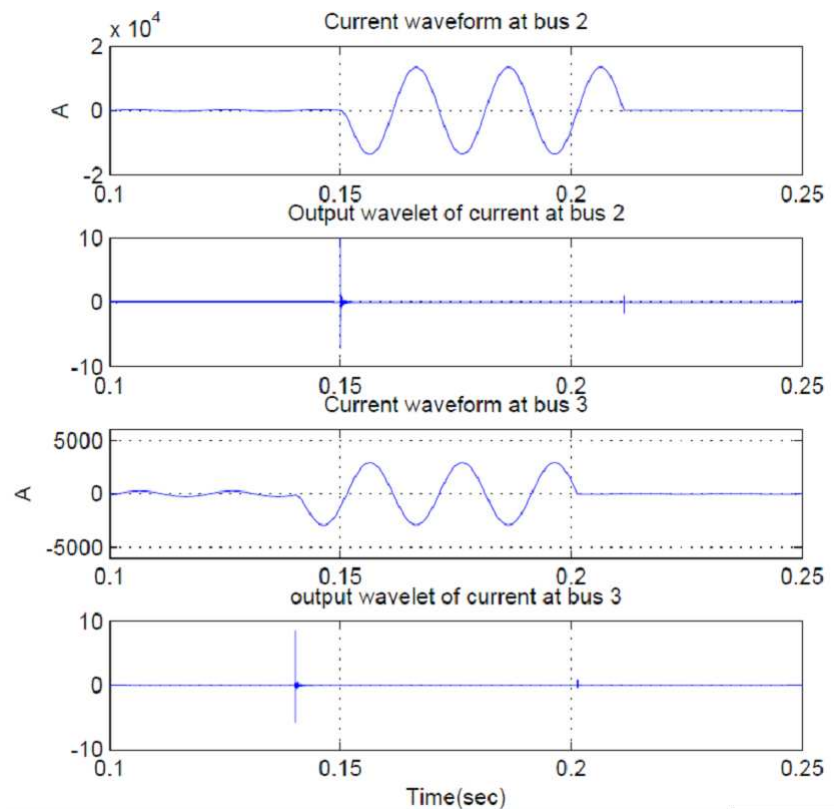
เมื่อพิจารณาสายส่งระยะสั้นจะพบว่า

$$T_2 - T_1 \approx 0 \quad (4.24)$$

ดังนั้นเวลาที่เห็นองค์ประกอบความถี่ลำดับสูงของทั้งจากปลาย G และ ปลาย H เป็นเวลาเดียวกันจึงสามารถใช้ในการชดเชยเวลาเพื่อให้สามารถคำนวณหาระยะลัดวงจรได้อย่างถูกต้อง เวฟเลทถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าองค์ประกอบความถี่สูงเพื่อเทียบกับค่าเปรียบเทียบ แล้วทำการเลื่อนข้อมูลสู่สมให้เท่ากันจากนั้นจึงนำไปเลือกรูปคลื่นเพื่อหาค่าเฟสเซอร์และนำมาคำนวณต่อไป

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi \left(\frac{n - k2^m}{2^m} \right) \quad (4.25)$$

โดยที่ $f(k)$ เป็นข้อมูลป้อน ψ เป็นเวฟเลทแม่ซึ่งใช้ตามสูตรที่ 4 (Daubechies 4)



รูปที่ 4.5: ภาพคลื่นกระแส และภาพคลื่นค่าพลังงานหลังผ่านการทำเวฟเลททรานฟอร์ม แล้วรีคอนสตรัคกลับมาเป็นภาพคลื่นองค์ประกอบความถี่สูง

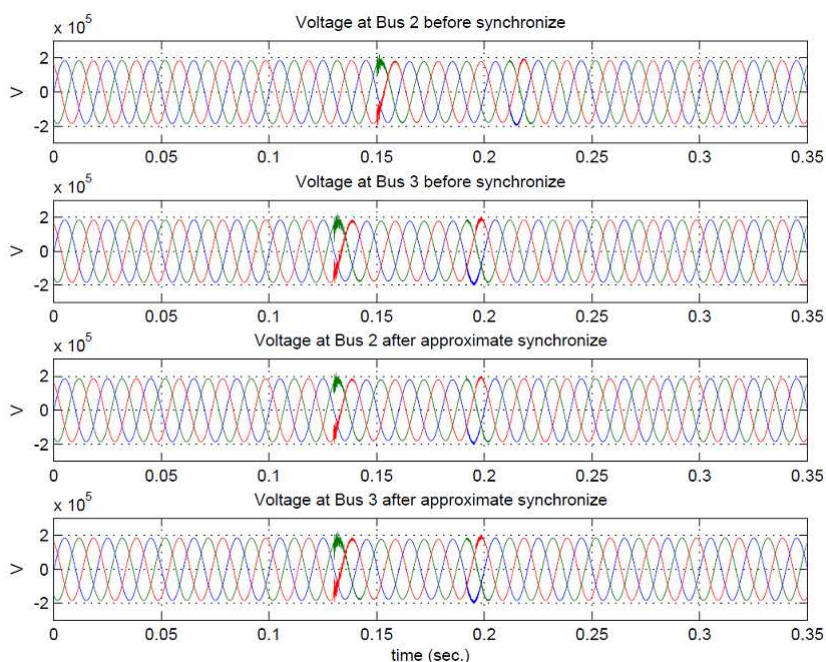


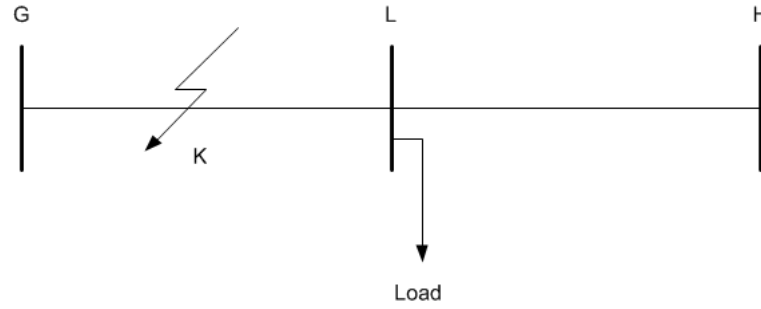
Fig. 3: Voltage waveforms before and after synchronize data.

รูปที่ 4.6: ภาพคลื่นแรงดันก่อนและหลังชดเชยเวลา

4.4 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลหลายปลายด้วยการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด

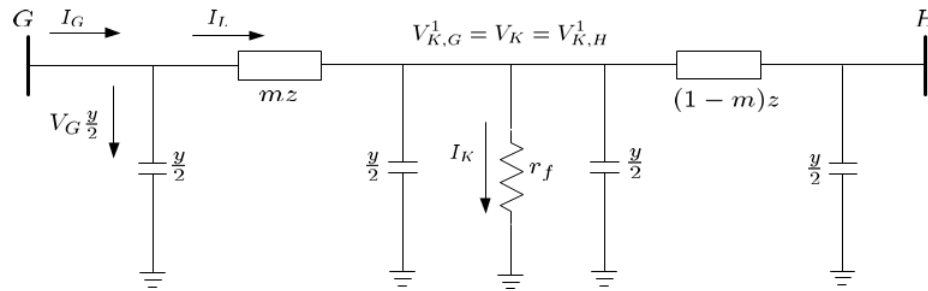
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลที่มีการวัดเพียงหนึ่งปลายของสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจร และใช้ข้อมูลที่บันทึกไว้ที่สถานีไฟฟ้าที่อยู่ห่างออกไปจากสายส่งเส้นที่เกิดลัดวงจรมาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจร แนวคิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเป็นจริงที่ว่าในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการวัดจัดเก็บข้อมูลหลายจุดหลายสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในเวลาเกิดการลัดวงจรจะมีข้อมูลแวดล้อมจำนวนมาก หากมีการวัดข้อมูลสองปลายก็สามารถนำระเบียบวิธีแบบสองปลายมาใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีในหลายกรณีที่มีข้อมูลเพียงปลายเดียวและมีข้อมูล ณ สถานีไฟฟ้าที่ห่างออกไปจากสายส่งเส้นที่ลัดวงจร ดังนั้นจึงน่าสนใจหากจะสามารถนำข้อมูลแวดล้อมอื่นมาช่วยในการคำนวณเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากขึ้นกว่า กรณีที่ใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียวมาทำการคำนวณ

พิจารณาโครงสร้างอย่างง่ายในภาพที่ 4.7 หากเรามีข้อมูลวัดที่จุด G และจุด H จะพบว่าเราไม่สามารถใช้การคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายได้ แต่จากจุดวัด H เราสามารถคำนวณหาแรงดันที่จุด L ได้อย่างไรก็ตามกระแสป้อนจุดลัดวงจร K จากปลาย L ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากว่าขึ้นอยู่กับโหลดที่บัส L ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้จะใช้ข้อมูลเพียงปลายเดียว กับข้อมูลแรงดันของอีกปลายของสายส่ง ซึ่งได้มาจากการคำนวณจากจุดวัดอื่นที่มีข้อมูล



รูปที่ 4.7: โครงสร้างอย่างง่าย

4.4.1 กรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

รูปที่ 4.8: วงจรอย่างง่ายแบบ โครงสร้างแบบ π

สมการแรงดัน ณ ตำแหน่งเกิดการลัดวงจรสามารถเขียนให้อยู่ในภาพตัวแปรที่วัดได้ดังต่อไปนี้

$$V_{K,G}^1 = (1 + r^2 Z^1 \frac{Y^1}{2}) V_G^1 - r Z^1 I_G^1 \quad (4.26)$$

$V_{K,G}^1$ คือแรงดัน ณ จุดลัดวงจรที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ปลาย G , r คือระยะลัดวงจรต่อความยาวสายส่ง, Z^1 คือ positive อิมพีแดนซ์ของสายส่ง, Y^1 คือแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง, V_G^1 แรงดัน positive ที่บัส G และ I_G^1 กระแส positive ที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส G

$$V_{K,H}^1 = (1 + (1-r)^2 Z^1 \frac{Y^1}{2}) V_H^1 - (1-r) Z^1 I_H^1 \quad (4.27)$$

สมการ(4.27) คือแรงดัน ณ จุดลัดวงจรที่คำนวณมาจากข้อมูลปลาย H โดยที่ V_H^1 คือ แรงดัน positive ที่บัส H และ I_H^1 คือกระแส positive ที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H

Zhen Yu Zu และคณะ [8] เสนอแนวคิดที่ว่ามุมของแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจร และมุมของกระแสลัดวงจรมีค่าเท่ากันเนื่องจาก อิมพีแดนซ์ลัดวงจรเป็น ความต้านทานเพียงอย่างเดียวจึงได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Arg}(V_K) = \text{Arg}(I_K) \quad (4.28)$$

โดยที่ $Arg(\cdot)$ คือค่ามุมของตัวแปรนั้นๆ, V_K คือแรงดันที่แท้จริงที่จุดลัดวงจร และ I_K คือกระแสที่ลัดวงจรที่แท้จริง

กระแสลัดวงจรเกิดจากกระแสป้อนจากบัส G รวมกับ กระแสป้อนจากบัส H เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_K^1 = I_{K,G}^1 + I_{K,H}^1 \quad (4.29)$$

โดยที่ $I_{K,G}^1$ คือ กระแส positive จากปลาย G และ $I_{K,H}^1$ คือกระแส positive จากปลาย H ซึ่งหาได้จาก

$$I_{K,G}^1 = r(-Y^1 - \frac{1}{4}Z^1(Y^1)^2)V_G^1 + r(1 + \frac{1}{2}Z^1Y^1)I_G^1 \quad (4.30)$$

$$I_{K,H}^1 = (1-r)(-Y^1 - \frac{1}{4}Z^1(Y^1)^2)V_H^1 + (1-r)(1 + \frac{1}{2}Z^1Y^1)I_H^1 \quad (4.31)$$

จะพบว่าหาก Y^1 มีค่าน้อยมากเราจะประมาณ I_K^1 ได้ดังนี้

$$I_K^1 \approx I_G^1 + I_H^1 \quad (4.32)$$

จากสมการ (4.28) จะได้

$$\frac{Im(V_{K,G}^1)}{Re(V_{K,G}^1)} = \frac{Im(I_K^1)}{Re(I_K^1)} \quad (4.33)$$

ปรับปรุงสมการ (4.33) เพื่อใช้เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์

$$h_1 = Im(V_{K,G}^1) \cdot Re(I_K^1) - Im(I_K^1) \cdot Re(V_{K,G}^1) \quad (4.34)$$

จากสมการแรงดันที่หาจากทั้งสองปลายสามารถเขียนฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$h_2 = Re(V_{K,G}^1 - V_{K,H}^1) \quad (4.35)$$

$$h_3 = Im(V_{K,G}^1 - V_{K,H}^1) \quad (4.36)$$

ซึ่ง V_H^1 ในสมการ (4.27)สามารถหาได้จากข้อมูลปลาย L ที่ทำการวัด

$$V_H^1 = Z_{LH}^1 \frac{Y_{LH}^1}{2} V_L^1 - Z_{LH}^1 I_{LH}^1 \quad (4.37)$$

โดยที่ Z_{LH}^1, Y_{LH}^1 คือพารามิเตอร์ของสายส่ง LH ซึ่งทำการวัดแรงดัน V_L^1 ที่บัส L และกระแสป้อนจากบัส L มายังบัส H I_{LH}^1

จะพบว่าสมการฟังก์ชันจุดประสงค์มีตัวแปรไม่ทราบค่า สามตัวคือ ระยะเวลาลัดวงจร r , มุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^1}$ และขนาดของกระแส I_H^1 ซึ่งต่อไปนี้จะเขียนอยู่ในภาพ เมตริกตัวแปรเสตทดังนี้

$$x^T = \left[r \quad \theta_{I_H^1} \quad |I_H^1| \right] \quad (4.38)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ

$$J(x) = \left(\sum_{i=1}^3 (h_i(x))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.39)$$

และมีฟังก์ชันข้อจำกัดคือ

$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad (4.40)$$

ใช้ระเบียบวิธี sequential quadratic programming (SQP) เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จะได้คำตอบ ระยะลัดวงจร m , มุมของกระแสก่อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^1}$ และ ขนาดของกระแสก่อนจุดลัดวงจรจากบัส H $|I_H^1|$ โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นดังนี้

$$x^{oT} = \left[0.5 \quad \theta_{I_G^1} \quad |I_G^1| \right] \quad (4.41)$$

x^{oT} คือเมตริกซ์ของค่าเริ่มต้นที่ใช้ในระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสม

4.4.2 กรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน

ในกรณีการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน ไม่สามารถใช้ปริมาณ องค์ประกอบลำดับบวก มาใช้ได้เนื่องจากสมการ (4.28) จะไม่เป็นจริง อย่างไรก็ตามหากพิจารณา มุมของแรงดัน ณ จุดลัดวงจร ในเฟสที่มีการลัดวงจร และมุมของกระแสลัดวงจรในเฟสนั้นๆ สมการยังเป็นจริง ซึ่งคือ

$$\text{Arg}(V_K^\psi) = \text{Arg}(I_K^\psi) \quad (4.42)$$

ψ แสดงเฟสที่ลัดวงจร ดังนั้นการคำนวณหาแรงดันที่จุดเกิดการลัดวงจรจากทั้งสองปลาย ต้องเป็นปริมาณในเฟสนั้นๆ ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_K^{ABC} = Z_O^{ABC} V_G^{ABC} + Z_P^{ABC} I_G^{ABC} \quad (4.43)$$

$$Z_O^{abc} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_s y}{2} & \frac{Z_m y}{2} & \frac{Z_m y}{2} \\ \frac{Z_m y}{2} & 1 + \frac{Z_s y}{2} & \frac{Z_m y}{2} \\ \frac{Z_m y}{2} & \frac{Z_m y}{2} & 1 + \frac{Z_s y}{2} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$$Z_P^{abc} = \begin{bmatrix} -Z_s & -Z_m & -Z_m \\ -Z_m & -Z_s & -Z_m \\ -Z_m & -Z_m & -Z_s \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

กรณี เฟส A ลงดินจะพบว่าสมการแรงดัน ณ จุดวัดปลาย G คือ

$$V_{K,G}^A = V_G^A + Z_s \frac{Y}{2} V_G^A + Z_m \frac{Y}{2} V_G^B + Z_m \frac{Y}{2} V_G^C - Z_l I_G^A - Z_m I_G^A - Z_m I_G^B - Z_m I_G^C \quad (4.46)$$

ดังนั้นสมการ(4.46)สามารถเขียนให้อยู่ในภาพของ positive และ zero อิมพีแดนซ์ได้ดังนี้ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ Z_1 และ Z_0 ได้ดังนี้

$$V_{K,G}^A = V_G^A + r^2 Z_1 \frac{Y}{2} \left(V_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_G^R \right) - r Z_1 \left(I_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_G^R \right) \quad (4.47)$$

และสามารถหาแรงดัน ณ จุดลัดวงจรจากข้อมูลปลาย H ได้ซึ่งคือ

$$V_{K,H}^A = V_H^A + (1-r)^2 Z_1 \frac{Y}{2} \left(V_H^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_H^R \right) - r Z_1 \left(I_H^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_H^R \right) \quad (4.48)$$

เนื่องจากการลัดวงจรเป็นการลัดวงจรแบบ เฟส A ลงดินดังนั้นกระแสไหลจากบัส H ในเฟส B และเฟส C สามารถหาได้จากแรงดันและกระแสจากบัส G ในเฟสนั้นๆ ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$I_H^B = -Y \left(1 + \frac{Z_l Y}{4} \right) V_G^B + \left(1 + \frac{Z_l Y}{4} \right) I_G^B \quad (4.49)$$

$$I_H^C = -Y \left(1 + \frac{Z_l Y}{4} \right) V_G^C + \left(1 + \frac{Z_l Y}{4} \right) I_G^C \quad (4.50)$$

โดยที่ V_G^R, I_G^R, V_H^R และ I_H^R หาได้จาก

$$V_G^R = V_G^A + V_G^B + V_G^C \quad (4.51)$$

$$I_G^R = I_G^A + I_G^B + I_G^C \quad (4.52)$$

$$V_H^R = V_H^A + V_H^B + V_H^C \quad (4.53)$$

$$I_H^R = I_H^A + I_H^B + I_H^C \quad (4.54)$$

ดังนั้นจากสมการ (4.47-4.54) เราสามารถหาฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$h_1 = \text{Im}(V_{K,G}^A) \cdot \text{Re}(I_K^A) - \text{Im}(I_K^A) \cdot \text{Re}(V_{K,G}^A) \quad (4.55)$$

ในกรณีที่ Y^1 มีค่าต่ำเราสามารถประมาณค่า I_K^A ได้ดังนี้

$$I_K^A \approx I_G^A + I_H^A \quad (4.56)$$

จากสมการแรงดันที่หาจากทั้งสองปลายสามารถเขียนฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$h_2 = \text{Re}(V_{K,G}^A - V_{K,H}^A) \quad (4.57)$$

$$h_3 = \text{Im}(V_{K,G}^A - V_{K,H}^A) \quad (4.58)$$

โดยที่ V_H^A, V_H^B และ V_H^C หาได้จากข้อมูลปลายอื่นที่มีการวัด ตัวแปรเสตทยังคงมีสามค่า คือ ระยะเวลาลัดวงจร r , มุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^A}$ และขนาดของกระแส I_H^A ซึ่งเขียนอยู่ในภาพ เมตริกตัวแปรเสตทได้ดังนี้

$$x^T = \left[r \quad \theta_{I_H^A} \quad |I_H^A| \right] \quad (4.59)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ

$$J(x) = \left(\sum_{i=1}^3 (h_i(x))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.60)$$

และมีฟังก์ชันข้อจำกัดคือ

$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad (4.61)$$

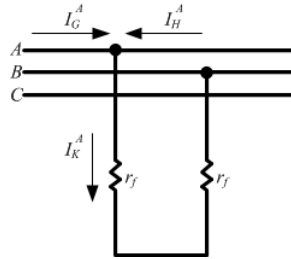
ใช้ระเบียบวิธี sequential quadratic programming (SQP) เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จะได้คำตอบ ระยะลัดวงจร r มุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^A}$ และ ขนาดของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $|I_H^A|$ โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นดังนี้

$$x^{oT} = \left[0.5 \quad \theta_{I_G^A} \quad |I_G^A| \right] \quad (4.62)$$

x^{oT} คือเมตริกซ์ของค่าเริ่มต้นที่ใช้ในระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสม

ในกรณี เฟส B ลงดิน และเฟส C ลงดินก็มีลักษณะการแก้ปัญหาเหมือนกัน เพียงแต่คิดให้อยู่ในค่าของเฟสที่ลัดวงจรนั้นๆ

4.4.3 กรณีลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส



รูปที่ 4.9: วงจรแสดงการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส

ในกรณีการลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส สมการจะมีความยุ่งยากน้อยกว่าแบบเฟสเดียวลงดิน ซึ่งจะเห็นได้ดังสมการที่จะทำการพิสูจน์ต่อไปนี้

กรณีการลัดวงจรแบบ AB ให้เขียนสมการเฟส A และ สมการเฟส B

$$V_{K,G}^A = V_G^A + r^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_G^R \right) - r Z^1 \left(I_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_G^R \right) \quad (4.63)$$

$$V_{K,G}^B = V_G^B + r^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_G^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_G^R \right) - r Z^1 \left(I_G^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_G^R \right) \quad (4.64)$$

นำสมการ (4.63) ลบออกจากสมการ (4.64) จะได้

$$V_{K,G}^{AB} = V_G^{AB} + r^2 Z^1 \frac{Y}{2} (V_G^{AB}) - r Z^1 I_G^{AB} \quad (4.65)$$

โดยที่

$$V_G^{AB} = V_G^A - V_G^B \quad (4.66)$$

และ

$$I_G^{AB} = I_G^A - I_G^B \quad (4.67)$$

ดังนั้นหากพิจารณาจากบัส H ก็จะได้สมการแรงดันที่จุดลัดวงจร K เท่ากับ

$$V_{K,H}^{AB} = V_H^{AB} + (1-r)^2 Z^1 \frac{Y}{2} (V_H^{AB}) - (1-r) Z^1 I_H^{AB} \quad (4.68)$$

ในกรณีนี้จะพบว่า มุมของแรงดัน V_{AB} จะเท่ากับมุมของกระแส $I_G^A + I_H^A$ และ เนื่องจากเป็นการลัดวงจรแบบเฟส AB ดังนั้นจะพบว่า

$$I_G^A + I_H^A = -(I_G^B + I_H^B) \quad (4.69)$$

จัดสมการ(4.69)ใหม่ให้อยู่ในภาพ I_H^B จะได้

$$I_H^B = -(I_G^A + I_G^B + I_H^A) \quad (4.70)$$

ซึ่งจะพบว่า

$$I_H^{AB} = I_H^A - (I_G^A + I_G^B + I_H^A) = 2I_H^A - (I_G^A + I_G^B) \quad (4.71)$$

เป็นที่ทราบว่ มุมของ V_{AB} เท่ากับมุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจร I_K^A ซึ่งประมาณค่าได้

$$I_K^A \approx I_G^A + I_H^A \quad (4.72)$$

เราสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$h_1 = \text{Im}(V_{K,G}^{AB}) \cdot \text{Re}(I_K^A) - \text{Im}(I_K^A) \cdot \text{Re}(V_{K,G}^A) \quad (4.73)$$

$$h_2 = \text{Re}(V_{K,G}^{AB} - V_{K,H}^{AB}) \quad (4.74)$$

$$h_3 = \text{Im}(V_{K,G}^{AB} - V_{K,H}^{AB}) \quad (4.75)$$

โดยที่ V_H^A, V_H^B และ V_H^C หาได้จากข้อมูลปลายอื่นที่มีการวัด ตัวแปรเสตที่ยังคงมีสามค่า คือ ระยะเวลาลัดวงจร r , มุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^A}$ และขนาดของกระแส I_H^A ซึ่งเขียนอยู่ในภาพ เมตริกตัวแปรเสตได้ดังนี้

$$x^T = \left[r \quad \theta_{I_H^A} \quad |I_H^A| \right] \quad (4.76)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ

$$J(x) = \left(\sum_{i=1}^3 (h_i(x))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.77)$$

และมีฟังก์ชันข้อจำกัดคือ

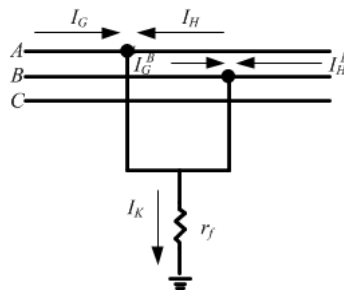
$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad (4.78)$$

ใช้ระเบียบวิธี sequential quadratic programming (SQP) เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จะได้คำตอบ ระยะลัดวงจร r , มุมของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $\theta_{I_H^A}$ และ ขนาดของกระแสป้อนจุดลัดวงจรจากบัส H $|I_H^A|$ โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นดังนี้

$$x^{oT} = \left[0.5 \quad \theta_{I_G^A} \quad |I_G^A| \right] \quad (4.79)$$

x^{oT} คือเมตริกซ์ของค่าเริ่มต้นที่ใช้ในระเบียบวิธีหาค่าเหมาะสม ในกรณี ลัดวงจรแบบ BC และแบบ CA สามารถแก้ปัญหาได้ในลักษณะเดียวกัน

4.4.4 กรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน



รูปที่ 4.10: กรณีการลัดวงจรแบบ ABG

ในกรณีการลัดวงจรแบบ ABG นั้นจะพบว่ากระแสป้อนจุดลัดวงจร I_K นั้นเป็นผลรวมของกระแสจากสองบัสลงดินกล่าวคือ

$$I_K \approx I_G^A + I_H^A + I_G^B + I_H^B \quad (4.80)$$

ดังนั้นในกรณีนี้ตัวแปรไม่ทราบค่าจะมี 5 ตัวคือ r ระยะลัดวงจร, $\theta_{I_H^A}$ มุมของกระแสป้อนจากบัส H เฟส A , $|I_H^A|$ ขนาดของกระแสป้อนจากบัส H เฟส A , $\theta_{I_H^B}$ มุมของกระแสป้อนจากบัส H เฟส B , $|I_H^B|$ ขนาดของกระแสป้อนจากบัส H เฟส B แสดงเป็นเมตริกส์ได้ดังนี้

$$x^T = \left[r \quad \theta_{I_H^A} \quad |I_H^A| \quad \theta_{I_H^B} \quad |I_H^B| \right] \quad (4.81)$$

อย่างไรก็ตามจะพบว่าสามารถตั้งสมการได้มากกว่าจำนวนตัวแปรเนื่องจาก ณ จุดเกิดการลัดวงจรมีเพียงแรงดันเดียว V_K ซึ่งสามารถหาได้จาก ทั้งแรงดันและกระแสของเฟส A และเฟส B ทำให้มีสมการ complex เท่ากันถึง 4 สมการ คือ แรงดัน $V_{K,G}^A, V_{K,G}^B, V_{K,H}^A$ และ $V_{K,H}^B$

$$V_{K,G}^A = V_G^A + r^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_G^R \right) - r Z^1 \left(I_G^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_G^R \right) \quad (4.82)$$

$$V_{K,G}^B = V_G^B + r^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_G^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_G^R \right) - r Z^1 \left(I_G^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_G^R \right) \quad (4.83)$$

$$V_{K,H}^A = V_H^A + (1-r)^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_H^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_H^R \right) - (1-r) Z^1 \left(I_H^A + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_H^R \right) \quad (4.84)$$

$$V_{K,H}^B = V_H^B + (1-r)^2 Z^1 \frac{Y}{2} \left(V_H^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} V_H^R \right) - (1-r) Z^1 \left(I_H^B + \frac{Z^0 - Z^1}{3Z^1} I_H^R \right) \quad (4.85)$$

ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$h_1 = Im(V_{K,G}^A) Re(I_K) - Re(V_{K,G}^A) Im(I_K) \quad (4.86)$$

$$h_2 = Re(V_{K,G}^A - V_{K,H}^A) \quad (4.87)$$

$$h_3 = Im(V_{K,G}^A - V_{K,H}^A) \quad (4.88)$$

$$h_4 = Re(V_{K,G}^B - V_{K,H}^B) \quad (4.89)$$

$$h_5 = Im(V_{K,G}^B - V_{K,H}^B) \quad (4.90)$$

$$h_6 = Re(V_{K,G}^A - V_{K,H}^B) \quad (4.91)$$

$$h_7 = Im(V_{K,G}^A - V_{K,H}^B) \quad (4.92)$$

$$h_8 = Re(V_{K,G}^B - V_{K,H}^A) \quad (4.93)$$

$$h_9 = Im(V_{K,G}^B - V_{K,H}^A) \quad (4.94)$$

ในกรณีจะพบว่าจำนวนสมการมีมากกว่าจำนวนตัวแปรมากดังนั้นเราสามารถเลือกใช้แค่บางกลุ่มของฟังก์ชันจุดประสงค์ หรือจะใช้ทั้งหมดก็ได้

$$J(x) = \left(\sum_{i=1}^9 (h_i(x))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.95)$$

และมีฟังก์ชันข้อจำกัดคือ

$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad (4.96)$$

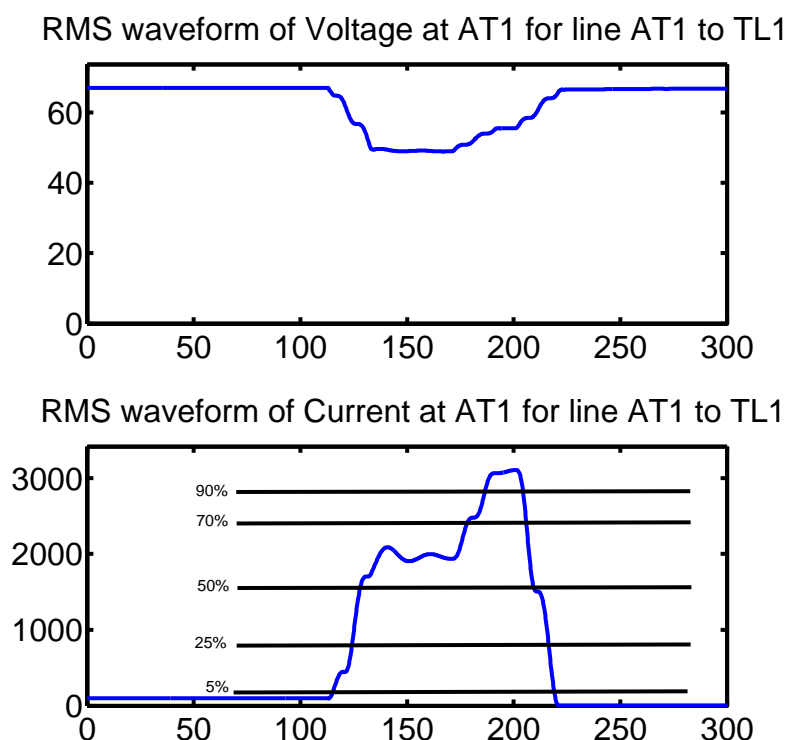
ใช้ระเบียบวิธี sequential quadratic programming (SQP) เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นโดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นดังนี้

$$x^{\circ T} = \left[r \quad \theta_{I_G^A} \quad |I_G^A| \quad \theta_{I_G^B} \quad |I_G^B| \right] \quad (4.97)$$

$x^{\circ T}$ คือเมตริกซ์ของค่าเริ่มต้นที่ใช้ในระเบียบวิธี หาค่าเหมาะสมในกรณีลัดวงจร แบบ BCG, CAG สามารถแก้ ปัญหาได้เหมือนกับวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

4.5 การเลือกช่วงข้อมูลที่น่ามาใช้ในการคำนวณ และระยะเวลาการลัดวงจร

ระยะเวลาการลัดวงจร เป็น ข้อมูลสำคัญ ที่วิศวกร ระบบ ป้องกัน ต้องการ ทราบ เพื่อ ตรวจสอบการตั้งค่ารีเลย์ในระบบป้องกัน ว่าถูกต้องอยู่แล้วหรือควรปรับแก้ ระยะเวลาการลัดวงจรเป็นคำตอบหนึ่งในระบบ AFA ที่ทีมวิจัยได้พัฒนาให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต งานวิจัยของ ยสวินท์ และคณะ [34] ได้ใช้เงื่อนไขกระแสในการ หาจุดเริ่มต้นการลัดวงจร และจุดสิ้นสุดการลัดวงจร ทั้งนี้เนื่องมาจากการลัดวงจรส่วนใหญ่ในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตทำให้เกิดแรงดันตกค่อนข้างน้อยจนยากที่จะใช้เป็นเงื่อนไข ในการหาจุดเริ่มต้นการลัดวงจรและจุดสิ้นสุดการลัดวงจร อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีที่ถูกนำมาใช้เป็นการเทียบ ค่า RMS ของกระแสในแต่ละเฟสกับปริมาณที่เป็นร้อยละของค่ากระแสสูงสุด เพื่อหาจุดเริ่มต้นการลัดวงจร และใช้ปริมาณกระแสเป็นศูนย์หลังจากมีการตัดวงจร ซึ่งให้นิยามกระแสเป็นศูนย์คือการที่ กระแสใน RMS เฟสนั้นมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ ค่าที่ตั้งไว้ค่าหนึ่ง ทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาระยะเวลาการลัดวงจรในกรณีการลัดวงจรแบบชั่วคราว และกรณีที่ กระแสค่อยลดลงและไม่เคยต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้เลย จากข้อบกพร่องดังที่กล่าวมาแล้วนั้นผู้วิจัย



รูปที่ 4.11: แรงดันและกระแส RMS วัดที่สถานีไฟฟ้าอ่างทอง1 บนสายส่ง อ่างทอง1 ไป ท่าลาน1 แสดงเส้นสมมุติในการเปรียบเทียบเพื่อหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการลัดวงจร

จึงนำเสนอการหาระยะเวลาการลัดวงจรภาพแบบใหม่ กล่าวคือจะทำการเทียบค่าของกระแส

เฟสนั้นก็กับ ค่าร้อยละของกระแสสูงสุด ทำการปรับค่าตัวเทียบ ตั้งแต่ 95% ลงมาจนถึงระดับ 1% แล้วพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมเป็นคำตอบของเวลาการลัดวงจรในกรณีนี้

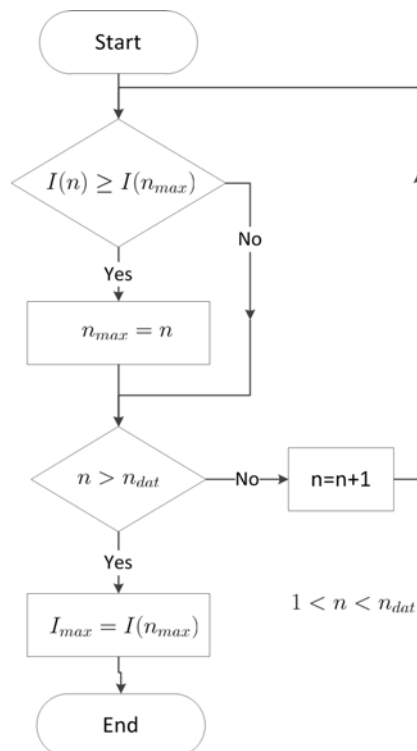
$$I_{max} = \max(I(n)) = I(n_{max}) \quad : \quad 1 < n < n_{dat} \quad (4.98)$$

I_{max} คือกระแส RMS สูงสุด n คือลำดับข้อมูล n_{max} คือลำดับข้อมูลที่มีกระแสสูงสุด และ n_{dat} คือลำดับข้อมูลสุดท้าย

ภาพที่ 4.12 แสดงการหาค่ากระแสสูงสุด และลำดับของข้อมูลที่บันทึกกระแสสูงสุดซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเวลาได้โดย

$$t = \frac{n}{f_s} \quad (4.99)$$

โดยที่ f_s คือความถี่สุ่ม (Hz) t คือเวลา (msec.)



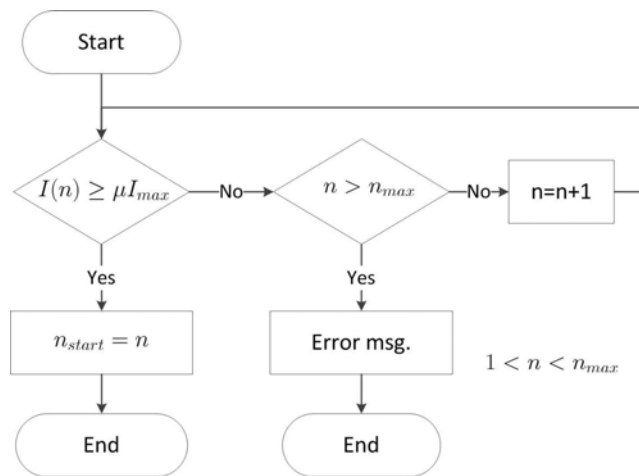
รูปที่ 4.12: การหาค่ากระแสสูงสุดและเวลาที่เกิดกระแสสูงสุด

การหาลำดับข้อมูลที่เริ่มต้นการลัดวงจรโดยเทียบกับ μI_{max} ได้แสดงให้เห็นในภาพที่ 4.13 เรียก n ที่ได้จากสมการ (4.102) ว่าลำดับเริ่มต้น n_{start}

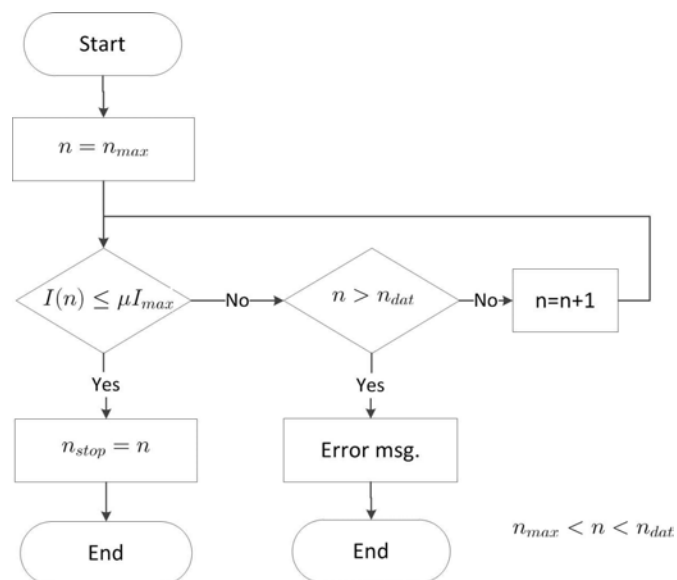
$$I(n) \geq \mu I_{max} \quad : \quad 0.01 \leq \mu \leq 0.95, \quad 1 < n < n_{max} \quad (4.100)$$

เวลาเริ่มการลัดวงจรเรียกว่า t_{start} สามารถหาได้จากสมการ (4.101)

$$t_{start} = \frac{n_{start}}{f_s} \quad (4.101)$$



รูปที่ 4.13: การหาเวลาเริ่มต้นการลัดวงจร



รูปที่ 4.14: การหาเวลาสิ้นสุดการลัดวงจร

การหาเวลาสิ้นสุดการลัดวงจรแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.14

$$I(n) \leq \mu I_{max} \quad : \quad 0.01 \leq \mu \leq 0.95, \quad n_{max} < n < n_{dat} \quad (4.102)$$

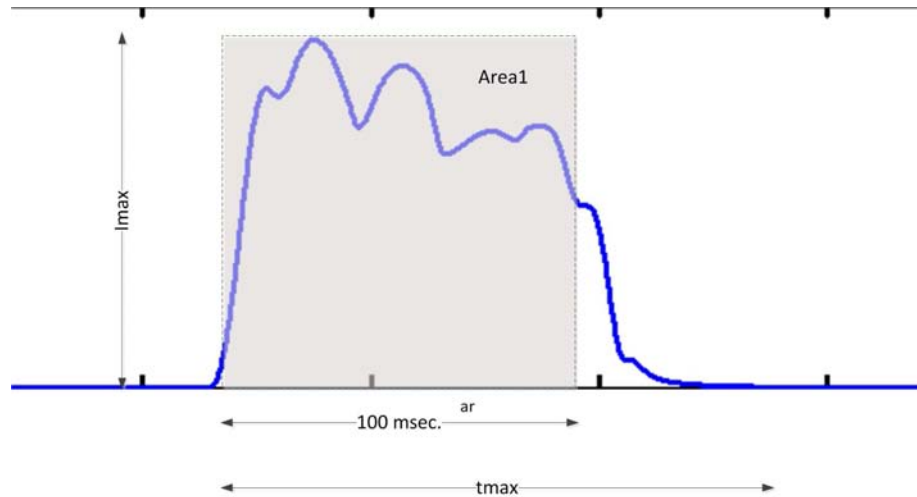
โดยที่ n_{stop} คือลำดับข้อมูลที่เป็นจุดสิ้นสุดการลัดวงจร สามารถแปลงเป็นเวลาได้โดย

$$t_{stop} = \frac{n_{stop}}{f_s} \quad (4.103)$$

ระยะเวลาการลัดวงจรในแต่ละค่าของตัวเทียบ μI_{max} จะหาได้จาก

$$t_{clr,\mu} = t_{stop,\mu} - t_{start,\mu} \quad (4.104)$$

อย่างไรก็ตามจะพบว่าเราได้ค่า ระยะเวลาการลัดวงจรหลายค่าขึ้นอยู่กับลำดับชั้นในการปรับตัวแปรคูณ μ กลยุทธ์ในการเลือกค่าจะทำดังนี้



รูปที่ 4.15: พื้นที่ใต้กราฟ $Area_1$ และพื้นที่ใต้กราฟ $Area_2$ ที่เกิดจากการหาพื้นที่ใต้กราฟของภาพคลื่นกระแสในช่วงเวลาที่มากที่สุดที่ได้จากการเทียบกับ $1\%I_{max}$

$$Area_1 = 100 * I_{max} \quad : \quad msec \cdot A \quad (4.105)$$

$$Area_2 = \sum_u^v I(n) \cdot \frac{1}{f_s} \quad (4.106)$$

โดยที่ $u = \min(n_{start})$ และ $v = \max(n_{stop})$ $Area_1$ เป็นพื้นที่ใต้กราฟสมมุติของระยะลัดวงจรใน zone1 (การทำงานใน zone1 จะตั้งค่าไว้ที่ 100 msec.) $Area_2$ เป็นพื้นที่ใต้กราฟของภาพคลื่นกระแสจริงที่ได้จากการวัดในช่วงที่กว้างที่สุดของเวลาที่ได้จากสมการ (4.104) ดังนั้นถ้า $Area_2$ น้อยกว่า $Area_1$ ค่าตอบเวลาลัดวงจร คือค่าที่มากที่สุดของ $t_{clr,\mu}$ ที่น้อยกว่า 120 msec.

$$Area_1 \leq Area_2 \quad : \quad t_{clr} = \max(t_{clr,\mu} \leq 120msec.) \quad (4.107)$$

ในกรณีที่ $Area_2$ มากกว่า $Area_1$ แสดงว่าการลัดวงจรอาจเป็นการทรูปใน zone2 ซึ่งสามารถใช้การเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟสมมุติของ zone2 แล้วหาค่ามากที่สุดที่น้อยกว่าระยะเวลาลัดวงจรใน zone2 เป็นคำตอบระยะเวลาในการลัดวงจร

4.6 สรุป

ส่วนแรกของบทนี้เกริ่นนำเกี่ยวกับระเบียบวิธีเลือกใช้ขั้นตอนวิธีการหาระยะลัดวงจร ที่เป็นแบบ ปลายเดี่ยว สองปลายแบบข้อมูลมีความตรงกันเชิงเวลา สองปลายแบบต้องชดเชย

ความคาดเคลื่อนทางเวลา และหลายปลาย โดยใช้ค่าทั้งแรงดันและกระแสช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรในการตรวจสอบ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการนำค่ามุมที่เป็นผลต่างของการคำนวณและการวัดใช้เป็นมุมชดเชยในการหาระยะลัดวงจรแบบสองปลายมาตรฐาน โดยไม่ต้องอาศัยขั้นตอนวิธีอื่นที่มีความซับซ้อนขึ้นไป อย่างไรก็ตามความถูกต้องของการหาระยะ ลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ของสายส่ง และแบบจำลองสายส่งที่ใช้ว่าสามารถเทียบเคียงกับสภาพจริงได้มากแค่ไหน

ส่วนถัดมาได้นำเสนอระเบียบวิธีเพิ่มความแม่นยำของขั้นตอนวิธี การหาระยะลัดวงจรแบบปลายเดียวโดยใช้ Z_{bus} มาช่วยและยังคงความง่ายของสมการแบบปลายเดียวอยู่ สิ่งต่างจากระเบียบวิธีแบบปลายเดียวทั่วไปคือไม่จำเป็นต้องรู้ประเภทของการลัดวงจรเพื่อเลือกสมการ ในระเบียบวิธีที่นำเสนอนี้ใช้เพียงสมการเดียวกับทุกประเภทการลัดวงจร ปริมาณที่ใช้เป็น กระแสและแรงดันที่วัดจากปลายข้างเดียวในภาพแบบ เฟสเซอร์ และแปลงเป็นค่าองค์ประกอบลำดับบวก เท่านั้นอย่างไรก็ตามจะพบว่าความแม่นยำของระเบียบวิธี ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการหาค่าของ Z_{bus} ที่จะนำมาใช้

ระเบียบวิธี ถัดมาได้นำเสนอวิธีการใช้ข้อมูลหลายปลายที่ช่วยให้สามารถหาแรงดันของปลายข้างที่ไม่มีข้อมูลได้ ระเบียบวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่เข้ากันได้เชิงเวลาเนื่องจากใช้ข้อมูล จากเครื่องมือวัดหลายตัว ขั้นตอนวิธีนี้ได้้นำแนวคิดการหาระยะลัดวงจรแบบสองปลาย และแนวคิดเรื่องมุมของแรงดัน ณ จุดลัดวงจรเท่ากับมุมของกระแสลัดวงจรมาใช้ ในการสร้างสมการจุดประสงค์ ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมจะ ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบระยะลัดวงจร ในระเบียบวิธีนี้จำเป็นต้องรู้ประเภทของการลัดวงจรเพื่อให้มีข้อมูลมากพอที่จะแก้ปัญหาได้ ระเบียบวิธีนี้ดีกว่าระเบียบวิธีการ หาระยะลัดวงจรแบบหลายปลายอื่นๆ ดังนี้คือในกรณี 3ปลาย ไม่จำเป็นต้องมีจุดวัดสามปลายเหมือนงานที่ผ่านมา และไม่จำเป็นต้องใช้ความต้านทานของแหล่งจ่าย เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา ระเบียบวิธีนี้ ยังสามารถปรับใช้กับสถานะที่ข้อมูลไม่ครบซึ่งสามารถพบได้ในระบบที่ที่มิวิชัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพัฒนาขึ้นให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ทั้งนี้เนื่องมาจากการขัดข้องของ เครื่องแม่ข่าย DFR ที่ไม่สามารถดึงข้อมูล กลับมาได้หมดทำให้ขาดข้อมูลของกระแสปลายใดปลายหนึ่ง ซึ่งทำให้ระเบียบวิธีสองปลาย สามปลาย หรือ หลายปลายทั่วไปทำไม่ได้ ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีจะถูก นำเสนอและเปรียบเทียบผลในบทต่อไป

สุดท้ายได้นำเสนอระเบียบวิธีการหาระยะเวลาการลัดวงจร ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเทียบปริมาณกระแสกับค่าคงที่ซึ่งจะให้ค่าที่ผิดพลาดได้ในหลายๆ กรณี

บทที่ 5

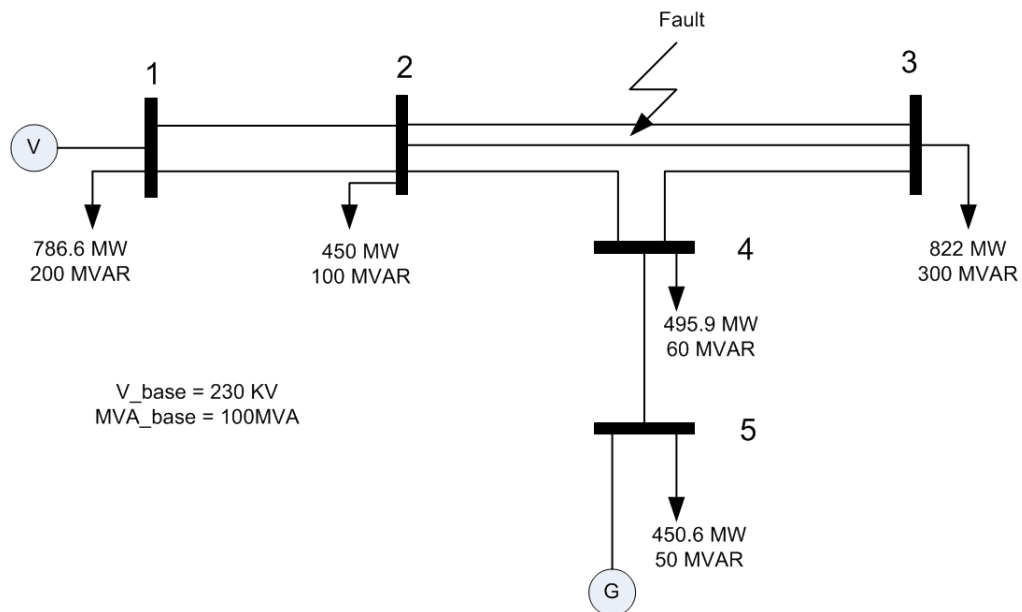
การทดสอบสมรรถนะ

5.1 ระบบทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบทดสอบซึ่งมีสองระบบคือ EGAT 5 บัส ซึ่งนำบางส่วนจากระบบในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตมาจำลองแบบ และระบบ IEEE 14 บัส ซึ่งนำมาจากงานของ Sameh kamel และคณะ [38]

5.1.1 ระบบทดสอบ EGAT 5 บัส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบทดสอบแบบ EGAT 5 บัสซึ่งจะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ระบบทดสอบนี้ได้นำบางส่วนจากระบบจริงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตมาจำลองแบบ และทำการจำลองแบบเชิงเวลาแบบสามเฟสโดยใช้ Matlab Simulink ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบจะแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ในแบบจำลองนี้ เป็นแบบมาตรฐาน (Classical model) ซึ่งมีพารามิเตอร์ดังตาราง 5.2 สายส่งเป็นแบบระยะปานกลาง (π model) ใช้ทดสอบในกรณี การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน และ การวิเคราะห์ผลของเวลาไม่ตรงกันต่อสมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐาน



รูปที่ 5.1: EGAT 5 บัส

ตารางที่ 5.1: ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งของ EGAT 5 บัส

From Bus	To Bus	r1(PU.)	x1(PU.)	y1(PU.)	r0(PU.)	x0(PU.)	y0(PU.)
1	2	0.00019	0.00366	0.01791	0.00338	0.01331	0.0088
1	2	0.00019	0.00365	0.01791	0.00345	0.01321	0.0088
2	3	0.00024	0.00432	0.02499	0.00425	0.01844	0.00959
2	3	0.00024	0.0043	0.02487	0.00433	0.01821	0.00956
2	4	0.0003	0.00539	0.03109	0.00498	0.02301	0.01418
3	4	0.00016	0.00294	0.01651	0.00286	0.0119	0.00817
4	5	0.00092	0.01037	0.03838	0.00933	0.03613	0.01878

ตารางที่ 5.2: ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า EGAT 5 บัส

Generator bus no.	5
MVA	425
r_a (PU.)	0.147
x_d (PU.)	0.22

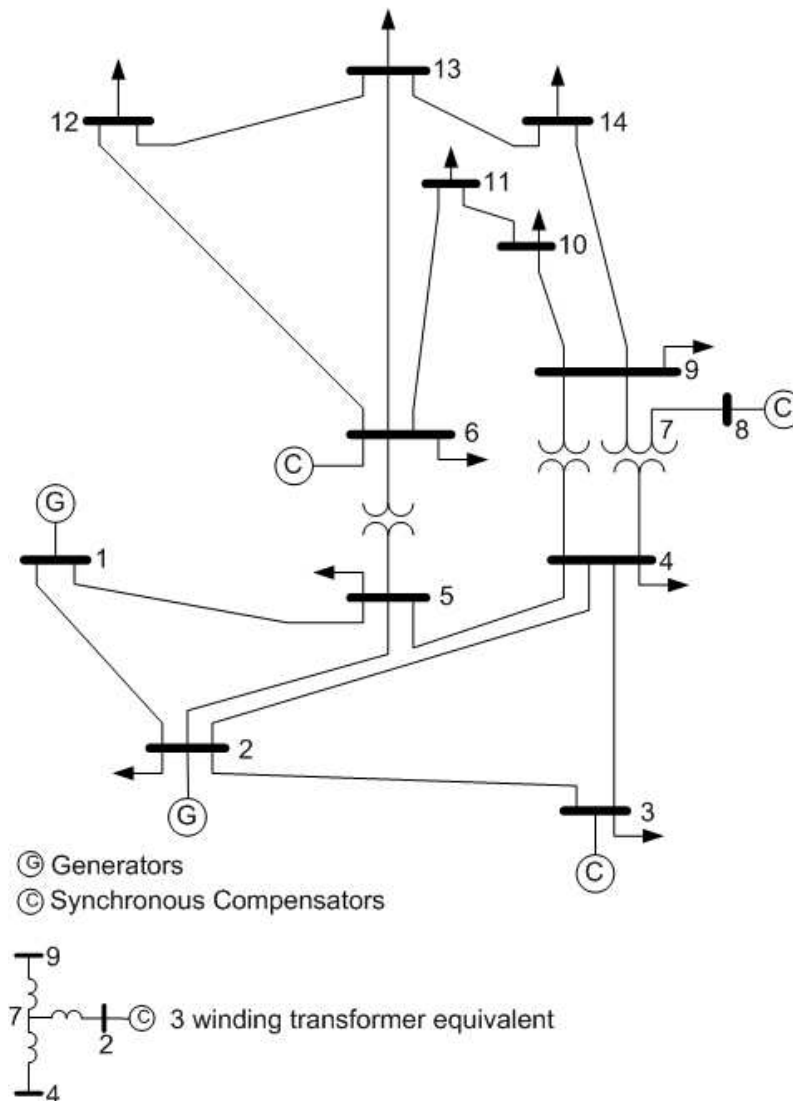
5.1.2 ระบบทดสอบ IEEE 14 bus

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบทดสอบ IEEE 14 bus ซึ่งจะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ปกติระบบ IEEE 14 bus เป็นระบบทดสอบ สำหรับงานโพลดิพลซึ่งเป็นระบบแบบคงที่ (steady state) อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดัดแปลง ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 bus ให้เป็นระบบทดสอบที่สามารถทำการจำลองแบบเชิงเวลาได้ โดยใช้ Matlab Simulink ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบจะแสดงไว้ในตาราง 5.3

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองแบบนี้เป็นแบบมาตรฐาน (Classical Model) มีพารามิเตอร์ตามตาราง 5.4 สายส่งเป็นแบบระยะปานกลาง (π model) ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ ของ ขั้นตอนวิธี ที่ ใช้ องค์ประกอบ ใน บัส อิมพีแดนซ์ เมตริกซ์ และการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ข้อมูลหลายปลายด้วยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

เพื่อทดสอบความถูกต้องของระบบจึงทำการทดสอบระบบโดย ปรับค่าความต้านทานการลัดวงจรตั้งแต่ 1Ω ถึง 10Ω และเปลี่ยนระยะลัดวงจรจาก 0.1PU. ถึง 0.9PU. เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดูลย์ ทำการคำนวณมุมของกระแสและมุมของแรงดันที่บัส 13 บัส 14 และ บัสลัดวงจรเพื่อให้เห็นขอบเขตและใช้เป็นค่าเปรียบเทียบ เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพที่ 5.3 ถึง 5.7

ภาพที่ 5.8 และ 5.9 เป็นภาพคลื่นกระแสเฟส A ที่จ่ายจากบัส 13 และ บัส 14



รูปที่ 5.2: IEEE 14 บัส

เปรียบเทียบกับโดยภาพที่ 5.8 มีจุดลัดวงจรอยู่ที่ 0.1PU. และ ภาพที่ 5.9 มีจุดลัดวงจรอยู่ที่ 0.9PU. เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ จะสังเกตเห็นในภาพที่ 5.8 กระแส ป้อนจากบัส 14 มีค่าต่ำกว่าช่วงก่อนและหลังการเกิดลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าบัส 14 ไม่ได้จ่ายกระแสป้อนจุดลัดวงจรแต่ยังรับกระแสป้อนจากบัส 14 อยู่ ปรากฏการณ์นี้จะเริ่มสังเกตเห็นได้ตั้งแต่ค่าความต้านทานการลัดวงจรมีค่าเท่ากับ 5Ω ดังนั้นในการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอจะใช้ความต้านทานการลัดวงจรอยู่ที่ 5Ω

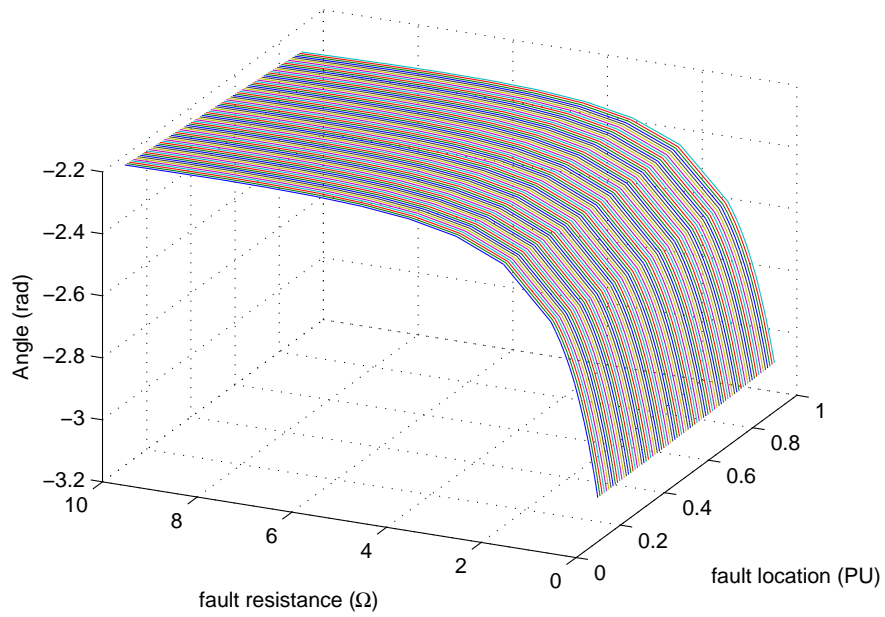
ตารางที่ 5.3: ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งของ IEEE 14 บัส

From Bus	To Bus	r1(PU.)	x1(PU.)	y1(PU.)	r0(PU.)	x0(PU.)	y0(PU.)
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	0.07752	0.23668	0.01320
1	5	0.05404	0.22304	0.0492	0.21616	0.89216	0.01230
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	0.18796	0.79188	0.01095
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	0.23244	0.70528	0.00935
2	5	0.05695	0.17388	0.0340	0.22780	0.69552	0.00850
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	0.26804	0.68412	0.00865
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	0.05340	0.16844	0.00320
4	7	0.00000	0.20912	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
4	9	0.00000	0.55618	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
5	6	0.00000	0.25202	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
6	11	0.09498	0.19890	0.0000	0.37992	0.79560	0.00000
6	12	0.12291	0.25581	0.0000	0.49164	1.02324	0.00000
6	13	0.06615	0.13027	0.0000	0.26460	0.52108	0.00000
7	8	0.00000	0.17615	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
7	9	0.00000	0.11001	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
9	10	0.03181	0.08450	0.0000	0.12724	0.38800	0.00000
9	14	0.12711	0.27038	0.0000	0.50844	1.08152	0.00000
10	11	0.08205	0.19207	0.0000	0.32820	0.76828	0.00000
12	13	0.22092	0.19988	0.0000	0.88368	0.79952	0.00000
13	14	0.17093	0.34802	0.0000	0.68372	1.39208	0.00000

ตารางที่ 5.4: ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า IEEE 14 บัส

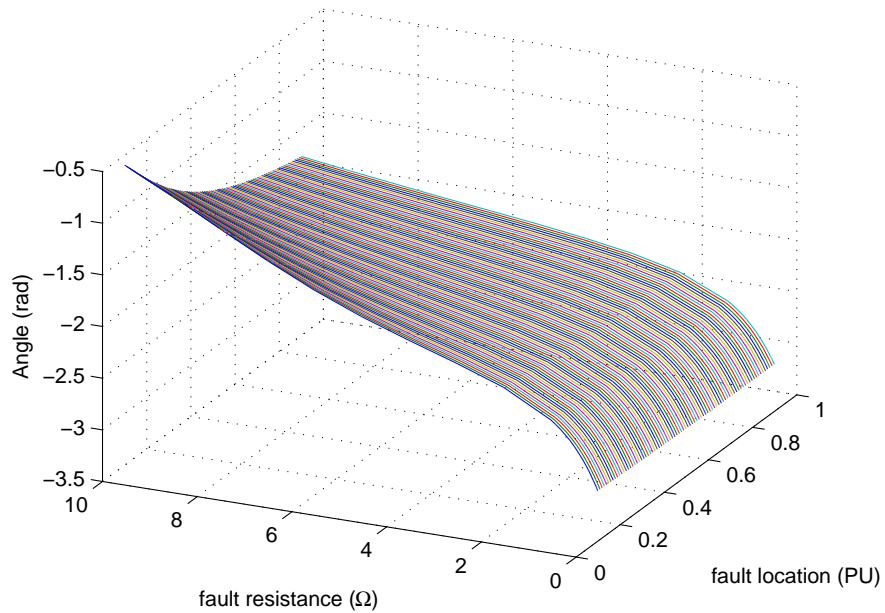
Generator bu no.	5	1	3	6	8
MVA	615	60	60	25	25
r_a (PU.)	1e-7	0.0031	0.0031	0.0014	0.0041
x_d (PU.)	0.8979	1.05	1.05	1.25	1.25

Angle (rad) of current flow from bus 13, fault location (PU) and fault resistance

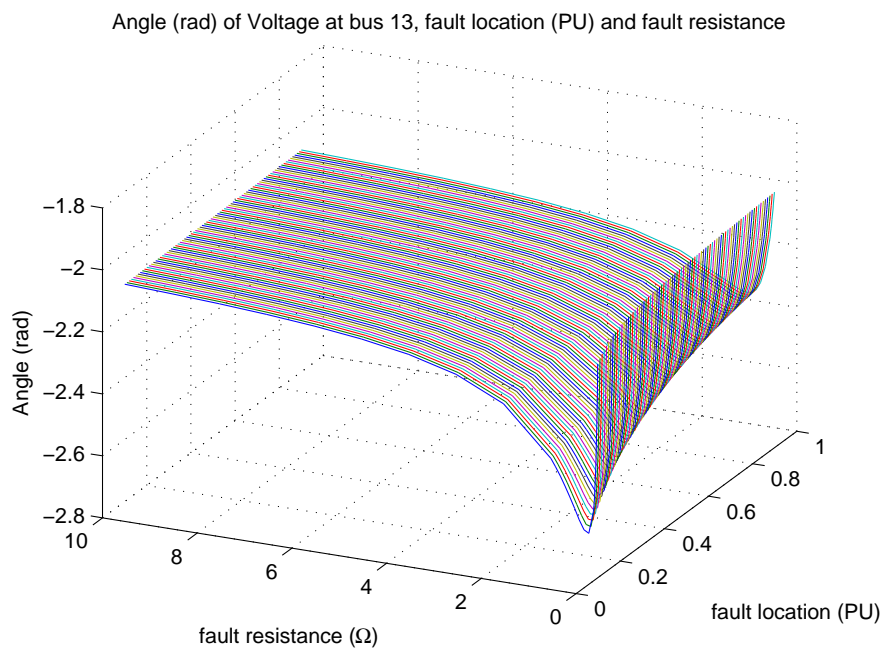


รูปที่ 5.3: มุมของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรที่มาจากบัส 13

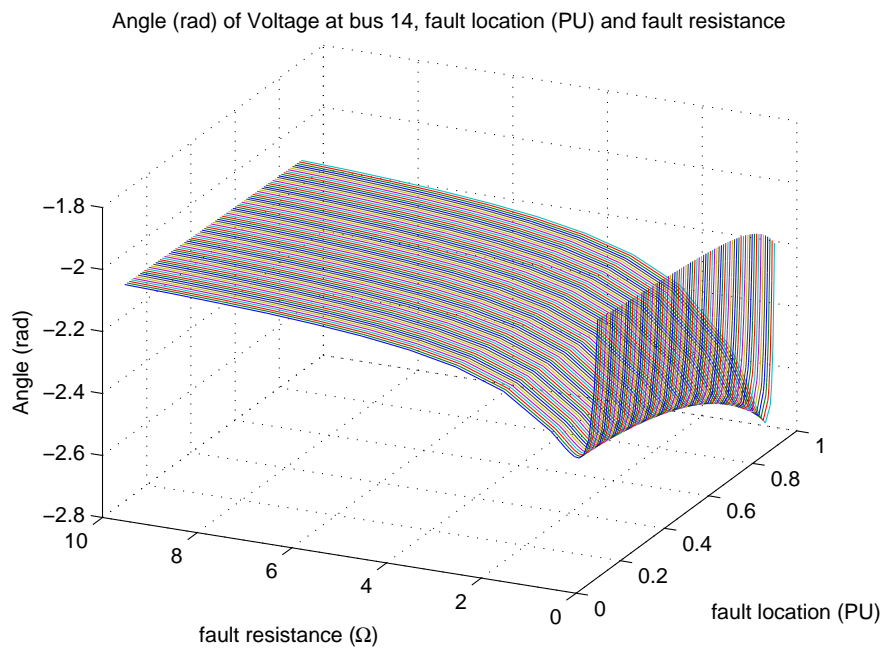
Angle (rad) of current flow from bus 14, fault location (PU) and fault resistance



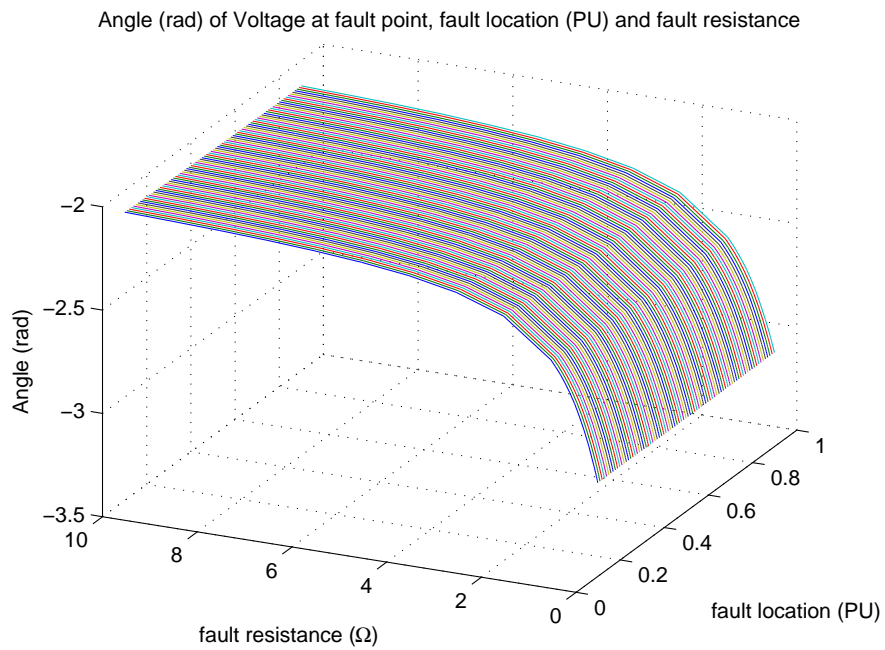
รูปที่ 5.4: มุมของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรที่มาจากบัส 14



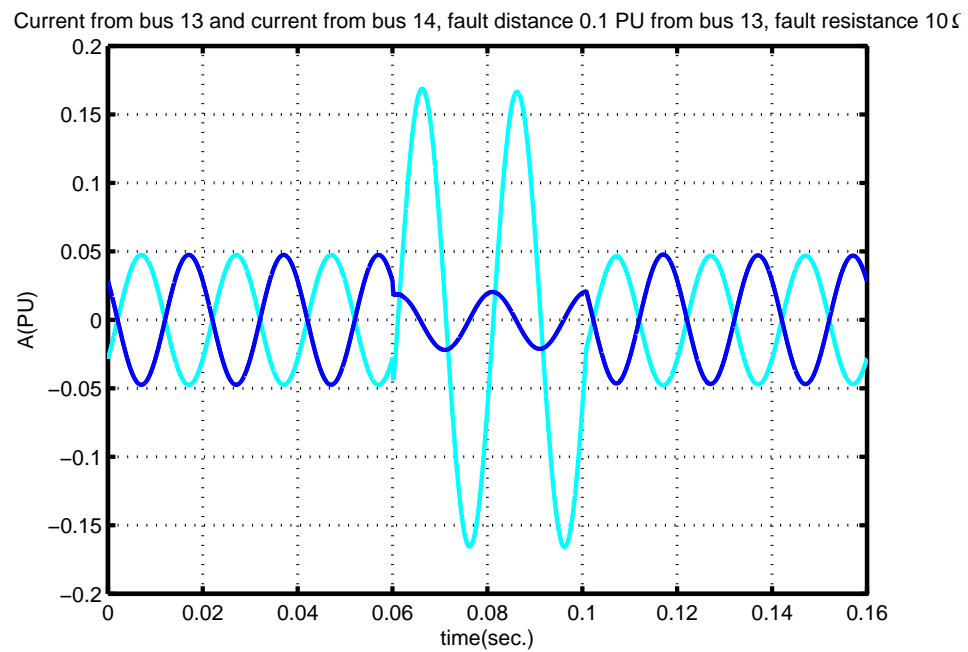
รูปที่ 5.5: มุมของแรงดันที่บัส 13



รูปที่ 5.6: มุมของแรงดันที่บัส 14

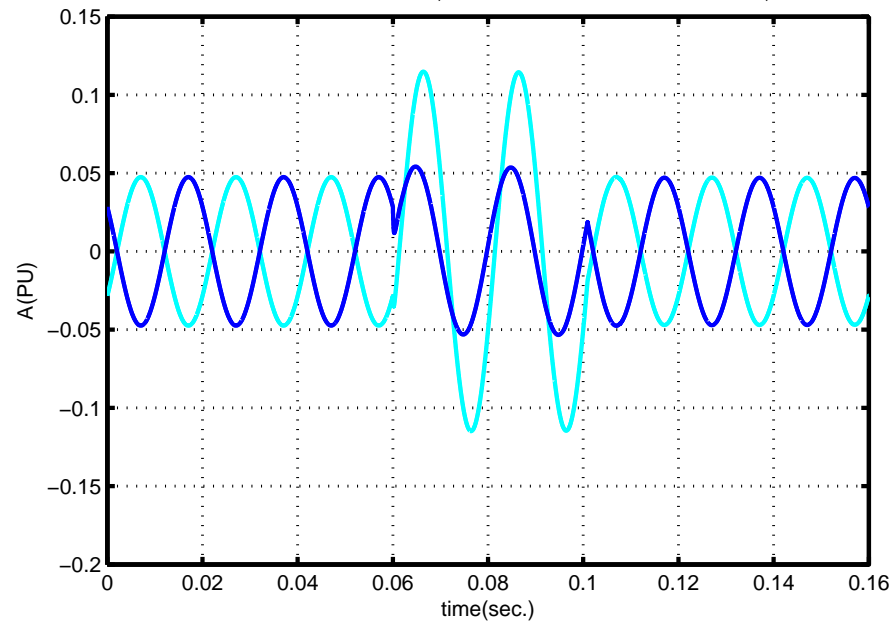


รูปที่ 5.7: มุมของแรงดันที่จุดเกิดการลัดวงจร



รูปที่ 5.8: ภาพคลื่นของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส 13 และ บัส 14 โดยจุดเกิดการลัดวงจรห่างจากบัส 13 0.1 PU

Current from bus 13 and current from bus 14, fault distance 0.9 PU from bus 13, fault resistance 10 Ω .



รูปที่ 5.9: ภาพคลื่นของกระแสที่ป้อนจุดลัดวงจรจากบัส 13 และ บัส 14 โดยจุดเกิดการลัดวงจรห่างจากบัส 13 0.9 PU

5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวมาตรฐาน

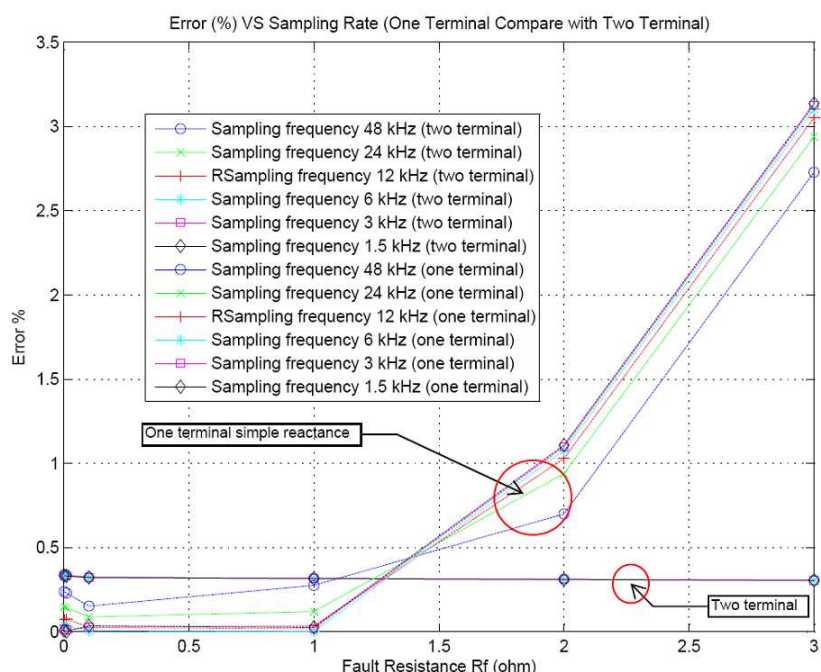
• ระบบทดสอบ EGAT 5 บัสโดยกำหนดให้ มีการลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างบัส 2 กับ บัส 3 ระยะลัดวงจรที่ 0.77PU. ห่างจากบัส 2 ประเภทการลัดวงจร $ABCG$ และ เปลี่ยนค่าความต้านทานจาก 0.001 Ω ถึง 3 Ω

• เก็บแรงดันและกระแสทั้งสามเฟส ที่บัส 2 และบัสที่ 3 ในความถี่สุ่มที่ต่างกัน ตั้งแต่ 1.5kHz ถึง 48kHz

• แปลงแรงดันและกระแสสามเฟสช่วงเกิดการลัดวงจรให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์
 • แปลงแรงดันและกระแสที่อยู่ในภาพเฟสเซอร์ ให้เป็นปริมาณองค์ประกอบสมมาตร
 • ทำคำนวณหาระยะลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีการคำนวณแบบปลายเดียวด้วยองค์ประกอบแบบรีแอกแตนซ์อย่างง่าย และแบบสองปลายมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด

• คำนวณหาความผิดพลาดโดย

$$error(\%) = (r_{cal} - r_{act}) \times 100 \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.10: ผลทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีปลายเดียวมาตรฐาน

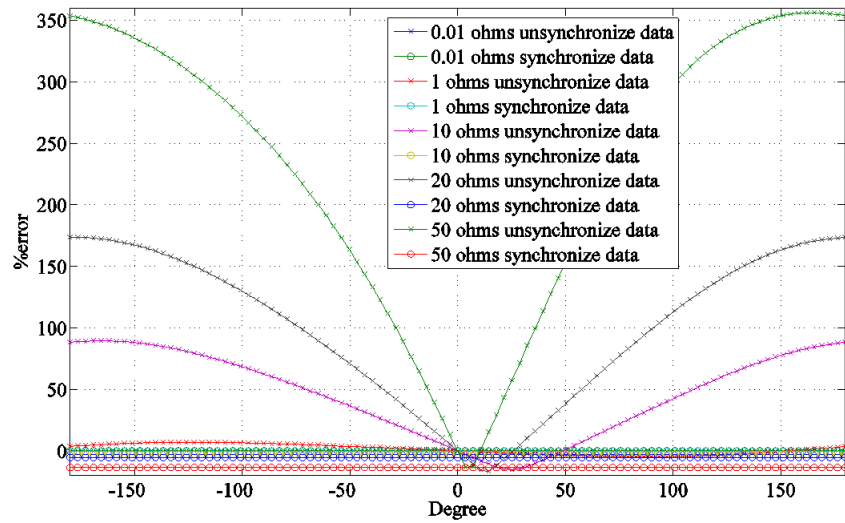
จากผลการทดลองจะพบว่าค่าความผิดพลาด ($\%error$) จะมากขึ้นเมื่อความต้านทานการลัดวงจรเพิ่มขึ้นกรณีการคำนวณแบบปลายเดียวด้วยองค์ประกอบรีแอกแตนซ์อย่างง่าย ในขณะที่การคำนวณแบบสองปลายมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดให้ค่าที่ดีมากแม้ว่า ค่าความต้านทานการลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นกล่าวคือการคำนวณแบบสองปลาย

มาตรฐานไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานการลัดวงจรที่เปลี่ยนไป ความถี่สุ่มไม่ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดต่างกันมากนัก

5.3 การวิเคราะห์ผลของเวลาไม่ตรงกันต่อสมรรถนะของขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐาน

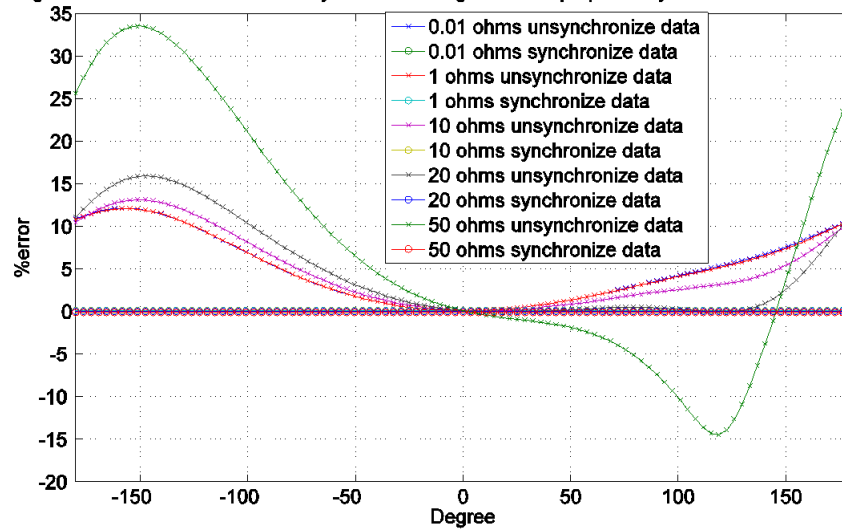
- รั้นระบบทดสอบ EGAT 5 บัสโดยกำหนดให้ มีการลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ระยะลัดวงจรที่ 0.2PU.ห่างจากบัส 2 ประเภทการลัดวงจร $ABCG$ AG AB และ ABG ตามลำดับ ความต้านทานการลัดวงจร 0.01 Ω 1 Ω 10 Ω 20 Ω และ 50 Ω ตามลำดับ
 - เก็บแรงดันและกระแสทั้งสามเฟส ที่บัส 2 และบัสที่ 3
 - ทำการเลื่อนมุมของแรงดันและกระแสของบัสที่ 3 โดยการเลื่อนเวลาของข้อมูลสุ่มให้มุมเฟสเปลี่ยนไปจากเดิม ระหว่าง -180 องศา ถึง 180 องศา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ไม่ตรงกันเชิงเวลา
 - คำนวณหาภาพคลื่นความถี่สูงของสัญญาณสุ่มกระแสจากทั้งสองปลาย(ที่ถูกเลื่อนเวลาแล้ว) โดยวิธีเวฟเลท และ เปรียบเทียบกับ ค่าคงที่ 0.1 เพื่อให้ได้เวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสตอนเกิดการลัดวงจร
 - ทำการเลื่อนข้อมูลสุ่มให้ตรงกับเวลาที่ได้จากการเทียบภาพคลื่นความถี่สูงกับค่าคงที่
 - แปลงข้อมูลสุ่มแรงดันและกระแสสามเฟสที่ทำการชดเชยเวลาแล้วและที่ยังไม่ได้ทำการชดเชยเวลาในช่วงเกิดการลัดวงจรให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์
 - แปลงแรงดันและกระแสที่อยู่ในภาพเฟสเซอร์ ให้เป็นปริมาณองค์ประกอบสมมาตร
 - ทำคำนวณหาระยะลัดวงจรด้วยขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐานด้วยการแก้ปัญหา ค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด ทั้งข้อมูลที่ยังไม่ได้ชดเชยเวลาและข้อมูลที่ชดเชยเวลาแล้ว
 - คำนวณหาความผิดพลาด

Percentage error of fault location with unsynchronized angle and the proposed synchronize method in case 3 phase fault



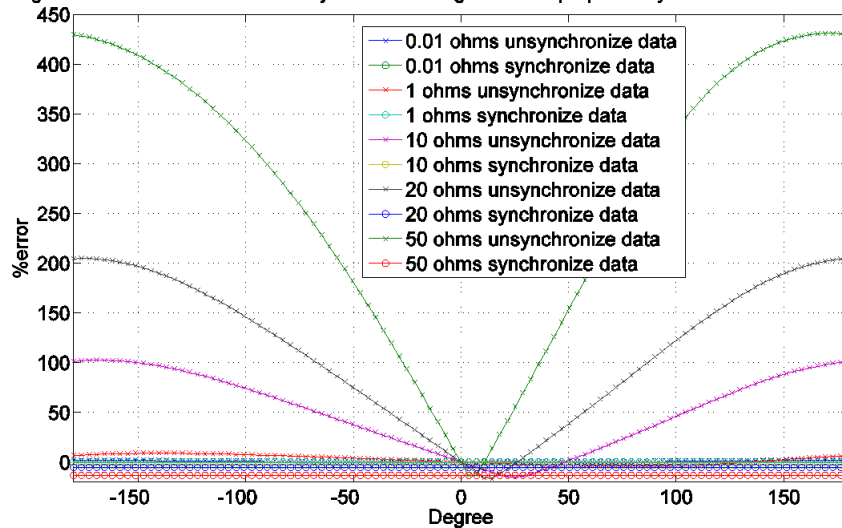
รูปที่ 5.11: กรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลด้วยการคำนวณแบบมาตรฐานแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท

Percentage error of fault location with unsynchronized angle and the proposed synchronize method in case AG f



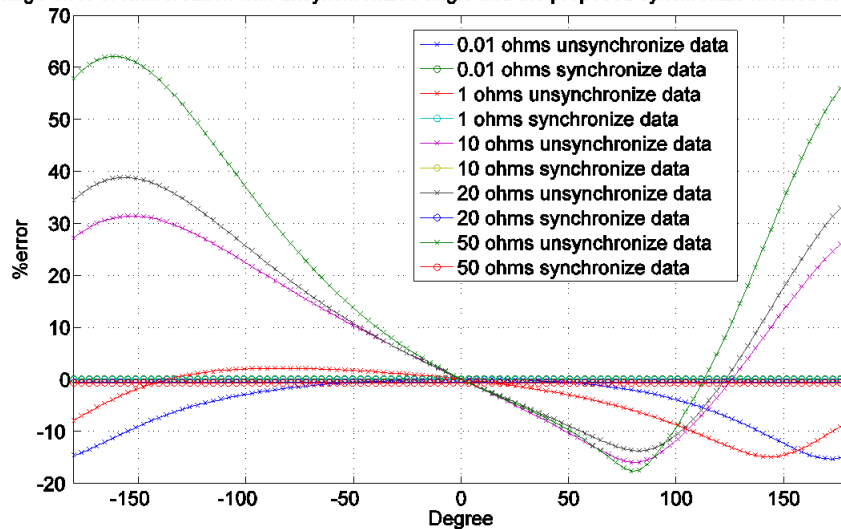
รูปที่ 5.12: กรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินด้วยการคำนวณแบบมาตรฐานแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท

Percentage error of fault location with unsynchronized angle and the proposed synchronize method in case AB fi



รูปที่ 5.13: กรณีลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟสด้วยการคำนวณแบบมาตรฐานแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท

Percentage error of fault location with unsynchronized angle and the proposed synchronize method in case ABG



รูปที่ 5.14: กรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินด้วยการคำนวณแบบมาตรฐานแก้ปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองปลายชดเชยผลของเวลาไม่ตรงกันด้วยหลักการเวฟเลท

จากผลการทดลองพบว่ากรณีที่ข้อมูลสองปลายไม่ตรงกันเชิงเวลาถ้าค่าความต้านทานการลัดวงจรมีค่าสูงจะส่งผลทำให้ความผิดพลาดในการหาระยะลัดวงจรแบบสองปลายมากขึ้น ผลของมุมเฟสที่ผิดไปทำให้การหาระยะลัดวงจรมีความผิดพลาดมากขึ้น

5.4 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้องค์ประกอบใน บัส อิมพีแดนซ์เมตริกซ์

- รั้นระบบทดสอบ IEEE14 บัสโดยกำหนดให้ มีการลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างบัส 13 กับ บัส 14 ระยะลัดวงจรเริ่มที่ 0.1 PU. จนถึง 0.9 PU. ประเภทการลัดวงจรมีสี่ประเภทคือ $ABCG, AG, AB, ABG$ และมีความต้านทานการลัดวงจรอยู่ที่ 3Ω

- เก็บแรงดันและกระแสทั้งสามเฟส ที่บัส 13
- แปลงแรงดันและกระแสสามเฟสช่วงเกิดการลัดวงจรให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์
- แปลงแรงดันและกระแสที่อยู่ในภาพเฟสเซอร์ ให้เป็นปริมาณองค์ประกอบเชิงบวก
- หาค่าของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} ที่ต้องใช้ในการคำนวณ
- ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจร หาค่าความผิดพลาด
- เปลี่ยนระยะลัดวงจรแล้วเริ่มขบวนการทดสอบใหม่ตลอดระยะทางของสายส่ง
- เปลี่ยนประเภทของการลัดวงจรแล้วเริ่มการทดสอบใหม่

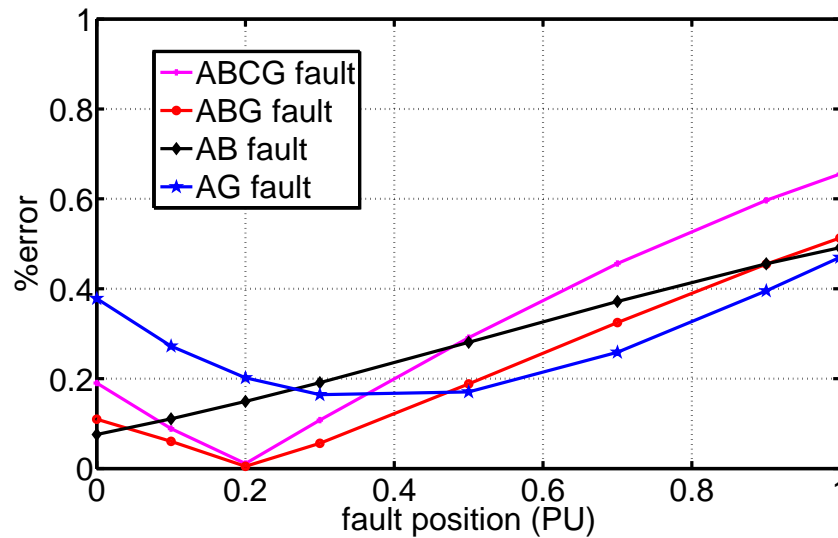
การทดสอบจะเปลี่ยนระยะลัดวงจรตั้งแต่ระยะ 0.1 ถึง 0.9 ต่อความยาวสายส่ง ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจรโดยใช้สมการที่ (4.21) หาค่าความคลาดเคลื่อนโดยสมการ (5.1) ทำการทดสอบทุกประเภทของการลัดวงจร คือ การลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน AG, การลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส AB, การลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟสลงดิน ABG และ การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน ABCG นำค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้มาพลอตแสดงในภาพที่ 5.15 โดยกำหนดให้แกนนอน เป็นระยะการลัดวงจร และแกนตั้ง แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองดังแสดงให้เห็นภาพที่ 5.15 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจะไม่เกิน 0.7 % ในกรณี การลัดวงจรแบบสามเฟสลงดิน ABCG ซึ่งหากสายส่ง มีความยาว 100 กิโลเมตร จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 700 เมตร เทียบได้กับระยะเสาส่งลัดสั้น (ระยะห่างระหว่างเสาส่งโดยทั่วไปอยู่ที่ 300 เมตร)

5.5 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ข้อมูลหลายปลายด้วยการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด

- รั้นระบบทดสอบ IEEE14 บัสโดยกำหนดให้ มีการลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างบัส 13 กับ บัส 14 ระยะลัดวงจรเริ่มที่ 0.1 PU. จนถึง 0.9 PU. ประเภทการลัดวงจรมีสี่ประเภทคือ $ABCG, AG, AB, ABG$ และมีความต้านทานการลัดวงจรอยู่ที่ 1 ถึง 5 Ω

- เก็บแรงดันและกระแสทั้งสามเฟส ที่บัส 13
- เก็บแรงดันทั้งสามเฟส ที่บัส 9, เก็บกระแสป้อนจากบัส 9 ไปยังบัส 14 ทั้งสามเฟส



รูปที่ 5.15: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี การเพิ่มสมรรถนะการหาตำแหน่งลัดวงจรบนสายส่งแบบ มีข้อมูลปลายเดียวโดยใช้ Z_{bus} .

- แปลงแรงดันและกระแสสามเฟสช่วงเกิดการลัดวงจรให้อยู่ในภาพเฟสเซอร์
- ทำการคำนวณหาแรงดันทั้งสามเฟสของบัส 14
- นำข้อมูลทั้งหมดเข้าระเบียบวิธีหาตำแหน่งลัดวงจรที่น่าเสนอใช้ ระเบียบวิธี SQP ในการหาคำตอบระยะลัดวงจร

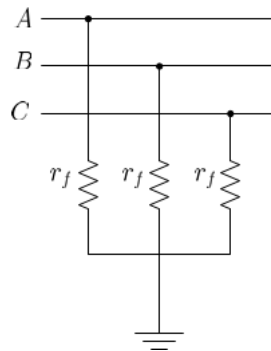
- ทำการคำนวณหาระยะลัดวงจร หาความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์
- เปลี่ยนระยะลัดวงจรแล้วเริ่มขบวนการทดสอบใหม่ตลอดระยะทางของสายส่ง
- เปลี่ยนประเภทของการลัดวงจรแล้วเริ่มการทดสอบใหม่

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดสอบเป็นกราฟแสดงความผิดพลาดเป็น % ในแกนตั้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (5.1) ผลการทดสอบจะแบ่งเป็นสี่หัวข้อตามประเภทของการลัดวงจรซึ่งคือ

- กรณีที่ 1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)
- กรณีที่ 2 การลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (AG)
- กรณีที่ 3 การลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)
- กรณีที่ 4 การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)

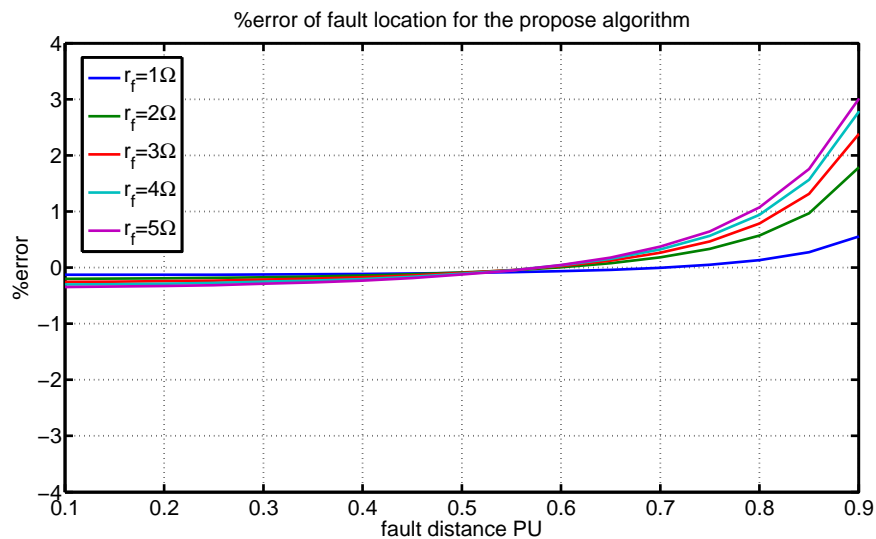
ในแต่ละกรณีศึกษาจะมีผลการทดลองของระเบียบวิธีที่น่าเสนอ ผลการทดลองของระเบียบวิธีมาตรฐาน ผลของการทดลองของระเบียบวิธีมาตรฐานที่มีการคำนวณผลกระทบของโหลด และระเบียบวิธีแบบสองปลายมาตรฐาน แกนนอนเป็นจุดเกิดการลัดวงจรในแต่ละช่วงความยาวของสายส่งซึ่งทำการเปลี่ยนค่าจาก 0.1 ถึง 0.9 ของความยาวสายส่งหนึ่งหน่วย ปริมาณความต้านทานการลัดวงจรจะทำการเปลี่ยนค่าจาก 1Ω ถึง 5Ω เพื่อดูผลกระทบของความต้านทานการลัดวงจรในแต่ละกรณี

5.5.0.1 ผลทดสอบกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์(ABCG)

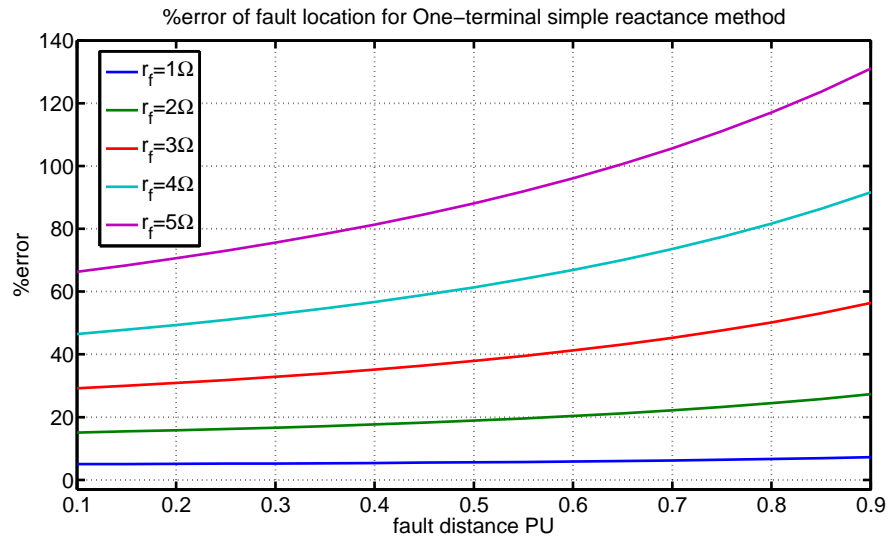


รูปที่ 5.16: ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ (ABCG)

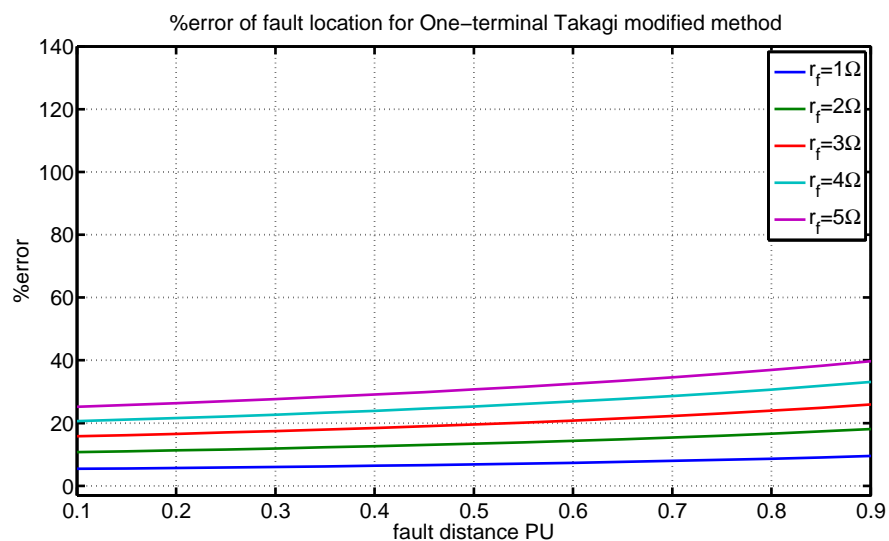
การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ใช้การจำลองการลัดวงจรดังแสดงในภาพ 5.16 ภาพที่ 5.17 แสดงผลของระเบียบวิธีที่นำเสนอ ผลความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 3% ตลอดความยาวสายส่ง ในทุกๆ ค่าของความต้านทานการลัดวงจร เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 130% และ 40% ในกรณีใช้ระเบียบวิธีมาตรฐาน และระเบียบวิธีมาตรฐานโดยคิดผลของโหลดตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 5.18 และ 5.19 ในกรณีระเบียบวิธีแบบสองปลายมาตรฐานให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.04% ถึง 0.023% ดังภาพ 5.20



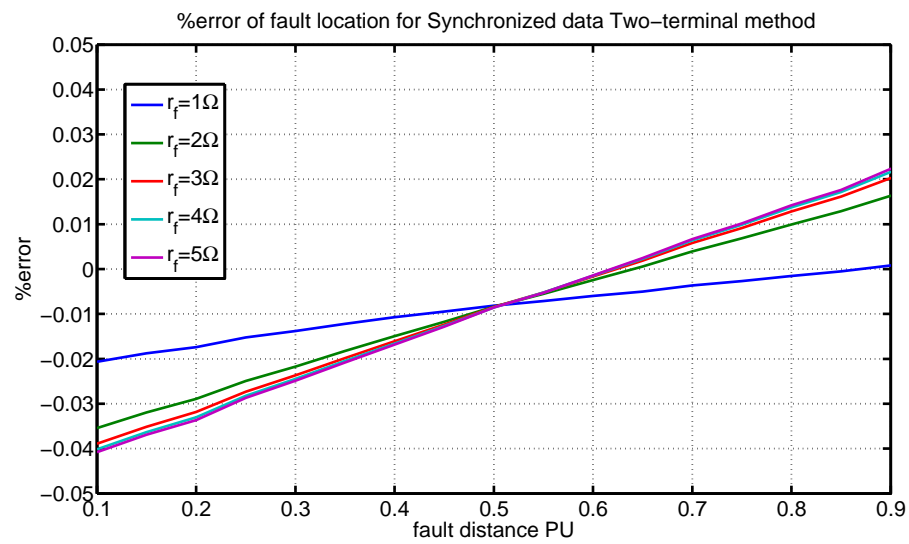
รูปที่ 5.17: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ (ABCG)



รูปที่ 5.18: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ (ABCG)

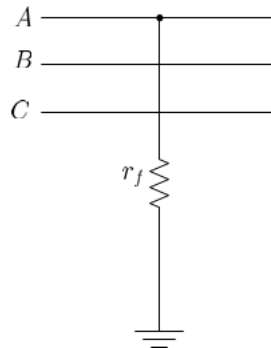


รูปที่ 5.19: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลย์ (ABCG)



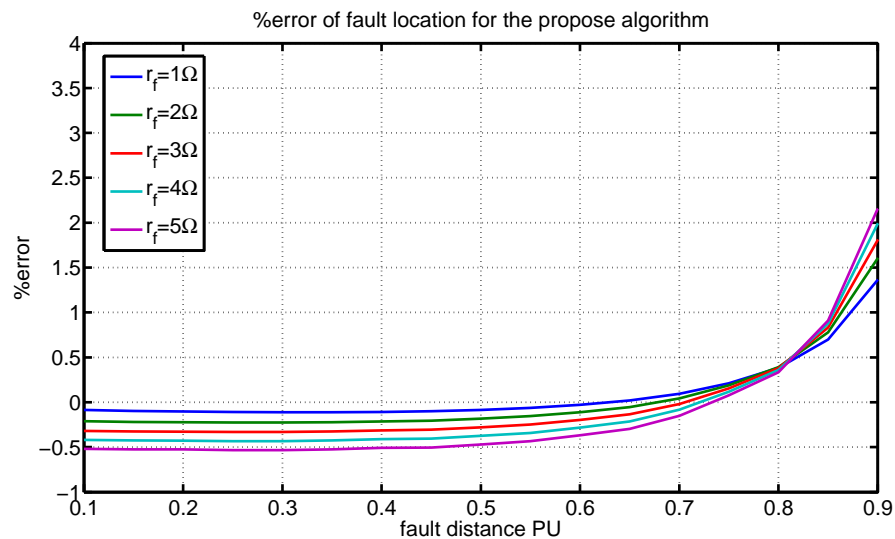
รูปที่ 5.20: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ (ABCG)

5.5.0.2 ผลทดสอบกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)

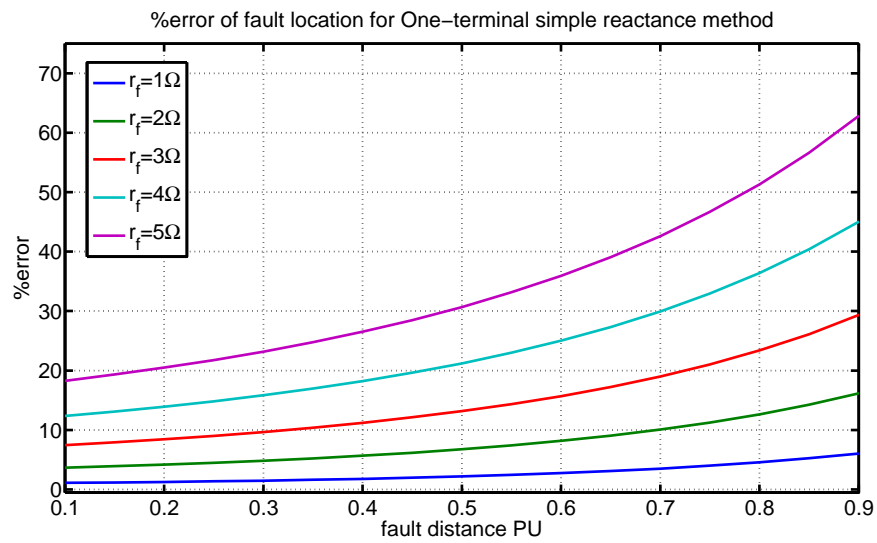


รูปที่ 5.21: ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (AG)

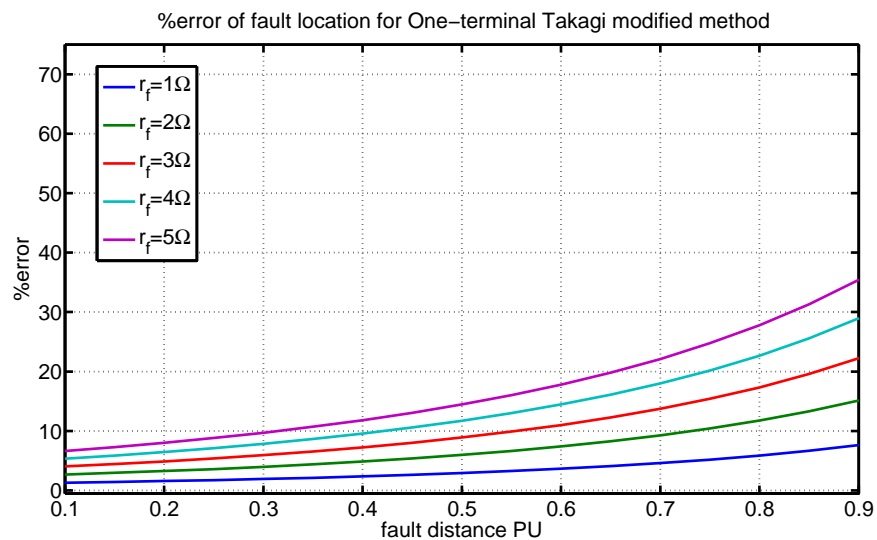
การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ใช้การจำลองการลัดวงจรดังแสดงในภาพ(5.21) ภาพที่ (5.22) แสดงผลของระเบียบวิธีที่นำเสนอ ผลความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 2.3% ตลอดความยาวสายส่ง ในทุกๆ ค่าของความต้านทานการลัดวงจร เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 64% และ 38% ในกรณีใช้ระเบียบวิธีมาตรฐาน และระเบียบวิธีมาตรฐานโดยคิดผลของโหลดตามลำดับ ดังแสดงในภาพ (5.23) และ(5.24) ในกรณีระเบียบวิธีแบบสองปลายมาตรฐานให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.04% ถึง 0.01% ดังภาพ(5.25)



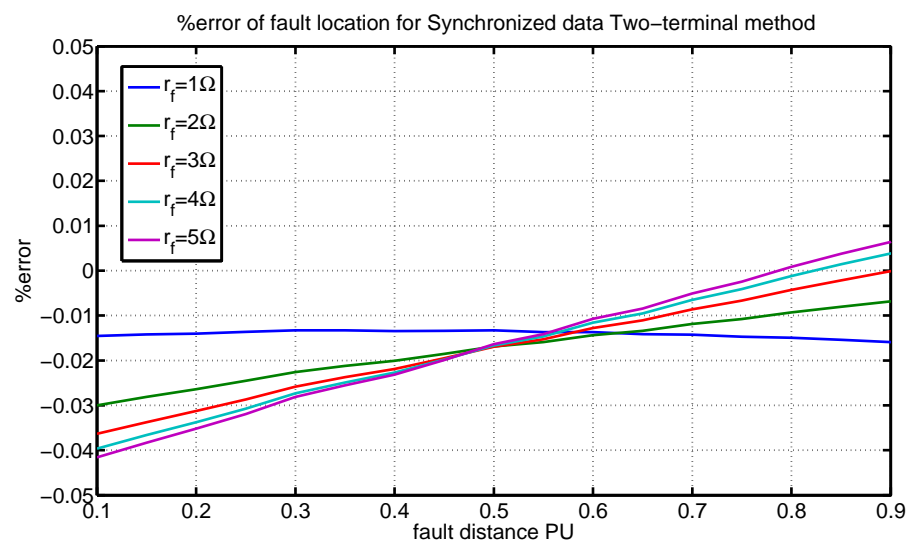
รูปที่ 5.22: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)



รูปที่ 5.23: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)

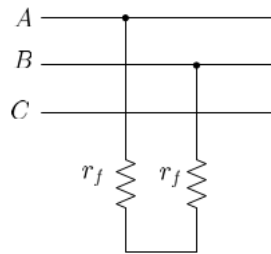


รูปที่ 5.24: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)



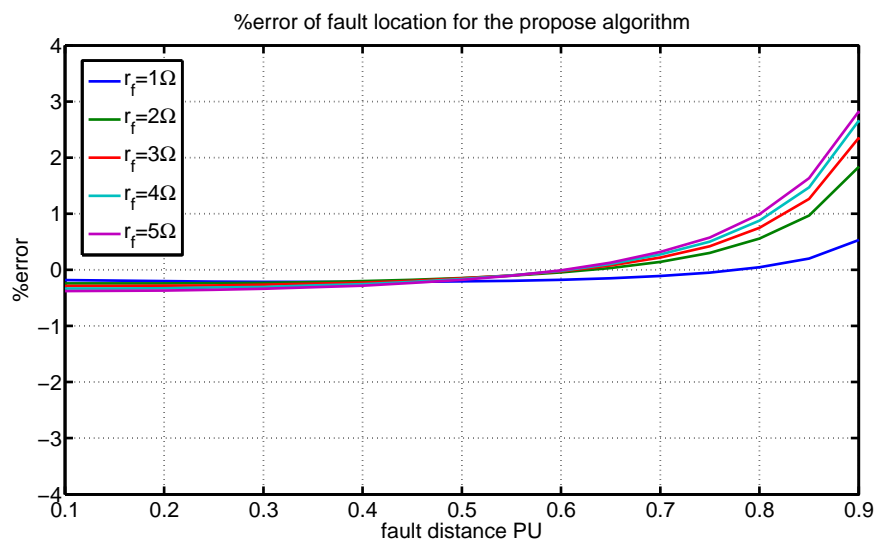
รูปที่ 5.25: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน(AG)

5.5.0.3 ผลทดสอบกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)

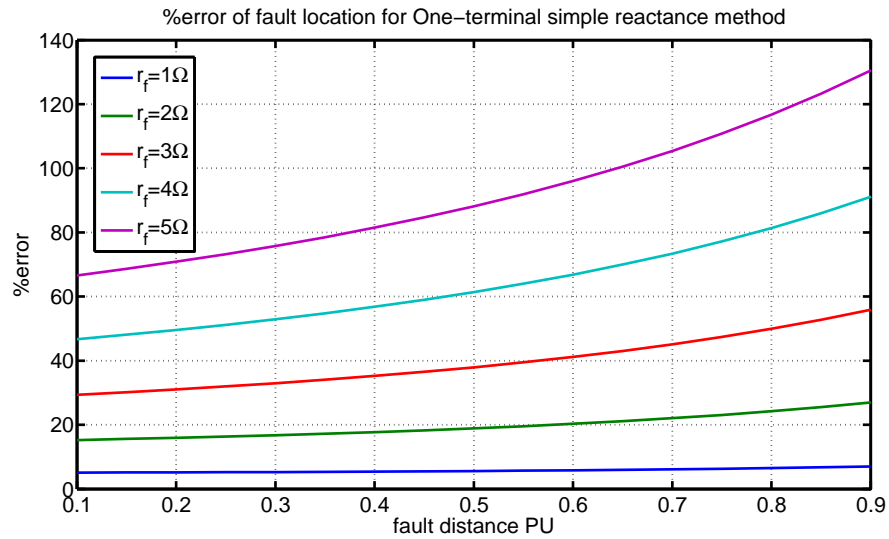


รูปที่ 5.26: ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสองเฟส (AB)

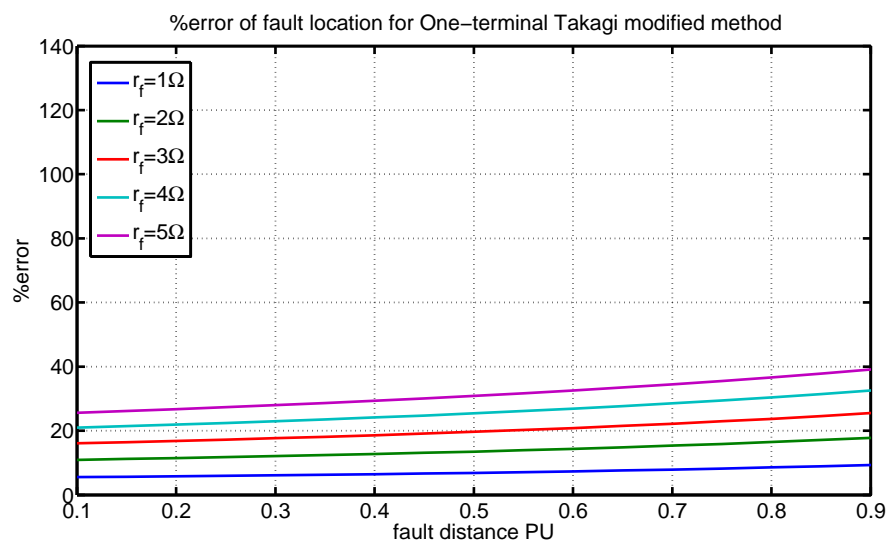
การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ใช้การจำลองการลัดวงจรดังแสดงในภาพ(5.26) ภาพที่ (5.27) แสดงผลของระเบียบวิธีที่นำเสนอ ผลความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 2.8% ตลอดความยาวสายส่ง ในทุกๆ ค่าของความต้านทานการลัดวงจร เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 130% และ 40% ในกรณีใช้ระเบียบวิธีมาตรฐาน และระเบียบวิธีมาตรฐานโดยคิดผลของโหลดตามลำดับ ดังแสดงในภาพ (5.28) และ(5.29) ในกรณีระเบียบวิธีแบบสองปลายมาตรฐานให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.06% ถึง 0.04% ดังภาพ(5.30)



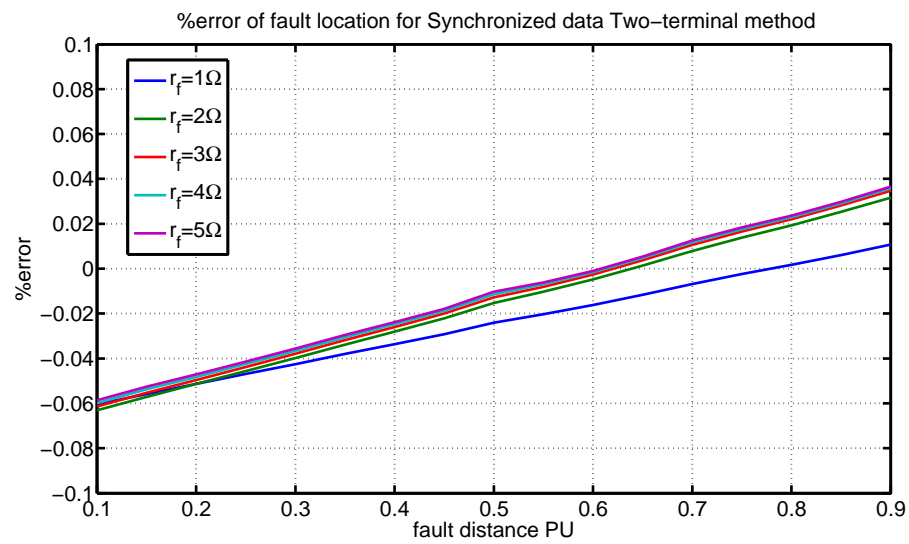
รูปที่ 5.27: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)



รูปที่ 5.28: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดียวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)

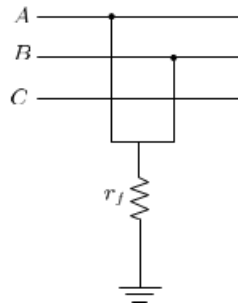


รูปที่ 5.29: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดียวโดยคิดผลของกระแสไหล ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)



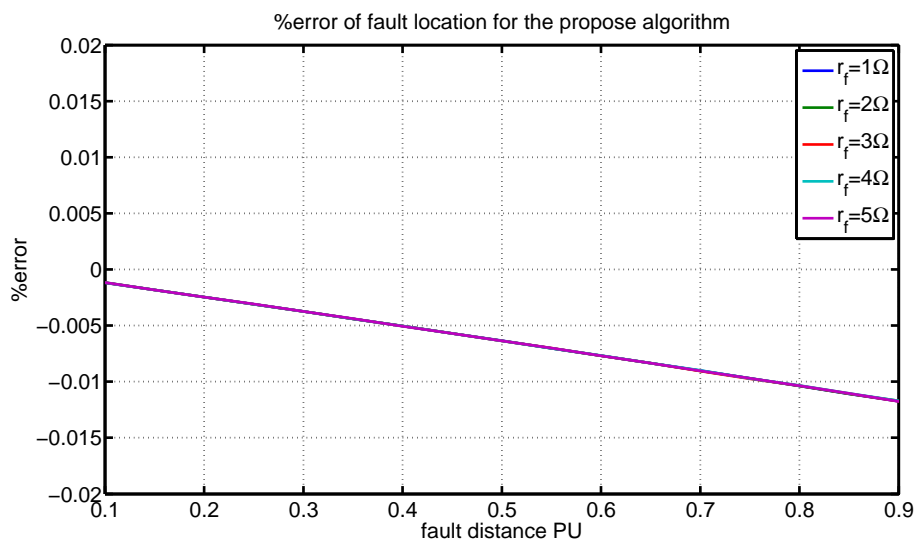
รูปที่ 5.30: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(AB)

5.5.0.4 ผลทดสอบกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส(ABG)

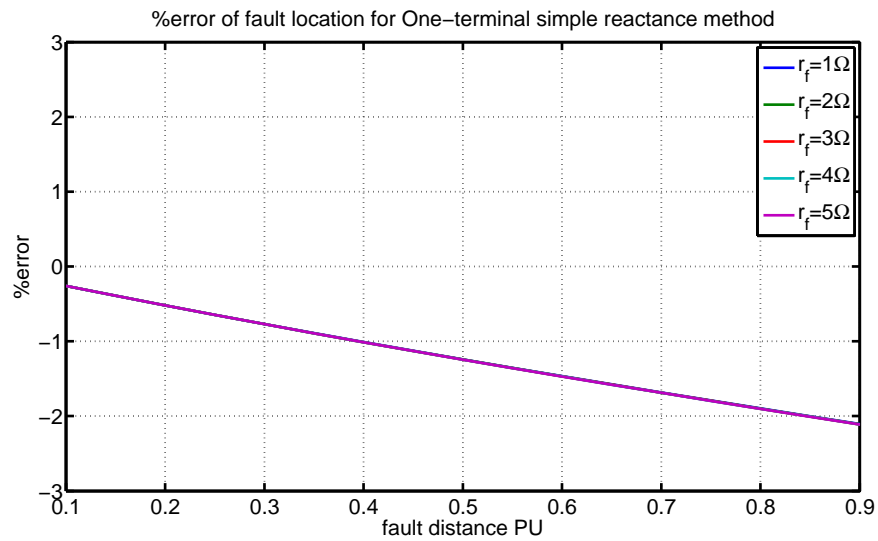


รูปที่ 5.31: ลักษณะการลัดวงจรที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (ABG)

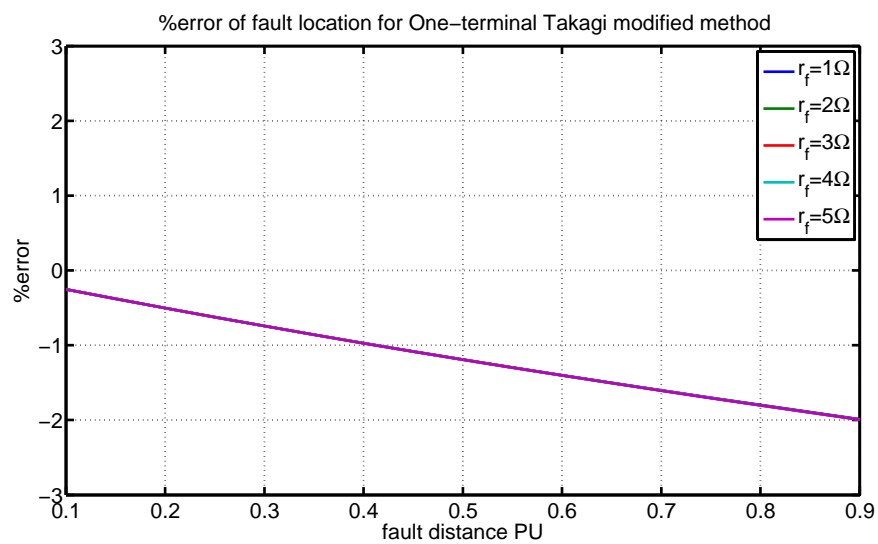
การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลย์ใช้การจำลองการลัดวงจรดังแสดงในภาพ(5.31) ภาพที่ (5.32) แสดงผลของระเบียบวิธีที่นำเสนอ ผลความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน -0.012% ตลอดความยาวสายส่ง ในทุกๆ ค่าของความต้านทานการลัดวงจร เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง -2.1% และ 2.1% ในกรณีใช้ระเบียบวิธีมาตรฐาน และระเบียบวิธีมาตรฐานโดยคิดผลของโหลดตามลำดับ ดังแสดงในภาพ (5.33) และ(5.34) ในกรณีระเบียบวิธีแบบสองปลายมาตรฐานให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.25% ถึง 0.1% ดังภาพ(5.35)



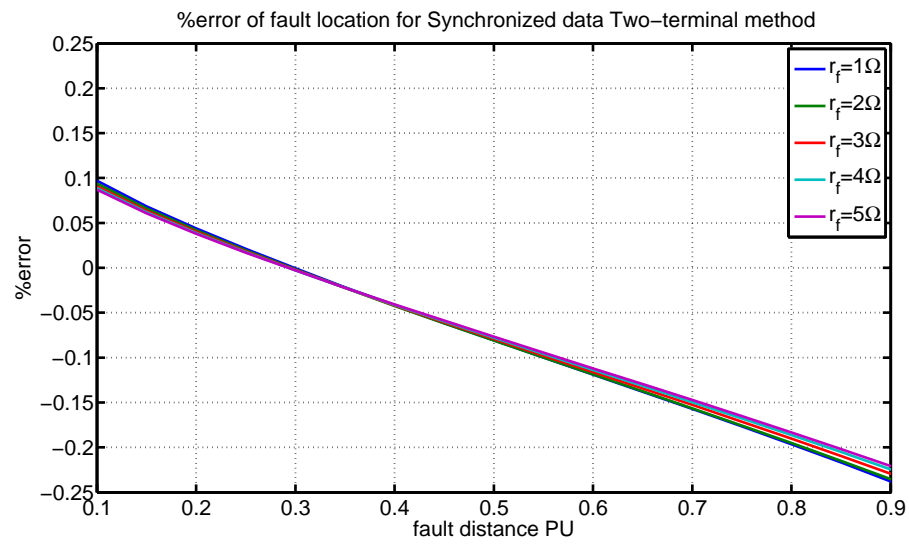
รูปที่ 5.32: ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี ที่นำเสนอ ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)



รูปที่ 5.33: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)



รูปที่ 5.34: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบปลายเดี่ยวโดยคิดผลของกระแสไหลด ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)



รูปที่ 5.35: ค่าความคาดเคลื่อนที่ได้จากวิธี แบบสองปลายมาตรฐาน ในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน(ABG)

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ นำเสนอผลการทดลองที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแม่นยำในการหาระยะลัดวงจรโดยใช้ขั้นตอนวิธีมาตรฐานมีดังนี้คือ

- ความต้านทานการลัดวงจรในกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียว
- ระยะการลัดวงจรกับตำแหน่งวัดข้อมูลในกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียว
- การจำแนกประเภทการลัดวงจรในกรณีการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียว
- ความคลาดเคลื่อนทางเวลาของข้อมูลนำมาใช้ในการคำนวณการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลาย

จะพบว่าในกรณีการคำนวณแบบปลายเดียวมาตรฐานค่าความต้านทานการลัดวงจรมีผลมากต่อความแม่นยำของการคำนวณตำแหน่งลัดวงจรกล่าวคือ หากความต้านทานมีค่ามาก ความแม่นยำในการหาตำแหน่งลัดวงจรจะมีน้อย เนื่องจากการคำนวณการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวมาตรฐานได้ละเอียด ผลของความต้านทานการลัดวงจรไปโดยการสมมุติว่าแรงดันที่ตำแหน่งลัดวงจรมีค่าเป็นศูนย์

ในกรณีตำแหน่งลัดวงจรใกล้กับปลายที่บันทึกข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะมีความแม่นยำมากกว่าในกรณีที่ตำแหน่งวัดห่างออกจากตำแหน่งที่มีข้อมูลวัด ทั้งนี้เนื่องมาจากกระแสลัดวงจรปลายที่บันทึกข้อมูลที่มีตำแหน่งลัดวงจรใกล้จะจ่ายกระแสลัดวงจรมากกว่าปลายไกล ดังนั้นมุมของกระแสป้อนที่วัดกับ กระแสลัดวงจรจะมีค่าใกล้เคียงกันทำให้การอนุมานว่า ส่วนเสมือนของแรงดันลัดวงจรหารด้วยกระแสป้อนมีค่าเป็นศูนย์ใกล้เคียงความเป็นจริง

ในกรณีการคำนวณการลัดวงจรแบบปลายเดียวจำเป็นต้องอาศัยประเภทของการลัดวงจรเพื่อเลือกขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการหาตำแหน่งลัดวงจร ดังนั้นจะพบว่าหาก การจำแนกการลัดวงจรผิดพลาดจะส่งผลให้การคำนวณตำแหน่งลัดวงจรมีความผิดพลาดไปด้วย

ในกรณีมีข้อมูลสองปลายหากข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนกันทางเวลามากความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งลัดวงจรจะต่ำเนื่องจากข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณมาจากคนละช่วงเวลากัน และในกรณีที่ข้อมูลสองปลายมีความคลาดเคลื่อนทางเวลาเท่ากันแต่มีความต้านทานการลัดวงจรต่างกัน กรณีที่มีความต้านทานการลัดวงจรสูงจะทำให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งลัดวงจรลดลง

อย่างไรก็ตามจากการทดลองจะเห็นว่าหากมีข้อมูลสองปลายและข้อมูลสองปลายตรงกันทางเวลาจะทำให้ตำแหน่งลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณแบบสองปลายมีความแม่นยำสูง ในกรณีที่ข้อมูลแบบปลายเดียวการชดเชยผลของกระแสไหลด้วยปริมาณกระแสก่อนเกิดการลัดวงจรจะช่วยให้ ความแม่นยำเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีไม่มีการชดเชยผลของไหล

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวโดยใช้ข้อมูลบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับการประเภทของการลัดวงจรและใช้เพียงค่าแรงดันและกระแส เชิงลำดับบวกเท่านั้นซึ่งได้เปรียบขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวที่ต้องอาศัยประเภท

ของการลัดวงจร และการประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าอย่างไรก็ตามผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของข้อมูลบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ที่มี

ในส่วนของการทำงานตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายได้นำเสนอแนวทางการใช้เวฟเลทมาช่วยในการชดเชยความคลาดเคลื่อนทางเวลาโดยทำการกรองหาเฉพาะส่วนประกอบความถี่สูง ของรูปคลื่นกระแสมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่เพื่อให้ได้เวลาที่เกิดการลัดวงจรแล้วทำการเลื่อนข้อมูลปลาย ที่ล้าหลังอยู่ให้ตรงกัน จะพบว่าทำให้ผลลัพธ์ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามความถี่สูงข้อมูลต่ำจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงดังนั้น ในกรณีความถี่สูงต่ำอาจใช้เป็นเพียงขั้นตอนวิธีในการช่วยลดความคลาดเคลื่อนทางเวลาและสามารถใช้ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบชดเชยมุมแบบวนซ้ำก็จะได้คำตอบที่แม่นยำขึ้น

เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาตำแหน่งลัดวงจร ขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลหลายปลายได้ถูกพัฒนาขึ้น ขั้นตอนวิธีนี้อาศัยข้อมูลที่วัดได้จากสายส่งเส้นที่ลัดวงจรหนึ่งปลายกับใช้ข้อมูลแวลล้อมอื่นในการหาแรงดันที่อีกปลายหนึ่งของสายส่งเส้นที่ลัดวงจร จะพบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำมากกว่าการหาตำแหน่งลัดวงจรแบบปลายเดียวมาก แต่มีความแม่นยำน้อยกว่าการคำนวณหาตำแหน่งลัดวงจรแบบสองปลายในกรณีที่ข้อมูลทั้งหมดที่นำมาคำนวณไม่มีความคลาดเคลื่อนทางเวลาเลยขั้นตอนวิธีนี้สามารถพัฒนาให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้โดยการปรับปรุงสมการจุดประสงค์

ในงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอระบบการหาความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติที่ได้มีการพัฒนาทั้งใน และต่าง ประเทศ ซึ่งมีแนวคิดในการรวบรวมข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่หลากหลายนำมาประมวลผลเพื่อให้ได้คำตอบ ที่ช่วยผู้ปฏิบัติการให้สามารถสรุปปัญหา และหาวิธีการแก้ไขได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามสิ่งที่จะขาดไม่ได้ในการใช้ข้อมูลจากหลายแหล่งก็คือความเข้ากันได้ของ ข้อมูลทั้งในแง่ของเวลา (time synchronization) และความถูกต้องในการวัดทั้งขนาด และเฟส ดังนั้นแนวคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพข้อมูล (supper calibrator) เป็นแนวคิดที่มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้การวิเคราะห์แบบอัตโนมัติมีความถูกต้องและแม่นยำซึ่งจำเป็นจะต้องพัฒนาต่อยอดในอนาคต

โครงสร้างพื้นฐานของระบบวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอ ซึ่งจะเห็นว่ามีส่วนรับข้อมูลจากเครื่องมือวัดและแปลงให้อยู่ในภาพแบบมาตรฐาน และเก็บลงฐานข้อมูลกลาง โปรแกรมประยุกต์ในการวิเคราะห์ต่างๆ สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้อย่างไม่จำกัดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลในฐานข้อมูลกลางว่ามีความหลากหลายและมากเพียงพอหรือไม่

สุดท้ายได้นำเสนอระเบียบวิธี ในการหาระยะเวลา การเกิด การลัดวงจร แบบปรับค่าได้ เพื่อให้การหาระยะลัดวงจรมีความแม่นยำขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

แนวทางในการทำงานวิจัยต่อไป จะเห็นว่าแนวคิดในการนำระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับการหาตำแหน่งลัดวงจรในกรณีที่มีข้อมูลหลายปลายสามารถเพิ่ม ปริมาณไม่ทราบค่าได้เพิ่มเติม เช่น มุมของการชดเชยเวลา ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่จำเป็นต้องมีความเข้ากันได้เชิงเวลาโดยการเพิ่มสมการช่วงก่อนเกิดการลัดวงจรเข้าไป หรือการที่มีข้อมูลหลายจุดสามารถ ใช้ยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือวัดซึ่งสามารถเพิ่มเติมสมการเข้าไปในเทคนิคการ

หาค่าเหมาะสมได้

เนื่องจากปริมาณเครื่องมือวัดในระบบมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นมากดังนั้นแนวคิด เรื่องการวัดในวงกว้าง (wide area monitoring) จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการประมาณค่าสถานะ (state estimation) ของระบบซึ่งสามารถพัฒนาต่อ เพื่อให้สามารถหา Z_{bus} ณ เวลาจริงได้ ซึ่งจะส่งผลให้การหาระยะลัดวงจรแบบปลายเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} สามารถนำไปใช้งานได้จริงซึ่งจะลดความยุ่งยากของขั้นตอนวิธีได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามอย่างที่กล่าวไปแล้วข้างต้นแนวคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลจะทวีความสำคัญเป็นอย่างมากในอนาคต

ในปัจจุบันระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตมีปริมาณข้อมูลมากถึง 1 เทอราไบต์ต่ออาทิตย์ดังนั้นหากจำนวนเครื่องมือวัดจำนวนมาก ถูกติดตั้งเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า อีกทั้งเครื่องมือวัดสมัยใหม่มีแนวโน้มที่จะมีความละเอียดสูงขึ้น (bit data ปัจจุบันอยู่ที่ 12-16 bits ขึ้นอยู่กับ class ของเครื่องมือวัด) ส่งผลให้จำเป็นต้องมีระบบคัดกรองและจัดการข้อมูลที่ดี ดังนั้นระบบจัดการฐานข้อมูล เทคโนโลยีการบีบอัดข้อมูล ตลอดจนข้อตกลงในการสื่อสารข้อมูล (protocol) เช่น มาตรฐาน IEC61850 [39] เป็นสิ่งจำเป็นต่อระบบวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (AFA) เป็นอย่างมากซึ่งผู้พัฒนาระบบจะต้องเตรียมความพร้อมทำความเข้าใจกับเทคโนโลยีเหล่านี้ต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon. Fault Data Synchronization Using Wavelet for Improving Two-terminal Fault Location Algorithm, APPEEC 2010
- [2] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon. Effects of R_f and Data Sampling Rate on Performance of One-terminal and Two-terminal Fault Location Algorithm EECON 2009
- [3] IEEE Std C37.114-2004, IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines
- [4] Takagi, et al. Development of a New Fault Locator Using the One-terminal Voltage and Current Data IEEE Trans. Power Apparatus and System (August 1982):2892-2898.
- [5] Eriksson, L., M. Saha, and G.D. Rockfeller, An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed IEEE Trans. Power Apparatus and System (February 1985):424-436
- [6] D. Novosel, D.G. Hart, E. Udren, and A. Phadke, Accurate fault location using digital relays, ICPST Conference (October 1944):1120-1124
- [7] Calos Eduardo de Morais Pereira and Luiz Cera Zanetta Jr., An optimisation approach for fault location in transmission line using one terminal data Electrical Power & Energy System, ELSEVIER (January 2006):290-296
- [8] Zhen Yu Xu, G. Xu, Li Ran, S. Yu, and Q.X. Yang, A New Fault-Impedance Algorithm for Distance Relaying on a Transmission Line IEEE Transactions on Power Delivery (July 2010):1384-1392
- [9] Liao Y. and Kang N., Fault-Location Algorithms Without Utilizing Line Parameters Based on the Distributed Parameter Line Model IEEE Transactions Power Delivery (April 2009):579-584
- [10] Joe Air Jiang et. al., An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part I: Theory and Algorithms IEEE Transactions on Power Delivery (April 2000):486-492

- [11] M. Kezunovic and B. Perunicic, Automated Transmission Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling at Two Ends IEEE Transactions on Power Systems (February 1996):407-413
- [12] D. Novosel, D.G. Hart, E. Udren, and Garitty, Unsynchronized two-terminal fault location estimation IEEE Transaction Power Delivery (January 1996):130-138
- [13] Dalcagne, A.L., S.N., Zurn, H.H., and Seara, R., A Two-terminal Fault Location Approach Based on Unsynchronized Phasors International Conference on Power System Technology (2006)
- [14] Dalcastagne, A.L., Filho, S.N., Zurn, H.H., and Seara, R., An Iterative Two-Terminal Fault-Location Method Based on Unsynchronized phasors IEEE Transaction on Power Delivery (October 2008):2318-2329
- [15] Y. Liao and S. Elangovan. Unsynchronised two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution (November 2006):639-643
- [16] Liao Y. and Kezunovic M. Optimal Estimate of Transmission Line Fault Location Considering Measurement Errors IEEE Transaction on Power Delivery (July 2007):13335-1341
- [17] Yuan Liao, Algorithms for Power System Fault Location and Line parameter Estimation Thirty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory (2007):189-193
- [18] Liao Y. Algorithm for Fault Location and Line Parameter Estimation Utilizing Voltage and Current Data During the Fault 40th Southeastern Symposium on System Theory (2008):183-187
- [19] Girgis, A.A., Hart, D.G., and Peterson, W.L.A., new fault location technique for two and three terminal lines IEEE Transaction on Power Delivery (January 1992):98-107
- [20] Chih-Wen Liu, Kai-Ping Lien, Ching-Shan Chen, Joe-Air Jiang A Universal Fault Location Technique for N-Terminal ($N \geq 3$) Transmission Lines IEEE Transactions on Power Delivery (2008):1366-1373
- [21] Ying-Hong Line, Chih-Wen Liu, and Chi-Shan Yu A, new Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines-Using Two-Terminal Synchronized Voltage and

- Current Phasors IEEE Transactions on Power Delivery (April 2002):452-459
- [22] IEEE Std. C37.111-1999 IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, (March 1999)
- [23] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, มาตรฐาน แบบ ระบบ ควบคุม และ ป้องกัน สถานะ ไฟฟ้าแรงสูง, (มีนาคม 2550)
- [24] จิรายุทธ์ กิตติจันทร์รัตน, การวิเคราะห์อุปกรณ์ผิดปกติพร้อมบนเครือข่ายระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ, วิทยานิพนธ์ปริญมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553
- [25] Mladen Kezunovic, B. Drazenovic, Fault Location, In John G. Webster, Editor, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering ,pp.276-285.
- [26] M. Kezunovic, I. Rikalo, Automating the Analysis of Faults and Power Quality IEEE Computer Applications in Power (January 1999):46-50
- [27] M. Kezunovic, T. Popovic, Developing Future Substation Automation Strategies Selecting Appropriate IEDs and Developing New Applications International Energy Journal, Special Issue, Cogeneration, Distributed Generation, Distribution System and Power Quality ,and DSM and Energy Efficiency (June 2005):3-151-3-162
- [28] C.Zheng, Y. Dong, O.Gonen, and M. Kezunovic Data Integration Used in New Applications and Control Center Visualization Tools IEEE PES General Meeting, Minneapolis, USA (July 2010)
- [29] Meliopoulos A.P.S., Cokkinides G.J., Galvan F., Fardanesh B., Myrda P., Advances in the SuperCalibrator Concept - Practical Implementations System Sciences, 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS (2007)
- [30] A.P. Sakis Meliopoulos, George J. Cokkinides, Floyd Galvan, Bruce Fardanesh and Paul Myrda, Delivering Accurate and Timely Data to All Model-Based Substation Automation Applications for Advanced Data Availability IEEE power & energy magazine (May/June 2007):74-86
- [31] รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบวิเคราะห์และรายงานผลเหตุขัดข้องในระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบอัตโนมัติโดยการแปลงและรวบรวมข้อมูลจากระบบบันทึกเหตุขัดข้องของ กฟผ., ศูนย์ผู้เชี่ยวชาญ พิเศษ เฉพาะ ด้าน เทคโนโลยี ไฟฟ้า กำลัง, คณะ วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 3 สิงหาคม 2552

- [32] Mladen Kezunovic Intelligent Design Substation Data Integration for Enhanced Asset Management Opportunities IEEE power & energy magazine (November/December 2010):37-44
- [33] Balcerek P. and Izykowski J.Improved Unsynchronized two-end Algorithm for Locating faults in Power Transmission Lines IEEE Bologna PowerTech Conf. Bologna, Italy (June 2003)
- [34] ยสวินทร์ บุรีทาน, การเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทและตำแหน่งของการลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัลทั้งสองปลาย, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [35] Y. Bureetan and N. Hoonchareon.Examination of Iterative Two-End Fault Location Algorithm Performance Using Field Measurements from Digital Fault Recorders Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference (ECTI-CON 2010) (May 2010)
- [36] Z.X. HAN., Generalized Method of Analysis of Simultaneous Faults in Electric Power System IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems (Oct 1982)
- [37] Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M. and Saha M.M., Accurate Noniterative Fault-Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurement IEEE Transaction on Power Delivery (2010):72-80
- [38] Sameh Kamel Mena Kodsi, Claudion A. Canizares, Modeling and Simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS Controllers, Technical Report (2003)
- [39] กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์, มาตรฐาน IEC61850 เบื้องต้น, 2554

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

วุฒิกกร ตรีวิธานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทรเดชา สิงห์สงเสนี ในปี พ.ศ. 2531 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ จนสำเร็จหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในปี พ.ศ. 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ จนสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2553

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

[1] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., Effects of R_f and Data Sampling Rate on Performance of One-terminal and Two-terminal Fault Location Algorithm. EECON 2009.

[2] Yossawin Bureetarn, Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., Improvement of Fault Classification Algorithm for Transmission System Using Sequence Components., EECON2009

[3] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., Fault Data Synchronization Using Wavelet for Improving Two-terminal Fault Location Algorithm., ASPES2009.

[4] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., Fault Data Synchronization Using Wavelet for Improving Two-terminal Fault Location Algorithm., APPEEC 2010.

[5] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., State Estimation Based Enhanced One-terminal Algorithm for Fault Location in Transmission Network., APAP2011

[6] Wutthikorn Threevithayanon and Naebboon Hoonchareon., Accurate One-terminal Fault Location Algorithm Based on The Principal of Short Circuit Calculation., IEEJ2011