

การระบุตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งโดยพิจารณาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจบบน  
โครงข่ายระบบส่ง

นายธนภัทร์ โชติพรหม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

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.

Line Fault Location Considering Mutual Coupling between Circuits on Transmission  
Networks

Mr. Thanapat Chotprom

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การระบุตำแหน่งความผิดพร้อมบนสายส่งโดยพิจารณาผล  
ของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรบนโครงข่ายระบบส่ง

โดย

นายธนภัทร์ โชติพรหม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์.ดร. ชานูณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. วุฒิกิจ ตรีวิทยานนท์)

ธนภัทร์ โชติพิพรหม : การระบุตำแหน่งความผิดปกติของบนสายส่งโดยพิจารณาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรบนโครงข่ายระบบส่ง. (LINE FAULT LOCATION CONSIDERING MUTUAL COUPLING BETWEEN CIRCUITS ON TRANSMISSION NETWORKS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ, 81 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อความแม่นยำของการระบุตำแหน่งผิดปกติในระบบส่ง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ข้อมูลปลายเดียวและประเภทที่ใช้ข้อมูลสองปลาย ทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบจำลองที่ทำการแปรค่าประเภทความผิดปกติ ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ และอิมพีแดนซ์ความผิดปกติ โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transient Program – Electromagnetic Transient Program) และใช้ข้อมูลจากระบบส่งจริง การวิเคราะห์ผลใช้วิธีเปรียบเทียบระยะความผิดปกติที่คำนวณได้กับระยะความผิดปกติจริง เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งผิดปกติโดยใช้ขั้นตอนวิธีมาตรฐานและขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ผลการศึกษาพบว่า การคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะทำให้การระบุตำแหน่งผิดปกติแบบสองปลายแม่นยำขึ้นทุกประเภทความผิดปกติ ส่วนการระบุตำแหน่งผิดปกติแบบปลายเดียวจะแม่นยำขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะกรณีที่เป็นความผิดปกติแบบ 1 สายลงดิน ดังนั้น ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งผิดปกติควรคำนึงถึงรูปแบบของสายส่ง ประเภทความผิดปกติ ข้อมูลสายส่ง และข้อมูลที่ได้จากการวัด นอกจากนี้ ในวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรลำดับศูนย์ โดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติ โดยการใช้สมมติฐานว่าสายส่งทั้งสองวงจรสมมาตรกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

# # 5570217221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LINE FAULT LOCATION / MUTUAL COUPLING/ PARALLEL CIRCUITS  
/ FIELD MEASUREMENT DATA/ TRANSMISSION NETWORK

THANAPAT CHOTPROM: LINE FAULT LOCATION CONSIDERING MUTUAL  
COUPLING BETWEEN CIRCUITS ON TRANSMISSION NETWORKS.  
ADVISOR: ASST.PROF.NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 81 pp.

This thesis studies impacts of mutual coupling between circuits on line fault location in a transmission system. The study is separated into one-terminal and two-terminal fault locations. Test with simulated data and field measurement data are performed, employing ATP-EMTP (Alternative Transient Program – Electromagnetic Transient Program) for the former case by varying fault types, fault locations and fault impedances. The improved accuracy for single line to ground faults in case of the one-terminal algorithms and the improved accuracy for all fault types in case of the two-terminal algorithms have been verified by comparing to those obtained from the standard one-terminal algorithm and the standard two-terminal fault location algorithm, respectively. Hence, the fault algorithms have to consider line configuration, fault type, line data and measurement data. Additionally, this thesis proposes a method for verifying line parameters and zero sequence mutual impedance using during fault voltages and currents, assuming that the double circuits line are symmetric.

Department : Electrical Engineering Student's Signature: .....

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature: .....

Academic Year: 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบของพระคุณสำหรับคำแนะนำต่างๆอันมีประโยชน์ยิ่งของ ผศ.ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ นอกจากอาจารย์จะให้คำแนะนำต่างๆอันมีประโยชน์ยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาจารย์ยังสร้างแรงกระตุ้น แรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย ทำให้ผมตระหนักได้ว่า การทำงานวิจัยที่ดีนั้นไม่ใช่เพียงแค่ทำให้เสร็จ ได้ผลตามต้องการ แต่จะต้องมีการพัฒนางานนั้นๆให้ดียิ่งๆขึ้นไป อีกทั้งการคำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินชีวิต ซึ่งเป็นสิ่งที่อยู่นอกเหนือภาระหน้าที่ของอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ผศ.ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ และ ดร. วุฒิกกร ตริวิทยานนท์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบ และแก้ไขในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในวิชาเรียนที่เปิดสอน และให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ปัญหาที่เกี่ยวข้องของกับงานวิจัย

ขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาด้านความรู้ และข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้อง ปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบของพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับการสนับสนุน และกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 การระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายส่งตามวิธีมาตรฐาน .....	5
2.1 ขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียว.....	5
2.2 ขั้นตอนวิธีแบบสองปลาย.....	8
2.3 ขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่ดัดแปลงมาจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน.....	9
2.3.1 ขั้นตอนวิธีแบบใช้กระแสช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด.....	9
2.3.2 ขั้นตอนวิธีสองปลายที่ประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square.....	12
บทที่ 3 การระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายส่งโดยพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร.....	13
3.1 การคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร.....	13
3.2 ขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร.....	16

3.3	ขั้นตอนวิธีแบบสองปลายที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร.....	25
บทที่ 4	การศึกษาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพร่อง.....	31
4.1	ระบบทดสอบและวิธีการทดสอบ.....	31
4.1.1	การสร้างแบบจำลองสายส่งไฟฟ้าโดยใช้ ATP-EMTP.....	31
4.1.2	การจำลองความผิดพร่อง.....	33
4.1.3	การคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรโดยใช้ ATP-EMTP .....	36
4.1.4	การวิเคราะห์ผล.....	39
4.2	การทดสอบความแม่นยำ.....	41
4.2.1	ขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีปลายเดียว.....	41
4.2.2	ขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีสองปลาย.....	42
บทที่ 5	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	44
5.1	ผลการทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีปลายเดียว.....	44
5.1.1	ผลการทดสอบโดยใช้ค่าจากระบบจำลอง.....	42
5.1.2	ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง.....	52
5.2	ผลการทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีสองปลาย.....	55
5.2.1	ผลการทดสอบโดยใช้ค่าจากระบบจำลอง.....	55
5.2.2	ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง.....	57
5.3	การประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้ข้อมูลขณะเกิดความผิดพร่อง.....	59
5.3.1	การประมาณค่าอิมพีแดนซ์สายส่งลำดับบวกและลำดับลบ.....	59
5.3.2	การประมาณค่าอิมพีแดนซ์สายส่งลำดับศูนย์และอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์.....	61
บทที่ 6	บทสรุป.....	64
6.1	สรุป.....	64



6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก. ตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับสมการคำนวณความผิดพลาดแต่ละประเภท.....	72
ภาคผนวก ข. สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วม	
ระหว่างวงจรสำหรับสายส่งแบบ 3 วงจร.....	76
ภาคผนวก ค. สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วม	
ระหว่างวงจรสำหรับสายส่งแบบ 4 วงจร.....	78
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมการสำหรับคำนวณตำแหน่งความผิดพร่องแบบรีแอกแทนซ์อย่างง่าย.....	7
3.1	สัมประสิทธิ์แบ่งส่วนสำหรับคำนวณกระแสและแรงดันองค์ประกอบสมมาตร....	20
3.2	ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณกระแสผิดพร่อง.....	24
5.1	ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งผิดพร่องแบบปลายเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลจากระบบ ส่งจริง.....	53
5.2	ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งผิดพร่องแบบสองปลายโดยใช้ข้อมูลจากระบบ ส่งจริง.....	58
6.1	สรุปผลการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความผิดพร่องประเภท ต่างๆ.....	65
6.2	สรุปเงื่อนไขสำหรับการใช้ขั้นตอนวิธีปลายเดี่ยวแบบต่างๆ.....	66
6.3	สรุปเงื่อนไขสำหรับการใช้ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบต่างๆ.....	67

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของสายส่งแบบวงจรเดี่ยว.....	5
2.2 วงจรสมมูลจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Thevenin .....	10
3.1 แบบจำลองสายส่งแบบ 3 เฟส 2 วงจรขนานกันบนเสาไฟฟ้า 1 ต้น.....	14
3.2 วงจรสมมูลของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน.....	16
3.3 วงจรสมมูลลำดับบวกของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการเหนี่ยวนำ ร่วมระหว่างวงจร.....	17
3.4 วงจรสมมูลลำดับลบของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการเหนี่ยวนำ ร่วมระหว่างวงจร.....	17
3.5 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการ เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร.....	17
3.6 วงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด.....	21
3.7 วงจรสมมูลลำดับลบสำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด.....	22
3.8 วงจรสมมูลลำดับศูนย์สำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด.....	22
3.9 วงจรสมมูลแบบ $\pi$ ลำดับบวก.....	26
3.10 วงจรสมมูลแบบ $\pi$ ลำดับลบ.....	26
3.11 วงจรสมมูลแบบ $\pi$ ลำดับศูนย์.....	27
4.1 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าสำหรับโครงข่ายระบบส่งไฟฟ้าในประเทศไทย.....	31
4.2 ก่อตั้งได้ตอบสำหรับวัตถุ LCC ในหน้าต่างรูปแบบวงจร.....	32
4.3 ก่อตั้งได้ตอบสำหรับวัตถุ LCC ในหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำ.....	33
4.4 แผนภาพแสดงเงื่อนไขการจำลองการเกิดความผิดพลาด.....	34
4.5 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน (A-G).....	35
4.6 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 2 เฟส (A-B).....	35
4.7 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน (A-B-G).....	36
4.8 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 3 เฟส (A-B-C).....	36
4.9 ก่อตั้งได้ตอบสำหรับการทดสอบข้อมูลโดยใช้ PFC .....	37
4.10 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์โดย PFC.....	37

ภาพที่	หน้า
4.11 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างโดยฟังก์ชัน Line Check.....	39
4.12 แผนภาพสรุปการดำเนินการในส่วนระบบทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	40
5.1 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน, $R_F = 1\Omega$ .....	44
5.2 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน, $R_F = 10\Omega$ .....	45
5.3 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน, $Z_F = 5\angle 65^\circ \Omega$ .....	45
5.4 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส, $R_F = 1\Omega$ .....	46
5.5 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส, $R_F = 10\Omega$ .....	47
5.6 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส, $Z_F = 5\angle 65^\circ \Omega$ .....	47
5.7 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน, $R_F = 1\Omega$ .....	48
5.8 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน, $R_F = 10\Omega$ .....	49
5.9 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน, $Z_F = 5\angle 65^\circ \Omega$ .....	49
5.10 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส, $R_F = 1\Omega$ .....	50
5.11 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส, $R_F = 10\Omega$ .....	51
5.12 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส, $Z_F = 5\angle 65^\circ \Omega$ .....	51
5.13 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริงกรณีความผิดพลาดแบบ 1 สายลงดิน.....	54

ภาพที่		หน้า
5.14	ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 1 เฟส ลงดิน.....	55
5.15	ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 2 เฟส..	56
5.16	ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 2 เฟส ลงดิน.....	56
5.17	ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 3 เฟส..	57
5.18	ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง.....	58
5.19	วงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่ง.....	60
5.20	วงจรสมมูลลำดับลบสำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่ง.....	61
5.21	วงจรสมมูลลำดับศูนย์สำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่ง.....	61
ก. 1	วงจรองค์ประกอบสมมาตรสำหรับความผิดพลาดแบบ A-G.....	72
ข. 1	วงจรความผิดพลาดสำหรับสายส่งแบบ 3 วงจร.....	76
ค. 1	วงจรความผิดพลาดสำหรับสายส่งแบบ 4 วงจร.....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นระบบที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ จากสถานที่หนึ่งไปยังอีกสถานที่หนึ่งเป็นระยะทางไกล ๆ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสายตัวนำเส้นหนึ่ง ๆ อาจส่งผลให้สายเส้นนั้นหรือทั้งวงจรไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะต้องแก้ไขปัญหาคความผิดปกติเหล่านั้นๆ เพื่อนำสายส่งกลับเข้าสู่ระบบโดยเร็วที่สุด

เมื่อเกิดความผิดปกติแบบถาวร(permanent fault) ในระบบส่งไฟฟ้าแรงสูงจากสาเหตุใดๆก็ตาม รีเลย์ในระบบป้องกันจะสั่งให้เบรกเกอร์ตัดสายส่งออกจากระบบ แล้วจะทดลองต่อสายส่งกลับเข้าระบบ 1 ครั้ง ถ้ายังคงมีความผิดปกติเกิดขึ้นอยู่ รีเลย์จะสั่งตัดสายส่งออกจากระบบอย่างถาวร และจะต้องส่งผู้ปฏิบัติการไปแก้ไข ณ จุดที่เกิดความผิดปกติ และเมื่อปัญหาถูกแก้ไขแล้วจึงจะสามารถส่งเริ่มใช้งานสายส่งได้อีกครั้งหนึ่ง ในอดีตการแก้ปัญหาความผิดปกติหลายๆครั้งยังไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม่ทราบตำแหน่งที่แม่นยำของความผิดปกติ ทำให้ผู้ปฏิบัติการหาจุดที่เกิดความผิดปกติไม่เจอ ดังนั้น การระบุตำแหน่งความผิดปกติที่แม่นยำจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ในทางปฏิบัติ การระบุตำแหน่งความผิดปกติจะอาศัยข้อมูลที่ถูกบันทึกจากอุปกรณ์บันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล(Digital Fault Recorders: DFRs) เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับขั้นตอนวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติแบบต่างๆ จากการศึกษางานวิจัยในอดีต พบว่าได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติไว้มากมาย แต่เนื่องจากสายส่งในระบบส่งไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนมากเป็นแบบสายส่ง 2 วงจรขนานกันบนเสาไฟฟ้า 1 ต้น นอกจากนี้ในบางเส้นทางยังมีสายส่งเป็นแบบ 3 หรือ 4 วงจรบนเสาไฟฟ้า 1 ต้นอีกด้วย จากลักษณะของสายส่งดังกล่าว ความแม่นยำของตำแหน่งผิดพร่องน่าจะได้รับผลกระทบ

จากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ดังนั้น ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจการระบุตำแหน่ง ความผิดพลาดที่พิจารณาผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. เพื่อตรวจสอบผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อความแม่นยำของการคำนวณ ตำแหน่งความผิดพลาด
2. ปรับปรุงขั้นตอนวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดโดยพิจารณาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. พิจารณาความผิดพลาดที่เกิดบนสายส่งไฟฟ้าทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรบน โครงข่ายระบบส่งของประเทศไทย โดยไม่พิจารณาการลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ภายใน สถานีไฟฟ้า
2. พิจารณาเฉพาะการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรในรูปอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำ
3. จำลองการเกิดความผิดพลาดบนระบบส่งไฟฟ้าโดยใช้ ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program)
4. ไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดความผิดพลาดมากกว่า 1 ตำแหน่งในเวลาเดียวกัน
5. ไม่พิจารณาความผิดพลาดแบบที่มีการพัฒนาประเภทของความผิดพลาด
6. ช่วงของการเกิดความผิดพลาดจะใช้วิธีเลือกโดยใช้สายตามนุษย์เพื่อจำกัดโอกาสเกิดความผิดพลาดในการเลือกช่วงดังกล่าว

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการทำการวิจัย มีขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตเพื่อพิจารณาแนวทางการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการระบุตำแหน่งผิดพ่วงให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น และในวิทยานิพนธ์นี้สนใจวิธีการปรับปรุงขั้นตอนระบุตำแหน่งความผิดพ่วงโดยวิธีการคำนวณผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร
2. ศึกษาเครื่องบันทึกความผิดพ่วงแบบดิจิทัลและการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึก
3. ศึกษาวิธีการใช้ ATP-EMTP เพื่อสร้างแบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าและจำลองการเกิดความผิดพ่วงบนระบบไฟฟ้า
4. ศึกษาวิธีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร
5. รวบรวมข้อมูลการเกิดความผิดพ่วงที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย
6. พัฒนาระบบการในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งผิดพ่วง
7. ทดสอบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งผิดพ่วงบนสายส่งด้วยวิธีมาตรฐาน และด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากระบบจำลอง
8. พัฒนาต่อยอดวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์สายส่งโดยอาศัยข้อมูลกระแสและแรงดัน
9. ทำการทดสอบกับข้อมูลความผิดพ่วงจริงที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้า
10. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
11. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งความผิดพ่วงที่แม่นยำมากขึ้น
2. สามารถนำขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งผิดพ่วงทั้งแบบปลายเดี่ยวและสองปลายที่ปรับปรุงแล้วไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบส่งไฟฟ้าจริงได้
3. สามารถสร้างสมการคำนวณค่าพารามิเตอร์สายส่งและค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรโดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดัน



## 1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบวิธีมาตรฐาน และขั้นตอนวิธีอื่นๆที่ประยุกต์มาจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน

บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรและระบุตำแหน่งผิดพลาดโดยพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

บทที่ 4 การศึกษาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด จะนำเสนอระบบทดสอบ และการทดสอบผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อการระบุตำแหน่งผิดพลาด โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่มีข้อมูลปลายเดียว และแบบที่มีข้อมูลสองปลาย

บทที่ 5 การประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้ข้อมูลขณะเกิดความผิดพลาด จะกล่าวถึงการวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สายส่ง ได้แก่ อิมพีแดนซ์ลำดับต่างๆ และอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์ โดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาด

บทที่ 6 นำเสนอบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

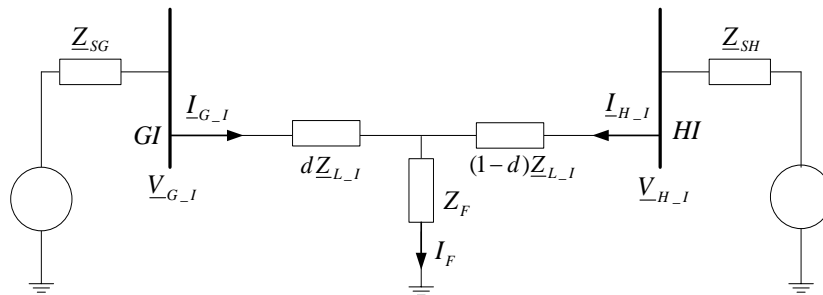
## บทที่ 2

### การระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายส่งตามวิธีมาตรฐาน

การระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายส่ง เป็นกระบวนการที่เน้นการระบุตำแหน่งความผิดพลาดเฉพาะกรณีที่เกิดขึ้นบนสายส่งอย่างแม่นยำมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งผิดพลาดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 เป็นขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐานที่อ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE C37.114 [1] ส่วนขั้นตอนวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 เป็นขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งผิดพลาดอื่นๆที่ประยุกต์มาจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานดังกล่าว

#### 2.1 ขั้นตอนวิธีปลายเดียว

ขั้นตอนวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบรีแอกแทนซ์อย่างง่าย เป็นขั้นตอนวิธีมาตรฐานใน IEEE C37.114 [1] สร้างขึ้นจากวงจรมุมูลที่มีสายส่งไฟฟ้า 1 วงจรบนเสาส่ง 1 ต้น และมีข้อมูลจากอุปกรณ์บันทึกความผิดพลาดแบบดิจิทัลจากเพียงปลายเดียว กล่าวคือ ในภาพที่ 2.1 จะกำหนดให้มีข้อมูลเฉพาะกระแสและแรงดัน  $I_{G-I}$  และ  $V_{G-I}$  เท่านั้น หรือสามารถกล่าวได้ว่า ขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถใช้ข้อมูลปลายเดียวในการคำนวณ และไม่มีการผิดพลาดการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ในวิทยานิพนธ์นี้ จะถือว่าผลการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดจากขั้นตอนวิธีดังกล่าวเป็นค่าระดับมาตรฐานสำหรับขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียว



ภาพที่ 2.1 วงจรมุมูลของสายส่งแบบวงจรเดียว

- โดยที่  $\underline{V}_{G-I}, \underline{V}_{H-I}$  คือ แรงดันที่วัดจากอุปกรณ์บันทึกปลายด้าน  $GI$  และ  $HI$   
 $\underline{V}_{G-II}, \underline{V}_{H-II}$  คือ แรงดันที่วัดจากอุปกรณ์บันทึกปลายด้าน  $GII$  และ  $HII$   
 $d$  คือ ระยะทางจากปลายด้าน G ถึงจุดที่เกิดความผิดปกติ (Per Unit: pu)  
 $\underline{Z}_{L-I}, \underline{Z}_{L-II}$  คือ อิมพีแดนซ์สายตัวนำของวงจร  $I$  และ  $II$   
 $\underline{Z}_{SG}, \underline{Z}_{SH}$  คือ อิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายปลายด้าน G และ H  
 $\underline{I}_{G-I}, \underline{I}_{H-I}$  คือ กระแสจากปลายด้าน G และ H ของวงจร  $I$   
 $\underline{I}_{G-II}, \underline{I}_{H-II}$  คือ กระแสจากปลายด้าน G และ H ของวงจร  $II$   
 $R_F$  คือ อิมพีแดนซ์ความผิดปกติ  
 $\underline{I}_F$  คือ กระแสความผิดปกติ

จากวงจรภาพที่ 2.1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตก(แรงดันตกบนสาย และแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ความผิดปกติ) กับแรงดันปลายด้าน G ได้ว่า

$$\underline{V}_{G-I} = d\underline{Z}_{L-I}\underline{I}_{G-I} + \underline{Z}_F\underline{I}_F \quad (2.1)$$

นำ  $\underline{I}_{G-I}$  หารสมการที่ 2.1 และจัดรูปใหม่ โดยใช้สมมติฐานว่าอิมพีแดนซ์ความผิดปกติมีลักษณะเป็น  $R_F$  จะได้สมการดังนี้

$$d\underline{Z}_{L-I} = \frac{\underline{V}_{G-I}}{\underline{I}_{G-I}} - \frac{R_F\underline{I}_F}{\underline{I}_{G-I}} \quad (2.2)$$

ใช้สมมติฐานว่ามุมเฟสของกระแส  $\underline{I}_{G-I}$  และ  $\underline{I}_F$  ตรงกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.2 เฉพาะส่วนจินตภาพ จะได้สมการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ ดังนี้

$$d = \frac{\text{imag}\left(\frac{\underline{V}_{G-I}}{\underline{I}_{G-I}}\right)}{\text{imag}\left(\underline{Z}_{L-I}\right)} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 ขั้นตอนวิธีที่แยกแทนชื่ออย่างง่ายจะมีความแม่นยำก็ต่อเมื่อ  $R_F = 0$  หรือมุมเฟสของกระแส  $\underline{I}_{G-I}$  กับ  $\underline{I}_F$  ตรงกัน [1-3]

สูตรการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับประเภทความผิดพลาด เนื่องจากใช้ค่ากระแสและแรงดันในการคำนวณต่างกันสำหรับความผิดพลาดแต่ละประเภท สูตรการคำนวณสำหรับความผิดพลาดประเภทต่างๆ เป็นดังนี้

$$d = \frac{\text{imag}\left(\frac{\underline{V}_{G-I}}{\underline{I}_{G-I}}\right)}{\text{imag}\left(\underline{Z}_{L-I}^1\right)} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\frac{\underline{V}_{G-I}}{\underline{I}_{G-I}}$  สำหรับแต่ละประเภทความผิดพลาด แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดแบบที่แยกแทนชื่ออย่างง่าย[13,14]

Fault type	$\underline{V}_{G-I}/\underline{I}_{G-I}$
A-G	$\underline{V}_{G-I}^A / (\underline{I}_{G-I}^A + k\underline{I}_R)$
B-G	$\underline{V}_{G-I}^B / (\underline{I}_{G-I}^B + k\underline{I}_R)$
C-G	$\underline{V}_{G-I}^C / (\underline{I}_{G-I}^C + k\underline{I}_R)$
A-B / A-B-G	$\underline{V}_{G-I}^{AB} / \underline{I}_{G-I}^{AB}$
B-C / B-C-G	$\underline{V}_{G-I}^{BC} / \underline{I}_{G-I}^{BC}$
C-A / C-A-G	$\underline{V}_{G-I}^{CA} / \underline{I}_{G-I}^{CA}$
A-B-C	สามารถใช้ค่าใดก็ได้ดังนี้ $\underline{V}_{G-I}^{AB} / \underline{I}_{G-I}^{AB}$ , $\underline{V}_{G-I}^{BC} / \underline{I}_{G-I}^{BC}$ , $\underline{V}_{G-I}^{CA} / \underline{I}_{G-I}^{CA}$

โดยที่

$$k = (\underline{Z}_{L-I}^0 - \underline{Z}_{L-I}^1) / 3\underline{Z}_{L-I}^1$$

$\underline{Z}_{L-I}^0, \underline{Z}_{L-I}^1$  คือ อิมพีแดนซ์สายตัวนำลำดับศูนย์และลำดับบวก

$\underline{I}_R$  คือ กระแสตกค้าง (residual current) มีค่าเท่ากับ  $3\underline{I}_0$

$\underline{V}_{G-I}^A, \underline{V}_{G-I}^B, \underline{V}_{G-I}^C$  คือ แรงดันปลายด้าน G/ เฟส A, B และ C ตามลำดับ

$\underline{I}_{G-I}^A, \underline{I}_{G-I}^B, \underline{I}_{G-I}^C$  คือ กระแสจากปลายด้าน G/ เฟส A, B และ C ตามลำดับ

$$\underline{V}^{AB} = \underline{V}^A - \underline{V}^B, \quad \underline{V}^{BC} = \underline{V}^B - \underline{V}^C \quad \text{และ} \quad \underline{V}^{CA} = \underline{V}^C - \underline{V}^A$$

$$\underline{I}^{AB} = \underline{I}^A - \underline{I}^B, \quad \underline{I}^{BC} = \underline{I}^B - \underline{I}^C \quad \text{และ} \quad \underline{I}^{CA} = \underline{I}^C - \underline{I}^A$$

กล่าวโดยสรุป การคำนวณตำแหน่งผิดพลาดโดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะใช้ข้อมูลแรงดันและกระแสของวงจรที่เกิดความผิดพลาดเพียงปลายเดียว และอิมพีแดนซ์ของสายส่งของวงจรที่เกิดความผิดพลาด โดยต้องทราบประเภทความผิดพลาดด้วย

## 2.2 ขั้นตอนวิธีแบบสองปลาย

การระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายที่กล่าวในส่วนนี้เป็นขั้นตอนวิธีมาตรฐานใน IEEE C37.114 [1] สร้างขึ้นจากวงจรสมมูลที่มีสายส่งไฟฟ้า 1 วงจรบนเสาส่ง 1 ต้น เช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวในหัวข้อ 2.1 แต่ขั้นตอนวิธีนี้จะถูกใช้ก็ต่อเมื่อข้อมูลกระแสและแรงดันจากอุปกรณ์บันทึกสัญญาณทั้ง 2 ปลาย และข้อมูลจากทั้ง 2 ปลายมีการซิงโครไนซ์ (synchronize) กันทางเวลา จากภาพที่ 2.1 พิจารณาลูปความผิดพลาดจากปลายด้าน GI และ HI และใช้ปริมาณแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟส จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

$$\underline{V}_{G-I}^{ABC} = d \underline{Z}_{L-I}^{ABC} \underline{I}_{G-I}^{ABC} + \underline{V}_F \quad (2.5)$$

$$\underline{V}_{H-I}^{ABC} = (1-d) \underline{Z}_{L-I}^{ABC} \underline{I}_{H-I}^{ABC} + \underline{V}_F \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 จัดรูปสมการเพื่อกำจัดพจน์  $\underline{V}_F$  และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตรโดยใช้ความสัมพันธ์  $A^{-1} \underline{Z}_L^{ABC} A = \underline{Z}_L^{012}$  จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\underline{V}_{G-I}^{012} - \underline{V}_{H-I}^{012} = d \underline{Z}_{L-I}^{012} \underline{I}_{G-I}^{012} - (1-d) \underline{Z}_{L-I}^{012} \underline{I}_{H-I}^{012} \quad (2.7)$$

แก้สมการที่ 2.7 เพื่อหาระยะเกิดความผิดพลาด d จะได้สมการคือ

$$d_{0,1,2} = \frac{(V_{G-I}^{0,1,2} - V_{H-I}^{0,1,2}) + Z_{L-I}^{0,1,2} I_{H-I}^{0,1,2}}{Z_{L-I}^{0,1,2} (I_{G-I}^{0,1,2} + I_{H-I}^{0,1,2})} \quad (2.8)$$

แต่อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.8 ประกอบด้วยสมการองค์ประกอบสมมาตร 3 สมการ นั่นคือ สมการลำดับบวก, ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ดังนั้นค่า  $d$  จึงเป็นไปได้ทั้งหมด 3 ค่าตอบ

กล่าวโดยสรุป การคำนวณตำแหน่งผิดพลาดโดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะใช้ข้อมูลแรงดันและกระแสของวงจรที่เกิดความผิดพลาดจากทั้ง 2 ปลาย และอิมพีแดนซ์ของสายส่งของวงจรที่เกิดความผิดพลาด โดยไม่ทราบประเภทความผิดพลาด

## 2.3 ขั้นตอนวิธีอื่นๆที่ดัดแปลงมาจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน

จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีต นอกจากขั้นตอนวิธีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 แล้ว ยังมีขั้นตอนวิธีระบุตำแหน่งผิดพลาดอื่นๆที่ดัดแปลงมาจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ดังเช่นขั้นตอนวิธีต่างๆดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ขั้นตอนวิธีแบบใช้กระแสช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด (pre-fault current)

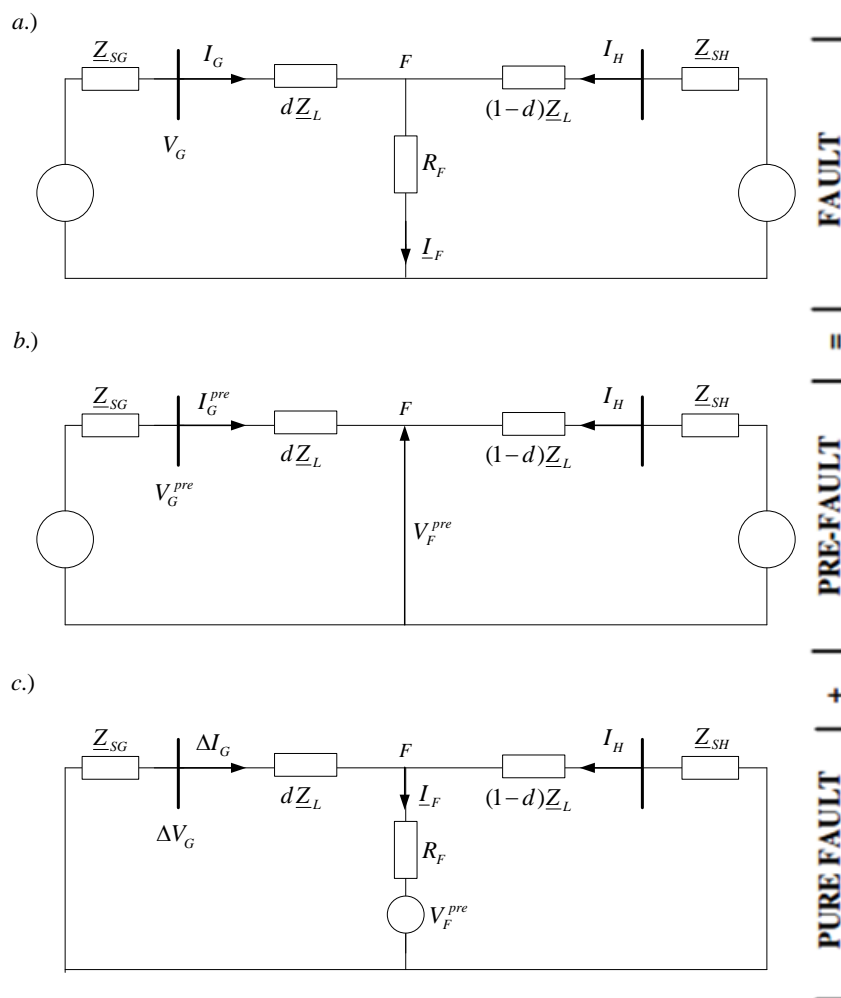
งานวิจัยในกลุ่มนี้พยายามกำจัดกระแสไหลลุด โดยพยายามหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อเกิดความผิดพลาด งานที่โดดเด่นที่สุดคืองานวิจัยตามเอกสารอ้างอิง [4] ซึ่งใช้ทฤษฎี Thevenin แยกวงจรความผิดพลาด (fault) ออกเป็นวงจรช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด (pre-fault) และวงจรความผิดพลาดบริสุทธิ์ (pure-fault) ดังภาพที่ 2.2 จากนั้นใช้หลักการแบ่งกระแสกับวงจรความผิดพลาดบริสุทธิ์ จะได้ว่า

$$\Delta I_G = \frac{(1-d)Z_L + Z_{SH}}{Z_{SG} + Z_L + Z_{SH}} I_F \quad (2.9)$$

โดยที่  $\Delta I_G$  คือ กระแสที่เพิ่มขึ้น (incremental current) กล่าวคือ กระแสจากปลายด้าน G ในขณะเกิดความผิดปกติลดลงด้วยกระแสจากปลายด้าน G ในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ

กลุ่มสัมประสิทธิ์ที่คูณอยู่หน้ากระแสความผิดปกติถูกนำเสนอไว้ในรูป distribution factor ( $k_s$ ) ตามเอกสารอ้างอิง [5] ดังนี้

$$k_s = \frac{-dZ_L + Z_L + Z_H}{Z_G + Z_L + Z_H} = |k_s| \angle \beta \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Thevenin a.) วงจรความผิดปกติ(fault) b.) วงจรช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ(pre-fault) และ c.) วงจรความผิดปกติบริสุทธิ์(pure-fault)

เมื่อแทน  $k_s$  ในสมการที่ 2.9 จะได้ว่า

$$I_F = \frac{\Delta I_G}{k_s} \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ 2.11 ในสมการที่ 2.1 โดยกำหนดว่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาด ( $Z_F$ ) มีลักษณะเป็นรีซิสทีฟอิมพีแดนซ์ ( $R_F$ ) จะได้ว่า

$$V_G = dZ_L I_G + R_F \frac{\Delta I_G}{k_s} \quad (2.12)$$

คุณสมการที่ 2.12 ด้วยคอนจูเกตของ  $\Delta I_G$  และพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพจะสามารถหาระยะเกิดความผิดพลาดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$d = \frac{\text{Im}(V_G \Delta \bar{I}_G)}{\text{Im}(Z_L I_G \Delta \bar{I}_G)} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\bar{I}_G$  คือ คอนจูเกตของ  $I_G$

สมการดังกล่าวใช้สมมติฐานว่า  $k_s$  เป็นจำนวนจริง ( $\beta = 0$ ) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในกรณี  $I_G$  กับ  $I_F$  มีมุมเฟสตรงกันเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว  $\beta$  จะแปรผันกับระยะเกิดความผิดพลาดและจะไม่สามารถคำนวณค่าที่ถูกต้องได้ถ้าไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงขั้นตอนวิธีดังกล่าว โดยการใช้กระแสลำดับศูนย์ ( $I_R$ ) แทน  $\Delta I_G$  ซึ่งรู้จักกันในชื่อ Modified-Takagi [1] ดังนี้

$$d = \frac{\text{Im}(V_G \Delta \bar{I}_R e^{-j\beta})}{\text{Im}(Z_L I_G \Delta \bar{I}_R e^{-j\beta})} \quad (2.14)$$

โดยที่  $\bar{I}_R$  คือ คอนจูเกตของ  $I_R$



ขั้นตอนวิธีดังกล่าวปรับปรุงการระบุตำแหน่งความผิดพลาดโดยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดผลของการพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพลงได้ แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีนี้ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่แม่นยำของมุม  $\beta$  โดยมุมดังกล่าวจะทำให้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดสามารถคำนวณได้แม่นยำเพียงจุดเดียวเท่านั้น

### 2.3.2 ขั้นตอนวิธีแบบสองปลายที่ประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square

เนื่องจากขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐานตามสมการที่ 2.8 จะประกอบด้วยสมการย่อย 3 สมการ ทำให้คำนวณระยะความผิดพลาดได้ 3 ค่า จึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square กับสมการดังกล่าว เพื่อหาระยะความผิดพลาดที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด [2] โดยมีวิธีการดังนี้

จัดรูปสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\underline{V}_{G-I}^{012} - \underline{V}_{H-I}^{012} + \underline{Z}_{L-I}^{012} \underline{I}_{H-I}^{012} = d \underline{Z}_{L-I}^{012} (\underline{I}_{G-I}^{012} + \underline{I}_{H-I}^{012}) \quad (2.15)$$

นิยามตัวแปรต่างๆ ดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$\underline{Y}' = \underline{V}_{G-I}^{012} - \underline{V}_{H-I}^{012} + \underline{Z}_{L-I}^{012} \underline{I}_{H-I}^{012} \quad (2.16)$$

$$\underline{M}' = \underline{Z}_{L-I}^{012} (\underline{I}_{G-I}^{012} + \underline{I}_{H-I}^{012}) \quad (2.17)$$

แทนสมการที่ 2.16 และ 2.17 ในสมการที่ 2.15 และด้วยคอนจูเกตของ  $\underline{M}'$  จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายดังนี้

$$d = (\overline{\underline{M}' \underline{M}'} )^{-1} \overline{\underline{M}' \underline{Y}'} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\overline{\underline{M}'}$  คือ ทรานสโพสคอนจูเกตของ  $\underline{M}'$

$$\text{และ} \quad \underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad a = \exp(j2\pi/3), \quad j = \sqrt{-1}$$

### บทที่ 3

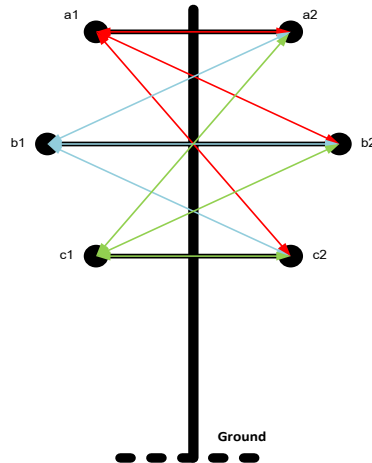
## การระบุตำแหน่งผิดพ่วงบนสายส่งโดยพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

โดยปกติ สายส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่ของโครงข่ายระบบส่งในประเทศไทยจะเป็นแบบ 2 วงจรขนานกัน บนเสาไฟฟ้า 1 ต้น โดยเป็นเหตุผลด้านเสถียรภาพของระบบ เสาส่งลักษณะนี้จะมีการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรเกิดขึ้น จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า ผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรสามารถแสดงในรูปอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจร ( $Z_m$ ) ข้อมูลกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์บันทึกความผิดพ่วงแบบดิจิทัลบันทึกได้ขณะเกิดความผิดพ่วง และเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความยาวสาย

### 3.1 การคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจร

เมื่อมีกระแสไหลในสายตัวนำเส้นหนึ่งจะมีการเหนี่ยวนำร่วมให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่เชื่อมต่อ (magnetic flux linkages) กับอีกวงจรหนึ่ง ฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวขึ้นอยู่กับกระแสทั้งหมดที่กำลังไหลในวงจรหนึ่งและเชื่อมต่อกับวงจรนั้นเข้ากับอีกวงจรหนึ่ง กระแสดังกล่าวจะไหลในสายตัวนำแล้วไหลกลับผ่านสายนิวทรัล, สายโอเวอร์เฮด หรือสายทั้ง 2 แบบ เนื่องจากเส้นทางการไหลดังกล่าวเปรียบได้กับพื้นโลก [6] ดังนั้นวิธีการประมาณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำจึงจำเป็นต้องใช้วิธีที่คำนึงถึงความต้านทานของพื้นโลกด้วย [6-8] วิธีที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติ คือ วิธีของ Carson J. (USA) ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับของ Pollaczek (Europe) [6] และใช้เป็นตัวอย่างสำหรับงานวิจัยอื่นๆที่ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกี่ยวข้องกับกระแสที่ไหลผ่านพื้นโลก [7]

ภาพที่ 3.1 แสดงแบบจำลองสายส่งแบบ 3 เฟสจำนวน 2 วงจรขนานกันบนเสาไฟฟ้า 1 ต้น โดยไม่พิจารณาสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (OHGW) ลักษณะดังกล่าวจะเกิดการเหนี่ยวนำร่วมขึ้นระหว่างวงจร แบบจำลองวงจรสายส่งดังกล่าวมีไว้เพื่อแสดงให้เห็นระยะทางระหว่างสายตัวนำที่เป็นไปได้ทั้งหมด กล่าวคือ เส้นลูกศรเชื่อมโยงระหว่างสายตัวนำต่างๆ แสดงถึงระยะทางระหว่างตัวนำนั้นๆ ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่า Geometric Mean Distance (GMD) ระหว่างวงจร 2 วงจรดังกล่าว



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองสายส่งแบบ 3 เฟส 2 วงจรขนานกันบนเสาไฟฟ้า 1 ต้น

สมการของ Carson สำหรับการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างตัวนำ a และตัวนำ b ใดๆ [6-7] เป็นดังนี้

$$Z_m = 1.571 \times 10^{-4} \omega + j \left[ 2 \times 10^{-4} \omega \ln \left( \frac{1650 \sqrt{\frac{\rho}{\omega}}}{d_{ab}} \right) \right] \quad \Omega / km \quad (3.1)$$

โดยที่  $\rho$  คือ สัมประสิทธิ์ต้านทานไฟฟ้าของดิน ( $\Omega / m^3$ )

$d_{ab}$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของ 2 ตัวนำใดๆ ( $m$ )

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมของระบบ ( $rad / s$ )

สำหรับการเปลี่ยนสมการที่ 3.1 ให้อยู่ในรูปปริมาณลำดับศูนย์สามารถทำได้ดังนี้ สมมติให้กระแสลำดับศูนย์ที่ใหญ่ในตัวนำแต่ละเฟสเป็น 1 แอมแปร์ และกระแสลำดับศูนย์ที่ใหญ่กลับในวงจรพื้นโลกเป็น 3 แอมแปร์ เมื่อรวมสายตัวนำทั้ง 3 เฟสให้เสมือนมีเพียง 1 ตัวนำ นั่นคือ จะมีกระแสลำดับศูนย์ 3 แอมแปร์ไหลในตัวนำดังกล่าว[6] และเป็นหลักการเดียวกันกับที่ใช้ในโปรแกรม ATP-EMTP กล่าวโดยสรุป อิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์จะเท่ากับ 3 เท่าของอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำในสมการที่ 3.1

$$Z_{0m} = 4.713 \times 10^{-4} \omega + j \left( 6 \times 10^{-4} \omega \ln \frac{1650 \sqrt{\frac{\rho}{\omega}}}{d_{ab}} \right) \quad \Omega / km \quad (3.2)$$

ในกรณีที่ เป็นสายส่งแบบ 3 เฟส 2 วงจร จะต้องใช้ค่า GMD (geometric mean distance) ระหว่าง 2 วงจร จะได้ว่า

$$Z_{0m} = 4.713 \times 10^{-4} \omega + j \left( 6 \times 10^{-4} \omega \ln \frac{1650 \sqrt{\frac{\rho}{\omega}}}{GMD} \right) \quad \Omega / km \quad (3.3)$$

เนื่องจากสายตัวนำของวงจรมี 2 ชุดๆละ 3 เส้น ดังนั้น ค่า GMD [6] ในสมการที่ 3.3 คือ รากที่ 9 ของผลคูณระยะทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างกลุ่มตัวนำชุดหนึ่งกับอีกชุดหนึ่ง

$$GMD = \sqrt[9]{d_{a1a2} d_{a1b2} d_{a1c2} d_{b1a2} d_{b1b2} d_{b1c2} d_{c1a2} d_{c1b2} d_{c1c2}} \quad m \quad (3.4)$$

ดังนั้นการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์ ( $Z_{0m}$ ) สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.3 โดยค่า GMD ขึ้นอยู่กับรูปแบบเรขาคณิตของแต่ละวงจร

โดยปกติแล้วค่ารีซิสแทนซ์ลำดับบวกและลำดับลบจะมีค่าน้อยมาก ในทางปฏิบัติจึงไม่มีการสมการคำนวณค่าดังกล่าว แต่ค่ารีแอกแทนซ์ลำดับบวกและลำดับลบจะมีไม่น้อยจนเกินไป สำหรับการคำนวณรีแอกแทนซ์ลำดับบวกและลำดับลบในทางปฏิบัติ [6] ใช้สูตรดังนี้

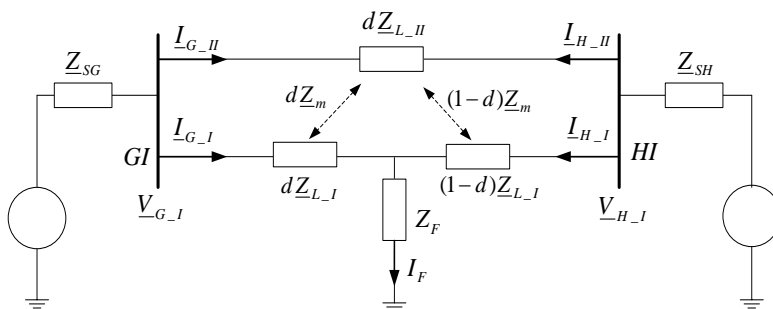
$$X_{1m} = X_{2m} = 0.1736 \frac{f}{60} \left[ 0.5 \log \frac{\sqrt[3]{d_{ab1} d_{bc1} d_{ca1}}}{GMR_{cond.}} - \frac{1}{12} \log \frac{(d_{a1a2})^4 (d_{b1b2})^2}{(d_{a1b2})^2 (d_{c1a1}) (d_{a1c2}) (d_{b1a2})^2} \right] \quad \Omega / km \quad (3.5)$$

โดยที่ GMR คือ ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของรัศมีสายตัวนำ ( $m$ )

### 3.2 ขั้นตอนวิธีแบบปลายเดี่ยวที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

เอกสารอ้างอิง [8],[9],[10],[11] และ [12] เสนอแนวทางในการสร้างสมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดโดยพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรแบบใช้ข้อมูลปลายเดี่ยว จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงดังกล่าวสามารถสรุปเป็นวิธีการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรสำหรับการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบใช้ข้อมูลจากเพียงปลายเดี่ยวได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

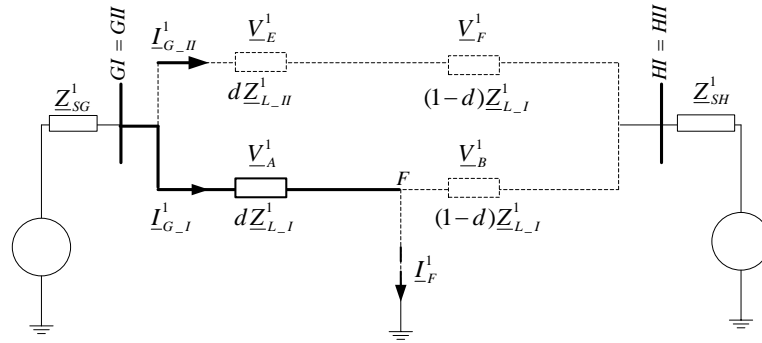
การเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรสามารถแสดงได้ในรูปแรงดันเหนี่ยวนำ(induce voltage) ซึ่งขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรและกระแสขณะเกิดความผิดพลาดที่ไหลในวงจรคู่ขนาน นอกจากนี้ขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวยังแปรผันโดยตรงกับความยาวของสายบริเวณนั้นอีกด้วย



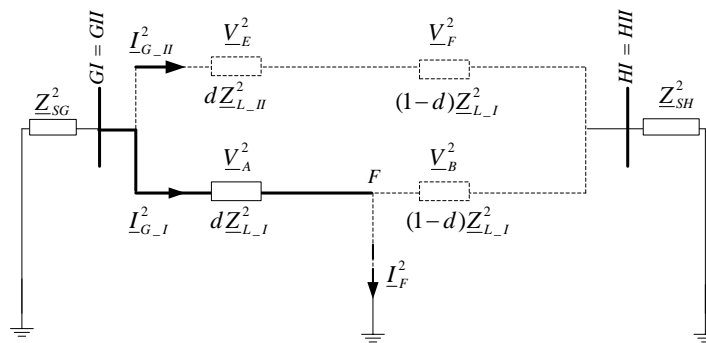
ภาพที่ 3.2 วงจรสมมูลของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน

การคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีวิธีการดังต่อไปนี้ พิจารณาวงจรสมมูลดังภาพที่ 3.2 ซึ่งแสดงวงจรสมมูลของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน เราสามารถแยกพิจารณาวงจรสมมูลดังกล่าวออกเป็นวงจรสมมูลลำดับบวก ลำดับลบและลำดับศูนย์ ดังภาพที่ 3.3-3.5

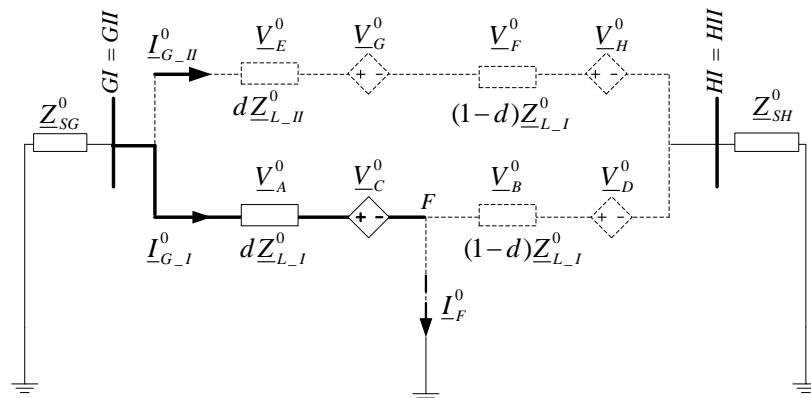
งานวิจัย [8],[9] และ [13] เสนอแนวทางการคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรโดยคิดเฉพาะอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์เท่านั้น โดยให้เหตุผลว่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบมีค่าน้อย สามารถละเลยได้ [7,8,11] อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดสอบผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรอันเกิดจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการทดสอบดังกล่าวในบทที่ 4



ภาพที่ 3.3 วงจรสมมูลลำดับบวกของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างวงจร



ภาพที่ 3.4 วงจรสมมูลลำดับลบของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างวงจร



ภาพที่ 3.5 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกัน แบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างวงจร

พิจารณาวงจรสมมูลลำดับวกดังภาพที่ 3.3 แรงดันในแต่ละส่วนของวงจรสมมูลเป็นดังต่อไปนี้

- แรงดันตกในวงจรความถี่พ่วง

$$\underline{V}_A^1 = d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 \quad (3.6)$$

$$\underline{V}_B^1 = (1-d)\underline{Z}_{L-I}^1 (\underline{I}_{G-I}^1 - \underline{I}_F^1) \quad (3.7)$$

- แรงดันตกในวงจรคู่ขนาน

$$\underline{V}_E^1 = d\underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{G-II}^1 \quad (3.8)$$

$$\underline{V}_F^1 = (1-d)\underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{G-II}^1 \quad (3.9)$$

พิจารณาวงจรสมมูลลำดับวกดังภาพที่ 3.4 แรงดันในแต่ละส่วนของวงจรสมมูลเป็นดังต่อไปนี้

- แรงดันตกในวงจรความถี่พ่วง

$$\underline{V}_A^2 = d\underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{G-I}^2 \quad (3.10)$$

$$\underline{V}_B^2 = (1-d)\underline{Z}_{L-I}^2 (\underline{I}_{G-I}^2 - \underline{I}_F^2) \quad (3.11)$$

- แรงดันตกในวงจรคู่ขนาน

$$\underline{V}_E^2 = d\underline{Z}_{L-II}^2 \underline{I}_{G-II}^2 \quad (3.12)$$

$$\underline{V}_F^2 = (1-d)\underline{Z}_{L-II}^2 \underline{I}_{G-II}^2 \quad (3.13)$$

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลลำดับศูนย์ดังภาพที่ 3.5 จะเห็นว่า มีพจน์ที่แสดงการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ซึ่งแสดงอยู่ในรูปแรงดันเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรเพิ่มขึ้นมา แรงดันในแต่ละส่วนของวงจรสมมูลเป็นดังต่อไปนี้

- แรงดันตกในวงจรความถี่พ่วง

$$\underline{V}_A^0 = d\underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{G-I}^0 \quad (3.14)$$

$$\underline{V}_B^0 = (1-d)\underline{Z}_{L-I}^0 (\underline{I}_{G-I}^0 - \underline{I}_F^0) \quad (3.15)$$

$$\underline{V}_C^0 = d\underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-II}^0 \quad (3.16)$$

$$\underline{V}_D^0 = (1-d)\underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-II}^0 \quad (3.17)$$

- แรงดันตกในวงจรคู่ขนาน

$$\underline{V}_E^0 = d\underline{Z}_{L-II}^0 \underline{I}_{G-II}^0 \quad (3.18)$$

$$\underline{V}_F^0 = (1-d)\underline{Z}_{L-II}^0 \underline{I}_{G-II}^0 \quad (3.19)$$

$$\underline{V}_G^0 = d\underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-I}^0 \quad (3.20)$$

$$\underline{V}_H^0 = d\underline{Z}_m^0 (\underline{I}_{G-I}^0 - \underline{I}_F^0) \quad (3.21)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมสายขณะเกิดความผิดพลาด ( $\Delta \underline{V}$ ) ในแต่ละวงจร กล่าวคือ เป็นแรงดันระหว่างปลาย GI ถึงจุด F จะสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{V}^1 \\ \Delta \underline{V}^2 \\ \Delta \underline{V}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_A^1 \\ \underline{V}_A^2 \\ \underline{V}_A^0 + \underline{V}_C^0 \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{L-I}^1 \\ \underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{L-I}^2 \\ \underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{L-I}^0 + \underline{Z}_m^0 \underline{I}_{L-II}^0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

จากวงจรความผิดพลาดดังภาพที่ 3.2 เมื่อพิจารณาสมการแรงดัน เราสามารถแบ่งแรงดัน ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

$$\underline{V}_{G-I} - \Delta \underline{V} - \underline{V}_F = 0 \quad (3.23)$$

แต่ละพจน์ในสมการที่ 3.23 แสดงรายละเอียดโดยใช้องค์ประกอบสมมาตร ดังนี้

$$\underline{V}_{G-I} = a_1 \underline{V}_{G-I}^1 + a_2 \underline{V}_{G-I}^2 + a_0 \underline{V}_{G-I}^0 \quad (3.24)$$

$$\underline{V}_F = R_F \underline{I}_F = R_F [\underline{I}_F^1 + \underline{I}_F^2 + \underline{I}_F^0] \quad (3.25)$$

$$\Delta \underline{V} = a_1 \Delta \underline{V}^1 + a_2 \Delta \underline{V}^2 + a_0 \Delta \underline{V}^0 \quad (3.26)$$

ใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 3.22 แทนในสมการ 3.26 จะได้

$$\Delta \underline{V} = a_1 [d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1] + a_2 [d\underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{G-I}^2] + a_0 [d\underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{L-I}^0 + d\underline{Z}_m^0 \underline{I}_{L-II}^0] \quad (3.27)$$



จากความสัมพันธ์  $\underline{Z}_{L-I}^1 = \underline{Z}_{L-I}^2$  , แยกพจน์ร่วม  $d\underline{Z}_{L-I}^1$  ออกจะได้

$$\Delta\underline{V} = d\underline{Z}_{L-I}^1 \left[ a_1 \underline{I}_{G-I}^1 + a_2 \underline{I}_{G-I}^2 + \left( a_0 \frac{\underline{Z}_{L-I}^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-I}^0 + a_0 \frac{\underline{Z}_m^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^0 \right) \right] \quad (3.28)$$

นิยาม  $\underline{I}_{G-IP}$  ดังสมการที่ 3.29 ( $\underline{I}_{G-IP}$  เป็นกระแสที่นิยามจากสมการคำนวณ ไม่ใช่กระแสที่วัดได้จริง) จะได้สมการแรงดันตก ( $\Delta\underline{V}$ ) ในรูปอย่างง่าย ดังสมการที่ 3.30

$$\underline{I}_{G-IP} = a_1 \underline{I}_{G-I}^1 + a_2 \underline{I}_{G-I}^2 + \left( a_0 \frac{\underline{Z}_{L-I}^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-I}^0 + a_0 \frac{\underline{Z}_m^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^0 \right) \quad (3.29)$$

$$\Delta\underline{V} = d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP} \quad (3.30)$$

สมการที่ 3.24 - 3.29 แสดงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ ( $a_1, a_2, a_0$ ) เนื่องจากความผิดพลาดต่างประเภทจะใช้กระแสและแรงดันในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดต่างกัน สมการต่างๆจึงต้องคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวเพื่อแทนการเลือกกระแสและแรงดันให้สอดคล้องกับการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดสำหรับความผิดพลาดประเภทต่างๆ เอกสารอ้างอิง [9] นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ ( $a_1, a_2, a_0$ ) ดังกล่าวโดยมีรายละเอียดแบ่งแยกตามประเภทความผิดพลาดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์แบ่งส่วนสำหรับคำนวณกระแสและแรงดันองค์ประกอบสมมาตร

ประเภทความผิดพลาด	$a_1$	$a_2$	$a_0$
A-G	1	1	1
B-G	$a^2$	a	1
C-G	a	$a^2$	1
A-B, A-B-G	$1 - a^2$	$1 - a$	0
A-B-C, A-B-C-G	$1 - a^2$	$1 - a$	0
B-C, B-C-G	$a^2 - a$	$a - a^2$	0
C-A, C-A-G	$a - 1$	$a^2 - 1$	0

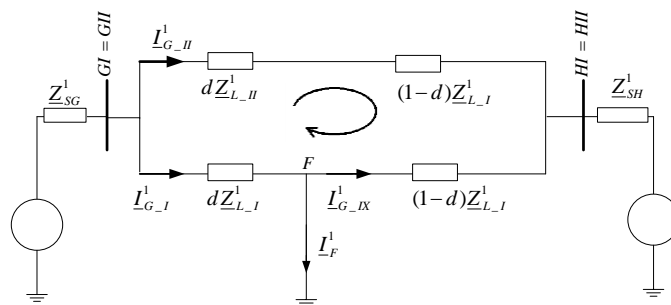
โดยที่  $a = \exp(j2\pi/3), j = \sqrt{-1}$

เมื่อแทนสมการ 3.24, 3.25 และ 3.30 ในสมการ 3.23 และแก้สมการโดยพิจารณาเฉพาะสมการจินตภาพในลักษณะเดียวกับขั้นตอนวิธีปลายเดียวมาตรฐานที่แยกแทนข้ออย่างง่าย กล่าวคือใช้สมมติฐานว่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดมีลักษณะเป็นรีซิสทีฟที่อิมพีแดนซ์และมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือมุมเฟสของ  $\underline{I}_{G-IP}$  กับ  $\underline{I}_F$  มีค่าตรงกันจะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดที่รวมการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ดังนี้

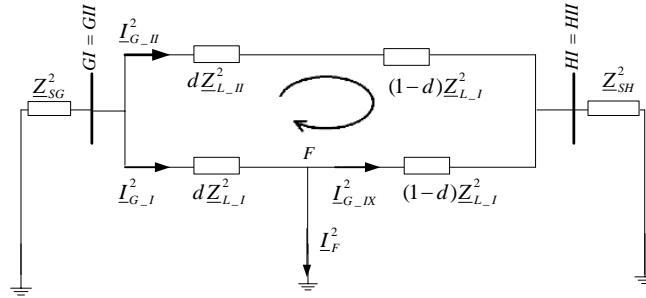
$$d = \frac{\text{imag}\left(\frac{\underline{V}_{G-I}}{\underline{I}_{G-IP}}\right)}{\text{imag}\left(\underline{Z}_{L-I}^1\right)} \quad (3.31)$$

ในเอกสารอ้างอิง [9] และ [12] เสนอวิธีการประมาณค่ากระแสผิดพลาดเพื่อใช้ในสมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงผสมผสานความรู้และเทคนิคในเอกสารอ้างอิงดังกล่าวและเรียบเรียงมานำเสนอ กล่าวคือ ในเอกสารอ้างอิง [12] นำเสนอวิธีการประมาณค่ากระแสผิดพลาดสำหรับความผิดพลาดแบบ 1 สายลงดิน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงประมาณค่ากระแสผิดพลาดสำหรับความผิดพลาดประเภทอื่นๆด้วยโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักที่ถูกนำเสนอไว้ในเอกสารอ้างอิง [9]

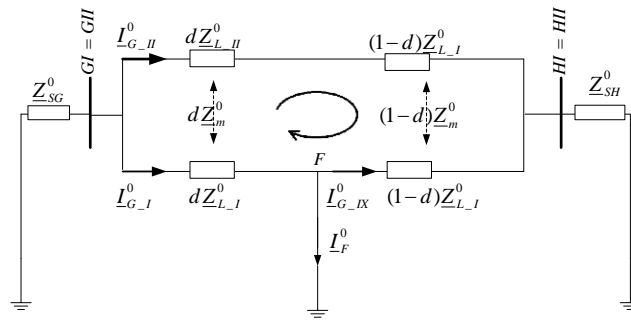
พิจารณาลู่ประหว่งวงจร  $I$  และวงจร  $II$  จากวงจรสมมูลภาพที่ 3.6 - 3.8



ภาพที่ 3.6 วงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด



ภาพที่ 3.7 วงจรสมมูลลำดับลบสำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด



ภาพที่ 3.8 วงจรสมมูลลำดับศูนย์สำหรับการประมาณกระแสผิดพลาด

จากวงจรสมมูลดังภาพที่ 3.6 - 3.8 สามารถเขียนเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโดยอาศัยกฎกระแสและกฎแรงดันของ Kirchhoff ได้ดังนี้

พิจารณาวงจรสมมูลภาพที่ 3.6

$$\underline{I}_F^1 = \underline{I}_{G-I}^1 - \underline{I}_{G-IX}^1 \quad (3.32)$$

$$\underline{I}_{G-IX}^1 = \frac{-d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 + \underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{G-II}^1}{(1-d)\underline{Z}_{L-I}^1} \quad (3.33)$$

แทนค่าสมการที่ 3.33 ในสมการที่ 3.32 จะได้

$$\underline{I}_F^1 = \frac{\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 - \underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{G-II}^1}{(1-d)\underline{Z}_{L-I}^1} \quad (3.34)$$

สำหรับสมการกระแส  $I_F^2$  จากวงจรสมมูลภาพที่ 3.7 จะสามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกับวงจรสมมูลลำดับบวก จะได้ดังนี้

$$I_F^2 = \frac{Z_{L-I}^2 I_{G-I}^2 - Z_{L-II}^2 I_{G-II}^2}{(1-d)Z_{L-I}^2} \quad (3.35)$$

สำหรับสมการกระแส  $I_F^0$  จากวงจรสมมูลภาพที่ 3.8 จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_F^0 = I_{G-I}^0 - I_{G-IX}^0 \quad (3.36)$$

$$I_{G-IX}^0 = \frac{-d(Z_m^0 - Z_{L-I}^0)I_{G-I}^0 + (Z_m^0 - Z_{L-II}^0)I_{G-II}^0}{(1-d)(Z_m^0 - Z_{L-I}^0)} \quad (3.37)$$

แทนค่าสมการที่ 3.37 ในสมการที่ 3.36 จะได้

$$I_F^0 = \frac{(Z_m^0 - Z_{L-I}^0)I_{G-I}^0 - (Z_m^0 - Z_{L-II}^0)I_{G-II}^0}{(1-d)(Z_m^0 - Z_{L-I}^0)} \quad (3.38)$$

สมการกระแสผิดพลาดสามารถหาได้จากการรวมสมการเขียน 3.34, 3.35 และ 3.38 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณกระแสผิดพลาด ( $a_{F1}, a_{F2}, a_{F0}$ ) ตามที่แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณกระแสผิดพลาดดังกล่าวถูกสร้างขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์เดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ ( $a_1, a_2, a_0$ ) แต่จะใช้สำหรับคำนวณกระแสผิดพลาดให้สอดคล้องกับประเภทความผิดพลาดเท่านั้น

ตารางที่ 3.2 แสดงสัมประสิทธิ์ ( $a_{F1}, a_{F2}, a_{F0}$ ) ซึ่งใช้เป็นตัวคูณกระแสผิดพลาด เพื่อใช้ในการประมาณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ผิดพลาด

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณกระแสผิดพลาด

ประเภทความผิดพลาด	$a_{F1}$	$a_{F2}$	$a_{F0}$
A-G	3	0	0
B-G	$3a^2$	0	0
C-G	$3a$	0	0
A-B	$1-a^2$	0	0
B-C	$a^2-a$	0	0
C-A	$a-1$	0	0
A-B-G	$1-a^2$	$1-a$	0
B-C-G	$a^2-a$	$a-a^2$	0
C-A-G	$a-1$	$a^2-1$	0
A-B-C, (A-B-C-G)	$1-a^2$	0	0

โดยที่  $a = \exp(j2\pi/3)$ ,  $j = \sqrt{-1}$

ในกรณีที่สายส่งทั้ง 2 วงจร มีค่าอิมพีแดนซ์สายส่งเท่ากัน นั่นคือ  $Z_{L_I}^1 = Z_{L_{II}}^1$ ,  $Z_{L_I}^2 = Z_{L_{II}}^2$  และ  $Z_{L_I}^0 = Z_{L_{II}}^0$  สมการที่ 3.34, 3.35 และ 3.38 จะสามารถเขียนแสดงตามลำดับดังนี้

$$\underline{I}_F^1 = \frac{I_{G_I}^1 - I_{G_{II}}^1}{(1-d)} \quad (3.39)$$

$$\underline{I}_F^2 = \frac{I_{G_I}^2 - I_{G_{II}}^2}{(1-d)} \quad (3.40)$$

$$\underline{I}_F^0 = \frac{I_{G_I}^0 - I_{G_{II}}^0}{(1-d)} \quad (3.41)$$

$$\underline{I}_F = a_{F1}\underline{I}_F^1 + a_{F2}\underline{I}_F^2 + a_{F0}\underline{I}_F^0 \quad (3.42)$$

จะเห็นว่า ในกรณีที่อิมพีแดนซ์สายส่ง 2 วงจรมีค่าไม่เท่ากัน กระแสผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์สายส่งทั้ง 2 วงจรดังกล่าว และการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ที่ต้องการทดสอบผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด ดังนั้น ในการคำนวณสำหรับกรณีความผิดพลาด 1 สายลงดิน จะเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก  $(a_{F1}, a_{F2}, a_{F0})$  เป็น  $(0, 0, 3)$  อย่างไรก็ตาม สำหรับความผิดพลาดประเภทอื่นๆ สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตามตารางที่ 3.2 เพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณแบบที่ต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์ได้ เพราะ การเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียวในกรณีที่เป็นความผิดพลาดอื่นที่ไม่ใช่ประเภท 1 สายลงดิน

แทนสมการ  $\underline{I}_F$  ในสมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียว (สมการที่ 3.31) และประมาณว่าอิมพีแดนซ์ผิดพลาด มีลักษณะเป็น  $R_F$  จะได้

$$\underline{V}_{G-I} = d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP} + R_F \underline{I}_F \quad (3.43)$$

สมการที่ 3.43 สามารถแยกออกได้เป็นสมการของส่วนจริง และสมการของส่วนจินตภาพ [5] ดังนี้

$$real(\underline{V}_{G-I}) = dreal(\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP}) + \frac{R_F}{(1-d)} real(\underline{I}_F) \quad (3.44)$$

$$imag(\underline{V}_{G-I}) = dimag(\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP}) + \frac{R_F}{(1-d)} imag(\underline{I}_F) \quad (3.45)$$

โดยที่  $\underline{I}_F = (1-d)\underline{I}_F$  สาเหตุที่นิยามค่า  $\underline{I}_F$  ขึ้นมาก็เพื่อให้สามารถแก้สมการ 3.44 และ 3.45 ได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นว่า มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 2 ตัว คือ  $d$  และ  $R_F$  ดังนั้นสามารถแก้สมการหาค่าระยะเกิดความผิดพลาด ( $d$ ) ได้ดังนี้

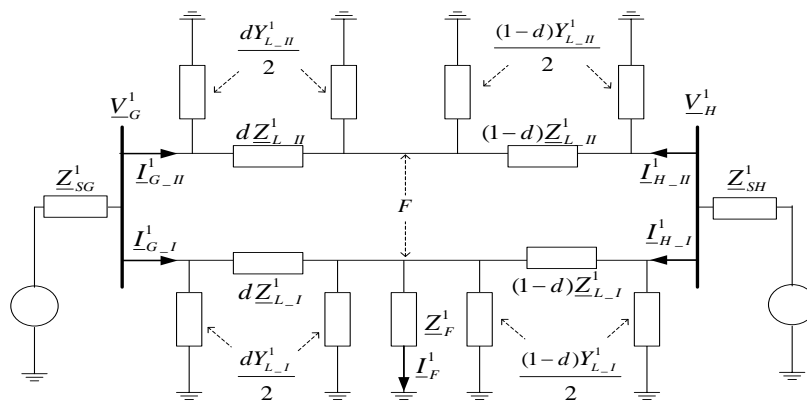
$$d = \frac{\text{real}(V_{G-I})\text{imag}(I_F) - \text{real}(I_F)\text{imag}(V_{G-I})}{\text{real}(Z_{L-I}^1 I_{G-IP})\text{imag}(I_F) - \text{real}(I_F)\text{imag}(Z_{L-I}^1 I_{G-IP})} \quad (3.46)$$

กล่าวโดยสรุป การคำนวณตำแหน่งผิดพร่องโดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะใช้ข้อมูลแรงดันและกระแสของทั้ง 2 วงจร จากปลายเดียวและอิมพีแดนซ์ของสายส่งของวงจรที่เกิดความผิดพร่อง และทราบประเภทความผิดพร่อง

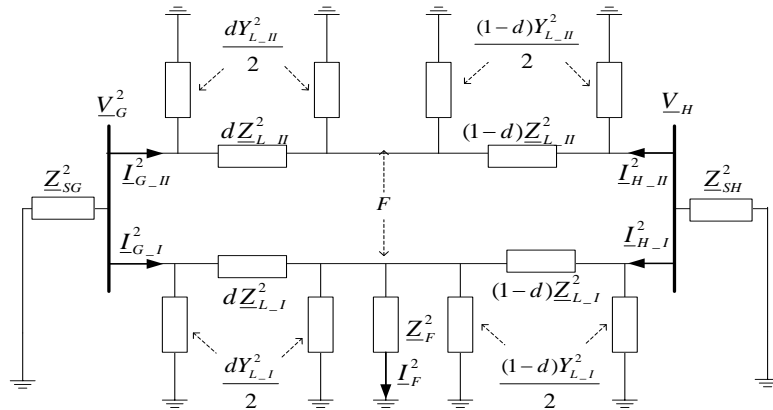
### 3.3 ขั้นตอนวิธีแบบสองปลายที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร

งานวิจัยตามเอกสารอ้างอิง [14] นำเสนอขั้นตอนวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องแบบสองปลาย โดยใช้เพียงกระแสขณะเกิดความผิดพร่องของวงจรที่เกิดความผิดพร่องและวงจรคู่ขนานจาก 2 ปลายเท่านั้น กล่าวคือ ขั้นตอนวิธีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์สายส่ง รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร กระบวนการวิเคราะห์ทำในรูปองค์ประกอบลำดับ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนวิธีมีดังนี้

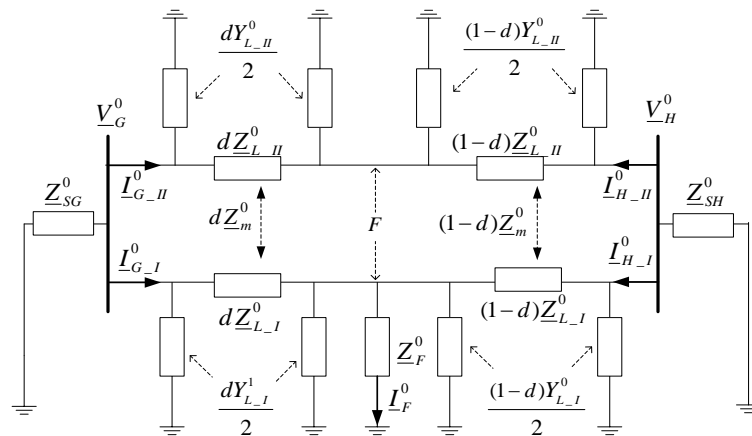
พิจารณาวงจรสมมูลลำดับบวก, ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ดังภาพที่ 3.9 – 3.11 ตามลำดับ จะเห็นว่าในวงจรสมมูลลำดับบวกและลำดับลบจะไม่มีผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร จะมีแค่วงจรสมมูลลำดับศูนย์ที่พิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมดังกล่าว



ภาพที่ 3.9 วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ลำดับบวก



ภาพที่ 3.10 วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ลำดับที่สอง



ภาพที่ 3.11 วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ลำดับศูนย์

**สมการสำหรับวงจรลำดับบวก**

จากวงจรสมมูลลำดับบวกดังภาพที่ 3.9 สามารถเขียนสมการโดยใช้กฎแรงดันของ Kirchhoff บนรูปต่างๆของแต่ละวงจรได้ดังนี้

สมการสำหรับวงจร  $I$

$$\underline{V}_G^1 - \underline{V}_H^1 = d\underline{Z}_{L-I}^1 \left( \underline{I}_{G-I}^1 - \underline{V}_G^1 \left( \frac{dY_{L-I}^1}{2} \right) \right) - (1-d)\underline{Z}_{L-I}^1 \left( \underline{I}_{H-I}^1 - \underline{V}_H^1 \left( \frac{(1-d)Y_{L-I}^1}{2} \right) \right)$$



$$\begin{aligned}
& \underline{V}_G^1 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-I}^1 \left( \frac{Y_{L-I}^1}{2} \right) \right] - \underline{V}_H^1 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-I}^1 \left( \frac{Y_{L-I}^1}{2} \right) \right] \\
& = d \underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 - (1-d) \underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{H-I}^1
\end{aligned} \tag{3.47}$$

สมการสำหรับวงจร II

$$\begin{aligned}
& \underline{V}_G^1 - \underline{V}_H^1 = d \underline{Z}_{L-II}^1 \left( \underline{I}_{G-II}^1 - \underline{V}_G^1 \left( \frac{dY_{L-II}^1}{2} \right) \right) - (1-d) \underline{Z}_{L-II}^1 \left( \underline{I}_{H-II}^1 - \underline{V}_H^1 \left( \frac{(1-d)Y_{L-II}^1}{2} \right) \right) \\
& \underline{V}_G^1 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-II}^1 \left( \frac{Y_{L-II}^1}{2} \right) \right] - \underline{V}_H^1 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-II}^1 \left( \frac{Y_{L-II}^1}{2} \right) \right] \\
& = d \underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{G-II}^1 - (1-d) \underline{Z}_{L-II}^1 \underline{I}_{H-II}^1
\end{aligned} \tag{3.48}$$

สมมติให้  $\underline{Z}_{L-I}^1 = \underline{Z}_{L-II}^1 = \underline{Z}_L^1$  และ  $Y_{L-I}^1 = Y_{L-II}^1 = Y_L^1$ , ลบสมการ 3.47 ด้วยสมการ 3.48 จะได้ว่า

$$\left[ d \underline{Z}_L^1 \underline{I}_{G-I}^1 - d \underline{Z}_L^1 \underline{I}_{G-II}^1 \right] - \left[ (1-d) \underline{Z}_L^1 \underline{I}_{H-I}^1 - (1-d) \underline{Z}_L^1 \underline{I}_{H-II}^1 \right] = 0 \tag{3.49}$$

ถ้าจัดพจน์ร่วมและจัดรูปใหม่จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพร่องสำหรับองค์ประกอบลำดับบวกดังนี้

$$d \left( \underline{I}_{G-I}^1 - \underline{I}_{G-II}^1 \right) - (1-d) \left( \underline{I}_{H-I}^1 - \underline{I}_{H-II}^1 \right) = 0 \tag{3.50}$$

สมการสำหรับวงจร I และ II สำหรับลำดับลบและลำดับศูนย์สามารถเขียนแสดงได้ในลักษณะเดียวกับลำดับบวก โดยใช้ชื่อสมมติ  $\underline{Z}_{L-I}^1 = \underline{Z}_{L-II}^1 = \underline{Z}_L^1$  และ  $Y_{L-I}^1 = Y_{L-II}^1 = Y_L^1$  จะได้สมการต่างๆ ดังนี้

### สมการสำหรับวงจรถ้าดับลบ

#### สมการสำหรับวงจรถ้า I

$$\begin{aligned} & \underline{V}_G^2 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-I}^2 \left( \frac{Y_{L-I}^2}{2} \right) \right] - \underline{V}_H^2 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-I}^2 \left( \frac{Y_{L-I}^2}{2} \right) \right] \\ & = d \underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{G-I}^2 - (1-d) \underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{H-I}^2 \end{aligned} \quad (3.51)$$

#### สมการสำหรับวงจรถ้า II

$$\begin{aligned} & \underline{V}_G^2 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-II}^2 \left( \frac{Y_{L-II}^2}{2} \right) \right] - \underline{V}_H^2 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-II}^2 \left( \frac{Y_{L-II}^2}{2} \right) \right] \\ & = d \underline{Z}_{L-II}^2 \underline{I}_{G-II}^2 - (1-d) \underline{Z}_{L-II}^2 \underline{I}_{H-II}^2 \end{aligned} \quad (3.52)$$

ลบสมการที่ 3.51 ด้วยสมการที่ 3.52 จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพ่วงสำหรับองค์ประกอบถ้าดับลบ ดังนี้

$$d(\underline{I}_{G-I}^2 - \underline{I}_{G-II}^2) - (1-d)(\underline{I}_{H-I}^2 - \underline{I}_{H-II}^2) = 0 \quad (3.53)$$

### สมการสำหรับวงจรถ้าดับศูนย์

#### สมการสำหรับวงจรถ้า I

$$\begin{aligned} & \underline{V}_G^0 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-I}^0 \left( \frac{Y_{L-I}^0}{2} \right) + d^2 \underline{Z}_m^0 \left( \frac{Y_{L-II}^0}{2} \right) \right] \\ & - \underline{V}_H^0 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-I}^0 \left( \frac{Y_{L-I}^0}{2} \right) + (1-d)^2 \underline{Z}_m^0 \left( \frac{Y_{L-II}^0}{2} \right) \right] \\ & = d \underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{G-I}^0 + d \underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-II}^0 - (1-d) \underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{H-I}^0 - (1-d) \underline{Z}_m^0 \underline{I}_{H-II}^0 \end{aligned} \quad (3.54)$$

สมการสำหรับวงจรถ II

$$\begin{aligned}
 & \underline{V}_G^0 \left[ 1 + d^2 \underline{Z}_{L-II}^0 \left( \frac{Y_{L-II}^0}{2} \right) + d^2 \underline{Z}_m^0 \left( \frac{Y_{L-I}^0}{2} \right) \right] \\
 & - \underline{V}_H^0 \left[ 1 + (1-d)^2 \underline{Z}_{L-II}^0 \left( \frac{Y_{L-II}^0}{2} \right) + (1-d)^2 \underline{Z}_m^0 \left( \frac{Y_{L-I}^0}{2} \right) \right] \\
 & = d \underline{Z}_{L-II}^0 \underline{I}_{G-II}^0 + d \underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-I}^0 - (1-d) \underline{Z}_{L-II}^0 \underline{I}_{H-II}^0 - (1-d) \underline{Z}_m^0 \underline{I}_{H-I}^0
 \end{aligned} \tag{3.55}$$

ลบสมการที่ 3.54 ด้วยสมการที่ 3.55 จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพร่องสำหรับองค์ประกอบลำดับวงจรถ II

$$d(\underline{I}_{G-I}^0 - \underline{I}_{G-II}^0) - (1-d)(\underline{I}_{H-I}^0 - \underline{I}_{H-II}^0) = 0 \tag{3.56}$$

จัดรูปสมการที่ 3.50, 3.53 และ 3.56 รวมให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$d = \frac{(\underline{I}_{H-I}^k - \underline{I}_{H-II}^k)}{(\underline{I}_{G-I}^k - \underline{I}_{G-II}^k) + (\underline{I}_{H-I}^k - \underline{I}_{H-II}^k)} \tag{3.57}$$

โดยที่  $k = 0, 1$  หรือ  $2$

การคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง ( $d$ ) สามารถคำนวณในองค์ประกอบลำดับใดก็ได้ โดยแก้หาเฉพาะส่วนจริงของสมการ 3.57 ก็จะได้สมการระบุตำแหน่งผิดพร่อง ( $d$ ) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

กล่าวโดยสรุป การคำนวณตำแหน่งผิดพร่องโดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะใช้กระแสของวงจรถของทั้ง 2 วงจรถ จากทั้ง 2 ปลาย โดยไม่ทราบประเภทความผิดพร่อง

## บทที่ 4

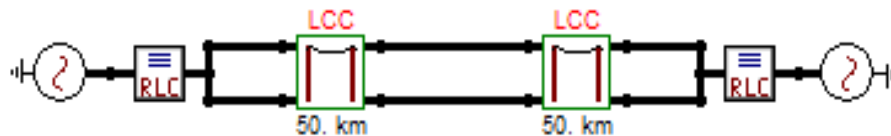
# การศึกษาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่ง ผิดพลาด

### 4.1 ระบบทดสอบและวิธีการทดสอบ

ในทางปฏิบัติ มีโปรแกรมหลายโปรแกรมที่สามารถใช้จำลองความผิดพลาดบนสายส่งไฟฟ้า และคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ ATP-EMTP [12] เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองสายส่งไฟฟ้า และจำลองการเกิดความผิดพลาดบนสายส่งสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย

#### 4.1.1 การสร้างแบบจำลองสายส่งไฟฟ้าโดยใช้ ATP-EMTP

แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าสำหรับโครงข่ายระบบส่ง [9,13,15,16,17,19] โดยใช้ ATP-EMTP เป็นดังนี้

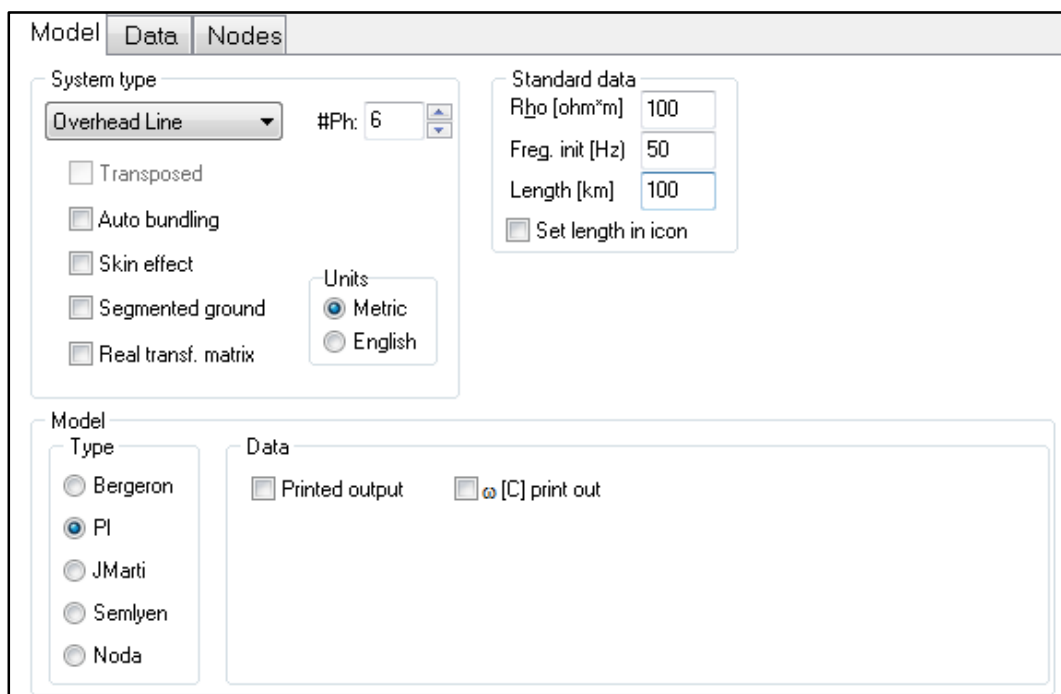


ภาพที่ 4.1 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าสำหรับโครงข่ายระบบส่งไฟฟ้าในประเทศไทย

การจำลองระบบส่งไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ดังภาพที่ 4.1 สามารถทำโดยใช้วัตถุ LCC (Line constants, Cable constants or Cable parameters Object) ซึ่งเป็นรูปแบบสายส่งประเภทหนึ่งใน ATP-EMTP

ต่อไปจะแสดงการสร้างจำลองสายส่งไฟฟ้าโดยจำลองจากรูปแบบสายส่งจริง โดยใช้วัตถุ LCC มีรายละเอียดดังนี้

- ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ประกอบด้วยแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่าย โดยกำหนดให้อิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายปลายด้านซ้าย(G) และปลายด้านขวา(H) [17] มีค่าดังนี้ :
  - $Z_{SG}^1 = Z_{SG}^2 = 1.312 + j15 \ \Omega$ ,  $Z_{SG}^0 = 2.334 + j26.6 \ \Omega$
  - $Z_{SH}^1 = Z_{SH}^2 = 0.656 + j7.5 \ \Omega$ ,  $Z_{SH}^0 = 1.127 + j13.3 \ \Omega$
- จำลองเป็นวงจรแบบ 3 เฟส จำนวน 2 วงจร (ไม่จำลองสายโอเวอร์เฮดกราวด์)
- ความยาวสายส่ง 100 กิโลเมตร



ภาพที่ 4.2 กกล่องโต้ตอบสำหรับวัตถุ LCC ในหน้าต่างรูปแบบวงจร [12]

เมื่อเลือกรูปแบบสายส่งชนิดวัตถุ LCC โปรแกรมจะแสดงกล่องโต้ตอบดังภาพที่ 4.2 สำหรับการจำลองสายส่งนี้ เลือกใช้แบบจำลอง  $\pi$  โดยเลือกเป็นสายโอเวอร์เฮด จำนวน 6 เฟส และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความนำไฟฟ้าของสายตัวนำ(Rho) เท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และความถี่ไฟฟ้า (Freq.init) 50 เฮิร์ต ในส่วนความยาวสายส่ง(Length) จะต้องสร้างวัตถุ LCC 2 ชุด เพื่อใช้กำหนดจุดเกิดความผิดพลาดระหว่างวัตถุ LCC 2 ชุดดังกล่าว ตัวอย่างเช่น สายส่งยาว 100 กิโลเมตร เกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 50 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวสายทั้งหมด วัดจากปลายด้าน

หนึ่ง ดังนั้น ต้องสร้างวัตถุ LCC 2 ชุด ความยาวชุดละ 50 กิโลเมตร เพื่อใช้แทนสายส่ง 50 กิโลเมตรดังกล่าว

Model		Data	Nodes				
#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.20764154	1.3865	0.081151078	2.75	24.9	14.35
2	2	0.20764154	1.3865	0.081151078	2.8	21.5	10.95
3	3	0.20764154	1.3865	0.081151078	3	18.1	7.55
4	4	0.20764154	1.3865	0.081151078	-2.75	24.9	14.35
5	5	0.20764154	1.3865	0.081151078	-2.8	21.5	10.95
6	6	0.20764154	1.3865	0.081151078	-3	18.1	7.55

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down arrows)

ภาพที่ 4.3 กล่องโต้ตอบสำหรับวัตถุ LCC ในหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำ

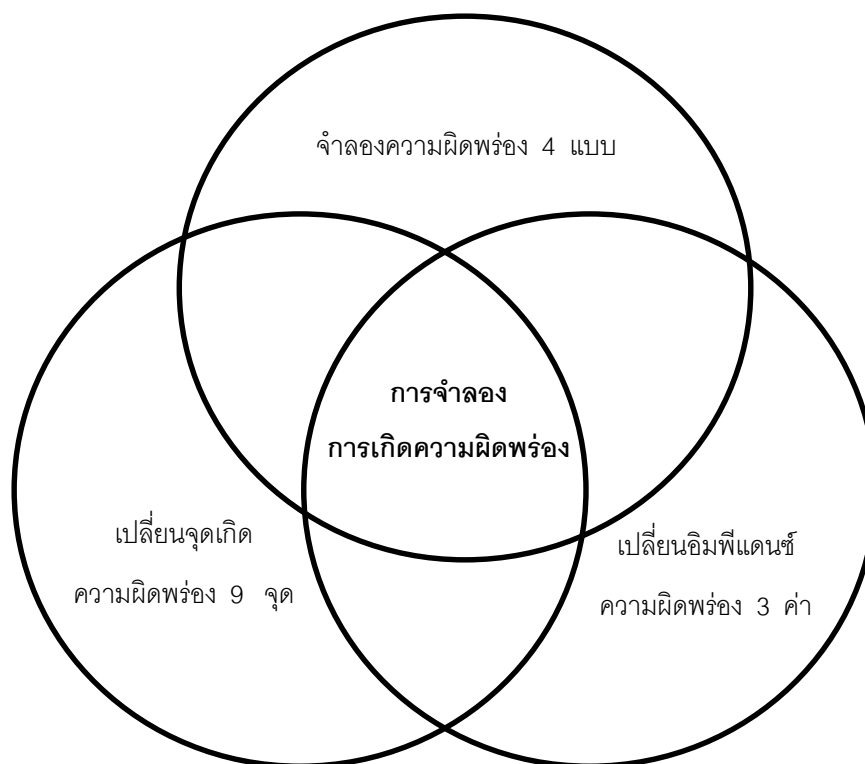
จากกล่องโต้ตอบดังภาพที่ 4.3 โปรแกรมจะระบุโดยอัตโนมัติว่าสายส่งเบอร์ 1 ถึง 3 อยู่ในวงจรที่ 1 และ สายส่งเบอร์ 4 ถึง 6 อยู่ในวงจรที่ 2 โดยรายละเอียดข้อมูลของสายตัวนำที่ผู้ใช้จะต้องระบุ มีดังต่อไปนี้

React	คือ	ความต้านทานรีแอกแตนซ์	( $\Omega / km$ )
Resis	คือ	ความต้านทานรีซิสแตนซ์	( $\Omega / km$ )
Rout	คือ	รัศมีของตัวนำ	( $cm$ )
Horiz	คือ	ระยะห่างจากเสาในแนวขนาน	( $m$ )
Vtower	คือ	ความสูงของสายตัวนำ	( $m$ )
Vmid	คือ	ระยะตกท้องข้างสูงสุด	( $m$ )

#### 4.1.2 การจำลองความผิดพลาด

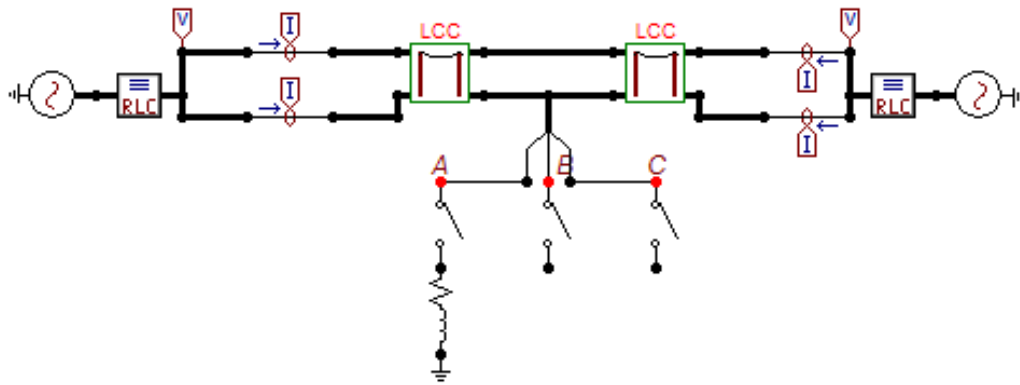
ในวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดบนสายส่งไฟฟ้าจำนวน 4 แบบ แบ่งตามประเภทความผิดพลาด ได้แก่ ความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน(single line to ground fault), ความผิดพลาดแบบ 2 เฟส(double-lines fault), ความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน(double-lines to ground fault) และความผิดพลาดแบบ 3 เฟส(three-phases fault)

ในแต่ละประเภทความผิดพลาดจะจำลองตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดจำนวน 9 จุด ได้แก่ ตำแหน่ง 10%, 20%, 30%, ... , 90% ของความยาวสายส่ง และจำลองอิมพีแดนซ์ความผิดพลาด 3 ลักษณะ ได้แก่  $R_F = 1$  โอห์ม,  $R_F = 10$  โอห์ม และ  $Z_F = 5 \angle 65^\circ$  โอห์ม (อ้างอิงจากงานวิจัยในอดีต [18] ที่มีการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลภาคสนาม พบว่า อิมพีแดนซ์ความผิดพลาดส่วนใหญ่มีมุมเฟสประมาณ 60-70 องศา และขนาดประมาณไม่เกิน 5 โอห์ม) สำหรับระบบทดสอบขั้นตอนวิธีแบบสองปลายจะจำลองกรณีที่มีอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดเป็นแบบ  $Z_F = 5 \angle 65^\circ$  เพื่อให้ระบบจำลองที่สร้างขึ้นมีลักษณะคล้ายกับสถานการณ์จริงมากที่สุด

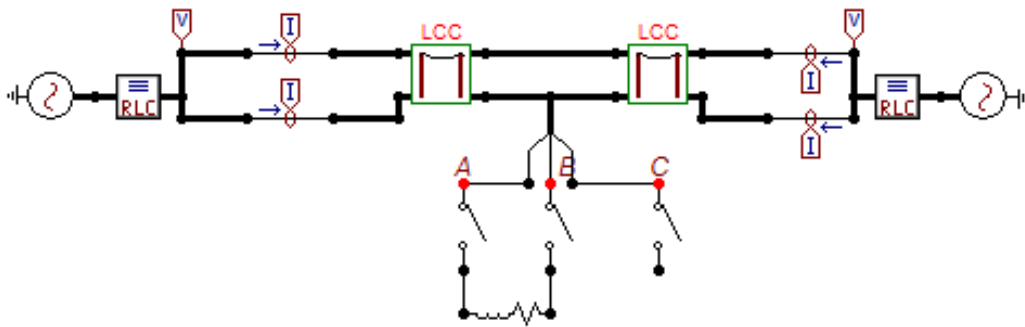


ภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงเงื่อนไขการจำลองการเกิดความผิดพลาด

ระบบจำลองแบ่งตามประเภทความผิดปกติทั้ง 4 แบบ แสดงดังภาพที่ 4.5 – 4.8 บริเวณปลายด้านซ้าย กำหนดให้เป็นปลายด้าน G และปลายด้านขวากำหนดให้เป็นปลายด้าน H แต่ละปลายจะมี โพรบสำหรับวัดแรงดันบัส 3 เฟส และกระแส 3 เฟส ที่ไหลในแต่ละวงจร เพื่อบันทึก ข้อมูลแรงดันและกระแสดังกล่าว และใช้สำหรับทดสอบผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อการคำนวณตำแหน่งผิดปกติของระบบประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ต่อไป

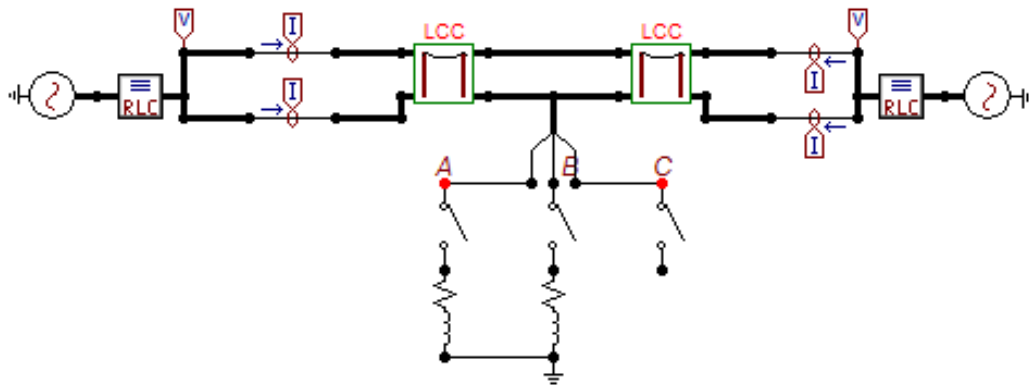


ภาพที่ 4.5 ระบบจำลองการเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน (A-G)

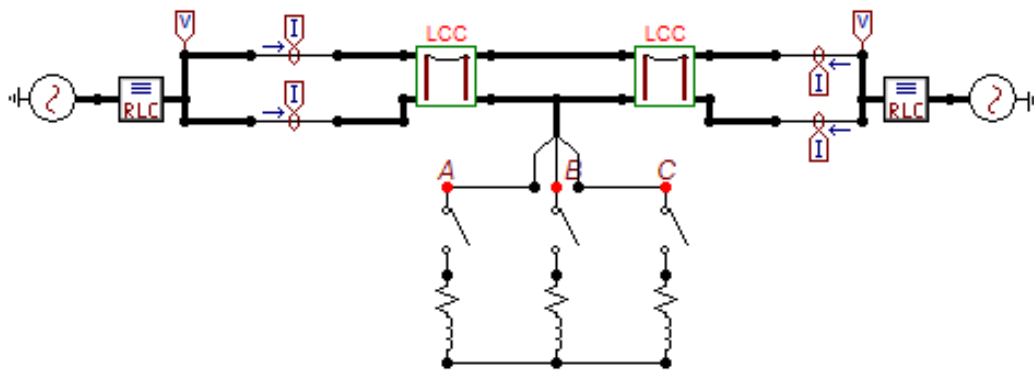


ภาพที่ 4.6 ระบบจำลองการเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส (A-B)





ภาพที่ 4.7 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน (A-B-G)

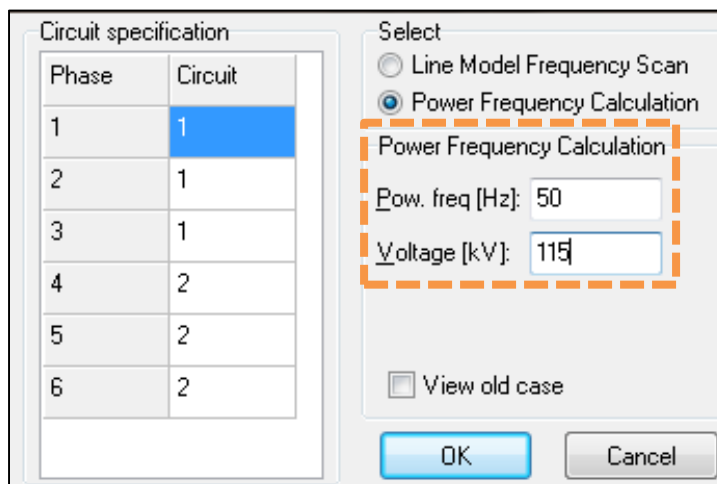


ภาพที่ 4.8 ระบบจำลองการเกิดความผิดพลาดแบบ 3 เฟส (A-B-C)

#### 4.1.3 การคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรโดยใช้ ATP-EMTP

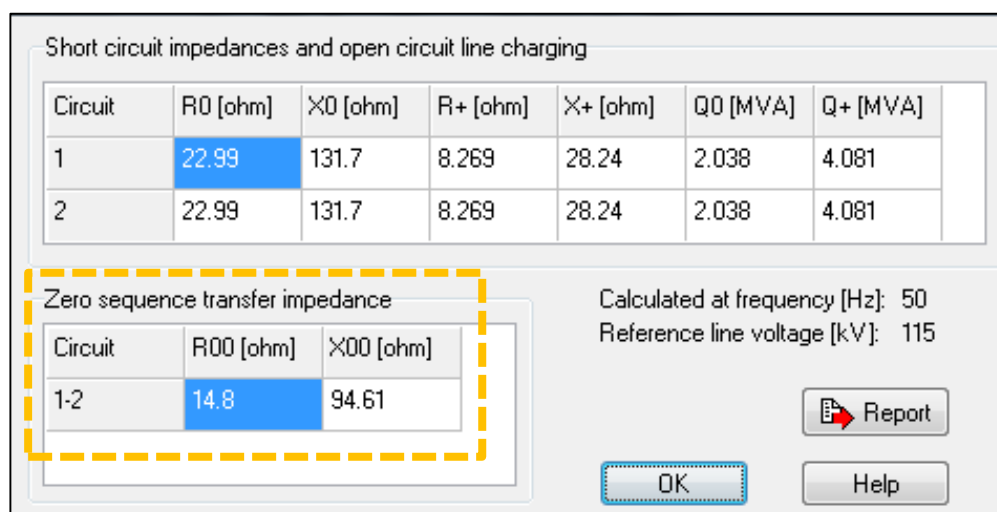
##### 4.1.3.1 การคำนวณโดยใช้ Power Frequency Calculation

เมื่อสร้างระบบจำลองตามหัวข้อ 4.1.1 แล้ว เราสามารถคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์โดยใช้ฟังก์ชัน Power Frequency Calculation (PFC) ดังนี้



ภาพที่ 4.9 กล่องโต้ตอบสำหรับการทดสอบข้อมูลโดยใช้ PFC

การเลือกทดสอบพารามิเตอร์ของสายส่งด้วย PFC จะต้องป้อนพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความถี่ไฟฟ้าและระดับแรงดัน (ใช้คำนวณการยกแรงดันสาย : line charging) โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (short circuit impedance) หรืออิมพีแดนซ์ของสายลัดดับศูนย์และลัดดับบวก, การยกแรงดันสาย (open circuit line charging) ลัดดับศูนย์และลัดดับบวก และอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลัดดับศูนย์ ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลัดดับศูนย์โดย PFC

จากภาพที่ 4.10 การทดสอบโดยฟังก์ชัน PFC สำหรับแบบจำลองสายส่งดังกล่าว ได้ อิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์รวมตลอดสายส่งเท่ากับ  $14.8 + j94.61$  โอห์ม หรือ  $0.148 + j0.946$  โอห์มต่อกิโลเมตร

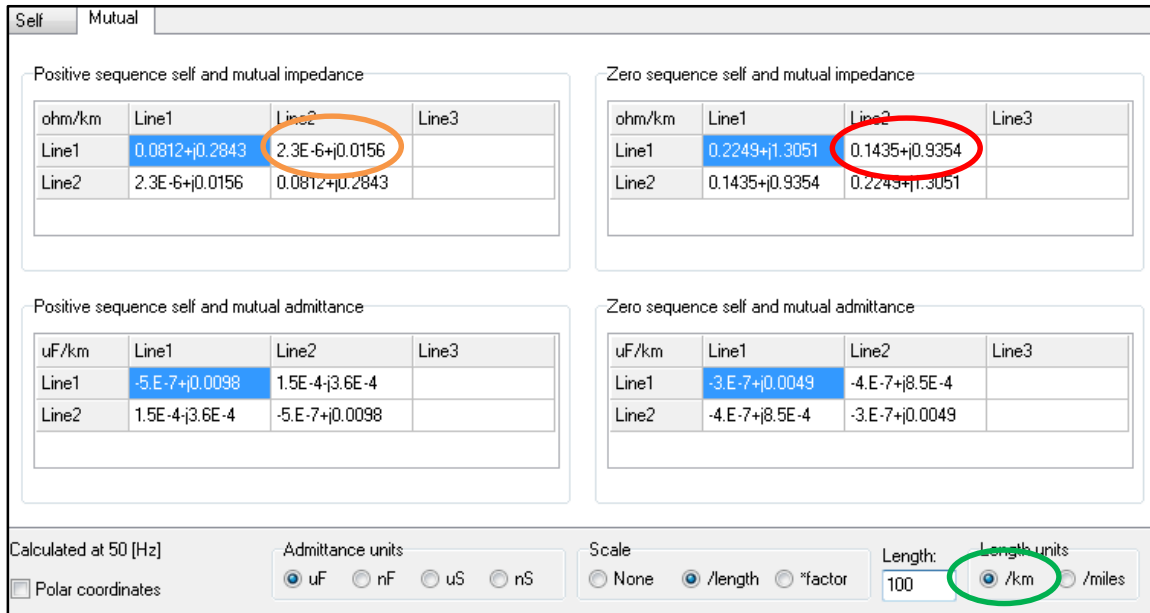
จะเห็นว่า การทดสอบโดยฟังก์ชัน PFC จะไม่สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจร ลำดับบวกและลำดับลบได้ ซึ่งการคำนวณค่าดังกล่าวจะต้องใช้ Line Check Function ซึ่งกล่าวใน หัวข้อ 4.1.2.2

#### 4.1.3.2 การคำนวณโดยใช้ Line Check Function

สำหรับการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์โดยใช้ฟังก์ชัน “Line Check” [16] จะสามารถเลือกรูปแบบของคำตอบได้หลายรูปแบบ ดังตัวอย่างในภาพที่ 4.11 โดยเลือกให้ แสดงคำตอบในรูปแบบ “โอห์ม ต่อ หน่วยความยาว” นอกจากนี้ ฟังก์ชัน “Line Check” ยังสามารถ คำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับบวกและลำดับลบได้อีกด้วย

พิจารณาภาพที่ 4.11 สำหรับสายส่งจำลองที่ใส่ค่าต่างๆดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 ได้ อิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์เท่ากับ  $0.1433 + j0.9347$  โอห์มต่อกิโลเมตร จะเห็น ว่ามีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณโดยใช้ PFC ส่วนอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับบวกและ ลำดับลบมีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-6} + j0.0156$  โอห์มต่อกิโลเมตร

จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวกและอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับลบ มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับศูนย์ ซึ่งในทางปฏิบัติอิมพีแดนซ์ดังกล่าวจึงถูก ละเลย แต่จะสังเกตว่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรลำดับบวกและลำดับลบมี ค่าไม่น้อยมากเกินไป ดังนั้น ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 จึงคำนึงถึงผลของอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำ ทั้ง 2 ลำดับด้วย เพื่อทดสอบผลจากการเหนี่ยวนำระหว่างวงจรในลำดับบวกและลำดับลบต่อความ แม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด



ภาพที่ 4.11 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างโดยฟังก์ชัน Line Check

#### 4.1.4 การวิเคราะห์ผล

การทดสอบผลทำการโดยการเปรียบเทียบระยะทางที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีต่างๆ ( $d_{calculate}$ ) กับระยะทางจริงที่ได้จากรายงานของ กฟผ. หรือจากการกำหนดขึ้นในระบบจำลอง ( $d_{actual}$ ) การเปรียบเทียบดังกล่าวทำโดยใช้สมการที่ 4.1

$$e = d_{actual} - d_{calculate} \quad (4.1)$$

โดยที่

$e$  คือ ค่าสัมบูรณ์ของระยะคลาดเคลื่อน (km)

$d_{actual}$  คือ ระยะความผิดพลาดจริง (km)

$d_{calculate}$  คือ ระยะความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณ (km)

จากสมการที่ 6.1 กรณีที่ค่า  $e > 0$  หมายความว่าระยะความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณสั้นกว่าระยะความผิดพลาดจริง (underestimate) ส่วนกรณีที่ค่า  $e < 0$  หมายความว่าระยะความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณเกินระยะความผิดพลาดจริง (overestimate)

การเลือกช่วงการเกิดความผิดพร่องจะพิจารณาจากรูปกราฟ โดยพิจารณาเลือกช่วงที่เป็น Steady-state โดยใช้เทคนิคการเลือกตามเอกสารอ้างอิง [20]

สำหรับการทดสอบแบบปลายเดี่ยวจะใช้ระยะคลาดเคลื่อนของระยะความผิดพร่องที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีแบบปลายเดี่ยวมาตรฐานรีแอกแทนซ์อย่างง่ายเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ ส่วนการทดสอบแบบสองปลายจะใช้ระยะคลาดเคลื่อนของระยะความผิดพร่องที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐานเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ กล่าวคือ ระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่พิจารณาผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะต้องน้อยกว่าเกณฑ์เปรียบเทียบของแต่ละกรณี จึงจะถือว่าขั้นตอนวิธีดังกล่าวแม่นยำกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน



ภาพที่ 4.12 แผนภาพสรุปการดำเนินการในส่วนระบบทดสอบและการวิเคราะห์ผล

## 4.2 การทดสอบความแม่นยำ

การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่คำนวณโดยใช้ขั้นตอนวิธีมาตรฐานกับขั้นตอนวิธีที่มีการชดเชยผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ในกรณีการทดสอบแบบใช้ข้อมูลปลายเดียวจะเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่คำนวณโดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบปลายเดียวมาตรฐานที่แยกแทนข้ออย่างง่ายที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.1 กับระยะเวลาเคลื่อนที่คำนวณโดยใช้ขั้นตอนวิธีปลายเดียวโดยใช้การประมาณกระแสผิดพลาดที่จะแสดงในหัวข้อ 4.2.1 ส่วนการทดสอบแบบสองปลายจะเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่คำนวณโดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบสองปลายที่ประยุกต์ใช้เทคนิค Least – Square ที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.2 เป็นเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากถ้าใช้ขั้นตอนวิธีแบบสองปลายมาตรฐานที่ไม่มีการประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square จะมีระยะเวลาผิดพลาดที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 คำนวณระยะเวลาผิดพลาดที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square เปรียบเทียบกับระยะเวลาเคลื่อนที่คำนวณโดยใช้ขั้นตอนวิธีสองปลายที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ที่จะแสดงในหัวข้อ 4.2.2 ดังต่อไปนี้

### 4.2.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีปลายเดียว

ขั้นตอนวิธีที่จะใช้ในการทดสอบจะปรับปรุงต่อยอดมาจากขั้นตอนวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 โดยจะเพิ่มการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรสำหรับวงจrlำดับบวกและลำดับลบ เพื่อทดสอบผลจากการเหนี่ยวนำดังกล่าวต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาดสำหรับขั้นตอนวิธีปลายเดียว สำหรับการปรับปรุงขั้นตอนวิธี ทำดังนี้

จากที่กล่าวไว้ว่าเราสามารถพิจารณาสมการแรงดันออกเป็นแรงดัน 3 กลุ่ม คือ  $\underline{V}_{G-I}$ ,  $\underline{\Delta V}$  และ  $\underline{V}_F$  โดยที่แรงดันเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะเกี่ยวข้องกับแรงดันที่ตกคร่อมสาย ( $\underline{\Delta V}$ ) ขั้นตอนวิธีปลายเดียวที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 พิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรเฉพาะวงจrlำดับศูนย์เท่านั้น เราสามารถเพิ่มการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรสำหรับวงจrlำดับบวกและลำดับลบได้โดยเพิ่มพจน์แรงดันเหนี่ยวนำ  $d\underline{Z}_m^1 \underline{I}_{G-II}^1$  และ  $d\underline{Z}_m^2 \underline{I}_{G-II}^2$  ในสมการแรงดันตกคร่อมสาย ดังนี้

$$\begin{aligned} \underline{\Delta V} = & a_1 \left[ d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 + d\underline{Z}_m^1 \underline{I}_{G-II}^1 \right] + a_2 \left[ d\underline{Z}_{L-I}^2 \underline{I}_{G-I}^2 + d\underline{Z}_m^2 \underline{I}_{G-II}^2 \right] \\ & + a_0 \left[ d\underline{Z}_{L-I}^0 \underline{I}_{G-I}^0 + d\underline{Z}_m^0 \underline{I}_{G-II}^0 \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

จากความสัมพันธ์  $\underline{Z}_{L-I}^1 = \underline{Z}_{L-I}^2$  , แยกพจน์ร่วม  $d\underline{Z}_{L-I}^1$  ออกจะได้

$$\begin{aligned} \Delta V = d\underline{Z}_{L-I}^1 & \left[ \left( a_1 \underline{I}_{G-I}^1 + a_1 \frac{\underline{Z}_m^1}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^1 \right) + \left( a_2 \underline{I}_{G-I}^2 + a_2 \frac{\underline{Z}_m^2}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^2 \right) \right. \\ & \left. + \left( a_0 \frac{\underline{Z}_{L-I}^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-I}^0 + a_0 \frac{\underline{Z}_m^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^0 \right) \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \underline{I}_{G-IP} = & \left( a_1 \underline{I}_{G-I}^1 + a_1 \frac{\underline{Z}_m^1}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^1 \right) + \left( a_2 \underline{I}_{G-I}^2 + a_2 \frac{\underline{Z}_m^2}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^2 \right) \\ & + \left( a_0 \frac{\underline{Z}_{L-I}^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-I}^0 + a_0 \frac{\underline{Z}_m^0}{\underline{Z}_{L-I}^1} \underline{I}_{G-II}^0 \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

แทนสมการที่ 4.3 ในสมการที่ 3.31 และทำการแก้สมการตามวิธีที่แสดงในหัวข้อ 3.2 จะได้สมการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรทั้ง 3 ลำดับ ดังนี้

$$d = \frac{\text{real}(\underline{V}_{G-I})\text{imag}(\underline{I}_F^1) - \text{real}(\underline{I}_F^1)\text{imag}(\underline{V}_{G-I})}{\text{real}(\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP})\text{imag}(\underline{I}_F^1) - \text{real}(\underline{I}_F^1)\text{imag}(\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-IP})} \quad (4.5)$$

โดย  $\underline{I}_{G-IP}$  ใช้ค่าในสมการที่ 4.4 และอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำทั้ง 3 ลำดับ สามารถหาโดยใช้ฟังก์ชัน Line Check ของโปรแกรม ATP ตามวิธีที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.3.2

#### 4.2.2 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีสองปลาย

สำหรับขั้นตอนวิธีที่มีการคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่จะใช้สำหรับทดสอบผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลาย คือ ขั้นตอนวิธีสองปลายที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 เนื่องจากขั้นตอนวิธีดังกล่าวคำนึงถึงผลของทั้งอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำและแอดมิต

แทนซ์เหนียวนำ โดยที่ไม่ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่าดังกล่าวด้วย ซึ่งจะลดความคลาดเคลื่อนจากการประมาณหรือคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เหนียวนำและแอมิตแทนซ์เหนียวนำผิดพลาดได้ การคำนวณโดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถเลือกใช้สมการลำดับบวก ลำดับลบหรือลำดับศูนย์ก็ได้ จะได้สมการดังนี้

$$d_{0,1,2} = \frac{\left( \underline{I}_{H-I}^{0,1,2} - \underline{I}_{H-II}^{0,1,2} \right)}{\left( \underline{I}_{G-I}^{0,1,2} - \underline{I}_{G-II}^{0,1,2} \right) + \left( \underline{I}_{H-I}^{0,1,2} - \underline{I}_{H-II}^{0,1,2} \right)} \quad (4.6)$$



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

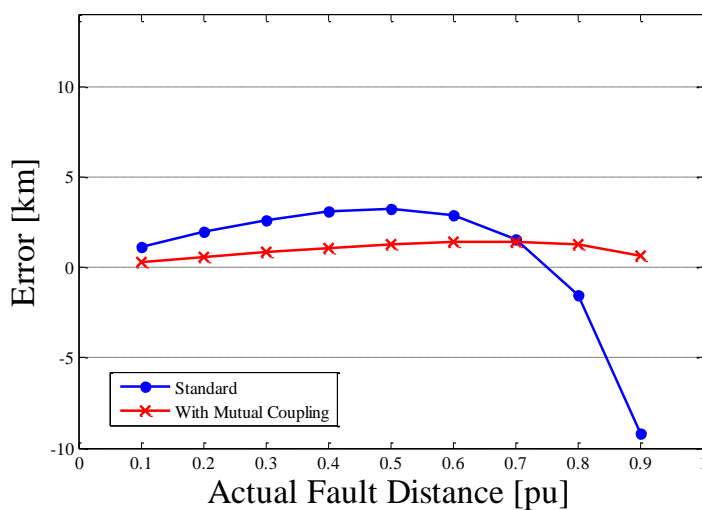
#### 5.1 ผลการทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีปลายเดียว

##### 5.1.1 ผลการทดสอบโดยใช้ค่าจากระบบจำลอง

ระยะคลาดเคลื่อน ( $e$ ) คำนวณโดยใช้ระยะจริงที่ได้จากการจำลอง ( $d_{actual}$ ) ลบด้วยระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการที่ 4.5 ( $d_{calculate}$ ) ตามสมการที่ 4.1

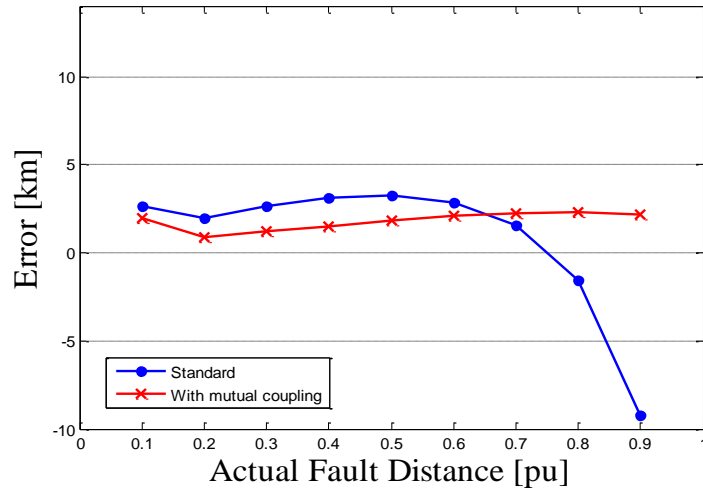
ในส่วนนี้จะแสดงผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจำลองสำหรับกรณีการทดสอบแบบปลายเดียว โดยแสดงในลักษณะกราฟเส้นแยกเป็นหัวข้อตามประเภทความผิดพลาด แกนนอนคือ ระยะผิดพลาด มีค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9 เพอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่ง ส่วนแกนตั้งคือระยะคลาดเคลื่อน ( $e$ ) มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

##### 5.1.1.1 ความผิดพลาดประเภท 1 เฟสลงดิน



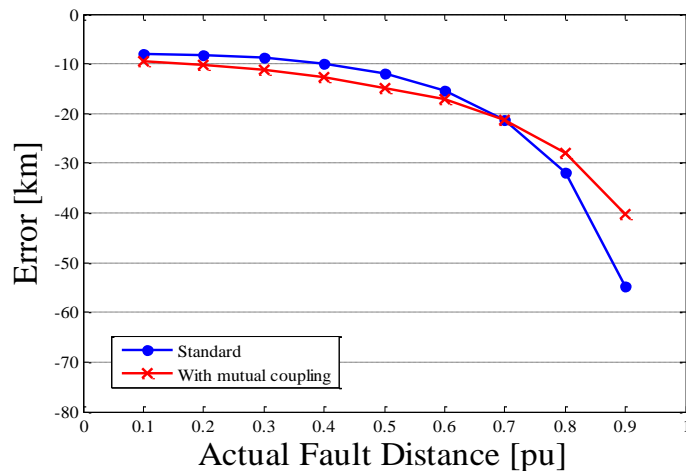
ภาพที่ 5.1 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดียวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน,

$$R_F = 1\Omega$$



ภาพที่ 5.2 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน,

$$R_F = 10\Omega$$



ภาพที่ 5.3 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน,

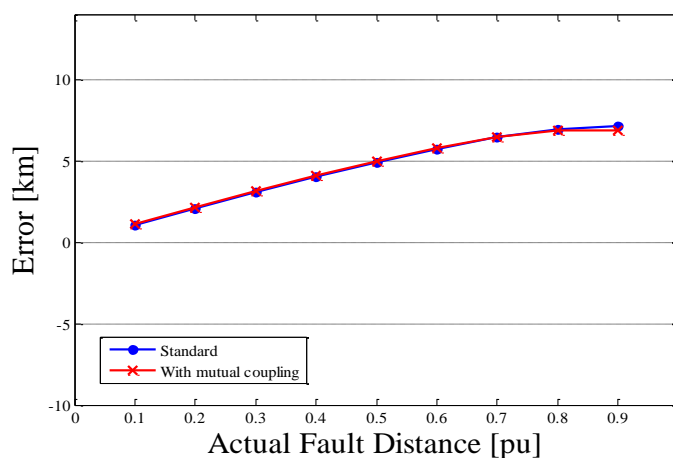
$$\underline{Z}_F = 5\angle 65^\circ\Omega$$

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน กรณี  $R_F = 1\Omega$  ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–2 กิโลเมตร ส่วน

ขั้นตอนวิธีมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 10 กิโลเมตร ในกรณี  $R_F = 10\Omega$  ผลการทดสอบเป็นในลักษณะเดียวกันกับกรณี  $R_F = 1\Omega$  ยกเว้น ณ จุดเกิดความผิดพลาดที่ 0.6 pu พบว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 2 กิโลเมตร ส่วนขั้นตอนวิธีมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 10 กิโลเมตร ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานในกรณีที่จุดเกิดความผิดพลาดอยู่ห่างจากปลายด้าน G มากกว่า 0.7 pu เท่านั้น กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5 – 40 กิโลเมตร ส่วนขั้นตอนวิธีมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5 – 55 กิโลเมตร

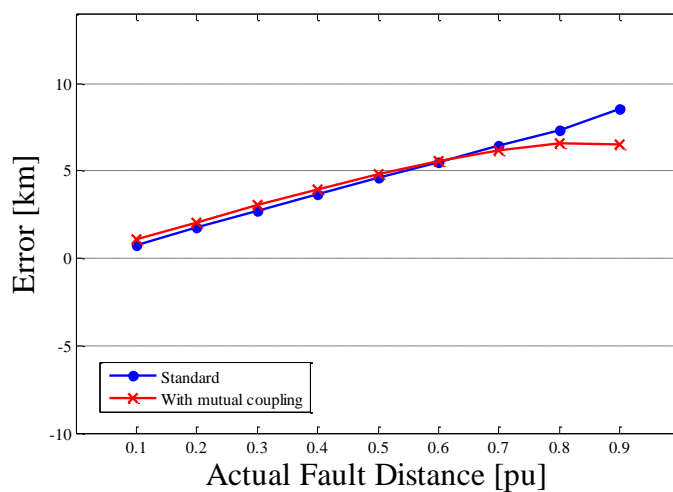
นอกจากนี้ยังพบว่า กรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  การทดสอบโดยขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณน้อยกว่าระยะทางจริง ส่วนการทดสอบโดยขั้นตอนวิธีมาตรฐานให้ผลการทดสอบแบบระยะคำนวณน้อยกว่าระยะทางจริงเฉพาะช่วง 0 pu ถึงประมาณ 0.7 pu เท่านั้น ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ผลการทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณมากกว่าระยะทางจริง

### 5.1.1.2 กรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส



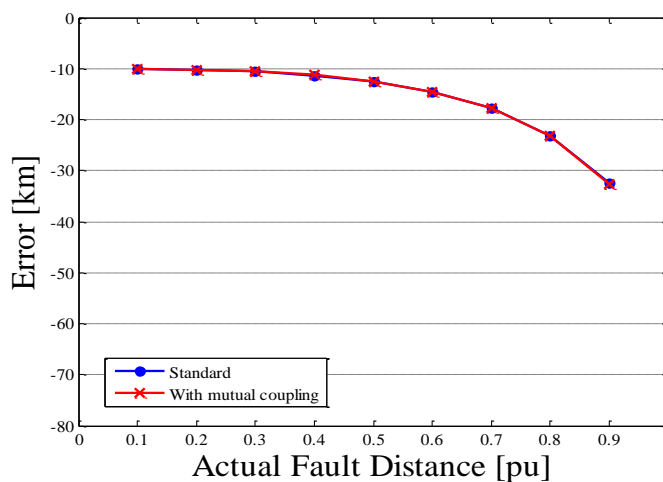
ภาพที่ 5.4 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนกรณีแบบปลายเดี่ยวความผิดพลาดแบบ 2 เฟส,

$$R_F = 1\Omega$$



ภาพที่ 5.5 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส,

$$R_F = 10\Omega$$



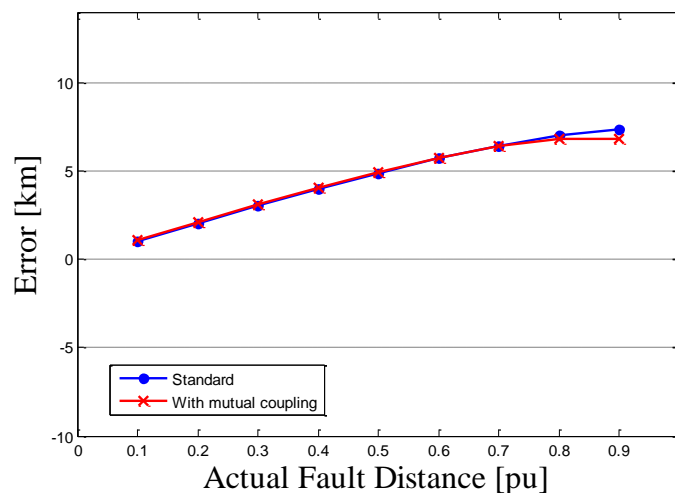
ภาพที่ 5.6 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส,

$$\underline{Z}_F = 5\angle 65^\circ \Omega$$

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส ระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันมากเกือบทุกจุดเกิดความผิดพลาด ยกเว้นช่วงที่เกิดความผิดพลาดอยู่ไกลเกิน 0.7 pu ของกรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  ระยะ

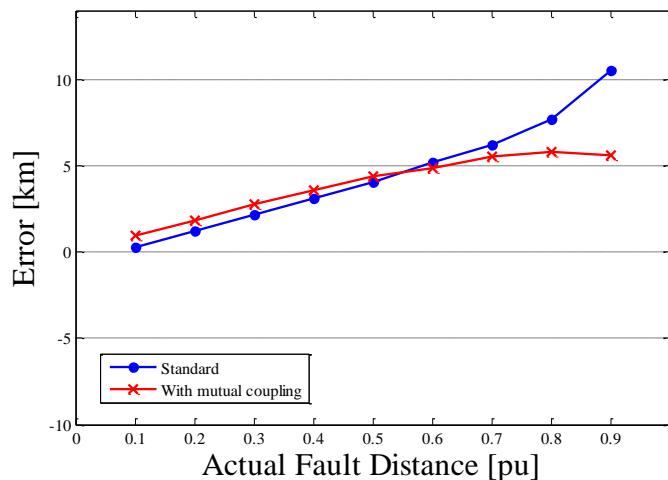
ผิดพ่วงที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพ่วงที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ทั้งกรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–10 กิโลเมตร ส่วนในกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 10–35 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า กรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  การทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณน้อยกว่าระยะทางจริง ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ผลการทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณมากกว่าระยะทางจริง

### 5.1.1.3 กรณีความผิดพ่วงแบบ 2 เฟสลงดิน

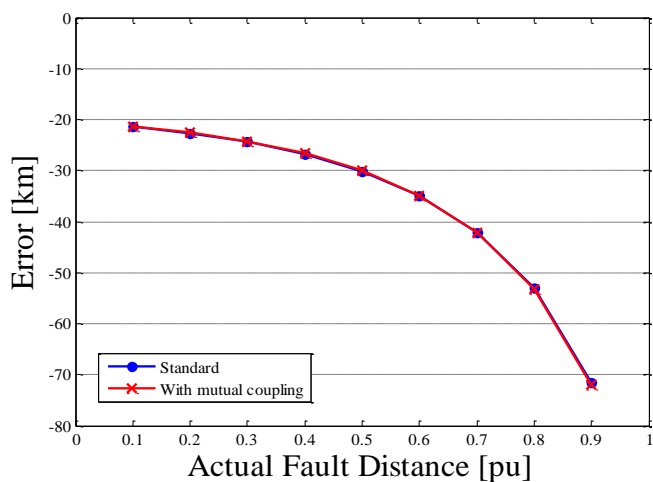


ภาพที่ 5.7 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพ่วงแบบ 2 เฟสลงดิน,

$$R_F = 1\Omega$$



ภาพที่ 5.8 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน,  
 $R_F = 10\Omega$



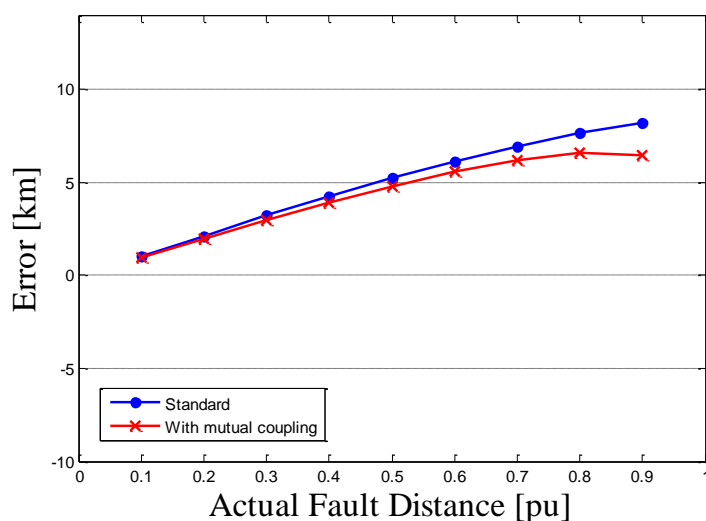
ภาพที่ 5.9 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน,  
 $\underline{Z}_F = 5\angle 65^\circ\Omega$

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน ระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณี  $R_F = 10\Omega$  จะเห็นว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรในช่วงประมาณ 0–0.7 pu ในช่วงที่ไกลกว่า 0.7 pu ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วม

ระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ทั้งกรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 0–10 กิโลเมตร ส่วนในกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 20–75 กิโลเมตร

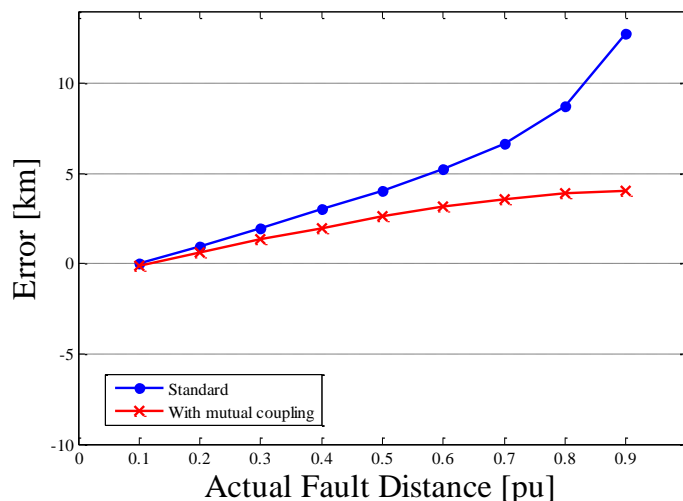
นอกจากนี้ยังพบว่า กรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  การทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณน้อยกว่าระยะทางจริง ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ผลการทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณมากกว่าระยะทางจริง

#### 5.1.1.4 กรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส



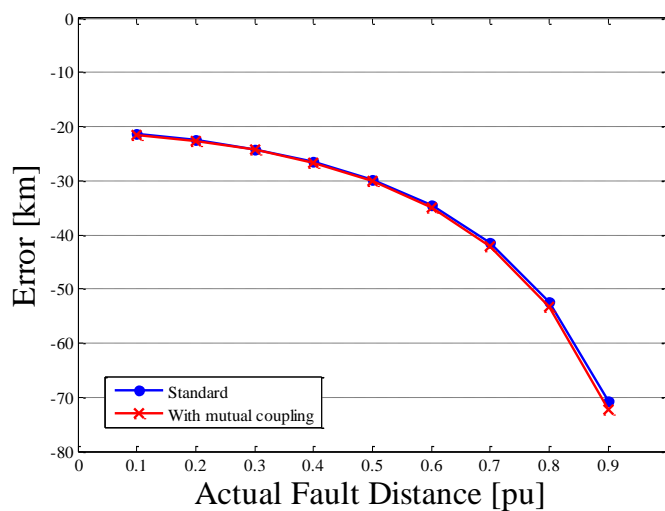
ภาพที่ 5.10 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส,

$$R_F = 1\Omega$$



ภาพที่ 5.11 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส,

$$R_F = 10\Omega$$



ภาพที่ 5.12 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส,

$$\underline{Z}_F = 5\angle 65^\circ\Omega$$

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส กรณี  $R_F = 1\Omega$  ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน และจะเห็นลักษณะดังกล่าวชัดเจนยิ่งขึ้นในช่วงที่จุดเกิดความผิดพลาดอยู่ไกลจากปลายด้าน G กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีทั้ง 2



แบบ ให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 10 กิโลเมตร ในกรณี  $R_F = 10\Omega$  ผลการทดสอบเป็นในลักษณะเดียวกันกับกรณี  $R_F = 1\Omega$  แต่จะชัดเจนยิ่งขึ้น กล่าวคือ ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่เกิดความผิดพลาดอยู่ไกลจากปลายด้าน G กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีที่คิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 5 กิโลเมตร ส่วนขั้นตอนวิธีมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0 – 15 กิโลเมตร ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวโดยรวม ขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ ให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 20 – 75 กิโลเมตร

นอกจากนี้ยังพบว่า กรณี  $R_F = 1\Omega$  และ  $R_F = 10\Omega$  การทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ ให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณน้อยกว่าระยะทางจริง ส่วนกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ผลการทดสอบโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบ ให้ผลการทดสอบเป็นแบบระยะคำนวณมากกว่าระยะทางจริง

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนของความผิดพลาดทั้ง 4 แบบ ในกรณี  $Z_F = 5\angle 65^\circ\Omega$  ระยะความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณโดยขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก เนื่องมาจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ประมาณให้อิมพีแดนซ์ความผิดพลาดมีลักษณะเป็นรีซิสทีฟอิมพีแดนซ์ เมื่อแทนตัวแปรดังกล่าวด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีทั้งส่วนรีซิสแทนต์และรีแอกแทนซ์ ยิ่งไปกว่านั้นค่ารีแอกแทนซ์ดังกล่าวยังมีค่ามากกว่ารีซิสแทนต์อีกด้วย จึงทำให้ระยะความผิดพลาดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก

นอกจากจากผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนที่แสดงดังภาพที่ 5.1 – 5.12 แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังทำการทดสอบผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีลำดับบวกและลำดับลบ โดยเปรียบเทียบระยะคลาดเคลื่อนกรณีที่เกิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีลำดับศูนย์อย่างเดียว กับกรณีที่เกิดผลของการเหนี่ยวนำร่วมของวงจรมีทั้ง 3 ลำดับ พบว่า ระยะคลาดเคลื่อนทั้งสองกรณีต่างกันน้อยมากกว่า (ไม่เกิน 10 เมตร) หรืออาจกล่าวได้ว่าการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีลำดับบวกและลำดับลบไม่มีผลต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด

### 5.1.2 ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง

สำหรับการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง ระยะคลาดเคลื่อน (e) คำนวณโดยใช้ระยะจริงที่ได้จากรายงานหน้างานของ กฟผ. ( $d_{actual}$ ) ลบด้วยระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการที่ 4.5 ( $d_{calculate}$ ) ตามสมการที่ 4.1

เหตุการณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าของ กฟผ. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2556 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียวโดยใช้ข้อมูลจากระบบส่งจริง

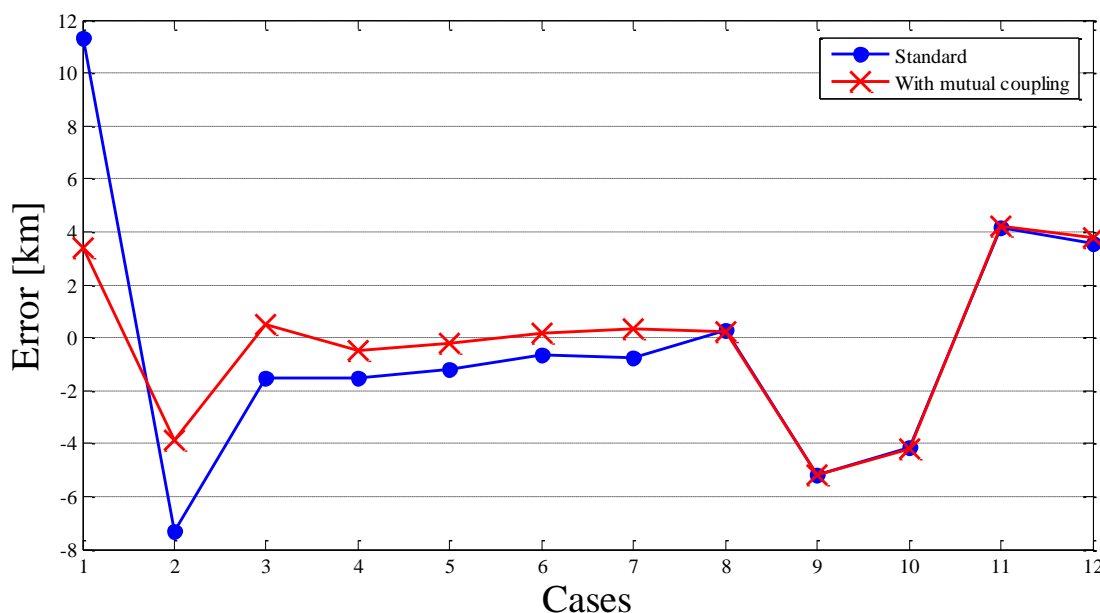
Case	Line Length[km]	Reported Location [km]	Calculated Distance		Error	
			Std. [km]	With mutual [km]	Std. [km]	With mutual [km]
1	116.05	35.3	24.01	31.92	11.29	3.38
2	60.441	59.9	67.23	63.76	-7.33	-3.86
3	41.92	2.505	1.005	2.015	1.5	0.49
4	41.92	39.415	40.95	39.895	-1.53	-0.48
5	73.07	33.6	34.8	33.79	-1.20	-0.19
6	198.9	6.33	6.98	6.15	-0.65	0.18
7	73.07	46.5	47.28	46.15	-0.78	0.35
8	70.83	19.99	16.45	16.24	3.54	3.75
9	44.14	24.14	19.99	19.93	4.15	4.21
10	70.83	3.99	3.71	3.76	0.28	0.23
11	44.14	20	24.15	24.19	-4.15	-4.19
12	48.5	32.37	37.56	37.56	-5.19	-5.19
13	65	46.67	50.31	50.31	-3.64	-3.64
14	116.05	40.70	21.14	21.14	19.56	19.56
15	123.39	49.86	48.48	48.48	1.38	1.38
16	123.39	80	74.99	74.99	5.01	5.01

ผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการคำนวณระยะผิดพลาดด้วยขั้นตอนวิธีปลายเดียวมาตรฐาน กับขั้นตอนวิธีปลายเดียวที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร โดยเหตุการณ์ที่ 1 – 12 เป็นความผิดพลาดประเภท 1 เฟสลงดิน ส่วนเหตุการณ์ที่ 13 และ

14 เป็นความผิดพลาดประเภท 2 สายลงดิน และเหตุการณ์ที่ 15 และ 16 เป็นความผิดพลาดประเภท 3 เฟส

ภาพที่ 5.13 แสดงผลการทดสอบจากตารางที่ 5.1 สำหรับกรณีที่เป็นความผิดพลาดแบบ 1 สายลงดิน จำนวน 12 เหตุการณ์ ในลักษณะกราฟเส้น โดยเส้นจุดทึบแสดงระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีปลายเดี่ยวมาตรฐานที่แยกแทนข้ออย่างง่าย ส่วนเส้นกากบาทแสดงระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร จะเห็นว่าเหตุการณ์ที่ 1 - 7 ระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน สำหรับเหตุการณ์ที่ 8 - 12 ระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากทั้ง 2 ขั้นตอนวิธีมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน

ส่วนกรณีที่เป็นความผิดพลาดแบบอื่นๆนอกเหนือจากกรณี 1 เฟสลงดิน ระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีทั้ง 2 แบบมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ต่างกันไม่เกิน 10 เมตร) ในทุกเหตุการณ์ จึงไม่ได้แสดงผลการทดสอบไว้



ภาพที่ 5.13 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบปลายเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริงกรณีความผิดพลาดแบบ 1 สายลงดิน

จากผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบจำลองและข้อมูลสายส่งจริง สามารถสรุปได้ว่าการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะมีผลทำให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดแม่นยำขึ้นอย่างมีนัยสำคัญใน

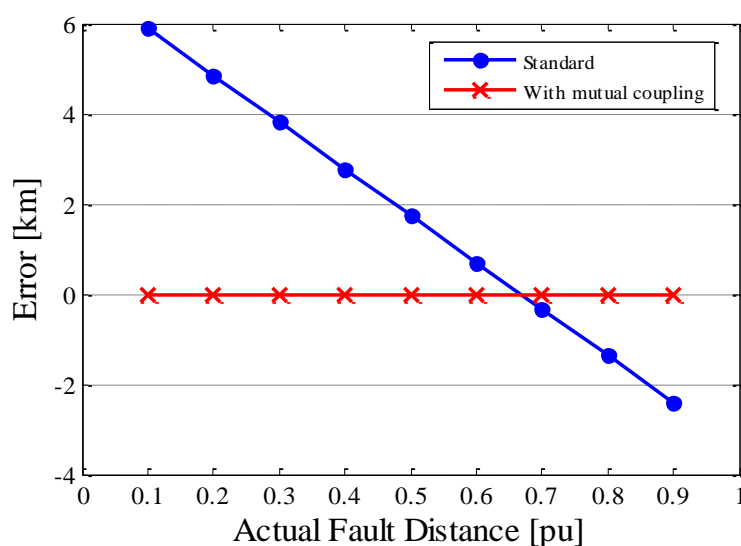
กรณีที่เป็นความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน และอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดมีลักษณะเป็นรีซิสทีฟ อิมพีแดนซ์ สำหรับความผิดพลาดอื่นๆ การเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะมีผลให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดแม่นยำขึ้นเฉพาะกรณีที่ความผิดพลาดเกิดบริเวณปลายสาย

## 5.2 ผลการทดสอบความแม่นยำสำหรับขั้นตอนวิธีสองปลาย

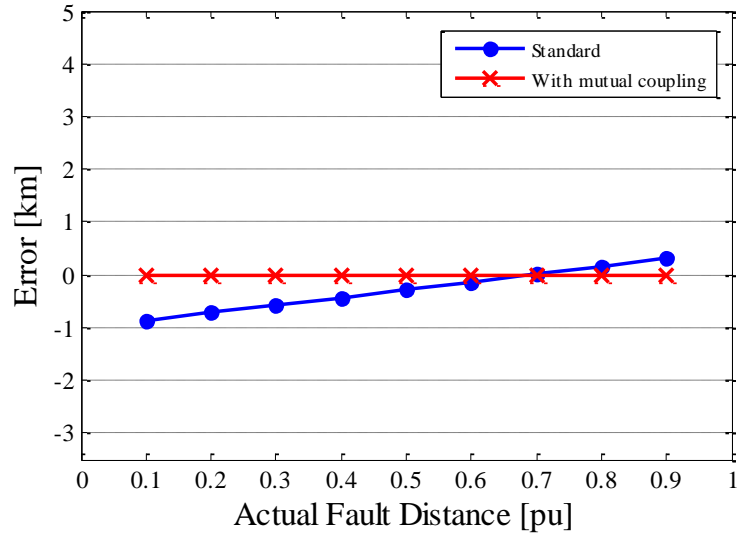
### 5.2.1 ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบจำลอง

ระยะคลาดเคลื่อน ( $e$ ) คำนวณโดยใช้ระยะจริงที่ได้จากการจำลอง ( $d_{actual}$ ) ลบด้วยระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการที่ 4.6 ( $d_{calculate}$ ) ตามสมการที่ 4.1

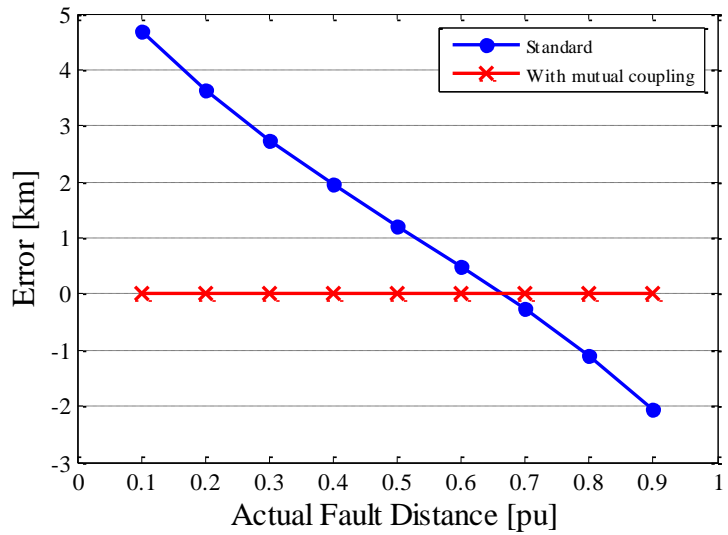
ในส่วนนี้จะแสดงผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจำลองสำหรับกรณีการทดสอบแบบสองปลาย โดยจะแสดงผลการทดสอบในลักษณะกราฟเส้นเฉพาะในกรณี  $Z_F = 5 \angle 65^\circ$  เท่านั้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดไม่มีผลต่อการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลาย และอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ [18] แกนนอนคือ ระยะผิดพลาดมีค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9 เพอร์ยูนิตของความยาวสายส่ง ส่วนแกนตั้งคือระยะคลาดเคลื่อน ( $e$ ) มีหน่วยเป็นกิโลเมตร



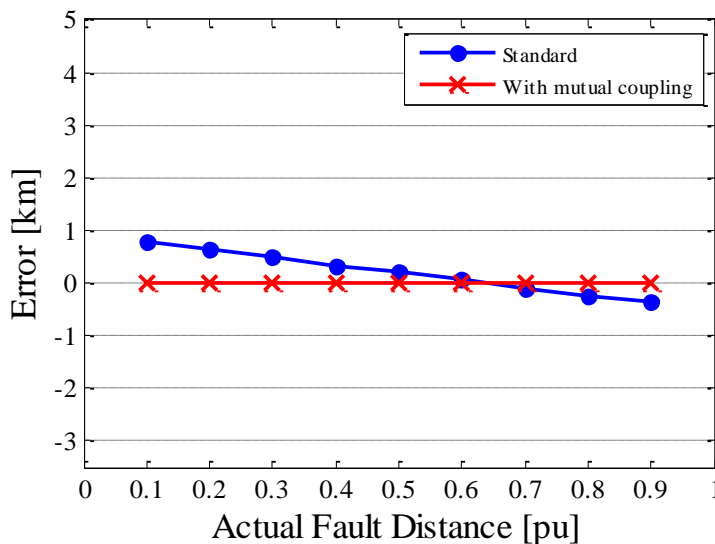
ภาพที่ 5.14 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน (A-G)



ภาพที่ 5.15 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 2 เฟส (A-B)



ภาพที่ 5.16 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน (A-B-G)



ภาพที่ 5.17 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายสำหรับความผิดพลาดแบบ 3 เฟส (A-B-C)

จากการพิจารณาผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนของความผิดพลาดทั้ง 4 แบบ จะเห็นว่า ระยะความผิดพลาดที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีที่มีการคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนจากระยะความผิดพลาดจริงน้อยมาก แตกต่างกับระยะความผิดพลาดที่คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีมาตรฐานอย่างมาก ในกรณีความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน ขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–6 กิโลเมตร ในกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟส ขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–1 กิโลเมตร ส่วนในกรณีความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน ขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–5 กิโลเมตร และในกรณีความผิดพลาดแบบ 3 เฟส ขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐานให้ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–1 กิโลเมตร

## 5.2.2 ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง

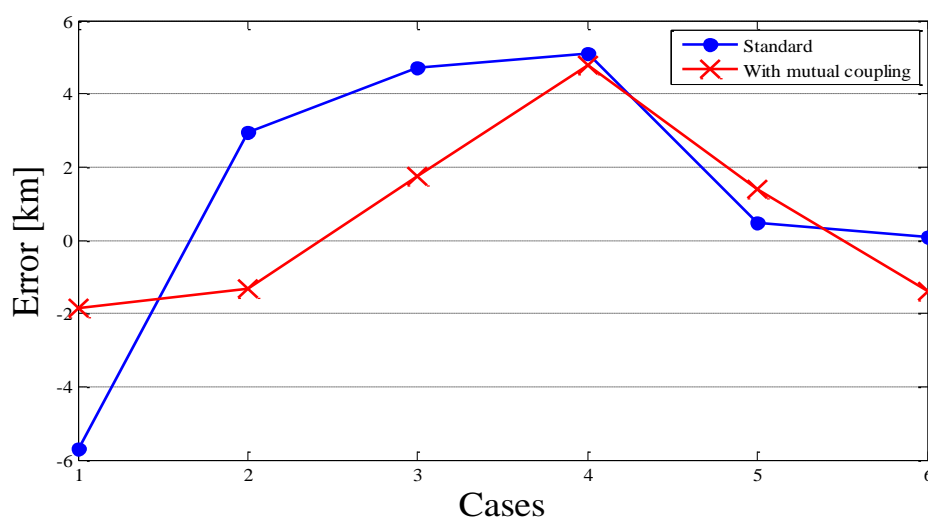
สำหรับการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง ระยะคลาดเคลื่อน (e) คำนวณโดยใช้ระยะจริงที่ได้จากรายงานหน้างานของ กฟผ. ( $d_{actual}$ ) ลบด้วยระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการที่ 4.6 ( $d_{calculate}$ ) ตามสมการที่ 4.1

เหตุการณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าของ กฟผ. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2555 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายโดยใช้ข้อมูลจากระบบส่งจริง

Case	Line Length[km]	Reported Location [km]	Calculated Distance		Error	
			Std. [km]	With mutual [km]	Std. [km]	With mutual [km]
1	29.32	20.61	26.36	22.45	-5.75	-1.84
2	70.83	19.99	17.06	21.32	2.93	-1.33
3	41.92	39.42	34.74	37.66	4.68	1.76
4	123.39	46.53	41.4	41.7	5.13	4.83
5	76.91	23.34	22.88	21.95	0.46	1.39
6	44.14	24.14	24.04	25.53	0.098	-1.39

ตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดของเหตุการณ์ที่ทดสอบและผลการทดสอบ โดยเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากการคำนวณระยะผิดพลาดด้วยขั้นตอนวิธีสองปลายมาตรฐาน กับขั้นตอนวิธีสองปลายที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร โดยเหตุการณ์ที่ 1-3 และ 5-6 เป็นความผิดพลาดประเภท 1 เฟสลงดิน ส่วนเหตุการณ์ที่ 4 เป็นความผิดพลาดประเภท 3 เฟส



ภาพที่ 5.18 ผลการคำนวณระยะคลาดเคลื่อนแบบสองปลายโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริง

ภาพที่ 5.18 แสดงผลการทดสอบจากตารางที่ 5.2 จำนวน 6 เหตุการณ์ ในรูปแบบกราฟ เส้นโดยเส้นจุดที่บ่งแสดงระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ส่วนเส้นกากบาทแสดงระยะคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร จะเห็นว่าเหตุการณ์ที่ 1 – 4 ระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน ส่วนเหตุการณ์ที่ 5 - 6 ระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระยะความผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ซึ่งเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์สายส่งของ 2 วงจร มีค่าไม่เท่ากัน ทั้ง 2 เหตุการณ์ดังกล่าว

จากผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบจำลองและข้อมูลสายส่งจริง สามารถสรุปได้ว่าการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะมีผลทำให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายแม่นยำขึ้นสำหรับความผิดพลาดทุกประเภท และจะแม่นยำขึ้นอย่างชัดเจนในกรณีที่เป็นการผิดพลาดประเภท 1 สายลงดิน และ 2 สายลงดิน

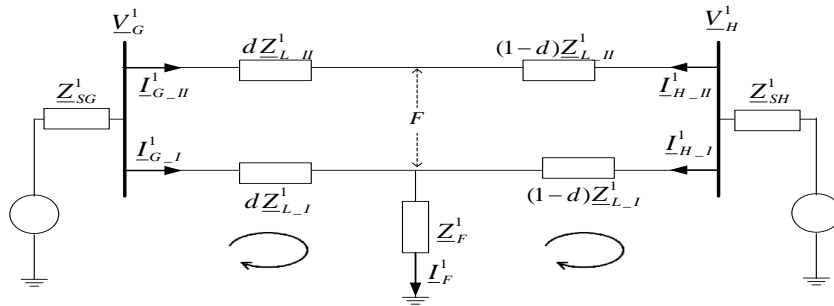
### 5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้ข้อมูลขณะเกิดความผิดพลาด

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ประโยชน์จากทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยในอดีตสังเคราะห์สมการคำนวณค่าพารามิเตอร์สายส่งขึ้นมา โดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดเป็นตัวแปรต้น สมการดังกล่าวพัฒนาขึ้นมาสำหรับสายส่งแบบ 2 วงจรบนเสา 1 ต้น แบบละเอียดผลของ line charging โดยมีข้อมูลแรงดันและกระแสจากวงจรที่เกิดความผิดพลาดและวงจรคู่ขนานครบทั้ง 2 ปลาย

#### 5.3.1 การประมาณค่าอิมพีแดนซ์สายส่งลำดับบวกและลำดับลบ

พิจารณาวงจรสมมูลลำดับบวกดังภาพที่ 5.19 ใช้สมมติฐานให้  $Z_{L-I}^1 = Z_{L-II}^1$  ดังนั้นสามารถใช้กฎแรงดันของ Kirchhoff เขียนความสัมพันธ์ของแรงดันได้เป็นสมการที่ 5.1 และ 5.2





ภาพที่ 5.19 วงจรสมมูลลำดับบวกสำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์สายส่ง

$$\underline{V}_G^1 = d\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{G-I}^1 + \underline{V}_F^1 \quad (5.1)$$

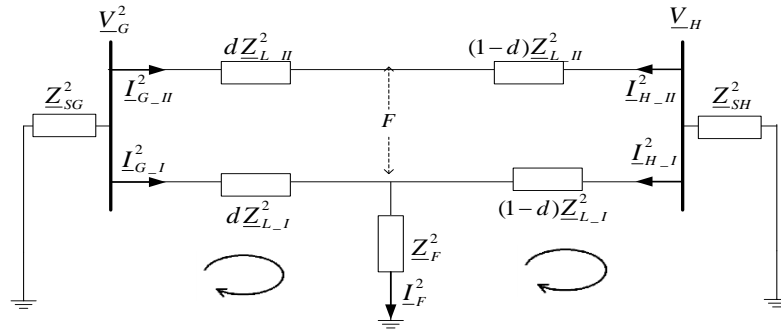
$$\underline{V}_H^1 = (1-d)\underline{Z}_{L-I}^1 \underline{I}_{H-I}^1 + \underline{V}_F^1 \quad (5.2)$$

ตัวแปร  $d$  ในสมการ 5.1 และ 5.2 สามารถแทนโดยใช้สมการที่ 3.54 ซึ่ง  $d$  ดังกล่าวจะเป็นฟังก์ชันของกระแสเพียงอย่างเดียว ทำการแก้สมการหาค่า  $\underline{Z}_{L-I}^1$  จะได้ว่า

$$\underline{Z}_{L-I}^1 = \frac{\underline{V}_G^1 - \underline{V}_H^1}{d(\underline{I}_{G-I}^1 + \underline{I}_{H-I}^1) - \underline{I}_{H-I}^1} \quad (5.3)$$

ค่า  $\underline{Z}_{L-I}^1$  ที่ได้จากสมการที่ 5.3 จะอยู่ในหน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร เนื่องจากค่า  $d$  ที่แทนไปในสมการมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

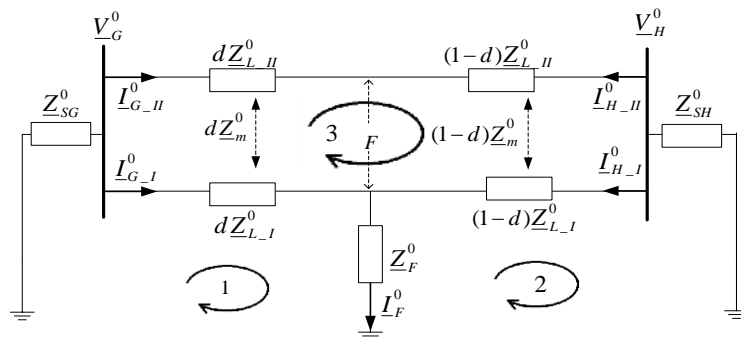
พิจารณาวงจรสมมูลลำดับบวกดังภาพที่ 5.20 ใช้สมมติฐานให้  $\underline{Z}_{L-I}^2 = \underline{Z}_{L-II}^2$  ทำการแก้สมการในลักษณะเดียวกับกรณีลำดับบวก จะได้สมการหาค่า  $\underline{Z}_{L-I}^2$  ดังนี้



ภาพที่ 5.20 วงจรสมมูลลำดับแบบละเลยผลของ line charging

$$\underline{Z}_{L-I}^2 = \frac{V_G^2 - V_H^2}{d(I_{G-I}^2 + I_{H-I}^2) - I_{H-I}^2} \quad (5.4)$$

### 5.3.2 การประมาณค่าอิมพีแดนซ์สายส่งลำดับศูนย์และอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์



ภาพที่ 5.21 วงจรสมมูลลำดับศูนย์แบบละเลยผลของ line charging

พิจารณาวงจรสมมูลลำดับศูนย์ดังภาพที่ 5.21 ให้สมมติฐานให้  $\underline{Z}_{L-I}^0 = \underline{Z}_{L-II}^0 = \underline{Z}_L^0$  สร้างสมการโดยใช้กฎแรงดันของ Kirchhoff จะได้สมการแรงดัน 3 สมการดังนี้

สมการรูปที่ 1

$$\underline{V}_G^0 = d\underline{Z}_L^0 I_{G-I}^0 + d\underline{Z}_m^0 I_{G-II}^0 + \underline{V}_F^0 \quad (5.5)$$

สมการรูปที่ 2

$$\underline{V}_H^0 = (1-d)\underline{Z}_L^0 I_{H-I}^0 + d\underline{Z}_m^0 I_{H-II}^0 + \underline{V}_F^0 \quad (5.6)$$

สมการรูปที่ 3

$$\begin{aligned} d\underline{Z}_L^0 I_{G-II}^0 + d\underline{Z}_m^0 I_{G-I}^0 - (1-d)\underline{Z}_L^0 I_{H-II}^0 - (1-d)\underline{Z}_L^0 I_{H-I}^0 \\ + (1-d)\underline{Z}_L^0 I_{H-I}^0 + (1-d)\underline{Z}_L^0 I_{H-II}^0 - d\underline{Z}_L^0 I_{G-I}^0 - d\underline{Z}_m^0 I_{G-II}^0 = 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

จัดรูปสมการที่ 5.7 จะได้ว่า

$$\underline{Z}_L^0 (I_{G-II}^0 - I_{G-I}^0) = \underline{Z}_m^0 (I_{G-II}^0 - I_{G-I}^0) \quad (5.8)$$

จากสมการที่ 5.8 เราจะได้ความสัมพันธ์  $\underline{Z}_{L-I}^0 = \underline{Z}_m^0$ , ลบสมการที่ 5.5 ด้วยสมการที่ 5.6 จะได้

$$\underline{V}_G^0 - \underline{V}_H^0 = [dI_{G-I}^0 - (1-d)I_{H-I}^0] \underline{Z}_L^0 + [dI_{G-II}^0 - (1-d)I_{H-II}^0] \underline{Z}_m^0 \quad (5.9)$$

ใช้ความสัมพันธ์  $\underline{Z}_{L-I}^0 = \underline{Z}_m^0$  แทนในสมการที่ 5.9 จะได้สมการหาค่า  $\underline{Z}_L^0$  ดังนี้

$$\underline{Z}_{L-I}^0 = \frac{\underline{V}_G^0 - \underline{V}_H^0}{d(I_{G-II}^0 + I_{G-I}^0) - (1-d)(I_{H-I}^0 + I_{H-II}^0)} \quad (5.10)$$

ค่า  $d$  ในสมการที่ 5.10 สามารถแทนโดยใช้สมการที่ 3.54 (ค่า  $d$  ดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของกระแสเพียงอย่างเดียว) เช่นเดียวกับในกรณีลำดับบวกและลบ และค่า  $\underline{Z}_{L-I}^0$  และค่า  $\underline{Z}_m^0$  ที่ได้จะมีหน่วยเป็นโอห์มต่อกิโลเมตร

กล่าวโดยสรุป สมการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สายส่งดังกล่าว ต้องใช้ข้อมูลแรงดันจากทั้ง 2 ปลาย กระแสจากทั้ง 2 วงจร ทั้ง 2 ปลาย ก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์สายส่ง ได้แก่  $\underline{Z}_{L-I}^1$ ,  $\underline{Z}_{L-I}^2$  และ  $\underline{Z}_{L-I}^0$  และยังสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรลำดับศูนย์  $\underline{Z}_m^0$  ได้อีก

ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าสำหรับแบบจำลองสายส่งดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำรวมระหว่างวงจรลำดับศูนย์  $Z_m^0$  มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายส่งลำดับศูนย์  $Z_{L-I}^0$

หมายเหตุ ค่า  $d$  จากสมการที่ 3.54 เป็นดังนี้

$$d = \frac{(I_{H-I}^k - I_{H-II}^k)}{(I_{G-I}^k - I_{G-II}^k) + (I_{H-I}^k - I_{H-II}^k)}$$

โดยที่  $k = 0, 1, 2$  ซึ่งหมายถึงค่าลำดับศูนย์, ลำดับบวก และลำดับลบ

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบผลจากการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความแม่นยำ การระบุตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแบบใช้ข้อมูลจากปลายเดียว และการทดสอบแบบใช้ข้อมูลสองปลาย และได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน นอกจากบทสรุปเรื่องผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรที่มีต่อการระบุตำแหน่งผิดพลาดแล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีเนื้อหาส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง ก็คือ การเสนอวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งโดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาด

การทดสอบผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรในแต่ละการทดสอบทำโดยเปรียบเทียบระยะคลาดเคลื่อนของระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีที่คิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร กับระยะคลาดเคลื่อนของระยะผิดพลาดที่คำนวณจากขั้นตอนวิธีมาตรฐานของแต่ละการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปได้ว่าการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรจะมีผลต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียวอย่างมีนัยสำคัญสำหรับกรณีที่เป็นความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน ดังนั้น การระบุตำแหน่งผิดพลาดสำหรับความผิดพลาดประเภทอื่นๆจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร แต่สำหรับการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลาย การเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรส่งผลต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาดในความผิดพลาดทุกประเภท นอกจากนี้ ยังสามารถสรุปได้ว่าการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรของวงจรลำดับบวกและลำดับลบไม่มีผลต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด กล่าวคือ จะมีเฉพาะการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรของวงจรลำดับศูนย์เท่านั้นที่ส่งผลต่อความแม่นยำการระบุตำแหน่งผิดพลาด

สำหรับสมการคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งโดยใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดนั้นได้พัฒนาขึ้นมาสำหรับสายส่งแบบ 2 วงจรบนเสา 1 ต้นที่มีข้อมูลกระแสและแรงดันครบทั้ง 2 ปลาย นอกจากจะสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งได้แล้ว ยังเป็นวิธีการใหม่ที่สามารถใช้คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำลำดับศูนย์ได้

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรต่อความผิดพลาดประเภทต่างๆ

ประเภทความผิดพลาด	ผลจากการพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร	
	ขั้นตอนวิธีปลายเดียว	ขั้นตอนวิธีสองปลาย
1 เฟสลงดิน	แม่นยำขึ้น	แม่นยำขึ้น
2 เฟส	-	แม่นยำขึ้น
2 เฟสลงดิน	-	แม่นยำขึ้น
3 เฟส	-	แม่นยำขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาขั้นตอนวิธีและเทคนิคต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และได้สังเคราะห์แนวทางการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีต่างๆให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของระบบและการเกิดความผิดพลาดแบบต่างๆ สรุปเรียงลำดับตามพัฒนาการและความแม่นยำของขั้นตอนวิธีจากน้อยไปมาก ดังตารางที่ 6.2 และ 6.3

ตารางที่ 6.2 แสดงขั้นตอนวิธีคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบปลายเดียวที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์และเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการใช้งาน ขั้นตอนวิธี 1-T.3 ใช้สำหรับสายส่งแบบ 2 วงจรภายใต้สมมติฐานคือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งทั้ง 2 วงจรนั้นมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถใช้ได้กับทุกประเภทความผิดพลาด ในกรณีที่อิมพีแดนซ์สายส่งมีค่าไม่เท่ากันและเป็นความผิดพลาดแบบ 1 สายลงดิน ควรใช้ขั้นตอนวิธี 1-T.2 ส่วนความผิดพลาดประเภทอื่นๆ ไม่ต้องคิดผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร ซึ่งควรใช้ขั้นตอนวิธี 1-T.1

ตารางที่ 6.3 แสดงขั้นตอนวิธีคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์และเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการใช้งาน ขั้นตอนวิธี 2-T.3 ใช้สำหรับสายส่งแบบ 2 วงจรภายใต้สมมติฐานคือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งทั้ง 2 วงจรนั้นมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถใช้ได้กับทุกประเภทความผิดพลาด กรณีที่เป็นสายส่งแบบ 2 วงจรและอิมพีแดนซ์สายส่งมีค่าไม่เท่ากันควรใช้ขั้นตอนวิธี 2-T.2 กรณีที่เป็นสายส่งแบบ 1 วงจรและไม่ใช้ความผิดพลาดแบบ 3 เฟส ควรใช้ขั้นตอนวิธี 2-T.2 เช่นกัน แต่ในกรณีที่ เป็นสายส่งแบบ 1 วงจรและความผิดพลาดแบบ 3 เฟส ควรใช้ขั้นตอนวิธี 2-T.1

ตารางที่ 6.2 สรุปเงื่อนไขสำหรับการใช้ขั้นตอนวิธีปลายเดี่ยวแบบต่างๆ

ขั้นตอนวิธีแบบปลายเดี่ยว	เงื่อนไขที่เหมาะสม
<p>1-T.1</p> <p>รีแอกแทนซ์อย่างง่าย</p> $d = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_{G-I}}{I_{G-I}}\right)}{\text{imag}\left(Z_{L-I}^1\right)}$ <p>(สมการที่ 2.4 หน้า 7)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 1 วงจร</li> <li>- ทุกประเภทความผิดพร้อม</li> <li>- อิมพีแดนซ์ผิดพร้อมเป็นรีซิสทีฟอิมพีแดนซ์ (<math>R_F</math>)</li> <li>- มุมเฟสของกระแสผิดพร้อมและกระแสที่ได้จากเครื่องมือวัดตรงกัน</li> </ul>
<p>1-T.2</p> <p>แบบชดเชยผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร</p> $d = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_{G-I}}{I_{G-IP}}\right)}{\text{imag}\left(Z_{L-I}^1\right)}$ <p>(สมการที่ 3.31 หน้า 21)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกันตลอดทั้งเส้น</li> <li>- เป็นความผิดพร้อมแบบ 1 สายลงดิน</li> <li>- ทราบค่ากระแสขณะเกิดความผิดพร้อมในวงจรคู่ขนาน</li> <li>- ทราบค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรลำดับศูนย์</li> <li>- อิมพีแดนซ์ผิดพร้อมเป็นรีซิสทีฟอิมพีแดนซ์ (<math>R_F</math>)</li> </ul>
<p>1-T.3</p> <p>แบบชดเชยผลของการเหนี่ยวนำระหว่างวงจรและมีการประมาณกระแสผิดพร้อม</p> $d = \frac{\text{re}(V_{G-I})\text{im}(I_F) - \text{re}(I_F)\text{im}(V_{G-I})}{\text{re}(Z_{L-I}^1 I_{G-IP})\text{im}(I_F) - \text{re}(I_F)\text{im}(Z_{L-I}^1 I_{G-IP})}$ <p>(สมการที่ 4.5 หน้า 42)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกันตลอดทั้งเส้น</li> <li>- ทุกประเภทความผิดพร้อม</li> <li>- อิมพีแดนซ์สายส่งของ 2 วงจรมีค่าเท่ากัน</li> <li>- ทราบค่ากระแสขณะเกิดความผิดพร้อมในวงจรคู่ขนาน</li> <li>- ทราบค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรลำดับศูนย์</li> <li>- อิมพีแดนซ์ผิดพร้อมเป็นรีซิสทีฟอิมพีแดนซ์ (<math>R_F</math>)</li> </ul>

ตารางที่ 6.3 สรุปเงื่อนไขสำหรับการใช้ขั้นตอนวิธีสองปลายแบบต่างๆ

ขั้นตอนวิธีแบบสองปลาย	เงื่อนไขที่เหมาะสม
<p>2-T.1</p> <p>แบบมาตรฐาน</p> $d_{0,1,2} = \frac{(V_{G-I}^{0,1,2} - V_{H-I}^{0,1,2}) + Z_{L-I}^{0,1,2} I_{H-I}^{0,1,2}}{Z_{L-I}^{0,1,2} (I_{G-I}^{0,1,2} + I_{H-I}^{0,1,2})}$ <p>(สมการที่ 2.8 หน้า 9)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 1 วงจร</li> <li>- ทุกประเภทความผิดพลาด</li> <li>- ให้ได้อิมพีแดนซ์ผิดพลาดทุกรูปแบบ</li> </ul>
<p>2-T.2</p> <p>แบบใช้เทคนิค Least-Square</p> $d = (\overline{M} \overline{M}')^{-1} \overline{M}' Y$ <p>(สมการที่ 2.18 หน้า 12)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 1 วงจร หรือ 2 วงจรที่อิมพีแดนซ์สายส่งของ 2 วงจรมีค่าไม่เท่ากัน</li> <li>- ความผิดพลาดแบบอื่นที่ไม่ใช่ความผิดพลาดแบบ 3 เฟส (เนื่องจากจะคลาดเคลื่อนมากกว่าขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐาน)</li> </ul>
<p>2-T.3</p> <p>แบบชดเชยผลของการเหนี่ยวนำระหว่างวงจร</p> $d_{0,1,2} = \frac{(I_{H-I}^{0,1,2} - I_{H-II}^{0,1,2})}{(I_{G-I}^{0,1,2} - I_{G-II}^{0,1,2}) + (I_{H-I}^{0,1,2} - I_{H-II}^{0,1,2})}$ <p>(สมการที่ 4.6 หน้า 43)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสายส่งแบบ 2 วงจรขนานกันตลอดทั้งเส้น</li> <li>- ทุกประเภทความผิดพลาด</li> <li>- อิมพีแดนซ์สายส่งของ 2 วงจรมีค่าเท่ากัน</li> <li>- ทราบค่ากระแสขณะเกิดความผิดพลาดในวงจรคู่ขนานทั้งสองปลาย</li> </ul> <p><u>หมายเหตุ</u> ควรทำการคำนวณโดยใช้กระแสลำดับบวกจะทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด</p>

สำหรับกรณีสายส่งแบบ 3 และ 4 วงจร ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้อภิปรายสูตรการคำนวณอย่างไว้ในส่วนภาคผนวก ข. และ ค. ตามลำดับ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาการระบุตำแหน่งผิดพลาดแบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร มีดังนี้

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้การเลือกช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาดโดยสร้างกราฟสัญญาณกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาด แล้วพิจารณาเลือกช่วงที่ค่ายอดของกราฟกระแสสูงกว่า



ปกติ และค่ายอดของกราฟแรงดันต่ำกว่าปกติ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในการเลือกช่วงเวลาขณะเกิดความผิดปกติได้ ดังนั้น หากสามารถเพิ่มกระบวนการคำนวณหาช่วงเวลาขณะเกิดความผิดปกติได้ แบบอัตโนมัติ ก็อาจทำให้ได้ช่วงเวลาที่ถูกต้องเหมาะสมยิ่งขึ้น และจะทำให้ค่ากระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติมีความถูกต้องยิ่งขึ้นตามไปด้วย

2. ในการทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริงทั้งกรณีการทดสอบแบบปลายเดี่ยวและแบบสองปลาย เป็นการคำนวณโดยตั้งสมมุติฐานว่าข้อมูลที่บันทึกได้ทั้งจากอุปกรณ์บันทึกสัญญาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายส่ง และค่าระยะความผิดปกติจริงที่บันทึกได้มีความถูกต้อง ซึ่งในทางปฏิบัติข้อมูลที่บันทึกได้จากอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากหม้อแปลง เช่น การอิ่มตัวของหม้อแปลง หรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการส่งสัญญาณระหว่างหม้อแปลงกับเครื่องบันทึกความผิดปกติ ดังนั้น หากสามารถแก้ปัญหาจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ก็จะลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนลงได้ และทำให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3. การทดสอบโดยใช้ข้อมูลระบบส่งจริงในกรณีแบบปลายเดี่ยวยังมีจำนวนเหตุการณ์ไม่มากนัก เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์บันทึกสัญญาณสำหรับสายส่งไฟฟ้ายังมีไม่เพียงพอ กล่าวคือ สายส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดตั้งที่ปลายฝั่งเดียวเท่านั้น สายส่งไฟฟ้าวงจรที่มีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดตั้งที่ปลายทั้ง 2 ฝั่งยังมีจำนวนน้อยมาก และอุปกรณ์บันทึกสัญญาณบางตัวอาจมีข้อมูลกระแสและแรงดันไม่ครบถ้วน นอกจากนี้ ยังต้องรอโอกาสที่จะมีความผิดปกติเกิดขึ้นในสายส่งนั้น จึงจะนำเหตุการณ์ดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ได้

4. สมการสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์สายส่งในบทที่ 5 สร้างขึ้นโดยใช้การละเลยผลของ line charging ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองสายส่งระยะสั้น ดังนั้น ในกรณีที่สายส่งที่พิจารณาเป็นแบบสายส่งระยะปานกลางหรือระยะยาว จำเป็นจะต้องปรับปรุงสมการดังกล่าวให้สอดคล้องกับแบบจำลองสายส่งนั้นๆด้วย

## รายการอ้างอิง

- [1] IEEE Standard C37.114. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. 2004.
- [2] วุฒิกิจ ตรีวิทยานนท์. การเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบวิเคราะห์ความผิดปกติของแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายส่งไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [3] ยสวินทร์ นุรีทาน. การเพิ่มความแม่นยำในการระบุประเภทและตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องบันทึกความผิดปกติทั้งสองปลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [4] IEEE Standard C37.114. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. 2004.
- [5] Eriksson, L., et al. An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Results from Remote-end Infeed. IEEE Trans on PAS (1985).
- [6] ABB, Group. Electrical Transmission and Distribution Reference Book. 1997.
- [7] Horak, J. Zero-Sequence Impedance of Overhead Transmission Lines, 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006.
- [8] Calero, F. Mutual Impedance in Parallel Lines – Protective Relaying and Fault Location Considerations. Schweitzer Engineering Laboratories, 2008.
- [9] Izykowski, J., et al. Locating Faults in Parallel Transmission Lines under Availability of Complete Measurements at One End. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. (2004).

- [10] de Andrade, L. and Sorrentino, E. Inclusion of the Zero-sequence Mutual Impedance in a Distributed Parameter Model of Transmission Lines. International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Czech Republic, May 2010.
- [11] Saha, M. Izykowski, J. and Rosolowski, E. Fault Location on Power Network. Springer, 2009.
- [12] Zhang, Q., et al. Transmission Line Fault Location for Phase-to-Earth Fault Using One-Terminal Data, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. (March 1999).
- [13] Izykowski, J., et al. Accurate Location of Faults in Parallel Transmission Lines under Availability of Measurements from One Circuit Only. 14<sup>th</sup> Power System Computational Conference, Sevilla, June 2002.
- [14] Apostolopoulos, C. A., and Korres, G. N. A Novel Fault-Location Algorithm for Double-Circuit Transmission Line Without Utilizing Line Parameters. IEEE Trans on Power Delivery, 26 (July 2011) : 1467 - 1478
- [15] Pereira, C., et al. Fault Location in Transmission Lines Using One-terminal Post-fault Voltage Data. IEEE Trans on Delivery (2004).
- [16] Prikler, L. and Høidalen, H.K. ATPDRAW version 5.6 User Manual. November 2009.
- [17] Henville, C. F. Digital Relay Reports Verify Power System Models. IEEE Trans on Power Delivery (April 1998).
- [18] วาที เลาหะโรจนพันธ์. การปรับปรุงข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติพร้อมและการศึกษาอิมพีแดนซ์ลัดวงจรในระบบส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2554.
- [19] Saadat, H. Power System Analysis. Singapore: McGraw-Hill, 2004.
- [20] Gilbert, D. M. and Morrison, I. F. A Statistical Method for the Detection of Power System Faults, Electrical Power & Energy Systems 19 (1997): 269 – 277.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $(a_1, a_2, a_0)$  และ  $(a_{F1}, a_{F2}, a_{F0})$ 

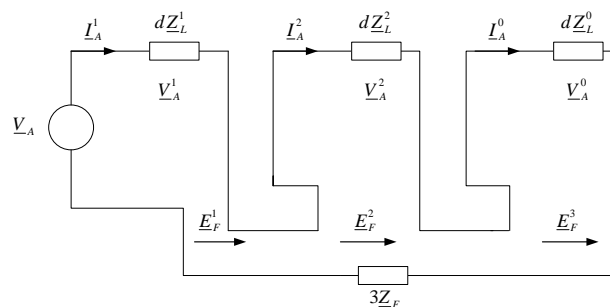
ตารางด้านล่างแสดงสัมประสิทธิ์แบ่งส่วนสำหรับคำนวณกระแสและแรงดันองค์ประกอบสมมาตร  $(a_1, a_2, a_0)$  ซึ่งเป็นตารางเดียวกันกับตารางที่ 3.1 สำหรับในส่วนนี้จะแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $(a_1, a_2, a_0)$  โดยจะยกตัวอย่างกรณีเป็นความผิดปกติประเภท 1 สายลงดิน

ประเภทความผิดปกติ	$a_1$	$a_2$	$a_0$
A-G	1	1	1
B-G	$a^2$	$a$	1
C-G	$a$	$a^2$	1
A-B, A-B-G	$1-a^2$	$1-a$	0
A-B-C, A-B-C-G	$1-a^2$	$1-a$	0
B-C, B-C-G	$a^2-a$	$a-a^2$	0
C-A, C-A-G	$a-1$	$a^2-1$	0

โดยที่  $a = \exp(j2\pi/3), j = \sqrt{-1}$

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $(a_1, a_2, a_0)$ 

สำหรับความผิดปกติแบบ A-G จะมีวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $(a_1, a_2, a_0)$  ดังนี้



ภาพที่ ก. 1 วงจรองค์ประกอบสมมาตรสำหรับความผิดปกติแบบ A-G [11]

จากภาพที่ ก. 1 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแสดังนี้

$$\begin{aligned}\underline{E}_F^1 &= \underline{V}_A^1 - d\underline{Z}_L^1 \underline{I}_A^1 \\ \underline{E}_F^2 &= \underline{V}_A^2 - d\underline{Z}_L^2 \underline{I}_A^2 \\ \underline{E}_F^0 &= \underline{V}_A^0 - d\underline{Z}_L^0 \underline{I}_A^0\end{aligned}$$

แรงดันที่เฟส A ณ ตำแหน่งลัดวงจร สามารถเขียนอยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตร ได้ดังนี้

$$\underline{E}_{AF} = \underline{E}_F^1 + \underline{E}_F^2 + \underline{E}_F^0 = 3\underline{Z}_F \underline{I}_A^0$$

แทนค่า  $\underline{E}_F^1$ ,  $\underline{E}_F^2$  และ  $\underline{E}_F^0$  จะได้ว่า

$$\left( \underline{V}_A^1 + \underline{V}_A^2 + \underline{V}_A^0 \right) - d\underline{Z}_L^1 \left( \underline{I}_A^1 + \underline{I}_A^2 + \frac{\underline{Z}_L^0}{\underline{Z}_L^1} \underline{I}_A^1 \right) = 3\underline{Z}_F \underline{I}_A^0$$

พิจารณาให้สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์  $(a_1, a_2, a_0)$  ดังนี้

$$\underline{V}_A = a_1 \underline{V}_A^1 + a_2 \underline{V}_A^2 + a_0 \underline{V}_A^0$$

และ

$$\underline{I}_{AP} = \left( a_1 \underline{I}_A^1 + a_2 \underline{I}_A^2 + a_0 \frac{\underline{Z}_L^0}{\underline{Z}_L^1} \underline{I}_A^1 \right)$$

โดยที่  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$  และ  $a_0 = 1$  เป็นไปดังที่แสดงในตารางผนวกที่ ก. 1 ส่วนกระแส  $\underline{I}_{AP}$  เป็นกระแสที่นิยามขึ้นจากการคำนวณ ไม่เท่ากับกระแส  $\underline{I}_A$  ที่ได้จากการวัด

ตารางด้านล่างนี้แสดง ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณกระแสผิดพลาดสำหรับความผิดพลาดประเภทต่างๆ  $(a_{F1}, a_{F2}, a_{F0})$  ซึ่งเป็นตารางเดียวกันกับตารางที่ 3.2 สำหรับในส่วนนี้จะแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $(a_{F1}, a_{F2}, a_{F0})$  โดยจะยกตัวอย่างกรณีเป็นความผิดพลาดประเภท 1 สายลงดิน

ประเภทความผิดพร้อม	$a_{F1}$	$a_{F2}$	$a_{F0}$
A-G	3	0	0
B-G	$3a^2$	0	0
C-G	$3a$	0	0
A-B	$1-a^2$	0	0
B-C	$a^2-a$	0	0
C-A	$a-1$	0	0
A-B-G	$1-a^2$	$1-a$	0
B-C-G	$a^2-a$	$a-a^2$	0
C-A-G	$a-1$	$a^2-1$	0
A-B-C, (A-B-C-G)	$1-a^2$	0	0

โดยที่  $a = \exp(j2\pi/3), j = \sqrt{-1}$

ตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ ( $a_{F1}, a_{F2}, a_{F0}$ ) [9,17]

- จาก  $\underline{I}_F = a_{F1}\underline{I}_F^1 + a_{F2}\underline{I}_F^2 + a_{F0}\underline{I}_F^0$
- สมมติเกิดความผิดพร้อมแบบ A-G นั่นคือ  $\underline{I}_F = \underline{I}_F^A$  และ  $\underline{I}_F^B = \underline{I}_F^C = 0$  ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_F^0 \\ \underline{I}_F^1 \\ \underline{I}_F^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_F^A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \underline{I}_F^A \\ \underline{I}_F^A \\ \underline{I}_F^A \end{bmatrix}$$

- นั่นคือ  $\underline{I}_F^0 = \underline{I}_F^1 = \underline{I}_F^2 = \frac{1}{3}\underline{I}_F^A$
- จากความสัมพันธ์ด้านบน จะสามารถแสดง  $\underline{I}_F$  ในรูปองค์ประกอบสมมาตรได้หลายทางเลือกดังนี้
  - $\underline{I}_F = \underline{I}_F^0 + \underline{I}_F^1 + \underline{I}_F^2$
  - $\underline{I}_F = 3\underline{I}_F^1$
  - $\underline{I}_F = 3\underline{I}_F^2$
  - $\underline{I}_F = 3\underline{I}_F^0$

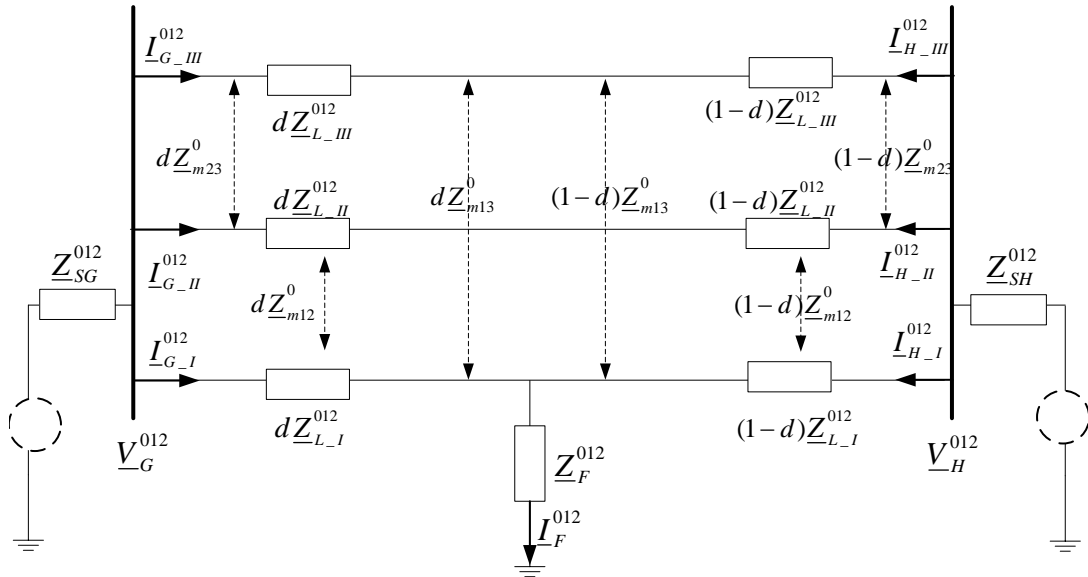
$$- \quad \underline{I}_F = 1.5\underline{I}_F^1 + 1.5\underline{I}_F^2 \quad (\text{และแบบอื่นในลักษณะเช่นเดียวกันนี้})$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในตารางที่ 3.2 อยู่ในกรณี  $\underline{I}_F = 3\underline{I}_F^1$  โดยมีเหตุผลเพื่อต้องการเน้นให้ปริมาณลำดับบวกมีน้ำหนักมากกว่าลำดับลบ และกำหนดให้  $a_{F0} = 0$  เพราะต้องการหลีกเลี่ยงการใช้อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ ปริมาณดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือต่ำเนื่องจากขึ้นอยู่กับความต้านทานไฟฟ้าของดิน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้และอยู่ภายใต้อิทธิพลของสภาพอากาศ [5,7,9,10,11,16]



## ภาคผนวก ข.

สมการคำนวณตำแหน่งผิดพ้องแบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร  
สำหรับสายส่งแบบ 3 วงจร



ภาพที่ ข. 1 วงจรความผิดพ้องสำหรับสายส่งแบบ 3 วงจร

วงจรสมมูลดังภาพที่ ข.1 เกิดความผิดพ้องที่วงจรที่ 1 สมมติให้อิมพีแดนซ์ของสายส่งของทุกวงจรมีค่าเท่ากัน จะเขียนสมการความผิดพ้องสำหรับวงจรที่ 1 ได้ดังนี้

$$V_G^{012} - V_H^{012} + (Z_{LI}^{012} I_{HI}^{012} + Z_{m12}^0 I_{HII}^0 + Z_{m13}^0 I_{HIII}^0) \\ = d[Z_{LI}^{012} (I_{GI}^{012} + I_{HI}^{012}) + Z_{m12}^0 (I_{GII}^0 + I_{HII}^0) + Z_{m13}^0 (I_{GIII}^0 + I_{HIII}^0)]$$

นิยามตัวแปรต่างๆดังนี้

$$Y' = V_G^{012} - V_H^{012} + (Z_{LI}^{012} I_{HI}^{012} + Z_{m12}^0 I_{HII}^0 + Z_{m13}^0 I_{HIII}^0)$$

$$M' = Z_{LI}^{012} (I_{GI}^{012} + I_{HI}^{012}) + Z_{m12}^0 (I_{GII}^0 + I_{HII}^0) + Z_{m13}^0 (I_{GIII}^0 + I_{HIII}^0)$$

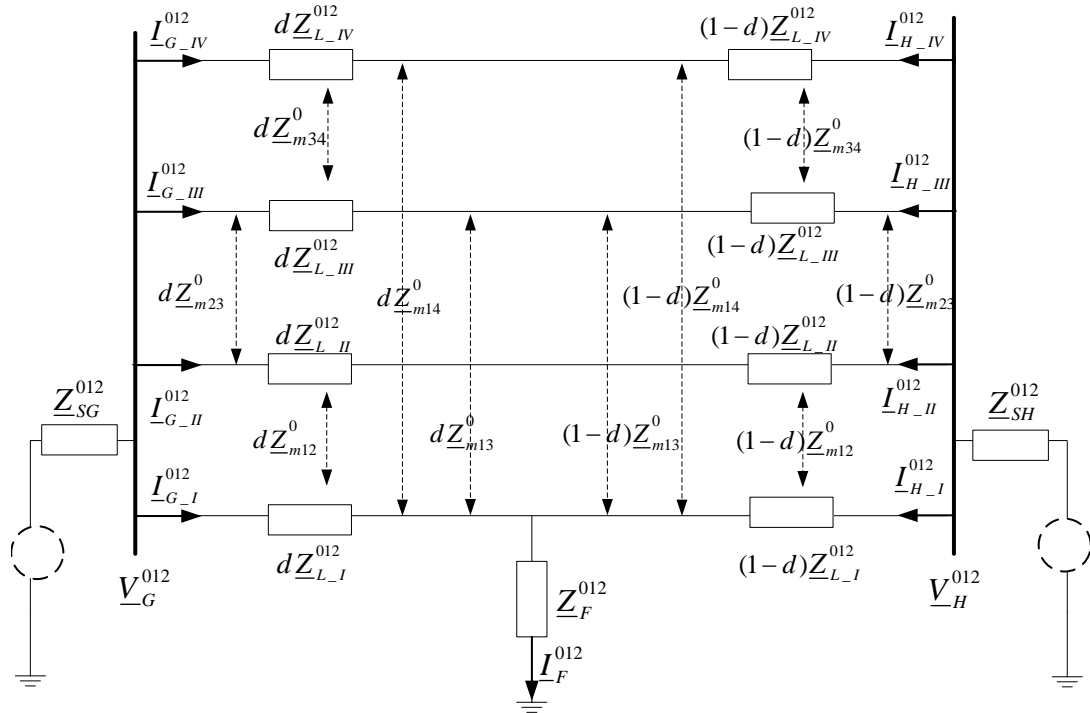
ประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายโดยพิจารณาผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรแบบไม่ต้องทราบประเภทความผิดพลาดดังนี้

$$d = (\overline{M' M'})^{-1} \overline{M' Y'}$$

โดยที่  $\overline{M'}$  คือ ทรานสโพสคอนจูเกตของ  $M'$

## ภาคผนวก ค.

สมการคำนวณตำแหน่งผิดพ่วงแบบพิจารณาการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร  
สำหรับสายส่งแบบ 4 วงจร



ภาพที่ ค. 1 วงจรความผิดพ่วงสำหรับสายส่งแบบ 4 วงจร

วงจรสมมูลดังภาพที่ ข.1 เกิดความผิดพ่วงที่วงจรที่ 1 สมมติให้อิมพีแดนซ์ของสายส่งของทุกวงจรมีค่าเท่ากัน จะเขียนสมการความผิดพ่วงสำหรับวงจรที่ 1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & V_G^{012} - V_H^{012} + (Z_{L_I}^{012} I_{H_I}^{012} + Z_{m_{12}}^0 I_{H_{II}}^0 + Z_{m_{13}}^0 I_{H_{III}}^0 + Z_{m_{14}}^0 I_{H_{IV}}^0) \\
 & = d[Z_{L_I}^{012} (I_{G_I}^{012} + I_{H_I}^{012}) + Z_{m_{12}}^0 (I_{G_{II}}^0 + I_{H_{II}}^0) + Z_{m_{13}}^0 (I_{G_{III}}^0 + I_{H_{III}}^0) + Z_{m_{14}}^0 (I_{G_{IV}}^0 + I_{H_{IV}}^0)]
 \end{aligned}$$

นิยามตัวแปรต่างๆดังนี้

$$Y' = V_G^{012} - V_H^{012} + (Z_{LI}^{012} I_{HI}^{012} + Z_{m12}^0 I_{HII}^0 + Z_{m13}^0 I_{HIII}^0 + Z_{m14}^0 I_{HIV}^0)$$

$$M' = Z_{LI}^{012} (I_{GI}^{012} + I_{HI}^{012}) + Z_{m12}^0 (I_{GII}^0 + I_{HII}^0) + Z_{m13}^0 (I_{GIII}^0 + I_{HIII}^0) + Z_{m14}^0 (I_{GIV}^0 + I_{HIV}^0)$$

ประยุกต์ใช้เทคนิค Least-Square จะได้สมการคำนวณตำแหน่งผิดพลาดแบบสองปลายโดยพิจารณาผลการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรแบบไม่ต้องทราบประเภทความผิดพลาดดังนี้

$$d = (\overline{M' M'})^{-1} \overline{M' Y'}$$

โดยที่  $\overline{M'}$  คือ ทราบสโพลคอนจูเกตของ  $M'$

## ภาคผนวก ง.

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

T. Chotprom and N. Hoonchareon, “Examining Impact of Mutual Coupling between Circuits on Transmission Line Fault Location”, in the International Electrical Engineering Conference (iEECON), Chiang Mai, Thailand , Mar 13-15, 2013.

T. Chotprom and N. Hoonchareon , “Improved Transmission Line Fault Location Considering Mutual Coupling between Circuits”, in the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference (ECTI-CON 2013), Krabi, Thailand , May 15 – 17, 2013.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนภัทร์ โชติพรหม เกิดวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดนครสวรรค์ เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555