

การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการหาตำแหน่งความผิดพร่องบนสายส่งจากข้อมูลทั้งสองปลายสาย  
โดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่ง

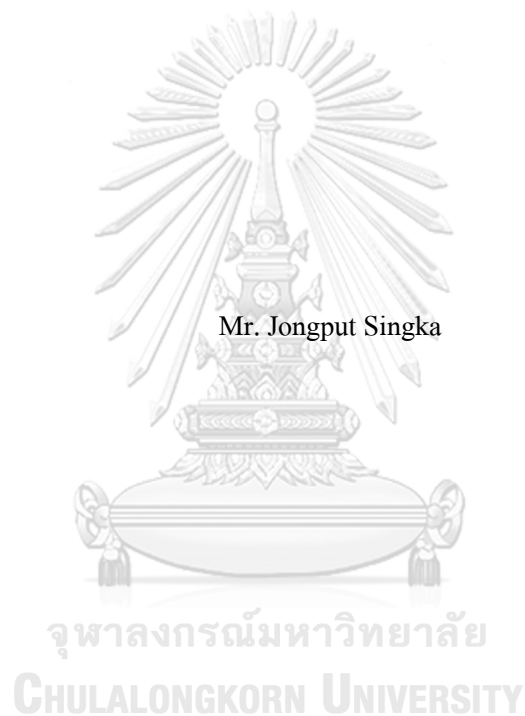


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

COMPARATIVE STUDY ON FAULT LOCATION TECHNIQUES FOR TRANSMISSION  
LINES BASED ON TWO – TERMINAL METHOD WITHOUT USING LINE PARAMETERS.



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

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการหาตำแหน่งความผิด  
พร้อมบนสายส่งจากข้อมูลทั้งสองปลายสายโดยไม่ใช้  
พารามิเตอร์ของสายส่ง

โดย

นายจงวุฒิ สิงห์กา

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชชัย เตชะสถอนันต์)

ประธานกรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจารณ์ หวังดี)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จงพุดิ ถึงห้ค้ : การศึคษาเปรึยบเทึยบเทคนึคการหาตำแหน่งความผึคพรัองบนสายส่ง จากข้อมูลท้งสองปลายสายโดยไม้ใช้พารามึเตอร์ของสายส่ง. ( COMPARATIVE STUDY ON FAULT LOCATION TECHNIQUES FOR TRANSMISSION LINES BASED ON TWO – TERMINAL METHOD WITHOUT USING LINE PARAMETERS.) อ.ที่ปรึคษาหลัก : ผศ. ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคค

จวบจนปัจจุบันมีการนำเสนอเทคนิคการคำนวณหาตำแหน่งความผึคพรัองบนสายส่งโดยไม้ใช้พารามึเตอร์ของสายส่งอย่างหลากหลาย ส่วนใหญ่จะคำนวณจากกระแสและแรงดันจากท้งสองปลายที่ต้งค้ถึงถึงการประสานเวลาของข้อมูลจากท้งสองฝั่ง วิทยานึพนธ์นี้ศึคษาเปรึยบเทึยบความต้งค้ในการคำนวณตำแหน่งความผึคพรัองของ 4 เทคนึคที่ไม้ใช้พารามึเตอร์ของสายส่ง พรึอมศึคษาพารามึเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความแม่นย้ ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองระบบไฟฟ้ากรณึที่เกึคความผึคพรัอง โดยปรึบค้พารามึเตอร์ต้งๆ เช่น ตำแหน่งที่เกึคความผึคพรัอง ความยาวสายส่ง ความต้านทานที่จุดเกึคความผึคพรัอง ชนิดของความผึคพรัอง ความคลาดเคลึอนของหม้อแปลงเครื่งม้อวัด นอกจากนี้ได้ทดสอบใช้ข้อมูลจริงเมื่อกเกึคความผึคพรัองบนสายส่งที่ได้จากเครื่งบันทึกความผึคพรัองมาใช้ในการศึคษาเปรึยบเทึยบด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึคษา 2563

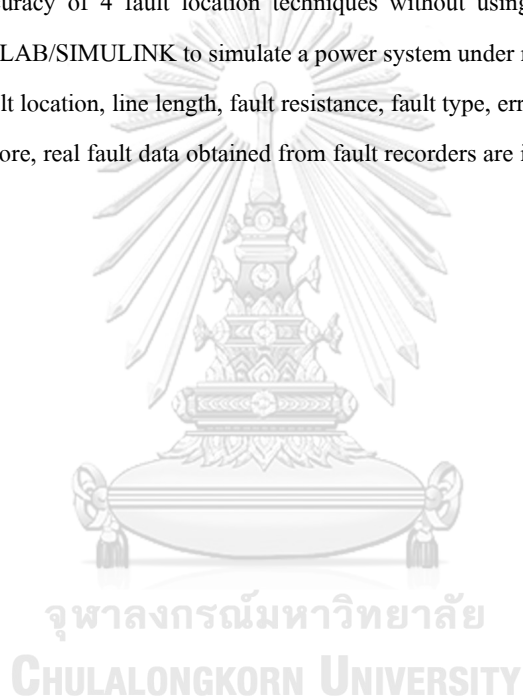
ลายม้อชื้อนึลิต .....  
ลายม้อชื้อ อ.ที่ปรึคษาหลัก .....

## 6170120921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD:

Jongput Singka : COMPARATIVE STUDY ON FAULT LOCATION TECHNIQUES FOR TRANSMISSION LINES BASED ON TWO – TERMINAL METHOD WITHOUT USING LINE PARAMETERS.. Advisor: Asst. Prof. Channarong Banmonkol

Up to the present time, various techniques without using line parameters have been proposed to determine fault location on a transmission line. Most techniques based on the calculation of currents and voltages from both line ends with a concern in time synchronization. This thesis presents a study to compare accuracy of 4 fault location techniques without using line parameters. The tests are performed using MATLAB/SIMULINK to simulate a power system under many fault conditions. Impacts of parameters such as fault location, line length, fault resistance, fault type, error of instrument transformers are investigated. Furthermore, real fault data obtained from fault recorders are implemented as comparative case study.



Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.ชาญรงค์ บาลมงคง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งสนับสนุนผู้ทำวิจัยจนสามารถทำวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.รัชชัย เตชสุนันต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิจารณ์ หวังดี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เหมาะสม

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ความเข้าใจจนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับสำเร็จได้

สุดท้ายนี้คุณค่าทั้งหลายที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตแด่หลวงปู่อ้วน และบิดามารดาที่เคยอดรมสั่งสอน รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน

จงพูนสิริ สิ้นหทัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

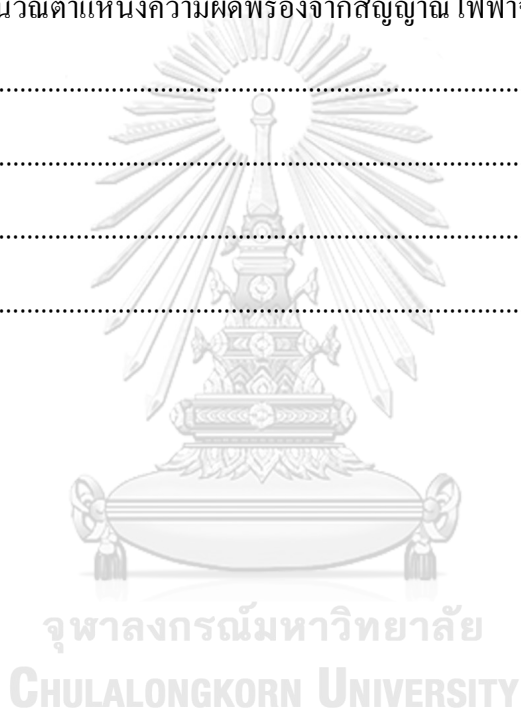
## สารบัญ

	หน้า
.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
ขอบเขตงานวิจัย .....	2
วิธีการดำเนินงาน .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตำแหน่งความผิดพร่อง.....	3
2.1 องค์ประกอบในระบบส่ง[1] .....	3
2.2 แบบจำลองของสายส่ง.....	3
2.3 องค์ประกอบสมมาตร[2] .....	5
2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ของระบบไฟฟ้ากับองค์ประกอบสมมาตร .....	6
2.4 ทฤษฎีกำลังสองน้อยที่สุด[3] .....	9
2.5 ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน [4].....	10
2.5.1 ระเบียบของนิวตัน-ราฟสันสำหรับสมการไม่เชิงเส้น.....	12



บทที่ 3 เทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช่พารามิเตอร์ของสายส่ง.....	14
3.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด[5] .....	15
3.2 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร .....	16
3.2.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปรเสนอโดย [6] และ [5].....	17
3.2.2 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร โดยมีการ พิจารณาค่าเก็บประจุชุนาน [7].....	17
3.3 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน .....	19
3.3.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันแบบแบ่ง ตามชนิดความผิดพลาด [8] .....	19
3.4.1 การคำนวณสำหรับความผิดพลาดลงดิน .....	19
3.4.2 การคำนวณสำหรับความผิดพลาดแบบเฟสไม่ลงดิน .....	21
บทที่ 4 การจำลองระบบไฟฟ้าและการทดสอบเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช่พารามิเตอร์.....	23
4.1 การคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab และ Simulink.....	23
4.2 การทดสอบความถูกต้องแต่ละวิธี.....	25
4.2.1 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 1 .....	25
4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 2 .....	30
4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 3 .....	34
4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 4 .....	38
4.3 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการคำนวณ .....	39
4.3.1 การศึกษาผลกระทบจากค่าความต้านทานความผิดพลาด .....	40
4.3.2 การศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาด .....	41
4.3.3 การศึกษาผลกระทบจากความยาวสาย.....	42
4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด.....	43

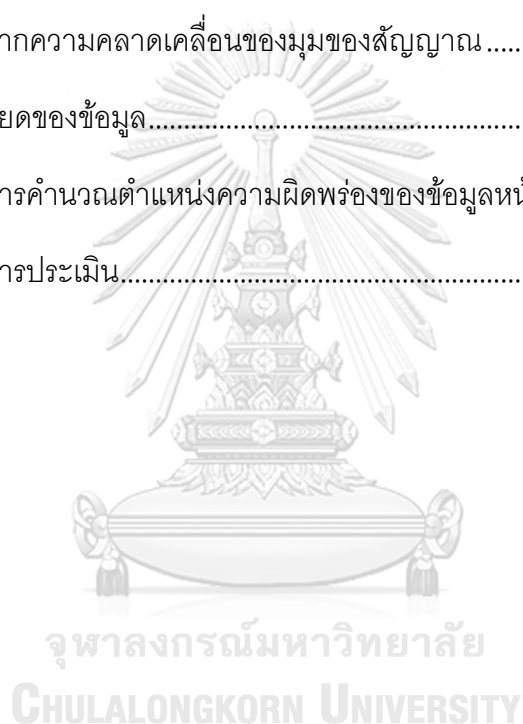
4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากการแท็บเล็ต.....	44
4.3.5 การศึกษาผลกระทบจากสายคู่.....	45
4.4 การทดสอบความไวต่อความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์วัด.....	47
4.4.1 ผลจากความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณ.....	47
4.4.2 ผลจากความคลาดเคลื่อนของมุม.....	49
4.5 การศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ.....	49
4.6 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดจากสัญญาณไฟฟ้าจากหน้างาน.....	53
บทที่ 5 สรุปผล.....	61
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	66



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G.....	26
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H .....	26
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของสายส่ง .....	27
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1.....	27
ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G.....	30
ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H .....	30
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ของสายส่ง .....	30
ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1.....	31
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G.....	34
ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H .....	34
ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของสายส่ง.....	34
ตารางที่ 12 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1.....	35
ตารางที่ 13 ข้อมูลชุดที่ 1.....	38
ตารางที่ 14 ข้อมูลชุดที่ 2.....	39
ตารางที่ 15 ค่าเดาเริ่มต้น .....	39
ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส G และบัส H .....	40
ตารางที่ 17 พารามิเตอร์ของสายส่ง .....	40
ตารางที่ 18 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย .....	40
ตารางที่ 19 ผลลัพธ์จากค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดที่เปลี่ยนไป .....	41
ตารางที่ 20 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด.....	42

ตารางที่ 21 ผลลัพธ์จากความยาวสายที่เปลี่ยนไป.....	43
ตารางที่ 22 ผลลัพธ์จากความผิดพร่องไม่สมมาตร.....	44
ตารางที่ 23 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากโหลด.....	45
ตารางที่ 24 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากสายคู่.....	46
ตารางที่ 25 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากสายคู่ที่มีโหลดต่ออยู่.....	47
ตารางที่ 26 ผลลัพธ์จากความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณ.....	48
ตารางที่ 27 ผลลัพธ์จากความคลาดเคลื่อนของมุมของสัญญาณ.....	49
ตารางที่ 28 รายละเอียดของข้อมูล.....	60
ตารางที่ 29 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพร่องของข้อมูลหน้างาน.....	60
ตารางที่ 30 ผลลัพธ์การประเมิน.....	61



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แผนผังวงจรเดี่ยวของระบบไฟฟ้า .....	3
รูปที่ 2 แผนผังวงจรเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติ .....	3
รูปที่ 3 แผนผังวงจรเดี่ยวของสายส่ง.....	4
รูปที่ 4 แบบจำลองสายส่งของระบบไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติ .....	4
รูปที่ 5 เฟสเซอร์ลำดับบวก.....	6
รูปที่ 6 เฟสเซอร์ลำดับลบ.....	6
รูปที่ 7 เฟสเซอร์ลำดับศูนย์.....	6
รูปที่ 8 เฟสเซอร์ในสถานะปกติ.....	6
รูปที่ 9 เฟสเซอร์ในสถานะที่ผิดปกติ .....	6
รูปที่ 10 เวกเตอร์ของเฟสเซอร์ .....	6
รูปที่ 11 แบบจำลองโครงข่ายลำดับเมื่อเกิดการลัดวงจรจากเฟส a ลงดิน .....	8
รูปที่ 12 การเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายลำดับแยกตามชนิดความผิดปกติ.....	9
รูปที่ 13 การหารากของสมการด้วยวิธีระเบียบของนิวตัน-ราฟสัน .....	11
รูปที่ 14 แผนภาพเส้นเดี่ยวของสายส่ง .....	14
รูปที่ 15 องค์ประกอบลำดับบวกในช่วงที่เกิดความผิดปกติ.....	17
รูปที่ 16 แผนผังการคำนวณด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน.....	21
รูปที่ 17 แผนภาพบล็อก Fourier .....	24
รูปที่ 18 แผนภาพบล็อก sequence analyzer.....	24
รูปที่ 19 สรุปขั้นตอนการปฏิบัติการ โดยรวม.....	25
รูปที่ 20 แบบจำลองระบบไฟฟ้าด้วย Simulink .....	26

รูปที่ 21 สายส่งในระบบย่อย .....	26
รูปที่ 22 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 1 .....	27
รูปที่ 23 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 1 .....	28
รูปที่ 24 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 1 .....	28
รูปที่ 25 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 1 .....	28
รูปที่ 26 การใช้งานแผนภาพบล็อก sequence analyzer.....	29
รูปที่ 27 ขั้นตอนการแปลงขนาดและมุมเป็นจำนวนเชิงซ้อนใน Editor ของ Matlab .....	29
รูปที่ 28 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 2.....	31
รูปที่ 29 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 2.....	31
รูปที่ 30 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 2.....	32
รูปที่ 31 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 2.....	32
รูปที่ 32 ขนาดแรงดันลำดับบวกและลบฝั่ง G.....	32
รูปที่ 33 มุมเลื่อนเฟสของแรงดันลำดับบวกและลบฝั่ง G .....	33
รูปที่ 34 ตำแหน่งความผิดพลาดจากการคำนวณ .....	33
รูปที่ 35 กราฟรูปกล่องของตำแหน่งความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยวิธีที่ 2.....	33
รูปที่ 36 สายส่งแบบพายในระบบย่อย .....	34
รูปที่ 37 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 3.....	35
รูปที่ 38 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 3 .....	35
รูปที่ 39 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 3.....	36
รูปที่ 40 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 3 .....	36
รูปที่ 41 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง .....	37
รูปที่ 42 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง .....	37
รูปที่ 43 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 50 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง .....	37

รูปที่ 44 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 80 เปอร์เซนต์ของสายส่ง .....	38
รูปที่ 45 สายส่งสั้นที่มีโหลดต่ออยู่ .....	44
รูปที่ 46 ระบบจำลองที่มีสายต่อขนาน .....	46
รูปที่ 47 ระบบจำลองที่มีสายต่อขนานที่มีโหลด 1 MW ต่ออยู่ .....	47
รูปที่ 48 การเพิ่มขนาดสัญญาณขึ้นด้วยการคูณด้วย gain .....	48
รูปที่ 49 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลอง .....	50
รูปที่ 50 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลอง .....	50
รูปที่ 51 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลอง .....	51
รูปที่ 52 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลอง .....	51
รูปที่ 53 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลอง .....	52
รูปที่ 54 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลอง .....	52
รูปที่ 55 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลอง .....	52
รูปที่ 56 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลอง .....	53
รูปที่ 57 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 1 .....	53
รูปที่ 58 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 1 .....	54
รูปที่ 59 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 1 .....	54
รูปที่ 60 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 1 .....	54
รูปที่ 61 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 2 .....	55
รูปที่ 62 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 2 .....	55
รูปที่ 63 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 2 .....	55
รูปที่ 64 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 2 .....	56
รูปที่ 65 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 3 .....	56
รูปที่ 66 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 3 .....	56

รูปที่ 67 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 3 .....	57
รูปที่ 68 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 3 .....	57
รูปที่ 69 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 4 .....	57
รูปที่ 70 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 4 .....	58
รูปที่ 71 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 4 .....	58
รูปที่ 72 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 4 .....	58
รูปที่ 73 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 5 .....	59
รูปที่ 74 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 5 .....	59
รูปที่ 75 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 5 .....	59
รูปที่ 76 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 5 .....	60



# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

โครงข่ายระบบไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ขยายใหญ่มากขึ้นตามความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจร ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ซึ่งปัจจุบันมีการให้ความสำคัญกับความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ามากขึ้น โดยความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าสามารถวัดได้จากดัชนีต่างๆ เช่น SAIDI หรือ SAIFI ที่มีกำหนดคำนวณครั้งที่ไฟดับในแต่ละปีและเวลาเฉลี่ยในการดับแต่ละครั้งไม่ควรเกินกี่นาที เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นบนสายส่งกำลัง อุปกรณ์ป้องกันจะแยกวงจรออกจากระบบไฟฟ้า โดยยังสามารถค้นหาตำแหน่งความผิดปกติได้รวดเร็วเท่าไรก็จะสามารถลดเวลาการดับของไฟฟ้าได้มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งความแม่นยำในการค้นหาตำแหน่งความผิดปกตินั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยงานซ่อมบำรุง เพราะสามารถประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายเนื่องจากการค้นหาตำแหน่งความผิดปกติ เพื่อลดผลกระทบจากความผิดปกติและรักษาความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการตรวจสอบแก้ไขปัญหาอย่างรวดเร็ว ซึ่งความเร็วในการแก้ไขปัญหาแปรผันตามความสามารถในการค้นหาตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ เนื่องจากระบบส่งมีขนาดใหญ่และตำแหน่งความผิดปกติที่สังเกตได้ยาก โดยปกติการค้นหาตำแหน่งความผิดปกติมีขีดจำกัดทางกายภาพ เช่น การฟื้นฟูระบบผ่านการปิดสวิตช์และการทำงานของรีโคลสเซอร์ สังเกตจากสายที่ขาด ตำแหน่งรีเลย์เป้าหมาย กลิ่นไหม้จากสายไฟ เป็นต้น นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยีที่มีความสามารถในการรวบรวมข้อมูล เช่น มิเตอร์อัจฉริยะ ข้อมูลจากศูนย์บริการลูกค้า ข้อมูลจาก SCADA และข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ความผิดปกติ เป็นต้น มาช่วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งความผิดปกติได้โดยนำข้อมูลที่บันทึกมาคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ

การคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติ โดยทั่วไปจะมีการนำค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟมาใช้ในการคำนวณ แต่อิมพีแดนซ์ของสายไฟจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดความผิดปกติ ส่งผลทำให้ผลลัพธ์จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนแปรผันตามสภาพโดยรอบ ซึ่งในการลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อม จำเป็นจะต้องวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟที่แม่นยำ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการค้นหาตำแหน่งความผิดปกติ จึงมีการคิดค้นวิธีคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติโดยไม่ใช้อิมพีแดนซ์ของสายไฟ

ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายไฟอย่างมากมาย โดยงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ทฤษฎีสองแหล่งจ่ายที่จะต้องวัดข้อมูลทั้งสองบัสให้มีเวลาประสานกัน แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดค่าในปัจจุบันมีความก้าวหน้าอย่างมากซึ่งสามารถรายงานความมุมของสัญญาณในแต่ละแหล่งจ่ายได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งความผิดปกติจึงขึ้นกับความแม่นยำประสิทธิภาพของการคำนวณ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาและทดสอบวิธีคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติบนสายส่งจากข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากทั้งสองปลายสาย โดยทดสอบการทำงานกับระบบไฟฟ้าจำลอง

ด้วยโปรแกรม Simulink จากนั้นจึงทดสอบกับข้อมูลแรงดันและกระแสขณะเกิดความผิดพลาดที่บันทึกไว้ในเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดแบบดิจิทัลไปคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งจากการคำนวณกับตำแหน่งที่สำรวจพบจากหน้างานจริง

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการหาตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายไฟในกรณีข้อมูลมีการประสานเวลากัน
2. เพื่อค้นหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาด
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายไฟ ที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายสถานการณ์

### ขอบเขตงานวิจัย

1. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งจากระบบไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรม simulink
2. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งจากข้อมูลแรงดันและกระแสจากหน้างาน
3. ใช้การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) ในการประสานเวลาข้อมูลทั้ง 2 แหล่ง
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดแต่ละวิธี
5. เขียนโปรแกรมคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยโปรแกรม Matlab

### วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดแบบไม่ใช้พารามิเตอร์และวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทดสอบการใช้โปรแกรม matlab คำนวณตำแหน่งความผิดพลาด
3. ค้นหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด
4. ทดสอบสมมติฐานและพัฒนาโปรแกรมคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด
5. วิเคราะห์ข้อมูลจากผลลัพธ์
6. รวบรวมข้อมูลจากการวิจัยและสรุปผล

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ

#### 2.1 องค์ประกอบในระบบส่ง[1]

การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติจากข้อมูลทั้งสองปลายสายนั้น ใช้ข้อมูลกระแสและแรงดันที่วัดได้จากอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะกำหนดขอบเขตของสายส่งที่สนใจซึ่งมีทิศทางกระแสเข้าไปทางสายส่งตาม  $I_G$  และ  $I_H$  ในรูปที่ 1 โดยทฤษฎีการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติพิจารณาจากข้อมูลและแบบจำลองของโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งในระบบส่ง วงจรเดี่ยวแบบ 3 เฟสเป็นรูปแบบวงจรที่เรียบง่ายที่สุด ที่จะแสดงแผนผังของแหล่งจ่ายที่ส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งาน ในรูปที่ 1 คือแผนผังวงจรเดี่ยวของระบบไฟฟ้า กำหนดให้เครื่องหมาย  $Z_L$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ส่วนเครื่องหมาย  $G$  และ  $H$  คือบัสที่อยู่ปลายสายส่งทั้งสองด้าน นอกจากนี้องค์ประกอบที่อยู่ภายนอกบัส  $G$  และบัส  $H$  จะกำหนดเป็นเพียงแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเท่านั้น โดยเมื่อเกิดความผิดปกติ แผนผังวงจรเดี่ยวของสายส่งจะเป็นดังรูปที่ 2 โดยจุด  $F$  คือตำแหน่งจุดเกิดความผิดปกติบนสายส่ง ซึ่งรายละเอียดแบบจำลองสายส่งในระบบไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติเป็นไปตามรูปที่ 4

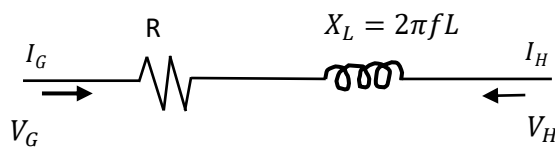


รูปที่ 2 แผนผังวงจรเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติ

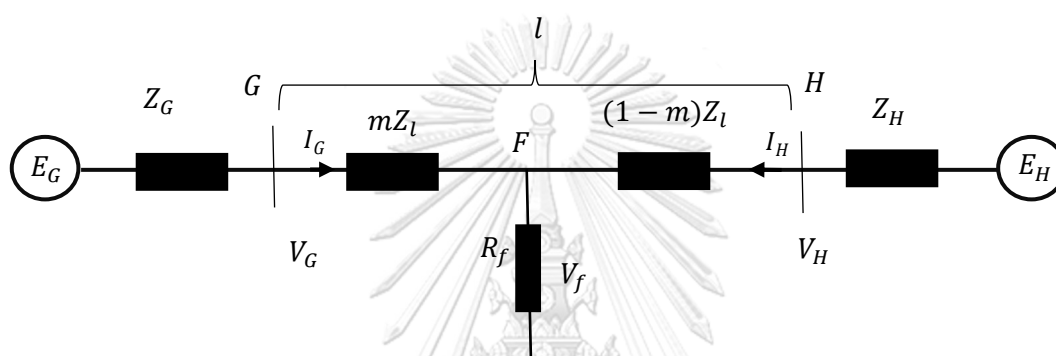
#### 2.2 แบบจำลองของสายส่ง

แบบจำลองของสายส่งแสดงถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบ เช่น การจำลองระบบส่งในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจรเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ โดยแบบจำลองของสายส่งจะแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบก้อน (lumped model) และ แบบกระจาย (distributed model) โดยแบบจำลองแบบก้อนจะแสดงค่าพารามิเตอร์คงที่ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ

รูปที่ 3 คือแบบจำลองอย่างง่ายที่ประกอบไปด้วยค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรมกัน โดยแบบจำลองชนิดนี้ใช้แสดงพารามิเตอร์ของสายระยะสั้น (น้อยกว่า 80 km)



รูปที่ 3 แผนผังวงจรเดี่ยวของสายส่ง



รูปที่ 4 แบบจำลองสายส่งของระบบไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติ

จากรูปที่ 4

$E_G$ , และ  $E_H$  คือ แรงดันแหล่งจ่ายจากฝั่ง G และ H

$Z_G$ , และ  $Z_H$  คือ อิมพีแดนซ์ของโครงข่ายจากฝั่ง G และ H

$V_G, I_G, V_H$  และ  $I_H$  คือ แรงดันและกระแสที่ปลายสายฝั่ง G และ H

$Z_L, L$  คืออิมพีแดนซ์และค่าเหนี่ยวนำของสายส่ง

$l$  คือ ความยาวสาย

$R_f$  คือความต้านทานความผิดปกติ

โดยทั่วไปวงจรจากรูปที่ 3 สามารถใช้ในการเขียนอธิบายองค์ประกอบของสายส่งเฟสเดี่ยวและสายส่งแบบสามเฟสสมดุล ในสภาวะปกติแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นองค์ประกอบลำดับบวก ซึ่งในสภาวะที่ไม่สมดุลหรือส่วนใหญ่คือการเกิดความผิดปกติในระบบส่งตามรูปที่ 4 จะทำให้สายส่งแบ่งออกเป็นสองส่วน โดย F คือตำแหน่งความผิดปกติบนสาย ซึ่งส่วนแรกมีระยะจาก G ถึง F เป็น m และ ส่วนที่สองมีระยะจาก F ถึง H

เป็น (1-m) ระยะทั้งสองมีหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต ในกรณีสายส่งแบบสามเฟส แรงดัน  $V$  และกระแส  $I$  จะมีค่าเป็น เวกเตอร์ที่มีองค์ประกอบเป็นค่าในแต่ละเฟส

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยมี  $Z$  เป็นเมทริกซ์ของอิมพีแดนซ์ที่มีองค์ประกอบแนวทแยงเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายในแต่ละเฟสและ องค์ประกอบที่อยู่นอกแนวทแยงคือค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟส และวงจรมีได้มีการละเลยค่าแอดมิตแตนซ์ ของสาย จึงไม่มีการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุขนาน โดย  $Z_{L,s}$  คืออิมพีแดนซ์ของสายในแต่ละเฟส และ  $Z_{L,m}$  คืออิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟส

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{L,s} & Z_{L,m} & Z_{L,m} \\ Z_{L,m} & Z_{L,s} & Z_{L,m} \\ Z_{L,m} & Z_{L,m} & Z_{L,s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

นอกจากนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายและค่าอิมพีแดนซ์ร่วมสามารถหาได้จากการคำนวณทางเรขาคณิตของสายส่ง โดยปกติค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและค่าอิมพีแดนซ์ร่วมทั้งหมดจะมีค่าไม่สมดุลหรือก็คือมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละ เฟส ซึ่งไม่สอดคล้องกับแบบจำลอง จึงต้องทำให้เมทริกซ์ความต้านทานมีความสมดุลด้วยวิธีการสลับเปลี่ยน ตำแหน่งของสายตัวนำหรือการ *Transposition* แต่ถ้าไม่มีการสลับเปลี่ยนตำแหน่งของสายตัวนำ แบบจำลองจะ สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร

### 2.3 องค์ประกอบสมมาตร[2]

แนวคิดเรื่ององค์ประกอบสมมาตร คิดค้นโดย C.L.Fortescue ในปี 1918 ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้าในสภาวะที่ไม่สมดุลด้วยองค์ประกอบใหม่ที่มีความสมดุล สามารถแบ่งได้ 3 องค์ประกอบ

1) องค์ประกอบลำดับบวก ประกอบไปด้วยองค์ประกอบเฟสสมดุล ที่มีการเรียงลำดับเหมือนกับเฟสเซอร์ของ ระบบไฟฟ้าเดิม จากรูปที่ 5

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \quad (4)$$

$$V_{c1} = a V_{a1} \quad (5)$$

2) องค์ประกอบลำดับลบ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบเฟสสมดุล ที่มีการเรียงลำดับตรงข้ามกับเฟสเซอร์ของ ระบบไฟฟ้าเดิม จากรูปที่ 6

$$V_{b2} = aV_{a2} \tag{6}$$

$$V_{c2} = a^2V_{a2} \tag{7}$$

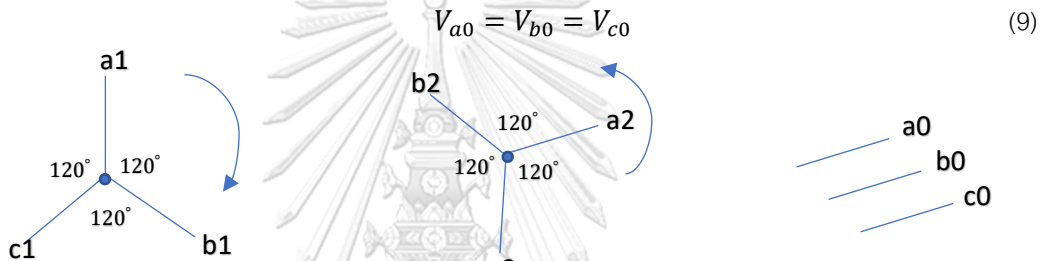
$a$  คือ ค่าเลื่อนเฟส  $120^\circ$  ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูป  $e^{j120^\circ}$  หรือ เขียนเป็น

$$a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j\sin(120^\circ) \tag{8}$$

$$a = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = -0.5 - j0.866$$

3) องค์ประกอบลำดับศูนย์ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบเฟสสมดุล ที่มีขนาดเท่ากับขนาดของระบบไฟฟ้าเดิม จากรูปที่ 7



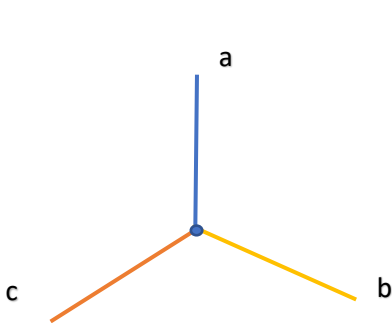
รูปที่ 5 เฟสเซอร์ลำดับบวก

รูปที่ 6 เฟสเซอร์ลำดับลบ

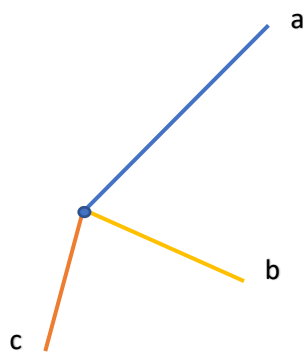
รูปที่ 7 เฟสเซอร์ลำดับศูนย์

### 2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ของระบบไฟฟ้ากับองค์ประกอบสมมาตร

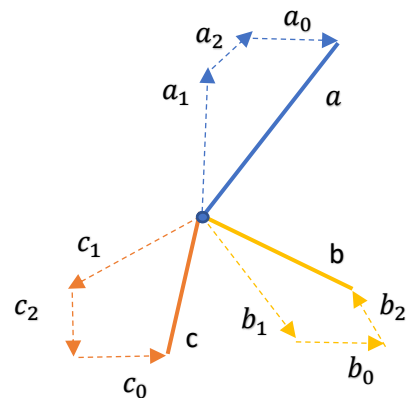
ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลของระบบไฟฟ้ากับองค์ประกอบสมมาตรดังรูปที่ 8-10 โดยรูปที่ 8 คือเฟสเซอร์ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำให้เฟสเซอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งสามารถวาดเฟสเซอร์ขององค์ประกอบแต่ละลำดับได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 เฟสเซอร์ในสภาวะปกติ



รูปที่ 9 เฟสเซอร์ในสภาวะที่ผิดปกติ



รูปที่ 10 เวกเตอร์ของเฟสเซอร์

จากเวกเตอร์ในรูปที่ 10 จะได้สมการ

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{b0} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\ &= a V_{c1} + a^2 V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad (12)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

อินเวิร์สเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

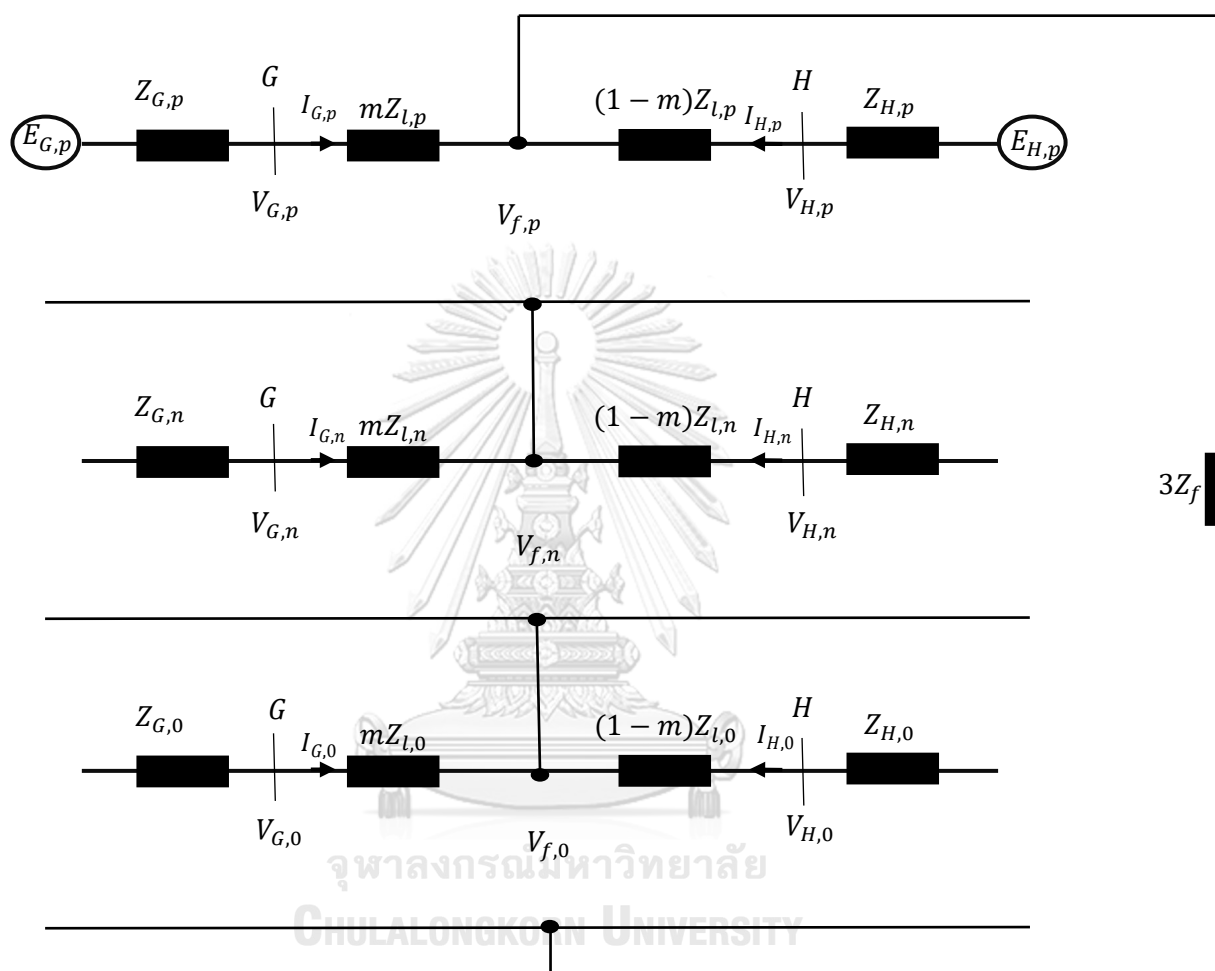
ในการใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรกับโครงข่ายไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล จะทำให้สามารถแบ่งโครงข่ายไฟฟ้าออกเป็น 3 โครงข่ายที่แยกจากกันซึ่งแบ่งตามองค์ประกอบลำดับคือโครงข่ายลำดับศูนย์ โครงข่ายลำดับบวก และโครงข่ายลำดับลบ ซึ่งในแต่ละลำดับจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเอง โดยค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบจะประมาณให้มีค่าเท่ากัน เนื่องจากลำดับบวกและลบของค่าอิมพีแดนซ์ในโครงข่ายบวกและลบแสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่อยู่ฝั่งเช่นสายส่งและหม้อแปลง ซึ่งมีค่าคงที่ โดยมีค่าเป็น

$$Z_{l,p} = Z_{l,n} = Z_{l,s} + Z_{l,m}$$

ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์คือ

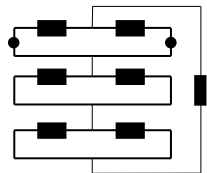
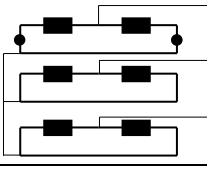
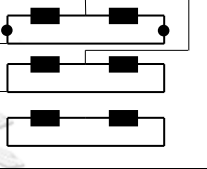
$$Z_{l,0} = Z_{l,s} + 2Z_{l,m}$$

รูปที่ 11 คือแบบจำลองโครงข่ายลำดับเมื่อเกิดการลัดวงจรจากเฟส a ลงดิน ซึ่งแบ่งได้ 3 วงจรแยกจากกันโดยมีจุดเชื่อมต่อกันผ่านค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ตำแหน่งจุดเกิดความผิดปกติ การต่อจุดเชื่อมนี้จะขึ้นกับชนิดของความผิดปกติตามตารางในรูปที่ 12



รูปที่ 11 แบบจำลองโครงข่ายลำดับเมื่อเกิดการลัดวงจรจากเฟส a ลงดิน



Fault type	Sequence component	network connection
Single line to ground	positive	
	negative	
	zero	
Double line to ground	positive	
	negative	
	zero	
Double line	positive	
	negative	
	zero	

รูปที่ 12 การเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายลำดับแยกตามชนิดความผิดปกติ

#### 2.4 ทฤษฎีกำลังสองน้อยที่สุด[3]

ทฤษฎีกำลังสองน้อยที่สุดคือ ทฤษฎีที่ใช้กับเทคนิคด้านสถิติศาสตร์ เช่น การทดลองเชิงเส้น เป็นต้น เพื่อหาพหุนามที่เหมาะสมในการนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยในระบบสมการ (15) จะเป็นการหาเวกเตอร์  $\hat{x}$  ที่ทำให้  $r(\hat{x})$  จากสมการ (16) มีค่าน้อยที่สุด หรือทำให้ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน  $S_e$  จากสมการ (17) มีค่าน้อยที่สุด

$$A\hat{x} = \bar{b} \quad (15)$$

กำหนดให้  $A \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ ,  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $b \in \mathfrak{R}^m$

$$|A\hat{x} - \bar{b}| = r(\hat{x}) \quad (16)$$

$$S_e = \Sigma(|A\hat{x} - \bar{b}|)^2 \quad (17)$$

ซึ่ง  $\hat{x}$  คือผลลัพธ์กำลังสองน้อยที่สุด และ  $r(\hat{x})$  คือ ส่วนที่เหลือ (residual) และจาก  $|A\hat{x} - \bar{b}|^2$  ของ (17) สามารถหาค่า  $\hat{x}$  ที่ทำให้  $r(\hat{x})^2$  มีค่าน้อยที่สุด เขียนได้ดังนี้

$$\text{minimize}(|A\hat{x} - \bar{b}|^2) \quad (18)$$

โดยค่า  $\hat{x}$  ที่ทำให้ (18) มีค่าน้อยที่สุดคืออนุพันธ์ของ (18) เทียบ  $x$  มีค่าเท่ากับศูนย์หรือก็คือ

$$\frac{d(|A\hat{x} - \bar{b}|^2)}{dx} = 0 \quad (19)$$

อนุพันธ์ของ (18) คือ

$$\frac{d(|A\hat{x} - \bar{b}|^2)}{dx} = \frac{d((A\hat{x} - \bar{b})^t (A\hat{x} - \bar{b}))}{dx} \quad (20)$$

จัดสมการ (20) ใหม่ได้

$$A^t \hat{x}^t \bar{b} - \bar{b}^t A + A^t A \hat{x} - A^t \bar{b} = 0 \quad (21)$$

จาก (21) จัดสมการใหม่เพื่อหา  $\hat{x}$

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{b} \quad (22)$$

ในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด ทฤษฎีกำลังสองน้อยที่สุดนำไปใช้ในการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเพื่อหาตำแหน่งความผิดพลาดจากสัดส่วนของสมาชิกจากผลลัพธ์กำลังสองน้อยโดยการใช้งานจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 2.5 ระเบียบวิธีของนิวตัน-กราฟสัน [4]

ทฤษฎีนิวตันเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหารากของสมการ จากอนุกรมเทย์เลอร์  $f(x)$  ที่อยู่ใกล้จุด  $x_0$

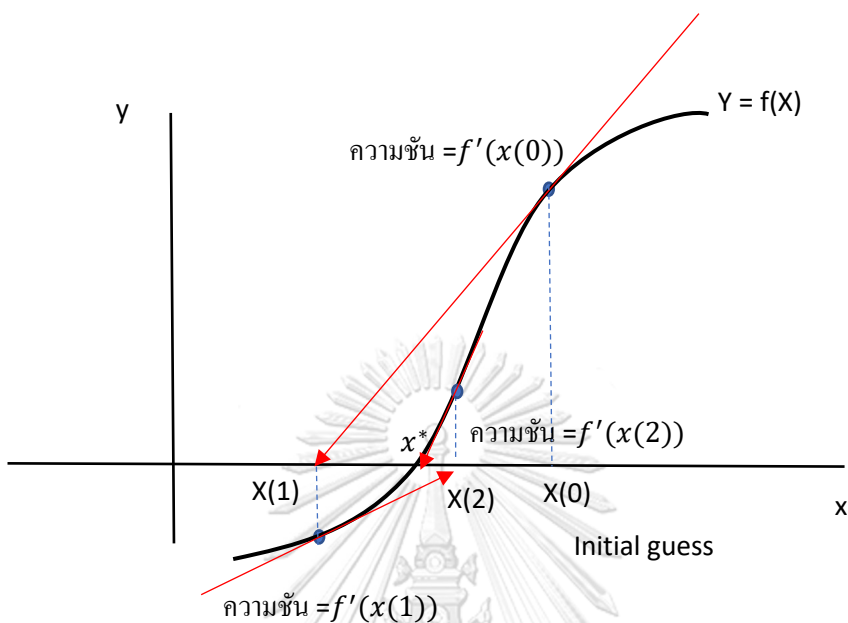
$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \dots + \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0)(x - x_0)^n \quad (23)$$

เนื่องจากพจน์อันดับสองขึ้นไปมีค่าน้อยดังนั้น

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (24)$$

ในการหารากจาก (24) จะได้  $f(x) = 0$  และจัดสมการหาราค่ารากได้

$$x^k = x^{k-1} - \frac{f(x^{k-1})}{f'(x^{k-1})} \quad (25)$$



รูปที่ 13 การหารากของสมการด้วยวิธีระเบียบของนิวตัน-กราฟเส้น

จากรูปที่ 13 หลังจากคำนวณ 3 รอบ ในที่สุดจะได้ค่ารากของสมการ  $x^*$

ขั้นตอนสำหรับวิธีระเบียบของนิวตัน-กราฟเส้น

1. กำหนดค่าจำนวนรอบสูงสุดของการทำซ้ำ (iter) เพื่อกรณีหารากไม่ได้ , กำหนด  $e_t$  (ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ) และ กำหนดค่าเดาเริ่มต้น (initial guess)
2. คำนวณค่า  $x$  จาก (25) รอบที่  $k$

รอลำดับรอบถัดไป  $k = k+1$

3. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน  $e = \left| \frac{x-x_0}{x} \right|$
4. ถ้า  $e > e_t$  และ  $k < \text{iter}$  เริ่มดำเนินการซ้ำ 2 ซ้ำ

ถ้า  $e > e_t$  แต่  $k = \text{iter}$  หารากไม่ได้

ถ้า  $e < e_t$  คำนวณค่ารากเรียบร้อยแล้ว

### 2.5.1 ระเบียบของนิวตัน-ราฟสันสำหรับสมการไม่เชิงเส้น

ในกรณีสมการไม่เชิงเส้นที่มีตัวแปรหลายค่าสามารถใช้วิธีระเบียบของนิวตัน-ราฟสันคำนวณหาค่าได้จากอนุกรมเทย์เลอร์ของฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  รอบจุด  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \dots \sum_{k_n=0}^{\infty} \frac{(x_1-a_1)^{k_1} \dots (x_n-a_n)^{k_n}}{k_1! \dots k_n!} \left( \frac{\partial^{k_1+\dots+k_n} f(a_1, \dots, a_n)}{\partial x_1^{k_1} \dots \partial x_n^{k_n}} \right) \quad (26)$$

เนื่องจากพจน์อันดับสองขึ้นไปมีค่าน้อยดังนั้น

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx f(a_1, a_2, \dots, a_n) + \frac{\partial}{\partial x_1} f(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1) + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} f(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_n - a_n) \quad (27)$$

เมื่อนำสมการ (27) มาใช้กับ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} f(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1) + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} f(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_n - a_n) \\ = -f(a_1, a_2, \dots, a_n) \end{aligned} \quad (28)$$

ระบบสมการไม่เชิงเส้นประกอบไปด้วย  $n$  สมการ หรือก็คือ

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (29)$$

เนื่องจากค่า  $x_1 - a_1, x_2 - a_2, \dots, x_n - a_n$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  ดังนั้นจาก (28) จะได้ระบบสมการเชิงเส้น (30)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$J\Delta x = -f \quad (31)$$

โดย  $J$  คือเมทริกซ์จาโคเบียน หลังจากกำหนดค่าเดาเริ่มต้นแล้วค่ารากของระบบสมการสามารถคำนวณซ้ำได้ด้วยสมการ (32)

$$x^k = x^{k-1} + \Delta x^{k-1} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{k-1} \\ x_2^{k-1} \\ \vdots \\ x_n^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{k-1} \\ \Delta x_2^{k-1} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{k-1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

ขั้นตอนสำหรับวิธีระเบียบของนิวตัน-กราฟเส้น ในการหารากของสมการไม่เชิงเส้น

1. กำหนดค่าจำนวนรอบสูงสุดของการทำซ้ำ (iter) เพื่อกรณีหารากไม่ได้, กำหนด  $e_t$  (ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ) และ กำหนดค่าเดาเริ่มต้น (initial guess)
2. คำนวณเมทริกซ์จาโคเบียน  $J$
3. คำนวณ  $\Delta x$
4. คำนวณค่า  $x$  จาก (33) รอบที่  $k$

รอกำหนดรอบถัดไป  $k = k+1$

$$5. \text{ คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน } e = \left| \frac{x^k - x^{k-1}}{x^{k-1}} \right|$$

6. ถ้า  $e > e_t$  และ  $k < \text{iter}$  เริ่มดำเนินการข้อ 2 ซ้ำ

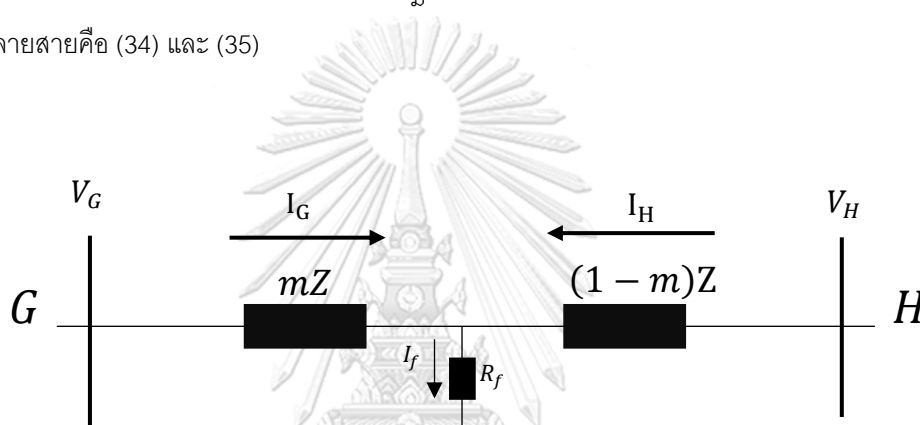
ถ้า  $e > e_t$  แต่  $k = \text{iter}$  หารากไม่ได้

ถ้า  $e < e_t$  คำนวณค่ารากเรียบร้อยแล้ว

### บทที่ 3

#### เทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่ง

มีการศึกษาวิจัยมากมายเกี่ยวกับการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสาย เทคนิคส่วนใหญ่เป็นการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดแบบสองปลายสาย โดยเทคนิคที่กล่าวมาคือการนำข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากทั้งสองฝั่งของสายส่งที่เกิดปัญหาจากความผิดพลาดมาคำนวณหา ระยะทางระหว่างตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาดกับจุดอ้างอิง ซึ่งจากรูปที่ 14 กำหนดให้  $G$  เป็นจุดอ้างอิง โดยสามารถเขียนสมการไฟฟ้าได้จากการอ้างอิงตามกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ทำให้ทราบสมการแรงดันจากทั้งสองปลายสายคือ (34) และ (35)



รูปที่ 14 แผนภาพเส้นเดี่ยวของสายส่ง

$$V_G = I_G mZ + I_f R_f \quad (34)$$

$$V_H = I_H (1-m)Z + I_f R_f \quad (35)$$

นำ (34) ลบ (35) จะได้

$$V_G - V_H = (I_G + I_H)mZ - I_H Z \quad (36)$$

จาก (36) สามารถคำนวณ  $m$  (ระยะทางระหว่างตำแหน่งความผิดพลาดกับจุดอ้างอิง) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้  $m$  และ  $Z$  (ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง) เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า เพื่อใช้ในการแก้สมการหาค่าของตัวแปรทั้งสองด้วยวิธีที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 นี้ โดยในแต่ละวิธีอาจมีการพิจารณาข้อมูลไฟฟ้าให้เป็นตัวแปรเพิ่มเติม เช่น มุมระหว่างข้อมูลทั้งปลายสาย อิมพีแดนซ์รวม และ ค่าเก็บประจุขานาน เป็นต้น

โดยทั่วไปสามารถแบ่งวิธีการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดได้หลายแบบ เช่นการแบ่งตามจำนวนรอบในการคำนวณสามารถแบ่งได้สองแบบคือแบบคำนวณซ้ำและแบบไม่คำนวณซ้ำ หรือแบ่งตามมุมระหว่างข้อมูลไฟฟ้าที่ใช้คำนวณ สามารถแบ่งได้เป็นแบบการคำนวณกรณีข้อมูลประสานเวลาและการคำนวณกรณีข้อมูลไม่ประสานเวลา ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งตามวิธีการแก้สมการ โดยสามารถแบ่งได้ 3 วิธีคือ

1. การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด
2. การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร
3. การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

โดยวิธีการคำนวณจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 3.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด[5]

การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเป็นการคำนวณหาค่า  $m$  และ  $Z$  จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด โดยคำนวณสมการแรงดันลำดับบวกเนื่องจากสมการลำดับบวกพบได้จากความผิดพลาดทุกชนิด ทำให้เทคนิคนี้มีความสามารถในการคำนวณตำแหน่งได้โดยไม่ต้องระบุชนิดความผิดพลาด

จาก (36) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตรได้ โดยในที่นี้ใช้เพียงองค์ประกอบลำดับบวกเท่านั้น ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (36) ใหม่ได้เป็น (37)

$$V_{G,p} - V_{H,p} = (I_{G,p} + I_{H,p})mZ - I_{H,p}Z \quad (37)$$

โดย

$V_{G,p}$ ,  $I_{G,p}$  คือแรงดันและกระแสลำดับบวกฝั่ง G ตามลำดับ

$V_{H,p}$ ,  $I_{H,p}$  คือแรงดันและกระแสลำดับบวกฝั่ง H ตามลำดับ

ในการคำนวณด้วยวิธีนี้จะใช้ข้อมูลในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด  $k$  ข้อมูลในการคำนวณ โดยจาก (37) เขียนให้อยู่ในระบบสมการได้ (38)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_p(t_k) \\ \Delta V_p(t_{k-1}) \\ \vdots \\ \Delta V_p(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma I_p(t_k) & -I_{H,p}(t_k) \\ \Sigma I_p(t_{k-1}) & -I_{H,p}(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots \\ \Sigma I_p(t_1) & -I_{H,p}(t_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mZ \\ Z \end{bmatrix} \quad (38)$$

โดย

$$\Delta V_p = V_{G,p} - V_{H,p}$$

$$\Sigma I_p = I_{G,p} + I_{H,p}$$

สามารถเขียน (38) ให้อยู่ในรูปที่เข้าใจง่ายดังนี้

$$[\Delta V_1] = [I_1] [z_1] \quad (39)$$

จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเขียนสมการ (39) ใหม่ได้

$$[z_1] = ([I_1]^T [I_1])^{-1} [I_1]^T [\Delta V_1] = \begin{bmatrix} mZ \\ Z \end{bmatrix} \quad (40)$$

โดย m มีค่าเท่ากับผลหารของสมาชิกตัวแรกกับตัวที่สองจาก (40) ได้สมการตาม (41)

$$m = \frac{mZ}{Z} \quad (41)$$

ซึ่งระยะทางจริงจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งความผิดพลาดคำนวณได้จาก

$$L_f = m * \text{ความยาวของสายส่ง}$$

ในกรณีที่ข้อมูลไม่ประสานเวลากัน ต้องปรับมุมของสัญญาณเพื่อให้มุมของข้อมูลทั้งสองฝั่งสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถเขียน (37) ใหม่ได้ (42) โดย  $e^{j\delta}$  คือความคลาดเคลื่อนของมุมระหว่างแรงดันทั้งสองบัส โดยเมื่อหาความคลาดเคลื่อนของมุมได้แล้ว จึงนำไปแทนใน (42) เพื่อที่จะคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดอย่างมีประสิทธิภาพ

$$V_{G,1} - V_{H,1}e^{j\delta} = (I_{G,1} + I_{H,1}e^{j\delta})mZ_1 - I_{H,1}e^{j\delta}Z_1 \quad (42)$$

### 3.2 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร

เทคนิคนี้เป็นการแก้สมการสองตัวแปรเพื่อหาระยะระหว่างตำแหน่งความผิดพลาดกับบัสอ้างอิง โดยกำหนดให้ตัวแปร Z (อิมพีแดนซ์ของสายส่ง) จากสองสมการมีค่าเท่ากัน เพื่อแทนค่าและกำจัดตัวแปรนี้ทิ้ง ซึ่งช่วยให้สามารถคำนวณระยะระหว่างตำแหน่งความผิดพลาดกับจุดอ้างอิงได้โดยไม่ต้องใช้อิมพีแดนซ์ของสาย



### 3.2.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปรเสนอโดย

[6] และ [5]

วิธีนี้ใช้สมการแรงดันลำดับบวกและลบในการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติ ซึ่งจากสมการ (37) สามารถเขียนอยู่ในรูปข้อมูลลำดับบวกและลบได้ (43) และ (44)

$$V_{G,1} - V_{H,1} = (I_{G,1} + I_{H,1})mZ - I_{H,1}Z \tag{43}$$

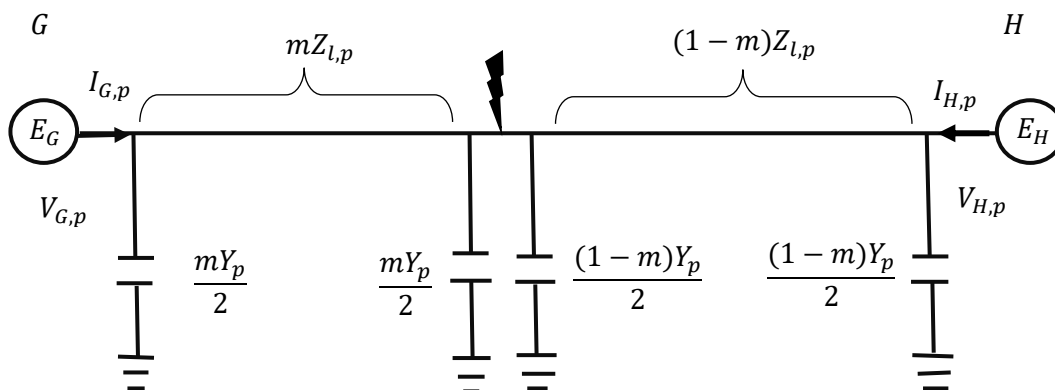
$$V_{G,2} - V_{H,2} = (I_{G,2} + I_{H,2})mZ - I_{H,2}Z \tag{44}$$

แทนค่าความต้านทานของข้อมูลลำดับบวก (43) ในสมการแรงดันลบ (44) แล้วจัดรูปจะได้สมการ (45)

$$m = \frac{(V_{G,1}-V_{H,1})I_{H,2}-(V_{G,2}-V_{H,2})I_{H,1}}{(V_{G,1}-V_{H,1})(I_{G,2}+I_{H,2})-(V_{G,2}-V_{H,2})(I_{G,1}+I_{H,1})} \tag{45}$$

### 3.2.2 การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร โดยมีการพิจารณาค่าเก็บประจุขนาน [7]

การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติบนสายส่งที่มีความยาว ค่าเก็บประจุขนานจะส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งความผิดปกติจึงมีการนำค่าเก็บประจุขนานมาร่วมพิจารณาในสมการ โดยสายส่งที่มีความยาวระยะกลาง จะสามารถวาดวงจรได้ในรูปวงจรแบบพาย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 15 องค์ประกอบลำดับบวกในช่วงที่เกิดความผิดปกติ

จากรูปที่ 15 ทำให้ทราบสมการแรงดันจากทั้งสองปลายสายคือ

$$V_{G,p} - \left(I_{G,p} - \frac{m}{2} Y_p V_{G,p}\right) m Z_{l,p} = V_{H,p} - \left(I_{H,p} - \frac{(1-m)}{2} Y_p V_{H,p}\right) (1-m) Z_{l,p} \quad (46)$$

$$V_{G,n} - \left(I_{G,n} - \frac{m}{2} Y_n V_{G,n}\right) m Z_{l,n} = V_{H,n} - \left(I_{H,n} - \frac{(1-m)}{2} Y_n V_{H,n}\right) (1-m) Z_{l,n} \quad (47)$$

จาก

$$Z_{l,n} \approx Z_{l,p} \quad (48)$$

แทนค่า (46) และ (47) ใน (48) แล้วจัดรูปได้

$$Y_p = \frac{2A_1 - 2m(A_1 - A_3)}{2mA_2 - A_2} \quad (49)$$

โดย

$$A_1 = V_{H,p} I_{H,n} + V_{G,n} I_{H,p} - V_{G,p} I_{H,n} - V_{H,n} I_{H,p}$$

$$A_2 = V_{G,p} V_{H,n} - V_{G,n} V_{H,p}$$

$$A_3 = V_{G,n} I_{G,p} + V_{H,p} I_{G,n} - V_{H,n} I_{G,p} - V_{G,p} I_{G,n}$$

เนื่องจากองค์ประกอบลำดับบวกของค่าเก็บประจุขนานเป็นค่าจินตภาพทำให้ทราบว่า

$$Y_p = -\bar{Y}_p \quad (50)$$

แทนค่า (49) ใน (50) แล้วจัดรูปได้

$$(2a_1 + 2a_1)m^2 - (3a_1 + a_2)m + a_1 = 0 \quad (51)$$

โดย

$$a_1 = \text{real}(A_1 \bar{A}_2)$$

$$a_2 = \text{real}(A_2 \bar{A}_3)$$

ผลเฉลยของสมการ (51) คือ

$$m = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad (52)$$

### 3.3 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน คือการคำนวณหารากของสมการแรงดัน ซึ่งกำหนดให้ระยะระหว่างตำแหน่งความผิดพลาดถึงบัสอ้างอิงและพารามิเตอร์ของสายส่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ที่มีการนำเสนอไว้แล้วด้วยกันสองวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีการพิจารณาตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยวิธีแรกจะมีการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมส่วนวิธีที่สองจะพิจารณาค่าความเก็บประจุขนาน ซึ่งแต่ละวิธีมีรูปแบบการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่แตกต่างกันดังนี้

#### 3.3.1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันแบบแบ่งตามชนิดความผิดพลาด [8]

วิธีนี้สามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยข้อมูลจากทั้งสองปลายสายโดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของสายส่งและข้อมูลจากทั้งสองปลายสายที่นำมาคำนวณ มุมของสัญญาณ และไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลช่วงก่อนเกิดความผิดพลาดมาร่วมในการคำนวณ ใช้เพียงแค่อิมพีแดนซ์กระแสและแรงดันจากสองปลายสายเท่านั้น ซึ่งตามที่ได้มีการนำเสนอใน [8] การคำนวณแบ่งออกเป็นการคำนวณสำหรับความผิดพลาดลงดิน และการคำนวณสำหรับความผิดพลาดแบบเฟสไม่ลงดิน

#### 3.4.1 การคำนวณสำหรับความผิดพลาดลงดิน

วิธีนี้เป็นการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยมีการพิจารณาอิมพีแดนซ์ร่วมด้วย โดยจากรูปที่ 14 เขียนสมการแรงดันได้ดังนี้

$$[V_G] - m[Z_L][I_G] = [V_H]e^{i\delta} - (1 - m)[Z_L][I_H]e^{i\delta} \quad (53)$$

จัดรูป (53) ได้

$$[V_G] - m[Z_L][I_G] - [V_H]e^{i\delta} + (1 - m)[Z_L][I_H]e^{i\delta} = 0 \quad (54)$$

จาก (54) เขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} V_{Ga} \\ V_{Gb} \\ V_{Gc} \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} R_s + iX_s & R_m + iX_m & R_m + iX_m \\ R_m + iX_m & R_s + iX_s & R_m + iX_m \\ R_m + iX_m & R_m + iX_m & R_s + iX_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ga} \\ I_{Gb} \\ I_{Gc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{Ha} \\ V_{Hb} \\ V_{Hc} \end{bmatrix} e^{i\delta} + (1 - m) \begin{bmatrix} R_s + iX_s & R_m + iX_m & R_m + iX_m \\ R_m + iX_m & R_s + iX_s & R_m + iX_m \\ R_m + iX_m & R_m + iX_m & R_s + iX_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ha} \\ I_{Hb} \\ I_{Hc} \end{bmatrix} e^{i\delta} = 0 \quad (55)$$

เมทริกซ์ (55) เขียนให้ในรูปแบบสมการแต่ละเฟสได้

$$f_a = (V_{G,a} - V_{H,a}e^{j\delta})\{(R_s + jX_s)(I_{G,a} + I_{H,a}e^{j\delta}) + (R_m + jX_m)[(I_{G,b} + I_{H,b}e^{j\delta}) + (I_{G,c} + I_{H,c}e^{j\delta})] - (R_s + jX_s)I_{H,a}e^{j\delta} - (R_m + jX_m)(I_{H,b} + I_{H,c})e^{j\delta}\} = 0 \quad (56)$$

$$f_b = (V_{G,b} - V_{H,b}e^{j\delta})\{(R_s + jX_s)(I_{G,b} + I_{H,b}e^{j\delta}) + (R_m + jX_m)[(I_{G,a} + I_{H,a}e^{j\delta}) + (I_{G,c} + I_{H,c}e^{j\delta})] - (R_s + jX_s)I_{H,b}e^{j\delta} - (R_m + jX_m)(I_{H,a} + I_{H,c})e^{j\delta}\} = 0 \quad (57)$$

$$f_c = (V_{G,c} - V_{H,c}e^{j\delta})\{(R_s + jX_s)(I_{G,c} + I_{H,c}e^{j\delta}) + (R_m + jX_m)[(I_{G,b} + I_{H,b}e^{j\delta}) + (I_{G,a} + I_{H,a}e^{j\delta})] - (R_s + jX_s)I_{H,c}e^{j\delta} - (R_m + jX_m)(I_{H,b} + I_{H,a})e^{j\delta}\} = 0 \quad (58)$$

โดยตัวแปร  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $R_m$  และ  $X_m$  คืออิมพีแดนซ์ของเฟส รีแอกแตนซ์ของเฟส อิมพีแดนซ์ร่วม และรีแอกแตนซ์ร่วมตามลำดับ ส่วน  $\delta$  คือผลต่างมุมของสัญญาณระหว่างบัส G และบัส H ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้  $\bar{x}$  คือเวกเตอร์ของตัวแปรไม่ทราบค่า

$$\bar{x} = [m \quad \delta \quad R_s \quad X_s \quad R_m \quad X_m]^T \quad (59)$$

และกำหนดให้  $\bar{F}$  เป็นเวกเตอร์ของสมการสมการ (56-58) เขียนได้เป็น (60) โดยสมาชิกประกอบไปด้วยจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของแต่ละสมการ

$$\bar{F} = [\text{real}(f_a) \quad \text{real}(f_b) \quad \text{real}(f_c) \quad \text{imag}(f_a) \quad \text{imag}(f_b) \quad \text{imag}(f_c)]^T \quad (60)$$

ซึ่งในการคำนวณค่าของตัวแปร จะต้องคำนวณเวกเตอร์  $\bar{x}$  โดยการคำนวณ (61) ซ้ำจนกระทั่งค่า  $\Delta x$  มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะตั้งไว้ที่ 0.001

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \Delta \bar{x}_{k-1} \quad (61)$$

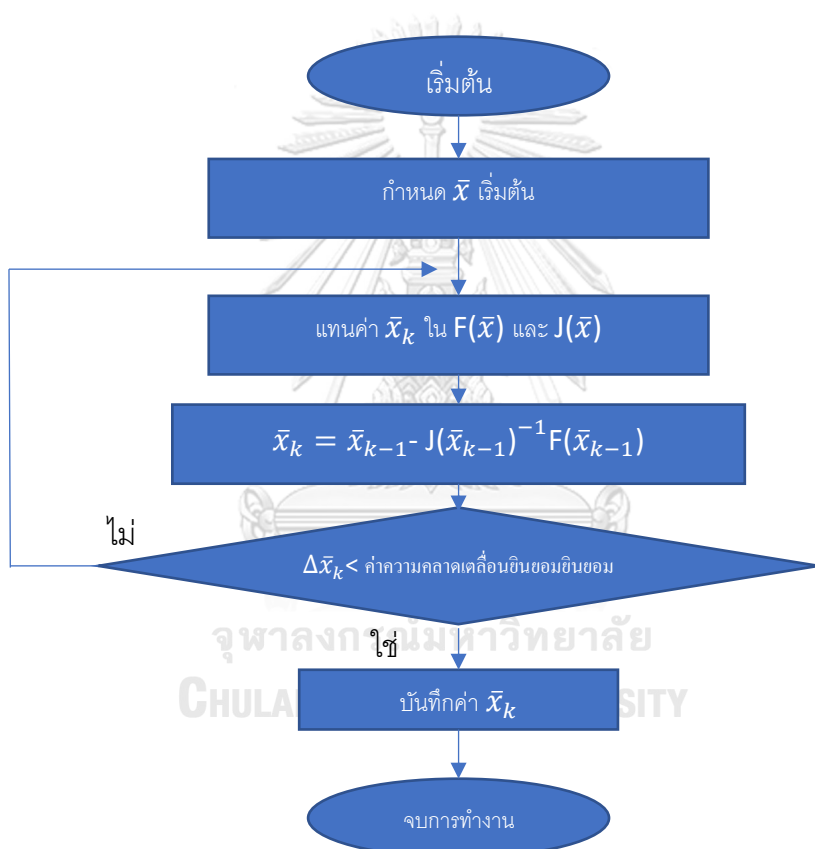
$$\Delta \bar{x}_{k-1} = -J(\bar{x}_{k-1})^{-1}F(\bar{x}_{k-1}) \quad (62)$$

J คือเมทริกซ์จาโคเบียนของสมการหรือ  $J = \frac{\partial F_i}{\partial x_j}$  โดย  $i$  และ  $j = 1, 2, 3, \dots, k$  เขียนอยู่ในรูป

เมทริกซ์ได้

$$J = \begin{bmatrix} \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial \delta} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial R_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial X_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial R_m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_a}{\partial X_m} \right) \\ \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial \delta} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial R_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial X_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial R_m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_b}{\partial X_m} \right) \\ \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial \delta} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial R_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial X_s} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial R_m} \right) & \text{real} \left( \frac{\partial f_c}{\partial X_m} \right) \\ \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial \delta} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial R_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial X_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial R_m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_a}{\partial X_m} \right) \\ \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial \delta} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial R_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial X_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial R_m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_b}{\partial X_m} \right) \\ \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial \delta} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial R_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial X_s} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial R_m} \right) & \text{imag} \left( \frac{\partial f_c}{\partial X_m} \right) \end{bmatrix}$$

โดยรูปที่ 16 คือแผนผังการคำนวณด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน



รูปที่ 16 แผนผังการคำนวณด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

### 3.4.2 การคำนวณสำหรับความผิดพ้องแบบเฟสไม่ลงดิน

ในระหว่างเกิดความผิดพ้องระหว่างเฟสจะมีแรงดันและกระแสลำดับบวกและลบเกิดขึ้น จาก (54) เขียนอยู่ในรูปสมการลำดับบวกและลบได้

$$f_p = [V_{G,p}] - m[Z_{L,p}][I_{G,p}] - [V_{H,p}]e^{i\delta} + (1 - m)[Z_{L,p}][I_{H,p}]e^{i\delta} = 0 \quad (63)$$

$$f_n = [V_{G,n}] - m[Z_{L,n}][I_{G,n}] - [V_{H,n}]e^{i\delta} + (1 - m)[Z_{L,n}][I_{H,n}]e^{i\delta} = 0 \quad (64)$$

กำหนดให้  $m$ ,  $\delta$ ,  $R_{l,p}$  และ  $X_{l,p}$  เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ในเวกเตอร์  $\bar{x}$  โดย  $R_{l,p}$  และ  $X_{l,p}$  คืออิมพีแดนซ์ของและรีแอกแตนซ์ของสายไฟตามลำดับ และกำหนดเวกเตอร์  $F$  ได้เป็น (66)

$$\bar{x} = [m \quad \delta \quad R_s \quad X_s]^T \quad (65)$$

$$\bar{F} = [\text{real}(f_p) \quad \text{real}(f_n) \quad \text{imag}(f_p) \quad \text{imag}(f_n)]^T \quad (66)$$

จากนั้นคำนวณเวกเตอร์  $\bar{x}$  โดยการคำนวณ (61) ซ้ำจนกระทั่งค่า  $\Delta\bar{x}$  มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยินยอม โดยใช้ที่ 0.001

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \Delta\bar{x}_{k-1} \quad (61)$$

$$\Delta\bar{x}_{k-1} = -J(\bar{x}_{k-1})^{-1}F(\bar{x}_{k-1}) \quad (62)$$

## บทที่ 4

### การจำลองระบบไฟฟ้าและการทดสอบเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความ ผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์

บทที่ 4 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 โดยจะกำหนดชื่อแต่ละวิธีตามลำดับเพื่อความกระชับในการเขียนบทความ ซึ่งมี 4 วิธีคือ

วิธีที่ 1 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

วิธีที่ 2 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปร

วิธีที่ 3 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีการแก้สมการสองตัวแปรโดยพิจารณาค่าเก็บกระแสชุนาน

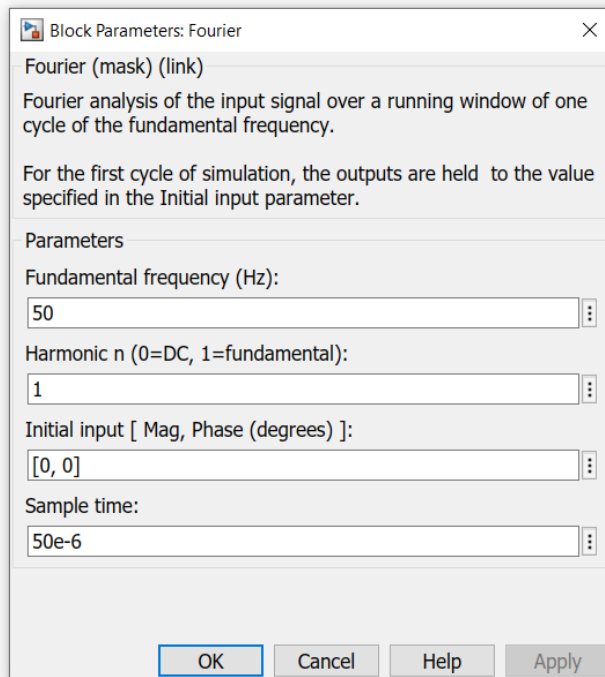
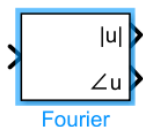
วิธีที่ 4 การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-กราฟเส้นแบบแบ่งตามชนิดความผิดพลาด

และเพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณแต่ละวิธี จึงได้จำลองระบบไฟฟ้าที่มีพารามิเตอร์ตามบทความจากนั้นศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้าที่ส่งผลต่อสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร ชนิดความผิดพลาด และความยาวสาย เป็นต้น นอกจากนี้ผลจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดและปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในระบบส่ง เช่น การเชื่อมต่อวงจรชั่วคราวในกรณีที่เกิดความผิดพลาดชั่วคราวและการศึกษาการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดในกรณีสายส่งมีโหลดต่ออยู่ โดยการทดลองจะมีการสร้างสัญญาณไฟฟ้าช่วงที่เกิดความผิดพลาดในระบบสายส่งย่อยที่ได้แสดงในหัวข้อถัดไป

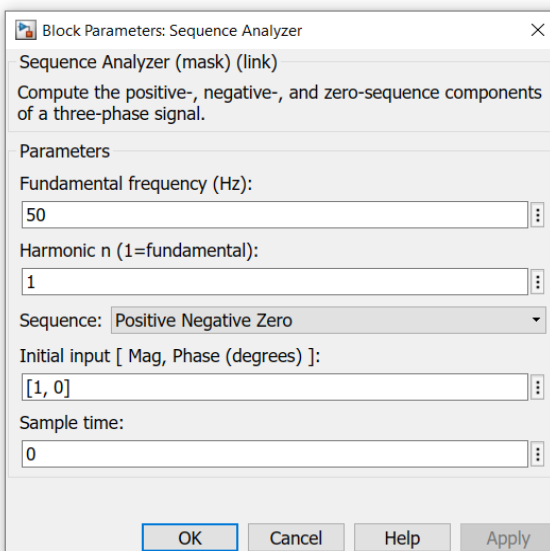
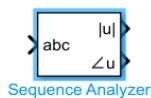
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.1 การคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab และ Simulink

การศึกษาคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ใช้โปรแกรม Simulink ในการจำลองระบบไฟฟ้า ด้วยแผนภาพบล็อกจากไลบรารี Simscape ที่สามารถใช้ในการจำลองระบบกายภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ โดยจำลองสัญญาณในรูปคลื่นไซน์ที่จำเป็นจะต้องแปลงให้อยู่ในรูปเฟสเซอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยในขั้นตอนนี้ใช้แผนภาพบล็อก Fourier (รูปที่ 17) เพื่อหาขนาดและมุมของสัญญาณไฟฟ้าแต่ละเฟส และ sequence analyzer (รูปที่ 18) เพื่อหาขนาดและมุมของสัญญาณไฟฟ้าลำดับบวก ลบ และศูนย์



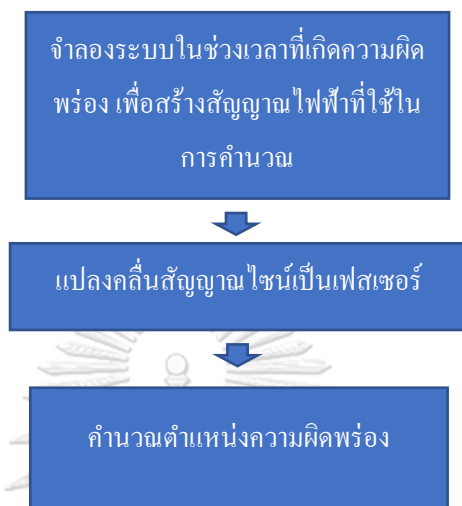
รูปที่ 17 แผนภาพบล็อก Fourier



รูปที่ 18 แผนภาพบล็อก sequence analyzer



โดยแต่ละการคำนวณจะใช้แค่อันใดอันหนึ่งเท่านั้น เพราะการคำนวณแต่ละวิธีมีการใช้รูปแบบสัญญาณที่ไม่เหมือนกัน โดยการคำนวณจะใช้ Editor ของโปรแกรม matlab ในการเขียนสมการเพื่อคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่งขั้นตอนการปฏิบัติการโดยรวมสรุปได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 สรุปขั้นตอนการปฏิบัติการโดยรวม

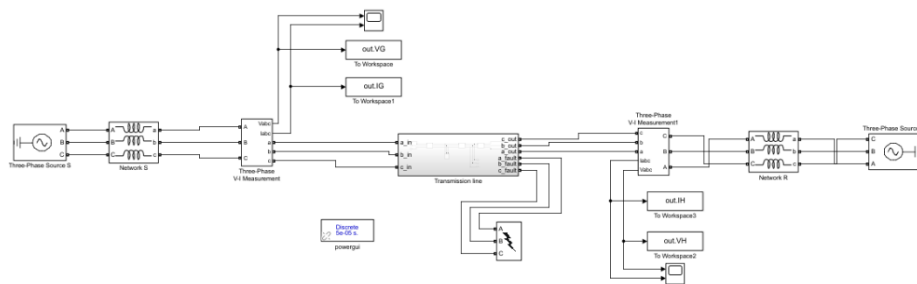
## 4.2 การทดสอบความถูกต้องแต่ละวิธี

ก่อนที่จะทำการศึกษาเทคนิคการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดนั้น จะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำแต่ละวิธี โดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยพารามิเตอร์ที่แต่ละบทความให้มา

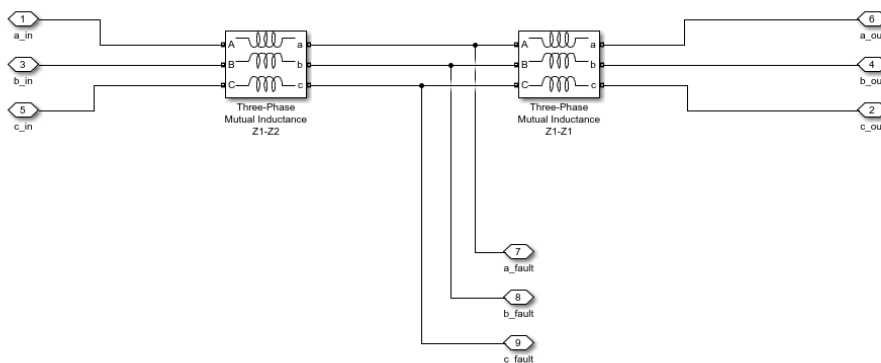
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 4.2.1 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 1

รูปที่ 20 คือระบบจำลองที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด โดยภายในระบบย่อย (Subsystem) คือสายส่งที่จำลองด้วยแผนภาพบล็อก Three phase mutual inductance  $Z1-Z2$  ซึ่งเป็นแบบจำลองสายส่งแบบสั้นดังรูปที่ 21 โดยมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ทั้งสองฝั่ง มีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 4 เสนอในบทความ [9]



รูปที่ 20 แบบจำลองระบบไฟฟ้าด้วย Simulink



รูปที่ 21 สายส่งในระบบย่อย

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G

$R_1$	1.0185 $\Omega$
$R_0$	2.037 $\Omega$
$L_1$	50.929 mH
$L_0$	101.85 mH

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H

$R_1$	1.0185 $\Omega$
$R_0$	1.7350 $\Omega$
$L_1$	42.85 mH
$L_0$	101.85 mH

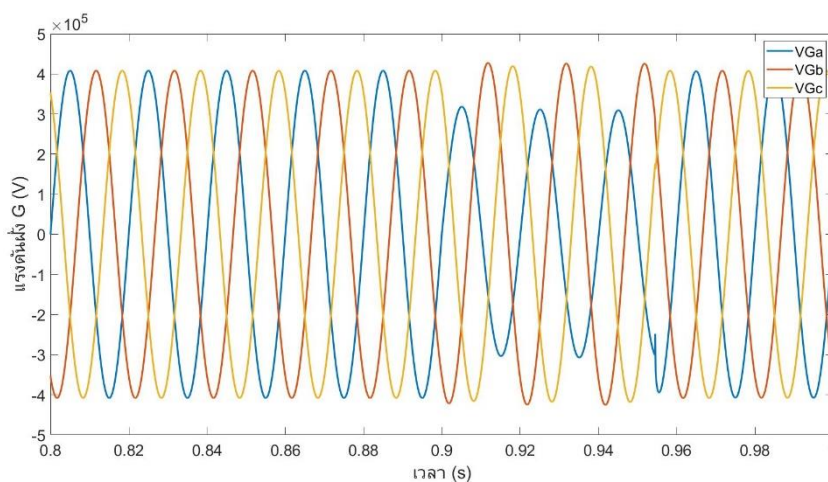
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของสายส่ง

$R_1$	0.0379 $\Omega/mile$
$R_0$	0.3535 $\Omega/mile$
$L_1$	0.00179 H/mile
$L_0$	0.00319 H/mile
ความยาวสาย	138 miles

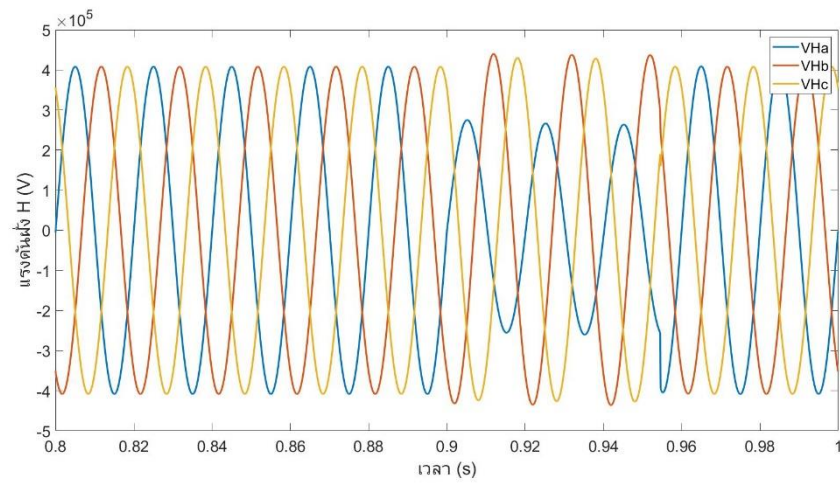
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1

$V_G$	500 kV <sub>rms</sub>
$\theta_G$	20°
$V_H$	500 kV <sub>rms</sub>
$\theta_H$	0°

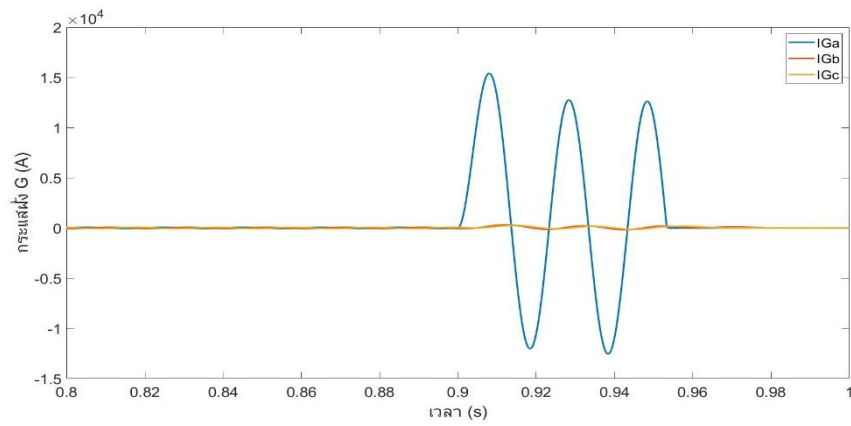
จากแบบจำลองกำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 90 ไมล์ จากฝั่ง G โดยเกิดความผิดพลาดจากเฟส a ลงกราวที่เวลา 0.9 วินาทีถึง 0.95 วินาทีด้วยความถี่ 50 Hz และมีอัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 20 kHz ซึ่งมีค่าความต้านทานความผิดพลาดเป็น 1 โอห์ม โดยสัญญาณกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเป็นดังรูปที่ 22-25



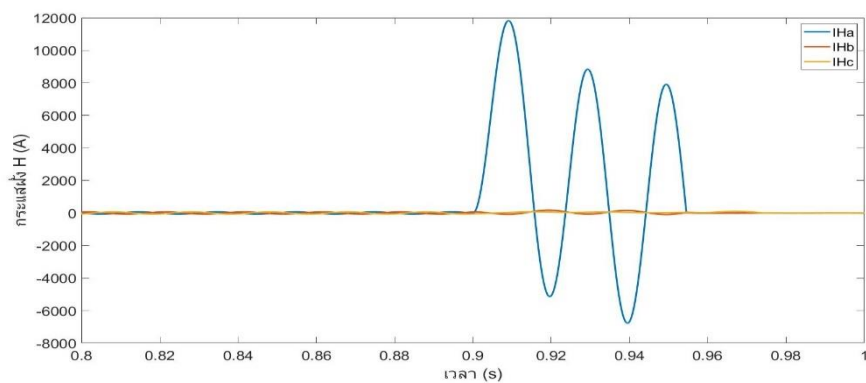
รูปที่ 22 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 1



รูปที่ 23 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 1

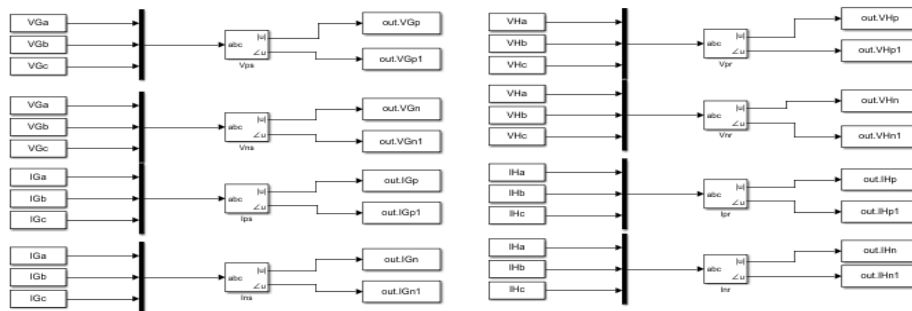


รูปที่ 24 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 1  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



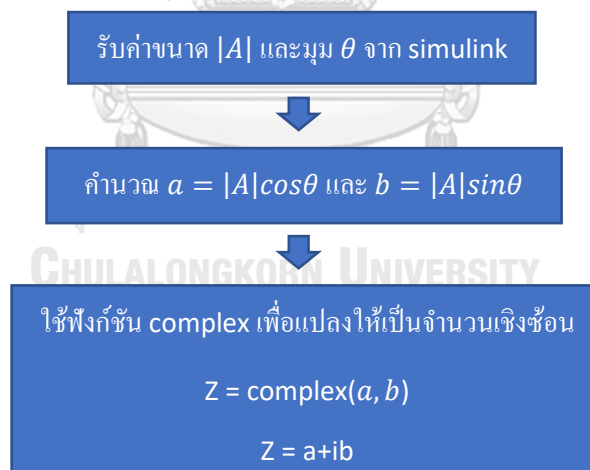
รูปที่ 25 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 1

ซึ่งในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดหลังจากได้สัญญาณจากทั้งสองปลายสายต้องใช้เฟสเซอร์ของสัญญาณในการคำนวณ โดยในที่นี้ใช้แผนภาพบล็อก sequence analyzer ในการหาเฟสเซอร์ลำดับของสัญญาณการใช้งาน โดยที่กำหนดอัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 10 kHz เป็นดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 การใช้งานแผนภาพบล็อก sequence analyzer

ตัวอย่างผลลัพธ์ขนาดและมุม(องศา)ของแรงดันลำดับบวกและลบจากฝั่ง G ของสัญญาณแสดงในรูปที่ 27-28 ซึ่งสามารถใช้ Editor ของ Matlab ในการแปลงขนาดและมุมเป็นจำนวนเชิงซ้อนเพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 ขั้นตอนการแปลงขนาดและมุมเป็นจำนวนเชิงซ้อนใน Editor ของ Matlab

โดยในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด จาก (38) กำหนดให้ใช้สมการจำนวน k ตัวอย่าง ซึ่ง k มีค่าขึ้นกับอัตราการสุ่มสัญญาณจากแผนภาพบล็อก sequence analyzer ในการคำนวณจะใช้ตัวอย่างในช่วงเวลา 0.89 วินาที ถึง 0.95 วินาที หรือช่วงก่อนเกิดความผิดพลาดถึงช่วงเวลาที่มีการตัดวงจรพอดี

$$\begin{bmatrix} \Delta V_p(t_k) \\ \Delta V_p(t_{k-1}) \\ \vdots \\ \Delta V_p(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{lp}(t_k) & -I_{H,p}(t_k) \\ \Sigma_{lp}(t_{k-1}) & -I_{H,p}(t_{k-1}) \\ \vdots & \vdots \\ \Sigma_{lp}(t_1) & -I_{H,p}(t_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mZ \\ Z \end{bmatrix} \quad (38)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณคือ 89.2767 ไมล์ ซึ่งคลาดเคลื่อนไป -0.52 เปอร์เซ็นต์ โดยใน [10] เสนอไว้ว่ามีความคลาดเคลื่อน -0.68 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 2

การจำลองระบบเพื่อทดสอบวิธีที่ 2 ใช้แบบจำลองดังรูปที่ 20 และ รูปที่ 21 โดยใช้พารามิเตอร์ตามบทความ [11] ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 5 -8

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G

$R_1$	1.0185 $\Omega$
$R_0$	2.0371 $\Omega$
$L_1$	0.0509 H
$L_0$	0.1018 H

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H

$R_1$	0.6366 $\Omega$
$R_0$	1.2732 $\Omega$
$L_1$	0.0318 H
$L_0$	0.0636 H

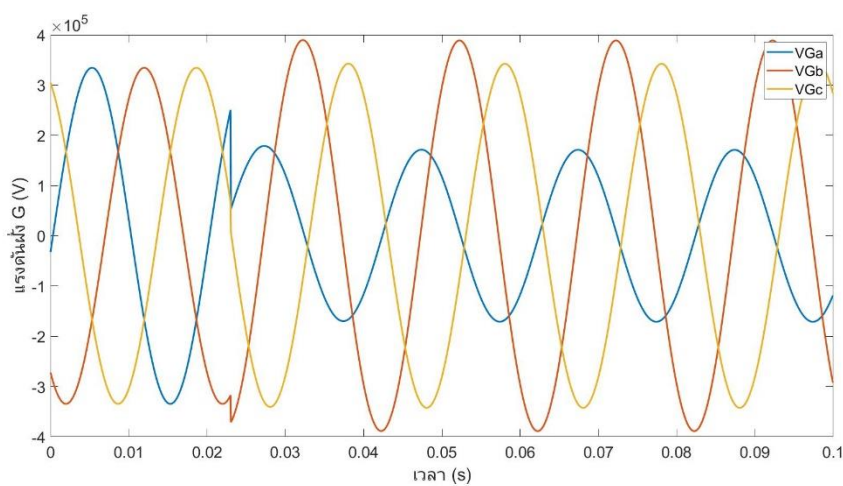
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ของสายส่ง

$R_1$	0.0650 $\Omega/km$
$R_0$	0.1950 $\Omega/km$
$L_1$	0.9549 H/km
$L_0$	2.8647 H/km
ความยาวสาย	100 km

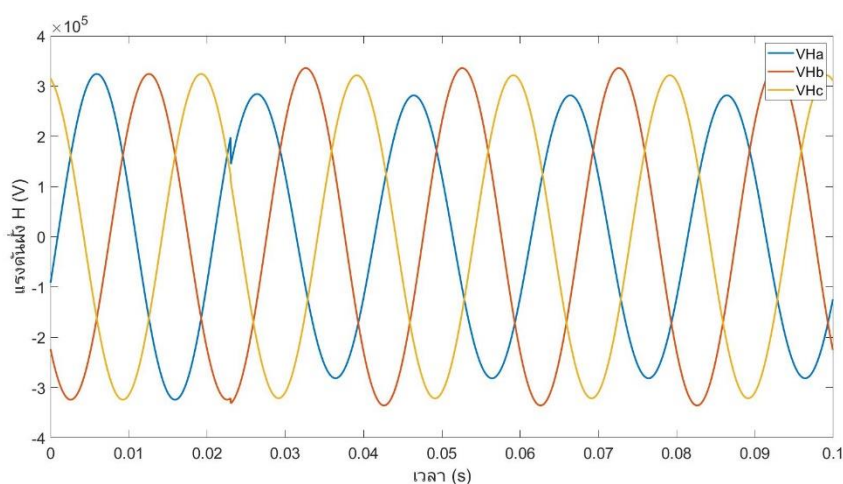
ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1

$V_G$	416 kV <sub>rms</sub>
$\theta_G$	0°
$V_H$	400 kV <sub>rms</sub>
$\theta_H$	-20°

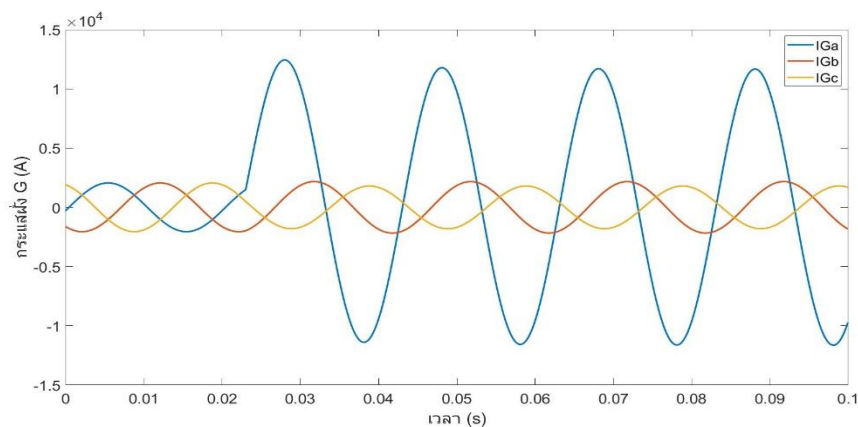
ในการจำลองกำหนดให้ระบบเกิดความผิดปกติจากเฟส a ลมกราวนี้ที่เวลา 0.023 วินาที ซึ่งเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง 10 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งและมีอิมพีแดนซ์ความผิดปกติ 10 โอห์ม โดยรูปที่ 28 ถึงรูปที่ 31 คือสัญญาณที่ได้



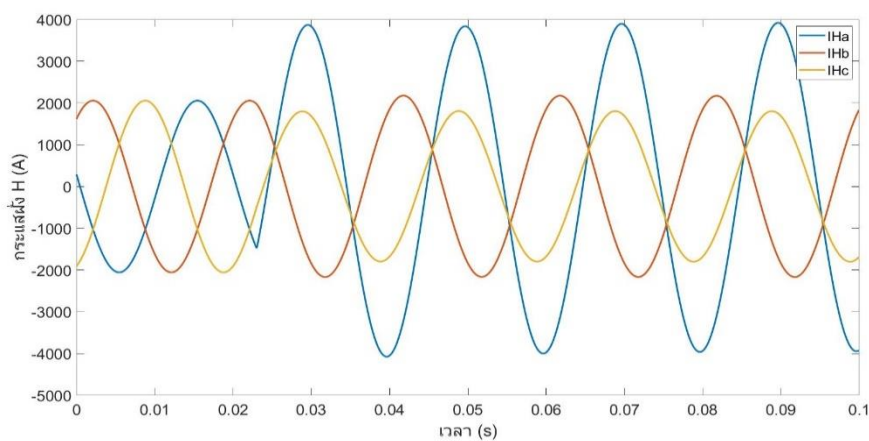
รูปที่ 28 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 2



รูปที่ 29 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 2

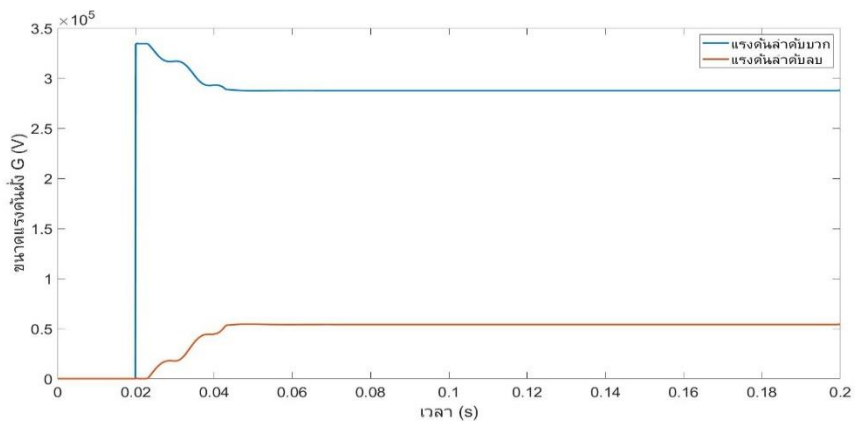


รูปที่ 30 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 2



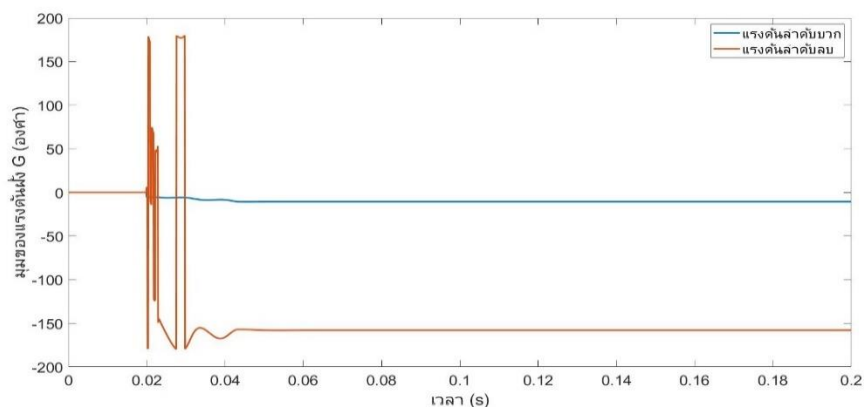
รูปที่ 31 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 2

ในการหาเฟสเซอร์ลำดับของสัญญาณใช้แผนภาพบล็อกsequence analyzer ดังรูปที่ 26 ตัวอย่างผลลัพธ์ขนาดและมุม(องศา)ของแรงดันลำดับบวกและลบจากฝั่ง G แสดงในรูปที่ 32-33



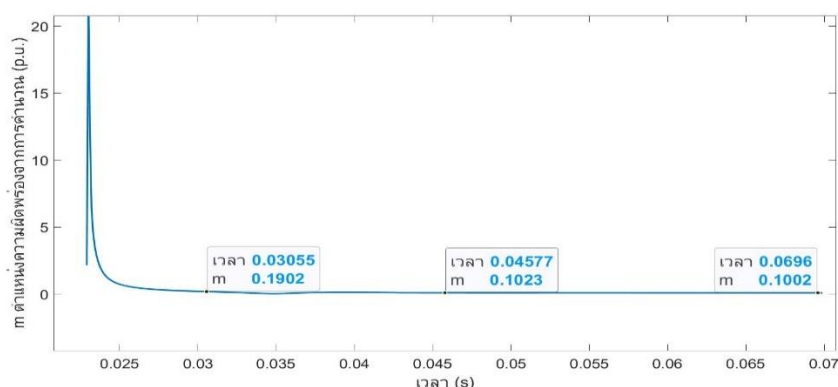
รูปที่ 32 ขนาดแรงดันลำดับบวกและลบฝั่ง G





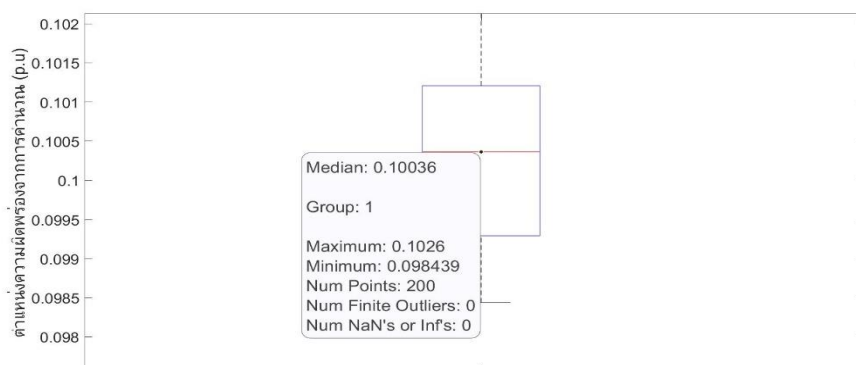
รูปที่ 33 มุมเลี้ยวเฟสของแรงดันลำดับบวกและลบฝั่ง G

จากนั้นใช้ Editor ของ Matlab ในการแปลงขนาดและมุมเป็นจำนวนเชิงซ้อนเพื่อความสะดวกในการคำนวณ ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 27 โดยการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดนั้นใช้ Matlab คำนวณสมการ (45) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 ตำแหน่งความผิดพลาดจากการคำนวณ

นำผลลัพธ์ช่วงเวลา 0.0457 วินาที ถึง 0.0696 วินาที มาวาดกราฟรูปกล่องได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 35

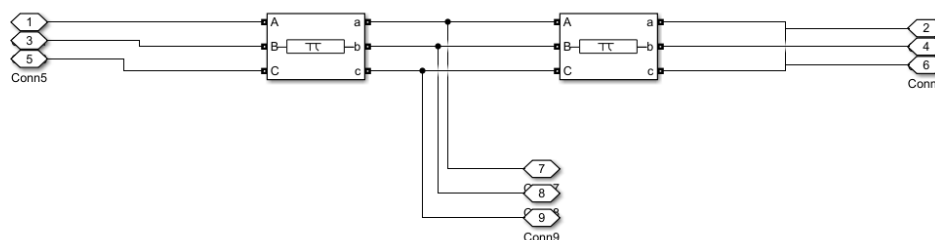


รูปที่ 35 กราฟรูปกล่องของตำแหน่งความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยวิธีที่ 2

ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเป็น 0.1036 p.u. มีความคลาดเคลื่อน 0.36 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 3

การจำลองระบบเพื่อทดสอบวิธีที่ 2 ใช้แบบจำลองดังรูปที่ 20 และสายเป็นแบบพายดิ่ง รูปที่ 36 โดยใช้พารามิเตอร์ตามบทความ [7] มีค่าตามตารางที่ 9 -12



รูปที่ 36 สายส่งแบบพายในระบบย่อย

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าฝั่งบัส G

$R_1$	17.177 $\Omega$
$R_0$	2.5904 $\Omega$
$L_1$	0.144995 H
$L_0$	0.04818 H

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส H

$R_1$	15.31 $\Omega$
$R_0$	0.7229 $\Omega$
$L_1$	0.146256 H
$L_0$	0.04818 H

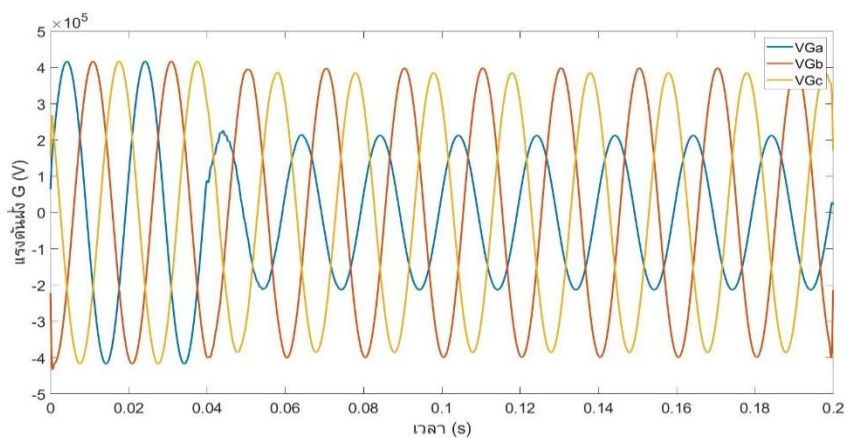
ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของสายส่ง

$R_1$	0.15573 $\Omega/km$
$R_0$	0.3765 $\Omega/km$
$L_1$	0.9767 mH/km
$L_0$	3.0189 mH/km
$C_1$	12.1681 nF/km
$C_0$	7.5417 nF/km
ความยาวสาย	320 km

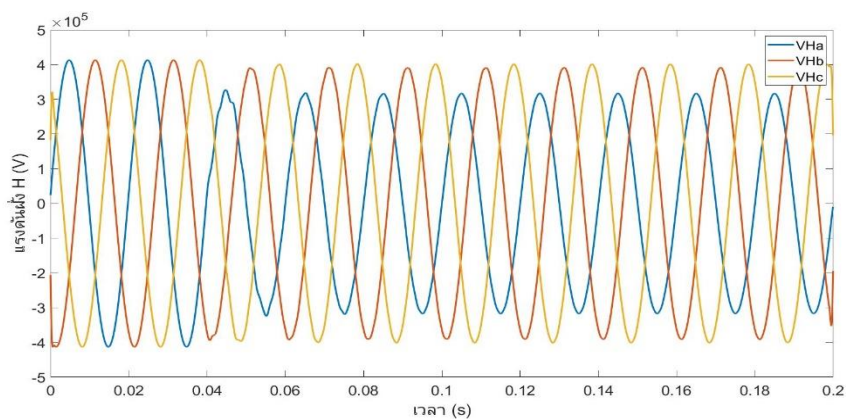
ตารางที่ 12 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายระบบที่ 1

$V_G$	500 kV <sub>rms</sub>
$\theta_G$	20°
$V_H$	500 kV <sub>rms</sub>
$\theta_H$	0°

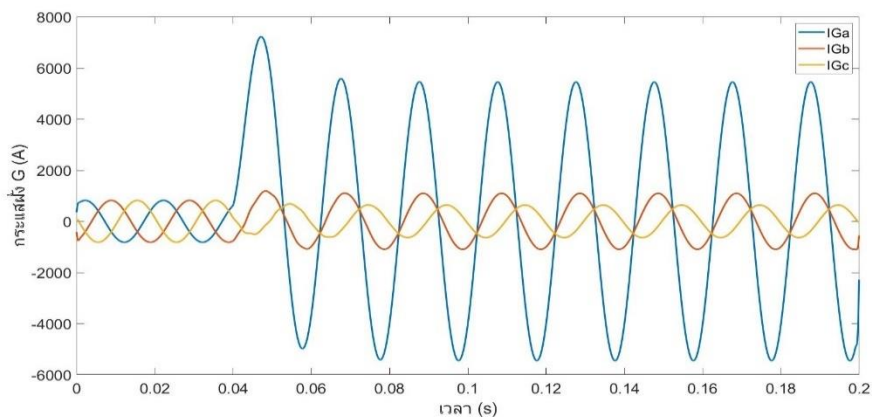
กำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งที่เวลา 0.04 วินาที โดยมีความต้านทานความผิดพลาด 1 โอห์ม ได้สัญญาณทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 38-41 ซึ่งในการทดสอบนี้ได้รับตำแหน่งความผิดพลาดเพื่อทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลลัพธ์ที่นำเสนอในบทความ [7]



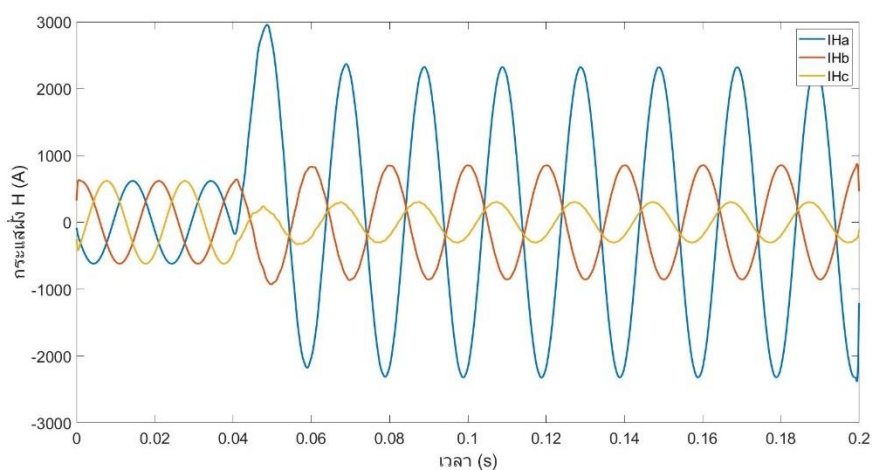
รูปที่ 37 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 3



รูปที่ 38 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 3

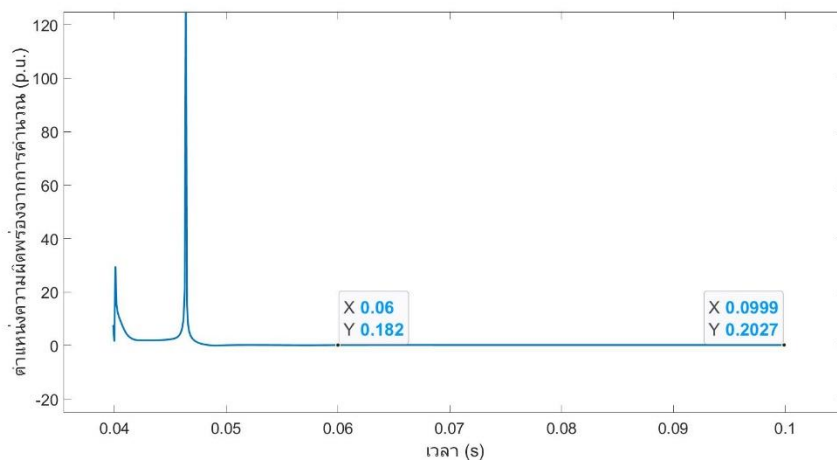


รูปที่ 39 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลองที่ 3

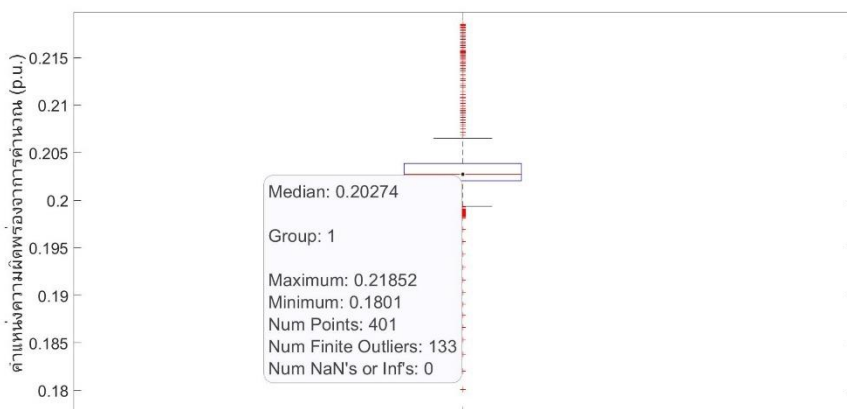


รูปที่ 40 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลองที่ 3

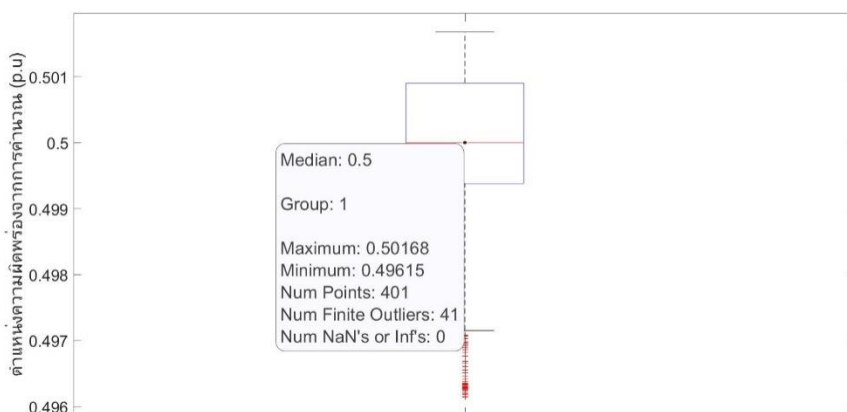
หลังจากได้สัญญาณมาแล้วจึงทำการแปลงสัญญาณด้วยแผนภาพบล็อก sequence analyzer ที่ต่อดังรูปที่ 26 เพื่อหาเฟสเซอร์ของสัญญาณ จากนั้นคำนวณตำแหน่งความผิดพ้องด้วยสมการที่ (52) ซึ่งรูปที่ 44 เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณที่มีความผิดพ้องที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง เพื่อความสะดวกในการดูผลจึงนำข้อมูลจากช่วงเวลา 0.06 ถึง 0.1 วินาที มาวาดเป็นกราฟรูปกล่อง ซึ่ง กราฟรูปกล่องทั้ง 3 ระยะเวลา เป็นดังรูปที่ 45-46



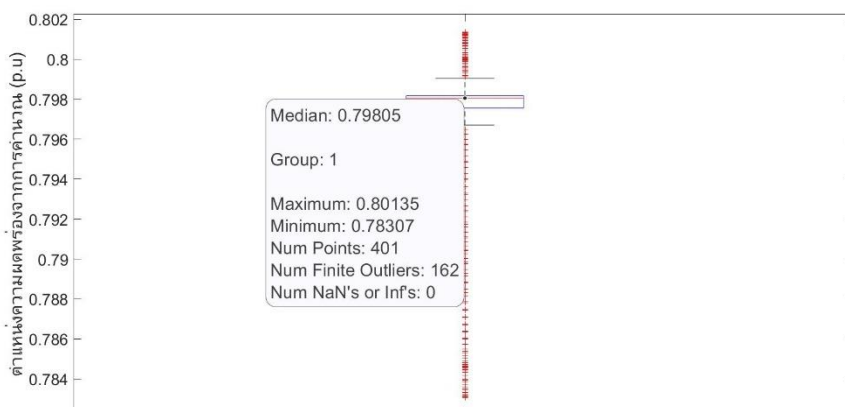
รูปที่ 41 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง



รูปที่ 42 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง



รูปที่ 43 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 50 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง



รูปที่ 44 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 80 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง

โดยค่ามัธยฐานคือผลลัพธ์ที่ได้จากตำแหน่ง 0.2 0.5 และ 0.8 p.u. มีค่าเป็น 0.203 0.5 และ 0.798 p.u. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เสนอใน [7] ที่มีค่าเป็น 0.204 0.5 และ 0.797 p.u. ตามลำดับ

#### 4.2.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ 4

ในการทดสอบวิธีที่ 4 จะทดสอบด้วยชุดข้อมูลเฟสเซอร์ที่ [8] ให้มา ซึ่งมี 2 ชุดข้อมูล โดยชุดที่ 1 ตามตารางที่ 13 เป็นเฟสเซอร์ในระบบ 500 kV สายมีความยาว 138.69 กิโลเมตร เกิดความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงกราวนที่ระยะจริง 57.82 กิโลเมตรจากฝั่ง G ส่วนชุดที่ 2 ตามตารางที่ 14 เป็นเฟสเซอร์ในระบบ 161 kV มีความยาวของสายส่งอยู่ที่ 93.12 กิโลเมตร ซึ่งเกิดความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงกราวนที่ระยะ 85.11 กิโลเมตรจากฝั่ง H โดยในบทความได้กำหนดค่าเดาเริ่มต้นที่ใช้ตามตารางที่ 15

ตารางที่ 13 ข้อมูลชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
$V_{Ga}$	0.71253 + j0.71835
$V_{Gb}$	0.027296 - j0.46566
$V_{Gc}$	-0.96676 + j0.35402
$I_{Ga}$	-4.9741 - j3.0075
$I_{Gb}$	-39.1991 - j13.7695
$I_{Gc}$	1.7197 - j1.7414
$V_{Ha}$	0.054162 + j0.99844
$V_{Hb}$	0.54877 - j0.38948
$V_{Hc}$	-0.90144 + j5.6612
$I_{Ha}$	0.32874 + j5.6612
$I_{Hb}$	-15.2273 - j48.4533
$I_{Hc}$	-1.7765 - j1.0783

ตารางที่ 14 ข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
$V_{Ga}$	0.67226 + j0.68317
$V_{Gb}$	0.11376 – j0.96417
$V_{Gc}$	-0.53707 + j0.26145
$I_{Ga}$	-0.067062 + j0.0061619
$I_{Gb}$	-0.15252 – j0.11224
$I_{Gc}$	1.05173 + j17.9774
$V_{Ha}$	0.89801 + j0.46016
$V_{Hb}$	-0.10941 – j0.99178
$V_{Hc}$	-0.69545 + j0.49139
$I_{Ha}$	0.36547 – j0.38002
$I_{Hb}$	-0.59806 – j1.3732
$I_{Hc}$	0.52749 + j2.9982

ตารางที่ 15 ค่าเดาเริ่มต้น

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
$m$	0.5
$\delta$	0
$R_s$	0.5
$X_s$	0.5
$R_m$	0.35
$X_m$	0.35

ผลลัพธ์ที่เสนอใน [8] ของข้อมูลที่ 1 และ 2 คือ 55.84 กิโลเมตร และ 87.71 กิโลเมตร ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณของวิทยานิพนธ์นี้คือ 55.8477 กิโลเมตร และ 87.77 กิโลเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.3 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการคำนวณ

ในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการคำนวณ ได้จำลองระบบจากรูปที่ 20 และ 21 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 16 17 และ 18 โดยกำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.04 วินาที ถึง 0.1 วินาที ซึ่งการทดสอบจะเปลี่ยนองค์ประกอบของระบบที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เช่น การเปลี่ยนจุดเกิดความผิดพลาด การเปลี่ยนค่าความต้านทานความผิดพลาด ค่าความยาวของสายส่งที่เปลี่ยนไป และ ชนิดความผิดพลาด เป็นต้น เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด โดยการคำนวณแต่ละวิธีจะทำตามวิธีที่เสนอใน 4.2 ยกเว้นวิธีที่ 4 ที่จะใช้ค่าเดาเริ่มต้นตามตารางที่ 15 แต่กำหนดค่า  $m$  เริ่มต้นให้มีค่าตามตำแหน่งความผิดพลาดจริงหรือเพิ่มลดตามสมควรเพื่อดูความแม่นยำที่คำนวณได้

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้าทางฝั่งบัส  $G$  และบัส  $H$ 

$R_1$	0.13225 $\Omega$
$R_0$	0.39675 $\Omega$
$L_1$	8.4236 mH
$L_0$	3.9675 mH

ตารางที่ 17 พารามิเตอร์ของสายส่ง

$R_1$	0.04 $\Omega/km$
$R_0$	0.21 $\Omega/km$
$L_1$	0.8598 mH/km
$L_0$	4.2356 mH/km
ความยาวสายส่ง	30 km

ตารางที่ 18 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย

$V_G$	115 kV <sub>rms</sub>
$\theta_G$	0°
$V_H$	115 kV <sub>rms</sub>
$\theta_H$	1°

#### 4.3.1 การศึกษาผลกระทบจากค่าความต้านทานความผิดพลาด

อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทานของการลัดวงจร ส่งผลทำให้กระแสและแรงดันช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของค่าความต้านทาน โดยในแต่ละวิธีการคำนวณที่นำมาทดสอบเป็นการใช้ข้อมูลจากสองปลายสายทั้งสิ้น ซึ่งจากวิจัยที่ผ่านมาถือว่าค่าความต้านทานความผิดพลาดไม่ส่งผลต่อการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดจากวิธีที่ใช้ข้อมูลจากสองปลายสาย เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละวิธีการคำนวณและศึกษาผลจากค่าความต้านทานความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทดสอบตั้งแต่ขนาด 0.01 ถึง 100 โอห์ม

วิธีการทดลอง



1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่ง โดยกำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.04 วินาที ถึง 0.1 วินาที ด้วยโปรแกรม Simulink
2. เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดเพื่อจำลองสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบผลจากอิมพีแดนซ์ต่อประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละเทคนิค
3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี ในแต่ละค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาด
5. บันทึกผลลัพธ์

#### ผลลัพธ์

#### ตารางที่ 19 ผลลัพธ์จากค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดที่เปลี่ยนไป

ความต้านทานความผิดพลาด (โอห์ม)	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาด = 0.2 p.u., ชนิดความผิดพลาด = L - g, ความยาวสาย = 30 km)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0.01	0.2449	4.49	0.20008	0.008	0.19998	-0.002	0.1980	-0.2
0.1	0.2441	4.41	0.20002	0.002	0.20000	0	0.1984	-0.16
1	0.2368	3.68	0.20032	0.032	0.20032	0.032	0.2020	0.2
10	0.2143	1.43	0.20000	0	0.20000	0	0.2027	0.27
100	0.2067	0.67	0.20000	0	0.20000	0	0.2026	0.26

จากตารางที่ 19 ค่าความต้านทานส่งผลเล็กน้อยต่อความแม่นยำในการคำนวณด้วยวิธีที่ 2 3 และ 4 ต่างจากวิธีที่ 1 ที่ค่าความต้านทานความผิดพลาดเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีความแม่นยำในการคำนวณมากขึ้น

#### 4.3.2 การศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาด

เป็นการทดสอบผลของตำแหน่งความผิดพลาดที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณ โดยมีผลลัพธ์ที่ได้ตามตารางที่ 20

#### วิธีการทดลอง

1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.04 วินาที ณ แต่ละตำแหน่งบนสายส่งด้วยโปรแกรม Simulink
2. เปลี่ยนตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาดบนสายส่ง
3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี ในแต่ละระยะของจุดเกิดความผิดพลาด

## 5. บันทึกผลลัพธ์

## ผลลัพธ์

ตารางที่ 20 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด

ตำแหน่งความผิดพลาดจริง ( $p.u.$ )	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ความต้านทานความผิดพลาด = 10 $\Omega$ , ชนิดความผิดพลาด = L - g, ความยาวสาย = 30 km)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)
0.05	0.0882	3.82	0.049997	-0.0003	0.049994	-0.0006	0.0546	0.46
0.25	0.2603	1.03	0.2500	0	0.2500	0	0.2521	0.21
0.50	0.5000	0	0.5000	0	0.5000	0	0.5449	-0.51
0.75	0.7466	-0.34	0.7500	0	0.7500	0	0.7451	-0.49
0.95	0.9476	-0.24	0.9500	0	0.9500	0	0.9440	-0.6

ตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาดส่งผลต่อความแม่นยำเล็กน้อยต่อผลลัพธ์การคำนวณ โดยแต่ละวิธีสามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกช่วงของสายส่ง ซึ่งวิธีที่ 2 และ 3 มีความแม่นยำที่สุด

## 4.3.3 การศึกษาผลกระทบจากความยาวสาย

ความยาวสายส่งส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์และความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลง ซึ่งจาก [5] ได้มีการเสนอความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคำนวณความผิดพลาดในสายที่มีความยาวแตกต่างกัน โดยวิธีที่ 4 กำหนด  $m$  เริ่มต้นเป็น 0.21 ซึ่งการทดลองมีดังนี้

## วิธีการทดลอง

- จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยโปรแกรม Simulink
- เปลี่ยนค่าความยาวสายส่งในช่วงที่เกิดความผิดพลาดเพื่อจำลองสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบผลจากชนิดความผิดพลาดต่อประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละเทคนิค
- คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
- คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี ในแต่ละค่าความยาวของสายส่ง
- บันทึกผลลัพธ์

## ผลลัพธ์

ตารางที่ 21 ผลลัพธ์จากความยาวสายที่เปลี่ยนไป

ความยาวสาย $km$	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาด = 0.2 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)
30	0.2143	1.43	0.2000	0	0.2000	0	0.2027	0.27
50	0.2093	0.93	0.2000	0	0.2000	0	0.2021	0.21
80	0.2060	0.6	0.2000	0	0.2000	0	0.2015	0.15
120	0.2041	0.41	0.2000	0	0.2000	0	0.2010	0.1
200	0.2026	0.26	0.2000	0	0.2000	0	0.2006	0.06

จากตารางที่ 21 จะเห็นได้ว่าความยาวสายที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้วิธีที่ 1 และ 4 มีความแม่นยำมากขึ้น โดยความยาวสายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีขนาดพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตาม สรุปได้ว่าวิธีที่ 1 และ 4 สามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดได้ดีในระบบที่มีขนาดพารามิเตอร์มาก ดังนั้นทั้ง 2 วิธีนี้จึงมีความเหมาะสมในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งที่มีความยาวมาก ซึ่งต่างจากวิธีที่ 2 และ 3 ที่สามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดได้ดีในทุกความยาวสาย

#### 4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด

ชนิดความผิดพลาดแบบไม่สมมาตรที่เกิดจากการลัดวงจรแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบเฟสเดียวลงกราวด์ แบบสองเฟส และ แบบสองเฟสลงกราวด์ ซึ่งมีแบบจำลองการลัดวงจรไม่เหมือนกัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดแต่ละชนิดจึงได้ทดลองเปลี่ยนชนิดความผิดพลาดเพื่อตรวจสอบความไวของวิธีการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดต่อชนิดความผิดพลาด ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 22

วิธีการทดลอง

1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.04 วินาที บนสายส่งด้วยโปรแกรม Simulink
2. เปลี่ยนชนิดความผิดพลาดเพื่อจำลองสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบผลจากชนิดความผิดพลาดต่อประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละเทคนิค
3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี ในแต่ละชนิดความผิดพลาด

## 5. บันทึกผลลัพธ์

### ผลลัพธ์

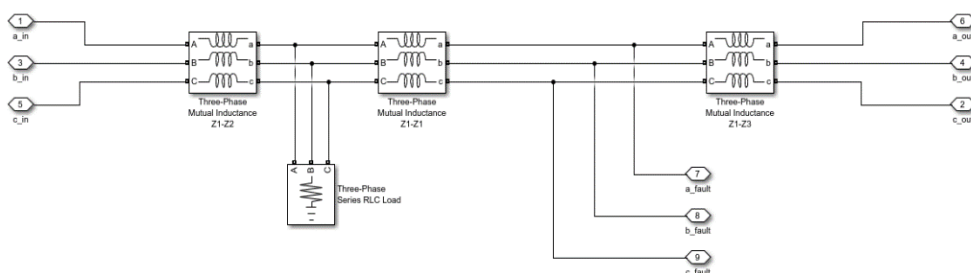
ตารางที่ 22 ผลลัพธ์จากความผิดพลาดไม่สมมาตร

ชนิดความผิดพลาด	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาด = 0.2 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ความยาวสาย = 30 km)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่ง ความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)
L - g	0.2143	1.43	0.2000	0	0.2000	0	0.2027	0.27
L - L	0.2197	1.97	0.2000	0	0.2000	0	0.2022	0.22
L - L - g	0.2168	1.68	0.19999	-0.001	0.19997	-0.003	0.2031	0.31

จากตารางที่ 22 สรุปได้ว่าชนิดความผิดพลาดไม่ส่งผลต่อสรคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดทั้ง 4 วิธี

### 4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากการแท๊ปโหลด

ในการคำนวณตำแหน่งบนสายส่งที่มีโหลดจากผู้ใช้ไฟฟ้าแรงสูงอาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เพื่อทดสอบขนาดของโหลดส่งผลต่อการคำนวณอย่างไรจึงจำลองระบบที่ได้กำหนดให้มีแท๊ปโหลดที่ตำแหน่ง 50 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง โดยเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 60 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งที่เวลา 0.04 วินาที ซึ่งมีค่าความต้านทานความผิดพลาด 10 โอห์ม โดยจำลองวงจรของสายส่งดังรูปที่ 50 ซึ่งจะทดสอบการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่โหลดขนาด 1 kw ถึง 1000 kw



รูปที่ 45 สายส่งสั้นที่มีโหลดต่ออยู่

### วิธีการทดลอง

1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยโปรแกรม Simulink
2. เปลี่ยนขนาดโหลดตั้งแต่ 1 kw ถึง 1000 kw

3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี
5. บันทึกผลลัพธ์

### ผลลัพธ์

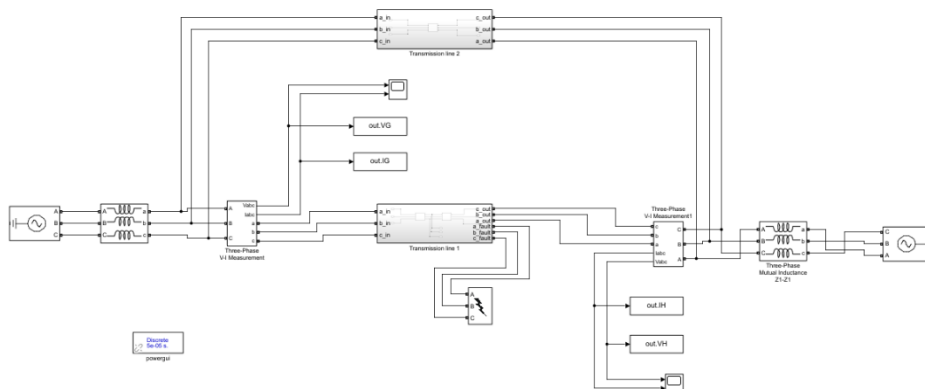
ตารางที่ 23 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากโหลด

กำลัง (kw)	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาดจริง = 0.8 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง(p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)
1	0.7696	-3.04	0.7750	-2.5	0.7749	-2.51	0.7463	-5.37
10	0.6600	-14	0.6574	-14.26	0.6572	-14.28	0.5030	-29.7
100	0.5311	-26.89	0.5305	-26.95	0.5322	-26.78	0.5002	-29.98
1000	0.5037	-29.63	0.5042	-29.58	0.5204	-27.96	0.5000	-30

จากตารางที่ 23 ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อโหลดมีขนาดตั้งแต่ 10 kw ขึ้นไป ซึ่งทำให้ทราบว่า การแก้ปโหลดส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ ดังนั้นจะต้องหาวิธีที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ ในปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดในกรณีวงจรรูปตัวที ซึ่งในอนาคตสามารถนำวิธีการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดบนวงจรสายส่งรูปตัวทีได้

#### 4.3.5 การศึกษาผลกระทบจากสายคู่

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ว่า องค์ประกอบภายนอกบัส G และบัส H มองเป็นแค่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและแหล่งจ่ายเท่านั้น เพื่อทดสอบทฤษฎีจึงจำลองระบบไฟฟ้าที่มีการต่อสายส่งขนานกับสายที่สนใจ โดยสายที่สนใจจะอยู่ระหว่างบัส G และบัส H จากในรูปที่ 46 คือ แผนภาพบล็อก three-phase I-V measurement และแผนภาพบล็อก three-phase I-V measurement1 ตามลำดับ ซึ่งไม่พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างทั้งสองสาย ผลลัพธ์ที่ได้เสนออยู่ในตารางที่ 24



รูปที่ 46 ระบบจำลองที่มีสายต่อขนาน

วิธีการทดลอง

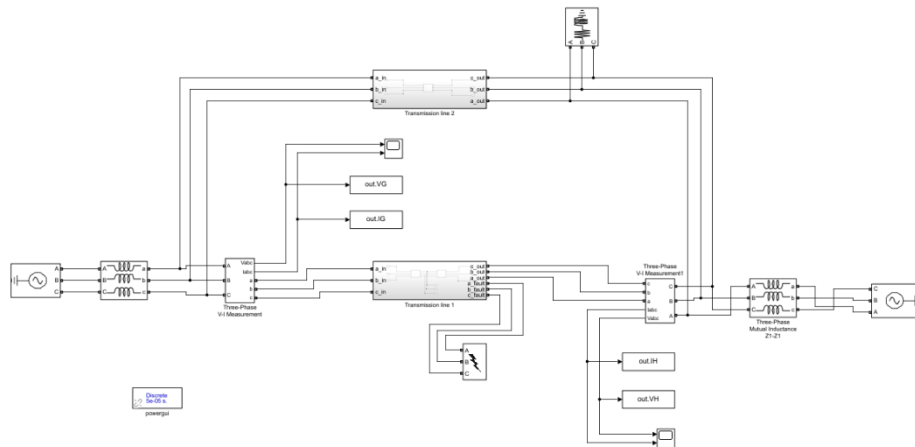
1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยโปรแกรม Simulink
2. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
3. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี
4. บันทึกผลลัพธ์

ผลลัพธ์

ตารางที่ 24 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากสายคู่

ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาดจริง = 0.2 p.u. ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g)							
วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0.2100	1	0.2000	0	0.2000	0	0.2015	0.15

จากตารางที่ 24 แสดงให้เห็นว่าการต่อสายส่งขนานกับสายที่สนใจไม่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณทั้ง 4 วิธี เพื่อให้แน่ใจจึงเพิ่มโหลดที่ขนาด 1 MW ที่ปลายสายส่งขนานดังรูปที่ 47 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 25



รูปที่ 47 ระบบจำลองที่มีสายต่อขนานที่มีโหลด 1 MW ต่ออยู่

ตารางที่ 25 ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบจากสายคู่ที่มีโหลดต่ออยู่

ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาดจริง = 0.2 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g)							
วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง(p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ตำแหน่ง ความผิดพลาด พ่วง (p.u.)	ความคลาด เคลื่อน (%)
0.2054	0.54	0.2000	0	0.2000	0	0.2001	0.01

การเพิ่มโหลดทำให้ระบบมีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 25 แสดงให้เห็นว่าวิธีที่ 1 และ 4 มีความแม่นยำมากขึ้น

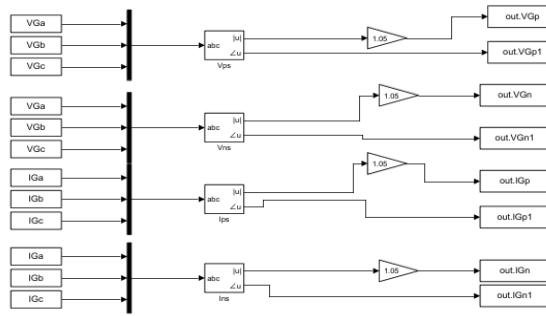
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.4 การทดสอบความไวต่อความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์วัด

ในการทดลองที่ผ่านมาได้มีการจำลองระบบที่สร้างสัญญาณในอุดมคติ ซึ่งในความเป็นจริงขนาดของสัญญาณจะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุปกรณ์วัด เช่น จากหม้อแปลงวัด เป็นต้น เพื่อทดสอบความไวต่อความคลาดเคลื่อนของวิธีการคำนวณ จึงทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงขนาดและมุมของสัญญาณไฟฟ้า

##### 4.4.1 ผลจากความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณ

ในการทดลองนี้จะเพิ่มขนาดสัญญาณไฟฟ้าโดยการต่อแผนภาพบล็อก gain ดังรูปที่ 48 โดยกำหนดให้สัญญาณจากฝั่งอ้างอิงมีขนาดเพิ่มขึ้นส่วนฝั่งตรงข้ามมีขนาดลดลง



รูปที่ 48 การเพิ่มขนาดสัญญาณขึ้นด้วยการคูณด้วย gain

วิธีการทดลอง

1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยโปรแกรม Simulink
2. จำลองสัญญาณที่มีขนาดคลาดเคลื่อนไปจากเดิม โดยกำหนดให้สัญญาณที่ตำแหน่งบัสอ้างอิงมีขนาดเพิ่มขึ้น และที่บัสตรงข้ามมีขนาดลดลง เพื่อใช้ในการทดสอบผลจากชนิดความผิดพลาดต่อประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละเทคนิค
3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี
5. บันทึกผลลัพธ์

ผลลัพธ์

ตารางที่ 26 ผลลัพธ์จากความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณ

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของขนาด	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาด = 0.2 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g, ความยาวสาย 30 km)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่งความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด(p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0	0.2143	1.43	0.2000	0	0.2000	0	0.2027	0.27
2	0.3015	10.15	0.3025	10.25	0.10599	-9.401	0.3228	12.28
5	0.2950	9.5	0.2953	9.53	0.2894	8.94	0.3021	10.21
10	0.2754	7.54	0.2756	7.56	1.0568	85.68	0.2774	7.74



จากตารางที่ 24 ทั้ง 4 วิธีมีความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อขนาดมีความคลาดเคลื่อน 2 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

#### 4.4.2 ผลจากความคลาดเคลื่อนของมุม

##### วิธีการทดลอง

1. จำลองระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดบนสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยโปรแกรม Simulink
2. จำลองสัญญาณมีมุมที่มีความคลาดเคลื่อน โดยกำหนดให้มุมของสัญญาณที่ป้อนตรงข้ามมีขนาดเปลี่ยนไป เพื่อใช้ในการทดสอบผลจากชนิดความผิดพลาดต่อประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละเทคนิค
3. คำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยแผนภาพบล็อก Fourier transform และ Sequence analyzer
4. คำนวณตำแหน่งความผิดพลาดด้วยวิธีที่นำเสนอทั้ง 4 วิธี
5. บันทึกผลลัพธ์

##### ผลลัพธ์

ตารางที่ 27 ผลลัพธ์จากความคลาดเคลื่อนของมุมของสัญญาณ

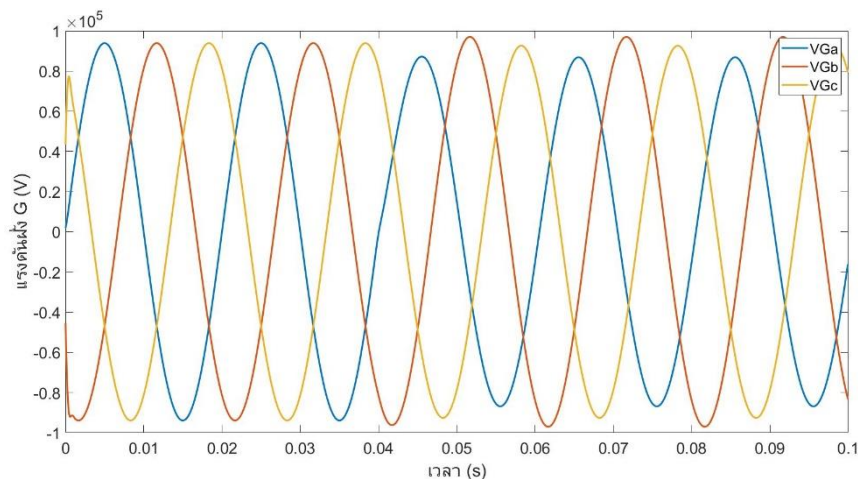
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุม (%)	ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด (ตำแหน่งความผิดพลาด = 0.2 p.u., ความต้านทานความผิดพลาด = 10 โอห์ม, ชนิดความผิดพลาด = L - g, ความยาวสาย = 30 km)							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ตำแหน่งความผิดพลาด (p.u.)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0	0.2143	1.43	0.2000	0	0.2000	0	0.2027	0.27
2	0.2071	0.71	0.2276	2.76	0.2124	1.24	0.3290	12.9
5	0.1960	-0.4	0.2628	6.28	0.2101	1.01	0.3240	12.4
10	0.1767	-2.33	0.2945	9.45	0.1615	-3.85	0.3275	12.75

จากตารางที่ 27 ความคลาดเคลื่อนของมุมส่งผลทำให้ผลลัพธ์เกิดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีที่ 1 มีความทนทานมากที่สุด

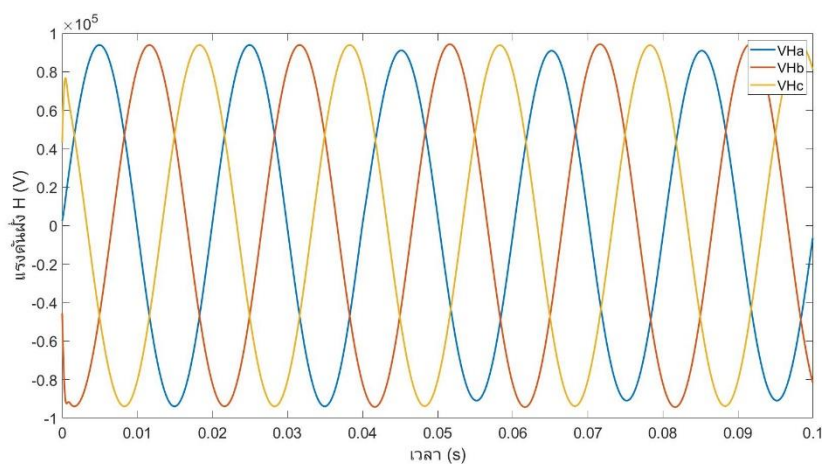
#### 4.5 การศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาด วิธีที่ 1 เป็นการใช้วิธีกำลังน้อยที่สุด ซึ่งในการหาค่าผลลัพธ์น้อยที่สุดจำนวนข้อมูลและช่วงของข้อมูลที่ใช้มีความสำคัญ ดังนั้นจึงควรเลือกช่วงและจำนวน

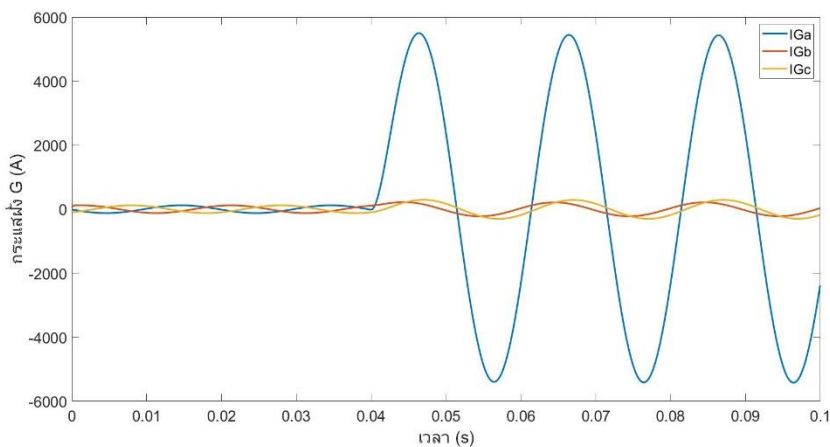
ข้อมูลที่เหมาะสม โดยช่วงที่เหมาะสมในการคำนวณคือช่วงเวลาก่อนเกิดและระหว่างเกิดความผิดพลาด ซึ่งถ้ามีข้อมูลช่วงก่อนเกิดความผิดพลาดที่มากพอจะช่วยให้สามารถเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดของวิธีที่ 1 ได้ ในการทดลองได้จำลองระบบที่กำหนดให้เกิดความผิดพลาดแบบเฟสเดียววงกราวน์ที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งที่เวลา 0.04 วินาทีถึง 0.1 วินาที มีความต้านทานความผิดพลาดเป็น 10 โอห์ม ซึ่งได้สัญญาณดังรูปที่ 49-52



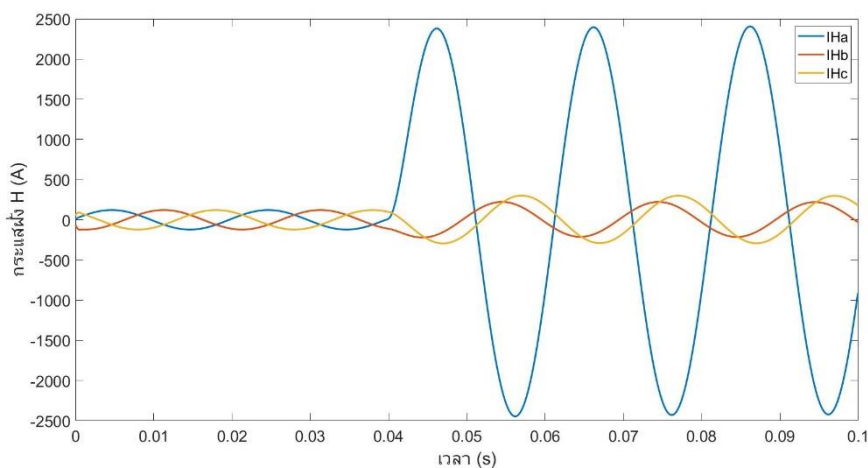
รูปที่ 49 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลอง



รูปที่ 50 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลอง

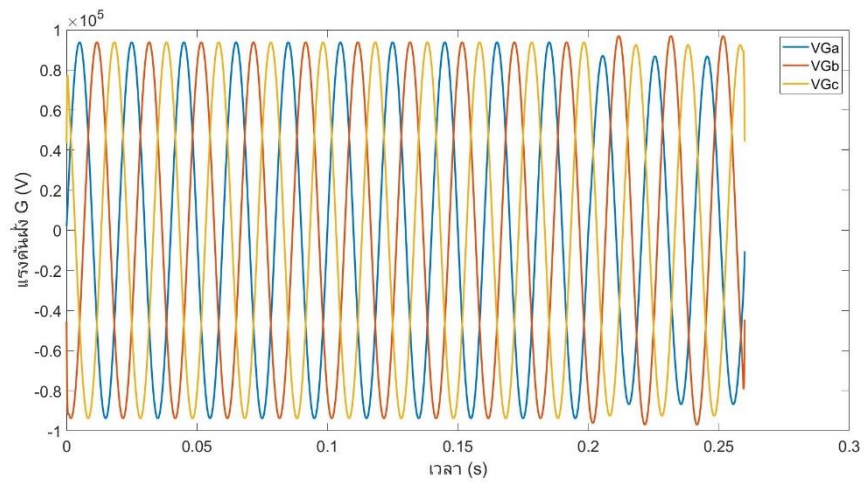


รูปที่ 51 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลอง

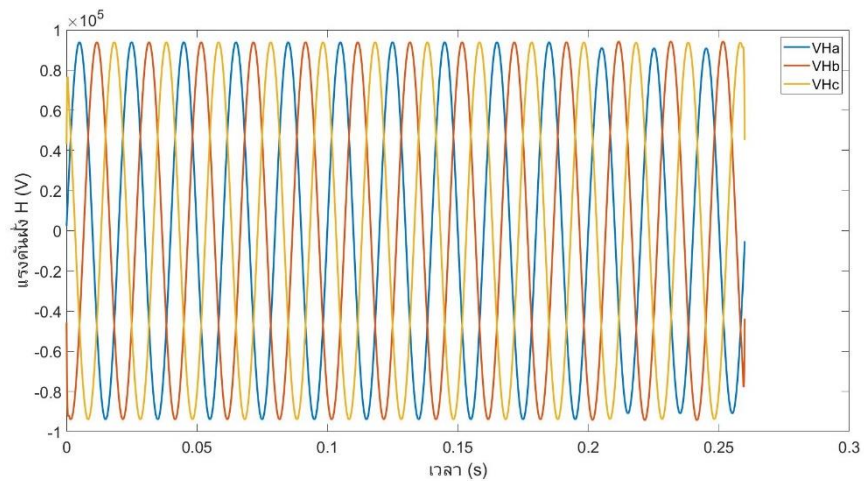


รูปที่ 52 กระแสฝั่ง H จากระบบจำลอง

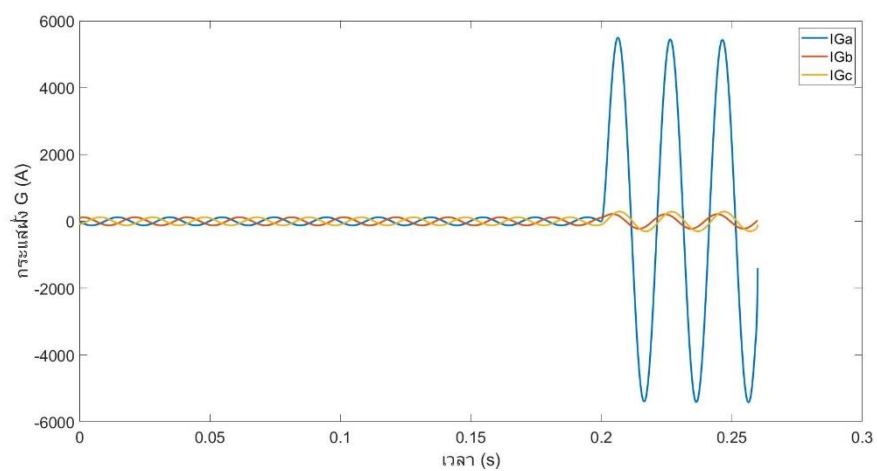
โดยในการคำนวณจะใช้ตัวอย่างข้อมูลตั้งแต่ 0 วินาทีถึง 0.1 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้คือ 0.2143 p.u. ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 1.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นถ้าเพิ่มจำนวนตัวอย่างช่วงเวลาก่อนเกิดความผิดปกติจะส่งผลทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อทดสอบสมมุติฐานจึงจำลองระบบ ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบเฟสเดียวลงกราวน์ที่ตำแหน่ง 20 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งที่เวลา 0.2 วินาทีถึง 0.26 วินาที มีความต้านทานความผิดปกติเป็น 10 โอห์ม ซึ่งได้สัญญาณดังรูปที่ 53-56



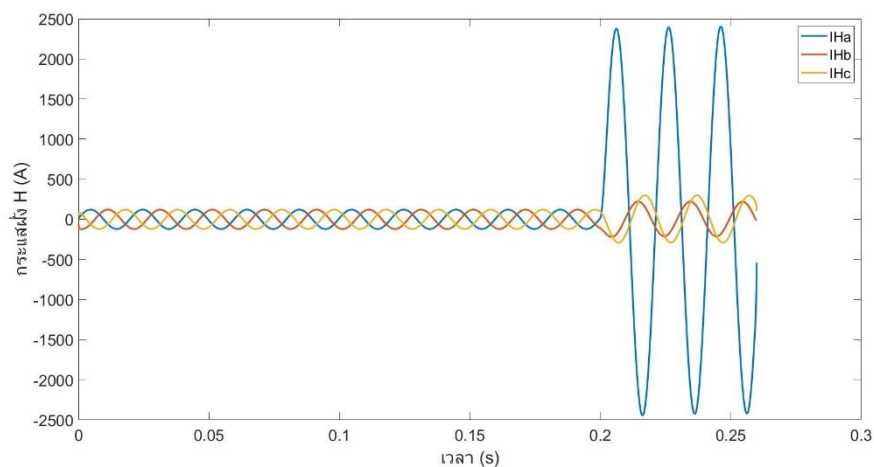
รูปที่ 53 แรงดันฝั่ง G จากระบบจำลอง



รูปที่ 54 แรงดันฝั่ง H จากระบบจำลอง



รูปที่ 55 กระแสฝั่ง G จากระบบจำลอง



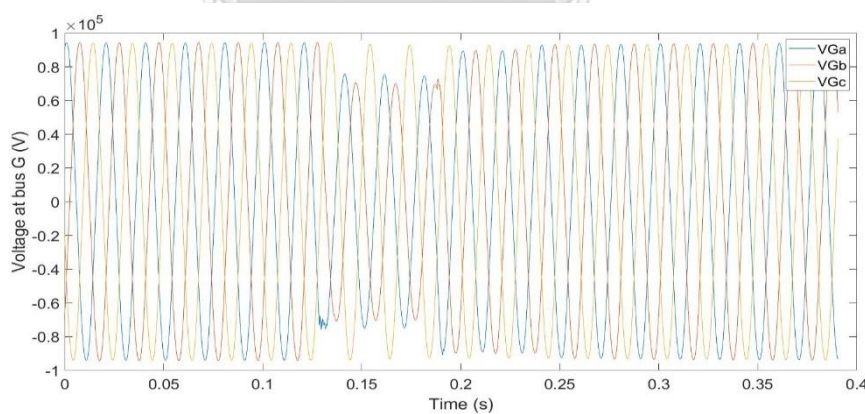
รูปที่ 56 กระแสไฟฟ้า  $H$  จากระบบจำลอง

โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ 0.2030 p.u. ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 0.3 เปอร์เซ็นต์ จากผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบว่าจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมากขึ้นจะทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น

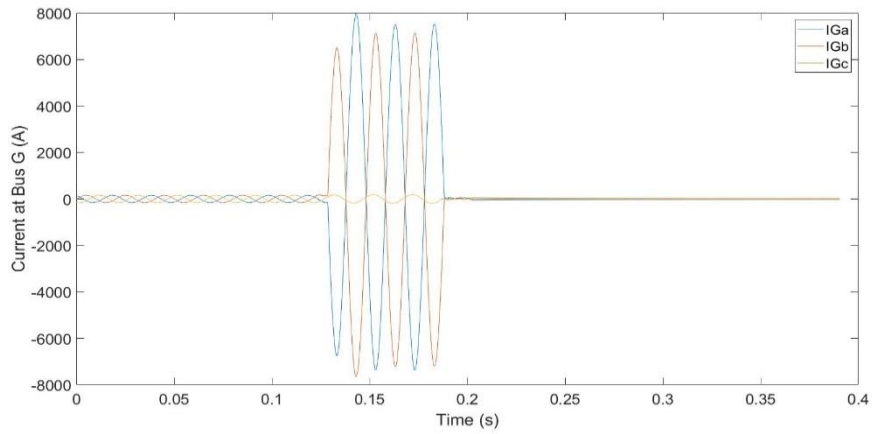
#### 4.6 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดจากสัญญาณไฟฟ้าจากหน่วยงาน

สัญญาณไฟฟ้าที่ใช้มี 5 ข้อมูลดังนี้

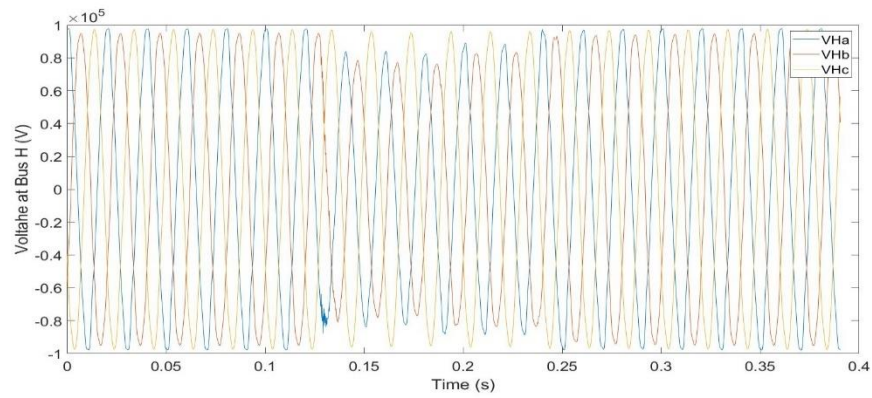
ข้อมูลที่ 1



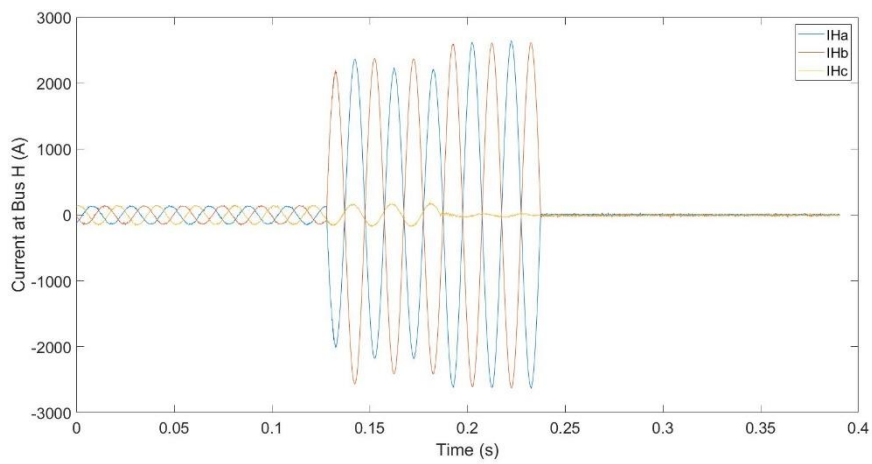
รูปที่ 57 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 1



รูปที่ 58 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 1

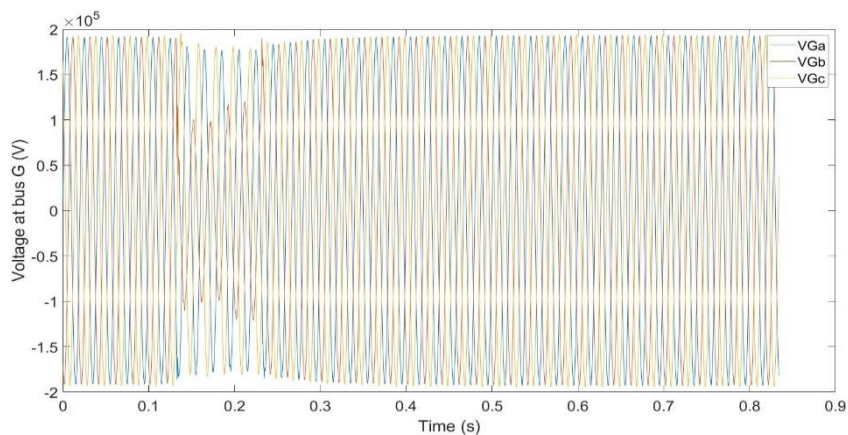


รูปที่ 59 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 1

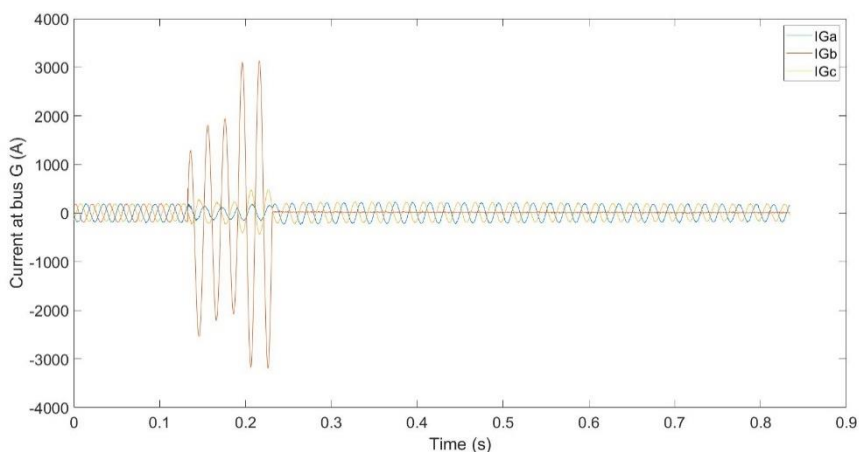


รูปที่ 60 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 1

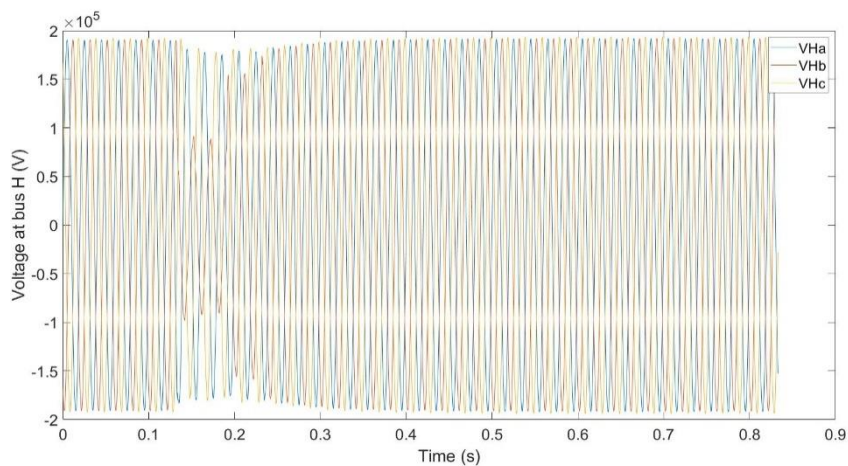
ข้อมูลที่ 2



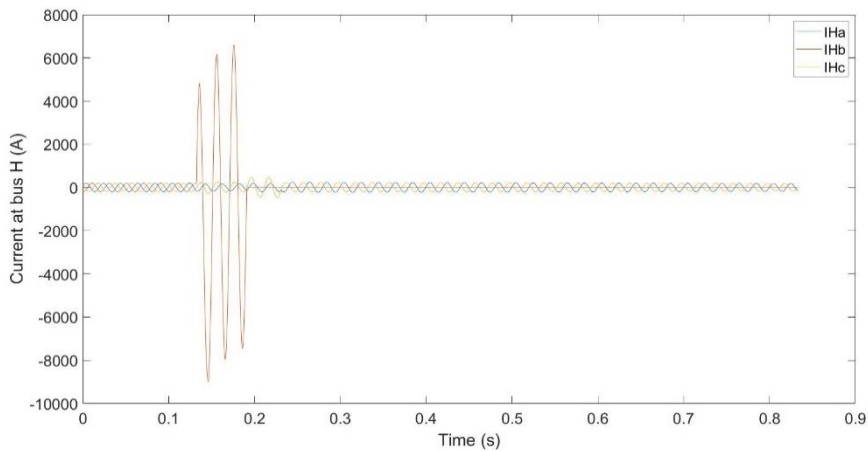
รูปที่ 61 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 2



รูปที่ 62 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 2

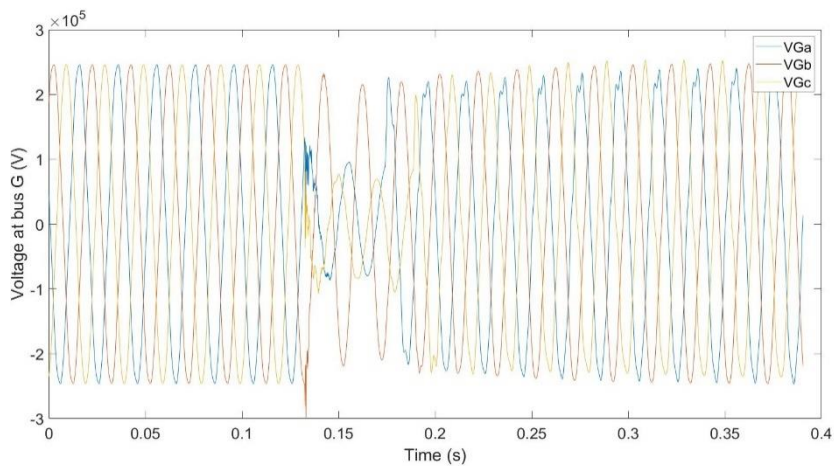


รูปที่ 63 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 2

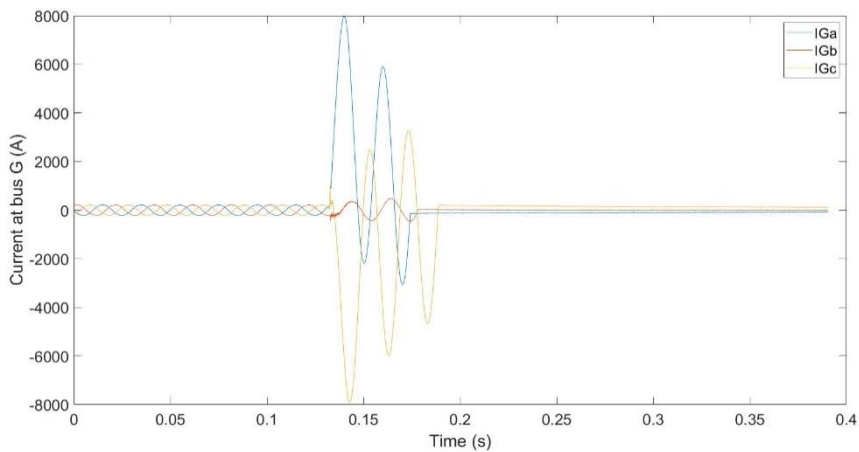


รูปที่ 64 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 2

ข้อมูลที่ 3

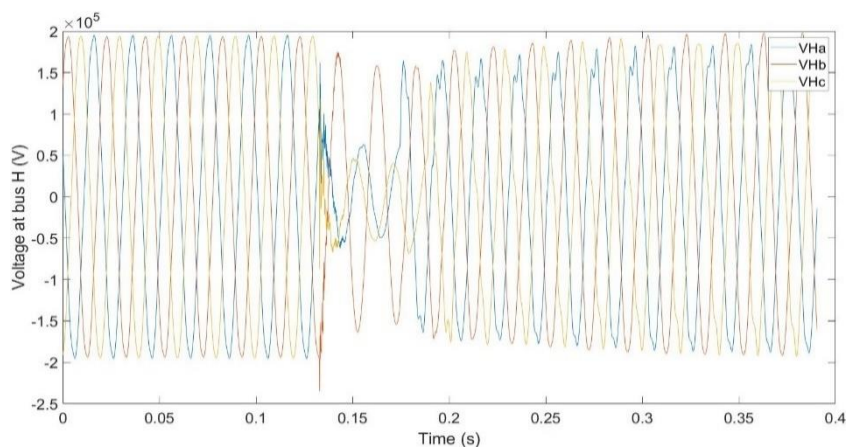


รูปที่ 65 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 3

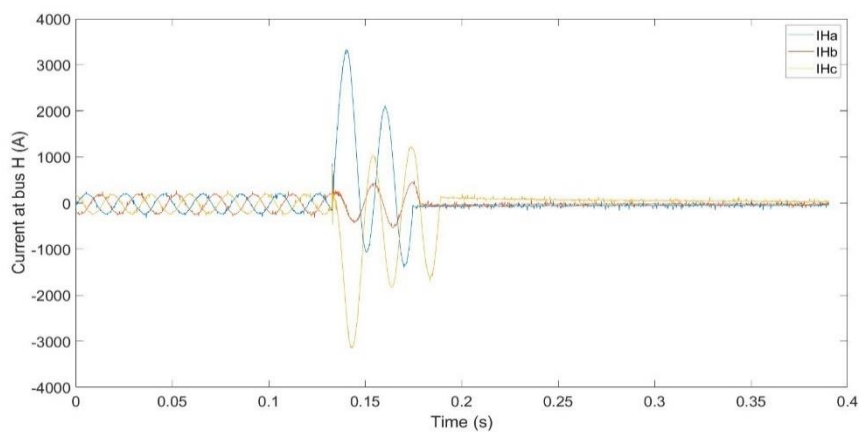


รูปที่ 66 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 3





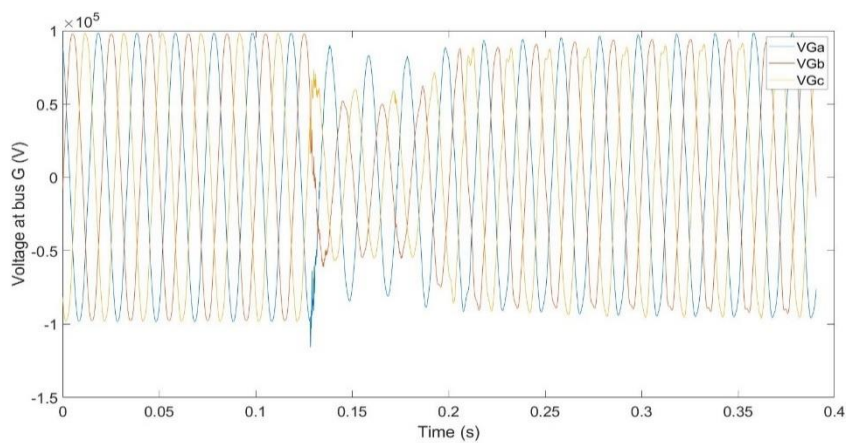
รูปที่ 67 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 3



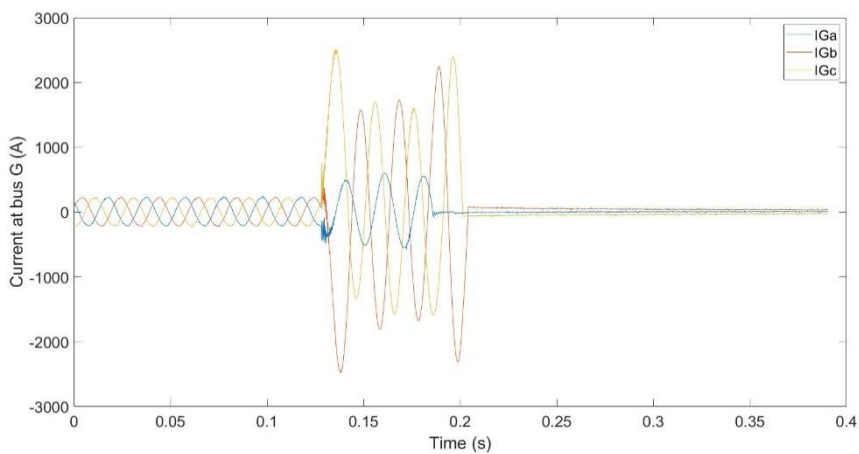
รูปที่ 68 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

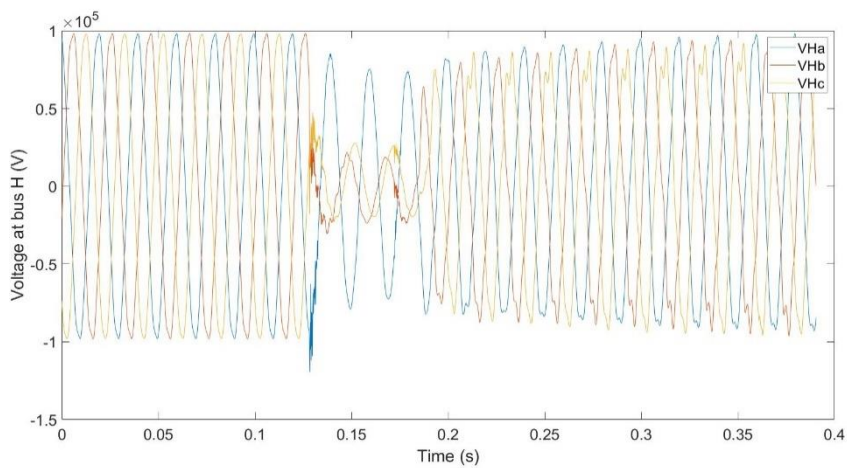
ข้อมูลที่ 4



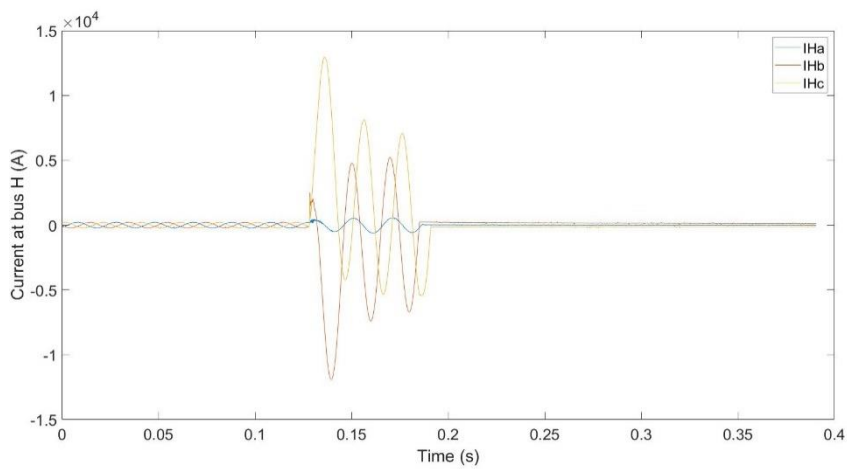
รูปที่ 69 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 4



รูปที่ 70 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลี่ 4

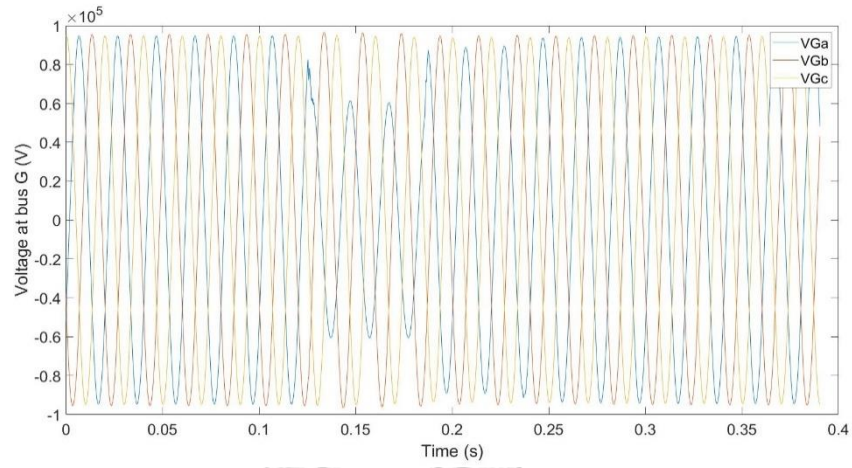


รูปที่ 71 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลี่ 4

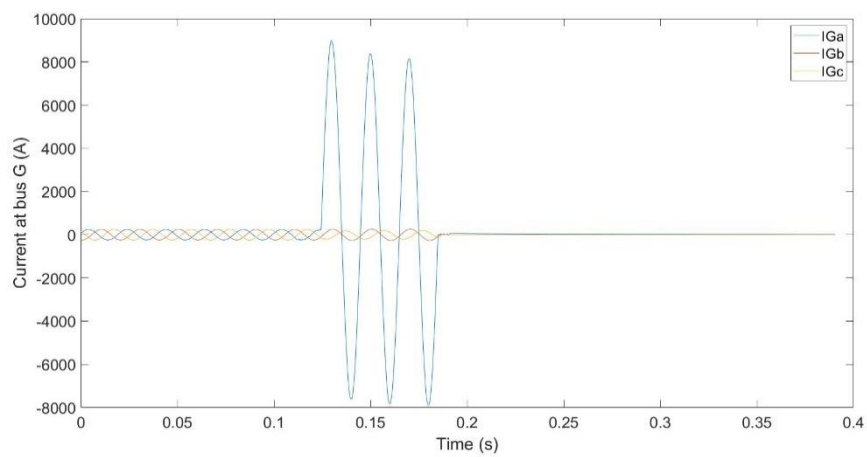


รูปที่ 72 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลี่ 4

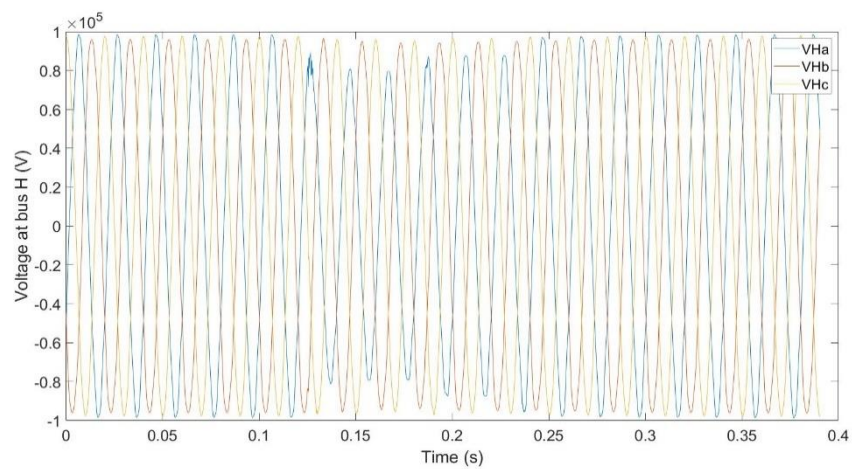
## ข้อมูลที่ 5



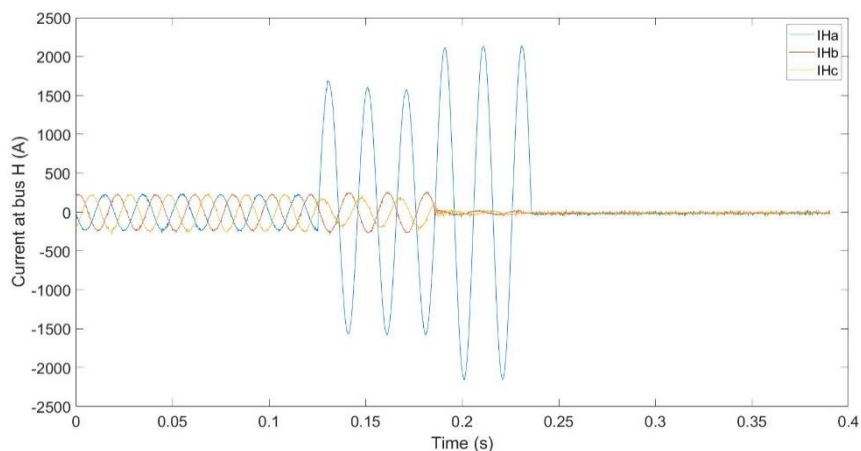
รูปที่ 73 สัญญาณแรงดันจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 5



รูปที่ 74 สัญญาณกระแสจากบัสอ้างอิงของข้อมูลที่ 5



รูปที่ 75 สัญญาณแรงดันจากบัสตรงข้ามของข้อมูลที่ 5



รูปที่ 76 สัญญาณกระแสจากบัสตรงข้ามของข้อมูลี่ 5  
ซึ่งสัญญาณทั้ง 5 มีข้อมูลดังตารางที่ 26

ตารางที่ 28 รายละเอียดของข้อมูล

ลำดับข้อมูล	ระดับแรงดัน (kV)	ความยาวสายส่ง (km)	ตำแหน่งความผิดพลาดตาม รายงาน	
			กิโลเมตร	p.u.
1	115	82.27	17.0	0.2066
2	230	88.10	70.4	0.7991
3	230	76.91	27.5	0.3576
4	230	76.00	65.5	0.8616
5	115	82.27	11.0	0.1337

ตารางที่ 29 ผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดของข้อมูลหน่วยงาน

ข้อมูลที่	ผลลัพธ์จากการคำนวณ							
	วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
	m (p.u.)	Error (%)	m (p.u.)	Error (%)	m (p.u.)	Error (%)	m (p.u.)	Error (%)
1	0.2532	4.66	0.2464	3.98	0.2464	3.98	0.2195	1.95
2	0.7539	-4.52	0.7702	-2.89	0.7859	-1.32	0.7197	-7.94
3	0.2557	-10.19	0.2979	-5.97	0.3097	-4.79	0.3156	-4.2
4	0.9170	5.54	0.9083	4.67	0.9096	4.8	0.9075	4.59
5	0.1756	4.19	0.1696	3.59	0.1422	0.85	0.1421	0.75

## บทที่ 5

### สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบผลลัพท์ของการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่งในระบบจำลองไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 115 kv ตามรูปที่ 20 ซึ่งมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 16 17 และ 18 โดยได้มีการทดสอบการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดเพื่อศึกษาผลลัพท์ที่ได้เมื่อองค์ประกอบที่สนใจของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปเช่น ตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาด ความต้านทานความผิดพลาด ความยาวสาย ชนิดความผิดพลาด และผลจากโหลด โดยจากผลลัพท์ที่ได้เสนอในตารางที่ 19 ถึง 23 ซึ่งโดยรวมทุกวิธีสามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดได้ แม่นยำมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นกรณีที่มีโหลดขนาด 10 kw ขึ้นไปต่ออยู่กับสายส่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 28

#### ตารางที่ 30 ผลลัพท์การประเมิน

การศึกษาองค์ประกอบที่สนใจ	ผลลัพท์การประเมิน			
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4
การศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งจุดเกิดความผิดพลาด	คำนวณได้แม่นยำทุกช่วงของสาย	คำนวณได้แม่นยำทุกช่วงของสาย	คำนวณได้แม่นยำที่สุดในทุกช่วงของสาย	คำนวณได้แม่นยำทุกช่วงของสาย
การศึกษาผลกระทบจากค่าความต้านทานความผิดพลาด	คำนวณได้แม่นยำเมื่อความต้านทานความผิดพลาดมีค่ามาก	คำนวณได้แม่นยำเมื่อความต้านทานความผิดพลาดมีค่ามาก	คำนวณได้แม่นยำและไม่ได้รับผลจากค่าความต้านทานความผิดพลาด	มีความคลาดเคลื่อนเมื่อค่าความต้านทานความผิดพลาดต่ำ
การศึกษาผลกระทบจากความยาวสาย	คำนวณได้แม่นยำเมื่อมีความยาวสายมาก	คำนวณได้แม่นยำเมื่อมีความยาวสายมาก	คำนวณได้แม่นยำทุกความยาวสาย	คำนวณได้แม่นยำเมื่อมีความยาวสายมาก
การศึกษาผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด	มีความคลาดเคลื่อนเมื่อคำนวณความผิดพลาดแบบเฟสเดียวลงกราวด์	คำนวณได้แม่นยำและไม่ได้รับผลจากชนิดความผิดพลาด	คำนวณได้แม่นยำและไม่ได้รับผลจากชนิดความผิดพลาด	คำนวณได้แม่นยำและไม่ได้รับผลจากชนิดความผิดพลาด
การศึกษาผลกระทบจากโหลด	มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อโหลดมีขนาดมาก	มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อโหลดมีขนาดมาก	มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อโหลดมีขนาดมาก	มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อโหลดมีขนาดมาก

ในการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดจากสัญญาณจริงจากหน้างาน วิธีที่ 3 และวิธีที่ 4 มีความแม่นยำที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการทดลองและผลจากการคำนวณสัญญาณจริง สรุปว่าวิธีที่ 3 เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด

### 5.1 ข้อเสนอแนะ

1. ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบการคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์ของสายส่ง จากข้อมูลทั้งสองปลายสายในกรณีที่สายส่งมีการเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอเท่านั้น ซึ่งในการทดสอบกับสัญญาณจากหน้าจึงมีความคลาดเคลื่อนที่มากเมื่อเทียบกับการทดสอบกับสัญญาณจำลอง จึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมกับสายส่งที่เรียงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ
2. วิธีที่ใช้ในการสอบไม่สามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดบนสายส่งที่มีการแท็ปโพลต์ ระหว่างสายได้ จำเป็นจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม หรือจะต้องมีการพัฒนาวิธีการคำนวณที่สามารถคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดโดยไม่ใช้พารามิเตอร์บนวงจรสายส่งแบบที่ได้
3. การคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดของข้อมูลจริงจากหน้างานที่นำมาทดสอบมีจำนวนกรณีที่น้อย เนื่องจากการมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ไม่เพียงพอและมีเหตุการณ์การเกิดความผิดพลาดที่ไม่มากนัก ซึ่งต้องมีการทดสอบเพิ่มเติม
4. สัญญาณคลื่นไซน์ของกระแสและแรงดันจากหน้างานของทั้งสองบัสมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดที่เกิดจากการบันทึกข้อมูลต่างช่วงเวลากัน ซึ่งต้องหาวิธีที่เหมาะสมในการปรับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อมุมของแรงดันระหว่างบัสทั้งสอง

## บรรณานุกรม

- [1] M. M. Saha, J. J. Izykowski, and E. Rosolowski, *Fault location on power networks*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] Glover J Duncan, Sarma Mulukutla S, and Overbye Thomas, *Power system analysis & design, SI version*. Cengage Learning, 2012.
- [3] G. Strang. "Lecture 9: Four Ways to Solve Least Squares Problems." MIT OPENCOURSEWARE. Available: <https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-065-matrix-methods-in-data-analysis-signal-processing-and-machine-learning-spring-2018/video-lectures/lecture-9-four-ways-to-solve-least-squares-problems/> (accessed Dec. 20, 2020).
- [4] ว. กาญจนกิจเกษม, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [5] J. Keshri and H. Tiwari, "Fault location in overhead transmission line without using line parameter," in *4th International Conference on Engineering and Technology (ICSET)*, 2017, pp. 11-15.
- [6] Liao Yuan, "Transmission line fault location algorithms without requiring line parameters," *Electric Power Components and Systems*, vol. 36, no. 11, pp. 1218-1225, 2008.
- [7] W. Xiu and Y. Liao, "Accurate transmission line fault location considering shunt capacitances without utilizing line parameters," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 16, pp. 1783-1794, 2011.
- [8] Y. Liao and S. Elangovan, "Unsynchronised two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, no. 6, pp. 639-643, 2006.
- [9] Elkalashy Nagy I, "Simplified parameter-less fault locator using double-end synchronized data for overhead transmission lines," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 808-818, 2014.
- [10] W. M. Khater, N. I. Elkalashy, T. A. Kawady, A.-M. I. Taalab, and M. Lehtonen, "Unsynchronized fault location independent on line parameters for transmission systems," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014: IEEE, pp. 1-6.
- [11] Z. Radojević, C. Kim, M. Popov, G. Preston, and V. Terzija, "New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters," in *International Conference*

*on Power System Transients Proceedings, 2009, pp. 28-48.*







จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จงวุฒิ สิงห์คำ
วัน เดือน ปี เกิด	10 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี 2559 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	35/1 ถ.พิทักษ์สันติราษฎร์ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
ผลงานตีพิมพ์	จงวุฒิ สิงห์คำ และชาญณรงค์ บาลมงคล. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการคำนวณและสมรรถนะของการหาตำแหน่งความผิดพร่องบนสายส่ง จากข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้งสองฝั่งโดยไม่ใช่พารามิเตอร์ของสายส่ง. งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟผ. ปี 2563 (PEACON & INNOVATION 2020)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY