



ระบบประมวลผลตำแหน่งและประเภทของความผิดปกติสำหรับระบบจำหน่าย
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้หลักการคลื่นจร
Fault Location and Classification System for Distribution of PEA
using Traveling Wave Theory

วสวัตตี้ ศรีนาค
Wasawat Srinak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบประมวลผลตำแหน่งและประเภทของความผิดพลาดสำหรับ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้หลักการคลื่นจร
ผู้เขียน	นายวสวัตต์ ศรีนาค
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
คณะกรรมการสอบ

..... (ดร.วฤทธิ วิชกุล)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น)
กรรมการ (ดร.วฤทธิ วิชกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกิง วงศ์ศิริโชติ)
รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.วฤทธิ์ วิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายสวัสดิ์ ศรีนาค)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายสวัสดิ์ ศรีนาค)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบประมวลผลตำแหน่งและประเภทของความผิดพลาดสำหรับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้หลักการคลื่นจร
ผู้เขียน	นายวสวัตต์ ศรีนาค
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณและออกแบบระบบค้นหาตำแหน่งจุดผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้การคำนวณตำแหน่งระยะทางของการเกิดความผิดพลาดด้วยวิธีคำนวณแบบคลื่นจรโดยอาศัยหลักการสะท้อนแบบปลายเดี่ยว (traveling wave single ended) โดยแบ่งการคำนวณและสรุปผลออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนแรกคือ การคำนวณตำแหน่งระยะทางของความผิดพลาดด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (MATLAB Simulink) ที่ทำการจำลองความผิดพลาดในระบบสายส่ง 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นำเสนอการคำนวณตำแหน่งระยะทางเปรียบเทียบกันระหว่าง วิธีคำนวณด้วยอิมพีแดนซ์ภายในสายส่ง และการคำนวณด้วยคลื่นจรโดยใช้หลักการสะท้อนแบบปลายเดี่ยว ส่วนที่สองคือการออกแบบเครื่องมือบันทึกกระแสของความผิดพลาดโดยทำการทดสอบกับวงจรจำลองในห้องปฏิบัติการ ส่วนที่สามคือ การทดสอบอัลกอริทึม การค้นหา ตำแหน่งระยะทาง และการคำนวณจากข้อมูลในระบบจำหน่าย 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและส่วนสุดท้ายเป็นการทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดพลาดโดยใช้ระยะทางที่บันทึกได้จากระบบจำหน่ายขณะเกิดความผิดพลาด นำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลไฟฟ้าขัดข้องและบำรุงรักษาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยผลที่ได้มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการแก้ไฟฟ้าขัดข้องและเพิ่มทางเลือกในการคำนวณระยะทางการเกิดความผิดพลาดจากการคำนวณที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้อยู่ในปัจจุบัน

คำสำคัญ: คลื่นจรแบบปลายเดี่ยว อิมพีแดนซ์ของสายส่ง ระยะทางความผิดพลาด ระบบ 115 เควี

Thesis Title	Fault Location and Classification System for Distribution of PEA using Traveling Wave Theory
Author	Mr.Wasawat Srinak
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

This research presented the calculation and design fault location of Provincial Electricity Authority's (PEA) distribution system by using traveling wave single-ended for calculate the estimate's distance of fault location. The calculation and summarization were divided into 4 parts: 1) the fault location has been calculated by simulation model using MATLAB Simulink, to simulates fault in 115 kV transmission lines of Provincial Electricity Authority that presented the distance's position calculation comparative between impedance method in transmission line and traveling wave single-ended 2) Design the fault current record by testing with circuit simulator in laboratory 3) Algorithm testing, calculate the estimate of distance and calculate from the data in 115 kV distribution system of the Provincial Electricity Authority (PEA) and 4) Prediction the cause of the fault by using the distance recorded from the distribution system, while fault and compared with the outage and maintenance database of the Provincial Electricity Authority (PEA), the result was accurate and acceptable. This research will increase the efficiency of outage correction and be the option to calculate the estimate's distance of fault location.

Keyword: traveling wave single-ended, impedance method in transmission line, fault distance, 115 kV transmission lines

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ตรวจสอบ แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ ช่วยพัฒนากระบวนการคิด การเรียนรู้ และการแก้ปัญหาในการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์ ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัย ถ่ายทอดความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น กรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัย และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เปิดโอกาสในการศึกษาให้แก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ที่ดี ผู้วิจัยมีความรู้สึกปราบปลื้ม และภูมิใจในความเป็นลูกพระบิดาอย่างที่สุด

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และให้โอกาสพนักงานได้ศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้กลับไปพัฒนาองค์กรต่อไป

ขอขอบพระคุณคุณอาจารย์ บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ข้าพเจ้าขอน้อมระลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยส่งเสริมสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจที่ดีแก่ข้าพเจ้า จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

วสวัตดี ศรีนาค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(5)
ABSTRACT.....	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(12)
รายการภาพประกอบ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย.....	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	10
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	11
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	11
1.7 สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล.....	11
1.8 แผนการดำเนินงานตลอดการวิจัย.....	12
1.9 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	14
2.1 บทนำ.....	14
2.2 การแปลงข้อมูล (Data transformation).....	14
2.2.1 การแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transformation).....	15
2.2.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)	16
2.2.3 เวฟเล็ตแม (Mother Wavelet).....	21
2.2.4 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform).....	23
2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบกันในระบบสายส่ง.....	23
2.3.1 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Resistance : R).....	23
2.3.2 ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (inductance ; L).....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ความจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Capacitance: C).....	29
2.4 ความเร็วเฟสในสายส่ง (Phase Velocity in transmission line).....	32
2.5 อัตราการสุ่มตัวอย่าง (sampling rate).....	36
2.6 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์.....	37
2.6.1 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบ ปลายเดียว.....	37
2.6.2 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบ สองปลาย.....	42
2.7 การระบุตำแหน่ง โดยวิธีคลื่นสะท้อน (Traveling wave).....	44
2.7.1 การระบุตำแหน่งความผิดพร่องโดยใช้สัญญาณความถี่สูงในสภาวะ ชั่วครู่ของแรงดัน (High Frequency Transient Voltage).....	44
2.7.2 การระบุตำแหน่งความผิดพร่องโดยใช้พื้นฐานของคลื่นสะท้อนบน ปลายด้านเดียว โดยใช้กระแส (Traveling Wave Based Transmission Line Using Single Ended Data).....	46
2.8 สถานีลानไกและโครงสร้างสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วน ภูมิภาค.....	50
2.9 การระบุเหตุการณ์การเกิดความผิดพร่อง โดยวิธีการคำนวณบนพื้นฐานของ สถิติ.....	51
2.9.1 การคัดเลือกคุณสมบัติเป็นเทคนิคที่ช่วยลดจำนวนตัวแปรที่จะใช้ใน ตัวแบบพยากรณ์.....	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....	53
3.1 บทนำ.....	53
3.2 การประมาณการตำแหน่งความผิดพร่อง.....	54
3.2.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในสายส่งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำ แบบจำลอง.....	56
3.2.2 การทดสอบแบบจำลองโดยการเริ่มการทำงานโดยใช้การตั้งค่า การทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete).....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การทดสอบวัดระยะความผิดพลาดโดยโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์	59
3.2.4 การคำนวณระยะทางความผิดพลาดโดยใช้หลักการของอิมพีแดนซ์ (Fault Impedance Method).....	60
3.2.5 การคำนวณระยะทางความผิดพลาดโดยใช้หลักการของคลื่นสะท้อน	62
3.2.6 การสร้างเครื่องมือบันทึกข้อมูลจากสถานีไฟฟ้า.....	64
3.2.7 การประมาณค่าตำแหน่งจากการสร้างแบบจำลองของสายส่งใน ห้องทดลอง.....	68
3.2.8 การประมาณค่าตำแหน่งจากการทดสอบกับสายส่งจริง.....	71
3.3 ระบบ Scada ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	75
3.4 ระบบการป้องกันสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	75
3.5 การทำนายข้อมูลของการเกิดความผิดพลาดโดยใช้ระยะทาง.....	76
3.5.1 การออกแบบการทดลองและนำข้อมูลของการทำ Feature Selection.....	76
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	81
4.1 บทนำ.....	81
4.2 การประเมินผลการทดสอบ การทำนายระยะทาง จะคำนวณค่าความ แม่นยำ (Accuracy).....	81
4.3 ผลจากการทำแบบจำลองในระบบคอมพิวเตอร์.....	82
4.3.1 วิธีการคำนวณอิมพีแดนซ์.....	82
4.3.2 วิธีการคำนวณโดยใช้คลื่นสะท้อนใช้การทดสอบ.....	93
4.4 ผลจากการทดสอบจากห้องทดลองในการสร้างแบบจำลองสายส่งใน ห้องปฏิบัติการ.....	109
4.5 ผลการทดสอบวัดระยะทางจากระบบจำหน่ายจริง.....	121
4.6 ผลจากการจำแนกข้อมูลจากการใช้โมเดลทำนายความผิดพลาดโดยใช้ ระยะทาง.....	129
4.6.1 ผลของการหาค่าของค่า Information Gain ค่าความสอดคล้องกัน ของข้อมูล.....	130

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.2 ผลของการหาค่าของค่า Classification.....	130
4.6.3 ผลการทดสอบ โมเดลทำนายความผิดพร่อง.....	131
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	132
5.1 บทนำ.....	132
5.2 สรุปผลการดำเนินงาน.....	132
5.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	133

รายการตาราง

		หน้า
ตาราง 1-1	การทบทวนวรรณกรรม.....	3
ตาราง 2-1	การคำนวณแรงดัน และกระแสสำหรับสมการระบุตำแหน่ง.....	39
ตาราง 2-2	การคำนวณกระแสก่อนและหลังเกิดความผิดปกติ.....	41
ตาราง 3-1	สัญลักษณ์ของการทำแบบจำลอง.....	54
ตาราง 3-2	ซีเควินซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศสำหรับสายจำหน่ายของการไฟฟ้า.....	56
ตาราง 3-3	ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์บนสายส่งอ้างอิงจากระบบจำหน่ายจริง.....	56
ตาราง 3-4	ตารางสรุปค่าแรงดันและกระแสที่ทำการวัดจากแบบจำลอง.....	57
ตาราง 3-5	ระยะทางของสายส่งและระยะทางของความผิดปกติที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง.....	58
ตาราง 3-6	กระแสและแรงดันที่ระยะทางลำดับต่างๆ ในสายส่ง.....	59
ตาราง 3-7	การคำนวณความเร็วเฟสและค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง.....	61
ตาราง 3-8	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรจำลองสายส่ง.....	67
ตาราง 3-9	การทดลองโดยอ้างอิงจากระยะทาง.....	68
ตาราง 3-10	สรุป feature ของข้อมูล.....	78
ตาราง 3-11	การออกแบบการทดสอบหาค่า information gain.....	79
ตาราง 3-12	การทดสอบทำนายสาเหตุโดยอ้างอิงระยะทาง.....	80
ตาราง 4-1	ผลการวัดแรงและกระแสที่สภาวะคงตัวที่บัสอ้างอิง.....	83
ตาราง 4-2	ผลการวัดค่าแรงดันกระแสค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิง.....	86
ตาราง 4-3	ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์.....	87
ตาราง 4-4	ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดปกติด้วยวิธีคลื่นสะท้อน.....	95
ตาราง 4-5	ผลการคำนวณความผิดปกติแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อน.....	96
ตาราง 4-6	การวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดปกติโดยแบบคำนวณคอมพิวเตอร์.....	97
ตาราง 4-7	สรุปข้อดีข้อเสียของวิธีคำนวณความผิดปกติด้วยการคำนวณแบบต่างๆ.....	98
ตาราง 4-8	การคำนวณระยะทางของสายส่งจำลอง.....	110
ตาราง 4-9	บันทึกเหตุการณ์ความผิดปกติจากสถานีไฟฟ้า.....	111

รายการตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง 4-10 ผลการคำนวณระยะทางความผิดพลาดตามเหตุการณ์.....	119
ตาราง 4-11 ผลคำนวณค่า information Gain ตาม Future.....	121
ตาราง 4-12 การประมาณการและผลการทำนายของการเกิดความผิดพลาด.....	121
ตาราง 4-13 สรุปผลการทำนายสาเหตุความผิดพลาด.....	122

รายการภาพประกอบ

		หน้า
ภาพประกอบ 1-1	แผนภาพแสดงอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	1
ภาพประกอบ 1-2	แผนผังระบบจำหน่ายแบบเชิงเส้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค...	2
ภาพประกอบ 2-1	การแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transform).....	15
ภาพประกอบ 2-2	การแยกสัญญาณและการสลายตัวของค่าสัมประสิทธิ์.....	18
ภาพประกอบ 2-3	การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่สูงและความถี่ต่ำ.....	20
ภาพประกอบ 2-4	รูปแบบของคลื่นเวฟเล็ตแบบต่างๆ.....	21
ภาพประกอบ 2-5	ความแตกต่างระหว่าง Haar wavelet และ Daubechies wavelet.....	22
ภาพประกอบ 2-6	การเกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ในสายส่ง.....	25
ภาพประกอบ 2-7	การหาค่าพลังงานของสนามแม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ.....	26
ภาพประกอบ 2-8	ระยะระหว่างตัวนำและฉนวนบนสายไฟฟ้า.....	27
ภาพประกอบ 2-9	ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร....	27
ภาพประกอบ 2-10	ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร	28
ภาพประกอบ 2-11	ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรแบบสลับสายไฟ.....	29
ภาพประกอบ 2-12	ระยะความจรรอบตัวนำของสายส่งไฟฟ้า.....	30
ภาพประกอบ 2-13	ระยะความจรระหว่างตัวนำบนสายส่งไฟฟ้า.....	31
ภาพประกอบ 2-14	ตัวแบบแสดงการกระจายของความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความจุ และการรั่วไหลในแต่ละช่วงสั้นๆตลอดความยาวสายส่ง	33
ภาพประกอบ 2-15	รูปแบบความสัมพันธ์ของระยะทางและพารามิเตอร์บนสายส่งตัวนำ.....	34
ภาพประกอบ 2-16	รูปแบบความสัมพันธ์ของระยะทางต่อแรงดันและกระแสบนสายส่งไฟฟ้า.....	34
ภาพประกอบ 2-17	ตัวอย่างการสุ่มสัญญาณในรูปแบบของคลื่นสัญญาณไซน์.....	36
ภาพประกอบ 2-18	แผนผังวงจรเชิงเส้นของวงจรแบบสองแหล่งจ่ายคำนวณแบบปลายเดียว.....	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 2-19	แผนภาพเฟสเซอร์ ของกระแสต่อแรงดัน.....	39
ภาพประกอบ 2-20	วงจรรการคำนวณของทฤษฎีชุดเซย์โหลด (Takagi Method)....	40
ภาพประกอบ 2-21	วงจรรการคำนวณแบบสองปลาย.....	43
ภาพประกอบ 2-22	แผนภาพเชิงเส้นของวงจรสายส่ง.....	44
ภาพประกอบ 2-23	กราฟแรงดันเฟส 120 องศา และแรงดัน alpha.....	46
ภาพประกอบ 2-24	ขั้นตอนของการนำเข้าสู่สัญญาณกระแสเพื่อใช้วิเคราะห์ตำแหน่ง ความผิดพร่อง.....	47
ภาพประกอบ 2-25	แผนผังจุดผิดพร่องที่ระยะต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของระยะทั้งหมด.....	48
ภาพประกอบ 2-26	แผนผังจุดผิดพร่องที่ระยะเกินกว่าครึ่งหนึ่งของระยะทั้งหมด.....	49
ภาพประกอบ 3-1	รูปแบบของระบบประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งของความผิดพร่อง	53
ภาพประกอบ 3-2	ตัวอย่างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink.....	55
ภาพประกอบ 3-3	ระยะการวางตำแหน่งของสายไฟฟ้าบนเสาไฟฟ้า.....	57
ภาพประกอบ 3-4	รูปแบบสัญญาณแรงดันที่วัดจากบัสอ้างอิงที่สภาวะปกติ.....	59
ภาพประกอบ 3-5	รูปแบบสัญญาณกระแสที่วัดจากบัสอ้างอิงที่สภาวะปกติ.....	59
ภาพประกอบ 3-6	รูปแบบการคำนวณความผิดพร่องแบบอิมพีแดนซ์.....	61
ภาพประกอบ 3-7	แบบจำลองการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแบบ อิมพีแดนซ์.....	62
ภาพประกอบ 3-8	รูปแบบการคำนวณความผิดพร่องแบบคลื่นสะท้อน.....	63
ภาพประกอบ 3-9	เครื่องมือวัดสัญญาณและคำนวณการแปลงสัญญาณความผิด พร่อง.....	64
ภาพประกอบ 3-10	รูปแบบการวัดความผิดพร่องที่สถานีไฟฟ้า.....	64
ภาพประกอบ 3-11	วงจรวัดแรงดันเทียบจุดกราวด์.....	65
ภาพประกอบ 3-12	วงจรรยกกระดัดแรงดันซีกบวก.....	65
ภาพประกอบ 3-13	ผลการวัดคลื่นสัญญาณ sine และแรงดันเทียบกราวด์.....	66
ภาพประกอบ 3-14	รูปแบบการทำงานของโปรแกรมบันทึกสัญญาณความผิดพร่องใน ระบบไฟฟ้า.....	67

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 3-15	การส่งผ่านข้อมูลระหว่าง FPGA และ Analog to digital เพื่อ บันทึกกระยะทาง.....	67
ภาพประกอบ 3-16	อัลกอริทึมสำหรับคำนวณระยะทางภายในสายส่ง.....	68
ภาพประกอบ 3-17	วงจรจำลองสายส่งเพื่อทดสอบเครื่องมือเก็บสัญญาณ.....	69
ภาพประกอบ 3-18	สัญญาณกระแสที่สภาวะปกติ.....	70
ภาพประกอบ 3-19	สัญญาณกระแสที่สภาวะไม่คงตัว.....	71
ภาพประกอบ 3-20	รูปแบบการทดสอบบันทึกกระยะทางในสายส่งจริง.....	71
ภาพประกอบ 3-21	อุปกรณ์นำเข้าสู่สัญญาณที่สถานีไฟฟ้า.....	72
ภาพประกอบ 3-22	วงจรสายส่งที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบระยะทาง.....	73
ภาพประกอบ 3-23	รูปแบบการวัดความผิดพลาดที่สถานีไฟฟ้า.....	74
ภาพประกอบ 3-24	รูปแบบการทำงานของโปรแกรมบันทึกสัญญาณความผิดพลาด ในระบบไฟฟ้า.....	74
ภาพประกอบ 3-25	สัญญาณกระแสที่สภาวะปกติ.....	74
ภาพประกอบ 3-26	รูปแบบสัญญาณเมื่อเกิดสภาวะไม่คงตัว.....	75
ภาพประกอบ 3-27	โปรแกรมติดตามสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	75
ภาพประกอบ 3-28	ผังการทำงานของระบบทำนายสาเหตุไฟฟ้าขัดข้อง.....	76
ภาพประกอบ 3-29	รายงานระบบบริหารไฟฟ้าขัดข้อง (OMS).....	77
ภาพประกอบ 3-30	แบบบันทึกข้อมูลระบบแจ้งเหตุไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้า.....	78
ภาพประกอบ 3-31	การบันทึกข้อมูลระบบแจ้งเหตุไฟฟ้าขัดข้องที่ทำการกรองข้อมูล	78
ภาพประกอบ 4-1	รูปแบบการจำลองแบบจำลองแบบปลายเดี่ยวด้วยแบบจำลอง คอมพิวเตอร์.....	82
ภาพประกอบ 4-2	สัญญาณแรงดันในสภาวะคงตัว ที่ทำการแปลงฟูเรียร์ของแรงดัน V_A, V_B, V_C 115 kV.....	83
ภาพประกอบ 4-3	ภาพสัญญาณกระแสในสภาวะไม่คงตัว ที่ทำการแปลงฟูเรียร์ ของกระแส I_A, I_B, I_C ที่ได้จากการจำลอง.....	83
ภาพประกอบ 4-4	กราฟผลการคำนวณอิมพีแดนซ์โดย ใช้เครื่องมือ Measurement Impedance.....	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 4-5	ภาพแรงดัน V_A, V_B, V_C ที่ได้จากการจำลอง.....	85
ภาพประกอบ 4-6	กระแส I_A, I_B, I_C ที่ได้จากการจำลอง.....	85
ภาพประกอบ 4-7	$V_{zero}, V_{positive}, V_{negative}$	86
ภาพประกอบ 4-8	$I_{zero}, I_{positive}, I_{negative}$	87
ภาพประกอบ 4-9	ผลของการคำนวณระยะทางด้วยวิธีอิมพีแดนซ์โดยเทียบกับ ที่ความผิดพลาด 10 km.....	93
ภาพประกอบ 4-10	คลื่นแรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะจำลองให้เกิดความผิด พลาด.....	94
ภาพประกอบ 4-11	แรงดันที่ผ่านการแปลง $V_0, V_{\alpha}, V_{\beta}$ ที่มีการลัดวงจรแบบ ลงดิน.....	95
ภาพประกอบ 4-12	กระแสที่ผ่านการแปลง $I_0, I_{\alpha}, I_{\beta}$ ที่มีการลัดวงจรแบบ ลงดิน.....	95
ภาพประกอบ 4-13	ผลการแปลง cwt ของสัญญาณกระแสที่สเกล 1 และสเกล 2 ของความผิดพลาดไม่เกินครึ่งสาย.....	96
ภาพประกอบ 4-14	ผลการแปลง cwt ของสัญญาณกระแสที่สเกล 1 และสเกล 2 ของความผิดพลาดไม่เกินครึ่งสาย.....	96
ภาพประกอบ 4-15	ผลการแปลง dwt เพื่อหาค่าเวลาเพื่อคำนวณระยะทางไม่เกิน ครึ่งสาย.....	97
ภาพประกอบ 4-16	ผลการแปลง dwt เพื่อหาค่าเวลาเพื่อคำนวณระยะทางที่เกินครึ่ง สาย.....	97
ภาพประกอบ 4-17	การคำนวณเวลาด้วยการจับเวลาหน้าคลื่นลูกที่ 1 และลูกที่ 2	98
ภาพประกอบ 4-18	การแปลงเวฟเล็ต ที่สเกล 1 และ 2 ของระยะการเกิดความผิด พลาดที่ 10,20,30,40 km.....	104
ภาพประกอบ 4-19	รูปแบบสัญญาณแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ....	105
ภาพประกอบ 4-20	รูปแบบสัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ....	105
ภาพประกอบ 4-21	รูปแบบสัญญาณกระแสและการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณปกติ.....	110

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 4-22	รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส A ลงดิน แรงดัน 10 V.....	110
ภาพประกอบ 4-23	รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส B ลงดิน แรงดัน 10 V.....	111
ภาพประกอบ 4-24	รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส C ลงดิน แรงดัน 10 V.....	111
ภาพประกอบ 4-25	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส A ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V.....	112
ภาพประกอบ 4-26	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส B ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V.....	113
ภาพประกอบ 4-27	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส C ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V.....	113
ภาพประกอบ 4-28	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส A ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40 V.....	114
ภาพประกอบ 4-29	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส B ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40 V.....	115
ภาพประกอบ 4-30	รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความถี่พร้อมแบบเฟส C ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40 V.....	115
ภาพประกอบ 4-31	รูปแบบการแปลงเวฟเล็ทของสัญญาณเกินครึ่งสาย มีสัญญาณอยู่ในสเกล 2.....	116
ภาพประกอบ 4-32	รูปแบบการแปลงเวฟเล็ทของสัญญาณไม่เกินครึ่งสาย.....	117

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ 4-33	รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไม่เกินครึ่งสาย.....	117
ภาพประกอบ 4-34	รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่จ่ายโหลดตามระดับแรงดัน ความผิดพลาดครึ่งสาย.....	118
ภาพประกอบ 4-35	รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่จ่ายโหลดตามระดับแรงดัน ความผิดพลาดเกินครึ่งสาย.....	119
ภาพประกอบ 4-36	รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่ผ่านการแปลงจ่ายโหลดตาม ระดับแรงดันความผิดพลาดเกินครึ่งสาย และเกินครึ่งสาย.....	120
ภาพประกอบ 4-37	สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (modal transform) ที่ วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะปกติ.....	122
ภาพประกอบ 4-38	สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (modal transform) ที่ วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน.....	122
ภาพประกอบ 4-39	สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (modal transform) ที่ วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะไม่คงตัวแบบไม่ลงดิน.....	123
ภาพประกอบ 4-40	การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน.....	123
ภาพประกอบ 4-41	การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน.....	124
ภาพประกอบ 4-42	การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่ สภาวะไม่คงตัวแบบลงดินเกินครึ่งสาย.....	124

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 4-43	125
การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน.....	125
ภาพประกอบ 4-44	126
การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน.....	126
ภาพประกอบ 4-45	126
การแบ่งสเกลค่าสัมบูรณ์การแปลง (Wavelet transform) ไม่ต่อเนื่องที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้า.....	126
ภาพประกอบ 4-46	127
การแบ่งสเกลค่าสัมบูรณ์การแปลง (Wavelet transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้.....	127
ภาพประกอบ 4-47	129
สัญญาณที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับสัญญาณจริง.....	129

บทที่ 1

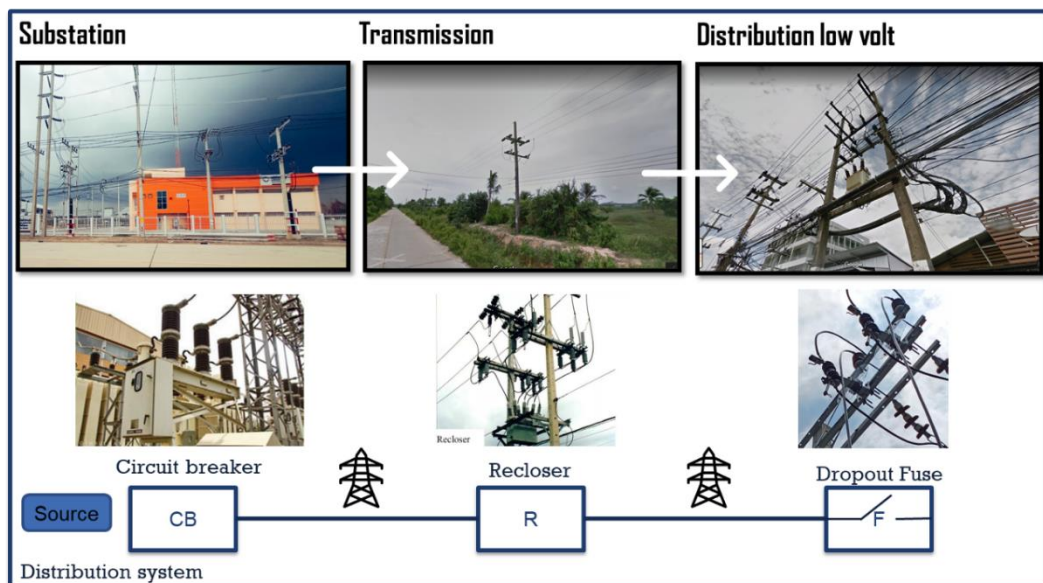
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ระบบจำหน่ายระดับแรงดันสูง 115 kV และแรงดันปานกลาง 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคใต้ในปัจจุบันออกแบบให้คู่ขนานไปกับถนนทางหลวงสายหลักจนถึงทางหลวงชนบท จึงทำให้เกิดวงจรไฟฟ้าที่หลากหลาย และเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายพาดผ่านไปตามสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอ้างอิงตามแต่ละพื้นที่ แยกแขนงออกไปคล้ายลักษณะก้างปลา โดยระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในภาคใต้ใช้ระดับแรงดันสูง 115 kV และ แรงดันปานกลาง ที่ระดับ 33 kV และสภาพแวดล้อมของพื้นที่เป็นภูเขาสลับกับทะเล ซึ่งมีความแตกต่างจากภูมิภาคอื่น ทั้งเรื่องระดับแรงดัน ชนิดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบและลักษณะของพื้นที่

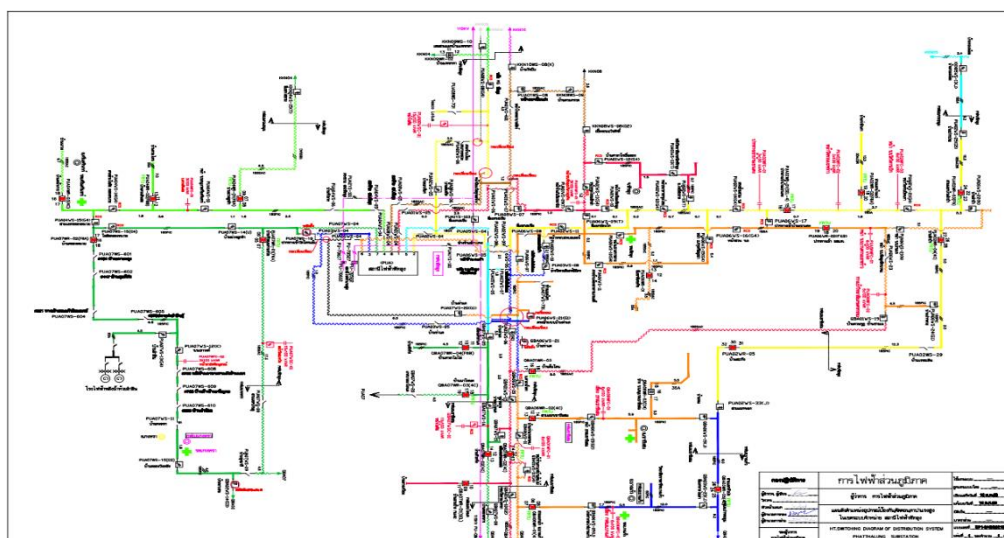
โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดการทั้งสองระบบ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ อุปกรณ์สำหรับตัดต่อวงจร และอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1. อุปกรณ์สำหรับตัดต่อวงจร แอร์เบรกสวิตช์ โหลดเบรกสวิตช์ แบบก๊าซ SF6
2. อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ได้แก่ เบรกเกอร์ รีโคลอสเซอร์ ส่วนวงจรแยกย่อยใช้ ดรอปเอาท์ฟิวส์ ในการตัดกระแสเกินป้องกันสายส่งในวงจร ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีจำนวนมากที่สุด ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพประกอบที่ 1-1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ซึ่งการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าในปัจจุบันจะใช้การสั่งการ และวิเคราะห์ข้อมูลจากส่วนของสถานีไฟฟ้าซึ่งจะคอยควบคุม สังเกตการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า และทำงานไปยังหน่วยซ่อมไฟของแต่ละการไฟฟ้าในการตรวจสอบระบบ โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่คือการลัดวงจรที่เกิดจากกายภาพ และสภาพแวดล้อม ต้นไม้ และสัตว์ รongลงมา คือจากอุปกรณ์ชำรุด และการลัดวงจรแบบไม่ทราบสาเหตุ ซึ่งสองอย่างหลังจะใช้เวลาในการแก้ปัญหาที่ยากกว่าใช้เวลามากกว่าส่งผลเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก



ภาพประกอบที่ 1-2 แผนผังระบบจำหน่ายแบบเชิงเส้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

โดยการลัดวงจรจากปัญหาอุปกรณ์ชำรุด และการลัดวงจรแบบไม่ทราบสาเหตุ จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าทำงานหลายครั้ง และจะไม่สามารถแก้ไขได้ในครั้งเดียว จนกว่าจะมีกระแสลัดวงจรเกินค่าปรับตั้งในอุปกรณ์ป้องกัน โดยหน่วยซ่อมไฟของการไฟฟ้าจะระบุปัญหาที่ทำให้เกิดการลัดวงจร จากการใช้การวิเคราะห์สันนิษฐาน ทำให้การแก้ไขปัญหา ไม่ได้แก้ไขปัญหาที่สาเหตุการเกิดอย่างแท้จริง เพราะไม่มีข้อมูลและสถิติที่แท้จริงเพียงพอ ทำให้ยังคงเกิดไฟดับอยู่บ่อยครั้งติดต่อกันเป็นเวลานาน เกิดความเสียหายกับผู้ใช้ไฟเป็นวงกว้าง ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นอย่างมาก

ทั้งนี้การตรวจจับสัญญาณในปัจจุบันใช้การคำนวณระยะทางผ่านทางอิมพีแดนซ์ โดยใช้กระแสไหลต และกระแสลัดวงจรในการคำนวณ ซึ่งยังเป็นแนวทางที่ใช้กันมาตั้งแต่เริ่มต้น เป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลในการคำนวณน้อย และไม่ยุ่งยาก ซึ่งการคำนวณประเภทนี้ยังมีข้อที่ต้องปรับปรุงหลายประการเนื่องจากอิมพีแดนซ์ในระบบจำหน่ายไม่คงที่ และให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนสูง

จากที่กล่าวมาข้างต้น การระบุระยะทางของความผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงจำเป็นต้องหาเครื่องมือเพิ่มเติม และวิธีการใหม่ เพื่อเป็นทางเลือกและสร้างการคำนวณรูปแบบใหม่ ทั้งนี้จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่ใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบปัจจุบันเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหวังที่จะออกแบบและพัฒนา การคำนวณหาระยะทางของการเกิดความผิดพลาด ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการค้นหาระยะทางโดยคำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ (Impedance) และเพิ่มการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการคำนวณโดยคลื่นจร (Traveling Wave) ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งผู้วิจัยมีความประสงค์จะรวบรวมข้อมูลการคำนวณอัลกอริทึม ตัวแปรในสมการ และข้อจำกัดต่างๆ ในกระบวนการทำงาน เพื่อเป็นการเริ่มต้นการศึกษาที่ถูกต้อง โดยการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการสรุปสาระสำคัญ และแนวทางในการดำเนินงานโดยใช้อรรถความรู้ มาประกอบเป็นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ โดยผู้วิจัยได้นำเสนอปีที่ตีพิมพ์ ชื่อเรื่อง และคณะผู้วิจัย รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัย ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 การทบทวนวรรณกรรม

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2014	ชื่อเรื่อง: Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application คณะผู้วิจัย: Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gikwad, and Mahendra Patel	บทความนี้แนะนำเสนอ การพัฒนาพื้นฐานอิมพีแดนซ์ อัลกอริทึมสำหรับประมาณการความผิดพลาดในระบบสายส่งไฟฟ้า โดยแต่ละอัลกอริทึมมีข้อกำหนดข้อมูลขาเข้า(Input) โดยเฉพาะ และตั้งสมมติฐานบางอย่างที่อาจหรืออาจไม่เป็นจริง ในสถานการณ์ที่เกิดของเหตุการณ์ความผิดพลาดนั้น หลักการของวิธีการระบุตำแหน่งข้อบกพร่องแต่ละวิธี จะใช้การเลือกอัลกอริทึมสำหรับคำนวณตำแหน่งความผิดพลาดที่เหมาะสมที่สุด โดยประกอบด้วย ทฤษฎีคำนวณปลายด้านเดียว

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			(Simple reactance, Takagi, Eriksson และ Novosel) และการใช้อัลกอริทึมคำนวณแบบสองปลาย(Synchronized, Unsynchronized and Current-only) โดยบทความมีการ สาธิตการใช้งาน ในการระบุความผิดพลาดในแง่ของการใช้งานจริง ซึ่งทฤษฎีจะมีรายละเอียดเกี่ยวกับการกำหนดสูตร และความต้องการข้อมูลขาเข้า (Input) ของอัลกอริทึม
2	2010	ชื่อเรื่อง: Impedance-Based Fault Location Experience คณะผู้วิจัย: Karl Zimmerman and David Costello Schweitzer	บทความนี้ อธิบายถึงประสบการณ์ ของการหาตำแหน่งความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าตามอิมพีแดนซ์แบบปลายเดี่ยว และแบบสองปลาย โดยกำหนดเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง กับตำแหน่งความผิดพลาด และอธิบายวิธีการใช้อิมพีแดนซ์ ในการระบุตำแหน่งของความผิดพลาด โดยมีวิธีการ (วิธีคำนวณอย่างง่าย (Simple Reactance) วิธีคำนวณทากากิ (Takagi) การหาความผิดพลาดโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและมุมเฟส (Zero - Sequence Current with Angle Correction) และการหาความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณสองปลาย (Two - Ended Negative - Sequence) โดยใช้วิธีการตรวจสอบข้อผิดพลาดของระบบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวระบุตำแหน่งความผิดพลาด โดยแสดงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
3	2020	ชื่อเรื่อง:	บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าความผิดพลาดระบบจำหน่ายโดยอิมพีแดนซ์

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>A Novel Fault Impedance Calculation Method for Distance Protection Against Fault Resistance</p> <p>คณะผู้วิจัย: Yingyu Liang, Zhengjie Lu, Wulin Li, Wenting Zha, and Yaotong Huo</p>	<p>แบบใหม่ เพื่อปรับปรุงค่าความต้านทานที่บกพร่อง ค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาด อิมพีแดนซ์เสริม และอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ จะถูกหมุนพร้อมกันในระนาบเชิงซ้อน จนกระทั่งอิมพีแดนซ์เสริม ที่สัมพันธ์กับทิศทางบวกของแกนจริง ตามความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต ระยะความผิดพลาดและอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาด จะได้รับการแก้ไข วิธีการนี้สามารถทำงานได้ดีภายใต้ความผิดพลาดประเภทต่างๆ เช่น ความผิดพลาด 1 เฟสลงดิน (AG) และ ความผิดพลาดระหว่างเฟส (BC, ABC) ผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอสามารถคำนวณระยะความผิดพลาดจริงได้อย่างถูกต้อง</p>
4	2010	<p>ชื่อเรื่อง: Algorithm for detecting, identifying, locating and experience to develop the automate fault location in radial distribution system.</p> <p>คณะผู้วิจัย: Choowong-Wattanasakpubal and Teratum-Bunyagul</p>	<p>บทความนี้นำเสนอการออกแบบอัลกอริทึมเพื่อตรวจจับ ระบุ และค้นหาความผิดพลาดในระบบแหล่งจ่ายไปยังวงจรเดียว (Radial) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้อัลกอริทึมประกอบด้วยสามส่วนหลัก ในขั้นแรกจะใช้อัลกอริทึมแบบปรับได้เพื่อติดตามการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบ เช่น เฟสเซอร์ เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ กระบวนการถัดไปใช้พื้นฐานของกฎอิมพีแดนซ์เพื่อตรวจจับ และระบุประเภทของความผิดพลาด สุดท้ายจะใช้เทคนิคการชดเชยค่ากระแส และระบบข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อประเมินตำแหน่งความผิดพลาดที่เป็นไปได้ จากการทดสอบภาคสนามของการหาตำแหน่งของความผิดพลาดโดยอัตโนมัติ โดยผลลัพธ์จะ</p>

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งของความผิดปกติพร้อมนั้น
5	2019	<p>ชื่อเรื่อง: A Recursive Method for Traveling-Wave Arrival-Time Detection in Power Systems</p> <p>คณะผู้วิจัย: R. Jalilzadeh Hamidi, and Hanif Livani</p>	<p>บทความนี้เสนอวิธีการตรวจจับเวลาที่มาถึงครั้งแรก ของคลื่นจร ในโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงวิธีการระบุตำแหน่งข้อผิดพลาดโดยอาศัยคลื่นจร โดยวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับตัวกรอง Kalman Filter โดยจำลองมาจากข้อมูลพารามิเตอร์ของการวัดแรงดันไฟ หรือกระแสที่มีความละเอียดสูง และสร้างส่วนที่เหลือ โดยวิธีการนี้จะแยกได้ว่ามีสัญญาณหรือคลื่นรบกวน โดยวิธีการจะใช้ EMTD-RV และตัวจำลองดิจิทัลแบบเรียลไทม์เพื่อดำเนินการจำลองแบบชั่วคราว ผลลัพธ์จะถูกวิเคราะห์โปรแกรม MATLAB</p>
6	2021	<p>ชื่อเรื่อง: Precise Traveling Wave Based Transmission Line Fault Location Method Using Single-Ended Data</p> <p>คณะผู้วิจัย: O.D. Naidu, and Ashok Kumar Pradhan</p>	<p>บทความนี้เสนอวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติแบบปลายเดียว โดยใช้ข้อมูลคลื่นจรบนสายส่งของคลื่นสามครั้งแรกที่มาถึงของคลื่นจร และความเร็วของคลื่น ในสายส่ง ในกระบวนการคำนวณระยะทางความผิดปกติ โดยพิจารณาจากคลื่นลูกแรกและลูกที่สอง จากนั้นใช้ คลื่นที่สามเพื่อระบุช่วงของการเกิดความผิดปกติ และเลือก ระยะห่างที่ถูกต้อง เทคนิคนี้ประหยัดและ ไม่ต้องการการสื่อสาร เทคนิคที่เสนอนี้ได้รับการตรวจสอบในสายสัญญาณสองขั้ว 400 kV, 50 Hz, 150 km. โดยใช้ในการจำลอง EMTDC กับแบบจำลองจริง ประสิทธิภาพของวิธีการ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการสื่อสารแบบ</p>

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			สองข้อที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว และพบว่ามี ความถูกต้อง
7	2020	ชื่อเรื่อง: A General Travelling-Wave-Based Scheme for Locating Simultaneous Faults in Transmission Lines คณะผู้วิจัย: Hossam A. Abd el-Ghany, Ahmed M. Azmy, and Ahmed Magdy Abeid	บทความนี้นำเสนออัลกอริทึมขั้นสูงเพื่อตรวจจับ แยกแยะ และระบุตำแหน่งความผิดปกติ การผสมผสานระหว่างเทคนิคแบบปลายเดี่ยวและสองปลาย โดยการนำเทคนิคคลื่นจรถูกใช้เพื่อระบุตำแหน่งความผิดปกติอย่างแม่นยำ มีการตรวจสอบผลการจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าอัลกอริทึมที่นำมาใช้นั้นสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งของความผิดปกติได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเวลา ระหว่างการเกิดขึ้นของความผิดปกติทั้งสองหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP และเครื่องมือแปลงเวฟเล็ต MATLAB ใช้เพื่อจำลองระบบส่งกำลัง 500 kV และวิเคราะห์สัญญาณชั่วคราว (Transient) ที่สร้างขึ้นหลังจากเกิดความผิดปกติ
8	2019	ชื่อเรื่อง: Experiences with Double-and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology คณะผู้วิจัย: Cezary Dzienis, Wolfgang Leitner	บทความนี้นำเสนอประสบการณ์กับเทคโนโลยีคลื่นจรสำหรับตำแหน่งความผิดปกติในโครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้การตรวจสอบรายละเอียดของคลื่นจร การระบุข้อผิดพลาดที่ประสบความสำเร็จอาศัยศักยภาพของการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมจากบันทึกที่จับได้ และเป็นครั้งแรกที่เทคโนโลยีคลื่นจร สำหรับการลัดวงจรระยะระหว่างเฟสต่อดินในเครือข่ายไฟฟ้า
9	2018	ชื่อเรื่อง:	บทความนี้นำเสนออัลกอริทึมหาตำแหน่งความผิดปกติ โดยใช้คลื่นจรแบบปลายด้าน

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>An Online Travelling Wave Fault Location Method for Unearthed-Operated High-Voltage Overhead Line Grids</p> <p>คณะผู้วิจัย: Roberto Benato, Sebastian Dambone Sessa, Michele Poli, Cristiano Quaciari, and Giovanni Rinzo</p>	<p>เดี่ยว อ้างอิงกับสายส่งแบบเดินอากาศ มีความแปลกใหม่ของการคำนวณความเร็วของคลื่นจรซึ่งใช้ประโยชน์จาก ความต้านทานอิมพีแดนซ์และตัวเก็บประจุ ขั้นตอนตำแหน่งข้อบกพร่องขั้นตอนที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปใช้กับสายส่งเดินอากาศสองวงจรซึ่งจำลองโดยโปรแกรม EMTP ในขณะที่อัลกอริทึมตำแหน่งความผิดพลาดได้ถูกนำมาใช้ กับโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งผลจากความต้านทานและมุมมองที่จุดเกิดความผิดพลาดไม่มีผลกับวิธีการนี้</p>
10	2017	<p>ชื่อเรื่อง: Reproduction Methodology for Single Phase-to-Ground Faults in Overhead Transmission Lines</p> <p>คณะผู้วิจัย: HANQING LIANG, YADONG LIU, GEHAO SHENG, AND XIUCHEN JIANG</p>	<p>บทความนี้เสนอวิธีการตามทฤษฎีการผกผันของรูปคลื่น และลักษณะของคลื่นจรบนพื้นฐานของแบบจำลองความถี่ ซึ่งแบบจำลองการเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นโดยพิจารณาจากลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น และรูปคลื่นที่จุดเกิดความผิดพลาดนั้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการบันทึกผลผ่านอัลกอริทึมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณ ให้ระบุพื้นที่ได้อย่างรวดเร็วและมีส่วนช่วยในการหาจุดผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วด้วย</p>
11	2006	<p>ชื่อเรื่อง: Improved Single-Ended Traveling-Wave Fault Location Algorithm Based on Experience With Conventional Substation Transducers</p>	<p>บทความนี้แนะนำเสนออัลกอริทึมที่ระบุความผิดพลาดโดยใช้คลื่นจรที่ไม่มีการวัดแบบสองปลายซิงโครไนซ์ โดยใช้การวัดแบบปลายเดี่ยวเพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการวัดแบบสองปลายซิงโครไนซ์จากระยะไกล อย่างไรก็ตามการใช้การ</p>

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>คณะผู้วิจัย: Darren Spoor, and Jian Guo Zhu</p>	<p>ประมวผลผลสัญญาณที่จำเป็นเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากต้องระบุงการสะท้อนแต่ละครั้ง ให้สัมพันธ์กับคลื่นสัญญาณด้านหน้าในเวลาที่เหมาะสม เทคนิคการประมวผลผลสัญญาณในปัจจุบันรวมถึงการวิเคราะห์สัญญาณแบบโมดอลและเวฟเล็ด ซึ่งเวกเตอร์ที่ได้มักจะถูกยกกำลังสอง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้จะลดลงอย่างมากด้วยการกรองที่เกี่ยวข้องกับทรานสดิวเซอร์ของสถานี และวงจรถุติยภูมิ นอกจากนี้ ความแปรผันของรูปแบบการสะท้อนที่สังเกตได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างความผิดพร่องบนสายส่งใกล้เคียงหรือไกลได้อย่างเหมาะสม เอกสารนี้พิจารณาข้อมูลคลื่นเดินทางที่สังเกตได้บนระบบส่งสัญญาณ 330 kV และนำเสนอวิธีการประมวผลผลสัญญาณแบบใหม่ โดยใช้ในการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องคำนวณในสเกลขนาดใหญ่ที่ปรับอย่างเหมาะสม โดยลักษณะสัมประสิทธิ์ (Coefficient) เป็นผลลัพธ์จะใช้เพื่อยืนยันลักษณะของความผิดปกติ และเพื่อการประมาณการตำแหน่งข้อผิดพลาดที่แท้จริง</p>
12	2005	<p>ชื่อเรื่อง: Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits คณะผู้วิจัย: Cansin Y. Evrenosog˘lu, and Ali Abur</p>	<p>บทความนี้ใช้อัลกอริทึมสำหรับจุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าสามจุดเชื่อมต่อโดยใช้การแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณความผิดพร่อง โดยพัฒนาคลื่นจรแบบปลายเดี่ยวเพื่อใช้งานสำหรับสามจุดเชื่อมต่อ โดยใช้อัลกอริทึมให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ สำหรับกรณีดังกล่าว และ</p>

ลำดับ	ปีที่ตีพิมพ์	ชื่อเรื่อง/คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ได้รับการทดสอบในสถานการณ์ต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP และ MATLAB
13	2010	ชื่อเรื่อง: Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults คณะผู้วิจัย: S. L. Zimath, M. A. F. Ramos, J. E. S. Filho	บทความนี้เป็นการเปรียบเทียบการใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์และการใช้คลื่นจรในการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย ซึ่งบทความได้อธิบายถึงระยะทางที่ทั้งสองวิธีระบุได้ นำมาเปรียบเทียบกัน คลื่นจรมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งมาก หากป้อนข้อมูลในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกต้อง และสามารถใช้ได้กับสายส่งทุกประเภท
14		ชื่อเรื่อง: Fault Location Using Wavelets คณะผู้วิจัย: Fernando H. Magnago and Ali Abur	บทความนี้เป็นการนำสัญญาณของคลื่นจรมาทำการแปลงเวฟเล็ต ให้เหมาะสมโดยเปลี่ยนจากโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปแบบโดเมนความถี่ โดยการแปลงเวลานี้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้อย่างฉับพลัน เช่น ความผิดปกติที่เกิดขึ้นชั่วคราว การวิเคราะห์นี้เพื่อตรวจจับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบพลังงานและประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเพื่อระบุตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติพร้อมสรุปถึงปัญหาและวิธีดำเนินการ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาการทำงานและสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่าย ที่สอดคล้องกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

1.3.2 เพื่อศึกษาวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติของระบบจำหน่ายที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ โดยใช้หลักการและทฤษฎีคลื่นจร

1.3.3 เพื่อศึกษาการทำงานและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อระบุพิกัดตำแหน่งความผิดปกติ ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

1.3.4 ออกแบบและประยุกต์ แบบจำลองให้สอดคล้อง กับระบบระบุตำแหน่งความผิดปกติที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.3.5 จัดทำเครื่องมือสรุปรายงานผลสาเหตุของการเกิดความผิดปกติเบื้องต้น โดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และข้อมูลจากแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ได้แบบจำลองของระบบจำหน่ายอ้างอิงจากระบบจำหน่ายจริง ที่สอดคล้องกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

1.4.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อระบุพิกัดตำแหน่ง ความผิดปกติ ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

1.4.3 รายงานผลสาเหตุของการเกิดความผิดปกติเบื้องต้น โดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และข้อมูลจากแบบจำลอง

1.4.4 ประยุกต์ใช้เครื่องมือและองค์ความรู้ในองค์กร เพื่อต่อยอดและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาบนแบบจำลองคอมพิวเตอร์และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคใต้ ที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 115 kV

1.5.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลอง อ้างอิงจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ป้องกันและระบบสายส่งในสถานีไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3

1.5.3 การเก็บกลุ่มตัวอย่างของสัญญาณความผิดปกติ ใช้การทดสอบในห้องทดลองและสถานีไฟฟ้า

5. ทดลองสร้างแบบจำลองระบบ จำหน่ายแบบ 3 bus										
6. จำลองคลื่นจรโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ										
7. ศึกษาแบบจำลองต่างๆ ที่มีอยู่เดิม และแบบจำลองใหม่เพิ่มเติม										
8. นำข้อมูลที่ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อ ออกแบบแบบจำลอง										
9. เขียนรายงานและสอบโครงร่าง วิทยานิพนธ์										
	ภาคการศึกษาที่ 2/2564					ภาคการศึกษาที่ 1/2565				
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
10. สร้างแบบจำลองระบบโครงข่ายของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค										
11. ทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ สอดคล้องกับระบบจริง										
12. ศึกษาการระบุตำแหน่งจุดผิดพลาด โดยวิธีอิมพีแดนซ์จากแบบจำลอง										
13. ศึกษาการระบุตำแหน่งจุดผิดพลาด โดยวิธีคลื่นจรจากแบบจำลอง										
14. เก็บข้อมูลสัญญาณในระบบจำลอง										
15. จำลองสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อ ระบุตำแหน่งจุดผิดพลาด										
16. ทดสอบและเก็บผลการทดลองหาค่า ความคลาดเคลื่อน										
17. นำข้อมูลที่ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อ ระบุสาเหตุของการเกิดความผิดพลาด										
18. เขียนรายงานและสอบโครงร่าง วิทยานิพนธ์										

1.9 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.9.1 โมเดลจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink version 2020a

1.9.2 มาตรฐานของสถานีไฟฟ้าและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

การระบุตำแหน่งความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญในการฟื้นฟูระบบจำหน่ายที่มีผลกระทบจากความผิดพร่องนั้น โดยความผิดพร่องแบบชั่วคราว เช่น สัตว์ กิ่งไม้ จะถูกแก้ไขได้ด้วยตัวเอง และในกรณีที่มีความผิดพร่องแบบถาวร การกำหนดตำแหน่งความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ จึงมีความสำคัญมากสำหรับการควบคุมระบบไฟฟ้า โดยการระบุตำแหน่งความผิดปกติได้รับการทดลองในวรรณกรรมต่างๆ ซึ่งวิธีการสร้างระบบประมวลผลนั้นจะมีขั้นตอนการดำเนินการเป็น 3 ส่วน คือ

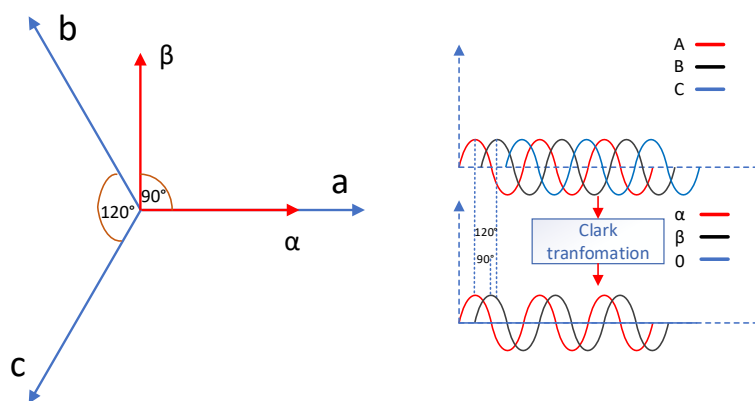
1. ส่วนการเตรียมข้อมูล และนำเข้า
 - 1) การแปลงข้อมูล (Data Transformation)
 - 2) การคำนวณความเร็วในสายส่ง (Velocity in Transmission Line)
 - 3) อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate)
2. ระบุตำแหน่งความผิดปกติสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ
 - 1) การระบุตำแหน่งโดยคลื่นจร (Traveling Wave)
 - 2) การระบุตำแหน่งโดยการคำนวณความต้านทานอิมพีแดนซ์ (Impedance Base)
3. ส่วนของการเปรียบเทียบข้อมูล
 - 1) การคัดเลือกข้อมูล (Feature Selection)
 - 2) การทำนายโดยอ้างอิงฐานข้อมูล

โดยโครงสร้างทั้ง 3 ส่วนนี้จะถูกคำนวณและทดสอบกับสัญญาณที่ถูกจำลองขึ้น และสัญญาณจริงโดยการศึกษาทฤษฎีมีส่วนที่จะทำให้การคำนวณในงานวิจัยมีความถูกต้องและแม่นยำ ทั้งนี้การให้ความสำคัญในส่วนต่างๆ จะส่งผลให้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้นโดยเนื้อหาที่สำคัญและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสามารถทำการสรุปได้ดังนี้

2.2 การแปลงข้อมูล (Data Transformation)

การแปลงข้อมูลเป็นขั้นตอนเป็นขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากการนำเข้ามาข้อมูลตั้งต้นอาจมาจากหลายแหล่งจำเป็นจะต้องแปลงข้อมูลเพื่อให้อยู่ในระบบฐานเดียวกันซึ่งในการคำนวณระยะทางของความผิดปกติในระบบจำหน่าย จำเป็นต้องแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับเทคนิคและวิธีการที่นำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูล

2.2.1 การแปลงแบบคลาร์ก [1] (Clark Transformation) โดยรูปแบบการแปลงข้อมูลจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีกรอบอ้างอิง (Reference Frame Theory) ซึ่งความเป็นมาเกิดขึ้นในปี ค.ศ.1937 โดย อีดิธ คลาร์ก (Eddie Clarke) ได้ตีพิมพ์บทความที่มีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัญหาของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาโดยผ่านการแปลงระบบ 3 แกน ที่ ไปเป็นระบบ 2 แกน อีกชื่อหนึ่งของขั้นตอนนี้คือการแปลง Alpha Beta Transform



ภาพประกอบที่ 2-1 การแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transform)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าการแปลงของคลาร์กจะเรียกว่าการแปลง Alpha Beta Transform โดยรูปแบบจะเป็นการแปลงทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการทำให้การวิเคราะห์วงจรสามเฟสให้ง่ายขึ้น โดยหลักการจะคล้ายกับการแปลงแบบ dq Transform โดยการคิด $\alpha\beta\gamma$ ใช้กับกระแสและแรงดันสามเฟสมีสมการ ดังนี้

$$V_{\alpha\beta\gamma}(t), I_{\alpha\beta\gamma}(t) = TV_{abc}(t), TI_{abc}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t), I_a(t) \\ V_b(t), I_b(t) \\ V_c(t), I_c(t) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

และเมื่อ V_{abc}, I_{abc} เป็นแรงดันและกระแสสามเฟสและ $V_{\alpha\beta\gamma}, I_{\alpha\beta\gamma}$ เป็นค่าที่ได้จากการแปลงจะได้สมการการผกผันของกระแสและแรงดันสามเฟสดังนี้

$$V_{abc}(t), I_{abc}(t) = T^{-1}V_{\alpha\beta\gamma}(t), T^{-1}I_{\alpha\beta\gamma}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha}(t), I_{\alpha}(t) \\ V_{\beta}(t), I_{\beta}(t) \\ V_{\gamma}(t), I_{\gamma}(t) \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

โดยการแปลงเปรียบเสมือนว่าเป็นการฉายภาพปริมาณแรงดันหรือกระแสสามเฟส บนแกนหนึ่ง สองแกนที่หยุดนิ่ง แกน Alpha และแกน Beta ซึ่งหากระบบมีความสมดุลจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงไม่สูญหายเนื่องจาก $I_a + I_b + I_c = 0$ และ $V_a + V_b + V_c = 0$ เทียบเท่ากับสมการของ γ ในการแปลงข้อมูล หากระบบไม่สมดุลแสดงว่าเทอมจะมีองค์ประกอบข้อผิดพลาด ดังนั้น γ เท่ากับศูนย์ แสดงว่าระบบมีความสมดุล จึงสามารถแยกระบบที่มีปัญหาและไม่มีปัญหาออกจากกัน จึงง่ายต่อการยกส่วนที่ผิดปกติมาทำการคำนวณและไม่คำนวณในสภาวะปกติ นี่ก็คือคุณสมบัติพิเศษของการแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transform)

ในการใช้การแปลงแบบคลาร์ก ต้องคำนึงระบบที่มีความสมดุลของเฟสในการวัด เพราะถ้าหาไม่มีความสมดุลจะทำให้การแปลงจาก 3 แกนไปเป็น 2 แกนเกิดความผิดพลาดในการคำนวณ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการวัดปริมาณสามเฟส

2.2.2 การแปลงเวฟเล็ต [2] (Wavelet Transform) เป็นรูปแบบหนึ่งของการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นการหาสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณ และเป็นการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform : FT) โดยได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้น ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว พิจารณารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น สัญญาณคลื่นเวฟเล็ต (Wavelet) เป็นการนำสัญญาณประกอบด้วยสัญญาณเฉพาะหลายๆ สัญญาณมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะ เป็นรูปคลื่นเล็กๆ ซึ่งจะเป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลง ไล่เข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว โดยสัญญาณคลื่นเวฟเล็ต (Wavelet) แต่ละตัวจะมีโครงสร้างจากฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งฟังก์ชัน และเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า "เวฟเล็ตแม่" (Mother Wavelet) คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันจะอยู่ในเขตของเวฟเล็ตนี้ โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดตามตัวแปร a และการเลื่อนตำแหน่งตามตัวแปร b ดังนั้นถ้าให้ $\varphi_{b,a}(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของเวฟเล็ตที่ตำแหน่ง a, b ใดๆ ที่สัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2-3)$$

$\varphi_{a,b}(t)$	ฟังก์ชันเวฟเล็ต
a	ค่าคงที่ของการปรับสเกล (Scale)
b	ค่าคงที่ของการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

ทฤษฎีเวฟเล็ตจะใช้วิเคราะห์สัญญาณเหมือนการแตกสัญญาณออกเป็นส่วนเล็กๆ ที่สัมพันธ์กันโดยจะอยู่ในรูปของเวฟเล็ตที่ถูกปรับขนาดสเกลและเลื่อนตำแหน่ง โดยทั่วไปจะใช้วิเคราะห์สัญญาณ ในรูปแบบของสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous) และไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยมีรูปแบบดังนี้

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT) รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้นมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการคูณกันของสัญญาณเดิม และฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ โดยทำการปรับขนาดสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปเรื่อยๆ จนครบทุกตำแหน่งและไล่ลำดับสเกลไปเรื่อยๆ จนถึงช่วงที่ต้องการ ซึ่งสามารถแสดงสมการการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{a,b}(t) dt \quad (2-4)$$

$CWT(a,b)$	ฟังก์ชันเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง
$x(t)$	สัญญาณที่ทำการวิเคราะห์
$\varphi_{a,b}(t)$	ฟังก์ชันเวฟเล็ต

โดยผลลัพธ์ของการปรับเปลี่ยนค่า a, b สามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณในรูปของความถี่สูง และความถี่ต่ำ ซึ่งการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง และเหมาะสมกับความถี่ที่จะทำการวิเคราะห์ จะให้ความแม่นยำทางเวลาและความถี่ โดยผลลัพธ์ของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจะอยู่ในรูปของ Wavelet Coefficient

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาความล่าช้าของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องในเรื่องของเวลาเนื่องจากต้องทำการแปลงทุกค่า โดยมีรูปแบบการปรับสเกลขนาดและการเลื่อนตำแหน่งเป็นช่วงๆ ที่ไม่ต่อเนื่องกัน

2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA) คือ การแยกสัญญาณที่มีส่วนผสมของสัญญาณหลายๆ ค่าความถี่ ออกเป็น

m, n	ขนาด, ลำดับ
$\psi_{m,n}(t)$	เวฟเล็ตฟังก์ชัน

ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณ $x(t)$ โดยใช้การขยายซีรีส์แบบรวมโดยใช้ทั้งสองอย่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณและค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{m0,n} \phi_{m0,n}(t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_{m0,n} \psi_{m0,n}(t) \quad (2-7)$$

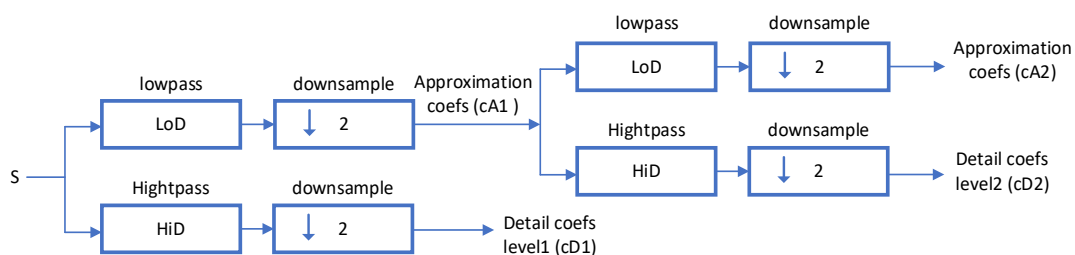
$S_{m0,n}$	เป็นสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิง
$T_{m0,n}$	เป็นสัมประสิทธิ์หรือค่าน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ตำแหน่งนั้นๆ
$x(t)$	เป็นสัญญาณใดๆ

โดยเมื่อทำการแยกสัญญาณขาเข้าแล้วทำการกระจายความละเอียดที่ระดับ
เหมาะสม จะสามารถนำสัญญาณนั้นมาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยมีสมการการแปลง
ดังนี้

$$DWT_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (2-8)$$

$b_0 a_0^m$	การเลื่อนตำแหน่ง
a_0^m	การกำหนดสเกล
m, n	เลขจำนวนเต็ม

2.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) กระบวนการ
แปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Filter Banks)
เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Window Function) ที่สามารถเปลี่ยนแปลง
ความถี่ในอัตราสองเท่าใน 1 ครั้ง ซึ่งเปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณนำเข้า (Input) ผ่านวงจร
กรองความถี่ที่มีแบนวิธที่มีอัตราการลดลงสองเท่าเหมือนกับแบนวิธของฟังก์ชันหน้าต่างในขณะนั้น
ดังนั้นจะสามารถนำเอาหลักการของฟิลเตอร์แบงก์มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้



ภาพประกอบที่ 2-3 การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่สูงและความถี่ต่ำ

การแปลงเวฟเล็ต ของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง เป็นการนำสัญญาณมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) และความถี่สูง (High Pass Filter) เพื่อแยกสัญญาณออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่มีความถี่ต่ำ (Approximation) และส่วนที่มีความถี่สูง (Detail) ในขั้นแรกหากยังมีสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่ก็จะนำสัญญาณความถี่ต่ำจากขั้นตอนแรกเข้าสู่การแปลงขั้นที่ 2 ซึ่งได้สมการของฟังก์ชันแสดงได้ดังนี้

$$Y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[2n-k] \quad (2-9)$$

$$Y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[2n-k] \quad (2-10)$$

$g[2n-k]$ ตัวกรองความถี่ต่ำ

$h[2n-k]$ ตัวกรองความถี่สูง

$Y_{low}[n]$ สัญญาณความถี่ต่ำ

$Y_{high}[n]$ สัญญาณความถี่สูง

โดยเมื่อค่าสัญญาณที่ผ่านตัวกรองทั้ง 2 ชนิด จะสามารถนำสัญญาณนั้นมาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยมีสมการการแปลง ดังนี้

$$DWT_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi \left(\frac{n-k2^m}{2^m} \right) \quad (2-11)$$

n จำนวนข้อมูล

m เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

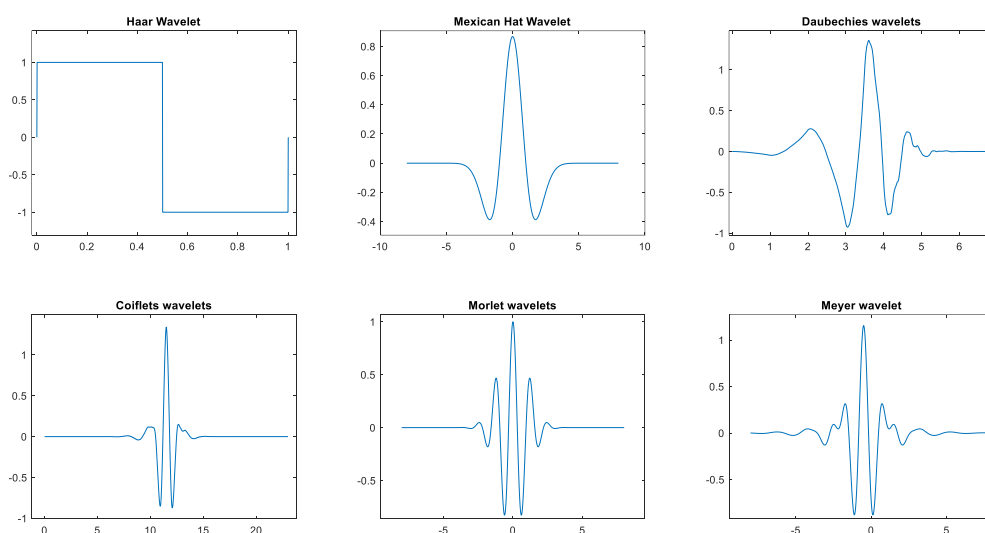
k เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

ทฤษฎีเวฟเล็ต สามารถใช้ได้กับสัญญาณหลายๆ ตัว โดยพิจารณารูปแบบของเวลา ความถี่ที่ต่อเนื่องกันอาจพิจารณาใช้การแปลงสัญญาณเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง เพื่อแสดงรูปแบบของความถี่ที่ช่วงเวลาต่าง ในกรณีสัญญาณและอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ไม่ต่อเนื่อง โดยพิจารณา

แปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย ซึ่งเป็นการใช้ตัวกรองกรองความถี่กับสัญญาณที่สนใจเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณที่ซับซ้อน

2.2.3 เวฟเลตแม่ (Mother Wavelet) [2]

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์เหมาะสม แล้ว ยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองนั้นๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเลตนั้น ตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเลตแม่ (Mother Wavelet) นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยลงไป และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเลตแม่ที่หลากหลายจึงทำให้การแปลงเวฟเลตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเลือกเวฟเลตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงเวฟเลตแม่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 รูปแบบของคลื่นเวฟเลตแบบต่างๆ

การแปลงเวฟเลตเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1909 โดย Alfred Haar นำเสนอ การแปลงแบบ Haar wavelet เป็นครั้งแรก แต่มีการนำเสนอข้อมูลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จนกระทั่งปี ค.ศ. 1987 เมื่อ Ingrid Daubechies แสดงให้เห็นว่าการแปลงเวฟเลต ซึ่งเจาะจงการแปลงแบบ Haar Wavelet เป็นกรณีพิเศษ โดยรูปแบบเวฟเลตที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีลักษณะดังนี้

1. Haar Wavelet เป็นลำดับของฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ปรับสเกลใหม่ ซึ่งรวมกันเป็นรูปแบบ Wavelet Family โดยพื้นฐานของเวฟเลต เวฟเลตชนิดนี้มีการวิเคราะห์เวฟเลตคล้ายกับการวิเคราะห์ฟูเรียร์ โดยแสดงฟังก์ชันในช่วงเวลาหนึ่งๆ ในรูปของออร์โธโนมอล (Orthonormal Haar Wavelet เป็นเวฟเลตตัวพื้นฐานที่เกิดการคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรก และใช้เป็นตัวอย่างที่แพร่หลายจนถึงปัจจุบัน โดย Haar Wavelet ยังเป็นเวฟเลตที่มีรูปแบบที่ง่ายที่สุด ข้อจำกัด

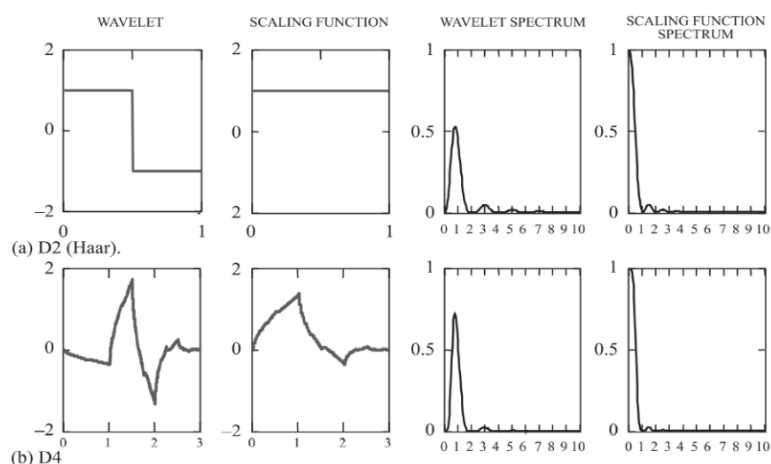
ของเวฟเล็ตชนิดนี้ คือมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องกันในทางกายภาพหากนำไปใช้วิเคราะห์สัญญาณที่มีความต่อเนื่องจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างยากหรือไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเลย โดยสัญญาณประเภทนี้จะนิยมนำไปใช้กับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง) เช่น การตรวจสอบความผิดพลาดของอุปกรณ์ในเครื่องจักร ฯลฯ ฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ของ Haar Wavelet φ สามารถอธิบายได้โดยสมการดังนี้

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < \frac{1}{2}, \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t < 1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-12)$$

2 . Daubechies Wavelet ถูกคิดค้นและปรับปรุงโดย Ingrid Daubechies ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก Haar Wavelet เป็นตระกูลของเวฟเล็ตที่มีลักษณะซ้อนทับกัน (Orthogonal Wavelets) และมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยนิยมใช้กับการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับขนาดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum_{k=0}^{N_k-1} (-1)^k c_k k^m = 0 \quad (2-13)$$

สำหรับจำนวนเต็ม $m = 0, 1, 2, \dots, n$ N_k คือช่วงเวลาที่ยาวไป ซึ่งหมายความว่าสามารถระงับส่วนของสัญญาณที่เป็นพหุนาม (Polynomial) ได้ถึง $\frac{N_k}{2} - 1$ องศา หรือ Daubechies Wavelet เป็นสัญญาณที่ดีมากที่สุดที่แสดงถึงพฤติกรรมพหุนามภายในสัญญาณตัวอย่างของ Daubechies Wavelet ได้แก่ ฟังก์ชันการปรับขนาดและสเปกตรัมพลังงาน ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2-5 ความยาวของ Daubechies Wavelet ที่ $N_k - 1$ ได้แก่ D2 คือ Haar Wavelet ซึ่งความยาวของ Daubechies Wavelet ที่เพิ่มขึ้น จะช่วยให้ฟังก์ชันการปรับขนาดผ่านช่วงความถี่ที่ต่ำและความถี่สูง และเหตุนี้จึงทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำ และตัวกรองความถี่สูง



ภาพประกอบที่ 2-5 ความแตกต่างระหว่าง Haar Wavelet และ Daubechies Wavelet

2.2.4 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) คือ การแปลงแบบอินทิกรัล (Integral Transform) โดยเป็นการเขียนแทนฟังก์ชันให้อยู่ในรูปผลบวก หรือการอินทิกรัลของเลขฐาน ที่เป็นฟังก์ชันรูปคลื่นไซน์ (Sine) หรือ โคไซน์ (Cosine) ในทางคณิตศาสตร์การแปลงฟูเรียร์ (FT) คือ การแปลงทางคณิตศาสตร์ฟังก์ชันปริมาณเทียบเวลาเวลาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันขนาดเทียบความถี่

โดยปกติแล้วคำ "การแปลงฟูเรียร์" จะใช้หมายถึง การแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง โดยเป็นการเขียนแทน ฟังก์ชัน $f[x(t)]$ จะใช้ผลบวกของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลเชิงซ้อน มาหาค่าของปริพันธ์ของกำลังสอง โดยมีความถี่เชิงมุม (ω) และขนาด (แอมพลิจูด) โดยฟังก์ชันที่ผ่านการแปลงฟูเรียร์สามารถแปลงกลับค่าเดิมได้เรียกว่า การแปลงกลับของการแปลงฟูเรียร์ (Inverse Fourier Transform) การแปลงฟูเรียร์ นั้นปกติจะเขียนอยู่ในรูปของ $f[x(t)]$ โดยมีความถี่เชิงมุม ω มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที โดยที่สัญญาณ $x(t)$ เป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปผลรวมแบบต่อเนื่องของฟังก์ชันเลขชี้กำลังที่มีความถี่ในช่วง $(-\infty, \infty)$ โดยการแปลงฟูเรียร์ จะเป็นการแปลงค่า $x(t)$ ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบของเลขชี้กำลังเชิงซ้อนซึ่งครอบคลุมทุกย่านความถี่ ซึ่งแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$f[x(t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2-14)$$

$f[x(t)]$	ฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่อง
$x(t)$	ฟังก์ชันเดิมที่ทำการแปลง

2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบกันในระบบสายส่ง [3]

2.3.1 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Resistance: R)

ในการศึกษาถึงความต้านทานของสายตัวนำในทางทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เราจะใช้สายตัวนำเดี่ยวรูปทรงกระบอก สมการหาค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ($R_{dc,T}$) เป็นดังนี้

$$R_{dc,T} = \frac{\rho_T l}{A} \quad (2-15)$$

ρ_T	ความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิ T มีหน่วยเป็น $\Omega\text{-m}$
ρ	ความต้านทานของอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 20°C มีค่า $2.83 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$
ρ	ความต้านทานของทองแดงที่อุณหภูมิ 20°C มีค่า $1.77 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$
l	ความยาวของสายตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
A	พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ค่า $R_{dc,T}$ ที่ได้จากสมการ จะนำมาใช้หาค่าความต้านทานทานกระแสสลับ $R_{ac,T}$ ในสายส่งไม่ได้จำเป็นจะต้องคูณด้วยค่าตัวประกอบ ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1) สายตัวนำที่ใช้ในสายส่งและระบบจำหน่ายเป็นสายชนิดตีเกลียว โดยถ้าตัดสายตัวนำเดียวกับสายตีเกลียวที่มีความยาวเท่ากัน มาเปรียบเทียบกับ โดยดึงสายตัวนำและสายตีเกลียวให้เป็นเส้นตรง จะเห็นว่าสายตีเกลียวมีความยาวมากกว่า ดังนั้น $R_{ac,T}$ ของสายตีเกลียวจึงมีค่ามากกว่า

2) การนำสายตีเกลียวเส้นหนึ่งไปใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง และเปลี่ยนสายดังกล่าวไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ จะพบว่าความต้านทานของสายขณะใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ $R_{ac,T}$ มีค่าสูงกว่าขณะใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีความถี่การไหลของไฟฟ้า จึงทำให้ความต้านทานเท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ แต่ในทางตรงกันข้ามไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่จึงทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวด้านนอกมากกว่าบริเวณผิวด้านใน ดังนั้น $R_{ac,T}$ จึงมีค่ามากกว่า $R_{dc,T}$ ลักษณะการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดนี้เรียกว่า “สกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect)” ส่วนตัวประกอบที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่า เมื่อเกิดสกินเอฟเฟกต์แล้วค่า $R_{ac,T}$ จะมีค่าสูงกว่า $R_{dc,T}$ (ของสายตีเกลียวชนิดเดียวกัน) มากน้อยเพียงใด เรียกว่า “ตัวประกอบสกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect Factor)” ซึ่งหาได้จากสมการ

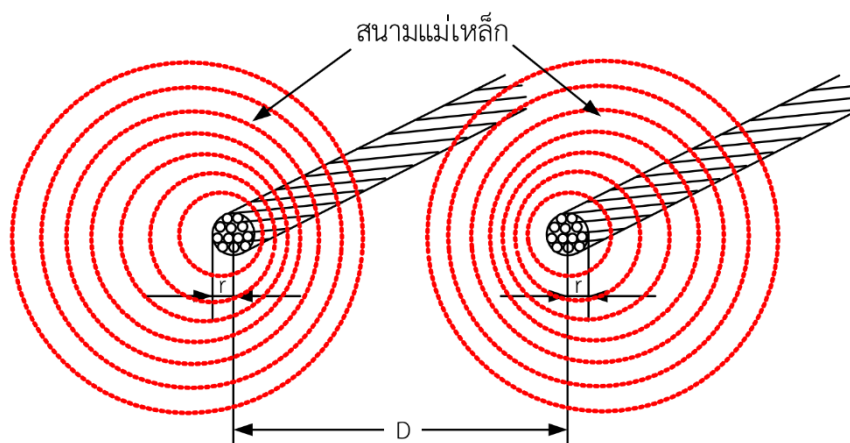
$$\text{Skin effect factor} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad (2-16)$$

ผลจากการนำสายมาตีเกลียว โดยถ้าใช้สายตัวนำตีเกลียว 3 เส้น (Strand) จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจากเดิม หากใช้สายตัวนำตีเกลียวมากกว่า 3 เส้น จะมีค่าของความต้านทานเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของจำนวนที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนสายที่นำมาตีเกลียว

ผลกระทบของอุณหภูมิ (Effect of Temperature) จากทฤษฎีวงจรไฟฟ้าทำให้ทราบว่า เมื่อสายตัวนำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความต้านทานของสายตัวนำจะมีค่าเพิ่มตาม หลักการดังกล่าวนำมาใช้กับสายส่ง (สายตัวนำ) ซึ่งใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับได้เช่นกัน

2.3.2 ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Inductance: L)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสายส่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field) เกิดขึ้นรอบๆ สายส่ง ซึ่งสนามแม่เหล็ก จะส่งผลให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นในสายส่ง โดยค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง จะใช้การคำนวณจากการหาค่าความเหนี่ยวนำจากสายตัวนำเส้นเดียว จากนั้นจึงนำหลักการแบบเดียวกันไปหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง 1 เฟส และสายส่ง 3 เฟส

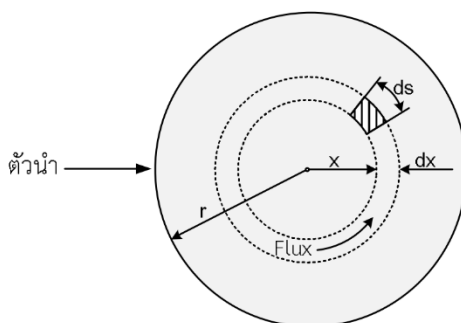


ภาพประกอบที่ 2-6 การเกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ในสายส่ง

ความเหนี่ยวนำของสายตัวนำแต่ละเส้นเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็ก 2 ส่วน คือ ฟลักซ์แม่เหล็กภายในสายตัวนำ (Inductance Component) และฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ (Internal Flux)

(1) ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กภายในสายตัวนำ (Inductance Component Due to Internal Flux : L_{int})

การหาค่า L_{int} ทำได้โดยการกำหนดเส้นรอบวงย่อย (d_x) ภายในสายตัวนำเพื่อใช้ในการพิจารณาในที่นี้คือ บริเวณเส้นประแสดงในภาพประกอบที่ 2-7 จากนั้นจึงหาพลังงานของสนามแม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวซึ่งจะทำให้ได้ค่า L_{int} ของสายตัวนำ



ภาพประกอบที่ 2-7 การหาค่าพลังงานของสนามแม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ

จากหลักการพื้นฐานพลังงานของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Energy) ที่เกิดขึ้นภายในสายตัวนำ หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (2-17)$$

เมื่อค่าซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability : μ) มีค่าคงที่คือ $\mu = \mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ Wb/m}^2$ และ เมื่อแทน H เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) พลังงานของสนามแม่เหล็ก (W) รอบบริเวณเส้นประจะมีค่าตามสมการดังต่อไปนี้

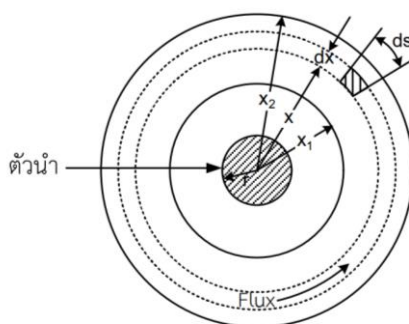
$$W = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \quad (2-18)$$

โดยเมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 2-17 จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$L_{int} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad (2-19)$$

(2) ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ (Inductance Component Due to External Flug : L_{ext})

ในภาพประกอบที่ 2-8 การหาค่า L_{ext} ทำได้โดยการกำหนดรัศมีภายนอกสายตัวนำ เพื่อใช้ในการคำนวณซึ่งมีค่าเท่ากับ x_1 และ x_2 เมื่อรู้ค่าข้างต้นสามารถคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux Linkage : λ) ที่บริเวณดังกล่าวได้ จะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ L_{ext} ของสายตัวนำได้



ภาพประกอบที่ 2-8 ระยะระหว่างตัวนำและฉนวนบนสายไฟฟ้า

จากหลักการพื้นฐาน ฟลักซ์แม่เหล็กคล้องสายที่บริเวณรอบสายตัวนำหาได้จาก

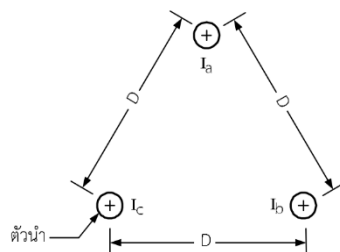
$$\lambda = LI \quad (2-20)$$

λ	Flux Linkage
L	ค่าความเหนี่ยวนำ
I	ค่ากระแส

โดยเมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการ 2-17 จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำภายนอกสาย L_{ext} ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$L_{ext} = 2 \times 10^{-7} \log \left(\frac{x_2}{x_1} \right) \quad (2-21)$$

ความเหนี่ยวนำของสายส่ง 3 เฟสที่มีระยะห่างเท่ากัน (Three Phase Inductance of Deltas pacing) ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบด้วยสายตัวนำ 3 เส้น แต่ละเส้นมีรัศมีเท่ากับ r วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และมีระยะห่าง D ดังภาพประกอบที่ 2-9 เรียกการวางตัวของสายตัวนำ หรือเรียกสายส่งที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า การวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า



ภาพประกอบที่ 2-9 ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

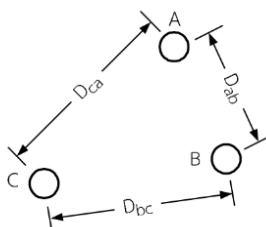
ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำทั้ง 3 เฟสอยู่สภาวะสมดุล ($I_a + I_b + I_c = 0$) การหาค่าความเหนี่ยวนำรัศมีเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean radius: *GMR*)” ของสายตัวนำที่เกลียวที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม โดยมีชื่อเรียกว่า ระยะห่างเฉลี่ยภายในตัวเอง (Self - Geometric Mean Distance หรือ Self GMD : D_s) ซึ่ง Self $GMD = D_s = GMR$

$$GMR = 0.7788r \quad (2-22)$$

ในสายตัวนำแต่ละเส้นหรือค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสได้โดยใช้สมการ 2-20 และสมการ 2-21 ดังนี้

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{GMR} \right) \quad (2-23)$$

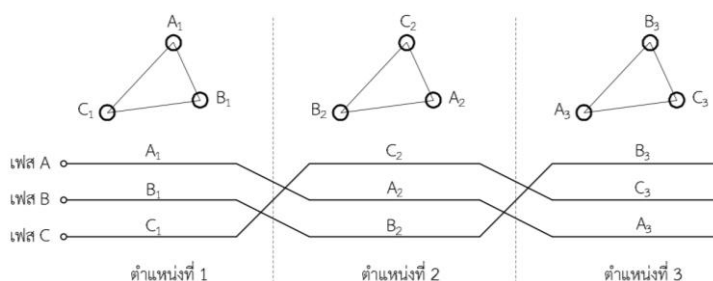
ค่าความเหนี่ยวนำในระบบสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (Three Phase Inductance of Asymmetrical Spacing) โครงสร้างของสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะที่ใช้ปฏิบัติงานจริง ตัวนำสายส่งทั้ง 3 เฟสจะมีระยะห่างไม่เท่ากัน ทำให้วิเคราะห์ได้ยากขึ้น



ภาพประกอบที่ 2-10 ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

แม้ว่ากระแสที่ไหลในสายตัวนำจะอยู่ในสภาวะสมดุล แต่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายตัวนำจะไม่สมดุลตามค่ากระแส เนื่องจากพารามิเตอร์มีค่าไม่เท่ากัน เพราะ GMD ของสายตัวนำ

ตลอดช่วงความยาวสายมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้หาค่าความเหนี่ยวนำทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับ GMD จึงต้องทำการสลับตำแหน่งของสายตัวนำ (Transpose Lines) ทุกช่วง 1 ใน 3 ของความยาวทั้งหมดดังภาพประกอบที่ 2-11 เพื่อให้สายตัวนำแต่ละช่วงมีระยะห่างเฉลี่ยเท่ากัน



ภาพประกอบที่ 2-11 ระยะการวางตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรแบบสลับสายไฟ

การวางตัวนำของสายตัวนำในภาพประกอบที่ 2-11 จะมีระยะการวางแตกต่างกัน 3 ระยะ คือ D_{ab} , D_{bc} และ D_{ca} ดังนั้นเพื่อให้ได้ระยะห่างเทียบเคียง (Equivalent Spacing : D_{eq}) จึงต้องแทนค่าระยะทั้ง 3 ลงในสมการ ซึ่งแสดงได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \quad (2-24)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2-24 ลงในสมการที่ 2-23 จะได้

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_m}{GMR} \right) \quad (2-25)$$

2.3.3 ความจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Capacitance: C)

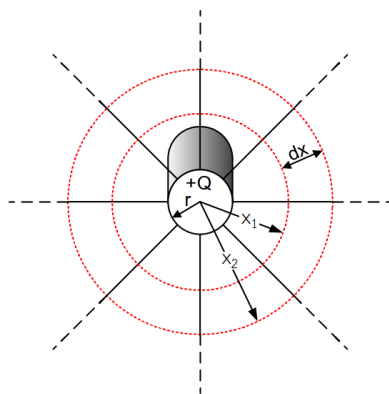
การไหลของกระแสไฟฟ้าบนสายตัวนำ จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนตัวนำที่วางขนานกันตลอดความยาวของสายส่ง จึงมีสนามไฟฟ้า (Electrical Field) ระหว่างสายตัวนำที่วางขนานกัน โดยมีอากาศเป็นไดอิเล็กทริก จึงเปรียบได้ว่าสายส่งและอากาศเป็นเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ C โดยมีสายตัวนำเป็นพื้นที่เก็บประจุ ถ้าระยะทางของการส่งกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 80 km ผลของค่าความจุไฟฟ้าจะมีน้อยมาก ซึ่งปกติแล้วจะไม่นำมาคิดในการคำนวณค่าทางไฟฟ้า แต่ถ้าระยะทางมากกว่า 80 km ค่าความจุไฟฟ้าจะมีมากขึ้น ทำให้เกิดกระแสซาร์จ

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวนำ จะเกิดประจุไฟฟ้าบวก (กระแสไฟฟ้าไหลเข้า) และส่งสนามไฟฟ้าไปยังสายตัวนำ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ (กระแสไฟฟ้าไหลออก) เปรียบเหมือนกับสายตัวนำทั้งสองได้รับการอัดประจุไฟฟ้าจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (หรือแรงดันระหว่างสายตัวนำ) จึงทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2-26)$$

Q	ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
V	แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย
C	ความเก็บประจุ

ถ้าต้องการหาค่าคาปาซิเตอร์ของสายส่งจำเป็นต้องหาค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ซึ่งจะมาพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำเดี่ยว ดังภาพประกอบที่ 2-12



ภาพประกอบที่ 2-12 ระยะความจอรอบตัวนำของสายส่งไฟฟ้า

ถ้า E เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) รอบสายตัวนำ และ D_x เป็นระยะความหนาของวงกลมที่พิจารณา หาค่าแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ ระหว่างจุด 2 จุด บริเวณรอบสายตัวนำเดี่ยวด้วยวิธีการอินทิเกรต ดังนี้

$$V = \int E dx \quad (2-27)$$

จากกฎของเกาส์จะได้สมการของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electrical Flux : D_e) ที่ล้อมรอบสายในรัศมี X เมตร และ ϵ_0 คือ สภาพยอม (Permittivity) ของอากาศ

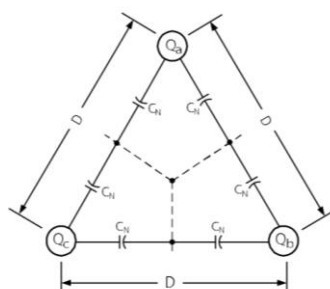
$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x} \quad (2-28)$$

เมื่อแทนค่า E ลงในสมการ 2-26 แล้ว ทำการอินทิเกรตสมการตั้งแต่ X_1 ไปจนถึงระยะ X_2 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ดังนี้

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{X_1}{X_2}\right) \quad (2-29)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างเท่ากัน (Three Phase Capacitance of Delta Spacing)

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ของสายส่ง 3 เฟสที่มีรัศมีเท่ากับ r และวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าดังภาพประกอบที่ 2-13 ทำได้โดยใช้สมการที่ 2-27 หาค่าแรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำที่ละเส้น โดยปกติของสายไฟฟ้าที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าจะถือว่าประจุไฟฟ้าของสายตัวนำทั้ง 3 อยู่ในสภาวะสมดุลเป็นผลจากการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กจึงทำให้ $Q_a = Q_b = Q_c = 0$ การหาค่าแรงดันไฟฟ้าสายถึงนิวทรัลของสายตัวนำ V_{an} ใช้ทฤษฎีการวางซ้อนมาใช้ในการคำนวณ โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2-30 โดยค่าเก็บประจุในสายสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2-31 ซึ่งในสายส่งที่วางตำแหน่งตามสามเหลี่ยมด้านเท่าค่าเก็บประจุจะมีค่าเท่ากันทั้งสามเฟสเนื่องจากใช้ระยะที่เท่ากันนำมาคำนวณ



ภาพประกอบที่ 2-13 ระยะความจระหว่งตัวนำบนสายส่งไฟฟ้า

โดยที่ใช้สมการที่ 2-30 เพื่อหาค่าแรงดัน

$$V_{an} = \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (2-30)$$

โดยที่ใช้สมการที่ 2-31 เพื่อหาค่าเก็บประจุ

$$C_{an} = \frac{0.0241}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2-31)$$

ซึ่งในสายส่งที่มีระยะเท่ากันจะได้

$$C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = C_n \quad (2-32)$$

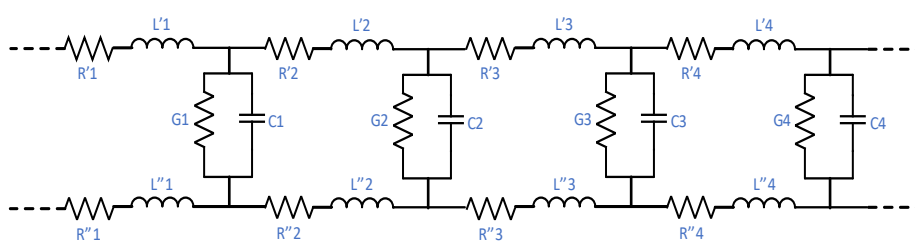
2.4 ความเร็วเฟสในสายส่ง (Phase Velocity in Transmission Line) [4] คือ ความเร็วการแพร่กระจายพิวคลิ้นสมดุลของคลื่นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) ไปตามแนวความยาวของสายส่งซึ่งมีปัจจัยมาจากความถี่และคาบเวลา เมื่อประจุไฟฟ้าถูกทำให้เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสของการเคลื่อนที่ของประจุ และสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการมีอยู่ของประจุ จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจำกัด ความเร็วนี้ในสายส่งเดินอากาศจะมีค่าประมาณความเร็วของแสง (Speed of Light) หรือประมาณ 2.9979×10^8 m/s

โดยในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง การส่งกระแสไฟฟ้าไปยังโหลดจะมีตัวนำคู่ขนานสองตัวที่เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับโหลด โดยแรงดันไฟฟ้าที่สร้างด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งกำลังไฟฟ้าไปยังปลายสายถึงโหลดไม่ได้ในทันที แต่จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นด้วยความเร็วจำกัดและถึงโหลดค่อนข้างช้า สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยการกระทำของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งตัวนำจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายที่สุดในแง่ของการเหนี่ยวนำแบบกระจายและความจุของสายไฟ ความเร็วของการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับตัวกลางที่อยู่รอบๆ สายไฟ โดยมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอยู่ด้วย

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2-33)$$

v	2.9979×10^8 m/s
f	ความถี่ในการขับแหล่งจ่าย
λ	ความยาวคลื่นใน 1 ช่วงเวลา

โดยสายส่งเป็นโครงข่ายวงจรแบบกระจายที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (Resistance) ที่ต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุ (Capacitance) ที่ต่อขนานเป็นกลุ่มไปตามความยาวทั้งหมดของสาย ตั้งแต่ต้นสาย ไปยังปลายสาย นอกจากนั้นแล้วยังมีตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่กระจายอยู่ตลอดความยาวรวมอยู่ ด้วย ความเหนี่ยวนำนี้เกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่จะต้านการทำให้เกิดหรือเปลี่ยนแปลง สนามแม่เหล็กรอบๆ สายไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด และช่องว่างระหว่างสายไฟฟ้าเป็นอากาศว่างจะถือว่าเป็นฉนวนจริงไม่ได้ เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเกิดการรั่วไหลกระจายไปตลอดความยาวสายไฟฟ้า การรั่วไหลนี้จึงถือว่ามีตัวนำมาต่อระหว่างสายไฟฟ้าทั้งสอง



ภาพประกอบที่ 2-14 ตัวแบบแสดงการกระจายของความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความจุ และการรั่วไหลในแต่ละช่วงตลอดความยาวสายส่ง

$R'1...R'n$, $R''1...R''n$, $L'1...L'n$, $L''1...L''n$, $G1...Gn$ และ $C1...Cn$ กระจายอยู่สม่ำเสมอตลอดความยาวของสายส่งจึงถูกเรียกว่าการกระจายตามความยาวของค่าพารามิเตอร์ (Distributed Parameters) โดยบทบาทของส่วนประกอบต่างๆ

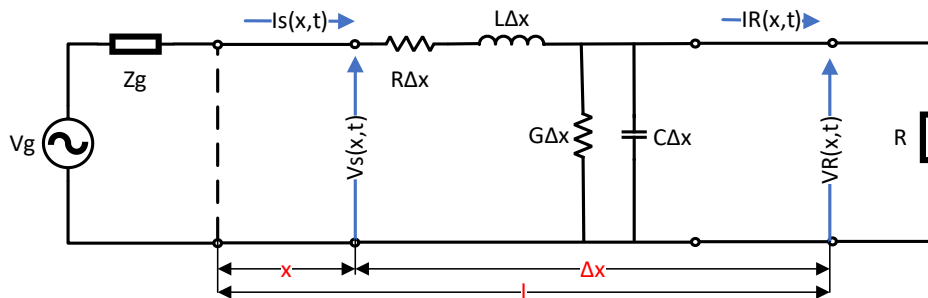
พารามิเตอร์ทั้งสิ้น L , C , R และ G ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สร้างสายเคเบิลหรือพิดไลน์ ทั้งสี่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ R และ G มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นสำหรับความถี่ที่สูงขึ้น และ L และ C มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยสมการพารามิเตอร์ของสายส่ง

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2-34)$$

Z_0	อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย
L'	ค่าความเหนี่ยวนำ H/m
C'	ค่าเก็บประจุ F/m

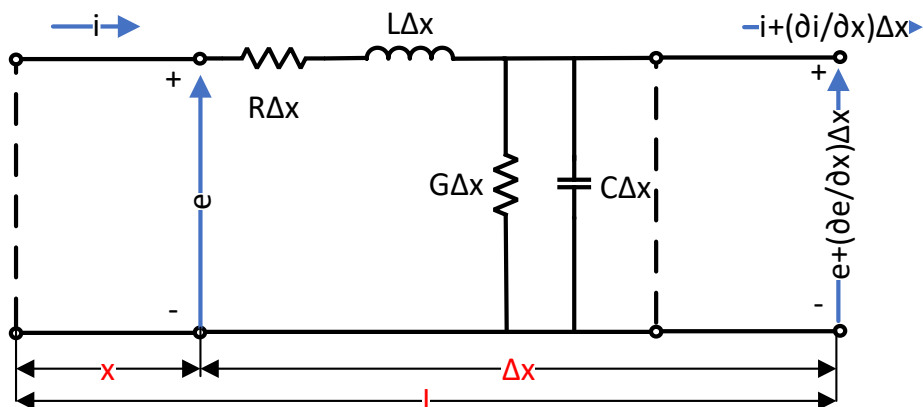
ปกติแล้วสายส่งที่ใช้งานจะเชื่อมต่ออยู่ระหว่าง 2 อุปกรณ์ คือ เครื่องกำเนิดซึ่งเป็นตัวจ่ายพลังงานที่ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งของสายส่งจะต่อเข้ากับโหลด เราจะเห็นภาพสายการส่งพื้นฐาน

ในลักษณะที่แสดงโดยแผนภาพ 2-15 โดย V_g เป็นแรงดันด้านแหล่งจ่าย และ R เป็นโหลดอ้างอิงตามลำดับ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นระยะ l กิโลเมตร ไปยังจุดสิ้นสุดการส่งและรับ โดยอิมพีแดนซ์ปลายสายจะเป็นค่าของความต้านทานของโหลด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าจะมีอิมพีแดนซ์ภายใน Z_g โดยความต้านทานของสายส่ง $R\Delta x$ มีค่าเป็น Ω/km ค่าความเหนี่ยวนำในสายส่งเป็น $L\Delta x$ มีค่าเป็น H/km และค่าความจุที่เกิดขึ้นระหว่างสาย $C\Delta x$ มีค่าเป็น F/km



ภาพประกอบที่ 2-15 รูปแบบความสัมพันธ์ของระยะทางและพารามิเตอร์บนสายส่งตัวนำ

เมื่อทำการพิจารณาโดยทำการแบ่งส่วนของสายส่งออกเป็นส่วนเล็กๆ โดยพิจารณาแรงดันและกระแสแบบทันทีทันใด โดยค่าความเหนี่ยวนำของระยะส่วนนั้นคือ $L\Delta x$ ค่าความต้านทานของระยะส่วนนั้นคือ $R\Delta x$ ค่าความเก็บประจุของระยะส่วนนั้นคือ $C\Delta x$ และค่าความนำกระแสไฟฟ้าของระยะส่วนนั้นคือ $G\Delta x$ ดังนั้นการคำนวณความแตกต่างระหว่างแรงดันวงจรต่อวงจรของสองจุด (Line to Line) คือ $(\partial e/\partial x)\Delta x$ โดยระบุได้ดังรูปต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 2-16 รูปแบบความสัมพันธ์ของระยะทางต่อแรงดันและกระแสบนสายส่งไฟฟ้า

การหาค่าความเร็วเฟสในระบบสายส่งจะต้องใช้ความสัมพันธ์ของสองตัวแปรคือระยะทาง (x) และเวลา (t) แรงดันวงจรต่อวงจรที่ได้จากการแบ่งสายส่ง คือ $(\partial e/\partial x)\Delta x$ โดยความสัมพันธ์เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน $R\Delta x$ และเปลี่ยนอัตรา $\partial i/\partial t$ ในช่วงที่มีความเหนี่ยวนำ $L\Delta x$ โดยสมการความสัมพันธ์สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$-\frac{\partial e}{\partial x}\Delta x = (R\Delta x)i + (L\Delta x)\frac{\partial i}{\partial t} \quad (2-35)$$

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = (R)i + (L)\frac{\partial i}{\partial t}$$

กระแสที่เกิดจากแรงดันที่กระทำต่อตัวเก็บประจุที่ต่อขนานผ่านตัวนำกระแสไฟฟ้า $G\Delta x$ และตัวเก็บประจุ $C\Delta x$ คำนวณได้จากค่าแรงดัน $\partial e/\partial t$ โดยสมการความสัมพันธ์สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$-\frac{\partial i}{\partial x}\Delta x = (G\Delta x)i + (C\Delta x)\frac{\partial e}{\partial t} \quad (2-36)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = (G)i + (C)\frac{\partial e}{\partial t}$$

คลื่นจรบนสายส่งที่ไม่มีความสูญเสีย การคำนวณความเร็วคลื่นจรบนสายส่งที่ไม่มีความสูญเสีย จะได้ว่า R และ G เท่ากับศูนย์ การประมาณค่าการสะท้อนจะทำได้ดีเมื่อค่าพลังงานในสายมีค่าน้อยทำให้การคำนวณการแพร่ของคลื่นง่ายขึ้น เมื่อใช้การคำนวณแบบไม่มีความสูญเสีย โดยค่าของแรงดันและกระแสเมื่อคำนวณแบบไม่มีความสูญเสียจะมีค่าดังนี้

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = L\frac{\partial i}{\partial t} \quad (2-37)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C\frac{\partial e}{\partial t} \quad (2-38)$$

เราสามารถประมาณการระหว่างกระแส (i) ระหว่างสองสมการ โดยการเทียบสมการแรงดันกับระยะทาง (x) และสมการกระแสกับเวลา (t) จึงได้สมการความแตกต่างของแรงดัน (e) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (2-39)$$

ในขณะเดียวกันสมการความแตกต่างของกระแส (i) จะมีค่าดังนี้

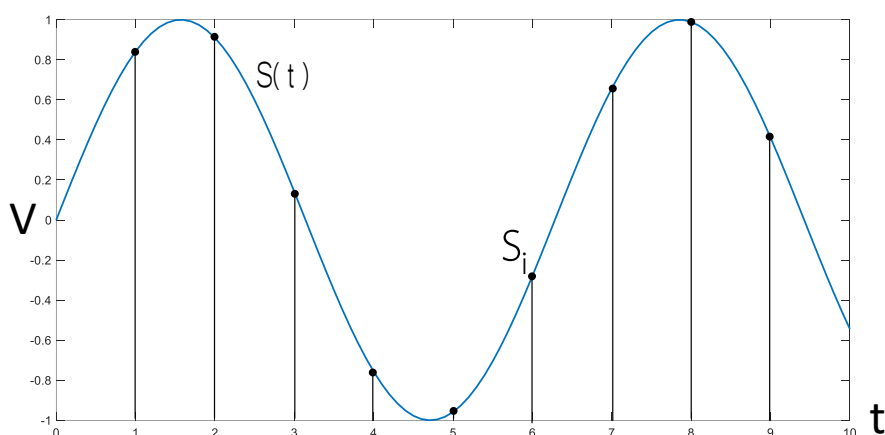
$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2-40)$$

สมการ 2-39 และ 2-40 เป็นรูปแบบมิติเดียวของสมการคลื่นซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหาที่ทราบกันดีว่าประกอบด้วยคลื่นที่สามารถเดินทางในทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือขนาดที่ความเร็ว

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-40)$$

2.5 อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) [12]

ในการประมวลผลสัญญาณ การสุ่มตัวอย่างคือการกำหนดจุดในสัญญาณเวลาต่อเนื่องให้เป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเปรียบเสมือนการแปลงคลื่นเป็นลำดับโดยใช้ค่าของสัญญาณที่จุดในเวลาหรือช่องว่างไปเรื่อยๆจนถึงเวลาที่กำหนด แสดงได้ตามภาพประกอบที่ 2-17



ภาพประกอบที่ 2-17 ตัวอย่างการสุ่มสัญญาณในรูปแบบของคลื่นสัญญาณไซน์

การแสดงตัวอย่างสัญญาณ สัญญาณต่อเนื่อง $S(t)$ จะแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ต่อเนื่อง S_i จะแสดงด้วยเส้นแนวตั้งสีดำ โดยการเก็บสัญญาณต่อเนื่องจะทำงานโดยการ

เก็บตัวอย่างทุกๆ ค่าทันที ต่อเนื่องทุกๆ t วินาที ในขณะที่การเก็บสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจะทำการสุ่มสัญญาณตามเวลาที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ โดยการสุ่มตัวอย่างสามารถทำได้สำหรับฟังก์ชันที่แตกต่างกันในด้านของขนาด ต่อ เวลา หรือมิติอื่นๆ ซึ่งได้ผลลัพธ์ในรูปสองมิติ

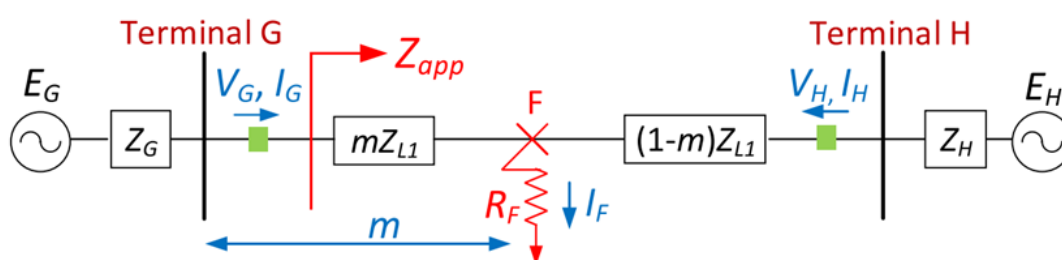
ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างหรืออัตราการสุ่มตัวอย่าง f_s คือจำนวนตัวอย่างเฉลี่ยที่ได้รับในหนึ่งวินาที ดังนั้น $f_s = \frac{1}{t}$ หน่วยของ f_s คือ เฮิรตซ์ (Hz) เช่น 50 kHz คือ 50,000 ตัวอย่างต่อวินาที

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ สัญญาณต่อเนื่องจะถูกสุ่มตัวอย่าง โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีข้อจำกัดตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ประมวลผลภายในโดยที่การทำงานของ ADC แปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เทียบต่อเวลา ซึ่งจะมีผลต่อการหาปริมาณของอินพุต ดังนั้นจึงทำให้มีข้อผิดพลาดและสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น นอกจากนี้การแปลงสัญญาณอย่างต่อเนื่องของ ADC จะทำการแปลงโดยสุ่มตัวอย่างของสัญญาณนำเข้า (Input) ที่อาจจะถูกจำกัดด้วยแบนด์วิธของตัวอุปกรณ์ จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของสัญญาณอินพุต

2.6 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์ [5]

อิมพีแดนซ์ เป็นการวัดความต้านทานรวมของวงจรไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายกระแสและแรงดันเข้าสู่วงจรโดยค่าอิมพีแดนซ์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของค่าตัวต้านทาน (Resistance) [6] ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) ซึ่งปริมาณเหล่านี้จะเกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าซึ่งสัญลักษณ์สำหรับอิมพีแดนซ์ปกติจะเป็น Z โดยขนาดของอิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้าจะคำนวณจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดของแรงดันต่อแอมพลิจูดของกระแส ซึ่งจะถูกวัดมาจากอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า โดยอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่ากระแส ความผิดพร่อง ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถคำนวณโดยวิธีแบบปลายด้านเดียว และแบบสองด้าน

2.6.1 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบปลายเดียว



ภาพประกอบที่ 2-18 แผนผังวงจรเชิงเส้นของวงจรแบบสองแหล่งจ่ายคำนวณแบบปลายเดียว

m	ระยะทางของจุดต่อร่วมถึงจุดที่เกิดความผิดปกติ (pu)
R_F	ความต้านทานของจุดที่เกิดความผิดปกติ (Ω)
I_F	กระแสที่วัดได้ของจุดที่เกิดความผิดปกติ (kA)
Z_{app}	ความต้านทานจากจุดต่อร่วมถึงจุดที่เกิดความผิดปกติ (Ω)
E_G, E_H	แหล่งจ่ายแรงดันที่จุดต่อร่วม G และ H (kV)
Z_G, Z_H	อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายหลังจุดต่อร่วม G และ H (Ω)
I_G, I_H	กระแสระหว่างจุดผิดปกติและจุดต่อร่วม G และ H (kA)
V_G, V_H	แรงดันระหว่างจุดผิดปกติและจุดต่อร่วม G และ H (kV)
I_{G0}, I_{G1}, I_{G2}	ลำดับซีแควนซ์ของกระแสความผิดปกติที่จุดต่อร่วม G (kA)
Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2}	ลำดับซีแควนซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรที่จุดต่อร่วม G และ H (Ω)

ตารางที่ 2-1 การคำนวณแรงดัน และกระแสสำหรับสมการระบุตำแหน่ง

Fault Type	V_G	I_G	Impedance
A-Ground	V_A	$I_A + kI_0$	$\frac{V_A}{I_A + kI_0}$
B-Ground	V_B	$I_B + kI_0$	$\frac{V_B}{I_B + kI_0}$
C-Ground	V_C	$I_C + kI_0$	$\frac{V_C}{I_C + kI_0}$
AB, AB-ground	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$	$\frac{V_A - V_B}{I_A - I_B}$
BC, BC-ground	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$	$\frac{V_B - V_C}{I_B - I_C}$
CA, CA-ground	$I_C - I_A$ $V_C - V_A$	$I_C - I_A$	$\frac{V_C - V_A}{I_C - I_A}$
A-B-C	$V_A - V_B, V_B - V_C,$ $V_C - V_A$	$I_A - I_B, I_B - I_C,$	
$k = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}$			

I_{AF}, I_{BF}, I_{CF}	กระแสความผิดปกติที่เฟส A, B, และ C ที่จุดต่อร่วม G (kA)
V_{AF}, V_{BF}, V_{CF}	แรงดันความผิดปกติที่เฟส A, B, และ C ที่จุดต่อร่วม G (kV)

$\Delta I_G, \Delta I_H$	กระแสความผิดพลาดโดยตรง (Pure fault) ที่จุดต่อร่วม G และ H (kA)
I_{G0}, I_{G1}, I_{G2}	ลำดับกระแสความผิดพลาดที่จุดต่อร่วม G (kA)
Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2}	ลำดับอิมพีแดนซ์ของวงจรที่จุดต่อร่วม G และ H (Ω)

การคำนวณแรงดันในวงจร ภาพประกอบที่ 2-18 โดยใช้แรงดันและกระแสที่จุดต่อร่วม G โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ โดยแรงดันที่จุดต่อร่วมจะคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$V_G = mZ_{L1}I_G + R_F I_F \quad (2-41)$$

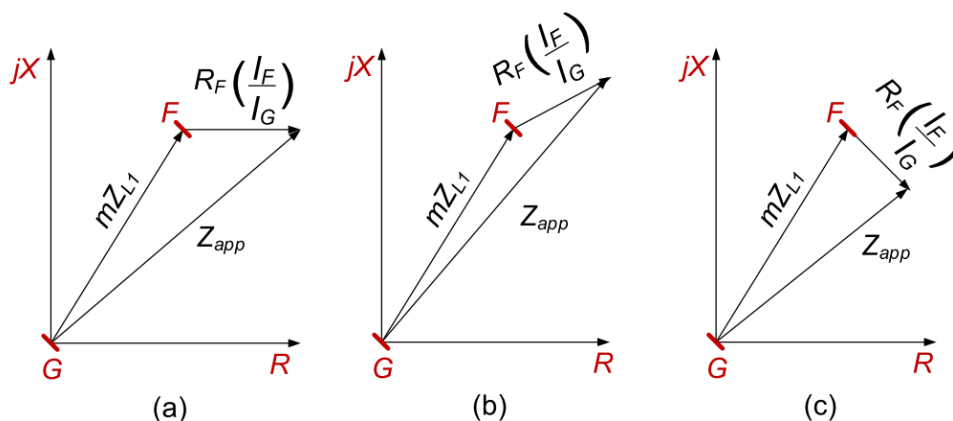
โดยแรงดันและกระแสที่จุดต่อร่วมจะขึ้นอยู่กับชนิดของความผิดพลาดและสามารถตรวจสอบได้ตามตารางที่ 2-1 และแบ่งชนิดได้ตามกระแสของความผิดพลาด โดยที่ความต้านทานที่วัดตรงจุดต่อร่วมจะสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Z_{app} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_{L1} + R_F \frac{I_F}{I_G} \quad (2-42)$$

ซึ่งสมการที่ 2-42 เป็นสมการพื้นฐานที่ใช้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณความผิดพลาดในวงจรไฟฟ้า ซึ่งตัวแปร I_F , R_F , และ m เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถรู้ค่าได้เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า จึงมีการคิดค้นอัลกอริทึมต่างๆ ที่ใช้ระบุตำแหน่งของความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า 3 วิธี ดังนี้

(1) วิธีคำนวณรีแอกแตนซ์อย่างง่าย (Simple Reactance Method) [7]

การคำนวณรีแอกแตนซ์อย่างง่ายเป็นการใช้ข้อดีจากความต้านทานที่จุดของความผิดพลาดนั้น ซึ่งเป็นความต้านทานตามธรรมชาติ ซึ่งเราพิจารณาตามมุมเฟสของกระแส I_G และ I_F



ภาพประกอบที่ 2-19 แผนภาพเฟสเซอร์ ของกระแสต่อแรงดัน

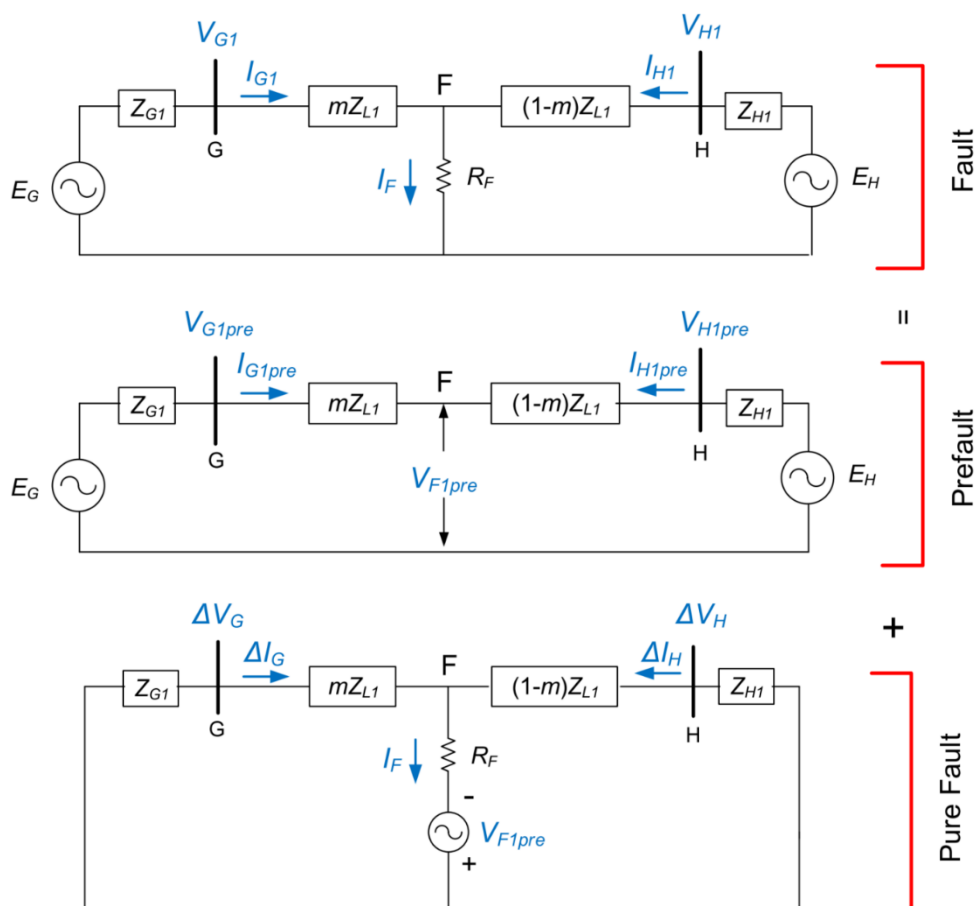
ซึ่งถ้าหากกระแส I_G และ I_F ทำมุมเฟสเท่ากัน ค่าที่ได้ตามสมการที่ 2-41 จะเป็นจำนวนจริง ซึ่งเราจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพเท่านั้น ตามสมการ 2-42

$$m = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_G}{I_G}\right)}{\text{imag}(Z_{L1})} \quad (2-43)$$

โดยที่ Z_{L1} เป็นส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อรวมที่ทำกรวดกับจุดที่เกิดความผิดปกติ ในวงจรไฟฟ้า

(2) วิธีคำนวณதாகากิ (Takaki method) [9]

ในส่วนการคำนวณของวิธีதாகากิจะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของการคำนวณรีแอกแตนซ์อย่างง่าย โดยจะคิดคำนวณสองช่วงเวลา คือ เวลาก่อนการเกิดความผิดปกติ และเวลาที่เกิดความผิดปกติไปแล้วนำมารวมกัน โดยจะมีค่า ΔI_G เพิ่มเข้ามาในสมการ



ภาพประกอบที่ 2- 20 วงจรการคำนวณของทฤษฎีชดเชยโหลด (Takagi Method)

โดยค่าตัวแปร ΔI_G สามารถคำนวณได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-2 การคำนวณกระแสก่อนและหลังเกิดความผิดปกติ

Fault Type	V_G	I_G	ΔI_G
A-Ground	V_A	$I_A + kI_0$	$I_{AF} - I_{Apre}$
B-Ground	V_B	$I_B + kI_0$	$I_{BF} - I_{Apre}$
C-Ground	V_C	$I_C + kI_0$	$I_{CF} - I_{Apre}$
AB, AB-ground	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$	$(I_{AF} - I_{Apre}) - (I_{BF} - I_{Apre})$
BC, BC-ground	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$	$(I_{BF} - I_{Bpre}) - (I_{CF} - I_{Cpre})$
CA, CA-ground	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$	$(I_{CF} - I_{Cpre}) - (I_{AF} - I_{Apre})$
A-B-C	$V_A - V_B,$ $V_B - V_C,$ $V_C - V_A$	$I_A - I_B,$ $I_B - I_C,$ $I_C - I_A$	$(I_{AF} - I_{Apre}) - (I_{BF} - I_{Apre}),$ $(I_{BF} - I_{Bpre}) - (I_{CF} - I_{Cpre}),$ $(I_{CF} - I_{Cpre}) - (I_{AF} - I_{Apre})$
$k = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}$			

I_{AF}, I_{BF}, I_{CF}	กระแสความผิดปกติที่เฟส A, B, และ C ที่จุดต่อร่วม G (kA)
V_{AF}, V_{BF}, V_{CF}	แรงดันความผิดปกติที่เฟส A, B, และ C ที่จุดต่อร่วม G (kV)
$\Delta I_G, \Delta I_H$	กระแสความผิดปกติโดยตรง (Pure fault) ที่จุดต่อร่วม G และ H (kA)
$I_{Apre}, I_{Bpre}, I_{Cpre}$	กระแสก่อนการเกิดความผิดปกติที่เฟส A, B, และ C ที่จุดต่อร่วม G (kA)
I_{G0}, I_{G1}, I_{G2}	ลำดับกระแสความผิดปกติที่จุดต่อร่วม G (kA)
Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2}	ลำดับความต้านทานของวงจรที่จุดต่อร่วม G และ H (Ω)

โดยการทำให้แบบนี้เพื่อลดความผิดพลาดจากผลของความต้านทานของโหลดที่เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าโดยการหากระแสความผิดปกติจะได้ตามสมการดังนี้

$$I_F = \left(\frac{Z_{G1} + Z_{L1} + Z_{H1}}{(1-m)Z_{L1} + Z_{H1}} \right) \Delta I_G \quad (2-44)$$

เมื่อการเกิดความผิดปกติเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างช่วงเกิดความผิดปกติและขณะเกิดความผิดปกติจึงต้องคูณด้วย ΔI_G ในสมการ ที่ 2-45 ทั้งสองด้าน

$$V_G \times \Delta I_G^* = m Z_{L1} I_G \Delta I_G^* + R_F I_F \Delta I_G^* \quad (2-45)$$

พิจารณาด้วยเฟสเซอร์การคำนวณระยะทางพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพโดยมีสมการของการหาระยะทางดังนี้

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \times \Delta I_G^*)}{\text{imag}(Z_{L1} \times I_G \times \Delta I_G^*)} \quad (2-46)$$

โดยที่ค่า V_G , I_G , ΔI_G^* สามารถคำนวณได้จากสาเหตุความผิดพลาดตามตารางที่ 2-2 การคำนวณแบบนี้เพื่อเป็นการลดค่าความผิดพลาดของความต้านทานที่เกิดจากโหลด ซึ่งการคำนวณนี้จะผิดพลาดได้หากความต้านทาน R_F ไม่เป็นความต้านทานเดียวกันกับความต้านทานตามสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

(3) วิธีคำนวณปรับปรุงหากากิ (Modified Takaki method) [8] [9]

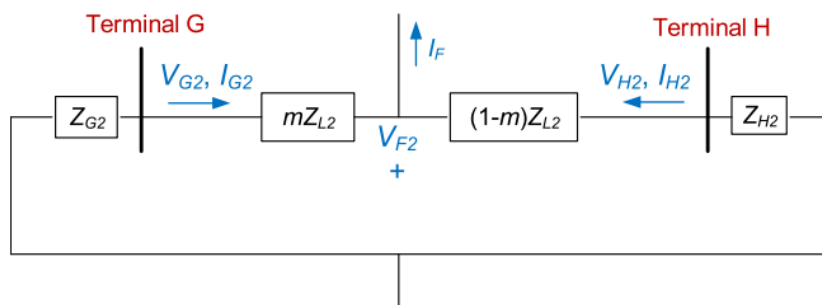
เป็นการปรับปรุงข้อมูลโดยการเปลี่ยนกระแสก่อนเกิดความผิดพลาด ΔI_G^* เป็น $3I_{G0}^*$ (Zero Sequence) เนื่องจากกระแสทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันเพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดที่เกิดจากกระแสผิดพลาดลงดินโดยมีสมการ ดังนี้

$$m = \frac{\text{imag}(V_G \times 3I_{G0}^* \times e^{-j\beta})}{\text{imag}(Z_{L1} \times I_G \times 3I_{G0}^* \times e^{-j\beta})} \quad (2-47)$$

V_G, V_H	แรงดันระหว่างจุดผิดพลาดและจุดต่อร่วม G และ H (kV)
I_{G0}, I_{G1}, I_{G2}	กระแสความผิดพลาดที่จุดต่อร่วม G (kA)
Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2}	อิมพีแดนซ์ของวงจรที่จุดต่อร่วม G และ H (Ω)

2.6.2 ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบสองปลาย [10]

ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบสองปลายจะใช้ข้อมูลรูปคลื่นตรวจจับที่ปลายทั้งสองของสายส่งเพื่อประมาณตำแหน่งของความผิดพลาดในสายส่งไฟฟ้า หลักการระบุตำแหน่งความผิดพลาดจะมีบางวิธีคล้ายกับวิธีการแบบปลายเดียว เช่นการใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสในการประเมินความต้านทาน ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดจากโหลด หรือความต้านทานของการลัดวงจรไม่เท่ากับต้านทานตามสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยข้อมูลตรวจจับจะถูกนำไปประมวลผลผ่านอัลกอริทึมเพื่อความแม่นยำ



ภาพประกอบที่ 2-21 วงจรการคำนวณแบบสองปลาย

(1) วิธีการคำนวณแบบเชื่อมโยงของความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบสองปลาย

การคำนวณแรงดันในวงจรแสดงในภาพประกอบที่ 2-21 โดยใช้แรงดันและกระแสที่จุดต่อร่วม G และ H โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ โดยแรงดันที่จุดต่อร่วมจะคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\text{จุดเชื่อมต่อ G : } V_{F2} = V_{G2} - mZ_{L2}I_{G2} \quad (2-48)$$

$$\text{จุดเชื่อมต่อ H : } V_{F2} = V_{H2} - (m-1)Z_{L2}I_{H2} \quad (2-49)$$

เมื่อคำนวณที่ข้ออื่น แรงดัน V_{F2} จะมีค่าเท่ากัน จึงจับสมการ 2-48 และ 2-49 นำมาเท่ากัน โดยค่าระยะทางของการเกิดความผิดปกติพร้อมจะมีค่าดังนี้

$$m = \frac{V_{G2} - V_{H2} + Z_{L2}I_{H2}}{(I_{G2} + I_{H2})Z_{L2}} \quad (2-50)$$

I_{G0}, I_{G1}, I_{G2} ลำดับกระแสความผิดปกติที่จุดต่อร่วม G (kA)

Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2} ลำดับอิมพีแดนซ์ของวงจรที่จุดต่อร่วม G และ H (Ω)

โดยที่เราสามารถคำนวณระยะทางในระบบสามเฟส โดยแทนค่า Z_{L2} ด้วยลำดับ Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2} (อิมพีแดนซ์ลำดับ Zero, Negative, Positive)

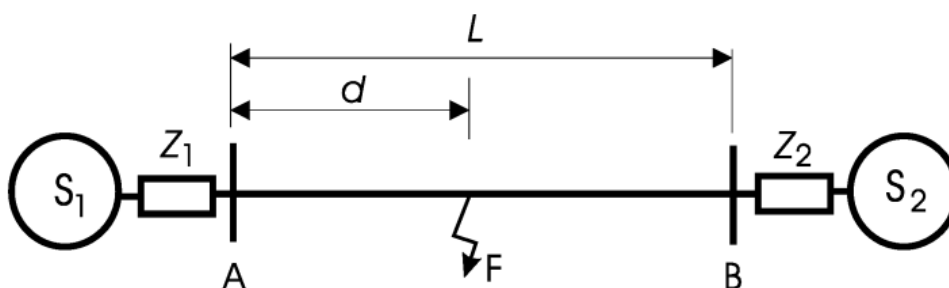
$$m = \frac{V_{G2} - V_{H2} + \left(\frac{I_{H2}}{3}\right)(Z_0 + Z_1 + Z_2)}{\frac{(I_{G2} + I_{H2})}{3}(Z_0 + Z_1 + Z_2)} \quad (2-51)$$

2.7 การระบุตำแหน่ง โดยวิธีคลื่นจร (Traveling Wave) [11] [12]

การระบุตำแหน่งการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า โดยใช้วิธีคลื่นจร เป็นวิธีระบุตำแหน่ง โดยใช้การจับสัญญาณแรงดันและกระแส ในอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) ที่สูงมาก โดยจะเห็นค่าความเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า โดยหลักการระบุตำแหน่ง ความผิดปกติจะใช้การจับเวลาของการเกิดคลื่นจรระหว่างลูกคลื่นในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมา คำนวณหาระยะทางทั้งนี้ ความแม่นยำของการทำนายระยะทางขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณ ซึ่ง วิธีการนี้จะไม่มีความกระทบของความต้านทานในระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง และสามารถ ตรวจสอบความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว

2.7.1 การระบุตำแหน่งความผิดปกติโดยใช้สัญญาณความถี่สูงในสถานะชั่วคราวของแรงดัน (High Frequency Transient Voltage) [9] โดยสัญญาณจะถูกสร้างขึ้นจากการลัดวงจรลงดินใน สายส่ง วิธีการนี้จะทำการวัดแบบปลายด้านเดียว การระบุตำแหน่งจะเกิดจากการคำนวณเวลาของ คลื่นลูกแรกที่มาถึงจุดต่อร่วม

การระบุตำแหน่งของความผิดปกติแบบปลายด้านเดียว ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีคลื่นจร (Traveling Wave) โดยการจับสัญญาณไม่คงตัวขณะเกิดความผิดปกติ และใช้ประโยชน์ จากคลื่น เริ่มต้นของแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันระยะทางไปยังตำแหน่งของความผิดปกติจะถูกกำหนดโดย ระยะเวลาของคลื่นลูกแรก



ภาพประกอบที่ 2-22 แผนภาพเชิงเส้นของวงจรสายส่ง

โดยการคำนวณจะพิจารณาจากความยาวของสายส่ง L และระบบการวัดตั้งอยู่ที่จุดต่อร่วม A กระแสผิดปกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง F ระยะห่างจากจุดต่อร่วม A มีค่า d เพื่อนำวิธีคลื่นจรไปใช้ ในระบบสามเฟส แรงดัน V_A, V_B, V_C จะถูกแปลงแรงดันเป็น V_0, V_α, V_β โดยใช้ทฤษฎีและหลักการ การแปลงของคลาร์ก (Clark Transformation)

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2-52)$$

โดยที่ V_0 เป็นแรงดันในรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) V_α, V_β เป็นแรงดันรูปแบบอากาศ (Aerial Mode) โดยแต่ละรูปแบบ มีความเร็วในการแพร่กระจายที่ต่างกัน ซึ่งแรงดันรูปแบบรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) และ อากาศ (Aerial Mode) จะใช้คลื่นจรในการระบุตำแหน่งความผิดพลาด โดยสมการหาระยะทางของความผิดพลาดจะมีค่าดังนี้

$$d = v_{zero} \times t_1 = v_{alpha} \times t_2 \quad (2-53)$$

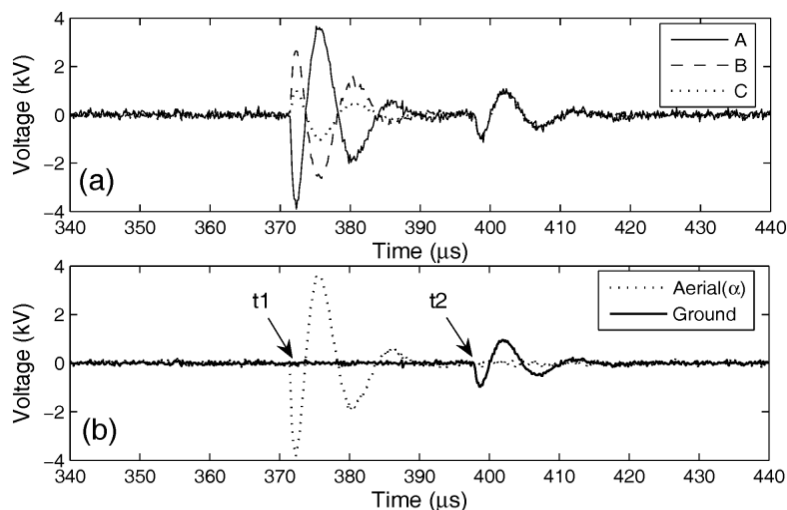
เมื่อ v_{zero}, v_{alpha} เป็นความเร็วในการแพร่กระจายแรงดันในรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) และแรงดันรูปแบบอากาศ (Aerial Mode) ตามลำดับ ในขณะที่ t_1, t_2 คือเวลาที่มาถึงของคลื่นเริ่มต้น ซึ่งค่าความแตกต่างของเวลาระหว่างรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) และรูปแบบอากาศ (Aerial Mode) จะหาได้จากสมการ

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2-54)$$

สุดท้ายใช้การคำนวณจากทั้งสองสมการ ในการประมาณการระบุตำแหน่งของความผิดพลาดได้ตามสมการดังนี้

$$d_E = \left(\frac{v_{zero} v_{alpha}}{v_{alpha} - v_{zero}} \right) \Delta t \quad (2-55)$$

การระบุตำแหน่งความผิดพลาดโดยใช้สัญญาณความถี่สูงในสถานะชั่วคราวของแรงดัน โดยการเก็บค่าพิกัดแรงดันในระบบสามเฟส โดยแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกแสดงถึงแรงดันที่อยู่ในระบบเฟสปกติทำมุม 120 องศา กับส่วนที่สองที่ทำการแปลงแกนให้อยู่ในรูป alpha จากนั้นนำมาหาค่าของเวลา



ภาพประกอบที่ 2-23 กราฟแรงดันเฟส 120 องศา และแรงดัน alpha

โดยแรงดันที่ผ่านการแปลงของคลาร์ก (V_0, V_α, V_β) จะคำนวณมาจากการแปลงสมการด้านแรงดันเฟส (V_A, V_B, V_C) เมื่อคำนวณออกมาจะได้กราฟแรงดันที่แตกต่างจากกราฟเดิม จากสมการข้างต้นเราสามารถคำนวณหาระยะทางโดยแทนค่าความเร็วในรูปแบบพื้นดิน ค่าความเร็วในรูปแบบอากาศ และส่วนต่างเวลา

2.7.2 การระบุตำแหน่งความผิดปกติโดยใช้พื้นฐานของคลื่นจรบนปลายด้านเดียว [13] โดยใช้ กระแส (Traveling Wave Based Transmission Line Using Single Ended Data) การระบุตำแหน่งโดยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการจับเวลาของคลื่นจร ที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยการพัฒนาของเทคโนโลยีในปัจจุบัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำสูง

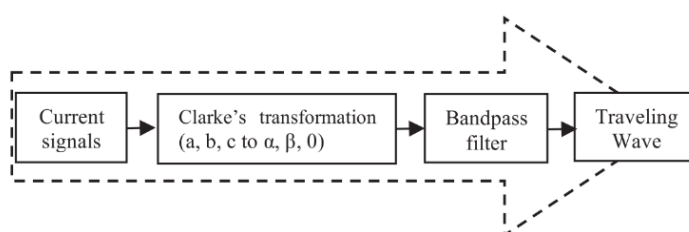
กระบวนการที่นำมาใช้ คือ การใช้ระยะเวลาที่มาถึงของหน้าคลื่นจร สองคลื่นแรกที่ถูกบันทึกโดยเครื่องมือวัด และความเร็วของคลื่นจร รายละเอียดการระบุเวลาของการสะท้อนครั้งที่สอง จะถูกกำหนดโดยหน้าคลื่น สะท้อนลูกที่สาม รายละเอียดของวิธีการต่างๆ อยู่ในส่วนย่อยของการเดินทางและการตรวจจับคลื่นจร การคำนวณระยะเวลาการเดินทางของคลื่นจร และ การระบุกึ่งกลางของตำแหน่งความผิดปกติ

1) การตรวจจับคลื่นจร (Traveling Wave Detection) [14] เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า สัญญาณจะถูกวัดและส่งไปยังอุปกรณ์ตรวจจับเพื่อและกรองคลื่นจรโดยใช้ตัวกรองแบบกำหนดช่วง (Bandpass Filter) ซึ่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจะถูกใช้สำหรับจับคลื่นจร คลื่นจรจะถูกสกัดและแยกออกโดยเฟสของกระแส เป็นกระแสในรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) และกระแสใน

รูปแบบอากาศ (Aerial Mode) โดยอ้างอิง เฟส A ซึ่งใช้หลักการและทฤษฎีของ Clark Transformation

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2-56)$$

ในขณะที่ I_0 เป็นสัญญาณกระแสในรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) I_α , I_β เป็นสัญญาณกระแสในรูปแบบอากาศ (Aerial Mode) สัญญาณกระแสในรูปแบบพื้นดิน (Ground Mode) จะถูกลดทอนมากกว่าสัญญาณกระแสในรูปแบบอากาศ (Aerial Mode) เนื่องจากสัญญาณสูญเสียไปบนพื้นโลก สัญญาณรูปแบบพื้นดิน (I_0) เป็นสัญญาณที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติลงดิน และสัญญาณรูปแบบอากาศ (I_α , I_β) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติระหว่างเฟส แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นจรจะใช้วิเคราะห์การระบุตำแหน่งความผิดปกติ โดยกระบวนการนำเข้าสู่สัญญาณในการแยกคลื่นจร [15] จะมีกระบวนการดังนี้



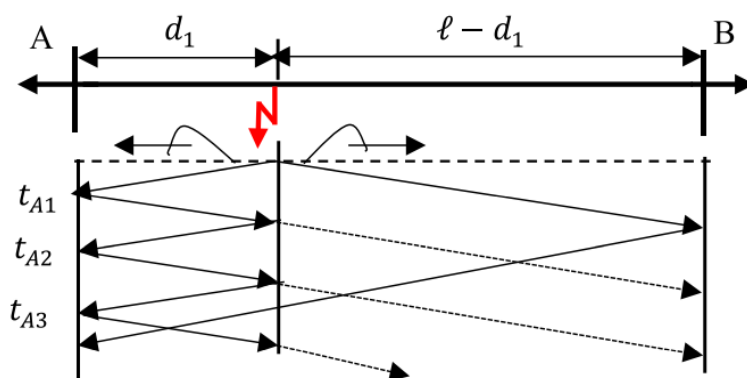
ภาพประกอบที่ 2-24 ขั้นตอนของการนำเข้าสู่สัญญาณกระแสเพื่อใช้วิเคราะห์ตำแหน่งความผิดปกติ

2) การคำนวณตำแหน่งความผิดปกติแบบปลายเดียว [14] [16] (Single-Ended Fault Location Formulation) การพิจารณาสายส่งที่มีการเชื่อมต่อสองจุดต่อรวม (Bus) A และ B ซึ่งแสดงอยู่ในภาพประกอบที่ 2-25 ระบุความผิดปกติระบุไว้ที่จุดต่อรวม A ขณะนี้เราพิจารณาใน 2 สถานการณ์ของการระบุความผิดปกติ

- ความผิดปกติในช่วงครึ่งแรก (ระหว่างจุดต่อรวม A และจุดกึ่งกลางของเส้น)
- ความผิดปกติในช่วงครึ่งหลัง (เกิน/หลังจุดกึ่งกลาง)

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เคลื่อนที่ (Time-Space Diagram) แสดงในภาพที่ 2-25 โดยมีความสอดคล้องกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งแรกของสาย จะเห็นได้ว่า

ในกรณีนี้ทั้งครั้งแรก และครั้งหลัง หน้าคลื่นจรที่ถูกบันทึกไว้จะเดินทางมาจากจุดผิวดพ้อง ถึงจุดต่อร่วม A มาก่อน จุดต่อร่วม B



ภาพประกอบที่ 2-25 แผนผังจุดผิวดพ้องที่ระยะต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของระยะทั้งหมด

จากแผนผัง สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$t_{A1} = t_{A0} + \frac{d_1}{v} \quad (2-57)$$

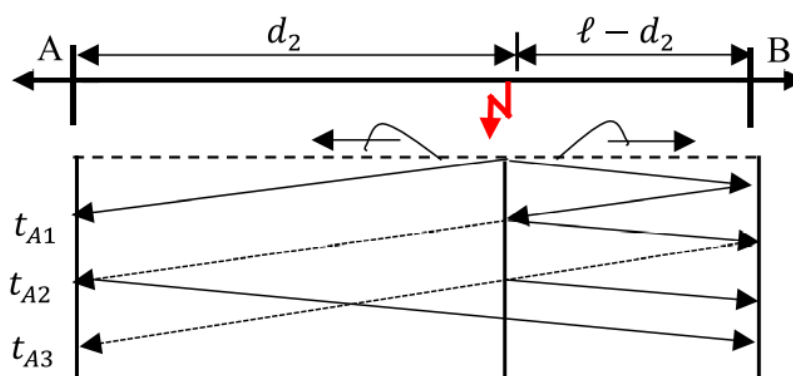
$$t_{A2} = t_{A0} + \frac{3d_1}{v} \quad (2-58)$$

d_1	ระยะความผิวดพ้องจากจุดต่อร่วม A สำหรับความผิวดพ้องในช่วงครึ่งแรก
t_{A0}	เวลาเริ่มต้นความผิวดพ้องที่บันทึกได้
t_{A1}, t_{A2}	คลื่นจรลำดับที่ 1 และ 2 ที่วัดได้โดยผู้บันทึกที่จุดต่อร่วม A
v	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ (Propagation Velocity)

การแก้สมการความผิวดพ้องข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ ของสองคลื่น ดังสมการนี้

$$d_1 = (t_{A2} - t_{A1}) \frac{v}{2} \quad (2-59)$$

การพิจารณาความผิวดพ้องในช่วงครึ่งหลังของสายตามแผนผังแสดงในภาพประกอบที่ 2-26 จากภาพสามารถสังเกตเห็นได้ว่าหน้าคลื่นจรที่ถูกบันทึกไว้จะเดินทางมาจากจุดผิวดพ้อง ถึงจุดต่อร่วม B มาก่อน จุดต่อร่วม A



ภาพประกอบที่ 2-26 แผนผังจุดผิดปกติพร้อมที่ระยะเกินกว่าครึ่งหนึ่งของระยะทั้งหมด

จากภาพที่ 2-26 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

$$t_{A1} = t_{A0} + \frac{d_2}{v} \quad (2-60)$$

$$t_{A2} = t_{A0} + \frac{2l-d_2}{v} \quad (2-61)$$

d_2	ระยะความผิดปกติจากจุดต่อร่วม A ในความผิดปกติช่วงครึ่งหลังของสาย
t_{A0}	เวลาเริ่มต้นความผิดปกติที่บันทึกได้
t_{A1} , t_{A2}	คลื่นจรลำดับที่ 1 และ 2 ที่วัดได้โดยผู้บันทึกที่จุดต่อร่วม A
v	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ (Propagation Velocity)

การแก้สมการความผิดปกติข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ ของสองคลื่น ดังสมการนี้

$$d_2 = l - (t_{A2} - t_{A1}) \frac{v}{2} \quad (2-62)$$

ระยะทางความผิดปกติ d_1 และ d_2 ถูกคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นโดยสมมติให้ความผิดปกติอยู่ในครึ่งแรกและครึ่งหลังตามลำดับ เพื่อการตรวจสอบตำแหน่งความผิดปกติที่ถูกต้อง นอกจากตำแหน่งทั้งสองแล้ว จำเป็นจะต้องระบุส่วน (ครึ่งหน้า ครึ่งหลัง) ให้ถูกต้องด้วย

3) การระบุส่วนความผิดปกติที่เกิดขึ้นน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวสายส่ง (Faulted Half Segment Identification) ในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งความผิด

พร้อม โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า จะเกิดสัญญาณสะท้อนจากปลายระยะไกลกับบัสอ้างอิง การสะท้อนจากปลายระยะไกลอาจมาถึงก่อนหรือหลังที่สะท้อนจากจุดผิดปกติพร้อมโดยสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ภาพประกอบที่ 2-25, 2-26 ซึ่งการแปลงเวฟเส้นแบบต่อเนื่องจะใช้ในการระบุส่วนความผิดปกติที่เกิดขึ้นน้อยหรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวสายส่ง หากมีค่าสูงสุดปรากฏอยู่ในโหมดศูนย์ที่สเกล 1 จะสามารถระบุได้ว่าเกิดความผิดปกติอยู่ในช่วงไม่เกินครึ่งสาย แต่ถ้าหากค่าที่ทำการแปลงโหมดศูนย์ที่สเกล 1 มีค่าเป็นศูนย์ความผิดปกติจะเกิดในช่วงเกินครึ่งสายโดยสัญญาณจะปรากฏอยู่ในสเกล 2 แทน

2.8 สถานีลานไกและโครงสร้างสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [16] โดยโครงสร้างสถานีไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญซึ่งการวัดสัญญาณจำเป็นจะต้องศึกษาโครงสร้างเพื่อการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

- สถานีลานไก 115 kV ต้องการความเชื่อถือได้สูง เนื่องจากเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 115 kV สามารถแบ่งได้ 2 แบบที่ใช้งานใน กฟภ. คือ

1. Breaker and a Half Scheme สำหรับ ระบบ Air Insulated Switchgear โครงสร้างสถานีไฟฟ้าต้องการ เซอร์กิตเบรกเกอร์ 3 ตัวต่อการป้องกันระบบ 2 วงจร เป็นระบบที่สะดวกในการปรับเปลี่ยนในการตัดจ่ายไฟ มีความเชื่อถือได้สูง

2. Double Bus Single Breaker Scheme สำหรับระบบ Gas Insulated Switchgear โครงสร้างประกอบด้วย 2 บัส โดยบัสบาร์ติดตั้งเชื่อมต่อกันด้วย Bus Tie เซอร์กิตเบรกเกอร์ และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ 1 ตัวป้องกัน 1 วงจร เป็นระบบที่ค่อนข้างสะดวกในการปรับเปลี่ยนในการตัดจ่ายไฟ

- สถานีไฟฟ้า (Substation)

2.1 รูปแบบโครงสร้างสวิทช์เกียร์ 115 kV ของ กฟภ. มี 6 แบบ แต่ละแบบของสถานีไฟฟ้ามีระดับความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกัน โดยจะเริ่มจากสถานีไฟฟ้าที่มีความเชื่อถือได้สูงสุดไปยังต่ำสุด

(1) GIS Double Bus Single Breaker โครงสร้างประกอบด้วย 2 บัสบาร์ติดตั้งเชื่อมต่อกันด้วย Bus Tie เซอร์กิตเบรกเกอร์และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ 1 ตัวป้องกัน ต่อ 1 วงจร โดยทั่วไปจะมีอย่างน้อย 2 Line Bays, 2 Transformer Bays และ 1 Tie Bay ในการออกแบบควรเผื่ออนาคตรองรับการเพิ่ม Line Bay เป็น 4-6 Line Bays เพื่อจ่ายไฟให้สถานีไฟฟ้าข้างเคียง สถานีไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า และจัดทำเป็น Loop System เนื่องจากการเพิ่ม Bay เป็นไปได้ค่อนข้างยาก และมีข้อต่ออยู่อย่างหนึ่งคือสามารถแยกบัส 2 บัสออกจากกัน เพื่อแยกจ่ายไฟได้ทำให้ สามารถปรับระดับแรงดันได้อย่างอิสระ

(2) AIS Main and Transfer Bus โครงสร้างประกอบด้วย 2 บัสบาร์ คือ เมนบัสใช้งานในภาวะปกติและบัสโอนย้าย ใช้ งานเมื่อมีการซ่อมบำรุงเซอร์เบรกเกอร์ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัสด้วย Bus Tie เซอร์กิตเบรกเกอร์ และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ 1 ตัวป้องกัน 1

(3) GIS H-Type Indoor มีรูปแบบการจัดโครงสร้างแบบ H-Scheme ฉนวนด้วย SF6 โครงสร้างประกอบด้วย 2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ ป้องกันไลน์ 2 ตัว และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันหม้อแปลง 2 ตัว และระหว่างกลางเชื่อมต่อด้วย สวิตช์ ตัดตอน เป็นรูปตัว H สามารถแยกจ่ายไฟเป็น 2 ข้างได้

(4) AIS H-Type Compact มีรูปแบบการจัดโครงสร้างแบบ H-Type การจัดโครงสร้างตามรูปที่ ก-4 โครงสร้างประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันไลน์ 2 ตัว และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันหม้อแปลง 2 ตัว และระหว่างกลางเชื่อมต่อด้วย สวิตช์ตัดตอน เป็นรูปตัว H

(5) AIS H-Type มีรูปแบบการจัดโครงสร้างแบบ H-Type โครงสร้างประกอบด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันไลน์ 2 ตัว และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันหม้อแปลง 2 ตัว และเชื่อมต่อกันด้วย สวิตช์ตัดตอน เป็นรูปตัว H รูปแบบนี้มีความยืดหยุ่นสูง

(6) AIS Tail-End มีการจัดโครงสร้าง โครงสร้างประกอบด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันหม้อแปลง 1 ตัวโดยต่อตรงเข้ากับไลน์สายส่ง 115 kV

2.2 รูปแบบโครงสร้าง Switchgear ระบบ 22 kV และ 33 kV สำหรับการจ่ายไฟของระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV จะมีโครงสร้างแบบ Single Bus Scheme โครงสร้างจะประกอบด้วย Incoming, Outgoing, Longitudinal Bus Couples และ Capacitor Bank เชื่อมต่อบน Bus เดียวกัน โดย Switchgear ที่ใช้ในระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV จะเป็นแบบ Metal-Clad/ Compartmented SF6 GIS

2.9 การระบุเหตุการณ์การเกิดความผิดพลาด โดยวิธีการคำนวณบนพื้นฐานของสถิติ [17] [18]

เป็นวิธีการรวบรวมข้อมูลจากฐานข้อมูลที่มีอยู่มาผ่านกระบวนการประมวลผลโดยใช้ฐานความรู้และโครงข่าย อัจฉริยะ เช่น กระบวนการสถิติ (Statistic) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) การสร้างแผนผังต้นไม้ (Decision Tree) หรือวิธีอื่นๆ โดยหลักการนำเข้าข้อมูลผ่านการเรียนรู้ซ้ำๆ และให้ค่าน้ำหนักเป็นตัวคูณ ซึ่งจะสัมพันธ์กันระหว่างข้อมูลขาเข้าและขาออก โดยคุณภาพของการทำนายนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่ป้อนเข้า และโครงสร้างที่จะใช้ในการทำนาย โดยข้อมูลการนำเข้า จะสามารถเป็นได้ทั้งข้อมูลตัวเลข (Numerical) เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความต้านทานสายส่ง และข้อมูลที่ไม่เป็นตัวเลข เช่น (Non - Numerical) เช่น สภาพอากาศ สาเหตุการเกิดไฟฟ้าขัดข้อง การไฟฟ้าที่รับผิดปกติ ซึ่งวิธีการคำนวณแบบนี้จะให้ผลที่แม่นยำ แต่จะมีข้อเสียคือ หากต้องการออกแบบให้ครอบคลุมระบบจำหน่าย

ทั้งหมดต้องทำการสร้างโมเดลใหม่ และเลือกโมเดลที่เหมาะสม กล่าวคือ ชุดข้อมูลที่นำมาคำนวณของระบบไฟฟ้าที่หนึ่งจะใช้ได้กับการคำนวณระบบไฟฟ้าที่นั่นเท่านั้น ทำให้ยากต่อการปรับปรุงข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

2.9.1 การคัดเลือกคุณสมบัติของข้อมูล [19] เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดจำนวนตัวแปรที่ไม่จำเป็นหรือไม่มีความเกี่ยวข้องกับข้อมูล เพื่อใช้ในการทำแบบทำนายข้อมูลซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ได้ตัวแปรที่ดีที่สุดเพียงตัวเดียว หรือ เลือกรวมของตัวแปรที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการทำนาย การทำนายที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพจำเป็นจะต้องทำการคัดเลือกคุณสมบัติของข้อมูลก่อนเสมอ เพราะจะช่วยลดขนาดของข้อมูลและช่วยให้การประมวลผลเร็วขึ้นมีผลมาจากการทำการกรองข้อมูลที่ไม่จำเป็นออกจึงไม่ต้องทำการประมวลผลทั้งหมด โดยการคัดเลือกต้องมีคุณลักษณะเด่น ดังนี้

1. ความแม่นยำของการจำแนกประเภทจะไม่ลดลง
2. การกระจายของกลุ่มจะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างข้างต้น
3. Classification (การจำแนกประเภทข้อมูล) การจำแนกประเภทของข้อมูลเป็นการนำข้อมูลมาทำการจัดกลุ่มโดยอาศัยความเข้ากันหรือความสอดคล้องกันของข้อมูลนั้น ซึ่งวิธีการจำแนกจะใช้ชุดข้อมูลจำนวน 2 ชุดซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลสอน (Training Set) และชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดจะถูกกำหนดโดยใช้ชั้นบอกประเภท (Class Label) ซึ่งในกระบวนการ Classification มี 2 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การสร้างแบบจำลอง (Model Construction) [20]

ขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองจะใช้ข้อมูลตั้งต้น ชื่อของข้อมูลชุดนี้จะเรียกว่าชุดข้อมูลสอน (Training Set) ซึ่งข้อมูลแต่ละตัวจะมีคุณลักษณะที่สามารถบอกค่าประเภทที่กำหนดไว้ (Class Label) โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้น จะมีผลลัพธ์การเรียนรู้การจำแนกประเภทในรูปแบบ กฎการจำแนกประเภท (Classification Rules) แผนผังต้นไม้ (Decision Trees) หรือสูตรทางคณิตศาสตร์

2. การนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ (Model Usage)

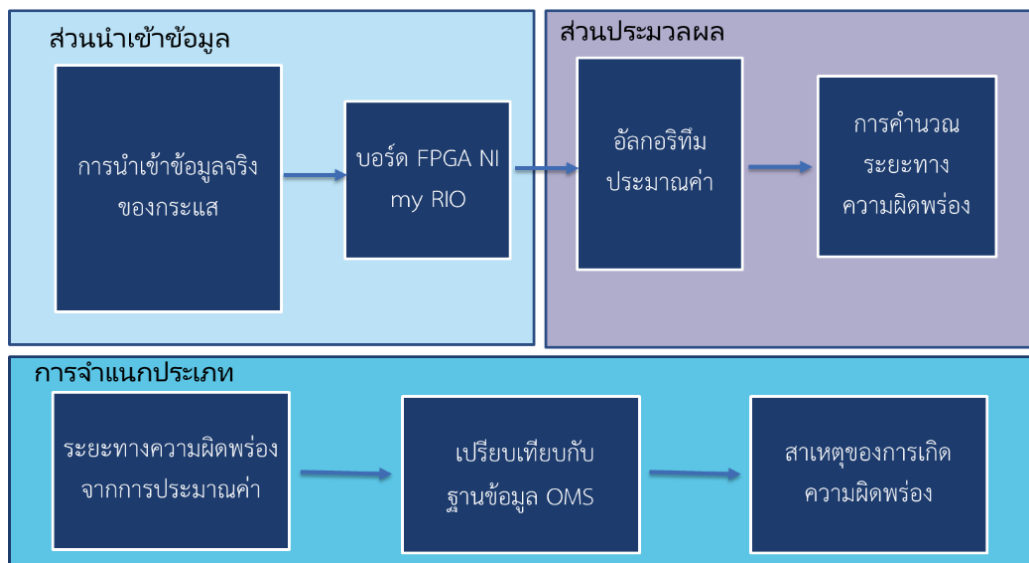
เพื่อการจำแนกประเภทตัวอย่างที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จะต้องมีการประมาณค่าของความแม่นยำของชุดข้อมูล (Accuracy) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ก่อนการนำไปใช้ โดยเปรียบเทียบค่าชั้นบอกประเภทประเภท (Class Label) ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ของชุดข้อมูลการสอน (Training Set) และชุดทดสอบ (Test Set) โดยค่าผลลัพธ์ของการจำแนกประเภทที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งแทนค่าข้อมูลตั้งต้นด้วยข้อมูลในชุดทดสอบ ต้องให้ผลลัพธ์ที่ตรงกัน โดยผลที่ได้จะนำไปคำนวณอัตราความแม่นยำ (Accuracy Rate) ซึ่งผลการจำแนกประเภทและความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น จะต้องมาจากชุดข้อมูลทดสอบที่เป็นอิสระไม่ขึ้นต่อชุดข้อมูลสอน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

3.1 บทนำ

ในการทดลองค้นหาความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าแยกส่วนประกอบออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของการนำเข้าสู่ข้อมูล (Sensor Input) ส่วนประมวลผล (Data Precision) และส่วนการแยกประเภทของความผิดพลาด (Classification) โดยในแต่ละส่วนจำเป็นต้องใช้ข้อมูลและสร้างเครื่องมือเพื่อให้การวิเคราะห์และค้นหาระยะเวลาทางทำได้แม่นยำยิ่งขึ้นโดยแสดงดังรูปต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 3-1 รูปแบบของระบบประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งของความผิดพลาด

โดยการค้นหาของความผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 การทดลองโดยการสร้างแบบจำลองสายส่งด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) คือการสร้างแบบจำลองสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยโปรแกรม (MATLAB) และทดสอบจำลองความผิดพลาด แบบ 1 เฟสลงดิน ความผิดพลาดแบบ 2 เฟสลงดิน ความผิดพลาดแบบ 3 เฟสลงดิน ความผิดพลาดระหว่างเฟส และความผิดพลาดแบบ 3 เฟส โดยการใช้การเก็บค่าและคำนวณระยะเวลาด้วย 2 วิธี คือวิธีคำนวณระยะเวลาความผิดพลาดด้วยอิมพีแดนซ์และวิธีคำนวณระยะเวลาความผิดพลาดด้วยคลื่นจร โดยทดสอบเก็บผลการทดลอง และค่าความแม่นยำของการคำนวณระยะเวลา

ระยะที่ 2 การสร้างเครื่องมือเก็บสัญญาณความผิดปกติโดยเลือกใช้การคำนวณที่แม่นยำกว่าโดยใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

- การทดลองคำนวณระยะทางความผิดปกติโดยการสร้างวงจรจำลองสายส่งในห้องทดลอง (Circuit Lab Test) โดยการจำลองค่าพารามิเตอร์จากวงจรสายส่งจริง เพื่อเก็บสัญญาณและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจัดเก็บสัญญาณและทดสอบอัลกอริทึมสำหรับคำนวณระยะทาง

- การทดสอบด้วยการเก็บข้อมูลในสายส่งจริง (Raw Data from Substation) โดยการเลือกสายส่งที่สนใจเพื่อทำการทดสอบคำนวณระยะทางของความผิดปกติ โดยใช้การจับสัญญาณที่เกิดขึ้นในสถานะชั่วครู่ (Transient) นำมาคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดปกติโดยนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระยะที่ 3 การจำแนกประเภทของการเกิดความผิดปกติโดยการนำระยะทางของความผิดปกติที่ได้มาทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดปกติ และวิเคราะห์ถึงความสำคัญของหัวข้อต่างๆ ที่มีผลต่อการทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดปกติ

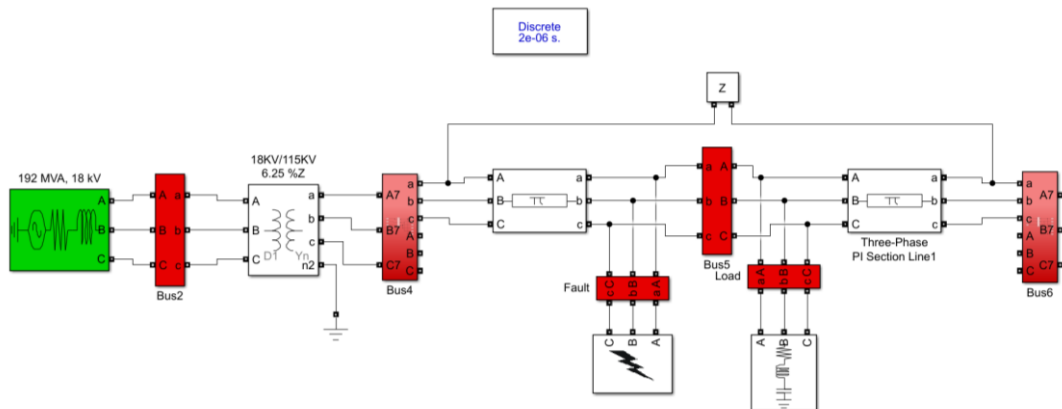
ซึ่งในการค้นหาตำแหน่งของความผิดปกติจำเป็นจะต้องออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลโดยใช้พื้นฐานจากข้อมูลในระบบฐานข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และเครื่องมือวัดที่มีอยู่ในสถานีไฟฟ้าโดยปรับปรุงเครื่องมือบันทึกผลที่รับข้อมูลกระแสไม่คงตัวที่เกิดขึ้นในสถานะชั่วครู่ (Transient) จากสถานะที่ไม่คงที่ในระบบจำหน่าย จากนั้นจะผ่านการแปลงข้อมูล (Modal, Wavelet Transform) เพื่อลดระดับของสัญญาณรบกวนและวิเคราะห์ข้อมูลผ่านอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณระยะทาง โดยขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการนำระยะทางที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดปกติ

3.2 การประมาณการตำแหน่งความผิดปกติโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับวิธีการระบุตำแหน่งของจุดผิดปกติจะใช้การคำนวณโดยรวมผลจากค่าพารามิเตอร์เพราะให้ผลที่ดีกว่าวิธีอื่น ซึ่งมีด้วยกัน 2 วิธีที่เป็นที่นิยมโดยปัจจุบัน คือ

- การหาจุดผิดปกติด้วยวิธีคำนวณอิมพีแดนซ์ (Fault Impedance)
- การหาจุดผิดปกติด้วยวิธีคลื่นสะท้อน (Traveling Wave)

เพื่อการวิเคราะห์เพื่อหาถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีทั้งสอง จะทำได้โดยการนำวงจรสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาสร้างเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบสมการของการคำนวณระยะทางและทดสอบอัลกอริทึม เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานที่ใช้ในงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป โดยแบบจำลองและการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งมีรูปร่างของแบบจำลองดังภาพประกอบที่



ภาพประกอบที่ 3-2 ตัวอย่างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink

โดยอุปกรณ์ที่นำมาต่อในวงจรที่นำมาทำการจำลองระบบไฟฟ้าเป็นการทำงานของแหล่งจ่าย ผ่านระบบสายส่งแบบปลายเดียวซึ่งมีการติดตั้งเครื่องวัดไว้ 3 บัส โดยใช้บัสที่ 4 เป็นบัสอ้างอิงโดยมีโหนดต่ออยู่กับระบบโดยมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 3-1 สัญลักษณ์ของการทำแบบจำลอง

สัญลักษณ์	ความหมาย
	เครื่องกำเนิด 192 MVA 18kV
	เครื่องวัดประจำบัส ที่วัดกระแสและแรงดัน
	หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 18KV/230KV
	สายส่งในระบบจำหน่าย
	โหนดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
	ความผิดพลาดในระบบจำหน่าย

3.2.1 ค่าพารามิเตอร์ในสายส่งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

โดยศึกษาระบบจำหน่ายแรงสูงและค่าประมาณการพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าโดยการคำนวณระบบจำหน่ายแรงสูง ค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ในระบบสายส่ง กำหนดจากชนิดและขนาดของสายไฟฟ้ารวมถึงความยาวในสายส่งไฟฟ้า ซึ่งสามารถแทนค่าและคำนวณได้โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ค่าหลักคือ

- ค่ารีซิสแตนซ์ (Resistance) เป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากตัวต้านทานในสายส่งโดยความต้านทานในสายส่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสายส่งแรงสูงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมี 3 ชนิด ได้แก่สายเปลือย สายหุ้มฉนวน และ สายเคเบิลใต้ดิน โดยสายเปลือยจะหามาจากอลูมิเนียมแกนเหล็กมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 mm² , 120 mm² และ 185 mm² สายหุ้มฉนวนจะหามาจากอลูมิเนียมหุ้มฉนวน XLPE มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 mm² , 120 mm² , และ 185 mm² ส่วนสายเคเบิลใต้ดินจะหามาจากสายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 240 mm² และ 400 mm²

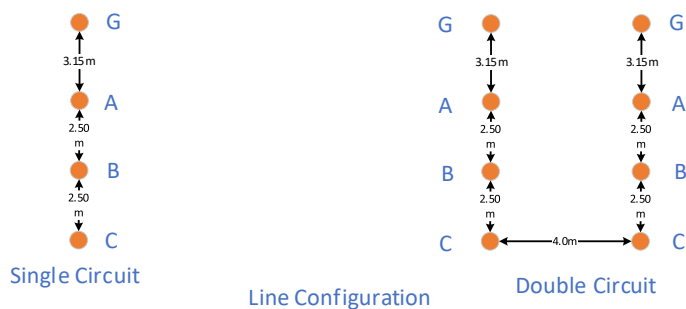
- ค่าอินดักแตนซ์ (Inductance) เป็นค่าที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำในสายส่งไฟฟ้า โดยมีผลมาจากการจัดเรียงสายส่ง ระยะห่างระหว่างสายส่ง และค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในสายส่งแต่ละเส้น ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงสายส่งวงจรเดี่ยว วงจรคู่ (Single and Double circuit) และระยะห่างระหว่างสาย ของสายส่งชนิด 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-3

- ค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) เป็นค่าที่เกิดจากตัวเก็บประจุในสายส่งไฟฟ้า โดยมีค่าความจุที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ค่า คือ

1.ค่าความจุที่เกิดขึ้นระหว่างสายมีผลมาจากการจัดเรียงสายส่ง ระยะห่างระหว่างสายส่ง และค่าสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวค่าอินดักแตนซ์

2.ค่าความจุระหว่างสายและพื้นดิน มีผลมาจากค่าความเป็นฉนวนของเสาไฟฟ้าและอุปกรณ์ลูกถ้วยรองรับสาย

โดยการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าจะคำนวณได้จากคุณลักษณะของสายส่ง ชนิดฉนวน ขนาดสาย และรูปแบบการจัดเรียงสายส่ง ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งอ้างอิงตามแบบมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมีการทดสอบและคำนวณค่าตามคุณลักษณะสายส่งที่ติดตั้งในระบบนั้นๆ โดยค่าได้จากการคำนวณ จะมีค่าของความเร็วในสายส่ง ค่าความยาวคลื่น ค่าความจุ และความเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตรซึ่งแสดงได้ตามตารางที่ 3-2



ภาพประกอบที่ 3-3 ระยะการวางตำแหน่งของสายไฟฟ้าบนเสาไฟฟ้า

จากระยะข้างต้นสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ ซีเควนซ์อิมพีแดนซ์ของสายส่งโดยแบ่งเป็นลำดับซีเควนซ์ศูนย์

และลำดับซีเควนซ์บวกตามขนาดหน้าตัดของสายส่งโดยขนาดเริ่มต้นที่ 50 mm^2 และสูงสุดที่ 185 mm^2 โดยแสดงดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-2 ซีเควนซ์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลอากาศสำหรับสายจำหน่ายของการไฟฟ้า

ขนาดสาย	รูปแบบวงจร	ซีเควนซ์	ค่าความเร็ว km/sec	ค่าความยาวคลื่น Ohm/km	ค่าความต้านทาน Ohm/km	ค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำ Ohm/km
50	single	zero	174890	3497.70	1.009500	1.796800
		positive	203720	4074.50	0.763980	0.264950
	double	zero	173170	3463.50	1.002000	1.693600
		positive	213660	4273.10	0.764030	0.317890
120	single	zero	176380	3527.50	0.567060	1.769400
		positive	249230	4984.60	0.321520	0.237230
	double	zero	176420	3528.50	0.567020	1.769100
		positive	249280	4985.50	0.321520	0.237230
185	single	zero	175740	3514.90	0.459960	1.755800
		positive	263890	5277.70	0.214410	0.224020
	double	zero	175800	3516.00	0.459940	1.755800
		positive	263880	5277.70	0.214410	0.224010

ซึ่งในการทดสอบวงจรโดยการแทนค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้โดยใช้การเปรียบเทียบค่าตารางซีเควนซ์อิมพีแดนซ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแยกค่าความจุและความเหนี่ยวนำออกจากกันโดยคำนวณค่าความเร็วด้วยค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุที่ 8.90 nH/km และ 1.295 mF/km

ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในลำดับบวก (Positive Sequence) โดยสามารถหาความเร็วเฟสโดยใช้สมการที่ 2-38 ในสายส่งได้ดังนี้

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3-1)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{8.9 \times 10^{-9} \times 1.295 \times 10^{-3}}} \quad (3-2)$$

$$v = 294557.52 \text{ km/s} \quad (3-3)$$

ตารางที่ 3-3 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์บนสายส่งอ้างอิงจากระบบจำหน่ายจริง

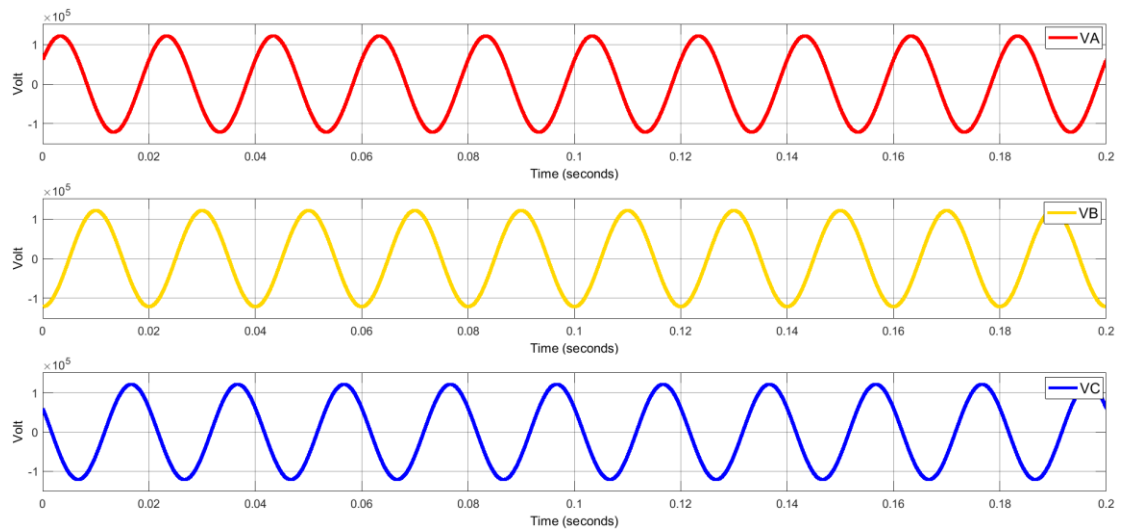
parameter	Resistance (Ohm/km)	Inductance(nH/km)	Capacitance(mF/km)
ZERO	0.0019992	5.93	8.90
POSITIVE	0.0041513	8.90	1.295
NEGATIVE	0.0041513	8.90	1.295
velocity	294557.52 km/s		

3.2.2 การทดสอบแบบจำลองโดยการเริ่มการทำงานโดยใช้การตั้งค่าการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่ 2 μs ทำการวัดค่าพิกัดของแบบจำลองในสถานะปกติ (Steady State) ซึ่งได้ค่าพิกัดแรงดันและกระแสที่ บัส 4 และบัสโหลด ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3-4 ตารางสรุปค่าแรงดันและกระแสที่ทำการวัดจากแบบจำลอง

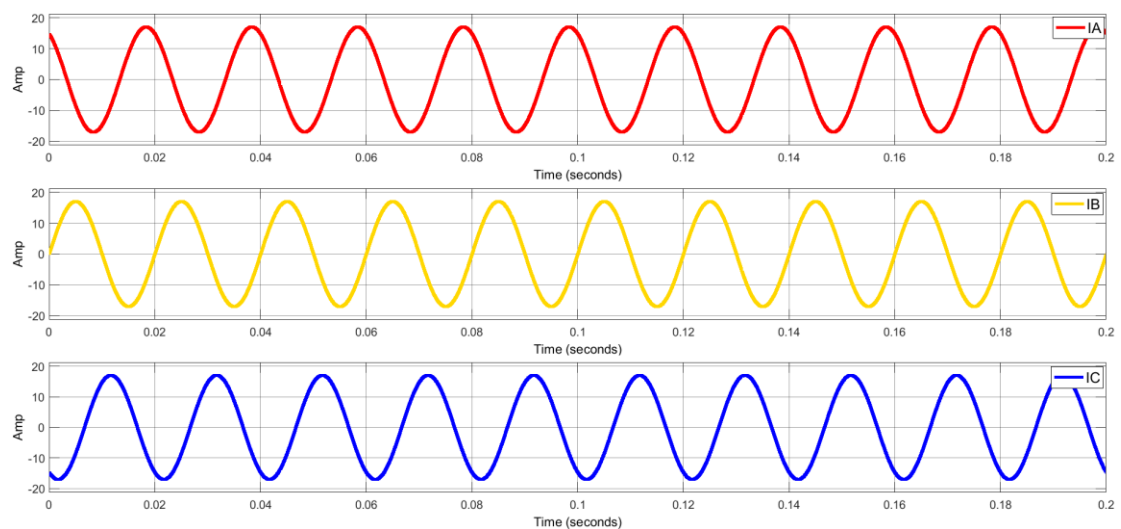
สถานะ	จุดที่ทำการวัด	ค่าที่ได้
แรงดัน เฟส A (V_A)	BUS 4	121412.05 V มุม 29.93 องศา
แรงดัน เฟส B (V_B)	BUS 4	121412.05 V มุม -90.07 องศา
แรงดัน เฟส C (V_C)	BUS 4	121412.05 V มุม 149.93 องศา
กระแสเฟส A (I_A)	BUS 4	15.29 A มุม 119.08 องศา
กระแสเฟส B (I_B)	BUS 4	15.29 A มุม -0.92 องศา
กระแสเฟส C (I_C)	BUS 4	15.29 A มุม -120.92 องศา
กระแสโหลดเฟส A (I_{Aload})	Load	0.09 A มุม 29.88 องศา
กระแสโหลดเฟส B (I_{Bload})	Load	0.09 A มุม -90.12 องศา
กระแสโหลดเฟส C (I_{Cload})	Load	0.09 A มุม 149.88 องศา

โดยเมื่อทำการวัดค่าแรงดันเฟสจากเซนเซอร์ข้อมูลนำเข้าที่บัส 4 ที่สภาวะแรงดันปกติ จะได้กราฟคลื่นไซน์ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา แหล่งจ่ายมีค่าแรงดัน 121 kV ดังรูป



ภาพประกอบที่ 3-4 รูปแบบสัญญาณแรงดันที่วัดจากบัสอ้างอิงที่สภาวะปกติ

โดยเมื่อทำการวัดค่ากระแสเฟสจากเซนเซอร์ข้อมูลนำเข้าที่บัส 4 ที่สภาวะแรงดันปกติจะได้ กราฟคลื่นไซน์ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา มีค่ากระแส 15.29 A ดังภาพประกอบที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-5 รูปแบบสัญญาณกระแสที่วัดจากบัสอ้างอิงที่สภาวะปกติ

3.2.3 การทดสอบวัดระยะความผิดพลาดโดยโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์

การทดสอบ 2 แบบ คือ แบบอิมพีแดนซ์ และแบบคลื่นจร โดยค่าระยะที่ทดสอบจะใช้ค่าที่ ระยะ 50 km ซึ่งอ้างอิงตามพิกัดสายส่งที่มีอยู่ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยจะ

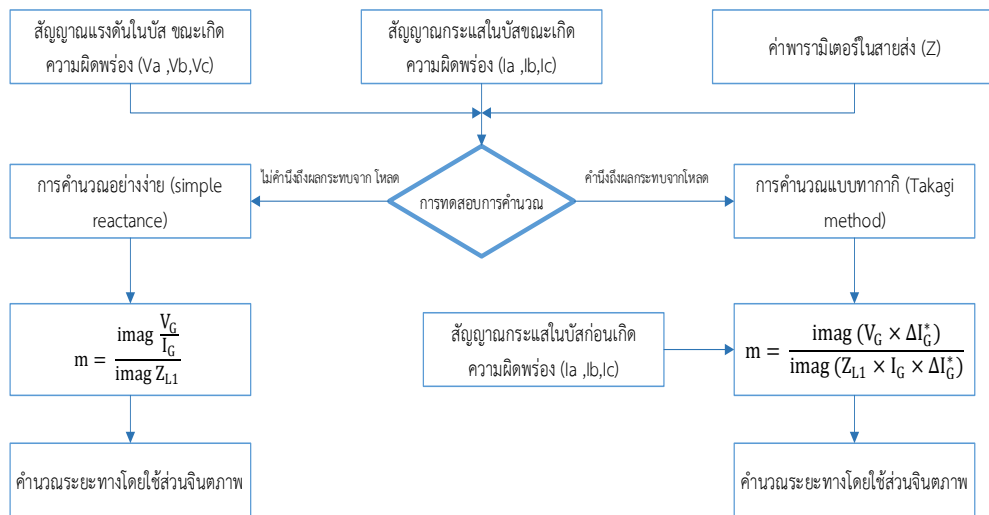
แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงกึ่งกลางสายส่ง และเกินกึ่งกลางสายส่ง โดยทำการวัดแบบเพิ่มค่าระยะทางจนไปสิ้นสุดที่บริเวณปลายสาย ซึ่งแสดงค่าระยะทางที่ทำการวัดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3-5 ระยะทางของสายส่งและระยะทางของความผิดพลาดที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง

Line section	Line section distance (km)	Fault distance (km)
ไม่เกินกึ่งกลาง	40	10
ไม่เกินกึ่งกลาง	35	15
ไม่เกินกึ่งกลาง	30	20
ไม่เกินกึ่งกลาง	25	25
เกินกึ่งกลาง	20	30
เกินกึ่งกลาง	15	35
เกินกึ่งกลาง	10	40
เกินกึ่งกลาง	5	45

3.2.4 การคำนวณระยะทางความผิดพลาดโดยใช้หลักการของอิมพีแดนซ์ (Fault Impedance Method)

เป็นการวัดแรงดันและกระแสโดยใช้การถอดพารามิเตอร์ออกจากตัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดขณะที่เกิดความผิดพลาดและสัญญาณกำลังเข้าสู่สถานะคงตัว โดยการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาดจะใช้หลักการคำนวณ 2 แบบคือ แบบอย่างง่าย (Simple Reactance) ที่ใช้การคำนวณที่ไม้อ้างอิงโหลด และแบบทากากิ (Tagaki) ที่ใช้การคำนวณโดยอ้างอิงโหลด โดยใช้การคำนวณทั้งสองแบบจะจำลองความผิดพลาดแบบ เฟสลงดิน แบบเฟสต่อเฟสลงดิน แบบสามเฟสลงดิน แบบเฟสต่อเฟส และแบบสามเฟส ซึ่งการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาดจะมีรูปแบบการรับค่าของสัญญาณและสมการที่ใช้ในการคำนวณตามภาพประกอบที่ 3-6



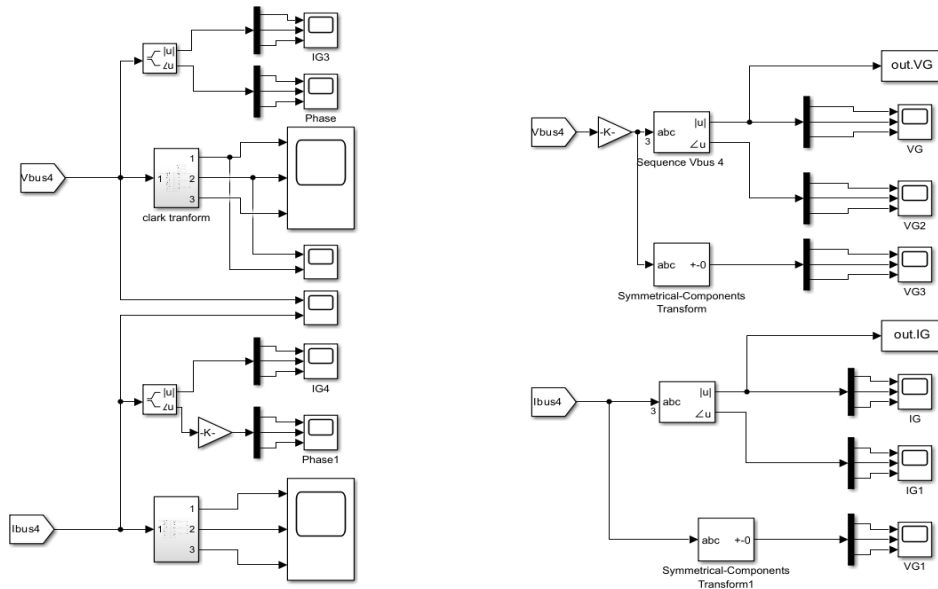
ภาพประกอบที่ 3-6 รูปแบบการคำนวณความผิดปกติแบบอิมพีแดนซ์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเซนเซอร์การวัดในระบบจำหน่ายเมื่อทำการจำลองที่สภาวะปกติ ซึ่งใช้เวลาในการจำลอง 0.5 s โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ระยะทาง 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 km ในสายส่งจะมีค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3-6 กระแสและแรงดันที่ระยะทางลำดับต่างๆ ในสายส่ง

Line section (km)	Simple reactance/Takagi		
	V_G (V)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)
10	120197.08	3.37	3.782+4.529i
20	120541.48	6.74	7.453+14.967i
30	120888.02	10.15	11.351+22.599i
40	121236.78	13.87	15.145+30.139i
50	121587.88	17.02	18.950+37.695i
60	121941.41	20.49	22.763+45.258i
70	122297.49	23.98	26.596+52.837i
80	122656.21	27.50	34.437+60.439i

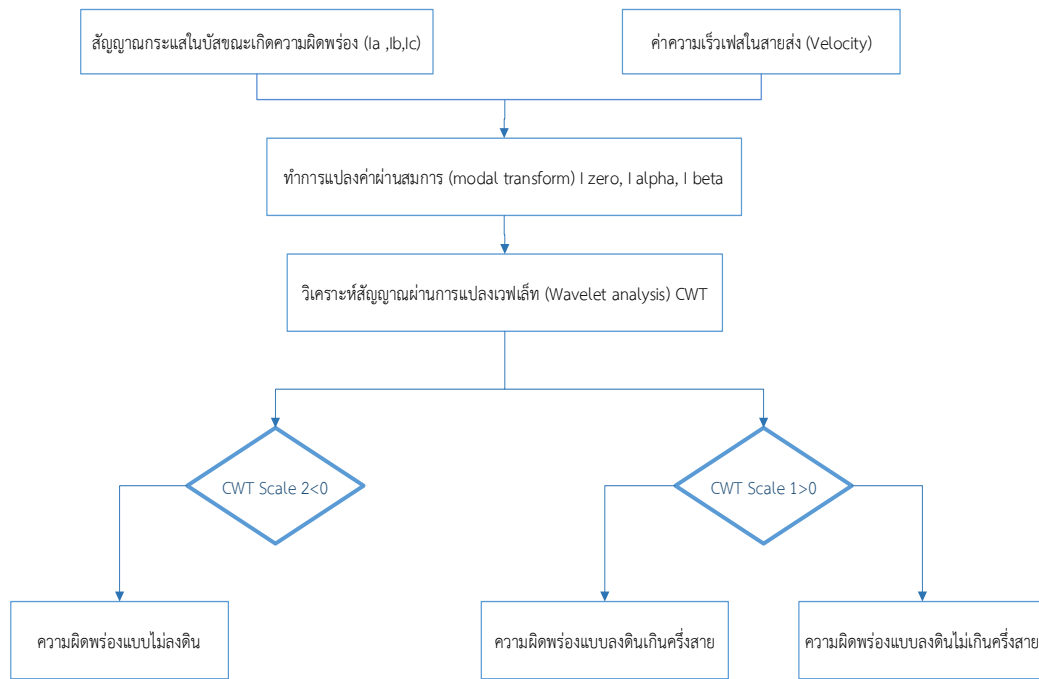
การออกแบบอุปกรณ์เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ โดยการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันที่บัส 4 โดยใช้การคำนวณมี 2 ส่วนโดยใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อหาแรงดันและองศา และการหาซีแควนซ์ของแรงดันและกระแสโดยใช้บล็อกจำลองในการดำเนินการตามรูปต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 3-7 แบบจำลองการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแบบอิมพีแดนซ์

3.2.5 การคำนวณระยะทางความผิดพลาดโดยใช้หลักการของคลื่นจร การนำข้อมูลของสัญญาณมาทำการแปลง (Transform)

ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวงจรสามเฟสขณะเกิดความผิดพลาดสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ โดยผ่านการแปลงสัญญาณซึ่งอุปกรณ์เซนเซอร์จะทำการวัดสัญญาณกระแส และแรงดันที่ไม่คงตัว โดยการวิเคราะห์สัญญาณจะใช้การแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transform) เพื่อให้ง่ายต่อการดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของวงจรสามเฟส โดยสัญญาณที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปแบบเชิงเส้นซึ่งหากวงจรอยู่ในสภาวะปกติรูปแบบสัญญาณแรงดัน (V_0) สัญญาณกระแส (I_0) จะเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าหากเกิดความผิดพลาดขึ้นสัญญาณแรงดัน (V_0) สัญญาณกระแส (I_0) จะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งในการหา ระยะทางของความผิดพลาดจะใช้สัญญาณข้างต้นนำมาแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เพื่อดู การเปลี่ยนแปลงของเวลา จากนั้นใช้ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปคูณด้วยความเร็วเฟสในสายส่งตาม สมการที่ 2-59 ,2-62 จะสามารถคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาด โดยระยะทางที่ได้จะเป็นระยะทางจากอุปกรณ์เซนเซอร์ไปจนถึงจุดที่เกิดความผิดพลาดนั้น โดยขั้นตอนของการนำเข้าสู่ สัญญาณและการคำนวณจะแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-8



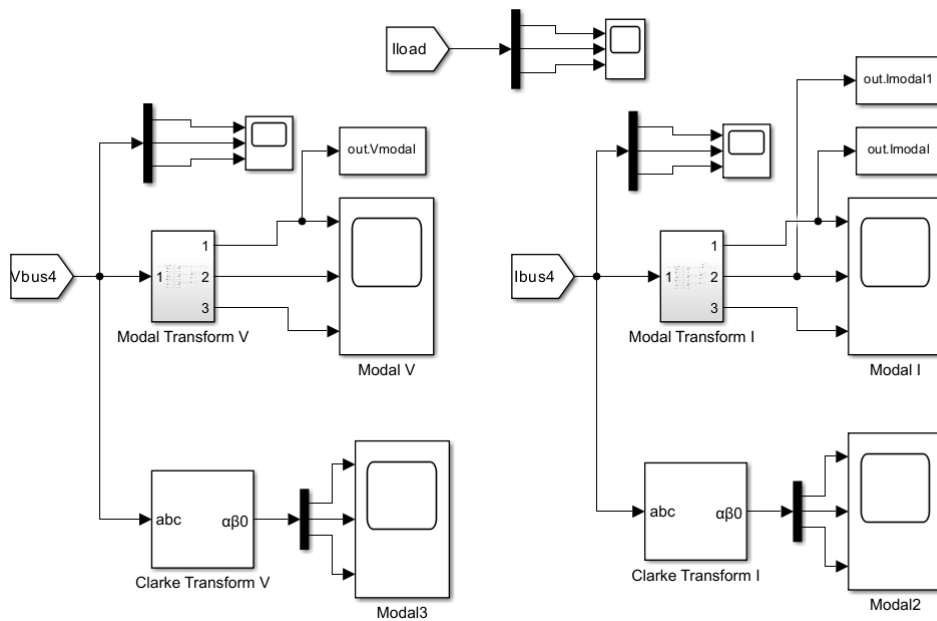
ภาพประกอบที่ 3-8 รูปแบบการคำนวณความผิดปกติแบบคลื่นสะท้อน

จากวิธีการดังกล่าวทำการสรุปเวลาที่เปลี่ยนแปลงและค่าพารามิเตอร์ความเร็วเฟสที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย ได้ค่าตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-7 การคำนวณความเร็วเฟสและค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง

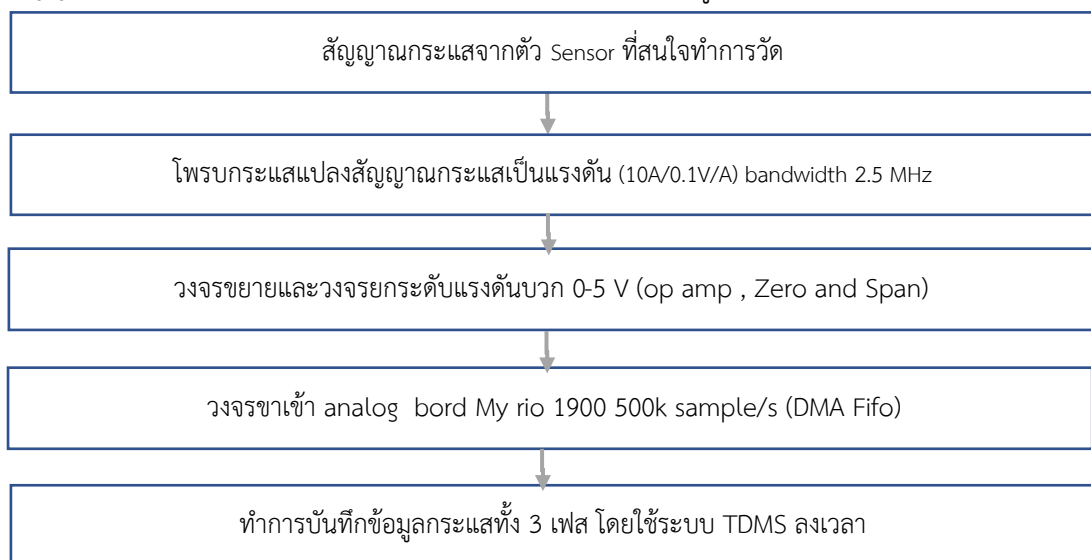
Line distance (km)	Traveling wave	
	Velocity(km/s)	Z_{L1} (Ohm)
10	294577	3.782+4.529i
20	294577	7.453+14.967i
30	294577	11.351+22.599i
40	294577	15.145+30.139i
50	294577	18.950+37.695i
60	294577	22.763+45.258i
70	294577	26.596+52.837i
80	294577	34.437+60.439i

การออกแบบอุปกรณ์เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ซึ่งการคำนวณแบบใช้คลื่นจรจะใช้ตัวแปรที่น้อยกว่าแบบแรกโดยวิธีนี้จะใช้การนำสัญญาณมาผ่านการแปลงและดูความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ 3 เฟสโดยใช้บล็อกจำลองในการดำเนินการตามรูปต่อไปนี้



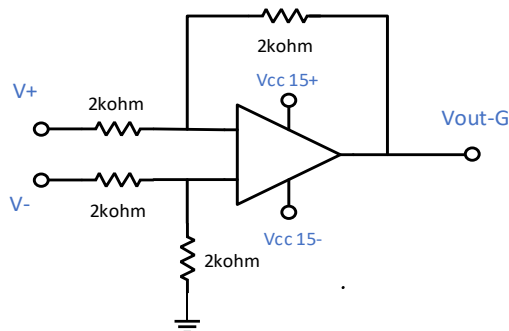
ภาพประกอบที่ 3-9 เครื่องมือวัดสัญญาณและคำนวณการแปลงสัญญาณความผิดพลาด

3.2.6 การสร้างเครื่องมือบันทึกข้อมูลจากสถานีไฟฟ้า การนำข้อมูลที่ได้จากการวัดในสถานีไฟฟ้าด้วยเครื่องมือจัดเก็บข้อมูล ในปัจจุบันการเก็บข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยังไม่มีมารองรับสัญญาณเหล่านี้ จำเป็นจะต้องออกแบบวงจรและส่วนนำเข้าข้อมูลโดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้



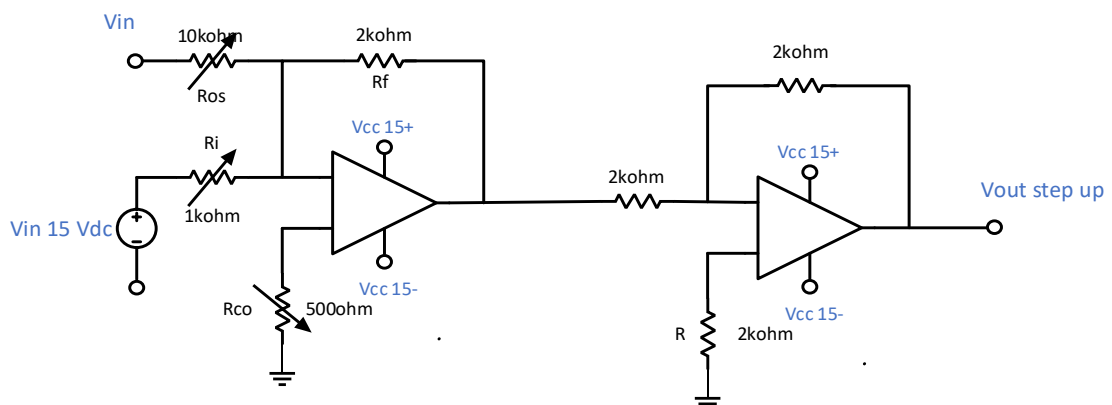
ภาพประกอบที่ 3-10 รูปแบบการวัดความผิดพลาดที่สถานีไฟฟ้า

วงจรวัดแรงดันขาเข้าเทียบสัญญาณ Common ข้อมูลแรงดันที่ออกจากโพรบกระแสจะเป็นสัญญาณที่อยู่ในซีกบวกลบซึ่งอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณจะวัดได้เฉพาะค่าที่อยู่ในซีกบวกลบเทียบสัญญาณ Common เท่านั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรรออปแอมป์ (op-amp) แปลงแรงดันกระแสตรง ที่มีสัญญาณบวก ลบ ให้เป็นสัญญาณที่มีค่าเฉพาะซีกบวกลบ เพื่อเตรียมสัญญาณในการนำไปยกระดับแรงดันต่อไป



ภาพประกอบที่ 3-11 วงจรวัดแรงดันเทียบจุดกราวด์

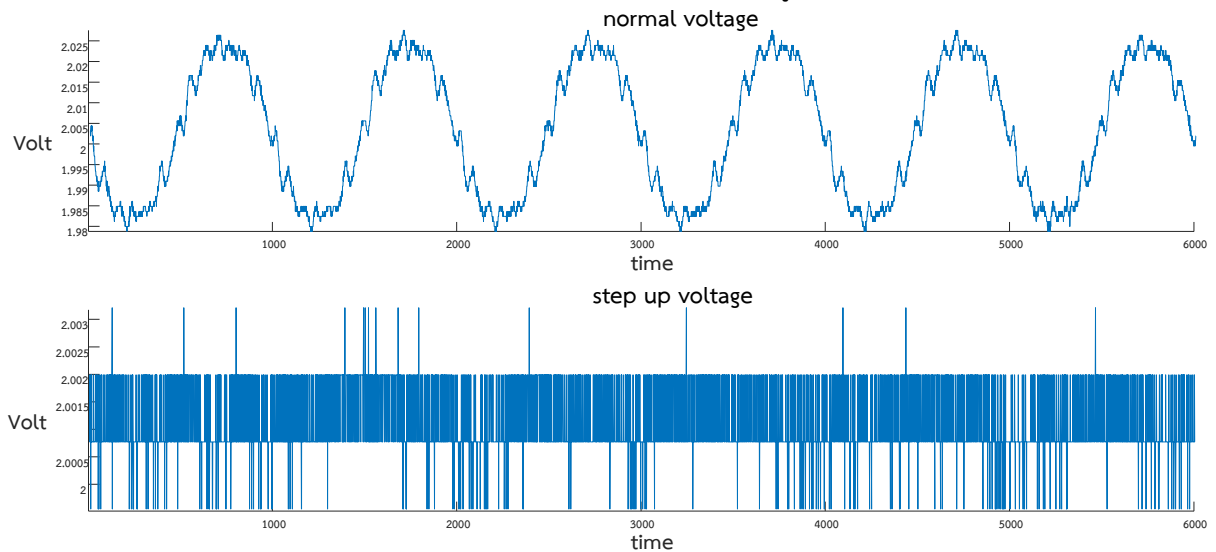
การรับสัญญาณขาเข้าโดยใช้วงจรรยกระดับแรงดันบวกลบ โดยอุปกรณ์รับสัญญาณอนาล็อกจะไม่สามารถรับสัญญาณย่านลบได้จึงจำเป็นต้องยกระดับสัญญาณแรงดันให้อยู่ในด้านซีกบวกลบโดยวงจรที่ใช้คือวงจร zero and span



ภาพประกอบที่ 3-12 วงจรรยกระดับแรงดันซีกบวกลบ

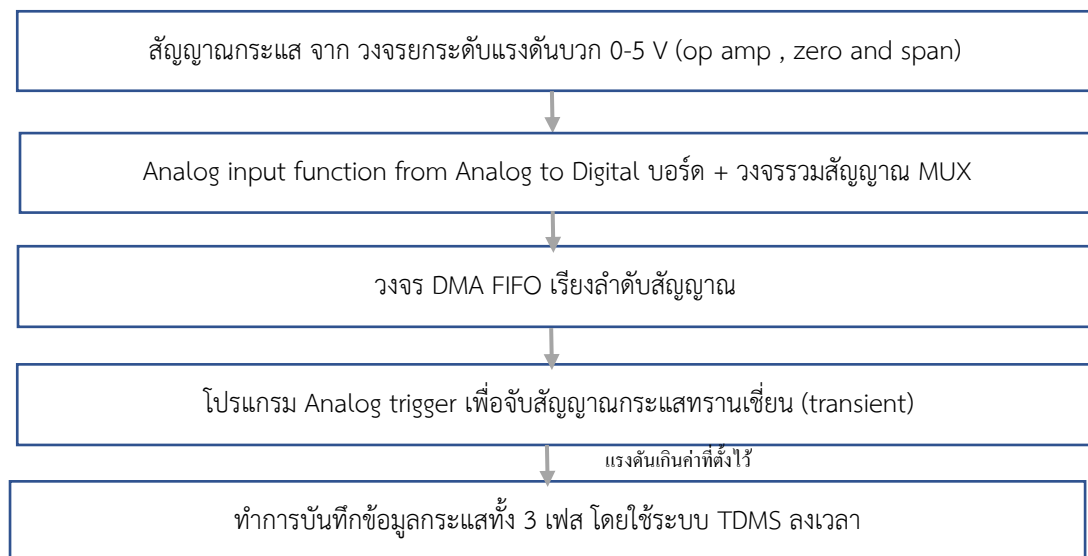
โดยที่ m คือ ค่าความชันที่ต้องปรับตั้งจะได้ $m = \Delta V_{out} / \Delta V_{in} = 5/2 = 2.5$ โดยที่กำหนด V_{out} ให้ได้ค่ายกระดับแรงดันที่ 2V จะได้ค่าความต้านทานปรับค่าได้ $R_{os} = 7.2 \text{ k}\Omega$ $R_i = 800 \text{ }\Omega$ $R_{co} = 500 \text{ }\Omega$

โดยสัญญาณฝั่งขาออกจะได้แรงดันที่ยกระดับขึ้นที่โดยมีจุดกึ่งกลางที่ 2V โดยที่สัญญาณสูงสุดและต่ำสุดจะอยู่ในช่วง 0-5 V โดยตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านวงจร zero and span ที่สภาวะปกติและสัญญาณที่ทำการยกระดับแรงดัน จะมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



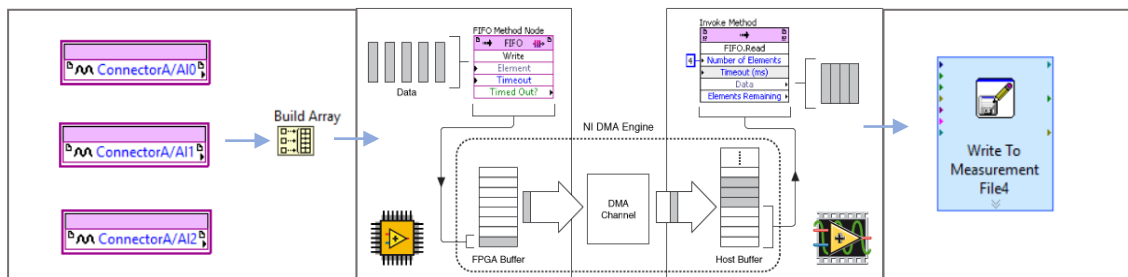
ภาพประกอบที่ 3-13 ผลการวัดคลื่นสัญญาณ sine และแรงดันเทียบกราวน์ที่ได้จากวงจร

การนำสัญญาณ 50 Hz ที่ 6000 sample ที่ได้จากวงจร zero and span มาผ่านบอร์ด Analog to Digital โดยส่งค่าผ่านวงจร FIFO เพื่อสุ่มสัญญาณโดยใช้ FPGA Xynlink-5630 ที่ 500000 sample/s โดยการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณมีการทำงานดังนี้



ภาพประกอบที่ 3-14 รูปแบบการทำงานของโปรแกรมบันทึกสัญญาณความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

การส่งผ่านข้อมูลจากวงจรขาเข้าเพื่อทำการบันทึกสัญญาณด้วย TDMS (Technician Data Management Streaming) เป็นการบันทึกสัญญาณที่มีอัตราสุ่มตัวอย่างสูงอย่างมีประสิทธิภาพโดยระบบนี้จะมีจุดสำคัญตรงที่การทำงานประสานกันระหว่างวงจร Analog to Digital และ บอร์ด FPGA โดยส่งผ่านข้อมูลกันผ่าน DMA FIFO เพื่อเพิ่มความเร็วและการจัดระเบียบในการส่งผ่านข้อมูล โดยข้อมูลที่นำเข้าจะมีค่าความเร็วถึง 500000 sa/s โดยการส่งผ่านข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ DMA ประกอบด้วยบัฟเฟอร์ FIFO สองตัว ตัวแรกจะอยู่บนคอมพิวเตอร์โฮสต์และอีกอันจะอยู่บน FPGA หลังจากสร้าง DMA FIFO แล้วเสร็จจะต้องเขียนโค้ดไคโตะแกรมบล็อกเพื่อเขียนข้อมูลและอ่านข้อมูลจากบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น หากกำลังถ่ายโอนข้อมูลจาก FPGA ไปยังโฮสต์ จะต้องเขียนโค้ดบน FPGA ที่เขียนข้อมูลไปยังบัฟเฟอร์และเขียนโค้ดบนโฮสต์ที่อ่านข้อมูลจากบัฟเฟอร์ เนื่องจากการสื่อสาร DMA ขึ้นอยู่กับ FIFO การถ่ายโอนข้อมูลจึงเกิดขึ้นที่ละองค์ประกอบ องค์ประกอบแรกในบัฟเฟอร์หนึ่งคือองค์ประกอบของการถ่ายโอนข้อมูล ภาพประกอบต่อไปนี้แสดงตัวอย่างของการถ่ายโอนข้อมูลในฝั่งของ FPGA และ ฝั่ง Analog to Digital ข้อมูลนี้



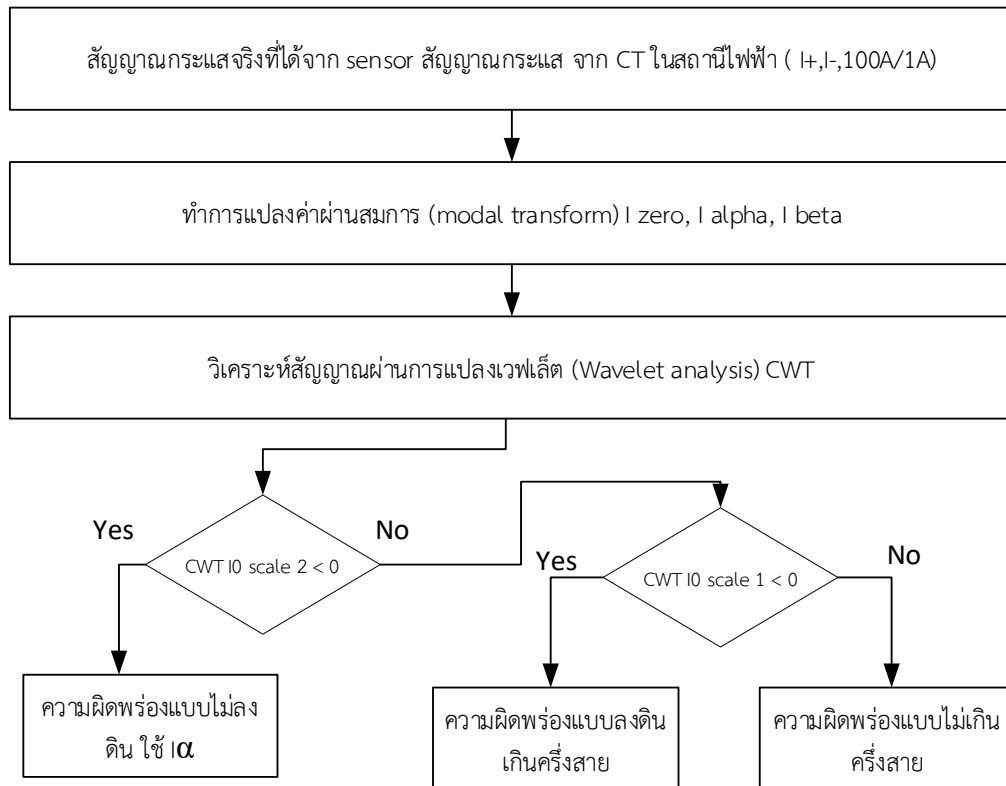
ภาพประกอบที่ 3-15 การส่งผ่านข้อมูลระหว่าง FPGA และ Analog to digital เพื่อบันทึกระยะทาง ในระบบที่ใช้การสุ่มตัวอย่างที่สูงมากมักจะมีปัญหาของการแลกเปลี่ยนข้อมูลทางเทคนิค การเก็บข้อมูลที่ไม่เหมาะสมขณะที่ทำการทดสอบหรือการทำการจำลอง (Simulation) ทำให้การจัดเก็บข้อมูลไม่มีความสอดคล้องกัน การกระจายของข้อมูลทำให้ยากต่อการค้นหาชุดข้อมูล เมื่อไม่สามารถระบุหรือค้นหาชุดข้อมูลได้ เป็นผลให้ต้องสร้างการทดสอบหรือการจำลอง (Simulation) ขึ้นมาใหม่ เป็นผลทำให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบลดลงและต้นทุนการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพื่อรับมือกับปัญหาที่เกิดขึ้น ในการทำงานในบอร์ดทดลอง จึงได้กำหนดแนวทางในการบริหารจัดการข้อมูลทางเทคนิค (TDM) ซึ่งประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ดังนี้

NI TDMS สำหรับการประเมินข้อมูลด้านการจัดเก็บ/บันทึกข้อมูล

NI DataFinder สำหรับการระบุตำแหน่งของชุดข้อมูลก่อนหน้าได้อย่างรวดเร็ว

NI DIAdem or the LabVIEW DataFinder Connectivity Vis เป็นโปรแกรมสำหรับการประมวลผลข้อมูลและสร้างรายงานผล

ซึ่งในกระบวนการของการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดปกติจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงโดยการนำสัญญาณมาแปลงผ่านสมการ (Modal Transform) เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงในระบบสามเฟสและแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เพื่อดูความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากนั้นใช้ความแตกต่างระหว่างรูปคลื่น เพื่อดูระยะทาง

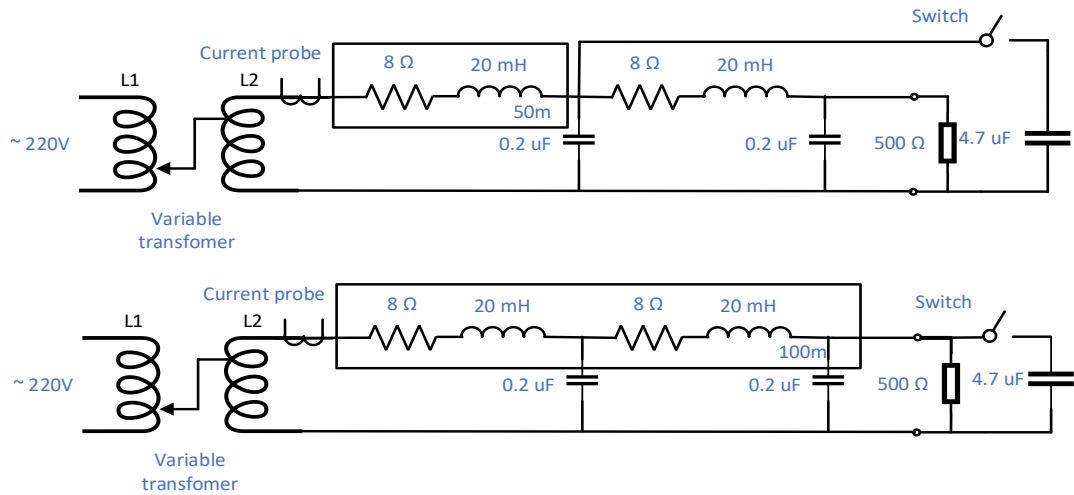


ภาพประกอบที่ 3-16 อัลกอริทึมสำหรับคำนวณระยะทางภายในสายส่ง

โดยที่ I_0 จะใช้คำนวณกับกรณีที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน และ I_α , I_β ใช้กับกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างเฟสต่อเฟส

3.2.7 การประมาณค่าตำแหน่งจากการสร้างแบบจำลองของสายส่งในห้องทดลอง

การทดสอบการเก็บข้อมูลของเครื่องมือเก็บข้อมูลกระแสขณะเกิดความผิดปกติว่ามีประสิทธิภาพและข้อจำกัดในการบันทึกข้อมูลความผิดปกติหรือไม่ โดยทำการสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายจำลองซึ่งใช้สายไฟฟ้าม้วนขดเพื่อสร้างความเหนี่ยวนำ (Inductance) และเพิ่มตัวเก็บประจุ (Capacitance) ขนานกับวงจร เพื่อทำการทดสอบโดยให้เกิดกระแสไม่คงตัวขึ้น (Transient) ขณะทำการเปิดสวิตช์ ตามรูปดังต่อไปนี้ซึ่งในการทดสอบจะทำการเพิ่มระยะของสายไฟโดยแบ่งเป็นการคำนวณระยะครึ่งสาย และปลายสาย เพื่อทดสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และทดสอบการวัดระยะทาง



ภาพประกอบที่ 3-17 วงจรจำลองสายส่งเพื่อทดสอบเครื่องมือเก็บสัญญาณ

การทดสอบเพื่อหาระยะทางจะเริ่มทดสอบที่แรงดัน 15-45 Vac โดยการวัดระยะที่กึ่งกลางและปลายสาย โดยทำการเพิ่มระยะสายส่งและทำการสับสวิตช์เพื่อทำให้เกิดความไม่คงตัวในระบบ โดยตารางการทดสอบโดยตารางการทดสอบสายส่งมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 3-8 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรจำลองสายส่ง

ระดับแรงดัน (V)	ระยะทำการวัด (m)	ระยะสายส่ง (m)	โหลด (Ohms)	Capacity (μF)
10	50	100	500	4.7
20	50	100	500	4.7
40	50	100	500	4.7
10	100	100	500	4.7
20	100	100	500	4.7
40	100	100	500	4.7

ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบจะเริ่มจากการจับสัญญาณกระแส แปลงสัญญาณแบบ Modal Transform แปลงเวฟเล็ท และคำนวณระยะทาง ของการวัดกระแส 3 เฟสที่สถานะปกติของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 5 W 500 Ω โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 15 V โดยใช้การบันทึกที่ 6000 sample

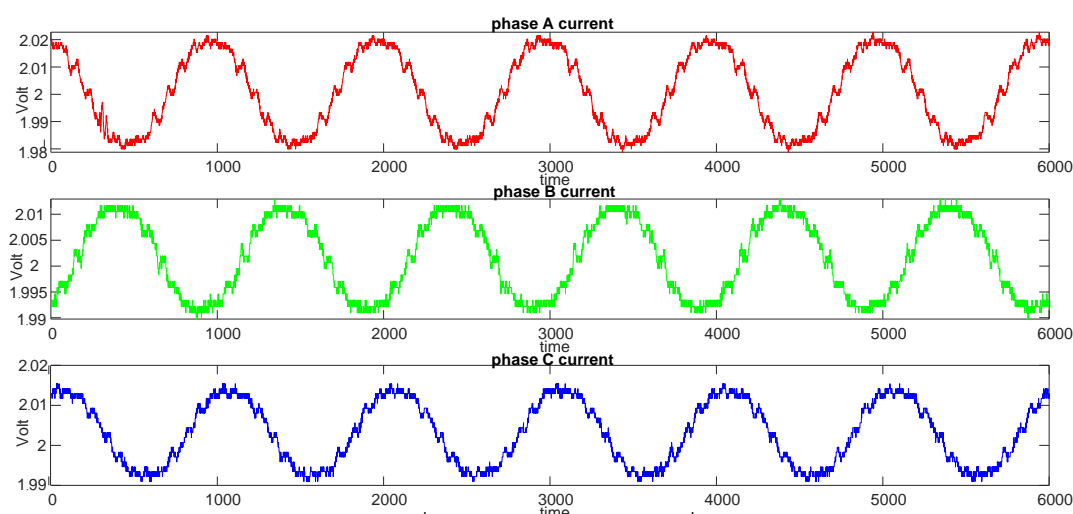
การวัดค่าพารามิเตอร์ในสายส่งโดยใช้ LCR มิเตอร์ที่ความถี่ 100 Hz โดยทำการวัดที่ระยะสายส่ง 50 และ 100 เมตรซึ่งค่าพารามิเตอร์ในสายส่งจำลองมีค่าใกล้เคียงสายส่งจริงโดยมีค่าพารามิเตอร์ในสายส่งดังนี้

ตารางที่ 3-9 การทดลองโดยอ้างอิงจากระยะทาง

ระยะทำการวัด (m)	โหลด (Ohms)	Resistance (Ohms)	Inductance (mH)	Capacitance (nF)
50	500	8.3	1.75	1
100	500	8.3	0.46	4

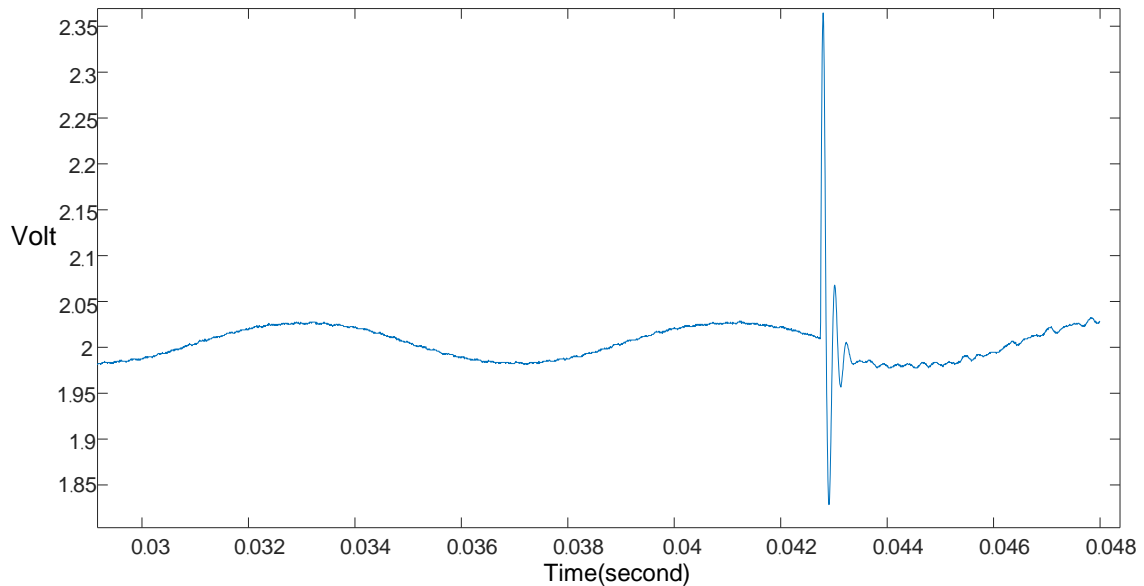
โดยที่ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบจะเริ่มจากการจับสัญญาณกระแส แล้วทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform จากนั้นแปลงเวฟเล็ท และคำนวณระยะทาง

กราฟของการวัดกระแส 3 เฟสที่ถูกอ่านและเขียนโดยบอร์ด Myrio โดยจำลองกระแส 3 เฟสที่สภาวะปกติ โดยทำการบันทึกค่า 6000 sample ซึ่งขณะบันทึกทำการจ่ายโหลดความต้าน 5 W และมีกระแสผ่านตัวต้านทานที่ 0.1 A โดยสัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากตัวเก็บความจุที่อยู่



ภาพประกอบที่ 3-18 สัญญาณกระแสที่สภาวะปกติ

การทดสอบจับสัญญาณไม่คงตัว (Transient) ที่เกิดขึ้นในวงจรแบบจำลองตามภาพประกอบที่ 3-17 ทำการทดสอบการเปิดวงจรที่ตำแหน่งสวิตช์ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับโหลดคาปาซิเตอร์ขนาด 47 μF ซึ่งกระแสจะไหลผ่านวงจรจำลองสายส่งแบบไม่เกินครึ่งสายที่ 50 m และแบบเกินครึ่งสายที่ 100 m โดยทั้งสองวงจรทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดกระแสที่ต้นทางซึ่งทำการทดสอบการวัดที่แรงดัน 10, 20, 40 V โดยใช้เครื่องมือจับสัญญาณที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณที่ 500000 sa/s สามารถจับสัญญาณกระแสแบบไม่คงตัว (Transient) ได้ที่เวลา 0.0425 s โดยรูปแบบสัญญาณแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-19

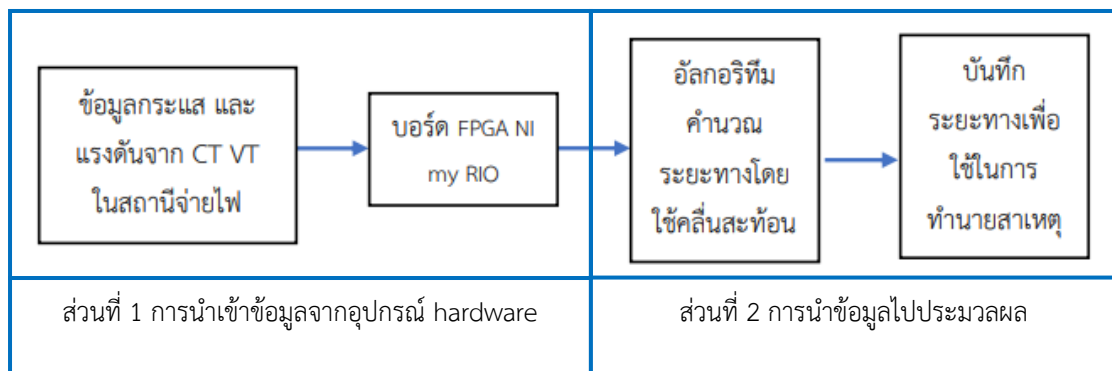


ภาพประกอบที่ 3-19 สัญญาณกระแสที่สภาวะไม่คงตัว

3.2.8 การประมาณค่าตำแหน่งจากการทดสอบกับสายส่งจริง

จากการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการจำลองและศึกษาข้อมูลทำให้ทราบรูปแบบของสัญญาณ และทดสอบสมการของการคำนวณระยะทางของความผิดพลาดซึ่งการเก็บข้อมูลระยะทางความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆทำให้ทราบถึงลักษณะของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยนำไปออกแบบชุดรับสัญญาณและทดสอบกับวงจรจำลองสายส่ง เพื่อดูรูปของสัญญาณว่ามีความคล้ายคลึงหรือสอดคล้องกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์หรือไม่ โดยผลที่ได้จะนำมาศึกษาทดลองกับสายส่งจริงเพื่อทดสอบการคำนวณระยะทางความผิดพลาดจริงที่เกิดขึ้น

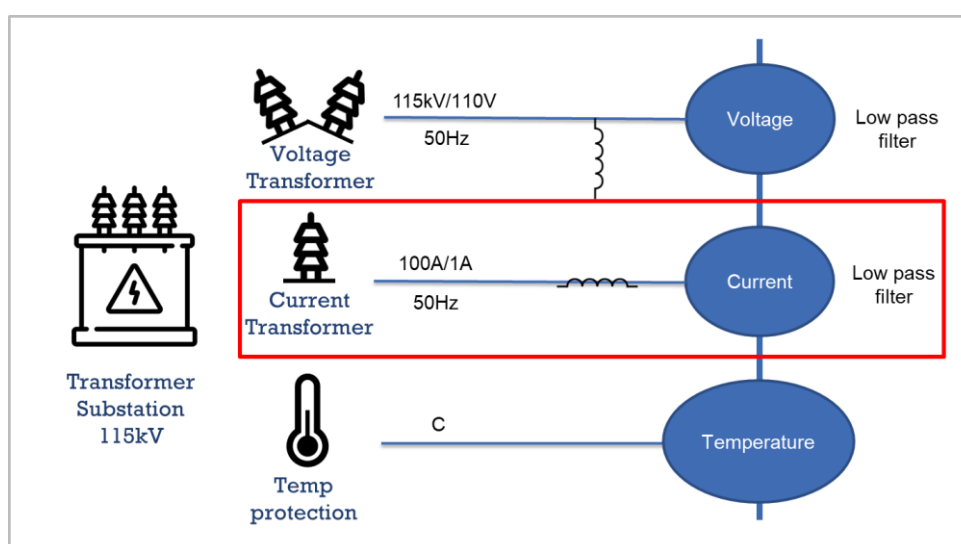
ระบบประมวลผลตำแหน่งความผิดพลาดจะแบ่งเป็นภาคการนำเข้าข้อมูล และภาคประมวลผลซึ่งทั้งสองส่วนจะทำงานไปด้วยกันเพื่อจับสัญญาณที่ผิดปกติในวงจรระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพประกอบที่ 3-20 รูปแบบการทดสอบบันทึกระยะทางในสายส่งจริง

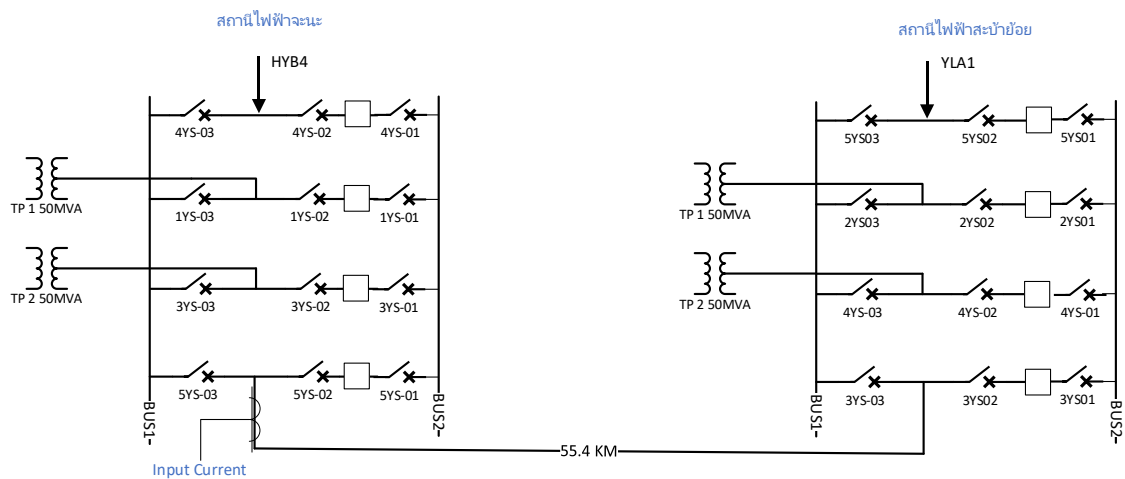
การศึกษาระบบของสถานีไฟฟ้าเพื่อออกแบบเลือกใช้อุปกรณ์วัดกระแส โครงสร้างของสถานี ลานไกและสถานีไฟฟ้า เลือกใช้การจัดรูปแบบ (Configuration) ของสถานีลานไก (Switching Station) และสถานีไฟฟ้า (Substation) จะขึ้นอยู่กับความสำคัญของโหลดที่จ่ายไฟ และความเชื่อถือได้ ของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ รูปแบบของสถานีลานไกและสถานีไฟฟ้าแต่ละแบบ

จากการศึกษาแผนผังพบว่าอุปกรณ์แปลงกระแสที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าแบบต่างๆ เป็นการติดตั้งในลานไกไฟฟ้าและดึงสัญญาณเข้าสู่ห้องควบคุมโดยมีการทำงานแยกกันระหว่างส่วนของสวิตช์ เกียร์โดยมีลักษณะการนำเข้าสู่สัญญาณอนาล็อก ดังนี้



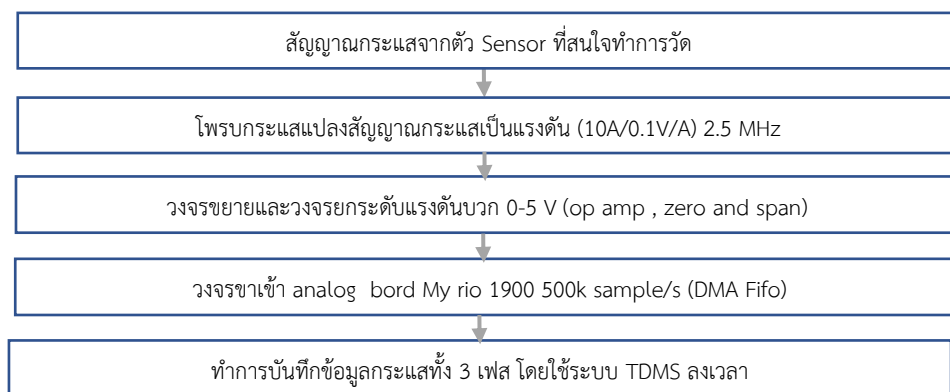
ภาพประกอบที่ 3-21 อุปกรณ์นำเข้าสู่สัญญาณที่สถานีไฟฟ้า

การทดสอบการเก็บติดตั้งกับระบบไลน์ 115 kV ในสายส่ง จะนะ-สะบ้าย้อย ที่รับแรงดันมาจากหม้อแปลง 50 MVA โดยจ่ายไฟไปยังสถานีปลายทางในบัสที่ 5 ที่มีความยาวโดยประมาณ 55.4 km รายละเอียดตามภาพประกอบที่ 3-22 ซึ่งติดตั้งหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ขนาด 100 A/1 A โดยทำการบันทึกค่ากระแสที่ด้านแรงต่ำโดยใช้เครื่องมือบันทึกกระแสที่ได้ทำการออกแบบต่อขนานกับวงจรโดยรูปแบบของสายส่งมีลักษณะดังนี้การทดสอบการเก็บข้อมูลจากการติดตั้งกับระบบไลน์ 115 kV จะนะ-สะบ้าย้อย



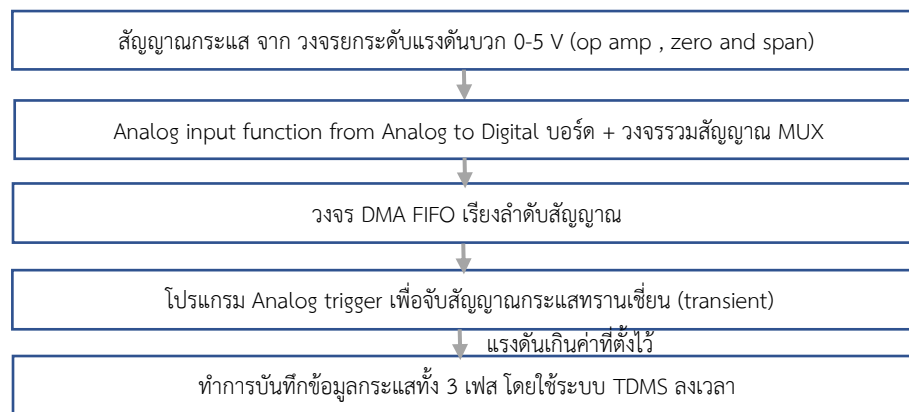
ภาพประกอบที่ 3-22 วงจรสายส่งที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบระยะทาง

การนำข้อมูลที่ได้จากการวัดในสถานีไฟฟ้า ด้วยเครื่องมือจัดเก็บข้อมูล ในปัจจุบันการเก็บข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยังไม่มีเครื่องรับสัญญาณเหล่านี้ จำเป็นจะต้องออกแบบวงจรและส่วนนำเข้าข้อมูล เพื่อนำสัญญาณไปวิเคราะห์ต่อไป



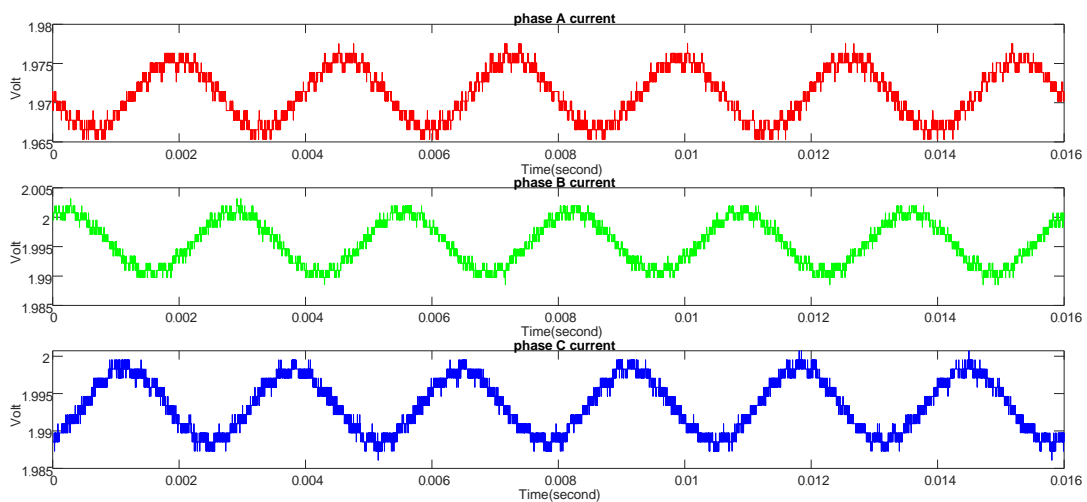
รูปที่ 3-23 รูปแบบการวัดความผิดปกติที่สถานีไฟฟ้า

วงจรและโปรแกรมสุ่มสัญญาณโดยบอร์ด FPGA การนำสัญญาณกระแส 3 เฟส 50 Hz ที่ 8000 sample ที่ได้จากวงจร zero and span ต่อเข้าบอร์ด Analog to Digital โดยส่งค่าที่คำนวณได้ผ่านวงจร DMA FIFO เพื่อสุ่มสัญญาณโดยใช้ FPGA Xynlink-5630 ที่ 500000 sample/s โดยการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณมีการทำงานดังนี้



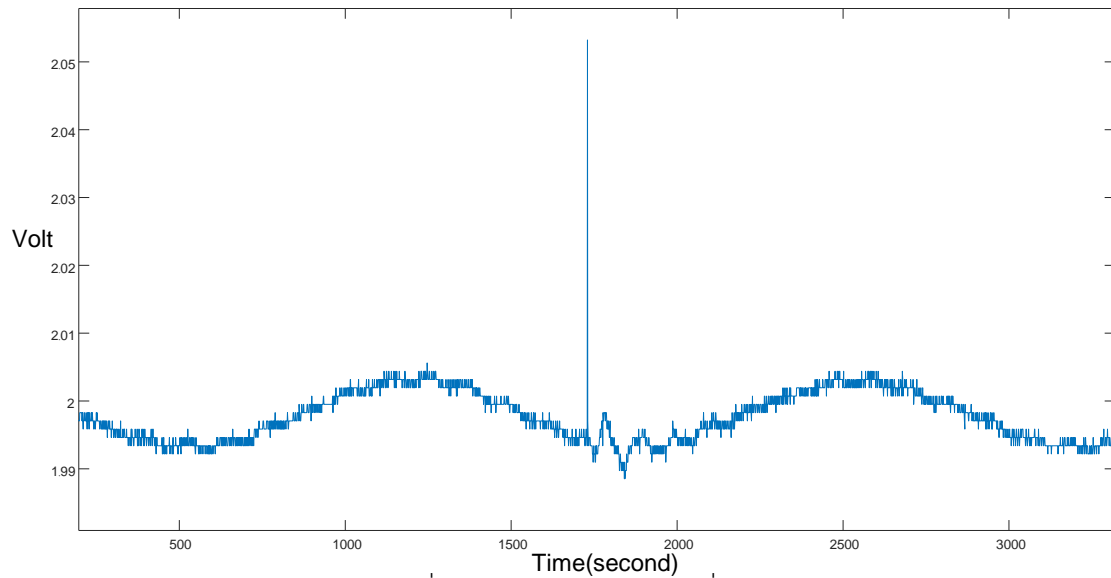
รูปที่ 3-24 รูปแบบการทำงานของโปรแกรมบันทึกสัญญาณความผิดปกติ
ในระบบไฟฟ้า

ลักษณะของรูปกระแสที่บันทึกได้ที่สภาวะปกติของทั้งสามเฟสค่ากระแสด้านปฐมภูมิวัดได้ 19 A เมื่อใช้โพรบกระแสวัดค่าดังกล่าว ผ่านตัววงจรการปรับสัญญาณค่าของโปรแกรมจะทำการวัดได้ มีค่าสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ที่มีค่าประมาณ 2.01 V โดยยกระดับแรงดันให้อยู่ในซีกบวก ที่ 2.00 V



ภาพประกอบที่ 3-25 สัญญาณกระแสที่สภาวะปกติ

การทดสอบจับสัญญาณที่ไม่คงตัว (Transient) ที่เกิดขึ้นในวงจรแบบระบบ 115kV ที่ 8000 sample ซึ่งได้ค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสแบบไม่คงตัวซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบชั่วคราวโดยสัญญาณที่ได้มีลักษณะ ดังนี้



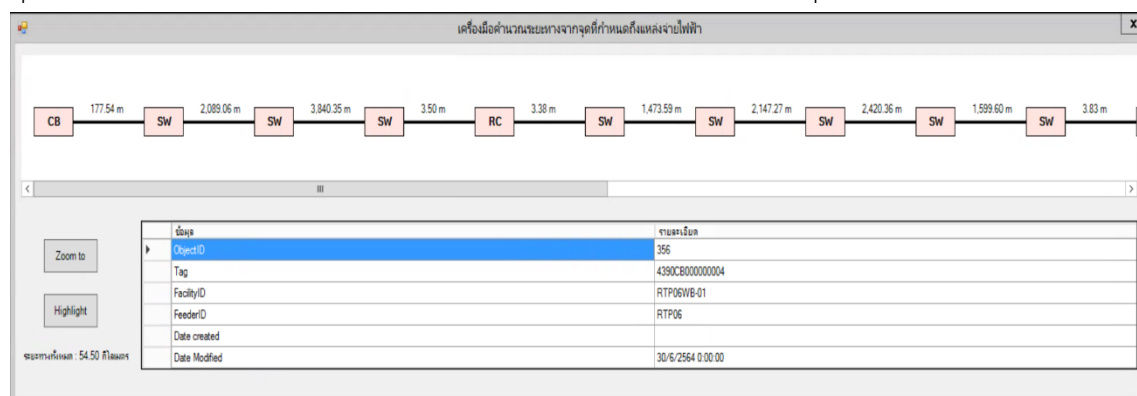
ภาพประกอบที่ 3-26 รูปแบบสัญญาณเมื่อเกิดสภาวะไม่คงตัว

3.3 ระบบ Scada ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระบบควบคุมสั่งการจ่ายไฟฟ้าแบบอัตโนมัติที่เรียกว่า SCADA (Supervisory Control and data Acquisition) เป็นระบบที่ใช้ในการทำการควบคุมการจ่ายไฟฟ้า การบริหารจัดการโหลด และการดูสถานะของการเกิดไฟฟ้าขัดข้อง โดยใช้สั่งการผ่านอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้า ให้จ่ายไฟฟ้าคืนสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วในกรณีที่มีไฟดับ นอกจากนี้ในตัวระบบยังมีการเก็บข้อมูลที่แรงดันกระแส และการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อการจ่ายไฟที่มีประสิทธิภาพ และปลอดภัย

3.4 ระบบการป้องกันสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

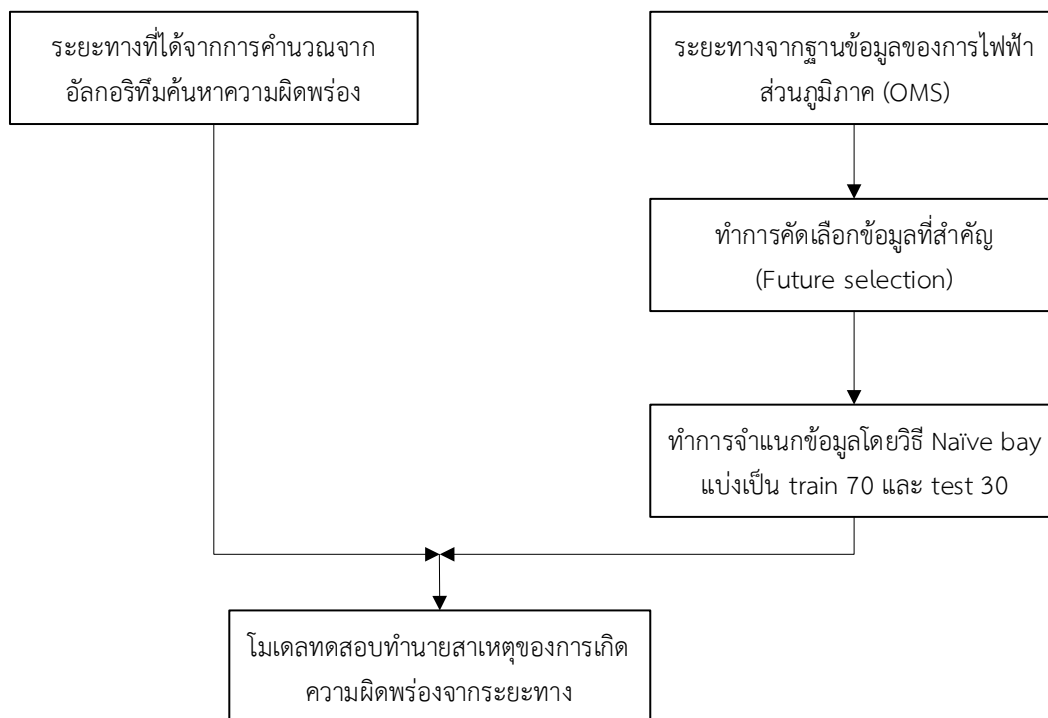
ในการจ่ายไฟของการไฟฟ้าจะแยกจ่ายเป็น feeder โดยแต่ละ feeder จะประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในสายส่งซึ่งในแต่ละ feeder จะประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกัน ดังนี้



ภาพประกอบที่ 3-27 โปรแกรมติดตามสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.5 การทำนายข้อมูลของการเกิดความผิดปกติโดยใช้ระยะทาง

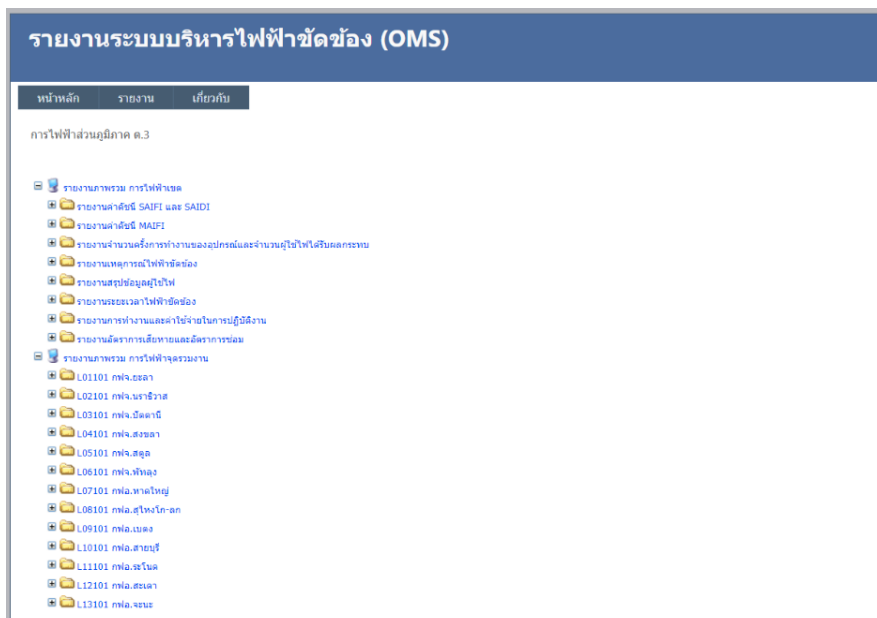
ในการทำนายผลของความผิดปกติในระบบจำหน่ายจะใช้ผลจากการทดลอง เป็นระยะทาง โดยจะนำเข้ามาทดสอบโดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลการแก้กระแสไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (OMS) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุที่น่าจะเกี่ยวข้องกับระยะทางนั้นโดยมีแผนผังการทำงาน ดังนี้



ภาพประกอบที่ 3-28 แผนผังการทำงานของระบบทำนายสาเหตุไฟฟ้าขัดข้อง

3.5.1 จากข้อมูลข้างต้นได้ออกแบบการทดลองและนำข้อมูลของการทำ Feature Selection มาประยุกต์ในงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัย คือ การค้นหาความผิดปกติในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1) การเตรียมข้อมูล และเลือกข้อมูลโดยวิธี Information Gain เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องที่เกิดขึ้นในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยข้อมูลชนิดนี้ทำการเก็บค่าได้จากบันทึกจากระบบแจ้งไฟฟ้าขัดข้องประจำการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพประกอบที่ 3-29 รายงานระบบบริหารไฟฟ้าขัดข้อง (OMS)

1.1 การเตรียมข้อมูลและเลือกข้อมูลที่สำคัญ (Feature Selection) จากตารางการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระบบ OMS ซึ่งประกอบด้วย

หมายเลขเหตุการณ์	คือ	รหัสระบุเหตุการณ์ที่ใช้เปิดใบงาน
ลำดับ	คือ	ลำดับเหตุการณ์เรียงตามวันเวลา
วันเวลาที่ไฟดับ	คือ	วันที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับ
รวมเวลาไฟดับ	คือ	ระยะเวลาที่ทำการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง
รหัสอุปกรณ์ที่ทำงาน	คือ	รหัสอุปกรณ์ ที่ทำการตัดกระแส
ฟีดเดอร์	คือ	สายการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า
ประเภทการทำงาน	คือ	การสร้างใบสั่งงานในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง
รายละเอียด	คือ	เหตุไฟฟ้าขัดข้องรายการแก้ไขงาน
กฟฟ.ที่รับผิดชอบ	คือ	สำนักงานการไฟฟ้าที่เกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง
สภาพอากาศ	คือ	รายละเอียดสภาพอากาศขณะเกิดไฟดับ
สถานที่จุดเกิดเหตุ	คือ	สถานที่ที่เกิดไฟฟ้าขัดข้อง
ค่าโหลด	คือ	รายการกำลังไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ
ประเภทเหตุการณ์	คือ	ลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
ระยะทาง	คือ	ระยะจริงทางจากสถานีไปถึงจุดที่เกิดความผิดปกติ

1.3 นำข้อมูลแยกตามตาราง เพื่อกำหนดค่า Features และ Values ซึ่งจะได้จำนวนของแต่ละข้อมูลดังรายละเอียดดังนี้ โดย class เป็นสาเหตุของการเกิดความผิดปกติเพราะต้องการทราบว่าผลของหัวข้อไหน มีความสำคัญมากที่สุด Features = 6 Class features = 1 Class Values =15 โดยสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3-10 สรุป feature ของข้อมูล

Features	Values
เวลา	เวรกลางวัน เวรบ่าย เวรกลางคืน
ประเภทการทำงาน	เป็นประเภทของอุปกรณ์ที่ทำงานภายในระบบ
ระยะทางของการเกิดความผิดปกติ	ค่ากิโลเมตรจากต้นทางไปถึงจุดเกิดความผิดปกติ
สาเหตุ	ทราบสาเหตุ สันนิษฐาน
สภาพอากาศ	อากาศปกติ ฝนตก อากาศชื้น / หมอก ฝนตก ลมแรง ฝนตก ฟ้าคะนอง
รายละเอียด	อุปกรณ์ชำรุด สัตว์ ต้นไม้ การกระทำโดยมนุษย์ ภัยธรรมชาติ ปรับปรุงระบบ

1.4 การทดสอบการคำนวณความสำคัญของข้อมูลโดยวิธี Information Gain เพื่อวัดประสิทธิภาพของข้อมูล ซึ่งจะทดสอบค่าตามข้อมูลเหตุการณ์ เปรียบเทียบข้อมูล 4 ส่วนกับส่วนรายละเอียด วิเคราะห์ใน โปรแกรม Python เพื่อหาค่าของจำนวนข้อมูลใน 1 เดือน 60 รายการ

1.5 การออกแบบค่าตารางคำนวณค่า IG เพื่อดูความเหมาะสมและความสอดคล้องกันของข้อมูลที่จะให้ค่าน้ำหนักมากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นของข้อมูล (Class) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ทำการสอนจะมี เวลา, ประเภทการทำงาน, ระยะทางของการเกิดความผิดปกติ, สาเหตุ, สภาพอากาศ, ส่วนข้อมูลที่ใช้กำหนดชั้นของข้อมูล จะใช้รายละเอียดของการเกิดความผิดปกติ โดยมีรูปแบบตารางดังต่อไปนี้

ลำดับที่	Features	ค่า IG
1	เวลา	คำนวณโดยใช้หลักการของ Information Gain
2	ประเภทการทำงาน	
3	ระยะทางของการเกิดความผิดพลาด	
4	สาเหตุ	
5	สภาพอากาศ	
	Class รายละเอียด	อุปกรณ์ชำรุด,สัตว์,ต้นไม้,การกระทำโดยมนุษย์,ภัยธรรมชาติ,ปรับปรุงระบบ ฯลฯ

ตารางที่ 3-11 การออกแบบการทดสอบหาค่า information gain

2. การ classification และเลือกข้อมูลโดยวิธี Naïve Bayes โดยมีการทดสอบทำนายที่ระยะ 20 – 50 km โดยใช้ชั้นข้อมูลของรายละเอียดของการเกิดความผิดพลาด ซึ่งระยะทางที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาสาเหตุดังนี้

ตารางที่ 3-12 การทดสอบทำนายสาเหตุโดยอ้างอิงระยะทาง

ระยะทางในการทดสอบ (km)	รายละเอียดของการเกิดความผิดพลาด/ทำนาย
20	ผลการทำนาย(อุปกรณ์ชำรุด,สัตว์,ต้นไม้,การกระทำโดยมนุษย์,ภัยธรรมชาติ,ปรับปรุงระบบ, ฯลฯ)
30	
40	
50	

3. การทดสอบความแม่นยำของข้อมูลโดยการทดสอบกับหัวข้อทั้งหมดโดยการสุ่มตัวอย่างทำการทำนายที่ 70 และทดสอบ 30 โดยทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลโดยนำมาหาค่าความแม่นยำของแบบจำลอง

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

การทดลองเก็บผลการทดสอบของการคำนวณระยะทางของความผิดพลาดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) ผลจากการคำนวณระยะทางด้วยแบบจำลองด้วยระบบคอมพิวเตอร์ 2) ผลจากการคำนวณระยะทางโดยทดลองจากแบบจำลองสายส่งในห้องทดลอง และ 3) ผลจากการเก็บข้อมูลระยะทางจากการเก็บข้อมูลในสายส่งจริง โดยการเก็บผลทดลองในแต่ละส่วนเป็นการใช้หลักการที่เกี่ยวข้องและทดสอบอัลกอริทึมสำหรับคำนวณระยะทางความผิดพลาด

4.2 การประเมินผลการทดสอบ การทำนายระยะทาง จะคำนวณค่าความแม่นยำ (Accuracy)

สำหรับการประเมินผลการทดสอบการประมาณค่าตำแหน่งความผิดพลาดโดยใช้การคำนวณคลื่นจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ร่วมกับการใช้ข้อมูลจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าโดยทำการเปรียบเทียบความผิดพลาดจากการคำนวณและความผิดพลาดจริงโดยค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\%error = \frac{|d_{calculate} - d_{actual}|}{d_{actual}} \times 100 \quad (4-1)$$

$\%error$	ค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อน
$d_{calculate}$	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
d_{actual}	ค่าระยะทางจริง

ในส่วนของการจำแนกประเภทจะแบ่งเป็น การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Training Set และ Testing Set ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 โดยค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%error = \frac{|N_{test} - N_{foretel}|}{N_{test}} \times 100 \quad (4-2)$$

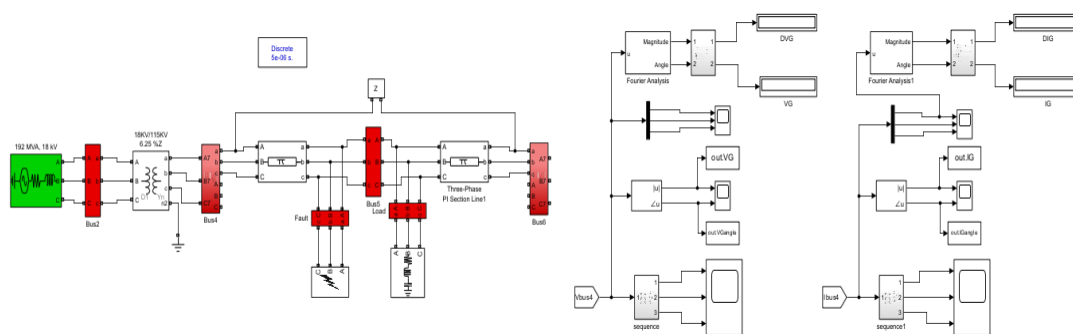
$\%error$	ค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อน
N_{test}	จำนวนข้อมูลที่นำมาทดสอบ
$N_{foretel}$	จำนวนที่ทำนายได้ถูกต้อง

4.3 ผลจากการทำแบบจำลองในระบบคอมพิวเตอร์

4.3.1 การคำนวณระยะทางของความผิดพลาดวิธีการคำนวณอิมพีแดนซ์

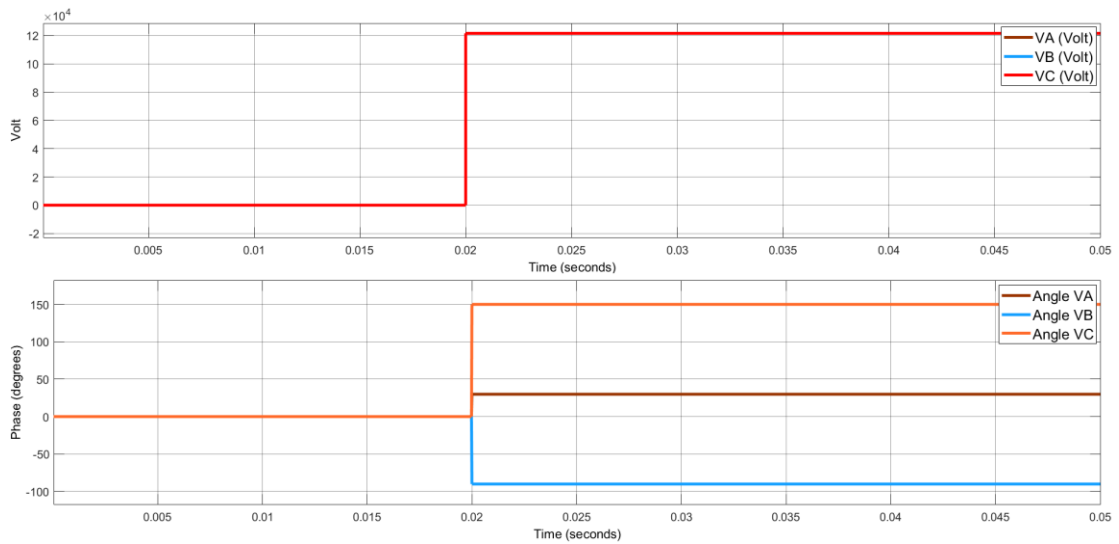
การคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาด โดยใช้วิธีการคำนวณแบบอิมพีแดนซ์ซึ่งมีขั้นตอนตามภาพประกอบที่ 3-6 ในหลักการนี้เป็นการของการคำนวณด้วยกฎของเคอร์ชอร์ฟโดยวิธีการนี้เป็นการคำนวณแบบง่ายแต่จะต้องรวบรวมข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างมีจำนวนมากส่งผลให้จำเป็นต้องมีการติดตามค่าพารามิเตอร์ให้ถูกต้องหากมีการรวบรวมพารามิเตอร์ที่ผิดพลาดอาจจะส่งผลให้การจำลองระยะทางมีความผิดพลาดตามไปด้วย ซึ่งในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนำวิธีการนี้มาใช้ในการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาด โดยค่าพารามิเตอร์ที่ต้องเก็บข้อมูลมีค่าต่างๆ ดังนี้

ในการทดสอบวัดสัญญาณที่ระดับแรงดัน 115 kV แบบปลายเดี่ยวที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่บัสอ้างอิง (I_G bus 4) เป็นการวัดสัญญาณกระแสและแรงดัน จะได้รูปแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_A, V_B, V_C และ I_A, I_B, I_C ที่ได้จากแบบจำลองโดยค่าที่ทำการวัดจะใช้พิกัดแรงดันและองศาขณะที่อยู่ในรูปการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัว



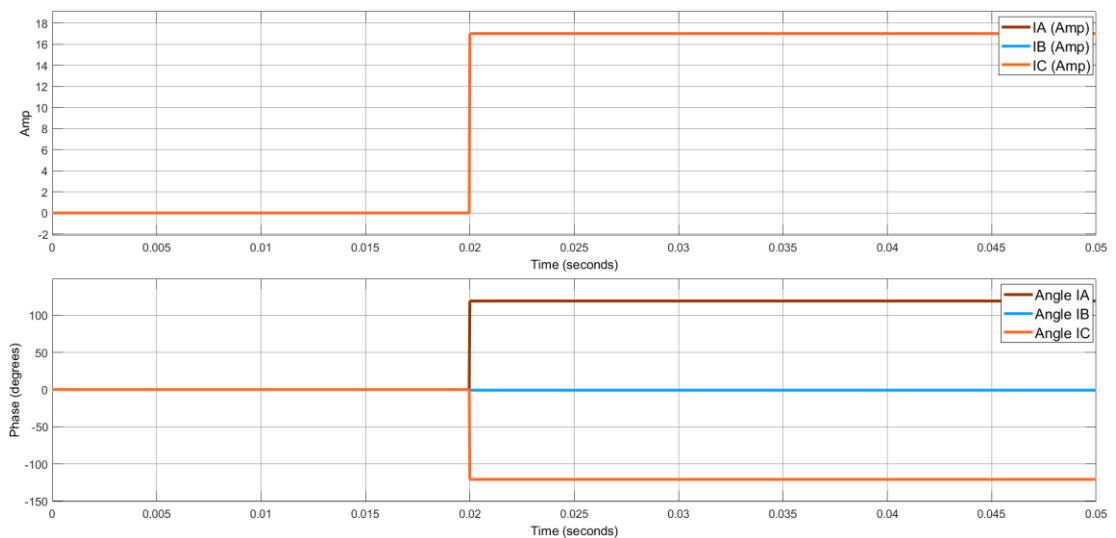
ภาพประกอบที่ 4-1 รูปแบบการจำลองแบบจำลองแบบปลายเดี่ยวด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

การวัดค่าแรงดันและกระแสที่บัสอ้างอิงโดยนำค่าดังกล่าวมาทำการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ที่ 50 Hz ซึ่งการวัดแรงดันในสภาวะคงตัว โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดผ่านหม้อแปลงกำลัง โดยกำหนดแรงดันขาออกให้มีขนาด 115 kV โดยผลจากการแปลงฟูเรียร์จะได้ค่าแรงดันทั้งค่าขนาดแรงดันและมุมเฟส ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ที่เวลา 0.02 s และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ขนาดแรงดัน 121 kV ซึ่งเป็นเวลาที่เครื่องกำเนิดเริ่มต้นทำงานจึงมีการเปลี่ยนแปลงได้ดังภาพประกอบที่ 4-2



ภาพประกอบที่ 4-2 สัญญาณแรงดันในสภาวะคงตัว ที่ทำการแปลงฟูเรียร์ V_A , V_B , V_C 115 kV

ผลการจำลองในคอมพิวเตอร์รูปแบบสัญญาณกระแสไฟฟ้าในบัสอ้างอิง (I_G bus 4) โดยค่า I_A , I_B , I_C ที่ได้จากแบบจำลองขณะที่อยู่ในสภาวะคงตัวโดยค่าที่ทำการวัดจะใช้พิกัดกระแสที่ทำการแปลงฟูเรียร์ที่ 50 Hz ซึ่งจะแสดงได้ทั้งค่าขนาดและมุมเฟสโดยลักษณะของสัญญาณกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับแรงดันที่เวลา 0.02 s แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-3 ผลของการวัดแรงดันและกระแสที่บัสอ้างอิงและบัสโหลดแสดงได้ตามตารางที่ 4-1

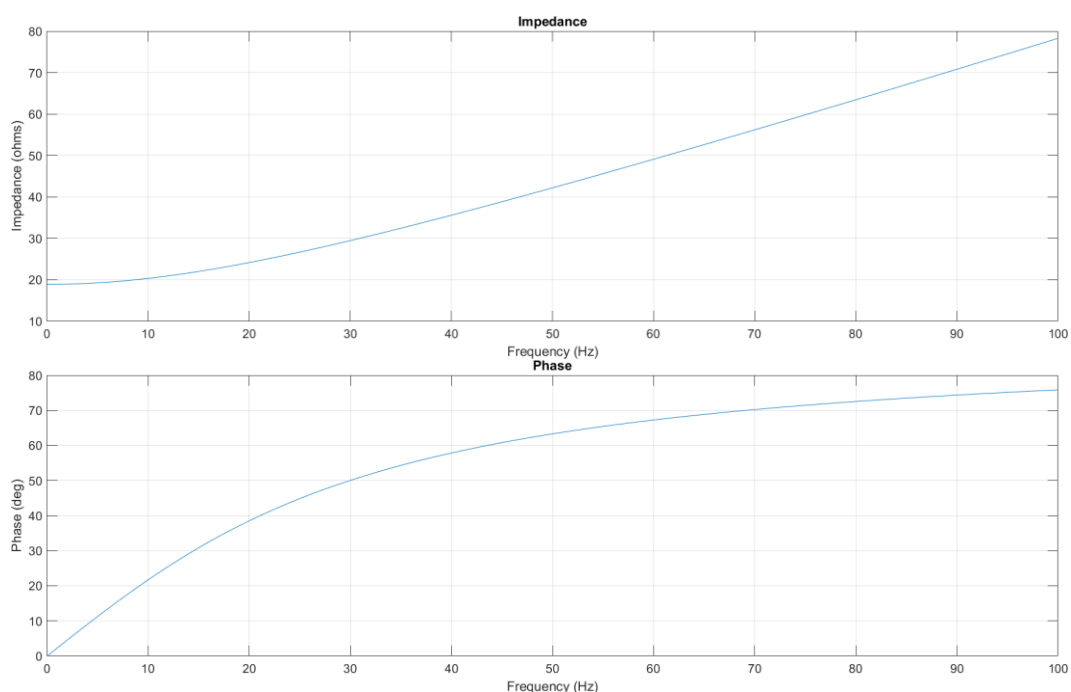


ภาพประกอบที่ 4-3 ภาพสัญญาณกระแสในสภาวะไม่คงตัว ที่ทำการแปลงฟูเรียร์ I_A , I_B , I_C ที่ได้จากการจำลอง

ตารางที่ 4-1 ผลการวัดแรงดันและกระแสที่สภาวะคงตัวที่บัสอ้างอิง

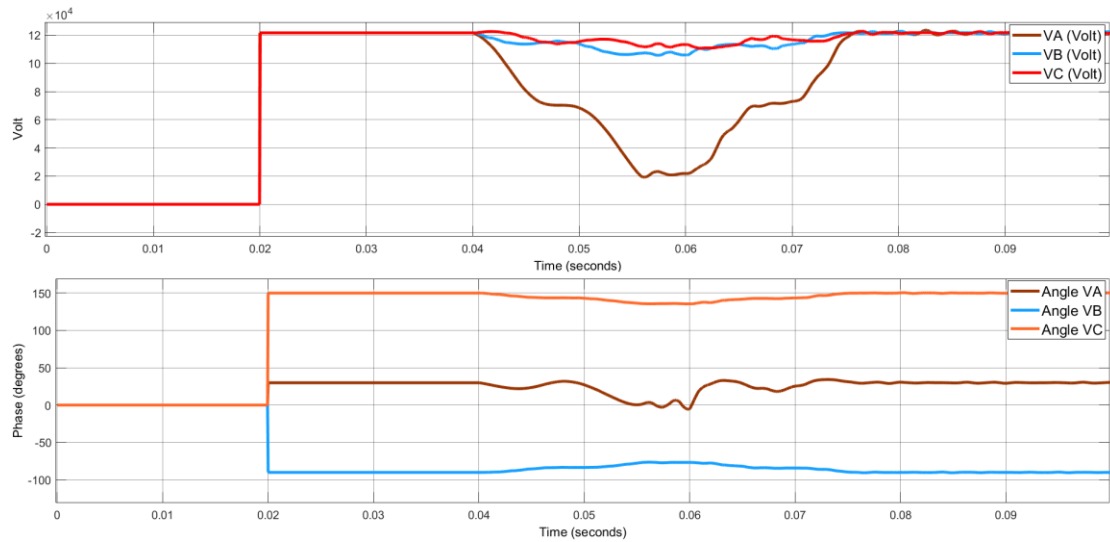
สถานะ	จุดที่ทำการวัด	ค่าที่ได้
แรงดัน เฟส A (V_A)	BUS 4	121412.05 V มุม 29.93 องศา
แรงดัน เฟส B (V_B)	BUS 4	121412.05 V มุม -90.07 องศา
แรงดัน เฟส C (V_C)	BUS 4	121412.05 V มุม 149.93 องศา
กระแสเฟส A (I_A)	BUS 4	15.29 A มุม 119.08 องศา
กระแสเฟส B (I_B)	BUS 4	15.29 A มุม -0.92 องศา
กระแสเฟส C (I_C)	BUS 4	15.29 A มุม -120.92 องศา
กระแสโหลดเฟส A (I_{Aload})	Load	0.09 A มุม 29.88 องศา
กระแสโหลดเฟส B (I_{Bload})	Load	0.09 A มุม -90.12 องศา
กระแสโหลดเฟส C (I_{Cload})	Load	0.09 A มุม 149.88 องศา

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง โดยการอ้างอิงตามค่านิยมรูปแบบของการคำนวณตามตารางที่ 3-2 ซึ่งอ้างอิงจากผู้ผลิตสายส่งซึ่งได้ทำการระบุอยู่ในแบบจำลองสายส่งตามภาพประกอบที่ 4-1 โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายที่ทำการต่อโหลดการใช้ไฟฟ้าจะใช้การวัดจากอุปกรณ์ (Measurement Impedance) โดยทำการวัดที่ 50 Hz โดยค่าอิมพีแดนซ์ในแบบจำลองที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่ทำการจำลอง ซึ่งมีผลโดยตรง หากความถี่มีค่าสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้นเนื่องจากค่าตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปรผันตรงตามค่าความถี่



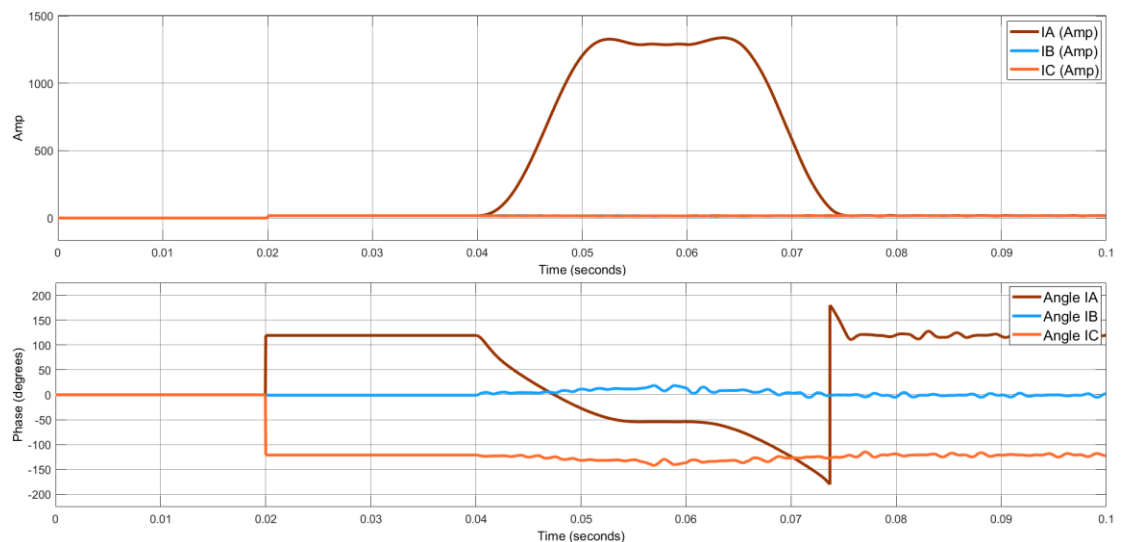
ภาพประกอบที่ 4-4 กราฟผลการคำนวณอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องมือ Measurement Impedance

การวัดค่าแรงดันและกระแสที่บัสอ้างอิงเพื่อการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ที่ 50 Hz ซึ่งการวัดแรงดันในสภาวะไม่คงตัวเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นที่เวลา 0.04 s ในระบบจำหน่าย จึงเกิดสัญญาณไม่คงตัว (Transient) เกิดขึ้นในระบบ 3 เฟส



ภาพประกอบที่ 4-5 แรงดัน V_A , V_B , V_C ที่ได้จากการจำลอง

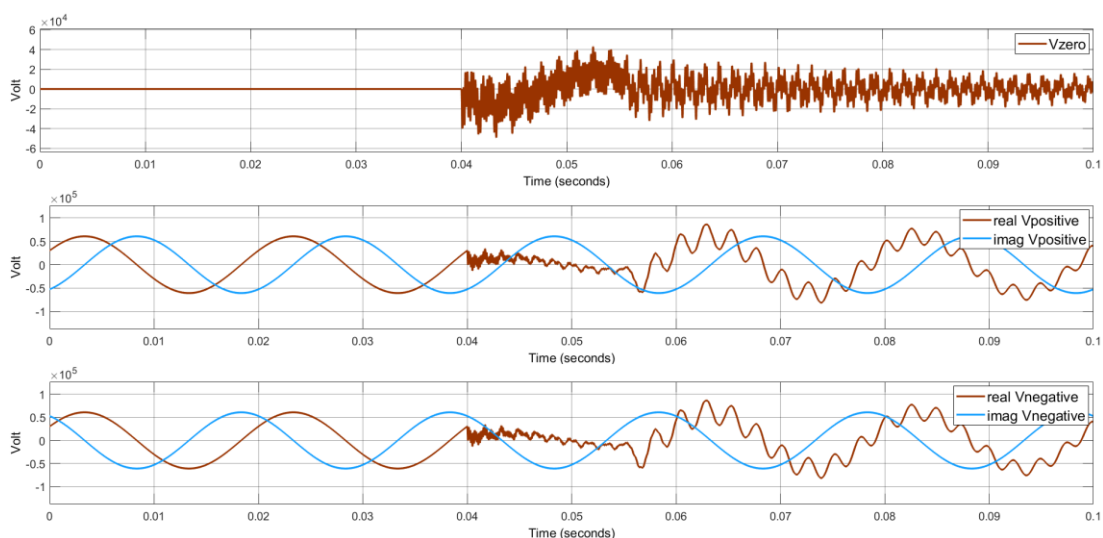
โดยผลการจำลองแรงดันในสภาวะไม่คงตัวในระบบไฟฟ้า ภาพประกอบที่ 4-5 เกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.04 s โดยการจำลองแรงดันในสภาวะไม่คงตัวในระบบไฟฟ้า เกิดความผิดพลาด ที่เวลา 0.04 s โดยรูปแบบคลื่นแรงดันจะมีการแกว่งจนเข้าสู่จนอยู่ในสภาวะสมดุลที่เวลา 0.075 s โดยให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ระยะทาง 10 km



ภาพประกอบที่ 4-6 กระแส I_A , I_B , I_C ที่ได้จากการจำลอง

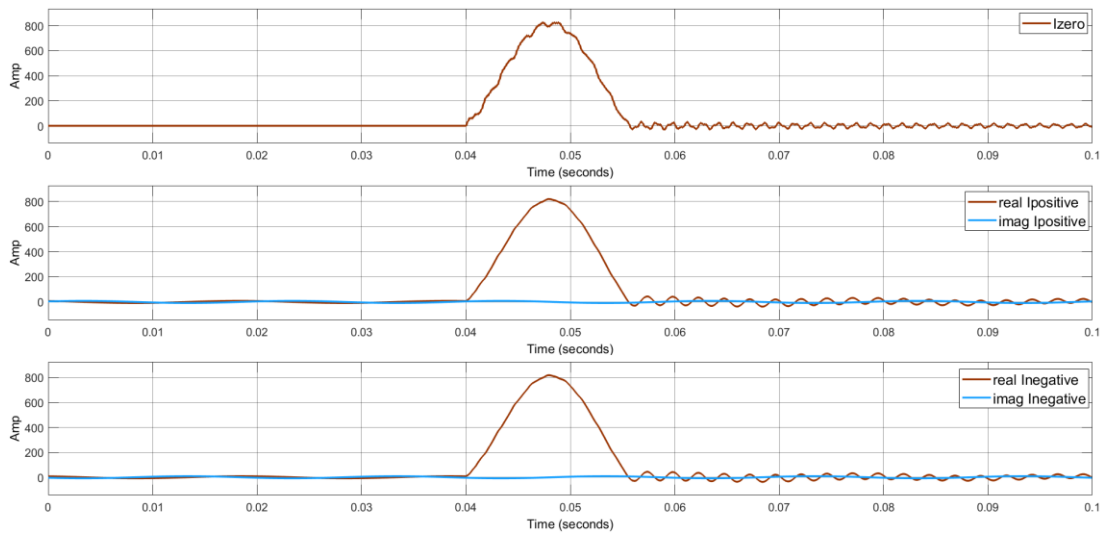
โดยผลการจำลองกระแสขณะเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ตามภาพประกอบที่ 4-6 เกิดความผิดปกติที่เวลา 0.04 s โดยรูปแบบคลื่นจะมีการแกว่งจนเข้าสู่ศูนย์อยู่ในสถานะสมดุลที่เวลา 0.07 s โดยให้ความผิดปกติเกิดขึ้นในการจำลองที่ระยะทาง 10 km

การวัดค่าแรงดันที่บัสอ้างอิงเพื่อการคำนวณ ซีควอนซ์ Zero, Positive, Negative จะเป็นการนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์นำมาคำนวณในรูปแบบของซีควอนซ์ที่คล้ายกับการแปลงแบบคลาร์ก ตามสมการที่ 2-1 ซึ่งการแปลงนี้จะใช้กับการคำนวณความผิดปกติแบบอิมพีแดนซ์ โดยรูปแบบของซีควอนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบ Zero จะเกิดขึ้นกับรูปแบบของความผิดปกติชนิดลงดิน โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์แบบทันทีทันใดเนื่องจากเกิดความผิดปกติที่มีความไม่สมมาตรกันของแรงดัน ส่วน Positive, Negative จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับ Zero แต่จะน้อยกว่า



ภาพประกอบที่ 4-7 V_{Zero} , $V_{Positive}$, $V_{Negative}$

รูปแบบของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ทำการวัดที่บัสอ้างอิงจะเป็นการนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์นำมาคำนวณในรูปแบบของซีควอนซ์ที่คล้ายกับการแปลงแบบคลาร์ก ทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2-2 ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.04 s โดยมีลักษณะเกิดสัญญาณกระแสพุ่งสูงขึ้นแบบทันทีทันใด ซึ่งมีจุดสูงสุดที่เวลา 0.047 s เนื่องจากเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรแบบลงดิน จึงทำให้เกิดกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ทั้งสามซีควอนซ์มีค่าเท่ากันทั้ง Zero, Positive, Negative โดยค่าซีควอนซ์ที่ทำการคำนวณได้จะมีลักษณะของสัญญาณกระแสไปในรูปแบบเดียวกันทั้งหมด ดังแสดงได้ตามภาพประกอบที่ 4-8



ภาพประกอบที่ 4-8 I_{Zero} , $I_{Positive}$, $I_{Negative}$

โดยผลการจำลองการเกิดความผิดปกติที่ระยะใกล้จุดต่อรวมที่ระยะ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 จะถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นไปจนตลอดความยาวในสายส่ง โดยทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่บัสอ้างอิงจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงเวลาของการเกิดความผิดปกติที่มีความแตกต่างกับสัญญาณปกติที่สภาวะคงตัวตามภาพประกอบที่ 4-2, 4-3 โดยการคำนวณจะทำการเลือกค่ากระแสและแรงดันของสัญญาณในช่วงที่เข้าสู่ศูนย์ตั้งแต่ 0.07 s เป็นต้นไปโดยทำการวัดสัญญาณเทียบแกนเวลาจะได้ค่าพิกัดตามตาราง ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-2 ผลการวัดค่าแรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดปกติ

แบบ 1 เฟสลงดิน

Line section (km)	Fault distance (km)	Simple reactance			Takagi		
		V_G (kV)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)	V_G (kV)	I_G (A)	ΔI_G (A)
40	10	11.84+1.23i	798.30-1167i	0.564+0.096i	11.84+1.23i	798.30-1167i	806.60-1182i
35	15	17.06+2.22i	803.60-1102i	0.564+0.096i	17.06+2.22i	803.60-1102i	811.90-1117i
30	20	21.84+3.05i	802.90-1042i	0.564+0.096i	21.84+3.05i	802.90-1042i	811.10-1057i
25	25	26.17+3.61i	797.80-986.30i	0.564+0.096i	26.17+3.61i	797.80-986.30i	806.10-1001i
20	30	30.16+5.18i	789.80-935.40i	0.564+0.096i	30.16+5.18i	789.80-935.40i	798-950.20i
15	35	33.85+5.66i	779.50-888.80i	0.564+0.096i	33.85+5.66i	779.50-888.80i	787.80-903.70i
10	40	37.24+7.23i	767.70-846.10i	0.564+0.096i	37.24+7.23i	767.70-846.10i	776-860.90i

ตารางที่ 4-3 ผลการวัดค่าแรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาด
แบบเฟสต่อเฟสลงดิน

Line section (km)	Fault distance (km)	Simple reactance			Takagi		
		V_G (kV)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)	V_G (kV)	I_G (A)	ΔI_G (A)
40	10	12.22+2.86i	1861-899.5i	0.564+0.096i	12.22+2.86i	1861-899.5i	1869-914.4i
35	15	18.14+4.56i	1884-841.4i	0.564+0.096i	18.14+4.56i	1884-841.4i	1893-856.3i
30	20	23.84+6.76i	1897-785.5i	0.564+0.096i	23.84+6.76i	1897-785.5i	1905-800.3i
25	25	29.29+8.54i	1899-732i	0.564+0.096i	29.29+8.54i	1899-732i	1097-746.8i
20	30	34.46+10.58i	1894-681.2i	0.564+0.096i	34.46+10.58i	1894-681.2i	1902-696.1i
15	35	39.37+13.28i	1884-633.1i	0.564+0.096i	39.37+13.28i	1884-633.1i	1892-648i
10	40	43.98+15.27i	1868-587.8i	0.564+0.096i	43.98+15.27i	1868-587.8i	1877-602.7i

ตารางที่ 4-4 ผลการวัดค่าแรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาด
แบบ 3 เฟสลงดิน

Line section (km)	Fault distance (km)	Simple reactance			Takagi		
		V_G (kV)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)	V_G (kV)	I_G (A)	ΔI_G (A)
40	10	12.22+2.89i	1861-899.5i	0.564+0.096i	12.22+2.89i	1861-899.5i	1869-914.4i
35	15	18.14+4.564i	1884-841i	0.564+0.096i	18.14+4.564i	1884-841i	1893-856.3i
30	20	23.84+6.76i	1896-785.5i	0.564+0.096i	23.84+6.76i	1896-785.5i	1905-800.4i
25	25	29.29+8.54i	1899-732i	0.564+0.096i	29.29+8.54i	1899-732i	1907-746.8i
20	30	34.46+10.58i	1894-981.2i	0.564+0.096i	34.46+10.58i	1894-981.2i	1902-696.1i
15	35	39.37+13.28i	1884-633.1i	0.564+0.096i	39.37+13.28i	1884-633.1i	1892-648i
10	40	43.98+15.27i	186-587.8i	0.564+0.096i	43.98+15.27i	186-587.8i	1877-602.7i

ตารางที่ 4-5 ผลการวัดค่าแรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาดแบบเฟสต่อเฟส

Line section (km)	Fault distance (km)	Simple reactance			Takagi		
		V_G (kV)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)	V_G (kV)	I_G (A)	ΔI_G (A)
40	10	12.22+2.89i	1861-899.5i	0.564+0.096i	12.22+2.89i	1861-899.5i	1869-914.4i
35	15	18.14+4.564i	1884-841i	0.564+0.096i	18.14+4.564i	1884-841i	1893-856.3i
30	20	23.84+6.76i	1896-785.5i	0.564+0.096i	23.84+6.76i	1896-785.5i	1905-800.4i
25	25	29.29+8.54i	1899-732i	0.564+0.096i	29.29+8.54i	1899-732i	1907-746.8i
20	30	34.46+10.58i	1894-981.2i	0.564+0.096i	34.46+10.58i	1894-981.2i	1902-696.1i
15	35	39.37+13.28i	1884-633.1i	0.564+0.096i	39.37+13.28i	1884-633.1i	1892-648i
10	40	43.98+15.27i	186-587.8i	0.564+0.096i	43.98+15.27i	186-587.8i	1877-602.7i

ตารางที่ 4-6 ผลการวัดค่าแรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ที่บัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาดแบบ 3 เฟส

Line section (km)	Fault distance (km)	Simple reactance			Takagi		
		V_G (kV)	I_G (A)	Z_{L1} (Ohm)	V_G (kV)	I_G (A)	ΔI_G (A)
40	10	-8.371+8.784i	-90.1+1956i	0.564+0.096i	-8.371+8.784i	-90.1+1956i	-81.81+1941i
35	15	-12.6+12.70i	-133.1+1914i	0.564+0.096i	-12.6+12.7i	-133.1+1914i	-124.8+1899i
30	20	-16.83+15.65i	-173.6+1872i	0.564+0.096i	-16.83+15.65i	-173.6+1872i	-165.3+1858i
25	25	-21.06+19.4i	-211.3+1831i	0.564+0.096i	-21.06+19.4i	-211.3+1831i	-203+1816i
20	30	-25.24+22.56i	-246.1+1790i	0.564+0.096i	-25.24+22.56i	-246.1+1790i	-237.8+1775i
15	35	-29.40+24.37i	-278+1749i	0.564+0.096i	-29.40+24.37i	-278+1749i	-269.7+1734i
10	40	33.48+27.48i	-307.1+1709i	0.564+0.096i	33.48+27.48i	-307.1+1709i	-298.9+1694i

จากการคำนวณตามวิธีแบบ Simple Reactance และ Takagi ได้ผลลัพธ์ของระยะทางของการเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากแบบจำลองลงในสมการ 2-43 ส่วนสมการแบบ Takagi เป็นการคำนวณเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่มาจากโหลด ซึ่งจะเป็นการคำนวณโดยใช้สภาวะก่อนเกิดความผิดพลาดลบกับขณะเกิดความผิดพลาดโดยใช้สมการที่ 2-45 โดยอ้างอิงการคำนวณดังนี้

การคำนวณแบบอย่างง่าย ที่ระยะความผิดพลาดที่ 10 km ซึ่งได้ค่าระยะความผิดพลาดที่ 11.57 km

$$m = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_G}{I_G}\right)}{\text{imag}(Z_{L1})} \quad (4-3)$$

$$m = \frac{11.84 + 1.23i / 798.30 - 1167i}{0.564 + 0.096i} \quad (4-4)$$

$$m = 11.57 \text{ km} \quad (4-5)$$

โดยเมื่อทำการคำนวณระยะทางของความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ ตลอดความยาวในสายส่งจะ
ได้ผลของการประมาณการระยะทางดังนี้

ตารางที่ 4-7 ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)
40	10	11.57	15.70	11.44	14.40
35	15	17.29	22.90	17.10	21.00
30	20	22.67	26.70	22.42	24.20
25	25	27.57	25.70	27.26	22.60
20	30	33.43	34.30	33.06	30.60
15	35	38.05	30.50	37.62	26.20
10	40	43.88	38.80	43.37	33.70

ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน ให้ผล
การคำนวณที่แม่นยำที่สุดในการทดสอบทั้ง 5 แบบเนื่องจากการวัดค่าพารามิเตอร์อ้างอิงแค่ 1 เฟส
ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อย

ตารางที่ 4-8 ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาด
แบบเฟสต่อเฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)
15	10	5.882	41.18	5.884	41.16
20	15	7.57	74.30	7.58	74.20
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10
45	40	18.83	211.70	18.92	210.80

ตารางที่ 4-9 ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาดแบบ 3 เฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)
15	10	5.19	48.10	5.20	48.00
20	15	7.57	74.30	7.59	74.10
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10
45	40	18.83	211.07	18.92	210.80

ตารางที่ 4-10 ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาดแบบเฟสต่อเฟส

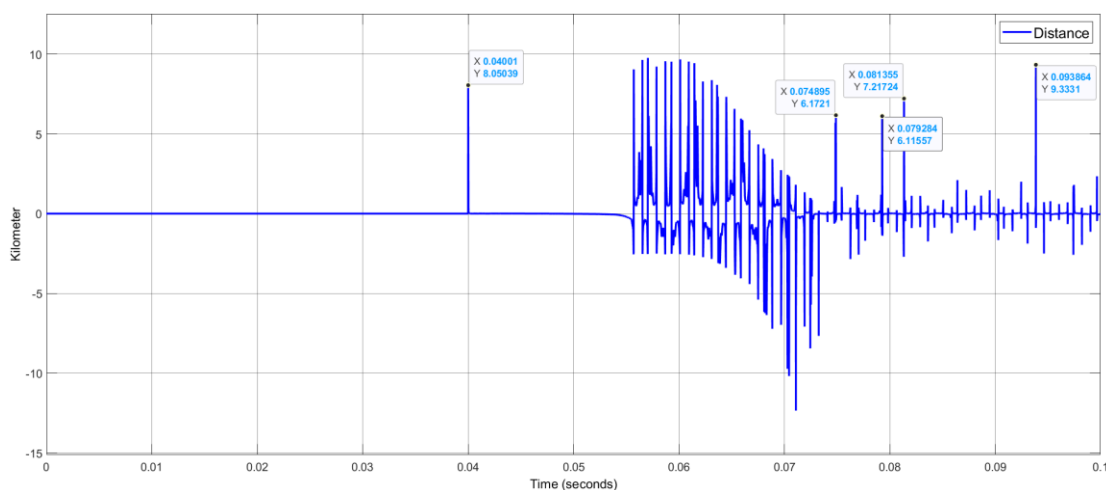
Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)
15	10	5.19	48.10	5.20	48.00
20	15	7.57	74.30	7.59	74.10
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10
45	40	18.83	211.70	18.92	210.80

ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาดแบบ เฟสต่อเฟสลงดิน, สามเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส, แบบสามเฟส ให้ผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการวัดค่าพารามิเตอร์อ้างอิงเฟสที่เกิดความผิดพลาดนำมาหักลบกันส่งผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

ตารางที่ 4-11 ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีอิมพีแดนซ์โดยจำลองความผิดพลาดแบบ 3 เฟส

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)
15	10	5.63	43.68	5.712	42.88
20	15	8.42	65.73	8.548	64.52
25	20	11.36	86.40	11.53	84.70
30	25	14.03	109.70	14.23	107.70
35	30	16.73	132.70	16.98	130.20
40	35	19.77	152.30	20.06	149.40
45	40	22.31	176.90	22.64	173.60

ผลของการเปรียบเทียบระยะทางจริงกับระยะที่คำนวณได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ให้ผลที่ค่อนข้างคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการตรวจจับค่าพารามิเตอร์นั้นทำได้ค่อนข้างยากและต้องเลือกค่าที่เหมาะสม ซึ่งการวิเคราะห์รูปแบบการคำนวณระยะทางโดยใช้วิธีอิมพีแดนซ์จะใช้ค่าตัวแปรในการคำนวณหลายตัวแปรซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากสัญญาณในภาพประกอบที่ 4-2 ถึง 4-8 จะมีช่วงเวลาที่ไม่นิ่งตัวจนถึงคู่เข้าจนเข้าสู่สัญญาณคงตัว ค่ากระแสและแรงดันที่จะนำมาคำนวณต้องมีการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งในการจับสัญญาณที่ไม่นิ่งตัวหากทำการเลือกช่วงเวลาจากสถานะคงตัวจนถึงคู่เข้าศูนย์นำมาคำนวณจะทำให้มีระยะทางของความผิดพลาดเกิดขึ้นได้หลายค่า จึงจะต้องใช้ระบบที่เลือกค่าระยะทางจากพิกัดได้อย่างแม่นยำนำมาคำนวณซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณระยะทางได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ในระบบจริงค่าพารามิเตอร์ในสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยเกิดขึ้นจากสภาพอากาศ ซึ่งหากจะทำให้แบบจำลองแม่นยำจำเป็นจะต้องปรับปรุงพารามิเตอร์ในสายส่งให้เหมาะสมด้วย โดยตัวอย่างการคำนวณระยะทางต่อเวลาเริ่มตั้งแต่เกิดสัญญาณไม่คงตัวจนถึงสัญญาณคู่เข้าแสดงได้ดังภาพประกอบต่อไปนี้

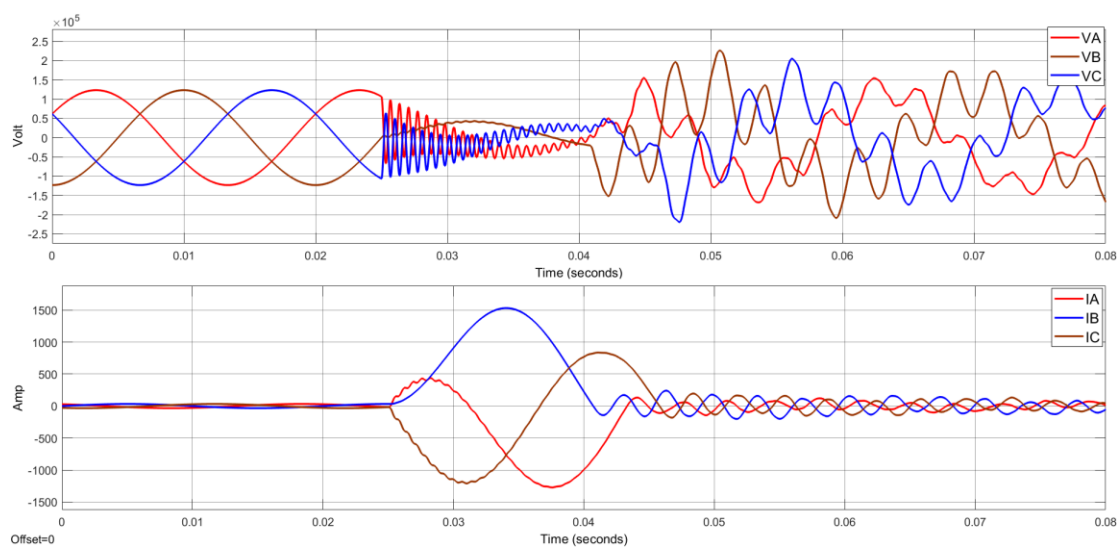


ภาพประกอบที่ 4-9 ผลของการคำนวณระยะทางด้วยวิธีอิมพีแดนซ์โดยเทียบต่อเวลาที่ความผิดพลาด 10 km

4.3.2 วิธีการคำนวณโดยใช้คลื่นจร

การทดสอบตามภาพประกอบที่ 3-8 ใช้แบบจำลองทดลองจับเวลาของคลื่นของสัญญาณกระแสเพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงโดยปัจจัยที่ต้องคำนึงคือระยะเวลาที่เกิดคลื่นจรในหนึ่งลูกคลื่นและความเร็วของการเกิดคลื่นจรซึ่งในปัจจุบันการเก็บข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยังไม่มีกรรองรับสัญญาณเหล่านี้โดยสัญญาณที่ต้องสนใจมีรายละเอียด ดังนี้

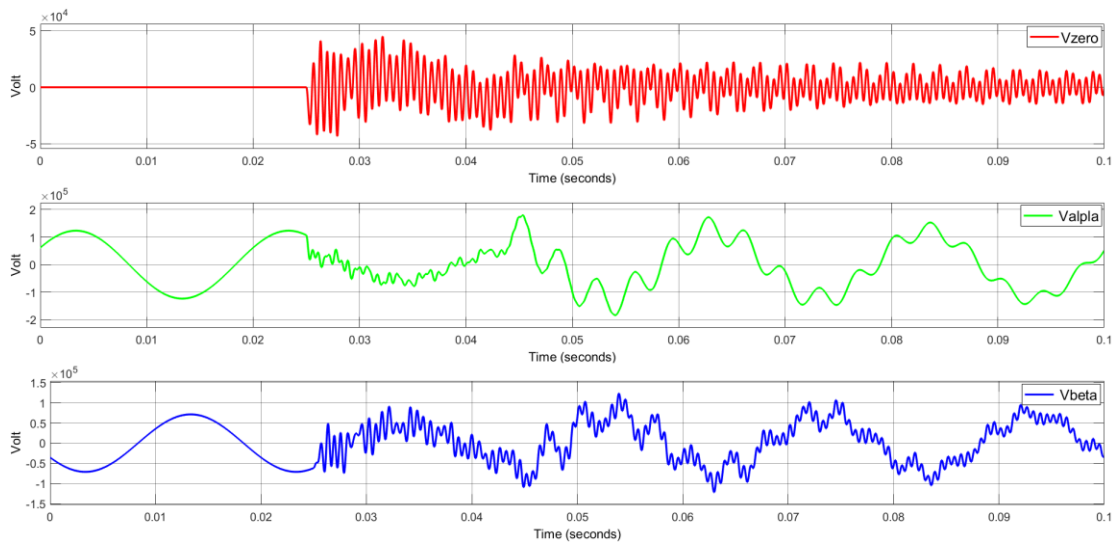
(1) กราฟแรงดันไฟฟ้า (Voltage Waveform) ขณะเกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.025 s ทำการวัดที่บัสอ้างอิงตามภาพประกอบที่ 4-1 ความผิดปกติในส่วนของแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันในเฟส A (V_A) มีลักษณะของการเกิดรูปคลื่นที่สภาวะไม่คงตัว (Transient) เกิดขึ้นมีค่าที่ลดลงและมีการลู่เข้าสู่ศูนย์ ส่วนรูปแบบของกระแสที่เกิดความผิดพลาดจะเกิดรูปคลื่นที่สภาวะไม่คงตัวเกิดขึ้นด้วยเช่นกัน แต่จะมีลักษณะที่พุ่งสูงขึ้นและเกิดการลู่เข้าสู่ศูนย์ แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-10 คลื่นแรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะจำลองให้เกิดความผิดพลาด

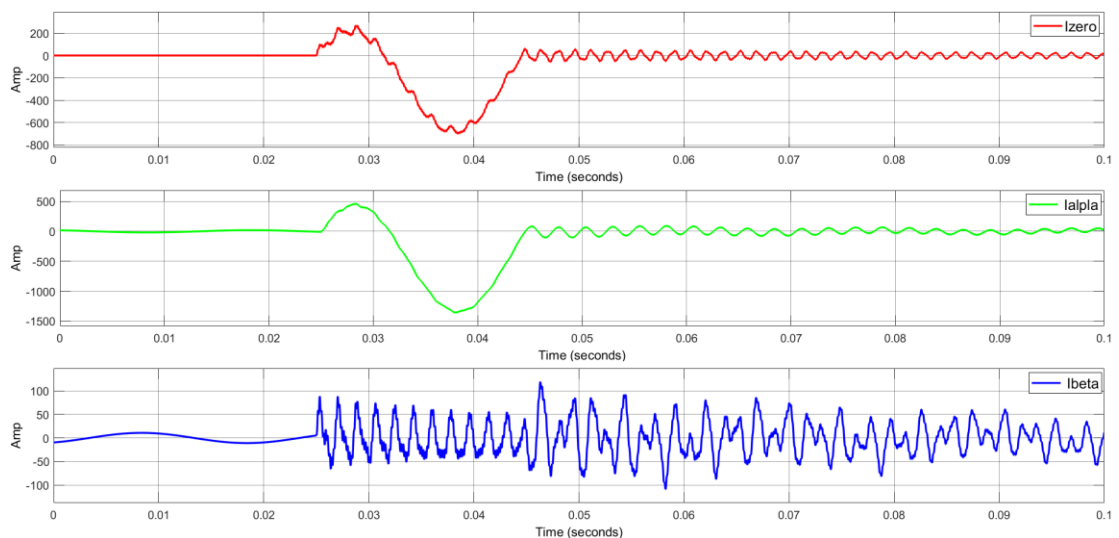
(2) การแปลงแรงดันและกระแสเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบ 3 เฟส โดยใช้การแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transformation) โดยการแปลงแรงดันจะใช้การแปลงตามสมการ 2-50 และการแปลงกระแสโดยใช้สมการ 2-54 ขณะเกิดความผิดพลาดที่เวลา 0.025 s

โดยรูปแบบแรงดันที่เกิดขึ้นในรูปแบบ Zero (V_0) จะมีลักษณะแบบไม่คงตัวและลู่เข้าสู่ศูนย์ โดยเมื่อมีความผิดพลาดแบบลงดินตามภาพประกอบที่ 4-13 แต่ถ้าหากเกิดความผิดพลาดระหว่างเฟส รูปแบบแรงดันไม่คงตัวจะปรากฏอยู่ในรูปแบบแรงดัน Alpha แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-11



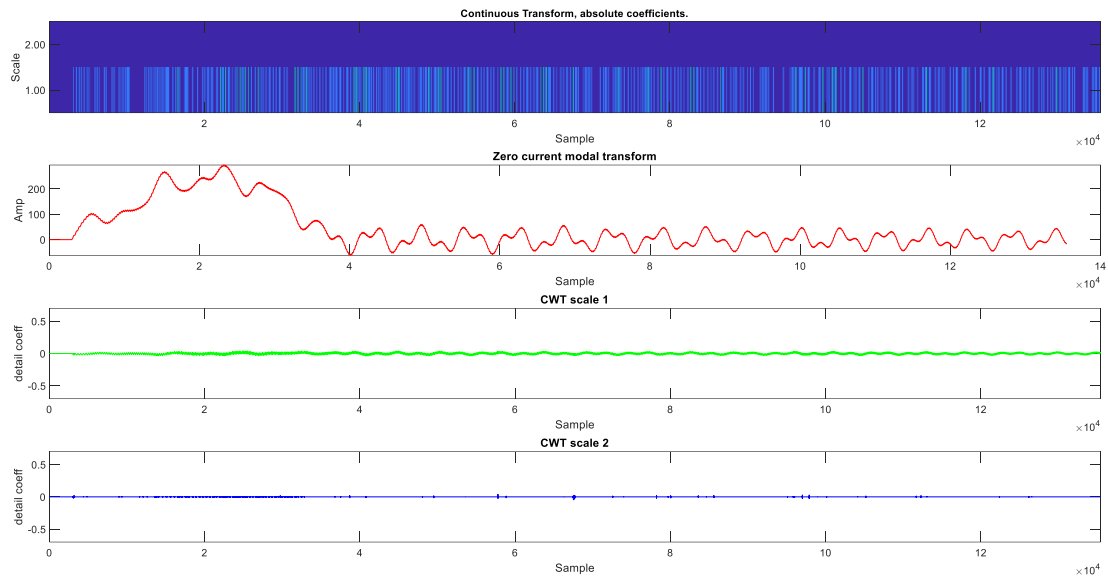
ภาพประกอบที่ 4-11 แรงดันที่ผ่านการแปลง V_0 , V_α , V_β ที่มีการลัดวงจรแบบลงดิน

กราฟกระแสที่ผ่านการแปลงแบบคลาร์ก (Clark Transformation) ที่บัสอ้างอิง ขณะเกิดความผิดปกติที่ เวลา 0.025 s โดยรูปแบบสัญญาณกระแส Zero (I_0) จะเกิดสัญญาณไม่คงตัว โดยเมื่อเวลา 0.045 s สัญญาณไม่คงตัวจะลดลงจนเข้าสู่สภาวะปกติแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12



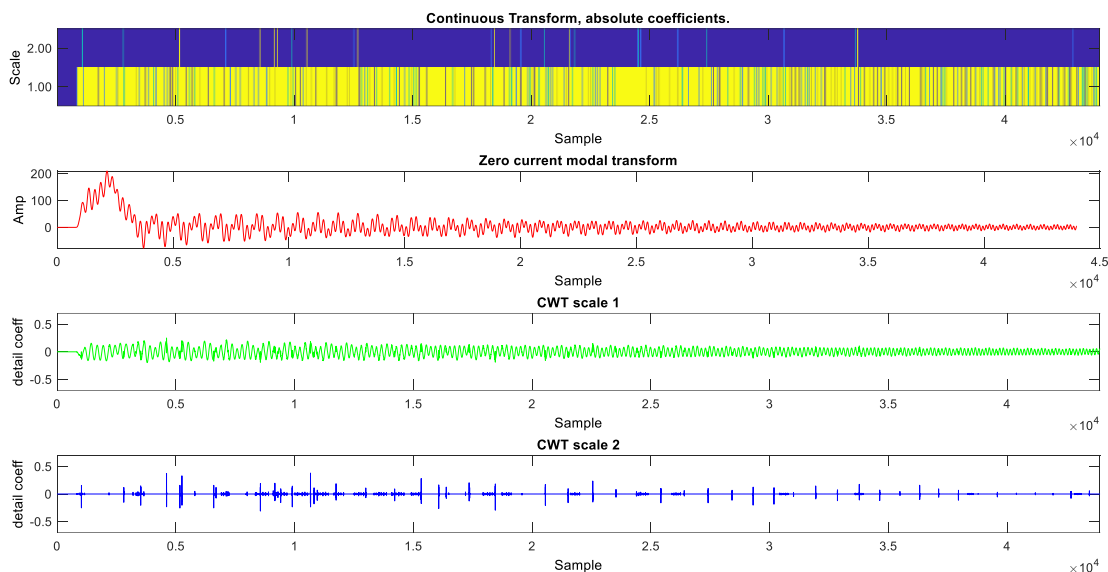
ภาพประกอบที่ 4-12 กระแสที่ผ่านการแปลง I_0 , I_α , I_β ที่มีการลัดวงจรแบบลงดิน

(3) การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์รูปแบบความผิดปกติไม่เกินครึ่งสายที่ผ่านการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง ที่ db4 Scale 1 และ 2 โดยสัญญาณในรูปของความถี่จะเกิดขึ้นเฉพาะการแปลงเวฟเลิตของ Scale 1 ซึ่งมีความถี่ที่สูงกว่าแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบที่ 4-13 ผลการแปลงเวฟเล็ดต่อเนื่องของสัญญาณกระแสที่สเกล 1 และสเกล 2 ของความผิดปกติไม่เกินครึ่งสาย

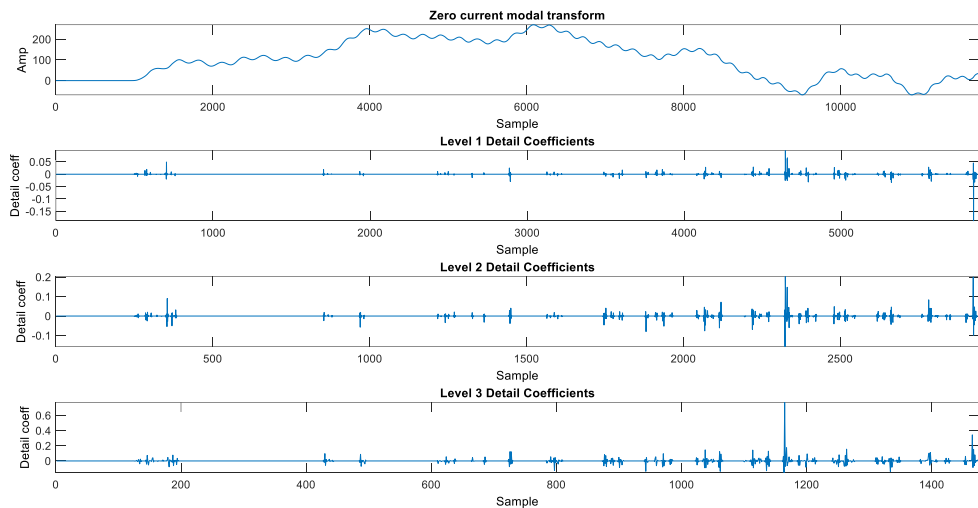
รูปแบบความผิดปกติเกินครึ่งสาย ที่ผ่านการทำการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องตลอดความยาวคลื่น ที่ db4 Scale 1 และ 2 โดยสัญญาณจะเห็นเฉพาะเกิดขึ้นที่การแปลงเวฟเล็ดของ Scale 1 ซึ่งมีความถี่ที่สูงกว่า Scale 2 แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-14



ภาพประกอบที่ 4-14 ผลการแปลง CWT ของสัญญาณกระแสที่สเกล 1 และสเกล 2 ของความผิดปกติเกินครึ่งสาย

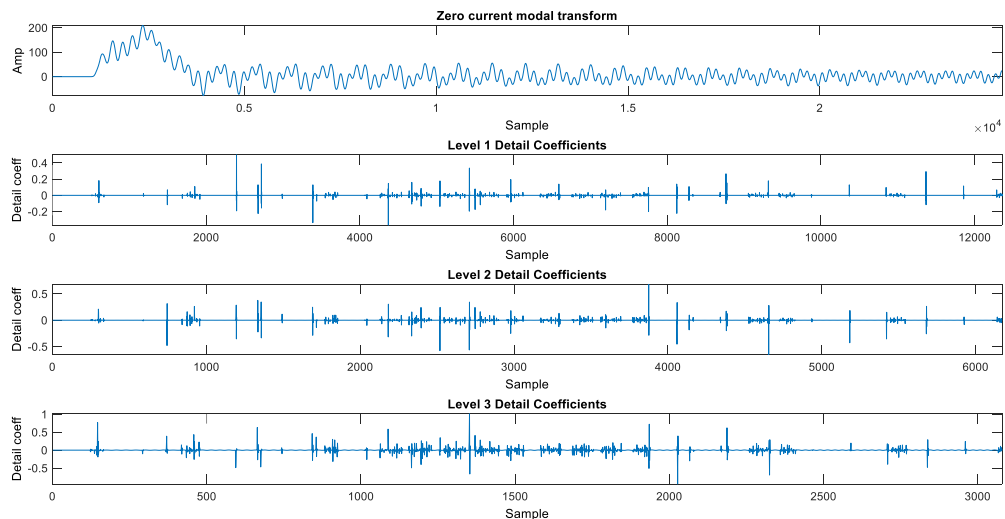
(4) รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตไม่ต่อเนื่อง ที่ความผิดพลาดแบบลงดินและความผิดพลาดระหว่างสายโดยแบบลงดินจะใช้สัญญาณตั้งต้นมาจาก I_0 และแบบระหว่างสายจะใช้จาก I_u ซึ่งทั้งสองแบบจะแสดงรูปแบบสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

รูปของสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตที่ db 4 ของความผิดพลาดแบบลงดินที่สเกล 1 – 3 เพื่อดูค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาของสัญญาณไม่เกินครึ่งสาย



ภาพประกอบที่ 4-15 ผลการแปลง DWT เพื่อหาค่าเวลาเพื่อคำนวณระยะทางไม่เกินครึ่งสาย

รูปของสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตที่ db 4 ของความผิดพลาดระหว่างสายที่สเกล 1-3 เพื่อดูค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา ของสัญญาณที่เกินครึ่งสาย



ภาพประกอบที่ 4-16 ผลการแปลง DWT เพื่อหาค่าเวลาเพื่อคำนวณระยะทางที่เกินครึ่งสาย

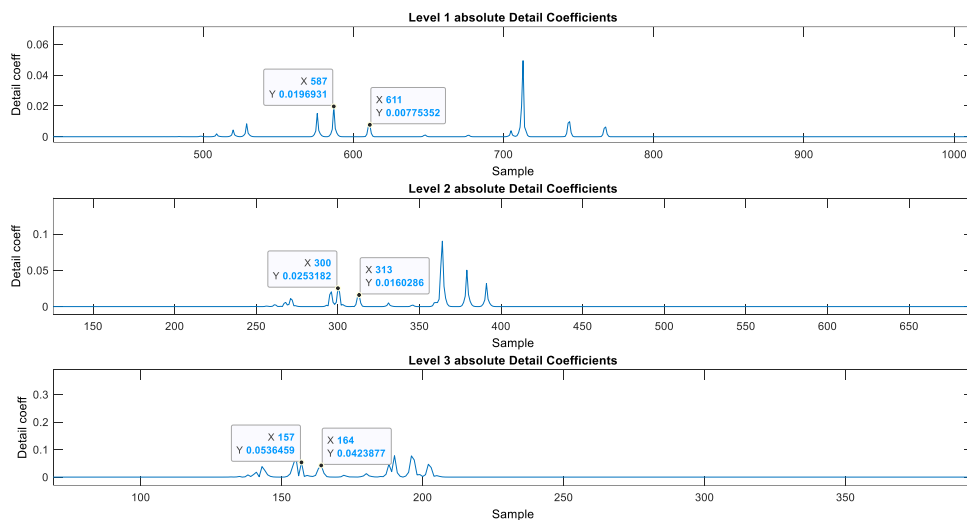
(5) การคำนวณความเร็วที่คลื่นเดินทางในสายส่ง (Velocity) จะใช้สมการที่ 2-38 โดยอ้างอิงจากพารามิเตอร์ในสายส่งค่าความเหนี่ยวนำมีค่า 8.9 nH และค่าความจุในสายส่ง 1.298 mF ตามตารางที่ 3-3 ซึ่งมีผลการคำนวณตามการคำนวณดังนี้

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4-7)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{8.9 \times 10^{-9} \times 1.295 \times 10^{-3}}} \quad (4-8)$$

$$v = 294557.5185 \text{ km/s} \quad (4-9)$$

(6) การวิเคราะห์เวลาจากการแปลงเวฟเล็ต ในการจับเวลาที่มาถึงของคลื่นจะเริ่มใช้การจับเวลาของหน้าคลื่นลูกแรกที่มาถึงลบด้วยเวลาของหน้าคลื่นรูปที่สอง ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2-25, 2-26 ซึ่งเป็นเวลาที่คลื่นเดินทางไปยังปลายสายและสะท้อนกลับมาจุดเริ่มต้น โดยการจับเวลาที่หน้าคลื่นจรมมาถึงจะแสดงจะได้จากการนำสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตไปหาค่าสัมบูรณ์ซึ่งโดยกำหนดค่าความผิดพลาดที่ 10 km ได้ลักษณะดังภาพประกอบต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 4-17 การคำนวณเวลาด้วยการจับเวลาหน้าคลื่นลูกที่ 1 และลูกที่ 2

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (4-10)$$

$$\Delta t = 611 - 587 \quad (4-11)$$

$$t = 24 \text{ step} \quad (4-12)$$

โดยเมื่อคูณกับเวลาสุ่มตัวอย่างที่จำลองคือ $1.63 \mu\text{s}$ ซึ่งได้จากการตั้งค่าในโปรแกรม ค่าเวลาคือ 24 Step จะได้ค่าการจำลองระยะทางซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$D = 294557.52 \times 24 \times 1.63 \times 10^{-6} \quad (4-13)$$

$$D = 11.52 \text{ km} \quad (4-14)$$

ผลจากข้อมูลการแปลงเวฟเล็ตโดยนำสัญญาณความถี่สูงที่สเกล 1 มาหาค่าเวลาที่คลื่นเดินทางกระทบบัสอ้างอิงและปลายสายส่งโดยใช้โครงสร้างการคำนวณตามอัลกอริทึมคำนวณความผิดพลาดแบบปลายเดียวและใช้การคำนวณความเร็วตามแบบการคำนวณพารามิเตอร์ในสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาคำนวณสามารถคำนวณค่าเวลาได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-12 ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดพลาดด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบเฟสลงดิน

Line distance (km) (1)	Fault distance (km) (2)	Line - fault (km) (1-2)	Traveling wave	
			Velocity (km/s)	Δt (μs)
50	10	40	294577	39.12
50	15	35	294577	50.12
50	20	30	294577	64.32
50	25	25	294577	89.15
50	30	20	294577	63.32
50	35	15	294577	50.24
50	40	10	294577	30.65

ตารางที่ 4-13 ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดปกติพร้อมด้วยวิธีคลื่นสะท้อน
แบบเฟสต่อเฟสลงดิน

Line distance (km) (1)	Fault distance (km) (2)	Line - fault (km) (1-2)	Traveling wave	
			Velocity (km/s)	Δt (μs)
50	10	40	294577	31.29
50	15	35	294577	49.47
50	20	30	294577	60.07
50	25	25	294577	88.37
50	30	20	294577	61.24
50	35	15	294577	49.47
50	40	10	294577	31.25

ตารางที่ 4-14 ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดปกติพร้อมด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบ 3 เฟสลงดิน

Line distance (km) (1)	Fault distance (km) (2)	Line - fault (km) (1-2)	Traveling wave	
			Velocity (km/s)	Δt (μs)
50	10	40	294577	29.47
50	15	35	294577	48.52
50	20	30	294577	60.07
50	25	25	294577	89.30
50	30	20	294577	60.07
50	35	15	294577	49.47
50	40	10	294577	30.24

ตารางที่ 4-15 ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดพลาดด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบเฟสต่อเฟส

Line distance (km) (1)	Fault distance (km) (2)	Line - fault (km) (1-2)	Traveling wave	
			Velocity (km/s)	Δt (μs)
50	10	40	294577	28.41
50	15	35	294577	49.52
50	20	30	294577	60.05
50	25	25	294577	89.30
50	30	20	294577	58.91
50	35	15	294577	49.47
50	40	10	294577	30.24

ตารางที่ 4-16 ผลการคำนวณส่วนต่างเวลาเกิดความผิดพลาดด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบ 3 เฟส

Line distance (km) (1)	Fault distance (km) (2)	Line - fault (km) (1-2)	Traveling wave	
			Velocity (km/s)	Δt (μs)
50	10	40	294577	25.77
50	15	35	294577	31.29
50	20	30	294577	58.94
50	25	25	294577	90.2
50	30	20	294577	58.94
50	35	15	294577	48.90
50	40	10	294577	29.58

ผลจากการใช้เวลาที่คำนวณได้นำมาคำนวณตามวิธีแบบคลื่นสะท้อน (Traveling Wave) ได้ผลลัพธ์ของระยะทางจากการคำนวณตามสมการที่ 4-13, 4-14 แบบใช้กระแสและการจับสัญญาณ

ไม่คงตัว (Transient) ของการเกิดความผิดพลาดแบบเฟสลงดินของการเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4-17 ผลการคำนวณความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อนแบบ 1 เฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	L-LF (km)	Estimate distance (km)	Distance error (km)	Distance error (%)
50	10	40	11.52	1.52	15.24
50	15	35	14.76	0.24	1.57
50	20	30	18.95	1.05	5.26
50	25	25	26.26	1.26	5.05
50	30	20	31.35	1.35	4.49
50	35	15	35.20	0.20	0.57
50	40	10	40.97	0.97	2.43

ตารางที่ 4-18 ผลการคำนวณความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อนแบบเฟสต่อเฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	L-LF (km)	Estimate distance (km)	Distance error (km)	Distance error (%)
50	10	40	8.68	1.32	13.19
50	15	35	14.29	0.71	4.71
50	20	30	17.70	2.30	11.52
50	25	25	26.31	1.31	5.22
50	30	20	32.30	2.30	7.68
50	35	15	35.43	0.43	1.22
50	40	10	41.09	1.09	2.73

ตารางที่ 4-19 ผลการคำนวณความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อนแบบ 3 เฟสลงดิน

Line distance (km)	Fault distance (km)	L-LF (km)	Estimate distance (km)	Distance error (km)	Distance error (%)
50	10	40	8.68	1.32	13.19
50	15	35	14.29	0.71	4.71
50	20	30	17.70	2.30	11.52
50	25	25	26.31	1.31	5.22
50	30	20	32.30	2.30	7.68
50	35	15	35.43	0.43	1.22
50	40	10	41.09	1.09	2.73

ตารางที่ 4-20 ผลการคำนวณความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อนแบบเฟสต่อเฟส

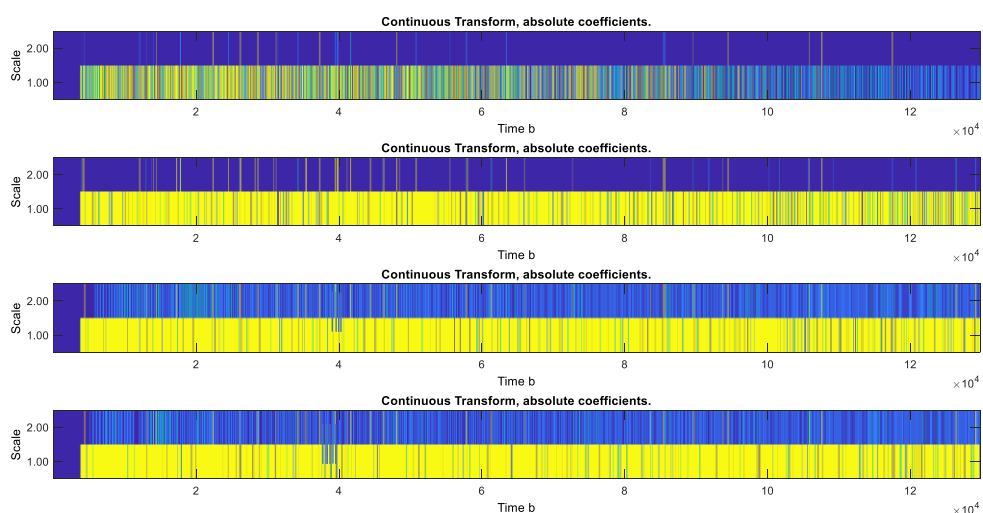
Line distance (km)	Fault distance (km)	L-LF (km)	Estimate distance (km)	Distance error (km)	Distance error (%)
50	10	40	8.37	1.63	16.31
50	15	35	14.59	0.41	2.75
50	20	30	17.69	2.31	11.55
50	25	25	26.31	1.31	5.22
50	30	20	32.65	2.65	8.82
50	35	15	35.43	0.43	1.22
50	40	10	41.09	1.09	2.73

ผลการคำนวณระยะทางโดยวิธีคลื่นจรของความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน, เฟสต่อเฟสลงดิน, สามเฟสลงดิน, เฟสต่อเฟส, สามเฟส ให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนต่ำโดยระยะทางการความผิดพลาดระยะสั้นจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าระยะทางที่ยาวกว่าเนื่องจากผลของการคิดเวลา

ตารางที่ 4-21 ผลการคำนวณความผิดพลาดแบบใช้การคำนวณแบบคลื่นสะท้อนแบบ 3 เฟส

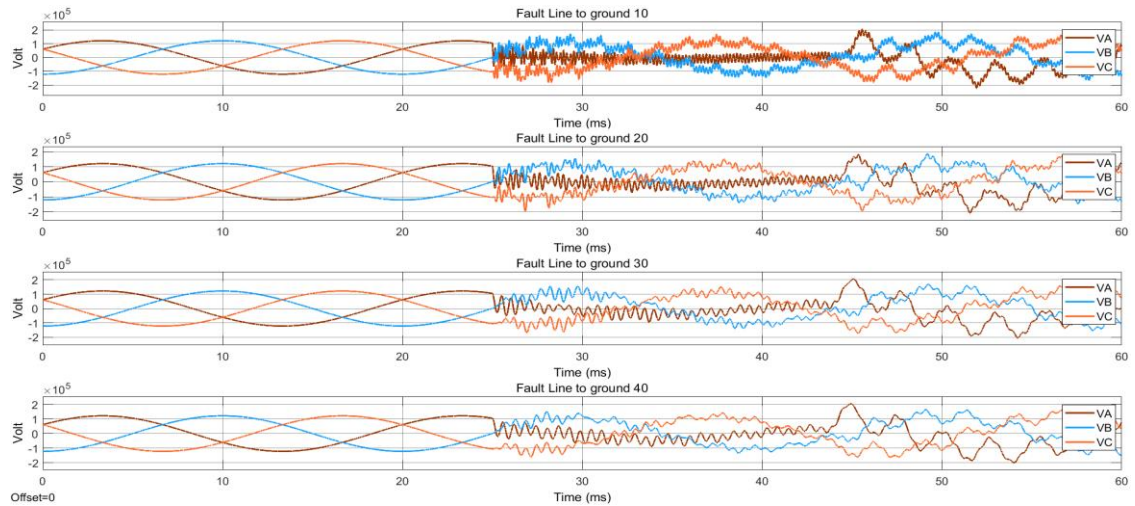
Line distance (km)	Fault distance (km)	L-LF (km)	Estimate distance (km)	Distance error (km)	Distance error (%)
50	10	40	7.59	2.41	24.09
50	15	35	9.22	5.78	38.55
50	20	30	17.36	2.64	13.19
50	25	25	26.57	1.57	6.28
50	30	20	32.64	2.64	8.79
50	35	15	35.60	0.60	1.70
50	40	10	41.29	1.29	3.22

รูปแบบของการคำนวณแบบคลื่นสะท้อนโดยสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณโดยทำการแปลงเวฟเลตที่ระยะการเกิดความผิดพลาดที่ 10, 20, 30, 40 km จากต้นสายไปจนถึงปลายสาย โดยเมื่อทำการแปลงในช่วงความผิดพลาดไม่เกินครึ่งสาย จะเกิดรูปสัญญาณที่ Scale 1 ส่วนความผิดพลาดที่เกินครึ่งสายจะเกิดรูปสัญญาณที่ Scale 2 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4-18 โดยรูปแบบของสีน้ำเงินจะแทนด้วยเวลาที่ต่ำไล่ระดับไปจนถึงสีเหลืองที่มีความถี่สูง โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นครึ่งสายจะเห็นสัญญาณที่แทนด้วยสีฟ้าเกิดขึ้นในสเกล 2 โดยการวิเคราะห์นี้จะทำให้การเลือกใช้สมการทำได้ง่ายขึ้น



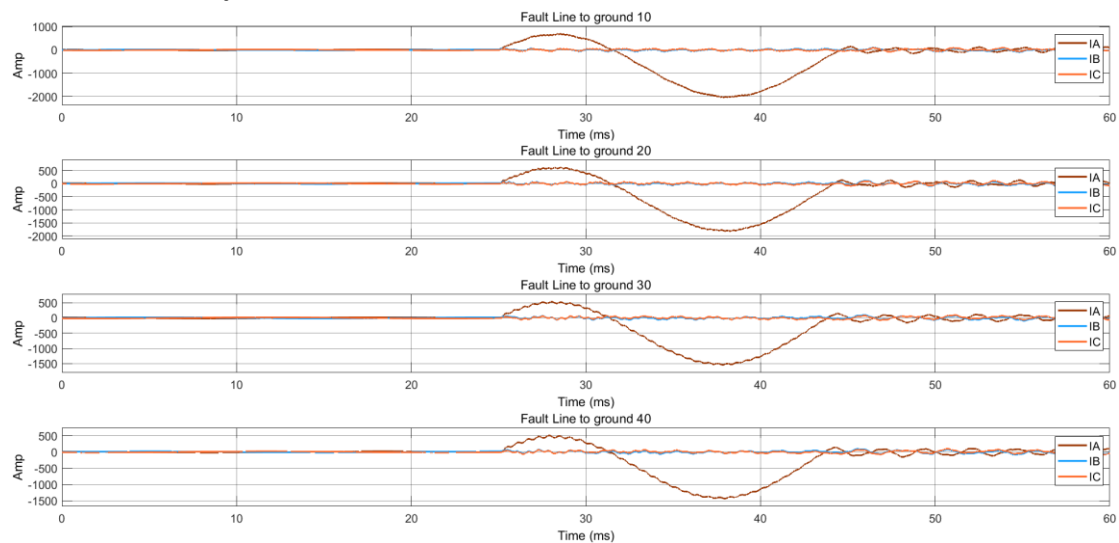
ภาพประกอบที่ 4-18 การแปลงเวฟเลต ที่สเกล 1 และ 2 ของระยะการเกิดความผิดพลาดที่ 10, 20, 30, 40 km

รูปแบบสัญญาณแรงดันที่วัดจากบัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาดที่ระยะการเกิดความผิดพลาดที่ 10, 20, 30, 40 km จากต้นสายไปจนถึงปลายสายโดยรูปแบบของความถี่ของสัญญาณเมื่อเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันโดยจุดที่ใกล้กับเครื่องวัดจะมีความถี่สูงกว่าจุดที่เกิดขึ้นไกลเครื่องวัดโดยการเกิดความถี่จะทำให้การแยกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่เกินครึ่งสายและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกินครึ่งสายทำได้



ภาพประกอบที่ 4-19 รูปแบบสัญญาณแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ

รูปแบบของสัญญาณกระแสที่วัดจากบัสอ้างอิงโดยจำลองความผิดพลาดที่ระยะการเกิดความผิดพลาดที่ 10, 20, 30, 40 km มีทิศทางเป็นไปในรูปแบบเดียวกับแรงดัน แต่มีความเคลื่อนไหวที่น้อยกว่าแรงดันอยู่เล็กน้อย



ภาพประกอบที่ 4-20 รูปแบบสัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 4-22 ตารางวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดพลาดแบบ 1 เฟส
ลงดินโดยแบบคำนวณคอมพิวเตอรื

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Traveling Wave)	Distance error (%)
15	10	11.57	15.70	11.44	14.40	11.52	15.24
20	15	17.29	22.90	17.10	21.00	14.76	1.57
25	20	22.67	26.70	22.42	24.20	18.95	5.26
30	25	27.57	25.70	27.26	22.60	26.26	5.05
35	30	33.43	34.30	33.06	30.60	31.35	4.49
40	35	38.05	30.50	37.62	26.20	35.20	0.57
45	40	43.88	38.80	43.37	33.70	40.97	2.43

ตารางที่ 4-23 ตารางวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดพลาดแบบ เฟสต่อเฟส
ลงดินโดยแบบคำนวณคอมพิวเตอรื

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Traveling Wave)	Distance error (%)
15	10	5.88	41.18	5.88	41.16	8.68	13.19
20	15	7.57	74.30	7.58	74.20	14.29	4.71
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50	17.70	11.52
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80	26.31	5.22
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30	32.30	7.68
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10	35.43	1.22
45	40	18.83	211.70	18.92	210.80	41.09	2.73

ตารางที่ 4-24 ตารางวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดพลาดแบบ 3 เฟส
ลงดินโดยแบบคำนวณคอมพิวเตอร์

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Traveling Wave)	Distance error (%)
15	10	5.19	48.10	5.20	48.00	8.68	13.19
20	15	7.57	74.30	7.59	74.10	14.29	4.71
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50	17.70	11.52
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80	26.31	5.22
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30	32.30	7.68
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10	35.43	1.22
45	40	18.83	211.70	18.92	210.80	41.09	2.73

ตารางที่ 4-25 ตารางวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดพลาดแบบ เฟสต่อเฟส
โดยแบบคำนวณคอมพิวเตอร์

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Traveling Wave)	Distance error (%)
15	10	5.19	48.10	5.20	48.00	8.37	16.31
20	15	7.57	74.30	7.59	74.10	14.59	2.75
25	20	10.12	98.80	10.15	98.50	17.69	11.55
30	25	12.17	128.30	12.22	127.80	26.31	5.22
35	30	14.31	156.90	14.37	156.30	32.65	8.82
40	35	16.91	180.90	16.99	180.10	35.43	1.22
45	40	18.83	211.70	18.92	210.80	41.09	2.73

ตารางที่ 4-26 ตารางวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการจำลองความผิดพลาดแบบ 3 เฟส
โดยแบบคำนวณคอมพิวเตอร์

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (km) (Simple)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (Takagi)	Distance error (%)	Estimate distance (km) (traveling wave)	Distance error (%)
15	10	5.63	43.68	5.71	42.88	2.41	24.09
20	15	8.42	65.73	8.54	64.52	5.78	38.55
25	20	11.36	86.40	11.53	84.70	2.64	13.19
30	25	14.03	109.70	14.23	107.70	1.57	6.28
35	30	16.73	132.70	16.98	130.20	2.64	8.79
40	35	19.77	152.30	20.06	149.40	0.60	1.70
45	40	22.31	176.90	22.64	173.60	1.29	3.22

การเปรียบเทียบระยะทางจากการวัดค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณทั้ง 2 วิธี ให้ผลการคำนวณที่ต่างกันโดยการจำลองความผิดพลาดในรูปแบบที่เกิดลงดินและความผิดพลาดระหว่างเฟสการคำนวณแบบคลื่นสะท้อนจะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าการคำนวณแบบอิมพีแดนซ์ เนื่องจากใช้ค่าตัวแปรที่น้อยกว่าจึงลดความผิดพลาดเกี่ยวกับการเก็บสัญญาณและการคำนวณ โดยตารางสรุปจะแสดงถึงข้อดีและข้อเสียของการคำนวณในแต่ละวิธี ดังนี้

ตารางที่ 4-27 สรุปข้อดีข้อเสียของวิธีคำนวณความผิดพลาดด้วยการคำนวณแบบต่างๆ

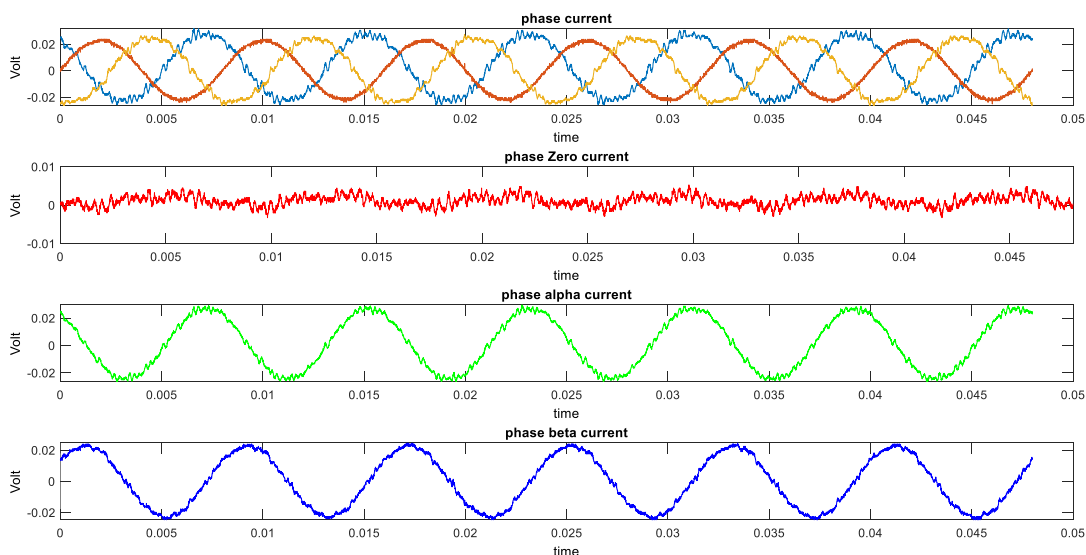
การระบุตำแหน่งของความผิดพลาด	ลักษณะของการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
การระบุตำแหน่งโดยใช้อิมพีแดนซ์	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้การวัดพารามิเตอร์พื้นฐานจากเครื่องมือวัด - ใช้สมการ Kirchhoff's Law ในการคำนวณในสมการ 	<ul style="list-style-type: none"> - สมการที่ใช้ในการคำนวณไม่ซับซ้อนไม่ยุ่งยาก - ใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในการเก็บข้อมูลได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - การรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ค่อนข้างมากทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลค่อนข้างมาก

การระบุตำแหน่งของความผิดพลาด	ลักษณะของการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้หลักทฤษฎี Simple Reactance และใช้การคำนวณแบบปลายด้านเดียว - ใช้ทฤษฎี Takagi เพื่อลดผลกระทบจากโหลด 		<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถติดตามความผิดพลาดที่เกิดชั่วคราวได้ - ผลลัพธ์ของตำแหน่งความผิดพลาดเกิดขึ้นได้หลายตำแหน่ง
การระบุตำแหน่งโดยใช้คลื่นจร	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้หลักการจับสัญญาณที่ความถี่สูงเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงช่วงเวลาที่แตกต่างกันและใช้ความเร็วคลื่นเพื่อค้นหาระยะทาง - การวิเคราะห์สัญญาณมีหลากหลายวิธีซึ่งต้องปรับปรุงให้เหมาะสมกับวงจรไฟฟ้า 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ตัวแปรในการคำนวณน้อยทำให้มีค่าความแม่นยำสูง - สามารถตรวจสอบความผิดพลาดแบบชั่วคราวและติดตามการสวิตซ์ซึ่งได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้อุปกรณ์จับสัญญาณที่มีราคาสูง - ผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณ เพราะอาจจะมีการปะปนของสัญญาณรบกวน

ในแง่ของการคำนวณหากไม่มองเรื่องราคาอุปกรณ์ การปรับปรุงวิธีการคำนวณความผิดพลาดวิธีอิมพีแดนซ์เป็นการใช้คลื่นจร จะส่งผลให้การคำนวณมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

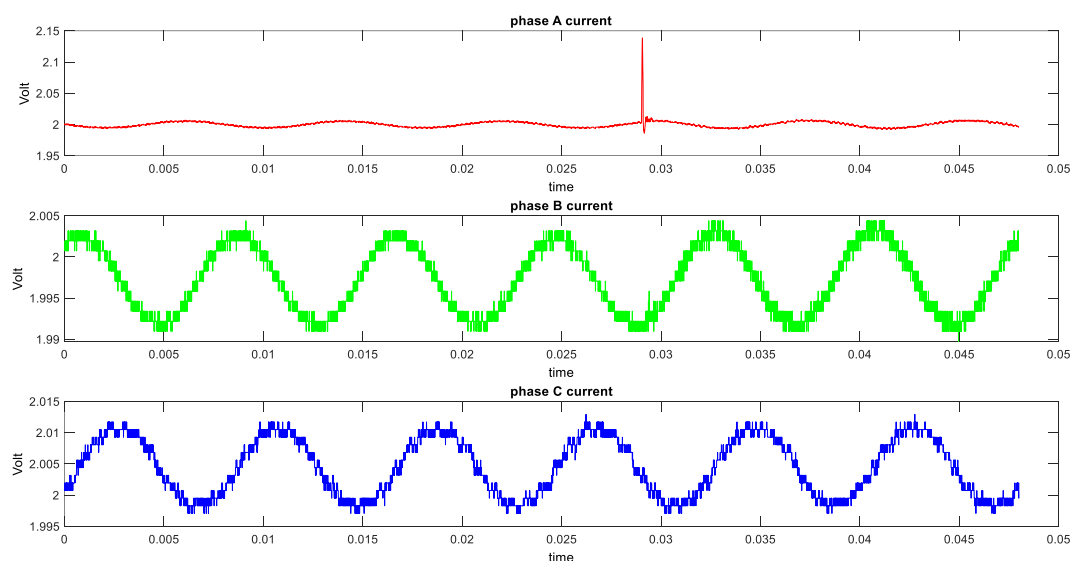
4.4 ผลจากการทดสอบจากห้องทดลองในการสร้างแบบจำลองสายส่งในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องมือบันทึกข้อมูลจากสถานีไฟฟ้า ภาพประกอบที่ 3-10 ที่ทำการทดสอบ เพื่อทดสอบจับสัญญาณของรูปแบบคลื่นที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว โดยทดสอบจ่ายแรงดันผ่านตัวเก็บประจุวงจรทดสอบตามภาพประกอบที่ 3-17 ซึ่งจะให้ผลโดยมีรูปคลื่นสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวพุ่งขึ้นสูงกว่าสัญญาณปกติ โดยในปกติตัวจับสัญญาณในสถานีไฟฟ้าจะจับคลื่นเหล่านี้ได้ แต่ความละเอียดยังมีไม่เพียงพอซึ่งการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบใช้จับสัญญาณมีผลเป็นอย่างไร

(1) ผลของการนำเข้าสู่สัญญาณที่สภาวะปกติในวงจรแบบจำลองจริงโดยการนำเข้าสู่สัญญาณที่สภาวะการจ่ายโหลดความต้านทานปกติขนาด 5W ซึ่งสัญญาณกระแสที่ได้มีมมเฟสต่างกัน 120 องศา และทดสอบการแปลงค่าให้อยู่ในรูป I_0, I_α, I_β โดยรูปแบบกราฟจะมีลักษณะ ดังนี้



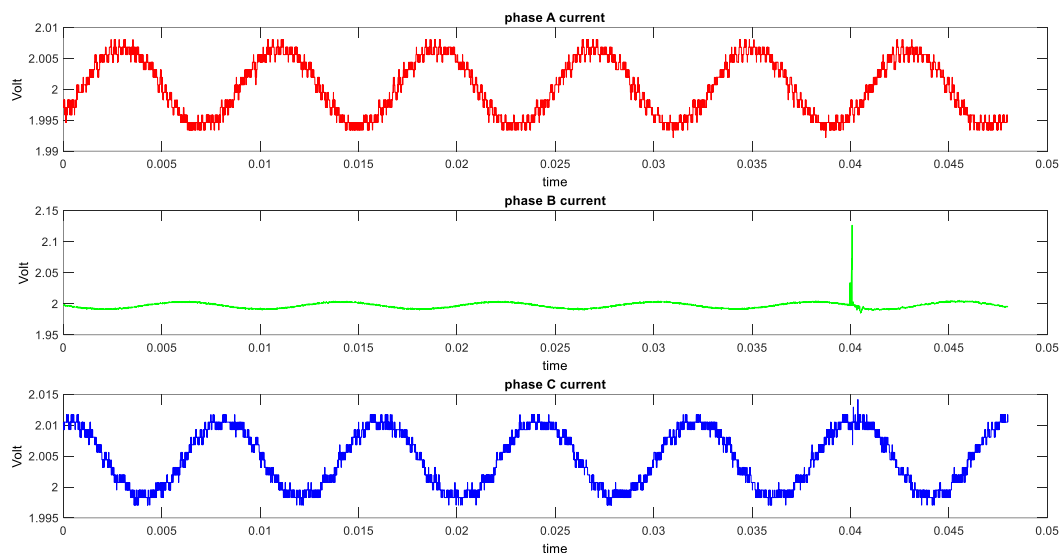
ภาพประกอบที่ 4-21 รูปแบบสัญญาณกระแสและการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณปกติ

(2) ผลของการนำเข้าสู่สัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวในวงจรแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ การบันทึกสัญญาณขณะจำลองการเกิดความผิดปกติโดยกราฟของการวัดกระแส 3 เฟสโดยการสับสวิตซ์ที่เฟส A ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 10 V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 Sample มีรูปแบบสัญญาณกระแสพุ่งสูงขึ้นในเฟส A และมีช่วงสัญญาณที่พุ่งสูงขึ้นในเฟส B และ C เล็กน้อย



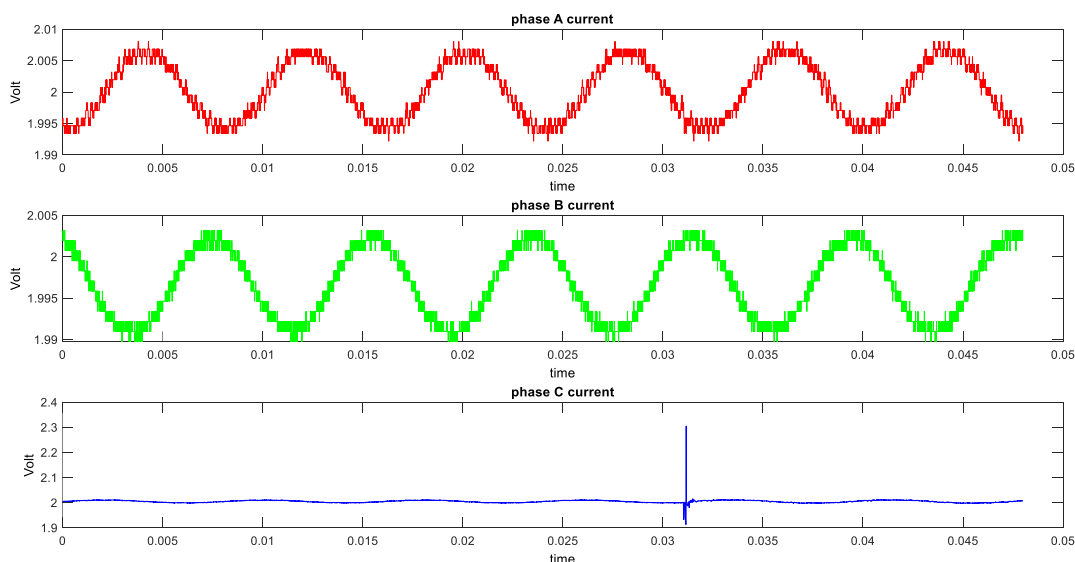
ภาพประกอบที่ 4-22 รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดปกติแบบเฟส A ลงดิน แรงดัน 10 V

(3) กราฟของการวัดกระแส 3 เฟสโดยการสับวิตซ์ที่เฟส B ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 10 V โดยใช้ในการบันทึกที่ 8000 Sample มีรูปแบบสัญญาณกระแสพุ่งสูงขึ้นในเฟส B ดังนี้ และ C เล็กน้อย



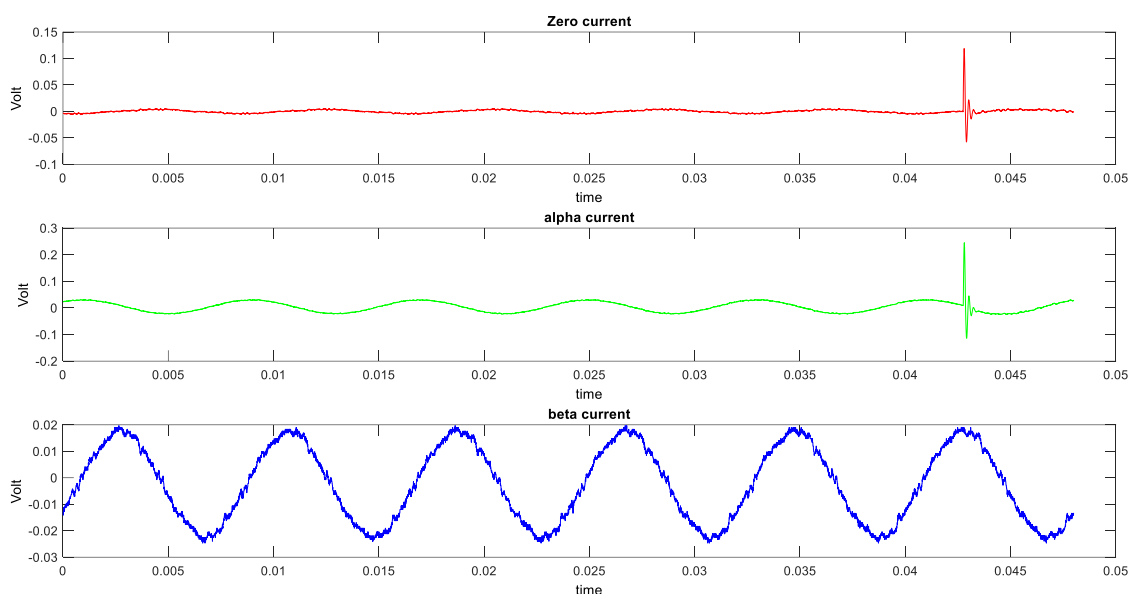
ภาพประกอบที่ 4-23 รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส B ลงดิน แรงดัน 10 V

(4) กราฟของการวัดกระแส 3 เฟสโดยการสับวิตซ์ที่เฟส C ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 5 W 500Ω โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 10 V โดยใช้ในการบันทึกที่ 8000 sample มีรูปแบบกราฟพุ่งสูงขึ้นในเฟส C



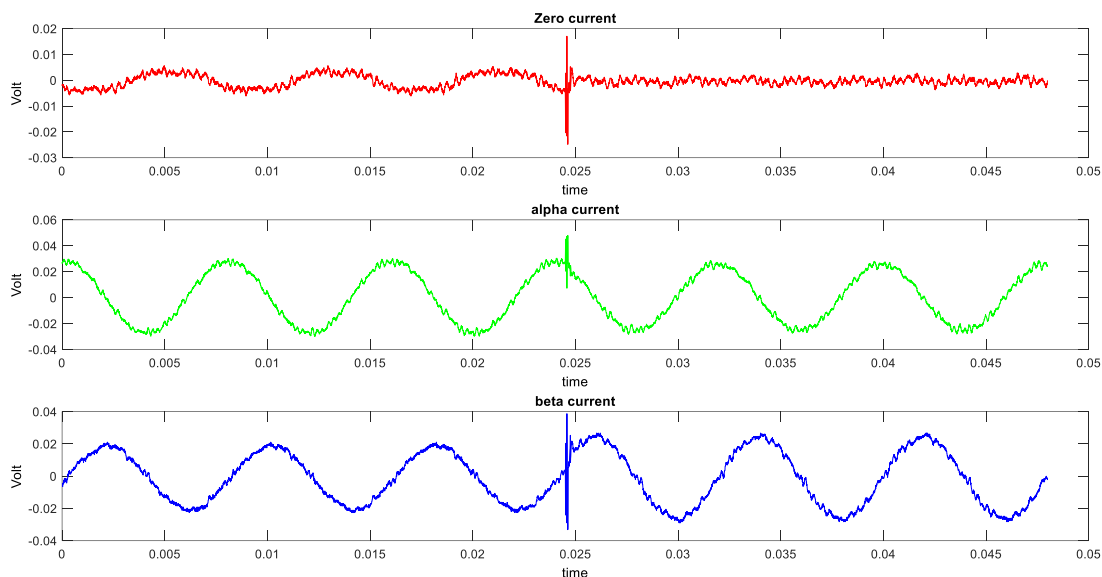
ภาพประกอบที่ 4-24 รูปแบบสัญญาณกระแส ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส C ลงดิน แรงดัน 10 V

(5) การทดสอบแปลงสัญญาณที่ได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณ โดยกราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) ที่เกิดความผิดพลาดไม่เกินครึ่งสายโดยการสับสวิตช์ที่เฟส A ระยะ 50 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40 V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 Sample มีสัญญาณเกิดขึ้นในโหมด Zero และโหมด Alpha



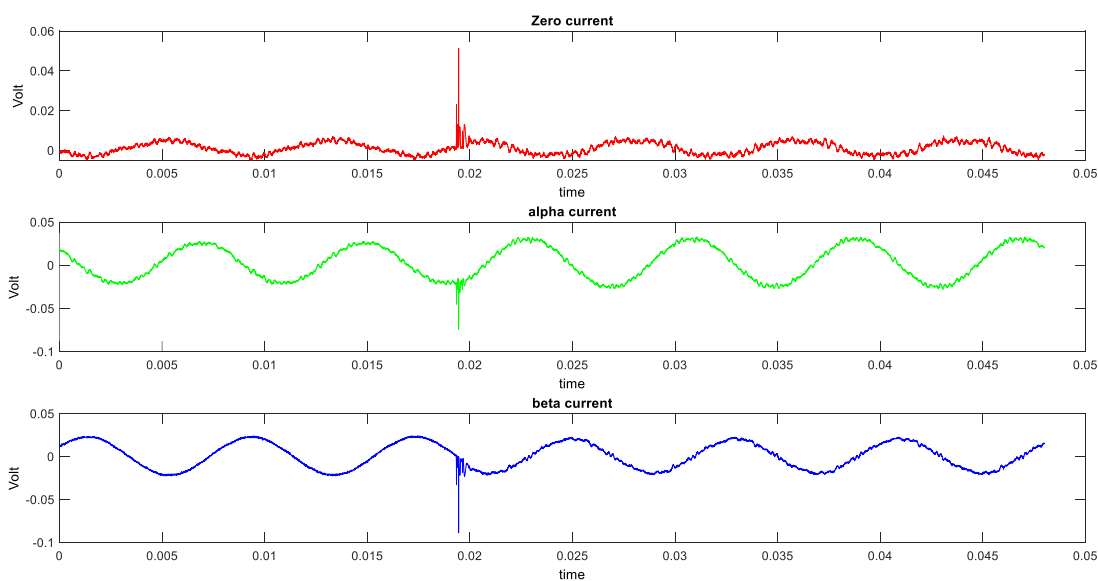
ภาพประกอบที่ 4-25 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส A ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V

โดยกราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) โดยการสับสวิตช์ที่เฟส B ระยะ 50 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40 V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 Sample มีสัญญาณเกิดขึ้นใน 3 โหมด คือ Zero Alpha และ Beta เนื่องจากขณะทำการเปิดสวิตช์มีสัญญาณกระแสเกิดขึ้นทั้ง 3 เฟส



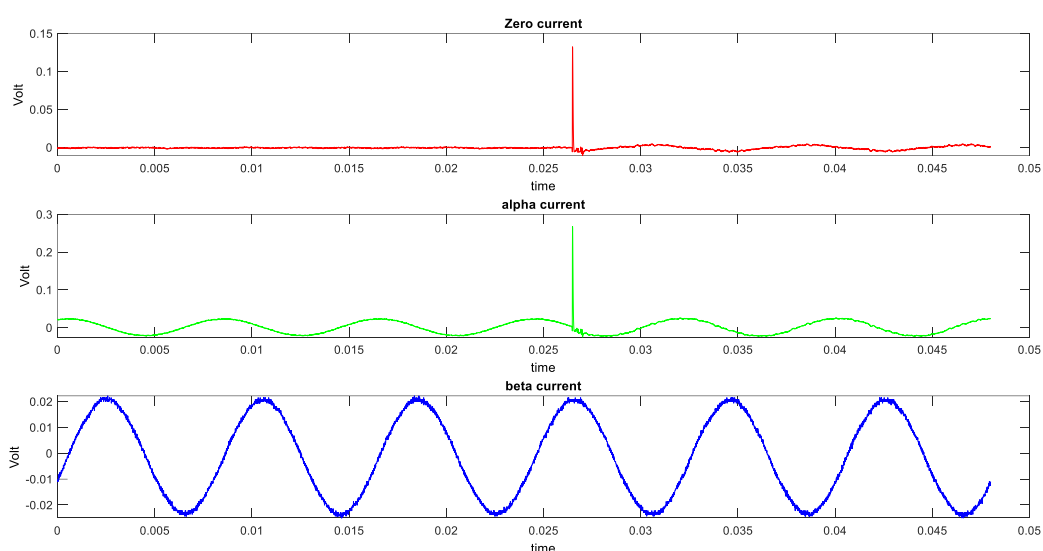
ภาพประกอบที่ 4-26 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส B ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V

โดยกราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) โดยการสับสวิตซ์ที่เฟส C ระยะ 50 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40 V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 สัญญาณเกิดขึ้นใน 3 โหมด คือ Zero Alpha Beta เนื่องจากขณะทำการเปิดสวิตซ์มีสัญญาณกระแสเกิดขึ้นทั้ง 3 เฟส



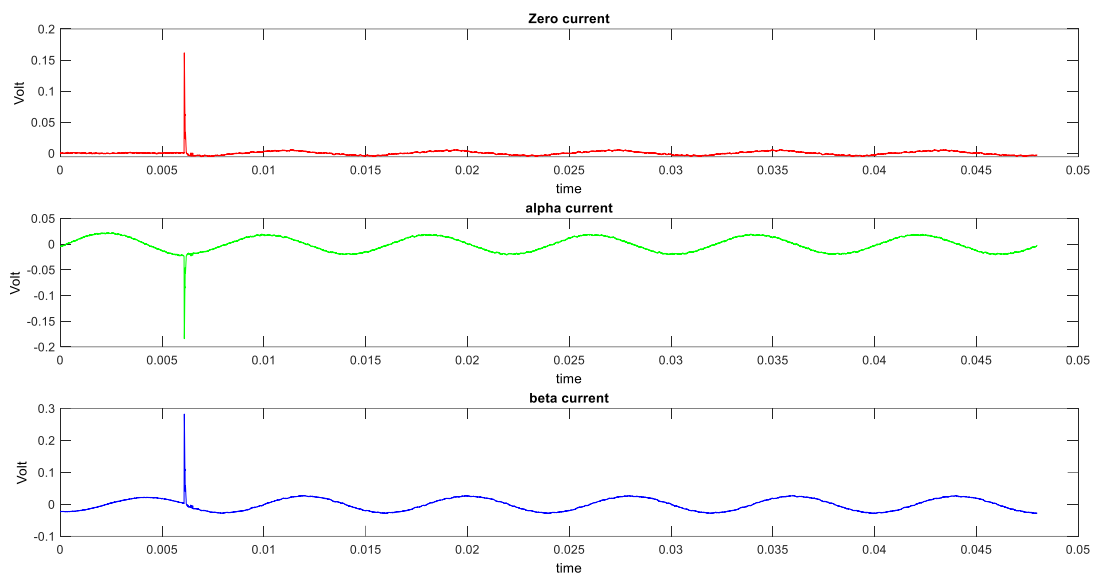
ภาพประกอบที่ 4-27 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส C ลงดิน ระยะ 50 m แรงดัน 40 V

(6) ผลของการแปลงสัญญาณ (Modal Transform) ที่สภาวะไม่คงตัว ที่เกิดความผิดพลาดของเฟส ในวงจรแบบจำลองจริงกราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) โดยการสับสวิตช์ที่เฟส A ระยะ 100 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 Sample มีรูปแบบสัญญาณกระแสเกิดขึ้นในโหมด Zero และโหมด Alpha เนื่องจากเมื่อสับสวิตช์ในวงจรมีรูปแบบสัญญาณเกิดขึ้นในเฟส A, B และ C



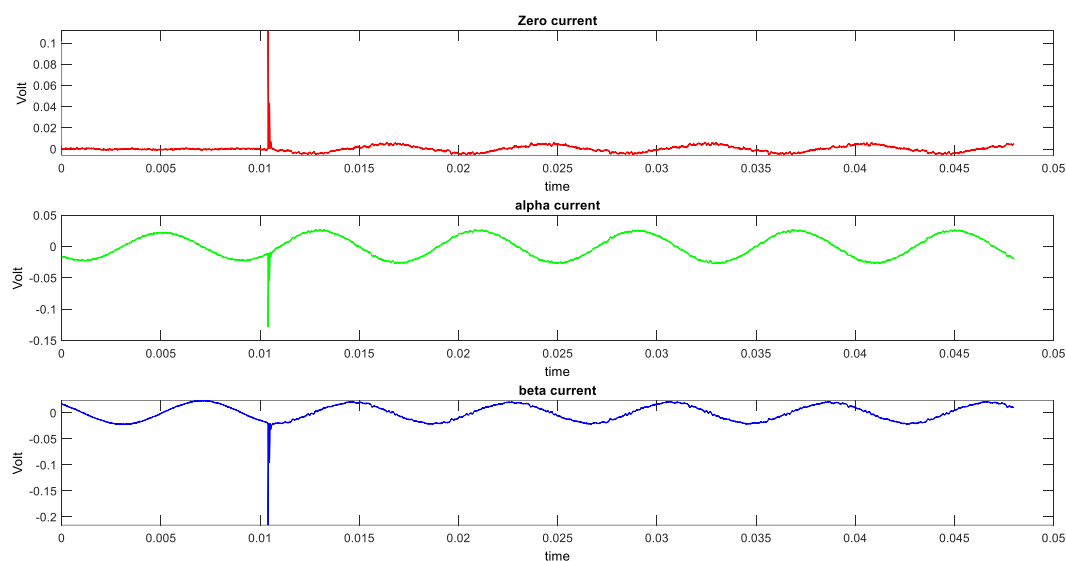
ภาพประกอบที่ 4-28 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพลาดแบบเฟส A ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40V

กราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) โดยการสับสวิตช์ที่เฟส B ระยะ 100 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40 V โดยใช้การบันทึกที่ 8000 Sample รูปแบบสัญญาณกระแสเกิดขึ้นในโหมด Zero และโหมด Alpha เนื่องจากเมื่อสับสวิตช์ในวงจรมีรูปแบบสัญญาณเกิดขึ้นในเฟส A, B และ C



ภาพประกอบที่ 4-29 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพร่องแบบเฟส B ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40 V

กราฟของการวัดกระแส 3 เฟสแปลงสัญญาณ 3 เฟส (Modal Transform) โดยการสับสวิทช์ที่เฟส C ระยะ 100 m โดยระยะรวมสายส่ง 100 m ของแบบจำลองที่ทำการจ่ายโหลด 500Ω 5 W โดยติดตั้งเครื่องวัดกระแส (Current Probe) ฝั่งแหล่งจ่ายแรงดัน 40 V โดยการใช้การบันทึกที่ 8000 Sample มีรูปแบบกราฟดังนี้



ภาพประกอบที่ 4-30 รูปแบบสัญญาณกระแสและการทำการแปลงสัญญาณแบบ Modal Transform ของสัญญาณไม่คงตัวความผิดพร่องแบบเฟส C ลงดิน ระยะ 100 m แรงดัน 40 V

การคำนวณความเร็วที่คลื่นเดินทางในสายส่ง จะใช้สมการที่ 2-38 โดยอ้างอิงจากพารามิเตอร์ในสายส่งค่าความเหนี่ยวนำมีค่า 1.75 mH และค่าความจุในสายส่ง 10 nF ตามตารางที่ 3-9 ซึ่งมีผลการคำนวณตามการคำนวณดังนี้

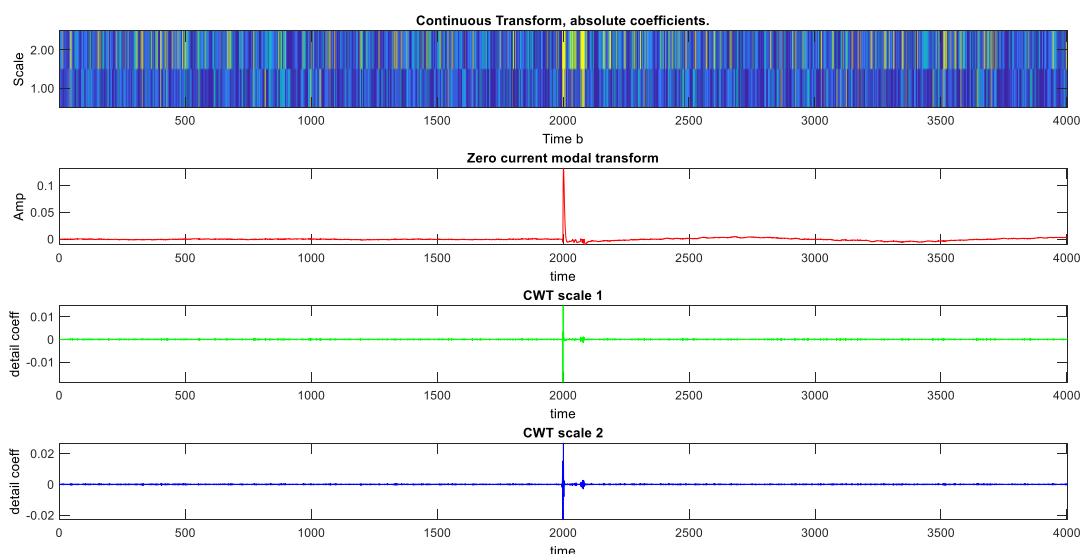
$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4-15)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{1.75 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-9}}} \quad (4-16)$$

$$v = 755928.946 \text{ m/s} \quad (4-17)$$

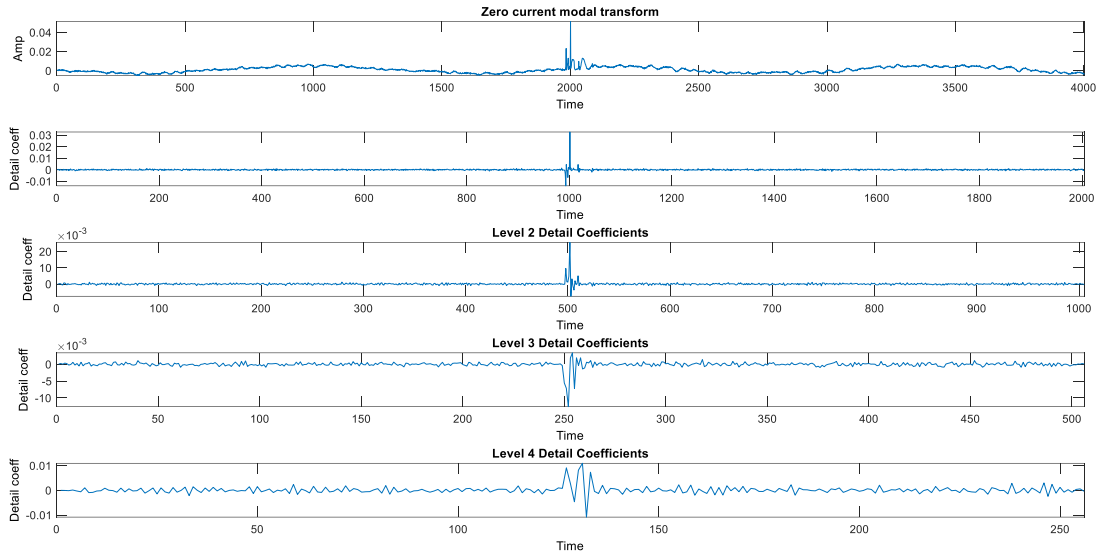
ผลของการแปลงสัญญาณเวฟเล็ตของสัญญาณที่สถานะไม่คงตัว (Transient) ในวงจรแบบจำลองจริง การแปลงข้อมูลกระแสที่รับเข้ามาแล้วทำการแปลงเวฟเล็ตเพื่อปรับสัญญาณในช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยรูปแบบการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณโดยการแปลงจะแยกออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการแปลงเพื่อดูช่วงของระยะทางการเกิดความผิดพลาดและส่วนที่ 2 เป็นการแปลงเพื่อดูเวลาที่เกิดขึ้นของหน้าคลื่นลูกที่ 1 และ 2

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตเพื่อดูสเกลของความถี่ 2 ช่วง ของการเกิดความผิดพลาดที่ไม่เกินครึ่งสายระยะน้อยกว่ากึ่งกลางของสายเมื่อทำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT) โดยแบ่งความถี่ออกเป็น 2 สเกล โดยความผิดพลาดที่ไม่เกินครึ่งสายจะปรากฏสัญญาณอยู่ในสเกล 1 ที่มีความถี่สูง ส่วนสัญญาณที่เกิดขึ้นในสเกล 2 ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดที่เกินครึ่งสายมากกว่าจุดกึ่งกลางของสาย



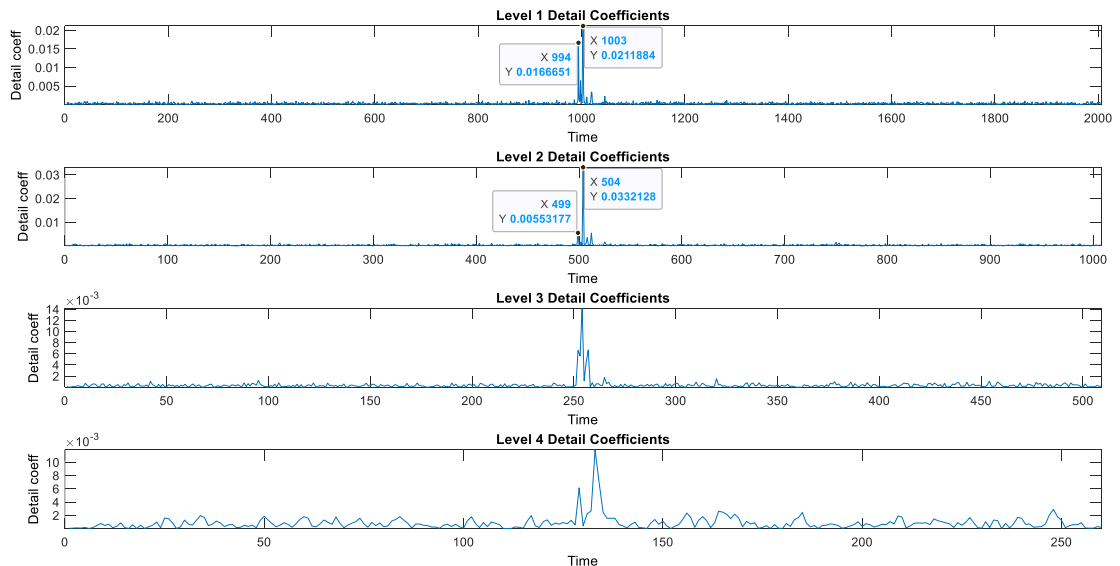
ภาพประกอบที่ 4-31 รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณเกินครึ่งสายซึ่งมีความถี่อยู่ในสเกล 2

การแปลงเวฟเลิตแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อดูเวลาที่เกิดหน้าคลื่นลูกที่ 1 และลูกที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปเพื่อหาช่วงของเวลาโดยการคำนวณระยะเวลาจะเป็นการจับเวลาจากคลื่นลูกที่ 1 และหน้าคลื่นลูกที่ 2 นำมาคำนวณระยะทางของความผิดพร่อง



ภาพประกอบที่ 4-32 รูปแบบการแปลงเวฟเลิตของสัญญาณไม่เกินครึ่งสาย

การคำนวณเวลาที่ได้จากสัญญาณที่จำลองความผิดพร่องที่ 50 m ทดสอบที่แรงดัน 20 V โดยให้ความผิดพร่องเกิดที่เฟส A ผ่านการแปลงเวฟเลิต โดยทำการคำนวณเวลาจากการแปลงเวฟเลิตที่สเกล 1 ในความผิดพร่องที่ไม่เกินครึ่งสาย และสเกล 2 ที่ความผิดพร่องมากกว่าครึ่งสาย



ภาพประกอบที่ 4-33 รูปแบบการแปลงเวฟเลิตของสัญญาณไม่เกินครึ่งสาย

การคำนวณเวลาโดยใช้เวลาน้ำคลื่นในสเกลที่ 1

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (4-18)$$

$$\Delta t = 1003 - 994 \quad (4-19)$$

$$t = 9 \text{ step} \quad (4-20)$$

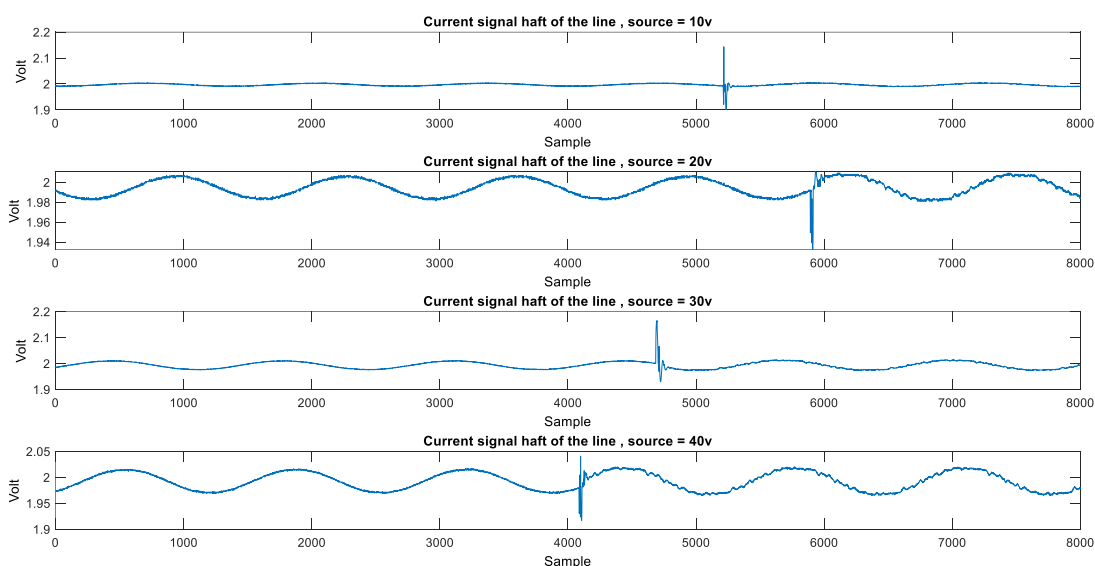
โดยเมื่อคูณกับเวลาสุ่มตัวอย่างที่จำลองคือ $6.0000024 \mu\text{s}$ ได้จากอัตราส่วนค่าความเร็วของบอร์ด
หารด้วยอินพุต $1/(500000/3)$ ค่าเวลาที่คำนวณได้คือ 10 step จะได้ค่าการจำลองระยะทางคือ

$$D = 755928.946 \times 9 \times 6.0000024 \times 10^{-6} \quad (4-21)$$

$$D = 40.82 \text{ m} \quad (4-22)$$

การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากวงจรจำลองสายส่ง

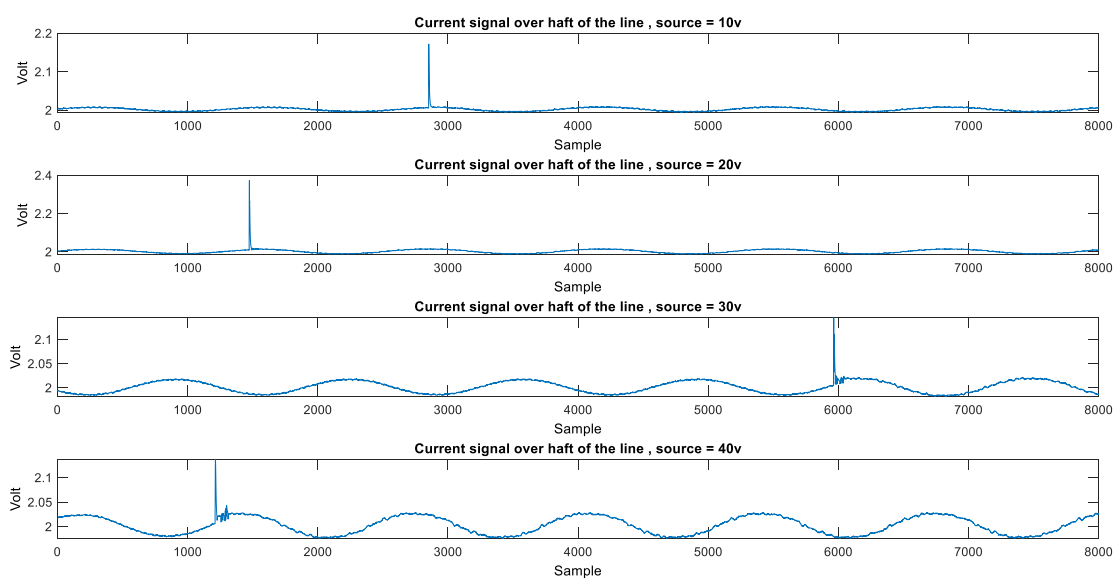
รูปแบบสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามแรงดันและกระแสที่จ่ายให้โหนดเพิ่มขึ้นของสัญญาณ
ความผิดพร่องไม่เกินครึ่งสาย เมื่อทำการจำลองความผิดพร่องจะเกิดสัญญาณไม่คงตัว (Transient)
อยู่ในซีกบวกและซีกลบ เนื่องจากการสะท้อนของสัญญาณของความผิดพร่องจะสะท้อนออกไปทั้ง 2
ด้าน ซึ่งรูปแบบสัญญาณจะคมชัดขึ้นหากเพิ่มแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับโหนดและรูปแบบ
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มตามสัญญาณกระแสและแรงดันดังกล่าวด้วยเนื่องจากใน
วงจรจำลองมีการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเอาไว้



ภาพประกอบที่ 4-34 รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่จ่ายโหนด

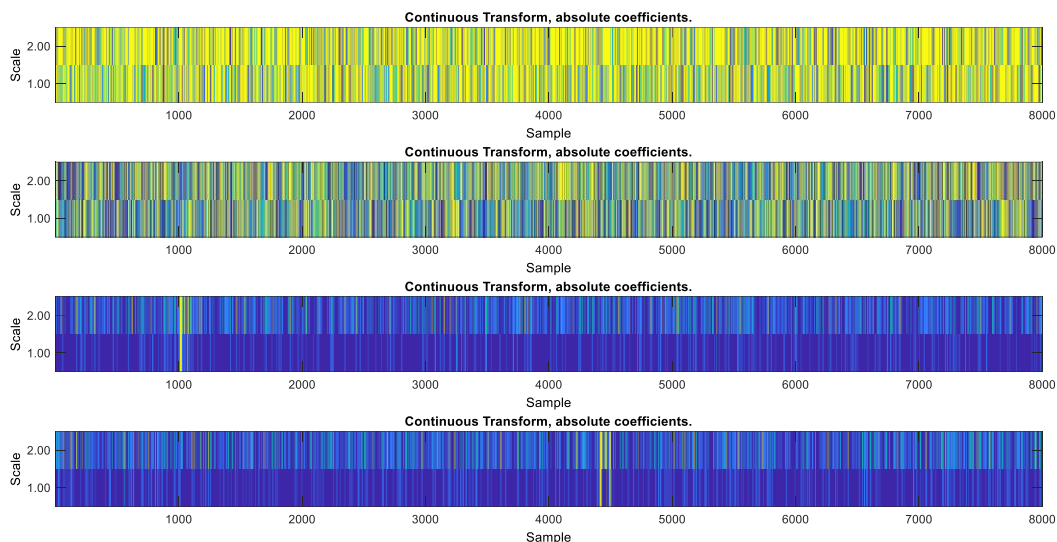
ตามระดับแรงดันความผิดพร่องครึ่งสาย

รูปแบบสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามแรงดันและกระแสที่จ่ายให้โหลดเพิ่มขึ้นของสัญญาณความผิดพลาดไม่เกินครึ่งสายจะพบรูปแบบของสัญญาณไม่คงตัว (Transient) ในซีกบวกเนื่องจากการสะท้อนของสัญญาณของความผิดพลาดจะสะท้อนออกไปแค่ด้านเดียวเนื่องจากความผิดพลาดที่ปลายสายมีระยะทางสั้น ซึ่งรูปแบบสัญญาณจะคมชัดขึ้นหากเพิ่มแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับโหลดและรูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มตามสัญญาณกระแสและแรงดันดังกล่าวด้วย



ภาพประกอบที่ 4-35 รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่จ่ายโหลดตามระดับแรงดันความผิดพลาดเกินครึ่งสาย

รูปแบบการแปลงเวฟเล็ทของสัญญาณที่ทำการแปลงในระยะต้นสาย และปลายสาย ที่สเกล 1 และสเกล 2 ของความผิดพลาด ไม่เกินครึ่งสาย และเกินครึ่งสายโดยแบบไม่เกินครึ่งสาย จะมีสัญญาณเกิดขึ้นที่สเกล 1 และแบบเกินครึ่งสาย จะมีสัญญาณเกิดขึ้นที่สเกล 2 โดยรูปแบบสัญญาณ สิ้นน้ำเงินจะแทนด้วยสัญญาณความถี่ต่ำ และสีเหลืองจะแทนด้วยสัญญาณความถี่สูง ตามภาพประกอบที่ 4-36 ในส่วนของสัญญาณ 2 ช่องแรก จะเห็นเส้นสีเหลืองปรากฏอยู่ทั้ง 2 สเกล ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณอยู่ในช่วงไม่เกินครึ่งสาย ส่วนสัญญาณในช่องที่ 3 และ 4 จะเห็นเส้นสีเหลืองปรากฏอยู่ในสเกล 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดความผิดพลาดในช่วงหลังครึ่งสาย ซึ่งมีผลมาจากความถี่ที่ต่างกันระหว่าง 2 ช่วง โดยการกำหนดช่วงจะทำให้การเลือกใช้สมการได้อย่างถูกต้อง



ภาพประกอบที่ 4-36 รูปแบบการแปลงสัญญาณกระแสที่ผ่านการแปลงจ่ายโพลตามระดับแรงดัน ความผิดพลาดเกินครึ่งสาย และไม่เกินครึ่งสาย

ผลการวัดระยะทางความผิดพลาดที่ได้จากการจับสัญญาณจากวงจรจำลองสายส่งที่ระยะไม่เกินครึ่งสาย และระยะที่เกินครึ่งสายโดยทำการทดสอบที่ค่าแรงดัน 10-40 V ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีตามตัวอย่างการคำนวณที่ (4-21), (4-22) มีค่าตามตาราง ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-28 การคำนวณระยะทางของสายส่งจำลอง ที่ระยะสายส่ง 100 m

ระดับแรงดัน (V)	ระยะทำการวัด (m)	เวลาที่จับได้ ΔT (μs)	ระยะทาง (m)
10	50	60.000024	45.3559
20	50	54.000024	40.82
40	50	60.000024	45.3559
10	100	6.000024	95.464
20	100	12.000024	90.928
40	100	6.000024	95.464

ในการทดสอบวัดสัญญาณในห้องทดลอง เนื่องจากสายส่ง ที่ทำการจำลองมีระยะสั้น จึงส่งผลให้รูปแบบของสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณช่วงเล็กๆ จึงทำให้การคำนวณระยะทางใช้เพียงคลื่นสองช่วงแรก โดยผลของสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นไม่เกินครึ่งสายจะพบสัญญาณของคลื่นกระแสในซีก

บวกและลบ ส่วนสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นครึ่งสายจะพบได้เฉพาะซีกบวกเท่านั้น โดยเมื่อแปลงเข้าสู่เวฟเล็ทสเกลจะตรงตามทฤษฎีที่ได้อ้างถึงในข้างต้น

4.5 ผลการทดสอบวัดระยะทางจากระบบจำหน่ายจริง

การติดตั้งตัวจับสัญญาณแบบปลายเดี่ยวโดยใช้เครื่องวัดติดตั้งที่ต้นทางของสถานีไฟฟ้าโดยมีการนำเข้าข้อมูลผ่านแบบจำลองตามภาพประกอบ 3-20 โดยใช้รูปแบบการวัดเช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบข้างต้นจะมีระยะเวลาของการสุ่มตัวอย่างที่ 8000 Sample ค่าอัตราสุ่มตัวอย่างที่ 500000 sample/s โดยผลในการคำนวณระยะทางจะมาจากโปรแกรม MATLAB โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งผลของกระบวนการบันทึกสัญญาณและการคำนวณจะแบ่งได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

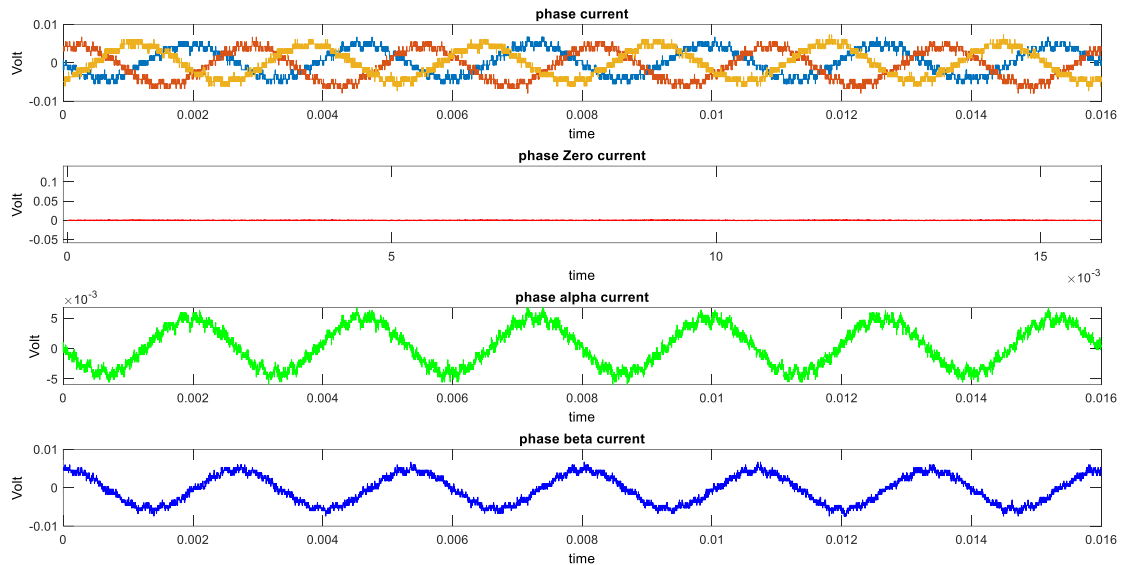
(1) การจับสัญญาณที่ได้จากสถานีไฟฟ้าโดยมีรูปแบบการทำงานตามภาพประกอบ 3-23 และ 3-24 เป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบเครื่องจับสัญญาณและโปรแกรมคำนวณระยะทาง เพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบสัญญาณจริง และประสิทธิภาพของเครื่องจับสัญญาณโดยใช้การหน่วงเวลาในการบันทึกความผิดพลาดที่สถานีไฟฟ้าโดยช่างแก่ไฟฟ้า โดยได้บันทึกค่าวัน เวลา เหตุการณ์ และค่าระยะทางความผิดพลาดของระบบจำหน่าย ตามเหตุการณ์โดยอ้างอิงจากระบบแจ้งไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากตัวเครื่องจับสัญญาณ

ตารางที่ 4-29 บันทึกเหตุการณ์ความผิดพลาดจากสถานีไฟฟ้า

วันที่	เวลา	เหตุการณ์	เฟส	ระยะทางที่ทำการบันทึก
7 ก.ย. 65	12.26	ลมแรง	CG	10 km
12 ก.ย. 65	14.57	นก/ค้างคาว	BG	30 km
13 ก.ย. 65	22.05	สัตว์	CG	7 km
15 ก.ย. 65	10.49	กิ่งไม้พาดสาย	CG	9 km
19 ก.ย. 65	9.41	สัตว์	CG	50 km
21 ก.ย. 65	11.43	Switching	ABC	8 km
22 ก.ย. 65	16.53	กิ่งไม้พาดสาย	CG	10 km
24 ก.ย. 65	00.54	นก/ค้างคาว	BG	43 km
26 ก.ย. 65	10.16	ลมแรง	AG	1 km

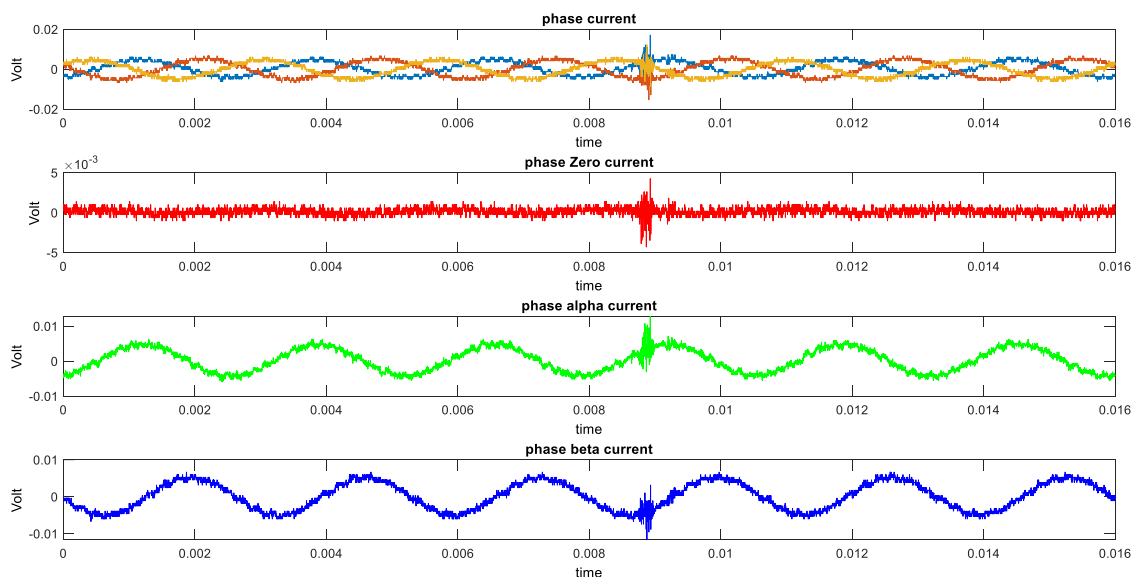
รูปแบบการจับสัญญาณที่สภาวะปกติ โดยผลของการจับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟส 100/1 ตามรูปที่ 3-21 โดยลักษณะแรงดันที่ได้เมื่อทำการแปลงสัญญาณจริงเพื่อดูค่าในรูป

I_0 , I_α , I_β จะมีลักษณะใกล้เคียงกับการทำแบบจำลองด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรูปแบบสัญญาณดังต่อไปนี้



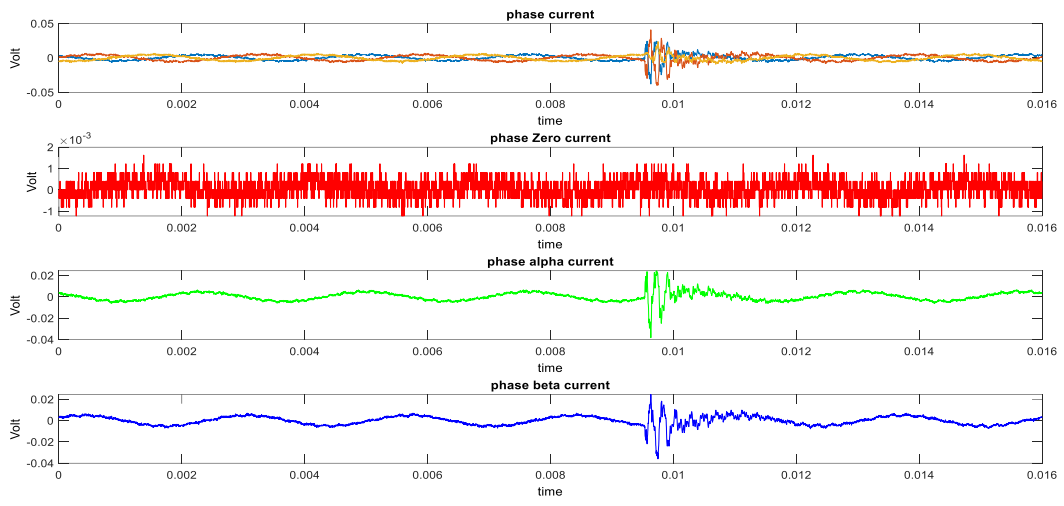
ภาพประกอบที่ 4-37 สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (Modal Transform) ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจับเก็บสัญญาณที่สภาวะปกติ

รูปแบบสัญญาณเมื่อเกิดความผิดปกติที่เกิขึ้นแบบลงดิน (Line to Ground Fault) โดยสัญญาณนี้จะเกิดค่ากระแสความผิดปกติที่ I_0 เรียกว่า (Zero Mode 1) ซึ่งจะเกิดสัญญาณไม่คงตัว (Transient) อยู่ในนั้นโดยความผิดปกติประเภทนี้เป็นประเภทไม่สมมาตรซึ่งเกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายได้มากที่สุด

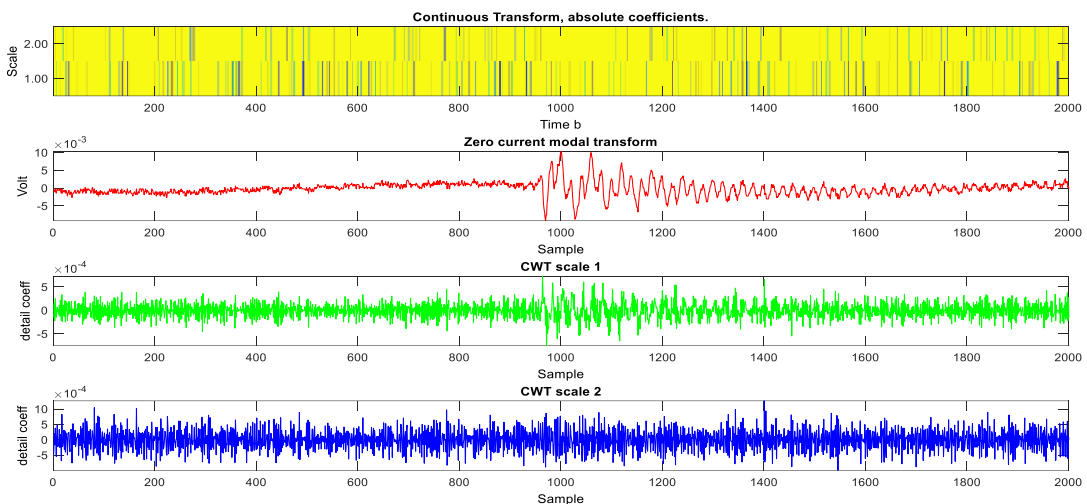


ภาพประกอบที่ 4-38 สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (Modal Transform) ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจับเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน

รูปแบบสัญญาณเมื่อเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นแบบไม่ลงดิน (Ungrounded) เป็นการเกิดความผิดปกติระหว่างเฟส หรือการปลดสับวงจรจ่ายไฟ โดยความผิดปกติประเภทนี้จะเป็นความผิดปกติแบบสมมาตรซึ่งจะไม่เกิดสัญญาณที่ I_0 เรียกว่า (Ariel Mode 1) จะมีสัญญาณปรากฏใน I_α I_β และ I_p แทน โดยในการคำนวณระยะทางจะใช้สัญญาณจากส่วนนี้แทน

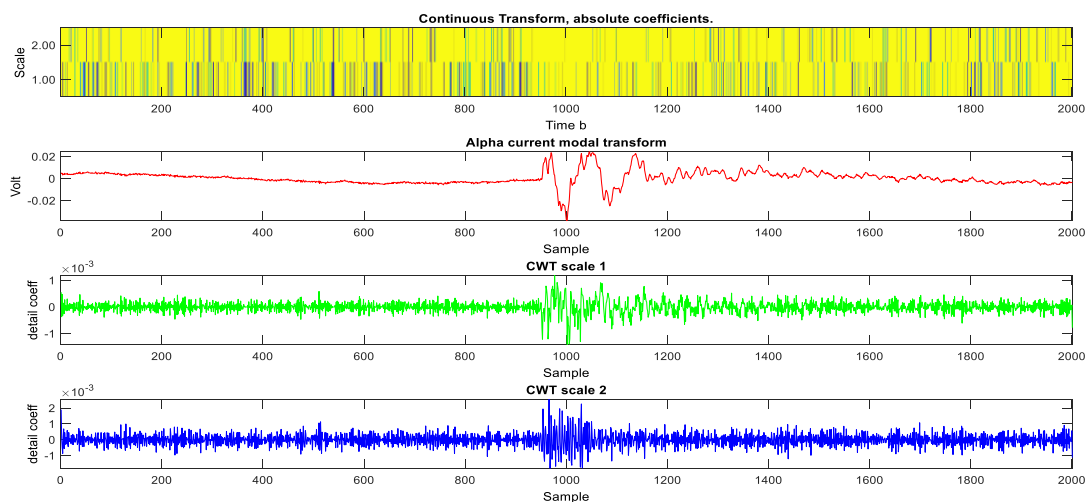


ภาพประกอบที่ 4-39 สัญญาณกระแส 3 เฟส ที่ผ่านการแปลง (Modal Transform) ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบไม่ลงดิน ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องเพื่อดูช่วงเวลาของการเกิดความผิดปกติโดยสัญญาณ I_0 ใช้เวฟเล็ต db 4 ที่สเกล 1-4 ของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดปกติ 1 เฟสลงดินที่ระยะไม่เกินครึ่งสายในการคำนวณความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดินจะใช้การแปลงสัญญาณเวฟเล็ตที่โหมด Zero I_0 ที่สเกล 1, 2 ซึ่งระดับของสัญญาณจะลดลงเมื่อเข้าสู่การแปลงระดับสเกลที่สูงขึ้น ซึ่งจะสรุปได้ว่าความถี่ของสัญญาณสูงสุดจะอยู่ในสเกล 1



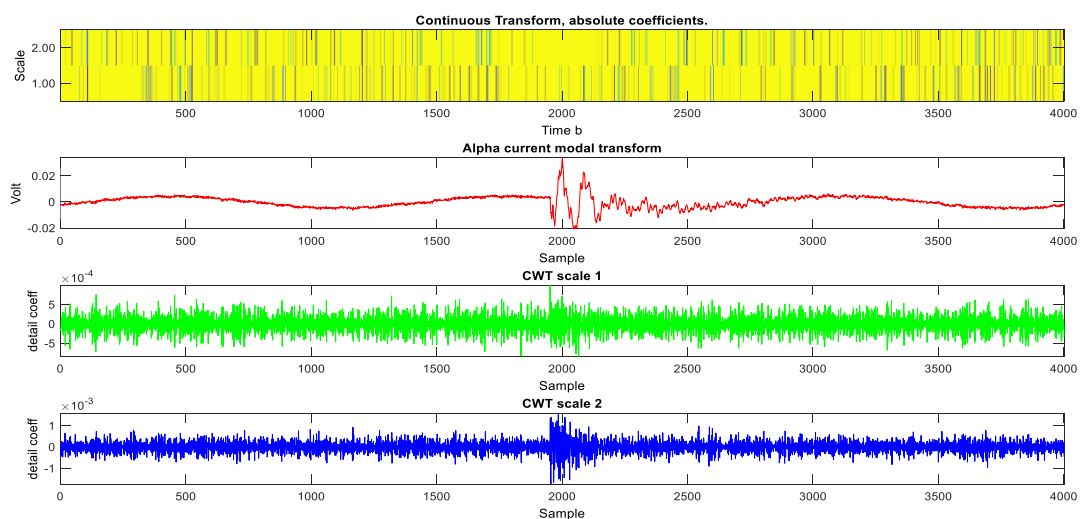
ภาพประกอบที่ 4-40 การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet Transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน

ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องโดยสัญญาณ I_α ใช้เวฟเล็ต db 4 ที่สเกล 1, 2 ของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดพลาด 1 เฟสแบบไม่ลงดิน ที่ระยะไม่เกินครึ่งสายในการคำนวณความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดินจะทำการแปลงสัญญาณเวฟเล็ตที่โหมด Alpha (I_α) ที่สเกล 1, 2 ซึ่งระดับของสัญญาณจะลดลงเมื่อเข้าสู่การแปลงระดับสเกลที่สูงขึ้น โดยสัญญาณกระแสจะปรากฏชัดเจนในรูปสเกลที่ 2



ภาพประกอบที่ 4-41 การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet Transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน

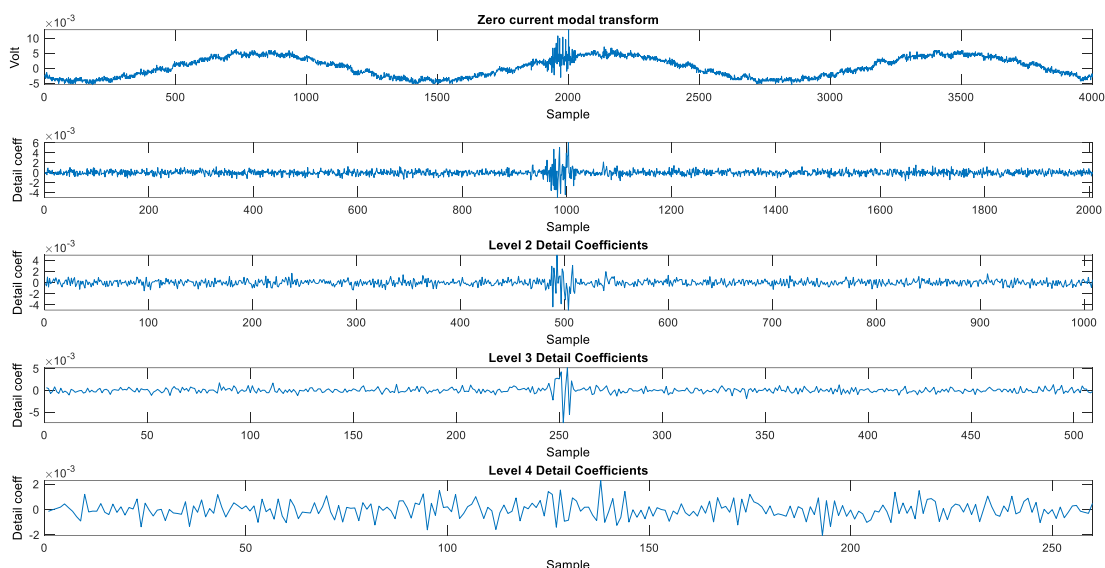
ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องโดยสัญญาณ I_α ใช้เวฟเล็ต db 4 ที่สเกล 1, 2 ของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดพลาด 1 เฟสแบบไม่ลงดินที่ระยะเกินครึ่งสายระยะทางเกินกว่าครึ่งหนึ่งของระยะสายส่ง ในการคำนวณความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดินจะทำการแปลงสัญญาณเวฟเล็ต ที่โหมด Alpha (I_α) ที่สเกล 1, 2 ซึ่งระดับของสัญญาณจะปรากฏอยู่ในสเกล 2



ภาพประกอบที่ 4-42 การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet Transform) ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดินเกินครึ่งสาย

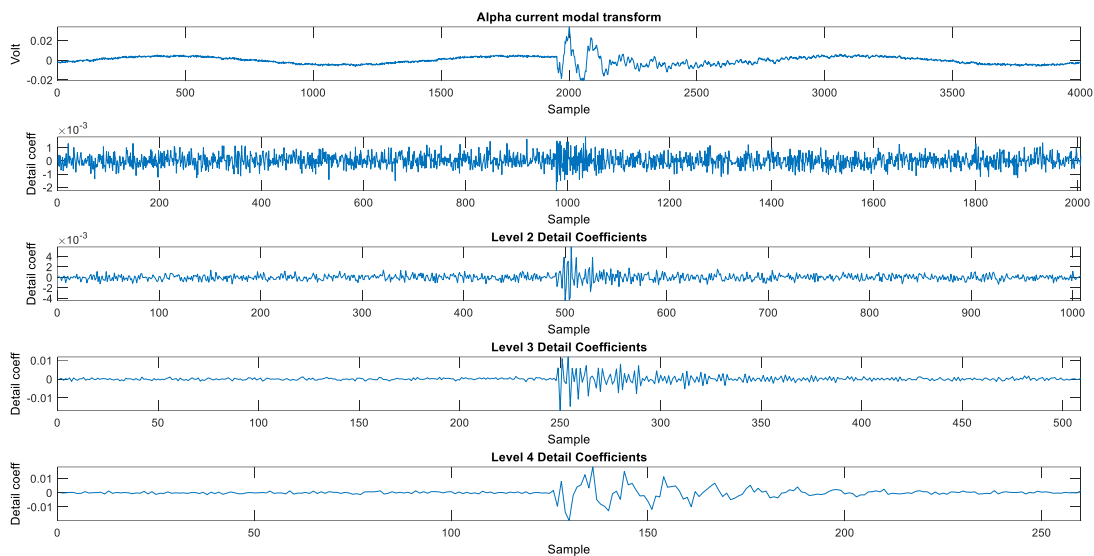
การวัดความเร็วเฟสในระบบสายส่ง ในการคำนวณความเร็วในสายส่งอ้างอิงจากรางที่ 3-2 ที่คำนวณโดยกองมาตรฐานระบบไฟฟ้า โดยใช้มาตรฐานวัสดุและการจัดเรียงสายส่ง อัตราพิกัดสายส่งที่ซึ่งมีการคำนวณจากผู้ผลิตโดยความเร็วเฟสในระบบสายส่งมีค่าเท่ากับ 263880 km/s

ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องจากสัญญาณ I_0 โดยใช้เวฟเล็ต db 4 ที่สเกล 1-4 ของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดพลาด 1 เฟสลงดิน ซึ่งทำการแปลงเวฟเล็ตที่สเกล 1-4 โดยลักษณะความผิดพลาดแบบนี้สัญญาณจะปรากฏเด่นชัดในสเกล 1 ซึ่งจะใช้ในการคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาดต่อไป



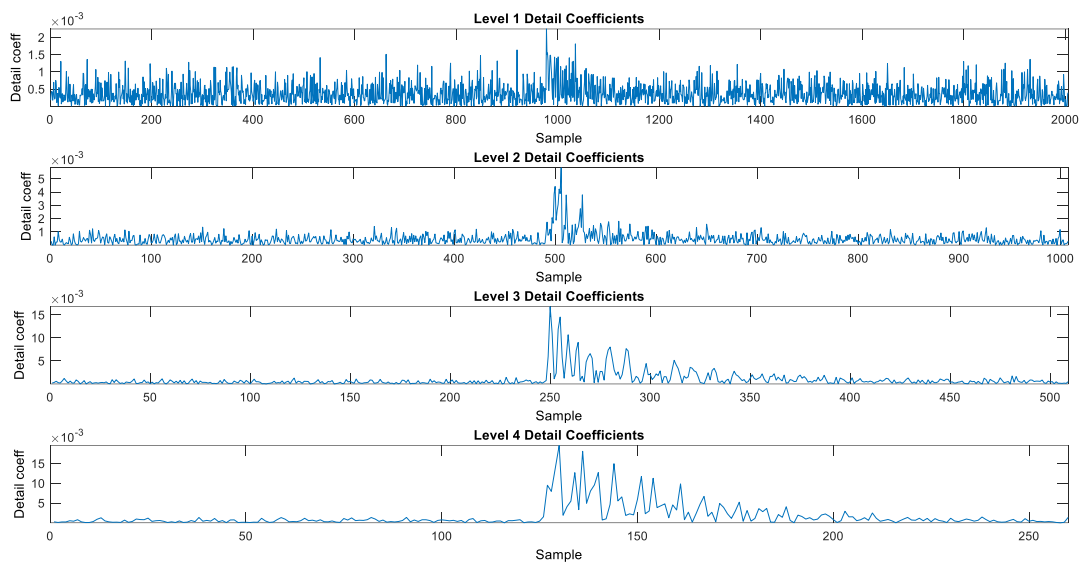
ภาพประกอบที่ 4-43 การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet Transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จาก สถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน

ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้โดยสัญญาณ I_u และแปลงเวฟเล็ตฟังก์ชัน db 4 ที่สเกล 1-4 ของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดพลาด 1 เฟสแบบไม่ลงดิน โดยสัญญาณจะปรากฏอยู่ในสเกลที่ 2 3 และ 4



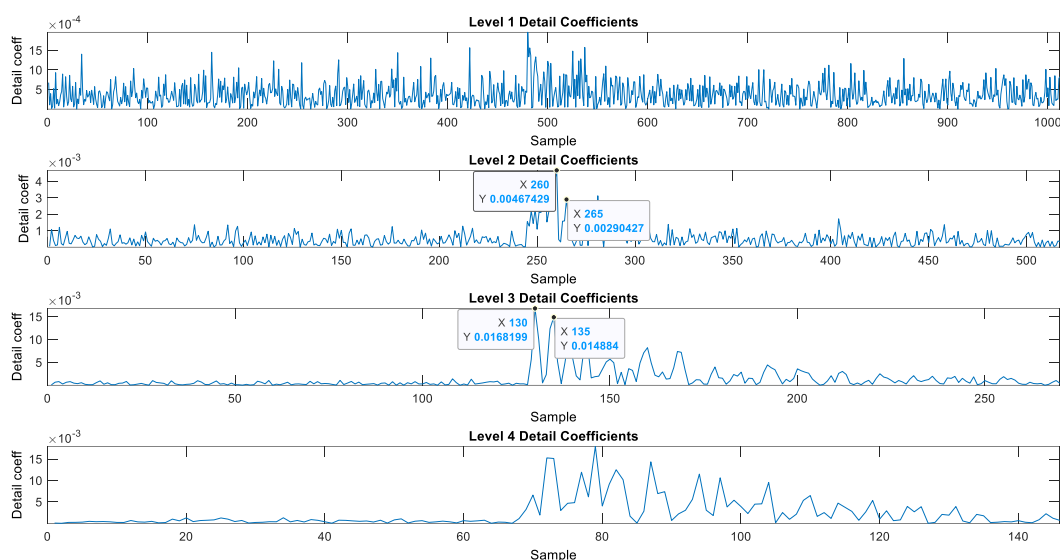
ภาพประกอบที่ 4-44 การแบ่งสเกล ที่ผ่านการแปลง (Wavelet Transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จาก สถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดิน

ผลการคำนวณระยะทางโดยใช้ค่าสัมบูรณ์ของเวฟเล็ตโคเอฟิเชียนเพื่อเวลาที่เกิดขึ้นระหว่าง รูปคลื่นโดยการใช้เวลาจากการหักล้างกันของยอดคลื่นของสัญญาณไม่คงตัวที่เกิดความผิดพลาด 1 เฟสลงดิน



ภาพประกอบที่ 4-45 การแบ่งสเกลค่าสัมบูรณ์การแปลง (Wavelet Transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้า

ผลการคำนวณระยะทางโดยใช้ค่าสัมบูรณ์ของเวฟเลตโคเอฟฟิเชียนเพื่อเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างรูปคลื่นโดยสัญญาณที่ได้เป็นการเกิดความผิดปกติครั้งสายระยะทางเกินครึ่งหนึ่งของสายส่งเนื่องจากเมื่อแปลงสัญญาณออกมาแล้วไม่มีสัญญาณที่ความถี่สเกล 1 โดยการคำนวณระยะทางโดยใช้เวลาเวลาจากการมาถึงของหน้าคลื่นที่ 1 ลบกับหน้าคลื่นลูกที่ 2



ภาพประกอบที่ 4-46 การแบ่งสเกลค่าสัมบูรณ์การแปลง (Wavelet Transform) ไม่ต่อเนื่อง ที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าและบันทึกโดยเครื่องจัดเก็บสัญญาณที่สภาวะไม่คงตัวแบบลงดินเกินครึ่งสาย

การคำนวณเวลาโดยใช้เวลาน้ำคลื่นในสเกลที่ 2

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (4-23)$$

$$\Delta t = 265 - 260 \quad (4-24)$$

$$t = 5 \text{ step} \quad (4-25)$$

โดยเมื่อคูณกับเวลาสุ่มตัวอย่างที่จำลองคือ $6.000024 \mu\text{s}$ ได้จากอัตราส่วนค่าความเร็วของบอร์ดหารด้วยอินพุต $1/(500000/3)$ ค่าเวลาคือ 5 step จะได้ค่าการจำลองระยะทางเนื่องจากระยะทางของความผิดปกติเกิดขึ้นเกินครึ่งสาย ระยะทางเกินครึ่งหนึ่งของของสายส่งจะมีการคำนวณระยะทางดังนี้

$$D = 55.4 - (263880 \times 5 \times 6.000024 \times 10^{-6}) \quad (4-26)$$

$$D = 47.48 \text{ km} \quad (4-27)$$

(2) ผลการทดสอบหาระยะทาง

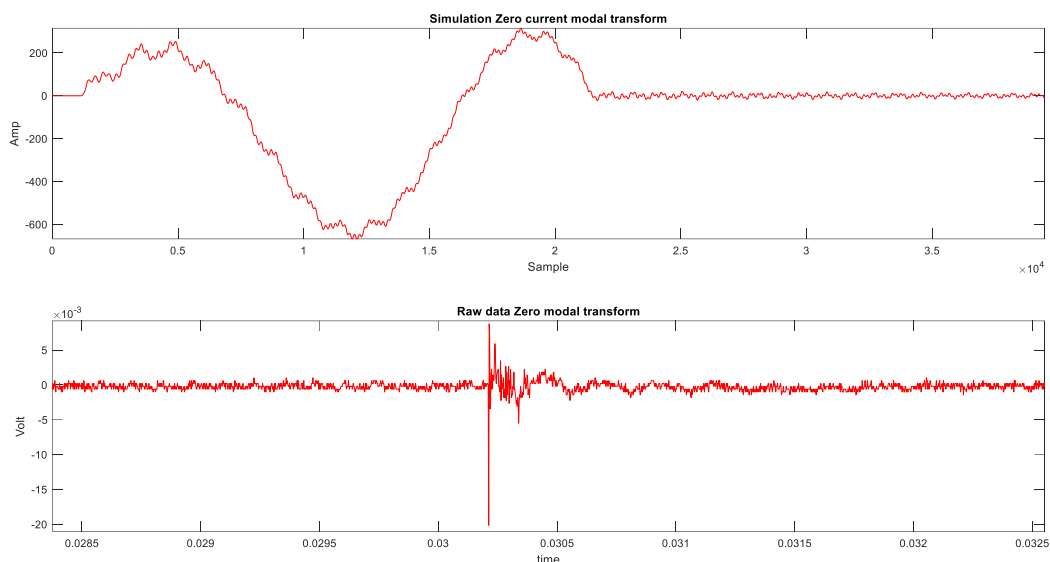
ความแม่นยำของอัลกอริทึมระยะทางที่ได้จากการคำนวณระยะทางตามตัวอย่างที่ (4-26), (4-27) จะใช้ระยะทางจากการบันทึกด้วยช่างซ่อมไฟฟ้าที่บันทึกการแก้ไขจากหน้างานจริง เปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ได้จากการบันทึกระยะทางจากเครื่องจัดเก็บสัญญาณความผิดพลาด โดยมีค่าตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-30 ผลการคำนวณระยะทางความผิดพลาดตามเหตุการณ์

วันที่	เวลา	เหตุการณ์	เฟส	ระยะทางที่ทำการบันทึก	ระยะทางที่ทำการคำนวณได้	ระยะทางที่คลาดเคลื่อน
7 ก.ย. 65	12.26	ลมแรง	CG	10 km	7.152 km	2.84 km
12 ก.ย. 65	14.57	นก/ค้างคาว	BG	30 km	28.61 km	1.39 km
13 ก.ย. 65	22.05	สัตว์	CG	7 km	8.94 km	1.94 km
15 ก.ย. 65	10.49	กิ่งไม้พาดสาย	CG	9 km	7.25 km	1.75 km
19 ก.ย. 65	9.41	สัตว์	CG	50 km	47.48 km	2.52 km
21 ก.ย. 65	11.43	กิ่งไม้พาดสาย	ABC	8 km	10.40 km	2.40 km
22 ก.ย. 65	16.53	กิ่งไม้พาดสาย	CG	10 km	10.73 km	0.73 km
24 ก.ย. 65	00.54	นก/ค้างคาว	BG	43 km	44.87 km	1.87 km
26 ก.ย. 65	10.16	ลมแรง	AG	1 km	3.58 km	2.58 km

4.5.9 การวิเคราะห์ผลจากการใช้เก็บผลทดสอบระยะทางของการเกิดความผิดพลาดจากระบบจำหน่ายจริง

การวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณจริง เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้มาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ Simulation แสดงได้ตามภาพประกอบที่ 4-47 จะมีความแตกต่างกัน 2 ประเภท ประเภทแรกคือรูปแบบกระแสและแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันในเรื่องของสัญญาณรบกวนและลักษณะของรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการทดสอบการแปลงสัญญาณทั้งสอง สัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งจะทำให้การแปลงได้ค่าที่แม่นยำกว่า และประเภทที่สองคือการสุ่มสัญญาณด้วยโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์จะมีอัตราสุ่มสัญญาณที่สูงกว่า ซึ่งข้อจำกัดของการเก็บสัญญาณจริงจะมีอัตราสุ่มสัญญาณของ FPGA ทำให้ความแม่นยำในการคำนวณลดน้อยลงตามไปด้วย



ภาพประกอบที่ 4-47 สัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และ สัญญาณความผิดพร่องที่ได้จากสัญญาณจริงที่สถานีไฟฟ้า

การวิเคราะห์การหาระยะทางของการเกิดความผิดพร่องของสัญญาณจริงจากสถานีไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะทางที่ทำการบันทึกจากระบบแก้ไฟฟ้าขัดข้องตามตารางที่ 4-30 พบว่ามีเหตุการณ์ที่สามารถคำนวณระยะทางได้ความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับระยะทางจริงจำนวน 5 เหตุการณ์ และไม่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงจำนวน 4 เหตุการณ์ ทั้งนี้ โดยระยะทางที่คำนวณผิดพลาดจะเกิดจากปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์บันทึกผล (Sampling Rate) และตัวรับสัญญาณญาณที่ผ่านหม้อแปลงกระแสซึ่งมีลักษณะเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ จึงทำให้สัญญาณความถี่สูงบางเหตุการณ์ขาดหายเพราะถูกกรองออก จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณโดยเหตุการณ์ที่คำนวณระยะทางได้ความคลาดเคลื่อนน้อยนั้นจะเป็นเหตุการณ์ที่เครื่องมือจับสัญญาณจับกระแสได้เต็มรูปคลื่นไม่ขาดหายเนื่องจากมีกระแสความผิดพร่องที่สูงส่วนเหตุการณ์ที่เกิดกระแสความผิดพร่องต่ำจะทำให้เครื่องจับสัญญาณจับได้ไม่เต็มรูปคลื่นส่งผลต่อการคำนวณที่ผิดพลาดตามไปด้วย

ประสิทธิภาพของเครื่องมือจัดเก็บสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณขาเข้าของเครื่องมือวัดโดยอัตราสุ่มตัวอย่างสูงสุดที่ทำได้คือ 500000 ตัวอย่าง ต่อวินาที โดยสัญญาณรบกวนและกระแสของความผิดพร่องมีผลต่อการคำนวณระยะทาง กล่าวคือกระแสความผิดพร่องที่มีค่าน้อยจะทำให้สัญญาณขาเข้าไม่สามารถจับยอดคลื่นได้เหมือนกับกระแสของความผิดพร่องที่มีค่ามาก

4.6 ผลจากการจำแนกข้อมูลจากการใช้โมเดลทำนายความผิดพร่องโดยใช้ระยะทาง

จากรูปแบบการทดสอบ ภาพประกอบที่ 3-28 จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงการข้อมูลที่มีน้ำหนักต่อ class มากที่สุดและประสิทธิภาพของการใช้โมเดลทำนายระยะทางซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีความสำคัญในการทำนายเหตุการณ์ด้านไฟฟ้าขัดข้องในอนาคต

4.6.1 ผลของการหาค่าของค่า Information Gain ค่าความสอดคล้องกันของข้อมูล
ตารางที่ 4-31 ผลคำนวณค่า information Gain ตาม Future

ลำดับที่	Features	ค่า IG (Entropy)	ค่า IG (Gini)
1	เวลา	0.9707820	0.1261689
2	ประเภทการทำงาน	0.9392649	0.1541340
3	ระยะทางของการเกิดความผิดปกติ	2.1220239	0.4338799
4	สาเหตุ	0.7900999	0.1325000
5	สภาพอากาศ	0.8769509	0.1119350
	Class รายละเอียด	อุปกรณ์ชำรุด, สัตว์, ต้นไม้, การกระทำ โดยมนุษย์, ภัยธรรมชาติ, ปรับปรุงระบบ ฯลฯ	

จากตารางจะทำการสรุปได้ว่าค่าที่สอดคล้องกับการทำนายสาเหตุ โดยการใช้ข้อมูลใน 1 เดือน จำนวน 60 รายการ โดยสภาพอากาศเป็นข้อมูลที่ส่งผลให้เกิดรายละเอียดของการเกิดความผิดปกติมากที่สุด ส่วนระยะทางของการเกิดความผิดปกติมีผลต่อการทำนายข้อมูลน้อยที่สุด รองลงมาเป็นสาเหตุ เวลา และประเภทของการทำงาน เนื่องจากข้อมูลระยะทางไม่สามารถกำหนดรายละเอียดได้โดยการเกิดสาเหตุของอุปกรณ์ชำรุด สัตว์ ต้นไม้ จะเกิดที่ระยะทางที่แตกต่างกันไป ซึ่งข้อมูลสภาพอากาศจะส่งผลกับระบบได้มากกว่า เช่น สภาพอากาศจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับต้นไม้ และอุปกรณ์ชำรุด เป็นต้น

4.6.2 ผลของการหาค่าของค่าโดยการใช้หลักการการทำนายของ Naïve Bayes

ตารางที่ 4-32 การประมาณการและผลการทำนายของการเกิดความผิดปกติ

ระยะทางในการทดสอบ (km)	รายละเอียดของการเกิด ความผิดปกติ/ทำนาย	รายละเอียดของการเกิด ความผิดปกติ/ผลจริง
20	ต้นไม้ล้มทับสาย	สัตว์
30	ลมแรง	ฝนฟ้าคะนอง ลมพัด
40	กิ่งไม้พาดสาย	สัตว์
50	ชำรุด	สัตว์

การทำนายรายละเอียดของสาเหตุการเกิดความผิดปกติจากการใช้ระยะทางผลจากการทำนายใน 4 เหตุการณ์สามารถทำได้ถูกต้อง 1 รายการส่วนอีก 3 รายการทำนายได้ผิดพลาด เนื่องจากการบันทึกสาเหตุการเกิดความผิดปกติเทียบระยะทาง มีจำนวนรายการสาเหตุมากขึ้นไป

ส่งผลให้ข้อมูลไม่เกาะกลุ่ม หากนำมาทำการจัดกลุ่มใหม่จะทำให้ผลของข้อมูลมีการเกาะกลุ่มมากขึ้น จะสามารถทำนายได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

4.6.3 ผลการทดสอบ Model จำนวน 18 รายการคิด เป็น 30% ของรายการทั้งหมด 60 รายการ ได้ผลการทำนายความแม่นยำดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-33 ตารางสรุปผลการทำนายสาเหตุความผิดปกติ

Features	ผลที่ทำนายทั้งหมด	ผลที่ทำนายถูกต้อง
เวลา	18	4
ประเภทการทำงาน	18	5
ระยะทางของการเกิดความผิดปกติ	18	6
สาเหตุ	18	2
สภาพอากาศ	18	13

การทำนายโดยใช้แบบจำลองจะทำนายผลของสภาพอากาศได้ถูกต้องแม่นยำที่สุด สอดคล้องกับการวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูล ซึ่งหากใช้การวิเคราะห์สาเหตุระยะทางให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นก็จำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลแบบรายปี หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการบันทึกระยะทางความผิดปกติในระบบบันทึกไฟฟ้าขัดข้อง

ผลจากการจำแนกข้อมูลจากการใช้โมเดลทำนายความผิดปกติ ข้อมูลที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อสาเหตุของการเกิดความผิดปกติมากที่สุดคือสภาพอากาศ ส่วนระยะทางมีผลต่อสาเหตุของความผิดปกติน้อยที่สุดซึ่งผลมาจากจำนวนรายการของสภาพอากาศมีการเกาะกลุ่มของข้อมูลมากกว่าในส่วนระยะทางนอกจากจะมีความเกาะกลุ่มน้อย ยังมีจำนวนข้อมูลที่หลากหลายกว่าจากที่กล่าวมาข้างต้นหากนำข้อมูลสภาพอากาศไปทำการทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดปกติก็จะทำได้ อย่างแม่นยำตามไปด้วย

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากการเก็บผลการทดลองที่ได้ทำการทดลองในทฤษฎีข้างต้นการศึกษาการทำงานและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่าย ที่สอดคล้องกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อศึกษาวิธีการระบุระยะทางของความผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ โดยใช้หลักการและทฤษฎีคลื่นจรเปรียบเทียบกับวิธีคำนวณแบบอิมพีแดนซ์ ซึ่งวิธีการคำนวณความผิดพลาดโดยใช้คลื่นจรมีความแม่นยำกว่าเพราะลดตัวแปรในการคำนวณและไม่มีผลกระทบจากโหลดและความต้านทานในระบบ ซึ่งจากการทดสอบข้างต้นนำไปออกแบบเครื่องจัดเก็บสัญญาณและกระบวนการการทำงานและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อระบุพิกัดตำแหน่ง ความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายโดยทดสอบกับระบบจำหน่ายจริง โดยออกแบบและจัดทำเครื่องจัดเก็บสัญญาณและแบบจำลองให้สอดคล้อง กับระบบระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่มีเครื่องมือวัดที่ใช้งานอยู่ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในปัจจุบัน และจัดทำเครื่องมือสรุป และทำนายผลและสาเหตุของการเกิดความผิดพลาดเบื้องต้น โดยใช้ระยะทางและข้อมูลจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลที่บันทึกจากฐานข้อมูลจริง ซึ่งผลที่ได้มีความแม่นยำของข้อมูลสามารถทำนายระยะทางได้โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยสามารถนำไประบุระยะของความผิดพลาด เพื่อเป็นตัวช่วยในการค้นหาตำแหน่งและสามารถนำไปต่อยอดพัฒนากระบวนการการทำงานในอนาคต เพื่อตอบสนองการจัดการด้านไฟฟ้าให้มีความมั่นคงต่อไป

5.2 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอการพัฒนาการออกแบบวิธีค้นหาจุดผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยพัฒนาการค้นหาจุดผิดพลาดวิธีเดิม ระบุปัญหา และทดแทนส่วนที่มีปัญหานั้นในกระบวนการใหม่ โดยศึกษาและทดลองการคำนวณแบบใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์ ในทฤษฎีที่แตกต่างกันคำนวณและสรุปผล รวมทั้งทดลองสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการใหม่ ทดลองหาข้อสรุปทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

โดยการทำงานในส่วนแรกเป็นส่วนของความเข้ามาของการทำงานวิจัย วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขต และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

จากข้อมูลข้างต้นนำทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้องมาเรียบเรียงโดยใช้เนื้อหาและสมการที่คำนวณความผิดพลาดด้วยอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วย วิธีคำนวณอย่างง่าย (Simple Reactance) วิธีคำนวณแบบทากากิ (Takagi Method) วิธีการคำนวณความผิดพลาดด้วยการใช้คลื่นจร (Traveling Wave Method) ประกอบด้วย การคำนวณแบบใช้แรงดัน (Transient Voltage Method) การคำนวณแบบใช้กระแส (Traveling Wave Single End) และทฤษฎีการหาความสอดคล้องของข้อมูล (Information Gain) การจำแนกและทำนายข้อมูลโดยใช้สาเหตุ (Naïve Bayed)

โดยใช้ข้อมูลทางทฤษฎีและสมการ นำเสนอรูปแบบของการทดลอง โดยการใช้แบบจำลองและคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ (MATLAB Simulink) เพื่อหาวิธีที่ดีที่สุดในการคำนวณความผิดพลาดต่อมาเป็นการสร้างโมเดลและทดลองในห้องปฏิบัติการ การสร้างเครื่องบันทึกสัญญาณความผิดพลาดนำมาทดสอบกับโมเดลสายส่งเพื่อดูแนวทางของสัญญาณและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจับสัญญาณ และนำไปทดสอบในการใช้การคำนวณในระบบไฟฟ้าจริงโดยคำนวณเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สุดท้ายใช้วิธีการหาความสอดคล้องของข้อมูล วิธีการจำแนกและการทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดพลาด

จากการทดลองด้วยวิธีข้างต้น จะทำการสรุปรูปแบบของผลการทดลองโดยการใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (MATLAB Simulink) ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกสัญญาณความผิดพลาดและใช้การคำนวณในระบบไฟฟ้าจริง ผลของการหาความสอดคล้องของข้อมูล ผลการจำแนกและการทำนายสาเหตุของการเกิดความผิดพลาด

ผลการทดสอบการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองสามารถคำนวณระยะทางในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ โดยระยะทางที่ได้สามารถใช้เป็นตัวช่วยในการค้นหาตำแหน่งความผิดพลาดของช่างหน้างาน เพื่อการค้นหาความผิดพลาดที่รวดเร็ว ตอบสนองผู้ใช้ไฟฟ้า

5.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองสร้างเครื่องเก็บสัญญาณซึ่งนำไปทดสอบกับระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งติดปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์บันทึกผลและตัวรับสัญญาณ จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ ทั้งนี้หากได้พัฒนาตัวอุปกรณ์และตัวกรองสัญญาณโดยใช้แนวทางตามงานวิจัยนี้ก็ส่งผลให้มีคุณภาพของสัญญาณมากยิ่งขึ้นและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการใช้งานคลื่นจรในการวัดระยะทางแพร่หลายยิ่งขึ้น ก็เป็นแนวทางการต่อยอดและพัฒนากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้

บรรณานุกรม

- [1] Lingwei Zhan, Yong Liu, “A Clarke Transformation-based DFT Phasor and Frequency Algorithm for Wide Frequency Range,” IEEE Transactions on Smart Grid., Volume 9 Issue 1, January 2018, pp. 67-77, 2018.
- [2] Paul S. Addison, “The Illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science Engineering, Medicine and Finance”. United Kingdom: CRC Press Taylor & Francis Group, pp.16-153, 2017.
- [3] ทักษิณ โสภานิช, “เอกสารประกอบการสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า,” 29 กรกฎาคม 2563, ค้นจาก <https://anyflip.com/jcljx/ppqt/basic>
- [4] กิตติพัฒน์ ตันตระกูลโรจน์, “ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า (Electric Transmission Line Theory),” กรุงเทพฯ: บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, หน้า 10-70, 2541.
- [5] SWAGATA DAS, SURYA SANTOSO, ANISH GAIKWAD, and MAHENDRA PATEL, “Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application,” IEEE Practical Innovations: Open Solutions Volume 2., May 2014, pp. 537-557, 2014.
- [6] F.H. Magnago, A. Abur, “fault Location Using Wavelets,” IEEE Transactions on Power Delivery., Volume 13 Issue 4, October 1998, pp. 1475-1480, 1998.
- [7] Karl Zimmerman and David Costello Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., “Impedance-Based Fault Location Experience,” 2006 IEEE Rural Electric Power Conference, April 2006, 8th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, April 2005, and 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp.1-27, April 2005.
- [8] S. L. Zimath, M. A. F. Ramos, J. E. S. Filho, “Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults” 2010 IEEE

- [9] S. Lotfifard, M. Kezunovic, and M. J. Mousavi, "A systematic approach for ranking distribution systems fault location algorithms and eliminating false estimates," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 1, pp. 285–293, Jan. 2013.
- [10] M. M. Saha, R. Das, P. Verho, and D. Novosel, "Review of fault location techniques for distribution systems," in *Proc. Power Syst. Commun. Infrastruct. Future*, Sep. 2002.
- [11] J. Mora-Flòrez, J. Melóndez, and G. Carrillo-Caicedo, "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems," *Electric. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 657–666, 2008.
- [12] M. Mirzaei, M. Z. A. A. Kadir, E. Moazami, and H. Hizam, "Review of fault location methods for distribution power system," *Australian J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 2670–2676, 2009.
- [13] O.D. Naidu, "Precise Traveling Wave-Based Transmission Line Fault Location Method Using Single-Ended Data," *IEEE Transactions on Industrial Informatics.*, Volume 17 Issue 8, August 2021, pp. 5197-5207, 2021.
- [14] Edmund O. Schweitzer, III, Armando Guzmán, Mangapathirao V. Mynam, Veselin Skendzic, and Bogdan Kasztenny Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch," This paper was presented at the 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers and can be accessed at:<http://dx.doi.org/10.1109/CPRE.2014.6798997>., pp.1-26
- [15] Roberto Benato, Senior Member, IEEE, Sebastian Dambone Sessa, Member, IEEE, Michele Poli, Cristiano Quaciari, and Giovanni Rinzo, Graduate Student Member, "IEEE, An Online Travelling Wave Fault Location Method for Unearthed-Operated High-Voltage Overhead Line Grids," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 33, NO. 6, DECEMBER 2018.
- [16] R. Jalilzadeh Hamidi , Member, IEEE, and Hanif Livani , Member, IEEE, "A Recursive Method for Traveling-Wave," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 34, NO. 2, pp.710-719, APRIL 2019

[17] กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า (กвр.) ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า (ฟвр.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค “ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าของ กฟภ.” pp.1-20, 2564

[18] Benemar Alencar de Souza; Angelo Márcio Formiga de Almeida “Multiobjective Optimization and Fuzzy Logic Applied to Planning of the Volt/Var Problem in Distributions Systems” IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 25, Issue: 3, August 2010),pp.1274-1281, 01 April 2010

[19] Mohammed J. Islam*, Q. M. Jonathan Wu, Majid Ahmadi, Maher A. Sid-Ahmed, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Windsor, Windsor, ON, Canada, “Investigating the Performance of Naïve- Bayes Classifiers and K- Nearest Neighbor Classifiers” Journal of Convergence Information Technology Volume 5, Number 2,pp.133-137 ,April 2010

[20] I Rish, “An Empirical Study of the Naive Bayes Classifier”, Proceedings of IJCAI-01, New Zealand, 2001

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายสวัสดิ์ ศรีนาค	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6310120088	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2556

ทุนการศึกษา

ทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตำแหน่ง วิศวกร ระดับ 5
สถานที่ทำงาน แผนกบริการลูกค้าและการตลาด การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสาขาอำเภอปากพะยูน

ภาคผนวก 1

การระบุตำแหน่งความผิดปกติในสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเปรียบเทียบวิธีคำนวณอิมพีแดนซ์ และคำนวณด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบปลายเดียว

Fault localization in Distribution System of PEA

by Comparing Impedance based method and Single-End Traveling

วสวัตต์ ศรีนาค¹ และ วรฤทธิ์ วิชกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ wasawatopp@gmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ warit.wi@psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการออกแบบวิธีค้นหาจุดผิดปกติในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยคำนวณระยะทางของจุดผิดปกติจากวิธีคำนวณแบบอิมพีแดนซ์ เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยใช้คลื่นสะท้อนแบบปลายเดียว โดยคำนวณและสรุปผล ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่จำลองระบบสายส่งที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งออกแบบเครื่องมือเก็บสัญญาณเพื่อทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองวงจรสายส่งที่ใช้ค่าพิกัดของระบบจำหน่ายจริง เพื่อหาข้อสรุปว่าทฤษฎีคลื่นสะท้อนแบบปลายเดียวที่นำมาใช้ สามารถใช้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้จริงและมีความแม่นยำกว่าวิธีอิมพีแดนซ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

คำสำคัญ: คลื่นสะท้อนแบบปลายเดียว, การค้นหาตำแหน่งจุดผิดปกติ

Abstract

This paper explains the development of the fault location finding method for the distribution system of PEA by the impedance resistance calculation compared to traveling wave single-end by calculating and summarizing with a computer mode; that simulates the transmission line system, as well as, designing the signal's collector for test in the laboratory with a transmission line that uses in the distribution system. To conclude, single-ended reflectance can be used in the distribution system of the Provincial Electricity Authority and is more accurate than the impedance method.

Keywords: Traveling Wave Single-End, Fault Location

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคใต้ ในปัจจุบัน ออกแบบให้คู่ขนานไปกับถนนทางหลวงสายหลักไปจนถึงทางหลวงชนบท ทำให้เกิดวงจรไฟฟ้าที่หลากหลายและเชื่อมโยงเป็นโครงข่าย มีลักษณะคล้ายกังปลา เนื่องจากสภาพแวดล้อมของพื้นที่เป็นภูเขาสลับทะเล ซึ่งมีความแตกต่างจากภูมิภาคอื่น โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ คือ การลัดวงจรที่เกิดจากสภาพ สภาพแวดล้อม และสัตว์ ร่องลงมา คือ อุปกรณ์ชำรุด และการลัดวงจรแบบไม่ทราบสาเหตุ

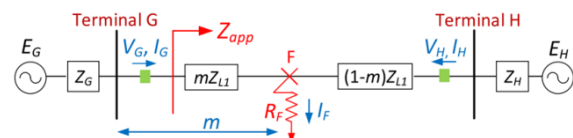
ซึ่งการลัดวงจรโดยสาเหตุสองอย่างหลัง จะเสียเวลาในการแก้ไขและตรวจสอบ ทั้งนี้การตรวจจับสัญญาณในปัจจุบันยังคงใช้การคำนวณระยะทางผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance based method) โดยใช้กระแสไหลกลับและกระแสลัดวงจรในการคำนวณ ซึ่งการคำนวณประเภทนี้ยังมีข้อที่ต้องปรับปรุงหลายประการ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ในระบบจำหน่ายไม่คงที่ และให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนสูง จากที่กล่าวมาข้างต้น งานระบุตำแหน่งของความผิดปกติในระบบ จึงจำเป็นต้องนำทฤษฎีการคำนวณคลื่นสะท้อนแบบปลายเดียว (Traveling wave) ซึ่งมีความแม่นยำกว่า มาประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบปัจจุบันให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานอิมพีแดนซ์ (Impedance based method) [1]

อิมพีแดนซ์เป็นการวัดความต้านทานรวมของวงจรไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายกระแสและแรงดันเข้าสู่วงจร โดยความต้านทานอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของค่าตัวต้านทาน ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุ ปริมาณเหล่านี้จะเกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าซึ่งสัญลักษณ์ปกติกจะเป็น Z ซึ่งพารามิเตอร์ของข้อมูลจะถูกวัดมาจากอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า โดยอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่ากระแสความผิดปกติในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้การคำนวณโดยวิธีแบบรีเอกแทนซ์อย่างง่ายแบบปลายด้านเดียว



รูปที่ 1 แผนผังวงจรเชิงเส้นของวงจรแบบสองแหล่งจ่าย [1]

การคำนวณแบบการปลายเดียวระยะทางของจุดต่อร่วมถึงจุดที่เกิดความผิดปกติ การคำนวณแรงดันในวงจร (รูปที่ 1) โดยใช้แรงดัน V_G และกระแส I_G ที่จุดต่อร่วม G โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_L ถูกคูณอยู่กับระยะทาง m ไปถึงจุดเกิดความผิดปกติ โดยกระแสของความผิดปกติมี

ค่า I_F และมีค่าความต้านทาน R_F ซึ่งการคำนวณ ใช้กฎของเคอร์ชอฟ โดยแรงดันที่จุดต่อร่วมคำนวณ ได้ตาม สมการดังนี้

$$V_G = mZ_{L1}I_G + R_F I_F \quad (1)$$

แรงดันและกระแสที่จุดต่อร่วมที่จับได้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของความคิดพ่วง โดยที่ความต้านทานรวมของระบบ Z_{app} ที่วัดตรงจุดต่อร่วมจะสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Z_{app} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_{L1} + R_F \frac{I_F}{I_G} \quad (2)$$

2.1.1.1 วิธีคำนวณ รีแอกแทนซ์อย่างง่าย (Simple reactance method)

การคำนวณรีแอกแทนซ์อย่างง่ายเป็นการใช้ข้อดีจากความต้านทานที่จุดความคิดพ่วงนั้น ซึ่งเป็นความต้านทานตามธรรมชาติ ซึ่งเราพิจารณาตามมุมเฟสของ กระแส I_G และ I_F ซึ่งถ้าหากกระแสทั้งสอง ทำมุมเฟสเท่ากัน ค่าที่ได้ตามสมการจะเป็นจำนวนจริง ซึ่งเราจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพเท่านั้น ตามสมการ

$$m = \frac{\text{imag} \frac{V_G}{I_G}}{\text{imag} Z_{L1}} \quad (3)$$

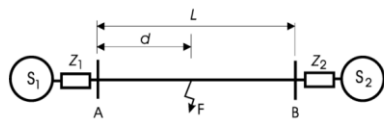
โดยที่ $\text{imag} Z_{L1}$ เป็นส่วนจินตภาพของความต้านทานอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับจุดที่เกิดความคิดพ่วงในวงจรไฟฟ้าและ m เป็นระยะทางที่เกิดความคิดพ่วง

2.1.2 การระบุตำแหน่งโดยวิธีคลื่นสะท้อน (Traveling wave) [2]

การระบุตำแหน่ง การเกิดความคิดพ่วงในระบบ โดยใช้วิธีคลื่นสะท้อน เป็นวิธีระบุตำแหน่งในรูปแบบหนึ่ง โดยใช้การจับสัญญาณแรงดันและกระแส ในอัตราตัวอย่างที่สูงมาก ซึ่งจะเห็นค่าความเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น เมื่อเกิดความคิดพ่วงในสายส่งไฟฟ้า

2.1.2.1 การระบุตำแหน่งความคิดพ่วงโดยใช้สัญญาณความถี่สูงในสถานะชั่วครู่ของแรงดัน (High Frequency Transient Voltage)

โดยสัญญาณจะถูกสร้างขึ้นจากการลัดวงจรลงดินในสายส่งวิธีการนี้จะทำการวัดแบบปลายด้านเดียว การระบุตำแหน่งจะเกิดจากการคำนวณเวลาของคลื่นลูกแรกที่มาถึงจุดต่อร่วม



รูปที่ 2 แผนภาพเชิงเส้นของสายส่ง

โดยการคำนวณจะพิจารณาจากความยาวของสายส่ง L และระบบการวัดตั้งอยู่ที่จุดต่อร่วม A กระแสความคิดพ่วงเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง F ระยะห่างจากจุดต่อร่วม A มีค่า d เพื่อนำวิธีคลื่นสะท้อนไปใช้ในระบบสามเฟส

แรงดันจะถูกแปลงแรงดันเป็น โดยใช้ทฤษฎีและหลักการ Clark Transformation

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

การระบุตำแหน่งความคิดพ่วงโดยใช้ สัญญาณความถี่สูงในสถานะชั่วครู่ของแรงดัน โดยการ ใช้การเก็บค่าพิคแวลจ $V_A V_B V_C$ ในระบบสาม

เฟส ทำมุม 120 องศา โดยทำการแปลงแกนให้อยู่ในรูปแบบดิน V_0 และรูปแบบอากาศ $V_\alpha V_\beta$ โดยที่ t_1 เป็นเวลาที่เกิดหน้าคลื่นในโหมดอากาศ และ t_2 เป็นเวลาที่เกิดหน้าคลื่นในโหมดดิน โดยสมการหาระยะทางของความคิดพ่วง d จะมีค่าดังนี้

$$d = V_\alpha t_1 = V_0 t_2 \quad (5)$$

2.1.2.2 การระบุตำแหน่งความคิดพ่วงโดยใช้พื้นฐานของคลื่นสะท้อนบนปลายด้านเดียวโดยใช้กระแส (Traveling Wave-Based Transmission Line Using Single Ended Data)

การระบุตำแหน่ง โดยวิธีนี้ จะมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการจับเวลา ของคลื่นสะท้อน ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยคลื่นสะท้อนจะถูกแยกออกโดยกระแสเฟส $I_A I_B I_C$ เป็นกระแสในรูปแบบพื้นดิน I_0 และกระแสในรูปแบบอากาศ $I_\beta I_\alpha$ ซึ่งใช้หลักการและทฤษฎีของ Clark Transformation

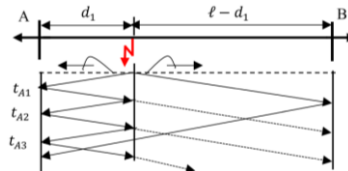
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

โดยความเร็วเฟส V ที่ใช้ในการคำนวณจะมาจากอัตราส่วนของตัวเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตร L และค่าตัวเก็บประจุต่อกิโลเมตร C ที่เกิดขึ้นในสายส่งโดยคำนวณได้จาก

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

การพิจารณาสายส่งที่มีการเชื่อมต่อสองจุดต่อร่วม (bus) A และ B (รูปที่ 2) โดยความคิดพ่วงระบุไว้ระหว่างจุดต่อร่วมทั้งสอง โดยพิจารณาจากสัญญาณที่ผ่าน การ CWT (Continue Wavelet Transform) เป็น 2 ประเภทดังนี้

- ความคิดพ่วงในช่วงครึ่งแรก (ไม่เกินช่วงกึ่งกลาง)



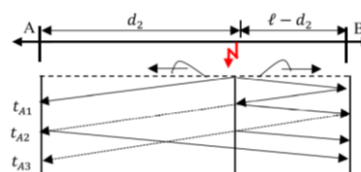
รูปที่ 3 แผนผังจุดความคิดพ่วงในช่วงครึ่งแรก

การแก้สมการความคิดพ่วงข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ ของสองคลื่น ดังสมการนี้

$$d_1 = (t_{A2} - t_{A1}) \frac{V}{2} \quad (8)$$

- ความคิดพ่วงในช่วงครึ่งหลัง (เกิน/หลังจุดกึ่งกลาง)

การพิจารณาความคิดพ่วงในช่วงครึ่งหลังของสายตามแผนผังแสดงในภาพที่ 4 จากภาพเราสามารถสังเกตได้ว่าหน้าคลื่นสะท้อนที่ถูกบันทึกไว้จะเดินทางมาจากจุดความคิดพ่วง ถึงจุดต่อร่วม B ก่อน จุดต่อร่วม A



รูปที่ 4 แผนผังจุดความคิดพ่วงในช่วงครึ่งหลัง

จะได้ความสัมพันธ์ ของสองคลื่น ดังสมการนี้

$$d_2 = \ell - (t_{A2} - t_{A1}) \frac{V}{2} \quad (9)$$

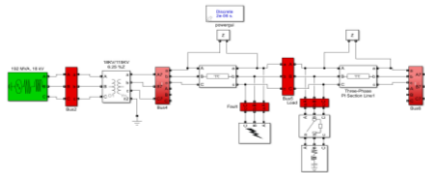
โดยเวลา T_{A1} เป็นเวลาที่หน้าคลื่นลูกที่ 1 มาถึงจุดต่อร่วม A และ T_{A2} เป็นเวลาที่หน้าคลื่นลูกที่ 2 มาถึงจุดต่อร่วม A และระยะทางความผิดพลาด d_1 และ d_2 ถูกคำนวณโดยใช้สมการข้างต้น โดยสมมติให้ความผิดพลาดอยู่ในครั้งแรกและครั้งหลังตามลำดับ เพื่อการตรวจสอบตำแหน่งความผิดพลาดที่ถูกต้อง จำเป็นจะต้องระบุส่วน (ครึ่งหน้า ครึ่งหลัง) ให้ถูกต้องด้วย

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การค้นหาตำแหน่งจุดผิดพลาดในระบบไฟฟ้า โดยจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB Simulink)

3.1.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณผลลัพธ์ที่จะนำไปใช้

การสร้างเป็นแบบจำลองการทำงานที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อทดสอบสมการและคำนวณระยะทางโดยโครงสร้างของแบบจำลองที่ทำการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB Simulink ได้ดังนี้



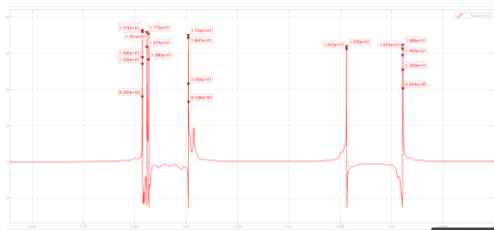
รูปที่ 5 แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink

อุปกรณ์ที่นำมาต่อในวงจรที่นำมาจำลองระบบไฟฟ้าเป็นการทำงานของแหล่งจ่าย 192 MVA ต่อผ่านหม้อแปลง 115 kv ผ่านระบบสายส่ง $R = 0.214410 \text{ ohm/km}$ $L = 1.295 \text{ mH/km}$ $C = 8.9 \text{ nF/km}$ ซึ่งมี การติดตั้งเครื่องวัดไว้ 3 บัส โดยมีโหลดขนาด 1000 W ต่ออยู่กับระบบ สัญญาณลักษณะนี้จะทำการวัดจะมี sampling rate ที่ 1 MHz

3.1.2 การคำนวณระยะทางจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

3.1.2.1 วิธีการคำนวณอิมพีแดนซ์

การคำนวณระยะทางของการเกิดความผิดพลาด โดยใช้วิธีคำนวณแบบอิมพีแดนซ์ในหลักการนี้เป็นการเป็นหลักการที่ใช้การคำนวณไม่ซับซ้อนตามสมการที่ (3) โดยรวบรวมข้อมูลของพารามิเตอร์ที่เก็บได้จากเซนเซอร์ที่ติดตั้งตามบัส และคำนวณแบบปลายเดียว โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ในทุกช่วงที่เกิดสัญญาณไม่คงตัว (transient)

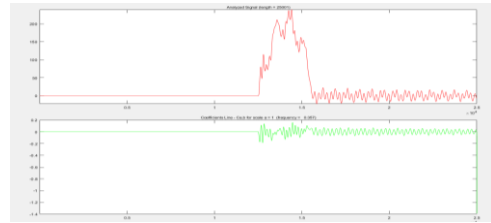


รูปที่ 6 ระยะทางที่คำนวณได้จากวิธีการคำนวณอย่างง่าย

3.1.2.2 วิธีการคำนวณโดยใช้คลื่นสะท้อน [3]

ใช้แบบจำลองทดลองจับเวลาของคลื่นเพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงโดยปัจจัยที่ต้องคำนึงคือระยะเวลาที่เกิดคลื่นสะท้อน ในหนึ่งลูกคลื่นและความเร็วของการเกิดคลื่นสะท้อน จากนั้นทำการแปลงเวฟเล็ตเพื่อ

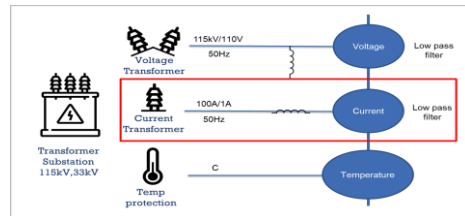
วิเคราะห์ช่วงระยะในการเกิดความผิดพลาด ในปัจจุบันการเก็บข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยังไม่มีการรองรับสัญญาณเหล่านี้



รูปที่ 7 การนำสัญญาณมาแปลงเวฟเล็ต เพื่อดูค่าความถี่และเวลา

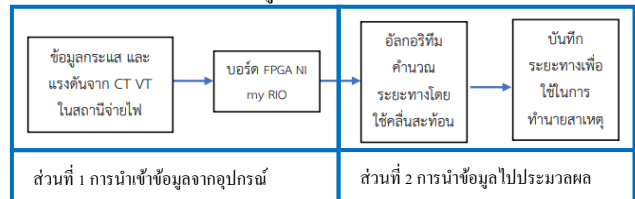
3.2 การออกแบบเครื่องมือจัดเก็บข้อมูลกระแสและทดสอบในห้องทดลองด้วยวงจรจำลองสายส่ง

จากการศึกษาระบบการวัดแรงดันในสถานีไฟฟ้า ที่ติดตั้งในเขตภาคใต้ของการไฟฟ้าส่วนภูมิกษานั้น การติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ 3 ชนิด คือ วัดแรงดัน วัดกระแส และอุณหภูมิ



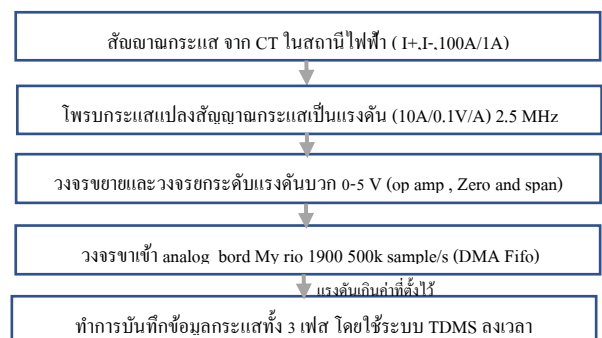
รูปที่ 8 แสดงสัญญาณขาออกของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า

ผลการจากการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำลองข้อมูล เพื่อศึกษาแนวทางของสัญญาณและสมการของการคำนวณระยะทางของความผิดพลาด จากการเก็บข้อมูลระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆ โดยผลสรุปนี้ นำไปออกแบบชุดรับสัญญาณเพื่อนำมาวิเคราะห์ระยะทางจริงที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็นภาคการนำเข้าข้อมูล และภาคประมวลผล



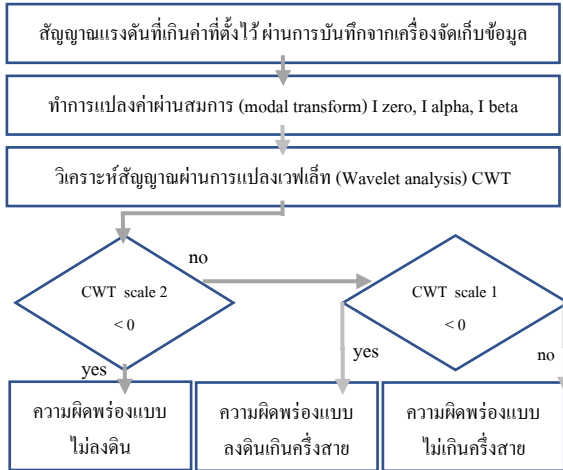
รูปที่ 9 แสดงภาพรวมส่วนการทำงานของเครื่องมือ

3.2.1 การนำข้อมูลที่ได้จากการวัดในสถานีไฟฟ้า ด้วยเครื่องมือจัดเก็บข้อมูล ในปัจจุบันการเก็บข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิกษายังไม่มีรองรับสัญญาณเหล่านี้ จำเป็นจะต้องออกแบบวงจรและส่วนนำเข้าข้อมูลเพื่อนำสัญญาณไปวิเคราะห์ต่อไป



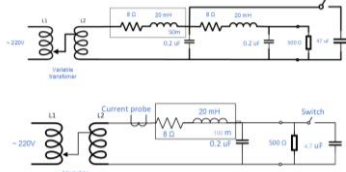
รูปที่ 10 ผังการทำงานของเครื่องจัดเก็บข้อมูล

3.2.2 การนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือจัดเก็บข้อมูล ไปประมวลผลในโปรแกรม MATLAB โดยสัญญาณผ่านการ Modal Transform และแปลงเวฟเล็ตแบบแบบต่อเนื่อง ที่สเกล 1 และ 2 เพื่อตรวจสอบช่วงการเกิดจากนั้นคำนวณระยะทางตามสมการที่ (8) และ (9)



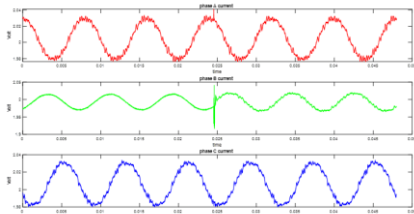
รูปที่ 11 อัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจสอบระยะทางของความคิดพ้อง

3.2.3 การจำลองสายส่งที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับสายส่งจริง จากการศึกษาข้อมูลสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาครูปแบบของวงจรจะประกอบไปด้วยตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และมีตัวเก็บประจุต่อขนาน เพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องจัดเก็บข้อมูลความคิดพ้อง โดยนำเข้าข้อมูลกระแสที่จุด CT โดยทดสอบที่แรงดัน 45 V



รูปที่ 12 วงจรจำลองสายส่ง (transmission line)

โดยกระแสที่สภาวะไม่คงตัวที่บันทึกได้ มีค่าสุ่มตัวอย่างที่ 500k sample/s ที่ 8000 ตัวอย่าง โดยกำหนดตัวตรวจสอบสัญญาณเกินค่าปรับตั้ง ซึ่งสามารถนำไปแปลงเวฟเล็ต และหาระยะทางต่อไป



รูปที่ 13 ตัวอย่างข้อมูลที่เครื่องจัดเก็บข้อมูลบันทึกได้โดยผ่านการแปลง

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองวงจรผ่านและบันทึกสัญญาณผ่านโปรแกรม MATLAB จากการศึกษาวิเคราะห์ทางระหว่าง 2 วิธีดังที่กล่าวมาสามารถคำนวณหา ระยะทางและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนได้

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการจำลองความคิดพ้องด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Line distance (km)	Fault distance (km)	Estimate distance (Simple) (km)	Distance error (%)	Estimate distance (Traveling wave) (km)	Distance error (%)
15	10	8.62	13.80	10.25	2.50
20	15	12.15	19.00	14.06	6.26
25	20	17.35	13.25	19.32	3.40
30	25	23.62	5.52	24.29	2.84
35	30	28.32	5.60	31.54	5.13
40	35	36.92	5.48	36.25	3.57
45	40	43.60	9.00	41.24	3.10

4.2 ผลการจำลองวงจรตามแบบจำลองและบันทึกสัญญาณในห้องทดลอง การทดสอบจากการเก็บกระแสที่สภาวะไม่คงตัวเปรียบเทียบการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการจำลองความคิดพ้องด้วยการจำลองสายส่งในห้องทดลอง

Line distance (m)	Fault distance (m)	Estimate distance (Simple) (m)	Distance error (%)	Estimate distance (Traveling wave) (m)	Distance error (%)
100	50	61.2	22.4	59.9	19.8
100	100	115.5	15.5	107.4	7.4

5. สรุปผล

การทดลองเก็บผลของระยะทางของทั้งสองวิธีการคำนวณด้วยวิธีคลื่นสะท้อนให้ผลที่แม่นยำกว่าแบบอิมพีแดนซ์ทั้งในการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์และห้องทดลอง เนื่องจากใช้ตัวแปรที่น้อยกว่าและไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามแกนเวลาซึ่งในเทคโนโลยีในปัจจุบัน การใช้หลักการของคลื่นสะท้อนสามารถประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้โดยการ ใช้เครื่องมือนำเข้าสัญญาณแอนะล็อกจากตัวเซนเซอร์ที่มีอยู่ในสถานีไฟฟ้า เพื่อการค้นหาจุดคิดพ้องที่แม่นยำและลดขั้นตอนในการตรวจสอบระบบจำหน่าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application SWAGATA DAS1,(Student Member, IEEE), SURYA SANTOSO1, (Senior Member, IEEE), ANISH GAIKWAD2, (Member, IEEE), AND MAHENDRA PATEL2, (Senior Member, IEEE)
- [2] Traveling Wave Fault Location for Power Cables Based on Wavelet Transform, Jiatao Sun ,Wuhan University, and Xishan Wen Xinlao Wei, Qingguo Chen and Yonghong Wang arbin University of Science and Technolog
- [3] Fault Location Using Wavelets, Fernando H. Magnago and Ali Abur,Department of Electrical Engineering,Texas A&M University,College Station, TX 77843, U.S.A.