

การหาตำแหน่งความผิดพ้องในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF VOLTAGE SAGS

Mr. Kittituch Kraikiat



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

กิตติธัช ไกรเกียรติ : การหาตำแหน่งความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ (FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF VOLTAGE SAGS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์, 76 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาวิธีการระบุตำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอประยุกต์ใช้คุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะเทียบกับความยาวสายป้อน ซึ่งแบ่งพฤติกรรมของแรงดันตกชั่วขณะออกเป็น 2 ส่วนคือ แรงดันตกตำแหน่งก่อนความผิดปกติและแรงดันตกตำแหน่งหลังความผิดปกติ โดยใช้กระบวนการกำลังสองน้อยที่สุด และการระบุเส้นทางเดินของสายผิดปกติจากสถานีไฟฟ้าจากการพิจารณาตำแหน่งของแรงดันตกชั่วขณะที่วัดได้ ซึ่งเหตุการณ์ผิดปกติและกระบวนการที่นำเสนอจำลองในโปรแกรม DIGSILENT/MATLAB ใช้จำลองข้อมูลจากระบบทดสอบ IEEE 34 บัส ที่ระดับแรงดันปานกลาง เพื่อทดสอบลักษณะของความผิดปกติและผลกระทบจากความซับซ้อนของระบบจำหน่าย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังศึกษาผลกระทบของตำแหน่งผิดปกติ ความต้านทานผิดปกติ จำนวนข้อมูลวัด การเปลี่ยนแปลงของโหลด และชนิดความผิดปกติ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5870377221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FAULT LOCATION / DISTRIBUTION SYSTEM / VOLTAGE SAG / IMPEDANCE FORMULATION

KITTITUCH KRAIKIAT: FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF VOLTAGE SAGS. ADVISOR: ASSOC. PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 76 pp.

This thesis studies a fault location method in distribution systems. The proposed method applies characteristics of voltage sags compared to the line length of feeders. Voltage sag behaviors are separated into two parts: voltage sags before and after the fault point using least square error and fault path detection from a substation to analyze voltage sag locations. Fault locations and the proposed method are simulated using DigSILENT/MATLAB under an IEEE 34-bus MV test system to analyze the effects of fault characteristics and the complexity of the distribution systems. This thesis also studies the effect of fault distances, fault resistances, a number of measurement points, load variations, and fault types to be a guideline for other distribution systems.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จะกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล(ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ (กรรมการ) และดร. วุฒิกร ตวีวิทยานนท์ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงร่างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัย.....	5
2.1 การคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติ.....	5
2.1.1 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลทางเดียว (one-ended fault location).....	5
2.1.2 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลสองทาง (two-ended fault location).....	6
2.1.3 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลหลายทาง (multi-ended fault location).....	7
2.1.4 วิธีการผสมผสานกับฐานความรู้ (Knowledge-based approaches).....	7
2.2 การประมาณและวิเคราะห์ค่าแรงดันตกและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติ.....	9
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐาน.....	10
3.1 สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution substation).....	10
3.1.1 การจัดเรียงวงจรสายส่งไฟฟ้าย่อย.....	10

3.2	วจรสมมูลของสายย่อย	12
3.2.1	ลักษณะของสายส่ง	12
3.2.2	สายย่อย (Line sections).....	12
3.3	ผลกระทบของแรงดันในสายจำหน่าย.....	13
3.3.1	แรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ.....	14
3.3.2	แรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ	14
3.3.3	ความยาวสายและกระแสไหลด.....	16
3.4	การแปรเปลี่ยนของแรงดัน (Voltage profile).....	17
3.5	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการประมาณข้อมูล.....	19
3.5.1	การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	20
3.5.2	การประมาณชุดข้อมูล	20
3.5.3	สมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regressions)	21
บทที่ 4	การวิเคราะห์ข้อมูลและวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติ.....	23
4.1	การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน	23
4.1.1	การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน กรณีที่ไม่มีสายแยก.....	23
4.1.2	การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน กรณีที่มีสายแยก	24
4.2	สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน ณ ตำแหน่ง ก่อนและหลังความผิดปกติ	26
4.3	การสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์เพื่อหาตำแหน่งความผิดปกติสำหรับกรณีที่มี ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดปกติมากกว่าเท่ากับ 3 ตำแหน่ง (สามารถ ประมาณเป็นเส้นโค้งได้)	27

4.4 การสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์เพื่อหาตำแหน่งความผิดพร่องสำหรับกรณีที่มีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพร่อง 2 ตำแหน่ง (ไม่สามารถประมาณเป็นเส้นโค้ง).....	30
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	32
5.1 ระบบทดสอบ.....	32
5.2 จำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะที่นำมาวิเคราะห์	35
5.2.1 หลักการในการพิจารณาเลือกจำนวนจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ	35
5.2.2 จำนวนและตำแหน่งของจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะของระบบทดสอบ	35
5.3 ตำแหน่งความผิดพร่องที่นำมาวิเคราะห์.....	37
5.4 ขั้นตอนการทดสอบ.....	38
5.5 ผลลัพธ์จากวิธีการระบุความผิดพร่องที่นำเสนอ	39
5.5.1 ตัวอย่างผลลัพธ์จากกระบวนการที่นำเสนอ.....	39
5.5.2 ผลการทดสอบ.....	44
5.6 วิเคราะห์ผล	54
5.6.1 ผลกระทบของระยะผิดพร่อง	54
5.6.2 ผลกระทบของความต้านทานผิดพร่อง	56
5.6.3 ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ	59
5.6.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด.....	61
5.6.5 ผลกระทบจากชนิดความผิดพร่อง.....	63
5.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการใช้แรงดันตกชั่วขณะ.....	66
5.8 การวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอ	67
5.8.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์.....	67
5.8.2 สรุปผลการเปรียบเทียบ	68
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	70

รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	76



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่าย	3
รูปที่ 3.1 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล	11
รูปที่ 3.2 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าระบบลูป	11
รูปที่ 3.3 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าแบบเน็ตเวิร์ก	12
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของสายย่อย	13
รูปที่ 3.5 รูปวงจรสายจำหน่ายและเฟสเซอร์ไดอะแกรม	14
รูปที่ 3.6 รูปวงจรสายจำหน่ายขณะเกิดความผิดปกติ	14
รูปที่ 3.7 วงจรสายส่งที่ต่อโหนดจุดเดียว	16
รูปที่ 3.8 วงจรสายที่มีโหนดกระจายแบบสมมาตร	17
รูปที่ 3.9 สายจำหน่ายจากต้นทาง i ไปยังปลายทาง j	17
รูปที่ 3.10 แสดงการแปรเปลี่ยนของแรงดันจากบัส i ไปบัส j	19
รูปที่ 4.1 ระบบจำหน่ายเรเดียลแบบไม่มีสายแยก	23
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับความยาวอิมพีแดนซ์	24
รูปที่ 4.3 ระบบจำหน่ายเรเดียลแบบมีสายแยก	24
รูปที่ 4.4 แสดงแนวโน้มของกราฟในกรณีที่มีการเลือกทางเดินจุดเทียบกับกรณีลากเส้นเชื่อมจุดปกติ	26
รูปที่ 4.5 แสดงการจัดกลุ่มข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ	27
รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบจาก Z_{FI} ที่แตกต่างกัน	28
รูปที่ 4.7 กระทบหาตำแหน่งผิดปกติสำหรับข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดปกติมากกว่าเท่ากับ 3 ตำแหน่ง	30
รูปที่ 4.8 กระทบหาตำแหน่งผิดปกติสำหรับข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดปกติเท่ากับ 2 ตำแหน่ง	31

รูปที่ 5.1 สายหลักของระบบทดสอบ.....	32
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของบัสบนสายย่อยที่พิจารณา.....	33
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของบัสบนสายแยกย่อยที่พิจารณา.....	33
รูปที่ 5.4 ค่าความยาวสายที่วัดจากบัส 800 ไปยังบัสอื่นๆในระบบทดสอบ	34
รูปที่ 5.5 ตำแหน่งจุดวัดกรณีที่ 1	36
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งจุดวัดกรณีที่ 2	36
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งจุดวัดกรณีที่ 3	37
รูปที่ 5.8 ระบบจำหน่าย IEEE 34 บัสและตำแหน่งผิดพ่วงที่พิจารณา.....	38
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	40
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงขนาด θ_k สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	40
รูปที่ 5.11 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพ่วงที่ 3	41
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	41
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงขนาด θ_k สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	42
รูปที่ 5.14 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพ่วงที่ 5	42
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	43
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่า θ_k สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง.....	43
รูปที่ 5.17 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพ่วงที่ 8	44
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพ่วง 0.5 โอห์ม	54
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพ่วง 20 โอห์ม	55
รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพ่วง 0.5 โอห์ม	55
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพ่วง 20 โอห์ม	56
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบความผิดพ่วงประเภทสามเฟสลงดิน.....	57
รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบความผิดพ่วงประเภทเฟสเอลงดิน.....	57

รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสองเฟส	58
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสองเฟสลงดิน	58
รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสามเฟสลงดิน	59
รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทเฟสเอลงดิน	60
รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสองเฟส	60
รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสองเฟสลงดิน	61
รูปที่ 5.30 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสามเฟสลงดิน	62
รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทเฟสเอลงดิน	62
รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสองเฟสลงดิน	63
รูปที่ 5.33 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแต่ละประเภทความผิดพร่องกรณีความต้านทานผิดพร่อง 0.5 โอห์ม	64
รูปที่ 5.34 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแต่ละประเภทความผิดพร่องกรณีความต้านทานผิดพร่อง 20 โอห์ม	65

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 1 (บัส 812)	45
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 2 (บัส 824)	46
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 3 (บัส 830)	47
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 4 (บัส 844)	48
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 5 (บัส 820)	49
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 6 (บัส 826)	50
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 7 (บัส 836)	51
ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 8 (บัส 862)	52
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งมิตพรวงของตำแหน่งมิตพรวงตำแหน่งที่ 9 (บัส 840)	53
ตารางที่ 5.10 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการที่นำเสนอ	66
ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความมิตพรวงบนสายหลัก	67
ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความมิตพรวงบนสายย่อย	67
ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความมิตพรวงบนสายแยกย่อย	68
ตารางที่ 5.14 สรุปผลการเปรียบเทียบ	69

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหาความผิดปกติในระบบไฟฟ้า วัตถุประสงค์ ขอบเขตที่จะศึกษา ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

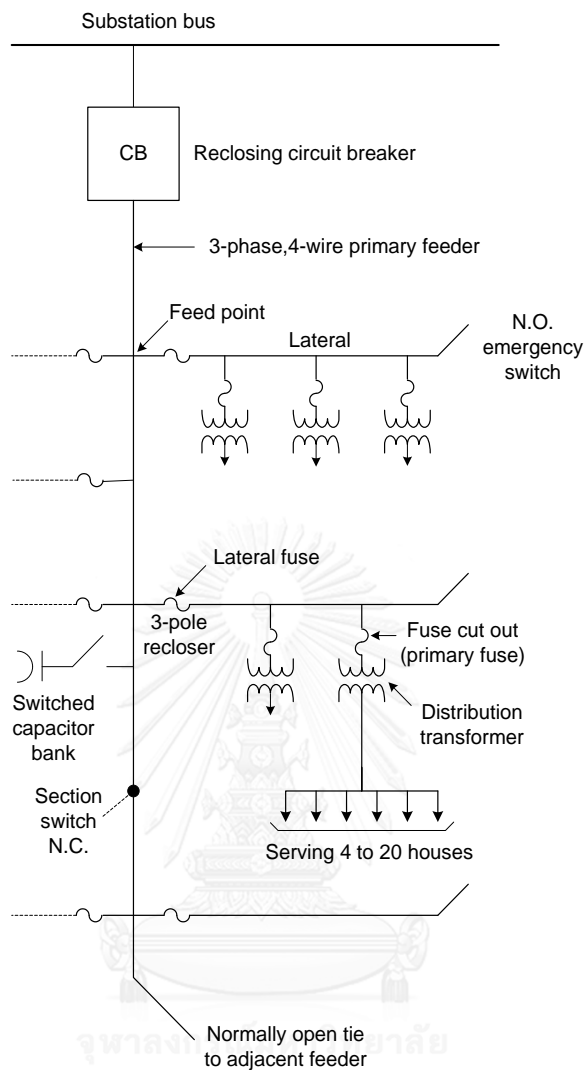
การเกิดปัญหาความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้ายังคงเป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในหลายด้าน โดยถ้าผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมรวมไปถึงผู้ผลิตไฟฟ้าก็อาจจะส่งผลให้เกิดผลเสียต่อระบบไฟฟ้าในโรงงานและทำให้มีผลเสียต่อธุรกิจได้ แต่ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นผู้อยู่อาศัยการเกิดปัญหาความผิดปกติทางไฟฟ้าอาจทำให้ผู้ใช้เกิดความไม่สะดวกสบายในการใช้ไฟฟ้าได้ กล่าวคือ เมื่อมีการลัดวงจรในระบบสายส่ง วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องจะต้องหาสาเหตุของความผิดปกติก่อนที่จะทำการแก้ไข ดังนั้นระยะเวลาในการหาความผิดปกติส่งผลต่อการฟื้นฟูระบบไฟฟ้า ยิ่งเกิดการขัดข้องการไฟฟ้าเป็นระยะเวลานาน ก็จะมีส่งผลกระทบต่อธุรกิจหรือผลประกอบการของผู้ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นผู้ให้บริการทางไฟฟ้าควรแก้ไขความผิดปกติทางระบบไฟฟ้าให้กลับมาสู่ภาวะปกติอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้สาเหตุของการเกิดความผิดปกตินั้นมีหลายสาเหตุ เช่น ภัยธรรมชาติ สัตว์ต่างๆและรวมไปถึงความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

การหาตำแหน่งความผิดปกติของระบบไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการฟื้นฟูระบบไฟฟ้าให้กลับมาสู่ภาวะปกติ สำหรับความผิดปกติแบบถาวร (Permanent fault) การจ่ายไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขจัดความผิดปกติออกจากระบบแล้ว ดังนั้นการที่สามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติได้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการขจัดความผิดปกติ สำหรับความผิดปกติแบบชั่วคราว (Temporary fault) การที่ทราบตำแหน่งความผิดปกตินั้น สามารถบอกได้ว่าส่วนไหนของระบบไฟฟ้าเป็นจุดที่อ่อนแอ (มีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดปกติสูง) เพื่อที่จะสามารถป้องกันได้ในอนาคต ทั้งนี้กระบวนการหาตำแหน่งความผิดปกติแตกต่างกันไปตามชนิดของระบบไฟฟ้า

ลักษณะวงจรของระบบจำหน่ายมีความแตกต่างจากระบบส่งไฟฟ้า วิธีการหาตำแหน่งผิดปกติจึงแตกต่างกัน ระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 และมีลักษณะสำคัญคือ ความไม่สมดุล (โหลดและสายไฟฟ้ามีทั้ง เฟสเดียว สองเฟส สามเฟส) สายไฟฟ้ามีหลายประเภท มีสายแยก มีการต่อโหลดหลายจุดและโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตลอด

ในอดีตการหาตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่ายจะใช้วิธีการขอให้ผู้เสียหายโทรมาแจ้งกับผู้ให้บริการ จากนั้นจึงส่งเจ้าหน้าที่ซ่อมแซมไปยังตำแหน่งของผู้เสียหายทำให้ใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้กลับมาทำงานได้ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการหาตำแหน่งความผิดพลาดมากมาย เช่น การใช้อิมพีแดนซ์ กระแส แรงดัน ความถี่ การวิเคราะห์รูปคลื่น และฐานความรู้ เป็นต้น แต่เนื่องมาจากปัจจัยต่างๆของระบบจำหน่าย เช่น การเพิ่มขึ้นของโหลด การเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่ายไฟฟ้า จำนวนข้อมูลวัดของระบบจำหน่าย รวมไปถึงค่าอิมพีแดนซ์และชนิดของความผิดพลาดที่ไม่สามารถระบุได้ ส่งผลให้ตำแหน่งความผิดพลาดที่คำนวณได้ยังคงมีความผิดพลาด

ดังนั้นการหาตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่ายในปัจจุบันยังคงเป็นปัญหาที่มีความท้าทายสูง เนื่องด้วยองค์ประกอบที่ได้กล่าวมา และข้อจำกัดของกระบวนการหาตำแหน่งความผิดพลาด พบว่าชนิดของความผิดพลาด และอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดส่งผลกระทบสูง เพราะเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ขณะเกิดความผิดพลาด เพื่อไม่ละเลยผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดเพราะเป็นผลกระทบโดยตรงจากชนิดและอิมพีแดนซ์ความผิดพลาด เทียบกับอิมพีแดนซ์สายป้อนเพราะเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องสูงเมื่อเทียบกับข้อมูลทางไฟฟ้าอื่นขณะเกิดความผิดพลาด



รูปที่ 1.1 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่าย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนากระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลของแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24.9 kV) แบบเรเดียลเท่านั้น
- 2) พิจารณาความผิดพลาดที่เกิดบนสายจำหน่ายไฟฟ้าเท่านั้น
- 3) พิจารณาความผิดพลาด 4 ชนิด คือ ความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน ความผิดพลาดแบบสามเฟสลงดิน ความผิดพลาดแบบสองเฟสและความผิดพลาดแบบสองเฟสลงดิน
- 4) ค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดที่จะพิจารณาคือ 0.5 5 10 และ 20 โอห์ม

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณและการการระบุตำแหน่งความผิดพลาด
- 2) ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ได้ทำมาแล้ว
- 3) จำลองระบบทดสอบลงในโปรแกรม DIGSILENT
- 4) จำลองความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าจำหน่ายโดยใช้โปรแกรม DIGSILENT
- 5) นำกลุ่มข้อมูลของแรงดันในระบบไฟฟ้าจำหน่ายกับอิมพีแดนซ์สายป้อนบางตำแหน่งมาจำลองหาความสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 6) กำหนด Objective function และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลของแรงดันออกเป็น 2 ตำแหน่ง คือ
 - (6.1) ตำแหน่งหน้าความผิดพลาด
 - (6.2) ตำแหน่งหลังความผิดพลาด
- 7) ทำการสร้างกราฟที่เหมาะสมโดยการใช้คำสั่ง fitting curve ใน MATLAB
- 8) แก้อสมการเพื่อหาตำแหน่งความผิดพลาดจากรูปกราฟของแรงดัน ณ ตำแหน่งหน้าความผิดพลาดและตำแหน่งหลังความผิดพลาด
- 9) นำตำแหน่งความผิดพลาดที่ได้ในรูปของอิมพีแดนซ์มาคำนวณเป็นระยะทางผิดพลาด
- 10) ทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอจากการวิเคราะห์ผลกระทบจาก ระยะผิดพลาด ความต้านทานผิดพลาด จำนวนจุดวัด การเปลี่ยนแปลงของโหลดและชนิดความผิดพลาด
- 11) เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงร่างวิทยานิพนธ์

- 1) สามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดได้โดยใช้ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะบางตำแหน่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 2) สามารถหาตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทบทวนงานวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษามา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ 1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่าย 2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณและวิเคราะห์ค่าแรงดันตกและแรงดันขณะเกิดความผิดพลาด

2.1 การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาด

ในการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่ายสามารถแบ่งออกเป็นหลายแบบตามหลักการและข้อมูลที่นำมาใช้ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการใหญ่ๆ การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลทางเดียว (one-ended fault location) การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลสองทาง (two-ended fault location) การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลหลายทาง (multi-ended fault location) และวิธีการผสมผสานกับฐานความรู้ (Knowledge-based approaches) ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการหาตำแหน่งความผิดพลาดออกมามากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำข้อจำกัดต่างๆของงานวิจัยมาพิจารณาและปรับปรุงอัลกอริทึมให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่าย

2.1.1 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลทางเดียว (one-ended fault location)

สำหรับการคำนวณโดยใช้ข้อมูลทางเดียวเป็นการใช้ข้อมูลเพียงด้านเดียวของระบบสายส่งในการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาด เนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณ โดยวิธีการหนึ่งคือการใช้ข้อมูลอิมพีแดนซ์ แรงดันและกระแสที่วัดได้ที่ต้นสายป้อนในการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกละเอียดง่ายอย่างไรก็ตาม ตำแหน่งความผิดพลาดที่ได้มีหลายตำแหน่ง จึงมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อหาตำแหน่งความผิดพลาดที่ถูกต้อง สำหรับการใช้อิมพีแดนซ์มีสมการตั้งต้นคือ

$$V_T = mZI + R_F I_F \quad (2.1)$$

โดยที่	V_T	คือ	คือแรงดันที่ต้นทาง (pu.)
	I	คือ	คือค่ากระแสที่ไหลผ่านสายส่ง (pu.)
	m	คือ	คือระยะความผิดพลาดที่วัดจากต้นสาย (pu.)
	z	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์สายต่อ 1 หน่วยระยะทาง (pu.)
	R_F	คือ	ค่าความต้านทานความผิดพลาด (pu.)

I_F คือ ค่าความกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานความผิดพลาด (pu.)

ซึ่งค่าของ V_T และ I จะขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของความผิดพลาด ทั้งนี้ระยะ m สามารถคำนวณได้หลายวิธีซึ่งเป็นการนำสมการที่ (2.1) ไปประยุกต์ใช้ดังนี้ การใช้ข้อมูลกระแสโพลตเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด [1] การชดเชยด้วยกระแสโพลตก่อนเกิดความผิดพลาด [2] การคำนวณโดยใช้คาร์รีแอกแตนต์สายส่งความถี่สูงร่วมกับข้อมูลของ DG (Distributed generator) [3] และ การคำนวณโดยใช้ส่วนประกอบเฟส [4]

2.1.2 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลสองทาง (two-ended fault location)

การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลสองทางของสายส่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การใช้ข้อมูลที่ไม่เชื่อมกันทางเวลา (time unsynchronized) กับ การใช้ข้อมูลที่เชื่อมกันทางเวลา (time synchronized) โดยทั้ง 2 กรณี ซึ่งสรุปรายละเอียดของแต่ละวิธีได้ดังนี้

1) การใช้ข้อมูลที่เชื่อมกันทางเวลา (time synchronized)

ในการคำนวณข้อมูลที่เชื่อมกันทางเวลานั้นมีหลายวิธี แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายบางวิธีเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วย

(1) การหาตำแหน่งการลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลื่น [5] วิธีนี้จะใช้หลักการที่ว่า ขณะเกิดความผิดพลาดนั้นจะเกิดส่วนประกอบความถี่สูงขึ้นในสัญญาณกระแสและแรงดันเคลื่อนที่ที่ออกจากจุดเกิดความผิดพลาด ไปที่จุดต่างๆของวงจร ซึ่งอาจจะใช้กับการตรวจจับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณความถี่สูง ทำให้สามารถนามาระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ ซึ่งวิธีการนี้มีความแม่นยำสูงแต่ ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณสูง (High sampling rate) และต้องมีอุปกรณ์สื่อสารเพื่อส่งข้อมูลระหว่างจุดตรวจจับสัญญาณต่างๆ

(2) การคำนวณแบบมาตรฐานด้วยการใช้การแก้ปัญหาค่าผิดพลาดแบบกำลังสองต่ำที่สุด [6] ซึ่งเป็นการสร้างข้อมูลแบบการคำนวณแบบทางเดียวแต่ทำการสร้างข้อมูลจากทั้งสองปลาย ซึ่งนิยมใช้ข้อมูลลำดับบวกและลบในการคำนวณแต่สำหรับข้อมูลลำดับศูนย์ ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดแบบสามเฟสสมดุลอาจทำให้เกิดความผิดพลาดสูงได้

(3) การคำนวณแบบจำลองสายส่งระยะไกลจาก PMU (phasor measurement unit) [7] ซึ่งแบ่งการคำนวณออกเป็นทั้งเฟสเดียวและสามเฟส แต่วิธีการนี้สามารถระบุตำแหน่งของความผิดพลาดได้อย่างแม่นยำในบางกรณีเท่านั้น

2) การใช้ข้อมูลที่ไม่เชื่อมกันทางเวลา (time unsynchronized)

ในการคำนวณข้อมูลที่ไม่เชื่อมกันทางเวลานั้นมีหลายวิธี แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายบางวิธีเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วย

(1) การคำนวณโดยปรับเปลี่ยนมุมเฟสแบบวนซ้ำ [8] โดยเนื่องจากข้อมูลสองทางของระบบไฟฟ้าที่มีความเหลื่อมของเวลาอยู่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแรงดันกับกระแสเชิงสัมพันธ์ผิดไป จึงได้มีการสมมติตัวแปรมุมเฟสชดเชยขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งการลัดวงจร

(2) การคำนวณโดยละเอียดมุมเฟสแบบวนซ้ำ [9] เป็นการนำเพียงขนาดของแรงดัน ณ จุดลัดวงจร มาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งขนาดของแรงดันนี้สามารถหาได้จากการนำข้อมูลสองทางมาคำนวณโดยทำการสุ่มจุดลัดวงจรระหว่างคู่สายไปเรื่อยๆ

(3) การคำนวณโดยใช้ข้อมูลก่อนเกิดความผิดพลาด [10] โดยทำการนำข้อมูลของรีเลย์มาประกอบกับข้อมูลก่อนเกิดความผิดพลาด โดยไม่จำเป็นต้องรู้ชนิดความผิดพลาดล่วงหน้า แต่จำเป็นต้องรู้มุมเฟสของข้อมูลทางไฟฟ้าในระบบ

2.1.3 การหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลหลายทาง (multi-ended fault location)

การคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรบนสายส่งโดยใช้ข้อมูลหลายทางนั้นเป็นการนำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลสองทางมาประยุกต์ใช้ โดยจะพิจารณาสายส่งเป็นรูปตัว T ครอบคลุมกันไปแล้วใช้ข้อมูลของทั้งสามปลายมาคำนวณโดยจะพิจารณาที่ละคู่สาย โดยส่วนมากระบบที่นำมาพิจารณาจะเป็นระบบสายส่ง

บทความหลายบทความได้นำแนวคิดนี้ไปต่อยอดเพื่อหาตำแหน่งการลัดวงจรในระบบสายส่งต่างๆดังนี้ การคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรสำหรับสายส่งที่มี N ปลาย [11] เป็นการวิเคราะห์โดยแยกสายส่งออกเป็นสายส่งแบบตัว T ต่อกันไปเรื่อยๆ การคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจรสำหรับสายส่งสามปลายโดยอาศัยข้อมูลของกระแสและแรงดันที่เชื่อมกันทางเวลา [12] โดยวิธีการนี้จะเป็นการวัดข้อมูลแค่สองทางบนสายส่งสามปลายแต่ใช้ source impedance เข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มสมการในการคำนวณแบบใช้ข้อมูลสองทาง

2.1.4 วิธีการผสมผสานกับฐานความรู้ (Knowledge-based approaches)

วิธีการนี้เป็นการนำโครงข่ายอัจฉริยะเทียมหรือฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่งโดยรวมแล้ววิธีนี้สามารถหาตำแหน่งความผิดพลาดได้อย่างแม่นยำ แต่ข้อจำกัดคือกระบวนการมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับวงจรและต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการสร้างความสัมพันธ์

1) การใช้กระบวนการอัจฉริยะเทียม (Artificial intelligence) [13] เป็นการใช้โครงข่ายสมองเทียม (Neural network) ตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic) สถิติ (Statistic) และวิธีการทาง

คณิตศาสตร์อื่นๆ ในการระบุตำแหน่งผิดพลาด เนื่องจากวิธีนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกได้

2) การแรงดันตกขณะเกิดความผิดพลาดที่เก็บจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีต [14] เป็นการใช้ฐานข้อมูล (Database) ของระบบ เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นจริงในระบบ ก็นำค่าแรงดันตกนี้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อระบุตำแหน่งผิดพลาด ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถหาคาตอบได้เร็ว ข้อเสีย คือ ต้องมีการสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งจากข้อมูลขาเข้าต่างๆ หรือสร้างฐานข้อมูลเก็บไว้ โดยที่กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดหรือฐานข้อมูลหนึ่งๆจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับวงจรหนึ่งๆ เมื่อวงจรไฟฟ้าเปลี่ยน จึงต้องทำการสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งหรือฐานข้อมูลใหม่ ข้อเสียอีกข้อหนึ่ง คือ ขั้นตอนการหาคาตอบของวิธีนี้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนจึงยากต่อการแก้ไขปรับปรุงเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาด

3) การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่ายโดยใช้ฐานข้อมูลจากมิเตอร์อัจฉริยะ [15] วิธีการนี้เป็นการนำค่าแรงดันตก (voltage sag) ที่วัดได้จากมิเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการลัดวงจร ซึ่งมีกระบวนการดังนี้ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ มิเตอร์ที่ติดตั้งไว้บริเวณสายป้อนจะวัดความผิดปกติของแรงดันตกได้ ค่าแรงดันตกบนบัสแต่ละบัสจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของมิเตอร์ที่วัด ความผิดปกติของแรงดันตกไม่สามารถระบุตำแหน่งของบัสที่เกิดการลัดวงจรได้ จึงมีความจำเป็นต้องสมมติให้บัส k (k แทนชื่อบัส เช่น k เท่ากับ 1 แทนบัสหมายเลข 1) เป็นบัสที่เกิดการลัดวงจรขึ้นภายในระบบทดสอบ การประมวลผลว่าบัส k ว่ามีแนวโน้มที่จะเป็นบัสที่เกิดการลัดวงจรจริงหรือไม่ จากข้อมูลขนาดของแรงดันตกที่วัดได้นำมาพิจารณาเป็นกระแส โดยจะวิเคราะห์ที่ผลรวมของส่วนต่างระหว่างกระแสบนบัสต่างๆยกเว้นบัส k กับค่าเฉลี่ยของกระแสที่บัส k นำมาเสนอเป็นดรรชนี (δ_k) ถ้าดรรชนีที่บัส k มีค่าต่ำที่สุดจะถูกระบุว่าเป็นบัสที่เกิดการลัดวงจรจริง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณหาดรรชนีดังกล่าว การส่งสัญญาณในช่วงเวลาขาดหายแบบอัตโนมัติ (automated outage mapping) เป็นการใช่มิเตอร์ตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่หลุดออกจากระบบโดยอัตโนมัติ ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจร ค่าแรงดันตกที่วัดได้จากมิเตอร์ที่ตรวจพบอุปกรณ์ที่หลุดออกจากระบบจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจร

4) การระบุตำแหน่งความผิดพลาดโดยการคำนวณอิมพีแดนซ์พหุคูณกับการเทียบเคียงความถี่ [16] วิธีการนี้เป็นการคำนวณหาระยะทางที่เป็นไปได้ ที่เกิดการลัดวงจรจากการประมาณโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion) ซึ่งระยะทางการลัดวงจร (fault distance) อ้างอิงจากสายป้อนไปจนถึงตำแหน่งการลัดวงจร และนำมาประเมินว่าเป็นระยะทางที่เกิดการลัดวงจรขึ้นจริงหรือไม่ จากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันและสเปกตรัมความถี่ (frequency spectrum) ของแรงดัน ภายใต้เงื่อนไข ระบบที่ใช้ทดสอบมีการลัดวงจรเกิดขึ้นในอดีตและข้อมูลต่างๆ เช่น กระแส แรงดัน ความถี่

ได้ถูกบันทึกไว้ในสายป้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1 เปรียบเทียบระหว่างแรงดันที่ถูกบันทึกไว้ในสายป้อนกับแรงดันที่ได้จากการคำนวณอนุกรมเทย์เลอร์มานำเสนอเป็นดรรชนี $J_1(k)$ 2 เปรียบเทียบขนาดของความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของแรงดันที่ถูกบันทึกไว้ในสายป้อนกับสเปกตรัมความถี่ของแรงดันที่ได้จากการคำนวณอนุกรมเทย์เลอร์มานำเสนอเป็นดรรชนี $J_2(k)$ โดยค่า k ของทั้งสองกรณีแทนอันดับของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร (เช่น จากการคำนวณอนุกรมเทย์เลอร์ได้ค่าระยะทางที่เป็นไปได้ 3 ค่า ถ้าเรานำค่าระยะทางค่าที่ 3 มาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น k เท่ากับ 3) ถ้าดรรชนีทั้งสองมีค่าต่ำสุด ณ ค่า k ค่าหนึ่งแสดงว่าอันดับที่ k ของระยะทางที่คำนวณได้เป็นระยะทางที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นจริง

5) การวิเคราะห์โดยการเทียบเคียงค่าเฟสเซอร์ของแรงดันตกที่วัดจาก PMU [17] วิธีการนี้เป็นการคำนวณหาตำแหน่งการลัดวงจร โดยการใช้การประมวลผลจาก เครื่องมือวัดเฟสเซอร์ (phasor measurement units , PMUs) ที่ได้ติดตั้งบนระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยมีเงื่อนไขว่า ค่า พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อิมพีแดนซ์สาย ชนิดของโหลด ได้ถูกระบุไว้แล้วในระบบ ซึ่งในคำนวณจะอ้างอิงจาก PMU ที่ติดตั้งอยู่คนละตำแหน่งและแบ่งการวิเคราะห์ตำแหน่งการลัดวงจรออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ 1 พิจารณาที่ PMU-1 จากการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ในทุกกิ่งเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งต้นในระบบ (ถ้ากิ่งที่พิจารณาเป็นกิ่งที่เกิดการลัดวงจรค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลง) ขึ้นในระบบ 2. พิจารณาที่ PMU-2 แล้วทำการคำนวณซ้ำอีกครั้ง แล้วทำการประมวลผลโดยใช้ส่วนต่างของแรงดันตกบนบัสที่ต่อกับกิ่งที่เกิดการลัดวงจรขึ้นที่คำนวณจาก PMU-1 กับที่คำนวณจาก PMU-2 โดยถ้าค่าแรงดันตกมีค่าใกล้เคียงกันให้สรุปว่ามีการเกิดการลัดวงจรขึ้นจริง

2.2 การประมาณและวิเคราะห์ค่าแรงดันตกและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติ

เนื่องด้วยระบบไฟฟ้าจำหน่ายในปัจจุบันบางระบบไม่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ทุกตำแหน่งขณะเกิดความผิดปกติหรือวัดได้แต่อาจจะผิดพลาดไม่จากค่าจริง ซึ่งส่งผลให้การคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติเกิดความผิดพลาดหรือในบางกรณีไม่สามารถคำนวณได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการประมาณและวิเคราะห์ค่าแรงดันตกและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าแรงดันตกมาจากบทความ [18] ซึ่งเป็นการประมาณค่าแรงดันตกในระบบไฟฟ้าจำหน่ายโดยนำวิธีการประมาณความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดมาประยุกต์ใช้

บทที่ 3

ความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงความรู้พื้นฐานรวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อใหญ่ 3.1 สถานีไฟฟ้าย่อย 3.2 วงจรสมมูลของสายย่อย 3.3 การสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ 3.4 ผลกระทบของแรงดันในสายจำหน่าย 3.5 การแปรเปลี่ยนของแรงดัน 3.6 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการประมาณข้อมูล

3.1 สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution substation)

สถานีไฟฟ้าย่อย [19] [20] เป็นสถานีกลางที่รับกำลังไฟฟ้าจากสายส่ง เพื่อลดแรงดันและจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อไปสู่ระบบจำหน่าย สำหรับหน้าที่และจุดประสงค์ของการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งสถานีไฟฟ้าต้นทางและสถานีไฟฟ้าย่อยมีดังนี้

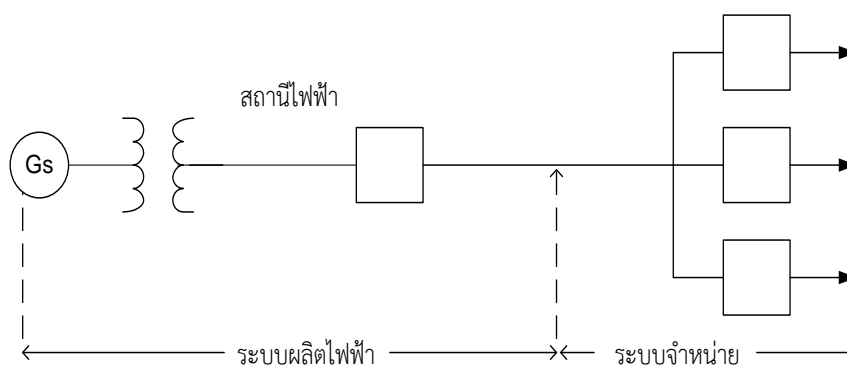
- 1) เป็นสถานีเปลี่ยนระดับแรงดัน
- 2) เป็นสถานีควบคุมแรงดันในระบบให้มีค่าคงที่ตามความต้องการ
- 3) สถานีเชื่อมระบบส่งและระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ในการตัดวงจรออกจากระบบหรือนำเข้าสู่ระบบ
- 4) เป็นสถานีวัดปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า
- 5) เป็นสถานีเชื่อมโยงระบบสื่อสาร (และการป้องกันระบบไฟฟ้า)

3.1.1 การจัดเรียงวงจรสายส่งไฟฟ้าย่อย

การจัดเรียงวงจรสายส่งย่อยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเรเดียล (Radial) และแบบวงรอบ (Loop) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบเรเดียล

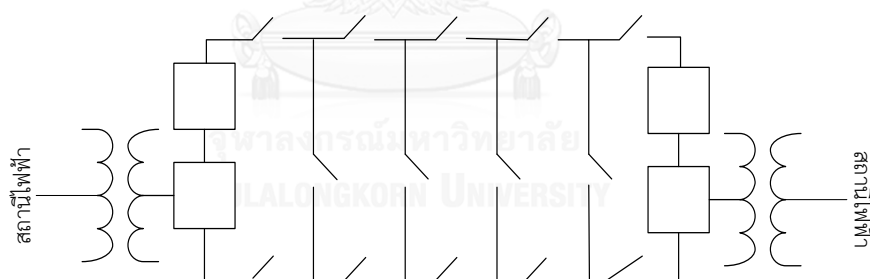
วงจรของสายส่งของระบบเรเดียลจะเริ่มจากบัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าและ สิ้นสุดที่สถานีไฟฟ้าย่อย ระบบเรเดียลเป็นระบบที่ง่ายและมีราคาของการลงทุนก่อสร้างสายส่ง เริ่มต้นต่ำ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่สายส่งย่อยสายใดสายหนึ่ง สถานีไฟฟ้าย่อยที่ต่อจากสายส่งย่อยนั้นก็จะไม่สามารถรับไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.1 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

2) ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบวงรอบ

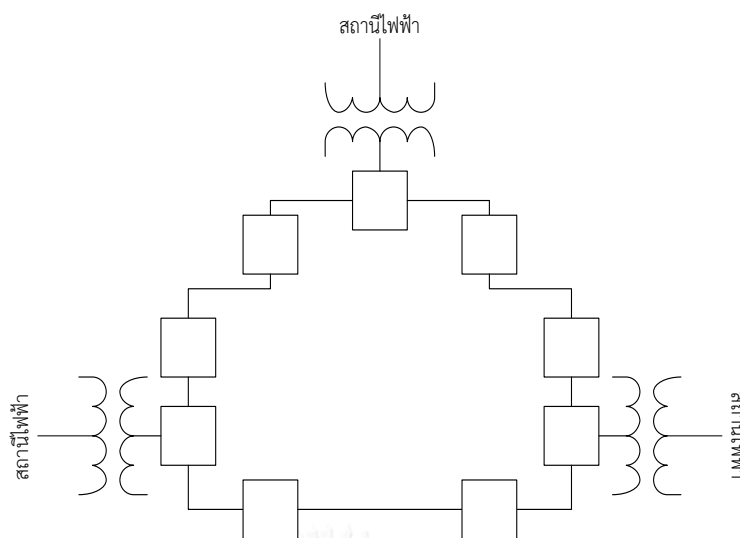
วงจรของสายส่งในระบบแบบวงรอบจะเริ่มจากบัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าและจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่สถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ จากนั้นจะกลับสู่บัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้า เดิมข้อดีของระบบวงรอบ คือ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สายส่งย่อยสายใดสายหนึ่ง สถานีไฟฟ้า ย่อยทั้งหมดยังสามารถรับไฟฟ้าได้ เนื่องจากยังมีสายส่งย่อยอีกสายหนึ่งที่เชื่อมกับสถานีไฟฟ้า ย่อยอื่นหรือเชื่อมกับจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าอยู่ การตรวจสอบและแก้ไขความผิดปกตินั้นสามารถทำได้โดยการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นทางและปลายทางของสายส่งย่อยที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ การจัดเรียงวงจรแบบนี้ จะให้ความน่าเชื่อถือสูงกว่าการจัดเรียงวงจรแบบเรเดียล



รูปที่ 3.2 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าระบบลูป

3) ระบบเครือข่าย(network system)

การจัดวงจรระบบเครือข่ายโดยระบบนี้จะต่อเชื่อมสถานีไฟฟ้าย่อยถึงกันหมดและมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าจากหลายแหล่งจ่าย โดยการใช้สวิตช์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันช่วยในการตัดต่อระบบวงจร เพื่อให้สามารถตัดส่วนหนึ่งส่วนใดออกทำการแก้ไขได้ จึงส่งผลให้การส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบเน็ตเวิร์กนั้น มีความเชื่อถือได้มากที่สุดเนื่องจากระบบ นี้ต้องมีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) และระบบรีเลย์ (relay) เหมาะกับการใช้ในเมืองที่มีประชากรหนาแน่น ย่านธุรกิจชุมชนของเมืองขนาดใหญ่



รูปที่ 3.3 ระบบส่งและจ่ายไฟฟ้าแบบเน็ตเวิร์ก

3.2 วงจรสมมูลของสายย่อย

สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายเฉพาะการจำลองสายย่อยในระบบไฟฟ้าจำหน่าย [21] [19] ซึ่งเป็นพื้นฐานที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับแรงดันที่วิทยานิพนธ์นำเสนอ

3.2.1 ลักษณะของสายส่ง

สำหรับสายส่งในระบบจำหน่าย ถ้าพิจารณาจากการกระจายของอิมพีแดนซ์แล้วจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1) สายส่งแบบโฮโมจีเนียส (Homogenous line)

สายส่งแบบโฮโมจีเนียสคือ สายส่งที่มีการกระจายของอิมพีแดนซ์อย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) ตลอดทั้งสาย หรือค่าอิมพีแดนซ์ต่อความยาวตลอดทั้งสายมีค่าคงที่ ซึ่งโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีที่สายส่งในระบบจำหน่ายเป็นแบบโฮโมจีเนียสเท่านั้น

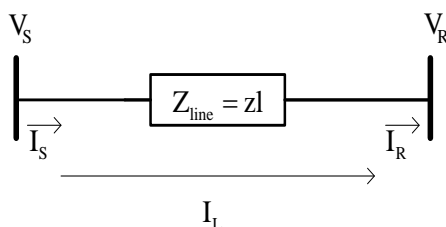
2) สายส่งแบบอินโฮโมจีเนียส (Inhomogeneous line)

สายส่งแบบอินโฮโมจีเนียสคือ สายส่งที่มีการกระจายของอิมพีแดนซ์อย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniform distribution) หรือค่าอิมพีแดนซ์ต่อความยาวตลอดทั้งสายมีค่าไม่คงที่

3.2.2 สายย่อย (Line sections)

สายย่อยในระบบจำหน่ายนั้นถือว่าเป็นสายส่งระยะสั้น ซึ่งมีความยาวต่ำกว่า 80 กิโลเมตร หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 69 kV โดยทั่วไปสายประเภทนี้จะมีผลจากตัวเก็บประจุต่ำมาก ดังนั้นแบบจำลองของสายส่งจึงประกอบด้วยความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับความเหนี่ยวนำเท่านั้น ดังแสดง

ในรูปที่ 3.4 วงจรดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสและสามารถใช้แทนสายส่งสามเฟสสมดุลก็ได้ โดยกรณีของสายส่งสามเฟสนั้น Z_{Line} หมายถึงอิมพีแดนซ์รวมของสายส่งแต่ละเส้น ส่วน V_S และ V_R เป็นแรงดันเฟส I_S และ I_R เป็นกระแสในสายตามลำดับ



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของสายย่อย

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะอาศัยอิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาวแทนอิมพีแดนซ์อนุกรมรวมของสายตัวนำ สำหรับสายส่งระยะสั้นในรูปที่ 5 นั้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$V_S = V_R + Z_{Line} I_R \quad (3.1)$$

$$I_S = I_L = I_R \quad (3.2)$$

หรืออาจจะเขียนในรูปเมตริกซ์เป็น

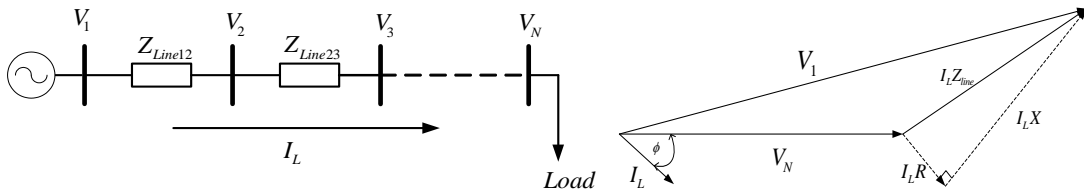
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{Line} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่	z	คือ	หมายถึงอิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาว (Ω/m)
	Z_{line}	คือ	หมายถึงอิมพีแดนซ์อนุกรมทั้งหมด (Ω)
	l	คือ	หมายถึงความยาวสายย่อย (m)
	I_L	คือ	หมายถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายย่อยตัวอย่าง (A)

3.3 ผลกระทบของแรงดันในสายจำหน่าย

สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายผลกระทบของแรงดันในสายจำหน่าย [20] [22] ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าปกติและแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ

3.3.1 แรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ



รูปที่ 3.5 รูปวงจรสายจำหน่ายและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

จากวงจรในรูปที่ 3.5 เขียนเป็นสมการโดยประมาณได้ดังนี้

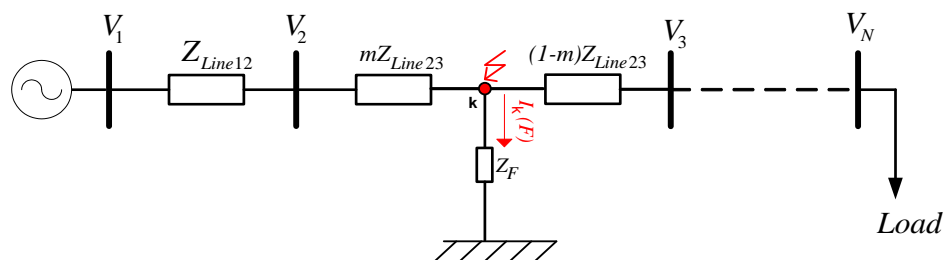
$$V_1 = V_2 + V_3 + \dots + V_N \quad (3.4)$$

$$V_n = V_1 - I_L \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n Z_{\text{Line},ij} \right) \quad (3.5)$$

โดยที่	V_1	คือ	ค่าแรงดันทางด้านแรงดันต่ำของสถานีไฟฟ้าย่อย (pu.)
	V_n	คือ	ค่าแรงดัน ณ ตำแหน่ง n เมื่อ $n=2,3,\dots,N$ (pu.)
	I_L	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจำหน่ายตัวอย่าง (pu.)
	$Z_{\text{Line},ij}$	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจำหน่าย โดยพิจารณาเป็นช่วงๆ ตั้งแต่ช่วงที่ i ถึง j เมื่อ $i=1,2,\dots,n-1$ และ $j=2,3,\dots,n$ (pu.)

เมื่อกำหนดให้กระแสไฟฟ้ามีทิศทางในการไหลจริงจากสถานีไฟฟ้าย่อยไปยังโหลด จากสมการที่ (3.5) จะพบว่า แรงดันที่ตำแหน่งหลังจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ตำแหน่งก่อนหน้าเสมอ เนื่องจากมีแรงดันตกค่อมอิมพีแดนซ์ในสายจำหน่าย

3.3.2 แรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติ



รูปที่ 3.6 รูปวงจรสายจำหน่ายขณะเกิดความผิดปกติ

จากวงจรในรูปที่ 3.6 สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันขณะเกิดความผิดปกติได้ดังนี้

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (3.6)$$

$$VD_i = V_i(0) - V_i(F) \quad (3.7)$$

โดยที่	$V_i(F)$	คือ	ค่าแรงดันทางด้านแรงดันต่ำของสถานีไฟฟ้าย่อย (pu.)
	$V_i(0)$	คือ	ค่าแรงดัน ณ ตำแหน่ง n เมื่อ $n=2,3,\dots,N$ (pu.)
	$I_k(F)$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจำหน่ายตัวอย่าง (pu.)
	Z_{ik}	คือ	อิมพีแดนซ์เมตริกซ์แถวที่ i หลักที่ k เมื่อ k คือตำแหน่งความผิดพลาด (pu.)
	VD_i	คือ	ค่าแรงดันตก ณ ตำแหน่ง i (pu.)

สำหรับการสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_{ik} ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.2 ซึ่งสร้างจากการอินเวอร์สแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์สำหรับกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่บัส และจากการอินเวอร์สแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ที่แทรกบัสผิดพลาดเข้าไปในระบบสำหรับกรณีที่เกิดความผิดพลาดระหว่างบัส

1) แรงดันตกสำหรับความผิดพลาดแบบ 3 เฟส

สำหรับความผิดพลาดแบบ 3 เฟส ค่าแรงดันตกในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากันซึ่งคำนวณได้จาก

$$VD_i = Z_{ik} I_k(F) \quad (3.8)$$

ซึ่งกระแสความผิดพลาดจะสามารถหาได้จากสมการ

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_F} \quad (3.9)$$

โดยที่	$V_k(0)$	คือ	ค่าแรงดัน ณ ตำแหน่ง k บนสายจำหน่ายในสภาวะปกติ (pu.)
	Z_F	คือ	อิมพีแดนซ์ความผิดพลาด ณ ตำแหน่ง k (pu.)

2) แรงดันตกสำหรับความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน

สำหรับความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดินนั้น ค่าแรงดันตกในแต่ละเฟสจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากรูปวงจรมูลในแต่ละองค์ประกอบไม่เหมือนกัน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\begin{bmatrix} V_i^0(F) \\ V_i^1(F) \\ V_i^2(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - Z_{ik}^0 I_k^0(F) \\ V_i^1(0) - Z_{ik}^1 I_k^1(F) \\ 0 - Z_{ik}^2 I_k^2(F) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} VD_{i,a} \\ VD_{i,b} \\ VD_{i,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{i,a}(0) \\ V_{i,b}(0) \\ V_{i,c}(0) \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} V_i^0(F) \\ V_i^1(F) \\ V_i^2(F) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่	$V_i^1(0)$	คือ	ค่าแรงดันก่อนเกิดความผิดพลาด ณ ตำแหน่ง i มีค่าเท่ากับ $V_i(0)$ (pu.)
	A	คือ	เมตริกซ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนองค์ประกอบ ซึ่ง $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a^2 & a^2 \end{bmatrix}, a = 1 \angle 120^\circ$
	$Z_{ik}^0, Z_{ik}^1, Z_{ik}^2$	คือ	อิมพีแดนซ์เมตริกซ์แถวที่ i หลักที่ k ของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์อันดับศูนย์ อันดับบวก และอันดับลบ (pu.)

ซึ่งกระแสความผิดพลาดจะสามารถหาได้จากสมการ

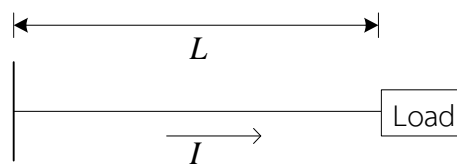
$$I_k^0(F) = I_k^1(F) = I_k^2(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_F} \quad (3.12)$$

สำหรับกรณีที่เกิดความผิดพลาดบนสายจำหน่ายทั้งในกรณีที่เกิดความผิดพลาดแบบ 3 เฟส สมการที่ (3.9) และแบบ 1 เฟสลงดิน สมการที่ (3.10) และ (3.11) พบว่า แรงดันตกจะมีค่าสูงหรือต่ำ จะขึ้นอยู่กับความใกล้ หรือไกลจากตำแหน่งที่สนใจไปยังตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่ง ถ้าตำแหน่งที่สนใจอยู่ใกล้ความผิดพลาด ค่าแรงดันตกคร่อมจะสูง แต่ถ้าตำแหน่งที่สนใจอยู่ไกลตำแหน่งความผิดพลาด ค่าแรงดันตกคร่อมจะต่ำ

3.3.3 ความยาวสายและกระแสไหล

ลักษณะการต่อโหลดในวงจรย่อยจะมีผลต่อค่าแรงดันตก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการต่อวงจร แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

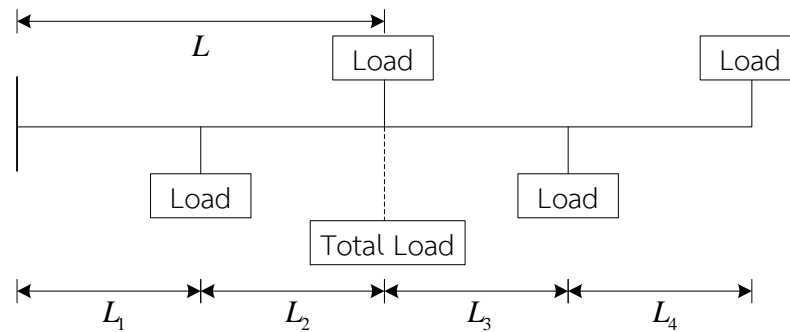
(1) โหลดจุดเดียว



รูปที่ 3.7 วงจรสายส่งที่ต่อโหลดจุดเดียว

โหลดจุดเดียวเป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยแรงดันตกจะคำนวณจากค่าแรงดันตกย่อย ซึ่งมีหน่วยเป็น mV/A/m โดยจะคูณด้วยกระแสไหลและความยาวสาย (L) ที่คิดจากแหล่งจ่ายไฟไปถึงจุดที่ติดตั้งโหลด

(2) โหลดกระจายแบบสม่ำเสมอ



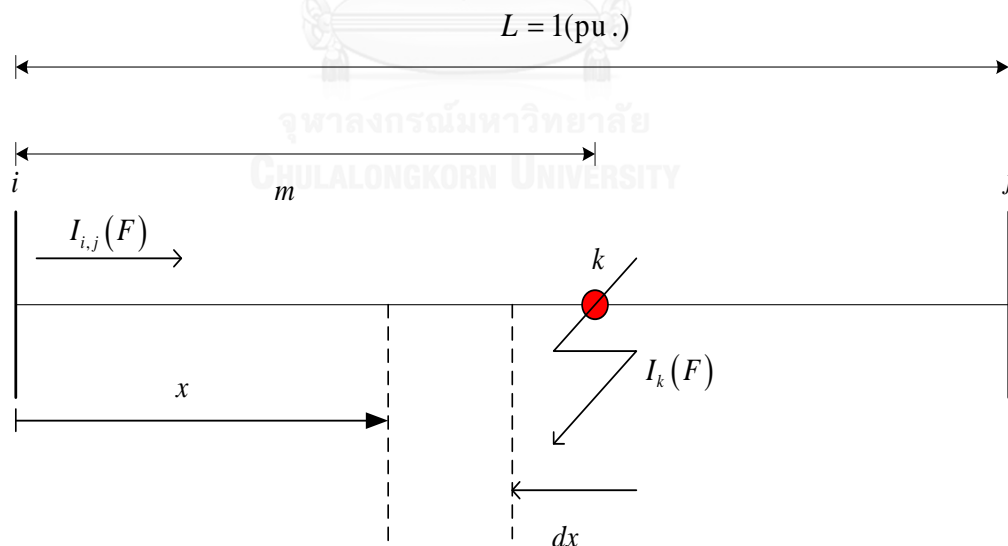
รูปที่ 3.8 วงจรสายที่มีโหลดกระจายแบบสม่ำเสมอ

ถ้ามีโหลดหลายตัวที่มีขนาดเท่า ๆ กัน และระยะห่างเท่า ๆ กันโดยประมาณ กระแสที่นำมาหาค่าแรงดันตก คือ ผลรวมของกระแสทั้งหมด ส่วนระยะทาง (L) คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวจากแหล่งจ่ายไฟไปยังโหลดตัวสุดท้าย แรงดันตกที่ได้คือแรงดันตกที่จุดปลายทาง

(3) โหลดกระจายไม่แน่นอน

ถ้าโหลดแต่ละตัวมีขนาดไม่เท่ากัน และ/หรือระยะห่างไม่เท่ากัน การหาค่าแรงดันตกจะต้องคิดแยกเป็นโหลดจุดเดียวแยกแต่ละตัวแล้วนำแรงดันตกมารวมกัน ค่าที่ได้จะเป็นแรงดันตกที่โหลดตัวปลายทาง

3.4 การแปรเปลี่ยนของแรงดัน (Voltage profile)



รูปที่ 3.9 สายจำหน่ายจากต้นทาง i ไปยังปลายทาง j

จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื่องจากสายส่งที่พิจารณามีลักษณะเป็นแบบโฮโมจีเนียส และค่าของแรงดันมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ [22] จากรูปที่ 3.9 เนื่องจากโครงสร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาที่ค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดต่ำและเป็นสายแบบเรเดียล เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น

กระแสลัดวงจรทั้งหมดจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ความผิดพลาดลงดิน ส่งผลให้วงจรส่วนหลังตำแหน่งความผิดพลาดมีค่าแรงดันเท่ากับแรงดัน ณ ตำแหน่งความผิดพลาด สำหรับวงจรส่วนหน้าตำแหน่งความผิดพลาดนั้นจะคำนวณแรงดันตกตามปกติ ถ้าพิจารณาแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดกับการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์จะได้ดังสมการ

$$V_{i,x} = V_i - V_x = \begin{cases} \int_0^x I_{i,j}(F)(1-x)z dx, & x \leq m \\ V_i - V_m, & m < x \leq 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) สำหรับกรณีที่แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่มีตำแหน่งอยู่หน้าความผิดพลาด ($x \leq m$) จะได้

$$\begin{aligned} V_x &= V_i - I_{i,j}(F)z \left(x - \frac{x^2}{2} \right) \\ V_x &= V_i - I_{i,j}(F)l(x) \end{aligned} \quad (3.14)$$

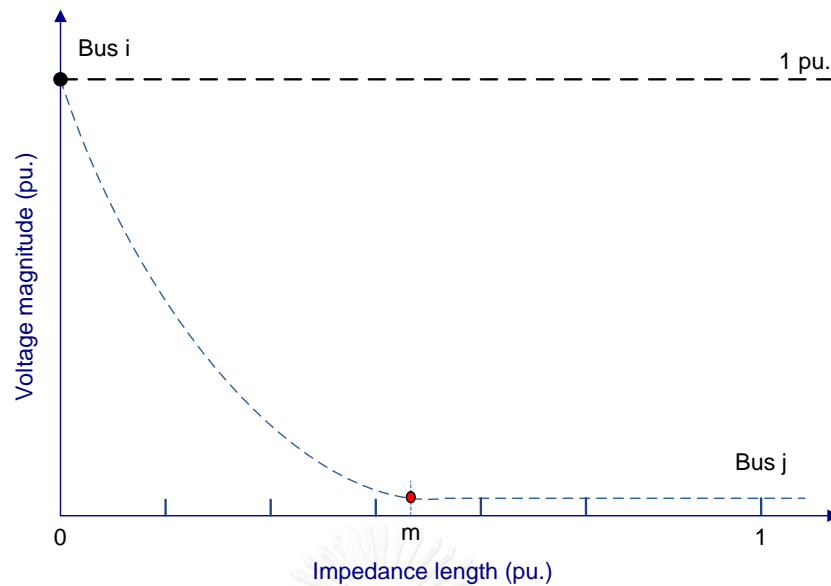
โดยที่ $l(x)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ซึ่งวัดจากบัส i ไปยังตำแหน่ง x ที่สนใจ (pu.)

จากสมการที่ (3.13) สำหรับกรณีที่แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่มีตำแหน่งอยู่หลังความผิดพลาด ($m < x \leq 1$) ได้ว่า

$$V_x = V_m = I_k(F)Z_F = d \quad (3.15)$$

โดยที่ d คือ ค่าคงที่ (pu.)

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) สรุปได้ว่าค่าแรงดันตำแหน่งที่อยู่หน้าความผิดพลาดมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม $l(x)$ ส่วนค่าแรงดันตำแหน่งที่อยู่หลังความผิดพลาดเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า $l(x)$ เปลี่ยนแปลงไป นำมาวาดกราฟ โดยที่แกนตั้งคือแรงดันขณะเกิดความผิดพลาดและแกนนอนคือค่าอิมพีแดนซ์ตามระยะทางที่วัดจากบัส i ไปยังบัส j ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการแปรเปลี่ยนของแรงดันจากบัส i ไปบัส j

3.5 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการประมาณข้อมูล

เนื่องจากแรงดันขณะเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่ายมีค่าลดลงจากต้นสายป้อนไปยังปลายสายป้อนตามลำดับ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการประมาณชุดข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งความผิดปกติ [23] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) เป็น การวิเคราะห์การถดถอยของตัวแปรอิสระ 1 ตัวและตัวแปรตาม 1 ตัวโดยตัวแปรทั้งสอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกันอาจเป็นความสัมพันธ์ตามกันหรือผกผันก็ได้ รูปแบบการวิเคราะห์นี้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของการวิเคราะห์การถดถอยโดยมีตัวแบบการถดถอยคือ

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (3.16)$$

โดยที่	Y_i	คือ	ค่าของตัวแปรตามในลำดับที่ i
	β_0 และ β_1	คือ	พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า
	X_i	คือ	ค่าคงที่ของตัวแปรอิสระในลำดับที่ i
	ε_i	คือ	ความคลาดเคลื่อน (random error) ในลำดับที่ i

ความคลาดเคลื่อนมีข้อกำหนดว่าต้องเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับและความคลาดเคลื่อนแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน

ค่าพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 เรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) โดยค่า β_1 คือความชันของสมการถดถอยที่บอกให้ทราบถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของการ

แจกแจงของตัวแปร Y เมื่อตัวแปรอิสระ X มีค่าเพิ่มขึ้น 1 หน่วยในขณะที่ β_0 คือจุดตัดแกน Y ของสมการถดถอยหรือเป็นค่าเฉลี่ยของการแจกแจงของตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ X มีค่าเท่ากับ 0

3.5.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการสร้างสมการถดถอยหรือสร้างตัวแบบของประชากรโดยตัวแบบที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (3.17) เนื่องจากในสมการดังกล่าวนักวิจัยไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 จึงต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างหรือข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมา เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองเพื่อใช้ในพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามหรือ \hat{Y} ค่าพยากรณ์นี้เรียก fitted value โดยค่าพยากรณ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i \quad (3.17)$$

โดยที่ $\hat{\beta}_0$ และ $\hat{\beta}_1$ คือ ค่าประมาณของพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 นั้นมีด้วยกันหลายวิธีแต่วิธีที่เป็นที่นิยมคือวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (ordinary least square estimation) หลักการของวิธีนี้คือ การประมาณค่าพารามิเตอร์ให้ค่าผลรวมกำลังสองของส่วนเหลือ (residual) ที่น้อยที่สุด ส่วนเหลือ (e_i) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงของตัวแปรตาม Y กับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอย (\hat{Y}) ที่ระดับเดียวกันของค่าของตัวแปรอิสระ X หรือสามารถเขียนได้ดังนี้

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i) \quad (3.18)$$

ความคลาดเคลื่อน (e) เป็นค่าที่ได้จากการประมาณแต่ละส่วนเหลือ (e) เป็นความคลาดเคลื่อนที่ได้จากตัวอย่าง

3.5.2 การประมาณชุดข้อมูล

ส่วนที่ 3.5.1 กล่าวถึงกระบวนการการสร้างพหุนามที่มีกราฟผ่านชุดข้อมูล $\{(x_i, y_i)\}$ ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการสร้างสมการเส้นโค้งหรือหาฟังก์ชัน $y = f(x)$ สำหรับประมาณชุดข้อมูล เส้นโค้งที่ดีจะต้องเป็นกราฟที่ผ่านย่านของชุดข้อมูลที่ใกล้เคียงมากที่สุด กล่าวคือ ค่าคลาดเคลื่อนรวมมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งประมาณที่ใช้วัดความคลาดเคลื่อนของเส้นโค้งจากชุดข้อมูลมีดังนี้

$$E_\infty(f) = \max_{1 \leq i \leq n} \{|f(x_i) - y_i|\} \quad (3.19)$$

$$E_1(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i| \quad (3.20)$$

$$E_2(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|^2} \quad (3.21)$$

การประมาณชุดข้อมูลด้วยเส้นโค้งจะต้องทำให้ค่าคลาดเคลื่อน $E_\infty(f)$, $E_1(f)$ และ $E_2(f)$ สำหรับวิธานิพจน์ฉบับนี้จะใช้ $E_2(f)$ ซึ่งจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ $\sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|^2$ น้อยที่สุด

3.5.3 สมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regressions)

รูปแบบทั่วไปของสมการเชิงพหุนามแสดงดังสมการที่ (3.22)

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k \quad (3.22)$$

โดยมีค่าคลาดเคลื่อน (Residual) คือ

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]^2 \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.23) หาอนุพันธ์ย่อยเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดได้

$$\partial(R^2) / \partial a_0 = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)] = 0 \quad (3.24)$$

$$\partial(R^2) / \partial a_1 = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)]x = 0 \quad (3.25)$$

$$\partial(R^2) / \partial a_k = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)]x^k = 0 \quad (3.26)$$

ทำการคูณกระจายตัวแปรได้

$$a_0n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.27)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.28)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} = \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.27) (3.28) และ (3.29) สามารถนำการเขียนในรูปเมตริกซ์สำหรับพหุนามยกกำลัง 1 ถึง k ได้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

เนื่องจากสมการที่ 3.30 เป็น Vandermonde matrix ดังนั้นสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.31) สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์

$$y = Xa \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.32) สามารถแก้สมการหาค่า a ได้เท่ากับ

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3.33)$$

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ค่า k มีค่าเท่ากับ 1 และ 2 เนื่องจากความสัมพันธ์ของแรกต้นตวก่อนและหลังตำแหน่งผิดพลาด

บทที่ 4

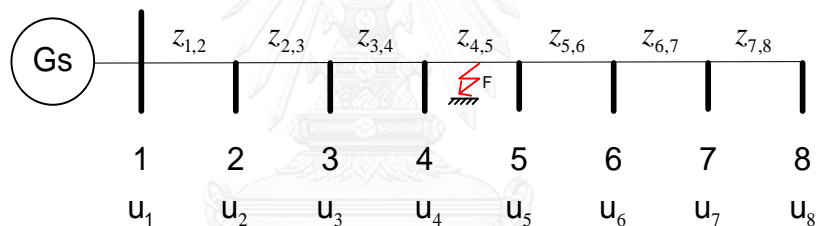
การวิเคราะห์ข้อมูลและวิธีการระบุตำแหน่งความผิดปกติ

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีการที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งความผิดปกติ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ 4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน 4.2 การระบุตำแหน่งความผิดปกติ

4.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน

4.1.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อนกรณีที่ไม่มีสายแยก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะบนสายป้อนตามแนวยาวที่ไม่มีสายแยก ซึ่งเป็นการอธิบายถึงการสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์ตามแนวเส้นตรงของสายป้อน โดยงานวิจัยนี้มีลักษณะการเก็บข้อมูลดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบจำหน่ายเรเดียลแบบไม่มีสายแยก

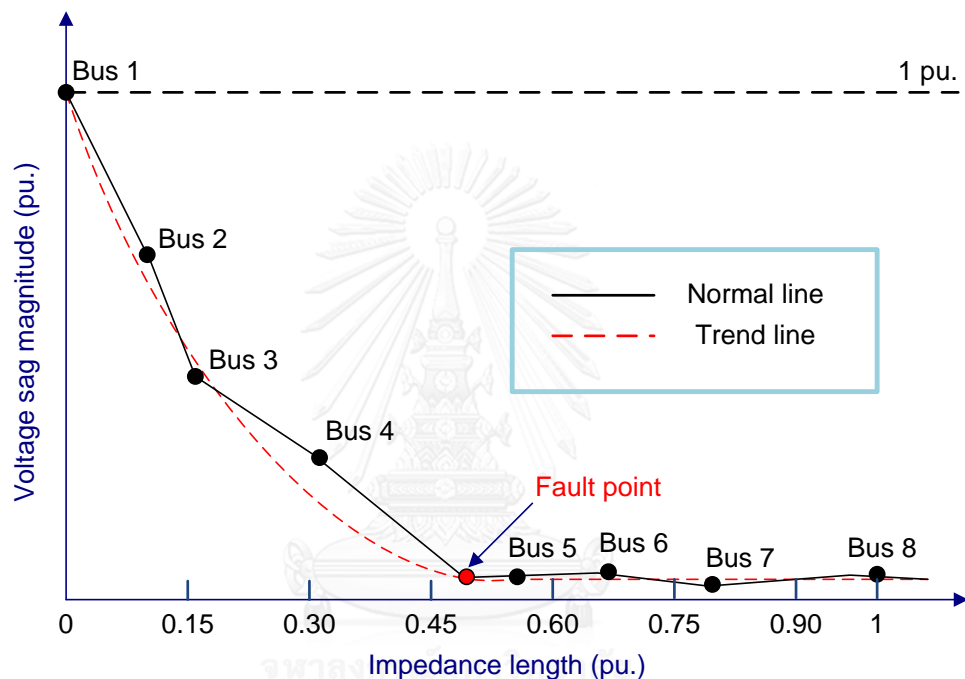
รูปที่ 4.1 แสดงระบบจำหน่ายแบบเรเดียล :ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ ณ บัสต่างๆในระบบ นิยามด้วยผลรวมของสายย่อยจากต้นสายป้อนไปถึงบัสนั้นๆแล้วเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ ณ บัส ที่อยู่ห่างจากต้นสายป้อนมากที่สุด ดังนี้

$$\begin{aligned}Z_1 &= 0 / Z_8 \\Z_2 &= Z_{1,2} / Z_8 \\Z_3 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3}) / Z_8 \\Z_4 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4}) / Z_8 \\Z_5 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4} + Z_{4,5}) / Z_8 \\Z_6 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4} + Z_{4,5} + Z_{5,6}) / Z_8 \\Z_7 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4} + Z_{4,5} + Z_{5,6} + Z_{6,7}) / Z_8 \\Z_8 &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4} + Z_{4,5} + Z_{5,6} + Z_{6,7} + Z_{7,8}) / Z_8\end{aligned}\tag{4.1}$$

ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้น (จากรูปที่ 4.1 ระหว่างบัส 4 และบัส 5) จะนิยามค่าอิมพีแดนซ์ Z_{FI} คือค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดจากต้นสายป้อนไปจนถึงตำแหน่งความผิดปกติ (จุด F)

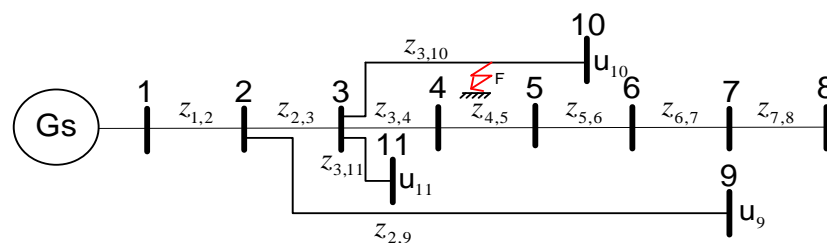
$$Z_{FI} = (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,4} + Z_{4,F}) / Z_8 \quad (4.2)$$

จากนั้นทำการวิเคราะห์ในกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างบัส 4 และ บัส 5 แล้วพิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับความยาวอิมพีแดนซ์ที่ได้บันทึกไว้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับความยาวอิมพีแดนซ์

4.1.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อนกรณีที่มีสายแยก



รูปที่ 4.3 ระบบจำหน่ายเรเดียลแบบมีสายแยก

เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปมีลักษณะคือมีหลายสายแยก โดยมีตัวอย่างระบบอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งระบบตัวอย่างมีสายแยกอยู่สองตำแหน่ง คือ บัส 2 แยกไปบัส 9 และ บัส 3 แยกไปบัส 10 และ 11 :ซึ่งมีพีแดนซ์ของสายแยกมีลักษณะดัง (4.3)

$$\begin{aligned}
 Z_9 &= (Z_{1,2} + Z_{2,9}) / Z_8; Z_9 = Z_7 \\
 Z_{10} &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,10}) / Z_8; Z_5 \leq Z_{10} \leq Z_6 \\
 Z_{11} &= (Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{3,11}) / Z_8; Z_3 \leq Z_{11} \leq Z_4
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

ซึ่งจากรูปที่ 4.3 เมื่อเกิดความผิดพลาดระหว่างบัส 3 กับบัส 10 วาดกราฟระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์สายป้อนพบว่าแรงดัน ณ ตำแหน่งที่คาดว่าจะอยู่หลังความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าแรงดันบัสที่อยู่ก่อนหน้า เนื่องมาจากผลกระทบของสายแยกที่มีค่าอิมพีแดนซ์สายป้อนมากกว่าอิมพีแดนซ์สายป้อนของแรงดันตำแหน่งที่อยู่หลังความผิดพลาด ส่งผลให้ตำแหน่งผิดพลาดเกิดความคลาดเคลื่อนสูงมีพิจารณาจากแนวโน้มของรูปกราฟ ดังนั้นจึงมีการเลือกทางเดินของจุดไปยังตำแหน่งความผิดพลาด

การเลือกทางเดินของจุดไปยังตำแหน่งความผิดพลาด ใช้แนวคิดที่ว่าระบบจำหน่ายที่มีสายแยก n สายนั้นเกิดจากการรวมกันของระบบเรเดียลที่ไม่มีสายแยก $n+1$ ระบบเข้าด้วยกัน โดยที่แรงดันตกชั่วขณะจะมีค่าลดลงตามความยาวสาย ซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งความผิดพลาดและหลังความผิดพลาด

เนื่องจากระบบตัวอย่างมีสายย่อย 3 สายดังนั้นจึงประกอบไปด้วยระบบเรเดียลย่อย 4 ระบบที่มีเส้นทางดังนี้

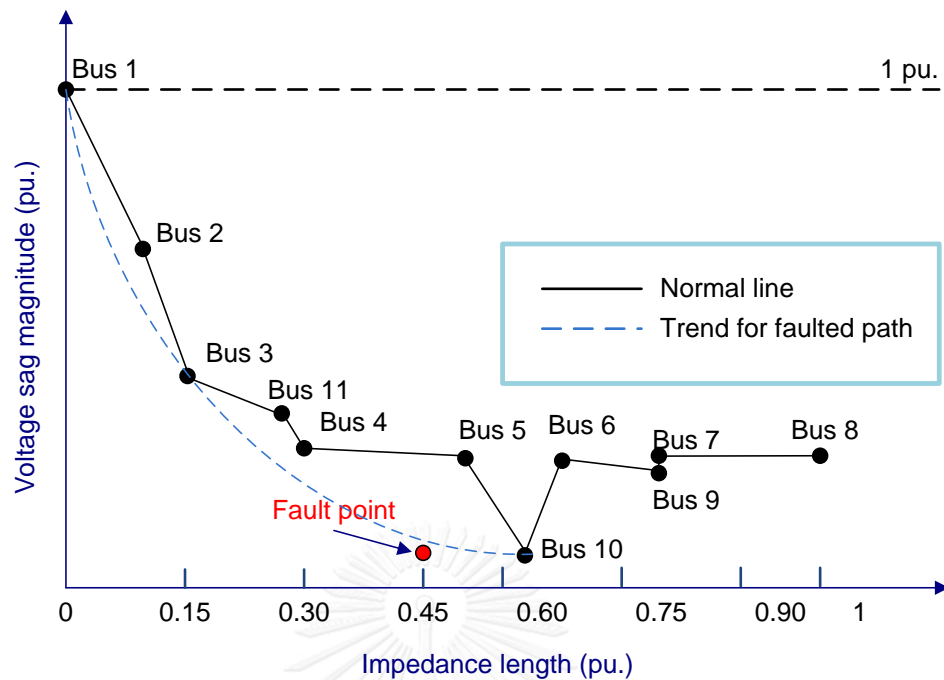
เส้นทาง 1 : บัส 1 บัส 2 บัส 3 บัส 4 บัส 5 บัส 6 บัส 7 บัส 8

เส้นทาง 2 : บัส 1 บัส 2 บัส 3 บัส 11

เส้นทาง 3 : บัส 1 บัส 2 บัส 3 บัส 10

เส้นทาง 4 : บัส 1 บัส 2 บัส 9

ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะของบัสที่ 10 มีค่าต่ำสุด ดังนั้นทางเดินของจุดข้อมูลแรงดันที่ใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งความผิดพลาดคือ บัส 1 บัส 2 บัส 3 และบัส 10 ซึ่งรูปที่ 4.4 แสดงเส้นทางกราฟแนวโน้มของเส้นทางของสายที่ผ่านจุดผิดพลาดและเส้นทางกราฟปกติจากการลากเชื่อมจุด



รูปที่ 4.4 แสดงแนวโน้มของกราฟในกรณีที่มีการเลือกทางเดินจุดเทียบกับกรณีที่ลากเส้นเชื่อมจุดปกติ

4.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน ณ ตำแหน่งก่อนและหลังความผิดปกติ

จากรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.4 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

1) ส่วนที่เป็นเส้นโค้ง

สำหรับส่วนที่เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนบัสทุกบัสในระบบที่อยู่บนเส้นทางที่เลือกตาม 4.1.2 และมีตำแหน่งอยู่ก่อนความผิดปกติ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีความสัมพันธ์แบบสมการกำลัง 2 ดังนี้

$$\tilde{v}(z_i) = az_i^2 + bz_i + c; z_i < z_{FI} \quad (4.4)$$

2) ส่วนที่เป็นเส้นตรง

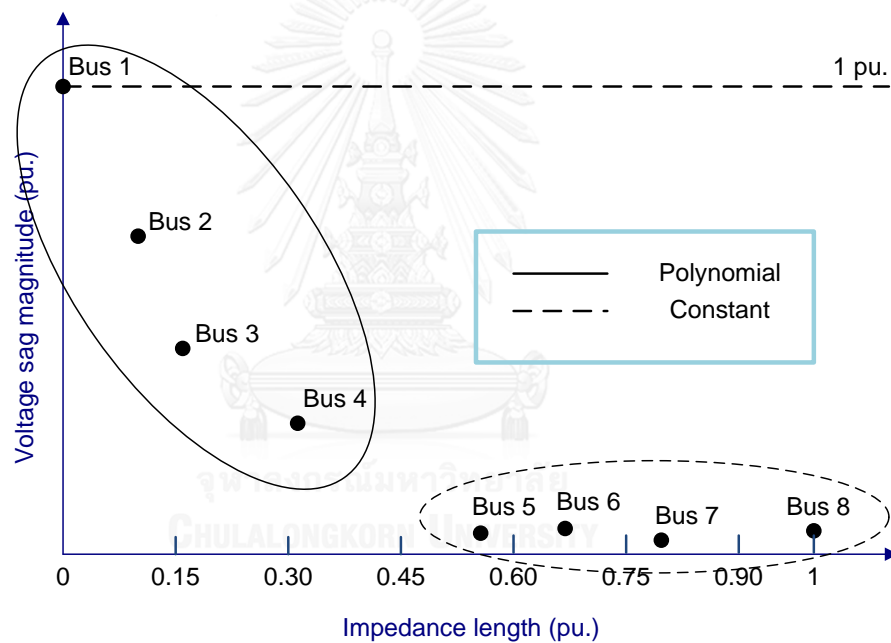
สำหรับส่วนที่เป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนบัสทุกบัสในระบบที่อยู่บนเส้นทางที่เลือกตาม 4.1.2 และมีตำแหน่งอยู่หลังตำแหน่งความผิดปกติ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ดังนี้

$$\tilde{v}(z_i) = d; z_i \geq z_{FI} \quad (4.5)$$

โดยที่ a, b, c และ d คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปกราฟของแรงดันกับตกชั่วขณะ กับอิมพีแดนซ์สายป้อนของแต่ละความผิดพลาด

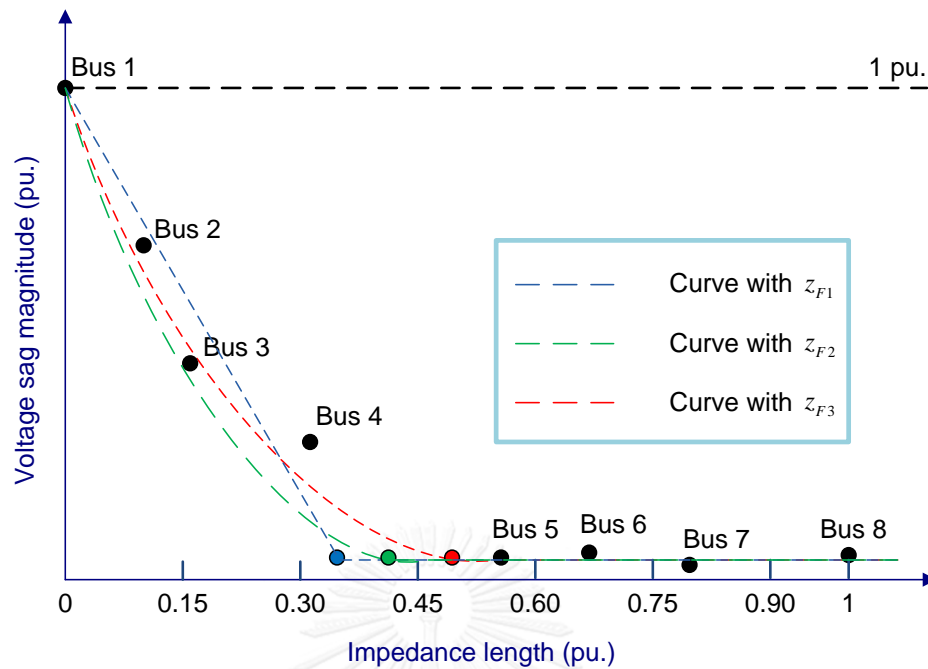
4.3 การสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์เพื่อหาตำแหน่งความผิดพลาดสำหรับกรณีที่มีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาดมากกว่าเท่ากับ 3 ตำแหน่ง (สามารถประมาณเป็นเส้นโค้งได้)

ในส่วนนี้วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการกำลังสองน้อย (least square method) ที่สุดในการ fitting curve ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ โดยแสดงเหตุการณ์ที่เกิดความผิดพลาดขึ้นระหว่างบัส 4 และ บัส 5 อ้างอิงจากรูปที่ 4.1 ดังนั้นเส้นทางที่ผ่านตำแหน่งความผิดพลาด คือ บัส 1 บัส 2 บัส 3 บัส 4 บัส 5 บัส 6 บัส 7 บัส 8



รูปที่ 4.5 แสดงการจัดกลุ่มข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ

รูปที่ 4.5 แสดงค่าของแรงดันตกชั่วขณะที่ทราบค่าขณะเกิดความผิดพลาดขึ้นบนเส้นทางดังกล่าว โดยจะนำของมูลนี้มาทำการ fitting curve ซึ่งในกรณีนี้ไม่รู้ค่าของ Z_{Fl} จึงทำการสุ่มค่าของ Z_{Fl} โดยที่ $z_1 \leq z_{Fl} \leq z_{max}$ โดย z_1 คืออิมพีแดนซ์ที่ต้นสายป้อนส่วน z_{max} คืออิมพีแดนซ์ของบัสที่อยู่ไกลสายป้อนมากที่สุด



รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบจาก z_{FI} ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.6 แสดงถึงผลกระทบจากการปรับค่า z_{FI} ซึ่งในการสุ่มค่า z_{FI} แต่ละค่าจะสามารถประมาณค่าแรงดันตกชั่วขณะของแต่ละบัสได้โดยใช้สมการที่ (4.4) และ (4.5) โดยค่าแรงดันตกชั่วขณะที่ประมาณนั้นจะมีการแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปกราฟแต่ละรูป ทั้งนี้เพื่อหารูปกราฟที่เหมาะสมที่สุดตามหลักการกำลังสองน้อยที่สุด จึงได้มีการกำหนด objective function ดังนี้

$$\min \left(\sum_i^n (v(z_i) - \tilde{v}(z_i))^2 \right) \quad (4.6)$$

โดยที่ $v(z_i)$ คือ แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดของบัส i ที่ทราบค่า
 $\tilde{v}(z_i)$ คือ แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่ประมาณจากกราฟ
 n คือ จำนวนบัสบนเส้นทางที่ผ่านจุดผิดพลาด

จากสมการที่ (4.6) ส่งผลให้มีค่า z_{FI} ค่าหนึ่งจากการสุ่มที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและเป็นตัวบ่งชี้ว่าได้รูปกราฟที่เหมาะสม โดยจะทำการบันทึกรูปกราฟไว้

จากรูปที่ 4.6 จะนำข้อมูลของแรงดันทุกค่าที่บนกราฟที่มีค่า $z_i < z_{FI}$ มาทำการ fitting curve อีกครั้ง (ตามขั้นตอนใน 4.3 แต่คิดเฉพาะกรณี $z_i < z_{FI}$ จะได้สมการ

$$\tilde{V}(z_i) = \beta_0 z_i^2 + \beta_1 z_i + \beta_2 \quad (4.7)$$

โดยที่ β_0 , β_1 และ β_2 คือ ค่าคงที่ ที่ได้จากการกำลังสองน้อยที่สุด

นำสมการที่ (4.5) กับ (4.7) มาแก้สมการหาจุดตัดระหว่าง 2 กราฟ และเรียกจุดตัดนั้นด้วยตัวแปร \tilde{z}_{FI} ซึ่งกราฟทั้งสองจะตัดกันเมื่อ $z_i = \tilde{z}_{FI}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \tilde{V}(\tilde{z}_{FI}) &= \tilde{v}(\tilde{z}_{FI}) \\ \beta_0 \tilde{z}_{FI}^2 + \beta_1 \tilde{z}_{FI} + \beta_2 &= d \\ \tilde{z}_{FI} &= \frac{-\beta_1 \pm \sqrt{\beta_1^2 - 4\beta_0(\beta_2 - d)}}{2\beta_0} \end{aligned} \quad (4.8)$$

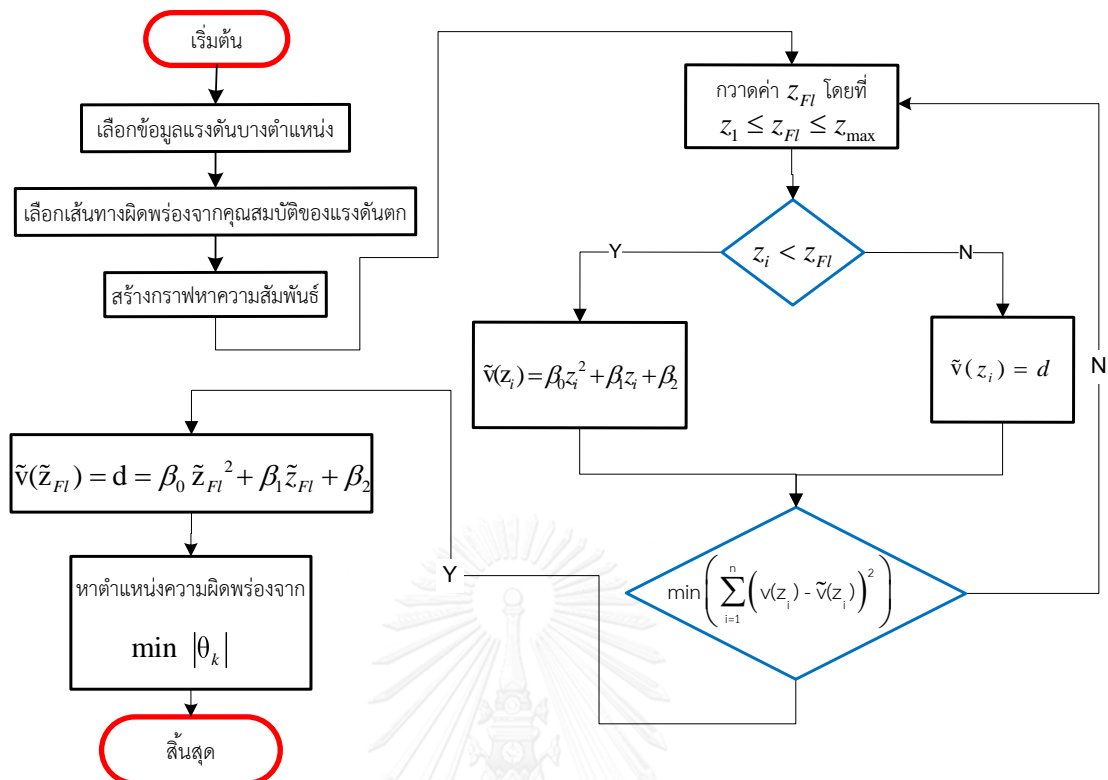
จากสมการที่ (4.8) จะได้ค่า \tilde{z}_{FI} ทั้งหมด 2 ค่า ซึ่งค่าของ \tilde{z}_{FI} ที่นำมาใช้ในการระบุตำแหน่งความผิดพลาดนั้นจะต้องอยู่ระหว่าง $0 \leq \tilde{z}_{FI} \leq 1$ โดยที่ตำแหน่งความผิดพลาดคือตำแหน่งของบัสที่มีค่าของดัชนีความผิดพลาด ($|\theta_k|$) ต่ำที่สุด ซึ่ง θ_k เป็นผลต่างระหว่าง \tilde{z}_{FI} กับ z_k โดยที่ k คือตำแหน่งของบัสในระบบไฟฟ้า การคำนวณ θ_k แสดงดังสมการ

$$\theta_k = \tilde{z}_{FI} - z_k \quad (4.9)$$

จาก (4.9) ค่าที่ต่ำสุดของ $|\theta_k|$ จะสามารถระบุได้ว่าบัส k เป็นบัสที่อยู่ใกล้ตำแหน่งความผิดพลาดมากที่สุด โดยแผนผังการคำนวณหาค่าดัชนีความผิดพลาดแสดงในรูปที่ 4.7 และสามารถแปลงค่า θ_k ที่ได้ไปเป็นระยะทางความผิดพลาดที่วัดจากสถานีไฟฟ้าไปยังตำแหน่งความผิดพลาดโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความยาวสายดังสมการ

$$\tilde{x}_F = x_{k,\min} + \left(\frac{\theta_{k,\min}}{D_{FI}} \right) z_{\max} \quad (4.10)$$

โดยที่	\tilde{x}_F	คือ	ระยะผิดพลาดจากการคำนวณที่วัดจากสถานีไฟฟ้าไปยังตำแหน่งผิดพลาด (km)
	$x_{k,\min}$	คือ	ระยะผิดพลาดที่วัดจากสถานีไฟฟ้าไปยังบัสที่มีค่า $ \theta_k $ ต่ำที่สุด (km)
	D_{FI}	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความยาวของสายย่อยโดยถ้า $\theta_k > 0$ เลือกค่า D_{FI} ของสายย่อยระหว่างบัสที่ k กับ $k+1$ ถ้า $\theta_k \leq 0$ เลือกค่า D_{FI} ของสายย่อยระหว่างบัสที่ $k-1$ กับ k (Ω/km)



รูปที่ 4.7 กระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดสำหรับข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาดมากกว่าเท่ากับ 3 ตำแหน่ง

4.4 การสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับอิมพีแดนซ์เพื่อหาดำแหน่งความผิดพลาดสำหรับกรณีที่มีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาด 2 ตำแหน่ง (ไม่สามารถประมาณเป็นเส้นโค้ง)

เนื่องจากบางกรณีของตำแหน่งผิดพลาดส่งผลให้เส้นทางที่เลือกมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ ณ ตำแหน่งก่อนความผิดพลาดน้อยกว่า 3 ตำแหน่งจึงไม่สามารถนำการสร้างกราฟเส้นโค้ง เช่น กรณีเกิดความผิดพลาดตำแหน่งในกับสถานีไฟฟ้าหรือภายใต้เงื่อนไขของตำแหน่งที่ทราบข้อมูลแรงดันที่กำหนดขึ้น (สำหรับข้อมูลแรงดัน 1 ตำแหน่งที่สถานีไฟฟ้าจะไม่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) ซึ่งสำหรับกระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดนั้นทำการวิเคราะห์ตาม 4.1 และ 4.2 แต่ในส่วนของแรงดันก่อนความผิดพลาดให้ประมาณเป็นเส้นตรงดังสมการ

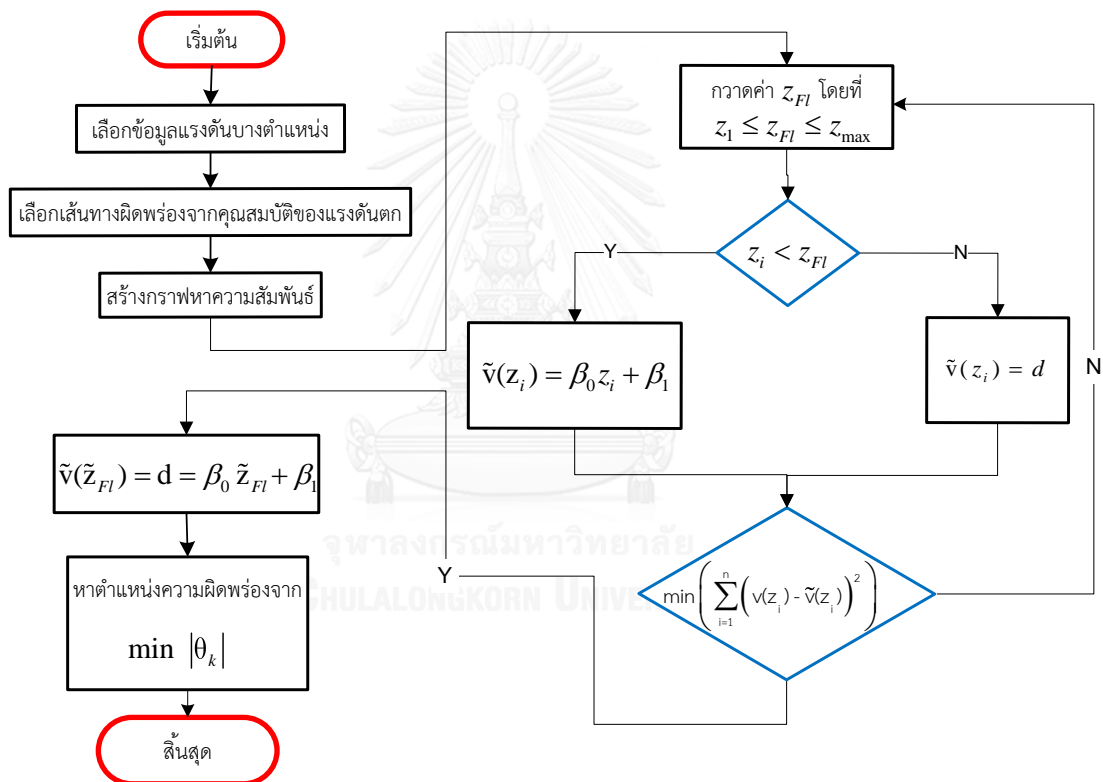
$$\tilde{V}(z_i) = \beta_0 z_i + \beta_1 \quad (4.11)$$

โดยที่ β_0 และ β_1 คือ ค่าคงที่ ที่ได้จากการกำลังสองน้อยที่สุด

สมการที่ (4.5) กับ (4.11) มาแก้สมการหาจุดตัดระหว่าง 2 กราฟ และเรียกจุดตัดนั้นด้วยตัวแปร \tilde{z}_{FI} ซึ่งกราฟทั้งสองจะตัดกันเมื่อ $z_i = \tilde{z}_{FI}$ ดังนี้

$$\begin{aligned}\tilde{V}(\tilde{z}_{FI}) &= \tilde{v}(\tilde{z}_{FI}) \\ \beta_0 \tilde{z}_{FI} + \beta_1 &= d \\ \tilde{z}_{FI} &= \frac{\beta_1 - d}{\beta_0}\end{aligned}\quad (4.12)$$

จาก \tilde{z}_{FI} ที่ได้นำไปคำนวณหาค่าของดัชนีความผิดพลาดและระยะผิดพลาดตามสมการที่ (4.9) และ (4.10) โดยมีแผนผังการคำนวณค่าดัชนีความผิดพลาดแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดสำหรับข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาดเท่ากับ 2 ตำแหน่ง

บทที่ 5

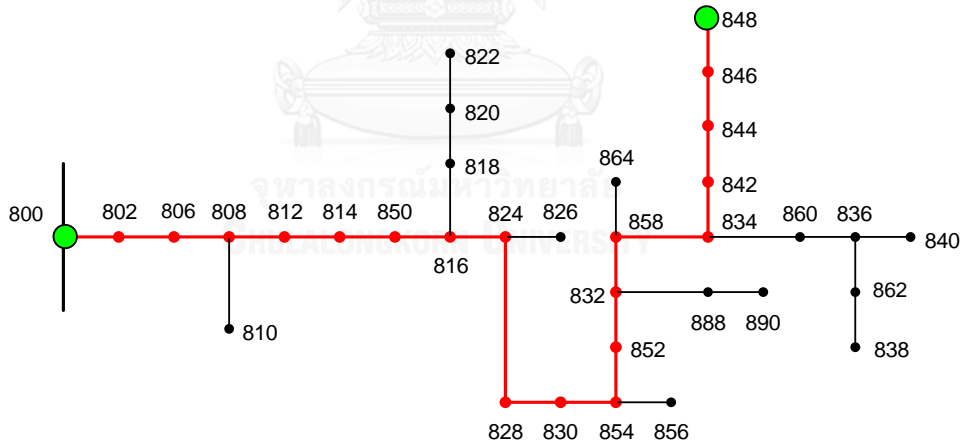
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในส่วนนี้จะแสดงการทดสอบและวิเคราะห์ผลของกระบวนการระบุตำแหน่งความผิดปกติที่นำเสนอโดยจะทดสอบกับระบบจำหน่าย 34 บัสที่จำลองขึ้นโดยโปรแกรม DIGSILENT

5.1 ระบบทดสอบ

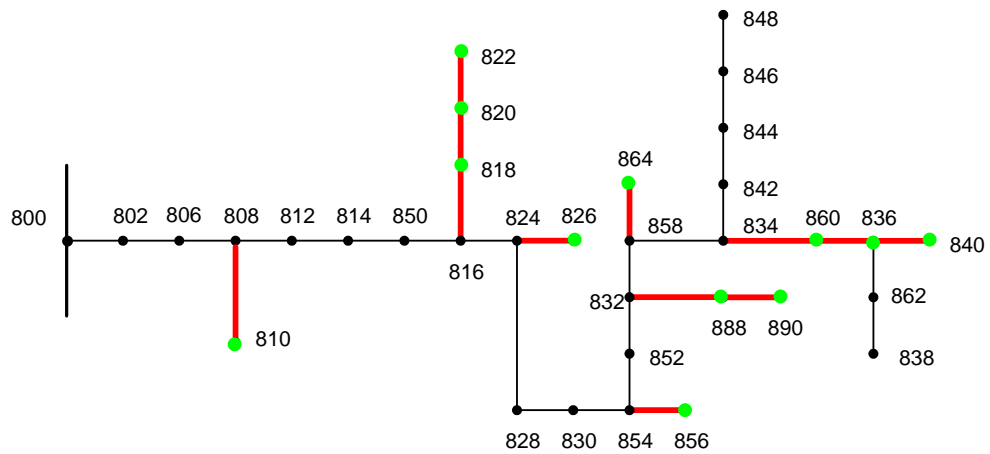
ระบบที่นำมาทดสอบเป็นระบบที่มีระดับแรงดัน 24.9 กิโลโวลต์ ซึ่งระบบที่ใช้ทดสอบเป็นของ IEEE [24] โดยมีบัสทั้งหมด 34 บัส โดยมีบัส 800 เป็นตำแหน่งอ้างอิงของสถานีไฟฟ้าและมีความยาวสายย่อยรวมกันทั้งหมดเท่ากับ 95.13 กิโลเมตร มีระยะทางจากบัสที่ไกลที่สุดโดยวัดจากต้นสายป้อนเท่ากับ 60.19 กิโลเมตร มีสายย่อยยาวที่สุด 12.44 กิโลเมตร มีโหลดทั้งหมด 25 ตัว ซึ่งการการจำลองตำแหน่งความผิดปกติในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ สายหลัก สายย่อยและสายแยกย่อย โดยนิยามลักษณะของสายจำหน่ายดังนี้

1) สายหลัก คือ ผลรวมของสายย่อยจากสถานีไฟฟ้าไปยังบัสในระบบจำหน่ายที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งในระบบทดสอบที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเส้นทางของสายหลักดังรูปที่ 5.1



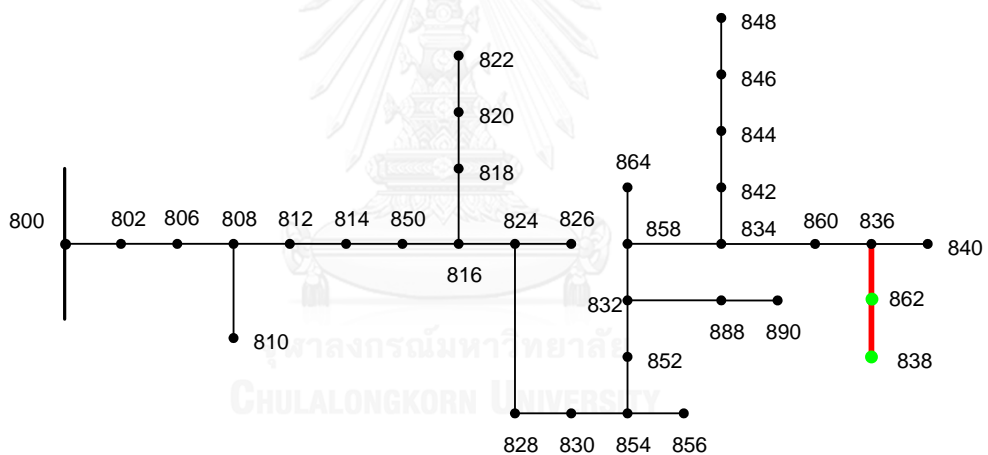
รูปที่ 5.1 สายหลักของระบบทดสอบ

2) สายย่อย คือ เส้นทางของสายที่แยกออกมาจากทางเดินสายหลักของระบบจำหน่าย ซึ่งในระบบทดสอบที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีบัสที่อยู่บนเส้นทางของสายย่อยทั้งหมด 12 บัสแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของบัสบนสายย่อยที่พิจารณา

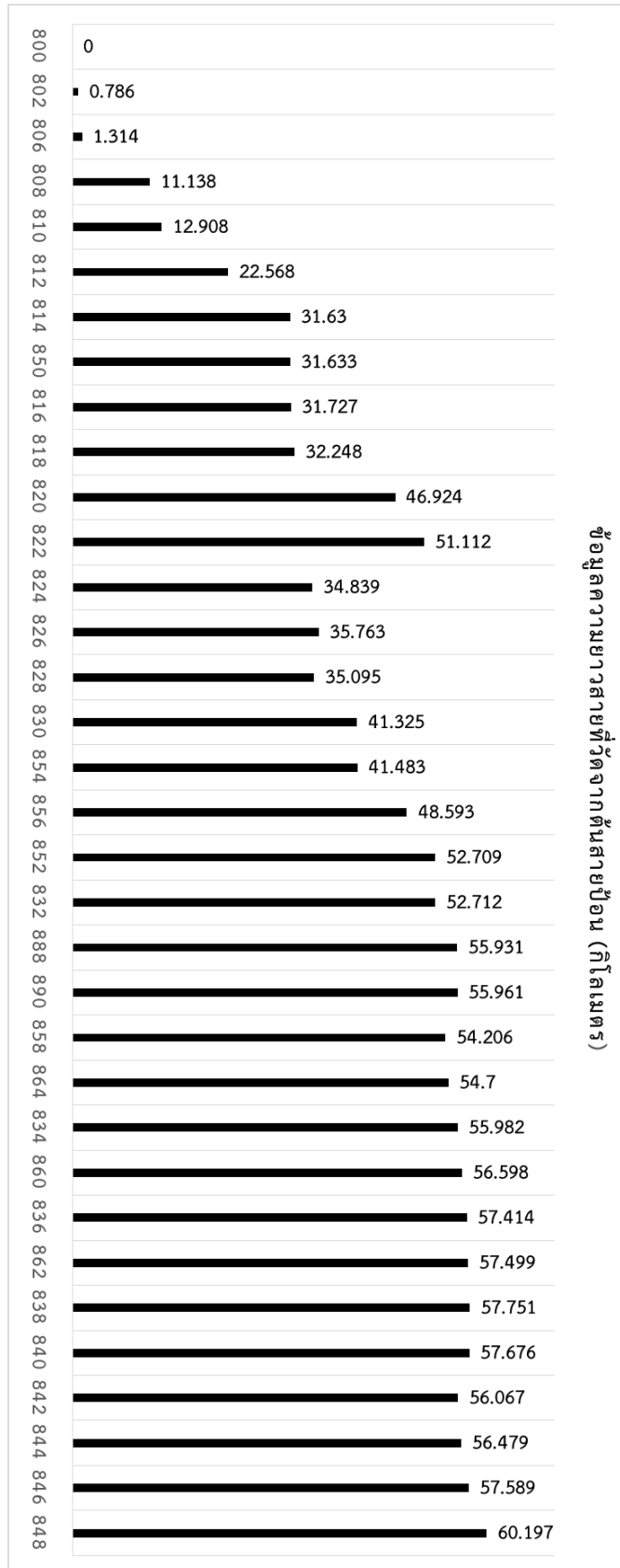
3) สายแยกย่อย คือ เส้นทางของสายที่แยกออกมาจากสายย่อยของระบบจำหน่าย ซึ่งในระบบทดสอบที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีบัสที่อยู่บนเส้นทางของสายแยกย่อยทั้งหมด 2 บัสแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของบัสบนสายแยกย่อยที่พิจารณา

ความยาวสายที่วัดจากจุดอ้างอิงของสถานีไฟฟ้า (บัส 800) ไปยังบัสอื่นๆในระบบจำหน่าย แสดงในรูปที่ 5.4

รูปที่ 5.4 ค่าความยาวสายที่วัดจากบัส 800 ไปยังบัสอื่น ๆ ในระบบทดสอบ



ข้อมูลความยาวสายที่วัดจากต้นสายไปยัง (กิโลเมตร)

5.2 จำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะที่นำมาวิเคราะห์

เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันกลางโดยปกติแล้วทางผู้ผลิตไฟฟ้าไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดของมูลทางไฟฟ้าไว้ที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า มีเพียงอุปกรณ์วัดที่ติดตั้งอยู่ที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าเท่านั้น ดังนั้นเพื่อแสดงความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลที่เป็นต่อการคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติในระบบจำหน่ายแล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอหลักการเลือกตำแหน่งและจำนวนของจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนี้

5.2.1 หลักการในการพิจารณาเลือกจำนวนจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ

เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีความซับซ้อนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้กำหนดหลักการเลือกตำแหน่งของจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะแบ่งออกเป็น 3 ข้อดังนี้

1) ทุกๆสายแยกและสายแยกย่อยต้องมีจุดวัดอยู่บริเวณปลายสายเนื่องจากเป็นตำแหน่งสำคัญสำหรับการเลือกทางเดินสายที่เกิดความผิดปกติ

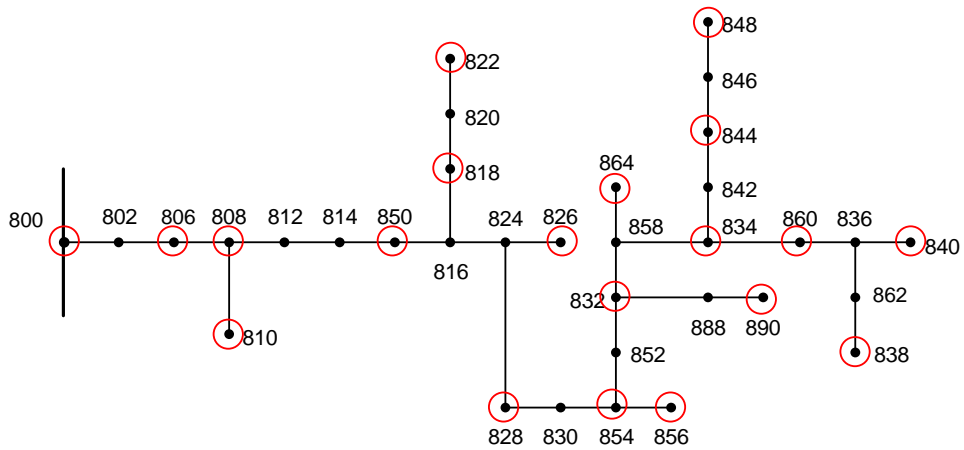
2) สายย่อยแต่ละส่วนของระบบทดสอบต้องมีจุดวัดอย่างน้อย 1 ตำแหน่งเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการหาตำแหน่งความผิดปกติว่าอยู่บริเวณสายย่อยไหน

3) ตำแหน่งทางเดินจากต้นทาง (บัส 800) ไปยังบัสต่างๆในระบบต้องมีตำแหน่งจุดวัดที่อยู่ก่อนความผิดปกติอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง และหลังความผิดปกติอย่างน้อย 1 ตำแหน่ง เพื่อเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างสมการของแรงดันตกชั่วขณะ (ถ้าผลลัพธ์จากการกำลังสองน้อยที่สุดแสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะที่อยู่ก่อนความผิดปกติ 1 ตำแหน่ง กระบวนการที่นำเสนอไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งความผิดปกติได้)

5.2.2 จำนวนและตำแหน่งของจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะของระบบทดสอบ

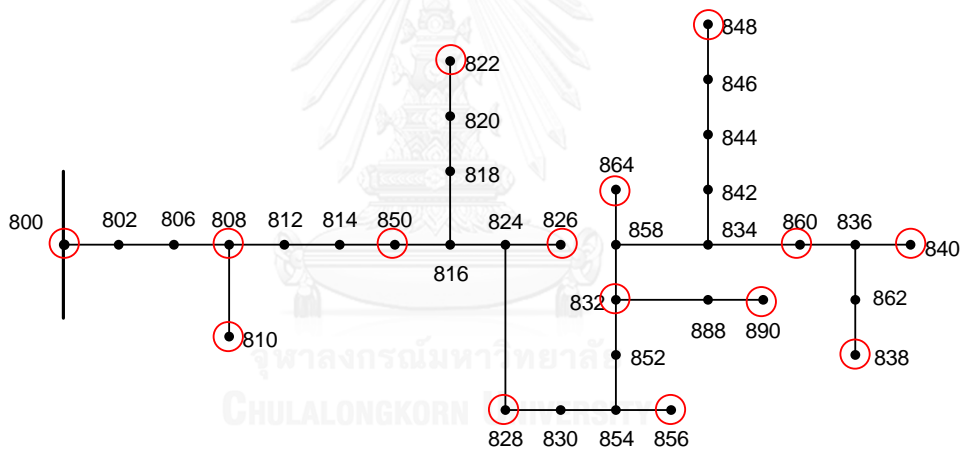
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกตำแหน่งและจำนวนจุดวัดของแรงดันตกชั่วขณะแบ่งออกเป็น 3 กรณีในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอดังนี้

1) กรณีที่ 1 ข้อมูลวัดแรงดันตกชั่วขณะ ณ บัสต่างๆในระบบไฟฟ้าจำนวน 20 ตำแหน่ง (คิดเป็น 58% ของจำนวนบัสทั้งหมดในระบบ) ได้แก่ บัส 800 806 808 810 850 818 822 826 828 854 856 832 890 864 834 860 838 840 844 และบัส 848 ดังรูปที่ 5.5



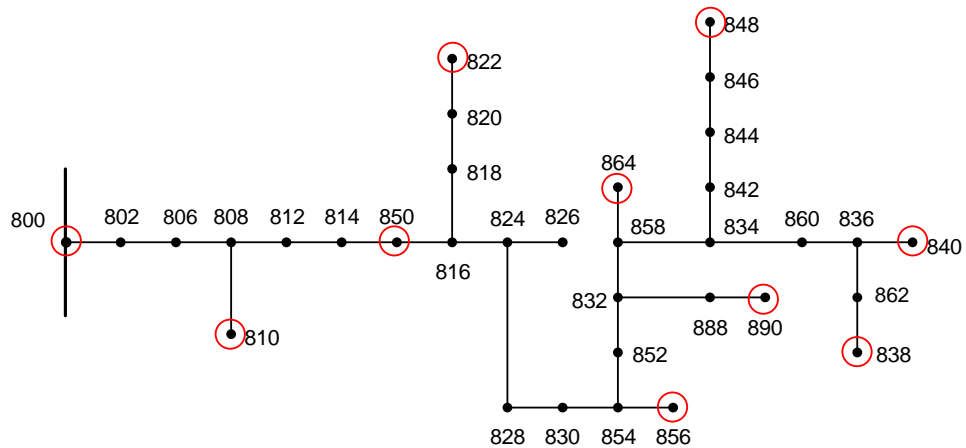
รูปที่ 5.5 ตำแหน่งจุดวิกฤตที่ 1

2) กรณีที่ 2 ข้อมูลวัดแรงดันตกชั่วขณะ ณ บัสต่างๆในระบบไฟฟ้าจำนวน 15 ตำแหน่ง (คิดเป็น 44% ของจำนวนบัสทั้งหมดในระบบ) ได้แก่ บัส 800 808 810 850 822 826 828 856 832 890 864 860 838 840 และบัส 848 ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งจุดวิกฤตที่ 2

3) กรณีที่ 3 ข้อมูลวัดแรงดันตกชั่วขณะ ณ บัสต่างๆในระบบไฟฟ้าจำนวน 10 ตำแหน่ง (คิดเป็น 29% ของจำนวนบัสทั้งหมดในระบบ) ได้แก่ บัส 800 810 850 822 856 890 864 838 840 และบัส 848 ดังรูปที่ 5.7

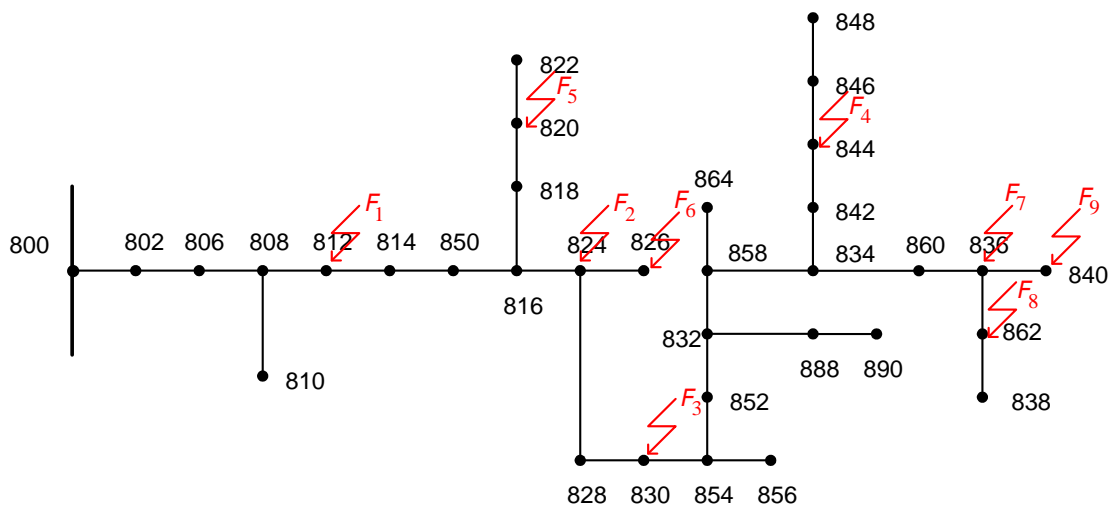


รูปที่ 5.7 ตำแหน่งจุดวัดกรณีที่ 3

5.3 ตำแหน่งความผิดพลาดที่นำมาวิเคราะห์

เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกแสดงการทดสอบหาตำแหน่งความผิดพลาดตามลักษณะองค์ประกอบสายของระบบจำหน่ายที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.1 คือ สายหลัก สายย่อยและสายแยกย่อย เป็นจำนวนทั้งหมด 9 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 5.8 โดยที่มีการปรับเปลี่ยนประเภทความผิดพลาด ค่าอิมพีแดนซ์ความผิดพลาด โหลดและจำนวนข้อมูลของแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แบบดังนี้

- 1) การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายหลัก ได้แก่ ตำแหน่งความผิดพลาดที่บัส 812 824 830 และ 844
- 2) การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายย่อย ได้แก่ ตำแหน่งความผิดพลาดที่บัส 820 826 และ 836
- 3) การคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายแยกย่อย ได้แก่ ตำแหน่งความผิดพลาดที่บัส 862 และ 840



รูปที่ 5.8 ระบบจำหน่าย IEEE 34 บัสและตำแหน่งผิดพลาดที่พิจารณา

5.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบวิธีการที่นำเสนอ แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: สร้างระบบจำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม DigSILENT และพัฒนากระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในโปรแกรม MATLAB

ขั้นตอนที่ 2: การทดสอบกระบวนการระบุตำแหน่งความผิดพลาดตามรูปแบบการทดสอบ 3 รูปแบบ ดังนี้

1) รูปแบบที่ 1 การจำลองความผิดพลาดบนสายหลัก

4 ตำแหน่งความผิดพลาด (บัส 812 824 830 และ 844)

พิจารณา 4 ประเภทความผิดพลาดได้แก่ เฟสเอลงดิน สามเฟสลงดิน สองเฟสและสองเฟสลงดิน

ความต้านทานความผิดพลาดมีค่า 0.5 5 10 และ 20 โอห์ม

โพลตสถานะเป็นทั้งปกติและเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$

แบ่งจำนวนข้อมูลออกเป็น 10 15 และ 20 ข้อมูล

จำนวนเหตุการณ์จำลองทั้งหมด 192 เหตุการณ์

2) รูปแบบที่ 2 การจำลองความผิดพลาดบนสายย่อย

3 ตำแหน่งความผิดพลาด (บัส 820 826 และ 836)

พิจารณา 4 ประเภทความผิดพลาดได้แก่ เฟสเอลงดิน สามเฟสลงดิน สองเฟสและสองเฟสลงดิน

ความต้านทานความผิดพลาดมีค่า 0.5 5 10 และ 20 โอห์ม

- โหลดสถานะเป็นทั้งปกติและเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$
 แบ่งจำนวนข้อมูลออกเป็น 10 15 และ 20 ข้อมูล
 จำนวนเหตุการณ์จำลองทั้งหมด 144 เหตุการณ์
- 3) รูปแบบที่ 3 การจำลองความผิดพลาดบนสายแยกย่อย
 2 ตำแหน่งความผิดพลาด (บัส 862 และ 840)
 พิจารณา 4 ประเภทความผิดพลาดได้แก่ เฟสเอลงดิน สามเฟสลงดิน สองเฟสและ
 สองเฟสลงดิน
 ความต้านทางความผิดพลาดมีค่า 0.5 5 10 และ 20 โอห์ม
 โหลดสถานะเป็นทั้งปกติและเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$
 แบ่งจำนวนข้อมูลออกเป็น 10 15 และ 20 ข้อมูล
 จำนวนเหตุการณ์จำลองทั้งหมด 96 เหตุการณ์

ขั้นตอนที่ 3: วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

โดยที่เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของตำแหน่งความผิดพลาดสามารถคำนวณจาก

$$Error[\%] = 100 \left(\frac{|x_{F,actual} - \tilde{x}_F|}{l_{line}} \right) \quad (5.1)$$

โดยที่ $x_{F,actual}$ คือ ระยะผิดพลาดที่จำลองขึ้นในโปรแกรม DigSILENT (km)
 \tilde{x}_F คือ ระยะผิดพลาดที่ได้จากกระบวนการที่นำเสนอ (km)
 l_{line} คือ ผลรวมของความยาวสายย่อยทั้งหมดในระบบ (km)

ขั้นตอนที่ 4: สรุปผลการทดสอบ

5.5 ผลลัพธ์จากวิธีการระบุความผิดพลาดที่นำเสนอ

ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการนำเสนอตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการที่นำเสนอรวมไปถึงค่า θ_k , \tilde{z}_{FI} และรูปภาพที่ได้จากกระบวนการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อเปรียบเทียบอย่างละเอียด ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอความคลาดเคลื่อนเป็นหน่วยเมตรและคำนวณเป็นร้อยละเทียบกับความยาวสายทั้งระบบเป็นจำนวนทั้งหมด 432 เหตุการณ์

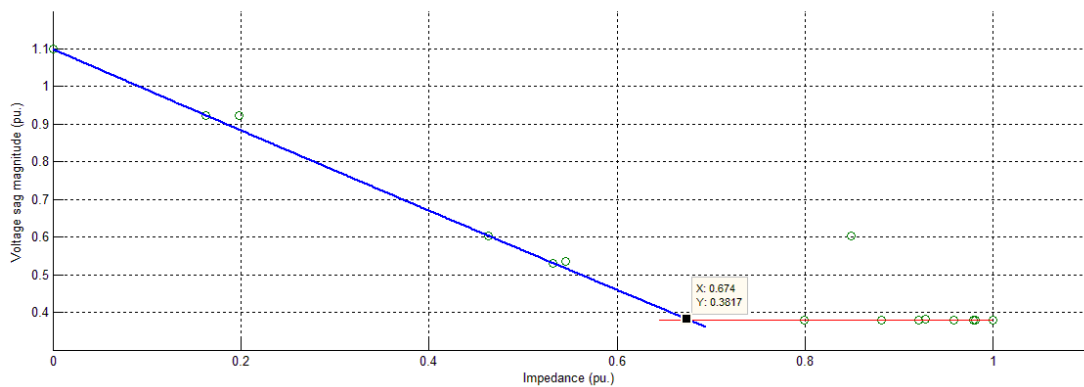
5.5.1 ตัวอย่างผลลัพธ์จากกระบวนการที่นำเสนอ

การระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล โดยใช้ค่าแรงดันตกชั่วขณะชั่วขณะนั้นตำแหน่งและจำนวนข้อมูลของแรงตกที่พิจารณาผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้ เนื่องจาก

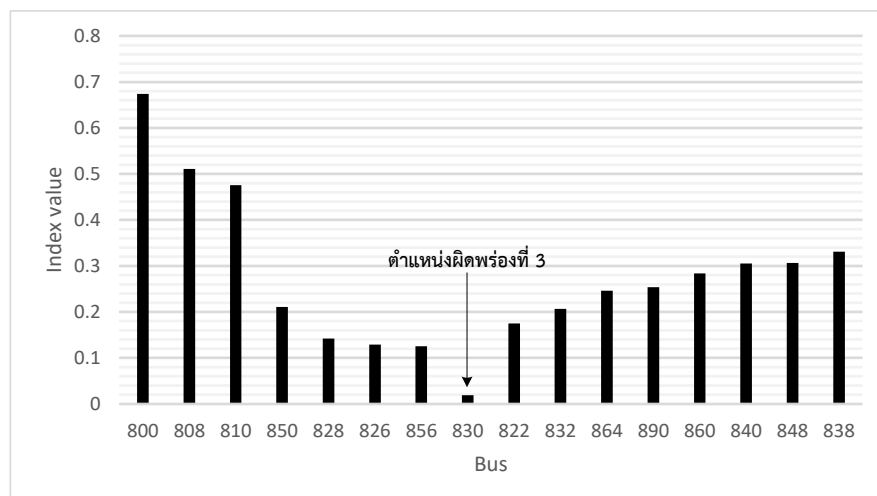
เหตุการณ์ผิดปกติที่จำลองมีจำนวนมาก จึงขอแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติ 3 เหตุการณ์เท่านั้น คือ การคำนวณเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายหลัก (830) การคำนวณเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายย่อย (820) และการคำนวณเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายแยกย่อย (862)

1) เหตุการณ์ผิดปกติที่ 1 : การคำนวณเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายหลัก (830)

เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 1 ความผิดปกติประเภทเฟสเอลงดิน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 ความต้านทานผิดปกติ 20 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าแรงดันตกชั่วขณะชั่วขณะสำหรับกรณีการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่งสามารถคำนวณหาค่า \tilde{Z}_{FI} ได้ดังรูปที่ 5.9

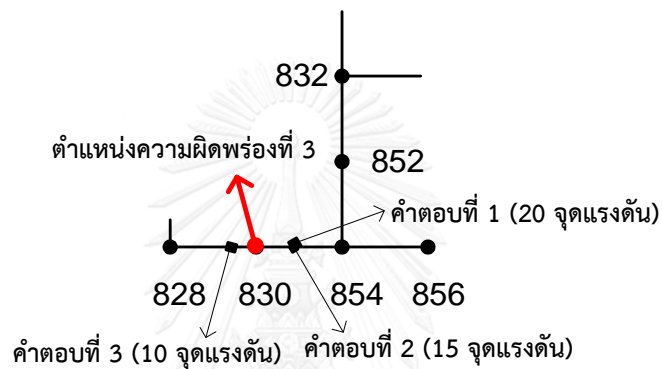


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง สำหรับค่า \tilde{Z}_{FI} ของกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 0.674 pu. ซึ่งสามารถความคำนวณหาขนาด θ_k ที่ต่ำที่สุดได้ ณ k เท่ากับ 830 :ซึ่งค่าเท่ากับ 0.019 โดยที่ขนาด θ_k ของบัส ณ ตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะที่กำหนดเทียบกับขนาด θ_k ณ ตำแหน่งความผิดปกติแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงขนาด θ_k สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง

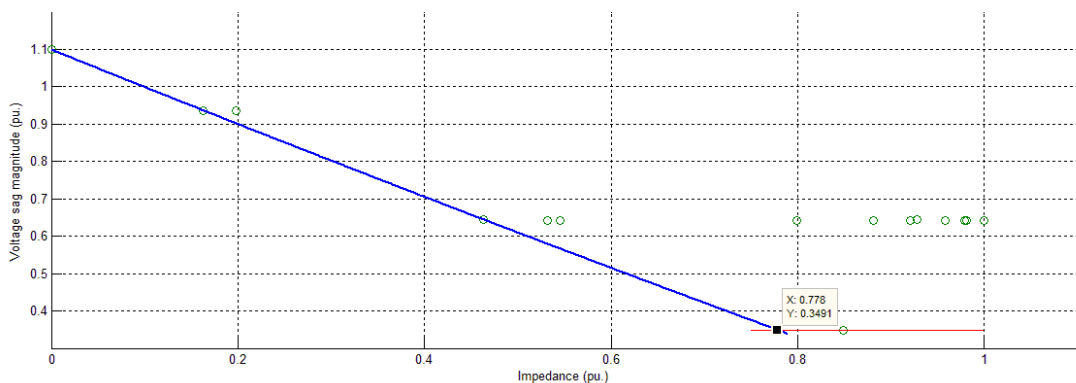
จาก θ_k และ \tilde{Z}_{FI} ที่ได้นำมาคำนวณหาระยะผิดพลาดคิดเป็นร้อยละเทียบกับความยาวสายย่อยทั้งหมดรวมกัน พบว่าสำหรับกรณีการใช้จำนวนข้อมูลแรงดันที่แตกต่างกันส่งผลให้ตำแหน่งความผิดพลาดที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกัน ที่สำหรับในกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่บัส 830 นั้นพบว่าความคลาดเคลื่อนของระยะผิดพลาดจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 และ 20 ตำแหน่งนั้นให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับคำตอบจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่งนั้นมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งความผิดพลาดมากที่สุดโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.074% หรือคิดเป็นระยะทางมีค่าเท่ากับ 70.43 เมตร จากความยาวสายย่อยทั้งหมด 95.13 กิโลเมตร และมีระยะทางระหว่างบัส 828 ไปยังบัส 830 เท่ากับ 7,308 เมตร ซึ่งตำแหน่งของคำตอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพลาดที่ 3

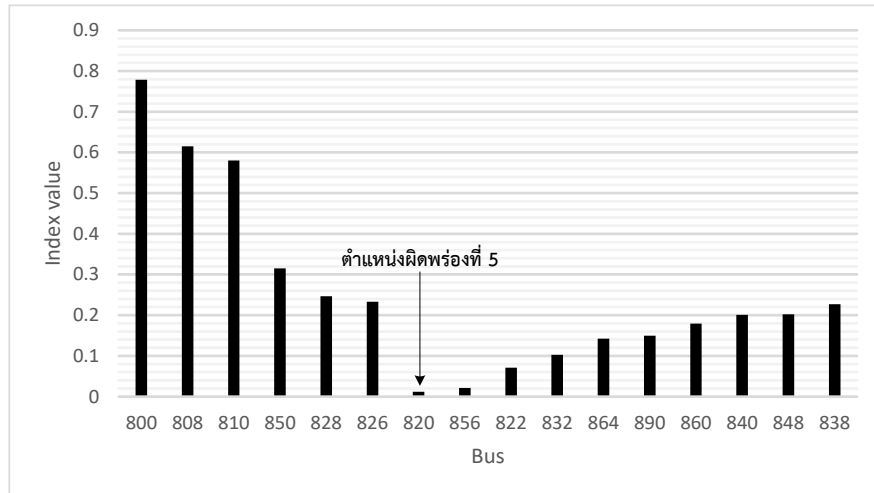
2) เหตุการณ์ผิดพลาดที่ 5 : การคำนวณเมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายย่อย (820)

เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 2 ความผิดพลาดประเภทเฟสบีต่อเฟสซีลงดินเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 5 ความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าแรงดันตกชั่วขณะชั่วขณะสำหรับกรณีการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่งสามารถคำนวณหาค่า \tilde{Z}_{FI} ได้ดังรูปที่ 5.12



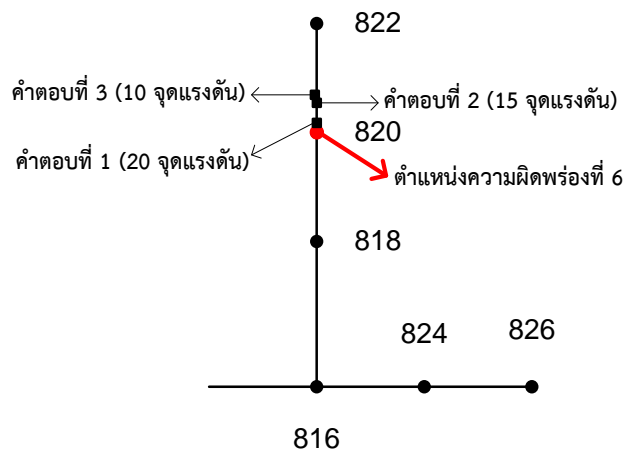
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง

สำหรับค่า \tilde{z}_{FI} ของกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 0.778 pu. ซึ่งสามารถความคำนวณหาขนาดของ θ_k ที่ต่ำที่สุดได้ ณ k เท่ากับ 820 :ซึ่งค่าเท่ากับ 0.012 โดยที่ขนาด θ_k ของบัส ณ ตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะที่กำหนดเทียบกับขนาด θ_k ณ ตำแหน่งความผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 5.13



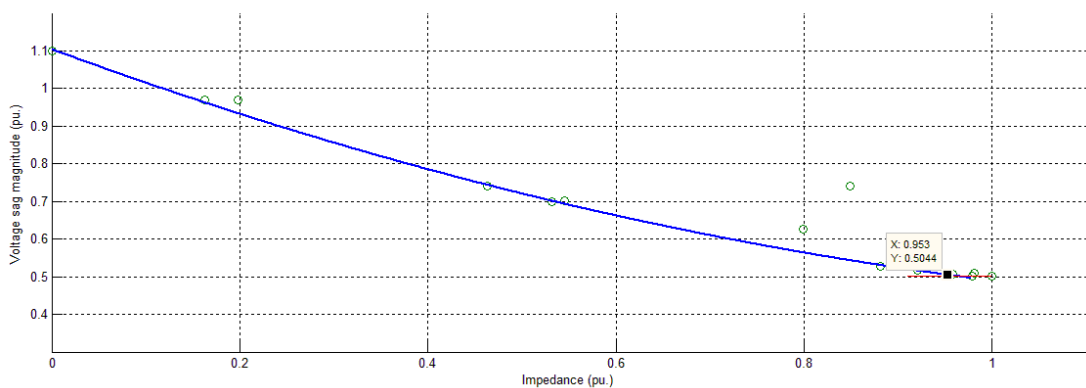
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงขนาด θ_k สำหรับกรณีมีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง

จาก θ_k และ \tilde{z}_{FI} ที่ได้นำมาคำนวณหาระยะผิดพลาดคิดเป็นร้อยละเทียบกับความยาวสายย่อยทั้งหมดรวมกัน พบว่าสำหรับกรณีการใช้จำนวนข้อมูลแรงดันที่แตกต่างกันส่งผลให้ตำแหน่งความผิดพลาดที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกัน ที่สำหรับในกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่บัส 820 นั้นพบว่าความคลาดเคลื่อนของระยะผิดพลาดจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 และ 10 ตำแหน่งนั้นให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับคำตอบจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่งนั้นมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งความผิดพลาดมากที่สุดโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.033% หรือคิดเป็นระยะทางมีค่าเท่ากับ 31.40 เมตร จากความยาวสายย่อยทั้งหมด 95.13 กิโลเมตร และมีระยะทางระหว่างบัส 820 ไปยังบัส 822 เท่ากับ 4,912 เมตร ซึ่งตำแหน่งของคำตอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.14



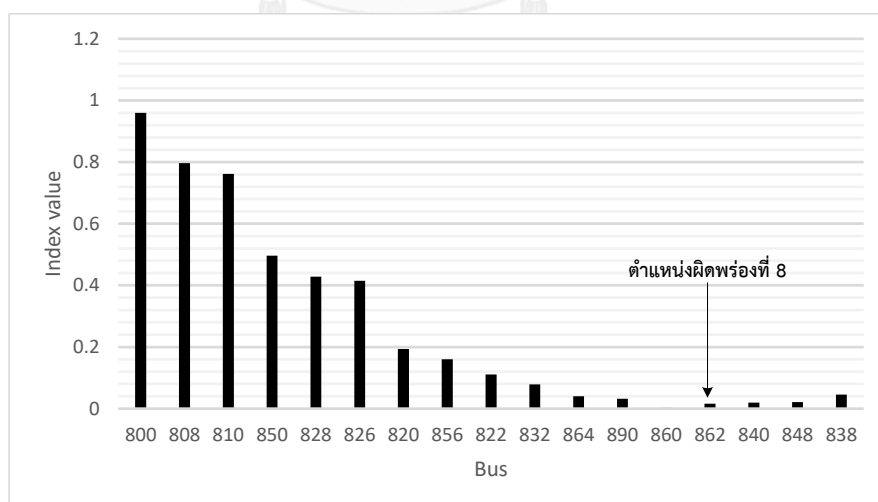
รูปที่ 5.14 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพลาดที่ 5

3) เหตุการณ์ผิดปกติที่ 8 : การคำนวณเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายแยกย่อย (862) เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 3 ความผิดปกติประเภทเฟสบีต่อเฟสซี เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 8 ความต้านทานผิดปกติ 20 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าแรงดันตกชั่วขณะชั่วขณะสำหรับกรณีการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่งสามารถคำนวณหาค่า \tilde{Z}_{FI} ได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่า \tilde{Z}_{FI} สำหรับกรณีที่มีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง

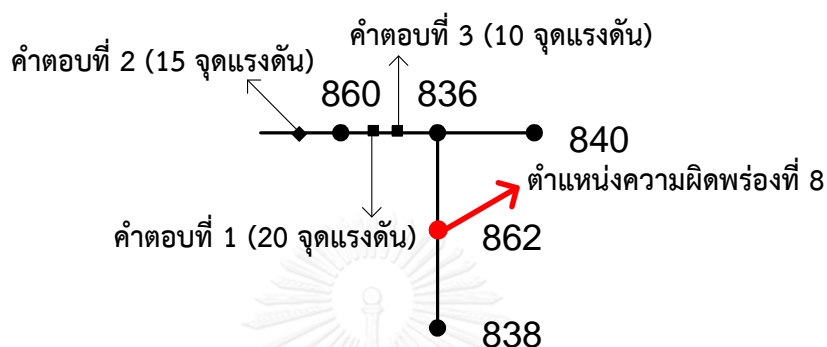
สำหรับค่า \tilde{Z}_{FI} ของกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 0.953 pu. ซึ่งสามารถความคำนวณหาขนาดของ θ_k ที่ต่ำที่สุดได้ ณ k เท่ากับ 860 :ซึ่งค่าเท่ากับ 0.005 โดยที่ขนาด θ_k ของบัส ณ ตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะที่กำหนดเทียบกับขนาด θ_k ณ ตำแหน่งความผิดปกติแสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่า θ_k สำหรับกรณีที่มีข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง

จาก θ_k และ \tilde{Z}_{FI} ที่ได้นำมาคำนวณหาระยะผิดปกติคิดเป็นร้อยละเทียบกับความยาวสายย่อยทั้งหมดรวมกัน พบว่าสำหรับกรณีการใช้จำนวนข้อมูลแรงดันที่แตกต่างกันส่งผลให้ตำแหน่งความผิดปกติที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกัน ที่สำคัญในกรณีที่เกิดความผิดปกติที่บัส 862 นั้นพบว่า

ความคลาดเคลื่อนของระยะผิดพลาดจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่งนั้นมีค่าสูงที่สุด แต่สำหรับคำตอบจากการใช้ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่งนั้นมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งความผิดพลาดมากที่สุดโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.768% หรือคิดเป็นระยะทางมีค่าเท่ากับ 730.48 เมตร จากความยาวสายย่อยทั้งหมด 95.13 กิโลเมตร และมีระยะทางระหว่างบัส 860 ไปยังบัส 862 เท่ากับ 901 เมตร ซึ่งตำแหน่งของคำตอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 คำตอบที่ได้จากการใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 15 และ 10 จุด ของตำแหน่งผิดพลาดที่ 8

5.5.2 ผลการทดสอบ

ส่วนนี้เป็นการแสดงผลการทดสอบทั้งหมด 432 เหตุการณ์ โดยการทดสอบรูปแบบที่ 1 การจำลองความผิดพลาดบนสายหลัก ณ บัส 812 824 830 และ 844 แสดงดังตารางที่ 5.1 ถึง ตารางที่ 5.4 ตามลำดับ รูปแบบที่ 2 การจำลองความผิดพลาดบนสายย่อย ณ บัส 820 826 และ 836 แสดงดังตารางที่ 5.5 ถึง ตารางที่ 5.7 ตามลำดับและรูปแบบที่ 3 การจำลองความผิดพลาดบนสายแยกย่อย ณ บัส 862 และ 840 แสดงดังตารางที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งดีพวอร์ชของตำแหน่งดีพวอร์ชตำแหน่งที่ 1 (ปี 812)

ตำแหน่งดีพวอร์ช	ประเภทความดีพวอร์ช	ความดีพวอร์ช (โอห์ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางดีพวอร์ช (เมตร)	(%)	ระยะทางดีพวอร์ช (เมตร)	(%)	ระยะทางดีพวอร์ช (เมตร)	(%)
1	ABC	0.5	112.33	0.118	84.88	0.089	1939.33	2.039
		5	496.58	0.522	717.94	0.755	3888.06	4.087
		10	544.62	0.572	798.50	0.839	3160.72	3.323
		20	386.80	0.407	825.95	0.868	3812.58	4.008
		0.5	208.39	0.219	379.93	0.399	1856.99	1.952
	AG	5	345.63	0.363	434.83	0.457	2536.30	2.666
		10	441.69	0.464	867.12	0.912	3181.30	3.344
		20	407.38	0.428	798.50	0.839	3757.69	3.950
		0.5	119.19	0.125	194.67	0.205	1877.57	1.974
		5	256.42	0.270	352.49	0.371	3764.55	3.957
BC	10	277.01	0.291	139.77	0.147	3634.17	3.820	
	20	537.75	0.565	764.19	0.803	3572.42	3.755	
	0.5	98.60	0.104	270.15	0.284	1856.99	1.952	
	5	222.11	0.233	208.39	0.219	4066.46	4.275	
	10	565.20	0.594	525.81	0.553	3888.06	4.087	
BCG	20	414.24	0.435	656.19	0.690	4107.63	4.318	

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 2 (ปี 824)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่ผลิตภัณฑ์	ความถี่ตามผลิตภัณฑ์ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)
2	ABC	0.5	105.20	0.111	345.36	0.363	158.67	0.167
		5	140.72	0.148	257.42	0.271	214.48	0.225
		10	44.30	0.047	201.61	0.212	280.45	0.295
		20	100.12	0.105	115.34	0.121	36.88	0.039
		0.5	49.38	0.052	333.54	0.351	323.39	0.340
	AG	5	163.74	0.172	561.88	0.591	495.91	0.521
		10	140.72	0.148	572.03	0.601	541.58	0.569
		20	135.64	0.143	237.13	0.249	526.36	0.553
		0.5	747.28	0.786	726.98	0.764	1787.51	1.879
		5	8.78	0.009	31.81	0.033	1244.56	1.308
BC	10	211.76	0.223	74.75	0.079	970.55	1.020	
	20	353.84	0.372	348.76	0.367	1011.14	1.063	
	0.5	54.45	0.057	343.69	0.361	429.95	0.452	
BCG	5	72.40	0.076	673.51	0.708	658.29	0.692	
	10	6.44	0.007	754.70	0.793	703.96	0.740	
	20	237.13	0.249	805.45	0.847	825.74	0.868	

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 3 (ปี 830)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะเวลาผลิต (เมตร)	(%)	ระยะเวลาผลิต (เมตร)	(%)	ระยะเวลาผลิต (เมตร)	(%)
3	ABC	0.5	100.88	0.106	100.88	0.106	770.90	0.810
		5	121.19	0.127	121.19	0.127	598.32	0.629
		10	111.04	0.117	111.04	0.117	486.65	0.512
		20	65.35	0.069	65.35	0.069	435.89	0.458
		0.5	161.79	0.170	161.79	0.170	212.55	0.223
	AG	5	80.58	0.085	80.58	0.085	222.71	0.234
		10	45.05	0.047	45.05	0.047	95.81	0.101
		20	127.53	0.134	127.53	0.134	70.43	0.074
		0.5	1400.32	1.472	1400.32	1.472	2116.02	2.224
		5	1715.02	1.803	1715.02	1.803	2060.19	2.166
BC	10	1801.31	1.894	1801.31	1.894	2730.21	2.870	
	20	2161.70	2.272	2161.70	2.272	3202.27	3.366	
	0.5	1278.50	1.344	1176.98	1.237	1197.28	1.259	
	5	1136.37	1.195	1227.74	1.291	1136.37	1.195	
	10	1060.23	1.115	1024.70	1.077	1004.40	1.056	
BCG	20	984.09	1.034	984.09	1.034	1060.23	1.115	

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 4 (ปี 844)

ตำแหน่งผิดพลาด	ประเภทความผิดพลาด	ความถี่ของตำแหน่งผิดพลาด (ไอทม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)
ABC		0.5	214.80	0.226	399.48	0.420	494.02	0.519
		5	158.96	0.167	89.80	0.094	615.86	0.647
		10	177.74	0.187	89.80	0.094	590.48	0.621
		20	387.41	0.407	267.49	0.281	575.25	0.605
		0.5	270.64	0.284	221.80	0.233	788.47	0.829
		5	387.41	0.407	226.87	0.238	849.39	0.893
AG		10	453.41	0.477	115.18	0.121	829.08	0.872
		20	453.41	0.477	89.80	0.094	1087.99	1.144
		0.5	1174.30	1.234	631.09	0.663	1626.12	1.709
BC		5	1113.38	1.170	504.17	0.530	1747.96	1.837
		10	1052.46	1.106	397.56	0.418	1285.98	1.352
		20	991.54	1.042	270.64	0.284	1174.30	1.234
		0.5	453.41	0.477	89.80	0.094	798.62	0.840
		5	510.92	0.537	69.49	0.073	833.65	0.876
BCG		10	451.78	0.475	148.80	0.156	945.85	0.994
		20	449.85	0.473	92.96	0.098	991.54	1.042
		4						

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 5 (ปี 820)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)
5	ABC	0.5	143.03	0.150	198.85	0.209	82.14	0.086
		5	203.93	0.214	239.45	0.252	90.39	0.095
		10	582.60	0.612	156.35	0.164	49.79	0.052
		20	543.91	0.572	645.39	0.678	100.53	0.106
		0.5	198.85	0.209	214.08	0.225	51.70	0.054
	AG	5	645.39	0.678	680.91	0.716	100.53	0.106
		10	604.80	0.636	685.99	0.721	85.31	0.090
		20	594.65	0.625	691.06	0.726	85.31	0.090
		0.5	4875.49	5.125	4708.04	4.949	5098.76	5.360
		5	4672.52	4.912	4768.93	5.013	5225.62	5.493
BC	10	4875.49	5.125	4829.82	5.077	5382.92	5.658	
	20	4581.18	4.816	4713.11	4.954	5164.73	5.429	
	0.5	24.42	0.026	990.45	1.041	1031.04	1.084	
BCG	5	9.20	0.010	1010.75	1.062	1061.49	1.116	
	10	21.25	0.022	1020.90	1.073	1081.79	1.137	
	20	31.40	0.033	1066.56	1.121	1066.56	1.121	

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 6 (ปี 826)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะเวลา (เมตร)	(%)	ระยะเวลา (เมตร)	(%)	ระยะเวลา (เมตร)	(%)
6	ABC	0.5	14.31	0.015	44.77	0.047	935.08	0.983
		5	21.23	0.022	90.47	0.095	914.78	0.962
		10	132.92	0.140	151.39	0.159	955.39	1.004
		20	163.38	0.172	197.08	0.207	965.55	1.015
		0.5	46.61	0.049	11.07	0.012	1072.16	1.127
	AG	5	16.15	0.017	36.46	0.038	1041.70	1.095
		10	49.85	0.052	19.39	0.020	990.93	1.042
		20	202.16	0.213	156.47	0.164	940.16	0.988
		0.5	1016.32	1.068	1234.63	1.298	1615.40	1.698
		5	1219.39	1.282	1305.70	1.373	1798.17	1.890
BC	10	1331.09	1.399	1392.01	1.463	1945.40	2.045	
	20	1422.47	1.495	1381.86	1.453	2204.33	2.317	
	0.5	0.92	0.001	11.07	0.012	914.78	0.962	
BCG	5	54.93	0.058	49.85	0.052	924.93	0.972	
	10	131.08	0.138	29.54	0.031	884.31	0.930	
	20	186.93	0.196	151.39	0.159	899.54	0.946	

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 7 (ปี 836)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)
ABC	0.5	5	114.75	0.121	205.99	0.217	18.44	0.019
		10	84.33	0.089	145.16	0.153	43.78	0.046
		20	190.78	0.201	79.26	0.083	99.54	0.105
	AG	5	119.81	0.126	74.19	0.078	58.99	0.062
		10	221.19	0.233	246.54	0.259	863.56	0.908
		20	256.68	0.270	256.68	0.270	797.66	0.838
7	BC	5	205.99	0.217	236.40	0.249	919.31	0.966
		10	251.61	0.264	195.85	0.206	1000.42	1.052
		20	418.88	0.440	205.99	0.217	9887.62	10.394
	BCG	5	489.85	0.515	702.74	0.739	9999.13	10.511
		10	525.33	0.552	723.02	0.760	9994.06	10.506
		20	677.40	0.712	768.64	0.808	10146.13	10.666
BCG	5	82.94	0.087	38.71	0.041	885.22	0.931	
	10	33.64	0.035	23.50	0.025	976.46	1.026	
	20	23.50	0.025	57.60	0.061	910.57	0.957	
		20	22.12	0.023	77.87	0.082	900.43	0.947

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 8 (ปี 862)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลเบื้องต้น 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลเบื้องต้น 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลเบื้องต้น 10 ตำแหน่ง	
			ระยะเวลา (เมตร)	(%)	ระยะเวลา (เมตร)	(%)	ระยะเวลา (เมตร)	(%)
8	ABC	0.5	220.04	0.231	436.96	0.459	927.58	0.975
		5	33.05	0.035	255.02	0.268	927.58	0.975
		10	93.30	0.098	209.53	0.220	912.42	0.959
		20	220.04	0.231	335.88	0.353	391.87	0.412
		0.5	153.94	0.162	270.18	0.284	1468.34	1.544
	AG	5	401.98	0.423	220.04	0.231	1528.98	1.607
		10	351.44	0.369	33.05	0.035	1468.34	1.544
		20	220.04	0.231	588.97	0.619	1109.52	1.166
		0.5	1963.61	2.064	1700.81	1.788	2367.92	2.489
		5	1518.88	1.597	957.90	1.007	2009.10	2.112
BC	10	1887.81	1.984	522.87	0.550	750.69	0.789	
	20	811.34	0.853	1144.89	1.204	730.48	0.768	
	0.5	220.04	0.231	53.27	0.056	1650.28	1.735	
BCG	5	128.67	0.135	401.98	0.423	1700.81	1.788	
	10	153.94	0.162	220.04	0.231	927.58	0.975	
	20	220.04	0.231	63.37	0.067	1832.21	1.926	

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของตำแหน่งผลิตภัณฑ์ 9 (巴士 840)

ตำแหน่งผลิตภัณฑ์	ประเภทความถี่	ความถี่ (ไอเท็ม)	ข้อมูลแรงดัน 20 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 15 ตำแหน่ง		ข้อมูลแรงดัน 10 ตำแหน่ง	
			ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)	ระยะทางผิดพลาด (เมตร)	(%)
ABC	0.5	5	139.74	0.147	52.99	0.056	1651.14	1.736
		10	317.25	0.333	129.60	0.136	1828.65	1.922
		20	403.47	0.424	317.25	0.333	1833.72	1.928
	AG	0.5	692.57	0.728	504.91	0.531	1473.63	1.549
		5	504.91	0.531	317.25	0.333	2016.31	2.120
		10	880.22	0.925	317.25	0.333	1965.59	2.066
BCG	20	5	504.91	0.531	52.99	0.056	2087.31	2.194
		10	504.91	0.531	52.99	0.056	2016.31	2.120
		20	58.06	0.061	32.70	0.034	1534.49	1.613
	BC	5	504.91	0.531	504.91	0.531	2016.31	2.120
		10	641.85	0.675	692.57	0.728	2553.92	2.685
		20	504.91	0.531	692.57	0.728	2376.41	2.498
BCG	0.5	317.25	0.333	129.60	0.136	2001.09	2.104	
	5	875.15	0.920	332.47	0.349	1833.72	1.928	
	10	129.60	0.136	78.88	0.083	2016.31	2.120	
		20	692.57	0.728	317.25	0.333	1727.22	1.816

5.6 วิเคราะห์ผล

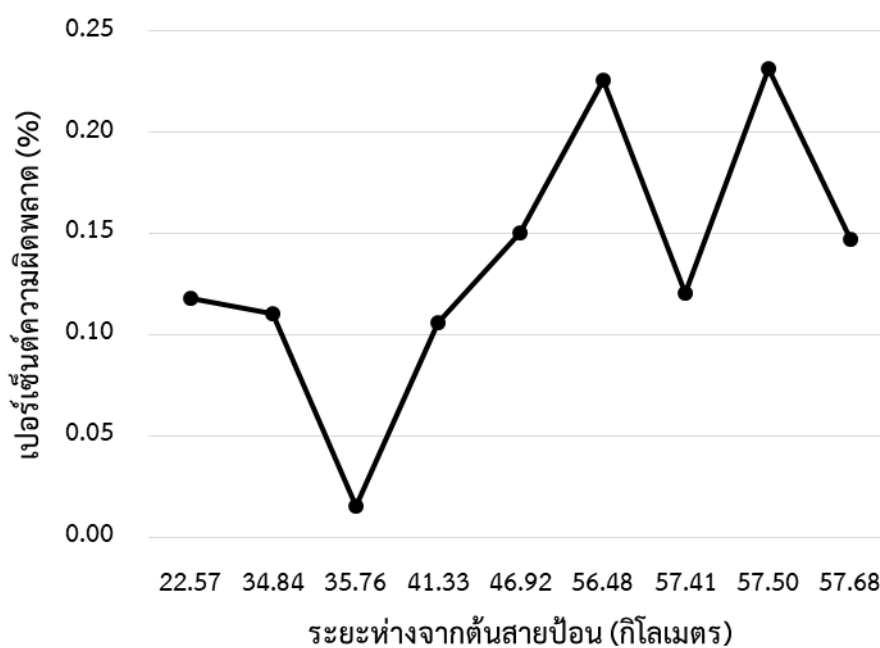
ในการวิเคราะห์ผลนั้นจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ผลกระทบของระยะฉีดพ่น ผลกระทบของความต้านทานฉีดพ่น ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของไหลและผลกระทบจากชนิดความฉีดพ่น

5.6.1 ผลกระทบของระยะฉีดพ่น

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระยะฉีดพ่นเป็นการใช้ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 20 ตำแหน่งทำการทดสอบโดยกำหนดให้ความต้านทานฉีดพ่นคงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงระยะฉีดพ่นไป รูปที่ 5.18 รูปที่ 5.19 รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 แสดงผลการทดสอบของความฉีดพ่นประเภทสามเฟสลงดิน และเฟสเอลงดินเทียบกับระยะฉีดพ่น โดยจะวิเคราะห์ที่ความต้านทานฉีดพ่น 0.5 โอห์ม และ 20 โอห์ม

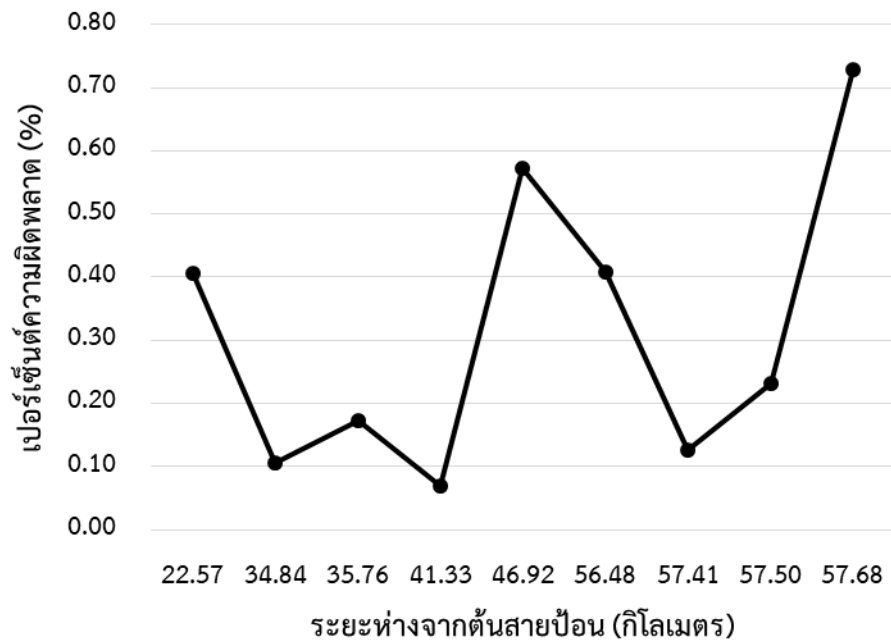


ความฉีดพ่นประเภทสามเฟสลงดิน



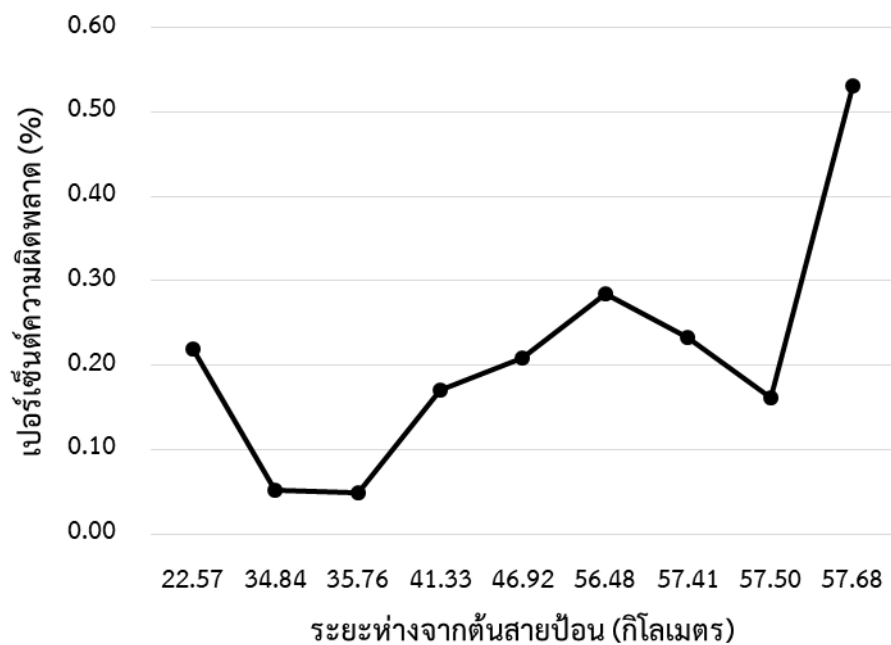
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบความต้านทานฉีดพ่น 0.5 โอห์ม

ความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน

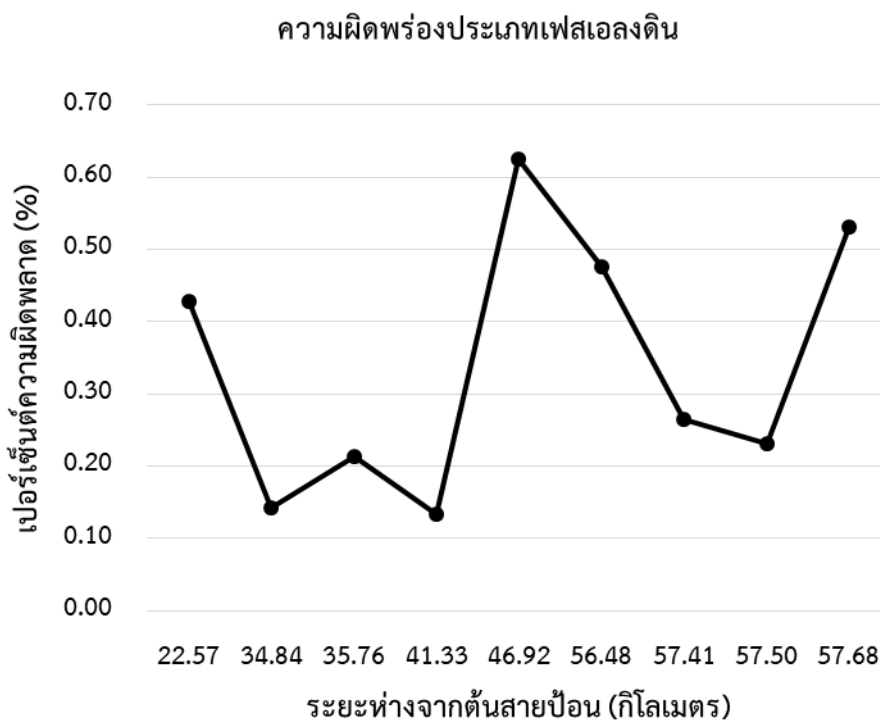


รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม

ความผิดพลาดประเภทเฟสเอลงดิน



รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 0.5 โอห์ม

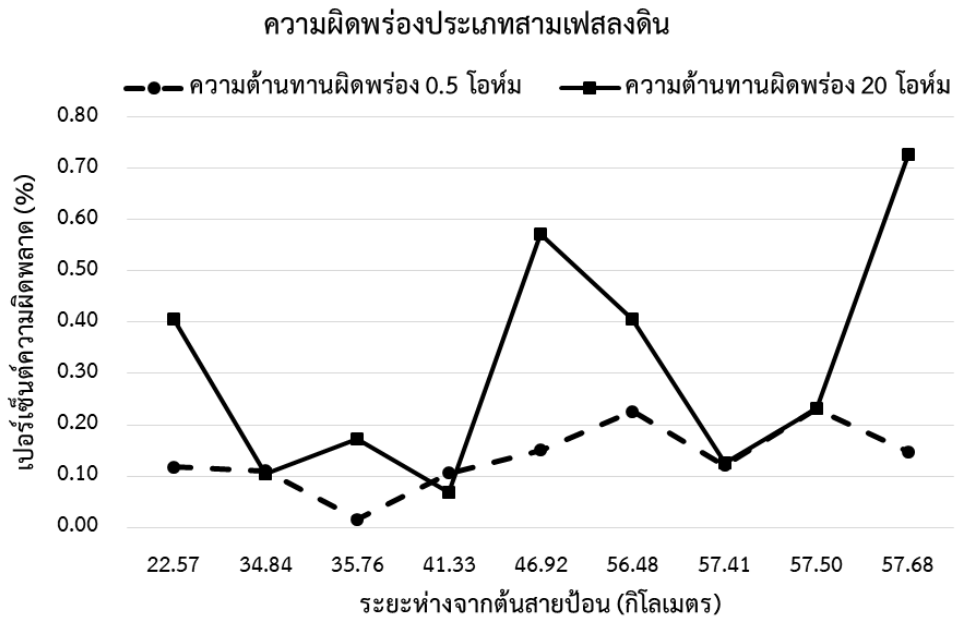


รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม

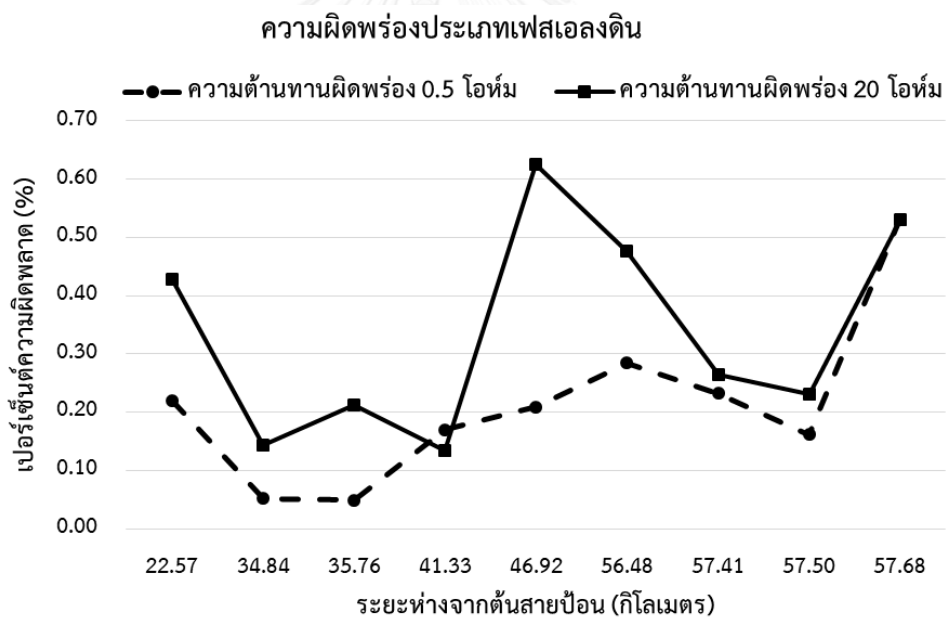
สำหรับความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดินแสดงดังรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 พบว่ามีช่วงที่กว้างที่สุดของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเท่ากับ 0.015% ถึง 0.728% สำหรับความผิดพลาดประเภทเฟสเอลงดินแสดงดังรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 พบว่ามีช่วงที่กว้างที่สุดของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเท่ากับ 0.049% ถึง 0.625% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของรูปกราฟทั้งหมดในระยะผิดพลาดช่วงแรก (ความผิดพลาดบริเวณต้นสาย) นั้นมีแนวโน้มที่จะลดลง แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุดช่วงหลัง (ความผิดพลาดบริเวณปลายสาย) มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น

5.6.2 ผลกระทบของความต้านทานผิดพลาด

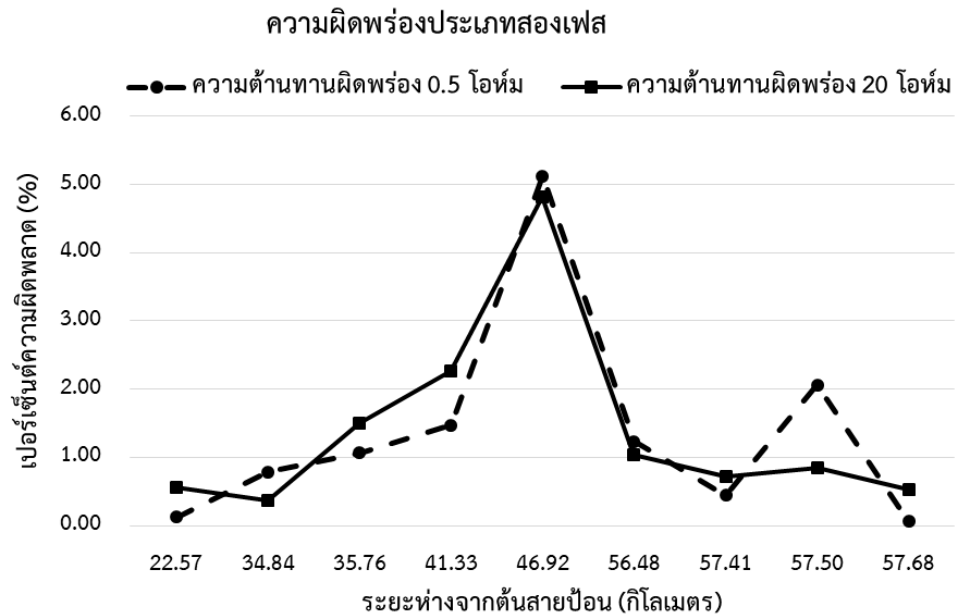
ในการวิเคราะห์ผลกระทบของความต้านทานผิดพลาดเป็นการใช้ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 20 ตำแหน่ง ทำการทดสอบโดยการปรับความต้านทานผิดพลาด ซึ่งในส่วนนี้จะนำเฉพาะกรณีความต้านทาน 0.5 โอห์ม (ต่ำสุดที่พิจารณา) และ 20 โอห์ม (สูงสุดที่พิจารณา) มาทำการวิเคราะห์สำหรับแต่ละประเภทความผิดพลาด



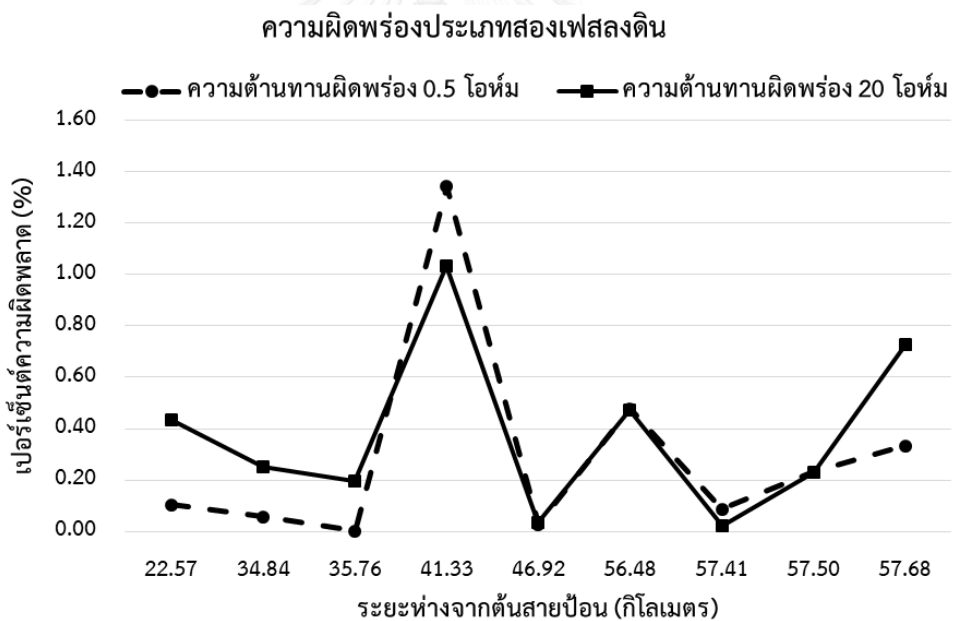
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบความผิดปกติของประเภทสามเฟสลงดิน



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบความผิดปกติของประเภทเฟสเอลงดิน



รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟส



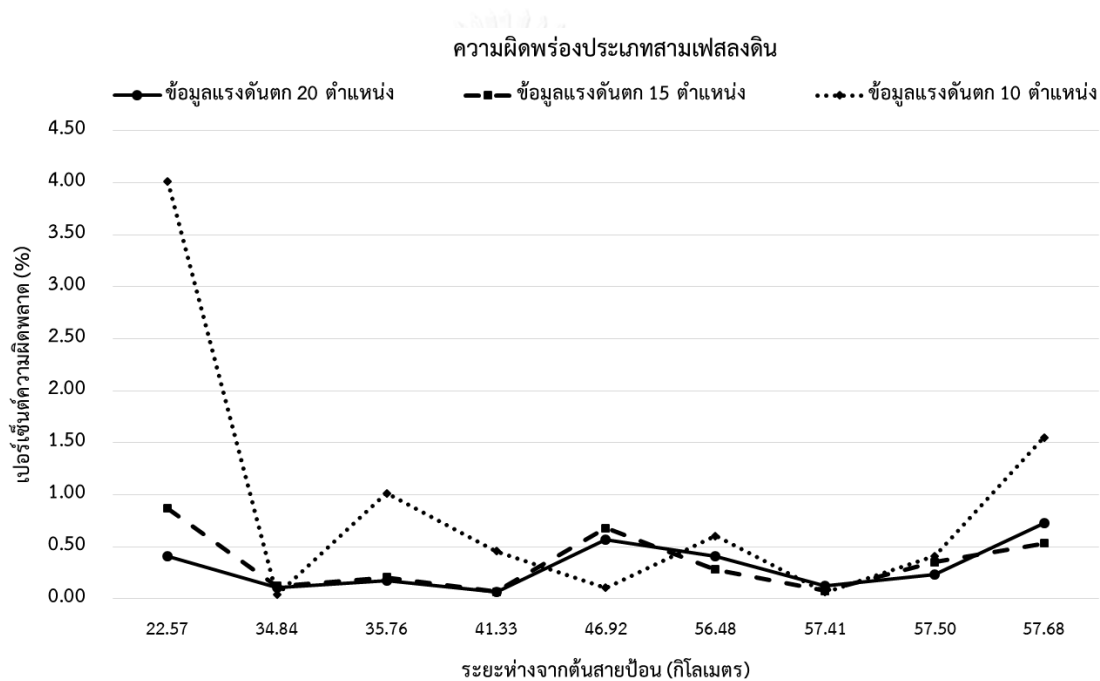
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน

จากรูปที่ 5.22 ถึงรูปที่ 5.25 จะเห็นว่าสำหรับความผิดพลาดประเภทสองเฟส และสองเฟสลงดิน เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความต้านทานผิดพลาด 0.5 โอห์ม และความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม จะมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันทั้งสองความต้านทาน แต่สำหรับความผิดพลาดแบบสามเฟสลงดิน และเฟสเอลงดินนั้น เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนสำหรับความผิดพลาดบางตำแหน่ง (ความผิดพลาดที่สายย่อย) แต่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันทั้งสองความต้านทาน ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเฉลี่ยแล้วนั้นพบว่า

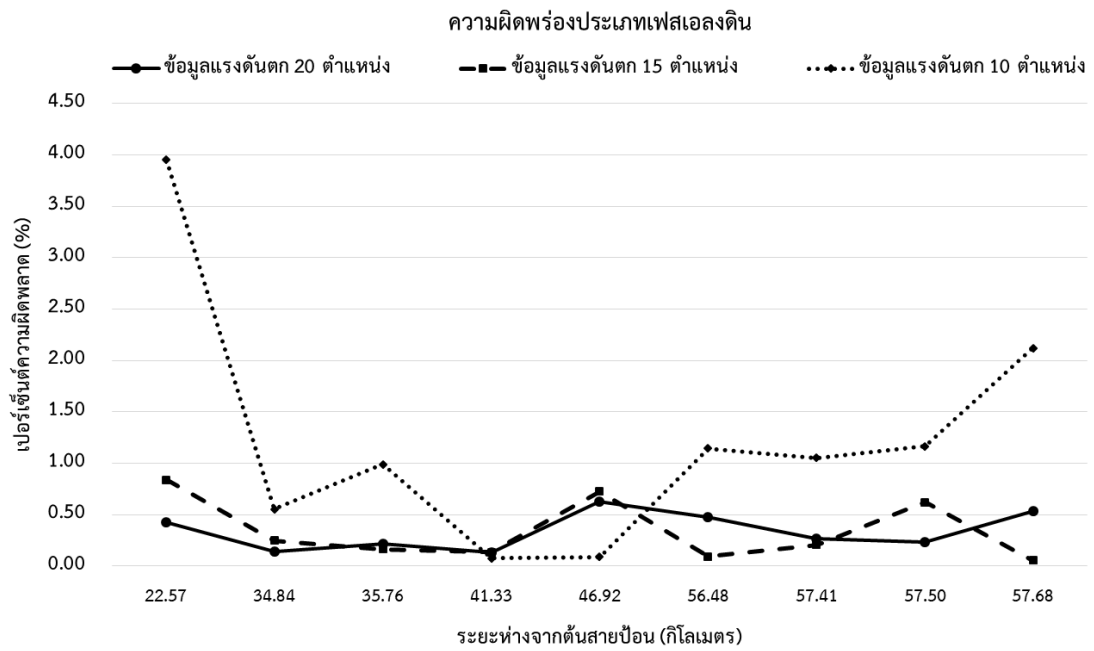
ความผิดพลาดประเภทต่อลงดินนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.00% ถึง 0.80% โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 1.34% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 1,278.50 เมตร ซึ่งเป็นความผิดพลาดตำแหน่งที่ 3 แต่สำหรับความผิดพลาดประเภทสองเฟสมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.40% ถึง 1.50% และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดถึง 5.13% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 4,875.49 เมตร ซึ่งเป็นความผิดพลาดตำแหน่งที่ 5

5.6.3 ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ

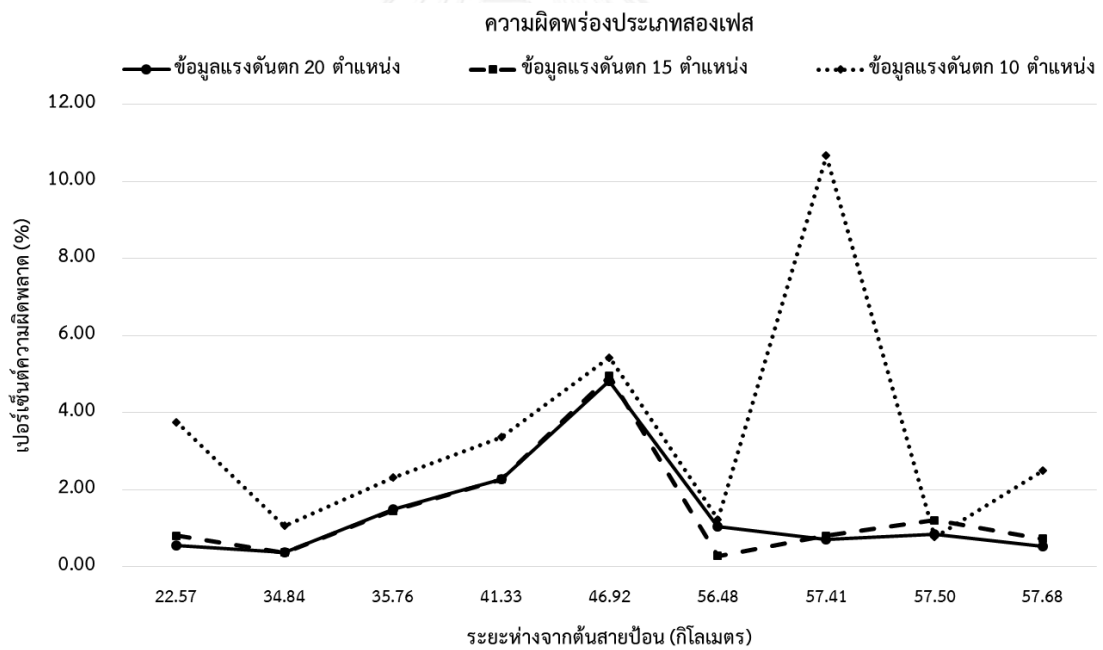
ในการวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ จะทำการปรับเพิ่มลดจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะจากกรณีปกติ 20 ตำแหน่ง เป็น 15 ตำแหน่ง และ 10 ตำแหน่ง แล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสำหรับแต่ละประเภทความผิดพลาด



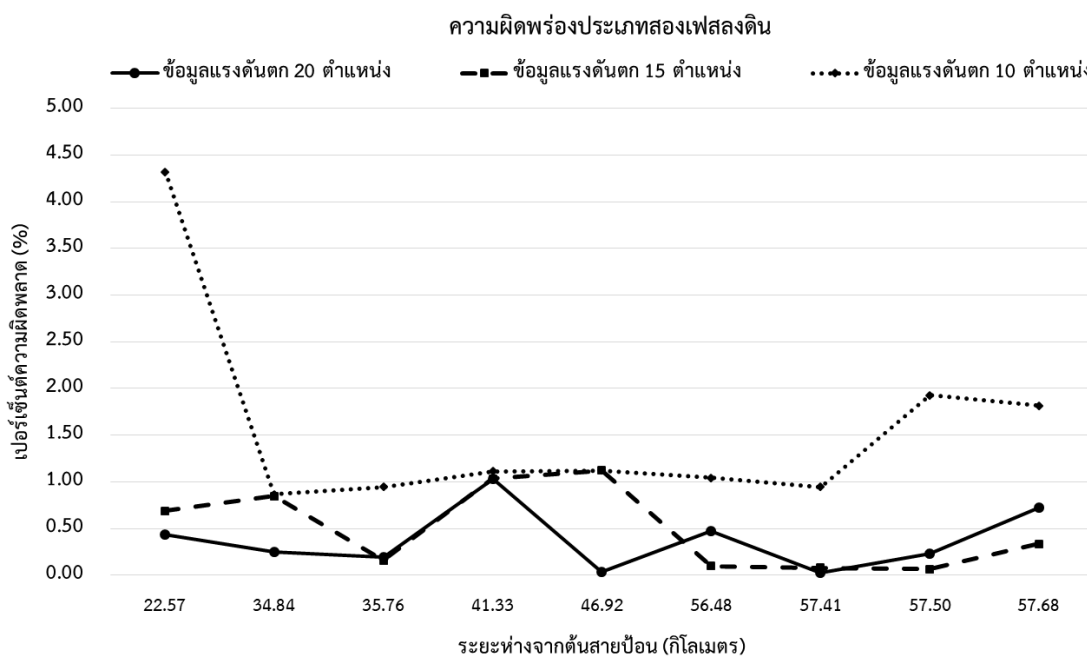
รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน



รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบความผิดปกติของประเภทเฟสเอลงดิน



รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบความผิดปกติของประเภทสองเฟส

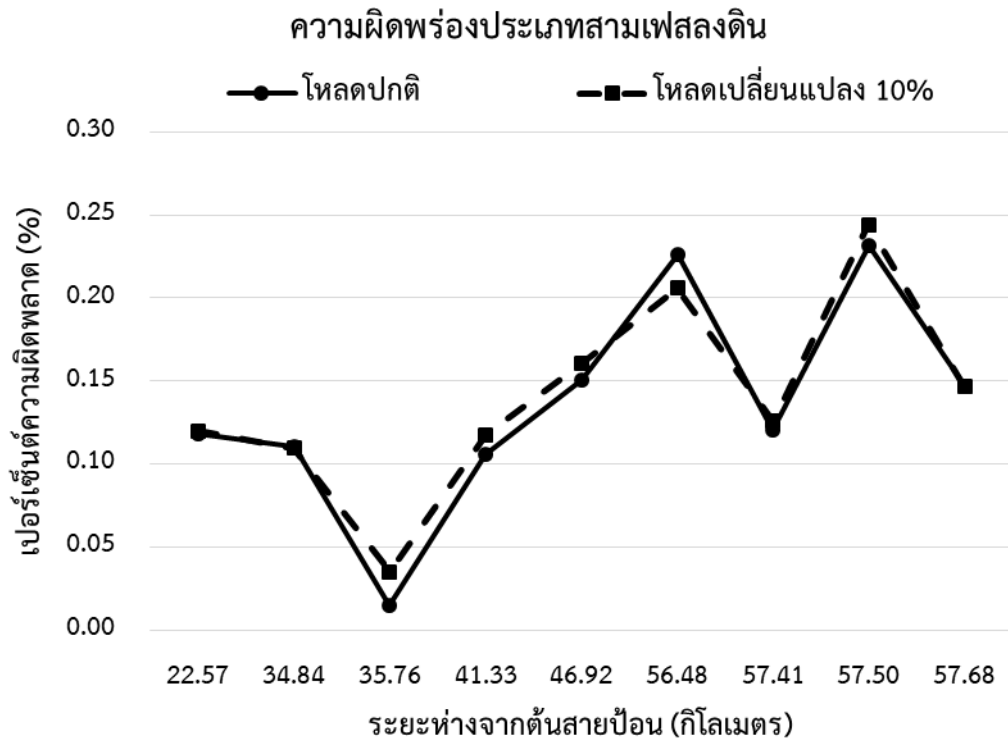


รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน

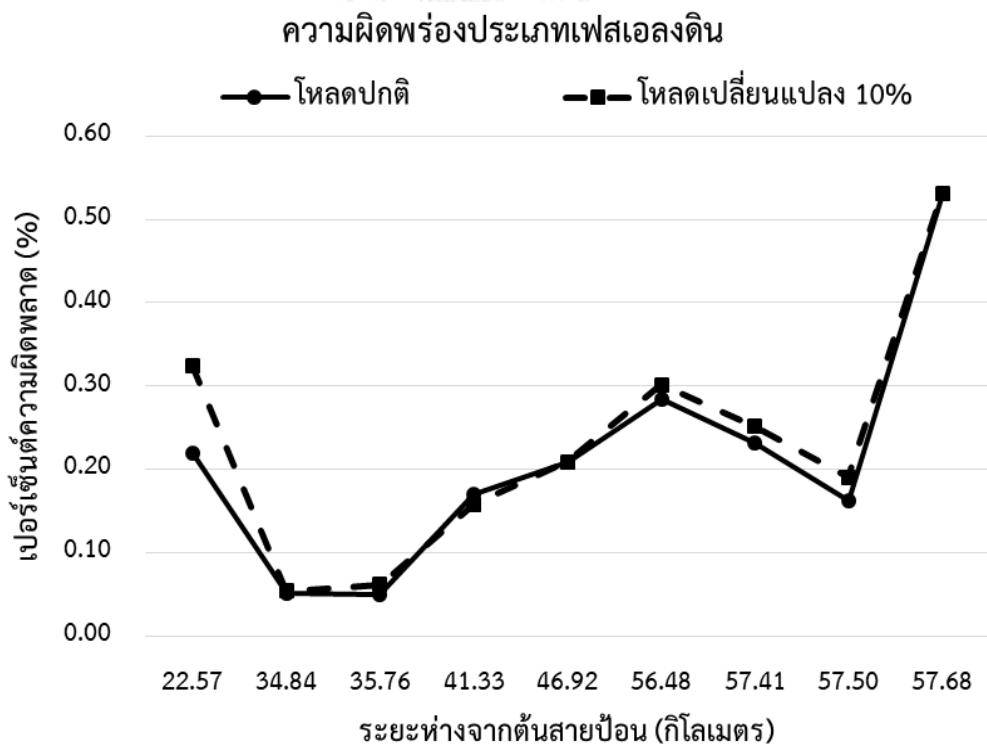
จากรูปที่ 5.26 ถึงรูปที่ 5.29 สำหรับการใช้จำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 20 และ 15 ตำแหน่ง (คิดเป็นร้อยละ 58 และ 44 ของจำนวนบัสทั้งหมดในระบบจำหน่าย) ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับการใช้ข้อมูลแรงดันตก 10 ตำแหน่งนั้น ความผิดพลาดประเภทลงดินมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่สำหรับความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดินมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้แรงดันตกชั่วขณะ 20 และ 15 ตำแหน่ง มีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.67% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 10,146.13 เมตร นอกจากนี้การติดตั้งจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ (สำหรับความผิดพลาดประเภทลงดิน) บริเวณช่วงของสายหลักที่ไม่มีสายแยกแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 0.63% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 599.32 เมตร และการติดตั้งจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ (สำหรับความผิดพลาดประเภทลงดิน) บริเวณทุกๆ ปลายสายแยกและสายแยกย่อยแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 1.03% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 979.84 เมตร

5.6.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด

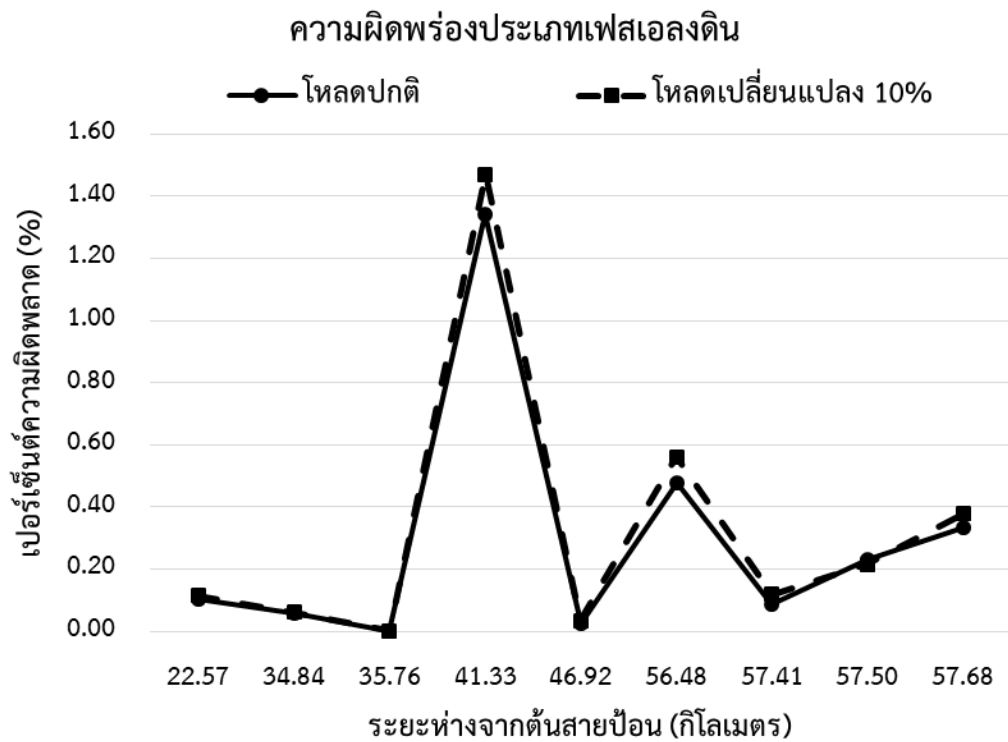
เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้โหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป $\pm 10\%$ ของโหลดทั้งระบบ (619 MVA) และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด



รูปที่ 5.30 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน



รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทเฟสเอลงดิน

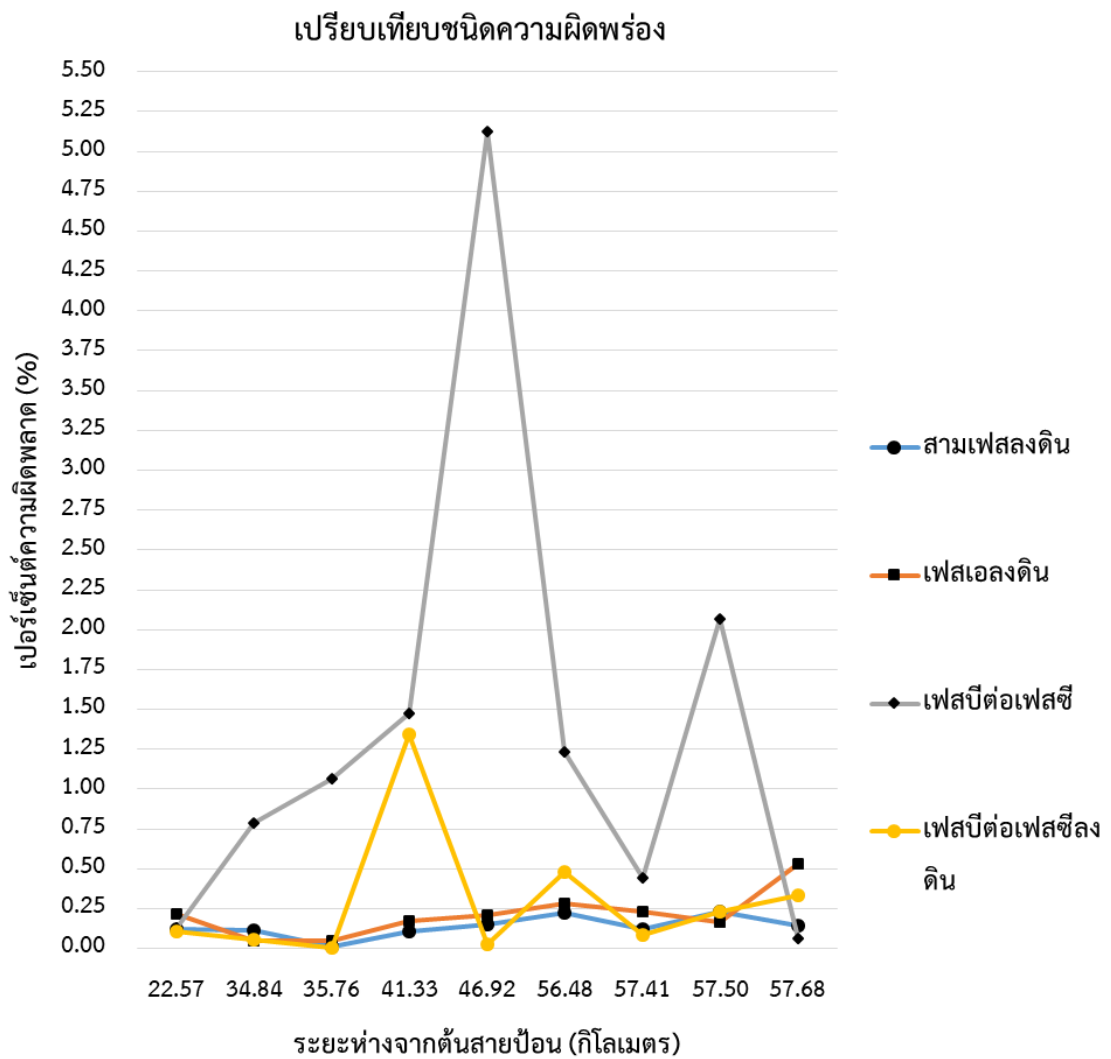


รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน

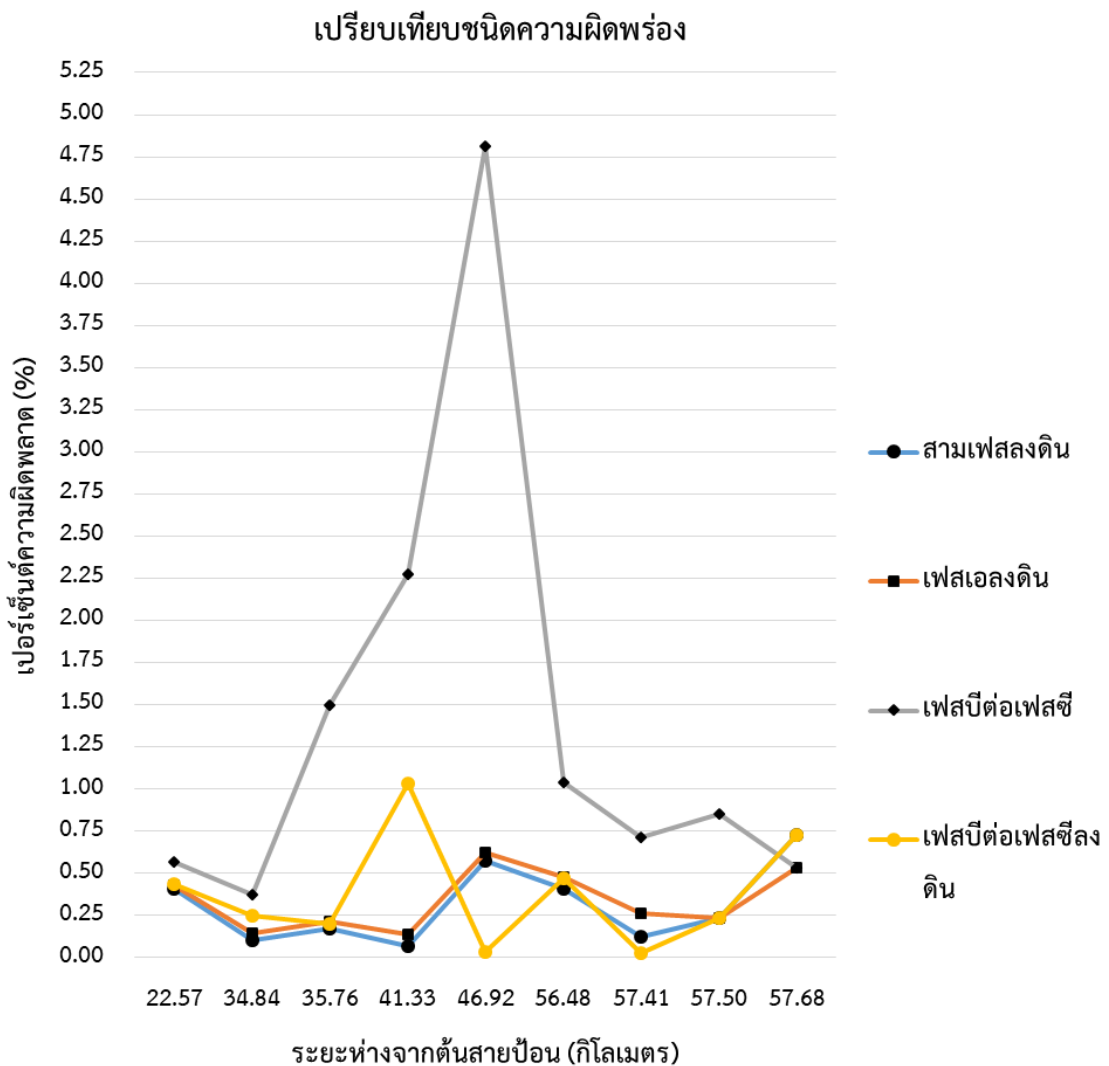
จากรูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.32 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสำหรับกรณีโหลดปกติ และกรณีโหลดเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$ มีค่าใกล้เคียงกัน

5.6.5 ผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดความผิดพลาดเป็นการใช้ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ 20 ตำแหน่ง ทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนประเภทของความผิดพลาด (4 ประเภทคือ สามเฟสลงดิน เฟสเอลงดิน สองเฟสและสองเฟสลงดิน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์เฉพาะกรณีความต้านทานผิดพลาด 0.5 โอห์ม (ต่ำสุดที่พิจารณา) และ 20 โอห์ม (สูงสุดที่พิจารณา)



รูปที่ 5.33 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแต่ละประเภทความผิดพลาดกรณีความต้านทานผิดพลาด 0.5 โอห์ม



รูปที่ 5.34 เปอร์เซ็นความผิดพลาดของแต่ละประเภทความผิดพลาดกรณีความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม

จากรูปที่ 5.33 และรูปที่ 5.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดเมื่อประเภทของความผิดพลาดเปลี่ยนสำหรับกรณีความต้านทานผิดพลาด 0.5 โอห์ม และ 20 โอห์ม พบว่าค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับความผิดพลาดประเภทลงดิน แต่สำหรับความผิดพลาดสองเฟสนั้น ค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับความผิดพลาดประเภทลงดิน โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงสูงสุดเท่ากับ 5.1% คิดเป็น 4,851.63 เมตร ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนประเภทความผิดพลาดจากเฟสบีต่อเฟสซีลงดินเป็นเฟสบีต่อเฟสซี

5.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการใช้แรงดันตกชั่วขณะ

จาก 5.6 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลของแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อนได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการที่นำเสนอ

ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์
ผลกระทบของระยะผิดพลาด	<ul style="list-style-type: none"> ● ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดมีค่าลดลงเมื่อเกิดความผิดพลาดบริเวณต้นสายและเพิ่มขึ้นบริเวณปลายสาย
ผลกระทบของความต้านทานผิดพลาด	<ul style="list-style-type: none"> ● ความผิดพลาดประเภทสองเฟสและสองเฟสลงดิน เมื่อความต้านทานผิดพลาดเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกัน ● ความผิดพลาดประเภทสามเฟสและเฟสลงดินค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่ตำแหน่งความผิดพลาด ณ สายย่อยเมื่อความต้านทานผิดพลาดเปลี่ยน
ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ	<ul style="list-style-type: none"> ● การใช้จำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะคิดเป็นร้อยละ 58 และ 44 ของจำนวนบัสทั้งหมดในระบบจำหน่ายมีผลกระทบน้อยต่อกระบวนการที่นำเสนอ ● สายหลักควรมีจุดวัดอย่างน้อย 1 ตำแหน่งสำหรับทุกๆ ช่วงสายที่ไม่มีสายแยก ● สายย่อยและสายแยกย่อยควรมีจุดวัดอยู่บริเวณปลายสายเป็นอย่างน้อย
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด	<ul style="list-style-type: none"> ● การเปลี่ยนแปลงของโหลดมีผลกระทบน้อยต่อกระบวนการที่นำเสนอ
ผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด	<ul style="list-style-type: none"> ● ความผิดพลาดประเภทลงดิน ชนิดของความผิดพลาดมีผลกระทบน้อยต่อกระบวนการที่นำเสนอ ● ความผิดพลาดประเภทสองเฟสส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าสูง

5.8 การวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอ

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณากรณีที่มีจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่งที่ต้นสายป้อนเทียบกับกรณีที่มีจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปรียบเทียบผลลัพธ์ และสรุปผลการเปรียบเทียบ

5.8.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์

ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลลัพธ์จากกระบวนการหาตำแหน่งความผิดพลาดสำหรับกรณีที่มีจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่งที่ต้นสายป้อน โดยใช้การคำนวณด้วยองค์ประกอบปริแอกแตนต์อย่างง่าย [25] เทียบกับกระบวนการที่นำเสนอกรณีที่มีจำนวนจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่งที่ความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 34 บัส ซึ่งทำการเปรียบเทียบตำแหน่งความผิดพลาดทั้งหมด 3 กรณี คือ ความผิดพลาดบนสายหลัก (บัส 830) ความผิดพลาดบนสายย่อย (บัส 820) และความผิดพลาดบนสายแยกย่อย (บัส 862) แสดงดังตารางที่ 5.11 ถึงตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายหลัก

ตำแหน่งผิดพลาด	ประเภทความผิดพลาด	จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่ง			จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง		
		จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด		จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด	
			(กิโลเมตร)	(%)		(กิโลเมตร)	(%)
830	ABC	2	7.43	7.81	1	0.07	0.07
	AG	2	5.32	5.59	1	0.13	0.13
	BC	2	11.23	11.81	1	2.16	2.27
	BCG	3	8.68	9.13	1	0.98	1.03

ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายย่อย

ตำแหน่งผิดพลาด	ประเภทความผิดพลาด	จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่ง			จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง		
		จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด		จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด	
			(กิโลเมตร)	(%)		(กิโลเมตร)	(%)
820	ABC	3	2.69	2.83	1	0.65	0.68
	AG	3	3.37	3.54	1	0.69	0.73
	BC	4	9.39	9.87	1	4.71	4.95
	BCG	1	8.24	8.66	1	1.07	1.12

ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดบนสายแยกย่อย

ตำแหน่งผิดพลาด	ประเภทความผิดพลาด	จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่ง			จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง		
		จำนวนคำตอบ ที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด		จำนวนคำตอบ ที่เป็นไปได้	ระยะทางผิดพลาด	
			(กิโลเมตร)	(%)		(กิโลเมตร)	(%)
862	ABC	3	4.32	4.54	1	0.34	0.35
	AG	3	9.11	9.58	1	0.59	0.62
	BC	2	5.42	5.70	1	1.14	1.20
	BCG	4	10.37	10.90	1	0.06	0.07

จากการทดสอบการหาตำแหน่งความผิดพลาดโดยการคำนวณด้วยองค์ประกอบรีแอกแตนซ์อย่างง่าย ซึ่งเป็นการคำนวณหารีแอกแตนซ์จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสที่ต้นสายป้อนขณะเกิดความผิดพลาด โดยมีข้อจำกัดพื้นฐานของกระบวนการคือ ต้องทราบชนิดความผิดพลาดล่วงหน้า เพราะการที่ทราบชนิดความผิดพลาดล่วงหน้าส่งผลต่อการเลือกค่าแรงดันและกระแสที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาระยะผิดพลาด แต่สำหรับกระบวนการที่นำเสนอไม่จำเป็นต้องทราบชนิดความผิดพลาดล่วงหน้า เพราะมีตำแหน่งจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งกระบวนการที่นำเสนอ นำค่าแรงดันตกชั่วขณะของเฟสที่ต่ำที่สุด (เฟสที่เกิดความผิดพลาด) มาใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้จากตารางที่ 5.11 ถึงตารางที่ 5.13 พบว่าจำนวนคำตอบของตำแหน่งความผิดพลาดที่คำนวณได้ สำหรับกรณีที่มีจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่งที่ต้นสายป้อน ให้คำตอบมากกว่า 1 ตำแหน่งและมีค่าความผิดพลาดสูง แต่สำหรับกรณีที่มีจำนวนจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง ให้คำตอบเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น และมีค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า

5.8.2 สรุปผลการเปรียบเทียบ

ในส่วนนี้เป็นการสรุปผลการเปรียบเทียบที่แสดงในหัวข้อ 5.8.1 โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 อย่าง คือ จำนวนตำแหน่งความผิดพลาด ระยะทางผิดพลาดและข้อมูลชนิดความผิดพลาด ซึ่งสามารถสรุปผลการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอเทียบกับกรณีที่มีจุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่งที่ต้นสายป้อน แสดงดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 สรุปผลการเปรียบเทียบ

การวิเคราะห์	จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 1 ตำแหน่งที่ต้นสายป้อน	จุดวัดแรงดันตกชั่วขณะ 15 ตำแหน่ง
จำนวนตำแหน่งความผิดพลาด	● มีหลายคำตอบ	● มีคำตอบเดียว
ระยะทางผิดพลาด	● แม่นยำต่ำ	● แม่นยำสูง
ข้อมูลชนิดความผิดพลาด	● ต้องทราบชนิดความผิดพลาดล่วงหน้า	● สำหรับความผิดพลาดประเภทลงดินไม่ต้องทราบชนิดความผิดพลาด



บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกระบวนการหาตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่ายโดยการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกชั่วขณะกับอิมพีแดนซ์สายป้อน โดยยึดหลักการพื้นฐานของคุณสมบัติแรงดันตกชั่วขณะ คือแรงดันตกชั่วขณะจะมีค่าลดลงตามความยาวสายและมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งผิดพลาด ทั้งนี้เพื่อแบ่งกลุ่มของข้อมูลของแรงดันตกชั่วขณะที่วัดได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดสำหรับแบ่งตำแหน่งของแรงดันตกชั่วขณะออกเป็นตำแหน่งก่อนความผิดพลาดและตำแหน่งหลังความผิดพลาด ตำแหน่งความผิดพลาดคำนวณจากการแก้สมการระหว่างสมการการถดถอยของแรงดันตกชั่วขณะตั้งก่อนและหลังความผิดพลาด ประกอบกับการเลือกทางเดินของสายไปยังตำแหน่งผิดพลาดจากค่าแรงดันตกชั่วขณะต่ำที่สุดที่วัดได้ เพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากกรณีที่แรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาดเป็นตำแหน่งของสายแยกอื่นๆ การวิเคราะห์ผลกระทบแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก คือ ผลกระทบของระยะผิดพลาด ผลกระทบของความต้านทานผิดพลาด ผลกระทบของจำนวนข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด และผลกระทบจากชนิดความผิดพลาด

จากผลการทดสอบพบว่าสำหรับความผิดพลาดประเภทลงดิน (สามเฟสลงดิน เฟสลงดินและสองเฟสลงดิน) กระบวนการที่นำเสนอสามารถคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดความผิดพลาด ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 0.8% คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 761 เมตร จากความยาวสายย่อยทั้งหมด 95.13 กิโลเมตร สำหรับความผิดพลาดประเภทสองเฟส กระบวนการที่นำเสนอก็ยังสามารถคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดได้ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 0.8% กับความผิดพลาดบางตำแหน่ง

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบ พบว่าสำหรับการปรับเปลี่ยนระยะผิดพลาดส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในบางตำแหน่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความผิดพลาดบนสายป้อนว่าเกิดขึ้นบริเวณต้นสายหรือปลายสาย และบริเวณสายแยกหรือสายหลัก นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความต้านทานผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงของโหลดและจำนวนของจุดวัดของแต่ละเหตุการณ์ผิดพลาดที่พิจารณา โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดส่วนใหญ่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลกระทบ ทำให้สามารถสรุปข้อจำกัดของกระบวนการที่นำเสนอ แบ่งออกเป็น 3 ข้อดังนี้

- 1) กระบวนการที่นำเสนอสามารถหาตำแหน่งความผิดพลาดได้สำหรับกรณีที่มีจำนวนข้อมูล แรงดันตกชั่วขณะตำแหน่งก่อนความผิดพลาดอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง และตำแหน่งหลังความผิดพลาดอย่างน้อย 1 ตำแหน่ง (เงื่อนไขขั้นต่ำสำหรับการสร้างสมการเส้นโค้งและเส้นตรง)
- 2) วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพกับความผิดพลาดประเภทหลงดิน โดยไม่จำเป็นต้องทราบชนิดความผิดพลาดล่วงหน้า (ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน 0.8%)
- 3) ทุกๆสายแยกและสายแยกย่อยต้องมีข้อมูลแรงดันที่ปลายสายเป็นอย่างน้อยเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งผิดพลาด

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการกำหนดตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะที่แน่นอนในการทดสอบ ดังนั้นค่าแรงดันตกชั่วขณะที่นำมาพิจารณาอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ เนื่องมาจากการเลือกใช้ตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะส่งผลต่อกระบวนการกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการที่นำเสนอ การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลักดังนี้

- 1) การวิเคราะห์เลือกจำนวนจุดวัดและตำแหน่งแรงดันตกชั่วขณะเพิ่มเติมเพื่อให้ทราบถึงความสำคัญของจำนวนและตำแหน่งของแรงดันตกชั่วขณะ
- 2) การวิเคราะห์เพื่อหาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด โดยการปรับเปลี่ยน ค่าความต้านทานผิดพลาด ตำแหน่งของจุดวัด และการเปลี่ยนแปลงของโหลด

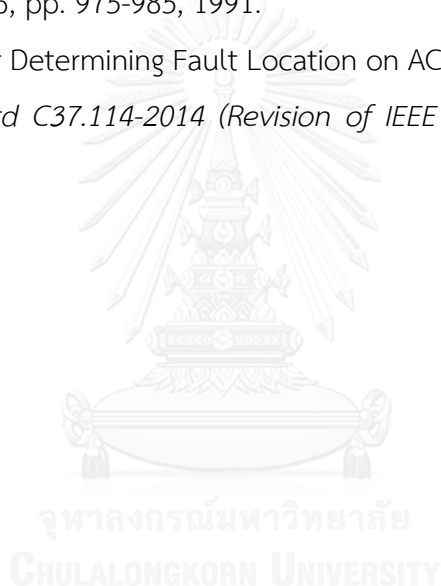
ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการที่นำเสนอเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นจึงสามารถนำไปปรับใช้กับข้อมูลหรือกระบวนการอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งความผิดพลาดให้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] R. Krishnathevar and E. E. Ngu, "Generalized Impedance-Based Fault Location for Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 449-451, 2012.
- [2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-2, pp. 59-60, 1982.
- [3] K. Jia, T. Bi, Z. Ren, D. Thomas, and M. Sumner, "High frequency impedance based fault location in distribution system with DGs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, pp. 1-1, 2016.
- [4] Z. Jun, D. L. Lubkeman, and A. A. Girgis, "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 801-809, 1997.
- [5] A. Borghetti, S. Corsi, C. A. Nucci, M. Paolone, L. Peretto, and R. Tinarelli, "On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, pp. 608-617, 11// 2006.
- [6] W. Threevithayanon and N. Hoonchareon, "Fault Data Synchronization Using Wavelet for Improving Two-terminal Fault Location Algorithm," in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010, pp. 1-4.
- [7] Y. Chi-Shan, L. Chih-Wen, Y. Sun-Li, and J. Joe-Air, "A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, pp. 33-46, 2002.
- [8] C. S. Yu, L. R. Chang, and J. R. Cho, "New Fault Impedance Computations for Unsynchronized Two-Terminal Fault-Location Computations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 2879-2881, 2011.
- [9] A. L. Dalcastagne, S. N. Filho, H. H. Zurn, and R. Seara, "An Iterative Two-Terminal Fault-Location Method Based on Unsynchronized Phasors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 2318-2329, 2008.

- [10] D. Novosel, D. G. Hart, E. Udren, and J. Garitty, "Unsynchronized two-terminal fault location estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 130-138, 1996.
- [11] T. Wu, C. Y. Chung, I. Kamwa, J. Li, and M. Qin, "Synchrophasor measurement-based fault location technique for multi-terminal multi-section non-homogeneous transmission lines," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 1815-1824, 2016.
- [12] L. Ying-Hong, L. Chih-Wen, and Y. Chi-Shan, "A new fault locator for three-terminal transmission lines using two-terminal synchronized voltage and current phasors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, pp. 452-459, 2002.
- [13] D. Dustegor, S. V. Poroseva, M. Y. Hussaini, and S. Woodruff, "Automated Graph-Based Methodology for Fault Detection and Location in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 638-646, 2010.
- [14] R. A. F. Pereira, L. G. W. d. Silva, M. Kezunovic, and J. R. S. Mantovani, "Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 852-862, 2009.
- [15] F. C. L. Trindade, W. Freitas, and J. C. M. Vieira, "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, pp. 251-260, 2014.
- [16] R. Dashti and J. Sadeh, "Fault section estimation in power distribution network using impedance-based fault distance calculation and frequency spectrum analysis," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 1406-1417, 2014.
- [17] J. Ren, S. S. Venkata, and E. Sortomme, "An Accurate Synchrophasor Based Fault Location Method for Emerging Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, pp. 297-298, 2014.
- [18] W. Bin, X. Wilsun, and P. Zhencun, "Voltage sag state estimation for power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 806-812, 2005.

- [19] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [20] ลือชัย ทองนิล, คู่มือวิศวกรไฟฟ้า ฉบับปรับปรุง: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2558.
- [21] K. Zimmerman and D. Costello, "Impedance-based fault location experience," in *Rural Electric Power Conference, 2006 IEEE*, 2006, pp. 1-16.
- [22] T. Tayjasanant., *Fundamentals of power quality*: Chulalongkorn University.
- [23] พรสิน สุภวาลัย, การวิเคราะห์การถดถอย: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร, 2556.
- [24] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, pp. 975-985, 1991.
- [25] "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines," *IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004)*, pp. 1-76, 2015.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ผ 1 ค่าอิมพีแดนซ์และความยาวสายแต่ละช่วงของสายย่อยในระบบทดสอบ

From Bus	To Bus	Length(km)	Z(Ohm)	Z(Ohm/km)
Bus 800	Bus 802	0.786	0.6821708	0.867901781
Bus 802	Terminal	0.264	0.2287123	0.86633447
Terminal	Bus 806	0.264	0.2287123	0.86633447
Bus 806	Bus 808	9.824	8.521847	0.867451853
Bus 812	Bus 808	11.43	9.915273	0.867477953
Bus 808	Terminal(1)	0.885	1.037565	1.172389831
Terminal(1)	Bus 810	0.885	1.037565	1.172389831
Bus 814	Bus 812	9.062	7.860829	0.86744968
Bus 814	Bus 850	0.003	0.00357534	1.19178
Bus 816	Bus 818	0.521	0.6113837	1.17348119
Bus 824	Terminal(4)	1.556	1.825213	1.173016067
Terminal(4)	Bus 816	1.556	1.825213	1.173016067
Bus 818	Terminal(2)	7.338	8.607638	1.173022349
Terminal(2)	Bus 820	7.338	8.607638	1.173022349
Bus 820	Terminal(3)	2.094	2.456261	1.172999522
Terminal(3)	Bus 822	2.094	2.456261	1.172999522
Bus 824	Terminal(6)	0.128	0.1501644	1.173159375
Terminal(6)	Bus 828	0.128	0.1501644	1.173159375
Bus 824	Terminal(5)	0.462	0.5416645	1.172433983
Terminal(5)	Bus 826	0.462	0.5416645	1.172433983
Terminal(7)	Bus 830	3.115	3.654001	1.173034029
Bus 828	Terminal(7)	3.115	3.654001	1.173034029
Bus 830	Bus 854	0.158	0.1859178	1.176694937
Bus 858	Terminal(11)	0.888	1.042212	1.173662162
Terminal(11)	Bus 834	0.888	1.042212	1.173662162
Bus 860	Terminal(16)	0.408	0.479096	1.174254902

Terminal(16)	Bus 836	0.408	0.479096	1.174254902
Bus 862	Terminal(17)	0.741	0.8688084	1.172480972
Terminal(17)	Bus 838	0.741	0.8688084	1.172480972
Bus 836	Terminal(18)	0.131	0.1537398	1.17358626
Terminal(18)	Bus 840	0.131	0.1537398	1.17358626
Bus 834	Bus 842	0.085	0.1001096	1.17776
Bus 842	Terminal(12)	0.206	0.2413356	1.171532039
Terminal(12)	Bus 844	0.206	0.2413356	1.171532039
Bus 844	Terminal(13)	0.555	0.6507124	1.172454775
Terminal(13)	Bus 846	0.555	0.6507124	1.172454775
Bus 846	Terminal(14)	0.689	0.09474659	1.169710988
Terminal(14)	Bus 848	0.689	0.09474659	1.169710988
Bus 816	Bus 850	0.094	0.1108356	1.179102128
Bus 852	Bus 832	0.003	0.00357534	1.19178
Bus 854	Bus 852	11.226	13.16799	1.172990379
Bus 854	Terminal(8)	3.555	4.170638	1.173175246
Terminal(8)	Bus 856	3.555	4.170638	1.173175246
Bus 832	Terminal(9)	0.747	0.875959	1.172635877
Terminal(9)	Bus 858	0.747	0.875959	1.172635877
Bus 858	Terminal(10)	0.247	0.2896028	1.172480972
Terminal(10)	Bus 864	0.247	0.2896028	1.172480972
Bus 834	Terminal(15)	0.308	0.3611096	1.172433766
Terminal(15)	Bus 860	0.308	0.3611096	1.172433766
Bus 862	Bus 836	0.085	0.1001096	1.17776
Bus 888	Bus 890	3.219	2.792141	0.867393911

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติธัช ไกรเกียรติ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2535 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2558

ระหว่างการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต นายกิตติธัช ไกรเกียรติ์ มีผลงานตีพิมพ์และนำเสนอบทความ “Fault Location in Distribution Systems based on Analysis of Voltage Sags” ในงานประชุมวิชาการ 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017) ระหว่างวันที่ 27-30 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ณ จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย