

การประยุกต์เวฟเลทเพื่อการตรวจจับและจำแนกประเภทของความผิดพร่องในระบบส่ง
กำลังไฟฟ้า



นายปณัสน์ สวัสดิ์พิพัฒน์

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF WAVELET FOR FAULT DETECTION AND CLASSIFICATION IN
POWER TRANSMISSION SYSTEMS



Mr. Panat Sawatpipat

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์เวฟเลทเพื่อการตรวจจับและจำแนกประเภท
ของความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

โดย

นาย ปณัสน์ สวัสดิ์พิพัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เดชสุนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนวิญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เดชสุนันต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทบุรี หุนเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ณัฐภพ นิมปิตวัน)

ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปณัสน์ สวตต์พพฒณ : การประกยทเวฟเลทเพอการตรวจจับและจำแนกประกทความมดพรงในระบบส่งกำลังไฟฟา. (Application of wavelet for fault detection and classification in power transmission systems) อ.ที่ประกษาวทยาพนธ์หลัก : ผู้ชวยศาสตราจารย์ ดร. ธวชชัย เดชสอณนต, 79 หนา.

วทยาพนธ์ฉบับนี้หนาเสนอวธการตรวจจับและจำแนกประกทความมดพรงในระบบส่งกำลังไฟฟา การตรวจจับความมดพรงนั้นใชวธการตรวจจับจากขนาดของกระแสร่วมกับการใชค่าพลังงาน(Spectral Energy) ซึ่งคานวณมาจากสัมประกทการแปลงเวฟเลทแบบละเอียด (Detail Coefficient) ในระดับชั้นที่ 2 การจำแนกประกทความมดพรงนั้นสามารถทำได้โดยพิจารณาค่าจุดเริ่มเปลยน (Threshold) ของพลังงานซึ่งคานวณมาจากสัมประกทการแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 4 โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลยนตางๆนั้นได้ทำการทดสอบจากสญญานความมดพรงที่วัดได้จริงจากระบบส่งกำลังไฟฟาของประเทศไทย โดยผลลัพธได้ถูกนำมาเปรยบเทยกับกระบวนการอื่ๆ ซึ่งพบวกระบวนการที่หนาเสนอนั้นสามารถตรวจจับและจำแนกประกทความมดพรงได้เป็นอย่างดี

คูนยวทยาทรพยากร

จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

ภาควชา.....วศวกรรมไฟฟา.....ลายมือชื่อนิสิต.....ปณัสน์.....สวตต์พพฒณ.....

สาขาวิชา.....วศวกรรมไฟฟา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ประกษาวทยาพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2552.....

4970418121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FAULT DETECTION / FAULT CLASSIFICATION / WAVELET TRANSFORM

PANAT SAWATPIPAT : APPLICATION OF WAVELET FOR FAULT DETECTION AND CLASSIFICATION IN POWER TRANSMISSION SYSTEMS. THESIS
 ADVISOR : ASST.PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 79 pp.

This thesis presents a method for fault detection and classification in power transmission systems. Fault detection utilizes magnitudes of fault currents together with spectral energy calculated from level-2 detail coefficients of wavelet transform. Fault classification relies on threshold values of spectral energy from level-4 detail coefficients of wavelet transform. Various thresholds are obtained from test results using actual fault data in Thailand's transmission systems. Results from available fault classification methods are compared and tabulated. The proposed method reveals a good performance for fault detection and classification in Thailand's transmission systems.

Department : Electrical Engineering Student's Signature Panat Sawatpipat
 Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature T. Tayjasanant
 Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ , ผศ.ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ และอาจารย์ ดร.ณัฐภพ นิมปิติวิน ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบพระคุณ ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาด้านความรู้ และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยุโทรพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นของระบบไฟฟ้า.....	5
2.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย.....	6
2.3 เครื่องบันทึกข้อมูลความผิดพลาดแบบดิจิทัล.....	6
2.3.1 เงื่อนไขในการทำงานของ DFR.....	7
2.3.2 ช่องสัญญาณที่ใช้บันทึกข้อมูลของ DFR.....	7
2.3.3 ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล.....	8
2.4 ระบบบันทึกความผิดพลาดของ กฟผ.....	9
2.5 ความผิดพลาดในระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....	10

2.6 ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)	12
2.7 เทคนิคในการวิเคราะห์สัญญาณ.....	13
2.7.1 การแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform)	13
2.7.2 การแปลงเวฟเลขท	15
บทที่ 3 วิธีการตรวจจับและจำแนกประเภทของความผิดปกติ.....	18
3.1 การตรวจจับความผิดปกติ.....	18
3.1.1 การตรวจจับโดยใช้ข้อมูลขนาดของกระแสสาย	18
3.1.2 การตรวจจับด้วยวิธีการแปลงเวฟเลขท.....	20
3.2 การจำแนกประเภทของความผิดปกติ.....	22
3.2.1 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยเงื่อนไขขนาดของกระแสสาย	23
3.2.2 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยเงื่อนไขขนาดของกระแสสาย โดย ปรับปรุงแก้ไขค่าจุดเริ่มเปลี่ยน.....	23
3.2.3 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของ กระแสลำดับ.....	24
3.2.4 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของ กระแสลำดับ โดยปรับปรุงค่าขนาดและมุมเฟส	28
3.2.5 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยวิธีการแปลงเวฟเลขท	32
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานเวฟเลขทเพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติ	34
4.1 การประยุกต์ใช้การตรวจจับความผิดปกติ.....	34
4.1.1 การเลือกกระตบชั้นในการแปลงเวฟเลขท	35
4.1.2 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนต่างๆ.....	38
4.2 การประยุกต์การจำแนกประเภทของความผิดปกติ	40
4.2.1 การเลือกกระตบชั้นของการแปลงเวฟเลขท	40
4.2.2 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนต่างๆ.....	41

4.3	สรุปเงื่อนไขในการตรวจจับและการจำแนกประเภทของความผิดปกติ.....	44
บทที่ 5	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
5.1	การจำลองระบบไฟฟ้า.....	45
5.1.1	ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง.....	45
5.1.2	การทดสอบตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	46
5.1.3	การทดสอบจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	47
5.2	ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่อง DFR.....	48
5.2.1	การทดสอบตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	48
5.2.2	การจำแนกประเภทความผิดปกติ.....	53
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
6.1	ข้อเสนอแนะ.....	60
	รายการอ้างอิง.....	61
	ภาคผนวก.....	63
	ภาคผนวก ก รายละเอียดของเหตุการณ์จาก กฟผ. และผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติ.....	64
	ภาคผนวก ข. การจำแนกความประเภทความผิดปกติโดยการใช้ขนาดและมุมเฟสของกระแสลำดับ.....	69
	ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	78
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติด้วยวิธีในหัวข้อ 3.2.1	23
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติด้วยวิธีในหัวข้อ 3.2.2	24
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติประเภทสมดุล.....	27
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติประเภทไม่สมดุล.....	27
ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติประเภทสมดุล ปรับปรุงตาม [10]	28
ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติประเภทไม่สมดุล ปรับปรุงตาม [10].....	28
ตารางที่ 3.7 ค่าดัชนีจากการคำนวณของกระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติ โดยใช้มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ	30
ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขสำหรับจำแนกความผิดปกติโดยการแปลงเวฟเลท.....	32
ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่สำหรับสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในแต่ละระดับชั้น	35
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขสำหรับจำแนกความผิดปกติโดยการแปลงเวฟเลท.....	42
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปร้องกับระบบจำลอง.....	46
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปร้องกับระบบจำลอง.....	47
ตารางที่ 5.3 รายละเอียดเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปร้องสำหรับการทดสอบการตรวจจับ.....	49
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปร้องกับสัญญาณในระบบจริง.....	50
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปร้องกับสัญญาณในระบบจริง หลังการตรวจสอบข้อมูลโดยละเอียด.....	52
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปร้องกับสัญญาณจากระบบจริง โดยใช้ค่าพลังงานจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในแต่ละระดับชั้น	54
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปร้องกับสัญญาณจากระบบจริง	56

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพรวมของระบบไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.2 รูปตัวอย่างอุปกรณ์ DFR.....	7
รูปที่ 2.3 ระบบบันทึกความผิดปกติ	10
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดปกติประเภทสามเฟส	11
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดปกติประเภทหนึ่งเฟสลงดิน	11
รูปที่ 2.6 เฟสเซอร์ของส่วนประกอบสมมาตร	12
รูปที่ 2.7 การแปลงฟูริเยร์	13
รูปที่ 2.8 การแปลงฟูริเยร์ช่วงสั้น	15
รูปที่ 2.9 Scaling function และ Wavelet function ของ Daubechies' Wavelet.....	15
รูปที่ 2.10 คุณสมบัติการขยายและลดสเกลของฟังก์ชันเวฟเลต.....	16
รูปที่ 2.11 คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเลต.....	16
รูปที่ 2.12 การกระจายสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่สเกล 2 ระดับ.....	17
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดินด้วยขนาดของกระแสสาย	20
รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A ในขณะเกิดความผิดปกติและค่าสัมประสิทธิ์การแปลง เวฟเลตแบบละเอียดระดับขั้นที่ 1 และ 2	21
รูปที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสเฟส A ในขณะเกิดความผิดปกติและค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์ การแปลงเวฟเลตแบบละเอียดระดับขั้นที่ 1 และ 2	22
รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบ มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ	29
รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแส 3 เฟสและเฟสเซอร์กระแสลำดับบวกและลำดับลบโดยอ้างอิง ทั้ง 3 เฟสของทั้ง 2 ช่วงความผิดปกติ	31
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติประเภท 2 เฟสด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต.....	33
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตแบบละเอียดระดับขั้นที่ 1..	36

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 2..	36
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 1 ในกรณีที่มีผลของสัญญาณรบกวน.....	37
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 2 ในกรณีที่มีผลของสัญญาณรบกวน.....	38
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการตรวจจับสำหรับเหตุการณ์ความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดิน	40
รูปที่ 4.6 การจำแนกประเภทความผิดปกติโดย Spectral Energy ระดับชั้นที่ 2 - 4	43
รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้าที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรม EMTDC/PSCAD	46
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการตรวจจับในกรณีเหตุการณ์ความผิดปกติ	47
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติกรณี 2 เฟส.....	48
รูปที่ 5.4 แผนผังเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าสำหรับเหตุการณ์ทดสอบ	49
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างข้อมูลที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง	51
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างข้อมูลการสับตัวเก็บประจุ	51
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างสัญญาณที่คาดว่าเป็นความผิดปกติจากระบบไฟฟ้าอื่น.....	53
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ผิดพลาด.....	55
รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ผิดพลาด (ใช้ค่าขนาดของกระแสสาย)	57
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ผิดพลาด (พลังงานในระดับชั้นที่ 4)	58

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบป้องกัน (Protection system) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างมากต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากมีหน้าที่ในการลดความเสียหายของระบบไฟฟ้าจากความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น ความผิดปกติ (Fault) ถือว่าเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมากต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายอันเกิดเนื่องมาจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ระบบป้องกันต้องทำการแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าหลักอย่างรวดเร็วที่สุด เพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

หลังจากเกิดเหตุการณ์ผิดปกติในระบบไฟฟ้า ควรจะต้องมีการวิเคราะห์เหตุการณ์ ภายหลังจากเหตุการณ์นั้นๆ (Post-processing analysis) เพื่อประโยชน์ในหลายๆประการ เช่น การกู้ระบบไฟฟ้ากลับคืนสู่สภาพปกติ การตรวจสอบการทำงานของระบบป้องกัน เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์ลักษณะเช่นนี้ อุปกรณ์ที่สำคัญชนิดหนึ่งซึ่งใช้บันทึกข้อมูลต่างๆของระบบไฟฟ้าในขณะที่เกิดความผิดปกติได้แก่ เครื่องบันทึกข้อมูลความผิดปกติแบบดิจิทัล (Digital fault recorder, DFR) ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่แต่ละสถานีไฟฟ้าให้บันทึกข้อมูลในช่วงที่เกิดความผิดปกติ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานในส่วนที่เกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในการสั่งการให้เครื่อง DFR เริ่มต้นบันทึกข้อมูลนั้น จะต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นค่ากระแสมีค่ามากกว่า 120% ของพิกัดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสในวงจรนั้นๆ หรือค่าแรงดันต้องค่าน้อยกว่า 85% ของแรงดันพิกัด หรือ อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Circuit breaker) มีการทำงาน เป็นต้น ซึ่งจากหลักการทำงานของเครื่อง DFR นั้น จะเห็นได้ว่ามีโอกาสสูงที่เหตุการณ์ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจะถูกบันทึกเข้ามาด้วย อีกทั้งด้วยเรื่องข้อจำกัดของหน่วยความจำ จึงทำให้ควรมีเครื่องมือซึ่งใช้ในการช่วยคัดกรองข้อมูลที่ไม่สำคัญออกไป โดยเหตุการณ์ซึ่งจำเป็นจะต้องบันทึกเก็บไว้ในฐานข้อมูลได้แก่ เหตุการณ์ที่เป็นผลมาจากการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงพัฒนาเครื่องมือที่จะสามารถช่วยในการคัดกรองข้อมูลเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติออกไป โดยทำการวิเคราะห์จากรูปคลื่นของกระแส รวมถึงข้อมูลต่างๆซึ่งได้มาจากเครื่อง DFR โดยจะทำการตรวจจับหาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติในระบบ

ไฟฟ้า ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) เข้ามาช่วยในการตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เนื่องจากการแปลงเวฟเลตนั้น ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ข้อมูลในสภาวะชั่วคราว (Transient) และทำการจำแนกประเภทของความผิดปกติต่างๆ เพื่อที่จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติต่อไป ซึ่งจะส่งผลให้ช่วยลดทรัพยากรเวลาและบุคลากรลง ทำให้สะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาและเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบไฟฟ้าต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อกลั่นกรองข้อมูลซึ่งได้มาจากเครื่อง DFR โดยตรวจจับเฉพาะเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติ (Fault detection) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อทำการจำแนกประเภทของความผิดปกติออกเป็นประเภทต่างๆ (Fault classification)
3. เพื่อช่วยลดทรัพยากรเวลาและบุคลากรในการจัดการข้อมูลเหตุการณ์ซึ่งมีฐานข้อมูลจำนวนมาก

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิเคราะห์ข้อมูลเหตุการณ์ต่างๆซึ่งได้มาจากการบันทึกของเครื่อง DFR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยการประยุกต์เทคนิคการแปลงเวฟเลตช่วยสำหรับการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์จะทำการกลั่นกรองเหตุการณ์ต่างๆ ซึ่งจะแยกเฉพาะเหตุการณ์ที่เป็นผลมาจากการเกิดความผิดปกติเข้ามาเก็บไว้ในฐานข้อมูล และในส่วนของข้อมูลเหตุการณ์ซึ่งเกิดจากความผิดปกตินั้นจะทำการจำแนกประเภทของความผิดปกติต่อไป

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

ในการทำการวิจัย มีขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติ
2. ศึกษาเทคนิคการแปลงเวฟเลตเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราว และเหตุการณ์ในช่วงระยะเวลาสั้น
3. ทดสอบการทำงานของโปรแกรมโดยอาศัยข้อมูลเหตุการณ์จากการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTDC/PSCAD

4. วิเคราะห์เหตุการณ์จากข้อมูลจริงซึ่งได้มาจากเครื่อง DFR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า และเปรียบเทียบเหตุการณ์ต่างๆ เพื่อหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) ที่ต้องทำการกำหนดค่า เพื่อใช้ในการตรวจจับเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า

5. แยกข้อมูลเฉพาะเหตุการณ์ที่เป็นผลมาจากการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

6. วิเคราะห์เหตุการณ์ความผิดปกติประเภทต่างๆ จากข้อมูลจริงซึ่งได้มาจากเครื่อง DFR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า และเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการจำแนกประเภทความผิดปกติ

8. เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการจำแนกประเภทความผิดปกติอื่นๆ

7. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้
2. สามารถจำแนกประเภทของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอในที่นี้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งประกอบไปด้วยความรู้เบื้องต้นสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เป็นต้น

บทที่ 3 วิธีการตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติ จะกล่าวถึงวิธีการต่างๆที่ใช้ในการตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานเวฟเลทเพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติ จะกล่าวถึง วิธีการเลือกดัชนีต่างๆเพื่อประยุกต์นำการแปลงเวฟเลทเพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริง

บทที่ 5 นำเสนอผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะกล่าวถึงผลการทดลองทั้งจากการจำลองระบบไฟฟ้าและจากสัญญาณที่วัดที่จริงจากเครื่อง DFR โดยทำการเปรียบเทียบผลจากวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีการจำแนกประเภทความผิดปกติอื่นๆ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 6 นำเสนอบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องในอนาคต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

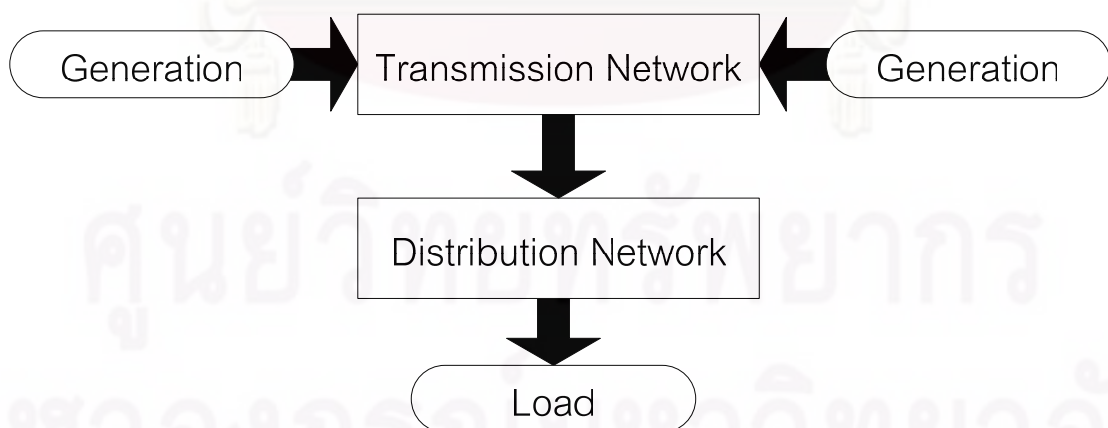
บทที่ 2

ทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เหตุการณ์ความผิดปกติ ซึ่งจะเป็นความรู้พื้นฐานเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงภาพรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นผู้เขียนจึงได้บรรยายแนะนำระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยรวมถึงส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งเครื่องมือต่างๆทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ช่วยในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณจากระบบไฟฟ้า

2.1 ความรู้เบื้องต้นของระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าประกอบไปด้วย ระบบผลิตไฟฟ้า(Generation System) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System) และระบบจำหน่าย(Distribution System) แต่ละระบบล้วนมีหน้าที่ความสำคัญแตกต่างกันออกไป โดยสามารถอธิบายภาพรวมของระบบไฟฟ้าได้ดังนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาจากรีเจนเนอเรชันไฟฟ้า โดยในการนำพลังงานไฟฟ้าไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือนนั้นจะต้องผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าเสียก่อน ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อให้สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าไปได้เป็นระยะไกล พร้อมทั้งยังสามารถลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย จากนั้นจะเป็นหน้าที่ของระบบจำหน่ายซึ่งทำหน้าที่ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือน โดยลดระดับของแรงดันลงเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย โดยภาพรวมของระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพรวมของระบบไฟฟ้า

ในส่วนของระบบไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในความรับผิดชอบของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) ส่วนระบบจำหน่ายจะอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.) ซึ่งดูแลการจ่ายไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) จะดูแลการจ่ายไฟฟ้าให้กับต่างจังหวัดทั่วทุกภาคของประเทศ ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ข้อมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ กฟผ.ในการศึกษา ดังนั้นผู้เขียนจึงจะขออธิบายภาพรวมเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

2.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย ประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีระดับแรงดัน 500 kV จำนวน 10 แห่ง ระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 68 แห่งและ ระดับแรงดัน 115 kV จำนวน 131 แห่ง ซึ่งติดตั้งอยู่ทั่วทั้งประเทศโดยมีสายส่งเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆซึ่งมีความยาวทั้งสิ้น 30,219 วงจรกิโลเมตร เพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ทั่วทั้งประเทศได้อย่างมั่นคงและมีประสิทธิภาพ

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นมีด้วยกันมากมาย เช่นสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้า ระบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์ที่สำคัญอีกอุปกรณ์หนึ่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นคือ เครื่องบันทึกข้อมูลความผิดปกติพร้อมแบบดิจิทัล (Digital Fault Recorder, DFR) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 เครื่องบันทึกข้อมูลความผิดปกติพร้อมแบบดิจิทัล

เครื่อง DFR ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจวัด (monitor) ระบบไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำการบันทึกข้อมูลของระบบไฟฟ้าในขณะที่เกิดความผิดปกติ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานในส่วนที่เกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น การหาจุดที่เกิดความผิดปกติเพื่อใช้ในการกู้ระบบไฟฟ้ากลับคืนสู่สภาวะปกติ การตรวจสอบการทำงานของระบบป้องกัน เป็นต้น รูปตัวอย่างอุปกรณ์ DFR แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปตัวอย่างอุปกรณ์ DFR

2.3.1 เงื่อนไขในการทำงานของ DFR

เงื่อนไขในการตรวจจับการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าของเครื่อง DFR เพื่อทำการบันทึกสัญญาณนั้น โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของแรงดันตก (Undervoltage) หรือขนาดกระแสเกิน (Overcurrent) ในแต่ละเฟส หรือตรวจจับจากการทำงานของสัญญาณดิจิทัล เช่นมีการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร หรือรีเลย์ระบบป้องกันมีการทำงาน เป็นต้น โดยหากเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเครื่อง DFR จะทำการบันทึกข้อมูลในทุกช่องสัญญาณที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าอยู่ในขณะนั้น

2.3.2 ช่องสัญญาณที่ใช้บันทึกข้อมูลของ DFR

เมื่อสามารถตรวจจับได้ว่าในขณะนั้นเกิดความผิดปกติขึ้น DFR จะทำการบันทึกสัญญาณของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งในการบันทึกสัญญาณนั้น ช่องสัญญาณที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) ช่องสัญญาณอนาล็อก (Analog) เพื่อใช้ในการบันทึกสัญญาณกระแสและแรงดันของทั้ง 3 เฟสของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าที่มีเครื่อง DFR ติดตั้งอยู่ ทั้งนี้รวมไปถึงกระแส

Polarized ซึ่งหมายถึงกระแสที่ไหลวนในขดลวดตัดขั้วขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งใช้เป็นตัวแทนในการตรวจจับความผิดปกติของแบบลงดิน

2) ช่องสัญญาณดิจิทัล (Digital) เพื่อใช้ในการบันทึกสัญญาณสถานะการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Circuit Breaker) และสถานะการทำงานของรีเลย์ป้องกันชนิดต่างๆ

โดยไฟล์ที่ได้มาจากการบันทึกข้อมูลของ DFR จะมีมาตรฐานในการบันทึกข้อมูลที่เรียกว่า Common Format for Transient Data Exchange (ตามมาตรฐาน COMTRADE IEEE C37.111.1999) ซึ่งไฟล์ข้อมูลจะเป็นไฟล์รูปแบบ Comma Separate Values (CSV Format)

2.3.3 ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล

ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูลเหตุการณ์ในแต่ละครั้งนั้น จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเกิดความผิดปกติในแต่ละครั้ง ซึ่งในแต่ละข้อมูลที่ DFR บันทึกเข้ามานั้นจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ (Pre-fault) ช่วงระหว่างเกิดความผิดปกติ (During-Fault) และช่วงเวลาหลังจากเกิดความผิดปกติ (Post-Fault) โดยระยะเวลาในช่วงก่อนเกิดและหลังเกิดความผิดปกตินั้นผู้ปฏิบัติงานจะสามารถตั้งค่าได้ แต่ในส่วนของช่วงเวลาระหว่างการเกิดความผิดปกติจะขึ้นอยู่กับการคงอยู่ของเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติที่กำหนด จนถึงขนาดสูงสุดของข้อมูลที่ DFR สามารถบันทึกได้

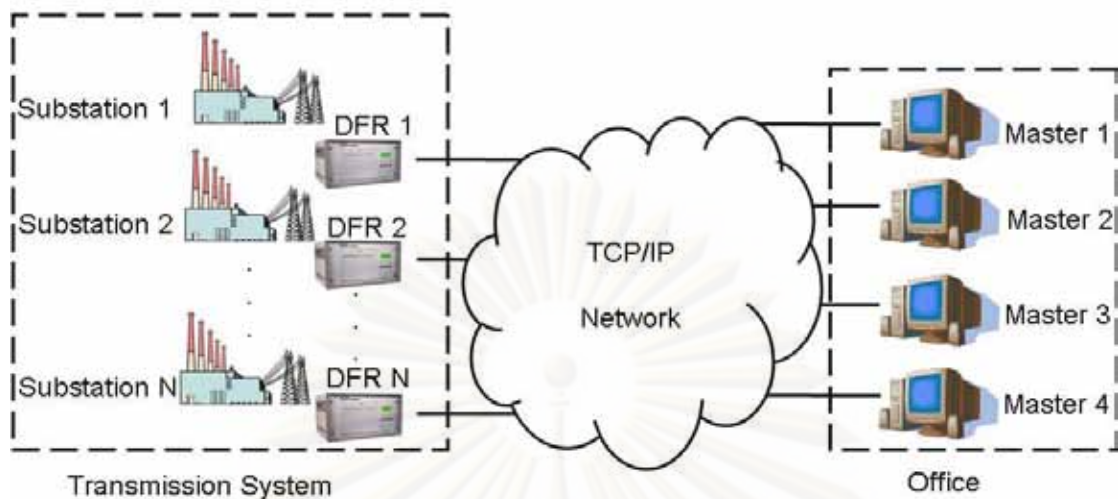
โดยทั่วไป เพื่อให้ขนาดของข้อมูลที่บันทึกไม่มีขนาดใหญ่จนเกินไป การบันทึกข้อมูลช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ และหลังการเกิดความผิดปกติควรมีระยะเวลาที่สั้น แต่ข้อมูลนั้นต้องยังไม่สูญเสียความสำคัญของข้อมูลไป ข้อมูลในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติใช้เพื่อบอกสถานะของระบบไฟฟ้าในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติว่าระบบไฟฟ้าว่าเป็นอย่างไร ดังนั้นข้อมูลในส่วนนี้ควรมีระยะเวลาที่สั้นแต่ต้องยังคงความสำคัญของข้อมูลไว้ได้ ในส่วนของช่วงระหว่างเกิดความผิดปกติ ระยะเวลาในการบันทึกจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร รวมไปถึงการทำงานของรีเลย์ชนิดปิดซ้ำ (Reclosing relay) ซึ่งจะสามารถประมาณได้จากการระยะเวลาในการปิดซ้ำของระบบป้องกันของอุปกรณ์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นเอง ในส่วนของระยะเวลาของช่วงหลังการเกิดความผิดปกติสามารถระบุได้เมื่อเงื่อนไขต่างๆในการตรวจจับความผิดปกติทุกเงื่อนไขหายไป ซึ่งระยะเวลาในช่วงหลังเกิดความผิดปกติจะเป็นไปตามที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้

โดยทั่วไปแล้ว กฟผ. จะตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้บันทึกข้อมูลเหตุการณ์ความผิดปกติของ DFR ดังต่อไปนี้

- จุดเริ่มเปลี่ยนของแรงดันตกเท่ากับ 85 % ของค่าแรงดันปกติ
- จุดเริ่มเปลี่ยนของกระแสเกินเท่ากับ 120 % ของพิกัดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส (Current transformer)
- ระยะเวลาช่วงก่อนเกิดความผิดปกติเท่ากับ 150 ms.
- ระยะเวลาช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติเท่ากับ 2 sec.
- ระยะเวลารวมทั้งเหตุการณ์ประมาณ 4 sec.

2.4 ระบบบันทึกความผิดปกติของ กฟผ.

ระบบบันทึกความผิดปกติที่ กฟผ. ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เพื่อบันทึกข้อมูลความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบไปด้วย Master Station ของแต่ละผู้ผลิต ซึ่งจะติดตั้งอยู่ที่สำนักงานใหญ่ของ กฟผ ส่วน DFR จะติดตั้งกระจายอยู่ตามสถานีไฟฟ้าแรงสูงทั่วประเทศ โดยในปัจจุบันสถานีไฟฟ้าระดับแรงดันไฟฟ้า 500 kV และ 230 kV มีการติดตั้ง DFR หมดแล้วทุกสถานีไฟฟ้า ส่วนสถานีไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV จะติดตั้งเฉพาะสถานีไฟฟ้าที่สำคัญ โดยรวมจำนวน DFR ที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมากกว่า 100 ยูนิต ซึ่งเมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องการข้อมูลสัญญาณที่บันทึกเก็บไว้ใน DFR ตามสถานีไฟฟ้าต่างๆ เพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์ จะสามารถเรียกข้อมูลเหล่านั้นได้ในลักษณะของการดาวน์โหลดข้อมูลผ่านระบบสื่อสารซึ่งเป็นระบบโมเด็ม (Modem) หรือระบบ Local Area Network (LAN) มายัง Master Station ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่สำนักงานใหญ่ โดยแผนผังระบบบันทึกความผิดปกติแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



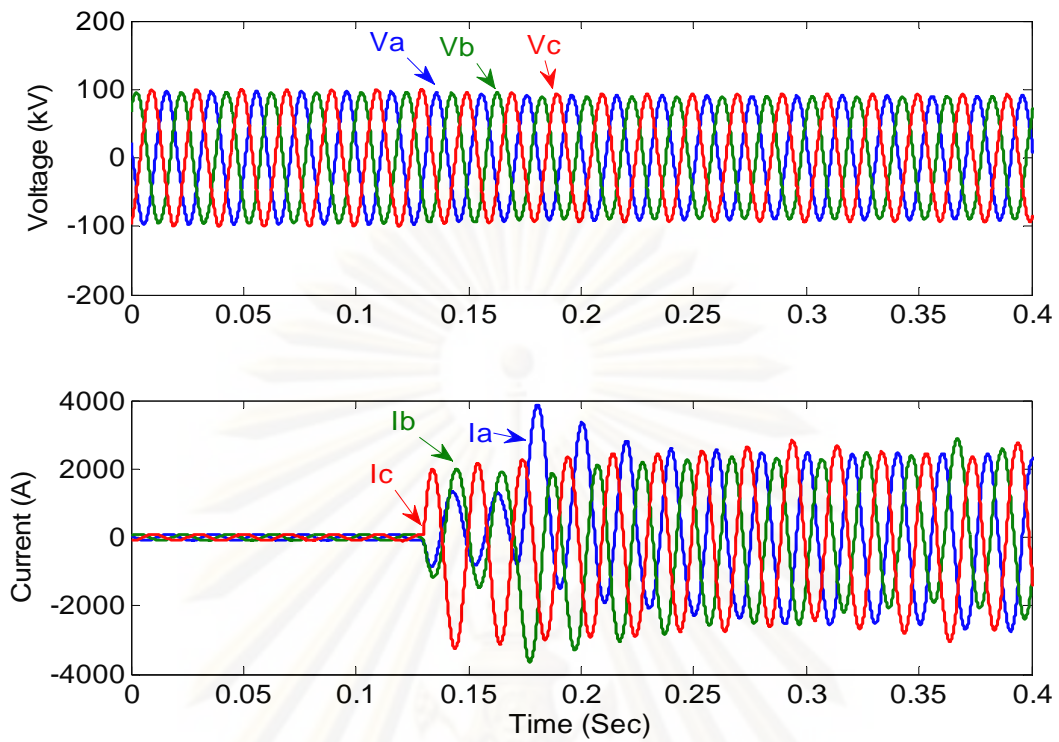
รูปที่ 2.3 ระบบบันทึกความผิดปกติ

2.5 ความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

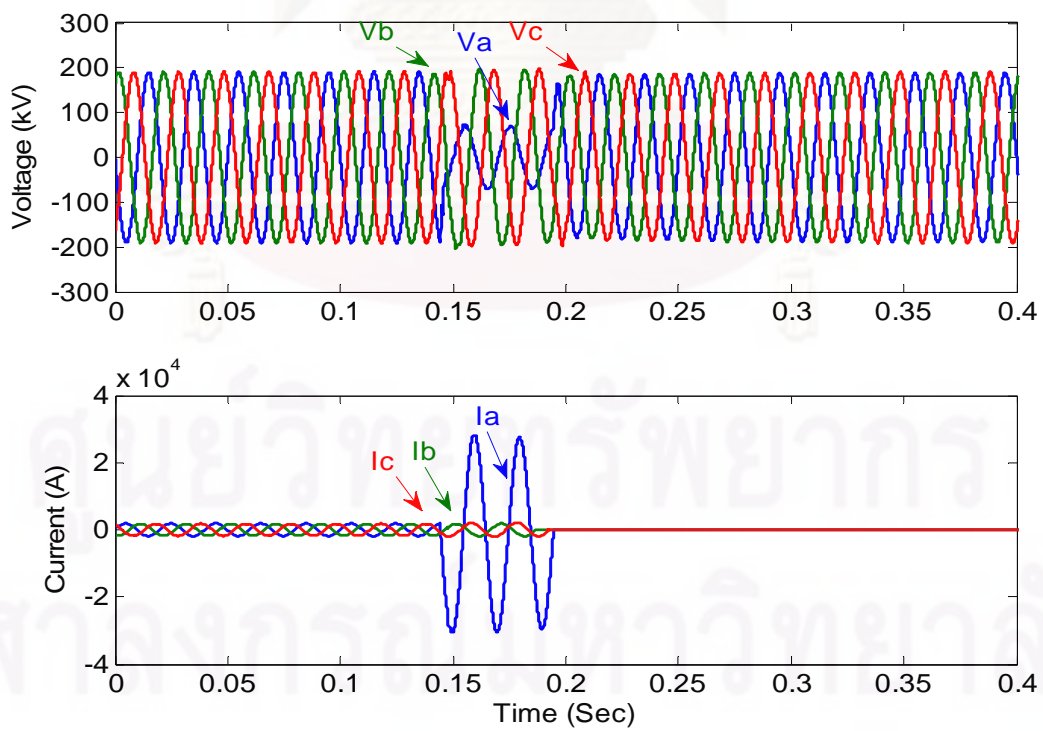
โดยทั่วไปความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจะเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวน วาบไฟ (Flashover) หรือจากความผิดพลาดจากตัวบุคคล เป็นต้น โดยชนิดของความผิดปกตินั้นเมื่อใช้ความสมดุลการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสและแรงดันทั้ง 3 เฟส เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีความผิดปกติแบบสมดุล เป็นกรณีที่ขนาดแรงดันในแต่ละเฟสที่ลดลงมีขนาดใกล้เคียงกันทั้ง 3 เฟส ได้แก่ ความผิดปกติแบบสามเฟส (Three phase fault) ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดปกติประเภทสามเฟสแสดงดังรูปที่ 2.4

2. กรณีความผิดปกติแบบไม่สมดุล เป็นกรณีที่ขนาดของแรงดันในแต่ละเฟสที่ลดลงมีขนาดไม่เท่ากันทั้งสามเฟส ได้แก่ ความผิดปกติแบบเฟสเดียวลงดิน (Single line to ground fault), ความผิดปกติแบบสองเฟสลงดิน (Double line to ground fault), ความผิดปกติแบบสองเฟส (Line to line fault) ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดปกติประเภทหนึ่งเฟสลงดินแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดพลาดประเภทสามเฟส

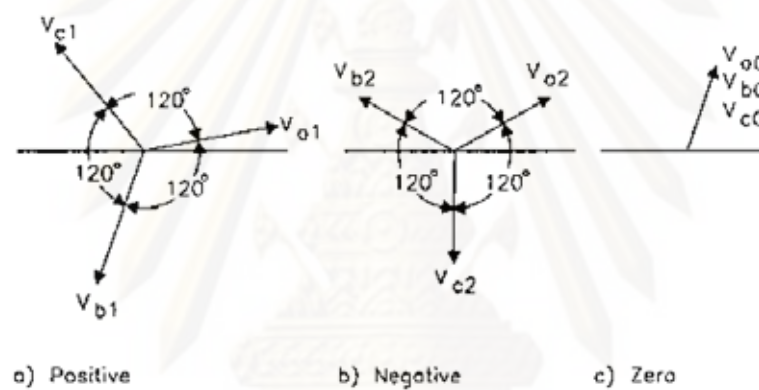


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสในกรณีความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน

2.6 ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)

ส่วนประกอบสมมาตรเป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ในสถานะที่ไม่สมดุลสำหรับระบบไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยอ้างอิงไปสู่ระบบไฟฟ้าสมดุลจำนวน 3 ระบบซึ่งเรียกว่าส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Components) ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components) และส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component)

ส่วนประกอบลำดับบวกประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน มุมเฟสต่างกัน 120 องศา ส่วนประกอบลำดับลบ ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน มุมเฟสต่างกัน 120 องศา แต่มีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับส่วนประกอบลำดับบวก ส่วนประกอบลำดับศูนย์ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน มุมเฟสเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เฟสเซอร์ของส่วนประกอบสมมาตร

โดยการแปลงเฟสเซอร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟส ไปสู่ส่วนประกอบลำดับทั้ง 3 นั้นสามารถแปลงได้ดังนี้

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.1)$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.2)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2.3)$$

โดย I_{a0} คือ ส่วนประกอบลำดับศูนย์ของกระแสที่อ้างอิงเฟส A
 I_{a1} คือ ส่วนประกอบลำดับบวกของกระแสที่อ้างอิงเฟส A
 I_{a2} คือ ส่วนประกอบลำดับลบของกระแสที่อ้างอิงเฟส A
 a คือ $1 \angle 120^\circ$

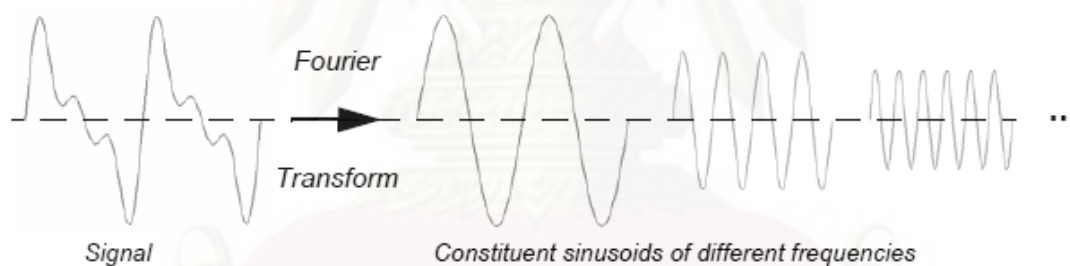
2.7 เทคนิคในการวิเคราะห์สัญญาณ

2.7.1 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยร์ เป็นรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็น การแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของการแตกองค์ประกอบของสัญญาณใดๆให้อยู่ในรูปของผลรวมของ ฟังก์ชันไซน์ หรือโคไซน์ที่มีขนาดและความถี่ที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยหากวิเคราะห์จาก สัญญาณที่เป็นสัญญาณในโดเมนเวลาแบบต่อเนื่องแล้วนั้น การแปลงฟูรีเยร์แบบต่อเนื่องสามารถ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.4)$$

โดย $x(t)$ คือ สัญญาณขาเข้าในโดเมนเวลา
 $X(\omega)$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงฟูรีเยร์ในโดเมนความถี่



รูปที่ 2.7 การแปลงฟูรีเยร์

ในทางปฏิบัตินั้นข้อมูลสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์ ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณที่อยู่ใน รูปแบบของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) เนื่องจากได้ถูกสุ่มสัญญาณออกเป็นช่วงๆ ดังนั้น การแปลงฟูรีเยร์จึงได้ถูกปรับปรุงมาเพื่อให้สามารถใช้งานกับข้อมูลเหล่านี้ได้ โดยเรียก กระบวนการดังกล่าวว่าการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform) ซึ่งสามารถ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.5)$$

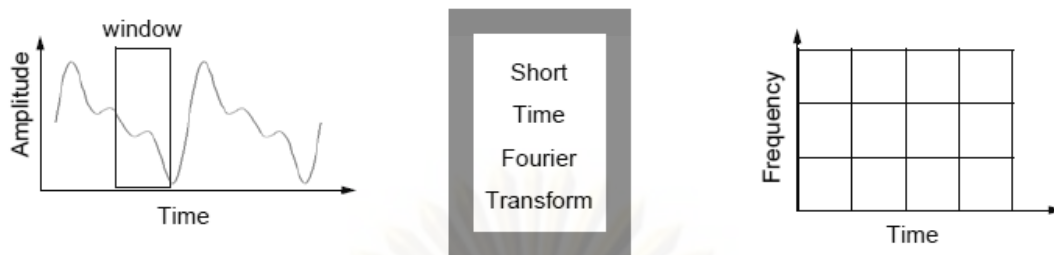
โดย $x[n]$ คือ สัญญาณขาเข้าในโดเมนเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง
 $X[k]$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง
 N คือ จำนวนข้อมูลสุ่มต่อ 1 คาบสัญญาณ

การแปลงฟูเรียร์ทั้ง 2 แบบข้างต้นนั้น ให้ผลลัพธ์ที่ดีในด้านของโดเมนความถี่ และเหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary Signal) แต่ข้อเสียของการแปลงฟูเรียร์คือ ในกรณีที่ทำการวิเคราะห์กับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงคาบเวลาอยู่ตลอดเวลา (Non-Stationary Signal) เช่น สัญญาณประเภทปรากฏการณ์ชั่วคราว (Transient) ซึ่งหากนำการแปลงฟูเรียร์มาทำการวิเคราะห์กับสัญญาณประเภทนี้แล้วจะทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้ รวมถึงยังไม่มีข้อมูลในส่วนช่วงเวลาอีกด้วย

ในการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นปรากฏการณ์ชั่วคราวประเภทหนึ่งนั้น นอกจากข้อมูลทางด้านความถี่ของสัญญาณแล้วนั้น ข้อมูลทางด้านเวลาก็ถือว่าเป็นข้อมูลส่วนสำคัญมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณให้เหมาะสมกับสัญญาณประเภทนี้ วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform) ซึ่งจะแบ่งสัญญาณออกมาเป็นช่วงๆ ซึ่งทำให้สามารถประมาณได้ว่าช่วงสัญญาณนั้นๆ เป็นสัญญาณที่มีคาบเวลาที่แน่นอน โดยการแบ่งช่วงสัญญาณนั้นสามารถกำหนดได้โดยผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function) โดยหากแบ่งสัญญาณให้แคบขึ้นจะให้ความละเอียดของข้อมูลทางด้านเวลาที่ดีขึ้น แต่ข้อมูลความละเอียดทางด้านของความถี่จะแยลงรูปภาพการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$X(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot W(t - \tau) \cdot e^{-j\omega\tau} dt \quad (2.6)$$

โดย $x(t)$ คือ สัญญาณขาเข้าในโดเมนเวลา
 $X(\omega)$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงฟูเรียร์ในโดเมนความถี่
 $W(t - \tau)$ คือ ฟังก์ชันของหน้าต่างในการวิเคราะห์
 τ คือ ฟังก์ชันการเลื่อนของหน้าต่าง

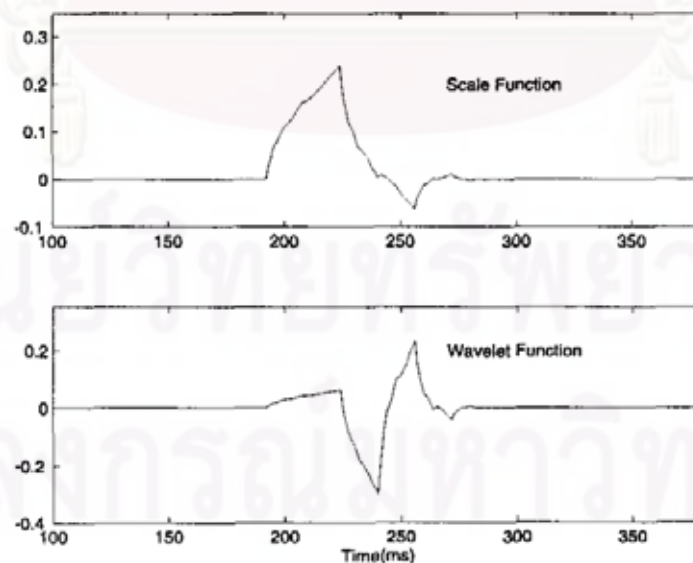


รูปที่ 2.8 การแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น

จะเห็นได้ว่าการแปลงฟูรีเยร์ช่วงเวลานั้น จะใช้ช่วงของหน้าต่างในการวิเคราะห์ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นอาจจะไม่เหมาะสมนัก เนื่องมาจากสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงนั้นประกอบไปด้วยข้อมูลที่มีความถี่ต่างๆกันออกไป ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูงนั้นควรจะใช้ช่วงของหน้าต่างที่แคบ ในทางกลับกันสำหรับสัญญาณความถี่ต่ำช่วงของหน้าต่างในการวิเคราะห์ก็ควรที่จะกว้างขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ที่มีการปรับความละเอียดในการวิเคราะห์สัญญาณได้ซึ่งเรียกว่า การแปลงเวฟเลท (Wavelet transform)

2.7.2 การแปลงเวฟเลท

การแปลงเวฟเลทจะใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆที่เรียกว่า “เวฟเลท” โดยจะมี Scaling function และ Wavelet function แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Scaling function และ Wavelet function ของ Daubechies' Wavelet

รูปคลื่นเวฟเลทแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลทต้นกำเนิด ที่เรียกว่า เวฟเลทแม่ (Mother wavelet) คลื่นเวฟเลทแต่ละอันจะอยู่ภายในเซตของเวฟเลทนี้โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล a และการเลื่อนตำแหน่ง b โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left[\frac{t-b}{a} \right] \quad (2.7)$$

โดยค่า a และ b จะแสดงรูปแบบของฟังก์ชันเวฟเลทดังรูปที่ 2.10 – 2.11



รูปที่ 2.10 คุณสมบัติการขยายและลดสเกลของฟังก์ชันเวฟเลท



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเลท

การแปลงเวฟเลทสามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราวได้ดี เนื่องจากผลการแปลงเวฟเลทจะมีความไวกับสัญญาณเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นจึงใช้ข้อดีดังกล่าวในการตรวจจับความผิดปกติ ซึ่งเราจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การกระจายสัญญาณหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Signal Decomposition Analysis, MRA) โดยจะใช้ฟังก์ชันเวฟเลทแม่คือ Daubechies wavelet แบบ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากคลื่นไซน์ โดยกำหนดให้ $C_0(n)$ เป็นสัญญาณที่บันทึกได้จากการตรวจวัดโดยเป็นสัญญาณแบบเต็มหน่วย (Discrete time) และกำหนดให้ผลการกระจายสัญญาณในสเกลที่ 1 (level 1) เป็น $C_1(n)$ และ $D_1(n)$ โดยที่ $C_1(n)$ เป็นส่วนหยาบ (Approximate) ของสัญญาณ $C_0(n)$ และ $D_1(n)$ เป็นส่วนละเอียด (Detail) ของสัญญาณ $C_0(n)$ ซึ่งเราจะสามารถหาผลการกระจายสัญญาณได้ดังนี้

$$C_1(n) = \sum_k h(k-2n) \cdot C_0(k) \quad (2.8)$$

$$D_1(n) = \sum_k g(k-2n) \cdot C_0(k) \quad (2.9)$$

โดยที่ $h(n)$ และ $g(n)$ เป็นสัมประสิทธิ์ตัวกรองเวฟเลท และในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการหาการกระจายสัญญาณในสเกลที่ 2 (level 2) จะได้ว่า

$$C_2(n) = \sum_k h(k-2n) \cdot C_1(k) \quad (2.10)$$

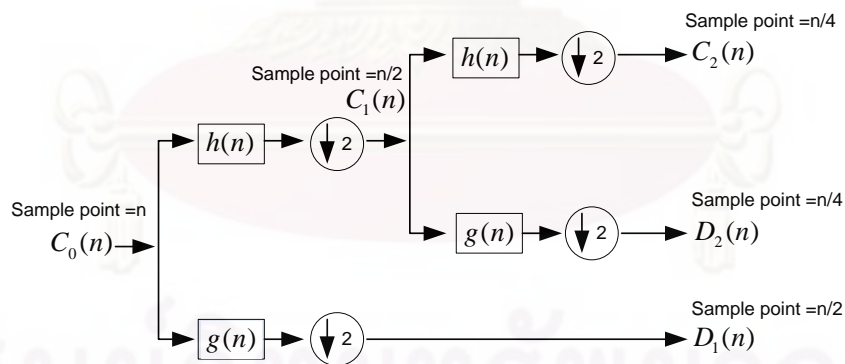
$$D_2(n) = \sum_k g(k-2n) \cdot C_1(k) \quad (2.11)$$

และในทำนองเดียวกันสำหรับที่ระดับความละเอียดที่สเกลอื่นๆ จะได้ว่า

$$C_N(n) = \sum_k h(k-2n) \cdot C_{N-1}(k) \quad (2.12)$$

$$D_N(n) = \sum_k g(k-2n) \cdot C_{N-1}(k) \quad (2.13)$$

โดย N เป็นระดับความละเอียดที่สเกลใดๆ ซึ่งจากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่สเกล 2 ระดับ

โดยในการศึกษาวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราวนั้น นิยมใช้สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียด ในระดับต่างๆ เนื่องจากเป็นระดับที่สัมพันธ์กับความถี่สูง

บทที่ 3

วิธีการตรวจจับและจำแนกประเภทของความผิดปกติ

3.1 การตรวจจับความผิดปกติ

ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ประเภทความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติ ซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณของ กระแส หรือ แรงดันไฟฟ้า เพื่อจำแนกเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติออกจากเหตุการณ์ปกติทั่วไปของระบบไฟฟ้า และจากนั้นจึงจำแนกประเภทของความผิดปกตินั้นๆ เพื่อนำผลลัพธ์ไปใช้ในการวิเคราะห์หรืออื่นๆต่อไป เช่นการหาตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ เป็นต้น

เทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกตินั้นมีด้วยกันหลายอย่าง โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆได้ดังนี้

1. เทคนิคการตรวจจับโดยใช้ข้อมูลสัญญาณที่ความถี่หลักมูล (50 เฮิร์ตซ์) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้งานกันเป็นอย่างมากเนื่องจากมีความยุ่งยากน้อย ตัวอย่างเทคนิคประเภทนี้ได้แก่ เทคนิคการตรวจจับความผิดปกติโดยตรวจสอบจากขนาดของกระแสสาย หรือ แรงดันในแต่ละเฟส [1 - 3]
2. เทคนิคการตรวจจับโดยใช้ข้อมูลสัญญาณที่ความถี่สูง ใช้หลักการว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้านั้น ช่วงที่เกิดจะมีความถี่สูง (สภาวะชั่วคราว) เกิดขึ้นด้วยเทคนิคนี้จึงได้นำความถี่สูงดังกล่าวมาใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ โดยส่วนใหญ่แล้วเทคนิคประเภทนี้จะใช้การแปลงเวฟเล็ตเข้าช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด [3 - 9]

3.1.1 การตรวจจับโดยใช้ข้อมูลขนาดของกระแสสาย

ในช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้านั้น ขนาดของกระแสสายในเฟสที่เกิดความผิดปกติจะมีค่าสูงกว่าสภาวะปกติมาก ดังนั้นวิธีการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีนี้ จึงได้นำค่าขนาดของกระแสสาย ณ เวลาใดๆ มาทำการเปรียบเทียบกับค่าขนาดของกระแสในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ (กระแสไหล) หากค่าสัดส่วนระหว่างกระแสในช่วงเวลานั้นเทียบกับกระแสในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติมีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดที่เฟสใดเฟสหนึ่ง แสดงว่า

สัญญาณที่นำมาวิเคราะห์นั้น เป็นเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติ โดยสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

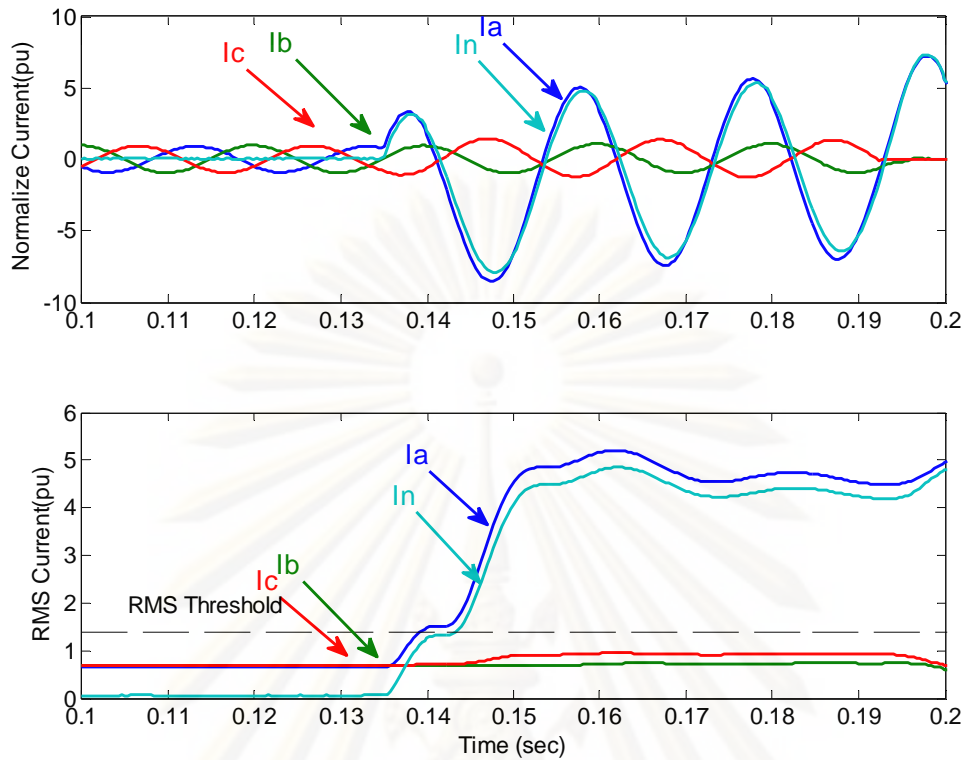
$$k_{1a} = \frac{|I_a|}{|I_{a-prefault}|} > I_{th} \quad (3.1)$$

$$k_{1b} = \frac{|I_b|}{|I_{b-prefault}|} > I_{th} \quad (3.2)$$

$$k_{1c} = \frac{|I_c|}{|I_{c-prefault}|} > I_{th} \quad (3.3)$$

โดย $|I_{ph}|$ คือ ค่าขนาดของกระแสเฟส โดย ph คือเฟส A, B และ C
 $|I_{ph-prefault}|$ คือ ค่าขนาดของกระแสในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติของเฟสใดๆ
 I_{th} คือ ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของสัดส่วนขนาดกระแสเทียบกับช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ

วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ค่อยซับซ้อน ดังนั้นวิธีการตรวจจับวิธีนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้งานกับงานรูปแบบต่างๆ เช่นงานระบบป้องกันกระแสเกิน(Over Current) เป็นต้น ในการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีดังกล่าวนั้น จะกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนค่าๆหนึ่ง เพื่อใช้ในการตรวจจับว่าสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีผลมาจากการเกิดความผิดปกติขึ้นหรือไม่ โดยรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดินด้วยค่าขนาดกระแส RMS

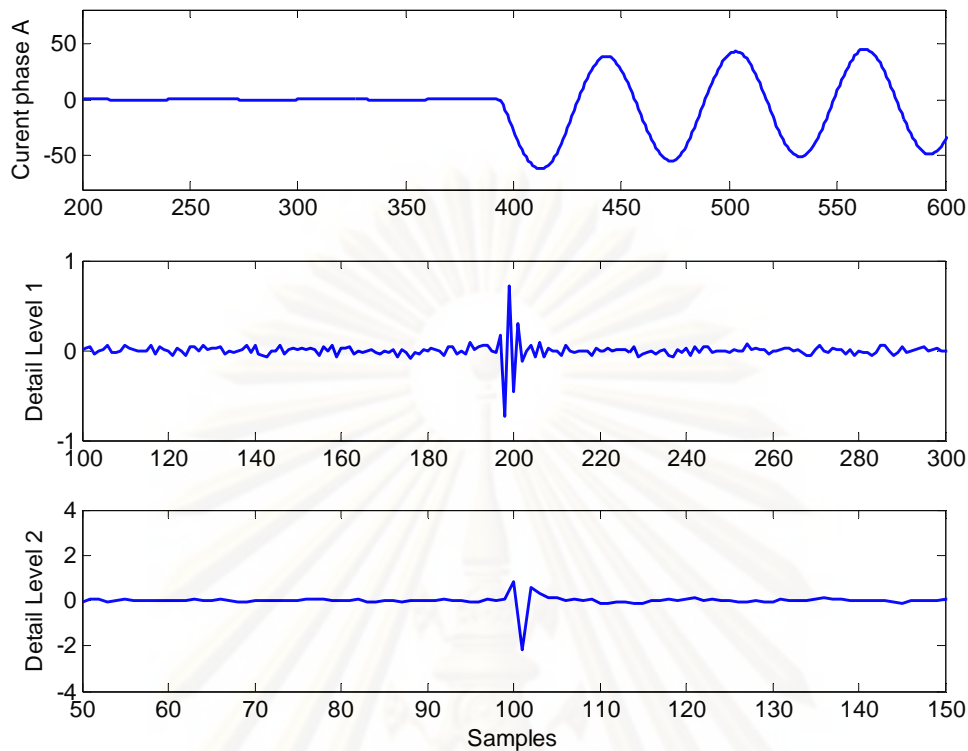


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดินด้วยขนาดของกระแสสาย

3.1.2 การตรวจจับด้วยวิธีการแปลงเวฟเลท

วิธีการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีการนี้ จะใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ช่วยในการวิเคราะห์ได้แก่ การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) ซึ่งมีความสามารถในการแยกส่วนประกอบของสัญญาณออกมาได้ทั้งในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

เนื่องจากความผิดพร่องนั้นเป็นเหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราวประเภทหนึ่ง ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดทั้งในส่วนของรูปคลื่นกระแสและแรงดัน ดังนั้นในการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีการแปลงเวฟเลทนั้น จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียด (Detailed Coefficient) ซึ่งสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดของสัญญาณ ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 1 และระดับชั้นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A ในขณะที่เกิดความผิดปกติและค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดระดับขั้นที่ 1 และ 2

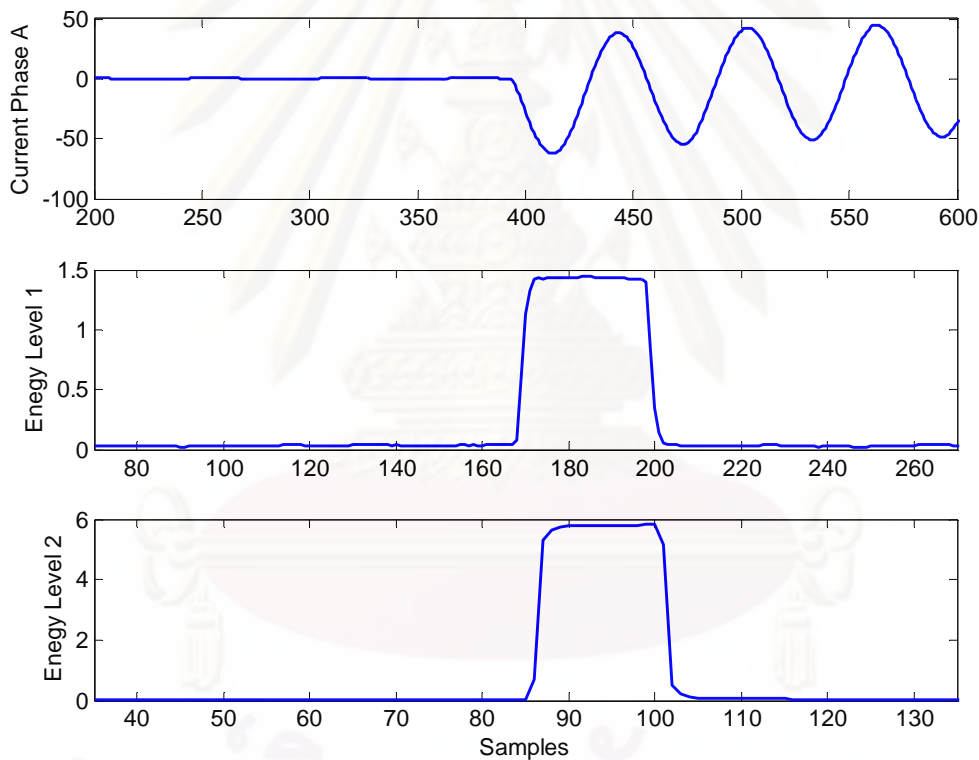
จากรูปที่ 3.2 สังเกตเห็นว่าในช่วงที่ก่อนการเกิดความผิดปกติ ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดจะมีค่าน้อยๆ และเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (เกิดความผิดปกติขึ้น) ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดจะมีค่าสูงขึ้นมาก ดังคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น การตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีนี้จึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดมาหาค่าพลังงาน (Spectral energy) เพื่อตรวจสอบว่าค่าพลังงานที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ นั้นมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด (จุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้) หรือไม่ โดยหากมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด แสดงว่าสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นเหตุการณ์ที่เป็นผลมาจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

การคำนวณหาค่าพลังงานนั้นจะใช้เทคนิคที่เรียกว่าการเลื่อนหน้าต่าง (Moving window) เข้ามาช่วย โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างทำการแบ่งสัญญาณสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดออกมาเป็นช่วงๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ช่วงนั้นๆ โดยจะเลื่อนหน้าต่างไปที่ละ 1 ตัวอย่างจนจบรูปคลื่นของสัญญาณ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SE_j = \sum_{k=1}^{N_w/2^j} [D_j(k)]^2 \quad (3.4)$$

โดย $D_j(k)$ คือ สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดที่สเกล j ใดๆ
 N_w คือ จำนวนสัญญาณสุ่มต่อ 1 คาบที่ความถี่หลักมูล

ดังที่ได้กล่าวมานั้นในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้านั้นค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดจะมีค่าน้อยมากโดยมีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์(ในทางทฤษฎี) และในขณะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าพลังงานดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าเดิมมาก ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและพลังงานของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 1 และระดับชั้นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสเฟส A ในขณะเกิดความผิดปกติและค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดระดับชั้นที่ 1 และ 2

3.2 การจำแนกประเภทของความผิดปกติ

หลังจากที่สามารถแยกแยะได้ว่าเหตุการณ์ใดเป็นเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติแล้วนั้น จะนำเหตุการณ์ความผิดปกติดังกล่าวมาจำแนกประเภทว่าเป็นความผิดปกติประเภทใด

โดยการวิเคราะห์ประเภทของความผิดพลาดนั้นเป็นการวิเคราะห์ที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากข้อมูลประเภทของความผิดพลาดนั้นเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นในการในการวิเคราะห์อื่นๆต่อไป เช่น การหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด เป็นต้น โดยวิธีที่ใช้ในการจำแนกความผิดพลาดนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.2.1 การจำแนกประเภทของความผิดพลาดด้วยเงื่อนไขขนาดของกระแสสาย

การจำแนกความผิดพลาดแต่ละประเภทโดยใช้เงื่อนไขขนาดของกระแสสายนั้น จะจำแนกโดยดูจากสัดส่วนระหว่างค่าขนาดของกระแสในขณะนั้นๆ เทียบกับช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด (กระแสไหลลด) หากค่าสัดส่วนของกระแสสายในเฟสใดมีค่ามากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดไว้ (เช่น $I_{th} = 2$) แสดงว่าเฟสดังกล่าวเป็นเฟสที่เกิดความผิดพลาดขึ้น โดยเงื่อนไขสำหรับความผิดพลาดแต่ละประเภทแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการจำแนกความผิดพลาดด้วยวิธีในหัวข้อ 3.2.1

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี k_{1a}	ดัชนี k_{1b}	ดัชนี k_{1c}	ดัชนี k_{1n}
A – G	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$
B – G	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$
C – G	$< I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$
A – B	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$< I_{th}$
B – C	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$
C – A	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$
A – B – G	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$
B – C – G	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$
C – A – G	$> I_{th}$	$< I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$
A – B – C	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$> I_{th}$	$< I_{th}$

3.2.2 การจำแนกประเภทของความผิดพลาดด้วยเงื่อนไขขนาดของกระแสสาย โดยปรับปรุงแก้ไขค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการปรับปรุงวิธีการในหัวข้อ 3.2.1 เพื่อให้สามารถจำแนกประเภทของความผิดพลาดได้ดียิ่งขึ้น โดยได้ทำการปรับปรุงค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้ขึ้นอยู่กับค่าขนาดสูงสุดของกระแสสาย แทนที่จะขึ้นอยู่กับค่าขนาดในช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดนั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ค่า ซึ่งค่าแรกใช้งานสำหรับตรวจสอบขนาดของกระแสสายในเฟสที่

เกิดความผิดปกติ ($I_{th-ph} = I_{max}/2$) และค่าที่สองนั้นใช้สำหรับตรวจสอบขนาดของกระแสผิดพลาดเพื่อใช้ในกรณีที่เกิดความผิดปกติประเภทลงดิน ($I_{th-neutral} = I_{max}/5$) โดยเงื่อนไขสำหรับความผิดปกติแต่ละประเภทแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการจำแนกความผิดปกติด้วยวิธีในหัวข้อ 3.2.2

ประเภทความผิดปกติ	$ I_a $	$ I_b $	$ I_c $	$ I_n $
A – G	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
B – G	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
C – G	$< I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
A – B	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$< I_{max}/5$
B – C	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/5$
C – A	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/5$
A – B – G	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
B – C – G	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
C – A – G	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/5$
A – B – C	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$> I_{max}/2$	$< I_{max}/5$

3.2.3 การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ

การจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับนั้น เป็นการจำแนกโดยวิเคราะห์จากมุมเฟสและค่าขนาดของกระแสลำดับ [1, 2] โดยวิธีการดังกล่าวนี้สามารถพิสูจน์ในทางทฤษฎีได้ดังภาคผนวก ข. โดยดัชนีซึ่งใช้ในการจำแนกประเภทของความผิดปกติมีดังต่อไปนี้

- ดัชนีผลต่างของมุมเฟสของเฟสเซอร์กระแสเฟส และเฟสเซอร์กระแสลำดับบวกโดยอ้างอิงกับเฟสนั้นๆ

$$k_{2a} = |\angle I_a - \angle I_{a1}| \quad (3.5)$$

$$k_{2b} = |\angle I_b - \angle I_{b1}| \quad (3.6)$$

$$k_{2c} = |\angle I_c - \angle I_{c1}| \quad (3.7)$$

- ดัชนีผลต่างของมุมเฟสของเฟสเซอร์กระแสลำดับบวก และเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ โดยอ้างอิงกับเฟสนั้นๆ

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| \quad (3.8)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| \quad (3.9)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| \quad (3.10)$$

- ดัชนีค่าสัดส่วนระหว่างขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับที่ศูนย์ และเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ ต่อ เฟสเซอร์กระแสลำดับบวก

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} \quad (3.11)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (3.12)$$

โดย $\angle I_{ph}$ คือ	มุมของเฟสเซอร์กระแสเฟส โดย ph คือเฟส A, B และ C
$\angle I_{ph1}$ คือ	มุมของเฟสเซอร์กระแสลำดับบวก ที่อ้างอิงตามเฟสใดๆ
$\angle I_{ph2}$ คือ	มุมของเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ ที่อ้างอิงตามเฟสใดๆ
$ I_0 $ คือ	ค่าขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับศูนย์
$ I_1 $ คือ	ค่าขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับบวก
$ I_2 $ คือ	ค่าขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ

ดัชนีต่างๆดังที่ได้กล่าวมานั้น จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขต่างๆเพื่อใช้ในการจำแนกความผิดปกติในแต่ละประเภท ดังนี้

- เงื่อนไขในกรณีความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดิน ซึ่งยกตัวอย่างเฉพาะกรณีประเภทเฟส A ลงดิน ดังสมการต่อไปนี้

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 0^\circ \quad (3.13)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 120^\circ \quad (3.14)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 120^\circ \quad (3.15)$$

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} > \delta \quad (3.16)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} > \varepsilon \quad (3.17)$$

- เงื่อนไขในกรณีความผิดพลาดประเภท 2 เฟส ซึ่งยกตัวอย่างเฉพาะกรณีประเภทเฟส A และ เฟส B ดังสมการต่อไปนี้

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 60^\circ \quad (3.18)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 60^\circ \quad (3.19)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 180^\circ \quad (3.20)$$

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} < \delta \quad (3.21)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} > \varepsilon \quad (3.22)$$

- เงื่อนไขในกรณีความผิดพลาดประเภท 2 เฟสลงดิน ซึ่งยกตัวอย่างเฉพาะกรณีประเภทเฟส A และ เฟส B ลงดินดังสมการต่อไปนี้

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 60^\circ \quad (3.23)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 60^\circ \quad (3.24)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 180^\circ \quad (3.25)$$

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} > \delta \quad (3.26)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} > \varepsilon \quad (3.27)$$

- เงื่อนไขในกรณีเกิดความผิดพลาดประเภท 3 เฟส

$$k_{2a} = |\angle I_a - \angle I_{a1}| = 0^\circ \quad (3.28)$$

$$k_{2b} = |\angle I_b - \angle I_{b1}| = 0^\circ \quad (3.29)$$

$$k_{2c} = |\angle I_c - \angle I_{c1}| = 0^\circ \quad (3.30)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} < \varepsilon \quad (3.31)$$

ในระบบไฟฟ้าจริงนั้น มุมของดัชนีชี้วัดต่างๆอาจจะมีค่าไม่ตรงตามทฤษฎี ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาด มุมที่เกิดความผิดพลาด ส่วนประกอบกระแสตรงของความผิดพลาด ผลของกระแสไหลต เป็นต้น โดย [1] ได้ประมาณค่าของมุมที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าทางทฤษฎีโดยเงื่อนไขสำหรับความผิดพลาดแบบสมดุลแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และสำหรับความผิดพลาดแบบไม่สมดุลแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการจำแนกความผิดพลาดประเภทสมดุล

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี k_{2a}	ดัชนี k_{2b}	ดัชนี k_{2c}
A-B-C	0 - 20°	0 - 20°	0 - 20°

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการจำแนกความผิดพลาดประเภทไม่สมดุล

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี k_{2a12}	ดัชนี k_{2b12}	ดัชนี k_{2c12}	ดัชนี I_{01}	ดัชนี I_{21}
A-G	0-20°	100°-140°	100°-140°	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
B-G	100°-140°	0-20°	100°-140°	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
C-G	100°-140°	100°-140°	0-20°	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
A-B	30°-90°	30°-90°	$>150°$	$< I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
B-C	$>150°$	30°-90°	30°-90°	$< I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
C-A	30°-90°	$>150°$	30°-90°	$< I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
A-B-G	30°-90°	30°-90°	$>150°$	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
B-C-G	$>150°$	30°-90°	30°-90°	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$
C-A-G	30°-90°	$>150°$	30°-90°	$> I_{01-pf}$	$> I_{21-pf}$

โดยที่ I_{01-pf} และ I_{21-pf} เป็นค่าดัชนี I_{01} และ I_{21} ในช่วงก่อนเกิดความผิดพลาด

3.2.4 การจำแนกประเภทของความผิดพลาดด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ โดยปรับปรุงค่าขนาดและมุมเฟส

[10] ได้นำวิธีการในหัวข้อที่ 3.2.3 ไปทดสอบกับสัญญาณจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริงนั้นพบว่าหากใช้ค่ามุมและขนาดของกระแสที่เบี่ยงเบนจากทฤษฎีตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 แล้วนั้นจะทำให้ผลลัพธ์จากการจำแนกประเภทความผิดพลาดเกิดความผิดพลาดโดยเฉพาะความผิดพลาดชนิด 2 เฟส (รายละเอียดการทดสอบแสดงในบทที่ 5) ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงค่าในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ใหม่ เพื่อให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งค่านี้ได้มาจากการทดสอบกับสัญญาณในระบบไฟฟ้าจริง โดยพบว่าค่ามุมสำหรับเงื่อนไขจำแนกความผิดพลาดแบบสมดุลควรมีค่าอยู่ระหว่าง $\pm 10^\circ$ จากค่าทฤษฎี และมุมสำหรับเงื่อนไขจำแนกความผิดพลาดแบบไม่สมดุล ควรมีค่าอยู่ระหว่าง $\pm 30^\circ$ จากค่าทฤษฎี และสำหรับกรณีความผิดพลาดประเภทลงดินค่าสัดส่วนระหว่างขนาดของกระแสลำดับศูนย์และกระแสลำดับบวกนั้นควรมีค่ามากกว่า 0.15 ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6

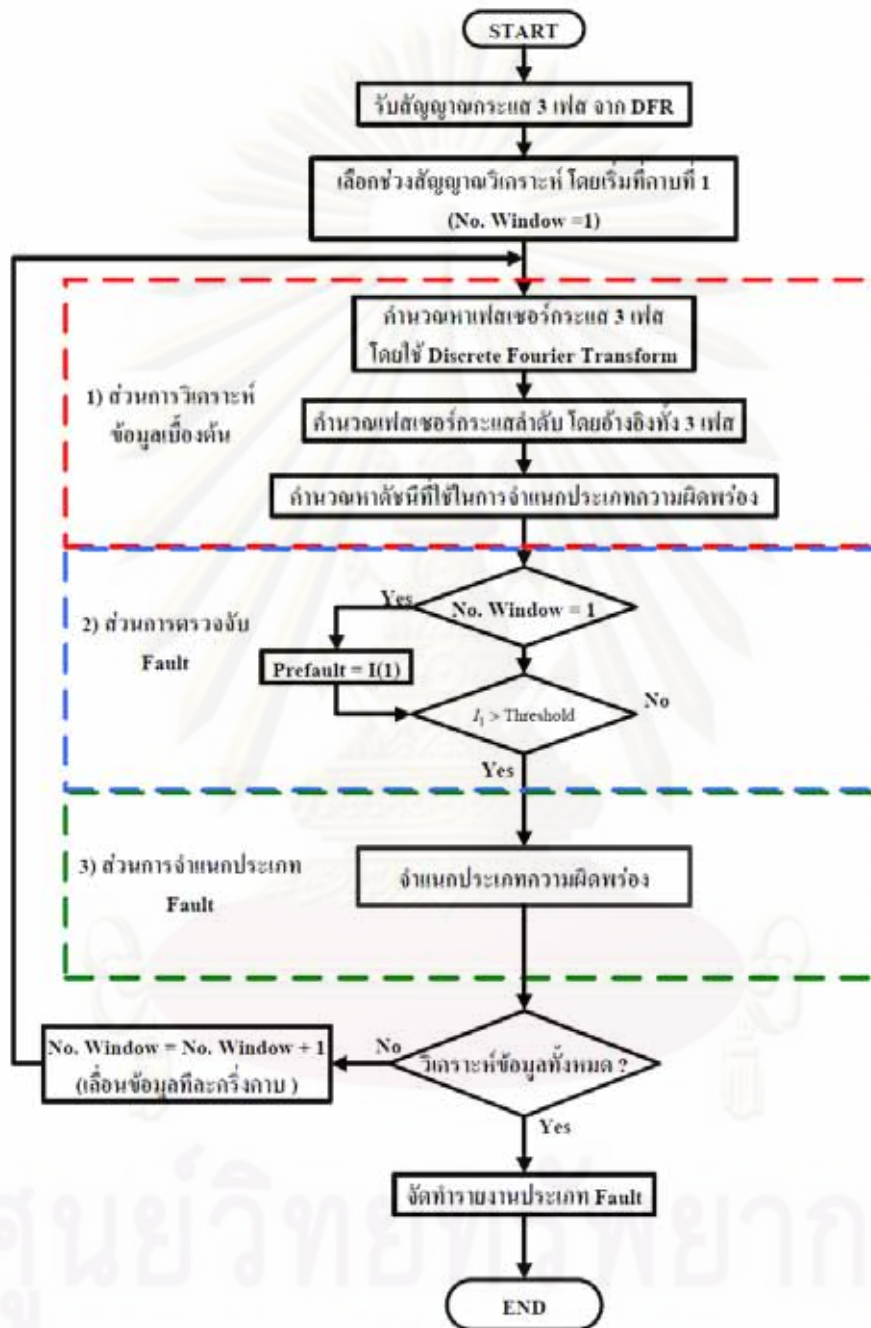
ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการจำแนกความผิดพลาดประเภทสมดุล ปรับปรุงตาม [10]

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี k_{2a}	ดัชนี k_{2b}	ดัชนี k_{2c}
A-B-C	$0 - 10^\circ$	$0 - 10^\circ$	$0 - 10^\circ$

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการจำแนกความผิดพลาดประเภทไม่สมดุล ปรับปรุงตาม [10]

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี k_{2a12}	ดัชนี k_{2b12}	ดัชนี k_{2c12}	ดัชนี I_{01}	ดัชนี I_{21}
A-G	$0^\circ \pm 30^\circ$	$120^\circ \pm 30^\circ$	$120^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15
B-G	$120^\circ \pm 30^\circ$	$0^\circ \pm 30^\circ$	$120^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15
C-G	$120^\circ \pm 30^\circ$	$120^\circ \pm 30^\circ$	$0^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15
A-B	$60^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	$180^\circ \pm 30^\circ$	<0.15	>0.15
B-C	$180^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	<0.15	>0.15
C-A	$60^\circ \pm 30^\circ$	$180^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	<0.15	>0.15
A-B-G	$60^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	$180^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15
B-C-G	$180^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15
C-A-G	$60^\circ \pm 30^\circ$	$180^\circ \pm 30^\circ$	$60^\circ \pm 30^\circ$	>0.15	>0.15

ในการประยุกต์ใช้งานการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับนั้น โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ 1) การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น 2) การตรวจจับความผิดปกติและ 3) การจำแนกประเภทความผิดปกติ ดังแผนผังการทำงานในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ

1) ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

หน้าที่หลักของส่วนนี้คือการวิเคราะห์ดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภทของความผิดปกติ โดยทำการหาเฟสเซอร์ของกระแสเฟสจากการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform) จากนั้นจะนำเฟสเซอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟสไปคำนวณหาเฟสเซอร์ของกระแสลำดับ โดยอ้างอิงกับทั้ง 3 เฟส เมื่อได้ข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดแล้วจะนำข้อมูลดังกล่าวไปหาดัชนีซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์จำแนกประเภทของความผิดปกติ ดังที่กล่าวไว้ในก่อนหน้า

2) การตรวจจับความผิดปกติ

ส่วนนี้จะเปรียบเทียบค่าขนาดของกระแสลำดับบวกในช่วงที่วิเคราะห์ กับช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ โดยจะใช้ค่าขนาดกระแสในคาบที่ 1 ที่ได้จาก DFR เป็นตัวแทนกระแสในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ หากขนาดของกระแสลำดับบวกในช่วงที่ทำการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 2 เท่าของช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ จะแสดงว่าช่วงที่ทำการวิเคราะห์นั้นเกิดความผิดปกติขึ้น

3) การจำแนกประเภทของความผิดปกติ

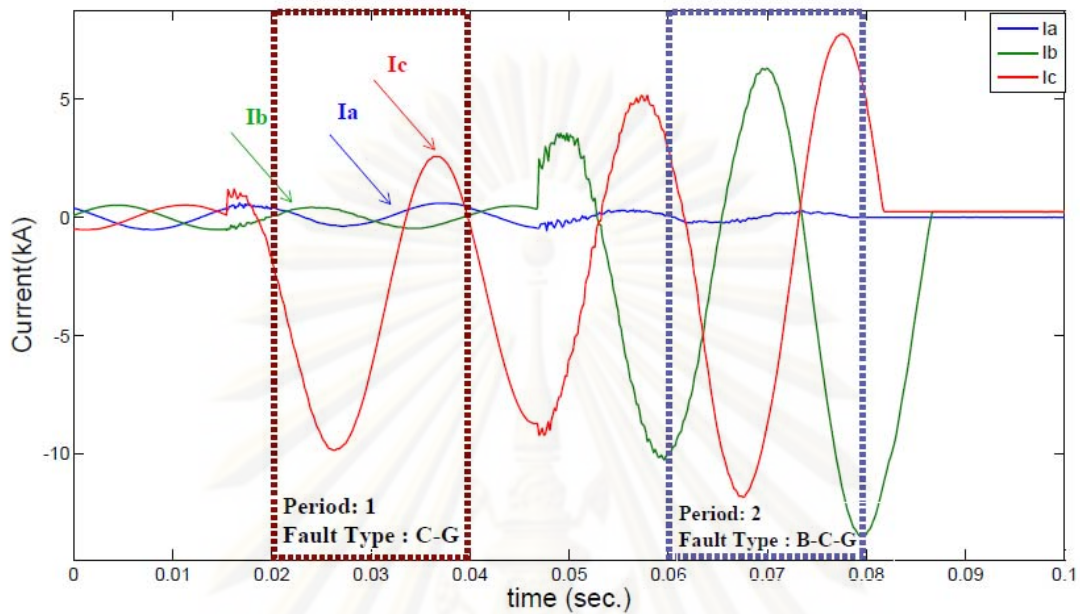
การจำแนกความผิดปกตินั้นผู้เขียนใช้ดัชนีซึ่งได้จากวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ ตามเงื่อนไขในการจำแนกประเภทความผิดปกติในตารางที่ 3.5 และ 3.6

เพื่อความเข้าใจที่มากยิ่งขึ้นจะขอยกตัวอย่างการคำนวณการจำแนกความผิดปกติด้วยวิธีการนี้จำนวน 1 เหตุการณ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้เป็นความผิดปกติบนสายส่ง 500 kV ที่ถูกระบุว่าเป็นความผิดปกติประเภท C-G และพัฒนาเป็นประเภท B-C-G และค่าดัชนีต่างๆที่ได้จากการคำนวณของทั้ง 2 ช่วงแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าดัชนีจากการคำนวณของกระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติโดยใช้มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ

ดัชนี	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2
k_{2a12}	133.25°	178.26°
k_{2b12}	106.74°	58.26°
k_{2c12}	13.25°	61.74°
I_{01}	0.95	0.36
I_{21}	0.95	0.69
ผลลัพธ์	C-G	B-C-G

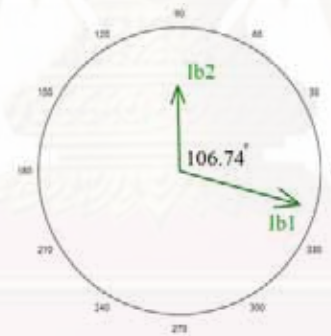
สัญญาณของกรณีตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วย กระแส 3 เฟส เฟสเซอร์กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับลบโดยอ้างอิงกับทั้ง 3 เฟสสำหรับช่วงทั้ง 2 ที่ทำการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3.5



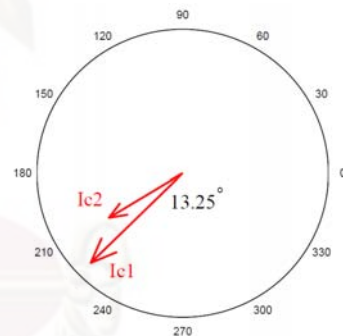
(ก) ตัวอย่างกระแส 3 เฟสในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมที่มีการพัฒนา



(ข) ดัชนี k_{2a12} ช่วง 1



(ค) ดัชนี k_{2b12} ช่วง 1



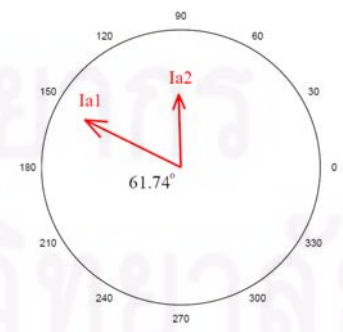
(ง) ดัชนี k_{2c12} ช่วง 1



(จ) ดัชนี k_{2a12} ช่วง 2



(ฉ) ดัชนี k_{2b12} ช่วง 2



(ช) ดัชนี k_{2c12} ช่วง 2

รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแส 3 เฟสและเฟสเซอร์กระแสลำดับบวกและลำดับลบโดยอ้างอิงทั้ง 3 เฟสของทั้ง 2 ช่วงความผิดปกติ

3.2.5 การจำแนกประเภทของความผิดพลาดด้วยวิธีการแปลงเวฟเลข

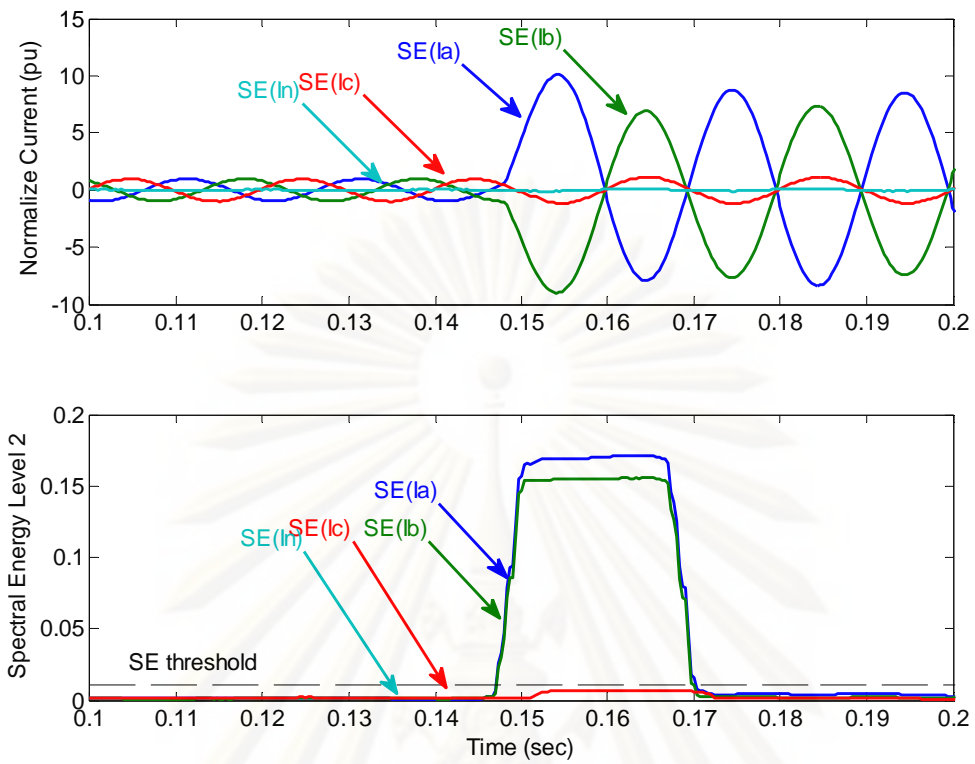
การจำแนกความผิดพลาดด้วยวิธีการแปลงเวฟเลขนั้น เป็นวิธีการที่มีความนิยมมากในปัจจุบัน โดยมีการประยุกต์ใช้งานในหลายๆรูปแบบเช่น การใช้ค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในการจำแนก [4, 5] การใช้ค่าสัดส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลข แบบละเอียดของกระแสเฟสและกระแสนิวทรัล การใช้สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขเข้าร่วมกับเทคโนโลยีอื่นๆ เช่น Neural Network, Fuzzy Logic เป็นต้น [6 - 8]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้พลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในการจำแนกประเภทของความผิดพลาด โดยวิธีการดังกล่าวจะตรวจสอบเฟสที่เกิดความผิดพลาดได้จากค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียด (SE_{ph}^j) โดยเฟสที่เกิดความผิดพลาดขึ้นนั้นค่าพลังงานที่ได้จะมีค่าสูงกว่าเฟสอื่นๆมาก ในการกำหนดว่าเฟสใดเป็นเฟสที่เกิดความผิดพลาดและเฟสใดเป็นเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดขึ้นนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมา (SE_{th}) โดยหากเฟสใดก็ตาม (รวมกระแสนิวทรัล) มีค่าพลังงานมากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ได้กำหนดมานั้น แสดงว่าเฟสดังกล่าวเป็นเฟสที่เกิดความผิดพลาดขึ้น เงื่อนไขในการจำแนกประเภทความผิดพลาดด้วยวิธีการนี้จึงแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 โดยตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดพลาดประเภท 2 เฟสด้วยวิธีการแปลงเวฟเลขแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขสำหรับจำแนกความผิดพลาดโดยการแปลงเวฟเลข

ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี SE_{j-a}	ดัชนี SE_{j-b}	ดัชนี SE_{j-c}	ดัชนี SE_{j-n}
A - G	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$
B - G	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$
C - G	$< SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$
A - B	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$< SE_{th}$
B - C	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$
C - A	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$
A - B - G	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$
B - C - G	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$
C - A - G	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$
A - B - C	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$> SE_{th}$	$< SE_{th}$

โดย j คือระดับขั้นในการแปลงเวฟเลข



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงประเภท 2 เฟสด้วยวิธีการแปลงเวฟเลข

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้งานเวฟเลทเพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติ

4.1 การประยุกต์ใช้การตรวจจับความผิดปกติ

จากที่ได้กล่าวถึงกระบวนการตรวจจับความผิดปกติด้วยการแปลงเวฟเลทแบบคร่าวๆ มาในบทที่แล้วนั้น ทำให้ทราบว่าในสภาวะปกติสัญญาณกระแสและแรงดันจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงขึ้น การแปลงเวฟเลทนั้นเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแยกการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงดังกล่าวออกมาได้ ซึ่งทำให้สามารถตรวจจับได้ว่าสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติหรือไม่

ในทางปฏิบัตินั้นการตรวจจับความถี่สูงของสัญญาณขาเข้าอาจจะไม่เพียงพอ เนื่องจากในทางปฏิบัติยังมีปัจจัยอื่นๆอีกมากมายที่ทำให้สัญญาณความถี่สูงของกระแสหรือแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้การแปลงเวฟเลท เข้าร่วมกับการวิเคราะห์ขนาดของกระแสสายในแต่ละเฟส โดยเงื่อนไขที่โปรแกรมจะระบุได้ว่าสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกตินั้น ค่าสัดส่วนขนาดของกระแสสายในเฟสใดๆต่อค่าขนาดในสภาวะก่อนเกิดความผิดปกติต้องมีค่ามากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดเป็นระยะเวลามากกว่าที่กำหนด และต้องมีสัดส่วนค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดต่อค่าพลังงานในสภาวะก่อนเกิดความผิดปกติมากกว่าค่า Threshold ที่กำหนดอีกด้วย โดยเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติมีดังต่อไปนี้

1. ถ้า $|I_{ph-prefault}| \approx 0$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
2. ถ้า $\frac{|I_{ph}|}{|I_{ph-prefault}|} < I_{th}$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
3. ถ้า $\frac{|I_{ph}|}{|I_{ph-prefault}|} > I_{th}$ เป็นเวลา $< \text{time}_{threshold}$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
4. ถ้า $\frac{SE_{j-ph}}{SE_{j-ph(prefault)}} < SE_{th}^{Detect}$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

5. ถ้า $\frac{SE_{j-ph}}{SE_{j-ph(prefault)}} > SE_{th}^{Detect}$ และไม่ตรงกับกฎด้านใดๆที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ เหตุการณ์นี้เป็นความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

โดย ph แสดงถึง เฟสต่างๆ กล่าวคือเฟส A B และ C
 $|I_{ph-prefault}|$ ขนาดของกระแสในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ
 $SE_{j-ph(prefault)}$ พลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้เวฟเลทแม่ (Mother Wavelet) เป็น Daubeuchies 4 เนื่องจากเหมาะสมในการวิเคราะห์รูปคลื่นประเภทสภาวะชั่วคราว [5, 9]

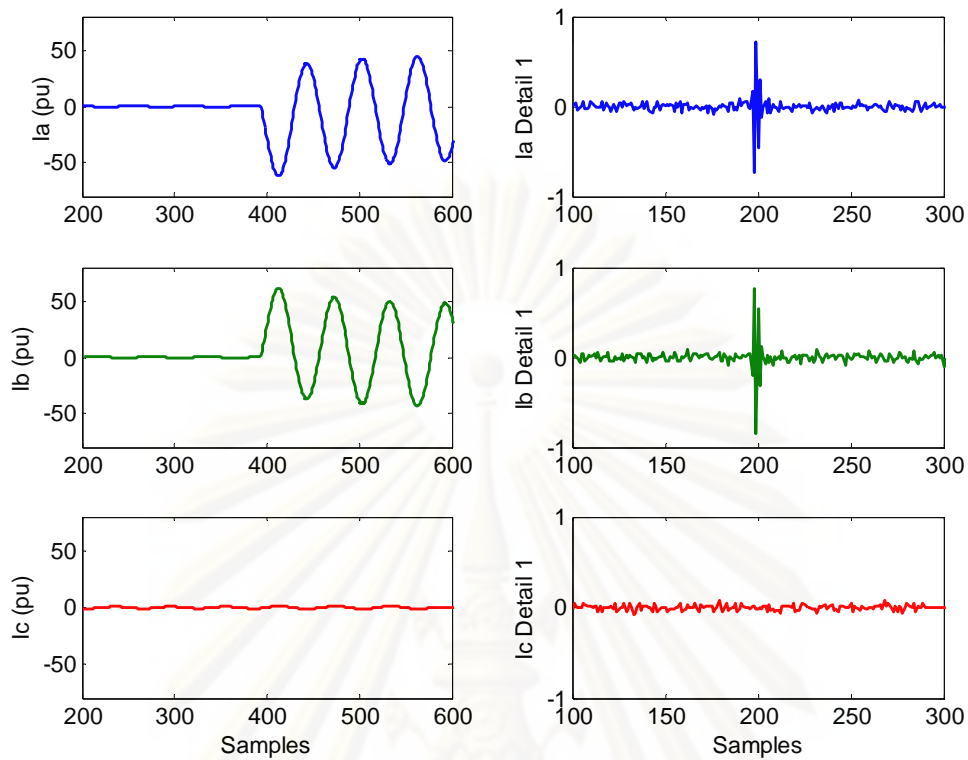
4.1.1 การเลือกระดับชั้นในการแปลงเวฟเลท

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณกระแสจากเครื่อง DFR ที่มีความถี่การสุ่มอยู่ที่ 3,000 Hz ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการสุ่มคือ 60 ตัวอย่าง/คาบ ในการแปลงเวฟเลทที่แต่ละระดับชั้นนั้นสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดจะสัมพันธ์กับช่วงของความถี่ดังตารางที่ 4.1

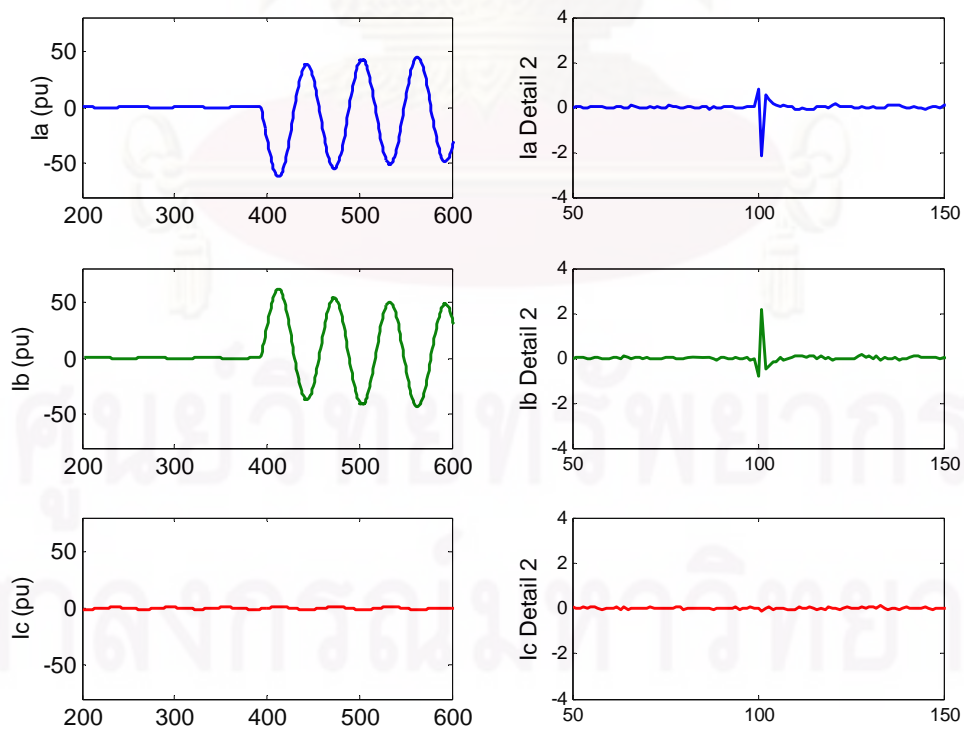
ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่สำหรับสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดที่แต่ละระดับชั้น
(ความถี่ในการสุ่มของสัญญาณขาเข้าคือ 3,000 Hz)

ระดับชั้นของการแปลงเวฟเลท	ช่วงความถี่ (Hz)
สัมประสิทธิ์แบบละเอียด ระดับที่ 1 (d_1)	750 – 1,500
สัมประสิทธิ์แบบละเอียด ระดับที่ 2 (d_2)	325 – 750
สัมประสิทธิ์แบบละเอียด ระดับที่ 3 (d_3)	162.5 – 325
สัมประสิทธิ์แบบละเอียด ระดับที่ 4 (d_4)	81.25 – 162.5

ในการตรวจจับความผิดปกตินั้น จะใช้วิธีตรวจจับจากความถี่สูงของสัญญาณในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ดังนั้นจึงควรใช้สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดที่ระดับชั้นต้นๆ (ระดับที่ 1 หรือ ระดับที่ 2) ในการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สะท้อนถึงความถี่สูงที่เกิดขึ้นของสัญญาณขาเข้า ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 1 และ 2 สำหรับเหตุการณ์ความผิดปกติแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ

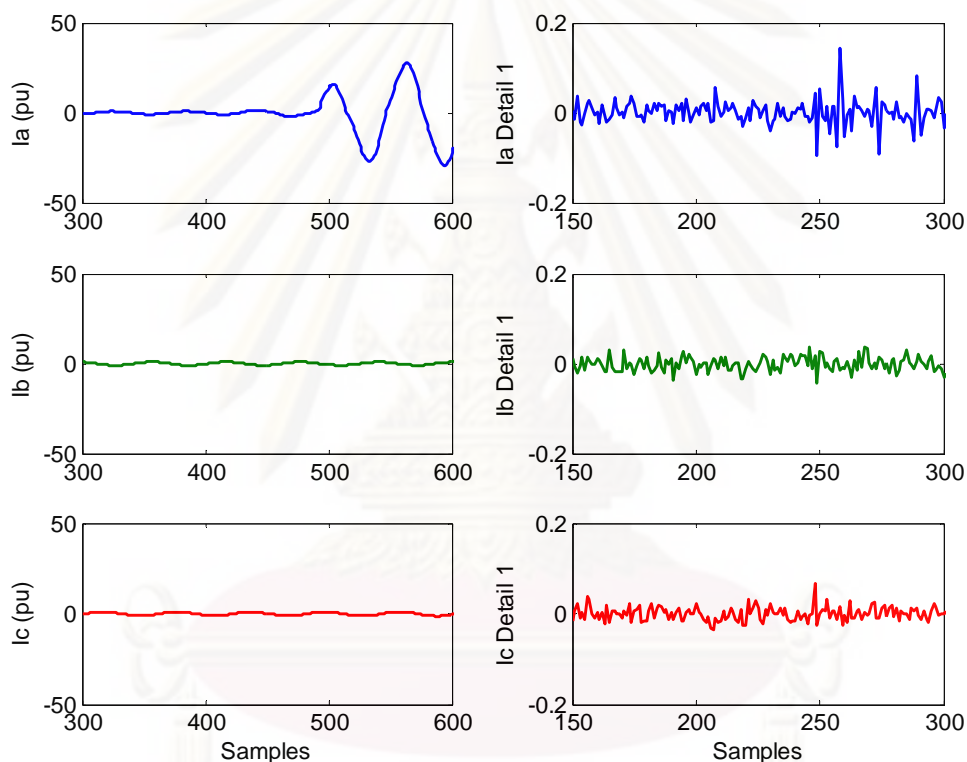


รูปที่ 4.1 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 1

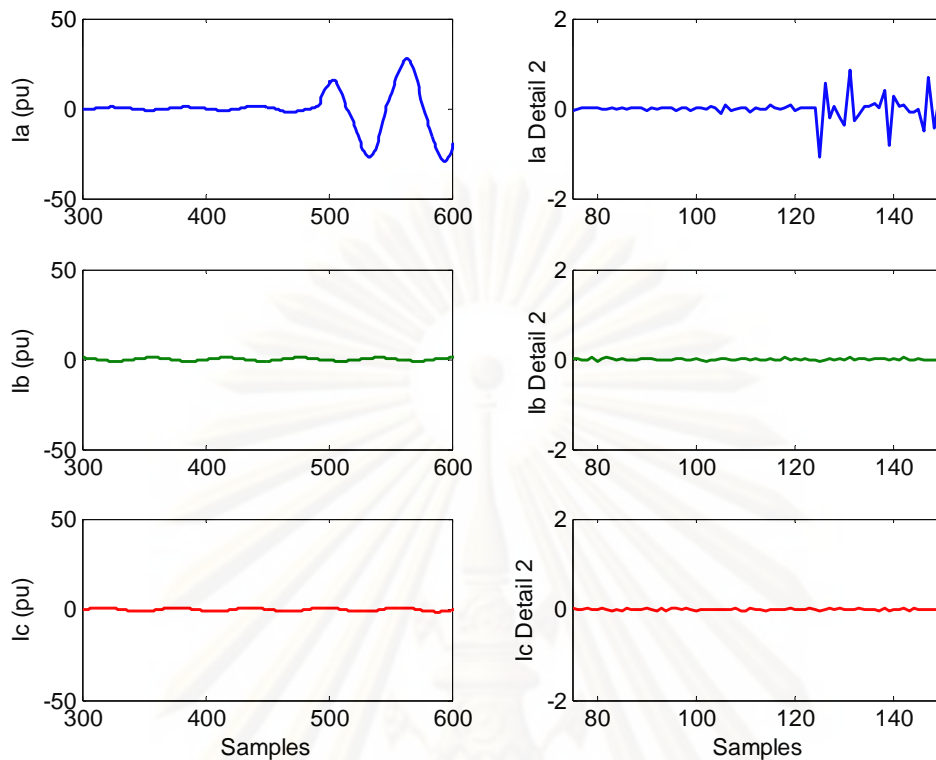


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 2

ในทางปฏิบัตินั้นสัญญาณรูปคลื่นกระแสที่เครื่อง DFR บันทึกเข้ามาได้นั้นจะมีสัญญาณรบกวนปะปนติดเข้ามาด้วย ซึ่งในบางเหตุการณ์นั้นสัญญาณรบกวนดังกล่าวมีค่ามากจนอาจทำให้การวิเคราะห์เกิดผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณรบกวนดังกล่าวมาแล้วการแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 1 (สัมพันธ์กับความถี่สูงสุดของสัญญาณขาเข้า) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติ เนื่องจากความถี่สูงที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปน วิชยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เปลี่ยนมาใช้เป็นระดับชั้นที่ 2 ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ที่ต่ำลงมาแทน โดยตัวอย่างสัญญาณค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 1 และ 2 ที่มีผลของสัญญาณรบกวนแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดระดับชั้นที่ 1 ในกรณีที่มีผลของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส และค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดระดับชั้นที่ 2 ในกรณีที่มีผลของสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 1 นั้นในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติจะมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าในช่วงที่เกิดความผิดปกติแล้วนั้น พบว่าในขณะที่เกิดความผิดปกติมีค่าสูงกว่าช่วงก่อนเกิดความผิดปกติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้การตรวจจับความผิดปกติด้วยสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 1 นั้นทำได้ลำบาก แต่ในรูปที่ 4.4 เมื่อนำสัญญาณขาเข้าเดิมไปแปลงสัมประสิทธิ์แบบละเอียดในระดับชั้นที่ 2 พบว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ชัดเจนกว่าในระดับชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผลดังนี้จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การแปลงเวฟเลขในระดับชั้นที่ 2 ในขั้นตอนการตรวจจับความผิดปกติ

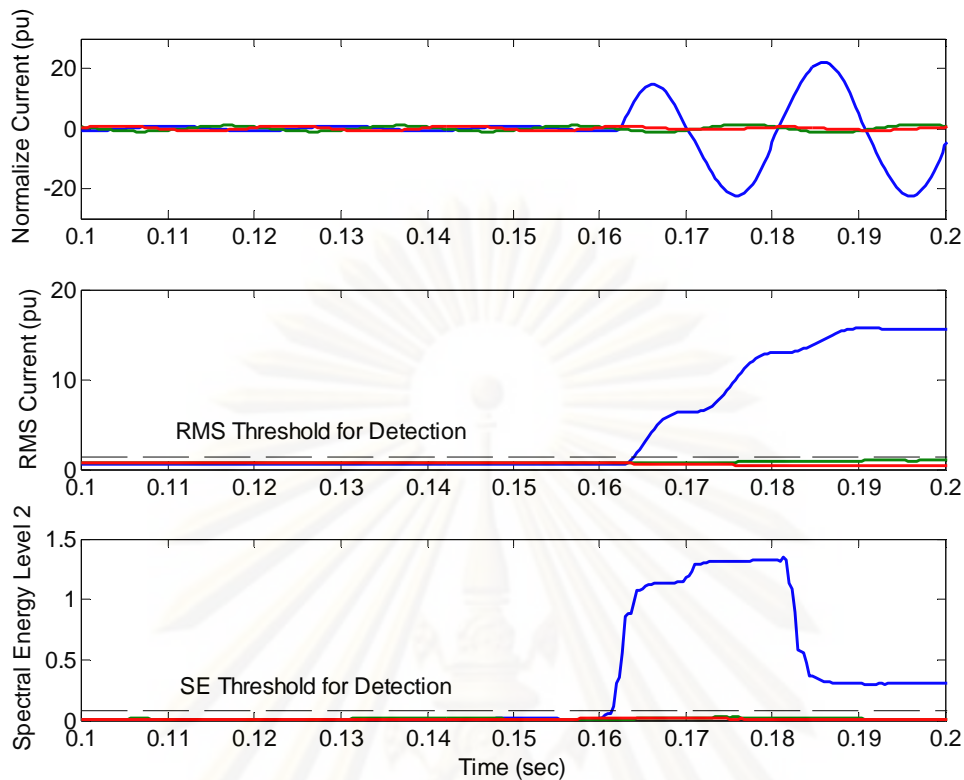
4.1.2 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนต่างๆ

ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้ในการตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติ นั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 ค่าด้วยกัน กล่าวคือค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับค่าขนาดของกระแสสาย (I_{th}) และค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับพลังงานของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียด (SE_{th}^{Detect}) โดยในการตรวจจับความผิดปกติ นั้นค่ากระแสสายจะต้องมีค่ามากกว่า I_{th} เป็นเวลามากกว่า $time_{threshold}$ และค่า

พลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดก็ต้องมีค่ามากกว่า SE_{th}^{Detect} ด้วยเช่นกัน จึงแสดงว่าเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติ

ในทางปฏิบัติตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติในแต่ละตำแหน่งล้วนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความผิดปกติในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ค่าระดับกระแสลัดวงจร (Fault Level) ในแต่ละตำแหน่งในระบบไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมกับการตรวจจับความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้าจริง ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าอ้างอิงหนึ่งในสัญญาณขาเข้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกค่าอ้างอิงเป็นค่าในช่วงก่อนที่เกิดความผิดปกติ ดังนั้นค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดจะเป็นจำนวนเท่าของค่าในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติโดยหากสัญญาณใดๆมีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดแสดงว่าสัญญาณนั้นเป็นสัญญาณที่เป็นผลมาจากการเกิดความผิดปกติขึ้น

ในการเลือกค่าจุดเริ่มเปลี่ยนทั้งสองค่านี้ผู้วิจัยต้องวิเคราะห์เหตุการณ์เป็นจำนวนมาก เพื่อให้ค่าที่กำหนดนั้นสามารถครอบคลุมกรณีต่างๆได้ ซึ่งจากการทดสอบกับสัญญาณจริงที่วัดได้จากเครื่อง DFR ที่ติดตั้งในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยแล้วนั้น พบว่าค่า Threshold ของขนาดของกระแสควรมีค่าเป็น $I_{th} = 2 \times I_{prefault}$ และค่า Threshold ของพลังงานของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทควรมีค่าเป็น $SE_2^{detect} = 5 \times SE_{2-prefault}$ โดยระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติจะต้องมีค่ามากกว่า 50 ms การกำหนดระยะเวลาดังกล่าวสามารถกำหนดได้จากระยะเวลาการทำงานของระบบป้องกันรวมกับระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร ซึ่งมีค่าเวลาที่เร็วที่สุดประมาณ 60 ms ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติด้วยวิธีการที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการตรวจจับสำหรับเหตุการณ์ความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดิน

4.2 การประยุกต์การจำแนกประเภทของความผิดปกติ

เมื่อตรวจจับความผิดปกติได้แล้วนั้น จะนำสัญญาณกระแสสำหรับอุปกรณ์ที่เกิดความผิดปกตินั้นมาจำแนกประเภทความผิดปกติ โดยการประยุกต์การจำแนกประเภทของความผิดปกติด้วยวิธีการแปลงเวฟเลทนั้นใช้หลักการที่ว่า กระแสสายในเฟสที่เกิดความผิดปกติจะมีค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดสูงกว่ากระแสสายในเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติมาก ดังนั้นทำให้สามารถกำหนดจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับพลังงานสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทค่าๆหนึ่ง โดยหากเฟสใดมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ แสดงว่าเฟสดังกล่าวเป็นเฟสที่เกิดความผิดปกติ

4.2.1 การเลือกระดับชั้นของการแปลงเวฟเลท

เช่นเดียวกับขั้นตอนการตรวจจับความผิดปกติ ระดับชั้นของการแปลงเวฟเลทมีความสำคัญมากที่จะบ่งบอกว่าเฟสใดเกิดความผิดปกติหรือไม่เกิดความผิดปกติ ซึ่งผู้เขียนได้วิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของแต่ละระดับชั้นในการจำแนกความผิดปกติ โดยได้ทำการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปกติจากสัญญาณจริงที่วัดได้จากเหตุการณ์ความผิดปกติในระบบ

ส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ (ประเภทของความผิดพลาด) กับรายงานของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. พบว่าการแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 4 (SE_4) ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 2 และที่ 3 มีความเหมาะสมสำหรับการจำแนกประเภทความผิดพลาดมากที่สุด [11] (รายละเอียดการทดลองแสดงในบทที่ 5)

4.2.2 การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนต่างๆ

ความยุ่งยากในการจำแนกประเภทของความผิดพลาดนั้น อยู่ที่การกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เพื่อระบุว่าเฟสใดเกิดความผิดพลาด หรือไม่เกิดความผิดพลาด โดยจากเหตุผลที่ว่าเฟสที่เกิดความผิดพลาดนั้นจะมีค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดมากกว่าเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดค่อนข้างมาก

เช่นเดียวกับในกรณีของการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับการตรวจจับความผิดพลาด ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดควรจะต้องครอบคลุมในทุกประเภทของความผิดพลาดด้วย ดังนั้นในการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจึงได้เลือกใช้ค่าให้เป็นสัดส่วนกับค่าขนาดของพลังงานในกระแสเฟสที่มีความมากที่สุด เพื่อบ่งบอกว่าเฟสใดบ้างที่เกิดความผิดพลาดขึ้น

ในการเลือกค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมนั้นผู้เขียนได้ทำการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดพลาดจากสัญญาณจริงที่วัดได้จากเหตุการณ์ความผิดพลาดในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ (ประเภทของความผิดพลาด) กับรายงานของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. โดยค่าจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งเป็นค่าสัดส่วนของพลังงานเปรียบเทียบกับเฟสที่มีค่าพลังงานมากที่สุดกล่าวคือ เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบระหว่างค่าจุดเริ่มเปลี่ยนค่าต่างๆกัน ได้แก่ $SE_{max} / 2$ $SE_{max} / 3$ และ $SE_{max} / 5$ โดยหากเฟสใดๆมีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด แสดงว่าเฟสดังกล่าวเป็นเฟสที่เกิดความผิดพลาด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าสำหรับกระแสเฟสนั้นควรใช้ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเป็น $SE_{max} / 2$ และสำหรับกระแสนิวทรอลควรใช้ค่าเป็น $SE_{max} / 5$ เงื่อนไขในการจำแนกความผิดพลาดด้วยการแปลงเวฟเลทแสดงดังตารางที่ 4.2

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขสำหรับจำแนกความผิดพลาดโดยการแปลงเวฟเลท

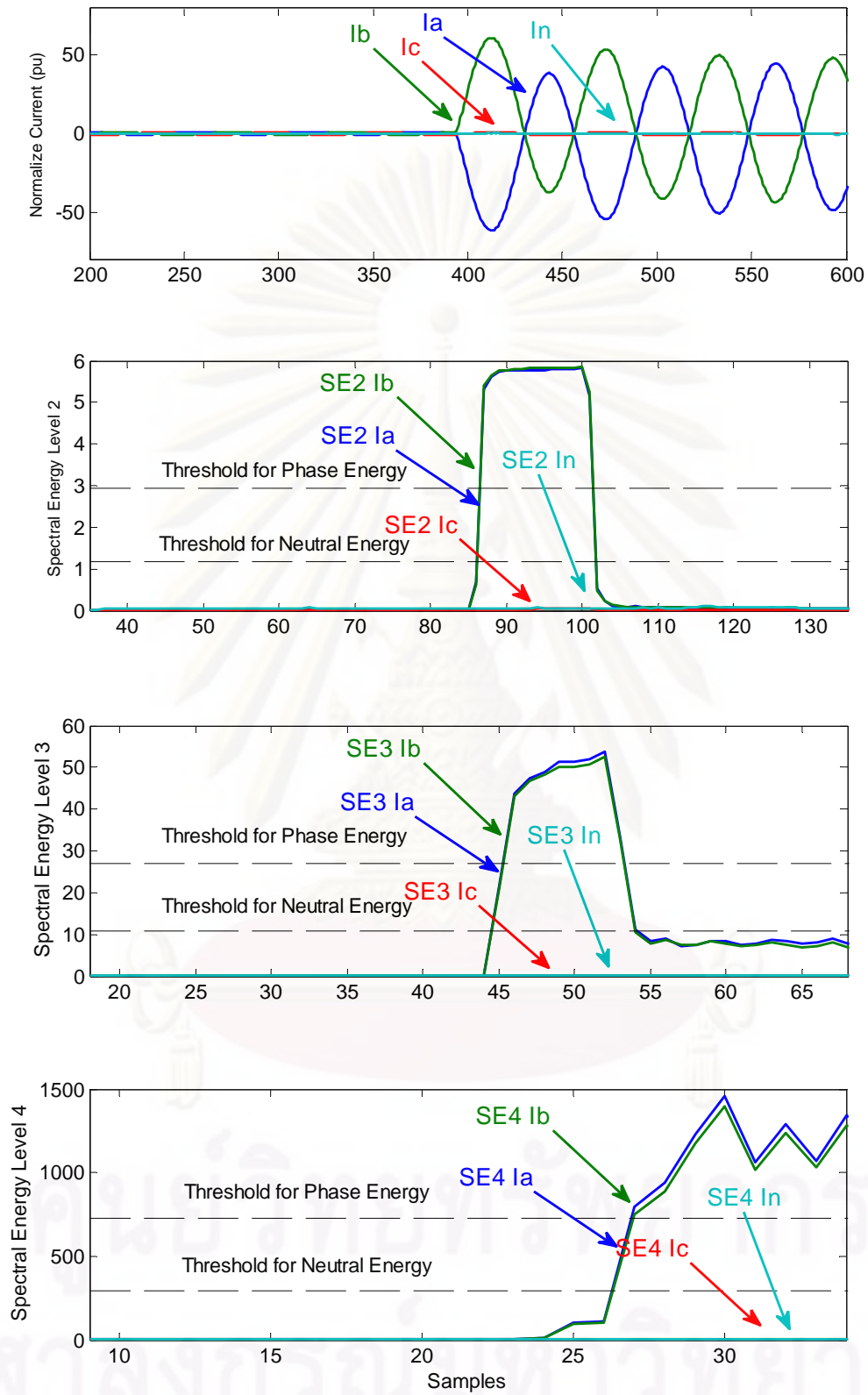
ประเภทความผิดพลาด	ดัชนี SE_{4-a}	ดัชนี SE_{4-b}	ดัชนี SE_{4-c}	ดัชนี SE_{4-n}
A - G	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
B - G	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
C - G	$< SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
A - B	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 5$
B - C	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 5$
C - A	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 5$	$> SE_{\max} / 5$	$< SE_{\max} / 5$
A - B - G	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
B - C - G	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
C - A - G	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 5$
A - B - C	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$> SE_{\max} / 2$	$< SE_{\max} / 5$

เพื่อความเข้าใจที่มากยิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างการจำแนกความผิดพลาดในกรณีความผิดพลาดประเภท 2 เฟส โดยจะแสดงการจำแนกประเภทด้วยการใช้ค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 2 - 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าพลังงานการแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 2 - 4 ($SE_2 - SE_4$) ของเฟสที่เกิดความผิดพลาด (เฟส B และ C) จะมีค่าสูงกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของเฟสซึ่งเท่ากับ $SE_{\max} / 2$ ส่วนค่าพลังงานของนิวทรอลจะมีค่าสูงกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของนิวทรอลซึ่งเท่ากับ $SE_{\max} / 5$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 การจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงโดย Spectral Energy ระดับชั้นที่ 2 - 4

4.3 สรุปเงื่อนไขในการตรวจจับและการจำแนกประเภทของความผิดปกติ

ในการตรวจจับความผิดพร่องนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้การผสมผสานวิธีการตรวจจับโดยใช้ค่าขนาดของกระแสสาย เข้าร่วมกับการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ค่าพลังงานที่คำนวณมาจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 2 (SE_{2-ph}) โดยเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพร่องนั้นมีดังต่อไปนี้

1. ถ้า $|I_{ph-prefault}| \approx 0$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
2. ถ้า $\frac{|I_{ph}|}{|I_{ph-prefault}|} < 2$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
3. ถ้า $\frac{|I_{ph}|}{|I_{ph-prefault}|} > 2$ เป็นเวลา < 50 ms. เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
4. ถ้า $\frac{SE_{j-ph}}{SE_{j-ph(prefault)}} < 5$ เหตุการณ์นี้ไม่ใช่ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

ในการจำแนกประเภทของความผิดพร่องนั้น นำรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสายส่งที่เกิดความผิดปกติไปหาค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 4 ซึ่งในการจำแนกประเภทของความผิดพร่องนั้นได้ใช้ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งอ้างอิงกับค่าพลังงานในเฟสที่มีค่าสูงที่สุด โดยจะใช้จุดเริ่มเปลี่ยนทั้งสิ้น 2 ค่า ได้แก่ค่าสำหรับการระบุเฟสที่เกิดความผิดปกติ ($SE_{4-ph} > SE_{max} / 2$) และค่าสำหรับกระแสนิวทรอลซึ่งใช้เพื่อระบุความผิดปกติประเภทลงดิน ($SE_{4-n} > SE_{max} / 5$) รายละเอียดสำหรับการจำแนกประเภทความผิดปกติแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 4.2

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

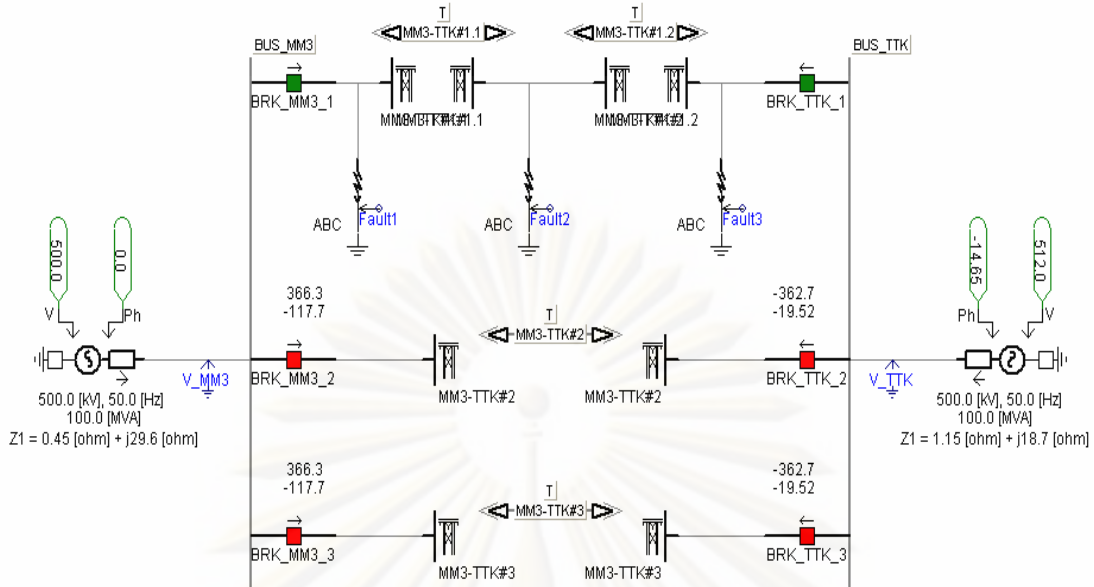
วิธีการการตรวจจับความผิดพร่องและจำแนกประเภทของความผิดพร่องที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมา ได้ถูกนำมาทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า (หัวข้อที่ 5.1) และสัญญาณที่วัดได้จริงจากเครื่อง DFR ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ กฟผ. (หัวข้อ 5.2) ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการต่างๆดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

5.1 การจำลองระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าจะถูกจำลองด้วยโปรแกรม EMTDC/PSCAD ซึ่งเป็นโปรแกรม Commercial ซึ่งนิยมใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วครู่

5.1.1 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองนั้นเป็นระบบไฟฟ้าในส่วนของเขตปฏิบัติการภาคเหนือ โดยเป็นการจำลองระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูง 500 kV แม่เมาะ 3 และสถานีไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ท่าตะโก โดยมีสายส่งเชื่อมโยงจำนวน 3 วงจร ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟเชื่อมต่ออยู่กับทั้ง 2 สถานีไฟฟ้าแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าเป็นแบบ พารามิเตอร์กระจาย (Distributed Line Parameter) โดยรูปโครงข่ายระบบไฟฟ้าที่ทำการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้าที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรม EMTDC/PSCAD

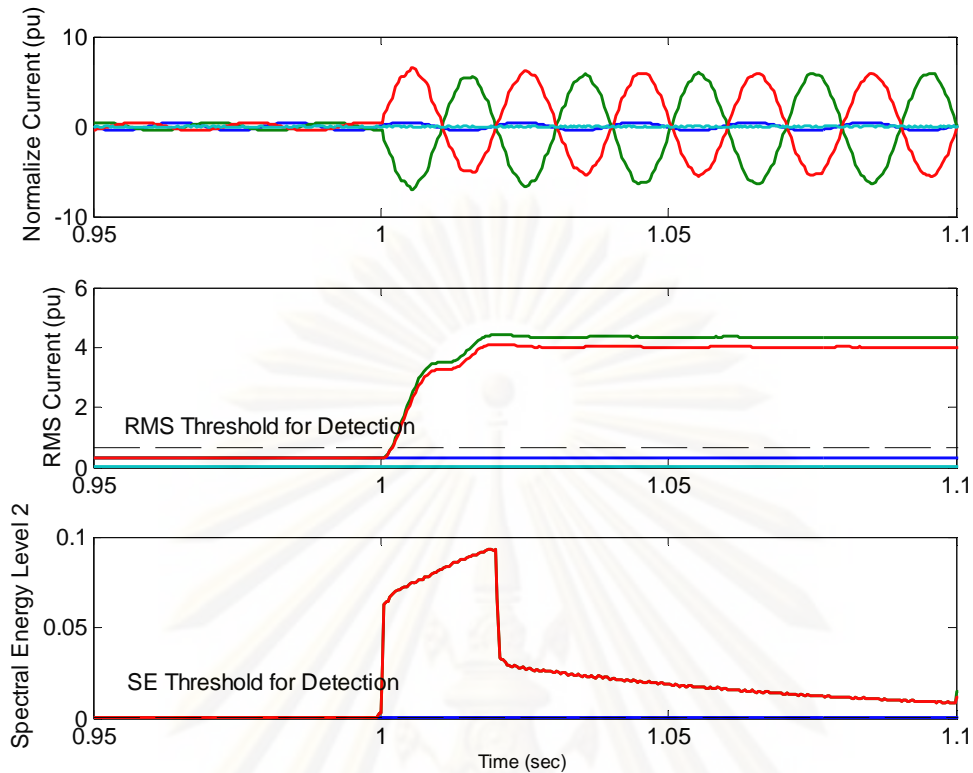
ในการทดลองนั้นสัญญาณต่างๆที่ทำการบันทึกค่าจะมีความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 3,000 Hz ซึ่งจะเท่ากับความถี่ในการเก็บสัญญาณของ DFR จริงที่อยู่ในระบบไฟฟ้า โดยเงื่อนไขการทดลองนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่ากระแสลัดวงจร เช่น ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร และชนิดของการลัดวงจร เป็นต้น ทั้งนี้ เงื่อนไขในการจำลองต่างๆ จะอธิบายไว้ใน การทดสอบของแต่ละหัวข้อ

5.1.2 การทดสอบตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติด้วยวิธีที่น่าเสนอ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในลักษณะนี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้นำเสนอไป โดยวิธีการทดสอบนั้นจะทำการเปรียบเทียบเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติประเภทต่างๆรวมทั้งสิ้น 10 ประเภทในตำแหน่งเกิดความผิดปกติต่างๆกัน ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปกติกับระบบจำลอง

ประเภทของเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์ที่ตรวจจับถูกต้อง
เหตุการณ์ความผิดปกติ	80	80



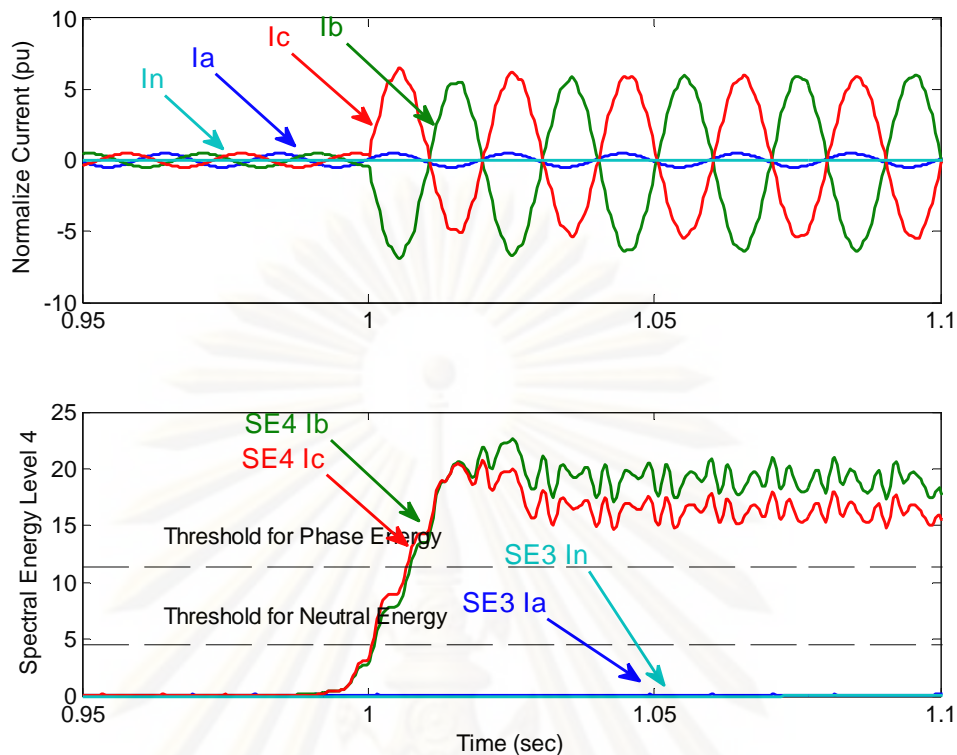
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการตรวจจับในกรณีเหตุการณ์ความผิดปกติ

5.1.3 การทดสอบจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยวิธีที่นำเสนอ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในลักษณะนี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้นำเสนอไปในการจำแนกประเภทของความผิดปกติแต่ละประเภทโดย เงื่อนไขในการจำลองเหตุการณ์ความผิดปกตินั้นจะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังต่อไปนี้ ประเภทของความผิดปกติทั้ง 10 ประเภท ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติบนสายส่ง โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติกรณี 2 เฟสแสดงดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปกติกับระบบจำลอง

ประเภทของความผิดปกติ	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์ที่จำแนกถูกต้อง
1 เฟสลงดิน	20	20
2 เฟส	20	20
2 เฟสลงดิน	20	20
3 เฟส	20	20



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติของกรณี 2 เฟส

5.2 ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่อง DFR

ข้อมูลที่น่าใช้ในมาทดสอบ เป็นข้อมูลจริงที่ได้มาจากเครื่อง DFR ที่ติดตั้งไว้ที่สถานีไฟฟ้าต่างๆทั่วประเทศ โดยข้อมูลที่ได้รับนั้นจะอยู่ในรูปแบบของ COMTRADE File โดย DFR ที่ได้เก็บสัญญาณมาทำการวิเคราะห์นั้นจะมีความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 3,000 Hz ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการสุ่มที่ 60 ตัวอย่าง/คาบ

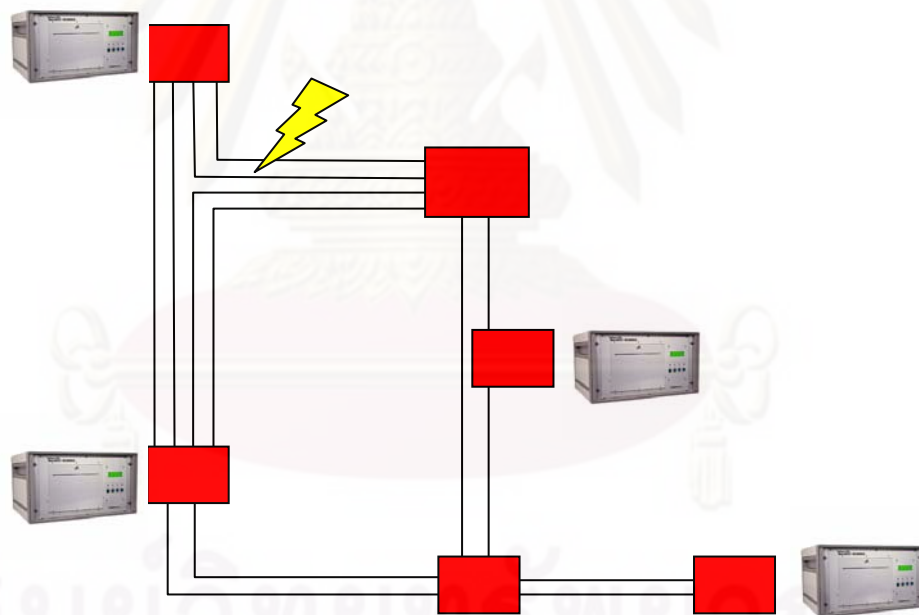
5.2.1 การทดสอบตรวจจับเหตุการณ์ความผิดปกติด้วยวิธีที่น่าเสนอ

ข้อมูลสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ นั้นได้รับมาจากข้อมูลที่ DFR ได้ทำการเก็บบันทึกไว้ในช่วงระหว่างวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2553 จำนวนข้อมูลที่ทำทดสอบเท่ากับ 117 ข้อมูล โดยเมื่อตรวจสอบกับข้อมูลของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ.ลงบันทึกไว้พบว่าในช่วงวันดังกล่าวมีเหตุการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นทั้งสิ้นจำนวน 1 เหตุการณ์โดยรายละเอียดเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติสำหรับการทดสอบการตรวจจับ

ลำดับ ที่	วันที่	เวลา	แรงดัน	ประเภท ความผิดปกติ
1	10/02/2553	07:09 น.	230	A - B

จากรายงานเหตุการณ์ในวันดังกล่าวนี้พบว่า เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าจำนวนทั้งสิ้น 1 เหตุการณ์ ซึ่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ควรจะเป็นข้อมูลในสถานีไฟฟ้าที่เกิดความผิดปกติและสถานีไฟฟ้าข้างเคียง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าข้อมูลที่ควรบันทึกกว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติควรมีทั้งสิ้นจำนวน 8 ข้อมูล โดยแผนผังเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าสำหรับเหตุการณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปกติแสดงได้ดังตารางที่ 5.4



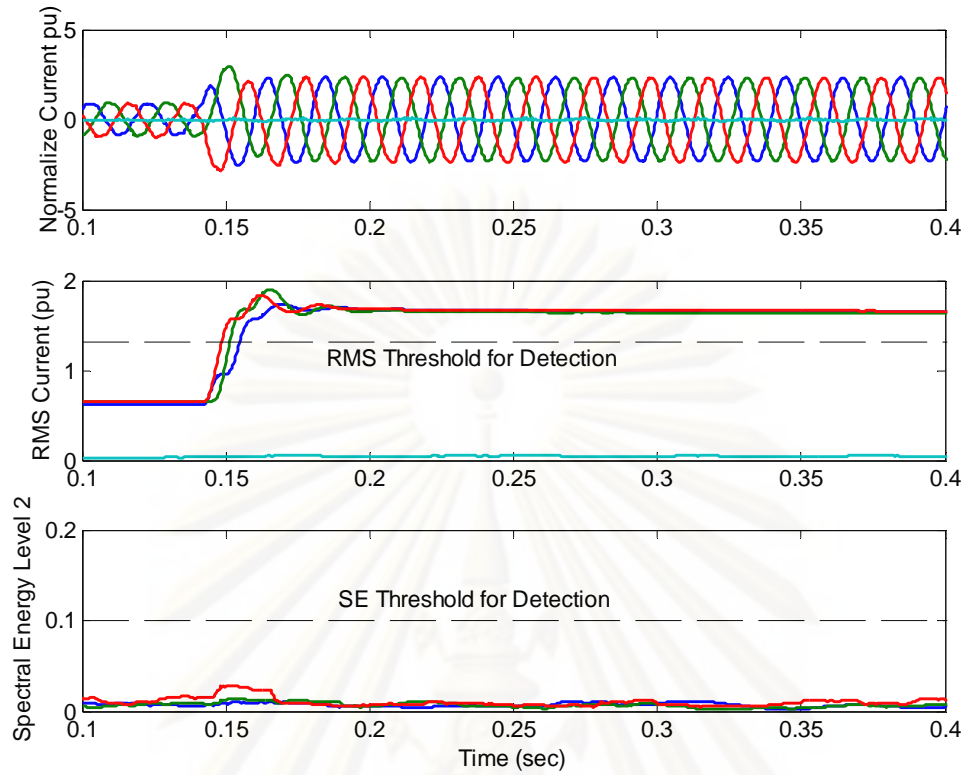
รูปที่ 5.4 แผนผังเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าสำหรับเหตุการณ์ทดสอบ

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการตรวจจับความผิดพลาดกับสัญญาณในระบบจริง

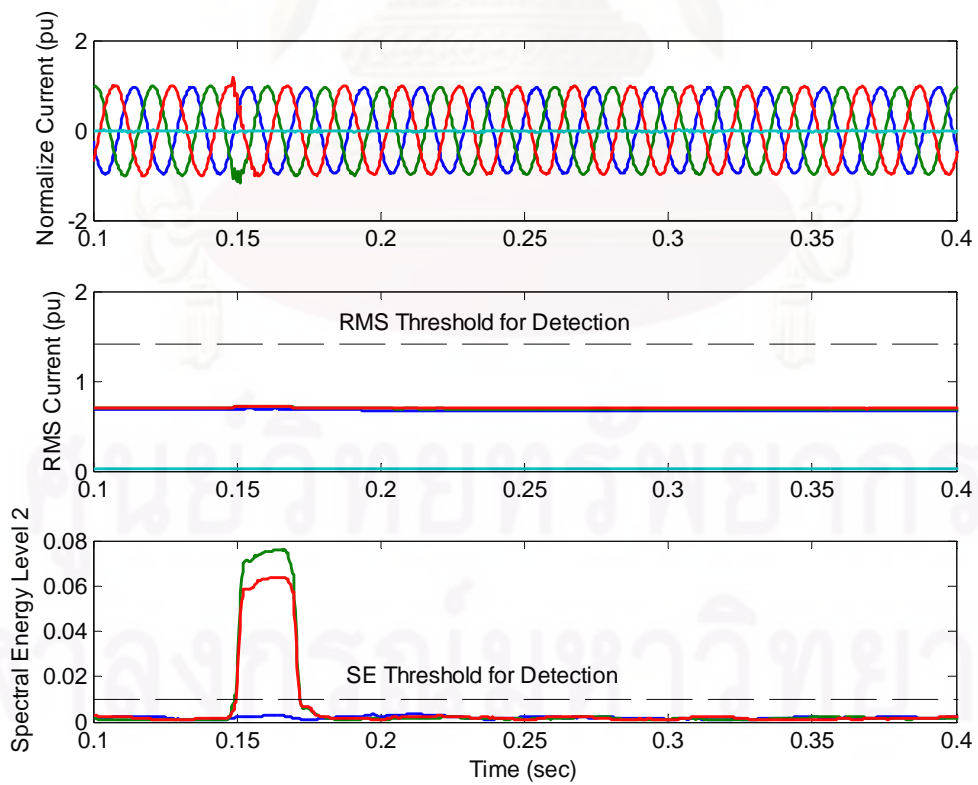
ประเภทของเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนข้อมูลแบ่งตามวิธีการตรวจจับ		
		ขนาดกระแส	ดัชนี SE_2	วิธีการที่นำเสนอ
เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดตามรายงาน กฟผ.	8	19	20	14
เหตุการณ์อื่น ๆ	109	98	97	103

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองโดยละเอียดในแต่ละข้อมูลนั้นทำให้พบว่าวิธีการตรวจจับโดยการใช้เฉพาะขนาดของกระแสนั้นมีการตรวจจับผิดพลาดในกรณีของเหตุการณ์ประเภทที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านในสายส่ง ซึ่งเหตุการณ์ประเภทดังกล่าวนี้เป็นเหตุการณ์ปกติทั่วไปในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่นในกรณีสายส่งคู่ขนาน หากมีการปลดสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งไปเพื่อการบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้น จะทำให้ปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเส้นที่เหลือมีปริมาณสูงขึ้น โดยเหตุการณ์ดังกล่าวนี้หากตรวจจับความผิดพลาดด้วยพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแล้วพบว่าในช่วงที่กระแสมีปริมาณสูงขึ้นนั้น ค่าพลังงานกลับมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด) ตัวอย่างการตรวจจับเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.5

ในส่วนของการตรวจจับความผิดพลาดด้วยพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทนั้นพบว่าวิธีการดังกล่าวตรวจจับผิดพลาดในกรณีของ เหตุการณ์ประเภทการสับตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มแรงดันในกับระบบไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องมาจากกระแสในสถานะชั่วคราวของการสับตัวเก็บประจุนั้นมีค่ามาก ดังนั้นพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับขั้นที่ 2 ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่สูงของสัญญาณจึงมีค่าสูงด้วย แต่เหตุการณ์ประเภทนี้จะไม่ถูกตรวจจับด้วยค่าขนาดของกระแสเนื่องจากขนาดของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเป็นระยะเวลาสั้น ตัวอย่างการตรวจจับเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างข้อมูลที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างข้อมูลการสับตัวเก็บประจุ

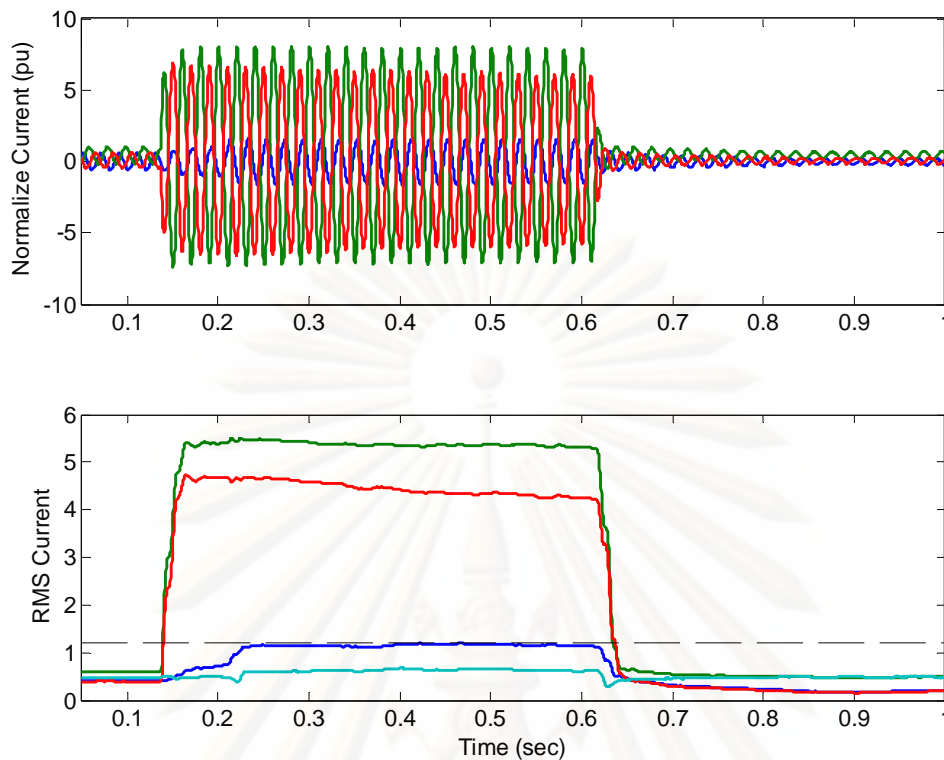
ดังนั้นเมื่อใช้กระบวนการที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 กล่าวคือใช้การตรวจนับโดยใช้ขนาดของกระแสสายเข้าร่วมกับการตรวจนับด้วยค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลข จะไม่ทำให้เกิดเหตุการณ์ประเภทที่ได้กล่าวมาถูกตรวจนับติดมาด้วย ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งสิ้นจำนวน 117 ข้อมูลนั้นตรวจนับเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดเพียงจำนวน 14 ข้อมูลเท่านั้น โดยนอกจากนั้นอีก 103 ข้อมูลเป็นเหตุการณ์ปกติทั่วไปของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเช่น การปลดหรือสับตัวเก็บประจุเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า การปลดหรือสับ Circuit Breaker เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ประจำปี การย้ายโหลด เป็นต้น

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่นำเสนอระบุว่าเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดจำนวน 14 ข้อมูล ซึ่งไม่ตรงกับที่ได้ตรวจสอบจากรายงานของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. จำนวน 8 ข้อมูล (ข้อมูลมีทั้งสถานีไฟฟ้าที่เกิดความผิดพลาด และสถานีไฟฟ้าใกล้เคียง) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ตรวจสอบในรายละเอียดของเหตุการณ์ที่วิเคราะห์ได้ไม่ตรงกัน พบว่าเหตุการณ์จำนวน 6 เหตุการณ์ที่ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดของ กฟผ. นั้นสันนิษฐานว่าทั้ง 6 เหตุการณ์ดังกล่าวน่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดในระบบจำหน่าย ซึ่งเหตุการณ์ประเภทนี้ผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. อาจจะไม่ทราบถึงเหตุการณ์เนื่องมาจาก ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันของ กฟผ. ทำงาน ดังนั้นเหตุการณ์เหล่านี้จึงไม่ได้ลงรายละเอียดในรายงานเหตุการณ์ของ กฟผ. ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลการตรวจนับความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ได้ดังตารางที่ 5.5 โดยตัวอย่างรูปสัญลักษณ์กระแสของเหตุการณ์เหล่านี้แสดงดังรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบการตรวจนับความผิดพลาดกับสัญญาณในระบบจริง หลังการ

ตรวจสอบข้อมูลโดยละเอียด

ประเภทของเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนข้อมูลแบ่งตามวิธีการตรวจนับ		
		ขนาดกระแส	ดัชนี SE_2	วิธีการที่นำเสนอ
เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดตามรายงาน กฟผ.	8	13	14	8
เหตุการณ์ปกติทั่วไป	103	98	97	103
เหตุการณ์ความผิดพลาดจากระบบไฟฟ้าอื่นๆ	6	6	6	6



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างสัญญาณที่คาดว่าจะมีความผิดพร่องจากระบบไฟฟ้าอื่น

5.2.2 การจำแนกประเภทความผิดพร่อง

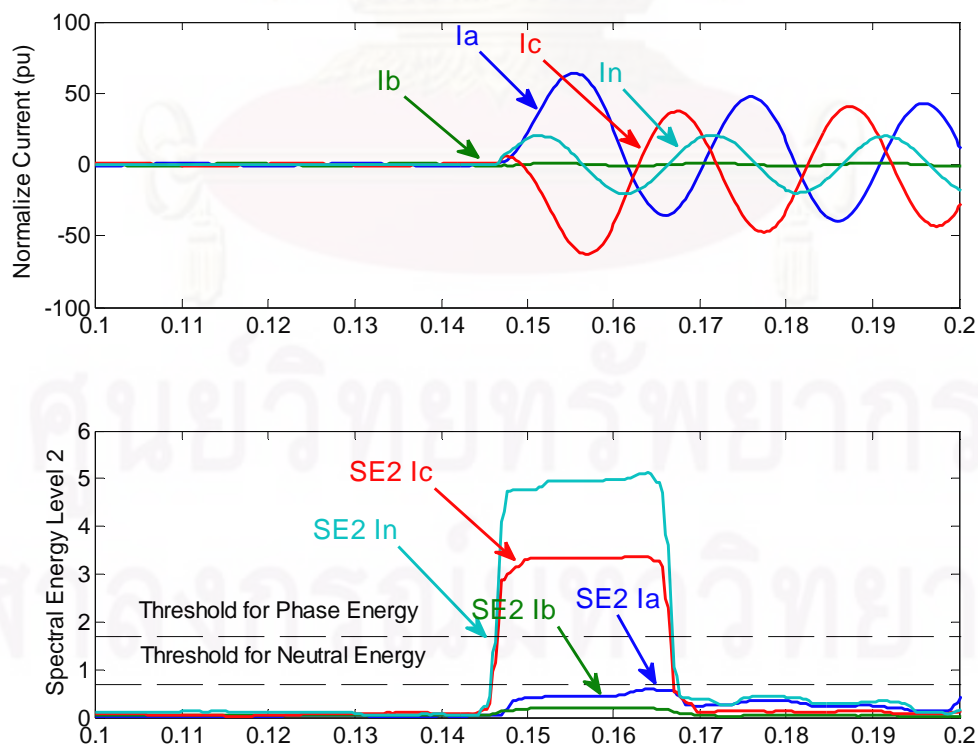
ข้อมูลสัญญาณความผิดพร่องที่ใช้ในการจำแนกประเภทความผิดพร่องนั้นได้รับมาจากข้อมูลที่เครื่อง DFR ได้ทำการเก็บบันทึกไว้ในช่วงระหว่างปี 2550 - 2553 โดยผู้เขียนได้พยายามคัดเลือกเหตุการณ์ความผิดพร่องในหลายๆประเภท เพื่อความหลากหลายในการทดสอบ ซึ่งรวมทั้งสิ้นจำนวนเหตุการณ์ที่เก็บข้อมูลเท่ากับ 48 เหตุการณ์ รายละเอียดเหตุการณ์ที่เกิดความผิดพร่องทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก

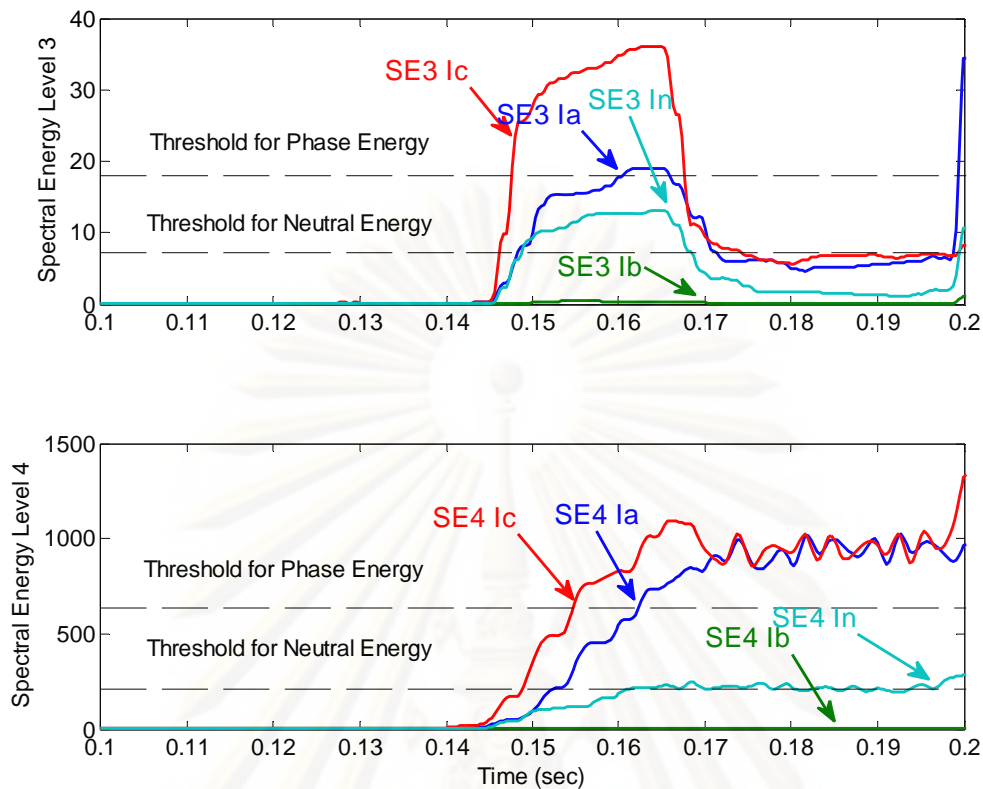
สัญญาณความผิดพร่องจริงที่เครื่อง DFR บันทึกเข้ามานั้นได้ถูกนำไปทดสอบกับกระบวนการจำแนกประเภทความผิดพร่องโดยใช้ค่าพลังงานสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 2, 3 และ 4 โดยกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนในการเลือกเฟสที่เกิดความผิดพร่องคือ $SE_{j-ph} > SE_{max} / 2$ ในการทดสอบนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละระดับชั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลประเภทของความผิดพร่องที่ผู้เชี่ยวชาญของ กฟผ. ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าพลังงานของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขในระดับชั้นใด มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการจำแนกประเภทของความผิดพร่องมากที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดพลาดพร้อมทั้งสัญญาณจากระบบจริง โดยใช้ค่าพลังงานจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในแต่ละระดับชั้น

ประเภทของความผิดพลาด	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์ที่จำแนกถูกต้อง		
		SE ระดับชั้นที่ 2	SE ระดับชั้นที่ 3	SE ระดับชั้นที่ 4
1 เฟสลงดิน	31	28	30	30
2 เฟส	5	2	2	4
2 เฟสลงดิน	10	3	1	7
3 เฟส	2	0	0	1

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการจำแนกประเภทของความผิดพลาดด้วยค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 4 นั้นมีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทความผิดพลาดมากที่สุด สำหรับระดับชั้นที่ 2 และ 3 ที่ให้ประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทความผิดพลาดไม่ค่อยดีนัก เป็นผลเนื่องมาจากค่าพลังงานในเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด (Unfaulted Phase) มีค่าสูงกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด หรือในบางกรณีเฟสที่เกิดความผิดพลาด (Faulted Phase) กลับมีค่าน้อยกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด ตัวอย่างการวิเคราะห์ความผิดพลาดประเภท 2 เฟสลงดินที่ผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 5.8





รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดพลาดที่ผิดพลาด

จากรูปที่ 5.6 เป็นความผิดพลาดประเภท A – C – G ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 2 และ 3 นั้นสำหรับเฟส C จะมีค่าสูงกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด แต่สำหรับค่าพลังงานในเฟส A นั้นมีค่าน้อยกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด ดังนั้นหากใช้ระดับชั้นที่ 2 และ 3 ในการจำแนกประเภทความผิดพลาดแล้วจะทำให้การวิเคราะห์ได้เป็นความผิดพลาดประเภท C – G ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ผิดพลาด ในส่วนระดับชั้นที่ 4 ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ 2 และ 3 นั้นพบว่าสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง จึงทำให้สรุปได้ว่าในการจำแนกความผิดพลาดนั้นการใช้ส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณอาจจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีนัก

หลังจากได้ทดสอบการจำแนกความผิดพลาดด้วยการแปลงเวฟเลขแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยได้ทำการทดสอบข้อมูลจริงเพื่อเปรียบเทียบการจำแนกประเภทความผิดพลาดกับกระบวนการจำแนกประเภทของความผิดพลาดอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการจำแนกโดยการใช้น้ำหนักของกระแส (หัวข้อที่ 3.2.1) การจำแนกโดยการใช้น้ำหนักของกระแสโดยผู้วิจัยปรับปรุงค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (หัวข้อที่ 3.2.2) กระบวนการจำแนกประเภทความผิดพลาดด้วยมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ (หัวข้อที่ 3.2.3) และกระบวนการจำแนกประเภทความผิดพลาดด้วย

มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับซึ่งปรับปรุงมุมเฟสตาม [10] (หัวข้อที่ 3.2.4) โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำแนกความผิดพร่องด้วยพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทแบบละเอียดในระดับขั้นที่ 4 (บทที่ 4) ในการทดสอบนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีการจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ โดยสรุปผลลัพธ์ของแต่ละวิธีการแสดงดังตารางที่ 5.7

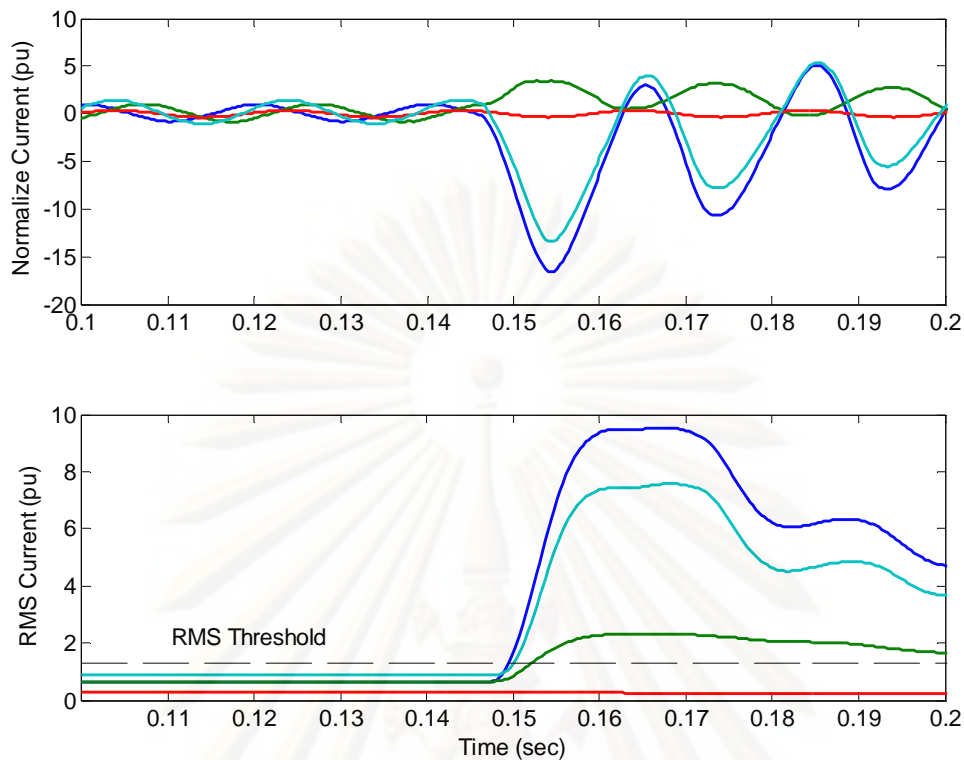
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดพร่องกับสัญญาณจากระบบจริง

ประเภทของความผิดพร่อง	จำนวนเหตุการณ์	จำนวนเหตุการณ์ที่จำแนกถูกต้อง				
		วิธีการหัวข้อ 3.2.1	วิธีการหัวข้อ 3.2.2	วิธีการหัวข้อ 3.2.3	วิธีการหัวข้อ 3.2.4	วิธีการที่นำเสนอ (บทที่ 4)
1 เฟสลงดิน	31	19	31	28	30	30
2 เฟส	5	4	4	1	4	4
2 เฟสลงดิน	10	7	9	9	10	7
3 เฟส	2	1	1	0	1	1

จากผลการทดลองการจำแนกประเภทของความผิดพร่องนั้น จะสังเกตได้ว่าวิธีการในหัวข้อที่ 3.2.1 (จำแนกประเภทความผิดพร่องโดยใช้จุดเริ่มเปลี่ยนสัมพันธ์กับค่าขนาดกระแสในสภาวะก่อนเกิดความผิดพร่อง) ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีในส่วนของความผิดพร่องประเภท 1 เฟสลงดิน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าขนาดของกระแสสายในเฟสที่ไม่เกิดความผิดพร่องนั้นมีค่าสูงเกินกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด โดยตัวอย่างการจำแนกความผิดพร่องที่ผิดพลาดแสดงได้ดังรูปที่ 5.9

วิธีการในหัวข้อที่ 3.2.2 นั้นได้ปรับปรุงวิธีการในหัวข้อที่ 3.2.1 โดยใช้จุดเริ่มเปลี่ยนที่สัมพันธ์กับขนาดของกระแสเฟสที่มีค่าสูงที่สุดแทน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวิธีการดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

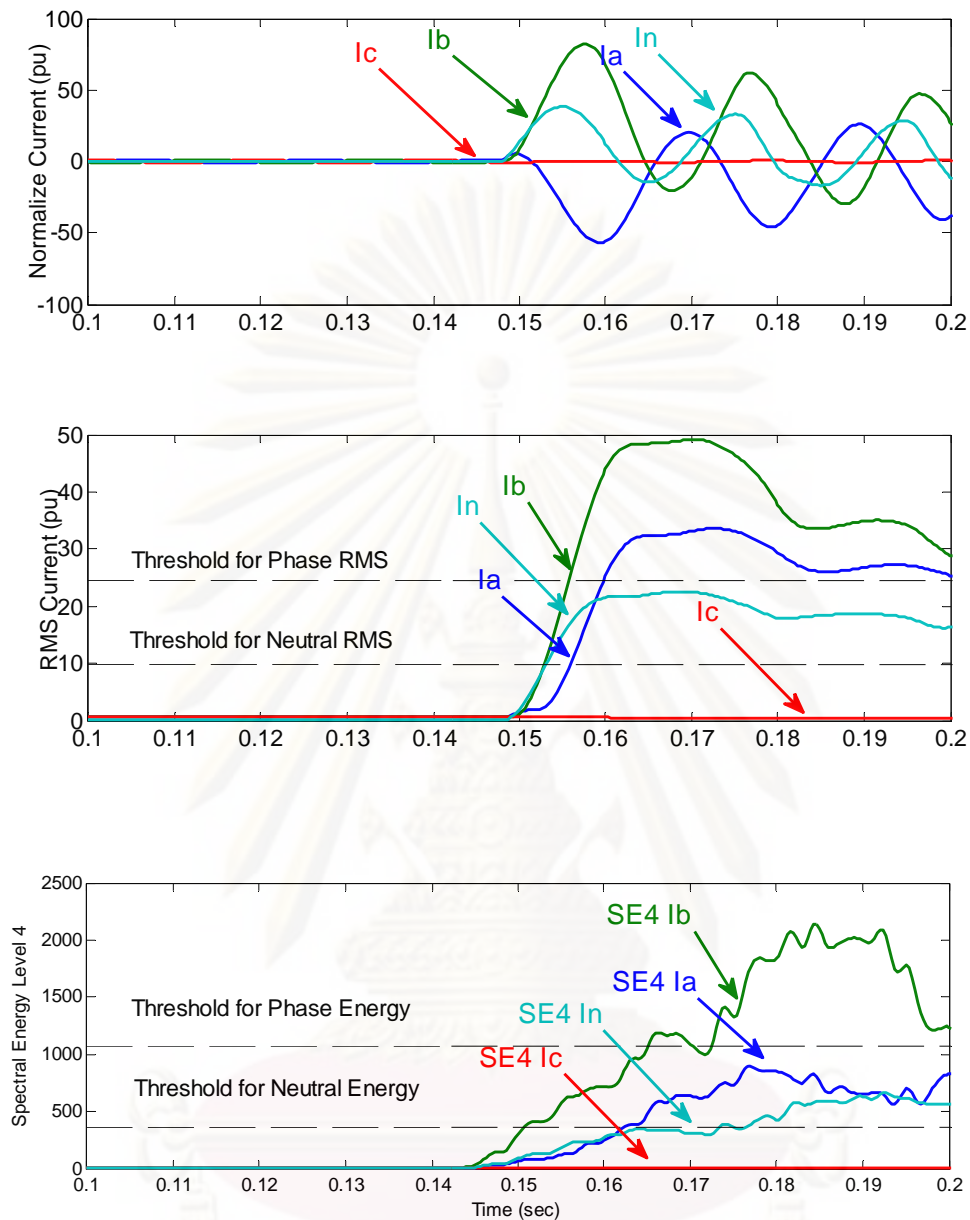
วิธีการในหัวข้อที่ 3.2.3 (จำแนกประเภทความผิดพร่องโดยใช้มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ) ให้ผลลัพธ์ผิดพลาดในส่วนของความผิดพร่องประเภท 2 เฟสเนื่องจากในทางปฏิบัตินั้น ถึงแม้ว่าจะเกิดความผิดพร่องประเภท 2 เฟสแต่ค่ากระแสลำดับที่ศูนย์จะยังคงมีค่าเล็กน้อย ดังนั้นวิธีการนี้จึงให้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดไป



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ผิดพลาด (ใช้ค่าขนาดของกระแสสาย)

วิธีการในหัวข้อ 3.2.4 เป็นการปรับปรุงเงื่อนไขมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับจากหัวข้อ 3.2.3 ให้เหมาะสมกับสัญญาณระบบไฟฟ้าจริงมากยิ่งขึ้น เมื่อทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้าจริงแล้วพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถจำแนกประเภทความผิดปกติได้ถูกต้องเกือบทุกเหตุการณ์ จะมีผิดพลาดเล็กน้อยในส่วนของความผิดปกติประเภท 1 เฟสลงดินซึ่งคาดว่าจะมีผลมาจากกระแสของโหลดซึ่งมีค่าสูงในบางกรณี

ในส่วนวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งได้แก่การจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 4 นั้นให้ผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีจะมีผิดพลาดบ้างในกรณีของความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานของเฟสที่เกิดความผิดปกติมีค่าไม่ถึงค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดของความผิดปกติประเภท 2 เฟสลงดินแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ผิดพลาด (พลังงานในระดับชั้นที่ 4)

เหตุการณ์ความผิดปกติในรูปที่ 5.10 เป็นความผิดปกติประเภท A - B - G ซึ่งการวิเคราะห์จากค่าขนาดของกระแสสายโดยใช้จุดเริ่มเปลี่ยนที่ปรับปรุงนั้นให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง แต่หากวิเคราะห์ด้วยค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลทในระดับชั้นที่ 4 นั้นพบว่าคำตอบของการวิเคราะห์จะเป็น B- G แทน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานของเฟส A มีค่าต่ำกว่าของจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดให้ของพลังงานของกระแสเฟส

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษากระบวนการตรวจจับและจำแนกประเภทความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเลขแบบเต็มหน่วย ในส่วนของการตรวจจับความผิดปกติ นั้นได้ใช้การตรวจจับความผิดปกติด้วยสัดส่วนขนาดของกระแสสายในช่วงที่เกิดความผิดปกติ เปรียบเทียบกับในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ ร่วมกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยการใส่เวฟเลขซึ่งตรวจจับความผิดปกติจากค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขในระดับชั้นที่ 2 (SE_2) โดยทั้ง 2 วิธีการจะมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของแต่ละวิธี ซึ่งในการบ่งบอกว่าสัญญาณใดเป็นสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ นั้น ทั้ง 2 วิธีการจะต้องมีค่ามากกว่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด จึงจะให้คำตอบว่าเป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติ

การจำแนกประเภทความผิดปกติสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจากค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขแบบละเอียดในระดับชั้นที่ 4 ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 โดยค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดนั้นมีด้วยกัน 2 ชนิด กล่าวคือค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับกระแสเฟส และค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับกระแสนิวทรัลซึ่งมีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของค่าพลังงานของเฟสใดๆที่มีค่าสูงสุด ($SE_{max}/2$) และ $1/5$ เท่าของค่าพลังงานของเฟสใดๆที่มีค่าสูงสุด ($SE_{max}/5$) ตามลำดับ โดยเงื่อนไขในการจำแนกประเภทความผิดปกติแสดงดังตารางที่ 4.2

ในการทดสอบกระบวนการต่าง ๆ นั้น ได้นำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้าที่จำลองด้วยโปรแกรม EMTDC/PSCAD และสัญญาณที่บันทึกได้จากเครื่อง DFR จริงในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ กฟผ. ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจจับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติได้เป็นอย่างดี โดยข้อมูลที่ตรวจจับได้นั้นเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. และเหตุการณ์ความผิดปกติจากระบบไฟฟ้าอื่นๆ (ระบบจำหน่าย เป็นต้น)

สำหรับการจำแนกประเภทความผิดปกติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบการจำแนกประเภทความผิดปกติโดยเปรียบเทียบกับรายงานเหตุการณ์ของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. โดยได้เปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการอื่นๆ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในการจำแนกประเภทความผิดปกติ นั้นการจำแนกด้วยค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลขนั้นให้ผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจำแนกโดยใช้มุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับหรือเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจำแนกโดยใช้ขนาดของกระแสสายเมื่อปรับรูปร่างจุดเริ่ม

เปลี่ยน (หัวข้อ 3.2.2) แล้วนั้นพบว่าวิธีการที่นำเสนออาจไม่ใช่วิธีการที่ดีนักในการจำแนกประเภทของความผิดปกติ

6.1 ข้อเสนอแนะ

วิธีการที่นำเสนอนี้ยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้ จึงได้เสนอแนวทางในการพัฒนาดังต่อไปนี้

1. ในการตรวจจับความผิดปกตินั้น เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ได้เก็บมาเพียง 1 วันเท่านั้นจึงทำให้อาจจะไม่ครอบคลุมในทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจริง ดังนั้นหากมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมมากขึ้นแล้วทำการทดสอบมากยิ่งขึ้นแล้วจะทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วย
2. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ข้อมูลเฉพาะจากกระแสเท่านั้นในการวิเคราะห์ ดังนั้นหากนำข้อมูลอื่นๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า การทำงานของระบบป้องกัน เป็นต้น มาช่วยในการวิเคราะห์จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. ในการจำแนกประเภทความผิดปกติข้อมูลความผิดปกติในแบบ 3 เฟสค่อนข้างพบเห็นยากในระบบไฟฟ้าจริง ดังนั้นจึงทำให้มีข้อมูลในการทดสอบกระบวนการน้อย โดยหากมีการเก็บข้อมูลความผิดปกติในแต่ละประเภทที่หลากหลายมากยิ่งขึ้นจะทำให้กระบวนการต่างๆมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วย
4. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 3,000 Hz เท่านั้นซึ่งในความเป็นจริงแล้วในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของกฟผ. ยังคงมีสัญญาณที่มีความถี่ในการสุ่มค่าอื่นๆอีก ดังนั้นในการพัฒนาประสิทธิภาพควรวีเคราะห์สัญญาณที่ความถี่อื่นๆเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- [1] Adu, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. IEEE Transactions on Power Delivery 17, 3 (July 2002) : 684-690.
- [2] Das, B., and Reddy, J.V. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. IEEE Transactions on Power Delivery 20, 2 (April 2005) : 609-616.
- [3] ศุภมาส ศิริกุล. การจำแนกพัฒนาการของฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [4] Silveira, P.M., Seara, R., and Zurn, H.H. An Approach using Wavelet Transform for Fault Type Identification in Digital Relaying. In 1999 IEEE Power Engineering Power Summer Meeting, pp.937 – 942, 1999.
- [5] Santoso, S., Powers, E.J., Grady, W.M., and Hofmann, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 2 (April 1996) : 924 – 930.
- [6] Silva, K. M., Souza, B. A., and Brito, N. S. D. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN. IEEE Transactions on Power Delivery, 21, 4 (October 2006) : 2058-2063.
- [7] Youssef, O.A.S. Combined fuzzy-logic wave-based fault classification technique for power system relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 19, 2 (April 2004) : 582-589.
- [8] Wang, H., and Keerthipala, W.W.L. Fuzzy-neuro approach to fault classification for transmission line protection. IEEE Transactions on Power Delivery, 13, 4 (October 1998) : 1093-1104.
- [9] จูติพงษ์ อินทรสินธุ์. การวิเคราะห์คุณลักษณะคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเลท. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

- [10] ปณัสน์ สวัสดิ์พิพัฒน์ และ รัชชัย เตชสุนันต์. การประยุกต์ใช้งานโปรแกรมจำแนกประเภทความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย (Implementation on fault classification program in Thailand's transmission power grid). ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32), หน้า 355-358. ปรจันบุรี, 2552.
- [11] Reddy, M.J., and Mohanta, D.K. Adaptive-neuro-fuzzy inference system approach for transmission Line fault classification and location incorporating effects of power swings. IET proceeding Generation Transmission and Distribution, 2, 2 (March 2008), 235-244.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของเหตุการณ์จาก กฟผ. และผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติ

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของเหตุการณ์ต่างๆที่ถูกลำเอียงมาทดสอบกับกระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ได้กล่าวไปในบทที่ 5 โดยกระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติที่ถูกลำเอียงมาทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 5 กระบวนการดังนี้ การจำแนกโดยใช้ขนาดของกระแส (หัวข้อที่ 3.2.1) การจำแนกโดยใช้ขนาดของกระแสโดยผู้วิจัยปรับปรุงค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (หัวข้อที่ 3.2.2) กระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับ (หัวข้อที่ 3.2.3) กระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติด้วยมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับซึ่งปรับปรุงมุมเฟสตาม [10] (หัวข้อที่ 3.2.4) และกระบวนการจำแนกประเภทความผิดปกติโดยใช้ค่าพลังงานของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตระดับชั้นที่ 4 (บทที่ 4) โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อมูลของผู้ปฏิบัติงานของ กฟผ. ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ โดยสรุปรายละเอียดของแต่ละวิธีการแสดงดังตารางที่ ก-1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก - 1 รายละเอียดผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงในแต่ละเหตุการณ์

ลำดับที่	วันที่	เวลา	ระดับแรงดัน (kV)	ประเภทความผิดปกติพ่วงจากรายงานของ กฟผ.	ความถูกต้องในการจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วง				
					วิธีการหัวข้อ 3.2.1	วิธีการหัวข้อ 3.2.2	วิธีการหัวข้อ 3.2.3	วิธีการหัวข้อ 3.2.4	วิธีการที่นำเสนอ (บทที่ 4)
1	28/06/2550	14:17 น.	230	B-G	✗	✓	✓	✓	✓
2	24/03/2550	15:45 น.	115	A-G	✓	✓	✗	✓	✓
3	07/05/2550	16:02 น.	115	A-B	✗	✗	✗	✗	✗
4	23/06/2550	16:11 น.	230	A-C-G	✓	✓	✓	✓	✓
5	02/02/2550	13.24 น.	115	A-G	✗	✓	✓	✓	✓
6	13/02/2550	09:17 น.	22	B-G	✗	✓	✓	✓	✗
7	15/06/2550	04:28 น.	115	C-G	✓	✓	✓	✓	✓
8	24/08/2550	02:48 น.	115	A-B-C	✗	✗	✗	✗	✗
9	04/06/2550	09:33 น.	115	B-G	✓	✓	✓	✓	✓
10	26/06/2550	01:25 น.	115	A-B-G	✓	✗	✓	✓	✗
11	04/06/2550	12:04 น.	115	B-G	✓	✓	✓	✓	✓
12	09/06/2550	11:44 น.	115	A-C	✓	✓	✓	✓	✓

ตารางที่ ก - 2 รายละเอียดผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงในแต่ละเหตุการณ์

ลำดับที่	วันที่	เวลา	ระดับแรงดัน (kV)	ประเภทความผิดปกติพ่วงจากรายงานของ กฟผ.	ความถูกต้องในการจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วง				
					วิธีการหัวข้อ 3.2.1	วิธีการหัวข้อ 3.2.2	วิธีการหัวข้อ 3.2.3	วิธีการหัวข้อ 3.2.4	วิธีการที่นำเสนอ (บทที่ 4)
13	08/06/2550	14:27 น.	115	B-C-G	✓	✓	✓	✓	✓
14	16/02/2552	06.40 น.	230	A - B	✓	✓	✓	✗	✓
15	17/02/2552	14.43 น.	115	A - G	✓	✓	✓	✓	✓
16	24/03/2552	14.42 น.	115	A - G	✓	✓	✓	✓	✓
17	01/03/2552	03.06 น.	230	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
18	20/03/2552	15.20 น.	115	A - G	✗	✓	✓	✓	✓
19	19/03/2552	21.27 น.	115	B - G	✗	✓	✓	✓	✓
20	27/04/2552	13.27 น.	230	A - G	✓	✓	✗	✗	✓
21	30/04/2552	00.05 น.	115	C - G	✗	✓	✓	✓	✓
22	05/04/2552	14.16 น.	230	B - G	✗	✓	✓	✓	✓
23	07/04/2552	13.31 น.	115	A - C - G	✓	✓	✓	✓	✓
24	06/05/2552	11.04 น.	230	A-B	✓	✓	✓	✗	✓

ตารางที่ ก - 3 รายละเอียดผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงในแต่ละเหตุการณ์

ลำดับที่	วันที่	เวลา	ระดับแรงดัน (kV)	ประเภทความผิดปกติพ่วงจากรายงานของ กฟผ.	ความถูกต้องในการจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วง				
					วิธีการหัวข้อ 3.2.1	วิธีการหัวข้อ 3.2.2	วิธีการหัวข้อ 3.2.3	วิธีการหัวข้อ 3.2.4	วิธีการที่นำเสนอ (บทที่ 4)
25	06/05/2552	11.40 น.	230	A-B	✓	✓	✓	✗	✓
26	20/05/2552	08.32 น.	230	A - C - G	✓	✓	✓	✓	✓
27	10/05/2552	15.10 น.	230	B - C - G	✗	✓	✓	✓	✓
28	10/05/2552	15.10 น.	230	B - C - G	✗	✓	✓	✓	✓
29	01/05/2552	06.15 น.	115	A - B - G	✓	✓	✓	✓	✗
30	01/05/2552	06.15 น.	115	A - G	✗	✓	✓	✓	✓
31	18/05/2552	18.44 น.	115	B - G	✓	✓	✓	✓	✓
32	28/05/2552	17.07 น.	115	C - G	✗	✓	✓	✓	✓
33	01/05/2552	06.01 น.	115	B - G	✓	✓	✓	✓	✓
34	09/05/2552	10.17 น.	115	B - G	✗	✓	✓	✓	✓
35	11/05/2552	15.38 น.	115	B - G	✗	✓	✓	✓	✓
36	25/05/2552	13.52 น.	115	C - G	✓	✓	✓	✗	✓

ตารางที่ ก - 4 รายละเอียดผลการทดลองจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วงในแต่ละเหตุการณ์

ลำดับที่	วันที่	เวลา	ระดับแรงดัน (kV)	ประเภทความผิดปกติพ่วงจากรายงานของ กฟผ.	ความถูกต้องในการจำแนกประเภทความผิดปกติพ่วง				
					วิธีการหัวข้อ 3.2.1	วิธีการหัวข้อ 3.2.2	วิธีการหัวข้อ 3.2.3	วิธีการหัวข้อ 3.2.4	วิธีการที่นำเสนอ (บทที่ 4)
37	29/06/2552	19.04 น.	230	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
38	02/06/2552	04.33 น.	115	A - B - C	✓	✓	✓	✓	✓
39	10/06/2552	22.59 น.	115	A - B - G	✓	✓	✓	✓	✓
40	13/07/2552	08.05 น.	230	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
41	01/07/2552	16.53 น.	115	B - G	✗	✓	✓	✓	✓
42	04/07/2552	03.01 น.	115	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
43	24/08/2552	04.01 น.	230	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
44	18/08/2552	03.00 น.	115	C - G	✓	✓	✓	✓	✓
45	20/08/2552	12.37 น.	115	B - G	✓	✓	✓	✓	✓
46	26/08/2552	17.25 น.	115	B - G	✓	✓	✓	✓	✓
47	30/08/2552	11.38 น.	115	A - B - G	✗	✓	✓	✗	✗
48	08/09/2552	08.16 น.	115	A - G	✓	✓	✓	✓	✓

ภาคผนวก ข.

การจำแนกประเภทความผิดปกติพร้อมด้วยการใช้ขนาดและมุมเฟสของกระแสลำดับ

การจำแนกประเภทความผิดปกติพร้อมด้วยวิธีการตรวจสอบมุมเฟสและขนาดของกระแสลำดับนั้น เป็นการจำแนกโดยวิเคราะห์จากมุมเฟสและค่าขนาดของกระแสลำดับ โดยดัชนีซึ่งใช้ในการจำแนกประเภทของความผิดปกติมีดังต่อไปนี้

- ดัชนีผลต่างของมุมเฟสของเฟสเซอร์กระแสเฟส และเฟสเซอร์กระแสลำดับบวกโดยอ้างอิงกับเฟสนั้นๆ

$$k_{2a} = |\angle I_a - \angle I_{a1}| \quad (1)$$

$$k_{2b} = |\angle I_b - \angle I_{b1}| \quad (2)$$

$$k_{2c} = |\angle I_c - \angle I_{c1}| \quad (3)$$

- ดัชนีผลต่างของมุมเฟสของเฟสเซอร์กระแสลำดับบวก และเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ โดยอ้างอิงกับเฟสนั้นๆ

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| \quad (4)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| \quad (5)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| \quad (6)$$

- ดัชนีค่าสัดส่วนระหว่างขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับที่ศูนย์ และเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ ต่อ เฟสเซอร์กระแสลำดับบวก

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} \quad (7)$$

$$I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (8)$$

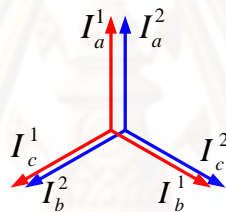
โดย $\angle I_{ph}$ คือ มุมของเฟสเซอร์กระแสเฟส โดย ph คือเฟส A, B และ C
 $\angle I_{ph1}$ คือ มุมของเฟสเซอร์กระแสลำดับบวก ที่อ้างอิงตามเฟสใดๆ
 $\angle I_{ph2}$ คือ มุมของเฟสเซอร์กระแสลำดับลบ ที่อ้างอิงตามเฟสใดๆ
 $|I_0|$ คือ ค่าขนาดของเฟสเซอร์กระแสลำดับศูนย์

นำค่าเงื่อนไขในการเกิดการลัดวงจรนำไปแทนกลับในสมการการแปลงจะได้

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_F \\ I_F \\ I_F \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_F}{3} \quad (13)$$

ซึ่งสามารถแสดงกระแสลำดับต่างๆ เป็นเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 เฟสเซอร์ของกระแสลำดับขณะเกิดการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดิน

จากรูปที่ ข.2 และสมการที่ (13) จะสามารถเขียนเงื่อนไขในการวิเคราะห์ของการลัดวงจรแบบเฟส a ลงดินได้ดังนี้

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 0 \quad (14)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 120 \quad (15)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 120 \quad (16)$$

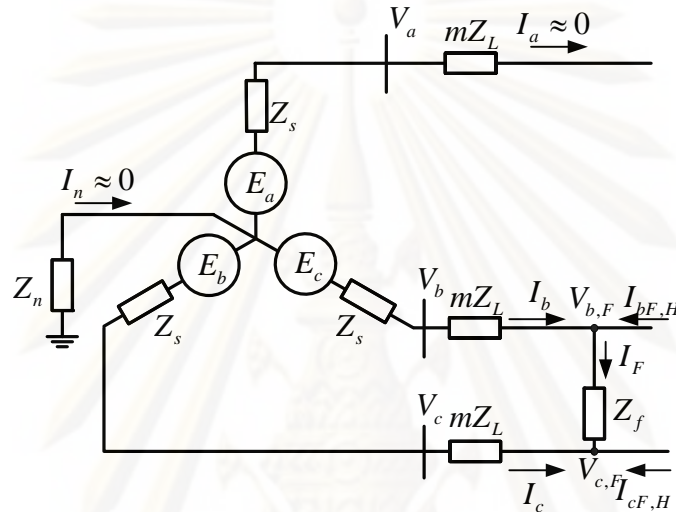
$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} = 1, \quad I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} = 1 \quad (17)$$

ในการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่มีเฟส b หรือเฟส c เป็นเฟสที่ลัดวงจร จะสามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน และจะมีค่าดัชนีในการระบุชนิดของการลัดวงจรแสดงดังในตารางที่ 3.3

การคำนวณค่าดัชนีของการลัดวงจรแบบสองเฟส

การคำนวณค่าดัชนีของการลัดวงจรแบบสองเฟส จะแสดงตัวอย่างคำนวณอย่างละเอียดในกรณีที่เฟส b และเฟส c เป็นเฟสที่ลัดวงจร จากค่าที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการลัดวงจรแบบสองเฟสที่มีอื่นเป็นเฟสที่ลัดวงจรได้

การลัดวงจรแบบสองเฟสที่มีการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 วงจรสมมูลการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c

จากรูปที่ ข.3 หากค่ากระแสการลัดวงจรส่วนใหญ่เป็นกระแสจากทางฝั่งซ้าย จะสามารถเขียนสมการเงื่อนไขการลัดวงจรได้ดังนี้

$$I_a = 0 \quad (18)$$

$$I_b = I_F \quad (19)$$

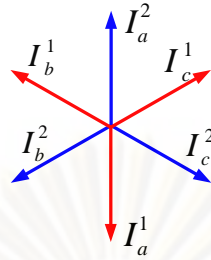
$$I_c = -I_F \quad (20)$$

นำค่าเงื่อนไขในการเกิดการลัดวงจรนำไปแทนกลับในสมการการแปลงจะสามารถเขียนสมการกระแสลำดับได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_F \\ -I_F \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ I_F \angle 90^\circ \\ I_F \angle -90^\circ \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1}{3} I_F \angle 90^\circ \quad (22)$$

จากสมการที่ (22) สามารถแสดงกระแสลำดับต่างๆ ในรูปเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 เฟสเซอร์ของกระแสลำดับขณะเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส b และเฟส c

จากรูปที่ ข.4 และสมการที่ (22) จะสามารถเขียนเงื่อนไขในการวิเคราะห์ของการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ได้เป็น

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 180 \quad (23)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 60 \quad (24)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 60 \quad (25)$$

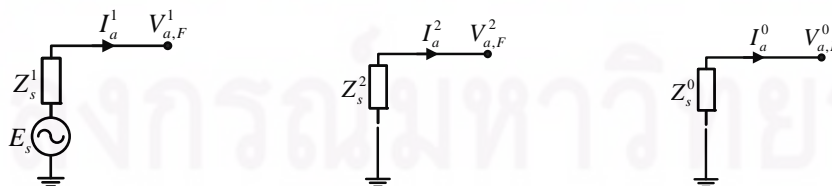
$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} = 0, \quad I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} = 1 \quad (26)$$

ในการลัดวงจรแบบสองที่มีเฟส a และเฟส b หรือเฟส a และเฟส c เป็นเฟสที่ลัดวงจร จะสามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน และจะมีค่าดัชนีในการระบุชนิดของการลัดวงจรแสดงดังในตารางที่ 3.3

การคำนวณค่าดัชนีของการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

การคำนวณค่าดัชนีของการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน จะแสดงตัวอย่างคำนวณอย่างละเอียดในกรณีที่มีเฟส b และเฟส c เป็นเฟสที่ลัดวงจร จากค่าที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดินที่มีอื่นเป็นเฟสที่ลัดวงจรได้

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบลำดับขณะเกิดการลัดวงจร จะสามารถเขียนได้ดังรูปที่ ข.5



a) ส่วนประกอบลำดับบวก b) ส่วนประกอบลำดับลบ c) ส่วนประกอบลำดับศูนย์

รูปที่ ข.5 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรของส่วนประกอบลำดับ

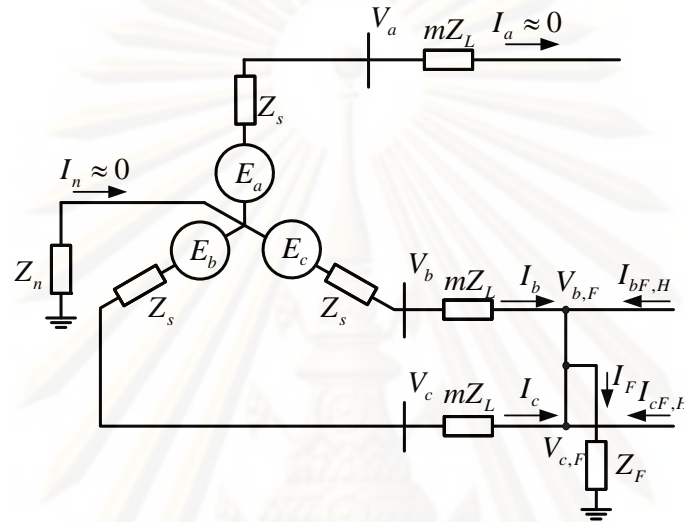
จากรูปที่ ข.5 สามารถเขียนสมการแรงดัน ณ จุดเกิดการลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_{0a,F} = 0 - Z_{0s} I_{0a} \quad (27)$$

$$V_{1a,F} = E_a - Z_{1s} I_{1a} \quad (28)$$

$$V_{2a,F} = 0 - Z_{2s} I_{2a} \quad (29)$$

การลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดินสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 วงจรสมมูลการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดิน

จากรูปที่ ข.6 การลัดวงจรแบบเฟส b เฟส c ลงดิน ตั้งสมมุติฐานว่ากระแสลัดวงจรส่วนใหญ่เกิดจากกระแสทางฝั่งซ้าย และกระแสไหลดขณะเกิดการลัดวงจรมีค่าน้อยมาก จะสามารถเขียนสมการการเงื่อนไขการลัดวงจร ณ จุดเกิดการลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_{b,F} = V_{c,F} = Z_F (I_b + I_c) \quad (30)$$

$$I_a = I_{0a} + I_{1a} + I_{2a} = 0 \quad (31)$$

จากสมการการแปลง สามารถเขียน $V_{b,F}$ และ $V_{c,F}$ อยู่ในรูปส่วนประกอบลำดับได้ดังนี้

$$V_{b,F} = V_{0a,F} + a^2 V_{1a,F} + a V_{2a,F} \quad (32)$$

$$V_{c,F} = V_{0a,F} + a V_{1a,F} + a^2 V_{2a,F} \quad (33)$$

จากสมการเงื่อนไขการลัดวงจร แทนค่า $V_{b,F}$ และ $V_{c,F}$ ลงในสมการที่ (30) จะได้

$$V_{0a,F} + a^2V_{1a,F} + aV_{2a,F} = V_{0a,F} + aV_{1a,F} + a^2V_{2a,F} \quad (34)$$

$$V_{2a,F} = V_{1a,F} \quad (35)$$

จากสมการการแปลง แทนค่า I_b และ I_c ในสมการที่ (30) จะได้

$$V_{b,F} = Z_F (I_{0a} + a^2I_{1a} + aI_{2a} + I_{0a} + aI_{1a} + a^2I_{2a}) \quad (36)$$

$$V_{b,F} = Z_F (2I_{0a} - I_{1a} - I_{2a}) \quad (37)$$

$$V_b = 3Z_F I_{0a} \quad (38)$$

แทนค่า $V_{b,F}$ จากสมการที่ (36) และค่า $V_{2a,F}$ จากสมการที่ (35) ลงในสมการที่ (32) จะได้

$$3Z_F I_{0a} = V_{0a,F} + a^2V_{1a,F} + aV_{1a,F} \quad (33)$$

$$3Z_F I_{0a} = V_{0a,F} + (a^2 + a)V_{1a,F} \quad (34)$$

$$3Z_F I_{0a} = V_{0a,F} - V_{1a,F} \quad (35)$$

แทนค่า $V_{0a,F}$ และ $V_{1a,F}$ จากสมการที่ (27),(28) ลงในสมการที่ (34) แก้สมการหาค่า I_{0a} จะได้

$$I_{0a} = -\frac{E_a - Z_{1s}I_{1a}}{Z_{0s} + 3Z_F} \quad (36)$$

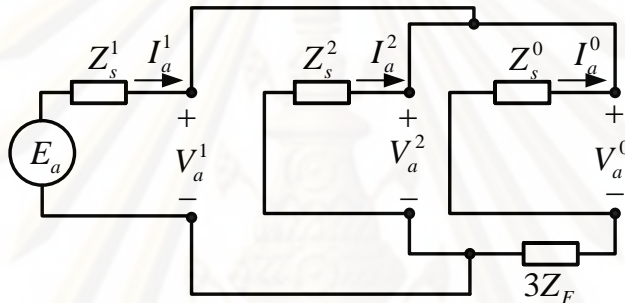
แทนค่า $V_{1a,F}$ และ $V_{2a,F}$ จากสมการที่ (28),(29) ลงในสมการที่ (35) แก้สมการหาค่า I_{2a} จะได้

$$I_{2a} = -\frac{E_a - Z_{1s}I_{1a}}{Z_{2s}} \quad (37)$$

แทนค่า I_{2a} และ I_{0a} ลงในสมการที่ (31) เพื่อหาค่า I_{1a} จะได้ค่าคือ

$$I_{1a} = \frac{E_a}{Z_{1s} + \frac{Z_{2s}(Z_{0s} + 3Z_F)}{Z_{2s} + Z_{0s} + Z_F}} \quad (38)$$

จากสมการที่ (36), (37), (38) จะสามารถเขียนเป็นรูปวงจรแทนการลัดวงจรแบบ สองเฟส
ลงดินได้ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 แบบจำลองการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดิน

จากรูปที่ ข.7 สามารถเขียนสมการแสดงกระแส I_{2a} และกระแส I_{0a} ในรูปของกระแส I_{1a}
ได้ดังนี้

$$I_{2a} = -\frac{(Z_{0L} + 3Z_F)I_{1a}}{Z_{2L} + Z_{0L} + 3Z_F} \quad (69)$$

$$I_{0a} = -\frac{Z_{2L}I_{1a}}{Z_{2L} + Z_{0L} + 3Z_F} \quad (40)$$

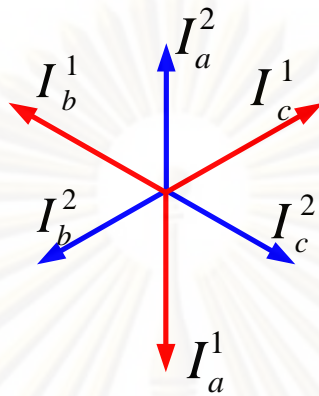
จากสมการที่ (69) และ (40) หากตั้งสมมุติฐานให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่า $X \gg R$
จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_{2a} = -kI_{1a} \quad (41)$$

$$I_{0a} = -k_1I_{1a} \quad (42)$$

โดยที่ k และ k_1 เป็นจำนวนจริง

จากสมการที่ (41) จะสามารถเขียนเฟสเซอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลำดับบวก และกระแสลำดับลบได้ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 เฟสเซอร์ของกระแสลำดับขณะเกิดการลัดวงจรแบบเฟส b และเฟส c ลงดิน

จากรูปที่ ข.8 และสมการที่ (41), (42) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$k_{2a12} = |\angle I_{a1} - \angle I_{a2}| = 180 \quad (23)$$

$$k_{2b12} = |\angle I_{b1} - \angle I_{b2}| = 60 \quad (24)$$

$$k_{2c12} = |\angle I_{c1} - \angle I_{c2}| = 60 \quad (25)$$

$$I_{01} = \frac{|I_0|}{|I_1|} = k, \quad I_{21} = \frac{|I_2|}{|I_1|} = k_1 \quad (26)$$

โดยที่

$$k = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}, \quad k_1 = \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (27)$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ปณัสย์ สวัสดิ์ดีพัฒน์ และ ธวัชชัย เตชัสอนันต์. การประยุกต์ใช้งานโปรแกรมจำแนกประเภทความผิดปกติพ้องในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย (Implementation on fault classification program in Thailand's transmission power grid), ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32), หน้า 355-358, ปราจีนบุรี, 2552.

Sawatpipat, P. and Tayjasant, T. Fault classification for Thailand's transmission lines based on discrete wavelet transform, In ECTI-CON 2010, Chaing Mai, 2010



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปณัศย์ สวัสดิ์พัฒน์ เกิดวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2549 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกร ระดับ 4 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย