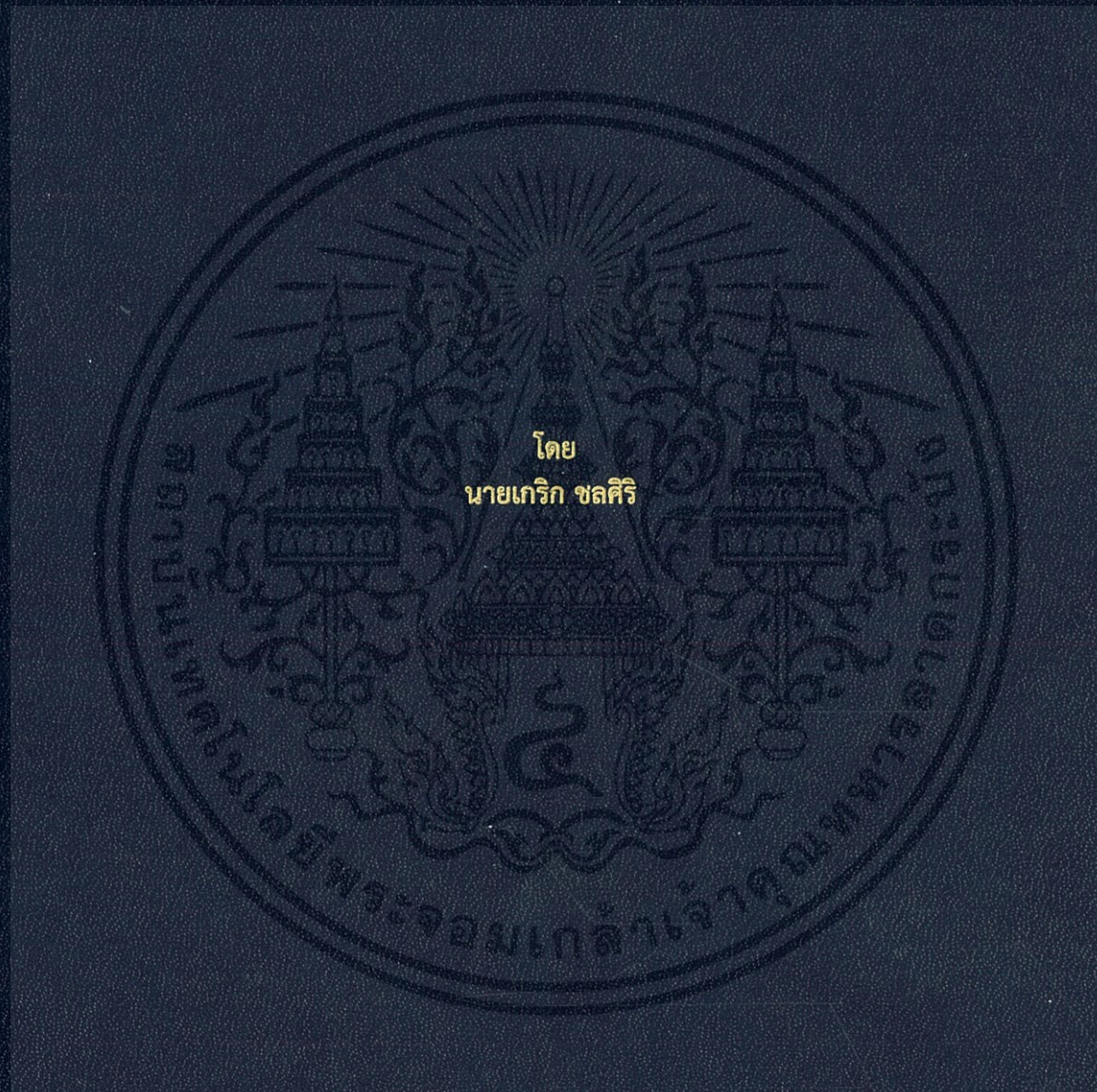


การออกแบบรีเลย์กระแสเกินโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และ
การแปลงเวฟเล็ตสำหรับสายส่ง
DESIGN OF OVER CURRENT RELAY USING MICROCONTROLLERS AND
WAVELET TRANSFORM FOR TRANSMISSION LINE



โดย
นายเกริก ชลศิริ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบรีเลย์กระแสเกินโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และ
การแปลงเวฟเล็ตสำหรับสายส่ง
DESIGN OF OVER CURRENT RELAY USING MICROCONTROLLERS AND
WAVELET TRANSFORM FOR TRANSMISSION LINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF OVER CURRENT RELAY USING MICROCONTROLLERS AND
WAVELET TRANSFORM FOR TRANSMISSION LINE



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BECHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การออกแบบรีเลย์กระแสเกินโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการแปลงเวฟเล็ตสำหรับสายส่ง
DESIGN OF OVER CURRENT RELAY USING MICROCONTROLLERS AND WAVELET
TRANSFORM FOR TRANSMISSION LINE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อรรถพล เเง่าพิทักษ์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบบรีเลย์กระแสน์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการแปลงเวฟเล็ดสำหรับสายส่ง

ผู้จัดทำ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.อรรถพล เเง่าพิทักษ์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบรีเลย์กระแสเกินโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการแปลงเวฟเล็ต
สำหรับสายส่ง

นาย เกริก ชลศิริ

รศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและสาธิตการออกแบบรีเลย์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลเพื่อตรวจจับ และแยกประเภทของฟอลต์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการทางเวฟเล็ต และจำลองผลด้วยชุดทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการแทนที่การใช้จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจำลองเงื่อนไข 2 รูปแบบคือ ประเภทของฟอลต์ และ ระยะทางที่เกิดฟอลต์ โดยได้ศึกษาพัฒนาและปรับปรุงวิธีการทางเวฟเล็ตให้เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการตรวจจับการเกิดฟอลต์และแยกประเภทของฟอลต์ ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยนำเสนอแนวโน้มของผลลัพธ์ที่ตอบสนองต่อชนิดของฟอลต์ ระยะทางที่เกิดฟอลต์ และ อัตราการสุ่มข้อมูลของสัญญาณ พร้อมเปรียบเทียบ ความเร็ว และ ความถูกต้องของวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) กับวิธีการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ระยะสั้น (Short time Fourier transform : STFT) ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายอยู่แล้วในปัจจุบัน และ นำเสนอเทคนิควิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดความผิดพลาดในกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับการพัฒนาการป้องกันฟอลต์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

Design of Over Current Relay Using Microcontrollers and Wavelet Transform for Transmission Line

Kroek chonsiri

Assoc. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul Supervisor

ABSTRACT

This project study and demonstrate about the design of a relay using microcontroller for processing to detect and classification faults in transmission lines by using wavelet. Method. And simulation result in distribution system experiment in the laboratory. Instead of using simulators with computer software. The two types of simulation are the fault type and fault position. We have studied, developed and improved the wavelet method suitable for use in detection and classifications of faults. To be more accurate and effective. By presenting the trend of results that respond to the fault type, fault position and sampling rate. And Comparing the speed and accuracy of the discrete wavelet transform (DWT) method with the short-term Fourier transform (STFT) method, that method was widely used today. And presentation of techniques in optimization methods. And reduce errors in the analysis process. It is the knowledge for the development of defect protection to be more effective in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เป็นเพราะการให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการวิจัยจาก รศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้คอยให้คำแนะนำตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ประสทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำโครงการในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณ จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์ ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยแก้ปัญหา และช่วยเหลือในการทดสอบจนสำเร็จลุล่วง

ผู้วิจัย จากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความกรุณาเปิดใช้อุปกรณ์เครื่องมือ อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการและผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(Lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

สุดท้ายผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาด้านระบบป้องกันหรือรีเลย์ป้องกันในระบบไฟฟ้าและสามารถย่อองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปต่อยอดเพื่อใช้ในการทำงานด้านวิศวกรรมอื่น ๆ ต่อไป

เกริก ชลศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	4
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	4
1.5 แผนการดำเนินงาน	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 กระแสตัดวงจร	9
2.1.1 การเกิดกระแสตัดวงจร	9
2.1.2 ลักษณะของกระแสตัดวงจร	11
2.2 การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ	12
2.2.1 ส่วนประกอบสมมาตร	12
2.2.2 สมการแปลงคาร์ก	14
2.3 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์	16
2.3.1 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform : FT)	17
2.3.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT)	20
2.3.2.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	
(Continuous Wavelet Transform : CWT)	23
2.3.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง	
(Discrete Wavelet Transform : DWT)	24

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	32
3.1 การจำลองฟอลต์	32
3.1.1 ชุดทดลองวงจรจำลองสายส่งแบบพาย	32
3.1.2 วิธีจำลองฟอลต์แต่ละรูปแบบ	34
3.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)	35
3.2.1 การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์	35
3.2.2 การเลือกเซนเซอร์วัดกระแส	37
3.2.3 แผนผังวงจร	38
3.3 ซอฟต์แวร์ (Software)	39
3.3.1 อันกอลิทึมที่ออกแบบ	39
3.3.2 การประยุกต์ใช้สมการแปลงคาร์ก	43
3.3.3 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่สูง ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง	45
3.3.4 เวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet)	46
3.3.5 อัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate)	47
3.3.6 เทคนิค Double Detection	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง	49
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุป	60
5.1.1 ผลที่เกิดจากการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการวิเคราะห์	60
5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็ว และ ความถูกต้อง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก	69
ประวัติผู้เขียน	74

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการลัดวงจรในสายส่งกำลัง	9
2.2	กระแสขณะเกิดการลัดวงจรของฟอลต์แต่ละชนิด	10
2.3	ส่วนประกอบของกระแสลัดวงจร	11
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณค่ายอดของกระแสลัดวงจรกับอัตราส่วนของ X และ R	11
2.5	ส่วนประกอบสมมาตร	12
2.6	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเวกเตอร์สัญญาณเฟสเซอร์ A,B,C กับ α, β	15
2.7	การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)	18
2.8	วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีฟูเรียร์ระยะสั้น (SFTF)	19
2.9	การแปลงฟูเรียร์ระยะสั้น (STFT)	20
2.10	ข้อการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT)	21
2.11	ข้อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการใช้ FT , STFT และ WT	22
2.12	การสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง ของฟังก์ชันเวฟเล็ต	20
2.13	การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	21
2.14	การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT)	23
2.15	การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (DWT)	24
2.16	กระบวนการแยกองค์ประกอบสัญญาณของฟิลเตอร์แบงค์	25
2.17	กระบวนการรวมกลับสัญญาณของฟิลเตอร์แบงค์	25
2.18	ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตของออกเทปฟิลเตอร์แบงค์แบบ 3 ระดับ	26
2.19	กระบวนการ FDWT ที่ LV2	27
2.20	กระบวนการ FDWT สำหรับสัมประสิทธิ์ 4 ตัว	28
2.21	กระบวนการ IDWT สำหรับสัมประสิทธิ์ 4 ตัว	29
2.22	กระบวนการ IDWT ที่ LV2	29
3.1	วันไลน์ไดอะแกรม ระบบสายส่งกำลัง	32
3.2	ชุดทดลองจำลองฟอลต์ในสายส่งชนิดพาย (วงจร)	33
3.3	ชุดทดลองจำลองฟอลต์ในสายส่งชนิดพาย (ชุดทดลองจริง)	33
3.4	แผงควบคุมฟอลต์	34
3.5	การต่อวงจรสำหรับฟอลต์แต่ละประเภท	34
3.6	รูปที่ 3.6 Arduino DUE	36
3.7	หม้อแปลงกระแส 3 เฟส พิกัด 50A/333mV-Class 0.2	37
3.8	วงจร Voltage Divider	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.9	ผังวงจรสำหรับปรับค่าสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส	38
3.10	กระบวนการ แผนผังแสดงการทำงานของรีเลย์	39
3.11	การแยกประเภทฟอลต์ด้วยสถานะฟอลต์ในเฟส A , B , C และ ศูนย์ (Zero)	40
3.12	การลดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส ABC ด้วยวิธีแปลงคาร์ก	41
3.13	ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส ABC ด้วยวิธีแปลงคาร์ก	42
3.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต ABC กับ Alpha กรณีเกิด BC fault	43
3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างเฟส ABC, α, β และ $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ ในสภาวะ 3 เฟสไม่สมดุล	44
3.16	การเลือกวิเคราะห์บางองค์ประกอบ ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง	45
3.17	Scaling function (ซ้าย) และ Wavelet function (ขวา) ของ Wavelet ชนิด db2	46
4.1	แผนผังขั้นตอนการทดลอง	49
4.2	ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (AG fault)	50
4.3	ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (BC fault)	52
4.4	ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (ABG fault)	54
4.5	ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส (ABC fault)	56
4.6	ขนาดสัญญาณกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินโครงการ	7
3.1	คุณสมบัติเชิงเทคนิคของ Arduino DUE	36
3.2	เวลาที่ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธี DWT เทียบระหว่าง Arduino DUE และ Mega	36
3.3	ค่าคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสจำแนกตาม Accuracy Class	37
3.4	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของ Wavelet ชนิด DB2	46
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และ อัตราสุ่มข้อมูลสูงสุดที่ใช้ได้	47
4.1	ระยะเวลาตรวจจับฟอลต์ เฟสบวก (Positive Phase) หน่วย มิลลิวินาที (ms)	61
4.2	ระยะเวลาตรวจจับฟอลต์ เฟสอัลฟา (Alpha Phase) หน่วย มิลลิวินาที (ms)	62
4.3	ผลการตรวจแยกประเภทฟอลต์ ใช้เทคนิคตรวจจับ 1 ครั้ง (Single Detection)	63
4.4	ผลการตรวจแยกประเภทฟอลต์ ใช้เทคนิคตรวจจับ 2 ครั้ง (Double Detection)	64
4.5	ระยะเวลาและความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์ เทียบระหว่าง เฟสบวก และ เฟสอัลฟา (ระยะเวลาหน่วย มิลลิวินาที)	65
4.6	ระยะเวลาในการตรวจจับ และ แยกชนิดฟอลต์ (ระยะเวลาหน่วย มิลลิวินาที)	65
4.7	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับ และ แยกชนิดฟอลต์	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหลายประเทศ ค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) มักถูกใช้แสดงอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศนั้น ๆ โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา (non-OECD) อย่างเช่นประเทศไทยนั้น จากการเปรียบเทียบโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การเพิ่มของ GDP มักจะมาพร้อมกับการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการขยายตัวของประชากร จึงส่งผลให้ต้องมีการเพิ่มอุปสงค์ให้เพียงพอกับอุปทาน ไม่ว่าจะมาในรูปของการผลิตสินค้า และการบริการ ที่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น และสิ่งที่สำคัญไม่แพ้ปริมาณการใช้ไฟฟ้า คือ ความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ที่จะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ทั้งต่อผู้บริโภค และ นักลงทุน ที่เป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากที่สุดในระบบไฟฟ้า ก็คือ สายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งมักพบปัญหาสำคัญได้บ่อยครั้ง คือ ความผิดปกติ (ฟอลต์: fault) ในระบบไฟฟ้า โดยฟอลต์นั้นอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวน หรือ มีสิ่งอื่นใด เช่น ต้นไม้ นก หรือ วัตถุอื่นใด มาเกียดขวาง หรือ ลาดผ่านสายส่งกำลังจนทำให้เกิดการลัดวงจรกันระหว่างสายส่งเฟสอื่น หรือ ตัวนำอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดลัดวงจรออกสู่ภายนอก จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกิดขนาดที่รับไหว ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อสายส่งกำลัง และบริเวณที่ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่ออยู่โดยรอบไม่ว่าจะเป็น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในครัวเรือน และยังก่อให้เกิดความสูญเสียพลังงานไปกับ กระแสอาร์ค (Arc) และกระแสฟอลต์ที่รั่วไหลออกนอกระบบ และยังทำให้คุณภาพทางไฟฟ้าลดลงอีกด้วย ดังนั้นการตรวจจับฟอลต์เพื่อตัดตอนปัญหาได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ เพื่อลดผลกระทบและความเสียหายที่อาจกระจายเป็นวงกว้าง และสามารถกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นั้นถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลัง และยังสามารถทำให้วางแผนในการซ่อมบำรุง และแก้ไขระบบไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว และยืดอายุการใช้งานของสายส่งและบริเวณที่ไฟฟ้าได้ยาวนานยิ่งขึ้น

อุปกรณ์ป้องกันสายส่งกำลังที่สำคัญและนิยมใช้กันคือการใช้รีเลย์ป้องกัน ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดในระบบไฟฟ้ารวมถึงสายส่งกำลังได้ โดยความรวดเร็ว และแม่นยำในการตรวจจับฟอลต์นั้น จะแสดงถึงคุณภาพของรีเลย์นั้น ๆ ซึ่งหากยังมีฟอลต์อยู่ในระบบนานเท่าไร้ความสูญเสียก็จะยิ่งมากขึ้นตามไปเท่านั้น จึงทำให้การพัฒนา และการค้นหากระบวนการใหม่ ๆ สำหรับมาใช้วิเคราะห์สัญญาณเพื่อการตรวจจับฟอลต์อย่างมีประสิทธิภาพ และรวดเร็วขึ้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการป้องกันสายส่งถูกแบ่งย่อยออกเป็นหลายรูปแบบตามแต่วัตถุประสงค์การใช้งาน และบริบทที่เลือกป้องกัน เช่น หลักการของรีเลย์กระแสไฟฟ้าเกิน รีเลย์กระแสไฟฟ้าเกินร่วลงดิน รีเลย์แรงดันไฟฟ้าขาด รีเลย์แรงดันไฟฟ้าเกิน และ รีเลย์ระยะทาง เป็นต้น [1]-[6] และในงานวิจัยนี้ได้เลือกนำเสนอการป้องกันฟอลต์ในระบบสายส่งกำลัง ซึ่งจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการจำลองสัญญาณผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ATP/EMTP หรือ PSCAD [7] เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการจำลองผ่านคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กนั้นไม่สามารถจำลองตัวแปรได้หลากหลายพอ จนทำให้ข้อมูลสัญญาณฟอลต์ที่ได้อาจคลาดเคลื่อนไปเมื่อนำไปใช้ในระบบจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกจำลองการเกิดฟอลต์จากชุดจำลองสายส่งกำลังในห้องปฏิบัติการ [8]-[10] ซึ่งถูกออกแบบให้รองรับกระแสฟอลต์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

และจากการศึกษางานบทความวิชาการ และบทความของทีมนักวิจัยอื่น สามารถจำแนกหลักการในการป้องกันสายส่งกำลังได้ 3 หลักการคือ งานวิจัยที่ใช้หลักการของ รีเลย์กระแสเกิน (Over Current Relay) ตามงานวิจัยที่ [11]-[12] ซึ่งวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่ให้เกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ ซึ่งมีข้อดีคือใช้ข้อมูลน้อย โดยอาศัยการวัดกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ก็ทำได้เพียงระบุสถานการณ์เกิดฟอลต์เพียงเท่านั้นไม่สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับการป้องกันสายส่งโดยเฉพาะ ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถคำนวณย้อนกลับหาระยะตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้จากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดฟอลต์ ตามงานวิจัยที่ [13]-[14] แต่แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลหลายตัว โดยต้องอาศัยการวัดทั้ง กระแส และแรงดัน แต่ก็มีปัญหาคือการหาตำแหน่งยังไม่มีคามแม่นยำเท่าที่ควร โดยเกิดจากฟอลต์โหลดที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่สาเหตุการเกิดฟอลต์ โดยให้ผลลัพธ์ประมาณคร่าว ๆ เป็นวงกว้างเพียงเท่านั้นไม่ได้ระบุเจาะจงชัดเจน จึงทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการของ คลื่นเดินทาง (Travelling Wave) ตามงานวิจัยที่ [15]-[17] ขึ้นมาซึ่งอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่นที่เกิดจากฟอลต์ โดยหาระยะทางจากการอัตราส่วนของผลต่างของ ณ เวลาที่เกิดฟอลต์และเวลา ณ ที่คลื่นสะท้อนกลับมายังตำแหน่งของรีเลย์อีกครั้งโดย กับ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในสายส่ง จึงทำให้วิธีมีความแม่นยำที่ดีกว่าแบบรีเลย์ระยะทาง แต่เนื่องจากต้องมีการใช้การคำนวณที่ซับซ้อน และมีตัวแปรที่ไม่คงที่หลายอย่าง ประกอบกับคลื่นสะท้อนที่มีขนาดเล็กทำให้ในการในการทดลองจริง มีความยากลำบากในการวัดสัญญาณ และจากเหตุผลที่กล่าวมาในปริญญา นิพนธ์ฉบับจึงเลือกใช้การออกแบบรีเลย์โดยใช้หลักการของรีเลย์กระแสเกินเนื่องจากมีความง่ายต่อการเก็บข้อมูลโดยวัดเพียงแค่ค่ากระแสไฟฟ้าเท่านั้น แต่ก็สามารถตรวจจับการเกิดฟอลต์ และแยกประเภทของฟอลต์ได้ ส่วนวิธีการที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณนั้นนิยมใช้อยู่ 3 วิธีคือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Root Mean Square : RMS) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีการคำนวณที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับซ้อน และยังเป็นวิธีที่ถูกใช้ในเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย เนื่องจากถูกบังคับใช้ตามมาตรฐาน IEEE ของเครื่องมือ Class A,B,C และ S ที่ต้องสามารถวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการ TrueRMS (RMS) ได้ และยังสามารถวิเคราะห์บนโดเมนเวลา แต่ก็สามารถประยุกต์ไปวิเคราะห์บนโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์ได้ละเอียดยิ่งขึ้นได้ ซึ่งต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier Analysis) มาร่วมด้วย โดยฟูเรียร์เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณโดยแปลงจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่เพื่อทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมาบนความถี่ต่าง ๆ ทำให้วิเคราะห์สัญญาณได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณได้ง่ายยิ่งขึ้นโดยจำแนกสัญญาณรูปแบบใด ๆ ออกเป็นสัญญาณไซน์บนความถี่ต่าง ๆ แทน โดยจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกใช้วิธีการนี้ เช่น ในงานวิจัยที่ [11]-[15] เนื่องจากในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นผลลัพธ์ในช่วงสภาวะคงที่ของสัญญาณนั้น จะวิเคราะห์ในรูปแบบของโดเมนความถี่ทั้งหมดทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ แต่เนื่องด้วยต้องใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 คาบสัญญาณทำให้ต้องใช้พลังในการประมวลสูงโดยเฉพาะหากมีการเพิ่มอัตราการสุ่มข้อมูล ก็จะส่งผลให้มีข้อมูลใน 1 คาบสัญญาณมากขึ้น ทำให้ใช้พลังในการประมวลสูงขึ้นตามไปด้วย และ เป็นการยากหากต้องการเลือกวิเคราะห์ความถี่ใด ๆ เพียงหนึ่งเดียว เนื่องจากสัญญาณพอลต์เป็นสัญญาณแบบเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ (Non-stationary signal) และมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะการเกิดพอลต์ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ความถี่ 2 ย่านเป็นอย่างน้อย ทำให้มีผู้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์เวฟเล็ต (Wavelet Analysis) [18]-[25] ขึ้นมาซึ่งถือเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่วิเคราะห์บนโดเมนเวลาและยังสามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมาในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้ เช่นเดียวกับฟูเรียร์ แต่สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้ดีกว่า โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ [26] ถึง [35] ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นขณะเกิดพอลต์ โดยเมื่อมีพอลต์เกิดขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด และเฟสของสัญญาณอย่างฉับพลัน ทำให้เกิดการหักมุมของสัญญาณซึ่งเป็นลักษณะขององค์ประกอบความถี่สูง ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับพอลต์ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ปริมาณนิพจน์ฉบับนี้จึงได้สนใจเลือกทำการออกแบบรีเลย์ป้องกันสายส่ง โดยใช้หลักการของรีเลย์กระแสเกิน และวิเคราะห์สัญญาณด้วยเวฟเล็ต และเก็บผลการทดลองด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากวิธีการแปลงเวฟเล็ต กับวิธีการใช้ฟูเรียร์ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และทำการปรับปรุงกระบวนการให้มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ และมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทดสอบการตรวจจับพอลต์โดยนำอันกอลิทึมที่ได้ออกแบบไปรันในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ในทางปฏิบัติ ว่ามีแนวโน้ม และ ข้อจำกัด ต่างจากทฤษฎีเช่นไรบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) นำเสนอเทคนิคและวิธีการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT)
- 2) ศึกษาและทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมการตอบสนองของการแปลงเวฟเล็ตต่อสัญญาณพอลต์ เพื่อ ปรับปรุงและพัฒนาวิธีการให้เหมาะสมแก่การนำมาวิเคราะห์สัญญาณพอลต์
- 3) ศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ ด้วยวิธีการใช้เวฟเล็ตและการใช้ฟูเรียร์
- 4) สามารถตรวจจับและระบุชนิดพอลต์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากกว่า 85% ขึ้นไป

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้มีขอบเขตการศึกษาและออกแบบรีเลย์โดยการใช่วิธีการแปลงเวฟเล็ตสำหรับตรวจจับสถานะการเกิดพอลต์ และ แยกชนิดของพอลต์ ซึ่งอาศัยข้อมูลจากชุดทดลองในห้องปฏิบัติการที่จำลอง สายส่งกำลังแบบเหนือดิน (Overhead Transmission Line) ที่ระยะความยาวสายส่ง 40 กิโลเมตร (ฐานจริง 100 MVA 115 kV) มาเป็นชุดทดลองการเกิดพอลต์บนสายส่งวงจรแบบพาย (π - network) ในห้องปฏิบัติการ (ฐานจำลอง 150 VA 420 V) โดยตั้งเป้าให้รีเลย์สามารถตรวจจับพอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตรวจจับพอลต์ได้ภายใน 4 คาบสัญญาณ (80 มิลลิวินาที) และ มีความถูกต้อง 85% ขึ้นไป

1.4 วิธีการใช้ในโครงการ

- 1) ศึกษา และ จำลองการเกิดพอลต์ที่แตกต่างกันทั้ง 44 กรณีจากชุดทดลอง เพื่อศึกษารูปแบบของกระแสพอลต์ และ เพื่อใช้สำหรับเลือกสเปกอุปกรณ์ในการสร้างรีเลย์
- 2) ออกแบบ และ สร้างรีเลย์ต้นแบบสำหรับใช้ในการบันทึก และ วิเคราะห์สัญญาณกระแสพอลต์
- 3) บันทึกผลจำลองการเกิดพอลต์ทั้ง 44 กรณีโดยใช้รีเลย์ที่ได้สร้างขึ้น แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อในโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) วิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) แล้วจึงเลือกปรับตัวแปร เช่น ตัวคูณขนาด ระดับของตัวกรอง (Level) อัตราสุ่มข้อมูล รวมถึง เทคนิควิธีการในการลดสัญญาณรบกวน เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการตรวจจับสัญญาณพอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 5) เปรียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเวฟเล็ต และวิธีการทางฟูเรียร์
- 6) ทำการแปลงอันกอลิทึมที่ได้ทำการออกแบบและทดลองภายในคอมพิวเตอร์จากภาษา MATLAB ไปเป็นภาษา C และทำการคอมไพล์ไสรี่เลย์ เพื่อทำการทดสอบการใช้งานจริง

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

โดยในระยะแรก สิงหาคม 2560 – ธันวาคม 2560 ในวิชา “โปรเจค 1 (PROJECT 1)” จะทำในส่วนของการศึกษาและออกแบบ รีเลย์แบบพื้นฐาน รีเลย์กระแสไฟฟ้าเกิน (Over current relays) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางฟูเรียร์ โดยยังไม่ใช้เวฟเล็ตเข้าช่วย

สิงหาคม 2560

- ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ อาทิ หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง และรีเลย์กระแสไฟฟ้าเกิน
- ศึกษารูปแบบการเกิดพอลต์ ประเภทของพอลต์ และการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์โดยใช้วิธีส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)
- ออกแบบและจัดหาอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการทำโครงการ

กันยายน 2560

- เก็บผลการจำลองการเกิดการลัดวงจรจากชุดทดลองสายส่งกำลัง เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ และ ตรวจจับพอลต์ในหัวข้อถัด ๆ ไป

ตุลาคม 2560

- สร้างรีเลย์ระยะทางจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega และ ทดสอบการทำงานรีเลย์ที่สร้างขึ้นมากับชุดทดลองการลัดวงจรในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

พฤศจิกายน 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับปรุงอัลกอริทึม โดยเปลี่ยนจากการใช้ วิธีส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) มาใช้วิธีสมการแปลงของคาร์ก (Clarke's Transformation) แทนเพื่อแก้ปัญหาการหน่วงเวลา 1 คาบสัญญาณ (cycle) จากการใช้ สมการฟูรีเยร์ (Fourier) ในการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลา (time-domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (frequency-domain)

ธันวาคม 2560

- นำเสนอโครงการน ระยะที่ 1 (วิชา โปรเจค1)

ระยะที่สอง มกราคม 2561 – พฤษภาคม 2561 ในวิชา “โปรเจค 2 (PROJECT 2)” จะเป็นวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยวิธีการทางแปลงเวฟเล็ต และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการใช้วิธีการทางฟูรีเยร์

มกราคม 2561- กุมภาพันธ์ 2561

- ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet transform : DWT)
- ปรับปรุงและพัฒนากระบวนการแปลงเวฟเล็ตให้เหมาะสมแก่การนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพอลต์

มีนาคม 2561

- สรุปและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ต
- เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเวฟเล็ตกับวิธีการทางฟูรีเยร์

เมษายน 2561 - พฤษภาคม 2561

- จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	ส.ค. 2560				ก.ย. 2560				ต.ค. 2560				พ.ย. 2560				ธ.ค. 2560				ม.ค. 2561				ก.พ. 2561			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	
1.ศึกษาทฤษฎีหัวข้อโครงการ	←-----→																											
2.ออกแบบ จัดทำอุปกรณ์ และ สร้างชุดทดลอง	←-----→																											
3.เก็บผลการทดลอง	←-----→																											
4.ปรับปรุงพัฒนาซอฟต์แวร์	←-----→																											
5.วิเคราะห์ผลการทดลอง	←-----→																											
6.สรุปผลการทดลอง	←-----→																											

←-----→ : ระยะเวลาที่วางแผน

←-----→ : ระยะเวลาปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) ทำให้ผู้ทดลองมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะและรูปแบบของฟอลต์ในระบบสายส่งกำลัง เช่น กระแสฟอลต์ ประเภทของฟอลต์ และ ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของฟอลต์ เป็นต้น
- 2) สามารถลดรูปสัญญาณไฟฟ้า 3 เฟส ก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สัญญาณด้วยสมการแปลงคาร์ก ทำให้ความซับซ้อนของสัญญาณไฟฟ้าลดลงจาก 3 เฟส เหลือเพียง 1 เฟส ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น
- 3) มีความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT)
- 4) ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้อง และ ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น อัตราสุ่มข้อมูลที่ใช้ ปริมาณสัญญาณรบกวน ขนาดกระแสฟอลต์ เป็นต้น
- 5) ทราบถึงข้อดี และ ข้อเสียในการตรวจจับฟอลต์ ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) และ การแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น (Shot Time Fourier Transform : STFT)
- 6) สามารถสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับ และแยกประเภทของฟอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม่นยำ และรวดเร็ว

บทที่ 2

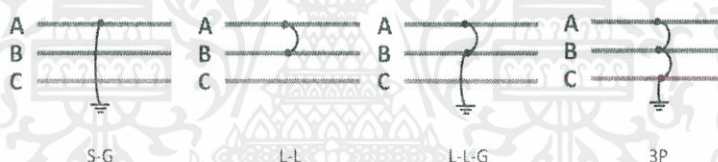
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระแสลัดวงจร

การเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า ตามมาตรฐานของ VDE (Verband Deutscher Electrotechniker e.V.) และ IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) จะมีหลักการที่คล้ายกันซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 การเกิดกระแสลัดวงจร

การเกิดกระแสลัดวงจรนั้นที่มักจะเป็นไปตามชื่อ กล่าวคือ กระแสที่เกิดขึ้นขณะมีการลัดวงจรระหว่างเฟสใดๆในระบบเข้าหากันโดยมีรูปแบบการลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทตามลักษณะการลัดวงจรคือ

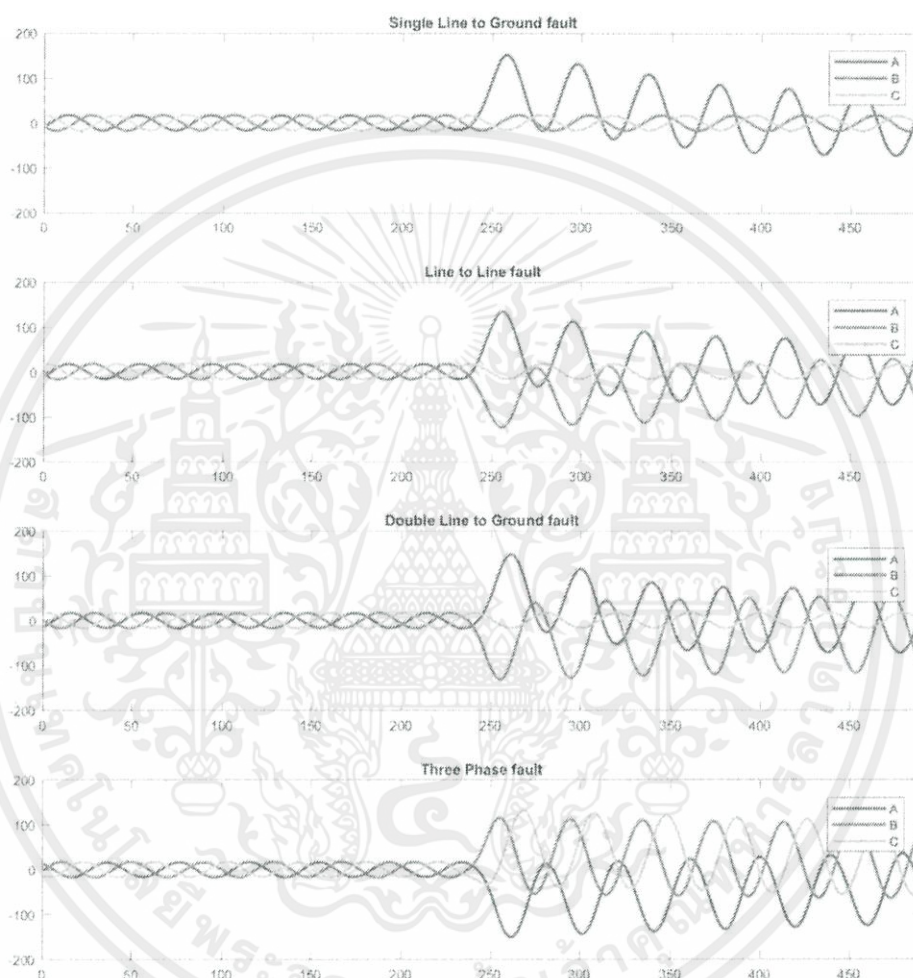


รูปที่ 2.1 ลักษณะการลัดวงจรในสายส่งกำลัง

- 1) การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground fault : S-G fault) คือ ฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจรกันระหว่างไลน์เฟสใดเฟสหนึ่งกับกราวด์เฟส ซึ่งเกิดได้ 3 แบบคือ A-G, B-G และ C-G fault
- 2) การลัดวงจรแบบสองเฟส (Line to Line fault : L-L fault) คือ ฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจรกันระหว่าง ไลน์เฟสด้วยกัน ซึ่งเกิดได้ 3 แบบคือ AB , AC และ BC fault
- 3) การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground fault : L-L-G fault) คือ ฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจร 2 รูปแบบคือ Single Line to Ground และ Double Line to Ground ในเวลาไล่เลี่ยกัน หรือ พร้อมๆกัน กล่าวคือมีการลัดวงจรระหว่าง ไลน์เฟส 2 เฟส กับ กราวด์เฟส ซึ่งเกิดได้ 3 แบบคือ AB-G, AC-G และ BC-G fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault : 3P fault) คือ ฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจรระหว่างทุกเฟสเข้าหากัน โดยถ้าทั้ง 3 เฟสบาลานซ์กันจะไม่มีกระแสไหลลงกราว หรืออาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่าการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical fault) แต่ถ้าทั้ง 3 เฟสไม่บาลานซ์กันจะเกิดผลลัพธ์ได้ 2 ลักษณะที่แตกต่างกันคือ ABC fault และ ABC-G fault

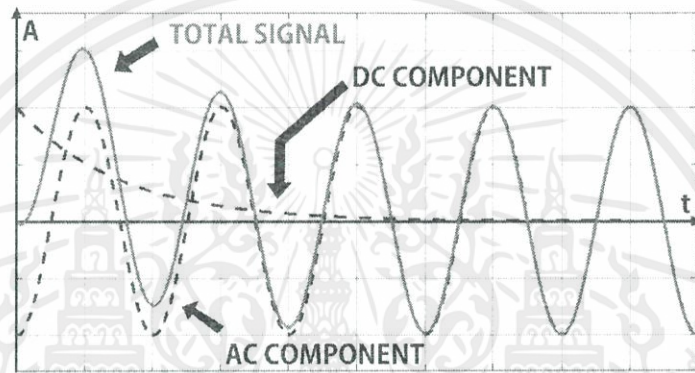


รูปที่ 2.2 กระแสขณะเกิดการลัดวงจรของฟอลต์แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

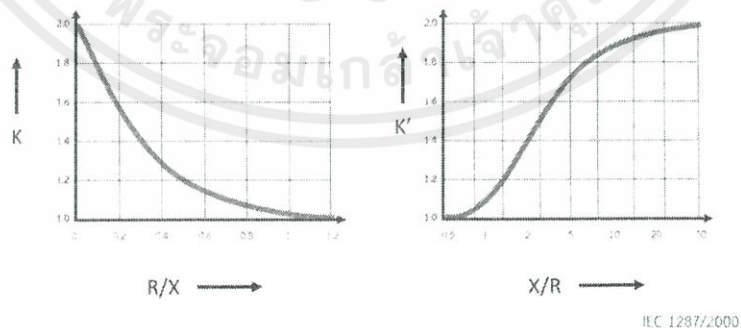
2.1.2 ลักษณะของกระแสลัดวงจร

สำหรับลักษณะของกระแสลัดวงจรนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงกระแสชั่วขณะ (transient) และ ช่วงกระแสคงตัว (steady state) โดยปริมาณนิพจน์บับนี้จะสนใจในเฉพาะส่วนของช่วงกระแสชั่วขณะเนื่องจากเป็นช่วงที่มีขนาดของกระแสสูงที่สุด ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบไฟฟ้า และ ในการออกแบบระบบตรวจจัดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้านั้นระยะเวลาในการตรวจจับถือเป็นเรื่องสำคัญ ยิ่งตรวจพบได้เร็วเท่าไร ก็ยิ่งลดความเสียหายต่อระบบได้มากเท่านั้น โดยในช่วงกระแสชั่วขณะนั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ AC component และ DC component ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของกระแสลัดวงจร

โดยในส่วนของ AC Component นั้นจะเป็นสัญญาณแบบสมมาตรที่มีรูปแบบตามแหล่งจ่าย (sinusoidal wave) ส่วน DC Component นั้นจะมีค่าสูงสุดขึ้นกับค่า PF (พาวเวอร์แฟกเตอร์ : Power factor) ของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และมีค่าลดลงแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลจนลู่เข้าสู่ 0



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณค่ายอดของกระแสลัดวงจรกับอัตราส่วนของ X และ R

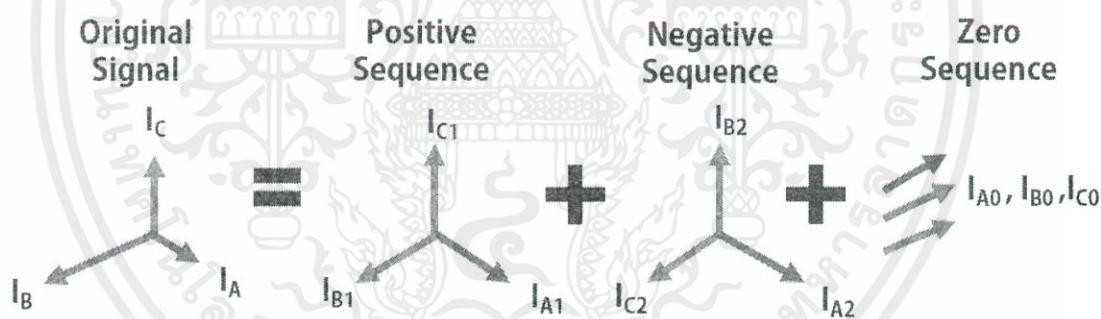
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ

โดยปกตินั้นการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรนั้นแทนที่จะต้องมาวิเคราะห์สัญญาณจากทั้ง Phase A B และ C นั้น เราเลือกที่จะใช้วิธีในการลดตัวแปรที่จะใช้ในการวิเคราะห์ลงมาเพื่อความง่ายและความรวดเร็วในการประมวลผล โดยการใช้การแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมาวิเคราะห์แค่บางส่วน แทน โดยทั่วไปนิยมใช้กันอยู่ 2 วิธีคือ ส่วนประกอบสมมาตร และ สมการแปลงคาร์ก

2.2.1 ส่วนประกอบสมมาตร

ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) นั้น เป็นวิธีที่สามารถจะแยกองค์ประกอบของเฟสเซอร์ของระบบบน frequency domain ที่ไม่สมดุล N เฟสเซอร์เป็นระบบเฟสเซอร์ที่สมดุล N องค์ประกอบแทน ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสภาวะไม่สมดุลได้ด้วยการใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรดังกล่าวแยกเป็นระบบเฟสเซอร์ที่สมดุล 3 องค์ประกอบด้วยกัน คือ ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence) , ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และ ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบสมมาตร

ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสที่มีขนาดเท่ากัน ($|I_{A1}| = |I_{B1}| = |I_{C1}|$) และมีมุมเฟสต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟสเดียวกันกับระบบต้นทาง (A-B-C) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{A1} = I_1 \quad (2.2)$$

$$I_{B1} = \alpha^2 I_1 \quad (2.3)$$

$$I_{C1} = \alpha I_1 \quad (2.4)$$

ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสที่มีขนาดเท่ากัน ($|I_{A2}| = |I_{B2}| = |I_{C2}|$) และมีมุมเฟสต่างกัน 120° แต่จะมีลำดับเฟสตรงข้ามกันกับระบบต้นทาง (A-C-B) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{A2} = I_2 \quad (2.5)$$

$$I_{B2} = \alpha I_2 \quad (2.6)$$

$$I_{C2} = \alpha^2 I_2 \quad (2.7)$$

ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero sequence component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสที่มีขนาดเท่ากัน และมีมุมเฟสทิศทางเดียวกันทั้งหมด โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{A0} = I_{B0} = I_{C0} = I_0 \quad (2.8)$$

โดยโอเปอเรเตอร์ α คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการเปลี่ยนมุมของกระแสแต่ละเฟสจากกระแสของเฟสอ้างอิง ซึ่งมีค่า $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ซึ่งเรียกว่า " α operater" และมีคุณสมบัติดังนี้

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.9)$$

$$\alpha^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.10)$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (2.11)$$

และสามารถนำมาเขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

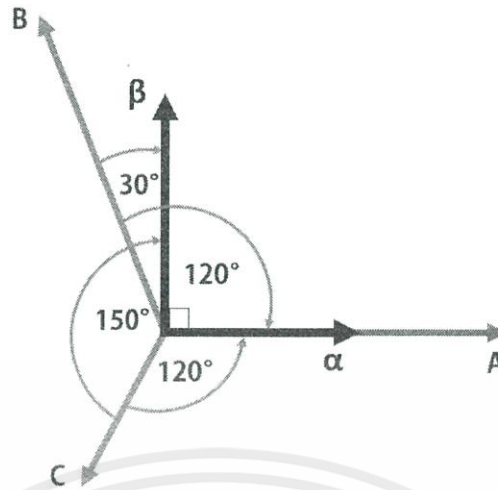
และเมื่อทำการผกผันเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.2 สมการแปลงคาร์ก

ในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมาวิเคราะห์นั้นในอดีตจะใช้วิธีส่วนประกอบสมมาตร แต่ในการใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรนั้น เป็นการแยกองค์ประกอบของสัญญาณบน frequency domain ซึ่งทำให้จำเป็นต้องแปลงสัญญาณบน Time-domain ไปอยู่บน frequency-domain ก่อน โดยวิธีการทั่วไปที่ใช้คือ การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transform) ซึ่งมีข้อเสียคือมีการหน่วงของผลลัพธ์จากการใช้ข้อมูลในการประมวลผลที่มากถึง 1 คาบสัญญาณ (0.02 วินาที ที่ ความถี่ 50 Hz) เพราะฉะนั้นในปริยฐานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้สมการแปลงคาร์ก (Clarke's Transformation) ซึ่งเป็นการแยกองค์ประกอบบน Time domain ในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณแทนการใช้ฟูรีเยร์

สมการแปลงคาร์ก คือ สมการที่ใช้แปลงปริภูมิเวกเตอร์ (Space vector) บน Time domain จากปริภูมิ 3 มิติ เป็นปริภูมิ 2 มิติบนแกนอ้างอิงฉาก (α - β) ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟส (A-B-C) ได้โดยการใช้สมการแปลงคาร์กดังกล่าวแปลงเป็นระบบ 2 เฟส บนแกนอ้างอิงฉาก โดยกำหนดให้ เฟส α เป็นแกนอ้างอิงเทียบกับ เฟส A และตั้งฉากกับ เฟส β ดังรูปที่ 2.9



ภาพที่ 2.6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเวกเตอร์สัญญาณเฟสเซอร์ A,B,C กับ α, β

ซึ่งเราสามารถอธิบายสมการแปลงคาร์กได้โดยการฉายเวกเตอร์ A,B,C ไปยังบนเวกเตอร์ α, β จะได้

$$I_\alpha = I_A + I_B \cdot \cos(120^\circ) + I_C \cdot \cos(120^\circ) \quad (2.15)$$

$$I_\beta = I_B \cdot \cos(30^\circ) + I_C \cdot \cos(150^\circ) \quad (2.16)$$

หรือ

$$I_\alpha = I_A - \frac{1}{2}I_B - \frac{1}{2}I_C \quad (2.17)$$

$$I_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}I_B - \frac{\sqrt{3}}{2}I_C \quad (2.18)$$

โดยถ้าระบบอยู่ในสภาวะ 3 เฟสสมดุล จะได้ว่า

$$I_\alpha = \frac{2|I_A|}{3} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

$$I_\beta = \frac{2|I_A|}{3} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.20)$$

และเพื่อปรับให้ I_α และ I_β มีขนาดเท่ากับ เฟส A B C ในสภาวะสมดุลจึงคูณ $\frac{3}{2}$ ทั้งสมการ (2.17) และ (2.18) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_\alpha = \frac{3}{2} \left(I_A - \frac{1}{2} I_B - \frac{1}{2} I_C \right) \quad (2.21)$$

$$I_\beta = \frac{3}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_B - \frac{\sqrt{3}}{2} I_C \right) \quad (2.22)$$

ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ขณะอยู่ในสภาวะ 3 เฟสสมดุลเป็น

$$I_\alpha = |I_A| \cdot \sin(\omega t) \quad (2.23)$$

$$I_\beta = |I_A| \cdot \cos(\omega t) \quad (2.24)$$

และกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของกระแสเฟส A B C มีค่าเท่ากับ I_0 จะได้ว่า

$$\frac{I_A + I_B + I_C}{3} = I_0 \quad (2.25)$$

หรือ

$$I_0 = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{2} I_A + \frac{1}{2} I_B + \frac{1}{2} I_C \right) \quad (2.26)$$

โดย I_0 คือ Homopolar component ซึ่งคือค่าเดียวกันกับ Zero Sequence Component ในวิธีส่วนประกอบสมมาตร ซึ่งสามารถนำมาเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.3 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

หากกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์นั้นแรกเริ่มต่างก็มีวิธีการต่าง ๆ มากมาย ใน การที่จะวิเคราะห์สัญญาณ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การแปลงสัญญาณใดๆให้กลายเป็นพารามิเตอร์ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งๆเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลสัญญาณนั้น ๆ สำหรับนำไปแสดงผล หรือ ประมวลผลต่อในกระบวนการถัดไป ตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square : RMS) ซึ่งมักถูกใช้เป็นตัวแทนของขนาดของสัญญาณ AC เนื่องจากไม่เท่าให้หึ่งค์ประกอบซีกบวกและลบหักล้างกันเหมือนค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Average) ตลอดจนค่าขนาดของสัญญาณ (Amplitude) ซึ่งมีหลายหลายวิธีในการหาแต่วิธีที่ให้ความถูกต้อง และนิยมใช้กันแพร่หลายที่สุดก็คือการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform : FT) แต่กระนั้นการแปลงฟูเรียร์นั้นก็ยังมีข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวน 1 คาบสัญญาณเพื่อประมวลผลลัพธ์ออกมา 1 ค่า แต่กลับกันอีกหนึ่งวิธีที่ถูกหยิบยกขึ้นมาแนะนำเสนอในปริญญาณิพนธ์เล่มนี้คือ การแปลงเวฟเล็ตซึ่ง จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการประมวลนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของคาบสัญญาณ แต่จะเป็นจำนวนคงที่แน่นอนตามเวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) ที่เลือกใช้งานซึ่งการใช้ข้อมูลในการประมวลผลน้อยนั้นจะส่งผลต่อเวลาในการประมวลผลโดยตรง โดยเมื่อมีข้อมูลที่น้อยกว่า ย่อมประมวลเร็วกว่า ซึ่งความเร็วเร็วจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลใดๆแบบ Real-time และเมื่อมีการเลือกใช้อัตราสุ่มข้อมูลที่สูงขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตจะเร็วกว่าวิธีเดิมๆอย่างฟูเรียร์อย่างเห็นได้ชัด

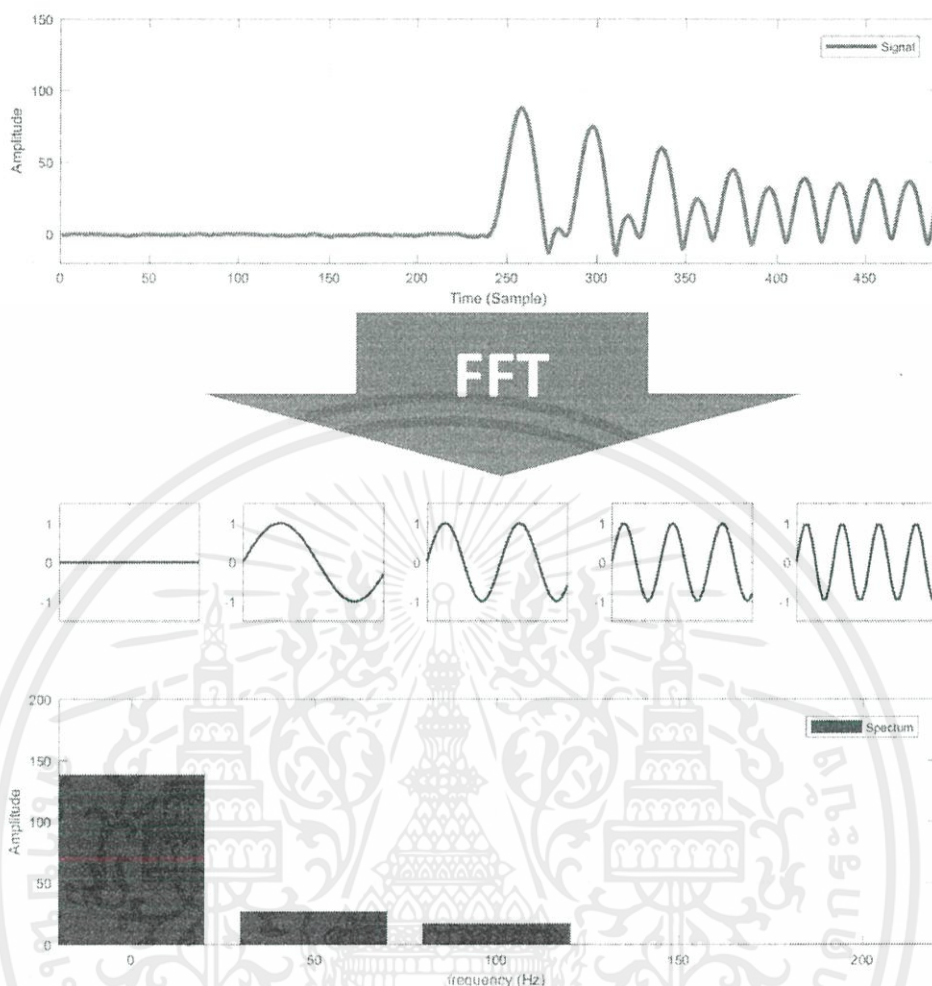
2.3.1 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform : FT)

การแปลงฟูเรียร์นั้นคือวิธีการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Signal) โดยแตกสัญญาณใดๆออกเป็นองค์ประกอบของสัญญาณในรูปแบบ Sinusoidal หลากหลายความถี่ จากการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลา (Time-Domain) ไปอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency-Domain) บนความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือ เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Spectrum of frequency) ซึ่งหาได้จากผลรวมของผลคูณสัญญาณอินพุตกับองค์ประกอบของ Sine และ Cosine บนช่วง $(-\infty, \infty)$ ซึ่งอาจเขียนในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) โดยใช้ Euler's Exponential form ได้ดังสมการที่ 2.28

$$FT(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.28)$$

และหากเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) ก็สามารถเขียนในรูปของสมการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform : DFT) หรือ แปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fourier Transform : FFT) ได้ดังสมการที่ 2.29 เมื่อ $N = 1, 2, 3, \dots, N$

$$DFT(n) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(k)e^{-\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right)} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.7 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)

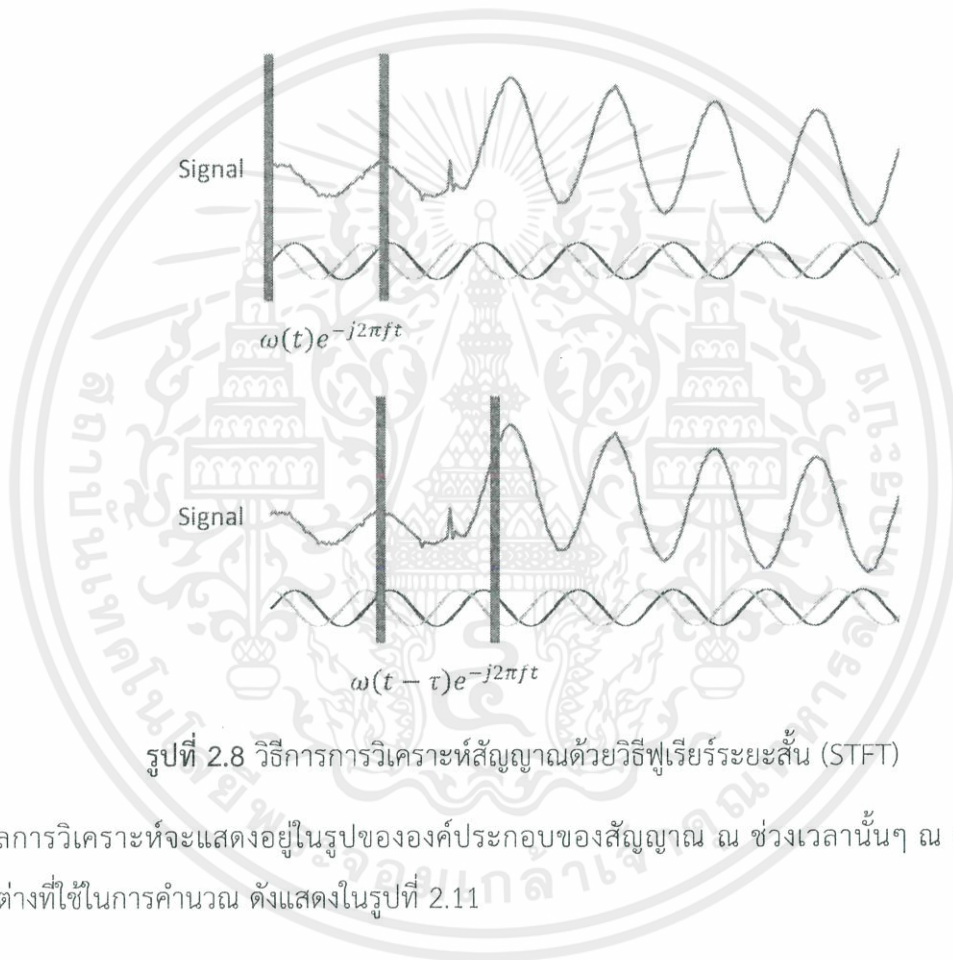
แต่จากข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์ ที่ทำให้เสียรายละเอียดของข้อมูลเชิงเวลาจากขั้นตอนการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปบนโดเมนความถี่ ที่ได้ผลลัพธ์เป็นขนาดขององค์ประกอบของสัญญาณ ณ ความถี่นั้นๆ แทน ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่ามีเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นตอนไหนของสัญญาณบอกได้เพียงว่าสัญญาณทั้งหมดนั้นบนช่วง $(-\infty, \infty)$ เกิดจากการรวมกันของสัญญาณ Sine ความถี่ใดบ้างเพียงเท่านั้น ภายหลังจากจึงได้เกิดการพัฒนาต่อมาเป็นการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform : STFT) ที่เป็นการวิเคราะห์ฟูเรียร์บนช่วงเวลาที่ยกจำกัด โดยช่วงระยะเวลาสั้นนี้ยมเรียกว่า หน้าต่าง (Windows) โดยในทางปฏิบัตินั้นจะเป็นการแบ่งช่วงหนึ่งของสัญญาณออกมาวิเคราะห์ทีละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่าง แล้วทำการเลื่อนหน้าต่าง (Moving Windows) ไปเรื่อยๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลของหน้าต่างถัดไปจนครอบคลุมช่วงทั้งหมดของสัญญาณ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน STFT ได้ดังสมการ 2.30

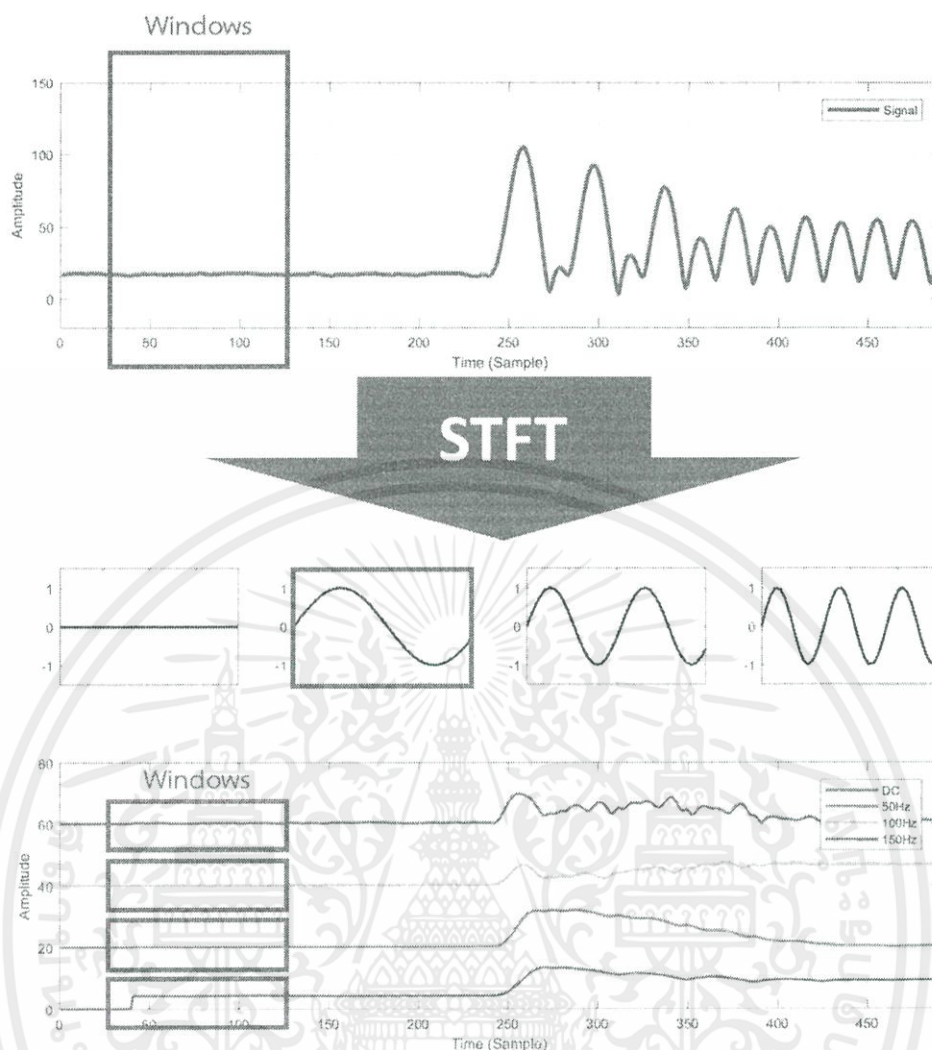
$$STFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.30)$$

เมื่อ $\omega(t) =$ ฟังก์ชันหน้าต่าง (windows function)



รูปที่ 2.8 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีฟูเรียร์ระยะสั้น (STFT)

ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงอยู่ในรูปขององค์ประกอบของสัญญาณ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ณ ตำแหน่งของหน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

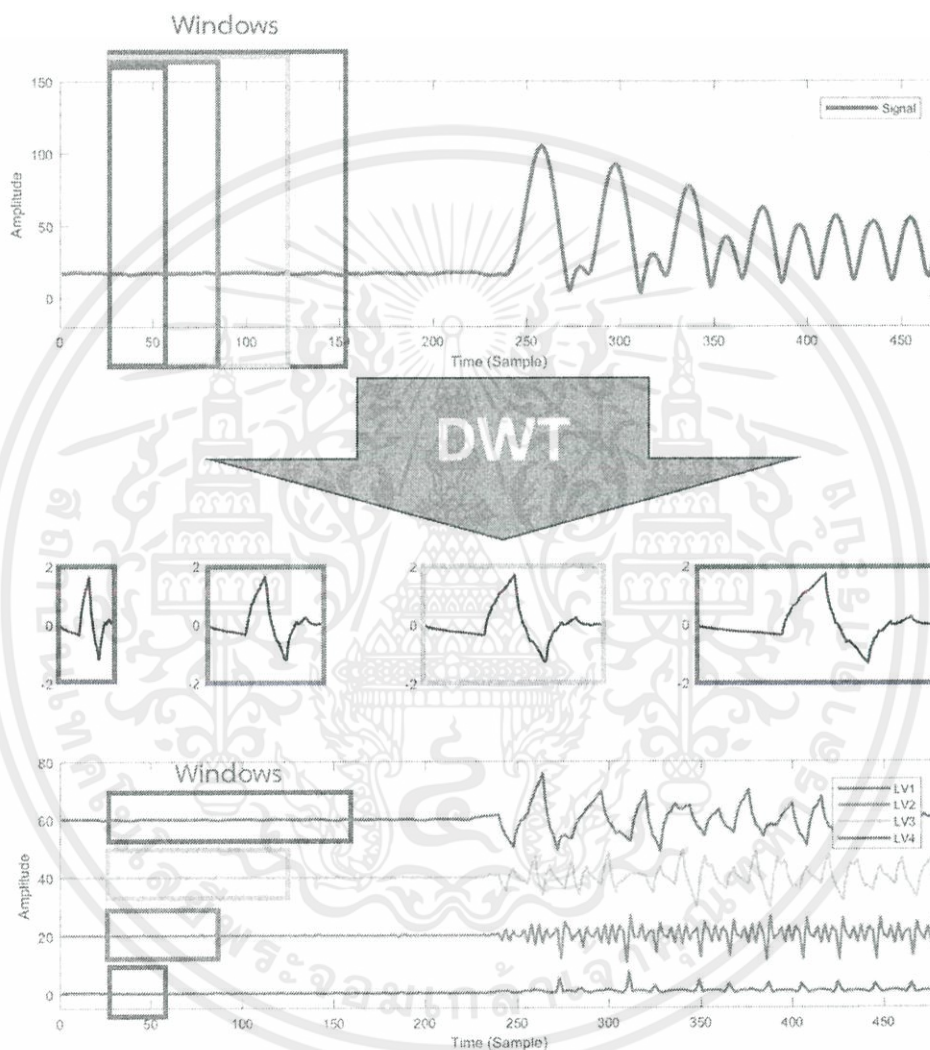


รูปที่ 2.9 การแปลงฟูเรียร์ระยะสั้น (STFT)

2.3.2 การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform : WT)

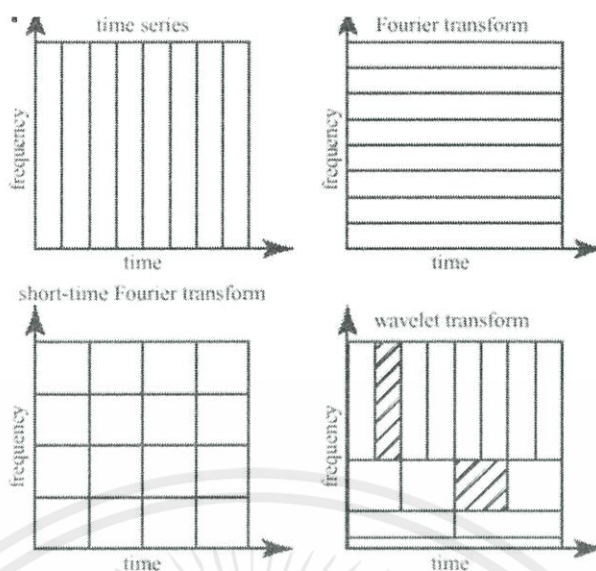
การแปลงเวฟเลตเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่พัฒนาต่อยอดมาจาก STFT ซึ่งแก้ไขข้อด้อยของ STFT ที่มีลักษณะของช่วงเวลาในการวิเคราะห์เป็นแบบคงที่ (fixed resolution transform) โดยเพิ่มความสามารถในการปรับเปลี่ยนขนาดของช่วงเวลาในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับแต่ละความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ได้ โดยความถี่สูง ก็จะใช้ช่วงเวลาที่สั้น ความถี่ต่ำก็ใช้ช่วงเวลาที่ยาวกว่าตามตามลักษณะของสัญญาณ จากหลักความคิดที่ว่าความถี่สูงนั้นย่อมมีการเปลี่ยนที่รวดเร็วกว่าความถี่ต่ำ การที่จะใช้

ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่เท่ากันตลอดทั้งย่านจึงไม่สมนัก โดยเฉพาะกับสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงคาบ (Non-periodic Signal) หรือ สัญญาณในช่วงทรานเซียน (Transient Signal) ดังเช่น สัญญาณฟอลต์ เป็นต้น การแปลงเวฟเลตนั้นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในวิเคราะห์สัญญาณประเภทนี้ โดยข้อเปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลาในการวิเคราะห์ของการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเลตแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.10 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ข้อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการใช้ FT , STFT และ WT

และอีกหนึ่งข้อแตกต่างระหว่างการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงฟูเรียร์ คือ ลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบ โดยการแปลงฟูเรียร์นั้นจะแยกย่อยองค์ประกอบของสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณในรูปแบบ sinusoidal หลากหลายความถี่ แต่ในการแปลงเวฟเล็ตนั้นจะแยกองค์ประกอบของสัญญาณมาเป็นสัญญาณเฉพาะรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นสัญญาณช่วงสั้นกึ่งสมมาตรแบบไม่เชิงคาบที่สามารถถูกปรับเปลี่ยนขนาด (scaling) จากฟังก์ชันต้นกำเนิดซึ่งเรียกว่าเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) ตามระดับ (Level) ของฟิลเตอร์ที่เลือกวิเคราะห์ โดยมีลักษณะการคำนวณคล้ายกับ STFT กล่าวคือ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตเกิดจากผลคูณระหว่างสัญญาณอินพุต กับ สัญญาณเวฟเล็ตซึ่งทำหน้าที่คล้าย Windows ที่ควบคุมขนาดผ่านการ สเกล (Scaling : “a”) และ การเลื่อนตำแหน่ง (Shifting : “b”) Windows ไปเรื่อยๆจนครอบคลุมช่วงของสัญญาณทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงสมการทั่วไปของเวฟเล็ตที่ a , b ได้ดังสมการที่ 2.31 หรืออธิบายได้ดังรูปที่ 2.13

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

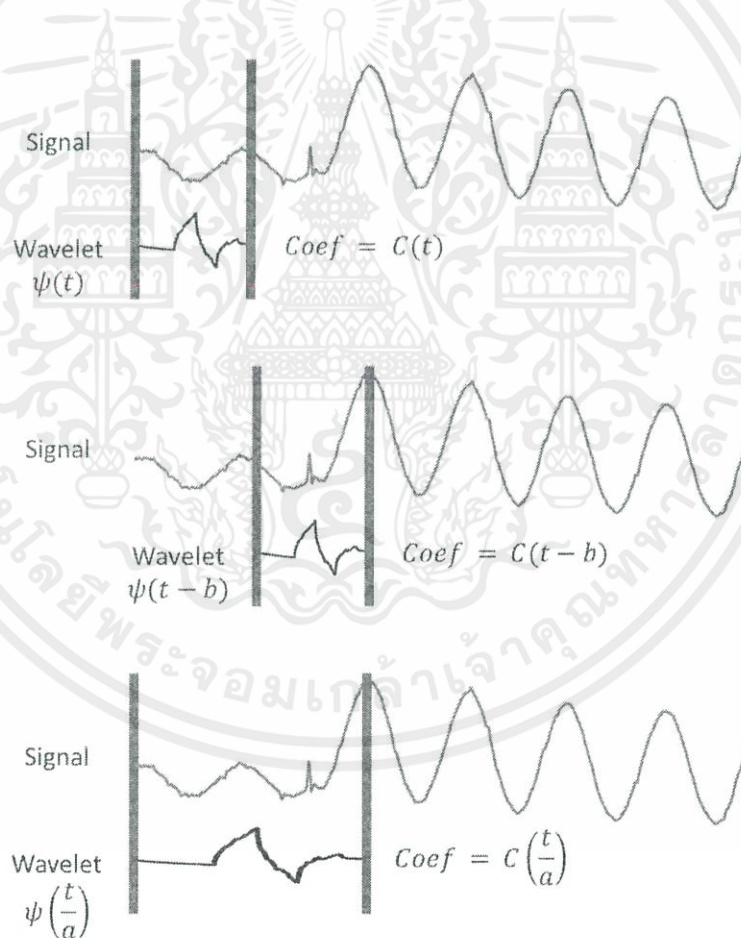
2.3.2.1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT)

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องมีกระบวนการคล้ายกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์แบบสั้น โดยมีลักษณะการวิเคราะห์โดยใช้ ฟังก์ชันหน้าต่าง (windows function) ที่อาศัยการเลื่อน (Shifting : “b”) หน้าต่างไปเรื่อยๆ เช่นเดียวกัน แต่จะมีจุดที่แตกต่างคือ ฟังก์ชันหน้าต่างของการแปลงเวฟเลตนั้น จะมีขนาดไม่คงที่ โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการขยาย (Scale : “a”) ของเวฟเลตแม่ (Mother wavelet : $\psi(t)$) ที่เลือกใช้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 และสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องได้ดังสมการที่ 2.32

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.32)$$

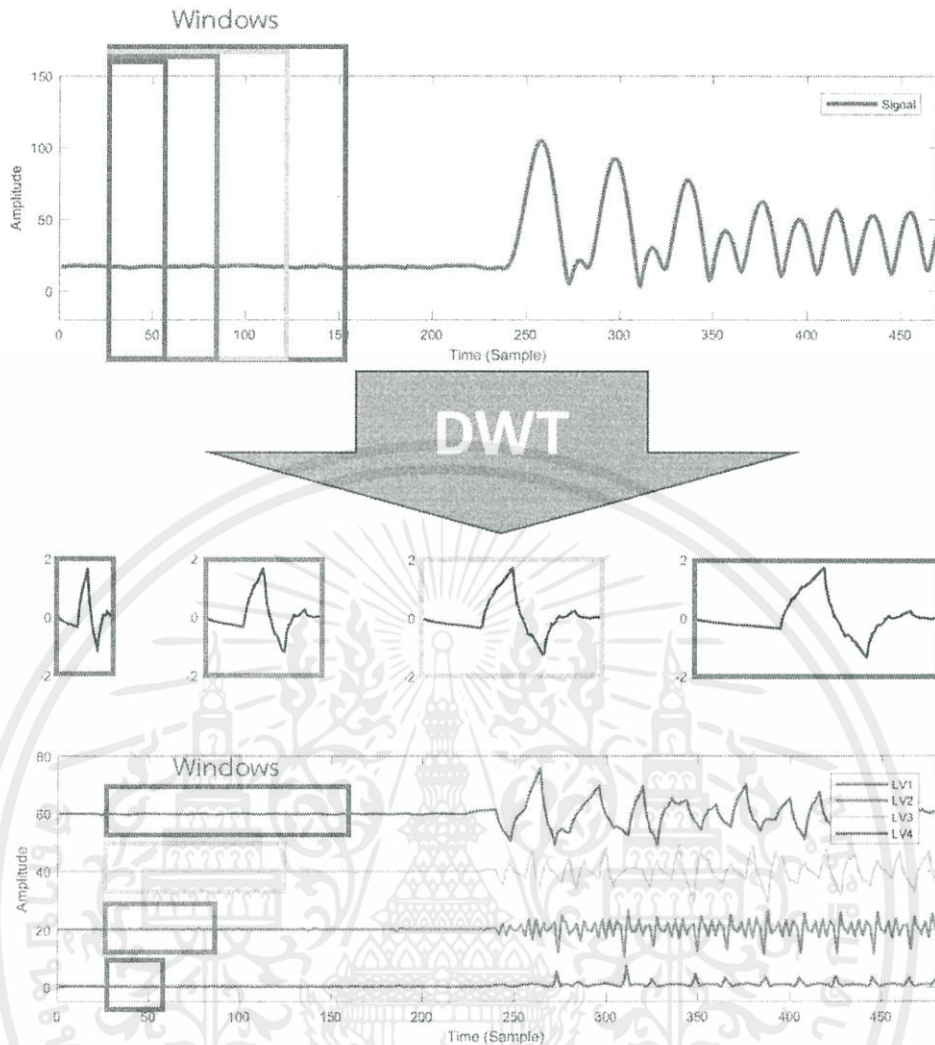
เมื่อ

$f(t) =$ สัญญาณที่การแปลง



รูปที่ 2.14 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (CWT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (DWT)

2.3.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet transform : DWT)

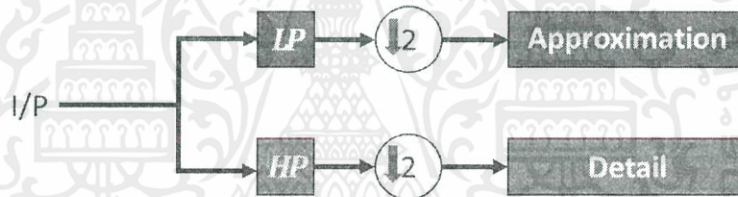
ในการบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องนั้นจะใช้หลักการฟิลเตอร์แบงค์ (Filter Bank) โดยมีอยู่ 2 กระบวนการด้วยกันนั้นคือ Forward Discrete Wavelet transform (FDWT) และ Inverse Discrete Wavelet transform (IDWT)

-ตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank)

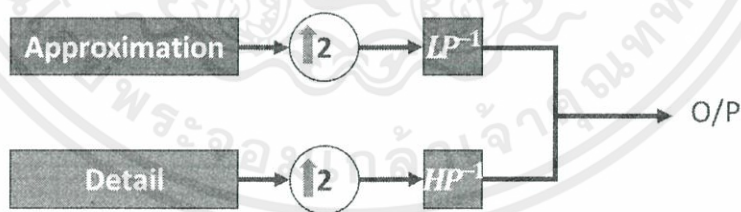
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการแปลงเวฟเลตนั้นจะมีหลักการคล้ายการใช้ ออกเทปฟิลเตอร์แบงก์ (Octave filter bank) เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ครึ่งละสองเท่า คล้ายกับแบนวิท (Bandwidth) ของฟังก์ชันหน้าต่างของ Octave filter bank ดังนั้นจึงสามารถนำหลักการนี้มาใช้ในการแปลงเวฟเลตในทางปฏิบัติได้ ซึ่งมี 2 กระบวนการคือ การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition) และ การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction)

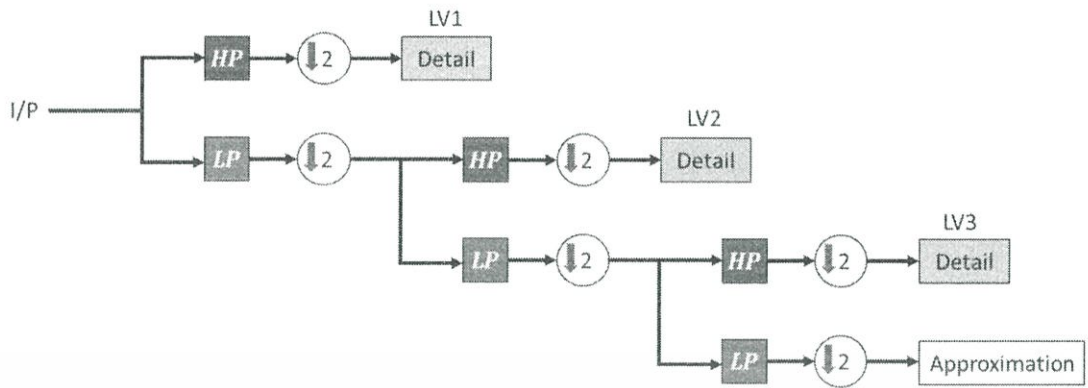
ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (two channel filter banks) เป็นการแยกสัญญาณออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation) และ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูง (Detail) โดยแยกองค์ประกอบของสัญญาณผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter : “h”) และ ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter : “g”) ดังรูปที่ 2.16 และ เมื่อได้องค์ประกอบที่ต้องการแล้วสามารถทำการย้อนกลับกระบวนการ หรือ รวมกลับสัญญาณได้โดยใช้วงจรกรองความถี่แบบผกผัน ตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 กระบวนการแยกองค์ประกอบสัญญาณของฟิลเตอร์แบงก์



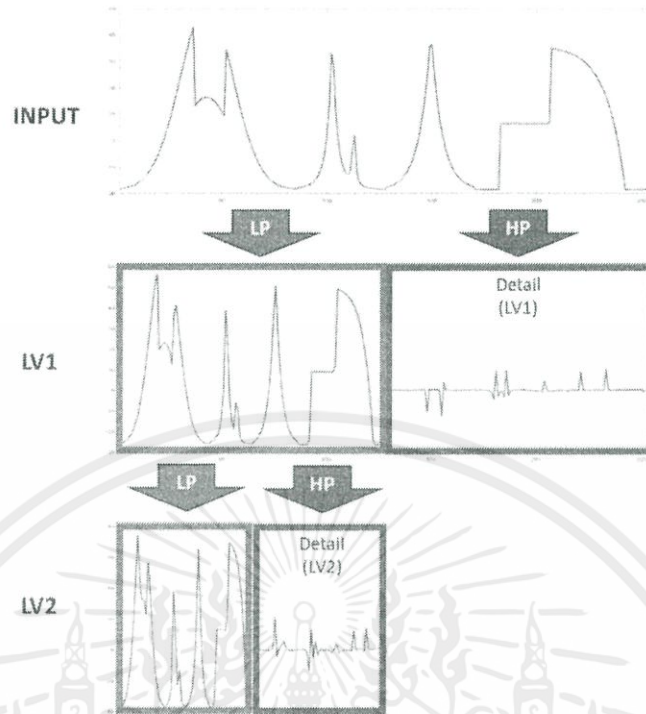
รูปที่ 2.17 กระบวนการรวมกลับสัญญาณของฟิลเตอร์แบงก์



รูปที่ 2.18 ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตของออกเทปฟิลเตอร์แบงก์แบบ 3 ระดับ

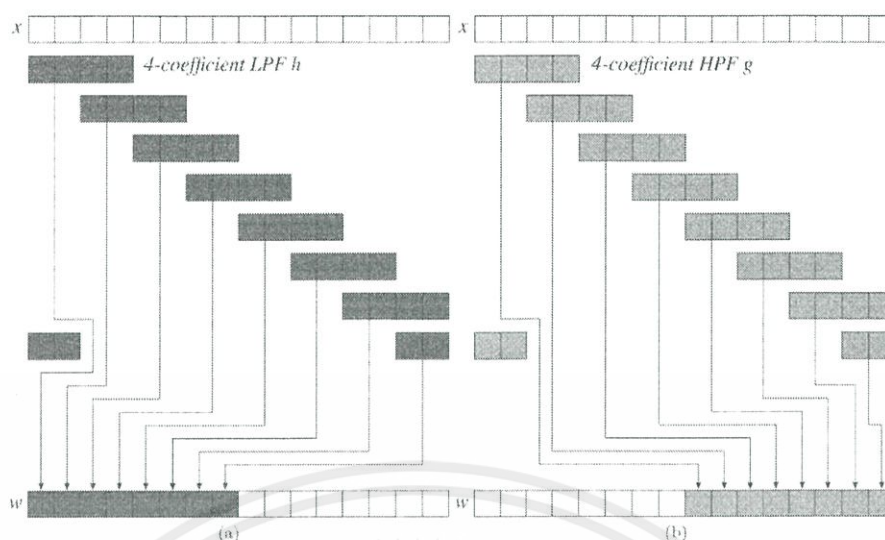
-FDWT (Forward Discrete Wavelet transform)

คือกระบวนการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition) ออกเป็นย่านความถี่ต่างๆผ่านการใช่วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low pass filter) และ วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (high pass filter) โดยใช้กระบวนการของ filter Bank ซึ่งทุกๆระดับ (level) การประมวลผลนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะมีอัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate) ลดลงครึ่งหนึ่งตามหลักการของ filter bank ดังรูปที่ 2.19 ที่แสดงกระบวนการ FDWT ที่ Level 2



รูปที่ 2.19 กระบวนการ FDWT ที่ LV2

ตัวอย่างอันกอลิทึมในการประมวลผล FDWT สำหรับเวฟเล็ตที่มีสัมประสิทธิ์ 4 ตัว เช่น DB2 โดยมีหลักการคล้ายๆ CWT กล่าวคือผลลัพธ์ของ FDWT เกิดจากผลคูณของสัญญาณกับค่าสัมประสิทธิ์ โดยจะใช้หลักการของฟังก์ชันหน้าต่างที่มีขนาดเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ แล้วทำการเลื่อนเพื่อประมวลผลไปเรื่อย ๆ ทีละครั้งหนึ่งของความกว้างหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยครั้งแรกของผลลัพธ์นั้นจะเป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำ และอีกครั้งที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบความถี่สูง

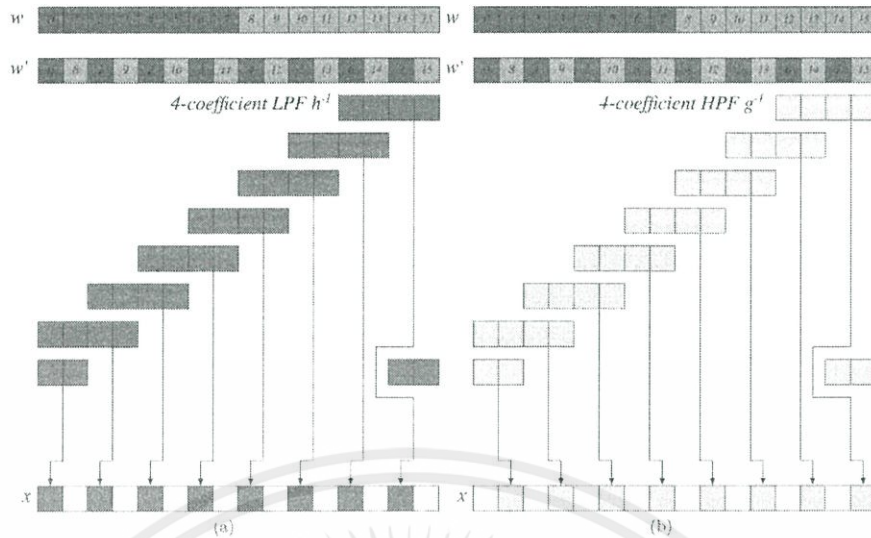


รูปที่ 2.20 กระบวนการ FDWT สำหรับสัมประสิทธิ์ 4 ตัว

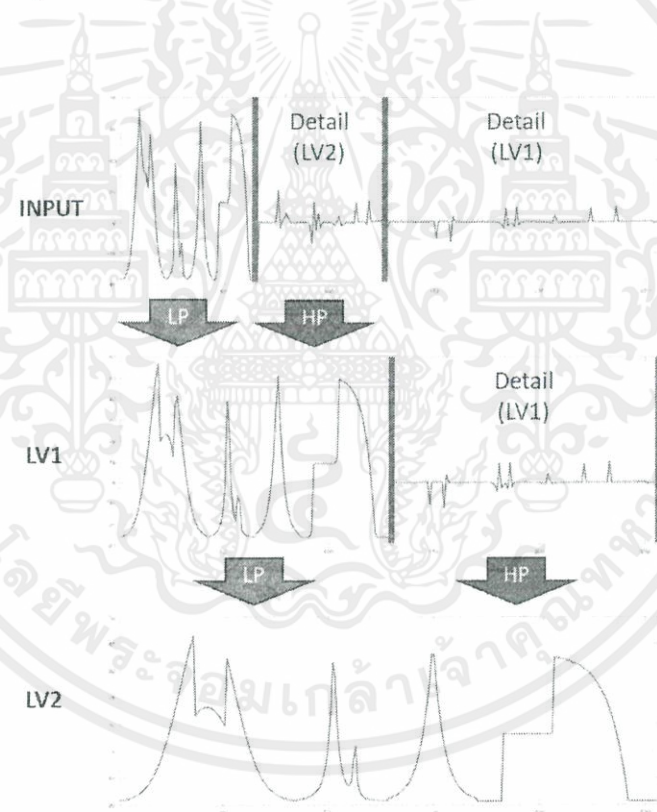
-IDWT (Inverse Discrete Wavelet transform)

คือ กระบวนการในการรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction) หรืออีกนัยหนึ่งคือ กระบวนการย้อนกลับของ FDWT โดยจากสัญญาณที่ผ่าน FDWT มาแล้วนั้นจะมีอัตราสุ่มข้อมูลที่ลดต่ำลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง และเพื่อทำให้ข้อมูลกลับมาอยู่บนฐานเวลาเดิม จึงต้องทำการรวมกลับสัญญาณโดยในกระบวนการ IDWT นั้นทุกๆระดับ (level) ของการประมวลผลนั้น อัตราสุ่มข้อมูลจะเพิ่มขึ้น 2 เท่า ทำให้อัตราสุ่มข้อมูลของสัญญาณกลับมาเท่าเดิมอีกครั้ง

ตัวอย่างอันกอลิทึมในการประมวลผล IDWT สำหรับเวฟเล็ตที่มีสัมประสิทธิ์ 4 ตัว เช่น DB2 โดยมีหลักการคล้ายๆ FDWT หากแต่เปลี่ยนเพียงสัมประสิทธิ์ตัวกรองไปใช้ตัวกรองผกผันเท่านั้น (h^{-1} , g^{-1}) และก่อนทำการใช้ฟังก์ชันหน้าต่างต้องทำการเรียงข้อมูลใหม่โดยสลับระหว่างองค์ประกอบความถี่สูงและต่ำไปมากดังรูปที่ 2.21 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็จะกลับมาเป็นสัญญาณต้นทางดังเดิม หากแต่ถ้าต้องการเฉพาะองค์ประกอบแค่บางส่วน เช่น ต้องการเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูงนั้น สามารถทำได้เช่นกัน โดยเลือกคำนวณเฉพาะแต่องค์ประกอบนั้นๆได้แล้วเว้น ส่วนองค์ประกอบที่ไม่ต้องให้วางไว้ หรือ เป็น 0



รูปที่ 2.21 กระบวนการ IDWT สำหรับสัมประสิทธิ์ 4 ตัว



รูปที่ 2.22 กระบวนการ IDWT ที่ LV2

-สัมประสิทธิ์ตัวกรอง (Filter Coefficients)

สำหรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองจะมีทั้งหมด 4 ชุดด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h = สัมประสิทธิ์ในกระบวนการแยกสัญญาณย่านความถี่ต่ำ (Decomposition low-pass filter)

g = สัมประสิทธิ์ในกระบวนการแยกสัญญาณย่านความถี่สูง (Decomposition high-pass filter)

h^{-1} = สัมประสิทธิ์ในกระบวนการรวมกลับสัญญาณย่านความถี่ต่ำ (Reconstruction low-pass filter)

g^{-1} = สัมประสิทธิ์ในกระบวนการรวมกลับสัญญาณย่านความถี่สูง (Reconstruction high-pass filter)

โดยแต่ละ Mother Wavelet นั้นก็จะกำหนด h ต่างกันไปซึ่งสามารถหาสัมประสิทธิ์ตัวอื่น เช่น g สามารถหาได้จากสมการที่ 2.33

$$g_k = (-1)^k h_{n-k-1} \text{ เมื่อ } k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\} \quad (2.33)$$

เมื่อ n คือจำนวนของสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ ตัวอย่างเช่น สำหรับฟิลเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ 2, 4 และ 6 ตัว คือ

$$h = [C_0 \ C_1] \rightarrow g = [C_1 \ -C_0] \quad (2.34)$$

$$h = [C_0 \ C_1 \ C_2 \ C_3] \rightarrow g = [C_3 \ -C_2 \ C_1 \ -C_0] \quad (2.35)$$

$$h = [C_0 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5] \rightarrow g = [C_5 \ -C_4 \ C_3 \ -C_2 \ C_1 \ -C_0] \quad (2.36)$$

ส่วนสัมประสิทธิ์ของ Inverse filter นั้นหาได้จาก

$$h_k^{-1} = \begin{cases} h_k & \text{เมื่อ } k \in \{1, 3, \dots\} \\ h_{n-k-2} & \text{เมื่อ } k \in \{0, 2, \dots\} \end{cases} \quad (2.37)$$

ตัวอย่างเช่น

$$h = [h_0 \ h_1] \rightarrow h^{-1} = [h_0 \ h_1] \quad (2.38)$$

$$h = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ h_3] \rightarrow h^{-1} = [h_2 \ h_1 \ h_0 \ h_3] \quad (2.39)$$

$$h = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5] \rightarrow h^{-1} = [h_4 \ h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_0 \ h_5] \quad (2.40)$$

ส่วน g^{-1} หาได้จากสมการ (2.33) และ (2.37) ตัวอย่างเช่น

$$h = [h_0 \ h_1] \rightarrow g^{-1} = [h_1 \ -h_0] \quad (2.41)$$

$$h = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ h_3] \rightarrow g^{-1} = [h_3 \ -h_0 \ h_1 \ -h_2] \quad (2.42)$$

$$h = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5] \rightarrow g^{-1} = [h_5 \ -h_0 \ h_3 \ -h_2 \ h_1 \ -h_4] \quad (2.43)$$

ตัวอย่างเช่น Daubechies 2 นั้นกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ h จำนวน 4 ค่าคือ

$$h = \left[\frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right] \quad (2.44)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สัมประสิทธิ์ g , h^{-1} และ g^{-1} เป็น

$$g = \left[\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad -\left(\frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\right) \quad \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad -\left(\frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.45)$$

$$h^{-1} = \left[\frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right] \quad (2.46)$$

$$g^{-1} = \left[\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad -\left(\frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\right) \quad \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad -\left(\frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.47)$$

บทที่ 3

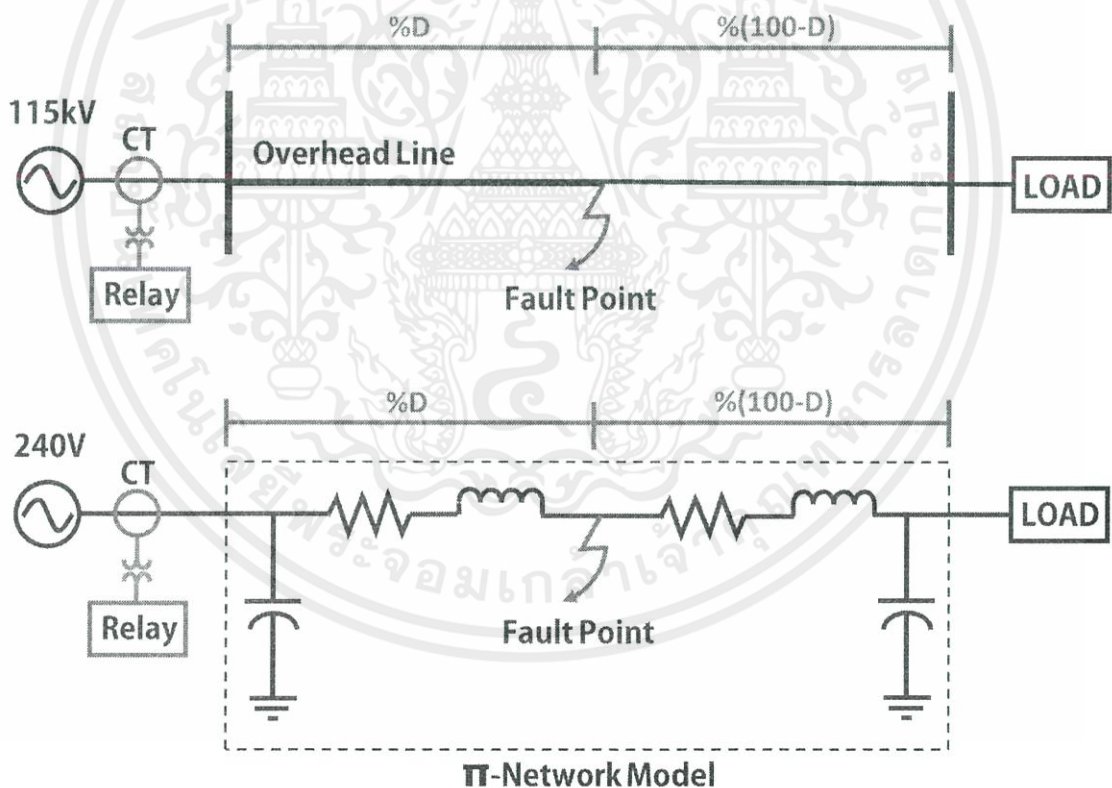
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 การจำลองฟอลต์

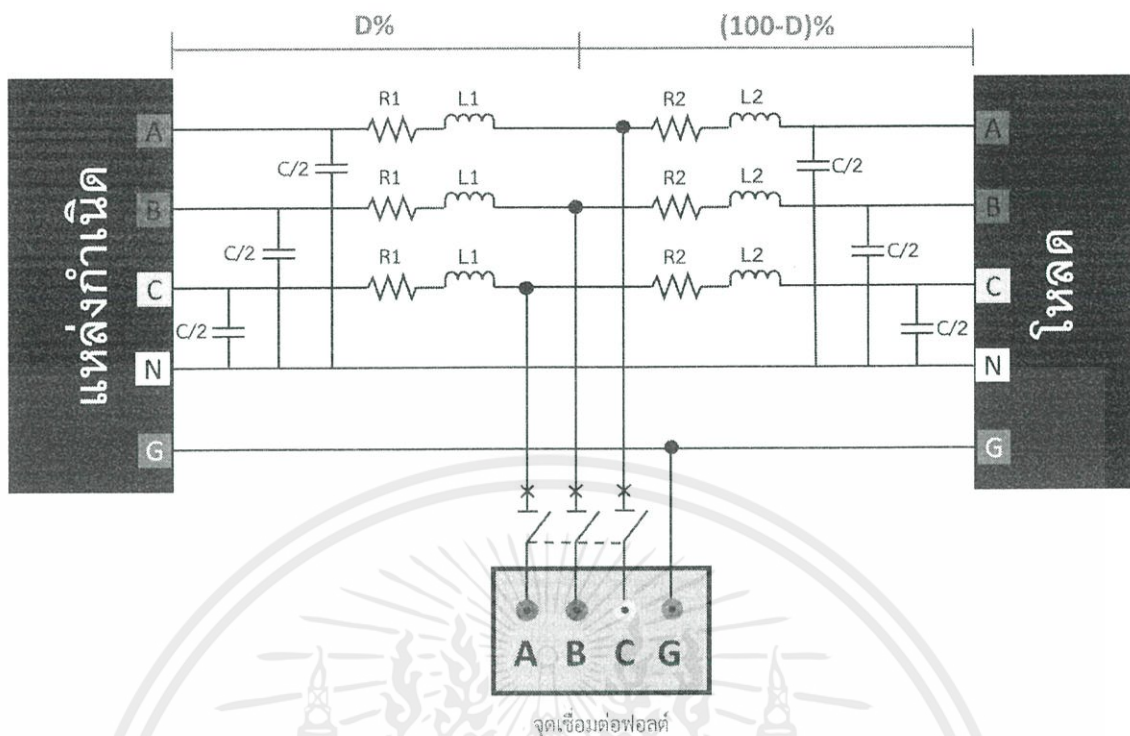
เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การจำลองระบบสายส่งกำลังมาเป็นชุดทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อให้การทดลองมีความยืดหยุ่นสามารถจำลองผลการเกิดฟอลต์ได้หลากหลายประเภท และ ง่ายต่อการเก็บผลการทดลอง

3.1.1 ชุดทดลองวงจรจำลองสายส่งแบบพาย [10]

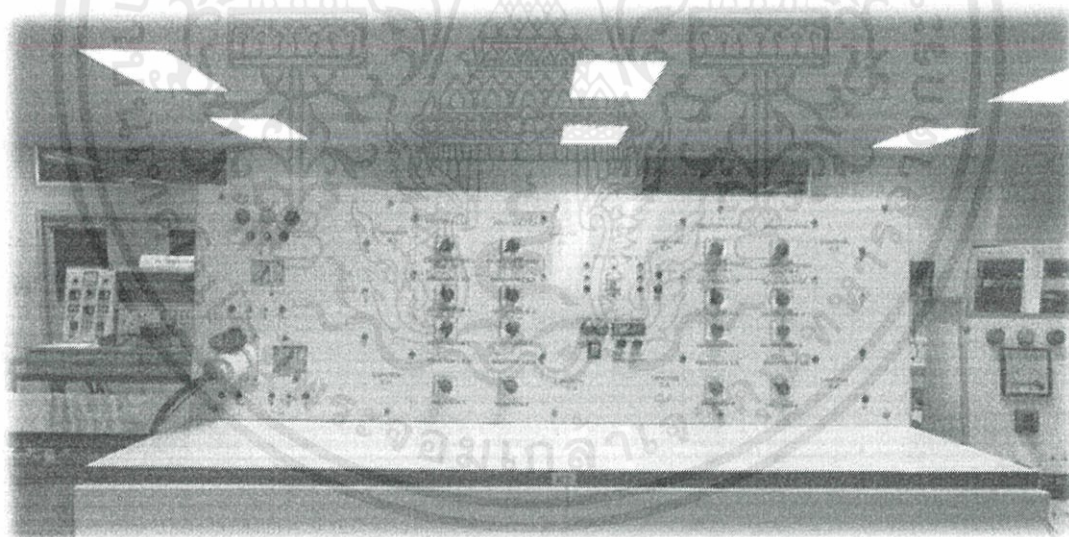
จำลองจากชุดทดลองสายส่งแบบพายพิกัด 150 VA 420 V ที่จำลองจากระบบจากสายส่งแบบเหนือดิน (Overhead) ที่ระยะทาง 40 กิโลเมตรพิกัด 100 MVA 115 kV โดยมีลักษณะวงจรตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วันไลน์ไดอะแกรม ระบบสายส่งกำลัง



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองจำลองฟอลต์ในสายส่งชนิดพาย (วงจร)



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองจำลองฟอลต์ในสายส่งชนิดพาย (ชุดทดลองจริง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วิธีจำลองฟอลต์แต่ละรูปแบบ

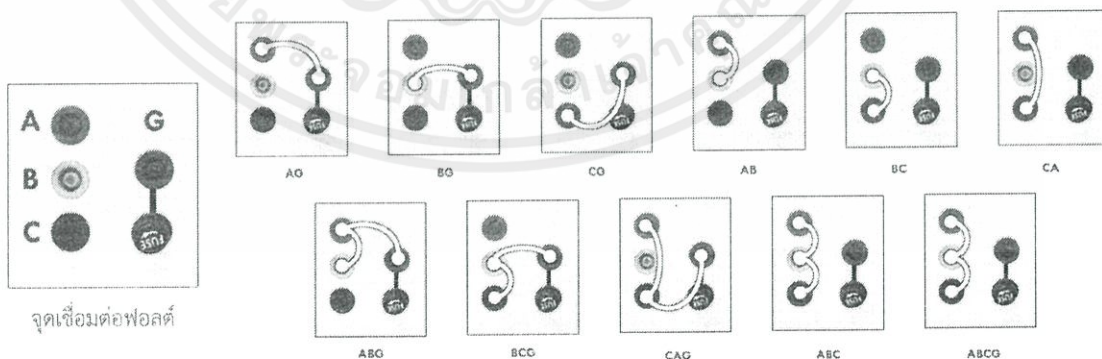
โดยการทดลองจะทำการจำลองฟอลต์ทั้งหมด 4 รูปแบบ รวมทั้งหมด 11 กรณี คือ

- การลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดิน กรณี AG , BG , CG
- การลัดวงจรแบบ 2 เฟส กรณี AB , BC , CA
- การลัดวงจรแบบ 2 เฟสลงดิน กรณี ABG , BCG , CAG
- การลัดวงจรแบบ 3 เฟส กรณี ABC , ABCG

โดยต่อวงจรสำหรับจำลองฟอลต์แต่ละชนิดได้ดังรูปที่ 3.5 และสามารถปรับตำแหน่งของการลัดวงจรได้โดย ปรับค่าอิมพีแดนซ์ (R , L , C) ของสายส่งตามสัดส่วนของระยะทางที่ต้องการ คือที่ระยะ 40% 50% 60% และ 70% ของสายส่ง หรือเป็นอัตราส่วน 40:60 50:50 60:40 และ 70:30 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แผงควบคุมฟอลต์



รูปที่ 3.5 การต่อวงจรสำหรับฟอลต์แต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ในการเลือกฮาร์ดแวร์นั้นจะขอแยกเป็น 2 ส่วน คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit : MCU) และ เซ็นเซอร์วัดกระแส (current transformer) โดยมีหลักการเลือกดังนี้

3.2.1 การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์

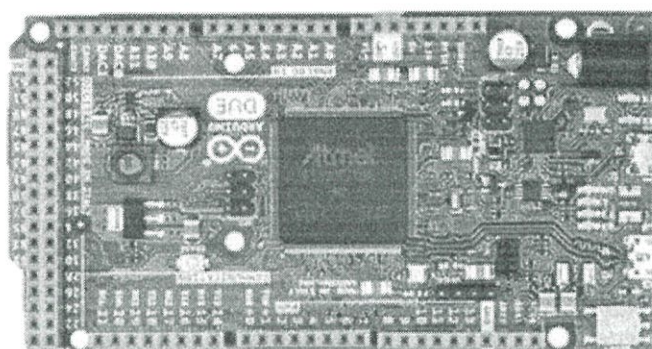
โดยในการเลือกบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นมีตัวแปรสำคัญหลักที่ต้องเลือกอยู่หลายประการ เช่น ความเร็วในการประมวลผล จำนวนอินพุตและเอาต์พุตพอร์ท ระดับแรงดันที่ใช้ งาน ตลอดจนถึงความยืดหยุ่นในการใช้งาน ฯลฯ โดยตัวแปรที่เรานำมาใช้เป็นตัวตัดสินในมีดังนี้

- ความยืดหยุ่นในการใช้งาน

โดยตัวแปรแรกที่ใช้เป็นตัวเลือกคือความยืดหยุ่นในการใช้งาน โดยเลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arduino เนื่องจากเป็น โอเพนซอร์ส (open source) และมีราคาไม่สูงนัก ทำให้นักพัฒนานิยมนำไปใช้งานและพัฒนาต่อยอดเป็นวงกว้าง จึงง่ายต่อการหาซื้อ และ ใช้งาน และยังมีอุปกรณ์ที่รองรับหลากหลายอีกด้วย

- เวลาที่ใช้ในการประมวลผล

โดยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนั้น จะแปรผันตรงกับความเร็วในการประมวลผลโดยในปริยฐานพินช์บับนี้ได้เลือกใช้เป็น Arduino DUE ซึ่งในด้านความเร็วในการประมวลผลนั้นมี Clock ที่ 84 MHz ซึ่งสูงที่สุดในตระกูล Arduino ดังแสดงในรูป 3.6 และยังมีบอร์ดตัวแรกที่ใช้สถาปัตยกรรม ARM แบบ 32bit อีกด้วย โดยแสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 และระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลต่อ 1 รอบการคำนวณนั้น เมื่อเทียบกันระหว่าง Arduino DUE (Clock 84 MHz) และ Arduino Mega (Clock 18MHz) ที่แสดงดังตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า Arduino DUE มีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่า 5-8 เท่า ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้วิเคราะห์สัญญาณที่ต้องใช้พลังในการประมวลผลสูง และ ต้องการความรวดเร็วแบบ Real-time เช่นในการทดลองนี้



รูปที่ 3.6 Arduino DUE

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงเทคนิคของ Arduino DUE

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-16V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Output Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks; 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้ในการประมวลผลใน 1 รอบการคำนวณ เทียบระหว่าง Arduino DUE และ Mega

LV	Arduino DUE (μ s)	Arduino Mega (μ s)
1	77	580
2	294	1264
3	550	2628
4	1057	5448

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเลือกเซนเซอร์วัดกระแส

โดยสำหรับเซ็นเซอร์วัดกระแสในปริภูมิงานที่เลือกใช้ หม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) โดยจากการทดลองมีค่ากระแสสูงสุดที่ประมาณ 7A จึงเลือกใช้พิกัด 50A ซึ่งใกล้เคียงที่สุดที่หาได้ และ เลือกจากระดับความถูกต้องของเครื่องวัด (Accuracy Class) ซึ่งบ่งบอกถึงความถูกต้องของการวัด โดยในปริภูมิงานที่เลือกได้เลือกใช้ระดับความถูกต้องของเครื่องวัดที่ 0.2 (Accuracy Class 0.2) ซึ่งเหมาะสมสำหรับงานวัดเทียบ โดยมีค่าความผิดพลาด (Error) 0.2% และมีความคลาดเคลื่อนของเฟสจากผลของหม้อแปลงกระแสเพียง 10% เท่านั้นที่พิกัดแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยหม้อแปลงกระแสที่เลือกใช้เป็นหม้อแปลงกระแส 3 เฟส พิกัด 50A/333mV ย่านความถี่ใช้งาน 50 - 400 HZ , Class 0.2 ขดลวดทุติยภูมิ 3000 รอบ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 ค่าคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสจำแนกตามระดับความถูกต้องของเครื่องวัด

Accuracy Class	% current(ratio) error at % of rated current shown below				Phase displacement (minutes) at % of rated current shown below				Application
	5	20	100	120	5	20	100	120	
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	Precision Test & Measurement
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	Precision Grade Meters
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	Tariff kWh Metering
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	Commercial kWh Metering

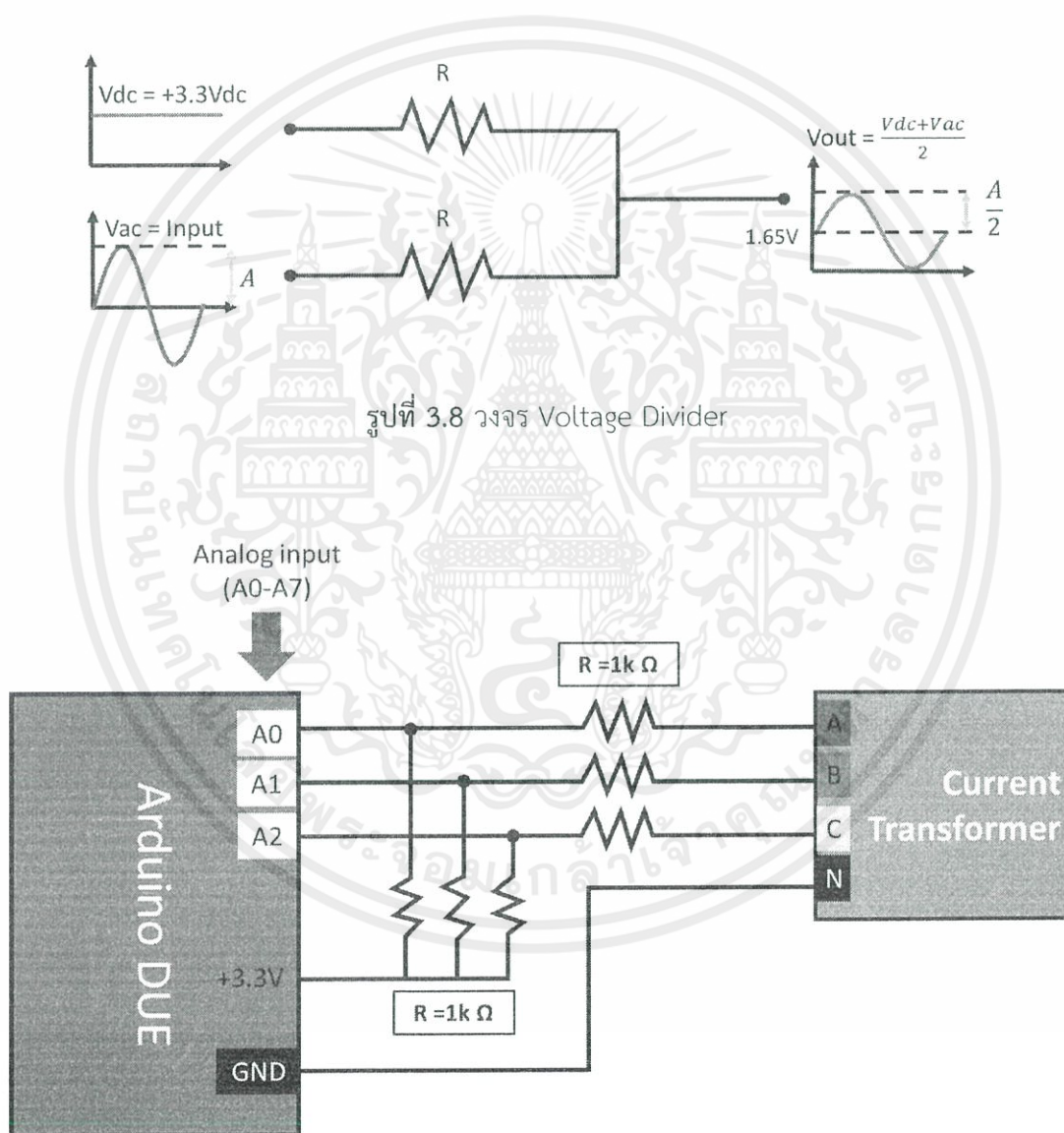


รูปที่ 3.7 หม้อแปลงกระแส 3 เฟส พิกัด 50A/333mV-Class 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 แผนผังวงจร

โดยในการออกแบบวงจรนั้นจะเป็นในส่วนของการรับค่าสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงกระแส ไปยัง พอร์ทอนาล็อกขาเข้า (Analog input) ของ Arduino เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้ เป็นสัญญาณแบบ Digital โดยใช้ ADC ภายในตัว Arduino เอง แต่เนื่องจาก หม้อแปลงกระแสที่เลือกใช้นั้น มีสัญญาณขาออกเป็นแรงดัน AC ในช่วง -333mV ถึง $+333\text{mV}$ แต่ Arduino นั้นรองรับสัญญาณขาเข้า ที่แรงดัน 0 ถึง $+3.3\text{V}$ เท่านั้นจึงต้องทำการยกระดับแรงดันด้วยวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ดังรูปที่ 3.8 โดยยกระดับแรงดันขึ้นไป 1.65V

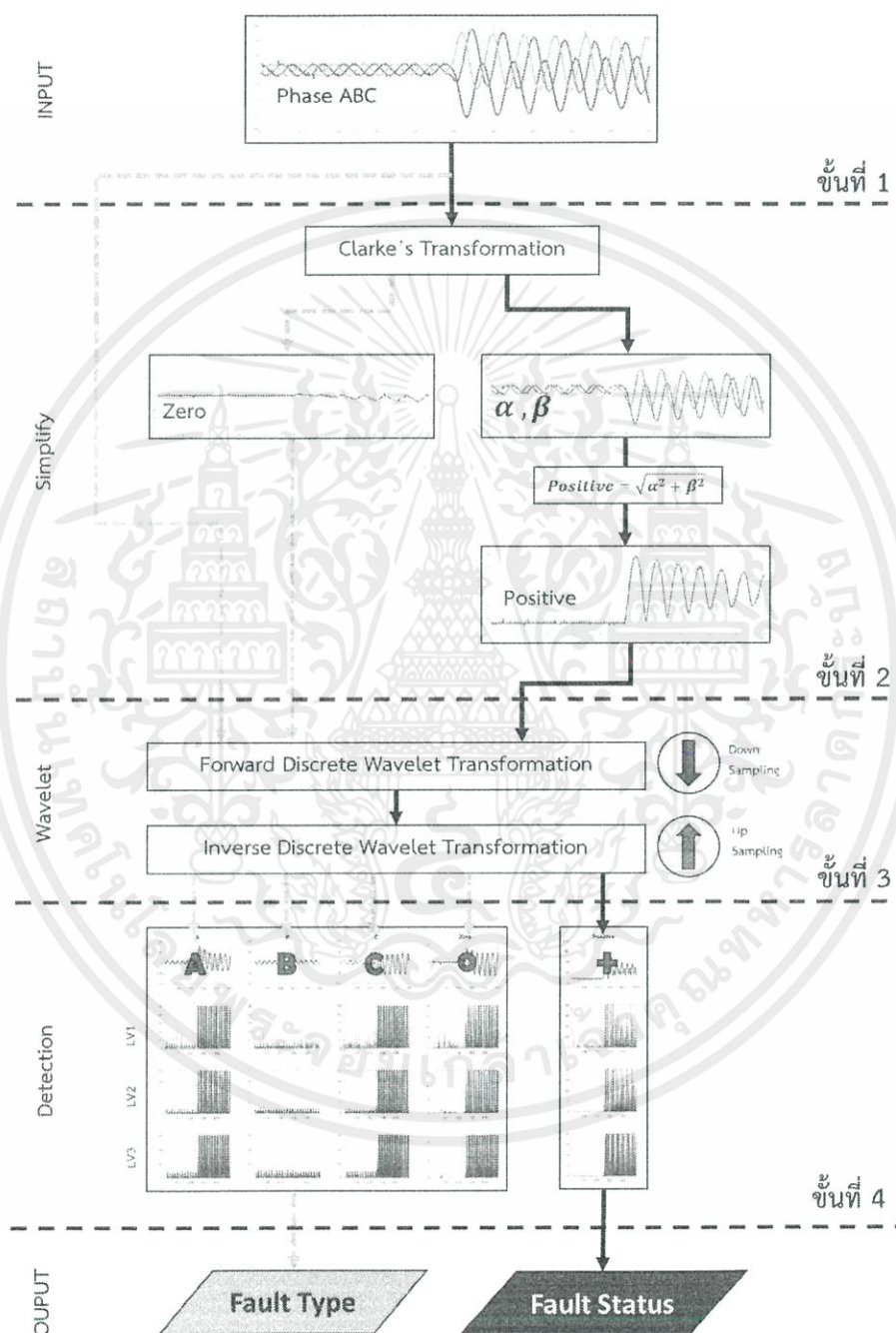


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ซอฟต์แวร์ (Software)

3.3.1 อื่นกอลิทีมที่ออกแบบ

สำหรับในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นมีหลักการทำงานดัง flow chart ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการทำงานของรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีหลักการทำงานดังนี้

ขั้นที่ 1 อ่านค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาเข้า 3 เฟส ABC ที่แปลงค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 240V เฟส ABC มาเป็นสัญญาณแรงดัน 0-333mV ผ่านหม้อแปลงกระแส แล้วจึงแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต (0-4096)

ขั้นที่ 2 ลดรูปสัญญาณ (Simplify) ในกระบวนการลดรูปสัญญาณนั้น จะแบ่งการทำงานเป็น 2 โหมดคือ โหมดตรวจจับฟอลต์ และ โหมดแยกประเภทฟอลต์ โดยขณะเริ่มการทำงานจะอยู่ในโหมดตรวจจับฟอลต์ และ หากตรวจพบว่ามียฟอลต์เกิดขึ้นก็จะทำการสลับการทำงานไปโหมดแยกประเภทฟอลต์ทันที เพื่อทำการแยกประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยในโหมดตรวจจับฟอลต์ นั้น จะทำการลดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ABC ให้เหลือเพียง 1 เฟส คือ เฟสบวก (Positive : +) ผ่านการใช้สมการแปลงคาร์ก เพื่อลดระยะเวลาและ ง่ายต่อการวิเคราะห์แทนที่การประมวลผลจากหลายสัญญาณให้เหลือเพียงสัญญาณเดียว ส่วนโหมดแยกประเภทฟอลต์ จะทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมด 4 เฟส คือ เฟส ABC และ เฟสศูนย์ (Zero) ที่ผ่านการลดรูปด้วยสมการแปลงคาร์ก

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet transform : DWT) โดยเลือกวิเคราะห์ที่ ระดับ (Level) 1-3

ขั้นที่ 4 เป็นกระบวนการต่อเนื่องมาจากขั้นที่ 2-3 โดยหากอยู่ในโหมดตรวจจับฟอลต์ จะทำการวิเคราะห์สัญญาณเฟสบวก เพียงสัญญาณเดียวเพื่อระบุว่าสัญญาณอยู่ในสถานะปกติ (Normal) หรือ สถานะเกิดฟอลต์ (Fault) และ หากอยู่ในโหมดแยกประเภทฟอลต์นั้นก็จะมีกระบวนการเช่นเดิมหากแต่เปลี่ยนเป็นวิเคราะห์สัญญาณเฟส A B C และ ศูนย์ แทนเพื่อระบุว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสใด โดยเราสามารถแยกประเภทประเภทของฟอลต์ได้ตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.11

ประเภทฟอลต์	A	B	C	Zero
AG	×			×
BG		×		×
CG			×	×
AB	×	×		
BC		×	×	
CA	×		×	
ABG	×	×		×
BCG		×	×	×
CAG	×		×	×
ABC	×	×	×	

โดย

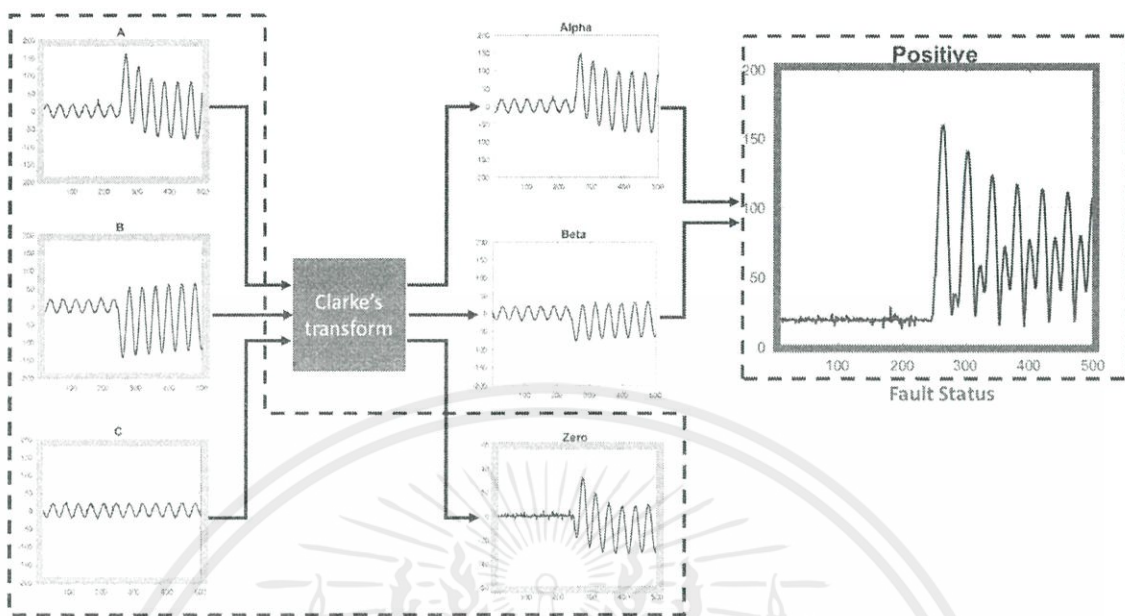
×

ว่าง = สถานะปกติ (Normal)

รูปที่ 3.11 การแยกประเภทฟอลต์ด้วยสถานะฟอลต์ในเฟส A , B , C และ ศูนย์ (Zero)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

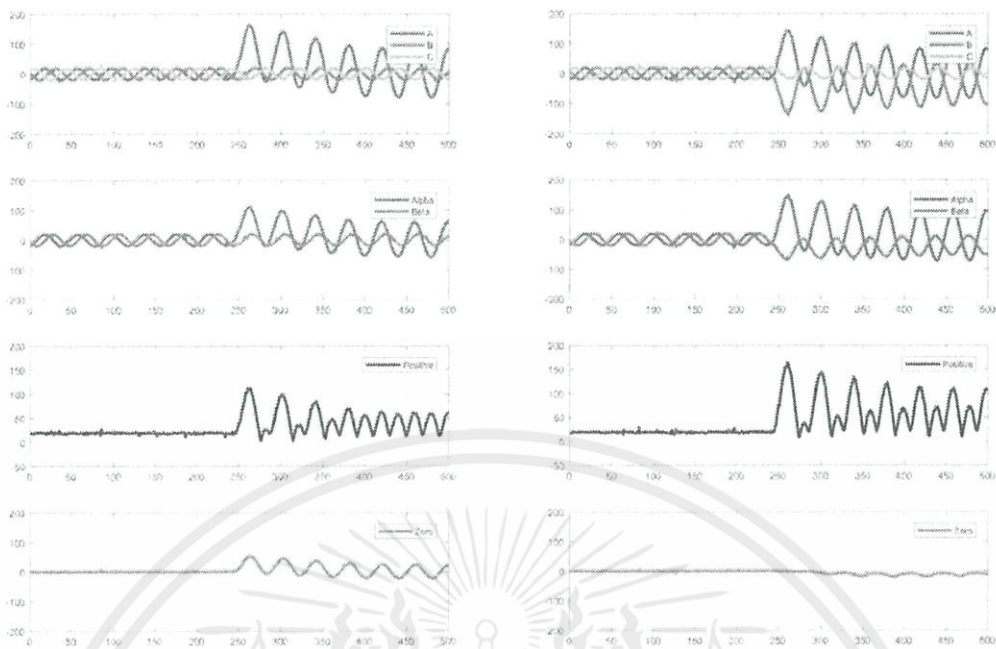
3.3.2 การประยุกต์ใช้สมการแปลงคาร์ก



รูปที่ 3.14 การลดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส ABC ด้วยวิธีแปลงคาร์ก

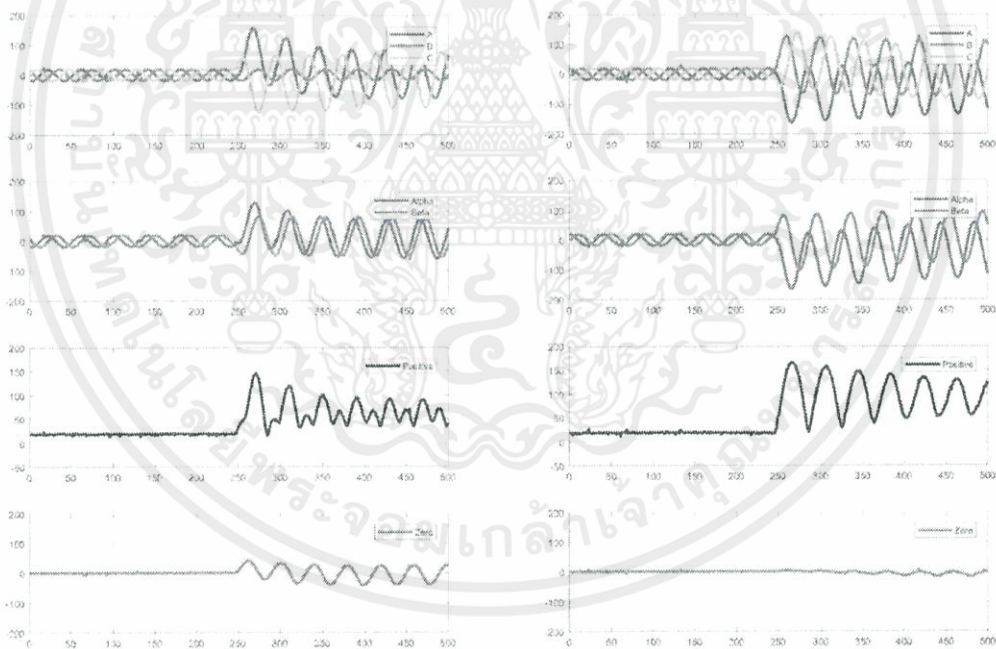
โดยผลลัพธ์จากสมการแปลงคาร์กนั้นจะได้พารามิเตอร์ 3 ตัวคือ I_α (เฟส Alpha), I_β (เฟส Beta) และ I_0 (เฟส Zero) ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

I_0 หรือ ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (zero sequences component) นั้นจะใช้สำหรับตรวจสอบกระแสไหลลงดิน ดังในกรณี การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และ แบบสองเฟสลงดิน ในรูปที่ 3.1 (ก) และ (ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดฟอลต์ กระแสในเฟส zero จะไม่เป็นเชิงเส้นโดยปรากฏองค์ประกอบจากกระแสส่วนเกินที่ไม่สมดุลของเฟส ABC แต่ในกรณี การลัดวงจรแบบเฟสถึงเฟส และ แบบสามเฟส ในรูปที่ 3.1 (ข) และ (ง) นั้นจะเห็นได้ว่ากระแสในเฟส zero แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากกระแสจากทั้ง 3 เฟส ABC ยังคงสมดุลกันแม้ขณะเกิดฟอลต์



(ก) กรณีการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

(ข) กรณีการลัดวงจรแบบสองเฟส



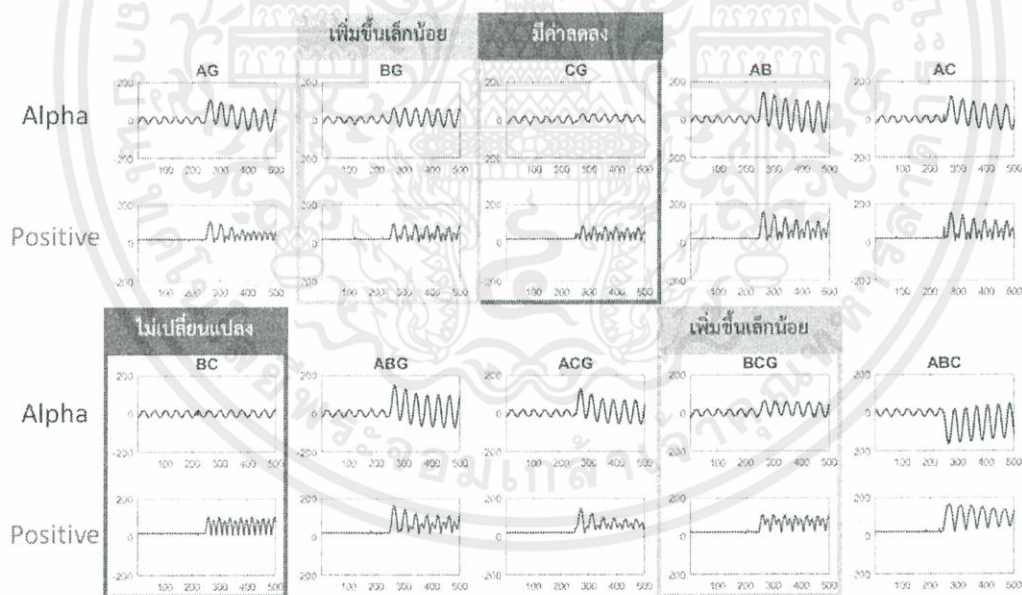
(ค) กรณีการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน

(ง) กรณีการลัดวงจรแบบสามเฟส

รูปที่ 3.17 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส ABC ด้วยวิธีแปลงคาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน I_β นั้นเนื่องจากมีองค์ประกอบแค่ 2 เฟส คือ B และ C เราจึงไม่ใช้พารามิเตอร์นี้ในการมาตรวจสอบฟอลต์ โดยจะใช้ I_α แทนซึ่งมีองค์ประกอบของทั้ง เฟส A, B และ C และด้วยการที่มีองค์ประกอบของทั้ง 3 เฟสนี้เอง งานวิจัยในอดีตจึงนิยมใช้พารามิเตอร์นี้เป็นตัวแทนเพื่อนำไปวิเคราะห์ตรวจจับฟอลต์ โดยจุดสังเกตของสมการแปลงคาร์กั้นนั้น จะเป็นการอ้างอิงเทียบกับเฟสใดเฟสหนึ่ง ในนี้คือเฟส A ทำให้องค์ประกอบแต่ละเฟสนั้นมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยจะเทน้ำหนักไปทางเฟสที่ใช้อ้างอิงเป็นหลักในที่นี้คือเฟส A ซึ่งองค์ประกอบของเฟส A, B และ C จะปรากฏในสัดส่วน 2:1:1 ดังสมการที่ 2.21 ซึ่งจากการที่องค์ประกอบของเฟส B และ C มีค่าน้อยนี้ทำให้ กรณีที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ ณ เฟส A จะทำให้วิเคราะห์หาฟอลต์ได้ยาก ตลอดจนหาไม่พบเลย เช่นในกรณีของ “B-C Fault” ที่กระแส ขณะเกิดฟอลต์นั้น $I_B = -I_C$ ทำให้องค์ประกอบของเฟส B และ C หักล้างกันพอดี จนเหลือแต่องค์ประกอบของเฟส A ทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจจับหาฟอลต์ได้ แสดงดังรูปที่ 3.5



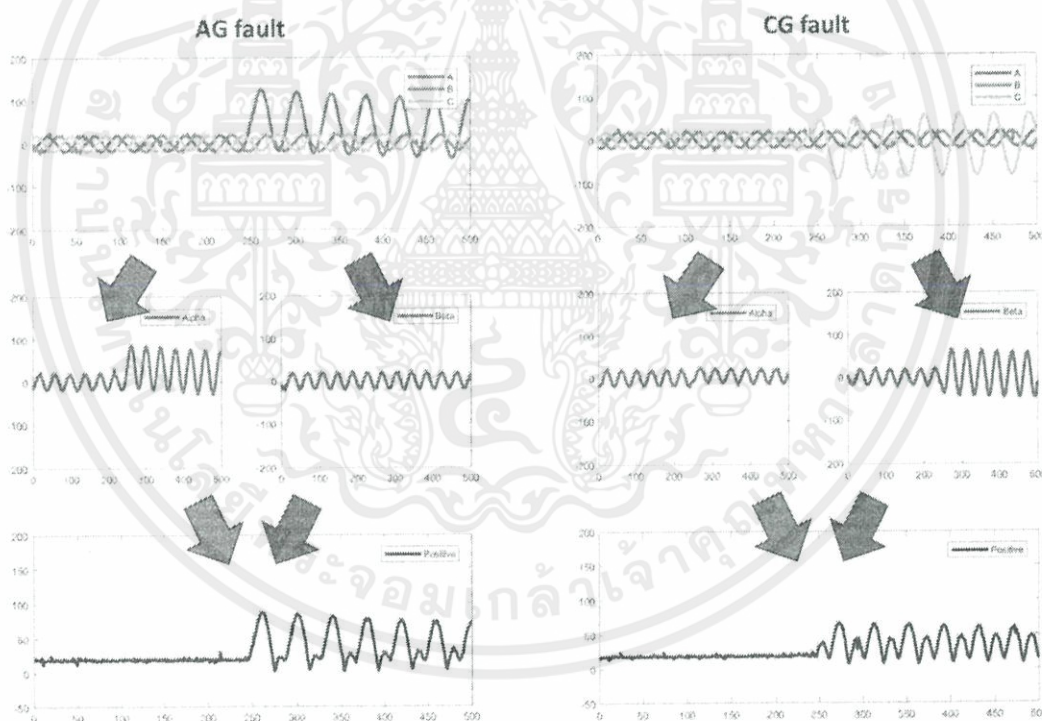
รูปที่ 3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต ABC กับ Alpha กรณีเกิด BC fault

ในปริภูมิพหุคูณฉบับนี้จึงได้ปรับปรุงวิธีการ โดยการใช้ Positive หรือ $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ แทนการใช้ I_α โดยมีหลักการในการปรับเปลี่ยนการบวกรวมคือ จากการใช้ I_α นั้นจะเน้นแสดงองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเฟส A ส่วน I_β นั้นกลับกันโดยจะมีแอมพลิจูดของเฟส B และ C เท่านั้นจึงเกิดแนวคิดในการนำ I_α และ I_β มาใช้ร่วมกันเพื่อให้ผลลัพธ์นั้นคงองค์ประกอบของทั้ง 3 เฟสไว้ทุกเฟส

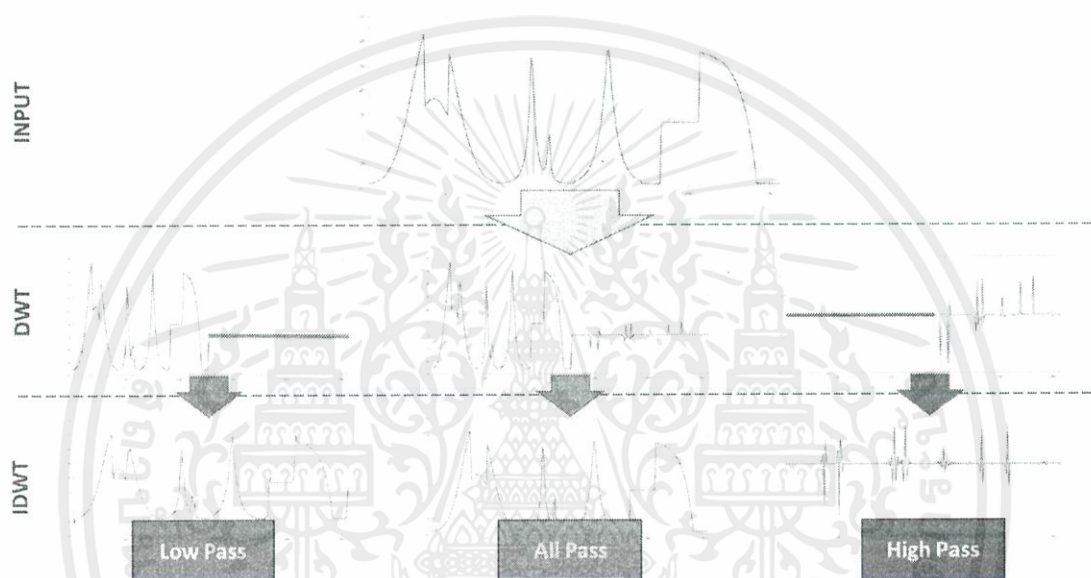
โดยในสภาวะ 3 เฟสสมดุลนั้น จากการสมการที่ 2.23 และ 2.24 จะพบว่าผลบวกกำลังสองของ I_α และ I_β ให้ผลลัพธ์เป็นค่าคงที่เท่ากับ $|I_A|^2$ ตามบทนิยามของตรีโกณมิติที่กล่าวว่า $\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$ จึงทำให้ในสภาวะปกติผลลัพธ์ของ $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ จะเป็นค่าคงที่ และในขณะที่เกิดฟอลต์นั้นจะทำให้ระบบอยู่ในสภาวะ 3 เฟสไม่สมดุลทำให้ ขนาดของ I_α และ I_β ไม่เท่ากันทำให้ผลลัพธ์ของ $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ จะมีลักษณะเป็นองค์ประกอบของเฟสนั้น ๆ ที่เกิดฟอลต์ ซึ่งอยู่บนสัญญาณคงที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 เพราะฉะนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาว่า $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับสถานะฟอลต์มากกว่า I_α นั้นเอง



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟส ABC , α, β และ $\sqrt{(I_\alpha)^2 + (I_\beta)^2}$ ในสภาวะ 3 เฟสไม่สมดุล

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูง ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง

โดยขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องนั้นได้กล่าวไปแล้วใน หัวข้อ 2.2.2.1 นั้นหากต้องการแค่เฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง จะมีกระบวนการเพิ่มเติมในกระบวนการ IDWT โดยก่อนที่จะทำการรวมสัญญาณกลับนั้น ให้เลือกเฉพาะองค์ประกอบส่วนที่ต้องการ และกำจัดส่วนอื่นออก หรือ ให้เป็น 0 เสียก่อนแล้วจึงทำการรวมกลับสัญญาณด้วย IDWT ซึ่งอธิบายได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเลือกวิเคราะห์บางองค์ประกอบ ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง

3.3.4 เวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) [23]-[24]

โดยปริยญาพันธฉบับนี้จะเลือกใช้เวฟเล็ตแม่ ในตระกูล Daubechies อันดับที่ 2 หรือ Daubechies 2 (db2) โดยเลือกจากการมีค่า Coefficients จำนวน 4 ตัวซึ่งไม่มากและไม่ยุ่งเกินไปจนส่งผลต่อระยะเวลาในการประมวลผล โดยมีลักษณะของ Scaling function และ Wavelet function แสดงดังรูปที่ 3.13 และมีค่าประมาณของ Coefficients จากสมการที่ 2.41-2.44 ของเวฟเล็ตแสดงได้ดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.13 Scaling function (ซ้าย) และ Wavelet function (ขวา) ของ Wavelet ชนิด db2

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของเวฟเล็ตชนิด db2

	Low-pass filter	High-pass filter
Decomposition	$h_0 = 0.482962913144534$	$g_0 = -0.129409522551260$
	$h_1 = 0.836516303737808$	$g_1 = -0.224143868042013$
	$h_2 = 0.224143868042013$	$g_2 = 0.836516303737808$
	$h_3 = -0.129409522551260$	$g_3 = -0.482962913144534$
Reconstruction	$h_0^{-1} = 0.224143868042013$	$g_0^{-1} = -0.129409522551260$
	$h_1^{-1} = 0.836516303737808$	$g_1^{-1} = -0.482962913144534$
	$h_2^{-1} = 0.482962913144534$	$g_2^{-1} = 0.836516303737808$
	$h_3^{-1} = -0.129409522551260$	$g_3^{-1} = -0.224143868042013$

3.3.5 อัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate)

โดยเราจะเลือก Sampling rate ที่มากที่สุดเท่าที่ hardware จะรับได้โดยเทียบจากระยะเวลาในการแปลง ADC ตลอดจนเวลาทั้งหมดที่ใช้ในคำนวณผลลัพธ์ใน 1 รอบการทำงาน โดยที่ Max Sampling rate < ระยะเวลาในการประมวลผล ซึ่งเลือกค่าที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 3.5

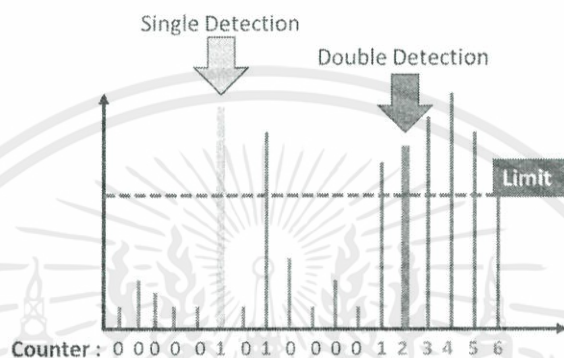
ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และ อัตราสุ่มข้อมูลสูงสุดที่ใช้ได้

LV	ระยะเวลาในการประมวลผล/ผลลัพธ์ (us)	Max Sampling rate (s/sample)
1	77	1e-4
2	294	3e-4
3	550	6e-4
4	1057	1e-3

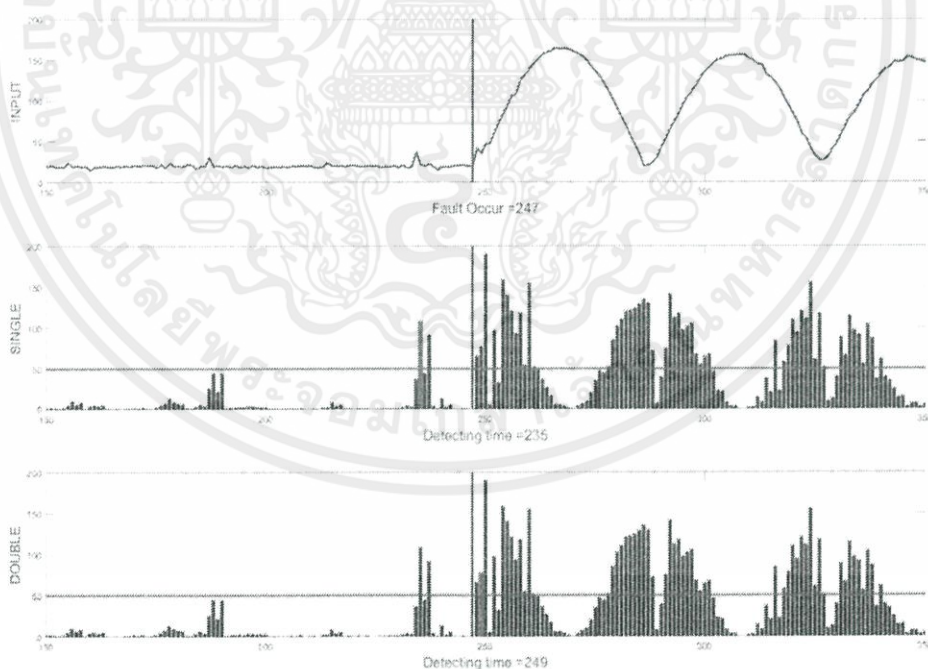
โดยในการทดลองนี้ ผู้ทดลองเลือกใช้การวิเคราะห์ที่ LV2 และ LV3 เป็นหลัก และเพื่อความง่ายต่อการเปรียบเทียบผลลัพธ์ผู้ทดลองจึงเลือกใช้อัตราสุ่มข้อมูลที่ 0.5 มิลลิวินาที

3.3.6 เทคนิค Double Detection

โดยเนื่องจากขณะทดลองผู้ทดลองได้พบปัญหาสัญญาณรบกวนในระบบ จนทำให้การตรวจจับพอลต์ผิดพลาดบ่อยครั้ง ทางผู้ทดลองจึงได้ใช้วิธีการ Double Detection เข้ามาช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยวิธีการนี้มีหลักการคือ จากเดิมที่หากสัญญาณมีค่าเกิน ลิมิตที่ได้ตั้งไว้ นั้นรีเลย์จะยืนยันสถานะเป็นพอลต์ทันที แต่ในวิธีการนี้นั้นจะต้องมีการตรวจจับสถานะพอลต์ได้ 2 ครั้ง ติดกันขึ้นไปจึงจะยืนยันสถานะการณเกิดพอลต์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วิธีการ Double Detection



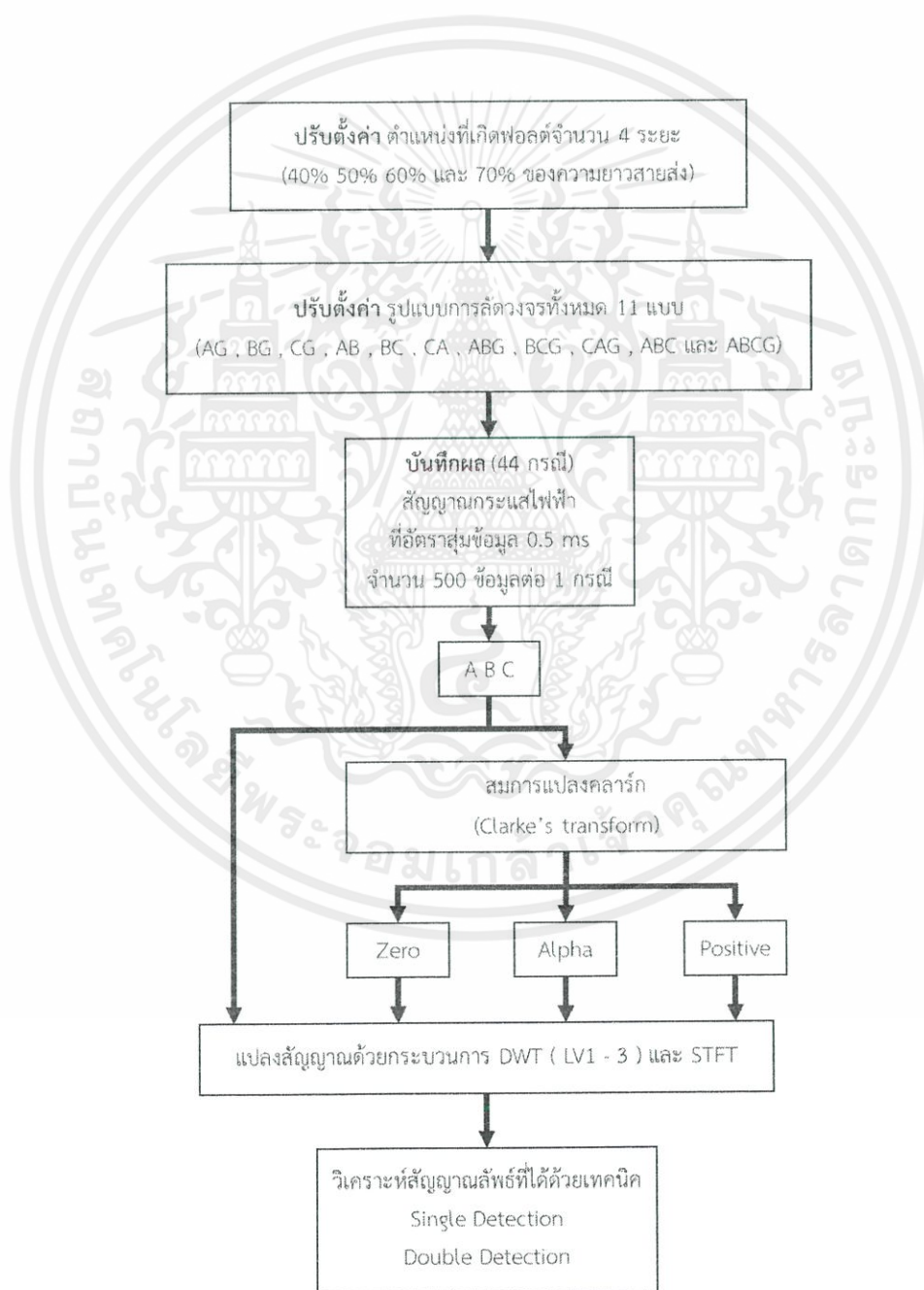
รูปที่ 3.14 Single Detection และ Double Detection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

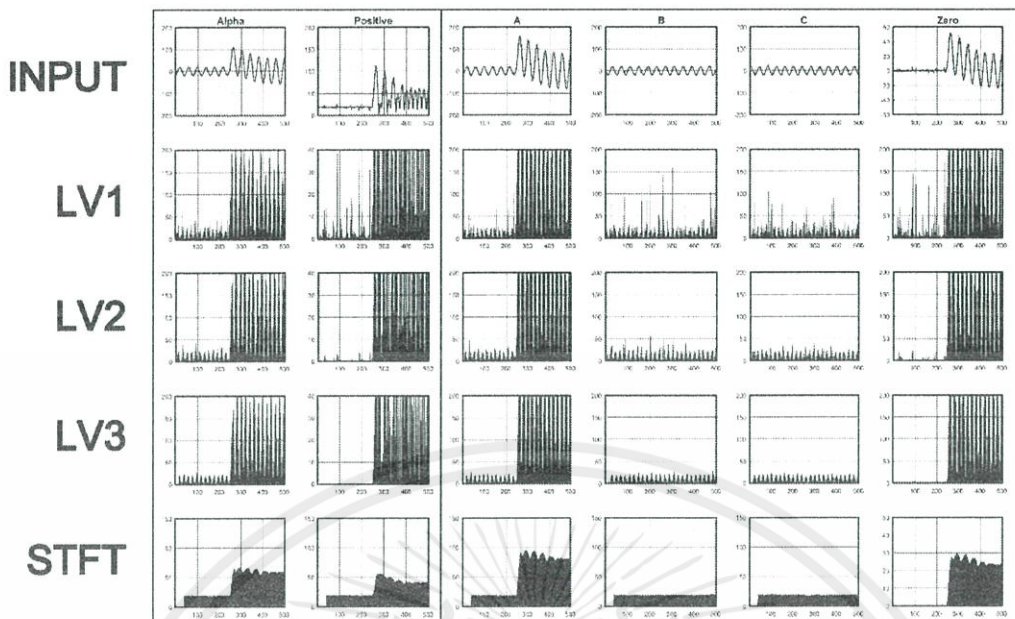
ผลการทดลอง

ในการทดลอง ผู้ทำการทดลองได้ทำการจำลองฟอลต์จากชุดทดสอบจำลองการลัดวงจรสายส่งแบบพาย (π - network) ที่จำลองมาจากระบบสายส่งระยะ 40 km (พิกัด 100VA 115kV) โดยจำลองตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ทั้งหมด 4 ระยะที่ระยะ 40% , 50% , 60% และ 70% ของความยาวสายส่ง และ จำลองประเภทของฟอลต์ทั้งหมด 11 ชนิด คือ AG , BG , CG , AB , AC , BC , ABG , ACG BCG , ABC และ ABCG รวม 44 กรณี โดยมีกระบวนการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

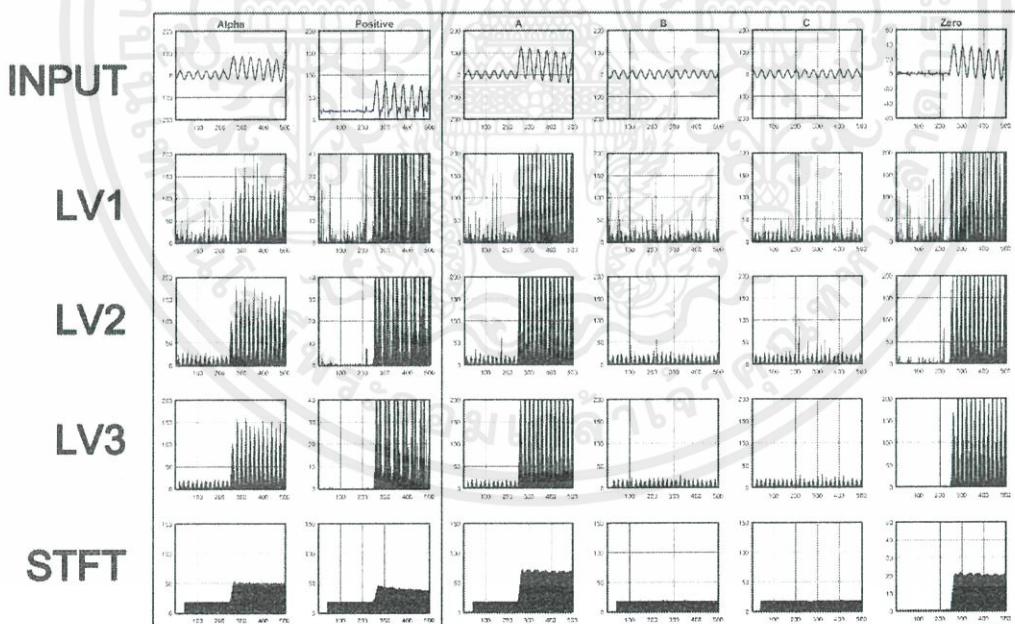
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

(ก) พอลต์ที่ระยะ 40% ของสายส่ง

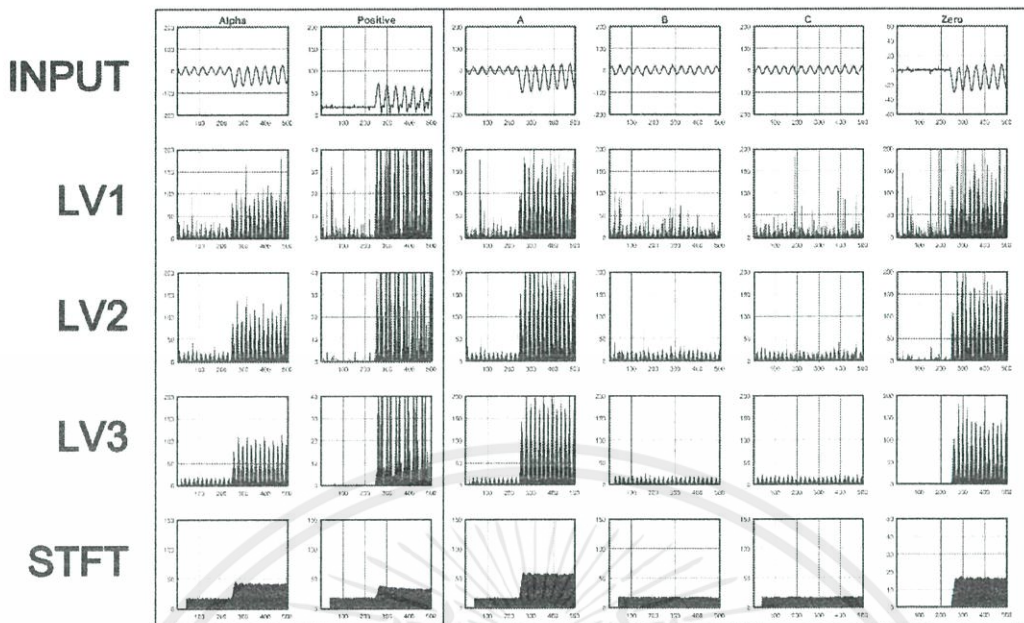


ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

(ข) พอลต์ที่ระยะ 50% ของสายส่ง

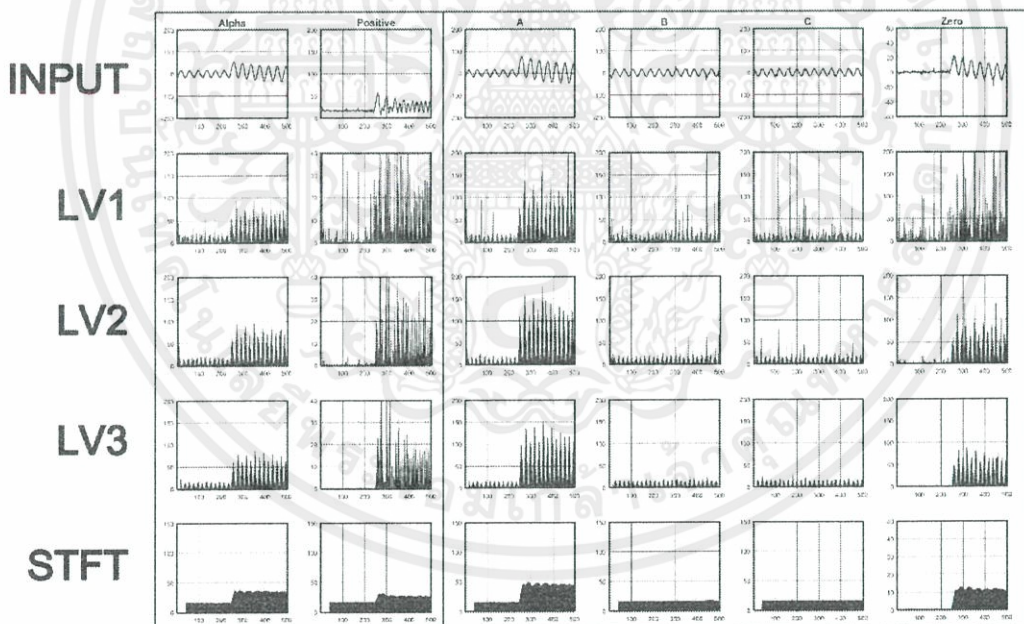
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

(ค) พอลต์ที่ระยะ 60% ของสายส่ง



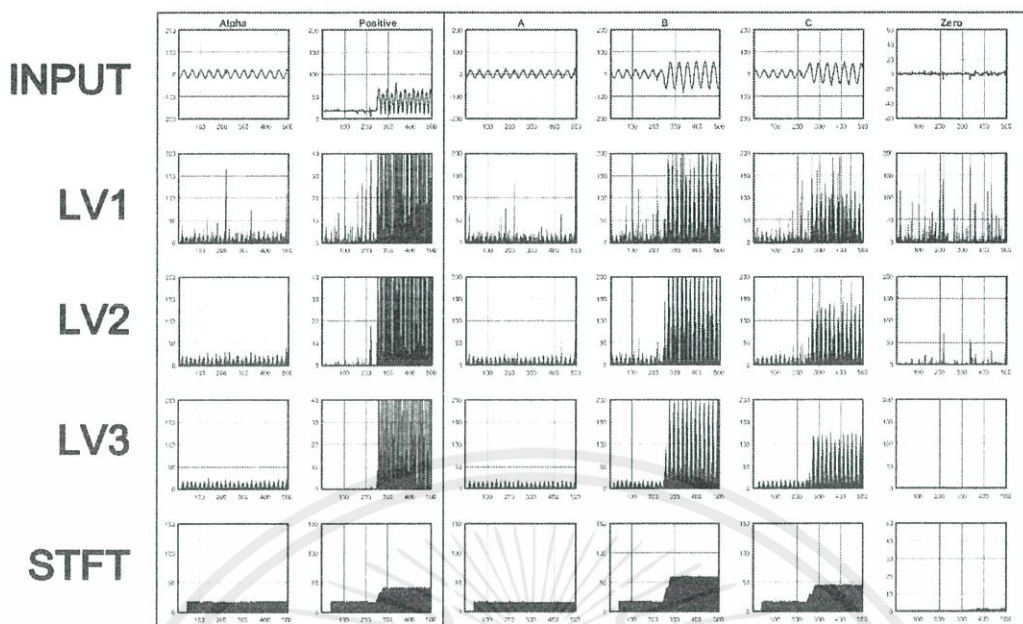
ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

(ง) พอลต์ที่ระยะ 70% ของสายส่ง

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (AG fault)

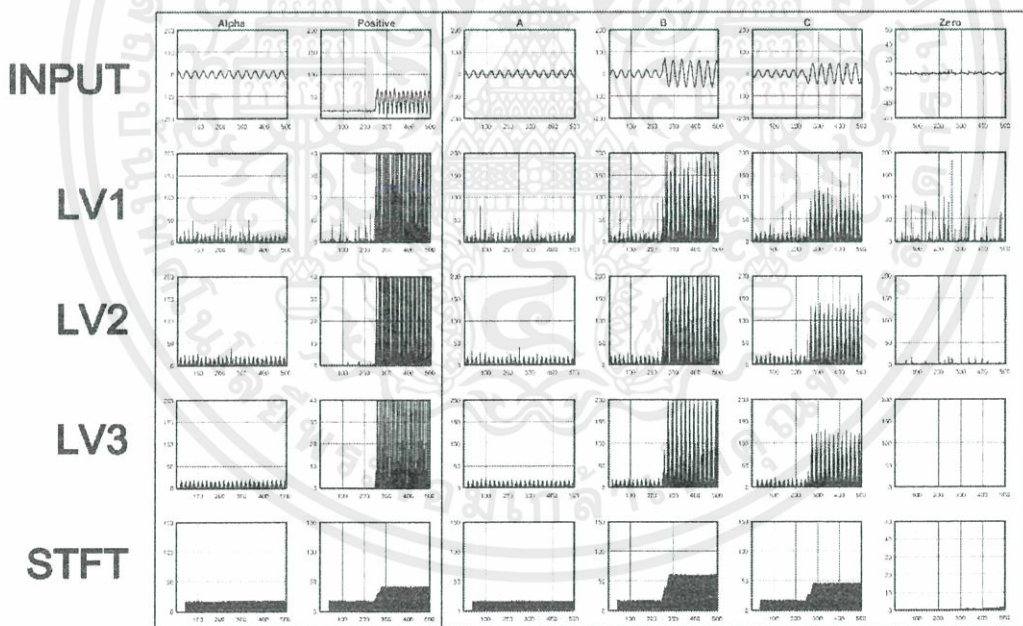
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

(ค) พอลต์ที่ระยะ 60% ของสายส่ง



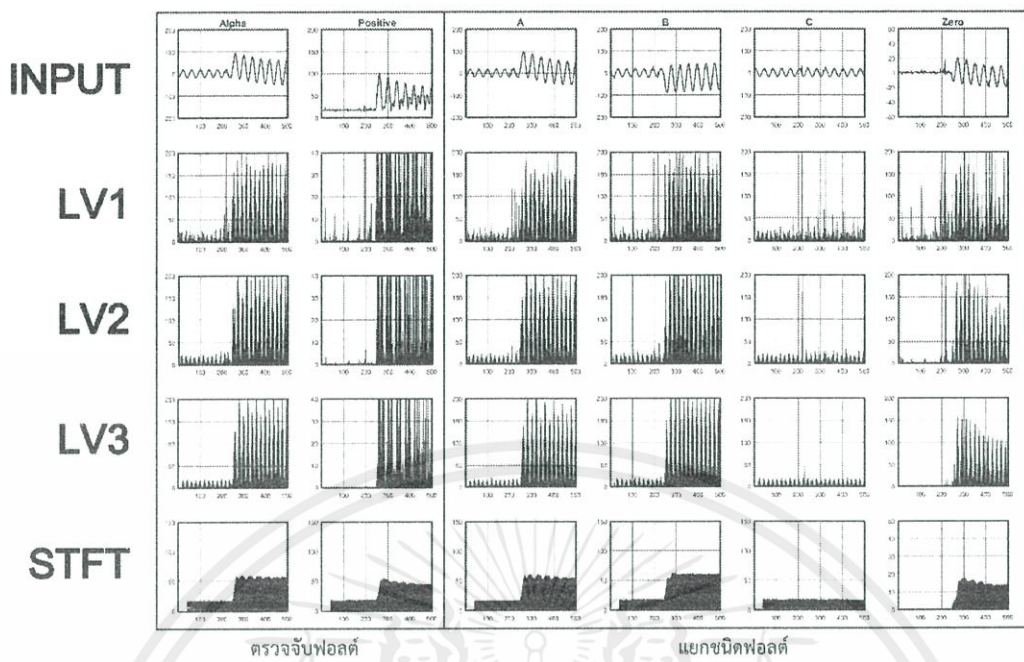
ตรวจจับพอลต์

แยกชนิดพอลต์

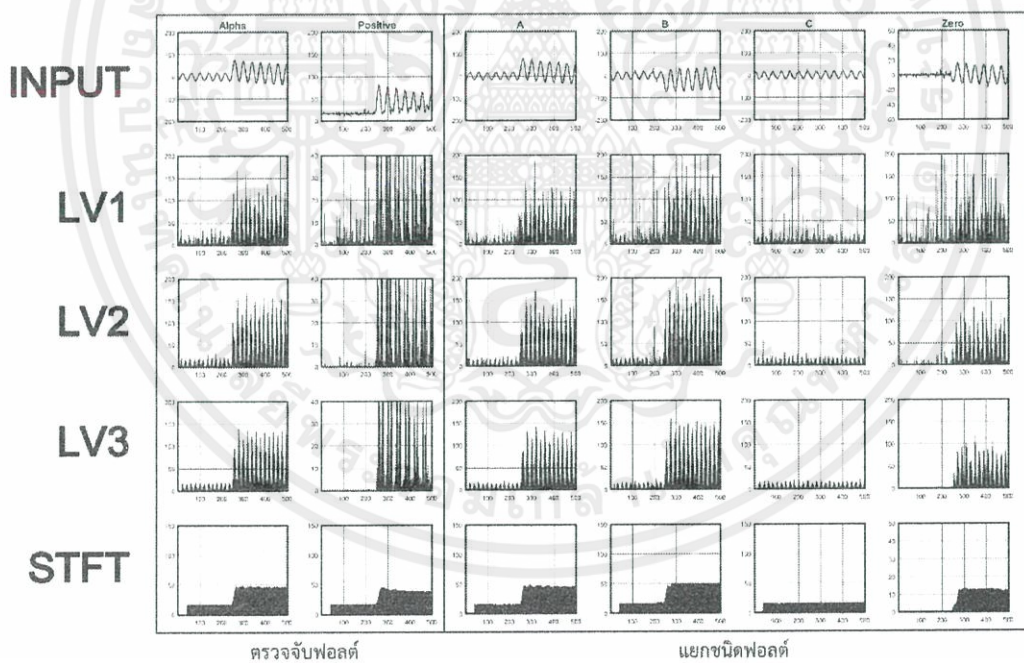
(ง) พอลต์ที่ระยะ 70% ของสายส่ง

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (BC fault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



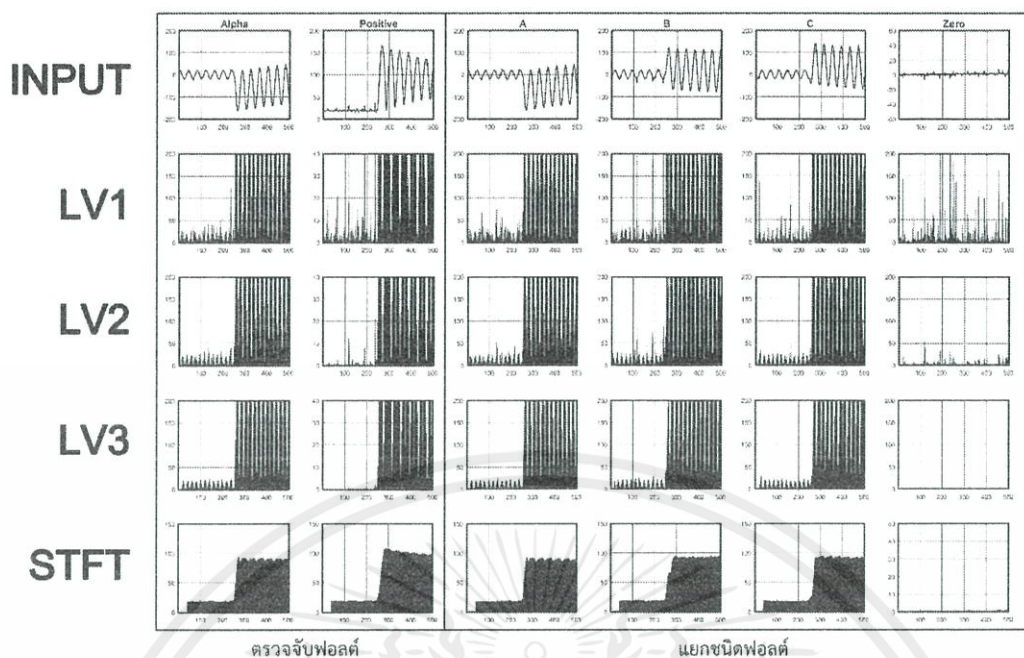
(ค) พอลต์ที่ระยะ 60% ของสายส่ง



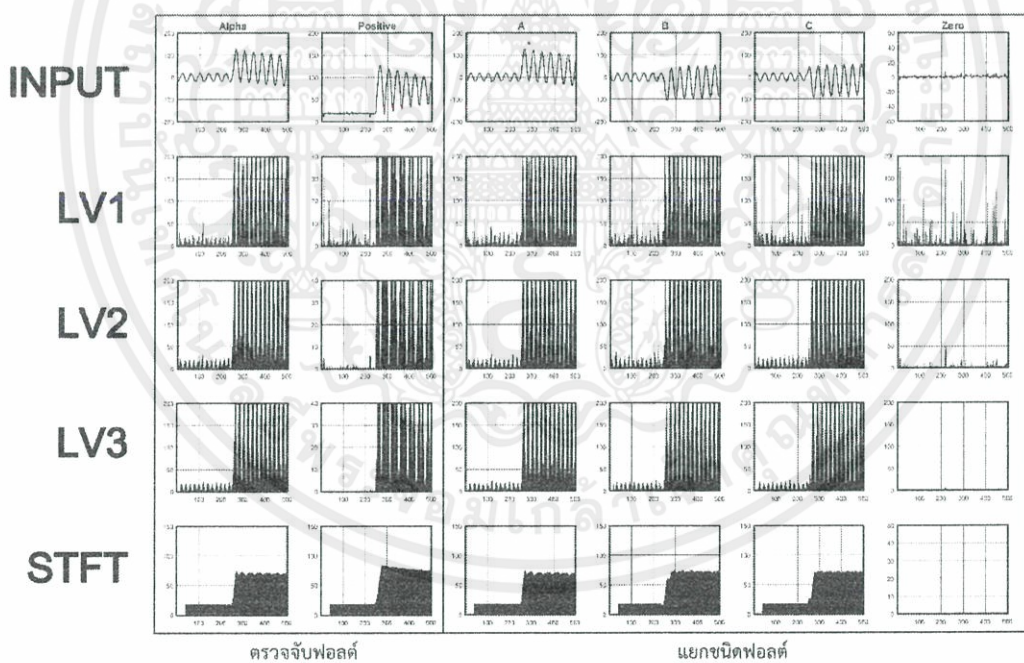
(ง) พอลต์ที่ระยะ 70% ของสายส่ง

รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (ABG fault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

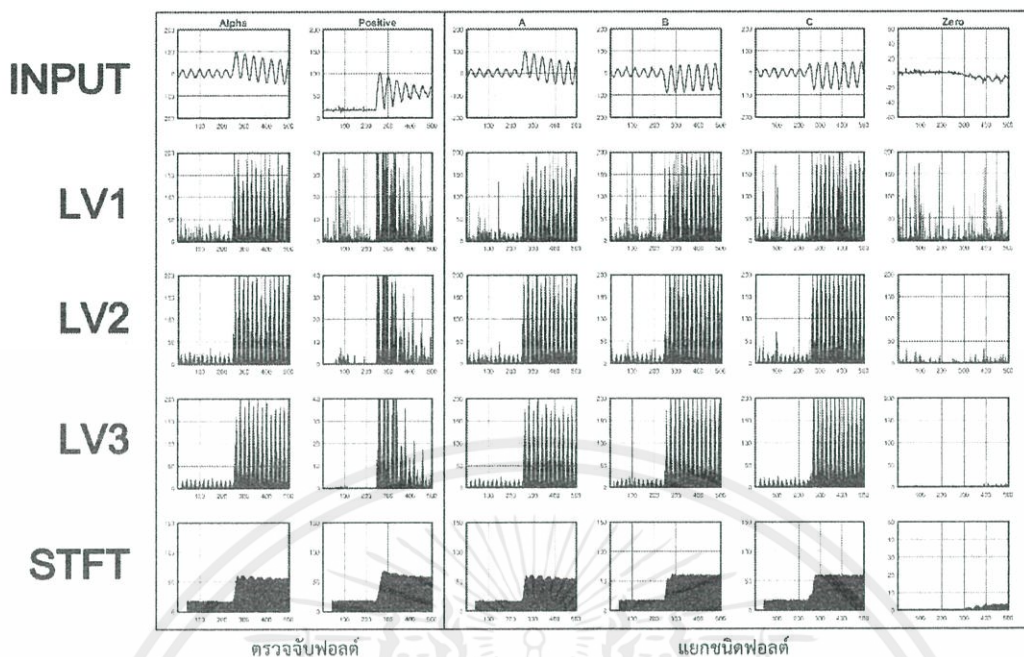


(ก) พอลต์ที่ระยะ 40% ของสายส่ง

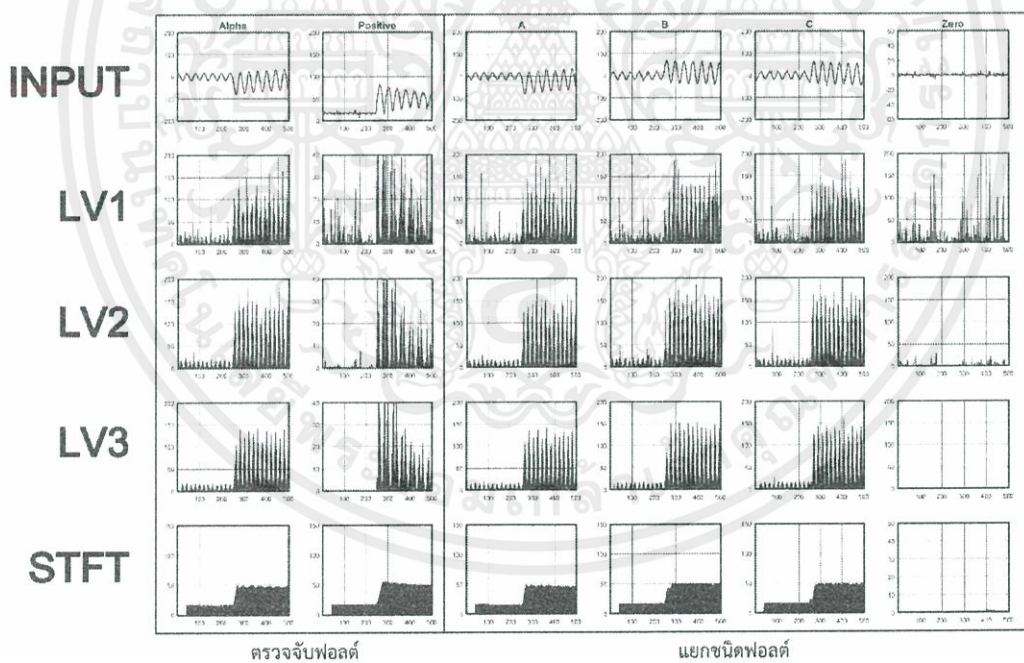


(ข) พอลต์ที่ระยะ 50% ของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) พอลต์ที่ระยะ 60% ของสายส่ง



(ง) พอลต์ที่ระยะ 70% ของสายส่ง

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสตัวจรแบบสามเฟส (ABC fault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2-4.5 แสดงตัวอย่างผลการแปลงสัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) และ แปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น (Short Time Fourier Transform : STFT) ที่ระยะทาง 40-70% ของสายส่ง

โดยในรูปที่ 4.2(ก) กรณีเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่ระยะ 40% ของสายส่ง ในคอลัมน์ที่ 1 วิเคราะห์สัญญาณเฟสอัลฟา (Alpha) โดยในแถวที่ 1 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้า นั้นมีการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณมากกว่า 1.25 เท่า (จาก 20 หน่วย เป็น 100 หน่วย) โดยมีจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนที่ ณ ตำแหน่งข้อมูลที่ 246 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเกิดฟอลต์ ถัดไปแถวที่ 2 แสดงสัญญาณที่ผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องที่ ระดับ 1 (LV1) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณมากกว่า 1.6 เท่า ($1.25^2=1.5625\sim 1.6$) ภายหลังเกิดฟอลต์ แต่ช่วงก่อนเกิดฟอลต์มีสัญญาณรบกวนสูงทำให้ อาจเกิดการตรวจจับผิดพลาดได้สูง ถัดไปแถวที่ 3 แสดงสัญญาณที่ผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องที่ ระดับ 1 (LV2) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณมากกว่า 1.6 เท่า ภายหลังเกิดฟอลต์ แต่ช่วงก่อนเกิดฟอลต์มีสัญญาณรบกวนปานกลางทำให้ อาจเกิดการตรวจจับผิดพลาดได้ ถัดไปแถวที่ 4 แสดงสัญญาณที่ผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องที่ ระดับ 1 (LV3) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณมากกว่า 1.6 เท่า ภายหลังเกิดฟอลต์ โดยสามารถระบุการเกิดฟอลต์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนต่ำ ถัดไป แถวที่ 5 แสดงสัญญาณที่ผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต (Hz) โดยช่วงก่อนเกิดฟอลต์จะมีลักษณะเกือบคงที่ และ มีการเพิ่มขึ้นของขนาดสัญญาณมากกว่า 1.25 เท่าหลังเกิดฟอลต์

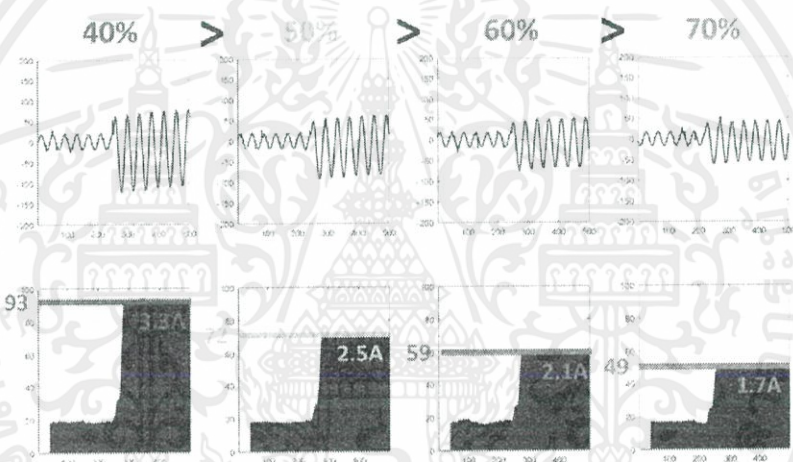
ถัดไปคอลัมน์ที่ 2 วิเคราะห์สัญญาณเฟสบวก (Positive) โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตนั้นให้ผลเช่นเดียวกันกับเฟสอัลฟา คือ ที่ระดับ 1 นั้นมีสัญญาณรบกวนสูง และ ลดลงที่ระดับ ถัดไปจนเป็นที่น่าพอใจในระดับที่ 3 ส่วนการตรวจแยกสถานะฟอลต์นั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าเฟสอัลฟา โดยช่วงก่อนเกิดฟอลต์นั้นสัญญาณจะมีค่าเป็น 0 และมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่บางส่วน และภายหลังเกิดฟอลต์ก็จะพบว่าสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 0 อย่างเห็นได้ชัดทำให้สามารถแยกสถานะการเกิดฟอลต์ได้อย่างชัดเจน ส่วนแถวสุดท้ายจะเป็นสัญญาณที่ผ่านการการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น ที่ความถี่ 0 เฮิร์ต หรือ องค์ประกอบกระแสตรง (DC Component) โดยช่วงก่อนเกิดฟอลต์นั้นจะมีขนาดคงที่ และจะมีขนาดเพิ่มขึ้นภายหลังการเกิดฟอลต์ และค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่อีกครั้ง

ส่วนคอลัมน์ที่ 3-5 วิเคราะห์สัญญาณกระแสเฟส A , B และ C ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเฟสอัลฟา (คอลัมน์ที่ 1) กล่าวคือโดยหาก ณ เฟสใดเกิดฟอลต์ก็จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณที่มากขึ้น ณ เฟสนั้นๆ ดังนั้นจึงใช้หลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกับเฟสอัลฟา

และสุดท้ายคอลัมน์ที่ 6 วิเคราะห์สัญญาณเฟสศูนย์ (Zero) โดยโดยสัญญาณมีลักษณะใกล้เคียงกับเฟสบวก (คอลัมน์ที่ 2) กล่าวคือก่อนเกิดฟอลต์นั้นสัญญาณจะมีค่าคงที่เท่ากับ 0

และหลังเกิดฟอลต์ก็จะเกิดองค์ประกอบของสัญญาณขึ้นมาเกิดเป็นลักษณะสัญญาณกระแสสลับ ดังนั้นจึงใช้หลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับเฟสล็อก

รูปที่ 4.2(ข) , 4.2(ค) และ 4.2(ง) กรณีเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่ระยะ 50% 60% และ 70% ของสายส่งตามลำดับ โดยมีผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับ ที่ระยะ 40% ซึ่งต่างกันเพียงขนาดของกระแสลัดวงจรโดยมีค่าลดลงแปรผกผันกับระยะทาง และจากค่าขนาดที่ลดลงส่งผลให้ความชันลดลงทำให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการตรวจจับ เป็นผลจากที่ระยะ 40% ของสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของสายส่งต่ำที่สุด และยิ่งระยะเพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะยิ่งสูงขึ้น จึงทำให้กระแสลัดวงจรลงเรื่อยๆ ตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของการแสสูงที่สุดนั้นก็ยิ่งขึ้นกับส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ร่วมด้วยแต่ก็มีผลเพียงชั่วคราวเท่านั้น เพื่อให้เห็นแนวโน้มชัดเจนจึงเลือกพิจารณาที่เฉพาะส่วนประกอบกระแสสลับ โดยมีค่าลดลงจาก 3.3A เหลือ 2.5A 2.1A และ 1.7A ตามลำดับ ตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ขนาดสัญญาณกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

หลักการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณแต่ละเฟส

เฟส A , B และ C นั้นใช้สำหรับแยกประเภทฟอลต์ว่ามีฟอลต์เกิดที่เฟสใดบ้าง โดยจากการทดลองหากเฟสใดมีการลัดวงจรเกิดขึ้น ก็จะสังเกตเห็นได้จากกระแสที่มีค่าเพิ่มขึ้นกว่าช่วงปกติ แต่หากเฟสใดไม่มีการลัดวงจรก็จะพบว่าขนาดกระแสไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เฟส Zero นั้นก็เปรียบเสมือนตัวแทนของกราวเฟส โดยจากการทดลองหากไม่มีการลัดวงจรลงดินนั้น จะมีลักษณะเป็นสัญญาณคงที่ (Constant Signal) ที่ ขนาดเป็น 0 ดังแสดงในกรณี Line to Line fault (รูปที่ 4.3) และ กรณี Three phase fault (รูปที่ 4.5) แต่หากมีการลัดวงจรลงดินนั้น ก็จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงโดยมีขนาดเท่ากับผลเฉลี่ยของกระแสส่วนเกิดที่ไม่สมดุล ดังแสดงในกรณี Single line to ground fault (รูปที่ 4.2) , Double Line to Ground fault (รูปที่ 4.4) ข้อสังเกต: ยกเว้นกรณี ABCG fault นั้นจะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส Zero อย่างชัดเจน เนื่องจากในการทดลองเป็นการจำลองระบบในแบบสามเฟสสมดุล ทำให้ไม่มีกระแสไหลลงกราว

เฟส Alpha เดิมถูกใช้เป็นตัวแทนสำหรับการตรวจจับสถานะการเกิดฟอลต์ โดยจากการทดลองพบว่าสำหรับการเกิดฟอลต์ กรณีที่เฟส A มีการลัดวงจรร่วมด้วย จะให้ผลการตอบสนองที่เด่นชัด ดังในกรณีของ AG , AB , AC , ABG , ACG , ABC และ ABCG เป็นต้น แต่กับกรณีอื่นที่ไม่มีเฟส A ร่วมด้วย คือ กรณี BC , BCG ที่ไม่สามารถตรวจจับสถานะฟอลต์ได้เลย และจากด้วยข้อเสียของ เฟส Alpha นี้เองผู้ทดลองจึงนำเสนออีกหนึ่งสัญญาณ คือ สัญญาณ Positive มาใช้แทนและผลเปรียบเทียบในการทดลอง

เฟส Positive ใช้สำหรับตรวจจับและยืนยันสถานะการเกิดฟอลต์ โดย ขณะที่ไม่มี การลัดวงจรนั้น สัญญาณจะมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญญาณ A , B และ C เป็นค่าคงตัวในลักษณะเดียวกับสัญญาณ Zero โดยหากมีฟอลต์เกิดขึ้น สัญญาณก็จะเกิดองค์ประกอบ AC ขึ้นอันเกิดจากการไม่สมดุลกันของสัญญาณ จึงทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับสถานะฟอลต์ได้ทุกกรณี

แต่เนื่องจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธี DWT ที่ LV1 นั้นมีสัญญาณรบกวนสูง ส่งผลให้เกิดการตรวจจับผิดพลาดเป็นจำนวนมาก ทางผู้ทดลองจึงแสดงผลการวิเคราะห์เฉพาะที่ LV2 และ LV3 เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.4 ที่แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับฟอลต์เทียบกับประเภทของฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ วิเคราะห์โดยใช้วิธี DWT ที่ LV2-LV3 การใช้ STFT และการใช้เทคนิค Double Detection และ ในตารางที่ 4.5-4.12 จะแสดงสถานะของการตรวจจับฟอลต์ เทียบกับ ประเภทของฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ วิเคราะห์โดยใช้วิธี DWT ที่ LV2-LV3 การใช้ STFT และการใช้เทคนิค Double Detection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาตรวจจับฟอลต์ เฟสบวก (Positive Phase) หน่วย มิลลิวินาที (ms)

บวก (Positive)																	
ชนิด ฟอลต์	ระยะ ทาง	Single			Double			STFT	ชนิด ฟอลต์	ระยะ ทาง	Single			Double			STFT
		LV1	LV2	LV3	LV1	LV2	LV3				LV1	LV2	LV3	LV1	LV2	LV3	
AG	40%	E	3	2.5	E	3.5	3	4.5	ABG	40%	E	1	1.5	E	1.5	2	3
	50%	E	3	3	E	3.5	3.5	5		50%	E	1.5	2	E	2	2.5	4
	60%	E	3.5	4	E	4	5.5	6.5		60%	E	1.5	2	E	2	2.5	4
	70%	E	3	4.5	E	3.5	5	7.5		70%	E	3	3	E	3.5	3.5	5.5
BG	40%	E	E	1.5	E	2	2	3	BCG	40%	E	E	1	E	1.5	1.5	2.5
	50%	E	2	3.5	E	2.5	4	4.5		50%	E	1.5	2	E	2	2.5	4
	60%	E	2	2	E	2.5	2.5	5		60%	E	1	1.5	2	1.5	2	4
	70%	E	2.5	4.5	E	3	5	6.5		70%	E	E	0.5	E	0.5	1	4
CG	40%	E	E	2.5	E	0.5	3	8	CAG	40%	E	E	2.5	0.5	1	3	3.5
	50%	E	2.5	4.5	2	3	5	10		50%	E	E	4	1.5	3	4.5	5.5
	60%	E	2.5	4.5	E	3	5	11.5		60%	E	E	4.5	E	3.5	5	7.5
	70%	E	E	6	E	8.5	6.5	14.5		70%	E	3	4.5	8	3.5	5	8.5
AB	40%	E	1.5	2	E	2	2.5	3.5	ABC	40%	E	E	1.5	E	E	2	3
	50%	E	1.5	1.5	E	2	2	3.5		50%	E	1.5	1.5	1.5	2	2	3.5
	60%	E	2.5	3	2.5	3	3.5	5		60%	E	1.5	1.5	E	2	2	4
	70%	E	E	3	E	3	3.5	5.5		70%	E	2.5	2.5	E	3	3	5.5
BC	40%	E	1.5	2	E	2	2.5	3.5	ABCG	40%	E	1.5	1.5	2	2	2	3.5
	50%	E	1	1.5	1.5	1.5	2	3.5		50%	E	E	1.5	E	1.5	2	3.5
	60%	E	E	1.5	E	1.5	2	4.5		60%	E	1	1.5	E	1.5	2	4
	70%	0.5	1.5	1.5	1	2	2	4.5		70%	E	E	3	E	3	3.5	6
CA	40%	E	E	E	E	E	E	5.5	รวม	ผิดพลาด							
	50%	E	E	2.5	E	3	3	4			43	17	1	34	3	1	0
	60%	E	E	2	E	3	2.5	4.5	รวม	เวลาเฉลี่ย							
	70%	E	E	2.5	E	E	3	4			0.5	2	2.55	2.25	2.51	3.07	5.16

หมายเหตุ : N = ตรวจไม่พบฟอลต์ , E = ตรวจจับผิดพลาด

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาตรวจจับฟอลต์ เฟสอัลฟา (Alpha Phase) หน่วย มิลลิวินาที (ms)

อัลฟา (Alpha)																	
ชนิด ฟอลต์	ระยะ ทาง	Single			Double			STFT	ชนิด ฟอลต์	ระยะ ทาง	Single			Double			STFT
		LV1	LV2	LV3	LV1	LV2	LV3				LV1	LV2	LV3	LV1	LV2	LV3	
AG	40%	2	2	4	4.5	2.5	4.5	3.5	ABG	40%	E	2	4	2	2.5	4.5	3.5
	50%	E	1.5	4	13	2	4.5	3.5		50%	E	2.5	4.5	4	3	5	4
	60%	E	3	5	13	3.5	5.5	4.5		60%	E	2	4.5	2.5	2.5	5	4.5
	70%	E	2.5	5	N	3	5.5	5		70%	3.5	2.5	5.5	13.5	3	6	5.5
BG	40%	E	2.5	5	2.5	3	5.5	4	BCG	40%	E	E	7	N	5	7.5	5.5
	50%	5.5	3	6	E	3.5	6.5	5.5		50%	1	2.5	9	N	6.5	9.5	7
	60%	E	3	6	N	3.5	6.5	6		60%	E	7	E	N	7.5	E	8
	70%	15	3.5	16	N	4	16.5	7.5		70%	E	E	N	N	N	N	8
CG	40%	E	E	N	N	N	N	N	CAG	40%	E	E	5.5	4	4	6	4.5
	50%	N	N	N	N	N	N	N		50%	4.5	5	7	5	5.5	7.5	6
	60%	E	N	N	N	N	N	N		60%	5.5	6.5	8	16.5	7	8.5	7.5
	70%	E	N	N	N	N	N	N		70%	E	5	8	N	5.5	8.5	8
AB	40%	1.5	1.5	3.5	2	2	4	3.5	ABC	40%	E	3	4.5	4	3.5	5	4
	50%	1.5	1.5	4	2	2	4.5	3		50%	4.5	3.5	5.5	5	4	6	5
	60%	2.5	2.5	5	3	3	5.5	4.5		60%	2.5	3	6	5.5	3.5	6.5	5.5
	70%	E	2.5	5	E	3	5.5	5		70%	5.5	5	7	15.5	5.5	7.5	6.5
BC	40%	E	E	N	E	N	N	N	ABCG	40%	E	E	5	3	E	5.5	4.5
	50%	E	E	N	N	E	N	N		50%	E	E	5	E	4	5.5	4.5
	60%	E	N	N	N	N	N	N		60%	4.5	4	6	5	4.5	6.5	5.5
	70%	N	N	N	N	N	N	N		70%	6.5	5	7.5	16.5	5.5	8	7.5
CA	40%	E	E	7	E	5	7.5	6	รวม	ผิดพลาด							
	50%	E	E	3.5	E	2	4	3			28	16	10	21	10	10	8
	60%	12	1	4	12.5	1.5	4.5	3.5		เวลาเฉลี่ย	4.88 3.16 5.76			6.72 3.75 6.26			5.17
	70%	E	E	3.5	0	1.5	4	3									

หมายเหตุ : N = ตรวจไม่พบฟอลต์ , E = ตรวจจับผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจแยกประเภทฟอลต์ ใช้เทคนิคตรวจจับ 1 ครั้ง (Single Detection)

ชนิด ฟอลต์	ตัว กรอง	40%					50%					60%					70%				
		A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ
AG	LV2	F	F	N	F	FALSE	F	F	F	F	FALSE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
	LV3	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
	STFT	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
BG	LV2	■					F	F	F	F	FALSE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
	LV3	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
	STFT	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
CG	LV2	■					N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	■				
	LV3	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE
	STFT	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE
AB	LV2	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	■				
	LV3	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE
	STFT	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE
BC	LV2	N	F	F	F	FALSE	N	F	F	N	TRUE	■					N	F	F	N	TRUE
	LV3	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE
	STFT	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE
CA	LV2	■					■					■					■				
	LV3	■					F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE
	STFT	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE
ABG	LV2	F	F	F	F	FALSE	F	F	F	F	FALSE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
	LV3	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
	STFT	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
BCG	LV2	■					N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	■				
	LV3	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE
	STFT	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE
CAG	LV2	■					■					■					F	N	F	F	TRUE
	LV3	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE
	STFT	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE
ABC	LV2	■					F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
	LV3	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
	STFT	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
ABCG	LV2	F	F	F	N	FALSE	■					F	F	F	N	FALSE	■				
	LV3	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE
	STFT	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE

หมายเหตุ : F = ตรวจพบฟอลต์ , N = ตรวจไม่พบฟอลต์ , ■ = กระบวนการตรวจจับไม่ถูกเริ่มต้น

TRUE = แยกชนิดถูกต้อง , FALSE = แยกชนิดไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจแยกประเภทฟอลต์ ใช้เทคนิคตรวจจับ 2 ครั้ง (Double Detection)

ชนิดฟอลต์	ตัวกรอง	40%					50%					60%					70%				
		A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ	A	B	C	G	สถานะ
AG	LV2	F	F	N	F	FALSE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
	LV3	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
	STFT	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE	F	N	N	F	TRUE
BG	LV2	N	F	N	F	TRUE	N	F	F	F	FALSE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
	LV3	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
	STFT	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE	N	F	N	F	TRUE
CG	LV2	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE
	LV3	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE
	STFT	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE	N	N	F	F	TRUE
AB	LV2	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE
	LV3	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE
	STFT	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE	F	F	N	N	TRUE
BC	LV2	N	F	F	F	FALSE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE
	LV3	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE
	STFT	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE	N	F	F	N	TRUE
CA	LV2	██████████					F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	██████████				
	LV3	██████████					F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE
	STFT	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE	F	N	F	N	TRUE
ABG	LV2	F	F	N	F	TRUE	F	F	F	F	FALSE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
	LV3	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
	STFT	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE	F	F	N	F	TRUE
BCG	LV2	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE
	LV3	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE
	STFT	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE	N	F	F	F	TRUE
CAG	LV2	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE
	LV3	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE
	STFT	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE	F	N	F	F	TRUE
ABC	LV2	██████████					F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
	LV3	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
	STFT	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE	F	F	F	N	TRUE
ABCG	LV2	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE
	LV3	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE
	STFT	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE	F	F	F	N	FALSE

หมายเหตุ : F = สถานะฟอลต์ , N=สถานะปกติ , ██████████ = กระบวนการตรวจจับไม่ถูกเริ่มต้น

TRUE = แยกชนิดถูกต้อง , FALSE = แยกชนิดไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากตารางที่ 4.1-4.2 สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งในเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟสบวก (Positive) และ เฟสอัลฟา (Alpha) นั้นเฟสบวกใช้ระยะเวลาในการตรวจจับ ที่ต่ำกว่าเฟสอัลฟาโดยเฉลี่ยทุกกรณีทั้ง LV1-LV3 ทั้งแบบ Single Detection และ Double Detection และฟูเรียร์ช่วงสั้น (STFT) และยังมีค่าความถูกต้องต่ำกว่าด้วยเช่นกันยกเว้นในกรณี LV1 แต่เนื่องจากที่ LV1 นั้นมีความถูกต้องเพียงไม่ถึง 50% ดังนั้นจึงขอข้ามไปวิเคราะห์ที่กรณีอื่นแทน โดยที่ LV2 แบบ Single นั้นมีความถูกต้องที่ 61.36% และเมื่อทำการเพิ่มเป็น LV3 ความถูกต้องก็ได้เพิ่มขึ้นเป็น 97.73% หรือเช่นเดียวกันหากใช้เทคนิค Double Detection ก็จะทำให้ที่ LV เดียวกันนั้นสามารถเพิ่มความถูกต้องขึ้นมาได้เช่นเดียวกัน โดยที่ LV2 และ LV3 มีความถูกต้องเพิ่มขึ้นเป็น 93.18% และ 97.73% ตามลำดับซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่การเพิ่ม LV หรือ การใช้เทคนิค Double Detection ก็ทำให้ต้องใช้เวลาในการตรวจจับนานขึ้นด้วยเช่นกัน กลับกันด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธี ฟูเรียร์ระยะสั้น นั้น มีความถูกต้องที่ 100% แต่ก็ใช้เวลามากกว่าการใช้เวฟเล็ตที่ 1.68-2.58 เท่าด้วยกัน

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาและความถูกต้องในการตรวจจับพอลต์ เทียบระหว่าง เฟสบวก และ เฟสอัลฟา (ระยะเวลาหน่วย มิลลิวินาที)

		Single			Double			STFT
		LV1	LV2	LV3	LV1	LV2	LV3	
ระยะเวลา	Positive	0.5	2	2.55	2.25	2.51	3.07	5.16
	Alpha	4.88	3.16	5.76	6.72	3.75	6.26	5.17
%ความถูกต้อง	Positive	2.27	61.36	97.73	22.73	93.18	97.73	100.00
	Alpha	36.36	63.64	77.27	52.27	77.27	77.27	81.82

และเมื่อทำการสรุปทุกตารางตั้งแต่ 4.1-4.4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6-4.7 โดยตารางที่ 4.4 แสดงเวลาในการตรวจจับเป็นแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันกับ ตารางที่ 4.3 กล่าวคือ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตเมื่อทำการเพิ่ม LV ก็จะทำให้ตรวจจับได้ช้าลงเล็กน้อย แต่ก็ยังเร็วกว่าวิธีการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น ที่เวลาเกือบ 2 เท่า โดยเวลาที่นานที่สุดในสำหรับเวฟเล็ตคือที่ LV3 แบบ Double โดยใช้เวลารวมทั้งกระบวนการ ตรวจจับ (ยืนยันสถานะ) พอลต์ และแยกประเภทของพอลต์ไปทั้งสิ้นเฉลี่ย 12.81 มิลลิวินาที แต่สำหรับวิธีการฟูเรียร์ช่วงสั้นใช้เวลาเฉลี่ยรวมกว่า 25.16 ซึ่งใช้เวลามากกว่าเกือบเท่าตัว ส่วนในตารางที่ 4.7 นั้นก็ให้ผลลัพธ์โดยรวมเช่นเดียวกันกับตารางที่ 4.5 โดยหากเพิ่ม LV หรือ ใช้เทคนิค Double Detection ก็จะทำให้มีค่าความถูกต้องเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยมีความถูกต้องสูงที่สุดที่ 97.73% แต่ก็ยังเป็นรองวิธีฟูเรียร์ช่วงสั้นที่มีความถูกต้อง 100%

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาในการตรวจจับ และ แยกชนิดฟอลต์ (ระยะเวลาหน่วย มิลลิวินาที)

	Single		Double		STFT
	Lv2	LV3	LV2	LV3	
ตรวจจับ	2.00	2.55	2.51	3.07	5.16
รวม	8.83	11.85	8.61	12.81	25.16

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นความถูกต้องในการตรวจจับ และ แยกชนิดฟอลต์

	Single		Double		STFT
	Lv2	LV3	LV2	LV3	
ตรวจจับ	61.36	97.73	93.18	97.73	100.00
แยกชนิด	55.56	100.00	92.68	100.00	100.00
รวม	34.09	97.73	86.36	97.73	100.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบบรีเลย์สำหรับตรวจจับและแยกประเภทของฟอลต์ในสายส่งกำลัง โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง จากสมมุติฐานที่ว่าขนาด และความถี่ของสัญญาณกระแสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาวิธีการตรวจจับ และ แยกประเภทฟอลต์ได้อย่างแม่นยำ และมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เนื่องจากผู้ทำการทดลองได้สังเกตเห็นศักยภาพในการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตนั้น มีลักษณะที่เหมาะสมแก่การนำมาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบทรานเซียน แต่กระนั้น การแปลงเวฟเล็ตก็ยังมีข้อผิดพลาดบางประการที่ทำให้การตรวจจับฟอลต์มีประสิทธิภาพไม่เต็มที่เท่าที่ควร ผู้จัดทำจึงได้นำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต โดยนำเสนอประสิทธิภาพด้านความเร็ว และ ความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์ โดยเปรียบกับการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายอยู่แล้วในปัจจุบัน และ นำเสนอเทคนิควิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดในกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับการพัฒนาการป้องกันฟอลต์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

5.1 สรุป

5.1.1 ผลที่เกิดจากการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการวิเคราะห์

การเลือกใช้สัญญาณเฟสบวก (Positive) มาวิเคราะห์แทน เฟสอัลฟา (Alpha) นั้น สัญญาณเฟสบวกสามารถตอบสนองต่อสัญญาณได้ดีกว่าเฟสอัลฟาทำให้สามารถตรวจจับฟอลต์ได้รวดเร็วกว่า และ สามารถตอบสนองต่อฟอลต์ได้ทุกชนิด ต่างจากเฟสอัลฟาที่ไม่สามารถตรวจจับฟอลต์ชนิด CG fault และ BC fault ได้เลย

การเพิ่มระดับ (Level) ของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถช่วยลดอัตรา การตอบสนองต่อสัญญาณทำให้ช่วยลดความผิดพลาดในการตรวจจับ ฟอลต์จากปัญหา Transient Noise หรือ Spike ได้ แต่จะทำให้ใช้คาบในการประมวลสัญญาณนานขึ้น

เทคนิค Double Detection สามารถช่วยลดความผิดพลาดในการตรวจจับฟอลต์ จากปัญหาสัญญาณรบกวนชั่วขณะ (Transient Noise) หรือ สัญญาณกระชาก (Spike) ได้ แต่จะทำให้ตรวจจับได้ช้าลง 1 ข้อมูล (Sample) เป็นอย่างน้อย โดยมีระยะเวลาขึ้นกับอัตราสุ่มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดอัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate) นั้นก็เปรียบเสมือนตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) โดยที่ยิ่งสัญญาณมีอัตราสุ่มที่สูงเท่าใด ก็ย่อมมีโอกาสที่จะมีองค์ประกอบความถี่สูงมากขึ้นเท่านั้น โดยหากลดอัตราสุ่มข้อมูลลงก็จะทำให้องค์ประกอบความถี่สูงลดลงได้ เช่น สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise) และ สัญญาณกระชาก (Spike) ทำให้ความผิดพลาดในการตรวจจับพอลต์ลดต่ำลง แต่ส่งผลให้สูญเสียความละเอียดของข้อมูลเชิงเวลาไปทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณนานขึ้น

5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็ว และ ความถูกต้อง

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคในการใช้เวฟเล็ตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ นั้นพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วมี 2 ปัจจัย คือ ขนาดของสัญญาณ และ ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง โดยขนาดของสัญญาณ โดยยังมีขนาดสัญญาณมาก อัตราการเปลี่ยนจะยิ่งสูง ส่งผลให้จับพอลต์เร็วขึ้น โดยมีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดของสัญญาณอย่างชัดเจน คือ ตำแหน่งที่เกิดพอลต์ โดยแปรผกผันกับ กับขนาดของกระแสโดยตรง ส่วนความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่างนั้น โดยหากใช้หน้าต่างที่กว้างก็จะมีข้อมูลที่มากขึ้นขึ้น ย่อมส่งผลต่อการใช้เวลาในการประมวลมากขึ้น และยังทำให้อัตราการตอบสนองต่อสัญญาณต่ำลง จนทำให้ตรวจจับพอลต์ได้ช้าลง โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่อ 1 รอบสัญญาณ ในการทดลองนี้คือ วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ อัตราการสุ่มข้อมูล ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดพลาดมี 3 ปัจจัยคือ ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ และ สัญญาณรบกวน โดย ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง โดยหากยังใช้จำนวนข้อมูลมาก หรือ หน้าต่างกว้าง จะทำให้อัตราการตอบสนองต่ำลง ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดต่ำลงได้ โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่อ 1 รอบสัญญาณ ในการทดลองนี้คือ วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ อัตราการสุ่มข้อมูล ส่วนกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ โดยกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณนั้นก็ส่งผลต่อค่าความผิดพลาด ตัวอย่างเช่นในการทดลองนี้ในนำเสนอเทคนิค Double detection ซึ่งสามารถช่วยลดความผิดพลาดได้ เป็นต้น และสุดท้ายคือปริมาณสัญญาณรบกวน โดยจากการทดลองพบว่าสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณกระชาก (Spike) ส่งผลให้การตรวจจับมีโอกาสผิดพลาดสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น วิธีการวิเคราะห์ หรือ การลดอัตราการสุ่มข้อมูล เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากชุดทดลองการเกิดฟอลต์บนสายส่งวงจรแบบพาย (π - network) ในห้องปฏิบัติการที่ใช้ทำการทดลองนั้นมีสัญญาณรบกวนเป็นจำนวนมาก โดยมีสัญญาณรบกวน 2 ส่วนคือ ส่วนแรก สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (white noise) ที่เกิดจากการออกแบบวงจรของชุดทดลองเอง และ สัญญาณกระชาก (Spike) ที่เกิดจากแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (magnetic contractor) ที่ใช้ในการลัดวงจร อันเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง จึงควรออกแบบชุดทดสอบใหม่ หรือ แก้เฉพาะปัญหาจากแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (magnetic contractor) โดยหันไปใช้อุปกรณ์ตัดต่อวงจรชนิดอื่นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวเชิงกลอย่างรีเลย์ไม่ใช้หน้าสัมผัสที่เคลื่อนไหว (Solid State Relay : SSR) เป็นต้น
2. เนื่องด้วยชุดทดลองการลัดวงจรที่ใช้ในการทดลองนั้น ไม่สามารถจำลองการเกิดฟอลต์ที่มุมต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำผู้ทดลองจึงไม่ได้ลงรายละเอียดในหัวข้อนี้ แต่ในทางปฏิบัตินั้น มุมการเกิดลัดวงจรส่งผลโดยตรงต่อ รูปร่างลักษณะของฟอลต์ เช่น ขนาดของส่วนประกอบกระแสตรง หรือ ขนาดสูงสุดของฟอลต์ เป็นต้น จึงควร ควรออกแบบหรือหาอุปกรณ์ในการที่จะช่วยให้สามารถควบคุมที่มุมที่เกิดการลัดวงจรได้แม่นยำกว่านี้เพื่อทำการศึกษา และเก็บข้อมูลเพิ่มเติมที่ โดยใส่รายละเอียดในเรื่อง มุมการเกิดการลัดวงจรด้วย
3. เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลาในการทดลองในการทดลองนี้จึงนำเสนอผลการทดลองในส่วนของ ซอฟต์แวร์ (Software) เป็นส่วนใหญ่ โดยไม่ได้เน้นในส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) เท่าที่ควรจึงไม่อาจเห็นผลลัพธ์ที่เป็นรูปธรรมเท่าที่ควร จึงควรจัดหาอุปกรณ์มาทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้ อย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.สุลี บรรจงจิตร, และ ผศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้า, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2556
- [2] สุชาติ ปรีชาธร. 2556. วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง (เล่ม 2) กรุงเทพฯ : วีพรี้นท์ (1991) จำกัด.
- [3] Hadi Saadat, Power System Analysis Second Edition, Singapore : Mc Graw Hill. 2004. pp 36-188.
- [4] พรชัย สอนสังข์, “การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันฟอลต์ในระบบจำหน่ายเพื่อจำแนกชนิดของฟอล (Analysis of Fault Voltage in the Electrical Power Distribution System for Fault Classification),” ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [5] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล. กรุงเทพฯ
- [6] Central Station Engineers, Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Fourth Edition : Fifth Printing. East Pittsburgh, Pennsylvania : estinghouse Electric Comporetion, 1964. Pp.32-63.
- [7] วรวิทย์ พงษ์ชัยศรีกุล ชีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล และ อานันท์วัฒน์ คุณากร, “การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC,” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, 2251, หน้า 25-30.
- [8] จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์ และคณะ, “ชุดการทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า,” ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [9] ทรงพล ปัทมธรรม,และ ทักษพงษ์ วิลย์เครือ,และ ธัชสนัย สถาพรมงคลเลิศ,และ ชีรพงษ์ สงครามยศ, “ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า,” ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [10] พัทธพล สมโชค และ คณะ “ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน”, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Nur Hazwani Hussin, Muhd Hafizi Idris*, Melaty Amirruddin, Mohd Saufi Ahmad, Mohd Alif Ismail, Farrah, “Modeling and Simulation of Inverse Time Overcurrent Relay using Matlab/Simulink”, 2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), 22 October 2016, Shah Alam, Malaysia
- [12] Abhishek Khanna ,“Spline Function based Technique for sensitizing of Ground Overcurrent relays for sub-transmission and distribution lines” the Power Grid Corporation of India Ltd ,(POWERGRID).
- [13] Dinesh Kumar Singh, Asheesh Kumar Singh and Soumya Ranjan Mohanty, “An Adaptive Transmission Line Protection and Modelling of Numerical Distance Relay with Analog Antialiasing Filter”, Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad, Allahabad , (2017)
- [14] HA heng-xu, ZHANG bao-hui, YUAN Wen-guang, “Novel Alorithm of Variable-Windows Fourier Transform Base High-Speed Distance Relay for EHV Transmission Line”, International Conference on Power System Technology – POWERCON 2004, November, 2004.
- [15] Chen Zhao and Lixing Zhou ,“Research on Traveling Wave Fault Location For Cable Based on Wavelet Analysis”, 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Enviromental Monitoring.
- [16] Lai JIANG, Zhen Ji and Q.H. WU, “Fault Location in Power Transmission Lines Using a Second Generation Wavelet Analysis”, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China
- [17] Peyman Jafarian, and Majid Sanaye-Pasand, “A Traveling-Wave-Based Protection Technique Using Wavelet/PCA Analysis”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 2, APRIL 2010.
- [18] Dr.Eric M. Schwartz, **Introduction to the Discrete Wavelet Transform (DWT)**, MIL-University of Florida (2004,February 15).
- [19] Graps, Amara, Summer 1995, “An Introduction to Wavelets,” IEEE Computational Sciences and Engineering, 2, n.2, pp 50-61.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] Strang, G., 1993, "Wavelet Transforms vs. Fourier Transforms," Bulletin (New Series) of AMS, 28(2), pp. 288-305.
- [21] Mallat, S.G., 1989, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Trans. PAMI, 11, 674-693.
- [22] Williams, John R., Amaratunga, Kevin, 1994, "Introduction to Wavelets in Engineering," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 37, 2365-2388.
- [23] Daubechies, I., 1992, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, Philadelphia, PA.
- [24] Daubechies, I., 1988, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," Commun. Pure Appl. Math., 41, 909-996.
- [25] Vetterli, M. and Kovacevic, J., 1995, Wavelets and Subband Coding, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [26] P. Makming, S. Bunjongjit, A.Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando, "FAULT DIAGNOSIS IN TRANSMISSION LINE USING WAVELET TRANSFORM ANALYSIS" King Mongkut's Institute of Technology Lakrabang & Tokai University.
- [27] A. H. Osman and O. P. Malik, "Protection of Parallel Transmission Line Using Wavelet Transform" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004.
- [28] N. Perera, A. D. Rajapakse, "Isolation of Fault in Distribution Networks With Distributed Generators", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 4, OCTOBER 2008.
- [29] Saurabh Kulkarni, Alica J.Allen, Shivaz Chopra, Surya Santoso, Thomas A.Short, "Waveform Characteristics of Underground Cable Failures"
- [30] Yougfu Li, Jin Fu, Qian Wang, "Study on T type Transmission Line Fault Location Base on Voltage Traveling Wave", State Grid Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute Chongqing, China.
- [31] Flavio B. Costa, "Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of the Wavelet Coefficient Energy", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 29, NO. 1, FEBRUARY 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Hassan Fathabadi, "Two novel proposed discrete wavelet transform and filter based approaches for short-circuit faults detection in power transmission lines," *Applied Soft Computing* **36**, 2015, pp. 375-382
- [33] A Borghetti, M. Bosetti, C. A. Nucci, M Paolone, and A. Abur, Fellow, "Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Network: Theory and Experimental Validation" ' *IEEE TRANSECTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 25 NO. 4, OCTOBER 2010, Page(s): 3139-3146
- [34] S.Jazebi, B.Vahidi, M.Jannati. (2011). A novel application of wavelet based SVM to transient phenomena identification of power transformer. *Energy Conversion and Management*. (52): 1354-1363.
- [35] เข้าวัดน์ อภิสิตธี. (2011). การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน. *วิทยานพนธ์ วศ.ม. (ไฟฟ้า)*. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [36] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล¹, ศุภี บรรจงจิตร¹, การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับแบ่งประเภทฟอลต์ในสายส่งแรงเดียว , *วิศวกรรมลาดกระบัง* ปีที่ : 20 ฉบับที่ : 2 เลขหน้า : 35-40 ปีพ.ศ. : 2546
- [37] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล¹, ศุภี บรรจงจิตร¹, สมชาติ จิรวិภากร¹, สุวัฒน์ นงนุช¹, การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับแบ่งประเภทฟอลต์ในสายส่ง , *วิศวกรรมลาดกระบัง* ปีที่ : 20 ฉบับที่ : 1 เลขหน้า : 49-54 ปีพ.ศ. : 2546
- [38] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล¹, ศุภี บรรจงจิตร¹, สมชาติ จิรวิภากร¹, อัครัช บรรจงศิลป์¹, การระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม , *วิศวกรรมลาดกระบัง* ปีที่ : 20 ฉบับที่ : 1 เลขหน้า : 55-60 ปีพ.ศ. : 2546
- [39] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล¹, ศุภี บรรจงจิตร¹, บุญเลิศ สือเฉย², การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมสองชนิดสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์บนสายส่ง, *วิศวกรรมลาดกระบัง* ปีที่ : 20 ฉบับที่ : 4 เลขหน้า : 77-82 ปีพ.ศ. : 2546



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบรีเลย์กระแสเกินโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และการแปลงเวฟเลตสำหรับสายส่ง

Design of Over Current Relay Using Microcontrollers and Wavelet Transform for Transmission Line

เกริก ชลศิริ

รศ.ดร.อรุณพล เง่าพิทักษ์กุล

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 0898584567 E-Mail kroek@windowslive.com

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและสาธิตการออกแบบรีเลย์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลเพื่อตรวจจับ และแยกประเภทของฟอลต์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการทางเวฟเลต และจำลองผลด้วยชุดทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ แทนที่การใช้จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจำลองเงื่อนไข 2 รูปแบบคือ ประเภทของฟอลต์ และ ระยะทางที่เกิดฟอลต์ โดยได้ศึกษาพัฒนา และปรับปรุงวิธีการทางเวฟเลตให้เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการตรวจจับการเกิดฟอลต์และแยกประเภทของฟอลต์ ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยนำเสนอแนวโน้มของผลลัพธ์ที่ตอบสนองต่อชนิดของฟอลต์ ระยะทางที่เกิดฟอลต์ และ อัตรา การสุ่มข้อมูลของสัญญาณ พร้อมเปรียบเทียบ ความเร็ว และ ความถูกต้องของวิธีการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) กับวิธีการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ระยะสั้น (Short time Fourier transform : STFT) ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายอยู่แล้วในปัจจุบัน และ นำเสนอเทคนิควิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดความผิดพลาดในกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อเป็น องค์ความรู้ สำหรับการ พัฒนาการ ป้องกัน ฟอลต์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

Abstract

This project study and demonstrate about the design of a relay using microcontroller for processing to detect and classification faults in transmission lines by using wavelet. Method. And simulation result in distribution system experiment in the laboratory. Instead of using simulators with computer software. The two types of simulation are the fault type and fault position. We have studied, developed and improved the wavelet method suitable for use in detection and classifications of faults. To be more accurate and effective. By presenting the trend of results that respond to the fault type, fault position and sampling rate. And Comparing the speed and accuracy of the discrete wavelet

techniques in optimization methods. And reduce errors in the analysis process. It is the knowledge for the development of defect protection to be more effective in the future.

1. บทนำ

ในปัจจุบันสำหรับประเทศในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา อย่างเช่นประเทศไทยนั้น การเพิ่มของ GDP มักจะมาพร้อมกับการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และสิ่งที่สำคัญไม่แพ้ปริมาณการใช้ไฟฟ้า คือ ความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ที่จะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ทั้งต่อผู้บริโภค และ นักลงทุน ที่เป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งหนึ่งในอุปสรรคที่มีความสำคัญมากที่สุดในระบบไฟฟ้าก็คือ สายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีกพบปัญหาสำคัญได้บ่อยครั้ง คือ ความผิดปกติ (ฟอลต์: fault) ในระบบไฟฟ้า โดยฟอลต์นั้นอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวน หรือ มีสิ่งอื่นใด เช่น ต้นไม้ นก หรือ วัตถุอื่นใด มาเกิดขวาง หรือ ลาดผ่านสายส่งกำลังจนทำให้เกิดการลัดวงจรกันระหว่างสายส่งเฟสอื่น หรือ ตัวนำอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดวงจรออกสู่ภายนอก จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกินขนาดที่รับไหว ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อสายส่งกำลัง และบริภัณฑ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่ออยู่โดยรอบ ดังนั้นการตรวจจับฟอลต์เพื่อตัดคอนปัญหาได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ เพื่อลดผลกระทบและความเสียหายที่อาจจะจ่ายเป็นวงกว้าง และสามารถกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นั่นถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลัง และยังสามารถทำให้วางแผนในการซ่อมบำรุง และแก้ไขระบบไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว และยืดอายุการใช้งานของสายส่งและบริภัณฑ์ไฟฟ้าได้ยาวนานยิ่งขึ้น

อุปสรรคป้องกันสายส่งกำลังที่สำคัญและนิยมใช้กันคือการใช้รีเลย์ป้องกัน ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดในระบบไฟฟ้า รวมถึงสายส่งกำลังได้ โดยความรวดเร็ว และ แม่นยำในการตรวจจับฟอลต์นั้น จะแสดงถึงคุณภาพของรีเลย์นั้น ๆ ซึ่งหากยังมีฟอลต์อยู่ในระบบนานเท่าไรความสูญเสียก็จะยิ่งมากขึ้นตามไปเท่านั้น จึงทำให้การพัฒนา และ การค้นหากระบวนการใหม่ ๆ สำหรับมาใช้วิเคราะห์

สัญญาณเพื่อการตรวจจับฟอลต์อย่างมีประสิทธิภาพ และรวดเร็ว นั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้า

หลักการป้องกันสายส่งถูกแบ่งย่อยออกเป็นหลายรูปแบบตามแต่วัตถุประสงค์การใช้งาน และบริษัทที่เลือกป้องกัน เช่น หลักการของรีเลย์กระแสไฟฟ้าเกิน รีเลย์กระแสไฟฟ้าเกินร่วลงดิน รีเลย์แรงดันไฟฟ้าขาด รีเลย์แรงดันไฟฟ้าเกิน และ รีเลย์ระยะทาง เป็นต้น [1] และในงานวิจัยนี้ได้เลือกนำเสนอการป้องกันฟอลต์ในระบบสายส่งกำลัง ซึ่งจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการจำลองสัญญาณผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ATP/EMTP หรือ PSCAD เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้ออกการจำลองผ่านคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กล้วนไม่สามารถจำลองตัวแปรได้หลากหลายพอ จนทำให้ข้อมูลสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากคลาดเคลื่อนไปเมื่อนำไปใช้ในระบบจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกจำลองการเกิดฟอลต์จากชุดจำลองสายส่งกำลังในห้องปฏิบัติการ [2] ซึ่งถูกออกแบบให้รองรับกระแสฟอลต์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

และจากการศึกษางานบทความวิชาการ และบทความของทีมนักวิจัยอื่น สามารถจำแนกหลักการในการป้องกันสายส่งกำลังได้ 3 หลักการคือ งานวิจัยที่ใช้หลักการของ รีเลย์กระแสเกิน (Over Current Relay), รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) และ คลื่นเดินทาง (Travelling Wave) และในเหตุผลที่กล่าวมาในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การออกแบบรีเลย์โดยใช้หลักการของรีเลย์กระแสเกินเนื่องจากมีความง่ายต่อการเก็บข้อมูลโดยวัดเพียงแค่ค่ากระแสไฟฟ้าเท่านั้น แต่ก็สามารถตรวจจับการเกิดฟอลต์ และแยกประเภทของฟอลต์ได้ ส่วนวิธีการที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณนั้นนิยมใช้อยู่ 3 วิธีคือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Root Mean Square : RMS) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน และยังเป็นวิธีที่ถูกใช้ในเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย และยังสามารถวิเคราะห์บนโดเมนเวลา แต่ก็สามารถประยุกต์ไปวิเคราะห์บนโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นได้ ซึ่งต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ (Fourier Analysis) มาร่วมด้วย โดยฟูรีเยร์เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณโดยแปลงจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่เพื่อทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมามความถี่ต่าง ๆ ทำให้วิเคราะห์สัญญาณได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณได้ง่ายยิ่งขึ้นโดยจำแนกสัญญาณรูปแบบใด ๆ ออกเป็นสัญญาณไชนันบนความถี่ต่าง ๆ แทน โดยจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกใช้วิธีการนี้ เนื่องจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นผลลัพธ์ในช่วงสภาวะคงที่ของสัญญาณนั้น จะวิเคราะห์ในรูปแบบของโดเมนความถี่ทั้งหมดทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วยฟูรีเยร์ แต่เนื่องด้วยต้องใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 คาบสัญญาณทำให้ต้องใช้พลังในการประมวลสูงโดยเฉพาะหากมีการเพิ่มอัตราการสุ่มข้อมูล ก็จะส่งผลให้มีข้อมูลใน 1 คาบสัญญาณมากขึ้น ทำให้ใช้พลังในการประมวลสูงขึ้นตามไปด้วย และ เป็นการยากหากต้องการเลือกวิเคราะห์ความถี่ใด ๆ เพียงหนึ่งเดียว เนื่องจากสัญญาณฟอลต์เป็นสัญญาณแบบเปลี่ยนแปลงแบบไม่

คงที่ (Non - stationary signal) และมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่ละลักษณะการเกิดฟอลต์ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ความถี่ 2 ย่านเป็นอย่างน้อย ทำให้มีผู้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์เวฟเล็ต (Wavelet Analysis) [3] ขึ้นมาซึ่งถือเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่วิเคราะห์บนโดเมนเวลาและยังสามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกมาในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับฟูรีเยร์ แต่สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้ดีกว่า ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นขณะเกิดฟอลต์ โดยเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด และเฟสของสัญญาณอย่างฉับพลันทำให้เกิดการหักมุมของสัญญาณซึ่งเป็นลักษณะขององค์ประกอบความถี่สูง ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับฟอลต์ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้สนใจเลือกทำการออกแบบรีเลย์ป้องกันสายส่ง โดยใช้หลักการของรีเลย์กระแสเกิน และวิเคราะห์สัญญาณด้วยเวฟเล็ต และเก็บผลการทดลองด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากวิธีการแปลงเวฟเล็ต กับ วิธีการใช้ฟูรีเยร์ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และทำการปรับปรุงกระบวนการให้มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ และมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทดสอบการตรวจจับ ฟอลต์ โดยนำอันกอลิ ทิม ที่ ได้ออกแบบ ไปรัน ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ในทางปฏิบัติ ว่ามีแนวโน้ม และ ข้อจำกัด ดังจากวิทยุชิ้นไร่นี้

2. การออกแบบการทดลอง

2.1 การจำลองฟอลต์ [2]

จำลองฟอลต์ทั้ง 44 กรณีโดยใช้ชุดทดลองสายส่งจำลองในห้องปฏิบัติการ

2.2 ฮาร์ดแวร์

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเลือกใช้ Arduino DUE
- หม้อแปลงกระแส 3 เฟส โดยเลือกใช้ขนาด 50A/333mV ในคลาส 0.2



รูปที่ 2.1 (ซ้าย) Arduino DUE (ขวา) หม้อแปลงกระแส 3 เฟส

- วงจรยกระดับสัญญาณแรงดันจาก AC จาก -333mV ถึง +333mV ไปอยู่บนช่วง 0-3V เพื่อที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถอ่านค่าได้

2.3 ซอฟต์แวร์

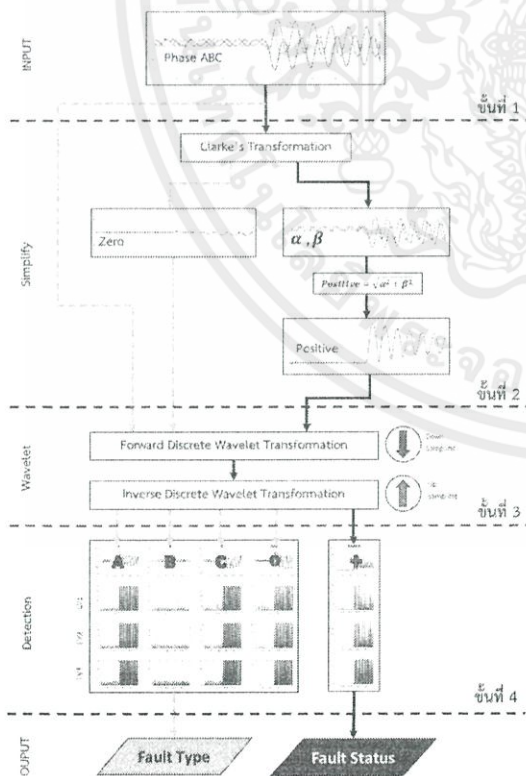
ขั้นที่ 1 อ่านค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาเข้า 3 เฟส ABC ที่แปลงค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 240V เฟส ABC มาเป็นสัญญาณ

แรงดัน 0-333mV ผ่านหม้อแปลงกระแส แล้วจึงแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต (0-4096)

ขั้นที่ 2 ลดรูปสัญญาณ (Simplify) ในกระบวนการลดรูปสัญญาณนั้น จะแบ่งการทำงานเป็น 2 โหมดคือ โหมดตรวจจับฟอลต์ และ โหมดแยกประเภทฟอลต์ โดยขณะเริ่มการทำงานจะอยู่ในโหมดตรวจจับฟอลต์ และ หากตรวจพบว่า มีฟอลต์เกิดขึ้นก็จะทำการสลับการทำงานไปโหมดแยกประเภทฟอลต์ทันที เพื่อทำการแยกประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยในโหมดตรวจจับฟอลต์ นั้นจะทำการลดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ABC ให้เหลือเพียง 1 เฟส คือ เฟสบวก (Positive: +) ผ่านการใช้สมการแปลงกรีก เพื่อลดระยะเวลาและ ง่ายต่อการวิเคราะห์ แทนที่การประมวลผลจากหลายสัญญาณ ให้เหลือเพียงสัญญาณเดียว ส่วนโหมดแยกประเภทฟอลต์ จะทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมด 4 เฟส คือ เฟส ABC และ เฟสศูนย์ (Zero) ที่ผ่านการลดรูปด้วยสมการแปลงกรีก

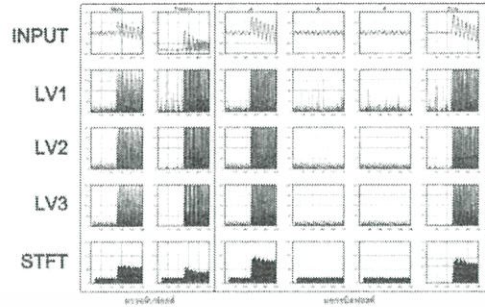
ขั้นที่ 3 วิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณ โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet transform : DWT) โดยเลือกวิเคราะห์ที่ ระดับ (Level) 1-3

ขั้นที่ 4 เป็นกระบวนการต่อเนื่องมาจากขั้นที่ 2-3 โดยหากอยู่ในโหมดตรวจจับฟอลต์ จะทำการวิเคราะห์สัญญาณเฟสบวก เพียงสัญญาณเดียวเพื่อระบุว่าสัญญาณอยู่ในสถานะปกติ (Normal) หรือ สถานะเกิดฟอลต์ (Fault) และ หากอยู่ใน โหมดแยกประเภทฟอลต์นั้นก็จะมีการวนการเช่นเดิมหากแต่เปลี่ยนเป็นวิเคราะห์ที่สัญญาณเฟส A B C และ ศูนย์ แทนเพื่อระบุว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสใด



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงาน

3. ผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลการทดลองการเกิดฟอลต์ชนิดหนึ่งเฟสลงดิน (AG)

โดยจากผลการทดลองตัวอย่างในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าที่เฟสบวก (Positive) นั้นภายหลังจากเกิดฟอลต์จะเกิดการเพิ่มขึ้นของขนาดอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการเกิดฟอลต์ได้ โดยที่ การวิเคราะห์เวฟเล็ตที่ LV1 นั้นจะมีสัญญาณรบกวนสูงจึงไม่สามารถใช้ในการตรวจจับฟอลต์ได้โดยส่วนที่ LV2 นั้นมีสัญญาณรบกวนที่ลดลง แต่ก็ยังสามารถตรวจจับได้ถูกต้องเพียง 61.36% และแยกประเภทได้ถูกต้องเพียง 55.56% และรวมทั้งกระบวนการเพียงแค 34.09% แต่เมื่อทำการเพิ่มเป็น LV3 ก็จะตรวจจับได้ถูกต้องเพิ่มเป็น 97.73% และแยกประเภทได้ถูกต้อง 100% หรือคิดเป็นถูกต้องทั้งทั้งกระบวนการ 97.73% แต่ต้องแลกมาด้วยการตอบสนองที่ช้าลง และเช่นเดียวกันกับการใช้เทคนิค Double Detection ที่ทำให้ความถูกต้องโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็น 86.36% แต่ก็ทำให้ตอบสนองได้ช้าลงเช่นกัน แต่ถึงอย่างไรก็ยิ่งเร็วกว่าวิธีการตรวจจับด้วยฟูเรียร์กว่าเท่าตัวเลยทีเดียวที่โดยเฉลี่ยช้าที่สุด 12.8 ms สำหรับ DWT และ 25.2 ms สำหรับ STFT

ตารางที่ 3.1 แสดงระยะเวลาการตอบสนองในการตรวจจับ และ แยกประเภทฟอลต์ของแต่ละวิธีการ

	Single		Double		STFT
	Lv2	LV3	LV2	LV3	
ตรวจจับ	2.00	2.55	2.51	3.07	5.16
รวม	8.83	11.85	8.61	12.81	25.16

ตารางที่ 3.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับ และ แยกประเภทฟอลต์ของแต่ละวิธีการ

	Single		Double		STFT
	Lv2	LV3	LV2	LV3	
ตรวจจับ	61.36	97.73	93.18	97.73	100.00
แยกชนิด	55.56	100.00	92.68	100.00	100.00
รวม	34.09	97.73	86.36	97.73	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุป

4.1 ผลที่เกิดจากการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการวิเคราะห์

การเลือกใช้สัญญาณเฟสบวก (Positive) มาวิเคราะห์แทนเฟสอัลฟา (Alpha) นั้นสัญญาณเฟสบวกสามารถตอบสนองต่อสัญญาณได้ดีกว่าเฟสอัลฟาทำให้สามารถตรวจจับฟอลต์ได้รวดเร็วกว่า และสามารถตอบสนองต่อฟอลต์ได้ทุกชนิด ต่างจากเฟสอัลฟาที่ไม่สามารถตรวจจับฟอลต์ชนิด CG fault และ BC fault ได้เลย

การเพิ่มระดับ (Level) ของการแปลงเวฟเล็คแบบไม่ต่อเนื่องสามารถช่วยลดอัตราการตอบสนองต่อสัญญาณทำให้ช่วยลดความผิดพลาดในการตรวจจับ ฟอลต์จากปัญหา Transient Noise หรือ Spike ได้ แต่จะทำให้ใช้คาบในการประมวลสัญญาณนานขึ้น

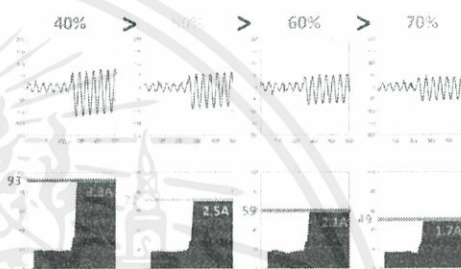
เทคนิค Double Detection สามารถช่วยลดความผิดพลาดในการตรวจจับฟอลต์จากปัญหาสัญญาณรบกวนชั่วขณะ (Transient Noise) หรือ สัญญาณกระชาก (Spike) ได้ แต่จะทำให้ตรวจจับได้ช้าลง 1 ข้อมูล (Sample) เป็นอย่างน้อย โดยมีระยะเวลาขึ้นกับอัตราสุ่มข้อมูล

การลดอัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate) นั้นก็เปรียบเสมือนตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) โดยที่ยังสัญญาณมีอัตราสุ่มที่สูงเท่าใดก็ย่อมมีโอกาสที่จะมีองค์ประกอบความถี่สูงมากขึ้นเท่านั้น โดยหากลดอัตราสุ่มข้อมูลลงก็จะทำให้องค์ประกอบความถี่สูงลดลงได้ เช่น สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise) และ สัญญาณกระชาก (Spike) ทำให้ความผิดพลาดในการตรวจจับฟอลต์ลดลง แต่ส่งผลให้สูญเสียความละเอียดของข้อมูลเชิงเวลาไปทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการตรวจวิเคราะห์สัญญาณมากขึ้น

4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็ว และ ความถูกต้อง

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคในการใช้เวฟเล็คเพื่อวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์นั้นพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วมี 2 ปัจจัย คือ ขนาดของสัญญาณดังเช่นรูปที่ 4.1 โดยหากยิ่งระยะเกิดฟอลต์ใกล้แหล่งกำเนิดเพียงใด ขนาดกระแสก็มากขึ้นเท่านั้น ทำให้ตรวจจับฟอลต์ได้เร็วขึ้นด้วย และ ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง โดยขนาดของสัญญาณ โดยยังมีขนาดสัญญาณมาก อัตราการเปลี่ยนจะยิ่งสูง ส่งผลให้จับฟอลต์เร็วขึ้น โดยมีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดของสัญญาณอย่างชัดเจนคือ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ โดยแปรผกผันกับ กับขนาดของกระแสโดยตรง ส่วนความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่างนั้น โดยหากใช้หน้าต่างที่กว้างก็จะมีข้อมูลที่มากขึ้นขึ้น ย่อมส่งผลต่อการใช้เวลาในการประมวลมากขึ้น และยังทำให้อัตราการตอบสนองต่อสัญญาณต่ำลง จนทำให้ตรวจจับฟอลต์ได้ช้าลง โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 1 รอบสัญญาณ ในการทดลองนี้คือ วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ อัตราการสุ่มข้อมูล ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดพลาดมี 3 ปัจจัยคือ ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ และ สัญญาณรบกวน โดย ความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่าง โดยหากยิ่งใช้

จำนวนข้อมูลมาก หรือ หน้าต่างกว้าง จะทำให้อัตราการตอบสนองต่ำลง ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดต่ำลงได้ โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 1 รอบสัญญาณ ในการทดลองนี้คือ วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ อัตราการสุ่มข้อมูล ส่วนกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ โดยกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณนั้นก็ส่งผลต่อค่าความผิดพลาด ตัวอย่างเช่นในการทดลองนี้ในนำเสนอเทคนิค Double detection ซึ่งสามารถช่วยลดความผิดพลาดได้ เป็นต้น และสุดท้ายคือ ปริมาณสัญญาณรบกวน โดยจากการทดลองพบว่าสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณกระชาก (Spike) ส่งผลให้การตรวจจับมีโอกาสผิดพลาดสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น วิธีการวิเคราะห์ หรือ การลดอัตราการสุ่มข้อมูล เป็นต้น



รูปที่ 4.1 ขนาดสัญญาณกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.ศุภี บรรจงจิตร, และ ผศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้า, กรุงเทพฯ: ซีอีดูเคชั่น จำกัด, 2556
- [2] พีทพล สมโชค และ คณะ "ชุดทดลองการลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเหนือดินและสายเคเบิลใต้ดิน", ปริญาณินท์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [3] Dr.Eric M. Schwartz, Introduction to the Discrete Wavelet Transform (DWT), MIL-University of Florida (2004,February 15).

ประวัติผู้เขียน



นาย เกริก ชลศิริ เกิดวันที่ 26 ตุลาคม 2538

ที่อยู่ 23/53 ซ. อุดมสุข 43 แขวงบางจาก เขตพระโขนง

กรุงเทพ 10260

โทรศัพท์ 089-858-4567 Email : kroek@windowlive.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้