

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

โดย

ภวิษฐ์ มัชฌิมานันท์
ภัทรพล จันทร์อินทร์
ภาณุ ศรีสุขใส

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต
Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

โดย

ภวินท์ มัชฌมานันท์
ภัทรพล จันทรอินทร์
ภาณุ ศรีสุขใส

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

PAWIN MATTAYAMANAN
PATARAPON JANIN
PANU SRISUKSAI

THIS PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

ปีการศึกษา 2556

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต
Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

โดย

ภวินท์ มัชฌมานันท์
ภัทรพล จันทร์อินทร์
ภาณุ ศรีสุขใส

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ชายชาญ โปธิสาร
ผศ.ดร.อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

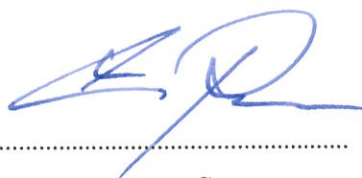
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

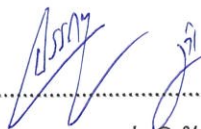
เรื่อง การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

ผู้จัดทำ

1. นาย ภวินท์ มัชฌิมาพันธ์
2. นาย ภัทรพล จันท์อินทร์
3. นาย ภาณุ ศรีสุขใส



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ชายชาญ โพธิสาร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.อรรถพล เจ้างัทท์กุล)

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

นาย ภวินท์ มัชฌิมาพันธ์
นาย ภัทรพล จันทรอินทร์
นาย ภาณุ ศรีสุขใส
ผศ. ชายชาญ โฟธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.อรรถพล เงามพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งและชนิดของฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ เชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งเมื่อเกิดฟอลต์ที่สายส่งระบบป้องกันควรจัดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วเพื่อความน่าเชื่อถือของระบบ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้จำลองระบบดังกล่าวด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้ามาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet) ซึ่งเป็นกระบวนการประมวลสัญญาณ (Signal Processing) โดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาจากสัญญาณฟอลต์ 5 สเกล จากนั้นใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงลำดับบวทที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตสเกลที่ 1 มาพิจารณาตรวจจับการเกิดฟอลต์และตำแหน่งเกิดฟอลต์ด้วยวิธีค่ายอดคลื่นแรก ค่ายอดคลื่นสูงสุด และค่ายอดคลื่นที่สอง อีกทั้งใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การเปลี่ยนแปลงของแต่ละเฟสและลำดับศูนย์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตสเกลที่ 1 มาใช้ในการระบุชนิดฟอลต์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีค่ายอดคลื่นที่สองมีความคลาดคลื่อน้อยที่สุด และการระบุชนิดฟอลต์มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องประมาณร้อยละ 90 ซึ่งวิธีดังกล่าวมีผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ และเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบป้องกันที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม

Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

Mr. Pawin Mattayamanan

Mr. Patarapon Janin

Mr. Panu Srisuksai

Asst.Prof.Chaichan Pothisarn Supervisor

Asst.Prof.Dr.Atthapol Ngaopitakkul Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

This thesis presents a fault location method and the fault type method in 22 kV distribution systems applied with the distributed generator (DG) connected. Provided that there is the fault in system, the protection system must be rapidly eliminate for *system reliability*. *This thesis* simulates those systems in PSCAD/EMTDC and takes the result in fault current to diagnose with wavelet transformation in MATLAB by using Daubeachies 4 (db4) as mother wavelet to separate the high frequency signal part out of 5 scale then take the 1st coefficient to identify and classify with the maximum peak , the 1st peak and the 2nd peak of travelling wave method and take the zero sequence coefficient to identify the fault type. From experimental result we could conclusion that the second peak method is the most accurate and the fault identification is about 90% that gives satisfactory result and would be useful in the development of the renewable energy connected in distribution system for power system protection.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ชายชาญ โพธิสาร และ ผศ.ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นที่อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ท่านได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นขณะดำเนินงาน และตรวจทานแก้ไขจนสำเร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำปริญญาโทจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปริญญาโทเล่มนี้มีสิ่งขาดตกบกพร่องประการใดทางคณะผู้จัดทำขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	5
1.6 แผนการดำเนินงาน	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 เทคโนโลยีกักเก็บผลิตไฟฟ้าปัจจุบัน	8
2.1.1 อากาศพลศาสตร์	11
2.1.1.1 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกักเก็บผลิตไฟฟ้า	11
2.1.1.2 บล็อกอากาศพลศาสตร์	13
2.1.1.3 การคำนวณอัตราส่วนความเร็วลมเหนือใบพัด	13
2.1.1.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์	13
2.1.1.5 การคำนวณทอร์กของความเร็วลม	14
2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	15
2.2 ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า	16
2.2.1 สาเหตุของการเกิดฟอลต์	16
2.2.2 การลัดวงจร	16
2.2.3 องค์กรประกอบสมมาตร	18
2.3 เทคนิคคลื่นเดินทาง (Travelling Wave)	19
2.3.1 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง	19
2.3.2 หลักการทำงานของคลื่นเดินทาง	23
2.3.2.1 วิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว	23
2.3.2.2 วิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งทั้งสองด้าน	24
2.3.3 ผลกระทบจากพลังงานทดแทนต่อกระแสฟอลต์	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 การเชื่อมโยงระบบและอุปกรณ์ป้องกันในระบบผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP)	27
2.5 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)	31
2.5.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	34
2.5.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย	36
2.5.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด(MRA)	36
2.5.2.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)	38
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลอง	40
3.1 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	40
3.2 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม	42
3.3 การจำลองฟอลต์ในระบบไฟฟ้า	45
3.3.1 เมื่อมีพลังงานทดแทนติดตั้งใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร	49
3.3.2 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง	54
3.3.3 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร	59
3.4 ผลจากการติดตั้งพลังงานทดแทนเข้าในระบบและเกิดฟอลต์ที่สายส่ง	64
บทที่ 4 การวินิจฉัยฟอลต์	65
4.1. การแปลงคลาร์ก (Clarke's Transformation)	67
4.2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย	69
4.3. การตรวจจับฟอลต์ (Fault Detection)	70
4.4. การระบุตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location)	72
4.4.1 จำนวนจากค่ายอดคลื่นแรก (First Peak)	74
4.4.2 จำนวนจากค่ายอดคลื่นสูงสุด (Maximum Peak)	75
4.4.3 จำนวนจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak)	76
4.5. การระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Identification)	79
4.5.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์	79
4.5.2 ตัวอย่างการระบุชนิดฟอลต์	82
บทที่ 5 ผลการทดลอง	87
5.1. รูปแบบการนำเสนอ	87
5.1.1 วิธีที่ใช้ในการทดลอง	87
5.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง	87
5.2 ผลการทดลอง	88
5.2.1 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	88
5.2.2 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง	98
5.2.3 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ	108

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุป	118
บรรณานุกรม	123
ภาคผนวก	125
ประวัติผู้เขียน	130

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เทคโนโลยีกักกันลมผลิตไฟฟ้าสมัยใหม่	9
2.2 บล็อกไดอะแกรมกักกันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่	11
2.3 ภาพตัดขวางของใบพัดกักกันลมลักษณะคล้ายปีกอากาศยานและมุมที่เกี่ยวข้อง	12
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์โดยทั่วไปของมุมเอนใบพัดจาก -1 องศา ถึง -8 องศา	14
2.5 ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault)	17
2.6 ฟอลต์สายเส้นเดียวลงกราวด์ (Single Line to Ground Fault)	17
2.7 ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้น (Line to Line Fault)	17
2.8 ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้นลงกราวด์ (Double Line to Ground Fault)	18
2.9 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์สามเฟสไม่สมดุล	19
2.11 ไดอะแกรมวิเคราะห์ฟอลต์ด้วยวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว	24
2.12 ไดอะแกรมวิเคราะห์ฟอลต์ด้วยวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งทั้งสองด้าน	26
2.13 กระแสลัดวงจรสนับสนุนจากแหล่งจ่ายและพลังงานทดแทน	26
2.14 วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.13	26
2.15 วงจรสมมูลย์เทวินิน	27
2.16 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ และอุปกรณ์ป้องกัน	28
2.17 ระบายเวลาและความถี่สำหรับการแปลงสัญญาณแบบต่างๆ	31
2.18 ลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบต่างๆ	32
2.19 การแปลงเวฟเล็ดเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่หลายๆสัญญาณ	33
2.20 การแปลงเวฟเล็ดขั้นตอนที่ 1 และ 2	34
2.21 การแปลงเวฟเล็ดขั้นตอนที่ 3	35
2.22 การแปลงเวฟเล็ดขั้นตอนที่ 4	35
2.23 การแปลงเวฟเล็ดขั้นตอนที่ 5	35
2.24 การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองแบบสองช่องสัญญาณ	38
2.25 การแปลงกลับสัญญาณด้วยตัวกรองแบบสองช่องสัญญาณ	39
3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวในการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม	40
3.2 วงจรจริงที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม	40
3.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม	43
3.4 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดเฟสเดียวลงกราวด์ (A-G) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง	45
3.5 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟส (AB) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ส่ง	46
3.6 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟสลงกราวด์ (AB-G) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ส่ง	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟส (AB) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ส่ง	48
4.1 ขั้นตอนในการวินิจฉัยฟอลต์	66
4.2 องค์ประกอบลำดับบวก และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ จากการแปลงคลาร์ก	68
4.3 การแปลงเวฟเฟสของกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current)	70
4.4 การแปลงเวฟเฟสของกระแสลำดับบวกยกกำลังสอง	71
4.5 ความเร็วคลื่นเดินทางในแต่ละความถี่	71
4.6 เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค้ายอดคลื่นแรก	74
4.7 เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค้ายอดคลื่นสูงสุด	75
4.8 ค้ายอดคลื่นที่เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้าน	76
4.9 เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค้ายอดคลื่นแรกและสอง	78
4.10 แผนผังการตัดสินใจของการระบุชนิดฟอลต์	82
4.11 สัมประสิทธิ์ค่าสูงสุดของช่วงที่เกิดฟอลต์และค่าเปรียบเทียบ	85
5.1 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	88
5.2 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	88
5.3 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	90
5.4 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	90
5.5 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	92
5.6 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	92

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ	116
5.30 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ	116
6.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง	119
6.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง	119
6.3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ	120
6.4 ค่าเฉลี่ยการระบุชนิดฟอลต์ของด้านส่ง ด้านรับ และด้านพลังงานทดแทน ตามลำดับ	121
6.5 ค่าเฉลี่ยการระบุชนิดฟอลต์ตามตำแหน่งเกิดฟอลต์	121

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 กำลังผลิตติดตั้งพลังงานทดแทนปี 2555	1
1.2 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำโครงการ	6
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบ	41
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบพลังงานลม	44
3.3 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน	50
3.4 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส	51
3.5 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน	52
3.6 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส	53
3.7 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน	55
3.8 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส	56
3.9 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน	57
3.10 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส	58
3.11 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน	60
3.12 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส	61
3.12 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน	62
3.12 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส	63
4.1 ความเร็วคลื่นเดินทางเฉลี่ยในแต่ละสเกลหรือช่วงความถี่	73
4.2 ตัวอย่างพฤติกรรมฟอลต์เพื่อใช้ในการออกแบบอัลกอริทึม	80
4.3 การพิจารณาฟอลต์แต่ละเฟสและฟอลต์ลงดิน	86
4.4 สรุปผลการวิเคราะห์	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันภาพรวมการใช้พลังงานของโลกสูงขึ้นและในช่วงปลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีปัจจัยการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดจากอัตราการเติบโตของผลิตภัณฑ์มวลรวมประเทศ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้องการใช้พลังงาน จากที่มีและเคยใช้อยู่จึงลดลงและอาจหมดไปในอนาคตอันใกล้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาแหล่งพลังงานในรูปแบบต่างๆ มาทดแทน เพื่อให้สามารถมีพลังงานใช้ได้ต่อไปในอนาคตอย่างมั่นคงและยั่งยืน

ในประเทศไทยแม้จะมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้เองในประเทศโดยคิดเป็นก๊าซธรรมชาติถึงร้อยละ 70 ดังนั้นการพัฒนาพลังงานทดแทนกันอย่างจริงจังจึงสามารถช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่น และยังช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศ โดยพลังงานทดแทนถือเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงเป้าหมายที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทนก๊าซธรรมชาติได้ โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล พลังงานลม พลังงานน้ำขนาดเล็ก ก๊าซชีวภาพ และขยะ และหากเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเหล่านี้มีต้นทุนถูกลงและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ก็อาจสามารถพัฒนาให้เป็นพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าได้ในอนาคต

จากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2555 ถึง 2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 [1] (PDP2010) ซึ่งได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) และคณะรัฐมนตรี (ครม.) โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ.2554-2573) นั้นคือ มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยลดลง เนื่องจากมีการสนับสนุนการประหยัดพลังงาน และการใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

2. แผนพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานทางเลือก ร้อยละ 25 ใน 10 ปี (พ.ศ.2555 ถึง 2564) เพื่อช่วยทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลให้ได้อย่างน้อยร้อยละ 25 ภายใน 10 ปี

ตารางที่ 1.1 กำลังผลิตติดตั้งพลังงานทดแทนปี 2555

ชนิดพลังงานทดแทน	ร้อยละกำลังการผลิตติดตั้ง
พลังงานชีวมวล	70
พลังงานแสงอาทิตย์	13
พลังงานก๊าซชีวภาพ	7
พลังงานลม	4
พลังงานน้ำ	4
พลังงานขยะ	2

พลังงานทดแทนที่นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า ตามรายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปีพ.ศ.2555[2] มีกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนรวม 2,786.2 เมกะวัตต์ โดยพบว่ามีการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลมากที่สุดถึงร้อยละ 70.3 ดังแสดงในตารางที่ 1.1 รองลงมาได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซชีวภาพ พลังงานลมและอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมา ร้อยละ 29.2 สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ.2555-2573 ถึงแม้ว่าพลังงานชีวมวลจะมีกำลังการผลิตติดตั้งมากที่สุด แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของมลภาวะทางอากาศและสิ่งแวดล้อม โดยช่วงปี 2555-2564 พลังงานลมควรมีกำลังการผลิต 1,774.3 เมกะวัตต์ และในช่วงปี 2565-2573 ควรมีกำลังการผลิต 199.4 เมกะวัตต์ ปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าพลังลมที่เป็นโครงการสาธิตของหน่วยงานราชการ และรัฐวิสาหกิจอยู่จำนวนหนึ่ง โดยในปี 2554 ได้มีโรงไฟฟ้าพลังลมที่เป็นโครงการสาธิตของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเริ่มเดินเครื่องแล้วประมาณ 2-3 เมกะวัตต์ และในปี 2556 ได้มีโครงการโรงไฟฟ้าพลังลมเกิดขึ้น 3 โรงไฟฟ้า กำลังผลิตรวมประมาณ 240 เมกะวัตต์ ลงนามในสัญญาซื้อขายกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นอกจากนี้ทางภาคเอกชนได้มีโครงการสร้างหรือยื่นขอใบอนุญาตติดตั้งโรงไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่น บริษัทเอ็กโกกรุ๊ป เป็นต้น ทำให้มีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังลมเพิ่มมากขึ้นแทนการใช้ก๊าซธรรมชาติ ตามแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าฉบับใหม่ หรือ พีดีพี 2013 (PDP 2013)

พลังงานลม คือพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งช่วยลดการเกิดภาวะโลกร้อน การใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้านั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในเรื่องต้นทุนเชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดและใช้เวลาในการก่อสร้างน้อยซึ่งเหมาะสำหรับช่วงเวลาที่ทำการสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เวลาในการก่อสร้างเป็นเวลานาน

การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานลมในปัจจุบัน ได้ก่อสร้างในพื้นที่ที่ห่างไกลจากชุมชน เนื่องจากต้องใช้พื้นที่เป็นจำนวนมากและอาจมีเสียงรบกวน แต่บริเวณนั้นต้องมีระบบไฟฟ้าเข้าถึงเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้ง่าย เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Overhead Aerial System) มีข้อเสียคืออาจเกิดความผิดปกติของวงจร (Fault) หรือเกิดการลัดวงจร (Short Circuit) อันเป็นผลมาจาก การพาดผ่านของต้นไม้หรือสิ่งมีชีวิต หรืออาจเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเกินจากฟ้าผ่า เป็นต้น เพื่อป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อในระบบพลังงานลมไม่ให้เกิดความเสียหาย จึงมีการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าคือ ขั้นตอนการระบุอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ โดยใช้สถานะหลังการเกิดฟอลต์ของรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ฟอลต์ไม่ง่ายเสมอไปและอาจจะใช้เวลานานเนื่องจากผู้ควบคุมระบบต้องวิเคราะห์ข้อมูลหรือสัญญาณเตือนจำนวนมากที่ถูกส่งไปยังศูนย์ควบคุมเพื่อที่จะหาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมในการนำระบบกลับคืน ข้อมูลดังกล่าวอาจจะไม่แม่นยำและไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจมาจากการสื่อสารที่ผิดพลาดหรือการทำงานที่ผิดพลาดของระบบป้องกัน ดังนั้นผู้ควบคุมระบบจึงต้องการเครื่องมือการวิเคราะห์เพื่อช่วยในการตีความหมายข้อมูลดังกล่าว ปัจจุบันมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) , เทคนิคซ์ฟพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine), ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) , การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการระบุตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location) ที่ได้ศึกษามามีดังนี้

งานวิจัยของ Feng Yan และคณะ ในปี 2011 [3] ได้ศึกษาการหาตำแหน่งฟอลต์สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์บนพื้นฐานทฤษฎีคลื่นเดินทางและทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจุดมุ่งหมายงานนี้คือการปรับปรุงความถูกต้องของการระบุตำแหน่งฟอลต์ ในรูปแบบใหม่ในการระบุตำแหน่งฟอลต์มี 2 ขั้นตอนคือ หนึ่งการกำหนดระยะทางฟอลต์ได้อย่างถูกต้องโดยวิธีการระบุตำแหน่งคลื่นเดินทางรูปแบบซีโดยรูปแบบซึ่งจะส่งสัญญาณคลื่นเดินทางตามคู่มือกำหนดระยะฟอลต์ สองคือการระบุชนิดฟอลต์โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้โปรแกรม ATP ในการจำลอง ซึ่งการหาตำแหน่งฟอลต์ทำโดยการส่งสัญญาณพัลส์แคบที่มีแรงดันสูงที่จุดเริ่มต้นของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้ตรวจสอบ

งานวิจัยของ H. Meyar-Naimi ในปี 2012 [4] ได้เสนอการใช้ตรรกะแบบฟัชซีที่ง่ายและถูกต้องซึ่งแก้ปัญหาต่างๆสำหรับรีเลย์ระยะทางและการระบุตำแหน่งฟอลต์ที่เกิดกับสายส่งยาวที่ถูกติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่มีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้การจำลองระบบด้วย PSCAD การใช้ฟัชซีในการระบุพื้นที่และตำแหน่งฟอลต์โดยใช้โปรแกรม MATLAB การแก้ไขอิมพีแดนซ์ถูกกำหนดโดยใช้ข้อมูลฟอลต์ที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม PSCAD ซึ่งผลที่ได้มีความถูกต้องซึ่งประเมินตำแหน่งฟอลต์ในเวลาอันสั้น (25-50 มิลลิวินาที) ที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการระบุตำแหน่ง

งานวิจัยของ Song Kim ในปี 2011 [5] ได้ศึกษาขั้นตอนวิธีการตรวจสอบฟอลต์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อบรรทัดโดยใช้การแปลงเวฟเล็ท การตรวจจับฟอลต์มีความสำคัญกับการจัดการโรงไฟฟ้าในวิธีปกติเซ็นเซอร์จะต้องตรวจสอบอินเวอร์เตอร์ที่ผิดปกติ แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูง การสลายการแปลงเวฟเล็ทหลายระดับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบตำแหน่งฟอลต์และอุปกรณ์ เป็นวิธีที่รวดเร็ว คำนวณง่ายและมีความแม่นยำในการตรวจสอบฟอลต์ ในบทความนี้จะเป็นการศึกษาการตรวจสอบฟอลต์สำหรับระบบการปรับปรุงไฟฟ้า (Power conditioning system : PCS) ในเวลาจริง ใช้การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ทมาใช้เป็นวิธีการจำแนกฟอลต์ซึ่งผลที่ได้มีเป็นที่น่าพอใจและมีประสิทธิภาพยอดเยี่ยม

งานวิจัยของ Xiao Chen และคณะ ในปี 2012 [6] ได้ทำการศึกษาการควบคุมพื้นผิวฟอลต์ (control surface failures) ซึ่งเป็นปัญหาที่ยากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสมการการเคลื่อนไหว จึงได้ใช้การวิเคราะห์เวฟเล็ทเพื่อตรวจจับสัญญาณฟอลต์ โดยมีวิธีการตามนี้คือ ขั้นแรกคือการสลายสัญญาณฟอลต์และระดับการสลายตัวจะเลือกตามสัญญาณเฉพาะ ขั้นต่อมาค่าสัมประสิทธิ์การสลายเวฟเล็ทในแต่ละกลุ่มจะมีการสร้างขึ้นมาใหม่จากนั้นจะดึงออกมาแต่ละช่วงความถี่ ต่อมาจะคำนวณจุดสูงสุดของสัญญาณความถี่สูงให้สำเร็จ

งานวิจัยของ C. Pothisarn และคณะ ในปี 2012 [7] ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ ในระบบส่งกำลัง 500 กิโลโวลต์ที่มุมและฟอลต์ชนิดต่างๆ ซึ่งฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีผลกระทบกับรีเลย์ระยะทางที่ติดตั้งในระบบ จึงใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยร่วมกับการประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทางและโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการแก้ปัญหา

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการระบุชนิดฟอลต์ (Fault Type) ที่ได้ศึกษามามีดังนี้

งานวิจัยของ Bhargav Vyas และคณะ ในปี 2012 [8] ได้ศึกษาการจำแนกฟอลต์ด้วยการวิเคราะห์การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) และ เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine : SVM) โดยจำลองผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และใช้เวฟเลตเป็นเวฟเลตแม่สำหรับสกัดลักษณะที่เป็นเวฟเลตพื้นฐาน ใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน สำหรับจำแนกค่าต่างๆ ซึ่งผลการจำลองปรากฏว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยของ C. Pothisarn และคณะ ในปี 2011 [9] ได้ทำการศึกษาการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยผสมกับตรรกะแบบฟัซซีเพื่อระบุประเภทของฟอลต์บนระบบสายส่ง โดยจำลองผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งใช้ดูบีซีส์ 4 (Daubechies หรือ dB4) เป็นเวฟเลตแม่ในการย่อยสลายองค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณและใช้สัญญาณกระแสลำดับบวกในการตรวจสอบฟอลต์ รายละเอียดค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตแบบเต็มหน่วยในเวลาสูงสุดอันดับแรกที่กระแสลำดับบวกสามารถตรวจพบฟอลต์ได้ดำเนินการตามรูปแบบการป้อนข้อมูลของตรรกะแบบฟัซซี งานวิจัยของ Vicente Torres และคณะ ในปี 2011 [10] ได้ศึกษาการตรวจสอบฟอลต์อิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault) โดยการใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) ซึ่งฟอลต์อิมพีแดนซ์สูง เป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนมาก และทำการตรวจสอบได้ยากในระบบจำหน่ายเพราะมีกระแสขนาดเล็กที่ไม่สามารถตรวจพบโดยการป้องกันทั่วไป ในการจำลองระบบทำโดยผ่านโปรแกรม ATP/EMTP โดยจำลองระบบจำหน่ายที่แม็กซีโก ระดับแรงดัน 13.8, 23 และ 34.5 กิโลโวลต์ ซึ่งทำการตั้งข้อสังเกตว่ากระแสของฟอลต์อิมพีแดนซ์สูงมีพฤติกรรมแบบสุ่ม, ไม่เป็นเชิงเส้น, กระแสในเฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากพฤติกรรมตัวต้านทานและฮาร์มอนิก ในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยจะสามารถระบุฟอลต์อิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่แตกต่างกันเพราะไม่สามารถดูได้ที่ความถี่พื้นฐานได้ และยังทำหน้าที่เป็นพื้นฐานการตรวจสอบบริเลย์สำหรับฟอลต์อิมพีแดนซ์สูง

งานวิจัยของ A.Nirmal และคณะ ในปี 2012 [11] ทำการจำแนกฟอลต์ที่มีอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault) โดยการใช้การแปลงเวฟเลต (WT) และโครงข่ายประสาทเทียม (ANNs) โดยใช้ซิมพาวเวอร์ซิสเต็มบ็อกเซต ในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองฟอลต์ การวิเคราะห์เวฟเลตใช้ย่อยสลายรูปคลื่นกระแสดังกล่าวและสกัดคุณสมบัติพิเศษโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยของ K.Saravanababu และคณะ ในปี 2013 [12] ได้ทำการศึกษาการจำแนกฟอลต์ การตรวจสอบฟอลต์ และการหาตำแหน่งฟอลต์ของสายส่งด้วยการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย และใช้ดูบีซีส์เวฟเลต (Daubechies Wavelet หรือ dB6) ในการแยกแยะและตรวจสอบฟอลต์ โดยจะใช้เวฟเลตในการดึงข้อมูลสัญญาณกระแสสามเฟสและประมวลผลรายละเอียดความถี่สูงจะได้ข้อมูลฟอลต์

จากเอกสารและบทความที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่เป็นการกล่าวถึงอัลกอริทึมในการตรวจจับฟอลต์และระบุชนิดฟอลต์ที่รวดเร็ว โดยใช้กับระบบไฟฟ้าอย่างง่ายที่มีเพียงด้านส่งและด้านรับ ซึ่งในระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนต่อรวมจะมีอัลกอริทึมที่ซับซ้อนในการหาตำแหน่งฟอลต์ยิ่งขึ้น อีกทั้งการแปลงเวฟเลตเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณที่สภาวะชั่วคราวเพื่อแยกองค์ประกอบ

ความถี่สูงไปวิเคราะห์ตรวจจับฟอลต์ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นปริญญาโทฉบับนี้ได้นำเสนอการตรวจจับและระบุชนิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานลมต่อรวมโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

1. ศึกษาลักษณะของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีระบบพลังงานทดแทนเชื่อมต่อในระบบ
2. ศึกษาการเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีผลอย่างไรต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม PSCAD ในการจำลองระบบพลังงานลมเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า
4. ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์สำหรับระบุชนิดและตำแหน่ง ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตการศึกษาของปริญญาโทเล่มนี้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ ขอบเขตของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ มีความยาวสายอยู่ที่ 30 กิโลเมตร , ขอบเขตพลังงานทดแทนที่ได้ศึกษาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและการวินิจฉัยฟอลต์โดยใช้ข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลอง โดยไม่พิจารณาถึงสัญญาณรบกวนอื่นๆ จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งและจำแนกชนิดของฟอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 วิธีและขั้นตอนการศึกษาการดำเนินงานของโครงการ

1. ศึกษาการทำงาน และส่วนประกอบต่างๆ ของระบบพลังงานลม
2. ศึกษาาระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีระบบพลังงานลมต่อรวม
3. ศึกษาลักษณะและชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับระบบด้วยโปรแกรม PSCAD
4. ศึกษาการนำฟังก์ชันเวฟเล็ตของโปรแกรม MATLAB มาประยุกต์ใช้ เพื่อแสดงชนิดและระบุตำแหน่งของฟอลต์ในระบบ

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าวิธีที่ใช้ระบุตำแหน่งของฟอลต์โดยใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทาง และวิธีการระบุชนิดของฟอลต์โดยใช้ทฤษฎีเวฟเล็ต
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบพลังงานลมเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า
3. ศึกษาการใช้งานและลองใช้โปรแกรม PSCAD ในการจำลองระบบและใช้โปรแกรม MATLAB ในการวินิจฉัยฟอลต์
4. จำลองระบบพลังงานลมเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า และทำการวินิจฉัยฟอลต์
5. สรุปผลและจัดทำปริญญาโทฉบับสมบูรณ์

1.6 แผนการดำเนินงาน

การวางแผนการดำเนินงานมีระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2556 ถึง 31 มีนาคม 2557

ตารางที่ 1.2 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2556																2557																							
	มิ.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.				ก.พ.				มี.ค.			
	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	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1. ศึกษาการระบุตำแหน่งและชนิดของพอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ต																																								
2. ศึกษาการทำงานของระบบพลังงานลมต่อกับระบบจำหน่าย																																								
3. ศึกษาโปรแกรม PSCAD และโปรแกรม MATLAB																																								
4. จำลองระบบจากโปรแกรม PSCAD																																								
5. วินิจฉัยพอลต์จากโปรแกรม MATLAB																																								
6. สรุปผลและจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์																																								



ดำเนินงานจริง



วางแผน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้านพลังงานทดแทน เพื่อเป็นตัวอย่างของผู้ที่สนใจด้านระบบพลังงานทดแทนที่มีการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่อาจมีเพิ่มมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าฉบับใหม่ (PDP 2013) ได้มีการสนับสนุนให้ใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น และข้อมูลกระบวนการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆของระบบพลังงานทดแทนจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ

ด้านงานวิจัย เป็นข้อมูลตัวอย่างสำหรับผู้ออกแบบระบบป้องกันในระบบไฟฟ้าหรือผู้ที่สนใจ การวิเคราะห์ฟอลต์ ระบุตำแหน่งฟอลต์และระบุชนิดฟอลต์ เพื่อลดความเสียหายที่เกิดกับระบบไฟฟ้าและซ่อมบำรุงส่วนที่เสียหายได้อย่างตรงจุดและรวดเร็ว

บทที่ 2

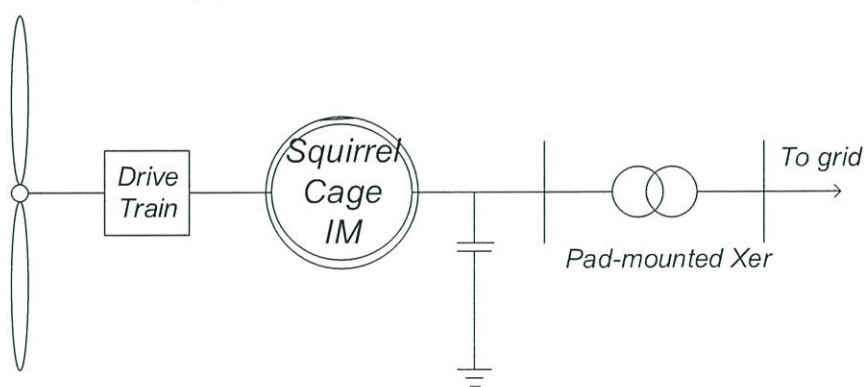
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

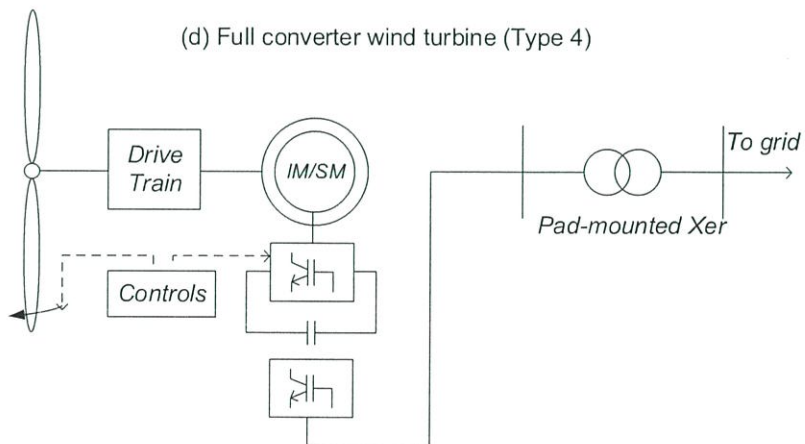
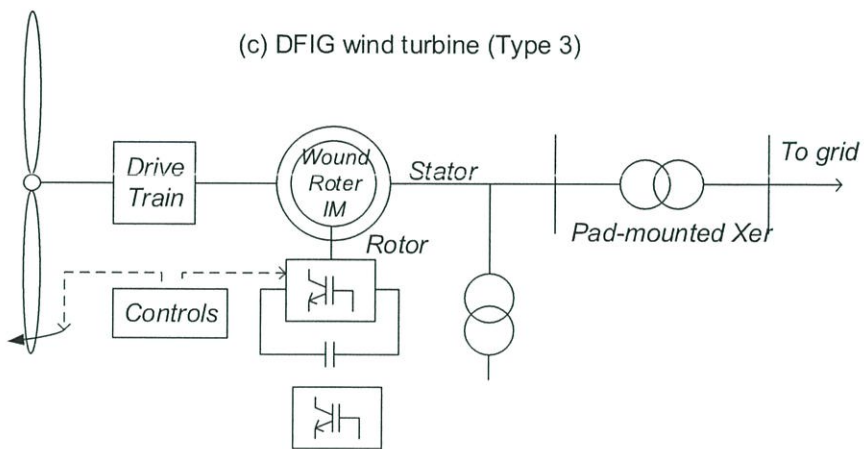
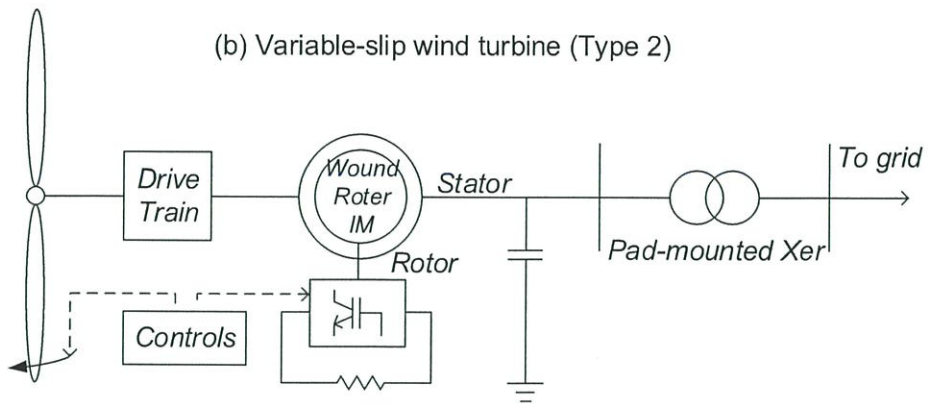
2.1 เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าปัจจุบัน [13]

เทคโนโลยีของกังหันลมผลิตไฟฟ้าปัจจุบันมีหลากหลายชนิด โดยในโรงไฟฟ้าพลังงานลมประกอบด้วยกังลมผลิตไฟฟ้าประมาณหนึ่งร้อยกังหัน ล้วนแต่เป็นเทคโนโลยีชนิดเดียวกันทั้งสิ้น ซึ่งเทคโนโลยีที่หลากหลายก็ย่อมมีคุณลักษณะที่ต่างกันอย่างที่ ความซับซ้อน , ประสิทธิภาพที่ได้จากความเร็วลม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น มีหลักการทำงานโดยรวม คือ เมื่อใบพัดและดุมยึดใบพัดได้รับลม เลาและเกียร์ทดรอบจะเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์ให้เร็วขึ้นมากพอที่จะขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้างี้จะเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนใหญ่มักใช้ชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากธรรมชาติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอะซิงโครนัสที่ได้รับความเร็วรอบไม่คงที่ ซึ่งหากเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสต้องมีความเร็วรอบที่คงที่ นอกจากนี้ อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากำลังยังเป็นอีกส่วนสำคัญที่ช่วยในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ในที่นี้ได้แบ่งชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า 4 ชนิด คือ

- ชนิดที่ 1 กังหันลมชนิดความเร็วคงที่ (Fixed-speed wind turbines)
- ชนิดที่ 2 กังหันลมชนิดสลิปไม่คงที่ (Variable-slip wind turbines)
- ชนิดที่ 3 กังหันลมชนิดเหนี่ยวนำป้อนสองทาง
(Doubly-fed induction generator (DFIG) wind turbines)
- ชนิดที่ 4 กังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มพิกัดกำลัง (Full-converter wind turbines)

(a) Fixed-speed wind turbine (Type 1)





รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าสมัยใหม่

กังหันลมแบบความเร็วคงที่เป็นชนิดพื้นฐานที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ในทางปฏิบัติมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ไม่มากนัก และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบกริดโดยตรง แม้ว่ากังหันลมชนิดนี้มีความแข็งแรง และความน่าเชื่อถือมาก แต่ก็มีข้อเสียที่เป็นที่ทราบกันดีคือ มีขนาดเล็กและต้องการการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ถูกรออกแบบรองรับการใช้งานกับช่วงความเร็วลมต่างๆ

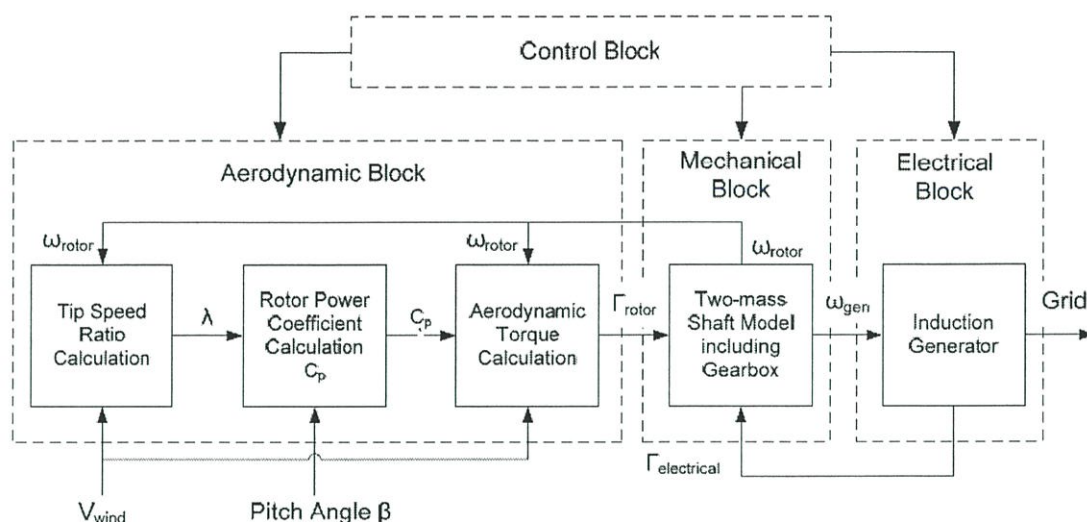
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดที่ใช้กันโดยทั่วไปนั่นคือกังหันลมความเร็วคงที่ ซึ่งเป็นชนิดพื้นฐานที่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไม่เกินไปร้อยละหนึ่ง และเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบกริดโดยตรง และใช้ระบบควบคุมไฟฟ้าหรือห้องควบคุมไฟฟ้าในการควบคุมแยกออกจากกังหันลม ในส่วนของใบพัดกังหันลมส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกติดตั้งกับเพลากลมหุนอย่างถาวร แต่จะถูกออกแบบให้สามารถหมุนได้เล็กน้อยเพื่อรองรับสภาพความเร็วลมต่างๆ ได้ ดังนั้นความเร็วลมเหนือใบพัดจึงเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการไหลของกระแสลมจนถึงการไหลแบบปั่นป่วนในระดับความเร็วลมแรง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบที่มีกำลังทางกลแยกออกจากกังหันลมในการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากภาวะไหลกลับ

กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ ถูกรออกแบบมาเพื่อใช้ในช่วงความเร็วโรเตอร์ต่างๆ ซึ่งความเร็วโรเตอร์จะแปรผันตรงกับความเร็วลมหรือระบบควบคุมขึ้นอยู่กับกรอกแบบ กังหันลมชนิดนี้นอกจากจะสามารถควบคุมความเร็วและกำลังทางกลได้แล้วยังสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมชนิดความเร็วคงที่ แต่สิ่งที่จำเป็นในระบบกังหันลมชนิดนี้คือต้องมีเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบกริดและมีข้อดีคือสามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้

กังหันลมแบบความเร็วคงที่ มีราคาถูก , แข็งแรง , มีความน่าเชื่อถือ และสะดวกในการซ่อมบำรุง ซึ่งกังหันลมชนิดนี้ถูกติดตั้งเป็นจำนวนมากในทศวรรษที่ผ่านมาและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ขณะที่กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ ยังคงถูกพัฒนาขนาดและกำลังไฟฟ้าติดตั้งตลอดมา ดังนั้นกังหันลมแบบความเร็วคงที่นี้จะยังคงมีบทบาทในการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าต่อไปในอนาคต กังหันลมผลิตไฟฟ้าทำงานโดยใช้หลักการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับการผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป ในส่วนของกังหันลมแบบความเร็วคงที่มีส่วนประกอบดังนี้

- ใบพัดโรเตอร์และคัมยัดใบพัด (prime mover)
- เปลาและชุดเกียร์ (ระบบขับเคลื่อนและชุดแปลงความเร็วรอบ)
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ระบบควบคุม

การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นการดึงพลังงานจลน์จากลมมาใช้ ดังรูปที่ 2.2 การทำงานร่วมกันระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่

2.1.1 อากาศพลศาสตร์ [13]

2.1.1.1 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยสังเขป

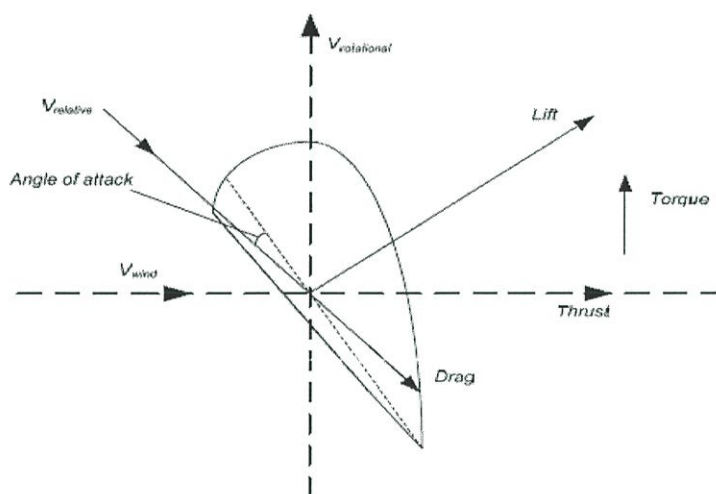
การผลิตไฟฟ้าจากกังหันขึ้นอยู่กับการทำงานระหว่างโรเตอร์ของกังหันลมและลมที่ปะทะเนื่องจากกำลังงานหลักของกังหันลมที่ผลิตได้มาจากความเร็วลมเฉลี่ย ดังนั้นในกรณีนี้จึงพิจารณาความเร็วลมเฉลี่ยและไม่คำนึงถึงลมปั่นป่วน ซึ่งการศึกษาอากาศพลศาสตร์ในช่วงแรกได้ทำการศึกษาโดยแบทซ์ (Betz) และ กลาเวิร์ด (Glauert) ราวปี ค.ศ.1920 และต้นทศวรรษ 1930 ระบุสมการกำลังงานที่ได้จากลม คือ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (2.1)$$

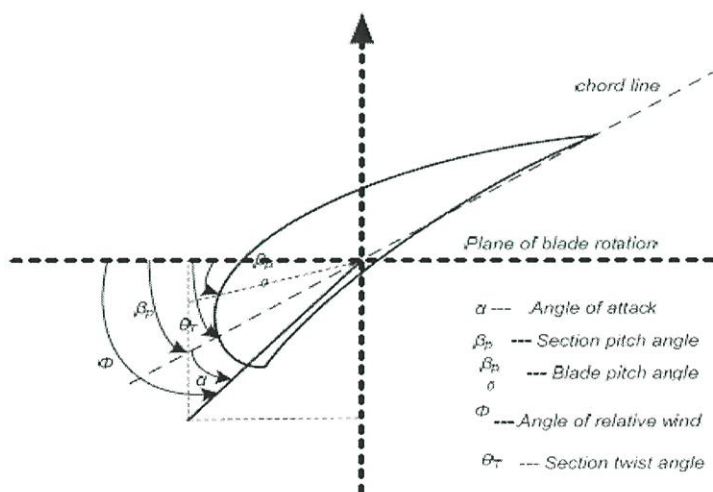
จากสมการ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ , A คือพื้นที่กวาดใบพัด และ V_{wind} คือความเร็วลม แบทซ์ (Betz) ได้พิสูจน์ว่ากำลังงานสูงสุดที่ได้จากกังหันโรเตอร์และลมปะทะในอุดมคติคือร้อยละ 59.26 ของความเร็วลมที่ปะทะใบพัด ในทางปฏิบัติกังหันลมได้ถูกจำกัดด้วยใบพัดจำนวน 2 หรือ 3 ใบพัด เนื่องจากเหตุผลด้านการออกแบบและเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นปริมาณของกำลังงานกังหันลมที่ผลิตได้จะมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 50 ของความเร็วลม ค่าอัตราส่วนของกำลังงานที่ผลิตได้กับความเร็วลมดังกล่าวได้ถูกจัดให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์กำลังงานโรเตอร์ (C_p) จึงสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการดังกล่าว คือ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_{wind}^3 \quad (2.2)$$

กังหันลมผลิตไฟฟ้าสมัยใหม่ใช้ใบพัดที่มีลักษณะแพนอากาศ (ลักษณะคล้ายปีกอากาศยาน) ดังรูปที่ 2.3 เพื่อควบคุมพลังงานจลน์จากลม จากลักษณะดังกล่าวจะมีแรงจากลม 2 ชนิดกระทำต่อใบพัดคือแรงยกและแรงต้าน ซึ่งใบพัดด้านที่อยู่เหนือกว่าจะถูกกระทำโดยแรงยกเพื่อไปทำให้เกิดทอร์กที่ใบพัดโรเตอร์ และส่งผลให้อีกด้านเกิดแรงต้านเช่นเดียวกัน แรงยกที่ตั้งฉากกับทิศทางของลม ยิ่งทำให้เกิดทอร์กการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบพัดจึงเป็นส่วนสำคัญในกำเนิดทอร์ก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของใบพัดกังหันลมลักษณะคล้ายปีกอากาศยาน (รูป ก)
และมุมที่เกี่ยวข้อง (รูป ข)

2.1.1.2 บล็อกอากาศพลศาสตร์

จากแผนภาพการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ในส่วนบล็อกของอากาศพลศาสตร์ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ การคำนวณอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบพัด (Tip speed ratio) , ค่าสัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้าโรเตอร์ (C_p) และการคำนวณแรงของอากาศ โดยตัวแปรขาเข้าที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ มุมปีกเงย (Pitch angle) และความเร็วลม เนื่องจากการจำลองโปรแกรมได้ศึกษาพฤติกรรมในช่วงสภาวะคงตัว จึงกำหนดให้ความเร็วลมมีค่าคงที่ตลอดการจำลองคือที่อัตราเร็วลมของกังหันลมผลิตไฟฟ้า อีกทั้งชนิดของกังหันลมเป็นชนิดความเร็วคงที่ จึงต้องกำหนดมุมปีกเงยให้คงที่ตลอดการจำลอง

2.1.1.3 การคำนวณอัตราส่วนความเร็วลมเหนือใบพัด (Tip speed ratio)

อัตราส่วนความเร็วลมเหนือใบพัดหรือ TSR หรือใช้ตัวย่อ λ คือ อัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายใบพัดที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองกับความเร็วลมอิสระ ซึ่งกังหันลมชนิดความเร็วลมคงที่นั้น จะมีอัตราส่วนความเร็วลมเหนือใบพัดเป็นค่าคงที่ตลอด เนื่องจากโรเตอร์ใบพัดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านเกียร์ทดรอบ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกริดโดยตรง จึงสามารถคำนวณอัตราส่วนความเร็วลมเหนือใบพัดได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\omega_{rotor} \cdot R_{rotor}}{V_{wind}} \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนด	ω_{rotor}	=	ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์	(rad/s)
	R_{rotor}	=	รัศมีโรเตอร์	(m)
	V_{wind}	=	ความเร็วลม	(m/s)

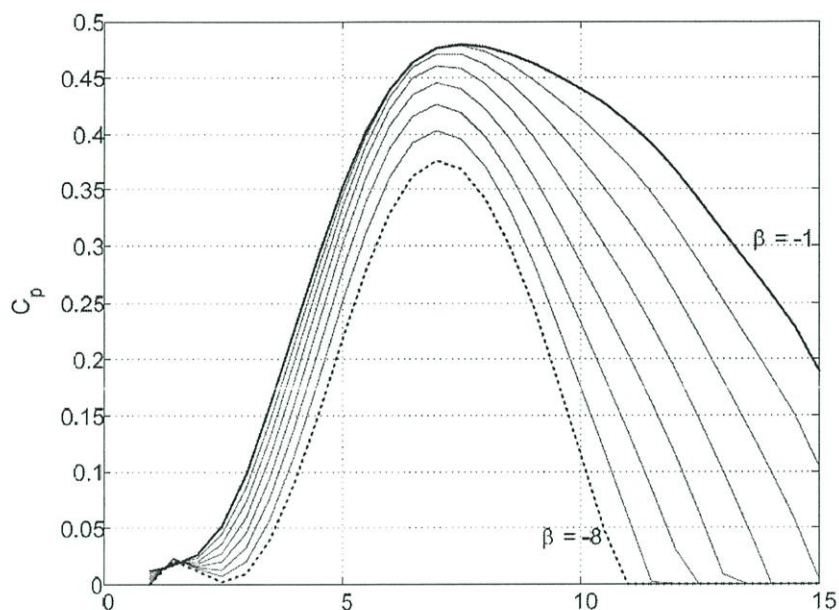
2.1.1.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์ (Rotor power coefficient , C_p)

อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบพัด (TSR) พร้อมด้วยมุมปีกเงย (Pitch angle , β) ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของโรเตอร์นั่นเอง สามารถระบุเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_p = \frac{\text{Extracted Power}}{\text{Power in Wind}} = \frac{P_{rotor}}{P_{wind}} \quad (2.4)$$

จากอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบพัดสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเร็วลมต่างๆ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งในกังหันลมชนิดความเร็วไม่คงที่ได้กำหนดให้มุมปีกเงยเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ดีที่สุดนั่นเอง ส่วนในกังหันลมแบบความเร็วคงที่นั้นได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดโดยตรง จึงทำให้ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกำหนดโดยความถี่ของระบบกริด ในทำนองเดียวกันความเร็วโรเตอร์ก็ถูกกำหนดให้คงที่ด้วยเช่นกัน เพราะเพลลาของโรเตอร์

ถูกเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงผ่านชุดเกียร์ ดังนั้นอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบพัดจึงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อความเร็วลมมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์กำลังในระยะแรกก็จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไปและจะลดลงเมื่อความเร็วลมมากขึ้นในภายหลัง ซึ่งกราฟของค่าสัมประสิทธิ์โดยทั่วไปได้แสดงดังรูปที่ 2.4 ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์ (C_p)



รูปที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์โดยทั่วไปของมุมเอนใบพัดจาก -1 องศา ถึง -8 องศา

2.1.1.5 การคำนวณทอร์กของความเร็วลม

ทอร์กของความเร็วลมที่ปะทะใบพัดสามารถคำนวณได้จากพลังงานจลน์ของลม E (Joule) , มวลอากาศ (kg) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_{wind} (m/s) ดังสมการ

$$E = \frac{1}{2} m V_{wind}^2 \quad (2.5)$$

เมื่อความหนาแน่นของอากาศคือ ρ (kg/m³) , มวลอากาศเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าสัมผัส A เป็นดังสมการ

$$\dot{m} = \rho A V_{wind} \quad (2.6)$$

ดังนั้นสมการกำลัง (watt) ของความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านที่รับลม A คือ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (2.7)$$

ในกรณีของกังหันลมชนิดนี้ พื้นที่รับลม A คือพื้นที่กวาดของใบพัด ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถให้กำลังงานโรเตอร์ได้ตรงตามสมการ จึงต้องมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi R^2_{rotor} \cdot V_{wind}^3 \quad (2.8)$$

ดังนั้น ทอร์กของที่ได้จากความเร็วลม (Nm) สามารถเขียนได้ด้วยสมการ

$$\Gamma_{rotor} = \frac{P_{rotor}}{\omega_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi R^2_{rotor} \cdot V_{wind}^3}{\omega_{rotor}} \quad (2.9)$$

2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [14]

ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสที่สำคัญประกอบด้วย โรเตอร์ ซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็ก และสเตเตอร์ที่มีขดลวดเหนี่ยวนำ โดยสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ($\phi = K_r \cdot I_r$) ถูกสร้างขึ้นจากกระแส I_r ที่ขดลวดสนาม ซึ่งกระแสโรเตอร์นั้นอาจจะได้มาจากไดนาโมหรือรับจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ขึ้นอยู่กับขดลวดที่สเตเตอร์เนื่องจากการหมุนของเพลลาที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล (r.m.s.) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์หรือความเร็วรอบการหมุน (n) ดังสมการ

$$E = k_s \cdot \phi \cdot n \quad (2.10)$$

เนื่องจากความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบการหมุนจากความสัมพันธ์

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.11)$$

เมื่อ p คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กของขดลวดโรเตอร์ , แรงดันประสิทธิผลที่ผลิตได้จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ผลิตได้คือ

$$E = k_s \cdot \phi \cdot f \quad (2.12)$$

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับโหลดและมีกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบ การสร้างสนามแม่เหล็กโดยโรเตอร์ที่กำลังหมุนอยู่นั้นจะเกาะกันไปกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ช่องว่างอากาศ ถ้าหากสนามแม่เหล็กทั้งสองสนามนี้ไม่มีมุมต่างกัน ($\delta=0$) จะไม่ทำให้เกิดแรงต้านการหมุน กำลังไฟฟ้าจริง

ที่ผลิตได้จึงมีค่าเป็นศูนย์ ในทางตรงกันข้ามหากสนามแม่เหล็กทั้งสองมีมุมต่างกันมากเท่าไร ($\delta > 0$) ก็ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบมากขึ้นเท่านั้น

เมื่อกำหนดให้มุมต่าง (δ) เป็นค่าคงที่ กำลังไฟฟ้าจริงจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันประสิทธิผล อย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แรงดันประสิทธิผลที่ถูกเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว รอบการหมุนและความถี่

$$P = \frac{E \cdot V}{X_s} \cdot \sin \delta = \frac{V \cdot k_s \cdot \phi \cdot f}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (2.13)$$

2.2 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า [15]

ความผิดปกติ หรือ ฟอลต์ (Fault) คือ ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังที่รบกวนการ ไหลตามปกติของกระแสไฟฟ้า สภาวะที่ผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

- ฟอลต์อนุกรม (Series fault) เป็นสภาวะผิดปกติในเฟส (phase) เกิดเปิดวงจรส่วนใด ส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น สายส่งขาด การแตกหักหรือตัวนำขาด เป็นต้น

- ฟอลต์ขนาน (Shunt fault) เป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสลงกราวด์ (ground) เกิดการลัดวงจรที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การลัดวงจรแบบต่างๆ เป็นต้น

2.2.1 สาเหตุของการเกิดฟอลต์

สาเหตุของการเกิดฟอลต์มีมากมายซึ่งสามารถเกิดได้จากทั้งคน สัตว์ ต้นไม้ ภัยธรรมชาติ อุปกรณ์ไฟฟ้า โดยฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามากที่สุด ได้แก่ ระบบสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead Lines) ซึ่งมีอัตราการเกิดฟอลต์คิดเป็นร้อยละ 50 ของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด สาเหตุของการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้าเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น การลัดวงจร (Short Circuit) การเกิดภาวะแรงดันสูง (Over Voltage) การเกิดความถี่ต่ำ (Under Frequency) การเกิดโหลดเกิน (Over Load) การสูญเสียสภาวะซิงโครนิส (Loss of Synchronism)

2.2.2 การลัดวงจร

การลัดวงจร หรือ ฟอลต์ ในระบบไฟฟ้าจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

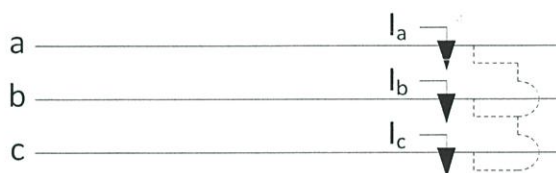
1. ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical fault หรือ Balanced fault) เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบแล้วกระแสฟอลต์ในช่วงสภาวะคงตัว (steady state) ของทั้งสามเฟสจะมีค่าเท่ากันและมีมุมห่างกัน 120 องศาเท่ากันทุกเฟส ได้แก่ ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault) ดังรูปที่ 2.5

2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical fault หรือ Unbalanced fault) เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบแล้วกระแสบางเฟสจะมากกว่าเฟสอื่น หรือมุมของกระแสต่างกันไม่เท่ากับ 120 องศาได้แก่

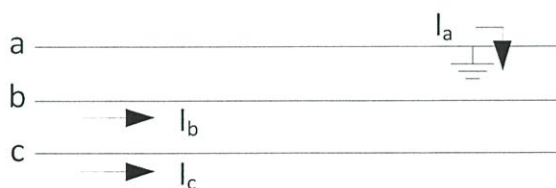
- ฟอลต์สายเส้นเดียวลงกราวด์ (Single Line to Ground Fault) ฟอลต์แบบนี้เกิดเมื่อสายไฟเส้นหนึ่งตกลงพื้นดิน มักจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดเพียงชั่วขณะ ดังรูปที่ 2.6

- ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้น (Line to Line Fault) ฟอลต์ชนิดนี้เกิดเมื่อมีสายไฟสองเส้นมาสัมผัสกันหรือมีกิ่งไม้หรือสัตว์พาครระหว่างสายไฟสองเส้นทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ดังรูปที่ 2.7

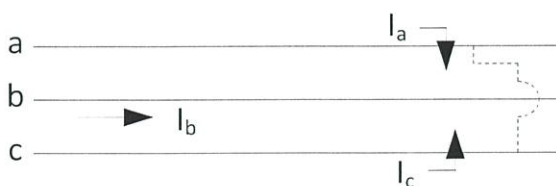
- ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้นลงกราวด์ (Double Line to Ground Fault) ฟอลต์ชนิดนี้เกิดเมื่อมีสายไฟสองเส้นคู่ใดคู่หนึ่งของระบบไฟฟ้าลัดวงจรลงดินพร้อมกัน ดังรูปที่ 2.8



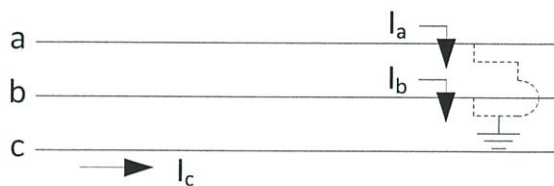
รูปที่ 2.5 ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault)



รูปที่ 2.6 ฟอลต์สายเส้นเดียวลงกราวด์ (Single Line to Ground Fault)



รูปที่ 2.7 ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้น (Line to Line Fault)



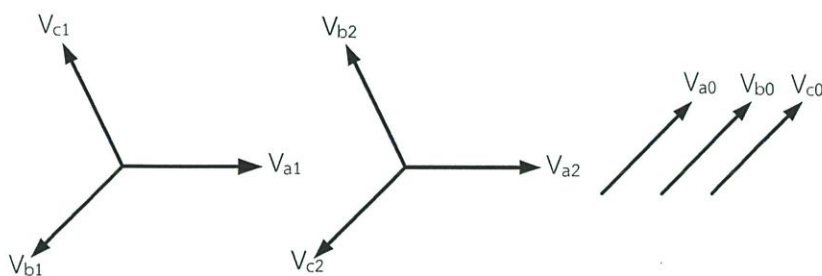
รูปที่ 2.8 ฟอลต์ระหว่างสายสองเส้นลงกราวด์ (Double Line to Ground Fault)

2.2.3 องค์ประกอบสมมาตร [16]

องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วงจรหลายเฟสไม่สมดุล นำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ฟอลต์ไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ตามทฤษฎีของ Fortescue ได้เสนอหลักการวิเคราะห์เฟสเซอร์ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (Unbalanced System) โดยใช้ผลรวมจากส่วนประกอบที่เป็นเฟสสมดุล (Balanced Phasors) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ซึ่งเฟสสมดุลจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ของทั้ง สามเฟส ที่มีขนาดเท่ากัน และมีลำดับเฟสตรงกันกับเฟสเซอร์ของส่วนประกอบในระบบไฟฟ้าแบบสมดุลและมีมุมเฟสระหว่างกันเท่ากับ 120 องศา
2. องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ของทั้ง สามเฟส ที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับเฟสเซอร์ของส่วนประกอบในระบบไฟฟ้าแบบสมดุลและมีมุมเฟสระหว่างกันเท่ากับ 120 องศา
3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ของทั้งสามเฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมของเฟสเซอร์ทั้งสามไม่แตกต่างกัน

การจัดลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สมมาตรกัน (Symmetrical Component) จะมีค่าเท่ากับ 120 องศาเสมอ ถ้ากำหนดเวกเตอร์ดำเนินการ 'a' สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าสามเฟส ในลักษณะเช่นเดียวกับเวกเตอร์ดำเนินการ 'j' สำหรับการวิเคราะห์จำนวนเชิงซ้อน โดยที่ 'j' คือเวกเตอร์ดำเนินการ สำหรับมุม 90 องศา ในทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในขณะที่ 'a' คือเวกเตอร์ดำเนินการสำหรับมุม 120 องศา และกำหนดให้ลำดับ (Sequence) เลข 1 แทนองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Components) เลข 2 แทนองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components) และเลข 0 แทนองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components)



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์สามเฟสไม่สมดุล

2.3 เทคนิคคลื่นเดินทาง (Travelling Wave)

วิธีนี้มีมานานหลายปีแล้วแต่ก็ยังมีการใช้กันอย่างจำกัด คือ เทคนิคคลื่นเดินทาง ในช่วงแรกระบบถูกจำลองขึ้นมา และถูกใช้สำหรับการวิจัยเพื่อยืนยันว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือและระบุตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ได้อย่างแม่นยำ หลายปีต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการนี้โดยแสดงให้เห็นว่าระบบนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับการระบุตำแหน่งฟอลต์ และการสื่อสารกันระหว่างระบบ ทำให้การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยวิธีคลื่นเดินทางเริ่มแพร่หลายมากขึ้น

ถึงแม้ว่าการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยคลื่นเดินทางจะมีความแม่นยำสูง แต่ก็ยังมีปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด หรืออาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ความผิดพลาดในการตรวจจับคลื่นเกิดจากการตีความสัญญาณชั่วขณะซึ่งเป็นความผิดพลาดขนาดใหญ่ ความผิดพลาดนี้เกิดจากเมื่อมีสัญญาณชั่วขณะหลายๆ ครั้ง หรือมีการสะท้อนของสัญญาณชั่วขณะซึ่งปรากฏว่ามีลักษณะเหมือนกัน เช่นฟ้าผ่าที่มีหลายลำ สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญในการตีความสัญญาณชั่วขณะที่เกี่ยวข้องกับฟอลต์ อีกอย่างคือบัสที่มีความแข็งแรงจะทำให้มีการหน่วงแรงดันชั่วขณะซึ่งจะเป็นผลให้ขนาดของแรงดันเกินลดลงและยากต่อการระบุหน้าคลื่นบนระบบที่มีบัสแข็งแรง การตรวจจับโดยใช้วิธีวัดกระแสจะให้ผลดีกว่า

2.3.1 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง [17]

สายส่งกำลัง คือระบบที่เชื่อมต่อตัวนำจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งที่ไกลออกไปโดยทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสายส่งกำลังส่วนใหญ่จะเป็นชนิดสายส่งกำลังไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นสายส่งชนิดสองสายตัวนำ สามสายตัวนำ หรือสายเคเบิล มักถูกพิจารณาสมการในรูปสายส่งสองตัวนำ ที่เรียกว่า สมการโทรเลข (telegraph equation) ซึ่งถูกคิดค้นโดย โอลิเวอร์เฮเวอร์ (Oliver Heaviside) ในปี ค.ศ.1850-1925 เมื่อเขาทำงานในบริษัทโทรเลข โดยได้ตรวจสอบหาสาเหตุสัญญาณรบกวนในสายโทรศัพท์ เมื่อสายส่งส่วนหนึ่งถูกกำหนดด้วยความยาว dx และประกอบด้วยพารามิเตอร์ความต้านทาน (R) , ความนำไฟฟ้า (G) , ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และความจุไฟฟ้า (C) ในรูปแบบ

ปริมาณเปอร์ยูนิต ถูกทำให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาว dx คือ Rdx , Gdx , Ldx และ Cdx นอกจากนี้ในระบบสายส่งกำลังได้สร้างฟลักซ์ไฟฟ้า (ψ) และฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) เพื่อทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะใดขณะหนึ่ง $u(x,t)$, $i(x,t)$

$$d\psi(t) = u(x,t)Cdx \quad (2.14)$$

และ
$$d\phi(t) = i(x,t)Ldx \quad (2.15)$$

คำนวณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ในทิศทางไปข้างหน้าแกน x ด้วยระยะ dx

$$u(x,t) - u(x + dx, t) = -du(x,t) = -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx = (R + L \frac{\partial}{\partial t})i(x,t)dx \quad (2.16)$$

เมื่อขจัดพจน์ dx ทั้งสองข้างสมการจะได้สมการแรงดันไฟฟ้า คือ

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} - Ri(x,t) \quad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อต้องการหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ความนำไฟฟ้า (G) และความจุไฟฟ้า (C) สามารถประยุกต์ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

$$i(x,t) - i(x + dx, t) = -di(x,t) = -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx = (G + C \frac{\partial}{\partial t})u(x,t)dx \quad (2.18)$$

เมื่อขจัดพจน์ dx ทั้งสองข้างสมการจะได้สมการกระแสไฟฟ้าคือ

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx = -C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - Gu(x,t) \quad (2.19)$$

เครื่องหมายลบในสมการแสดงถึง เมื่อคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเดินทางในตัวนำในทิศทางไปข้างหน้าแกน x , $i(x,t)$ และ $u(x,t)$ จะมีขนาดแอมพลิจูดลดลงเมื่อความยาว x เพิ่มขึ้น จึงถูกแทนด้วยพารามิเตอร์

$$Z = R - L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.20)$$

และ
$$Y = G - C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (2.21)$$

เมื่อทำการอนุพันธ์อีกครั้งโดยเทียบกับ x จะได้สมการอนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

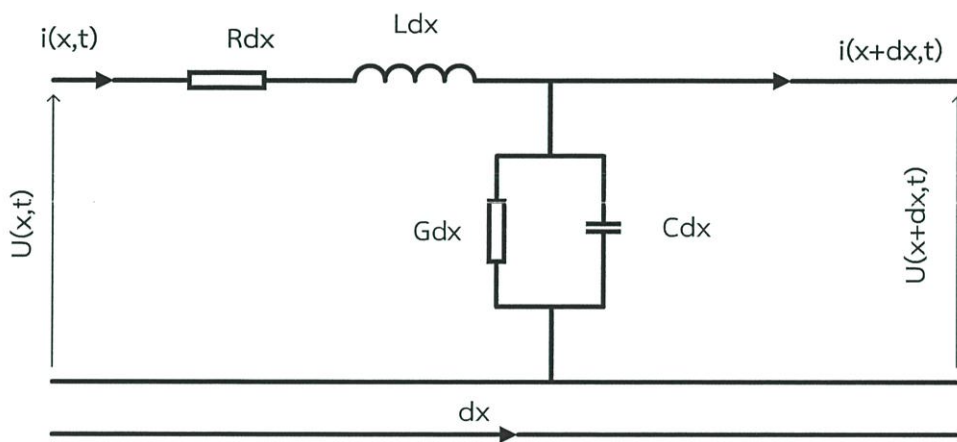
$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = -Y \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = YZi(x,t) = \gamma^2 i(x,t) \quad (2.22)$$

และ
$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = -Z \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = ZY u(x,t) = \gamma^2 u(x,t) \quad (2.23)$$

สมการดังกล่าว γ คือ ปริมาณเชิงซ้อน เรียกว่า ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (propagation constant)

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (2.24)$$

ซึ่ง α คือ ค่าคงที่การลดทอน (attenuation constant) มีผลต่อขนาดของคลื่นเดินทาง และ β คือ ค่าคงที่เฟส (phase constant) มีผลต่อมุมต่างเฟสของคลื่นเดินทาง



รูปที่ 2.10 แบบจำลองสายส่งกำลังเฟสเดียว [17]

สายส่งกำลังไฟฟ้าทั่วไปใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นหลัก แต่เพื่อง่ายต่อการการคำนวณและเข้าใจทฤษฎีคลื่นเดินทาง จึงสามารถใช้คลื่นเดินทางช่วงแรกของวงจรเดี่ยวมาคำนวณได้ โดยในกรณีความสูญเสียในสายส่งก็เช่นกัน เมื่อพิจารณาให้ความต้านทาน (R) ที่อนุกรมกันในสายส่งและความนำไฟฟ้า (G) ที่ขนานกันในสายส่ง มีค่าเป็นศูนย์ และความเหนี่ยวนำ (L) และความจุไฟฟ้า (C) เป็นค่าคงที่ จึงมีสมการสายส่งกำลังดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.25)$$

และ

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.26)$$

เนื่องจากพิจารณาในช่วงที่ไม่มีกระแสของสัญญาณและเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังนั้นจึงแทนค่า $u=Z_0 i$ ในสมการที่ 2.25 และ 2.26 จะได้

$$Z_0 \frac{\partial i}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.27)$$

และ

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -Z_0 C \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.28)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.27 หารโดยสมการที่ 2.28 จะได้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.29)$$

นั่นคือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของความสูญเสียในสายส่ง

เมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นเดินทางสามารถคำนวณได้จากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมดังนี้

$$u(x, t) - u(x + dx, t) = (Ldx) \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.30)$$

เมื่อ $u = Z_0 i$ จะได้

$$i(x, t) - i(x + dx, t) = \left(\frac{L}{Z_0} dx\right) \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.31)$$

จำกัดขอบเขต $\frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$ ด้วย $\frac{\partial i(x, t) - i(x + dx, t)}{\partial t}$ ได้ดังนี้

$$i(x, t) - i(x + dx, t) = \left(\frac{L}{Z_0} dx\right) \frac{\partial i(x, t) - i(x + dx, t)}{\partial t} \quad (2.32)$$

จะได้สมการความเร็วคลื่นเดินทาง คือ

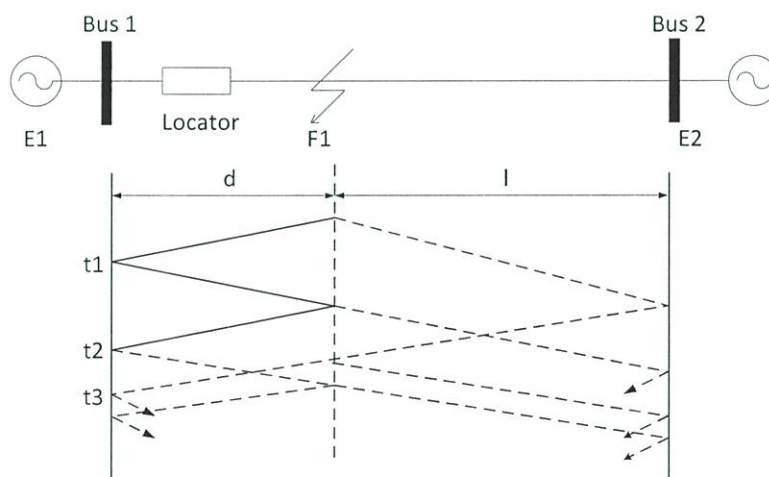
$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{Z_0}{L} v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.33)$$

2.3.2 หลักการทำงานของคลื่นเดินทาง

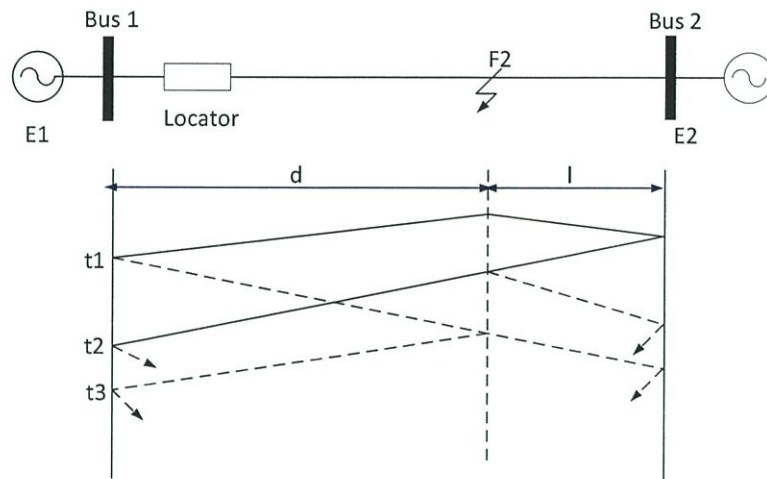
เป็นวิธีการอาศัยความต่างของเวลาขณะเกิดฟอลต์นั้นคือ เมื่อฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่ง สัญญาณฟอลต์ของแรงดันและกระแสจะเกิดเป็นคลื่นเดินทางและแพร่กระจายไปทั้งสองด้านของสาย จนกว่าจะพบกับจุดที่ไม่ต่อเนื่องหรือจุดเชื่อมต่อ เช่น บัสหรือจุดที่เกิดฟอลต์ ณ จุดนี้คลื่นส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าไปในส่วนที่เชื่อมต่อ เรียกว่า การหักเห และส่วนที่เหลือจะย้อนกลับเรียกว่า การสะท้อน ซึ่งการหักเหและการสะท้อนจะสร้างคลื่นเพิ่มขึ้นและกระจายผ่านไปยังระบบไฟฟ้า ค่าเริ่มต้นของการสร้างคลื่นเดินทางขึ้นกับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกินขึ้นทันทีของฟอลต์และประสิทธิภาพความต้านทานเส้นทางฟอลต์ โดยมี 2 แบบ

2.3.2.1 วิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว [18]

พิจารณาตำแหน่งการเกิดฟอลต์เป็น 2 กรณี คือ ฟอลต์ ที่ F1 และ F2 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับฟอลต์ที่ระยะไกลที่ตำแหน่ง F1 จะทำให้เกิดคลื่นเดินทางสะท้อนสองทิศทางคือไปด้านหน้าและหลัง โดยส่วนที่สะท้อนไปด้านหน้าจะเป็น t_1 และสะท้อนจากตำแหน่ง t_1 กลับมายังตำแหน่งหนึ่งที่เกิดฟอลต์และสะท้อนไปด้านหลังอีกคือ t_2 ส่วนกรณีที่ 2 เมื่อฟอลต์เกิดที่ระยะไกลที่ตำแหน่ง F2 จะระบุตำแหน่งสองครั้งแรกด้านหน้าคลื่นต่อเนื่องที่ t_1 และ t_2 เช่นเดียวกันแต่ t_2 เกิดจากการสะท้อนจากบัสด้านหลังมาบัสด้านหน้า ซึ่ง t_1 คือเวลาที่มาถึงของคลื่นเดินทางเริ่มต้นและ t_2 คือเวลาที่มาถึงของคลื่นเดินทางสะท้อนจากระยะไกลสิ้นสุดบัส 2 ดังนั้นระยะทางฟอลต์ (ข) สามารถคำนวณโดยใช้วิธีห้วงเวลาระหว่างเวลาที่มาถึงต่อเนื่องของคลื่นเดินทางและความเร็วการในการเดินทางของคลื่นที่สอดคล้องกันสำหรับฟอลต์ในครั้งแรก



(ก) เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งครั้งแรกของสายส่ง



(ข) เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งครึ่งหลังของสายส่ง

รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ด้วยวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว

สายส่งดังรูปที่ 2.11 (ก)

$$d = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (2.34)$$

สำหรับฟอลต์ระยะไกลดังรูป 2.11 (ข)

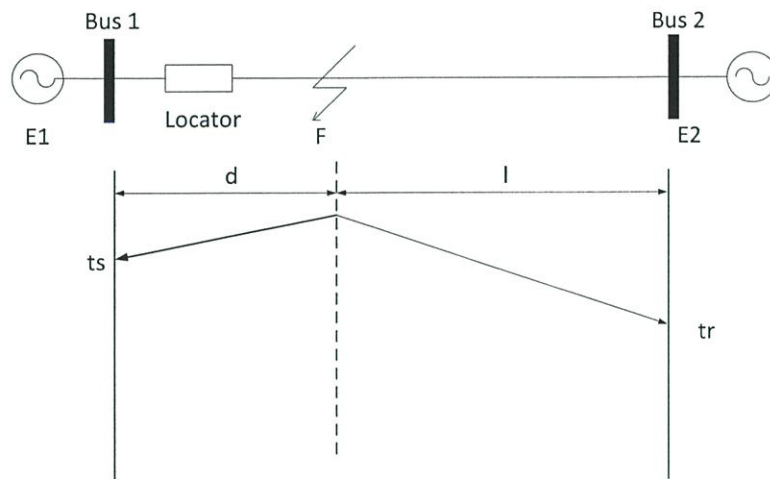
$$d = \frac{L - v(t_2 - t_1)}{2} \quad (2.35)$$

เมื่อ L คือ ความยาวสายส่ง

v คือ ความเร็วในการเดินทางของคลื่นซึ่งถือว่าเป็นค่าคงที่ในวิธีการระบุตำแหน่งฟอลต์โดยคลื่นเดินทาง

2.3.2.2 วิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งทั้งสองด้าน [19]

วิธีนี้จะมีหลักการคำนวณคล้ายกับวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว ที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือ เมื่อมีการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนสายส่งจะทำให้เกิดการสะท้อนจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปด้านหน้าและด้านหลังของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ โดยเวลาที่สัญญาณสะท้อนจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ไปด้านหน้าและทำการสะท้อนกลับเป็น t_1 ส่วน t_2 คือเวลาที่สัญญาณสะท้อนจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ไปด้านหลังและทำการสะท้อนกลับดังรูปที่ 2.12 นั่นคือจะใช้เวลาที่เกิดจากการสะท้อนกลับทั้งสองบ้สมาคิดหาตำแหน่งฟอลต์และไม่ต้องคำนึงถึงว่าฟอลต์จะเกิดที่ตำแหน่งระยะใกล้หรือระยะไกลเหมือนแบบวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งด้านเดียว



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ด้วยวิธีหาตำแหน่งฟอลต์จากปลายสายส่งทั้งสองด้าน

โดยสามารถคำนวณหาตำแหน่งได้ดังสมการ

$$d = \frac{L - v(t_r - t_s)}{2} \quad (2.36)$$

เมื่อ L คือ ความยาวสายส่ง

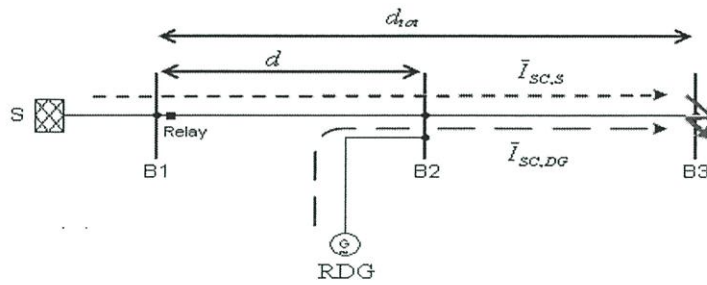
v คือ ความเร็วในการเดินทางของคลื่นซึ่งถือว่าเป็นค่าคงที่ในวิธีการระบุตำแหน่งฟอลต์โดยคลื่นเดินทาง

2.3.3 ผลกระทบจากพลังงานทดแทนต่อกระแสฟอลต์ [20]

ในการคำนวณหากระแสฟอลต์ที่มีฟีดเดอร์พลังงานทดแทนต่อร่วมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าหลักดังรูปที่ 2.13 กำหนดให้ฟีดเดอร์พลังงานทดแทนเชื่อมต่อกับระบบห่างจากแหล่งจ่ายระยะ d และเกิดฟอลต์สามเฟสที่ระยะปลายสุดของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ระยะทางที่มีความสัมพันธ์กับความยาวของสายส่งดังนี้

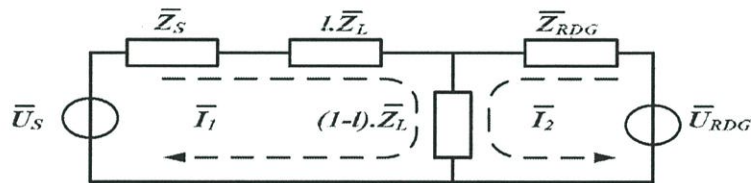
$$l = \frac{d}{d_{tot}} \quad (2.37)$$

เมื่อกำหนดให้ d คือระยะทางพลังงานทดแทนติดตั้งห่างจากแหล่งจ่าย และ d_{tot} คือความยาวของสายส่ง



รูปที่ 2.13 กระแสลัดวงจรสนับสนุนจากแหล่งจ่ายและพลังงานทดแทน

วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.13 แสดงดังรูปที่ 2.14 โดย Z_L คืออิมพีแดนซ์รวมของสาย, Z_{RDF} คือ อิมพีแดนซ์ของพลังงานทดแทน และ Z_s คืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและพลังงานทดแทนคือ U_s และ U_{RDG} ตามลำดับ



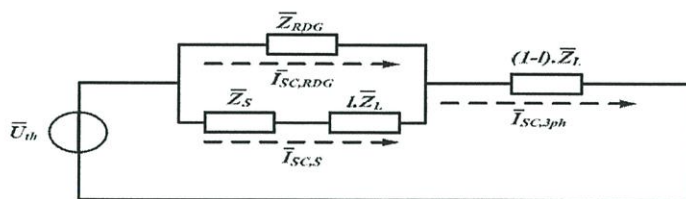
รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.13

จากกระแสไหลวน I_1 และ I_2 ประยุกต์ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับ U_s และ U_{RDG} ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_{RDG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_L & (1-l) \cdot Z_L \\ (1-l) \cdot Z_L & Z_{RDG} - (1-l) \cdot Z_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

เมื่อกำหนดให้ I_1 คือกระแสลัดวงจรสนับสนุนจากแหล่งจ่าย ($I_{sc,s}$) และ I_2 คือ กระแสลัดวงจรสนับสนุนจากพลังงานทดแทน ($I_{sc,RDG}$) โดยกระแสไฟฟ้าทั้งสองคือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรรวมของวงจร

เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร $I_{sc,s}$ และ $I_{sc,RDG}$ ของวงจรสมมูลย์เทวินินของระบบเป็นดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลย์เทวินิน

จากรูปที่ 2.15 จะได้อิมพีแดนซ์ของวงจรเทวินิน คือ

$$Z_{th} = \frac{(Z_s + l \cdot Z_L) \cdot Z_{RDG}}{(Z_s + l \cdot Z_L) + Z_{RDG}} + (1 - l) \cdot Z_L \quad (2.39)$$

เมื่อกำหนดให้ $Z_s = R_s + jX_s$ คืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย, $Z_{RDG} = R_{DG} + jX_{RDG}$ คืออิมพีแดนซ์ของพลังงานทดแทน, $Z_L = R_L + jX_L$ คืออิมพีแดนซ์รวมของสายส่ง และ l คือตำแหน่งของพลังงานทดแทนตามสมการที่ 2.39 และถือว่าค่า R_{RDG} และ R_s มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรสามเฟสสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_{SC,3ph} = \frac{U_{th}}{Z_{th}} \quad (2.40)$$

แทนที่สมการที่ 2.39 ในสมการที่ 2.40

$$I_{SC,3ph} = \frac{U_{th} \cdot (Z_s + l \cdot Z_L + Z_{RDG})}{[(Z_L \cdot Z_{RDG} + Z_s \cdot Z_{RDG} + Z_s \cdot Z_L) + l \cdot Z_L (Z_L - Z_s) - l^2 Z_L^2]} \quad (2.41)$$

กระแสไฟฟ้าสนับสนุนจากพลังงานทดแทน คือ

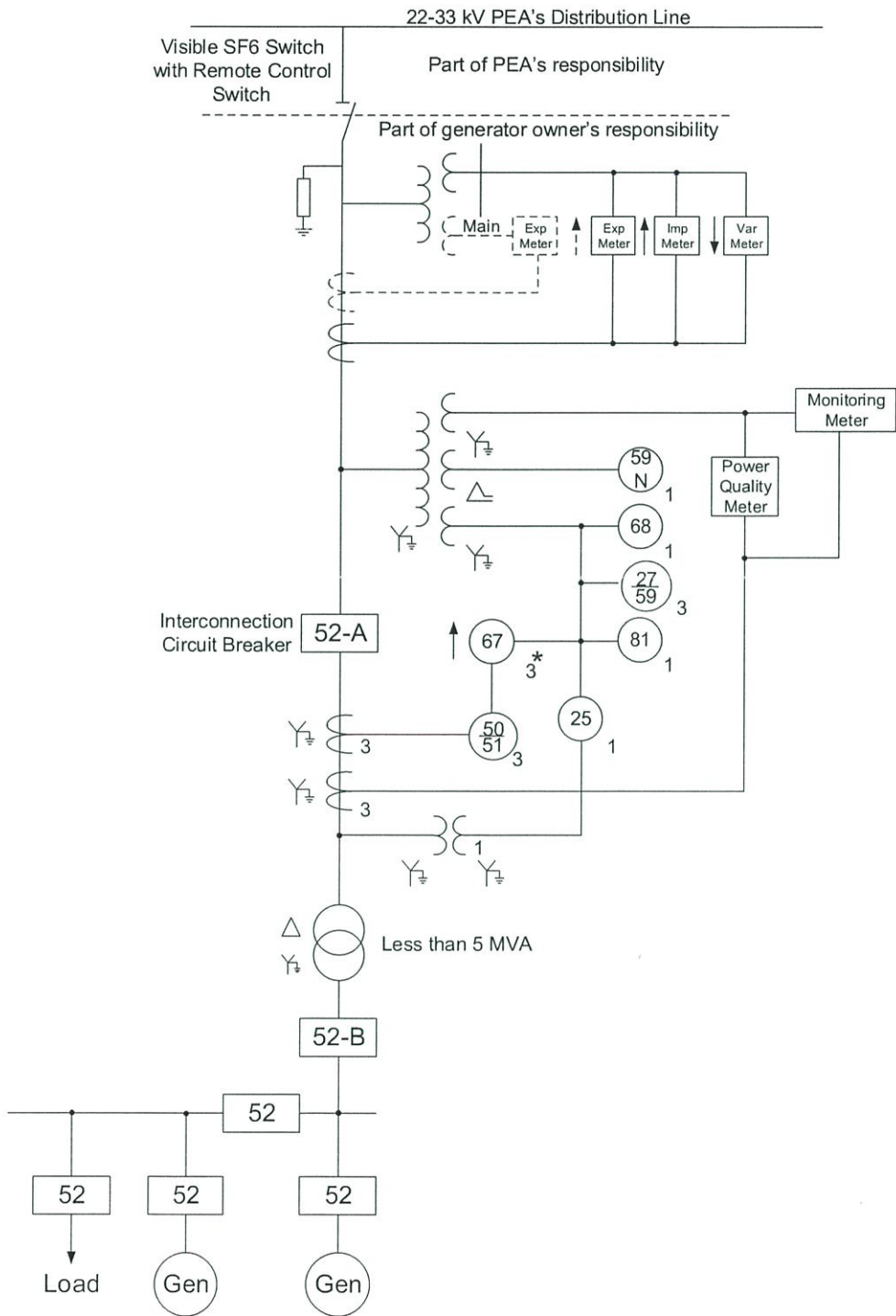
$$I_{SC,RDG} = \frac{Z_{RDG}}{(Z_{RDG} + l \cdot Z_L + Z_s)} \times I_{SC,3ph} \quad (2.42)$$

แทนที่สมการที่ 2.41 ในสมการที่ 2.42 จะได้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรสนับสนุนจากพลังงานทดแทน คือ

$$I_{SC,RDG} = \frac{U_{th} \cdot Z_{RDG}}{[(Z_L \cdot Z_{RDG} + Z_s \cdot Z_{RDG} + Z_s \cdot Z_L) + l \cdot Z_L (Z_L - Z_s) - l^2 Z_L^2]} \quad (2.43)$$

2.4 การเชื่อมโยงระบบและอุปกรณ์ป้องกันในระบบผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP) [21]

รูปแบบการเชื่อมโยงระบบและอุปกรณ์ป้องกันสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กระบบ 22-33 kV ปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไม่เกิน 3 MW



รูปที่ 2.16 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ และอุปกรณ์ป้องกัน

รีเลย์ป้องกัน (Protection Relay) ที่ใช้กับผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยหรือแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ต้องการขนานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ มีขนาดกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าไม่เกิน 3 MW ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV ใช้เครื่องหมายวงกลมและมีตัวเลขและอักษรอยู่ภายในซึ่งเป็นสัญลักษณ์ใช้แทน Relay ต่าง ๆ ดังนี้

- Synchronizing Check Relay (25)

เป็นรีเลย์ที่ใช้ช่วยในการปิดวงจรกลับร่วมกับ Recloser โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ด้านของเบรกเกอร์ ตัวที่ถูก Trip ว่าเหมาะสมในการปิดวงจรหรือไม่ สิ่งที่ต้องตรวจสอบคือ

1. ขนาดของแรงดันทั้ง 2 ด้าน
2. มุมเฟสของแรงดันทั้ง 2 ด้าน
3. ความถี่ของแรงดันทั้ง 2 ด้าน

ถ้าคุณสมบัติทั้ง 3 อยู่ใน Limit ที่กำหนดไว้ก็จะให้คำสั่งไปให้ Recloser เพื่อปิดวงจรเบรกเกอร์ต่อไป ในการตรวจสอบคุณสมบัติดังกล่าว จะทำก็ต่อเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ด้านของเบรกเกอร์เท่านั้น เรียกว่า Synchrocheck ในกรณีที่ด้านหนึ่งไม่มีแรงดัน ตัวรีเลย์ Synchrocheck จะทำงานในโหมด Voltage Check แทนซึ่งจะตรวจสอบเฉพาะขนาดของแรงดันอย่างเดียวเท่านั้น ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขก็จะให้คำสั่งเช่นกัน

- Undervoltage and Overvoltage Relay (27/59)

รีเลย์แรงดันสูงเกินและต่ำเกิน (Under and Over Voltage Relay) ทำหน้าที่ตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบว่าอยู่ในช่วงพิคัดที่กำหนดหรือไม่ ถ้าหากว่ามีแรงดันสูง (Over Voltage) หรือต่ำกว่าที่กำหนด (Under Voltage) รีเลย์นี้จะสั่งปลดเบรกเกอร์เพื่อแยกผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบ ลักษณะของรีเลย์แรงดันไฟฟ้าสูงเกินและต่ำเกิน ทำหน้าที่ตรวจสอบแรงดันสูงเกินและต่ำเกิน ควรตั้งค่าได้ตามพิคัดไม่น้อยกว่า + 10 % และ - 15 % พร้อมทั้งสามารถหน่วงเวลาแบบคงที่ หรือเวลาผกผันได้ ทั้งนี้เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า

- Phase Overcurrent Relay (50/51)

การทำงานของรีเลย์นี้คือ คือจะมีคำสั่งเมื่อมีกระแสเข้าตัวรีเลย์ เกินค่าที่ตั้งไว้แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. Instantaneous O/C Relay (50)

เป็นรีเลย์ที่ทำงานเมื่อกระแสเกินค่าที่กำหนดไว้ และให้ทำคำสั่งโดยไม่มีการหน่วงเวลา โดยทั่วไปเวลาดำเนินการอยู่ในช่วงประมาณ 50-100 ms ใช้ป้องกันอุปกรณ์ทั่วไป เช่น Motor , Transformer ที่อยู่ปลายทางไม่จำเป็นต้องรอเวลาเพื่อ Co-ordinate กับรีเลย์ตัวอื่น

2. Time Delay O/C Relay (51)

เมื่อกระแสเกินค่าที่กำหนดไว้ จะมีการหน่วงเวลาตามที่ตั้งไว้ก่อนให้คำสั่งออกมาสามารถแบ่งได้เป็น

2.1 Definite or Fix Time Delay (เวลาไม่ขึ้นกับกระแส)

2.2 Inverse Time Delay (เวลาแปรผกผันกับกระแส)

นอกจากนี้ใน Inverse Time Delay ยังมีกราฟลักษณะแบบต่างๆ ด้วย เช่น Normal , Standard Inverse, Extremely Inv., Very Inv. เป็นต้น

- Zero sequence Overvoltage Relay (59N)

ตรวจสอบการเกิดกระแสลัดไฟฟ้าวงจรด้านแรงสูงหรือในระบบของการไฟฟ้า โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กด้านที่ต่อเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าจะต่อแบบเดลต้า ทำให้เมื่อเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินในระบบของการไฟฟ้า เบรกเกอร์ของการไฟฟ้าจะเปิดวงจรออก ส่วนรีเลย์ตรวจจับการเกิดฟอลต์กระแสเกินลงดิน เบรกเกอร์ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจะมองไม่เห็นการเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดินที่เกิดขึ้น ดังนั้นรีเลย์นี้จะทำหน้าที่ตรวจรับรู้การลัดวงจรดังกล่าว แล้วปลดเบรกเกอร์ที่ต่อเชื่อมโยงกับระบบของการไฟฟ้าออก ดังนั้นรีเลย์ตรวจรับรู้ค่าแรงดันลำดับศูนย์สูงเกิน (Zero Sequence Over Voltage) จึงเป็นรีเลย์วัดแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยจะรับสัญญาณมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงทดแรงดันที่มีขดลวดทุติยภูมิต่อวงจรแบบเดลต้าเปิด

- Phase Directional Overcurrent Relay (67)

เป็นรีเลย์ป้องกันกระแสเกินที่มีทิศทาง สามารถเลือกทิศทางการเปิดวงจรได้ เมื่อฟอลต์อยู่ด้านใด หลักการทำงานคือ การเปรียบเทียบมุมทางไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าที่เข้ามากับปริมาณที่มีทิศทางคงที่เรียกว่า Polarizing Quantity (ซึ่งอาจเป็นกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าก็ได้) ถ้ากระแสไฟฟ้าที่เข้ารีเลย์ ทำมุมกับ Polarizing Quantity ตามเงื่อนไขก็สามารถทริบได้ โดยค่ากระแสไฟฟ้าต้องมากกว่าค่า Pick Up ของรีเลย์ตัวนั้น

- Voltage Relay Block Closing Circuit while Deenergized (68)

ตรวจสอบแรงดันของระบบการไฟฟ้าว่ามีไฟอยู่หรือไม่ ถ้าไม่มีไฟจากการไฟฟ้าจ่ายมาให้ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจะไม่สามารถสั่งสับเบรกเกอร์ขนานระบบได้ ทั้งนี้เนื่องจากการไฟฟ้าอาจจะทำการบำรุงรักษาระบบอยู่ หรือเกิดความผิดปกติในระบบของการไฟฟ้า ลักษณะของรีเลย์เป็นรีเลย์วัดแรงดันต่ำเกิน โดยจะใช้หน้าสัมผัสทำงานเมื่อมีแรงดันมากกว่าร้อยละ 90 ทำให้มีการต่อวงจรสั่งปิดเบรกเกอร์ในการขนานระบบ แต่อุปกรณ์ที่จะทำ การสั่งปิดเบรกเกอร์ เพื่อขนานระบบ คือ Synchronizing Check Relay

- Underfrequency and Overfrequency Relay (81)

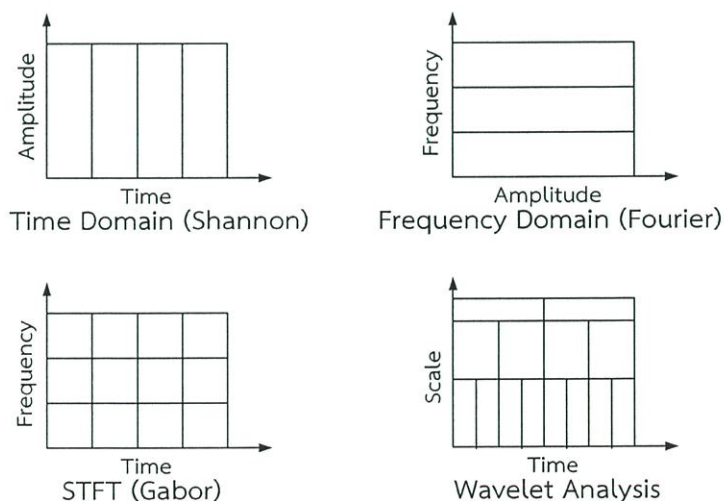
ตรวจสอบความถี่ของระบบไฟฟ้าว่าอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ ถ้าหากความถี่มีการเปลี่ยนแปลงมากเกินกว่าช่วงที่กำหนดไว้ จะมีการเตือนหรือสั่งปลดเบรกเกอร์ที่ทำ การเชื่อมต่อกับผู้ผลิต

ไฟฟ้ารายเล็ก ลักษณะของรีเลย์ควรตั้งค่าความถี่สูงเกินและต่ำเกินได้ด้านละ 2 ช่วง ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นสัญญาณเตือนและสั่งปลดเบรกเกอร์ที่ทำ การเชื่อมต่อกับผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออก

2.5 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)

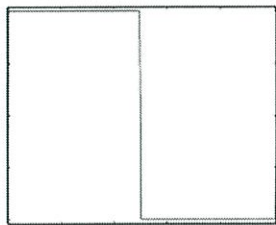
คลื่นหรือสัญญาณในทางคณิตศาสตร์มักจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในโดเมนเวลา การวิเคราะห์สัญญาณมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การแปลงฟูริเยร์ก็เป็นการวิเคราะห์สัญญาณแบบหนึ่งโดยการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของไซน์หรือโคไซน์ การแปลงเวฟเล็ตก็เป็นการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis) โดยทฤษฎีเวฟเล็ตสามารถนำมาประยุกต์เพื่ออธิบายลักษณะของสิ่งต่างๆหรือระบบใดๆได้ เช่น การบีบอัดขนาดรูปภาพ การรบกวนทางไฟฟ้า การวิเคราะห์การมองเห็น การทำนายการเกิดแผ่นดินไหว การสั่นของเครื่องยนต์ การวิเคราะห์เสียงพูดของมนุษย์ เป็นต้น

การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ซึ่งมีพัฒนาการมาจากการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform) การแปลงฟูริเยร์ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform) และได้มีการพัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากขึ้น สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์น้อยลงในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์กว้างขึ้น ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณที่เป็นภาวะชั่วคราว และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีประโยชน์มากในงานทางด้านประมวลผลสัญญาณ

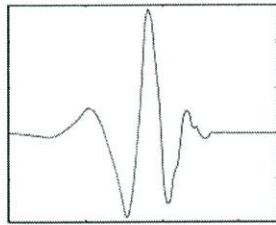


รูปที่ 2.17 ระยะเวลาและความถี่สำหรับการแปลงสัญญาณแบบต่างๆ [22]

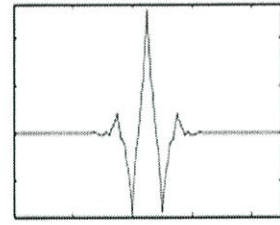
หลักการและกระบวนการแปลงเวฟเล็ดสามารถอธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบไปด้วยสัญญาณเฉพาะหลายๆสัญญาณมารวมกันเป็นหนึ่งสัญญาณ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นรูปคลื่นเล็กๆ เรียกว่า เวฟเล็ด ซึ่งจะเป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ ดังรูปที่ 2.18



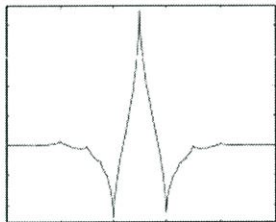
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Haar



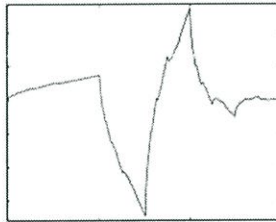
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Daubechies



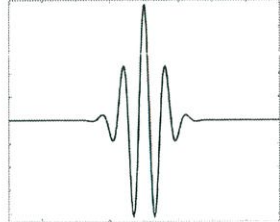
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Biorthogonal



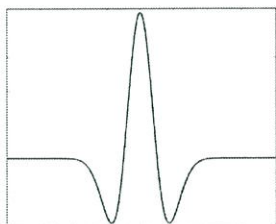
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Coiflets



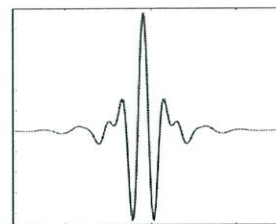
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Symlets



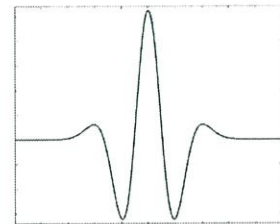
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet



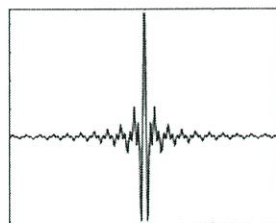
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Mexican Hat



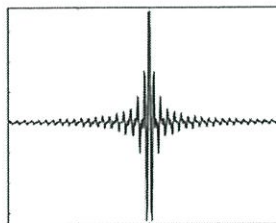
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Meyer



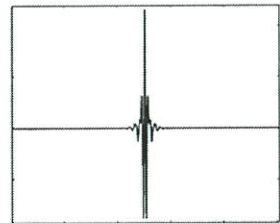
คลื่นเวฟเล็ดแบบ Gaussian



คลื่นเวฟเล็ดแบบ Shannon



คลื่นเวฟเล็ดแบบ Frequency B-Spline



คลื่นเวฟเล็ดแบบ DMeyer

รูปที่ 2.18 ลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบต่างๆ

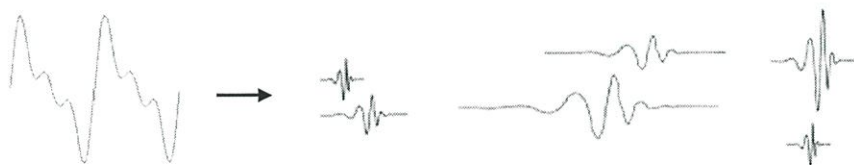
เมื่อนำสัญญาณเฉพาะหลายๆสัญญาณมารวมกันเป็นหนึ่งสัญญาณเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใดๆโดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ต ต้นกำเนิดเรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันจะอยู่ภายในเซตของเวฟเล็ตนี้ โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันจะเกิดจากการสเกล (Scaling) และการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting) กำหนดให้ เป็น a และ b ตามลำดับ ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่ง จะสามารถเขียนเป็นสมการของเวฟเล็ตได้ ดังนี้

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.44)$$

- เมื่อ $\psi(t)$ คือ ฟังก์ชันของเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับสเกลและเลื่อนตำแหน่ง
- a คือ พารามิเตอร์ของการปรับสเกล (Scaling)
- b คือ พารามิเตอร์ของการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

พารามิเตอร์ $\frac{1}{\sqrt{a}}$ ในสมการเป็นการทำนอร์มัลไลซ์ (Normalize) เพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกลแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่

เมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเหมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่หลายๆ สัญญาณที่มีการปรับสเกลและตำแหน่งที่ต่างกันไป ซึ่งรูปแบบการแตกสัญญาณให้เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่หลายๆ สัญญาณ เรียกว่า การกระจายเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) ในทางตรงกันข้ามการนำส่วนประกอบย่อยๆ ของสัญญาณมารวมกลับให้เป็นสัญญาณเดิม เรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) ซึ่งทำได้โดยการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform)



รูปที่ 2.19 การแปลงเวฟเล็ตเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่หลายๆสัญญาณ [22]

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ต โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งการแปลงได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

2.5.1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณในทุกๆค่าของความถี่ โดยอาศัยการวิเคราะห์จากคุณสมบัติของการแปลงเวฟเลตด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ a และ b ทำให้ในองค์ประกอบความถี่สูงจะมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบ ในองค์ประกอบความถี่ต่ำจะมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้าง ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะเป็นการแก้ไขข้อด้อยของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงแบบฟูริเยร์ช่วงเวลาสั้นได้ และเป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\text{CWT}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.45)$$

เมื่อ $f(t)$ คือ สัญญาณที่ทำการแปลง

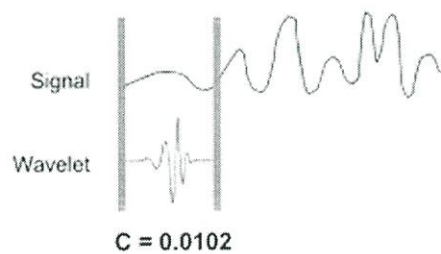
$\psi(t)$ คือ เวฟเลตแม่ (Mother Wavelet)

a คือ พารามิเตอร์ของการปรับสเกล (Scaling)

b คือ พารามิเตอร์ของการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

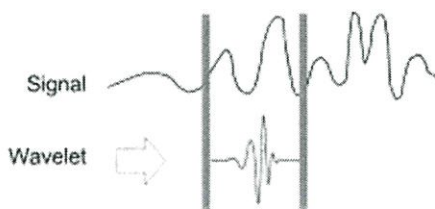
กระบวนการของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. นำเวฟเลตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก
2. คำนวณสัมประสิทธิ์ (C) ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเลตแม่ในสเกลแรกและสัญญาณในส่วนแรก ค่าสัมประสิทธิ์ (C) จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปร่างเวฟเลตแม่



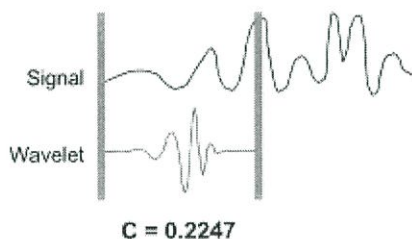
รูปที่ 2.20 การแปลงเวฟเลตขั้นตอนที่ 1 และ 2 [22]

3. เลื่อนตำแหน่งการวิเคราะห์ไปทางด้านขวา และทำขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำ จนกระทั่งครอบคลุมช่วงสัญญาณทั้งหมด จะได้การแปลงเวฟเลตในสเกลแรก



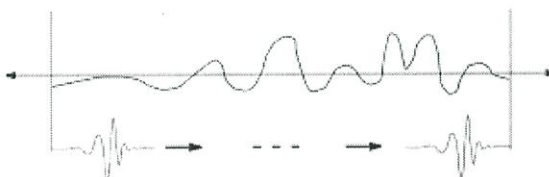
รูปที่ 2.21 การแปลงเวฟเล็ตขั้นตอนที่ 3 [22]

- เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 อีกครั้ง



รูปที่ 2.22 การแปลงเวฟเล็ตขั้นตอนที่ 4 [22]

- ทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 อีกครั้ง จนกระทั่งครบทุกสเกล



รูปที่ 2.23 การแปลงเวฟเล็ตขั้นตอนที่ 5 [22]

จากขั้นตอนทั้ง 5 ขั้นตอนของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) จะได้ผลจากการวิเคราะห์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของแต่ละค่าการปรับสเกลและทุกตำแหน่งของการเลื่อนสัญญาณ ซึ่งจะให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดี เนื่องจากการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องจึงต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างมากและผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความซ้ำซ้อนเกินความจำเป็น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาการแปลงเวฟเล็ต เป็นการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

2.5.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเป็นการแปลงเวฟเล็ตที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยการปรับรูปแบบการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมีทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis: MRA)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้โดยการนำสัญญาณเล็กๆที่มีการปรับค่าตามสเกล a และปรับค่า b หลายๆ ตำแหน่งมารวมกัน เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณทั้งหมดมารวมกันแล้วจะทำให้ได้สัญญาณต้นแบบดั้งเดิมขึ้นมาซึ่งเป็นสัญญาณอินพุท หลักการในการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดนั้น สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์

สเปซเวกเตอร์ (Space Vector) คือ สเปซของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณย่อยๆ ที่เรียกว่า ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis Function) กำหนดให้ V คือ สเปซเวกเตอร์ และ j คือ ระดับความละเอียดของจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานที่รวมกันเป็นฟังก์ชัน ฟังก์ชันนี้ เรียกว่า ฟังก์ชันสเกลลิง (Scaling Function) กำหนดให้ $\phi(t)$ คือ ฟังก์ชันสเกลลิง ที่มีความละเอียด j ภายในสเปซ V_j

ถ้า j มีค่าสูงขึ้นจะแสดงถึงระดับความละเอียดที่สูงขึ้นและแสดงถึงจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานที่มาก แต่การที่ต้องใส่ฟังก์ชันพื้นฐานที่มากลงในสเปซที่มีช่วงเวลาจำกัด จะทำให้ฟังก์ชันพื้นฐานแต่ละฟังก์ชันมีช่วงเวลาแคบ ซึ่งหมายถึง ฟังก์ชันพื้นฐานมีความถี่สูงทำให้สัญญาณมีความละเอียดสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้า j มีค่าต่ำจะมีฟังก์ชันพื้นฐานน้อยทำให้ช่วงเวลาของฟังก์ชันพื้นฐานแต่ละฟังก์ชันมีช่วงเวลาที่กว้างขึ้น ดังนั้นจะพบว่า การปรับระดับความละเอียดลดลงมาหนึ่งระดับฟังก์ชันพื้นฐาน ($j-1$) จะมีความถี่ลดลงครึ่งละ 2 เท่าของระดับความละเอียดเดิม (j) โดยเมื่อใช้คุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดแล้ว จะสามารถวิเคราะห์สัญญาณ $f(t)$ ที่อยู่สเปซระดับความละเอียด j ใดๆ ได้ดังนี้

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) \quad (2.46)$$

สามารถปรับระดับความละเอียดในสเปซใดๆ ได้ดังนี้

$$\phi_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j t - k) \quad ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (2.47)$$

เมื่อ c_k^j คือ สัมประสิทธิ์จากการปรับระดับความละเอียด j ที่ตำแหน่ง k ใดๆ

J คือ ระดับความละเอียด โดยค่าของ j จะอยู่ในเซตของจำนวนเต็ม (\mathbb{Z})

k คือ ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณ โดยค่าของ k จะอยู่ในเซตของจำนวนเต็ม(Z)

การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงไปอีก จะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่ในอีกสเปซหนึ่ง เรียกสเปซนี้ว่า สเปซของเวกเตอร์เวฟเล็ต (Wavelet Vector Space : W^j) ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่เรียกว่า ฟังก์ชันเวฟเล็ต (Wavelet Function : $\psi(t)$) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\psi(t)_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (2.48)$$

กำหนดให้ $g_j(t)$ เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐาน ($\psi(t)_{j,k}$) ภายในสเปซเดียวกัน มารวมกันเป็นสัญญาณใดๆ จะได้

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (2.49)$$

เมื่อ d_k^j คือ สัมประสิทธิ์จากการปรับระดับความละเอียด j ที่ตำแหน่ง k ใดๆ

กำหนดให้ $V_{j+1} = W_j + V_j$ หรืออาจกล่าวได้ว่า W_j เป็นส่วนต่างของ V_j และ V_{j+1} ดังนั้น เมื่อแตกสัญญาณ $g_j(t)$ ออกให้อยู่ในรูปสเปซ V_0 ได้ดังนี้

$$V_0 = V_{-1} + W_{-1} \quad (2.50)$$

$$V_0 = V_{-2} + W_{-2} + W_{-1} \quad (2.51)$$

$$V_0 = V_{-3} + W_{-3} + W_{-2} + W_{-1} \quad (2.52)$$

เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นอาจเขียน $cA_j(t)$ แทน V_j และ $cD_j(t)$ แทน W_j ได้เป็น

$$f(t) = cA_1(t) + cD_1(t) \quad (2.53)$$

$$f(t) = cA_2(t) + cD_2(t) + cD_1(t) \quad (2.54)$$

$$f(t) = cA_3(t) + cD_3(t) + cD_2(t) + cD_1(t) \quad (2.55)$$

เมื่อ $cD_j(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนละเอียดของระดับที่ j

$cA_j(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนประมาณของระดับที่ j

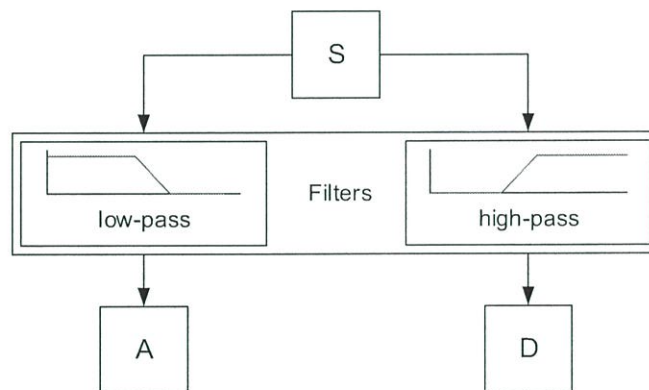
รูปแบบของการแตกกระจายสัญญาณ $f(t)$ จนถึงระดับความละเอียดที่ j ภายในสเปซ V_j ในรูปของสัมประสิทธิ์ส่วนละเอียดและสัมประสิทธิ์ส่วนประมาณในระดับความละเอียดต่างๆ กัน ซึ่งกระบวนการนี้เป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ต ที่เรียกว่า การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) ในการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดโดยการเปลี่ยนแปลงสเกลในการ

วิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า จะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยซึ่งสามารถอธิบายหลักการ ทำงานได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณในลักษณะฟิลเตอร์แบงค์

2.5.2.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

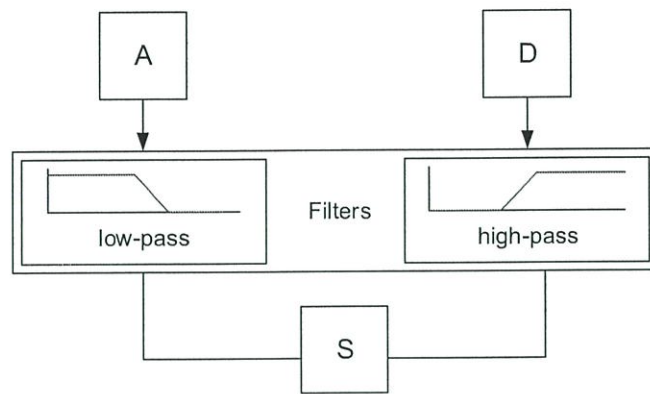
การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณใช้หลักการแยกสัญญาณต้นแบบออกเป็น 2 ช่องสัญญาณ (two channel filter banks) หรือแยกสัญญาณอินพุตออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีความถี่ต่ำและส่วนที่มีความถี่สูง โดยจะใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) สำหรับแยกองค์ประกอบส่วนที่มีความถี่ต่ำ และใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) สำหรับแยกองค์ประกอบส่วนที่มีความถี่สูง โดยสัญญาณที่ได้มานั้นจะผ่านอัตราสุ่มลง (Down Sampling) ด้วย 2 ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ลดลงครึ่งหนึ่ง ในการวิเคราะห์แต่ละขั้นตอนโดยสรุปคือ เมื่อนำสัญญาณต้นแบบมาผ่านการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยแล้ว จะทำให้สัญญาณต้นแบบถูกแยกองค์ประกอบด้วยตัวกรองความถี่สูง และตัวกรองความถี่ต่ำ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะถูกลดอัตราสุ่มครึ่งหนึ่งทำให้ได้สัญญาณเป็น 2 ส่วน คือ

- สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง เรียกว่า Detail : D
- สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ เรียกว่า Approximation : A



รูปที่ 2.24 การแยกสัญญาณด้วยตัวกรองแบบสองช่องสัญญาณ [22]

ในทางกลับกันสามารถวิเคราะห์เพื่อสร้างสัญญาณกลับแบบสองช่องสัญญาณ โดยการนำส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูงมารวมกันเป็นสัญญาณเดิม



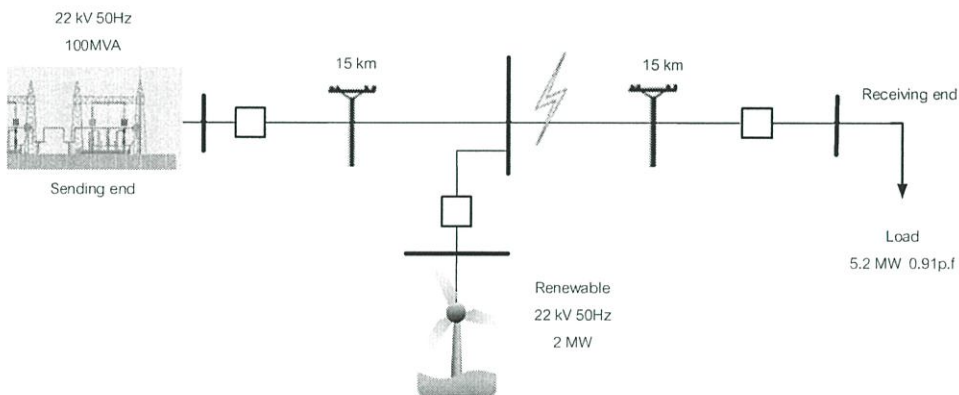
รูปที่ 2.25 การแปลงกลับสัญญาณด้วยตัวกรองแบบสองช่องสัญญาณ [22]

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลอง

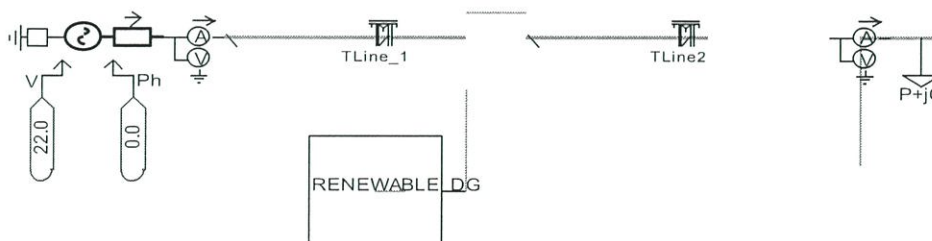
3.1 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC จากสถานีไฟฟ้า (ด้านส่ง) ไปยังภาระไฟฟ้าขนาด 5.2 เมกกะวัตต์ (ด้านรับ) ระยะทาง 30 กิโลเมตร โดยมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนติดตั้งอยู่ระหว่างด้านรับและด้านส่ง มีส่วนช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดผู้ใช้ ซึ่งหากเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อร่วมจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสนับสนุนฟอลต์ ดังนั้นการตรวจจับและระบุตำแหน่งฟอลต์ควรทำได้โดยเร็ว เพื่อซ่อมบำรุงและแก้ไขต่อไป



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวในการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม

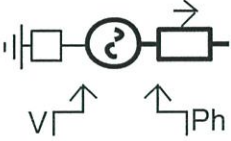
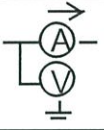
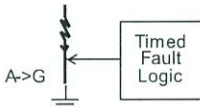


จากไดอะแกรมเส้นเดียวในการจำลองระบบฯ สามารถออกแบบวงจรจริงที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรจริงที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม

จากรูปที่ 3.2 วงจรจริงที่ใช้ในการจำลองระบบฯ ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เป็นวงจรระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างง่ายวงจรเดียวที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนต่อรวม ประกอบด้วยด้านส่ง (สถานีไฟฟ้า) , ด้านพลังงานทดแทน และด้านรับ (โหลดผู้ใช้) ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรมีดังนี้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

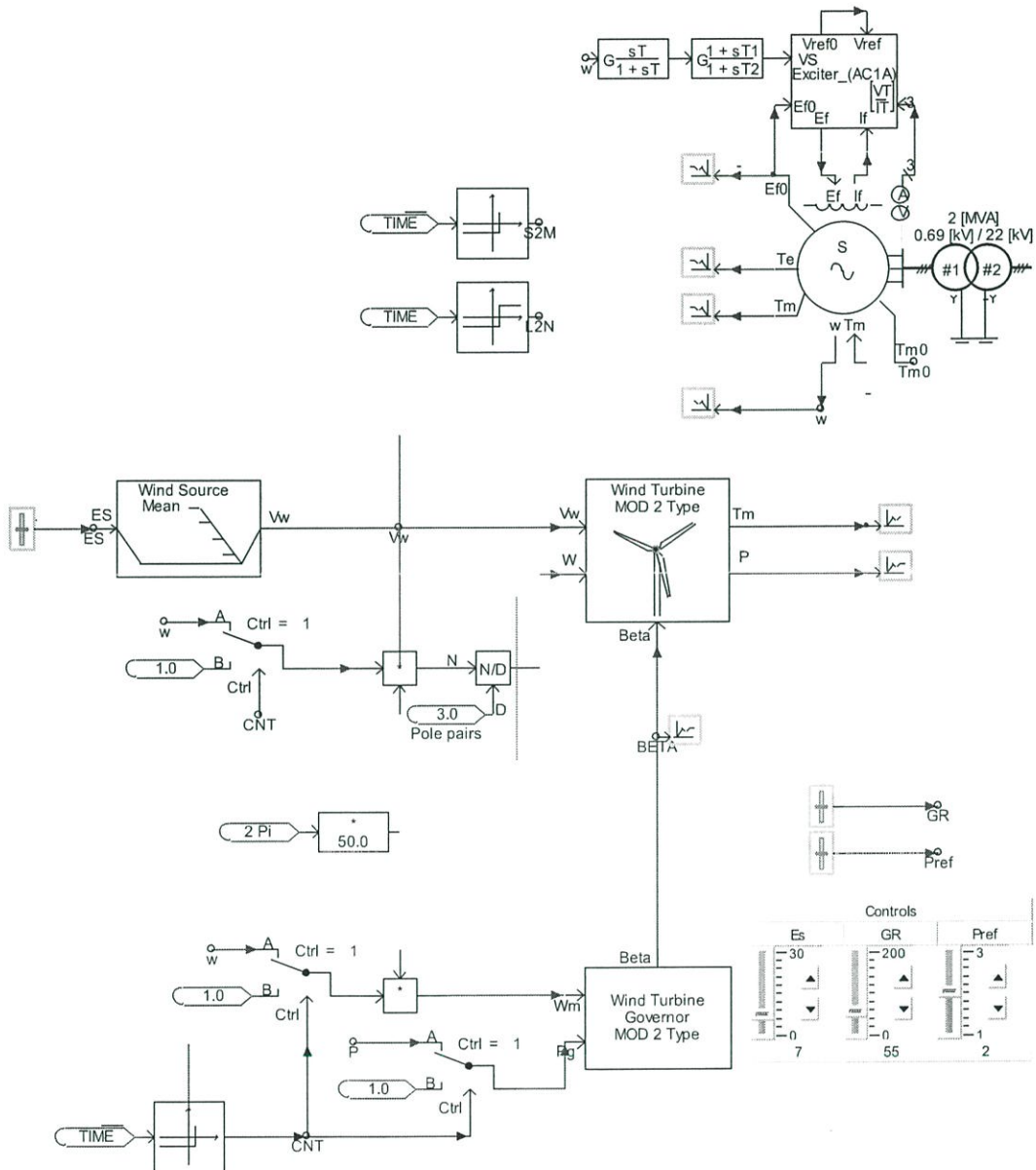
ชื่ออุปกรณ์	รูปอุปกรณ์ในการจำลอง	ค่าอธิบาย
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (Three Phase Voltage Source)		Base MVA = 100 MVA Base Voltage= 22 kV Base Frequency=50Hz Positive sequence Impedance= $3.177 \angle 72.172 \Omega$ Zero sequence Impedance= $1.223 \angle 89.999 \Omega$
มัลติมิเตอร์ (Multimeter)		Base MVA = 1 MVA Base Voltage = 1 kV Frequency = 50 Hz
Three Phase Fault		ใช้กำหนดชนิดฟอลต์ และเวลาเกิดฟอลต์
สายส่งเหนือศีรษะ (Overhead Line)		ชนิดของสาย= SAC ความยาวของสายส่ง= 30 Km จำนวนสายตัวนำ= 3 รัศมีภายนอก= 7.99 mm ความต้านทานกระแสดตรง= 0.164 Ω /Km ระยะหย่อน= 0.92 m การวางสายไฟฟ้าเป็นไปตามข้อกำหนด กฟภ.
โหลดผู้ใช้ (Fixed Load)		กำลังไฟฟ้าจริง= 5.2 MW กำลังไฟฟ้าเสมือน= 2.3 MVAR ระดับแรงดัน= 22 KV

3.2 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้ในการจำลอง มีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องจักรกลไฟฟ้า , กังหันลมไฟฟ้า , ชุดควบคุมเกอเวเนออร์ , แหล่งกำเนิดลม , ระบบควบคุมการกระตุ้น และ หม้อแปลงไฟฟ้า เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ โดยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ ได้อ้างอิงจาก Geoho 2MW (GHFD87-2000/II,GHFD93-2000/III) โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

ผู้ผลิต	Geoho Energy Technology Co.,Ltd	
พิกัดกำลังไฟฟ้า		2 MW
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด		87/93 m
พิกัดความเร็วลม		13 m/s
จำนวนใบพัด		3 ใบพัด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส		
	กำลังไฟฟ้าพิกัด	2.2 MW
	พิกัดแรงดันไฟฟ้า	690 V
	พิกัดกระแสไฟฟ้า	1840 A
	ความถี่	50 Hz
	จำนวนขั้ว	6 ขั้ว
	ความเร็วพิกัดกำลังไฟฟ้า	1200 rpm

การทำงานของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในรูปที่ 3.3 สามารถแบ่งออกเป็น 2 สถานะการทำงาน คือ สถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว กล่าวคือในสถานะชั่วคราวเริ่มจากอุปกรณ์กังหันลมไฟฟ้า (Wind Turbine) รับค่าความเร็ว w (สมการ $speed = \frac{120f}{P}$) และเกอเวเนออร์ เพื่อส่งค่าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบควบคุมการกระตุ้น (AC exciter) ก็จะรับค่าแรงบิดและความเร็ว w นำมาคำนวณเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ขดลวดสนาม ตามมาตรฐาน IEEE Std 421.5 จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 6 วินาที ระบบจะเริ่มเข้าสู่สถานะคงตัว ตัวกำหนดความเร็วลม (Wind source) สามารถจ่ายความเร็วลมเฉลี่ยแก่กังหันลมไฟฟ้าเพื่อผลิตแรงบิดได้ด้วยตนเอง จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนออกมาได้อย่างคงที่เข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 2 MVA 0.69 kV/22kV ต่อไป



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

จากรูปที่ 3.3 วงจรจริงที่ใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งเป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดความเร็วลมคงที่โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2 MW ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรมีดังนี้

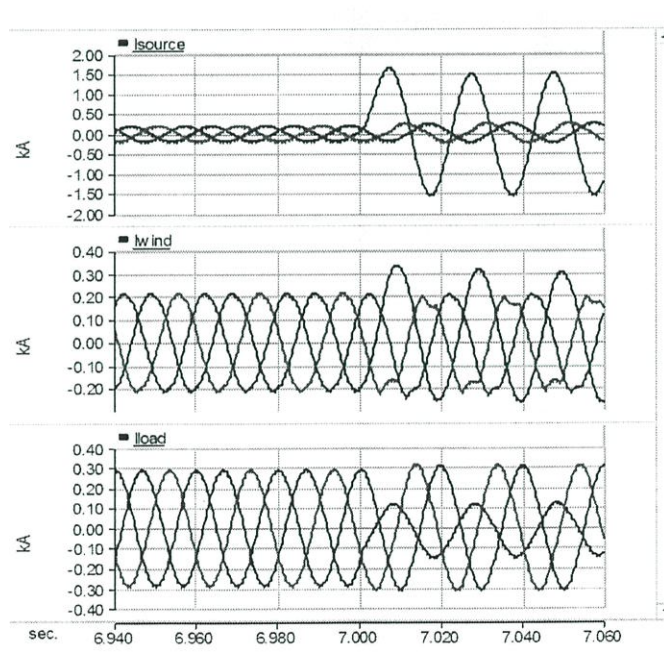
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบพลังงานลม

ชื่ออุปกรณ์	รูปอุปกรณ์ในการจำลอง	คำอธิบาย
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine)		อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยขดลวดแอมแปร์จำนวน 2 ขดลวดในแกน q สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแบบพันรอบขดลวดและชนิดขั้วยื่น ความเร็วรอบถูกควบคุมโดยความเร็ว w หรือทอร์ค T_m ที่ป้อนเข้าอย่างใดอย่างหนึ่ง <ul style="list-style-type: none"> - พิกัดแรงดันต่อเฟส 0.398 kV - พิกัดกระแส 1.840 kA - ความถี่ 50 Hz
ระบบควบคุมการกระตุ้น (AC Exciters)		ระบบควบคุมการกระตุ้นเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่จ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสนามให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ประกอบด้วย Power source unit , Regulator controller circuit และอุปกรณ์ป้องกัน ตามมาตรฐาน IEEE Std 421.5
กังหันลมไฟฟ้า (Wind Turbine)		อุปกรณ์จำลองระบบทางกลของกังหันลมไฟฟ้า 2 และ 3 ใบพัดอย่างง่าย โดยรับค่าความเร็วลม V_w , ความเร็วรอบ w และมุมเฟินใบพัด เพื่อนำมาคำนวณและส่งออกค่าแรงบิดทางกล และกำลังไฟฟ้าออกมา <ul style="list-style-type: none"> - พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 MVA - รัศมีโรเตอร์ 43.5 m - พื้นที่รับลม 5,944 m² - ความหนาแน่นอากาศ 1.225 kg/m³
ตัวควบคุมความเร็ว (Wind Governor)		อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับปรับมุมปีกเงย (pitch angle) โดยรับค่าความเร็วรอบ w และกำลังไฟฟ้าจริง P จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาคำนวณมุมและส่งค่าไปยังกังหันลมไฟฟ้า
ตัวกำหนดลักษณะลม (Wind Source)		อุปกรณ์สำหรับกำหนดความเร็วลมและลักษณะของลมชนิดต่างๆ โดยรับค่าความเร็วลมที่ปรับค่าได้ E_s และส่งค่าความเร็วลม V_w ที่มีคุณลักษณะที่ต้องการเข้าสู่กังหันลมไฟฟ้า <ul style="list-style-type: none"> - ความเร็วลมเฉลี่ย 13 m/s
หม้อแปลงไฟฟ้า (3 phase Transformer)		<ul style="list-style-type: none"> - ความถี่ 50 Hz - กำลังไฟฟ้าปรากฏ 2 MVA - แรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ 0.690 kV - แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 22 kV

3.3 การจำลองฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

ในที่นี้ได้จำลองการเกิดลัดวงจรที่สายส่งทั้งสี่เส้น ได้แก่ ลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single line to ground fault) , ลัดวงจรระหว่างเฟส (line to line fault) , ลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน (Double line to ground fault) และ ลัดวงจรสามเฟส (Symmetrical three phase fault) ที่ตำแหน่งแตกต่างกันและเปลี่ยนตำแหน่งแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนติดตั้งบริเวณใกล้แหล่งจ่ายไฟฟ้า , ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับโหลดผู้ใช้ และใกล้โหลดผู้ใช้ โดยได้แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะเกิดฟอลต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบของระบบเมื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนดังกล่าว และนำเสนอสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่ง และชนิดของฟอลต์ ซึ่งจะได้นำเสนอในบทต่อไป

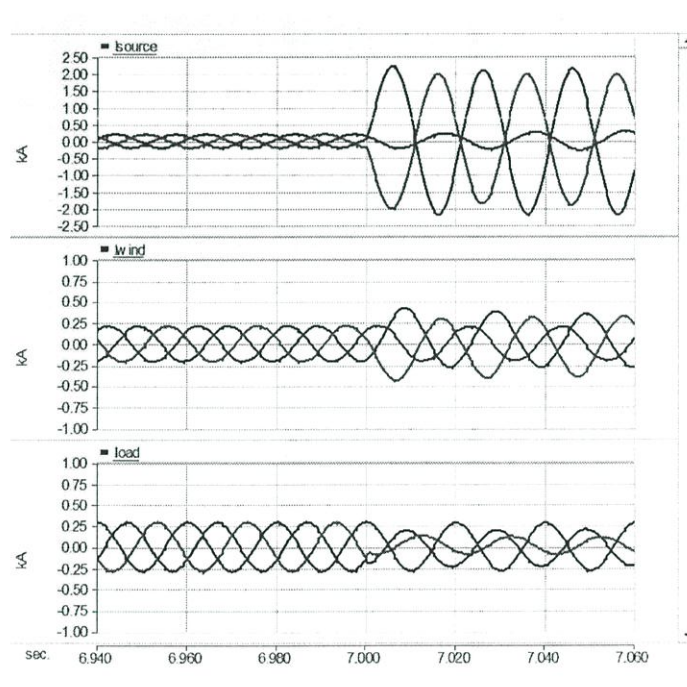
ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (A-G) ระยะทาง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง ที่เวลา 7 วินาที เชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ค่ากระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของเฟส A ที่วัดได้ด้านส่งมีค่า 1.069 กิโลแอมป์ , ด้านพลังงานทดแทน 0.190 กิโลแอมป์ และด้านรับ 0.091 กิโลแอมป์



รูปที่ 3.4 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดเฟสเดียวลงกราวด์ (A-G) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

จากรูปที่ 3.4 พบว่ากระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ (เฟส A) มีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี นอกจากนี้กระแสฟอลต์ได้มีค่าแปรผันตามระยะทางคือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นกระแสฟอลต์จะมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.41

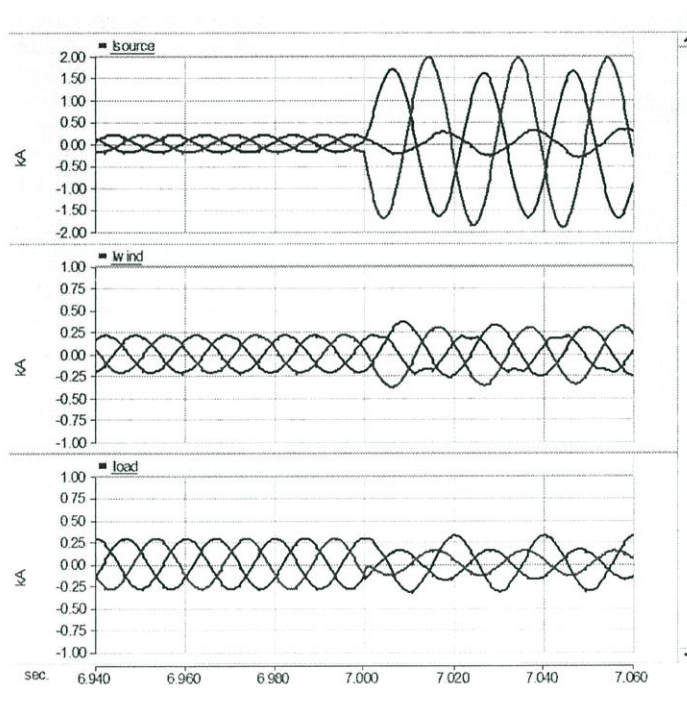
ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส (AB) ระยะทาง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง ที่เวลา 7 วินาที เชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่ด้านส่งเฟส A มีค่า 1.491 กิโลแอมป์ , เฟส B 1.373 กิโลแอมป์ ด้านพลังงานทดแทนเฟส A มีค่า 0.209 กิโลแอมป์ , เฟส B มีค่า 0.216 กิโลแอมป์ และด้านรับเฟส A มีค่า 0.152 กิโลแอมป์ , เฟส B มีค่า 0.073 กิโลแอมป์



รูปที่ 3.5 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟส (AB) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ส่ง

จากรูปที่ 3.5 พบว่ากระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ (เฟส A และ เฟส B) มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ควรมีค่าเท่ากัน และฟอลต์ระหว่างเฟสถือเป็นฟอลต์ที่มีความรุนแรงมากกว่าฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน นอกจากนี้กระแสฟอลต์ได้มีค่าแปรผันตามระยะทางคือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นกระแสฟอลต์จะมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.41

ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อการเกิดลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน (AB-G) ระยะทาง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง ที่เวลา 7 วินาที เชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่ด้านส่งเฟส A มีค่า 1.150 กิโลแอมป์ , เฟส B มีค่า 1.346 กิโลแอมป์ ด้านพลังงานทดแทนเฟส A มีค่า 0.179 กิโลแอมป์ , เฟส B มีค่า 0.204 กิโลแอมป์ และด้านรับเฟส A มีค่า 0.117 กิโลแอมป์ , เฟส B มีค่า 0.097 กิโลแอมป์

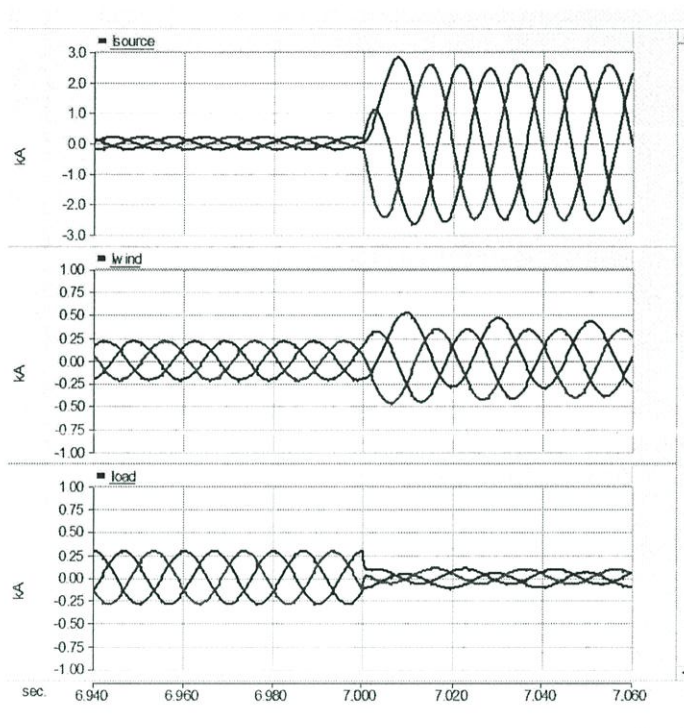


รูปที่ 3.6 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟสลงกราวด์ (AB-G) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

จากรูปที่ 3.6 พบว่ากระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ (เฟส A และ เฟส B) มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีคือกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมระหว่างเฟสที่เกิดฟอลต์ นอกจากนี้กระแสฟอลต์ได้มีค่าแปรผันตามระยะทาง คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นกระแสฟอลต์ที่เกิดฟอลต์จะมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.41

ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรสามเฟส (ABC) ระยะทาง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง ที่เวลา 7 วินาที เชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผล

ของเฟส A B และ C ที่วัดได้ด้านส่งมีค่า 1.762 กิโลแอมป์ , ด้านพลังงานทดแทน 0.205 กิโลแอมป์ และ ด้านรับ 0.054 กิโลแอมป์



รูปที่ 3.7 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดสามเฟสลงกราวด์ (ABC) เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

จากรูปที่ 3.7 พบว่ากระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ (เฟส A เฟส B และเฟส C) มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุดหรือมีความรุนแรงสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี นอกจากนี้กระแสฟอลต์ได้มีค่าแปรผันตามระยะทาง คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นกระแสฟอลต์ที่เกิดฟอลต์จะมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.41

3.3.1 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อมีพลังงานทดแทนติดตั้งใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร

ในการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อมีพลังงานทดแทนติดตั้งใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ได้มีการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทนและมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ระยะ 3 , 9 ,15 , 21 และ27 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง อีกทั้งยังได้เปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์ ได้แก่ ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (Single line to ground fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟส (line to line fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (Double line to ground fault) และ ฟอลต์สามเฟส (three phase fault) เพื่อทราบผลกระทบความรุนแรงของฟอลต์แต่ละชนิดที่มีต่อระบบและทราบเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านได้อย่างชัดเจน ดังนี้

พิจารณาตารางที่ 3.3 – 3.6 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร

-เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนในระบบฯ เป็นการช่วยเพิ่มกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละด้าน เช่น ด้านส่งจากระดับแรงดันไฟฟ้า 21.182 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 21.976 kV และด้านรับจากระดับแรงดันไฟฟ้า 18.467 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 19.401 kV

-เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ห่างออกไป กระแสไฟฟ้านั้นก็ยังมีค่าน้อยลงเช่น เมื่อเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.616 , 0.619 ,0.744 , 0.577 และ0.469 ตามลำดับระยะทาง 3 , 9 15 , 21 และ27 กิโลเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านพบว่า ยกตัวอย่างฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตร กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่งมีค่า 0.619 kA และด้านพลังงานทดแทนมีค่า 0.173 kA จะร่วมจ่ายกระแสสนับสนุนกระแสฟอลต์มีค่า 0.601 kA ส่วนที่เหลือจากนั้นจะจ่ายให้แก่ด้านรับเพียง 0.141 kA

-เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์พบว่า กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ เช่น ยกตัวอย่างเกิดฟอลต์ที่ระยะ 9 กิโลเมตร ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) มีค่า 0.601 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB) กระแสไฟฟ้าเฟส A และ เฟส B มีค่า 1.493 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงมากที่สุดของฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์คือกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.141 kA และเฟส B มีค่า 1.372 kA ซึ่งเป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ และฟอลต์สามเฟสเป็นฟอลต์ที่มีความรุนแรงมากที่สุด กระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากันคือ 1.851 kA ซึ่งมากกว่าฟอลต์ชนิดอื่น

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	16.654	17.540	18.361	18.872	19.310	21.976	17.351	20.251	19.098	19.665	20.069
		B	21.182	19.766	20.316	20.592	20.634	20.762	21.976	20.433	21.567	21.334	21.459	21.525
		C	21.182	21.104	20.935	20.931	20.905	21.022	21.977	21.840	21.841	21.706	21.753	21.806
	I (kA)	A	0.184	1.661	1.120	0.852	0.701	0.590	0.126	1.616	0.619	0.744	0.577	0.469
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.228	0.218	0.126	0.153	0.140	0.130	0.128	0.129
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.210	0.126	0.126	0.143	0.156	0.165	0.173
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	14.612	19.051	16.913	18.014	18.803
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.236	23.791	22.675	22.584	22.334	22.167
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	21.307	22.124	22.181	22.290	22.359
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.188	0.173	0.172	0.168	0.166
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.148	0.155	0.149	0.150	0.150
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.142	0.155	0.151	0.151	0.151
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	11.394	8.354	6.087	5.082	4.533	19.401	12.123	14.242	6.461	5.351	4.792
		B	18.467	18.270	22.770	20.773	20.817	21.916	19.401	19.137	20.315	21.767	22.424	23.004
		C	18.466	18.948	20.688	20.368	20.449	21.101	19.401	19.852	20.104	21.458	21.940	22.203
	I (kA)	A	0.184	0.114	0.083	0.061	0.056	0.045	0.194	0.121	0.141	0.064	0.053	0.048
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.229	0.219	0.194	0.191	0.203	0.217	0.224	0.230
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.211	0.194	0.198	0.201	0.214	0.219	0.222
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.555	1.041	0.793	0.646	0.547	0.000	1.652	0.601	0.838	0.681	0.578	
	B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (AB)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.786	17.622	17.979	18.358	18.693	21.976	18.472	18.311	18.683	19.077	19.436
		B	21.182	11.221	14.193	15.911	17.021	17.794	21.976	11.539	14.692	16.505	17.672	18.476
		C	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.977	21.786	21.852	21.887	21.907	21.922
	I (kA)	A	0.184	1.998	1.477	1.173	0.976	0.837	0.126	2.011	1.437	1.109	0.897	0.750
		B	0.184	1.950	1.416	1.105	0.902	0.760	0.126	1.892	1.322	0.995	0.783	0.636
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.126	0.154	0.134	0.127	0.124	0.122
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	18.355	17.635	17.958	18.418	18.871
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.236	8.506	12.712	15.103	16.636	17.690
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	21.902	22.019	22.077	22.112	22.135
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.197	0.190	0.184	0.179	0.175
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.217	0.195	0.183	0.176	0.171
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.119	0.128	0.134	0.138	0.141
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	15.159	13.720	12.846	12.271	11.861	19.401	15.977	14.438	13.512	12.906	12.467
		B	18.467	6.875	6.513	6.683	6.925	7.153	19.401	7.211	6.765	6.940	7.205	7.463
		C	18.466	18.467	18.467	18.465	18.467	18.467	19.401	19.171	19.252	19.293	19.322	19.336
	I (kA)	A	0.184	0.151	0.137	0.128	0.122	0.118	0.194	0.159	0.144	0.135	0.129	0.124
		B	0.184	0.069	0.065	0.067	0.069	0.071	0.194	0.072	0.068	0.069	0.072	0.074
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.194	0.191	0.192	0.193	0.193	0.193
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.908	1.396	1.096	0.902	0.765	0.000	2.053	1.493	1.168	0.958	0.811	
	B	0.000	1.908	1.395	1.096	0.902	0.765	0.000	2.053	1.493	1.168	0.958	0.811	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.564	18.066	18.393	18.674	18.919	21.976	18.259	18.769	19.102	19.393	19.659
		B	21.182	14.788	15.487	16.518	17.328	17.961	21.976	15.382	16.093	17.169	18.005	18.661
		C	21.182	19.611	20.206	20.481	20.627	20.719	21.977	20.244	20.891	21.192	21.355	21.460
	I (kA)	A	0.184	1.608	1.171	0.970	0.832	0.731	0.126	1.571	1.107	0.894	0.744	0.636
		B	0.184	1.772	1.368	1.093	0.910	0.776	0.126	1.756	1.294	0.993	0.798	0.656
		C	0.184	0.203	0.205	0.213	0.219	0.224	0.126	0.168	0.163	0.158	0.158	0.160
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	13.925	16.275	17.393	18.141	18.700
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.236	15.680	14.465	15.602	16.662	17.550
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	22.906	22.634	22.420	22.303	22.232
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.169	0.172	0.172	0.171	0.169
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.196	0.188	0.180	0.175	0.170
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.142	0.141	0.142	0.144	0.145
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	12.826	10.252	8.719	7.372	6.131	19.401	13.342	10.855	9.250	7.813	6.492
		B	18.467	12.626	8.253	6.723	5.973	5.763	19.401	11.897	8.788	7.137	6.330	6.095
		C	18.466	20.345	20.588	21.413	22.007	22.461	19.401	19.542	21.544	22.413	23.056	23.542
	I (kA)	A	0.184	0.128	0.102	0.087	0.074	0.061	0.194	0.133	0.108	0.092	0.078	0.065
		B	0.184	0.126	0.082	0.067	0.060	0.058	0.194	0.119	0.088	0.071	0.063	0.061
		C	0.184	0.203	0.205	0.214	0.220	0.224	0.194	0.195	0.215	0.224	0.230	0.235
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.489	1.076	0.889	0.763	0.675	0.000	1.574	1.141	0.945	0.810	0.715	
	B	0.000	1.658	1.293	1.032	0.855	0.724	0.000	1.771	1.372	1.092	0.905	0.765	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.976	10.356	13.341	15.319	16.635	17.569
		B	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.976	10.355	13.341	15.319	16.635	17.569
		C	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.977	10.355	13.341	15.319	16.636	17.569
	I (kA)	A	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.126	2.520	1.717	1.288	1.019	0.835
		B	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.126	2.520	1.717	1.288	1.019	0.835
		C	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.126	2.520	1.717	1.288	1.019	0.835
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	7.875	10.862	13.410	15.151	16.393
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.236	7.875	10.862	13.410	15.151	16.393
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.235	7.875	10.862	13.410	15.151	16.393
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.196	0.186	0.179	0.174	0.171
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.196	0.186	0.179	0.174	0.171
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.196	0.186	0.179	0.174	0.171
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	19.401	6.670	4.850	3.842	3.210	2.780
		B	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	19.401	6.670	4.850	3.842	3.210	2.780
		C	18.466	6.285	4.566	3.625	3.035	2.630	19.401	6.670	4.850	3.842	3.210	2.780
	I (kA)	A	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.194	0.067	0.048	0.038	0.032	0.028
		B	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.194	0.067	0.048	0.038	0.032	0.028
		C	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.194	0.067	0.048	0.038	0.032	0.028
I _{fault} (kA)	A	0.000	2.465	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.616	1.851	1.427	1.160	0.977	
	B	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.616	1.851	1.427	1.160	0.977	
	C	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.616	1.851	1.427	1.160	0.977	

3.3.2 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อมีพลังงานทดแทนติดตั้งระหว่างกลาง ได้มีการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทนและมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ระยะ 3 , 9 ,15 , 21 และ 27 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง อีกทั้งยังได้เปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์ ได้แก่ ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (Single line to ground fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟส (line to line fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (Double line to ground fault) และฟอลต์สามเฟส (three phase fault) เพื่อทราบผลกระทบความรุนแรงของฟอลต์แต่ละชนิดที่มีต่อระบบและทราบเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านได้อย่างชัดเจน ดังนี้

พิจารณาตารางที่ 3.7 – 3.10 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

-เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนในระบบฯ เป็นการช่วยเพิ่มกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบ ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละด้าน เช่น ด้านส่งจากแรงดันไฟฟ้า 21.182 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 21.933 kV และด้านรับจาแรงดันไฟฟ้า 18.467 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 20.312 kV

-เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ห่างออกไป กระแสไฟฟ้านั้นก็ยังมีค่าน้อยลงเช่น เมื่อเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.628 , 1.069 , 0.793 , 0.612 และ 0.501 ตามลำดับระยะทาง 3 , 9 15 , 21 และ 27 กิโลเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านพบว่า ยกตัวอย่าง ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตร กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่งมีค่า 1.069 kA จะจ่ายกระแสสนับสนุนกระแสฟอลต์มีค่า 1.148 kA ดังนั้นด้านพลังงานทดแทนจึงแบ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ด้านรับและฟอลต์ 0.190 kA ส่วนด้านรับได้รับกระแสไฟฟ้าเพียง 0.091 kA

-เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์พบว่า กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ เช่น ยกตัวอย่างเกิดฟอลต์ที่ระยะ 9 กิโลเมตร ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) มีค่า 1.148 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB) กระแสไฟฟ้าเฟส A และ เฟส B มีค่า 1.552 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงมากที่สุดของฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์คือ กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.176 kA และ เฟส B มีค่า 1.414 kA ซึ่งเป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ และฟอลต์สามเฟสเป็นฟอลต์ที่มีความรุนแรงมากที่สุด กระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากันคือ 1.916 kA ซึ่งมากกว่าฟอลต์ชนิดอื่น

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	16.654	17.540	18.361	18.872	19.310	21.933	17.294	18.069	18.879	19.510	19.943
		B	21.182	19.766	20.316	20.592	20.634	20.762	21.933	20.415	20.964	21.157	21.330	21.419
		C	21.182	21.104	20.935	20.931	20.905	21.022	21.933	21.802	21.602	21.616	21.676	21.736
	I (kA)	A	0.184	1.661	1.120	0.852	0.701	0.590	0.138	1.628	1.069	0.793	0.612	0.501
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.228	0.218	0.138	0.164	0.152	0.147	0.145	0.145
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.210	0.138	0.138	0.149	0.157	0.169	0.178
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.058	14.841	10.365	8.074	10.037	12.185
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.055	22.730	25.430	26.748	24.952	23.849
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.057	21.628	22.512	23.483	23.467	23.389
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.185	0.190	0.192	0.184	0.179
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.154	0.136	0.127	0.137	0.143
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.143	0.146	0.144	0.146	0.147
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	11.394	8.354	6.087	5.082	4.533	20.312	13.291	9.167	6.950	5.712	5.116
		B	18.467	18.270	22.770	20.773	20.817	21.916	20.312	20.020	21.745	22.535	23.332	23.905
		C	18.466	18.948	20.688	20.368	20.449	21.101	20.313	20.668	21.547	22.374	22.953	23.279
	I (kA)	A	0.184	0.114	0.083	0.061	0.056	0.045	0.203	0.133	0.091	0.069	0.057	0.051
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.229	0.219	0.203	0.200	0.217	0.225	0.233	0.239
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.211	0.203	0.206	0.215	0.223	0.229	0.232
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.555	1.041	0.793	0.646	0.547	0.000	1.645	1.148	0.901	0.726	0.616	
	B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (AB)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.786	17.622	17.979	18.358	18.693	21.933	18.417	18.152	18.453	18.899	19.283
		B	21.182	11.221	14.193	15.911	17.021	17.794	21.933	11.508	14.414	16.098	17.373	18.245
		C	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.933	21.763	21.758	21.754	21.799	21.829
	I (kA)	A	0.184	1.998	1.477	1.173	0.976	0.837	0.138	2.023	1.491	1.177	0.946	0.788
		B	0.184	1.950	1.416	1.105	0.902	0.760	0.138	1.897	1.373	1.069	0.837	0.677
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.138	0.164	0.148	0.134	0.128	0.126
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.058	18.427	16.629	15.455	15.266	15.665
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.055	9.307	8.129	7.751	10.765	12.893
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.057	21.516	21.517	21.513	21.650	21.739
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.192	0.209	0.221	0.209	0.200
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.213	0.216	0.216	0.200	0.190
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.124	0.118	0.115	0.124	0.130
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	15.159	13.720	12.846	12.271	11.861	20.312	16.922	15.259	14.185	13.529	13.062
		B	18.467	6.875	6.513	6.683	6.925	7.153	20.312	8.349	7.299	7.000	7.333	7.643
		C	18.466	18.467	18.467	18.465	18.467	18.467	20.313	19.871	19.872	19.867	19.983	20.056
	I (kA)	A	0.184	0.151	0.137	0.128	0.122	0.118	0.203	0.169	0.152	0.141	0.135	0.130
		B	0.184	0.069	0.065	0.067	0.069	0.071	0.203	0.083	0.073	0.070	0.073	0.076
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.203	0.198	0.198	0.198	0.199	0.200
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.908	1.396	1.096	0.902	0.765	0.000	2.040	1.552	1.271	1.035	0.871	
	B	0.000	1.908	1.395	1.096	0.902	0.765	0.000	2.040	1.552	1.271	1.035	0.871	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.9 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG)

			กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน				
				3	9	15	21	27		3	9	15	21	27
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.564	18.066	18.393	18.674	18.919	21.933	18.204	18.622	18.900	19.232	19.959
		B	21.182	14.788	15.487	16.518	17.328	17.961	21.933	15.322	15.862	16.816	17.740	18.610
		C	21.182	19.611	20.206	20.481	20.627	20.719	21.933	20.211	20.751	20.992	21.207	21.834
	I (kA)	A	0.184	1.608	1.171	0.970	0.832	0.731	0.138	1.583	1.150	0.950	0.788	0.717
		B	0.184	1.772	1.368	1.093	0.910	0.776	0.138	1.766	1.346	1.067	0.851	0.605
		C	0.184	0.203	0.205	0.213	0.219	0.224	0.138	0.178	0.185	0.184	0.176	0.140
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.058	14.882	11.420	9.093	11.479	17.360
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.055	15.408	12.312	10.459	10.519	13.495
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.057	22.244	24.735	25.913	24.767	21.741
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.168	0.179	0.191	0.189	0.189
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.193	0.204	0.209	0.197	0.190
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.146	0.130	0.119	0.127	0.132
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	12.826	10.252	8.719	7.372	6.131	20.312	14.353	11.736	9.826	8.319	15.063
		B	18.467	12.626	8.253	6.723	5.973	5.763	20.312	13.106	9.740	7.734	6.801	7.613
		C	18.466	20.345	20.588	21.413	22.007	22.461	20.313	20.293	22.125	23.002	23.818	20.058
	I (kA)	A	0.184	0.128	0.102	0.087	0.074	0.061	0.203	0.143	0.117	0.098	0.083	0.150
		B	0.184	0.126	0.082	0.067	0.060	0.058	0.203	0.131	0.097	0.077	0.068	0.076
		C	0.184	0.203	0.205	0.214	0.220	0.224	0.203	0.203	0.221	0.230	0.238	0.200
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.489	1.076	0.889	0.763	0.675	0.000	1.567	1.176	1.010	0.866	0.756	
	B	0.000	1.658	1.293	1.032	0.855	0.724	0.000	1.762	1.414	1.172	0.966	0.756	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.10 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC)

			กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน				
				3	9	15	21	27		3	9	15	21	27
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.933	10.309	13.097	14.788	16.339	17.322
		B	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.933	10.309	13.097	14.790	16.339	17.323
		C	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.933	10.309	13.097	14.789	16.339	17.322
	I (kA)	A	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.138	2.528	1.762	1.375	1.070	0.877
		B	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.138	2.528	1.762	1.375	1.070	0.877
		C	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.138	2.528	1.762	1.375	1.070	0.877
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.058	8.702	6.070	4.011	7.357	9.881
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.055	8.702	6.070	4.011	7.357	9.881
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.057	8.702	6.070	4.012	7.357	9.881
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.193	0.205	0.211	0.198	0.189
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.193	0.205	0.211	0.198	0.189
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.152	0.193	0.205	0.211	0.198	0.189
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	20.312	7.805	5.434	3.654	3.425	2.960
		B	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	20.312	7.805	5.434	3.654	3.425	2.960
		C	18.466	6.285	4.566	3.625	3.035	2.630	20.313	7.805	5.434	3.654	3.425	2.960
	I (kA)	A	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.203	0.078	0.054	0.036	0.034	0.030
		B	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.203	0.078	0.054	0.036	0.034	0.030
		C	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.203	0.078	0.054	0.036	0.034	0.030
I _{fault} (kA)	A	0.000	2.465	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.598	1.916	1.358	1.237	1.040	
	B	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.598	1.916	1.358	1.237	1.040	
	C	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.598	1.916	1.358	1.237	1.040	

3.3.3 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร

การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เมื่อมีพลังงานทดแทนติดตั้งใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ได้มีการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทนและมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ระยะ 3 , 9 ,15 , 21 และ 27 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง อีกทั้งยังได้เปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์ ได้แก่ ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (Single line to ground fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟส (line to line fault) , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (Double line to ground fault) และฟอลต์สามเฟส (three phase fault) เพื่อทราบผลกระทบต่อความรุนแรงของฟอลต์แต่ละชนิดที่มีต่อระบบและทราบเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านได้อย่างชัดเจน ดังนี้

พิจารณารายที่ 3.11 – 3.14 เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร

-เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนในระบบ เป็นการช่วยเพิ่มกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบ ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละด้าน เช่น ด้านส่งจากแรงดันไฟฟ้า 21.182 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 21.888 kV และด้านรับจาแรงดันไฟฟ้า 18.467 kV เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่า 20.223 kV

-เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ห่างออกไป กระแสไฟฟ้าด้านส่งก็ยังมีค่าน้อยลงเช่น เมื่อเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.640 , 1.079 , 0.800 , 0.638 และ 0.535 ตามลำดับระยะทาง 3 , 9 15 , 21 และ 27 กิโลเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าของแต่ละด้านพบว่ายกตัวอย่างฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตร กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่งมีค่า 1.079 kA จะจ่ายกระแสสนับสนุนกระแสฟอลต์มีค่า 1.138 kA ดังนั้นด้านพลังงานทดแทนจึงแบ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ด้านรับและฟอลต์ 0.187 kA ส่วนด้านรับได้รับกระแสไฟฟ้าเพียง 0.103 kA

-เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฟอลต์พบว่า กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ เช่น ยกตัวอย่างเกิดฟอลต์ที่ระยะ 9 กิโลเมตร ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG) มีค่า 1.138 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB) กระแสไฟฟ้าเฟส A และ เฟส B มีค่า 1.536 kA เป็นชนิดที่มีความรุนแรงมากที่สุดของฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์คือ กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) กระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่า 1.167 kA และ เฟส B มีค่า 1.401 kA ซึ่งเป็นชนิดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าฟอลต์ระหว่างเฟสเนื่องจากกระแสฟอลต์เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ และฟอลต์สามเฟสเป็นฟอลต์ที่มีความรุนแรงมากที่สุด กระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากันคือ 1.899 kA ซึ่งมากกว่าฟอลต์ชนิดอื่น

ตารางที่ 3.11 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	16.654	17.540	18.361	18.872	19.310	21.888	17.236	18.025	18.852	19.391	19.769
		B	21.182	19.766	20.316	20.592	20.634	20.762	21.888	20.379	20.964	21.179	21.274	21.311
		C	21.182	21.104	20.935	20.931	20.905	21.022	21.888	21.756	21.556	21.573	21.607	21.649
	I (kA)	A	0.184	1.661	1.120	0.852	0.701	0.590	0.150	1.640	1.079	0.800	0.638	0.535
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.228	0.218	0.150	0.174	0.165	0.161	0.160	0.162
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.210	0.150	0.152	0.163	0.170	0.177	0.184
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.799	14.937	10.822	8.629	7.008	6.009
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.798	21.690	23.651	24.536	25.280	26.011
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.801	21.951	22.765	23.566	24.182	24.572
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.183	0.187	0.189	0.191	0.193
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.159	0.147	0.141	0.137	0.132
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.144	0.147	0.145	0.143	0.140
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	11.394	8.354	6.087	5.082	4.533	21.223	14.361	10.322	8.167	6.537	5.468
		B	18.467	18.270	22.770	20.773	20.817	21.916	21.223	20.929	22.717	23.507	24.187	24.864
		C	18.466	18.948	20.688	20.368	20.449	21.101	21.224	21.551	22.382	23.171	23.788	24.187
	I (kA)	A	0.184	0.114	0.083	0.061	0.056	0.045	0.212	0.143	0.103	0.081	0.065	0.054
		B	0.184	0.182	0.227	0.207	0.229	0.219	0.212	0.209	0.227	0.235	0.241	0.248
		C	0.184	0.189	0.206	0.203	0.225	0.211	0.212	0.215	0.223	0.231	0.237	0.242
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.555	1.041	0.793	0.646	0.547	0.000	1.637	1.138	0.887	0.747	0.659	
	B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (AB)

			กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน				
				3	9	15	21	27		3	9	15	21	27
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.786	17.622	17.979	18.358	18.693	21.888	18.356	18.088	18.390	18.741	19.061
		B	21.182	11.221	14.193	15.911	17.021	17.794	21.888	11.477	14.400	16.095	17.187	17.944
		C	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.182	21.888	21.728	21.733	21.737	21.738	21.736
	I (kA)	A	0.184	1.998	1.477	1.173	0.976	0.837	0.150	2.034	1.502	1.189	0.983	0.838
		B	0.184	1.950	1.416	1.105	0.902	0.760	0.150	1.903	1.375	1.070	0.872	0.734
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.150	0.175	0.160	0.148	0.137	0.128
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.799	18.477	16.748	15.570	14.721	14.089
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.798	9.940	8.738	8.280	8.083	7.983
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.801	21.086	21.113	21.124	21.133	21.130
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.187	0.203	0.214	0.223	0.231
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.210	0.212	0.212	0.213	0.213
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.128	0.123	0.120	0.119	0.118
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	15.159	13.720	12.846	12.271	11.861	21.223	17.937	16.241	15.095	14.273	13.673
		B	18.467	6.875	6.513	6.683	6.925	7.153	21.223	9.449	8.298	7.887	7.733	7.675
		C	18.466	18.467	18.467	18.465	18.467	18.467	21.224	20.577	20.606	20.619	20.629	20.627
	I (kA)	A	0.184	0.151	0.137	0.128	0.122	0.118	0.212	0.179	0.162	0.151	0.142	0.136
		B	0.184	0.069	0.065	0.067	0.069	0.071	0.212	0.094	0.083	0.079	0.077	0.077
		C	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.212	0.205	0.205	0.206	0.206	0.206
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.908	1.396	1.096	0.902	0.765	0.000	2.027	1.536	1.254	1.073	0.950	
	B	0.000	1.908	1.395	1.096	0.902	0.765	0.000	2.027	1.536	1.254	1.073	0.950	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	17.564	18.066	18.393	18.674	18.919	21.888	18.142	18.560	18.839	19.084	19.305
		B	21.182	14.788	15.487	16.518	17.328	17.961	21.888	15.263	15.816	16.784	17.558	18.166
		C	21.182	19.611	20.206	20.481	20.627	20.719	21.888	20.164	20.732	20.994	21.127	21.207
	I (kA)	A	0.184	1.608	1.171	0.970	0.832	0.731	0.150	1.595	1.162	0.962	0.821	0.719
		B	0.184	1.772	1.368	1.093	0.910	0.776	0.150	1.775	1.354	1.073	0.887	0.752
		C	0.184	0.203	0.205	0.213	0.219	0.224	0.150	0.188	0.197	0.195	0.193	0.193
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.799	15.724	13.024	11.118	9.286	7.449
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.798	14.969	11.730	9.719	8.467	7.874
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.801	21.680	23.572	24.468	25.186	25.784
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.167	0.177	0.187	0.196	0.204
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.191	0.201	0.206	0.209	0.211
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.149	0.138	0.130	0.124	0.119
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	12.826	10.252	8.719	7.372	6.131	21.223	15.371	12.822	10.983	9.207	7.414
		B	18.467	12.626	8.253	6.723	5.973	5.763	21.223	14.226	10.936	8.906	7.630	7.005
		C	18.466	20.345	20.588	21.413	22.007	22.461	21.224	21.100	22.891	23.740	24.429	25.019
	I (kA)	A	0.184	0.128	0.102	0.087	0.074	0.061	0.212	0.153	0.128	0.110	0.092	0.074
		B	0.184	0.126	0.082	0.067	0.060	0.058	0.212	0.142	0.109	0.089	0.076	0.070
		C	0.184	0.203	0.205	0.214	0.220	0.224	0.212	0.211	0.229	0.237	0.244	0.250
I _{fault} (kA)	A	0.000	1.489	1.076	0.889	0.763	0.675	0.000	1.560	1.167	1.000	0.891	0.820	
	B	0.000	1.658	1.293	1.032	0.855	0.724	0.000	1.752	1.401	1.157	0.995	0.875	
	C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 3.14 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ 3 กิโลเมตร ขณะเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC)

		กรณีไม่ติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ไม่ติดตั้งพลังงานทดแทน					กรณีติดตั้ง พลังงานทดแทน	เกิดฟอลต์ที่ระยะต่างๆ ติดตั้งพลังงานทดแทน					
			3	9	15	21	27		3	9	15	21	27	
ด้านส่ง	V (kV)	A	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.888	10.260	13.035	14.788	16.043	16.930
		B	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.888	10.259	13.035	14.790	16.043	16.930
		C	21.182	10.093	12.883	14.772	16.031	16.921	21.888	10.259	13.035	14.789	16.043	16.931
	I (kA)	A	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.150	2.535	1.776	1.375	1.121	0.946
		B	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.150	2.535	1.776	1.375	1.121	0.946
		C	0.184	2.520	1.784	1.379	1.123	0.948	0.150	2.535	1.776	1.375	1.121	0.946
ด้านพลังงานทดแทน	V (kV)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.799	9.435	6.985	5.352	4.008	2.882
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.798	9.435	6.985	5.350	4.008	2.882
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.801	9.435	6.985	5.351	4.008	2.882
	I (kA)	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.191	0.200	0.208	0.209	0.210
		B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.191	0.200	0.208	0.209	0.210
		C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.191	0.200	0.208	0.209	0.210
ด้านรับ	V (kV)	A	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	21.223	8.974	6.588	4.717	3.482	2.687
		B	18.467	6.285	4.566	3.625	3.035	2.631	21.223	8.974	6.588	4.719	3.482	2.687
		C	18.466	6.285	4.566	3.625	3.035	2.630	21.224	8.974	6.588	4.717	3.483	2.687
	I (kA)	A	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.212	0.090	0.066	0.046	0.034	0.027
		B	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.212	0.090	0.066	0.046	0.034	0.027
		C	0.184	0.063	0.046	0.036	0.030	0.026	0.212	0.090	0.066	0.046	0.034	0.027
I _{fault} (kA)	A	0.000	2.465	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.579	1.899	1.357	1.111	0.944	
	B	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.579	1.899	1.357	1.112	0.944	
	C	0.000	2.464	1.743	1.347	1.096	0.924	0.000	2.579	1.899	1.358	1.112	0.944	

3.4 ผลจากการติดตั้งพลังงานทดแทนเข้าในระบบและเกิดฟอลต์ที่สายส่ง

เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า โดยผ่านสายส่งขนาดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ระยะทาง 30 กิโลเมตร มีผลดังนี้

- แหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้านส่ง จ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีพลังงานทดแทน ดังนั้นแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนจึงช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่โหลด
- เมื่อพลังงานทดแทนติดตั้งห่างจากด้านส่งมากขึ้น แหล่งจ่ายทางด้านส่งก็ยิ่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
- ในระบบไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อร่วม เมื่อเกิดฟอลต์ที่สายส่งไม่ว่าจะระยะทางเท่าไร กระแสฟอลต์จะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของชนิดฟอลต์คือ ฟอลต์เฟสเดียวลงกราวด์ , ฟอลต์ระหว่างเฟส , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงกราวด์ และ ฟอลต์สามเฟส ตามลำดับ

กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่ง , ด้านพลังงานทดแทน และด้านโหลด มีค่าลดลงตามระยะห่างที่เกิดฟอลต์
- กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งเกิดฟอลต์ในกรณีนี้มีค่ามากที่สุด เนื่องจากพลังงานทดแทนติดตั้งใกล้แหล่งจ่าย จึงมีส่วนช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มในระบบ

กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่งมีค่าลดลงตามระยะห่างที่เกิดฟอลต์
- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านพลังงานทดแทนจะช่วยจ่ายสนับสนุนฟอลต์ตามระยะห่างที่เกิดฟอลต์ ทำให้กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์มีค่าลดลงไม่มากนักและจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเกิดฟอลต์ใกล้ตำแหน่งของพลังงานทดแทน
- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านโหลดจะลดลงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ แต่จะมีค่ามากกว่ากรณีแรก เนื่องจากพลังงานทดแทนช่วยจ่ายให้ด้านรับ

กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านส่งมีค่าลดลงตามระยะห่างที่เกิดฟอลต์
- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านพลังงานทดแทนมีค่าลดลงตามระยะทาง แต่จะมากกว่ากรณีแรก เนื่องจากต้องแบ่งจ่ายให้ด้านรับ
- กระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ด้านรับมีค่าลดลงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ แต่จะมีค่ามากกว่าสองกรณีแรก เนื่องจากพลังงานทดแทนช่วยจ่ายให้ด้านรับ

บทที่ 4

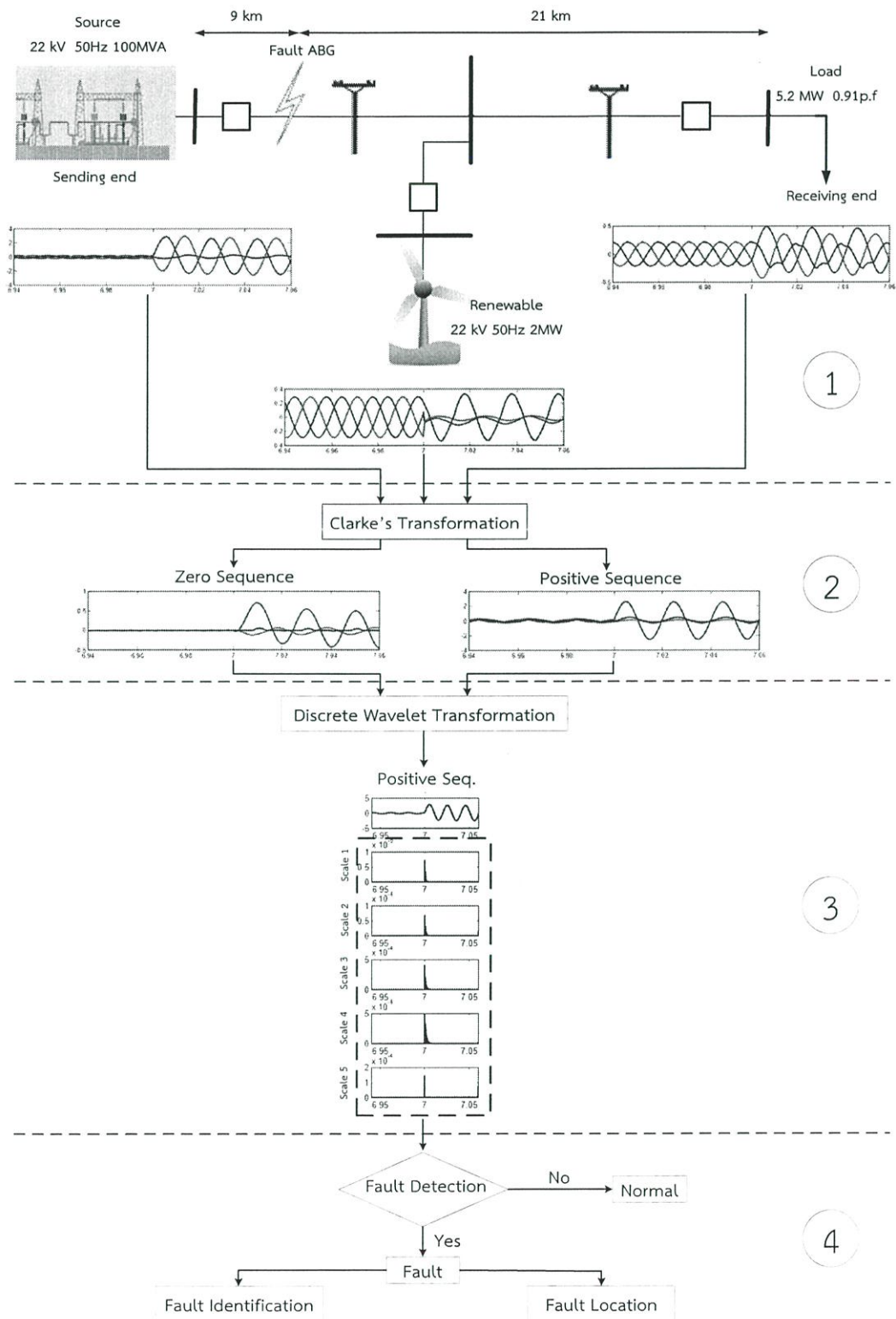
การวินิจฉัยฟอลต์

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ จากสถานีไฟฟ้า (ด้านส่ง) ไปยังภาระไฟฟ้าขนาด 5.2 เมกกะวัตต์ (ด้านรับ) ระยะทาง 30 กิโลเมตร โดยมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบระหว่างด้านรับและด้านส่ง วินิจฉัยฟอลต์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ประยุกต์ทฤษฎีการแปลงคลาร์ก ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ดและทฤษฎีคลื่นเดินทาง เพื่อใช้ในการตรวจจับฟอลต์ ระบุตำแหน่งฟอลต์ และระบุประเภทของฟอลต์

ในการวินิจฉัยฟอลต์จะนำเอาสัญญาณของกระแสบนสายส่งที่เกิดฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม PSCAD มาประมวลผลและใช้อัลกอริทึมต่างๆ มาใช้ในการตัดสินใจ โดยสัญญาณกระแสฟอลต์จะวัดที่ปลายสายส่งทั้งทางด้านส่ง ด้านรับ และด้านพลังงานทดแทน ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันจำนวน 600 กรณี โดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเฟสที่เกิดฟอลต์ มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง และตำแหน่งของพลังงานทดแทน รูปแบบของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่แตกต่างกันมีรูปแบบ ดังนี้

1. เฟสที่เกิดฟอลต์ เปลี่ยนแปลงฟอลต์ 10 ลักษณะ (เฟสเดียวลงกราวด์, ระหว่างเฟส , ระหว่างเฟสลงกราวด์ , สามเฟส)
2. มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเฟส A (0 องศา, 45 องศา, 90 องศา, 135 องศา)
3. ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ร้อยละ 10 , 30 , 50 , 70 และ 90 ของระยะสายส่งทั้งหมด 30 กิโลเมตร เมื่อวัดจากปลายด้านส่งของแหล่งจ่าย (3, 9, 15 ,21 ,27 กิโลเมตร)
4. ตำแหน่งของพลังงานทดแทน (ใกล้แหล่งจ่าย , ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด , ใกล้โหลด)
5. เวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์ที่ 7 วินาที

ขั้นตอนในการวินิจฉัยฟอลต์เพื่อให้ง่ายในการอธิบายจึงได้ยกตัวอย่างเหตุการณ์ในขณะที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเกิดฟอลต์ลัดวงจรระหว่างเฟส A และเฟส B ลงดิน (ABG) มุมเริ่มเกิดฟอลต์ 45 องศา เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตรของสายส่ง เมื่อวัดจากปลายด้านส่ง (Sending end) ของสายส่งคิดเป็นร้อยละ 30 ของระยะสายส่งทั้งหมดจาก 30 กิโลเมตร โดยแสดงวงจรระบบไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวมที่ระยะ 15 กิโลเมตร ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะสายส่งของวงจร และแสดงสัญญาณกระแสฟอลต์ของแต่ละสายส่ง มีขั้นตอนการวินิจฉัยฟอลต์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนในการวินิจฉัยฟอลต์

จากรูปที่ 4.1 เป็นขั้นตอนในการวินิจฉัยฟอลต์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในขั้นตอน 1 เป็นตัวอย่างของการจำลองฟอลต์ลัดวงจรระหว่างเฟส A และเฟส B ลงดิน (ABG) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนในการวินิจฉัยสัญญาณฟอลต์ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนที่ 4 เป็นการใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ทั้งหมด ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการนำกระแสสัญญาณฟอลต์เฟส A เฟส B และเฟส C มาเข้าสู่การแปลงคลาร์ก เพื่อให้ได้กระแสฟอลต์สองเฟสหยุดนิ่งเพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์สัญญาณที่เป็นภาวะชั่วคราวหรือฟอลต์ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.1 จากนั้นเมื่อได้กระแสฟอลต์สองเฟสหยุดนิ่งแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 นั่นคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา เป็นการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อได้องค์ประกอบความถี่สูงแล้ว จะนำมาเข้าสู่ขั้นตอนที่ 4 เริ่มจากการตรวจจับฟอลต์โดยตัดสินใจว่าสายส่งนี้เกิดฟอลต์หรือไม่ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.3 เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งจะนำข้อมูลที่ได้นำมาเข้าสู่การระบุตำแหน่งฟอลต์ อธิบายในหัวข้อที่ 4.4 และการระบุชนิดของฟอลต์ อธิบายในหัวข้อที่ 4.5

4.1 การแปลงคลาร์ก (Clarke's Transformation) [25]

การแปลงคลาร์ก (Clarke's Transformation) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแปลงแอลฟาเบต้า ($\alpha\beta$ Transformation) คือ การแปลงทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (a, b, c) ให้เป็นกระแสไฟฟ้าสองเฟสหยุดนิ่ง ($\alpha\beta 0$) ซึ่งคล้ายกับการแปลงดีควิซีโร (dq0 Transformation) ของทางเครื่องกล

การแปลงคลาร์กเป็นเมทริกซ์การแปลงชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์สายส่งสามเฟสที่มีการไขว้สลับสาย (Transposed) หรือสายส่งสามเฟสที่ไม่ได้มีการไขว้สลับสาย (Un-transposed) โดยผ่านการวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบข้อผิดพลาดและความถี่ สมมติให้กระแสสามเฟสเป็น ดังนี้

$$i_a(n) = I_a \cos(n\omega T + \varphi_a) \quad (4.1)$$

$$i_b(n) = I_b \cos(n\omega T + \varphi_b) \quad (4.2)$$

$$i_c(n) = I_c \cos(n\omega T + \varphi_c) \quad (4.3)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาในการสุ่ม (Sampling period)

เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \\ i_0(n) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(n) \\ i_b(n) \\ i_c(n) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

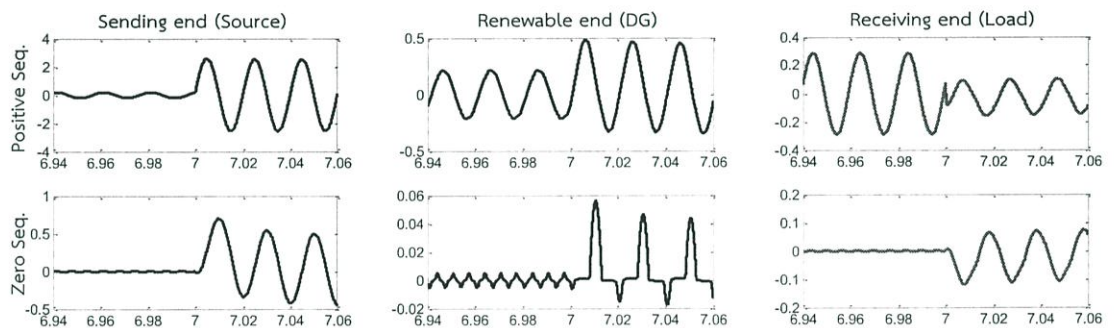
$$\begin{bmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \\ i_0(n) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(n) \\ i_b(n) \\ i_c(n) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

จากเมทริกซ์ดังกล่าว สามารถสรุปอย่างย่อได้เป็น

$$i_{\alpha\beta 0} = C \times i_{abc} \quad (4.6)$$

เมื่อ C คือ เมทริกซ์การแปลงคลาร์ก

จากทฤษฎีการแปลงคลาร์กจะนำเมทริกซ์ C มาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายส่งแบบที่มีการไขว้สลับสายอย่างสมบูรณ์และสายส่งแบบที่ไม่มีการไขว้สลับสาย เพื่อใช้ในการหาองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) ของกระแสสามเฟสที่ได้จากการจำลอง แปลงให้อยู่ในรูปของกระแสสองเฟสหยุดนิ่ง เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ฟอลต์ ผลลัพธ์จากการแปลงคลาร์กจะได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบลำดับบวก และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ จากการแปลงคลาร์ก

ผลลัพธ์จากการใช้เมทริกซ์การแปลงคลาร์กแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับบวก และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ จะได้กระแสสองเฟสหยุดนิ่งที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ จากนั้นจะนำไปเข้าขั้นตอนในการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยต่อไป

4.2 การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transformation)

จากทฤษฎีการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis) ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ท วิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ จึงนำ การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ พอลต์บนสายส่ง เนื่องจากสามารถเห็นผลการวิเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความถี่ได้อย่าง ชัดเจน การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยสามารถแยกกระแสในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดพอลต์ได้ ใน สภาวะปกติสัญญาณกระแสจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่เกิดพอลต์จะมี องค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่

ในการพิจารณาพอลต์จะเลือกการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ทแม่ชนิด daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา เนื่องจากเวฟเล็ทแม่ชนิด daubechies มี คุณสมบัติในการวิเคราะห์สัญญาณที่ให้ความแม่นยำสูงกว่าเวฟเล็ทแม่ชนิดอื่นๆ

พิจารณาสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทเพียง $1/4$ ไซเคิลหลังจากการเกิดพอลต์ ซึ่งสั้นกว่าการใช้หลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต้องใช้ช่วงข้อมูลของการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิล

พิจารณาจำนวนสเกลหรือช่วงความถี่เพียง 5 สเกล ทั้งนี้เพื่อให้มีข้อมูลและเวลาในการ วิเคราะห์มีความเหมาะสม ตามหลักการพื้นฐานที่ว่าจำนวนสเกลที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าความถูกต้องที่สามารถ ยอมรับได้ ถ้าใช้จำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่มากขึ้นจะทำให้มีข้อมูลในการตัดสินใจมากขึ้นแต่ใช้เวลาใน การวิเคราะห์นานมากขึ้นตามไปด้วย

จากทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) ซึ่งเป็นทฤษฎี พื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ท แยกองค์ประกอบส่วนที่มีความถี่สูงและองค์ประกอบส่วนที่มีความถี่ต่ำ โดย ผ่านอัตราสุ่มลง ทำให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ลดลงครึ่งหนึ่ง ในตัวอย่างเหตุการณ์ขณะเกิดพอลต์จะ จำลองจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยมีความถี่ในการสุ่ม (Sampling frequency) 200 kHz เมื่อใช้ เวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาจะได้ 5 สเกล ซึ่งแต่ละสเกลจะมีช่วงความถี่ที่ ลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนี้

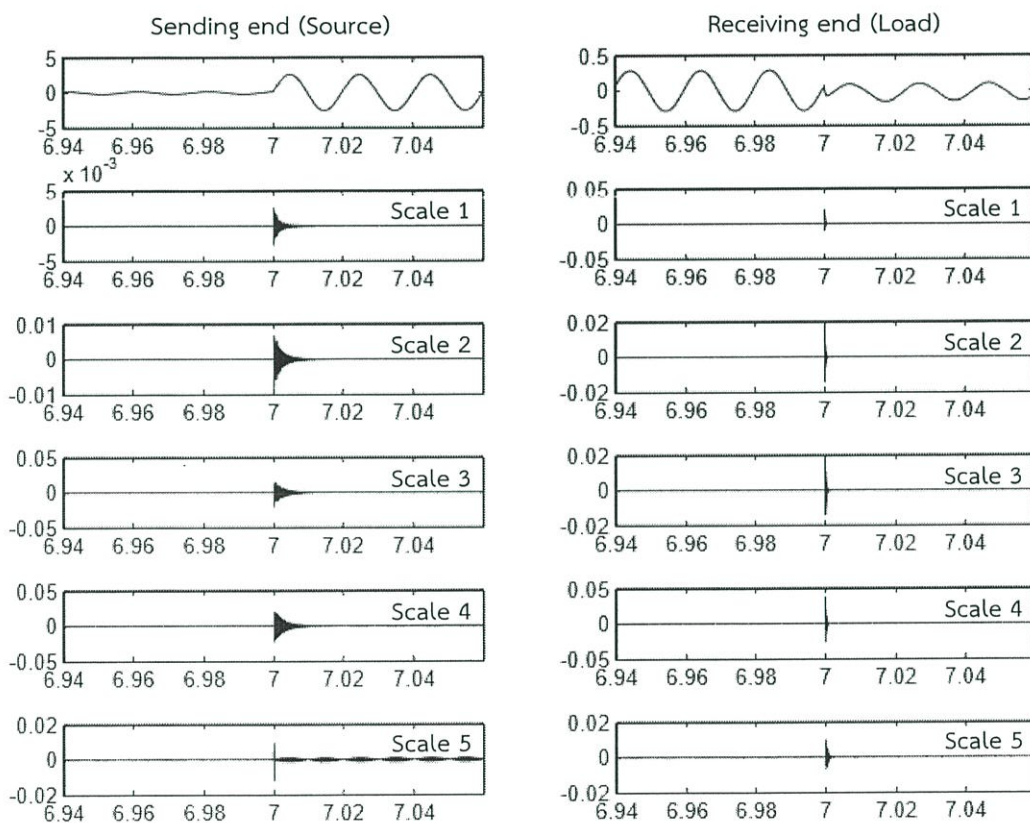
สเกลที่ 1 มีช่วงความถี่	50 – 100 kHz
สเกลที่ 2 มีช่วงความถี่	25 – 50 kHz
สเกลที่ 3 มีช่วงความถี่	12.5 – 25 kHz
สเกลที่ 4 มีช่วงความถี่	6.25 – 12.5 kHz
สเกลที่ 5 มีช่วงความถี่	3.125 – 6.25 kHz

ผลลัพธ์จากการใช้เวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลหรือช่วง ความถี่ที่ 1–5 จะได้สัมประสิทธิ์แต่ละสเกลออกมา นำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงไปวิเคราะห์พอลต์ใน สายส่ง เช่น ตรวจจับพอลต์ ระบุตำแหน่งพอลต์ และระบุประเภทของพอลต์ต่อไป

4.3 การตรวจจับฟอลต์ (Fault Detection)

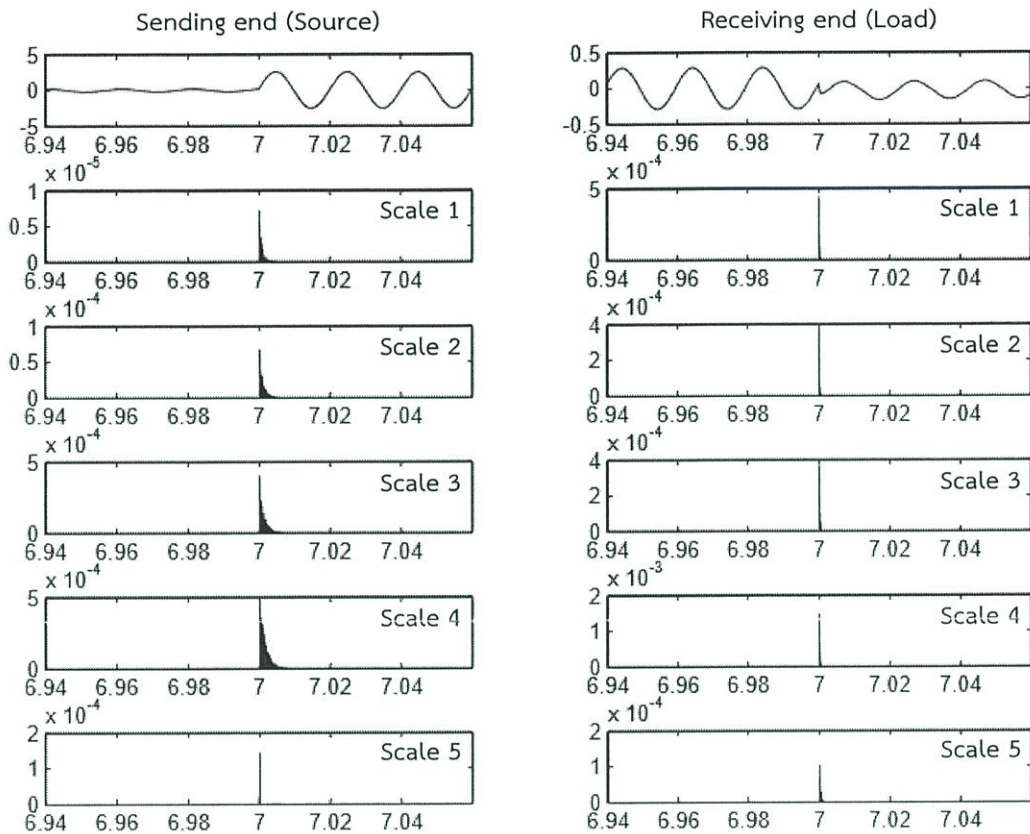
การตรวจจับฟอลต์เป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าตรวจจับฟอลต์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จะสามารถกำจัดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วและลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถเข้าไปซ่อมบำรุงได้อย่างทันที

หลังจากการแปลงคลาร์กโดยใช้เมทริกซ์ C แปลงสัญญาณกระแสฟอลต์ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) และใช้เวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) แยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกล จะได้สัมประสิทธิ์จากการแยกองค์ประกอบความถี่สูง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การแปลงเวฟเล็ตของกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current)

จะสังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 7s$) มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ๆ ศูนย์และหลังเกิดฟอลต์ ($t > 7s$) มีสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนและง่ายต่อการพิจารณา จึงทำการยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลที่ 1-5 จะได้สัมประสิทธิ์จากการแยกองค์ประกอบความถี่สูง ที่ยกกำลังสองแล้ว ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเล็ดของกระแสลำดับวอยกกำลังสอง

ในการพิจารณาว่าเกิดฟอลต์หรือไม่ จะกำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 7s$) และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ($t > 7s$) เป็นจำนวนเท่า โดยตั้งสมมติฐาน คือ ถ้าสัมประสิทธิ์ในสเกลใดสเกลหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติ แสดงว่า มีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่งนั้น

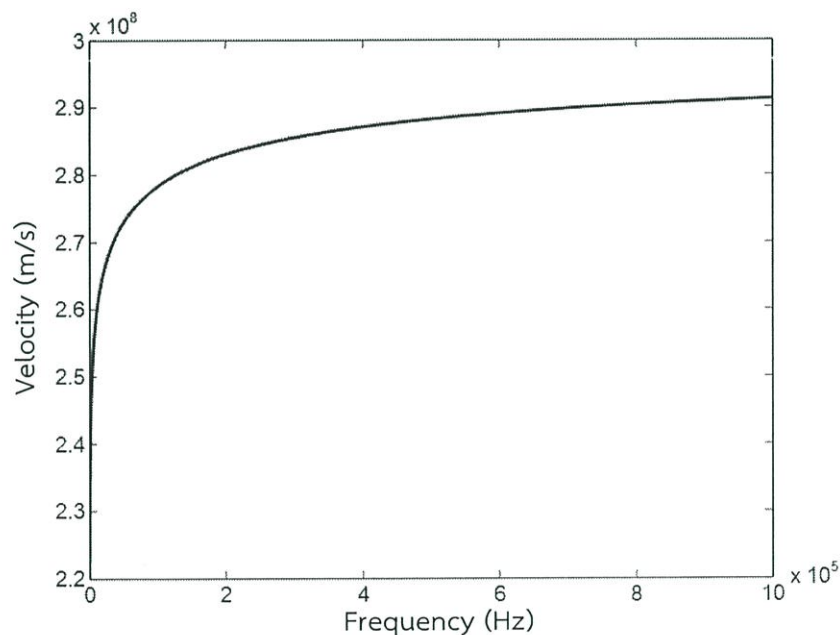
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นที่สเกลที่ 1 จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติ แสดงว่าสายส่งในวงจรนี้เกิดฟอลต์ แต่ถ้าในสเกลที่ 1 ไม่สามารถตรวจจับฟอลต์หรือไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของค่าสัมประสิทธิ์สามารถวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงได้ในสเกลถัดไปได้ (สเกลที่ 2-5)

ผลลัพธ์จากการตรวจจับฟอลต์ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ที่เกิน 5 เท่าจากสภาวะปกติว่าเกิดขึ้นที่เวลาใด นั่นคือ เวลาที่กระแสฟอลต์เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้าน ทั้งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย และด้านรับหรือโหลด เวลาที่ตรวจพบนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของเวลาที่เกิดฟอลต์ และจะนำข้อมูลหลังจากเวลานี้อีก $1/4$ ไซเคิลหรือ 0.005 วินาทีในระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ มาคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้

4.4 การระบุตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location)

จากการตรวจจับฟอลต์ในวงจรและสามารถตรวจพบฟอลต์ว่าเกิดขึ้นในสายส่งจริง จากผลการตรวจจับฟอลต์จะได้เวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์ เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทาง (Travelling wave) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งที่จุดใดจุดหนึ่ง จะทำให้สัญญาณที่เกิดฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายสายส่งทั้งสองด้าน ทั้งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย และด้านรับหรือโหลด ถ้าสามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้านได้ จะสามารถนำเวลาที่ได้มาใช้ในการระบุตำแหน่งฟอลต์

ในการพิจารณาการระบุตำแหน่งฟอลต์ นอกจากจะพิจารณาเวลาที่คลื่นที่เกิดฟอลต์เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้านแล้ว ยังพิจารณาถึงความเร็วของคลื่นเดินทางซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสายส่ง และช่วงความถี่ในแต่ละสเกลที่เวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา เนื่องจากความเร็วของคลื่นเดินทางแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ของคลื่นที่นำมาพิจารณา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความเร็วคลื่นเดินทางในแต่ละความถี่

จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยจะแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกล ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาความเร็วคลื่นเดินทาง จึงทำการเฉลี่ยความเร็วคลื่นเดินทางในแต่ละสเกล หรือช่วงความถี่ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเร็วคลื่นเดินทางเฉลี่ยในแต่ละสเกลหรือช่วงความถี่

เวฟเล็ตสเกลที่	ช่วงความถี่ (kHz)	ความเร็วเฉลี่ย (km/s)
1	50 – 100	289,298
2	25 – 50	284,408
3	12.5 – 25	278,221
4	6.25 – 12.5	271,004
5	3.125 – 6.25	263,198

การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดพอลต์ จะพิจารณาต่อจากการตรวจจับพอลต์ ซึ่งการตรวจจับพอลต์จากตัวอย่างเหตุการณ์ในขณะที่เกิดพอลต์ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติ มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$d = \frac{(L-v \times (tr-ts))}{2} \quad (4.7)$$

เมื่อ

d = ระยะทางจากจุดที่เกิดพอลต์วัดจากปลายสายส่งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย (km)

L = ความยาวของสายส่ง (km)

ts = เวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย (s)

tr = เวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับหรือโหลด (s)

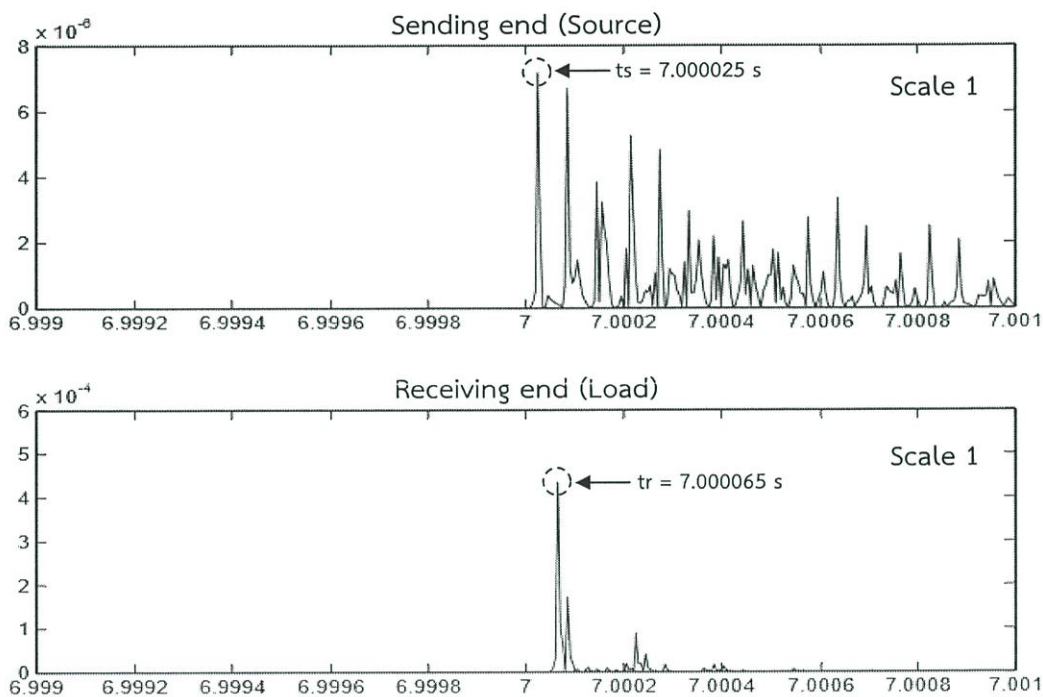
v = ความเร็วคลื่นเดินทางเฉลี่ยในแต่ละสเกล (km/s)

ตัวอย่างในการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งพอลต์จากการตรวจจับพอลต์ ซึ่งเป็นพอลต์ที่เฟส A และเฟส B ลงดิน (ABG) ระยะทางเกิดพอลต์ที่ 9 กิโลเมตรของสายส่ง เมื่อวัดจากปลายด้านส่ง ตรวจจับพอลต์ได้ในสเกลที่ 1 หรือที่ช่วงความถี่ 50 – 100 กิโลเฮิร์ต ดังนั้น ความเร็วคลื่นเดินทางที่ใช้ในการคำนวณ คือ 289,298 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าคงที่ในการระบุตำแหน่งพอลต์ วิธีการคำนวณสามารถคำนวณได้ 3 วิธี ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. คำนวณจากค่ายอดคลื่นแรก (First Peak)
2. คำนวณจากค่ายอดคลื่นสูงสุด (Maximum Peak)
3. คำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak)

4.4.1 คำนวณจากค่ายอดคลื่นแรก (First Peak)

การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งพอลต์โดยวิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นแรก เป็นค่ายอดคลื่นแรก ที่ตรวจพบได้จากตรวจจับพอลต์ ซึ่งเป็นการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายสายส่งของค่า ยอดคลื่นแรก ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค่ายอดคลื่นแรก

เมื่อ $L = 30$ กิโลเมตร
 $ts = 7.000025$ วินาที
 $tr = 7.000065$ วินาที
 $v = 289298$ กิโลเมตร/วินาที

จากสมการที่ 4.7 แทนค่าตัวแปรลงในสมการ จะได้

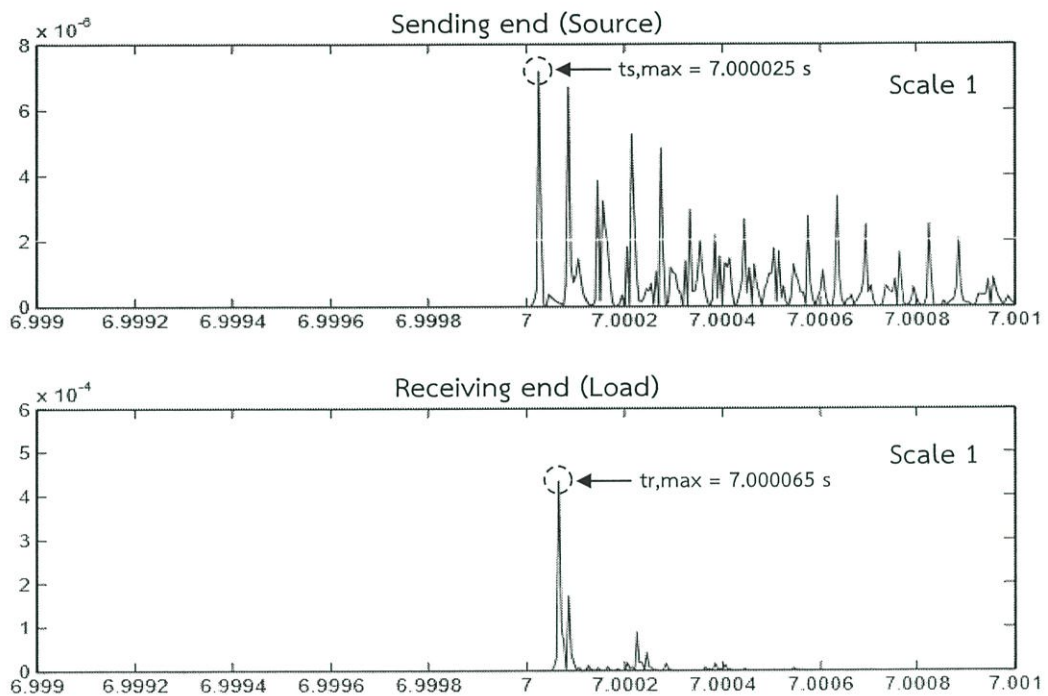
$$d = \frac{(30 - 289298 \times (7.000065 - 7.000025))}{2} \quad (4.8)$$

$$d = 9.214024 \text{ กิโลเมตร}$$

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จริงที่ 9 กิโลเมตรเมื่อวัดจากปลายด้านส่ง
ดังนั้น จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน 0.214024 กิโลเมตร

4.4.2 คำนวณจากค่ายอดคลื่นสูงสุด (Maximum Peak)

การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์โดยวิธีการคำนวณจากค่ายอดสูงสุด แตกต่างจากการคำนวณจากค่ายอดคลื่นแรก คือ เป็นค่ายอดคลื่นสูงสุดในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังจากการตรวจจับฟอลต์ ซึ่งเป็นการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งของค่ายอดคลื่นสูงสุด ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค่ายอดคลื่นสูงสุด

เมื่อ $L = 30$ กิโลเมตร
 $t_{s,max} = 7.000025$ วินาที
 $t_{r,max} = 7.000065$ วินาที
 $v = 289298$ กิโลเมตร/วินาที

จากสมการที่ 4.7 แทนค่าตัวแปรลงในสมการ จะได้

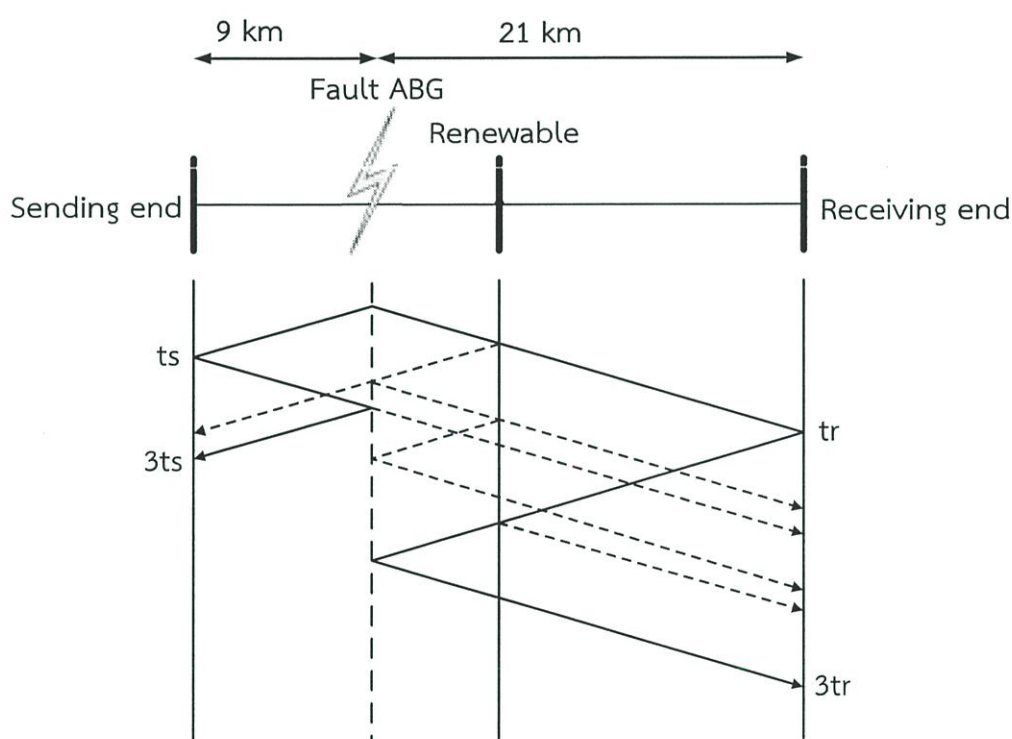
$$d = \frac{(30 - 289298 \times (7.000065 - 7.000025))}{2} \quad (4.9)$$

$$d = 9.214024 \text{ กิโลเมตร}$$

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จริงที่ 9 กิโลเมตรเมื่อวัดจากปลายด้านส่ง
ดังนั้น จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน 0.214024 กิโลเมตร

4.4.3 คำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak)

การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์โดยวิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง เป็นค่ายอดคลื่นที่สะท้อนจากปลายสายส่งทั้งสองด้านและสะท้อนจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเป็นการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งของค่ายอดคลื่นแรกและค่ายอดคลื่นที่สอง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่ายอดคลื่นที่เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้าน

การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ จะพิจารณาจากเวลาที่ฟอลต์เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้านเป็นค่ายอดคลื่นแรกแล้วสะท้อนกลับไปยังตำแหน่งที่เกิดฟอลต์และสะท้อนกลับไปยังปลายสายส่งทั้งสองด้านอีกครั้งเป็นค่ายอดคลื่นที่สอง มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$d = L \times \frac{t_{diff_S}}{t_{diff_S} + t_{diff_R}} \quad (4.10)$$

$$t_{\text{diff}_S} = \left| \frac{ts - 3ts}{2} \right| \quad (4.11)$$

$$t_{\text{diff}_R} = \left| \frac{tr - 3tr}{2} \right| \quad (4.12)$$

เมื่อ

d = ระยะทางจากจุดที่เกิดฟอลต์วัดจากปลายสายส่งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย (km)

L = ความยาวของสายส่ง (m)

t_{diff_S} = ผลต่างของเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่ง (s)

t_{diff_R} = ผลต่างของเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับ (s)

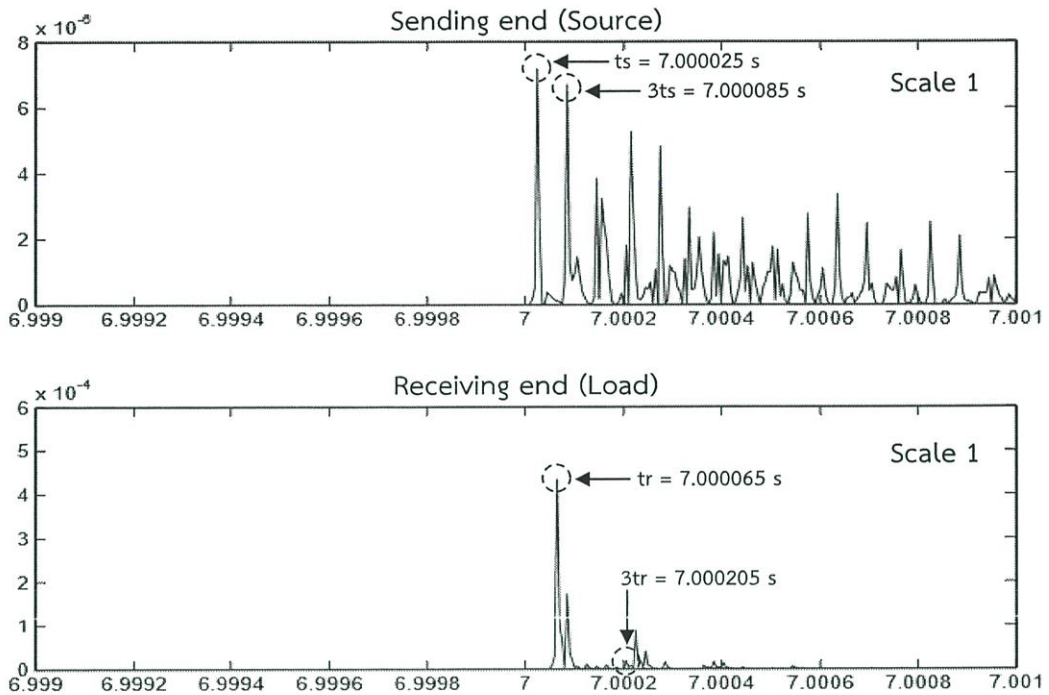
ts = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่งของค้ายอดคลื่นแรก (s)

tr = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับของค้ายอดคลื่นแรก (s)

$3ts$ = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่งของค้ายอดคลื่นที่สอง (s)

$3tr$ = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับของค้ายอดคลื่นที่สอง (s)

จากตัวอย่างการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์ ซึ่งเป็นฟอลต์ที่เฟส A และเฟส B ลงดิน (ABG) ระยะทางเกิดฟอลต์ที่ 9 กิโลเมตรของสายส่ง เมื่อวัดจากปลายด้านส่ง จะได้เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค้ายอดคลื่นแรกและค้ายอดคลื่นที่สอง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งทั้งสองด้านของค้ายอดคลื่นแรกและสอง

เมื่อ $L = 30$ กิโลเมตร
 $t_s = 7.000025$ วินาที
 $t_r = 7.000065$ วินาที
 $3t_s = 7.000085$ วินาที
 $3t_r = 7.000205$ วินาที

จากสมการที่ 4.11 แทนค่า t_s และ $3t_s$ ลงในสมการ จะได้

$$t_{\text{diff}_S} = \left| \frac{7.000025 - 7.000085}{2} \right| = 0.00003 \text{ วินาที} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ 4.12 แทนค่า t_r และ $3t_r$ ลงในสมการ จะได้

$$t_{\text{diff}_R} = \left| \frac{7.000065 - 7.000205}{2} \right| = 0.00007 \text{ วินาที} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.10 แทนค่า L , t_{diff_S} และ t_{diff_R} ลงในสมการ จะได้

$$d = 30 \times \frac{0.00003}{0.00003 + 0.00007} \quad (4.15)$$

$$d = 9.000000 \text{ กิโลเมตร}$$

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จริงที่ 9 กิโลเมตรเมื่อวัดจากปลายด้านส่ง
ดังนั้น จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร

4.5 การระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Identification)

การเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ ที่สายส่งย่อมทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านส่ง ด้านรับ และด้านพลังงานทดแทน ซึ่งในปฏิญานินท์เล่มนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสัญญาณกระแสไฟฟ้าในการระบุชนิดฟอลต์เท่านั้นเนื่องจากมีความถูกต้องและแม่นยำ โดยได้นำสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาทำการแปลงเวฟเล็ทเพื่อพิจารณาความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ของแต่ละเฟสเทียบกับสัมประสิทธิ์ลำดับศูนย์ เพื่อให้ค่าแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกันและง่ายต่อการเปรียบเทียบ จากนั้นจึงวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เพื่อสร้างอัลกอริทึมตามทฤษฎีการตัดสินใจ (Decision Tree) ดังนั้นการระบุชนิดของฟอลต์จึงมีกระบวนการดังต่อไปนี้

4.5.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์

ตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ต้องผ่านการแปลงเวฟเล็ทและต้องอยู่ในสเกลเดียวกัน เช่น หากนำสเกลที่ 1 ให้ใช้สเกลที่ 1 ตลอดการวิเคราะห์และเพื่อง่ายต่อการพิจารณาจึงได้ทำการกำหนดตัวแปรดังนี้

4.5.1.1 ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงที่เกิดฟอลต์

A_{\max} = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบเฟส A ในช่วง ¼ ลูกคลื่น

B_{\max} = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบเฟส B ในช่วง ¼ ลูกคลื่น

C_{\max} = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบเฟส C ในช่วง ¼ ลูกคลื่น

Z_{\max} = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ในช่วง ¼ ลูกคลื่น

4.5.1.2 ตัวแปรค่าเปรียบเทียบ

$A_{\text{com}} = \frac{A_{\max}}{Z_{\max}}$; ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบเฟส A อ้างอิงกับค่าสูงสุดองค์ประกอบลำดับศูนย์

$$B_{com} = \frac{B_{max}}{Z_{max}} ; \text{ค่าเปรียบเทียบของค้ประกอบเฟส B อ้างอิงกับค่าสูงสุดของค้ประกอบลำดับศูนย์}$$

$$C_{com} = \frac{C_{max}}{Z_{max}} ; \text{ค่าเปรียบเทียบของค้ประกอบเฟส C อ้างอิงกับค่าสูงสุดของค้ประกอบลำดับศูนย์}$$

$$Z_{com} = \frac{Z_{max}}{Z_{max}} ; \text{ค่าเปรียบเทียบของค้ประกอบลำดับศูนย์อ้างอิงกับค่าสูงสุดของค้ประกอบลำดับศูนย์มีค่าเท่ากับ 1}$$

4.5.1.3 ตัวแปรตรวจสอบ

$$Ph_{max} = \text{ค่าสูงสุดจากการเปรียบเทียบ } A_{com}, B_{com}, C_{com}$$

$$Ph_{min} = \text{ค่าต่ำสุดจากการเปรียบเทียบ } A_{com}, B_{com}, C_{com}$$

เมื่อได้ค่าเปรียบเทียบทั้งสามเฟส และค่าองค์ประกอบลำดับศูนย์ รวมถึงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการเปรียบเทียบทั้งสามเฟส แล้วจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาศึกษาพฤติกรรมเพื่อออกแบบอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับระบบดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างพฤติกรรมพอลต์เพื่อใช้ในการออกแบบอัลกอริทึม

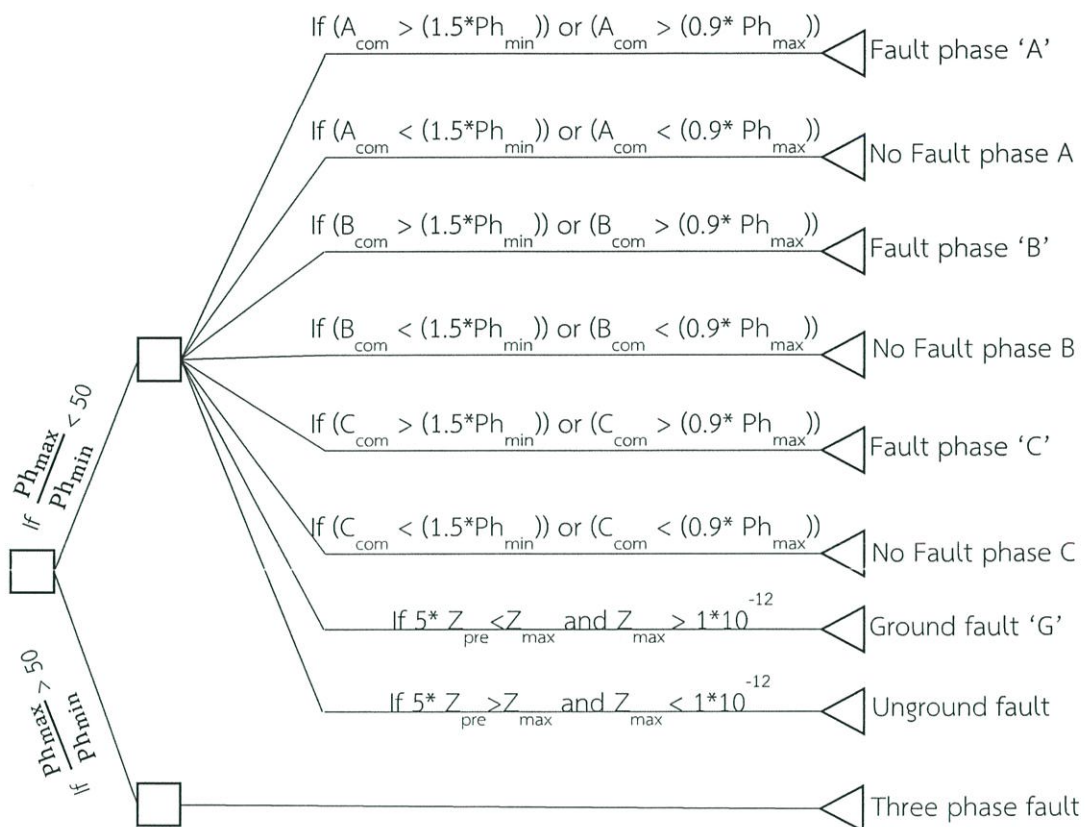
	A_{com}	B_{com}	C_{com}	Ph_{min}	Ph_{max}	Z_{pre}	Z_{max}
พอลต์หนึ่งเฟสลงดิน							
ด้านส่ง	3.783313	0.476751	0.476926	0.476751	3.783313	1.56E-14	8.23E-07
ด้านพลังงาน ทดแทน	4.743506	1.12105	1.079438	1.079438	4.743506	1.96E-14	2.43E-09
ด้านรับ	361.0468	64.02296	63.99675	63.99675	361.0468	1.71E-14	1.35E-07
พอลต์ระหว่างเฟส							
ด้านส่ง	6.92E+08	6.92E+08	140556.9	140556.9	6.92E+08	1.56E-14	1.10E-14
ด้านพลังงาน ทดแทน	2226852	2225267	979.7388	979.7388	2226852	1.96E-14	2.27E-14
ด้านรับ	2.29E+09	2.29E+09	1242371	1242371	2.29E+09	1.71E-14	2.01E-13
พอลต์ระหว่างเฟสลงดิน							
ด้านส่ง	57.54646	91.94202	0.400222	0.400222	91.94202	1.56E-14	1.09E-07
ด้านพลังงาน ทดแทน	137.842	196.6028	1.209784	1.209784	196.6028	1.96E-14	3.05E-10
ด้านรับ	23846.23	27347.9	63.19909	63.19909	27347.9	1.71E-14	1.80E-08
พอลต์สามเฟส							
ด้านส่ง	5028083.117	11153238	1204625	1204625	11153238	1.56E-14	9.53E-13

ด้านพลังงาน ทดแทน	35566.4804	78725	8355.06	8355.06	78725	2.07E-14	8.99E-13
ด้านรับ	332608850.4	7.37E+08	79347809	79347809	7.37E+08	1.71E-14	8.72E-13

จากตารางที่ 4.2 คือตัวอย่างแสดงพฤติกรรมตัวแปรการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง ชนิด AG , AB , ABG และ ABC มุมเกิดฟอลต์ 45 องศา ติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง เพื่อออกแบบอัลกอริทึมในการระบุชนิดฟอลต์ มีพฤติกรรมดังนี้

- ค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วงเกิดฟอลต์ (Z_{max}) ชนิดฟอลต์ลงกราวด์ มีค่ามากกว่า 1×10^{-12} และมีค่ามากกว่า 5 เท่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ (Z_{pre})
- ค่าเปรียบเทียบองค์ประกอบเฟสที่เกิดฟอลต์ มีความแตกต่าง 0.9 เท่าของค่าต่ำสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{min}) อย่างชัดเจน
- ค่าเปรียบเทียบองค์ประกอบเฟสที่เกิดฟอลต์ มีความแตกต่าง 1.5 เท่าของค่าสูงสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{max}) อย่างชัดเจน
- ในกรณีฟอลต์สามเฟส อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{max}) และค่าต่ำสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{min}) มีค่าไม่เกิน 50

ดังนั้นจึงสามารถแสดงเป็นแผนภาพการตัดสินใจ (Decision Tree) ได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 แผนผังการตัดสินใจของการระบุชนิดฟอลต์

4.5.2 ตัวอย่างการระบุชนิดฟอลต์

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีดังกล่าว จึงขอยกตัวอย่างวิธีการระบุฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง มุมเกิดฟอลต์ 45 องศา ติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง โดยได้นำสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้งสามด้านมาแปลงเวฟเล็ท แล้วนำสเกลที่ 1 มาวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังนี้

4.5.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ท เป็นวิธีการนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าของทั้งสามด้านมาทำการแปลงเวฟเล็ทเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 แล้วตรวจจับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ช่วงเกิดฟอลต์

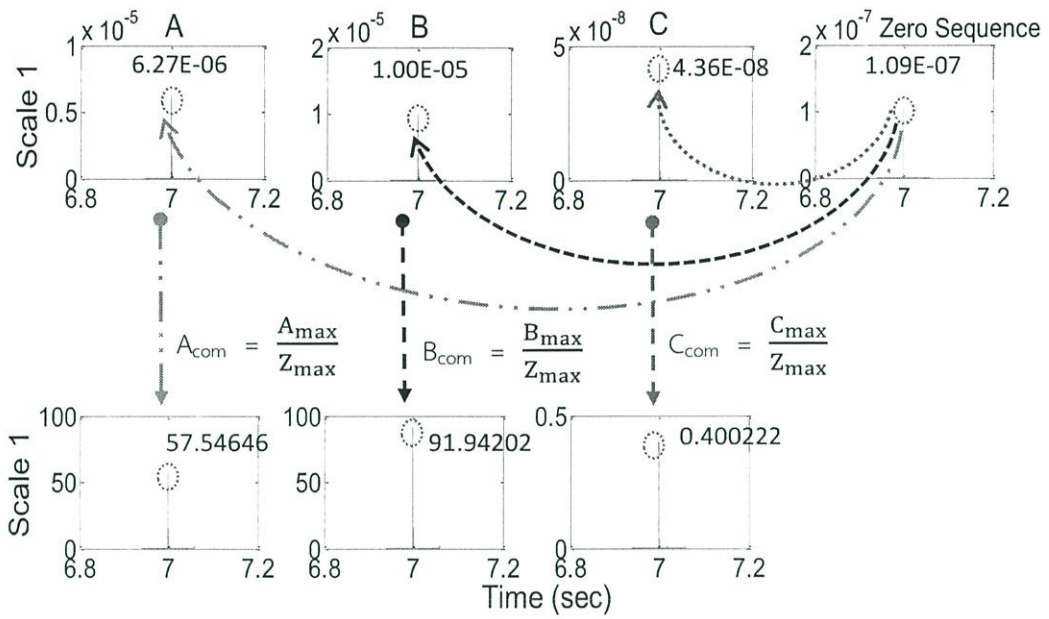
ด้านส่ง	ด้านพลังงานทดแทน	ด้านรับ
$A_{\max} = 6.27E-06$	$A_{\max} = 4.21E-08$	$A_{\max} = 4.28E-04$
$B_{\max} = 1.00E-05$	$B_{\max} = 6.00E-08$	$B_{\max} = 4.91E-04$
$C_{\max} = 4.36E-08$	$C_{\max} = 3.69E-10$	$C_{\max} = 1.14E-06$
$Z_{\max} = 1.09E-07$	$Z_{\max} = 3.05E-10$	$Z_{\max} = 1.80E-08$

4.5.2.2 ขั้นตอนที่ 2 การหาค่าเปรียบเทียบ นำค่าที่ได้จาก 4.5.4.1 มาทำตามขั้นตอนในข้อที่ 4.5.1.2 จะได้ค่าเปรียบเทียบดังนี้

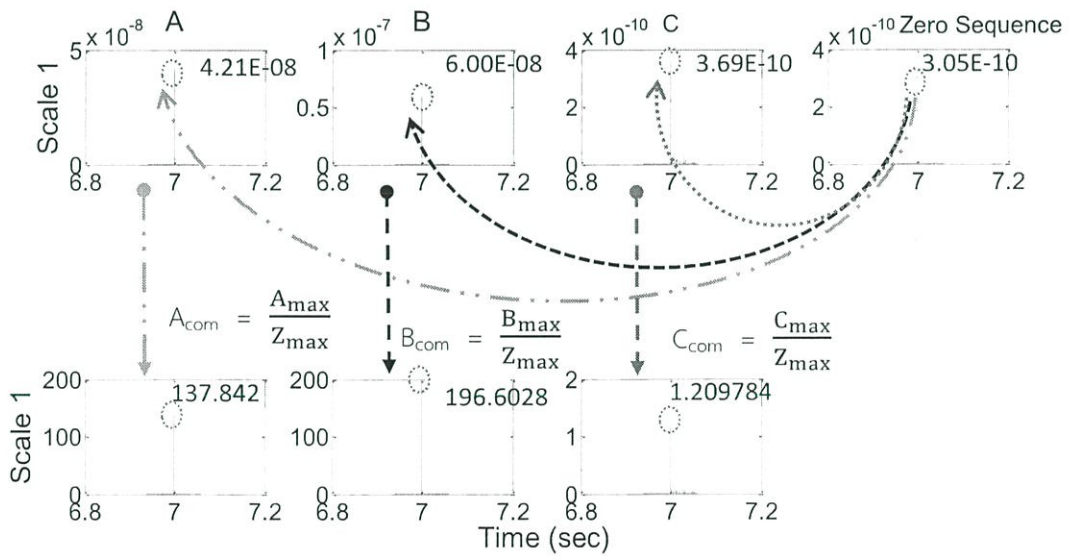
ด้านส่ง	ด้านพลังงานทดแทน	ด้านรับ
$A_{\text{com}} = \frac{6.27E-06}{1.09E-07} = 57.546$	$A_{\text{com}} = \frac{4.21E-08}{3.05E-10} = 137.842$	$A_{\text{com}} = \frac{4.28E-04}{1.80E-08} = 23846.23$
$B_{\text{com}} = \frac{1.00E-05}{1.09E-07} = 91.942$	$B_{\text{com}} = \frac{6.00E-08}{3.05E-10} = 196.603$	$B_{\text{com}} = \frac{4.91E-04}{1.80E-08} = 27347.9$
$C_{\text{com}} = \frac{4.36E-08}{1.09E-07} = 0.400$	$C_{\text{com}} = \frac{3.69E-10}{3.05E-10} = 1.209$	$C_{\text{com}} = \frac{1.14E-06}{1.80E-08} = 63.199$
$Z_{\text{com}} = \frac{1.09E-07}{1.09E-07} = 1$	$Z_{\text{com}} = \frac{3.05E-10}{3.05E-10} = 1$	$Z_{\text{com}} = \frac{1.80E-08}{1.80E-08} = 1$

เมื่อได้ค่าเปรียบเทียบแล้ว สามารถหาค่าต่ำสุด Ph_{\min} และ ค่าสูงสุด Ph_{\max} จากการเปรียบเทียบ A_{com} , B_{com} , C_{com} ดังนี้

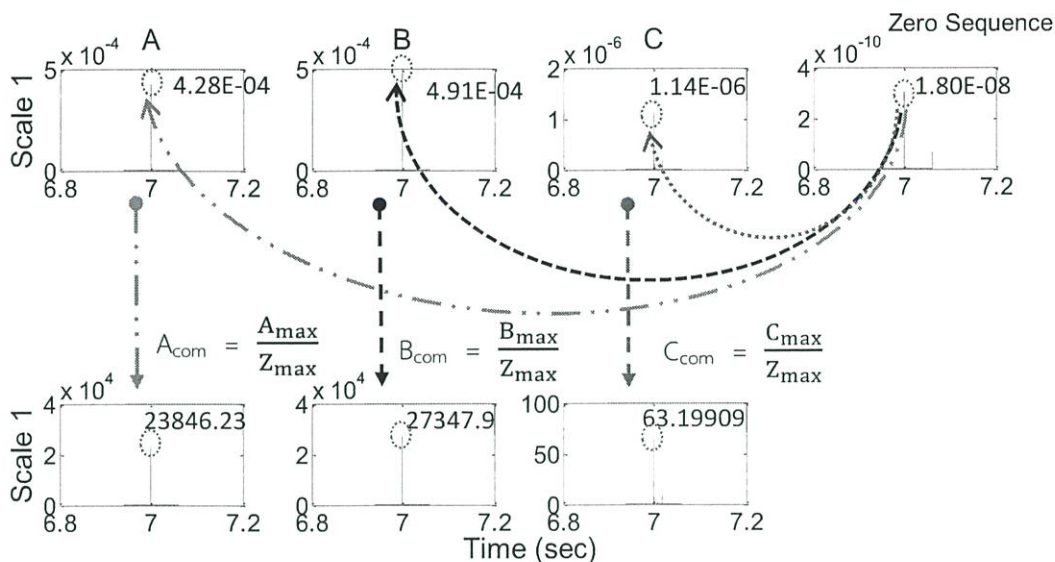
ด้านส่ง	ด้านพลังงานทดแทน	ด้านรับ
$Ph_{\min} = 0.400$	$Ph_{\min} = 1.209$	$Ph_{\min} = 63.199$
$Ph_{\max} = 91.942$	$Ph_{\max} = 196.603$	$Ph_{\max} = 27347.9$



(ก) ด้านส่ง



(ข) ด้านพลังงานทดแทน



(ค) ด้านรับ

รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ค่าสูงสุดของช่วงที่เกิดฟอลต์และค่าเปรียบเทียบ (ก) ด้านส่ง (ข) ด้านพลังงานทดแทน และ (ค) ด้านรับ

4.5.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การระบุชนิดฟอลต์

- พิจารณาฟอลต์ลงดิน

การพิจารณาฟอลต์ลงดินโดยใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์ หากมีค่าเกิน 1×10^{-12} จึงถือว่าเป็นฟอลต์ลงดิน

- พิจารณาฟอลต์แต่ละเฟส

การระบุชนิดฟอลต์แต่ละเฟสต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้คือ

1) ค่าเปรียบเทียบต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ของ Ph_{max}

ด้านส่ง	ด้านพลังงานทดแทน	ด้านรับ
$0.9 \cdot Ph_{max} = 82.748$	$0.9 \cdot Ph_{max} = 176.943$	$0.9 \cdot Ph_{max} = 24613.11$

หรือ

2) ค่าเปรียบเทียบต้องมีค่ามากกว่า 1.5 ของ Ph_{min}

ด้านส่ง	ด้านพลังงานทดแทน	ด้านรับ
$1.5 \cdot Ph_{min} = 0.6$	$1.5 \cdot Ph_{min} = 1.814$	$1.5 \cdot Ph_{min} = 94.798$

ตารางที่ 4.3 การพิจารณาฟอลต์แต่ละเฟสและฟอลต์ลงดิน

		ค่าเปรียบเทียบ	Ph _{max}	Ph _{min}	0.9*Ph _{max}	1.5*Ph _{min}	สรุป
ด้านส่ง	A	1.645885	91.942	0.400	82.748	0.6	Fault
	B	7.302813	91.942	0.400	82.748	0.6	Fault
	C	0.398047	91.942	0.400	82.748	0.6	No fault
	Z _{max}	$5 * 1.56E-14 < 1.09E-07 \text{ and } 1.09E-07 > 1 * 10^{-12}$					Ground
ด้านพลังงาน ทดแทน	A	4.141013	196.603	1.209	176.943	1.814	Fault
	B	11.67014	196.603	1.209	176.943	1.814	Fault
	C	1.172226	196.603	1.209	176.943	1.814	No fault
	Z _{max}	$5 * 1.96E-14 < 1.80E-08 \text{ and } 1.80E-08 > 1 * 10^{-12}$					Ground
ด้านรับ	A	511.4577	27347.9	63.199	24613.11	94.798	Fault
	B	1127.266	27347.9	63.199	24613.11	94.798	Fault
	C	63.35124	27347.9	63.199	24613.11	94.798	No fault
	Z _{max}	$5 * 1.71E-14 < 3.05E-10 \text{ and } 3.05E-10 > 1 * 10^{-12}$					Ground

4.5.2.4 ขั้นตอนที่ 4 สรุปการระบุชนิดฟอลต์

จากขั้นตอนหัวข้อที่ 4.4.4.1 - 4.4.4.3 จึงสามารถสรุปการระบุชนิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรห่างจากด้านส่ง มุมเกิดฟอลต์ 45 องศา เชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนระหว่างกลางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์

	เฟส A	เฟส B	เฟส C	กราวด์ (G)
ด้านส่ง	Fault	Fault	No fault	Fault
ด้านพลังงานทดแทน	Fault	Fault	No fault	Fault
ด้านรับ	Fault	Fault	No fault	Fault

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากบทที่ 3 มาวินิจฉัยฟอลต์ด้วยวิธีตามบทที่ 4 จากนั้นทดสอบวิธีดังกล่าวด้วยข้อมูลการจำลองทั้งสิ้น 600 ชุด เพื่อสามารถที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตามวัตถุประสงค์การทดลอง ซึ่งผลการทดสอบสามารถแบ่งรูปแบบการนำเสนอได้ดังต่อไปนี้

5.1 รูปแบบการนำเสนอ

5.1.1 วิธีที่ใช้ในการทดลอง

วิธีที่ใช้ในการวินิจฉัยฟอลต์ในการทดลองนี้คือการแปลงเวฟเล็ต โดยมีวิธีการตรวจจับคลื่นเดินทาง 3 วิธีคือ

1. วิธีค่ายอดคลื่นแรก
2. วิธีค่ายอดคลื่นสูงสุด
3. วิธีค่ายอดคลื่นที่สอง

5.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง

การแสดงผลของกราฟทดลองจะแบ่งตามการตำแหน่งติดตั้งของพลังงานทดแทนคือ ใกล้ด้านส่ง , ระหว่างกลาง และใกล้ด้านรับ โดยแต่ละตำแหน่งประกอบด้วยตำแหน่งเกิดฟอลต์ เรียงตามระยะทางร้อยละ 10 , 30 , 50 , 70 และ 90 ของความยาวสายส่ง (ห่างจากด้านส่ง) โดยแต่ละตารางมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

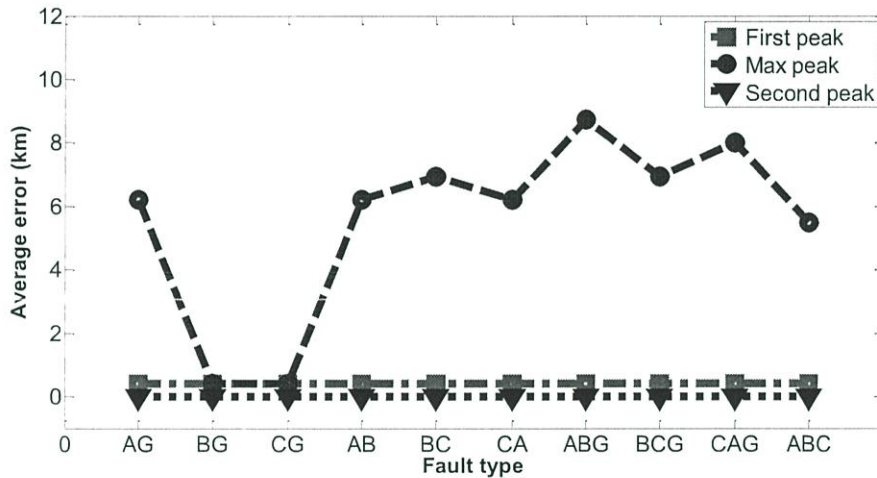
1. ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ซึ่งได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โดยเปรียบเทียบวิธีการหาตำแหน่งฟอลต์ด้วยกัน 3 วิธี คือ วิธีค่ายอดคลื่นแรก , วิธีค่ายอดคลื่นสูงสุด และวิธีค่ายอดคลื่นที่สอง พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งและความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธี
2. แสดงประสิทธิภาพของการระบุชนิดฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยวิธีค่ายอดสูงสุด เรียงลำดับตามประเภทฟอลต์ คือ AG , BG , CG , AB , BC , CA , ABG , BCG , CAG และ ABC ตามลำดับ
3. ค่าความถูกต้องที่ปรากฏในกราฟเกิดจากค่าเฉลี่ยของมุมเกิดฟอลต์ (Inception angle) ประกอบด้วยมุม 0 องศา , มุม 45 องศา , มุม 90 องศา และมุม 135 องศา

5.2 ผลการทดลอง

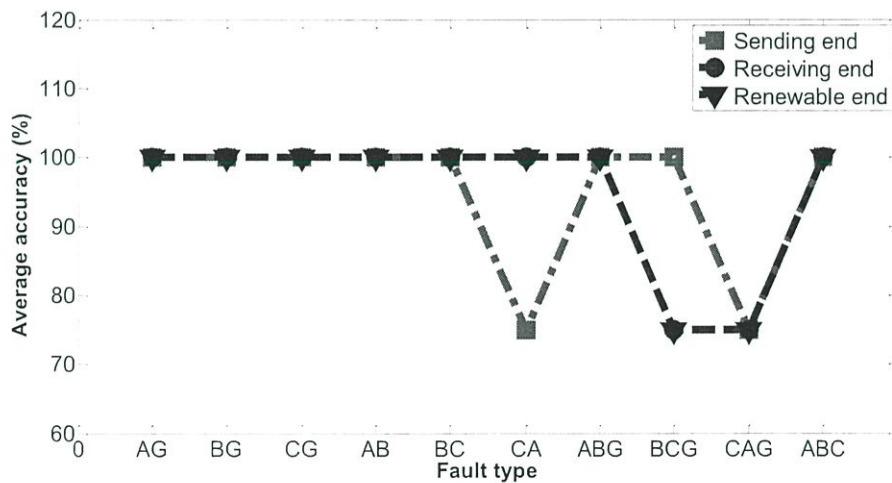
5.2.1 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

5.2.1.1 ฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่งไฟฟ้า และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 3 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 3 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 2.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 8.563 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 5.563 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 3 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

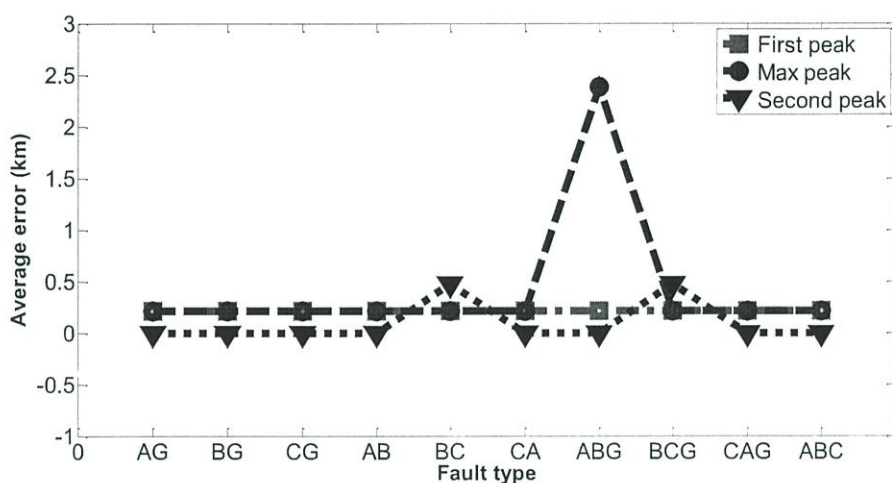
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 86.11 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

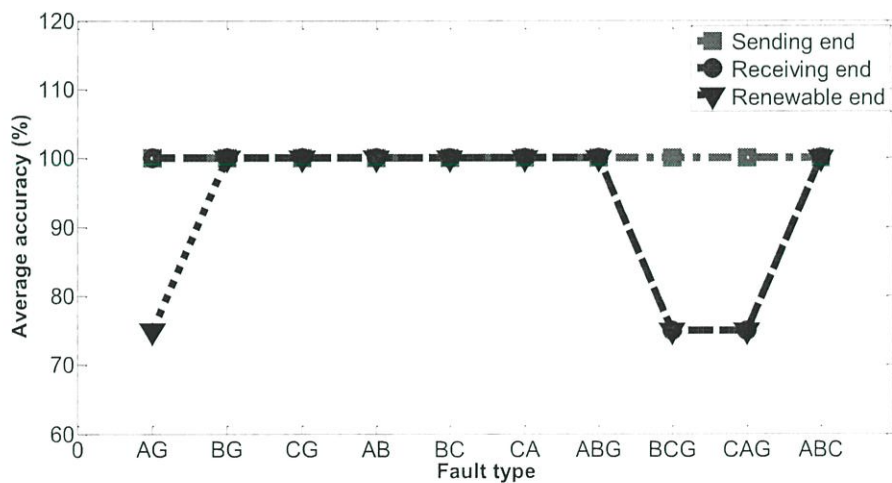
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.1.2 ฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่งไฟฟ้า และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 9 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกกระยะทางเฉลี่ยคือ 8.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 8.569 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 8.905 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.095 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) กับฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

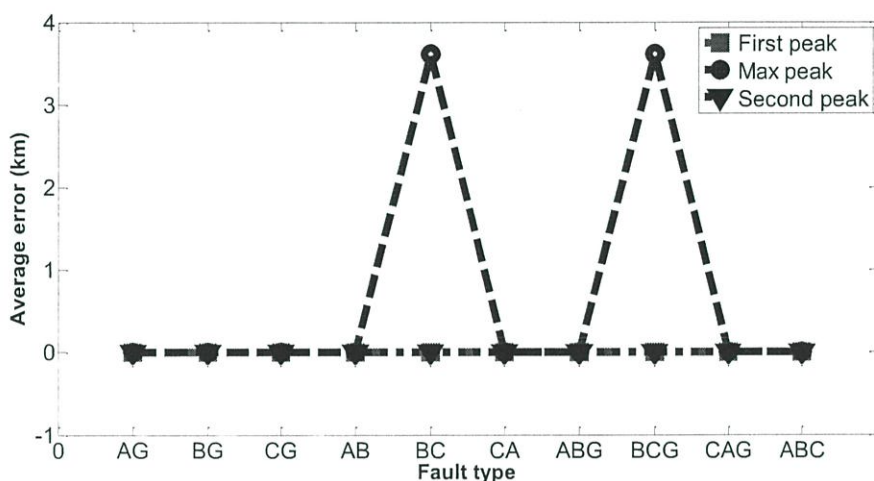
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 88.89 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

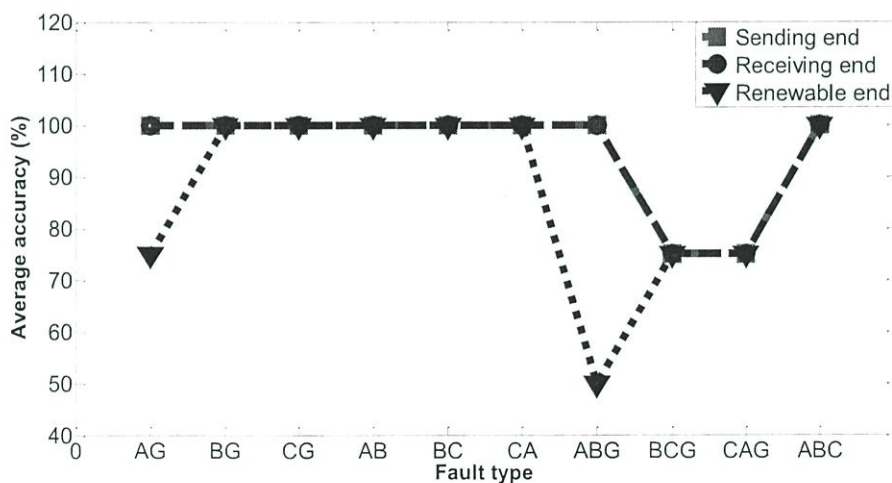
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์เท่ากันทุกประเภท ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากสุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

5.2.1.3 ฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่งไฟฟ้า และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 15 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 15 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 14.277 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.723 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) กับฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

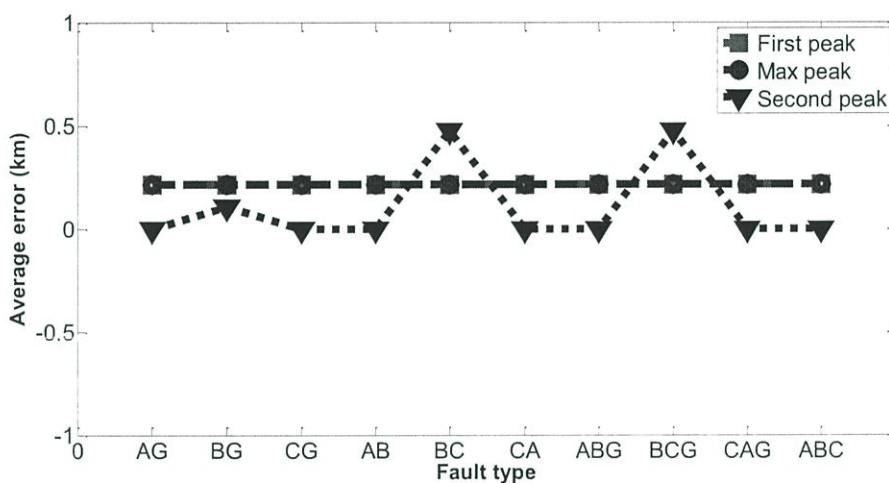
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 77.78 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

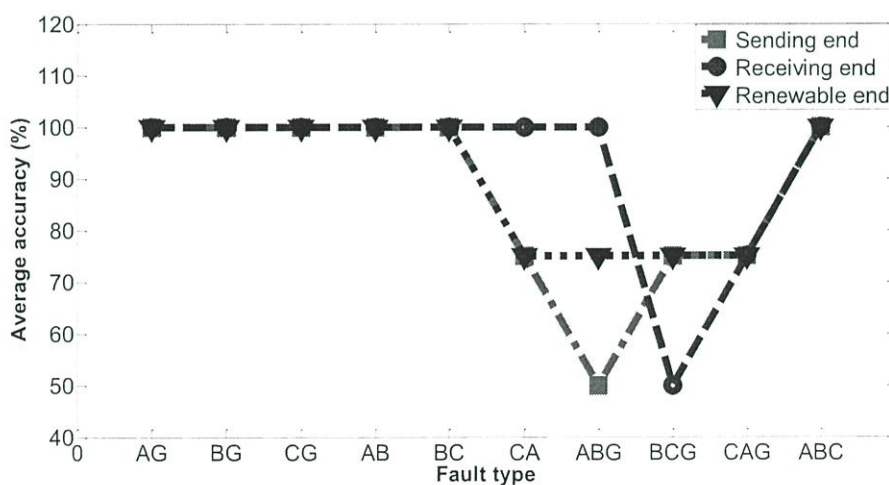
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

5.2.1.4 ฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่งไฟฟ้า และ สมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 21 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ ด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

การระบุตำแหน่งพอลต์ (ระยะทาง 21 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 20.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 20.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 20.895 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.106 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทพอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

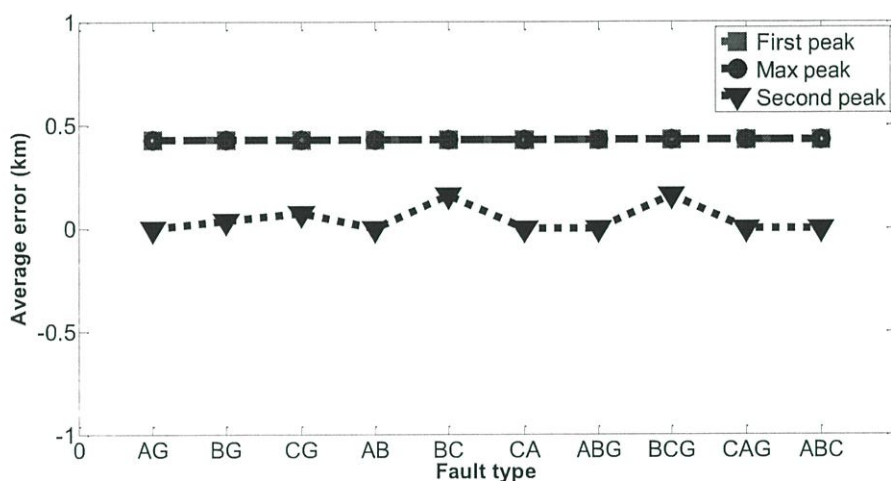
การระบุชนิดของพอลต์

วิธีการระบุชนิดของพอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , พอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 94.44 , ส่วนพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 72.22 และพอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

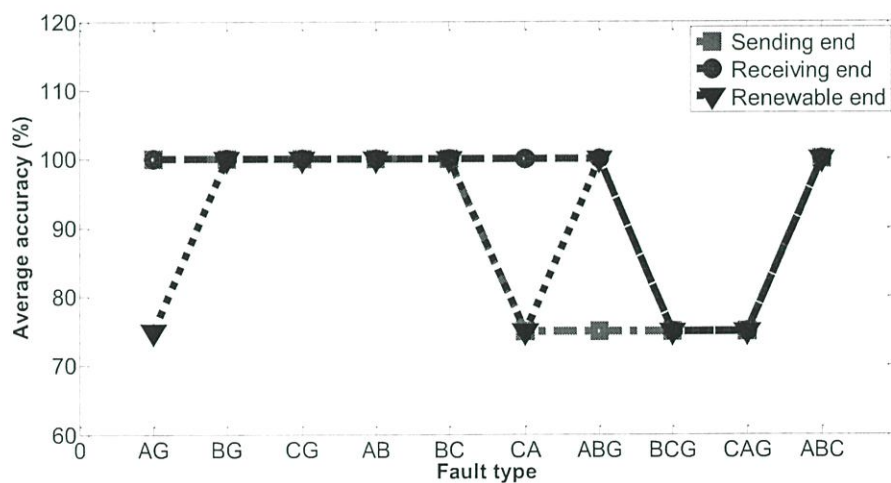
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.1.5 พอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่งไฟฟ้า และ สมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 27 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ ด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 27 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 26.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 26.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 26.958 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.042 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การระบุชนิดของฟอลต์

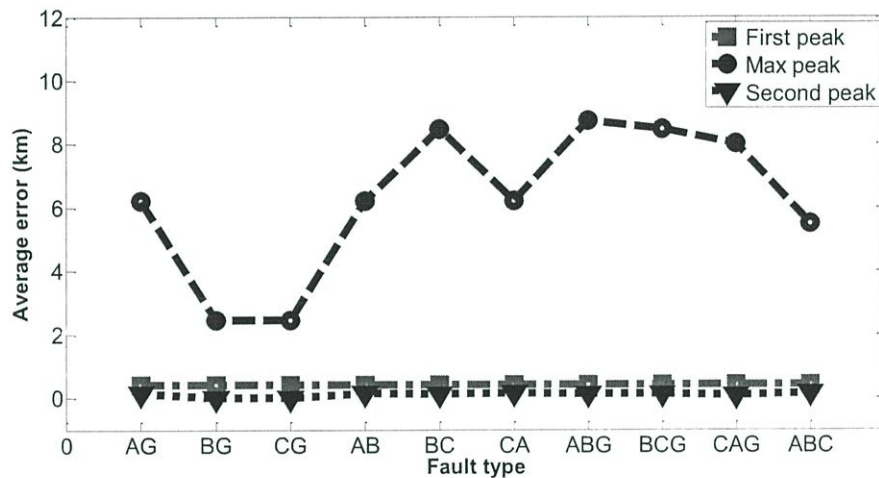
วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 91.67 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 75 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

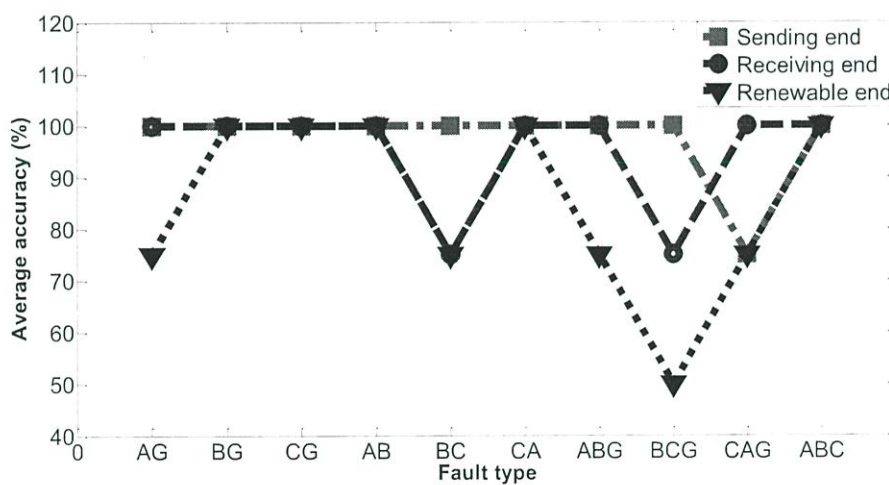
5.2.2 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

5.2.2.1 ฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลางระบบไฟฟ้า และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 3 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 5.12 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 3 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 2.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 9.276 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 6.276 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 2.892 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.108 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

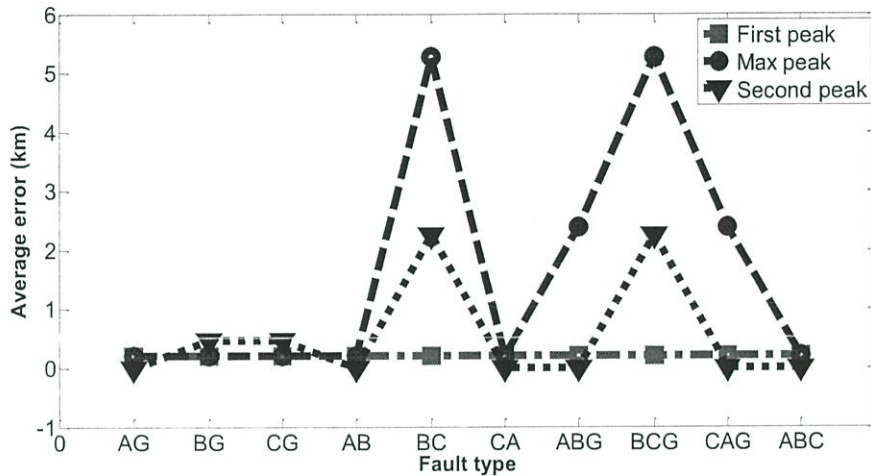
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 94.44 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 80.56 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

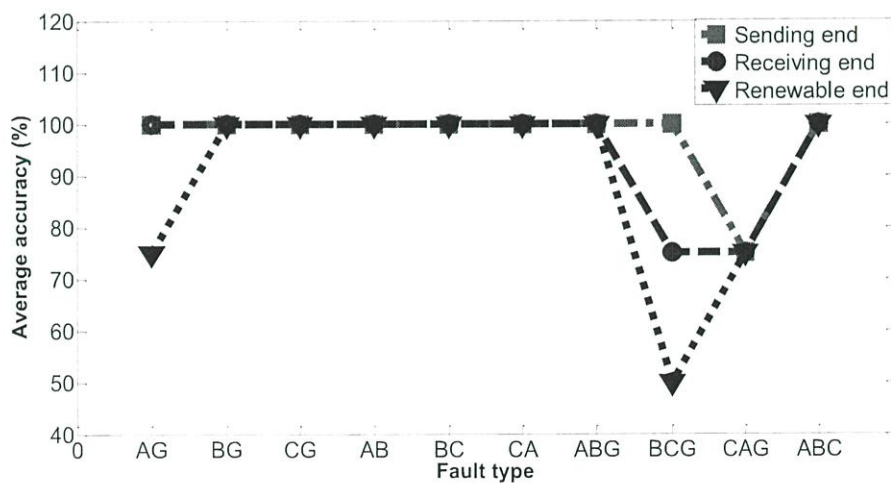
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด

5.2.2.2 ฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลางระบบไฟฟ้า และสมมติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 5.14 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 9 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกกระยะทางเฉลี่ยคือ 8.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 7.339 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.661 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 8.454 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.546 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

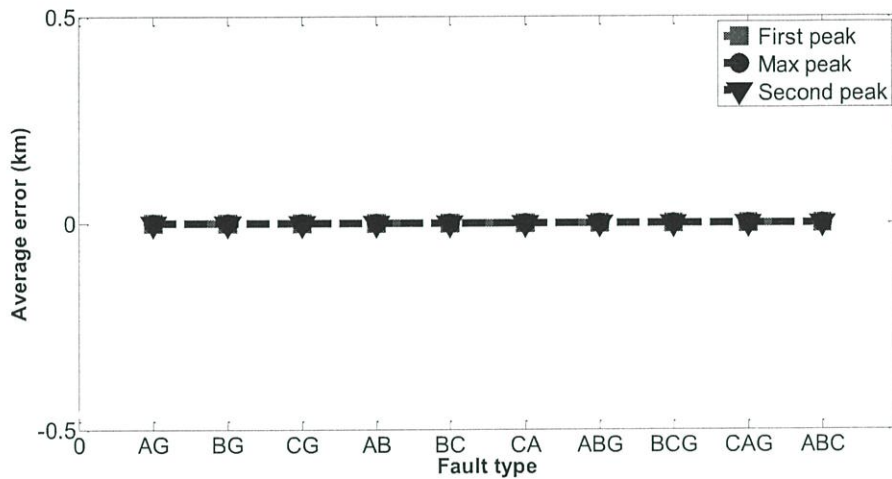
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 83.33 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

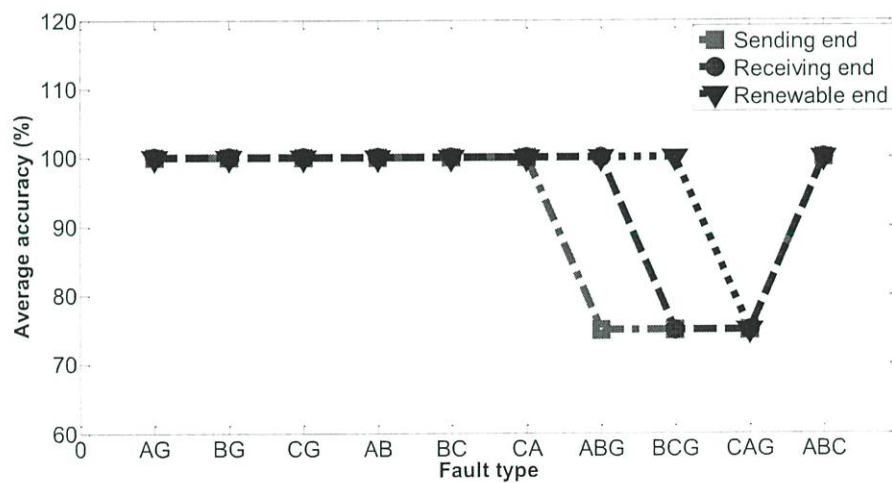
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

5.2.2.3 ฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลางระบบไฟฟ้า และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 15 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 5.16 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 15 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

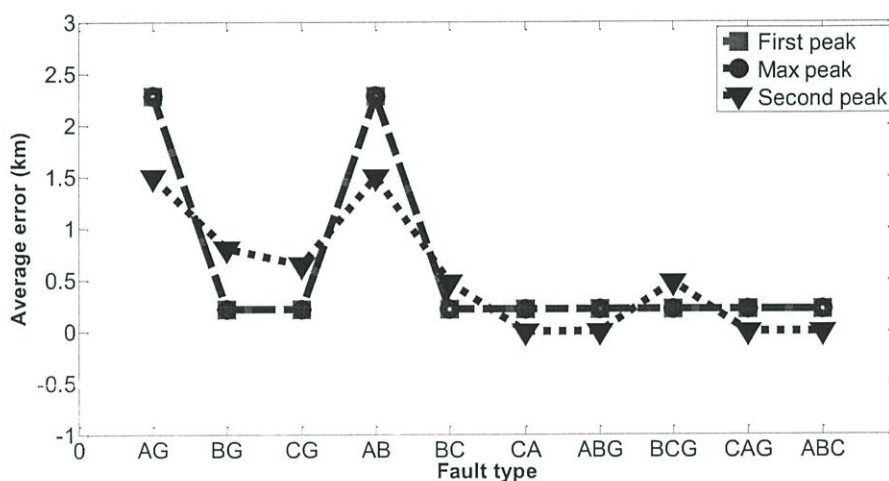
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 83.33 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

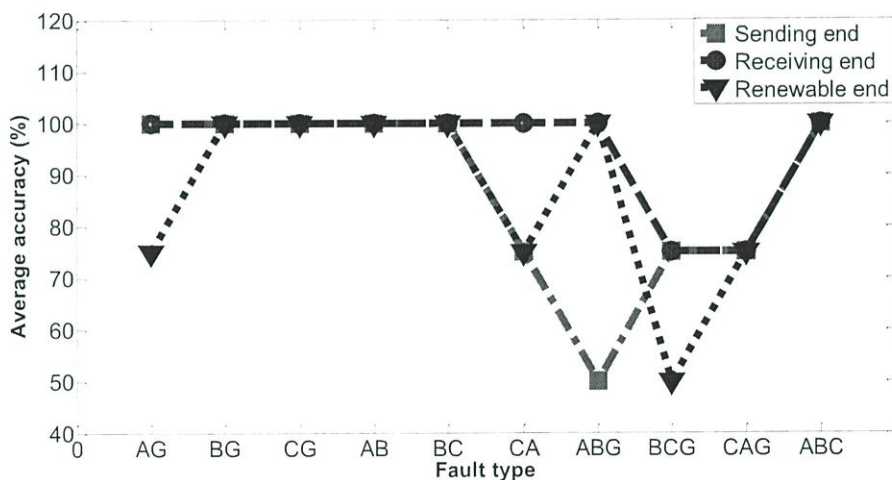
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.2.4 ฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลางระบบไฟฟ้า และสมมติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 21 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ



รูปที่ 5.17 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 5.18 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 21 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 20.373 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.627 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG,BG,CG) กับฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 20.373 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.627 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) กับฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 20.46 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.540 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG,BG,CG) มีค่ามากที่สุด

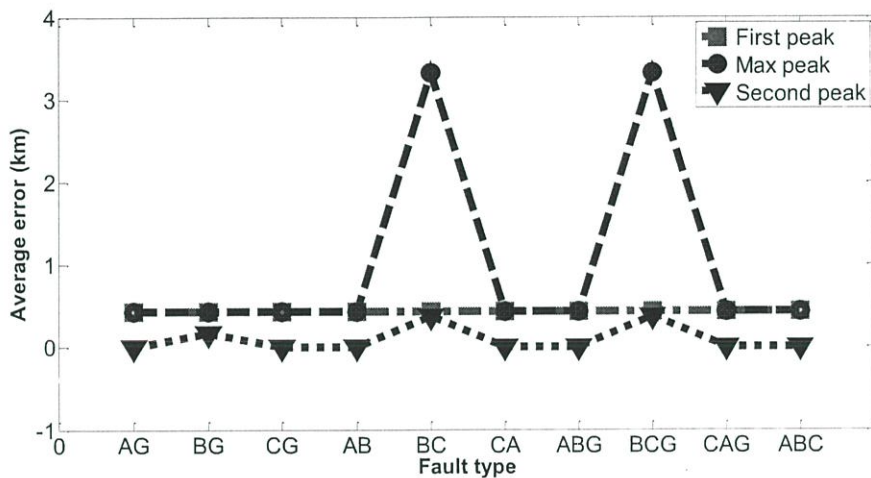
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 94.44 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 75 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

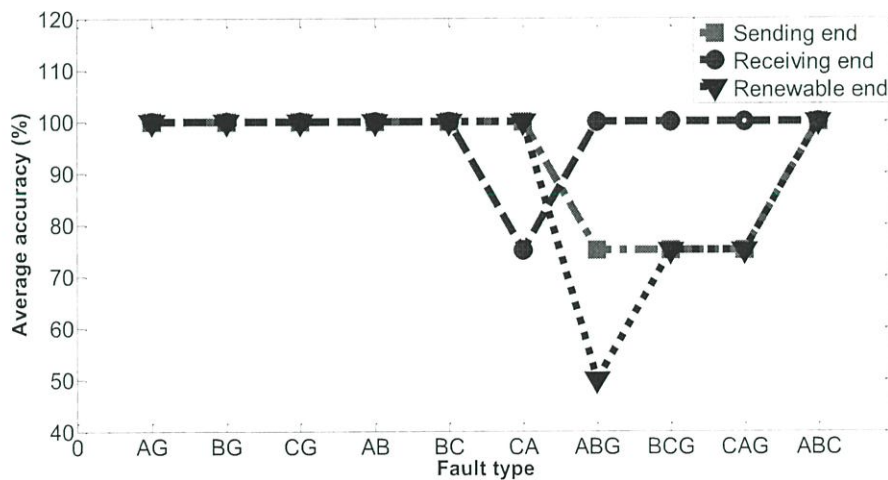
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.2.5 ฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลางระบบไฟฟ้า และสมมติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 27 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ



รูปที่ 5.19 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 5.20 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 27 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 26.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 25.993 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.007 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 26.907 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.093 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มีค่ามากที่สุด

การระบุชนิดของฟอลต์

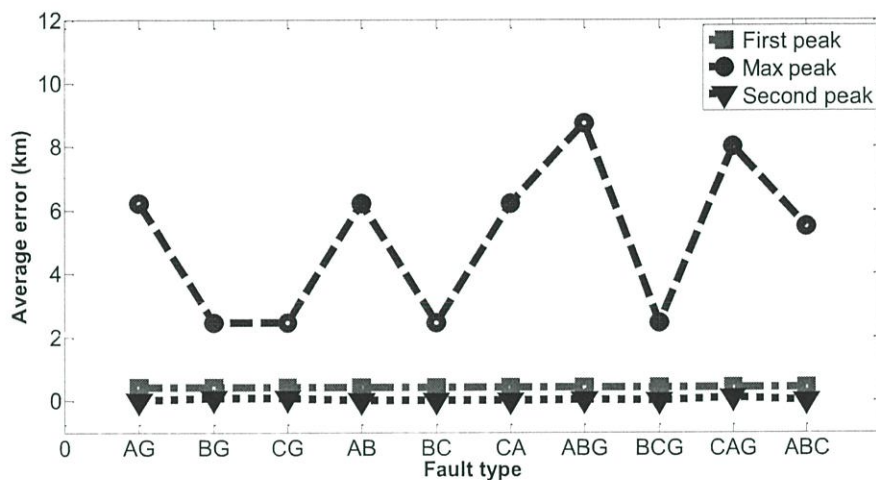
วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100, ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 80.56 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) มากที่สุด ด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด

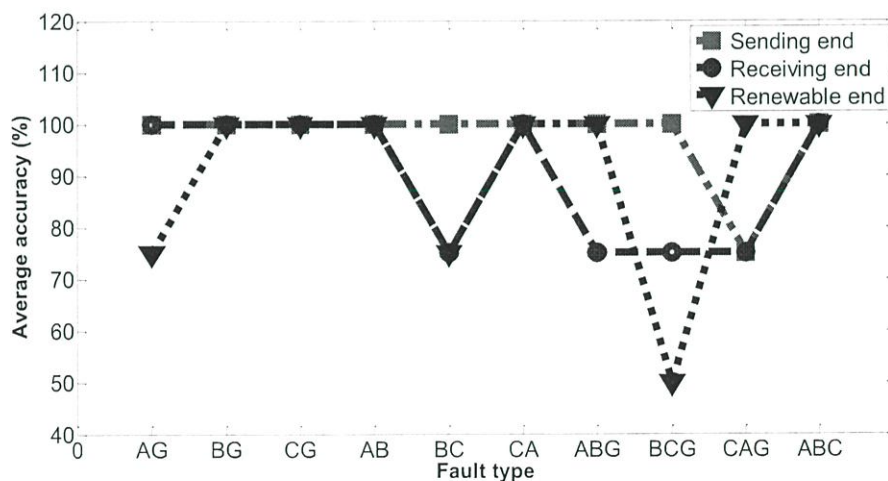
5.2.3 กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

5.2.3.1 ฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 3 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ



รูปที่ 5.21 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ



รูปที่ 5.22 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร (ร้อยละ 10 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

การระบุตำแหน่งพอลต์ (ระยะทาง 3 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกกระยะทางเฉลี่ยคือ 2.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 8.076 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 5.076 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 2.972 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.028 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

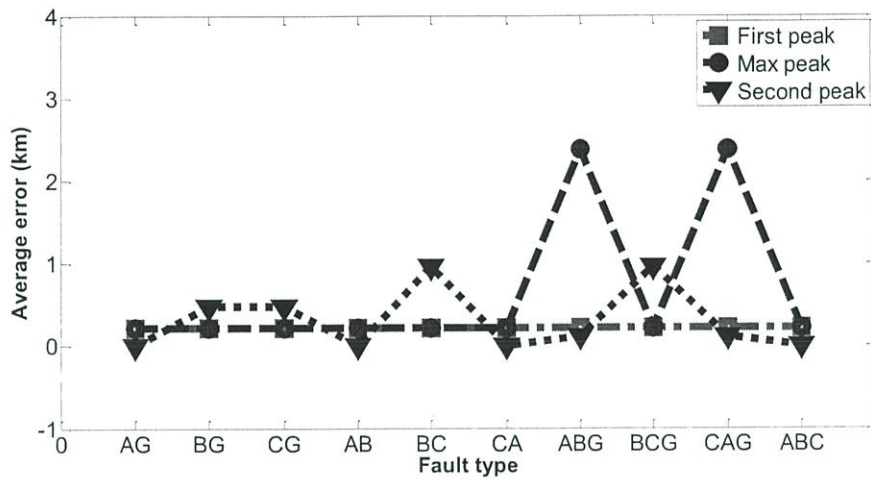
การระบุชนิดของพอลต์

วิธีการระบุชนิดของพอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22, พอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 94.44, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 83.33 และพอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

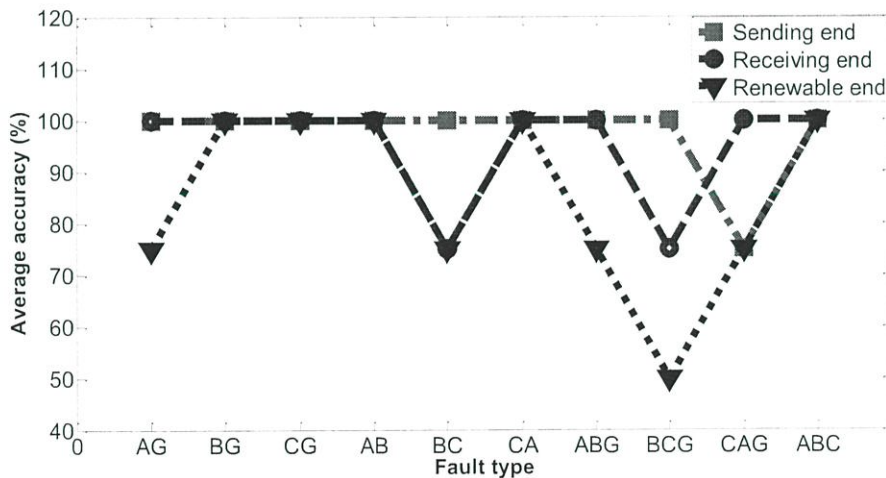
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) มากที่สุด

5.2.3.2 ฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ และสมมติให้ เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 9 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ



รูปที่ 5.23 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ



รูปที่ 5.24 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตร (ร้อยละ 30 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

การระบุตำแหน่งพอลต์ (ระยะทาง 9 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 8.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 8.352 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.648 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 8.689 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.311 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทพอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

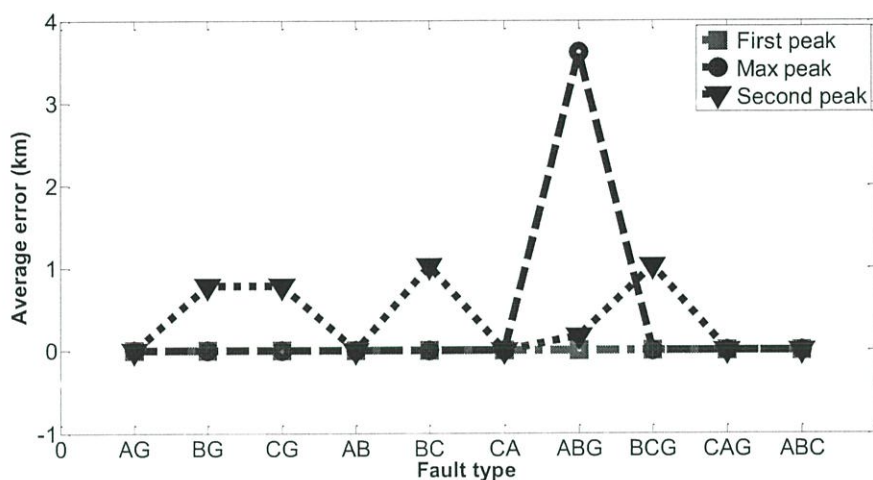
การระบุชนิดของพอลต์

วิธีการระบุชนิดของพอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , พอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 94.44 , ส่วนพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 83.33 และพอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

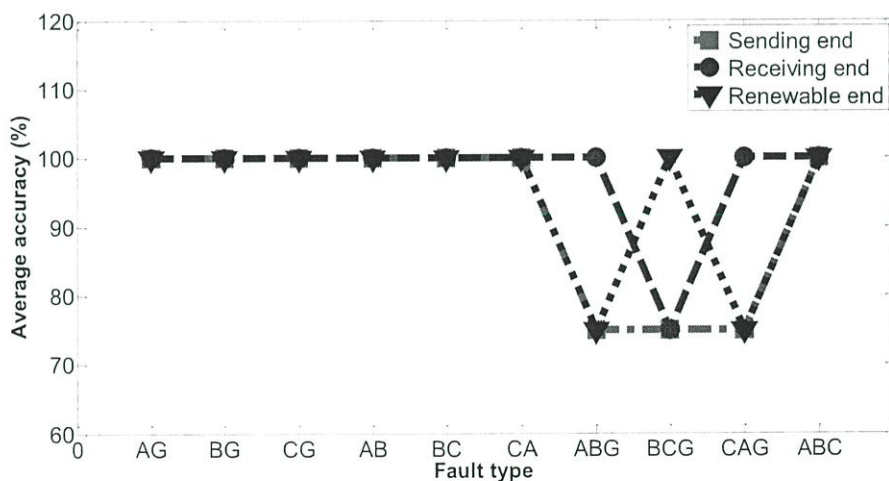
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทพอลต์มีค่าลดลงในประเภทพอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.3.3 ฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 15 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ



รูปที่ 5.25 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ



รูปที่ 5.26 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร (ร้อยละ 50 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 15 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 15 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 14.638 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.362 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG, CAG) มีค่ามากที่สุด

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 14.619 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.381 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) มีค่ามากที่สุด

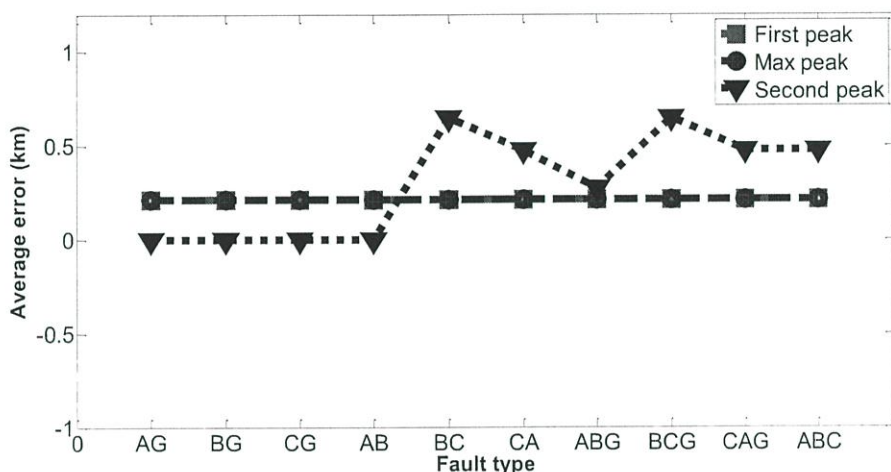
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 80.56 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

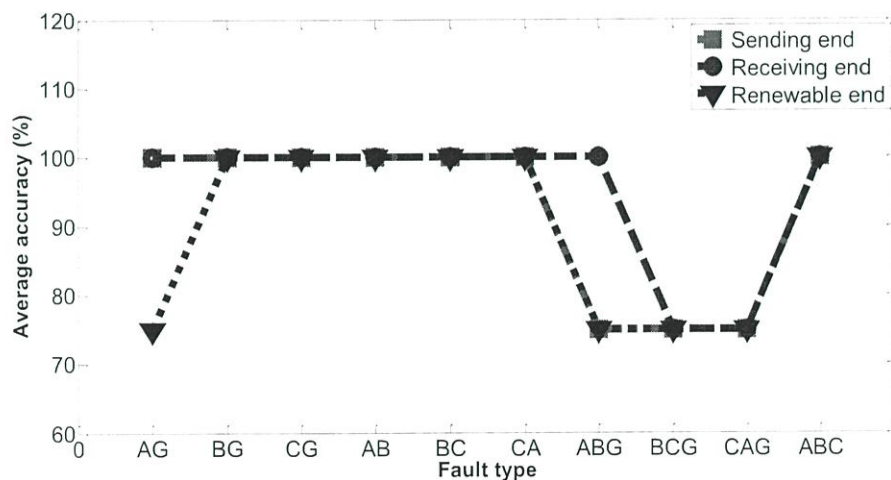
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากที่สุด

5.2.3.4 ฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ และสมมุติให้ เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 21 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ



รูปที่ 5.27 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ



รูปที่ 5.28 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 21 กิโลเมตร (ร้อยละ 70 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 21 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 20.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 20.786 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.214 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ 20.7 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.301 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มีค่ามากที่สุด

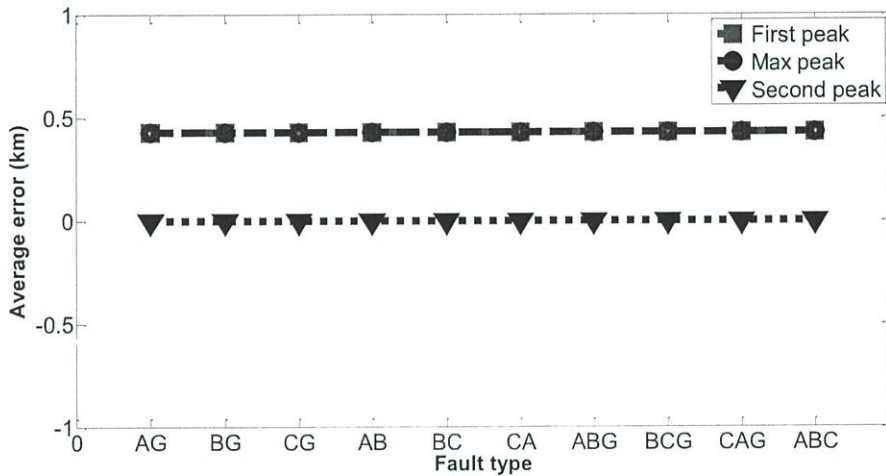
การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเลิตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 100 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 77.78 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

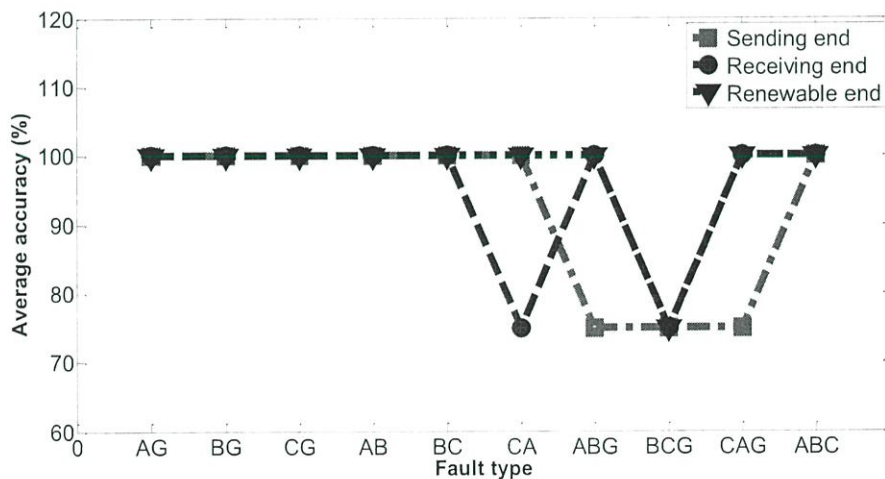
ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

5.2.3.5 ฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง)

จากการจำลองระบบในบทที่ 3 ทำการติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ และสมมุติให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 27 กิโลเมตรนับจากด้านส่ง เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ และค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.29 และ 5.30 ตามลำดับ



รูปที่ 5.29 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ



รูปที่ 5.30 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 27 กิโลเมตร (ร้อยละ 90 ของความยาวสายส่ง) กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทาง 27 กิโลเมตรจากด้านส่ง)

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นแรกระยะทางเฉลี่ยคือ 26.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นสูงสุดระยะทางเฉลี่ยคือ 26.572 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.428 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การคำนวณที่ได้จากวิธีค่ายอดคลื่นที่สองระยะทางเฉลี่ยคือ คือ 27 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) และระยะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน

การระบุชนิดของฟอลต์

วิธีการระบุชนิดของฟอลต์ด้วยการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG , BG , CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.22 , ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 86.11 และฟอลต์สามเฟส (ABC) ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

ด้านส่งไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ด้านรับไฟฟ้าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟส (AB , BC , CA) และฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด ส่วนด้านพลังงานทดแทนค่าความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์มีค่าลดลงในประเภทฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG , BCG , CAG) มากสุด

บทที่ 6

บทสรุป

จากการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV โดยมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนต่อรวมด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์มาวิเคราะห์เพื่อตรวจจับการเกิดฟอลต์ , ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และระบุชนิดของฟอลต์ ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV ระยะทางระหว่างด้านส่ง (สถานีไฟฟ้า) ถึง ด้านรับ (โหลดผู้ใช้) 30 กิโลเมตร โดยมีพลังงานทดแทนชนิดพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 2 MW เชื่อมต่อที่ตำแหน่งใกล้ด้านส่ง ระหว่างกลาง และใกล้ด้านรับ ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งทำการจำลองโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ชนิดฟอลต์ , ตำแหน่งเกิดฟอลต์ และมุมเกิดฟอลต์ เป็นต้น รวมทั้งสิ้น 600 ตัวอย่าง อัตราการสุ่ม 200 kHz เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าในระบบและนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2. ในตัวอย่างเหตุการณ์ขณะเกิดฟอลต์ที่ได้จำลองจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยมีความถี่ในการสุ่ม (Sampling frequency) 200 kHz เมื่อใช้เวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ทแม่ซูนิต Daubeachies 4 (db4) แยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาได้ 5 สเกล ซึ่งแต่ละสเกลจะมีช่วงความถี่ที่ลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนี้

สเกลที่ 1 มีช่วงความถี่	50 – 100 kHz
สเกลที่ 2 มีช่วงความถี่	25 – 50 kHz
สเกลที่ 3 มีช่วงความถี่	12.5 – 25 kHz
สเกลที่ 4 มีช่วงความถี่	6.25 – 12.5 kHz
สเกลที่ 5 มีช่วงความถี่	3.125 – 6.25 kHz

ผลลัพธ์จากการใช้เวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลหรือช่วงความถี่ที่ 1-5 จะได้สัมประสิทธิ์แต่ละสเกลออกมา นำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงไปวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่ง เช่น ตรวจจับฟอลต์ ระบุตำแหน่งฟอลต์ และระบุประเภทของฟอลต์ต่อไป

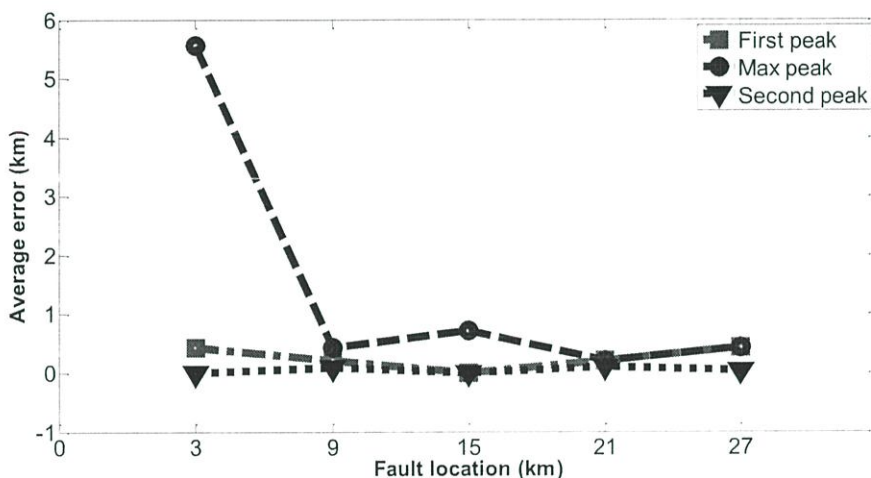
3. ทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยในการตรวจจับฟอลต์ , หาตำแหน่งฟอลต์ และระบุชนิดของฟอลต์ โดยได้พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของกระแสฟอลต์ในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังจากการเกิดฟอลต์ ในสเกลที่ 1 มาใช้เป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

4. การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ได้นำเสนอ แบ่งออกเป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

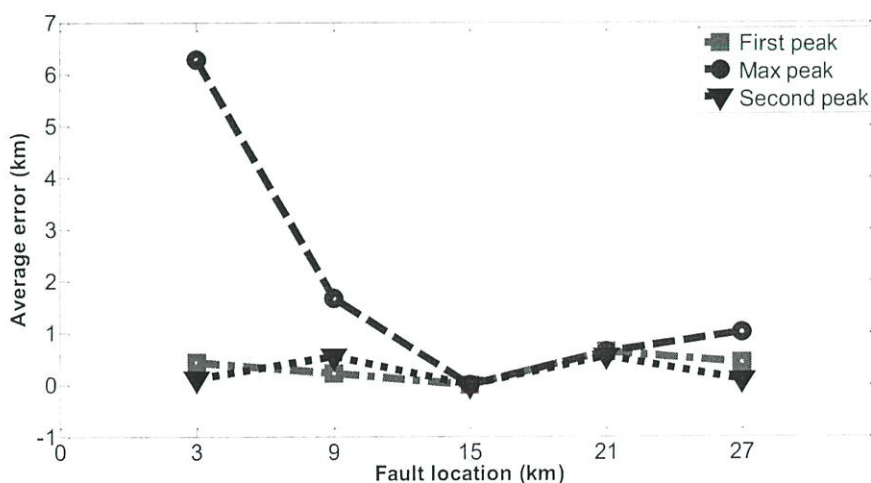
4.1 การตรวจจับฟอลต์

ผลจากการตรวจจับฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) โดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies4 (db4) จากตัวอย่างการเกิดฟอลต์ 600 ตัวอย่าง โดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเฟสที่เกิดฟอลต์ มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง และตำแหน่งของพลังงานทดแทน สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ทั้ง 600 ตัวอย่าง หรือ ร้อยละ 100

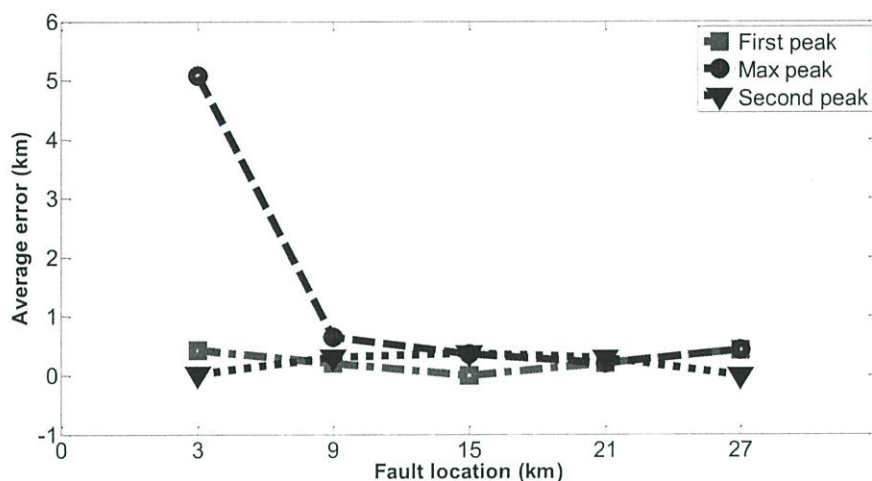
4.2 การระบุตำแหน่งของฟอลต์



รูปที่ 6.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง



รูปที่ 6.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนระหว่างกลาง



รูปที่ 6.3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านรับ

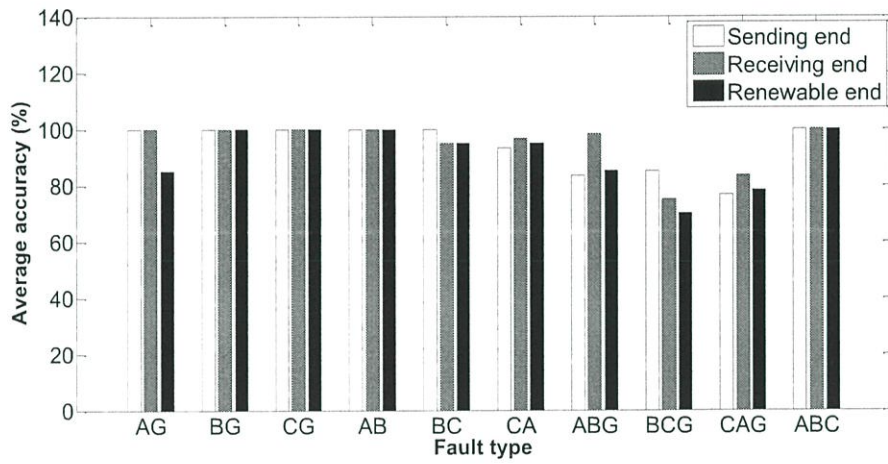
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการระบุตำแหน่งของฟอลต์ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง ระหว่างกลาง และใกล้ด้านรับ พบว่า มีแนวโน้มเดียวกัน แบ่งเป็นวิธีการคำนวณวิธีต่างๆ ได้ดังนี้

- วิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นแรก (First Peak) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์เล็กน้อย เนื่องจาก ในบางฟอลต์ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ 0 องศาเมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดัน ค่ายอดคลื่นแรกมีค่าต่ำมากจึงตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกผิดพลาด ส่งผลให้การคำนวณจากค่ายอดคลื่นแรกมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

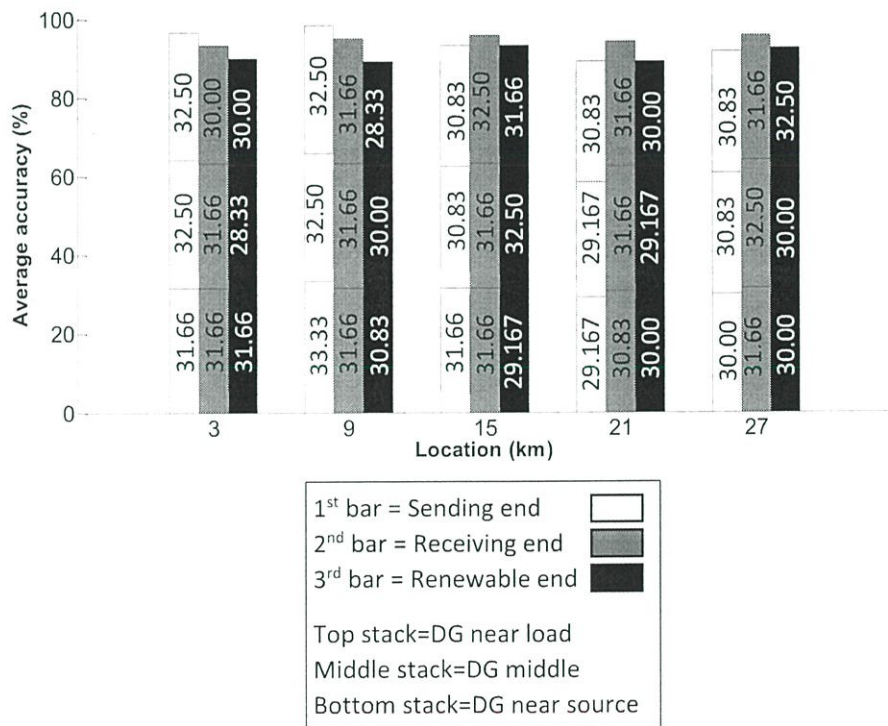
- วิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นสูงสุด (Maximum Peak) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์มากที่สุด โดยเฉพาะฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตรจากด้านส่ง มีค่ายอดคลื่นสูงสุดที่สะท้อนมาจากด้านพลังงานทดแทนในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังจากการเกิดฟอลต์ ทำให้การคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงมาก ดังนั้น การคำนวณจากค่ายอดคลื่นสูงสุดจึงมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด

- วิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์น้อยที่สุด เนื่องจากการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สองไม่มีการนำความเร็วคลื่นเดินทางมาคำนวณ เพราะ ความเร็วคลื่นเดินทางสามารถแปรเปลี่ยนไปตามระยะทางของสายส่ง ความเหนี่ยวนำ (L) และความจุไฟฟ้า (C) ของสายส่ง ดังนั้น การคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง โดยไม่ใช้ความเร็วคลื่นเดินทางจึงมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

4.3 การระบุชนิดของฟอลต์



รูปที่ 6.4 ค่าเฉลี่ยการระบุชนิดฟอลต์ของด้านส่ง ด้านรับ และด้านพลังงานทดแทน ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 ค่าเฉลี่ยการระบุชนิดฟอลต์ตามตำแหน่งเกิดฟอลต์

การระบุชนิดของฟอลต์ด้วยวิธีการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทางโดยการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยพบว่า ค่าเฉลี่ยความถูกต้องเมื่อแบ่งตามชนิดฟอลต์มีค่าประมาณร้อยละ 80 และค่าเฉลี่ยความถูกต้องเมื่อแบ่งตามตำแหน่งเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 โดยเมื่อตำแหน่งเกิดฟอลต์ใกล้ด้านใดด้านหนึ่ง จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมากกว่าด้านที่ห่างออกไป และเมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนที่บริเวณใดๆ ทำให้กระแสไฟฟ้าใกล้ด้านนั้นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่ด้านใกล้เคียงดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเช่นกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้การตรวจจับฟอลต์ด้วยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณกระแสไฟฟ้าโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วย มีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการวิเคราะห์คือใช้ข้อมูลเพียง $1/4$ ไซเคิลหลังจากการเกิดฟอลต์ และความแตกต่างของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟสที่เกิดฟอลต์ สามารถจำแนกชนิดฟอลต์ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอ ไม่ว่าจะเป็นวิธีการตรวจจับฟอลต์ การระบุตำแหน่งเกิดฟอลต์ และวิธีการระบุชนิดของฟอลต์ สามารถเป็นแนวทางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์ที่ใช้ในการป้องกันระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เช่น อุปกรณ์รีเลย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่สอดคล้องกับแนวโน้มของเทคโนโลยีระบบป้องกันไฟฟ้าในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังเป็นการนำทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ร่วมกับระบบไฟฟ้าในทางวิศวกรรม ถือว่าเป็นการขยายขอบเขตงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] กระทรวงพลังงาน. 19 มิถุนายน 2555. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2555-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก:
www.eppo.go.th/power/PDP2010-r3/PDP2010-Rev3-Cab19Jun2012-T.pdf
- [2] กระทรวงพลังงาน. มิถุนายน .5 กันยายน 2556. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี 2555 [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก:
www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/Alternative_1012/thailand%20alternative%20energy%20situation%202012.pdf
- [3] Feng Yan, Wenxuan Liu and Lin Tian, “Fault Location for 10kV Distribution Line Based on Traveling Wave-ANN Theory”, IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM), Vol. 2 , 2011, pp. 437-440
- [4] H.Meyar-Naimi, “A New Fuzzy Fault Locator for Series Compensated Transmission Lines”, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012, pp. 53-58.
- [5] Song Kim, “Fault Detection Algorithm of the Photovoltaic System using Wavelet Transform”, Power Electronics (IICPE), 2011, pp. 1-6.
- [6] Xiao Chen, Xinmin Wang, Cheng Peng, “The Application of Wavelet Transform to Fault Detection of Aircraft Control Surface” IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM), Vol. 2 , 2011, pp. 437-440.
- [7] C. Pothisarn and A. Ngaopitakkul, “Analysis of Characteristics using Wavelet Transform for Simultaneous faults in Electrical Power System”, Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications (IBICA) , 2012, pp. 93-97.
- [8] Bhargav Vyas, Rudra Prakash Maheshwari and Biswarup Das, “Fault Analysis of Controllable Series Compensated Transmission Line with Wavelet Transform and Support Vector Machine” , IEEE Engineering (NUICONE), 2012, pp. 1-5.
- [9] C.Pothisarn and A.Ngaopitakkul, “Application of DWT and Fuzzy Logic Algorithm for Classifying Simultaneous Fault Types”, TENCON 2011 - 2011 IEEE Region, 2011, pp. 44-48.
- [10] Vicente Torres , Hectorc and Ruiz, “High impe.dance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform” IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2011, pp. 325-329.
- [11] A.Nirmal Kannan and A.Rathinam, “High Impedance Fault classification using Wavelet transform and Artificial Neural Network”, Computational Intelligence and Communication Networks(CICN), 2012, pp. 831-837.

- [12] K.Saravanababu, P.Balakrishnan and Dr.K.Sathiyasekar, "Transmission Line Faults Detection, Classification, and Location Using Discrete Wavelet Transform", *Power, Energy and Control (ICPEC)*, 2013, pp. 233-238.
- [13] Mohit Singh, *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*, เทกซ์สม , 2011
- [14] ABB SACE, "Technical Application Papers No.13 Wind Power Plants", *Technical Application Papers*, 2011
- [15] ยอดลักษณ์ แซ่ตั้ง และ ธีรยุทธ อุ๋นเรื่อน, "การระบุตำแหน่งความผิดปกติในระบบสายจำหน่าย โดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ," *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2548.
- [16] สุชาติ ปรีชาธร, *วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง*, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2555.
- [17] Abdelsalam Mohamed Elhaffar, "Power Transmission Line Fault Location based on Current Traveling Waves", *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาอิเล็กทรอนิกส์, Helsinki University of Technology*, 2008
- [18] S.Lin, and et al, "Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines," *IET Generation Transmission & Distribution*, Vol 6, No. 8, 2012, pp. 764-772.
- [19] Wu Zhihua, and et al, "A Novel Double Terminal Traveling Wave Fault Location Method not Influenced by Wave Speed," *Transmission & Distribution Conference & Exposition*, Seoul, 2009, pp. 1-4.
- [20] R. Sivakumar, *Manufacturing Science and Technology III*, อินเดีย, 2012
- [21] กองวิจัย ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "กองวิจัย ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ. 2546", 2546
- [22] Michel Misiti, and et al, *Wavelet Toolbox User's Guide*, 4th Ed., Apple Hill Drive, Natick, 2010.
- [23] JSW THE JAPAN STEEL WORKS,LTD, "JSW J82-2.0", ญี่ปุ่น
- [24] Champa Nandi and A.K.Chakraborty, "Wind Power Plants with VSC Based STATCOM in PSCAD/EMTDC Environment", *International Conference on Power and Energy System (ICPES 2012)*, vol 56
- [25] Abdullah asuhaimi และคณะ, "identification and location of fault on transmission line using wavelet based on clarke' s transformation"

ภาคผนวก

การวินิจฉัยฟอลต์ในระบบพลังงานทดแทนโดยใช้การแปลงเวฟเลต

Fault Diagnosis in Renewable Energy System Based on Wavelet Transform

ภวิณี มัชฌมานันท์ ภัทรพล จันทร์อินทร์ และ ภาณุ ศรีสุขใส

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับสัญญาณฟอลต์ พร้อมทั้งระบุตำแหน่งและชนิดของฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ โดยมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนต่อร่วม ซึ่งเมื่อเกิดฟอลต์ที่สายส่งระบบป้องกันควรจัดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วเพื่อความน่าเชื่อถือของระบบ บทความนี้ได้จำลองระบบดังกล่าวในโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าช่วงที่เกิดฟอลต์มาวิเคราะห์สัญญาณในโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลตเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเลตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) พัฒนาให้สามารถระบุตำแหน่งและชนิดฟอลต์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ พร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าในระบบขณะเกิดฟอลต์

คำสำคัญ: ฟอลต์, แหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน, การแปลงเวฟเลต

Abstract

This thesis presents a fault location method and a fault type method in 22 kV distribution systems applying the distributed generator (DG) parallel to system. Provided that there is the fault in system, the protection system must rapidly eliminate for system reliability. This thesis simulates those systems in PSCAD/EMTDC and takes the result in fault current to diagnose with wavelet transformation in MATLAB by using Daubechies 4 (db4) as mother wavelet that developed discrete wavelet transformation to detect and classify fault accurately. Moreover, this thesis also studies the effect of DG to the faults.

Keywords: Fault, Distributed Generator, Wavelet Transformation

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นกว่าที่ผ่าน ทำให้ต้องมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งอาจเกิดฟอลต์หรือมีการทำงานที่ผิดพลาดของระบบป้องกันไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า ชีวิต และทรัพย์สินบริเวณใกล้เคียง ยิ่งใช้เวลานานการหา

เพื่อช่วยวิเคราะห์ความหมายของข้อมูลดังกล่าว ปัจจุบันมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN), เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine : SVM), ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) และ การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform : WT) เป็นต้น โดยได้มีตัวอย่างในการวิจัยดังนี้

เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม สามารถนำไปใช้ในการแบ่งรูปแบบการทำงานของรีเลย์ระยะทาง[1] โดยการป้อนสัญญาณอินพุตของแรงดันและเฟสเซอร์ของกระแสสามเฟส ซึ่งใช้ในสถานีย่อย ซึ่งสามารถตัดสินใจว่าจะปิดหรือเปิดวงจรในระยะเวลาอันสั้นและการนำไปประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งฟอลต์บนสายส่งได้[2] โคนใช้เฟสเซอร์ของแรงดันและกระแสทับกันเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแหล่งจ่ายระยะไกล

เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน นำประยุกต์ใช้กับคุณลักษณะความถี่[3] ในการหาตำแหน่งฟอลต์สายส่งแรงสูง โดยใช้สัญญาณแรงดันและกระแสในสภาวะชั่วคราวซึ่งมีคสามแม่นยำสูง และใช้กับเทคนิคเวฟเลต[4] โดยใช้เวฟเลตเป็นเวฟเลตแม่สกัดลักษณะเวฟเลตพื้นฐาน และใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในการจำแนกค่าต่างๆ

เทคนิคตรรกะแบบฟัซซี มาประยุกต์ใช้กับการแปลงเวฟเลตเพื่อระบุประเภทฟอลต์บนสายส่ง[5] โดยใช้คูบีซีที 4 (Daubechies หรือ db4) เพื่อเป็นเวฟเลตแม่ในการย่อยสลายองค์ประกอบความถี่สูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง[6] เช่น การควบคุมเสถียรภาพ ควบคุมความถี่ คาดการณ์ไหลลด เป็นต้น

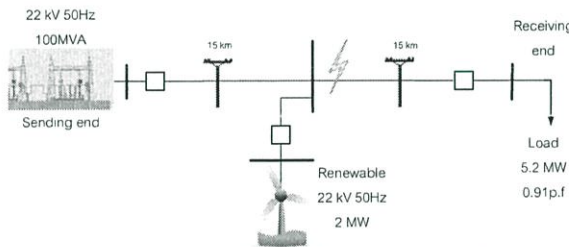
การแปลงเวฟเลต มาประยุกต์ใช้กับทฤษฎีคลื่นเดินทาง[7] เพื่อระบุประเภทและระยะที่เกิดฟอลต์ และ ประยุกต์ใช้กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับกริด[8] โดยจะใช้การสลายเวฟเลตหลายระดับ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ คำนวณง่าย และแม่นยำ

2. การจำลอง

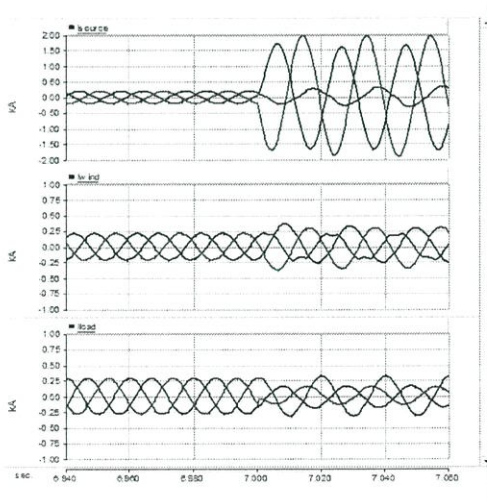
การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC จากสถานีไฟฟ้า(ด้านส่ง)ไปยังโหนดผู้ใช้ (ด้านรับ) ขนาด 5.2 เมกกะวัตต์(ด้านรับ) ระยะทาง 30 กิโลเมตร โดยมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจากพลังงานลม

จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โปรแกรมจำลองได้ทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ลูกคลื่น (6.94-7.12 วินาที) โดยเริ่มเกิดฟอลต์ที่วินาทีที่ 7 อัตราการสุ่ม 200 kHz และ เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- จำลองฟอลต์ที่เกิดขึ้น 10 ชนิด คือ ฟอลต์เฟสเดียวลงดิน , ฟอลต์ระหว่างเฟส , ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน , ฟอลต์สามเฟส และสภาวะปกติ
- ตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่ระยะ 3 , 9 , 15 , 21 , 27 กิโลเมตร จากด้านส่ง
- มุมเริ่มเกิดฟอลต์ที่ 0 , 45 , 90 , 135 องศา เมื่อเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าเฟส A (ช่วงละ 45 องศา)
- เชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่ตำแหน่งใกล้ด้านส่ง (สถานีไฟฟ้า) 3 กิโลเมตร , ระหว่างกลาง และ ใกล้ด้านรับ (โหลดผู้ใช้) 3 กิโลเมตร



รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองฟอลต์



รูปที่ 2 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดระหว่างเฟสลงกราวด์ (AB-G) และติดตั้งพลังงานทดแทนใกล้ด้านส่ง

จากรูปที่ 3 ตัวอย่างเหตุการณ์ในขณะที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเกิดฟอลต์ที่เฟส A และเฟส B ลงดิน (AB-G) มุมเริ่มเกิดฟอลต์ 45 องศา เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดัน ที่ระยะทาง 9 กิโลเมตรของสายส่ง เมื่อวัดจากปลายด้านส่ง โดยมีพลังงานทดแทนต่อร่วมที่ระยะ 15 กิโลเมตร ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะสายส่งของวงจร

เมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบพบว่า พลังงานทดแทนมีส่วนช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในระบบ และเมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งก่อนหน้าพลังงานทดแทน จะช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ด้านรับ และเมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งหลังพลังงานทดแทน จะช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าสนับสนุนกระแสลัดวงจร

3. การวินิจฉัยฟอลต์

จากผลของการจำลองสัญญาณจะนำมาวินิจฉัยเพื่อหาว่าสายส่งนี้เกิดฟอลต์หรือไม่โดยการตรวจจับฟอลต์ ซึ่งถ้าเกิดฟอลต์จะนำสัญญาณมาเข้าขั้นตอนการระบุตำแหน่งฟอลต์ และชนิดฟอลต์ เพื่อให้สามารถเข้าไปซ่อมบำรุงรักษาสายส่งได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ ซึ่งมีการวินิจฉัยฟอลต์ ดังนี้

3.1 การตรวจจับฟอลต์

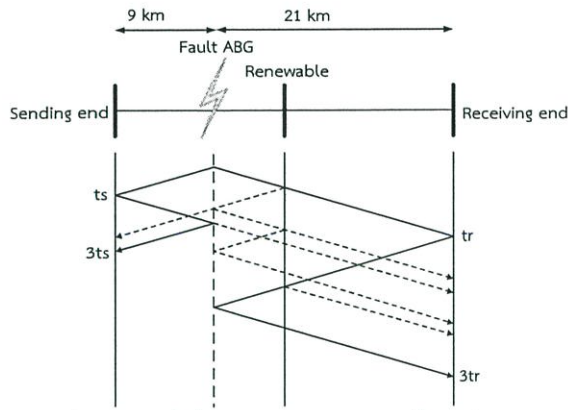
ในการพิจารณาว่าเกิดฟอลต์หรือไม่ จะกำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 7s$) และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ($t \geq 7s$) เป็นจำนวนเท่า โดยตั้งสมมติฐาน คือ ถ้าสัมประสิทธิ์ในสเกลใดสเกลหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติ แสดงว่า มีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่งนั้น

จากการแปลงคลาร์ก (Clarke's Transformation) เพื่อให้ได้อंकประกอบลำดับบวก และการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transformation) เพื่อให้ได้อंकประกอบความถี่สูงหรือสเกล จะได้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลตในสเกลที่ 1-5

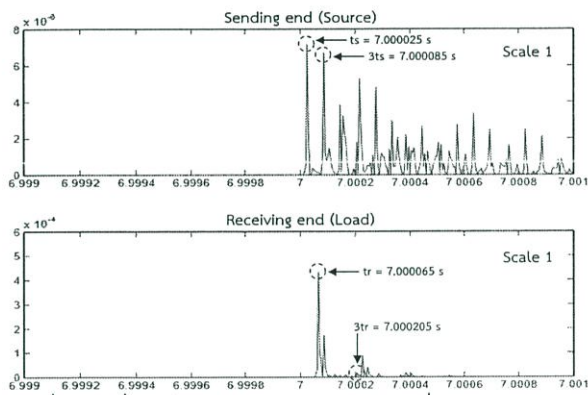
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นที่สเกลที่ 1 จะเห็นได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงมากกว่า 5 เท่าจากสภาวะปกติ แสดงว่าสายส่งในวงจรนี้เกิดฟอลต์ ผลลัพธ์จากการตรวจจับฟอลต์ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ที่เกิน 5 เท่าจากสภาวะปกติว่าเกิดขึ้นที่เวลาใด นั่นคือเวลาที่กระแสฟอลต์เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้าน ทั้งด้านส่งหรือแหล่งจ่าย และด้านรับหรือ โหลด เวลาที่ตรวจพบนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของเวลาที่เกิดฟอลต์และจะนำข้อมูลหลังจากเวลานี้อีก $1/4$ ไซเคิลหรือ 0.005 วินาทีในระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ มาคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้

3.2 การระบุตำแหน่งฟอลต์

คำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak) เป็นค่ายอดคลื่นที่สะท้อนจากปลายสายส่งทั้งสองด้านและสะท้อนจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเป็นการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งของค่ายอดคลื่นแรกและค่ายอดคลื่นที่สอง ดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 3 ค่ายอดคลื่นที่เดินทางมายังปลายสายส่งทั้งสองด้าน [5]



รูปที่ 4 เวลาที่ฟอลต์มาถึงปลายสายส่งของค่ายอดคลื่นแรกและสอง

การคำนวณด้วยวิธีนี้จะไม่ใช่คลื่นเดินทางในการคำนวณ
มีสมการในการคำนวณ ดังนี้

$$d = L \times \frac{t_{diff_S}}{t_{diff_S} + t_{diff_R}} \quad (1)$$

$$t_{diff_S} = \left| \frac{ts - 3ts}{2} \right| \quad (2)$$

$$t_{diff_R} = \left| \frac{tr - 3tr}{2} \right| \quad (3)$$

เมื่อ t_{diff_S} = ผลต่างของเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่ง

t_{diff_R} = ผลต่างของเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับ

$3ts$ = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านส่ง

ของค่ายอดคลื่นที่สอง

$3tr$ = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายส่งด้านรับ

ของค่ายอดคลื่นที่สอง

เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการระบุตำแหน่งฟอลต์มาก

ขึ้น จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดฟอลต์เป็นที่ระยะ 3, 9, 15, 21, 27

กิโลเมตรจากด้านส่ง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

Fault Location	3km	9km	15km	21km	27km
ts	7.000005	7.000025	7.000045	7.000065	7.000085
3ts	7.000025	7.000085	7.000145	7.000205	7.000265
t_{diff_S}	10×10^{-6}	30×10^{-6}	50×10^{-6}	70×10^{-6}	90×10^{-6}
tr	7.000085	7.000065	7.000045	7.000025	7.000005
3tr	7.000255	7.000205	7.000145	7.000085	7.000025
t_{diff_R}	85×10^{-6}	70×10^{-6}	50×10^{-6}	30×10^{-6}	10×10^{-6}
Cal (km)	3.15789	9.000000	15.00000	21.00000	27.00000
Error(km)	0.15789	0	0	0	0

4.3 การระบุชนิดฟอลต์

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ดโดยนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าของทั้งสามเฟสและองค์ประกอบลำดับศูนย์มาทำการแปลงเวฟเล็ดเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงสุดกลที่ 1 แล้วตรวจจับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วงหลังเกิดฟอลต์ 1/4 ลูกคลื่น

X_{max} = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดหลังเกิดฟอลต์ของเฟส A, B และ C

$Z_{max} = Z_{post}$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์

ขั้นตอนที่ 2 การหาค่าเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบองค์ประกอบเฟส A, B และ C อ้างอิงกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ($X_{max} = \frac{X_{max}}{Z_{max}}$)

$$X_{max} = \frac{X_{max}}{Z_{max}}$$

จากนั้นเปรียบเทียบค่า A_{com} , B_{com} , C_{com} เพื่อหาค่าต่ำสุด

Ph_{min} และค่าสูงสุด Ph_{max}

ขั้นตอนที่ 3 การระบุชนิดฟอลต์

- พิจารณาฟอลต์ลงดิน

การพิจารณาฟอลต์ลงดินโดยใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์ หากมีค่าเกิน 1×10^{-12} จึงถือว่าเป็นฟอลต์ลงดิน

- พิจารณาฟอลต์แต่ละเฟส

การระบุชนิดฟอลต์แต่ละเฟสต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้คือ

ค่าเปรียบเทียบต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ของ Ph_{max} หรือ

ค่าเปรียบเทียบต้องมีค่ามากกว่า 1.5 ของ Ph_{min}

- พิจารณาฟอลต์สามเฟส

อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{max}) และค่าต่ำสุดจากการเปรียบเทียบ (Ph_{min}) มีค่าไม่เกิน 50

จึงสามารถระบุเป็นอัลกอริทึมสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในรูปแบบคำสั่งเงื่อนไข If-Then ได้ดังนี้

If $\frac{X_{max}}{Z_{max}} > 50$ then

Z_{max}

else if ($X_{com} > (1.5 * Ph_{min})$) or ($X_{com} > (0.9 * Ph_{max})$) then

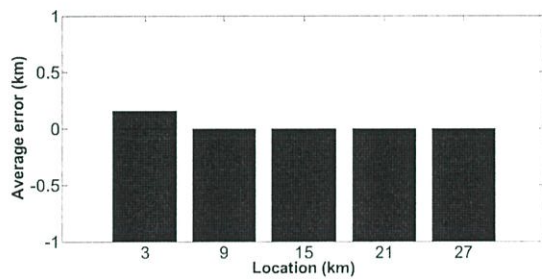
```

        phase X fault
    else No fault phase X
    end
    else if (5* Zprc < Zmax) and (Zmax > 1*10-12) then
        Ground fault
    else Unground fault
    end
    else Three phase fault
    end
    end

```

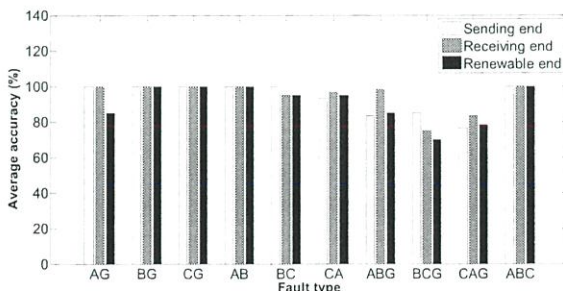
5. ผลการทดลอง

1. การระบุตำแหน่งฟอลต์ ด้วยวิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง (Second Peak) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์น้อยที่สุด เนื่องจากการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สองไม่มีการนำความเร็วคลื่นเดินทางมาคำนวณ เพราะความเร็วคลื่นเดินทางสามารถแปรเปลี่ยนไปตามระยะทางของสายส่ง ความเหนี่ยวนำ (L) และความจุไฟฟ้า (C) ของสายส่ง ดังนั้น การคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง โดยไม่ใช้ความเร็วคลื่นเดินทางจึงมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนตำแหน่งฟอลต์ในระยะทางต่างๆ

2. การระบุชนิดของฟอลต์ด้วยวิธีการตรวจจับค่ายอดสูงสุดของคลื่นเดินทาง โดยการแปลงเวฟเลตเติมหน่วยพบว่า ค่าเฉลี่ยความถูกต้องเมื่อแบ่งตามชนิดฟอลต์มีค่าประมาณร้อยละ 80 และค่าเฉลี่ยความถูกต้องเมื่อแบ่งตามตำแหน่งเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 โดยเมื่อตำแหน่งเกิดฟอลต์ใกล้ด้านใดด้านหนึ่ง จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมากกว่าด้านที่ห่างออกไป และเมื่อติดตั้งพลังงานทดแทนที่บริเวณใดๆ ทำให้กระแสไฟฟ้าใกล้ด้านนั้นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่ด้านใกล้เคียงดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยการระบุชนิดฟอลต์ของด้านส่ง ด้านรับ และด้านพลังงานทดแทน ตามลำดับ

6. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์การแปลงเวฟเลตเพื่อวินิจฉัยฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบเติมหน่วย (DWT) เวฟเลตแม่ชนิด Daubeachies 4 (db4) ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ พบว่าทุกวิธีการคำนวณสามารถตรวจจับฟอลต์ได้ทุกกรณี แต่เมื่อระบุตำแหน่งฟอลต์พบว่า วิธีที่ดีที่สุด คือ วิธีการคำนวณจากค่ายอดคลื่นที่สอง สำหรับการระบุชนิดฟอลต์โดยใช้ค่ายอดคลื่นสูงสุด ขั้นตอนที่ใช้มีความเหมาะสมกับการมีแหล่งพลังงานทดแทนต่อรวม เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งในอนาคตวิธีการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์และขั้นตอนในการระบุชนิดฟอลต์สามารถพัฒนาต่อออกให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น และสามารถเป็นแนวทางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีพลังงานทดแทนต่อรวม เช่น อุปกรณ์รีเลย์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] D.V. Coury and D.C. Jorge, "Artificial Neural Network Approach to Distance Protection of Transmission Lines," **IEEE Trans. Power Systems**, Vol. 13, No. 1, 1998, pp. 102-108.

[2] Zhihong Chen and Jean-Claud Maun, "Artificial Neural Network Approach to Single-Ended Fault Locator for Transmission Lines," **IEEE Trans. Power Systems**, Vol. 15, No. 1, 2000, pp. 370-375.

[3] Robert Salat and Stanislaw Osowski, "Accurate Fault Location in the Power Transmission Line Using Support Vector Machine Approach," **IEEE Trans. Power Systems**, Vol. 19, No. 2, 2004, pp. 979-986.

[4] Bhargav Vyas, Rudra Prakash Maheshwari and Biswarup Das, "Fault Analysis of Controllable Series Compensated Transmission Line with Wavelet Transform and Support Vector Machine", **IEEE Engineering (NUICON)**, 2012, pp. 1-5.

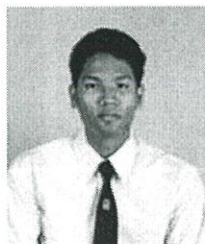
[5] C.Pothisarn and A.Ngaopitakkul, "Application of DWT and Fuzzy Logic Algorithm for Classifying Simultaneous Fault Types", **TENCON 2011 - 2011 IEEE Region**, 2011, pp. 44-48.

[6] Yong-hua Song and Allan T.Johns, "Applications of fuzzy logic in power systems. III. Example applications," **Power Engineering Journal**, Vol. 13, No. 2, 1999, pp. 97-103

[7] C. Pothisarn and A. Ngaopitakkul, "Analysis of Characteristics using Wavelet Transform for Simultaneous faults in Electrical Power System", **Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications (IBICA)** , 2012, pp. 93-97.

[8] Song Kim, "Fault Detection Algorithm of the Photovoltaic System using Wavelet Transform" **Power Electronics (IICPE)**, 2011, pp.1-6

ประวัติผู้จัดทำ



ชื่อ - นามสกุล นายวินท์ มัยมานันท์
 วันเดือนปีเกิด 15 มกราคม พ.ศ.2535
 ที่อยู่ 29 หมู่ 4 ตำบลบ้านสวน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2552

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดชลบุรี

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พฤษภาคม 2556



ชื่อ - นามสกุล นายภัทรพล จันทรอินทร์
 วันเดือนปีเกิด 30 มีนาคม พ.ศ.2535
 ที่อยู่ 307 ตำบลในเวียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน 55000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2552

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจังหวัดนนทบุรี

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พฤษภาคม 2556



ชื่อ - นามสกุล นายภาณุ ศรีสุขใส
 วันเดือนปีเกิด 31 ตุลาคม พ.ศ.2534
 ที่อยู่ 10/1 ตำบลในเวียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน 55000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2552

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจังหวัดลำปาง
 ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พฤษภาคม 2556