



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การคำนวณขนาดของแรงดัน โดยวิธีการแปลงเวฟเลต สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ
โดย นายวัฒนา ครอบพาณิชย์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล)

กรรมการ

(ดร.กันย์ กังวานสายชล)

การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเส้น สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ

นายวัฒนา ครอบพาณิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายวัฒนา ครอบพาณิชย์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ท สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

แรงดันตกชั่วขณะเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่พบบ่อยและก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าได้มากที่สุด ที่ผ่านมามีวิธีการหาขนาดของแรงดันหลายวิธี แต่มีวิธีที่นิยมใช้ที่สุด 3 วิธี ได้แก่ วิธีหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน

งานวิจัยนำเสนอวิธีการคำนวณ จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ทและทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ กับวิธีที่นิยมใช้ 3 วิธี ได้แก่ วิธีหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน โดยใช้สัญญาณทดสอบจากแหล่งที่มา 3 ทางคือ การสร้างแรงดันตกชั่วขณะจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC สัญญาณทดสอบที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE1159.2 และสัญญาณทดสอบที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วิธีการที่กล่าวถึงทั้งหมดจะถูกนำมาจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB ผลปรากฏว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ทมีประสิทธิภาพเหนือวิธีการอื่นๆ ในการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 129 หน้า)

คำสำคัญ : การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ การคำนวณขนาดของแรงดัน การแปลงเวฟเล็ท

Name : Mr.Wattana Trongpanich
Thesis Title : Wavelet-based Magnitude Calculation for Voltage Sag Analysis
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Dr.Teratom Bunyagul
Academic Year : 2006

Abstract

Voltage sag is a power quality problem. The voltage magnitude can be determined in a number of ways. Most popular methods are Root mean square, Orthogonal and Peak voltage method.

The thesis presents a wavelet-based technique to determine the beginning, the end and the magnitude of voltage sag. The results show the comparison between the wavelet based technique and the most popular methods such as Root mean square, Orthogonal component and Peak value magnitude evaluation. The test signals obtain from three sources. Firstly, the signals was simulated from a 115/22 kV substation of Provincial Electricity Authority (PEA) in Thailand by using PSCAD/EMTDC program. Secondly, the real signals were captured at a PEA's 115/22 kV substation. Finally, the signals were obtained from IEEE Power Quality Event Characterization Working Group (P1159.2). All techniques mentioned were then tested in Matlab program. The results have shown that the proposed wavelet-based technique is superior to other conventional techniques.

(Total 129 pages)

Keywords : Voltage Sag Detection, Voltage Magnitude Evaluation, Wavelet Transform

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตครั้งนี้ ผู้วิจัยได้พบอุปสรรคมากมาย หลายครั้งเกิดความท้อถอย แต่ก็ได้รับแรงสนับสนุนและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในด้านต่างๆ จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอถือโอกาสนี้...

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ท่านรองผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คุณพิชญ พุ่มอัม ท่านผู้ช่วยผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คุณวิวัฒน์ สิริจินดา ที่มอบโอกาสและประสบการณ์อันดียิ่งในชีวิตแก่ผู้วิจัย

กราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดี ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิทยา คุณแม่มาณี ครอบครัวตรงรองพาณิชย์ทุกคน ผู้ไม่เคยทอดทิ้งและร่วมกันประคับประคอง ผลักดันให้ผู้วิจัยสามารถประสบความสำเร็จจนมีวันนี้ได้

ขอขอบคุณ คุณพาสนา โมฬีกุล สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และพี่ๆ สำนักงานรองผู้ว่าการจำหน่ายและบริการ ภาค 2 สำหรับประสบการณ์อันดีตลอดระยะเวลาที่มี

ขอบคุณ พี่ เพื่อน น้อง ร่วมรุ่น MEE 46 และในห้อง Power system ทุกคนที่ร่วมแบ่งปันประสบการณ์ ความรู้ (บ้างไม่รู้บ้าง) ความสนุก และฝ่าฟันบททดสอบต่างๆ ด้วยกันตลอดมา

และสุดท้าย ขอขอบคุณ คุณชนนุช วชิรพันธ์ สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษาต่างๆ และกำลังใจอันดีเยี่ยม

วัฒนา ตรงรองพาณิชย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	1
1.2 ประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	1
1.3 สาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	15
1.4 การแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	15
1.5 การติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	18
1.6 ประโยชน์ของการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	20
บทที่ 2 การวิเคราะห์และติดตามปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ	21
2.1 คุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ	21
2.2 แรงดันตกชั่วขณะเนื่องจากฟอลต์	25
2.3 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าขณะที่เกิดฟอลต์	27
2.4 วิธีการคำนวณขนาดแรงดัน	30
บทที่ 3 สัญญาณและการวิเคราะห์สัญญาณ	37
3.1 สัญญาณ	37
3.2 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	38
3.3 ทฤษฎีการแซมปลิง	39
3.4 เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล	41
บทที่ 4 การวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต	43
4.1 การแปลงเวฟเล็ต	43
4.2 ฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่	48
4.3 ฟังก์ชันดาบปีชีส์เวฟเล็ต	52
4.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง	54
4.5 การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ท	60
บทที่ 5 การทดสอบและการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงาน	63
5.1 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันทดสอบขนาด 1 เปอร์ยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC	63
5.2 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC	69
5.3 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 %	82
5.4 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE1159.2	96
5.5 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	108
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	123
6.1 สรุปผลการจำลองการทำงาน	123
6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยต่อไป	125
เอกสารอ้างอิง	127
ประวัติผู้วิจัย	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 สภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	3
1-2 สภาวะชั่วคราวในลักษณะของออสซิลเลเตอร์ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	4
1-3 นิยามแรงดันตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	5
1-4 นิยามของปัญหาไฟดับ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	6
1-5 นิยามของปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	8
1-6 นิยามของปัญหาแรงดันตก ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	8
1-7 นิยามของปัญหาแรงดันเกิน ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	9
1-8 นิยามของปัญหาการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นตามมาตรฐาน IEEE Std.1159	9
1-9 นิยามของปัญหาแรงดันไม่สมดุล ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	12
1-10 นิยามของปัญหาแรงดันกระเพื่อม ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159	13
1-11 สรุปนิยามของปัญหาคุณภาพไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE Std.1159	14
1-12 สรุปสาเหตุและวิธีการแก้ไขปัญหาคูณภาพไฟฟ้า	18
2-1 รูปแบบและโอกาสของการเกิดฟลัดในในระบบไฟฟ้า	26
4-1 ตัวอย่างการเรียกชื่อของดาบิชีส์เวฟเล็ดในโปรแกรม MATLAB	52
4-2 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของดาบิชีส์	53
5-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	63
5-2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง สถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	64
5-3 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	75
5-4 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	81
5-5 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูก คลื่น	84
5-6 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้หน้าต่างรับ ข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5-7 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	90
5-8 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	95
5-9 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	98
5-10 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	102
5-11 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	103
5-12 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	108
5-13 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	111
5-14 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	115
5-15 การเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5-16 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้า ที่หน้าต่างรับข้อมูล ขนาด 1/2 ลูกคลื่น	121

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าผ่าในลักษณะของสภาวะชั่วคราวอิมพัลส์	2
1-2 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าผ่าสภาวะชั่วคราวในลักษณะของออสซิลเลเตอร์	3
1.3 ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะสาเหตุจากการเกิดฟอลต์แบบเฟสเดียว	5
1-4 แสดงลักษณะของปัญหาไฟดับ	6
1-5 ลักษณะแรงดันเกินที่เกิดจากฟอลต์เฟสเดียว	7
1-6 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนสาเหตุจากฮาร์โมนิกส์	10
1-7 ลักษณะของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนในลักษณะเกิดรอยบาก	11
1-8 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันกระแสเฟื้อม	13
1-9 ขั้นตอนกระบวนการสำรวจปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	16
1-10 วัฒนาการของการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	19
1-11 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าตามขนาดของแรงดัน โดยใช้ IEEE std.1159-1995	20
2-1 การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมูล	22
2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่มีผลต่อปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ	23
2-3 ลักษณะการกำหนดค่าการทำงานแบบโซนของรีเลย์ระยะทาง	23
2-4 ลักษณะสมบัติของรีเลย์กระแสเกิน แบบอินเวอร์สเวลา	24
2-5 การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสในระบบไฟฟ้า	24
2-6 ส่วนประกอบของแรงดันแบบสมมาตร	26
2-7 วงจรสมมูลของฟอลต์ระหว่างไลน์	28
2-8 วงจรสมมูลของฟอลต์ระหว่างสองไลน์ลงกราวด์	29
2-9 ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่าอาร์เอ็มเอส	32
2-10 ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีแยกองค์ประกอบอโรคอนอล	34
2-11 ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่ายอดของแรงดัน	35
3-1 ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	38
3-2 การแซมปลิงสัญญาณแอนะล็อกในลักษณะซำคาบ	40
4-1 รูปคลื่นเวฟเล็ตชนิดหนึ่ง	44
4-2 การแปลงฟูเรียร์	45
4-3 การแปลงเวฟเล็ต	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-4 ผลกระทบของสัญญาณเวฟเล็ด เมื่อค่าการสเกลเปลี่ยน	46
4-5 การเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณเวฟเล็ดแม่	47
4-6 ฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่ของฮาร์เวฟเล็ด	48
4-7 ฟังก์ชันแม่ของเกาส์เซียนเวฟเล็ด	49
4-8 การใช้ฟิลเตอร์แบบ FIR เพื่อการแยกองค์ประกอบสัญญาณ	50
4-9 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับ	50
4-10 ฟังก์ชันมอดุลเวฟเล็ด	51
4-11 ฟังก์ชันเวฟเล็ดคาบปีชีส์	52
4-12 การแยกองค์ประกอบและรวมกลับโดยวิธีแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่อง	54
4-13 การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ $X[n]$ โดยการแปลงเวฟเล็ดระดับที่หนึ่ง	55
4-14 การรวมองค์ประกอบของสัญญาณ $X[n]$ โดยการแปลงเวฟเล็ดระดับที่หนึ่ง	56
4-15 การแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่องสามารถแยกสัญญาณพื้นฐานจากสัญญาณรบกวน	57
4-16 การเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ทำการวัด	58
4-17 ขั้นตอนการคำนวณขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ด	60
4-18 แสดงการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ด	61
5-1 วงจรสถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง ขนาด 115/22 กิโลโวลต์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	64
5-2 รูปคลื่นสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอร์ยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC	65
5-3 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอร์ยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	66
5-4 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอร์ยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	67
5-5 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอร์ยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น	68
5-6 สัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-7 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	70
5-8 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	71
5-9 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	72
5-10 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	73
5-11 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	74
5-12 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	76
5-13 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	77
5-14 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	78
5-15 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-16 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	80
5-17 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น	82
5-18 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งสร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์	83
5-19 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธีโดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	84
5-20 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	85
5-21 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	86
5-22 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	87
5-23 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	88
5-24 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-25 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ทของ สัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	91
5-26 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	92
5-27 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ ออโธกอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	93
5-28 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดัน ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	94
5-29 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จาก โปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น	95
5-30 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งได้จาก IEEE 1159.2	96
5-31 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้าน คุณภาพไฟฟ้าของ IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	97
5-32 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ทของ สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่ หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	98
5-33 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดัน อาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-34 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ อโอคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	100
5-35 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดัน ของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	101
5-36 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้าน คุณภาพไฟฟ้าของ IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	102
5-37 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของ สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่ หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	104
5-38 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดัน อาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	105
5-39 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ อโอคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	106
5-40 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดัน ของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	107
5-41 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งได้จาก Fault Recorder ของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	109
5-42 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้ หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	110

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-43 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	111
5-44 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	112
5-45 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออริคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	113
5-46 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น	114
5-47 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	115
5-48 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	117
5-49 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	118
5-50 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออริคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	119
5-51 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น	120

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทหนึ่ง ซึ่งแนวทางการติดตามและวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแต่ละประเภทย่อมจะมีลำดับขั้นตอนที่เหมือนกัน ดังนั้น ในบทนี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงภาพรวมเกี่ยวกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า จะกล่าวถึงความหมาย การจำแนกประเภท สาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้า รวมทั้งจะกล่าวถึงการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าและประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตามปัญหาดังกล่าว เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและทำงานวิจัยต่อไป

1.1 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Problem)

หน้าที่สำคัญของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า พยายามแบ่งออกได้เป็น 2 อย่างหลักๆ ด้วยกัน คือ เพื่อจัดส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ และเพื่อรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟจะรับได้ ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา การศึกษาและงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในแนวทางหน้าที่จัดส่งพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างทั่วถึง ส่วนเรื่องของความเชื่อถือได้ (Reliability) และคุณภาพ (Quality) ของพลังงานไฟฟ้าแทบจะไม่ถูกกล่าวถึงเลย จนกระทั่งในช่วงต้นทศวรรษที่ 1980 คำว่าคุณภาพไฟฟ้าเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความบกพร่องและหยุดทำงานในระบบไฟฟ้า และยังเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุดเสียหายอีกด้วย [1]

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า หมายถึง ปัญหาใดๆ ในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้ว มีผลทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าความถี่ของไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติ จนมีผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าและการไฟฟ้าได้รับความเสียหายหรือทำงานผิดพลาดจนต้องปลดตัวเองออกไป [2]

1.2 ประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Classes of Power Quality Problems)

ตามปกติแล้วปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะถูกจำแนกออกตามขนาด ระยะเวลา และค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่เกิด

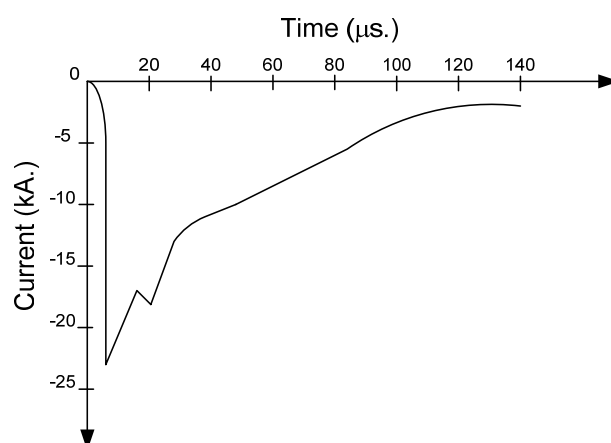
เหตุการณ์ โดยทาง IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineerings) ได้ทำการกำหนดมาตรฐานเพื่อที่จะจำแนกแบ่งประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าไว้ดังนี้ [3]

1.2.1 สภาวะชั่วคราว (Transient)

สภาวะชั่วคราวเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ลักษณะรูปคลื่นที่ปรากฏนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้น (Rate of Rise) ของแรงดันหรือกระแสด้วยความถี่สูงในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกสภาวะชั่วคราวออกตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั่วแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้เป็น 2 ประเภทคือ สภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์ (Impulse Transient) และสภาวะชั่วคราวในลักษณะของออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Transient)

1.2.1.1 สภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์

สภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์ เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสแบบชั่วเดียว ซึ่งอาจจะเป็นชั่วบวกหรือชั่วลบก็ได้ จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์บางส่วนชำรุดเสียหาย เพราะฉนวนของอุปกรณ์จะได้รับความเครียดสูงเกินกว่าพิกัดที่สามารถทนได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159 ได้กำหนดนิยามความหมายของอิมพัลส์ในลักษณะของอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของขนาดกระแส หรือแรงดันภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ดังตารางที่ 1-1 ยกตัวอย่างสภาวะชั่วคราวในลักษณะของอิมพัลส์ ได้แก่ อิมพัลส์ขนาด $1.2/50\ \mu\text{s}$ 2,000 V หมายถึง อิมพัลส์ที่มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นสูงสุด 2,000 โวลต์ภายในระยะเวลา 1.2 ไมโครวินาที และมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันสูงสุดภายในระยะเวลา 50 ไมโครวินาที

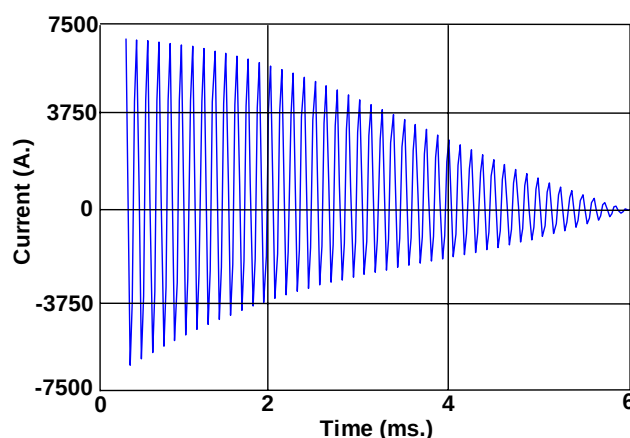


ภาพที่ 1-1 แสดงลักษณะของกระแสฟ้าผ่าในลักษณะของสภาวะชั่วคราวอิมพัลส์

ตารางที่ 1-1 แสดงสภาวะชั่วครู่ในลักษณะของอิมพัลส์ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Magnitude
Transient (Impulsive)			
- Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	-
- Microsecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ms	-
- Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	-

1.2.1.2 สภาวะชั่วครู่ในลักษณะของออสซิลเลเตอร์



ภาพที่ 1-2 แสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าสภาวะชั่วครู่ในลักษณะของออสซิลเลเตอร์

สภาวะชั่วครู่ในลักษณะของออสซิลเลเตอร์ เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดของแรงดันหรือกระแสแบบสองขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการสวิตช์ขั้วคาปาซิเตอร์แรงสูงขนาดใหญ่ (Switching Capacitor)

การเกิดสภาวะชั่วครู่ในลักษณะของออสซิลเลเตอร์พอจะลำดับเหตุการณ์ได้ดังนี้ ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) จะมีการถ่ายเทพลังงานเก็บสะสมซึ่งกันและกันระหว่างค่าพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) และค่าพลังงานสนามไฟฟ้าในรูปของค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) อยู่ตลอดเวลา โดยจะมีพลังงานบางส่วนสูญเสียไปในรูปปริมาณความร้อนในค่ารีซิสแตนซ์ (Resistance) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร

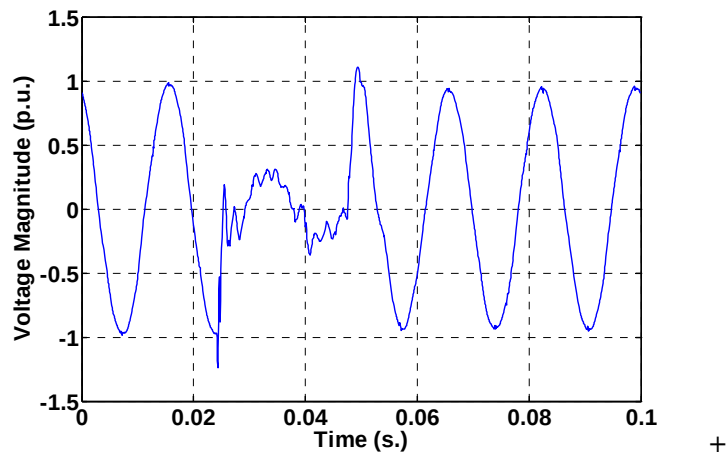
ทางไฟฟ้าทั้งค่ารีแอกแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์อย่างทันทีทันใดในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้ระบบไฟฟ้านั้นๆ ไม่สามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่งได้อย่างทันทีทันใด เป็นผลทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าความถี่ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการออสซิลเลเตอร์อยู่ชั่วขณะหนึ่ง

ตารางที่ 1-2 แสดงสภาวะชั่วคราวในลักษณะของออสซิลเลเตอร์ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Magnitude
Transient (Impulsive)			
- Low Frequency	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 P.U.
- Medium Frequency	5 - 500 kHz	20 μ s	0 – 8 P.U.
- High Frequency	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0 – 4 P.U.

1.2.2 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

แรงดันตกชั่วขณะ หมายถึงการที่ค่าแรงดันลดลงจนมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.9 เปอรฺ์ยูนิต (Per Unit) ภายในช่วงระยะเวลา (Duration) 0.5 ลูกคลื่น (Cycles) จนถึง 1 นาที โดยสาเหตุของการเกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะได้แก่ การเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือเกิดจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ๆ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดในปริมาณที่มากอย่างทันทีทันใดในระบบไฟฟ้า เนื่องจากโหลดมอเตอร์จะดึงกระแสขนาด 5 – 6 เท่าของกระแสโหลดเต็มพิกัด (Full Load Current) ในช่วงเวลาที่ทำกรสตาร์ท ค่ากระแสที่เพิ่มมากขึ้นนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับการเกิดขึ้นของกระแสฟอลต์ ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดฟอลต์แบบเฟสเดียว (Single Line to Ground Fault) ได้ดังภาพที่ 1-3



ภาพที่ 1-3 แสดงลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะสาเหตุจากการเกิดฟอลต์แบบเฟสเดียว

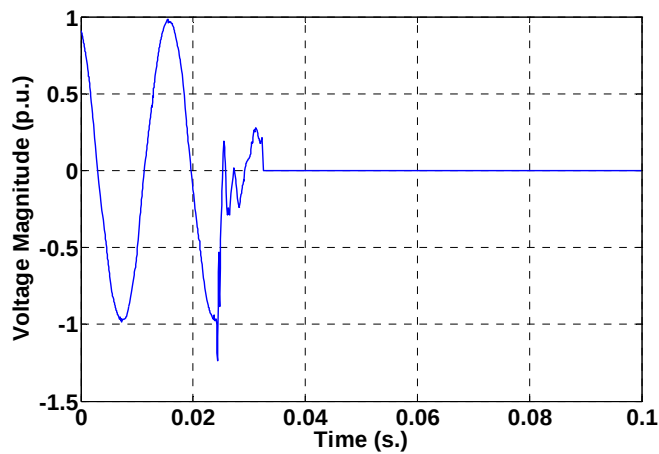
สำหรับปัญหาแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามความหมายของแรงดันตกชั่วขณะตามขนาดของระยะเวลาที่เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะไว้ดังตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 แสดงนิยามแรงดันตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Voltage Sag			
- Instantaneous		0.5 – 30 Cycles	0.1-0.9 pu
- Momentary		30 Cycles – 3 s	0.1-0.9 pu
- Temporary		3 s – 1 min	0.1-0.9 pu

1.2.3 ไฟฟ้าดับ (Interruption)

ไฟฟ้าดับ หมายถึงระดับแรงดันในระบบจะเหลือน้อยกว่า 10% ของแรงดันปกติหรือมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ไฟดับเกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่า 1 นาที สาเหตุของปัญหาไฟดับ มักเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่สถานีไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ป้องกันภายในระบบไฟฟ้าทำการปลดวงจรเพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้น ลักษณะของปัญหาไฟฟ้าดับแสดงได้ดังภาพที่ 1-4



ภาพที่ 1-4 แสดงลักษณะของปัญหาไฟฟ้าดับ

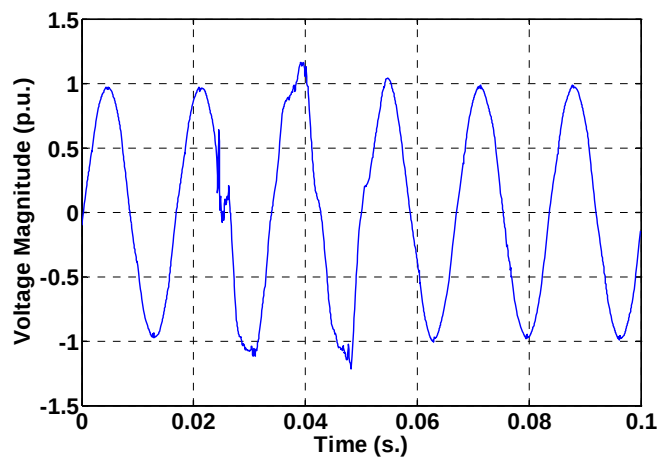
ส่วนระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการปิดกลับวงจร (Reclosing) ของอุปกรณ์ป้องกัน ดังนั้น ในกรณีที่ฟิวส์แรงสูง (H.R.C. Fuse) ทำการปลดวงจรเนื่องจากเกิดฟอลต์ ระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับจะยาวนานกว่าการปลดวงจรด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ เนื่องจากฟิวส์แรงสูงไม่สามารถทำการปิดกลับวงจรได้ทันทีหลังจากที่มีการปลดวงจรเพื่อกำจัดฟอลต์ ซึ่งมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามปัญหาไฟฟ้าดับไว้ดังตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1-4 แสดงนิยามของปัญหาไฟฟ้าดับ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Short-Duration Variations			
- Instantaneous Interruption		0.5 – 30 Cycles	<0.1 pu
- Momentary Interruption		30 Cycles – 3 s	<0.1 pu
- Temporary Interruption		3 s – 1 min	<0.1 pu
Long-Duration Variations			
- Interruption, Sustained		>1 min	0 pu

1.2.4 แรงดันเกินชั่วขณะ (Swell)

แรงดันเกินชั่วขณะ หมายถึงแรงดันของระบบไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นไปอยู่ระหว่าง 1.1 – 1.8 เปอรืยูนิตที่ความถี่เท่าเดิมภายในช่วงเวลา 0.5 ลูกคลื่นถึง 1 นาที ปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะมีสาเหตุหลักมาจากฟอลต์แบบเฟสเดียว โดยในเฟสที่เกิดฟอลต์ขึ้นนั้นจะเกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะหรือไฟดับ ทำให้ส่งผลกระทบต่อกับเฟสข้างเคียงเกิดแรงดันเกินชั่วขณะขึ้น



ภาพที่ 1-5 แสดงลักษณะแรงดันเกินที่เกิดจากฟอลต์เฟสเดียว

ภาพที่ 1-5 แสดงลักษณะแรงดันเกินที่เกิดจากฟอลต์เฟสเดียว นอกจากสาเหตุจากการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้าแล้ว แรงดันเกินชั่วขณะยังอาจเกิดจากการสตาร์ทของมอเตอร์ขนาดใหญ่ หรือการสวิตชิงคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าในระบบไฟฟ้าอีกด้วย แต่ระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าสาเหตุจากการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า โดยมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะไว้ดังตารางที่ 1-5

ตารางที่ 1-5 แสดงนิยามของปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Voltage Swell			
- Instantaneous		0.5 – 30 Cycles	1.1 – 1.8 pu
- Momentary		30 Cycles – 3 s	1.1 – 1.4 pu
- Temporary		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu

1.2.5 แรงดันตก (Undervoltage)

ปัญหาแรงดันตกโดยส่วนใหญ่เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยที่ระบบไฟฟ้าไม่สามารถที่จะรักษาสมดุลไว้ได้ ผลของแรงดันตกในลักษณะนี้อาจไม่รุนแรงจนทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงาน แต่จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลง เป็นผลทำให้ใช้เวลาในการสตาร์ทใช้เวลานานและมอเตอร์กินกระแสมากกว่าปกติ ทำให้คาปาซิเตอร์จ่ายค่ารีแอคทีฟพาวเวอร์ (Reactive Power) ลดลงและมีผลทำให้อายุการใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์สั้นลง เป็นต้น โดยมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามปัญหาแรงดันตก คือการลดลงของแรงดันในระบบไฟฟ้า จนต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติที่ความถี่เดียวกัน เป็นระยะเวลามากกว่า 1 นาที ดังตารางที่ 1-6

ตารางที่ 1-6 แสดงนิยามของปัญหาแรงดันตก ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Undervoltages		>1 min	0.8 – 0.9 pu

1.2.6 แรงดันเกิน (Overvoltage)

ปัญหาแรงดันเกิน คือการเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์เอ็มเอสในระบบไฟฟ้า จนสูงกว่า 110 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติที่ความถี่เดียวกันเป็นระยะเวลามากกว่า 1 นาที ดังตารางที่ 1-7

ตารางที่ 1-7 แสดงนิยามของปัญหาแรงดันเกิน ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Overvoltages		>1 min	1.1 – 1.2 pu

ปัญหาแรงดันเกินมีสาเหตุของปัญหาเช่นเดียวกับปัญหาแรงดันตก เพียงแต่อยู่ในสภาวะที่ตรงข้ามกัน ยกตัวอย่างเช่น การปลดโหลดขนาดใหญ่ การชดเชยค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์ในช่วงไม่มีโหลด (Light Load) มากเกินไป หรือแม้กระทั่งการปรับแท็ป (Tap Changer) ที่ผิดพลาดของหม้อแปลงเป็นต้น ผลกระทบเมื่อมีแรงดันเกินในลักษณะนี้จะไม่รุนแรงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันเกินจากฟ้าผ่า เนื่องจากแรงดันเกินประเภทนี้จะไม่ทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหายแบบทันทีทันใด แต่จะมีผลในระยะยาวมากกว่า คือ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าสั้นลง

1.2.7 การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortion)

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ถูกนิยามว่าเป็นความเบี่ยงเบน (Deviation) ใดๆ ในสภาวะปกติ (Steady State) ของแรงดันจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine Waveform) โดยมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้นิยามปัญหาการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไว้ 5 ประเภทดังตารางที่ 1-8

ตารางที่ 1-8 แสดงนิยามของปัญหาการผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

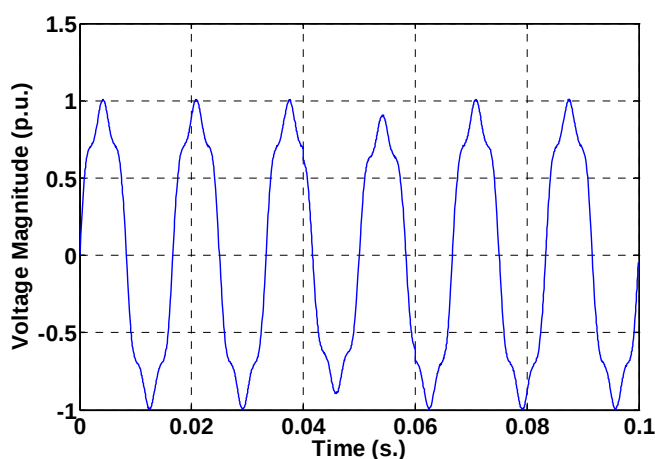
Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Waveform distortion			
- Dc Offset		Steady State	0 – 0.1%
- Harmonics	0–100 th harmonic	Steady State	20%
- Interharmonics	0 – 6 kHz	Steady State	– 2%
- Notching		Steady State	
- Noise	Broadband	Steady State	0 – 1%

1.2.7.1 ดีซี ออฟเซต (Dc Offset)

ความผิดเพี้ยนเนื่องจากดีซีออฟเซต เป็นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีค่าแรงดันกระแสตรง (DC Voltage) ปรากฏอยู่ในค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ สาเหตุเกิดจากมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทวงจรแปลงกระแสตรง (Rectifier) หรือประเภทไดโอด (Diode) อุปกรณ์เหล่านี้จะทำการผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ซึ่งกระแสไฟฟ้ากระแสตรงในระบบไฟฟ้านี้จะเป็นอันตรายต่อแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนสูงในหม้อแปลงส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง นอกจากนี้ ดีซีออฟเซตเป็นสาเหตุของการสึกกร่อนของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) ในระบบกราวด์ (Grounding) อีกด้วย

1.2.7.2 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

ฮาร์โมนิกส์ คือรูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่ใช้งานปกติ การรวมกันของฮาร์โมนิกส์กับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ใช้งานปกติจะมีผลทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิม โดยเฉพาะความถี่ที่มีจำนวนเท่าเป็นเลขคี่ เช่น ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น จะส่งผลกระทบเป็นพิเศษเนื่องจากจะทำให้ค่าแรงดันขดของแรงดันปกติลดลงมาก ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนสาเหตุจากฮาร์โมนิกส์แสดงไว้ดังภาพที่ 1-6



ภาพที่ 1-6 แสดงลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนสาเหตุจากฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์เป็นผลพวงมาจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เรกติไฟเออร์ (Rectifier) คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ตัวปรับความเร็ว

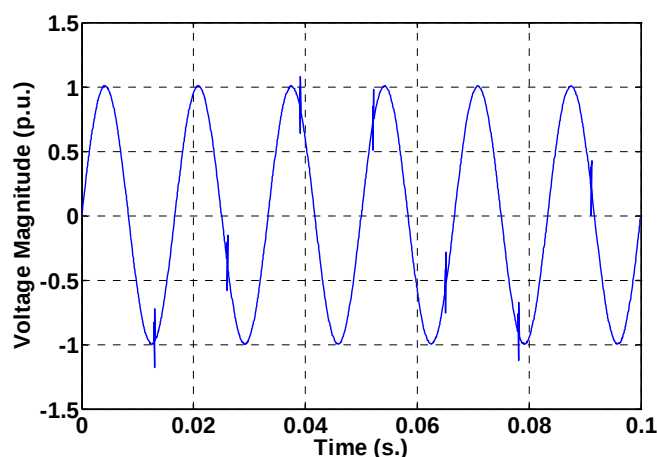
มอเตอร์ (Adjustable Speed Drive) และอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทเชื่อม (Welding) เช่น เครื่องเชื่อม (Arc Welding) เตาหลอม (Arc Furnace) อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเป็นผลให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิม

1.2.7.3 อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ (Interharmonics)

อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ คือรูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนไม่เต็มเท่าของความถี่ใช้งานปกติ เมื่ออินเตอร์ฮาร์มอนิกส์รวมกับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ใช้งานปกติจะมีผลทำให้สัญญาณแรงดันประกอบไปด้วยความถี่ที่มีช่วงกว้าง (Wide Band Spectrum) อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์สามารถพบได้ทั่วไปในรูปคลื่นแรงดันทุกระดับแรงดัน แหล่งกำเนิดของอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ได้แก่ คอนเวอร์เตอร์ (Converter) มอเตอร์ประเภทอินดักชัน (Induction Motor) เครื่องอาร์ค (Arcing Device) เป็นต้น ผลกระทบของอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ทำให้รูปคลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงมีผลกระทบกับระบบไฟฟ้าน้อยตามไปด้วย

1.2.7.4 ผิดเพี้ยนในลักษณะเกิดรอยบาก (Notching)

ความผิดเพี้ยนในลักษณะเกิดรอยบาก เกิดจากมีสัญญาณแรงดันรบกวนที่เป็นคาบ (Periodic Voltage Disturbance) เข้ามาปะปนในแรงดันระบบไฟฟ้า ซึ่งแรงดันรบกวนนี้เกิดจากผลกระทบของการทำงานปกติในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากแรงดันรบกวนดังกล่าวมีลักษณะเป็นคาบ และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีลักษณะคล้ายกับฮาร์มอนิกส์ได้ แต่แตกต่างกันที่แรงดันรบกวนนี้มีความถี่ที่สูงมากและไม่สามารถที่จะวัดได้ง่ายๆ เหมือนกับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนในลักษณะเกิดรอยบาก แสดงไว้ดังภาพที่ 1-7



ภาพที่ 1-7 แสดงลักษณะของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนในลักษณะเกิดรอยบาก

1.2.7.5 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนถูกนิยามว่าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ มีช่วงความถี่ในช่วงที่ต่ำกว่า 200 กิโลเฮิรท์ ซึ่งช่วงความถี่จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันหรือค่ากระแสไฟฟ้าในสายตัวนำนั้นๆ สาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนได้แก่ อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Device) วงจรควบคุม (Control Circuit) อุปกรณ์อาร์ค (Arcing Equipment) วงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier) และการสวิตชิงอุปกรณ์จ่ายไฟ (Switching Power Supply) บ่อยครั้ง ปัญหาสัญญาณรบกวนอาจเพิ่มความรุนแรงเนื่องจากการมีระบบกราวด์ (Grounding) ที่ไม่ดี ผลเสียของการมีสัญญาณรบกวนคือ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer) และตัวควบคุมที่โปรแกรมได้ (Programmable Controller) ทำงานผิดพลาด

1.2.8 แรงดันไม่สมดุล (Unbalance Voltage)

ในระบบไฟฟ้าที่สมดุลนั้น จะมีแต่เพียงกระแสที่เป็นส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence) เท่านั้นที่ไหลอยู่ในระบบ แต่ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกันมากในแต่ละเฟส จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสอยู่ในสถานะที่ไม่สมดุลอันเนื่องมาจากระบบไฟฟ้าที่มีกระแสที่เป็นส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) ไหลเจือปนอยู่ นอกจากนั้นหากระบบไฟฟ้าที่เกิดสถานะที่ไม่สมดุลนี้เป็นระบบกราวด์ (Ground System) ก็จะมีกระแสที่เป็นส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ไหลเจือปนอีกด้วย การประเมินค่าแรงดันไม่สมดุลสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าความแตกต่างระหว่างค่าแรงดันสูงสุดกับค่าแรงดันต่ำสุดต่อค่าแรงดันเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการวัด ซึ่งมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามปัญหาแรงดันไม่สมดุลไว้ดังตารางที่ 1-9

ตารางที่ 1-9 แสดงนิยามของปัญหาแรงดันไม่สมดุล ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Voltage Unbalance		Steady State	0.5 – 2 %

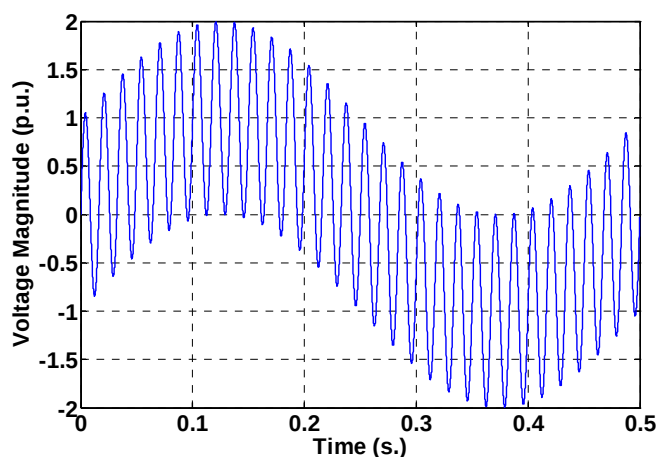
1.2.9 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuations)

แรงดันกระเพื่อม เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไปมาอย่างต่อเนื่องในช่วงความถี่ประมาณ 0-25 เฮิรท์ ซึ่งจะส่งผลให้หลอดไฟเกิดการกระพริบเป็นระยะที่เรียกว่า ไฟกระพริบ (Flicker) โดยมาตรฐาน IEEE Std.1159 ได้ให้คำนิยามปัญหาแรงดันกระเพื่อม ดังตารางที่ 1-10

ตารางที่ 1-10 แสดงนิยามของปัญหาแรงดันกระเพื่อม ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Voltage Fluctuations	<25 Hz		

ในระบบไฟฟ้า อุตสาหกรรมเหล็กเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของปัญหาแรงดันกระเพื่อม เนื่องจากในอุตสาหกรรมประเภทนี้มีอุปกรณ์ประเภทเตาหลอม (Arc Furnace) เป็นอุปกรณ์หลัก ลักษณะของแรงดันกระเพื่อม แสดงได้ดังภาพที่ 1-8



ภาพที่ 1-8 แสดงลักษณะของรูปคลื่นแรงดันกระเพื่อม

1.2.10 การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้ากำลัง (Power Frequency Variations)

การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าถูกนิยามว่าเป็นการเบี่ยงเบน (Deviation) ไปจากความถี่ปกติพื้นฐานในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณลักษณะของโหลดในระบบไฟฟ้า ถ้าความต้องการของโหลดมากกว่ากำลังการผลิต จะทำให้ความถี่ของระบบมีค่าต่ำกว่าค่าปกติ ในทางตรงข้ามถ้ากำลังการผลิตมากเกินไปความต้องการของโหลด จะทำให้ความถี่ของระบบมีค่าสูงกว่าค่าปกติ การที่ความถี่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าปกติจะส่งผลกระทบต่อหลายประการ เช่น ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนไป ส่งผลให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอินดักทีฟ (Inductive) ได้มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอุปกรณ์สูงขึ้น และในที่สุดอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์

ตารางที่ 1-11 แสดงสรุปนิยามของปัญหาคุณภาพไฟฟ้ากำลัง ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159

Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
1. Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5-ns rise	<50 ns	
1.1.2 Microsecond	1- μ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1-ms rise	>1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low Frequency	<5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Medium Frequency	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
1.2.3 High Frequency	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu
2. Short-Duration Variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Interruption		0.5 – 30 Cycles	<0.1 pu
2.1.2 Sag (Dip)		0.5 – 30 Cycles	0.1-0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5 – 30 Cycles	1.1 – 1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		30 Cycles – 3 s	<0.1 pu
2.2.2 Sag (Dip)		30 Cycles – 3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 Cycles – 3 s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s – 1 min	<0.1 pu
2.3.2 Sag (Dip)		3 s – 1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3. Long-Duration Variations			
3.1 Interruption, Sustained		>1 min	0 pu
3.2 Undervoltages		>1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Overvoltages		>1 min	1.1 – 1.2 pu
4. Voltage Unbalance		Steady State	0.5 – 2 %
5. Waveform Distortion			
5.1 Dc Offset		Steady State	0 – 0.1%
5.2 Harmonics	0 – 100 th harmonic	Steady State	0 – 20%
5.3 Interharmonics	0 – 6 kHz	Steady State	0 – 2%
5.4 Notching		Steady State	
5.5 Noise	Broadband	Steady State	0 – 1%
6. Voltage Fluctuations	<25 Hz		

1.3 สาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Cause of Power Quality)

ปัจจุบัน ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทุกระดับแรงดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม [4] เนื่องจากเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักหรือทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ สำหรับสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้นพอจะแบ่งได้ดังนี้ [1]

1.3.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าในปัจจุบันไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน กระแส และความถี่ที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดได้ เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวควบคุม (Microprocessor-Based Control) หรืออุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) เป็นต้น

1.3.2 การเพิ่มขึ้นของโหลดที่เป็นอุปกรณ์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) ในกระบวนการผลิต หรือการใช้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงานแบบเปิดปิด (On-Off) ด้วยความถี่สูง เช่น ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดปรับความเร็วได้ (Adjustable-Speed Motor Drive) ตัวจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (Switching Mode Power Supply) และวงจรควบคุมกระแสตรง (Power Rectifier) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้จะเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้รูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิม

1.3.3 การวางแผนบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าที่ไม่ดี หรือการก่อสร้างระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้องตามมาตรฐานซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฟอลต์ (Fault) ในระบบไฟฟ้าได้ง่าย

1.3.4 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การเกิดฟ้าผ่าขึ้นในระบบจำหน่ายหรือสายส่ง เป็นต้น

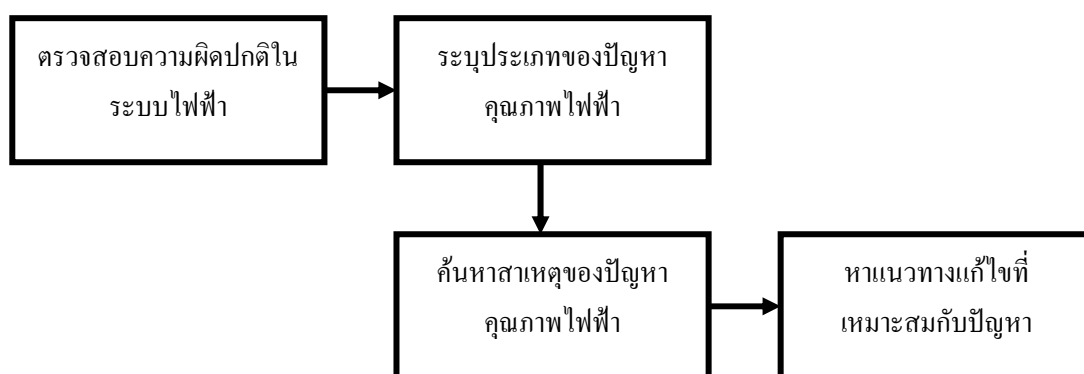
1.4 การแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Solution)

จากสาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่กล่าวมา พอจะสรุปวิธีแก้ไขและแนวทางป้องกันปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ 4 แนวทางคือ [5]

1.4.1 ลดผลกระทบของอุปกรณ์ที่มีความไวต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Reduce Effect on Sensitive Equipment) ผู้ผลิตอุปกรณ์ที่มีความไวต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้า สามารถลดหรือกำจัดผลกระทบของปัญหาดังกล่าวได้ โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า เช่น ออกแบบอุปกรณ์ให้สามารถปรับรีเลย์ป้องกันแรงดันตก (Undervoltage Relay) หรือเพิ่มอุปกรณ์บางตัว ได้แก่ คาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อช่วยเก็บพลังงานชั่วคราวเมื่อเกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ เป็นต้น นอกจากนี้ อุปกรณ์ไฟฟ้าบางตัวยังสามารถออกแบบให้ทนต่อ

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ เช่น หม้อแปลงชนิดเคแฟคเตอร์ (K-factor transformers) เป็นหม้อแปลงพิเศษซึ่งถูกออกแบบมาให้ทนต่อปัญหาฮาร์มอนิกส์ได้ เป็นต้น

1.4.2 กำจัดหรือลดสาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Reduce or Eliminate Cause) วิธีการกำจัดหรือลดสาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าจะต้องทำการวินิจฉัยถึงแหล่งกำเนิดของปัญหาเสียก่อน ซึ่งกระบวนการแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 1-9 แสดงขั้นตอนกระบวนการสำรวจปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (Determine Power System Condition) ว่ามีความผิดปกติไปจากสภาวะปกติอย่างไร บริเวณไหน จากนั้นเริ่มระบุประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Identify Power Quality Problem) ว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทใด ต่อมาทำการค้นหาสาเหตุของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Determine Cause of the Problem) และสุดท้ายคือการหาแนวทางแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ (Analyze Survey Results to Match Solution to Problem)



ภาพที่ 1-9 แสดงขั้นตอนกระบวนการสำรวจปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

1.4.3 กำจัดหรือลดตัวนำของสาเหตุปัญหา (Reduce or Eliminate Transfer Medium) ในบางกรณี ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้า อาจทำหน้าที่เป็นตัวนำปัญหาคุณภาพไฟฟ้า อาทิเช่น ฮาร์มอนิกส์ ทรานเซียนต์ แรงดันตกชั่วขณะ หรือไฟกระพริบ จากผู้ใช้ไฟฟ้ารายหนึ่ง ไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น ภายในโรงงานเดียวกัน โหลดที่มีความไวต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้าและโหลดที่สร้างปัญหาคุณภาพไฟฟ้า อาจต่ออยู่ภายในวงจรเดียวกัน วิธีแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การย้ายโหลดที่มีความไวต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้าไปต่อกับวงจรอื่นแทน เป็นต้น

1.4.4 ติดตั้งอุปกรณ์แก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Install Power Conditioning Equipment) แบ่งออกได้เป็น 9 ประเภทได้แก่

1.4.4.1 ตัวดูดซับแรงดันเสิร์จ (Surge Suppressors) ซึ่งในด้านแรงสูงเรียกว่า กับดักเสิร์จ หรือกับดักฟ้าผ่า(Surge or Lightning Arresters) และในส่วนด้านแรงต่ำเรียกว่า ตัวดูดซับแรงดันทรานเซียนต์หรือ TVSSs (Transient Voltage Surge Suppressors)

1.4.4.2 ตัวกรองสัญญาณรบกวน (Noise Filters)

1.4.4.3 หม้อแปลงแยกกลุ่มโหลด (Shielded Isolation Transformers) เป็นการแยกกลุ่มโหลดที่มีความไวต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามาอยู่ที่หม้อแปลงเดียวกัน

1.4.4.4 รีแอคเตอร์ปรับแรงดัน (Low-Voltage Line Reactors) เป็นการสับสวิตช์ อินดักเตอร์ (Inductor) หรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อเพิ่มหรือลดค่า Var ในระบบไฟฟ้าตามลำดับ โดยเมื่อค่า Var ในระบบไฟฟ้าค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ระดับแรงดันเพิ่มขึ้นและเมื่อค่า Var ในระบบไฟฟ้าค่าลดลงจะมีผลทำให้ระดับแรงดันลดลงตามไปด้วย

1.4.4.5 ตัวกระชับแรงดันในสายป้อน (Line-Voltage Regulators) เป็นหม้อแปลงชนิดหนึ่งที่มีการควบคุมและรักษาระดับแรงดันด้านทุติยภูมิ (Secondary Side) ให้คงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านปฐมภูมิ (Primary Side)

1.4.4.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำการติดตั้งโดยให้เริ่มทำงานเมื่อเกิดปัญหาไฟฟ้าดับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลดที่จำเป็น

1.4.4.7 การติดตั้งสวิตช์ตัดตอนสายป้อน (Dual Feeders with Static Transfer) ถ้าจำเป็นที่ต้องการความมั่นคงในระบบไฟฟ้าสูง สามารถทำการติดตั้งสายส่งไฟฟ้าจากเดิมหนึ่งวงจร (Feeder) เป็นสองวงจร โดยทำการติดตั้งสวิตช์ตัดตอนเพื่อทำการรับไฟจากวงจรที่ 1 ในกรณีปกติ และรับไฟจากวงจรที่ 2 ในกรณีที่วงจรที่ 1 ไม่สามารถจ่ายไฟให้ได้

1.4.4.8 ตัวสำรองไฟหรือ UPS (Uninterruptible Power Supplies) เป็นตัวจ่ายพลังงานสำรองในกรณีที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ซึ่งจะทำการชาร์จไฟจากแหล่งจ่ายในสถานะปกติ

1.4.4.9 ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filters) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ พาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) และแอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) โดยพาสซีฟฟิลเตอร์จะประกอบขึ้นจากอินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์เพื่อทำการกรองฮาร์โมนิกส์ตามค่าที่กำหนดไว้ ส่วนแอคทีฟฟิลเตอร์จะมีหลักการทำงานที่แตกต่างจากพาสซีฟฟิลเตอร์ตรงที่จะสามารถปรับกระแสฮาร์โมนิกส์ให้ลดลงได้ โดยภายในตัวแอคทีฟฟิลเตอร์จะมีตัวเซนเซอร์คอยจับกระแสฮาร์โมนิกส์และทำการผลิตกระแสฮาร์โมนิกส์ตรงข้ามขึ้นเพื่อหักล้างกัน

จากสาเหตุและวิธีการป้องกันแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาสามารถทำการสรุปและแบ่งออกตามประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 1-12 [6]

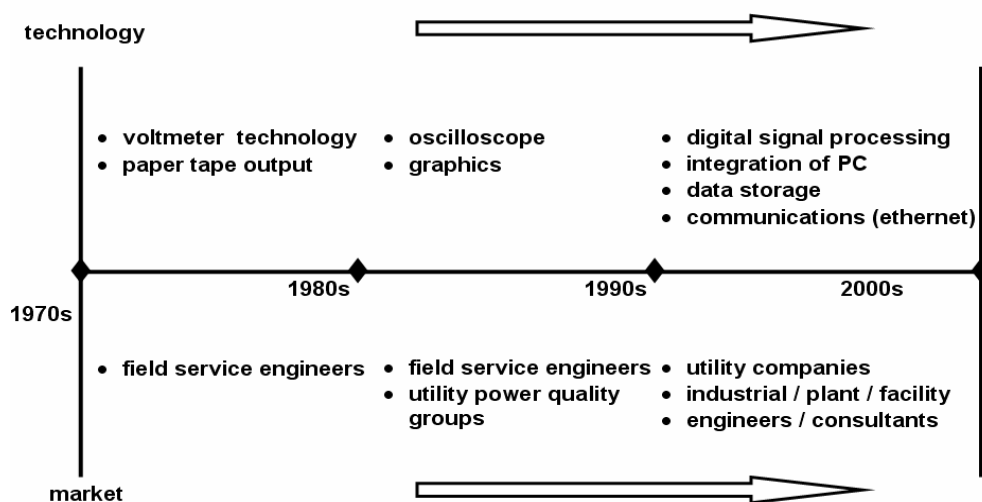
ตารางที่ 1-12 สรุปสาเหตุและวิธีการแก้ไขปัญหาคูณภาพไฟฟ้า

ประเภทปัญหาคูณภาพไฟฟ้า (Power Quality Category)	สาเหตุของปัญหา (Typical Causes)	การแก้ไขปัญหา (Power Quality Solution)
1. ทรานเซียนต์แบบอิมพัลส์ (Impulse Transient)	ฟ้าผ่า การสับสวิตช์โหลด	กั๊บดักเล็รจ ตัวกรอง
2. ทรานเซียนต์แบบ ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Transient)	การสับสวิตช์คาปาซิเตอร์ การสับสวิตช์โหลด	กั๊บดักเล็รจ ตัวกรอง
3. แร่งดันตก/เกินชั่วขณะ (Sags/Swells)	ฟอลต์ในสายป้อน การสตาร์ทของโหลดขนาด ใหญ่	หม้อแปลงรักษาแรงดัน UPS
4. ไฟฟ้าดับ (Interruption)	ระบบป้องกันไฟฟ้า การบำรุงรักษา	UPS เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง
5. แร่งดันตก/เกิน (Undervoltages/Overvoltages)	การสตาร์ทของโหลดขนาด ใหญ่, การเพิ่มหรือลดโหลดอย่าง รวดเร็ว	ตัวควบคุมแรงดัน หม้อแปลงรักษาแรงดัน
6. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)	โหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น	ตัวกรองแอกทีฟ หรือแพสซีฟ
7. ไฟกระพริบ (Voltage Flicker)	การสตาร์ทของโหลดขนาด ใหญ่, การเพิ่มหรือลดโหลดอย่าง รวดเร็ว	รีแอกเตอร์ปรับแรงดัน

1.5 การติดตามปัญหาคูณภาพไฟฟ้า (Power Quality Problem Monitoring)

การติดตามปัญหาคูณภาพไฟฟ้า ถือว่าเป็นขั้นตอนแรกในการศึกษาและแก้ไขปัญหาคูณภาพไฟฟ้า ซึ่งได้มีพัฒนาการมาเป็นเวลานานดังภาพที่ 1-10 แสดงพัฒนาการของการติดตามปัญหาคูณภาพไฟฟ้า [1] โดยในช่วงแรกเริ่มจากทศวรรษที่ 1970 ไปจนถึงช่วงทศวรรษที่ 1980 ได้มีการนำโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) มาใช้ในการติดตามปัญหาคูณภาพไฟฟ้าและแสดงผลของการวัดออกมาทางกระดาษ ต่อมาในช่วงทศวรรษที่ 1980 ไปจนถึงช่วงทศวรรษที่ 1990 เริ่มมีการพัฒนามาเป็นการใช้

ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และแสดงผลของการวัดออกมาทางจอภาพ และปัจจุบันได้มีการนำความรู้ทางด้านการประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) เข้าร่วมกับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้มีการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Storage) ของสัญญาณเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยกลุ่มของผู้ศึกษาในปัจจุบันนั้นจะครอบคลุมถึงทั้งกลุ่มของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจอุตสาหกรรม

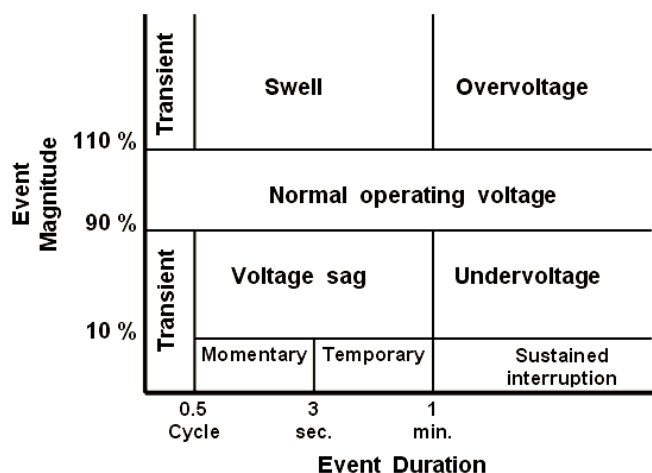


ภาพที่ 1-10 แสดงวิวัฒนาการของการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟฟ้า (Magnitude Variation) และการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของความถี่แรงดันไฟฟ้า (Frequency Deviation) [5]

การหาขนาดของแรงดันนั้น ใช้สำหรับติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ปัญหาทรานเซียนต์ แรงดันตก แรงดันเกิน แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ ไฟดับ เป็นต้น ซึ่งการแบ่งประเภทของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแสดงได้ตามภาพที่ 1-11 [1] จะเห็นว่า ช่วงขนาดของแรงดันที่ 90-110 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติ จะจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ของแรงดันที่ใช้งานปกติ ถ้าแรงดันสูงหรือต่ำกว่าแรงดันใช้งานปกติ ภายในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 0.5 ลูกคลื่นจะจัดอยู่ในเกณฑ์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแบบทรานเซียนต์ ส่วนแรงดันสูงหรือต่ำกว่าแรงดันใช้งานปกติภายในช่วงระยะเวลา 0.5 ลูกคลื่นถึง 1 นาที จะเรียกว่า ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแบบแรงดันเกินชั่วขณะหรือแรงดันตกชั่วขณะ ตามลำดับ และหากช่วงระยะเวลาของแรงดันสูงหรือต่ำ

กว่าแรงดันใช้งานปกติ ภายในช่วงระยะเวลาเกิน 1 นาที่ จะเรียกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทนี้ว่า ปัญหาแรงดันเกินหรือแรงดันตก ตามลำดับ และสุดท้ายถ้าแรงดันมีค่าอยู่ระหว่าง 0-10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันใช้งานปกติเป็นระยะเวลานานกว่า 1 นาที่ จะเรียกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทนี้ว่า ไฟดับ



ภาพที่ 1-11 แสดงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าตามขนาดของแรงดัน โดยใช้ IEEE std.1159 - 1995

ส่วนการวิเคราะห์ความถี่ของความถี่แรงดัน ใช้สำหรับการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่มาตรฐานของระบบไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ปัญหาฮาร์มอนิกส์ อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ และส่วนประกอบกระแสดรง เป็นต้น

1.6 ประโยชน์ของการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Advantage of Power Quality Monitoring)

การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้รับคือ ขนาดของแรงดันเทียบกับเวลา (Magnitude Versus Time) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาสาเหตุของปัญหา เพื่อหาแนวทางแก้ไขหรือป้องกัน โดยทำการเปรียบเทียบช่วงเวลาการเกิดปัญหาของสัญญาณที่คำนวณได้กับกิจกรรมในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของช่วงเวลานั้นๆ ประโยชน์อีกประการหนึ่งคือ สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบป้องกันอุปกรณ์ เช่น ออกแบบติดตั้งระบบตัวชดเชยค่า VAR (Static Var Compensator) เพื่อ 억제ระดับแรงดันไฟฟ้าในขนาดที่เหมาะสม กับปัญหาแรงดันตกที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันคงที่สม่ำเสมอ หรือนำไปใช้ออกแบบตัวอุปกรณ์ให้มีความทนทานเหมาะสมกับคุณภาพไฟฟ้า

บทที่ 2

การวิเคราะห์และติดตามปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

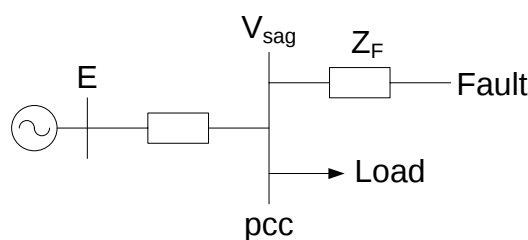
ในบรรดาปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้น แรงดันตกชั่วขณะเป็นปัญหาที่พบมากและก่อให้เกิดความเสียหายได้มากที่สุด [1] โดยฟอลต์ในระบบไฟฟ้าเป็นสาเหตุหลักของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ดังนั้น บทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic) ของแรงดันตกชั่วขณะ ได้แก่ ขนาด (Magnitude) ช่วงเวลา (Duration) มุมเฟส (Phase Angle) สาเหตุและการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งจากสถิติของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [7] พบว่าฟอลต์ลงดินเฟสเดียว (Single Line to Ground Fault) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ และสุดท้ายจะกล่าวถึงการคำนวณขนาดของแรงดันเพื่อติดตามและศึกษาปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งที่ผ่านมามีหลายวิธีที่ถูกลำเสนอ แต่มีวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด 3 วิธี คือ วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส (The Root Mean Square Method) การแยกองค์ประกอบทางออร์โธกอนอล (Orthogonal Component) การหาค่ายอดของแรงดัน (Peak Voltage) [8]

2.1 คุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ (Characteristic of Voltage Sag)

จากคำนิยามของแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานของ IEEE แรงดันตกชั่วขณะ หมายถึงขนาดของแรงดันที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 เปอรเซ็นต์ของพิคตแรงดันปกติ โดยขนาดของแรงดันที่ลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นนานตั้งแต่ 0.5 ลูกคลื่น (Cycle) จนถึง 1 นาที โดยการเกิดแรงดันตกชั่วขณะส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากฟอลต์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งฟอลต์ในระบบไฟฟ้านั้นนอกจากจะมีสาเหตุมาจากสัตว์ ต้นไม้ และคุณภาพของอุปกรณ์แล้ว ผลจากภัยธรรมชาติที่เกิดจากลมพายุและฟ้าผ่าก็เป็นสาเหตุอย่างหนึ่งด้วย โดยฟอลต์ที่เกิดจากฟ้าผ่ามีผลสืบเนื่องมาจากการที่ฉนวนของลูกถ้วยไฟฟ้าไม่สามารถทนต่อค่าแรงดันเกินขนาดใหญ่จากลักระแสฟ้าผ่าได้ทำให้เกิดการแรงดันเกินข้ามลูกถ้วย (Flash Overvoltage) หรือแรงดันเกินย้อนกลับในลูกถ้วยได้ (Back Flash Overvoltage) ในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาแรงดันตกชั่วขณะจำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ ได้แก่ ขนาด (Magnitude) ช่วงเวลา (Duration) และมุมเฟส (Phase Angle)

2.1.1 ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ (Magnitude of Voltage Sag)

โดยทั่วไปหากฟอลต์เป็นแบบสมมูลสามารถคำนวณหาขนาดของแรงดันตกชั่วขณะได้ตามหลักการของการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ดังภาพที่ 2-1 ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เกิดฟอลต์แบบสามเฟส (Three Phase Fault) ขึ้นในระบบ ระดับแรงดันตกชั่วขณะที่จุดต่อร่วมหรือบัสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-1)

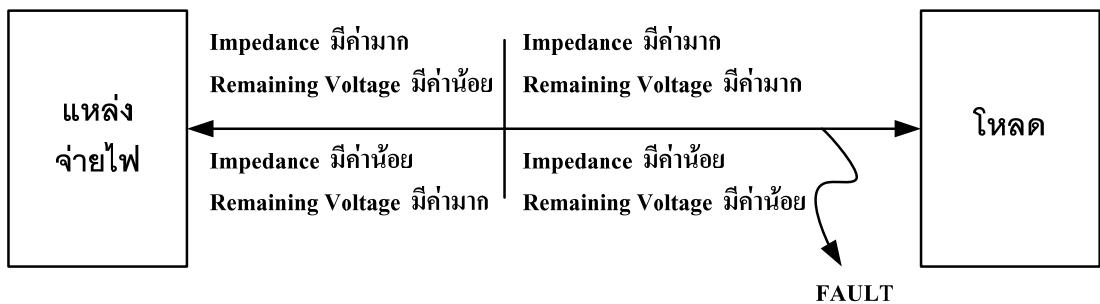


ภาพที่ 2-1 แสดงการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมูล

$$V_{Sag} = \left(\frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \right) E \quad (2-1)$$

จากสมการที่ (2-1) หาค่าแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมูลชี้ให้เห็นว่าแรงดันที่ปรากฏที่ตำแหน่งบัสจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของระบบตั้งแต่บัสจนถึงจุดเกิดฟอลต์เป็นสำคัญ หากระยะที่เกิดฟอลต์อยู่ใกล้บัสมากจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าน้อยและนั่นย่อมหมายความว่ากระแสฟอลต์แบบสามเฟสจะมีค่ามาก เป็นผลทำให้ระดับแรงดันที่เหลืออยู่ในระบบมีค่าลดลงมากจนอาจมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นหากต้องการควบคุมไม่ให้ขนาดของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ลดต่ำลงจนก่อให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟ จะต้องป้องกันไม่ให้ฟอลต์เกิดขึ้นที่ระยะใกล้กับตำแหน่งบัส แต่หากพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟจนถึงบัส จะพบว่าแหล่งจ่ายไฟที่มีเสถียรภาพมากหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำจะมีส่วนช่วยลดความรุนแรงของปัญหาแรงดันตกชั่วขณะได้

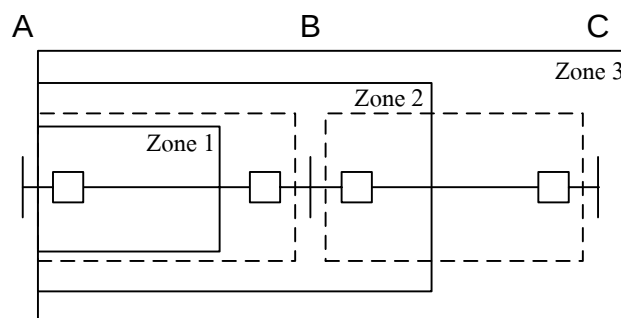
การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่มีผลต่อปัญหาแรงดันตกชั่วขณะให้ง่ายขึ้น ควรเริ่มต้นจากการกำหนดจุดพิจารณา และใช้สมการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมูลมาประกอบการอธิบายจะให้ความสัมพันธ์ตามภาพที่ 2-2 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อการเกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะในขณะที่เกิดฟอลต์ประกอบไปด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า



ภาพที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่มีผลต่อปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

2.1.2 ระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Duration of Voltage Sag)

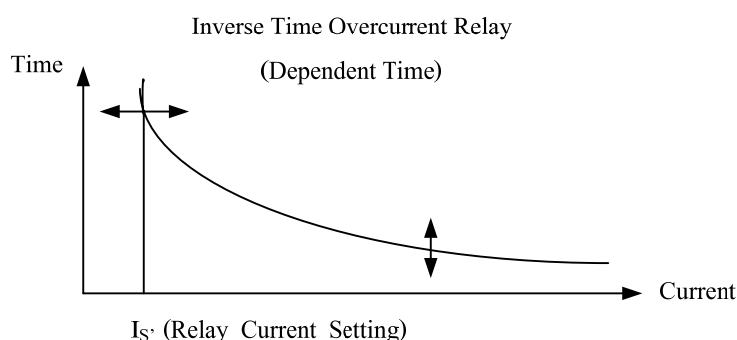
จากสถิติของปัญหาแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น พบว่าส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นระยะเวลาของปัญหาจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งเพื่อกำจัดฟอลต์ในระบบ ยกตัวอย่างเช่น ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบ 115 กิโลโวลต์ จะได้รับการกำจัดภายในเวลาอันรวดเร็วด้วยรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ที่ถูกตั้งให้ทำงานเป็นแบบโซน (Zone) การทำงานในโซนแรกจะตั้งเป็นแบบทันทีทันใด (Instantaneous) ส่วนการทำงานในโซนที่สองตั้งเวลาไว้ 0.3 วินาที และการทำงานในโซนที่สามตั้งเวลาไว้ที่ 0.6 วินาที ตามภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แสดงลักษณะการกำหนดค่าการทำงานแบบโซนของรีเลย์ระยะทาง

ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในโซนที่หนึ่งหากเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นใกล้กับสถานีไฟฟ้า จะทำให้ระดับแรงดันมีขนาดลดลงไปมาก แต่เนื่องจากรีเลย์ระยะทางใช้เวลากำจัดฟอลต์แบบทันทีทันใด (Instantaneous) ดังนั้นระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะจึงสั้นมาก

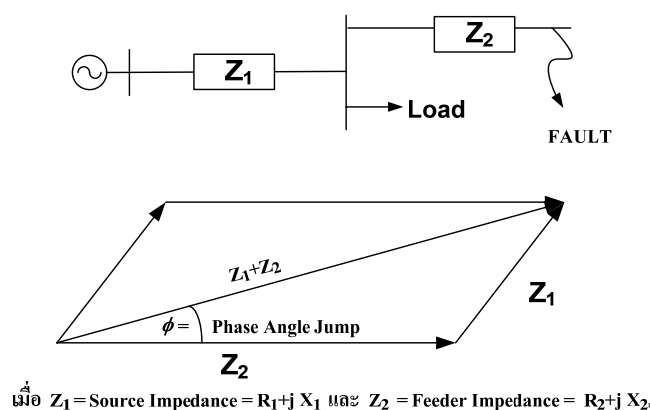
สำหรับฟอลต์ในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์หรือ 33 กิโลโวลต์นั้น จะได้รับการป้องกันโดยรีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) ซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นแบบอินเวอร์สเวลา (Inverse Time) ตามภาพที่ 2-4 กล่าวคือ รีเลย์จะทำงานเร็วหากกระแสฟอลต์มีค่ามาก และจะมีผลทำให้การกำจัดฟอลต์ที่กระแสสูงๆ ใช้เวลาที่สั้นลง ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาที่เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะนั้นสั้นลงตามไปด้วย



ภาพที่ 2-4 แสดงลักษณะสมบัติของรีเลย์กระแสเกิน แบบอินเวอร์สเวลา

2.1.3 มุมเฟสของแรงดันตกชั่วขณะ (Phase Angle of Voltage Sag)

ปัญหาการเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไม่ได้ทำให้ระดับของแรงดันไฟฟ้า มีขนาดลดลงเท่านั้น แต่ยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของมุมเฟส (Phase-Angle Jump) ที่ตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาด้วย



เมื่อ $Z_1 = \text{Source Impedance} = R_1 + j X_1$ และ $Z_2 = \text{Feeder Impedance} = R_2 + j X_2$

ภาพที่ 2-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสในระบบไฟฟ้า

จากภาพที่ 2-5 การเลื่อนของมุมเฟสคือความแตกต่างของมุมก่อนเกิดฟอลต์และมุมขณะเกิดฟอลต์ หรือมุมที่อยู่ระหว่างอิมพีแดนซ์ของฟีดเดอร์ (Feeder Impedance) หรือ Z_2 และอิมพีแดนซ์ของระบบ (System Impedance) หรือ $(Z_1 + Z_2)$ ตามสมการที่ (2-2)

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_2}{R_2}\right) - \arctan\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right) \quad (2-2)$$

ในกรณีที่ระบบมีค่าอัตราส่วนของ $\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2}$ จะมีผลทำให้การเลื่อนของมุมเฟสมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสใดๆ ขึ้นในระบบขณะเกิดฟอลต์ อย่างไรก็ตาม กรณีเช่นนี้มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วระบบไฟฟ้ามีการใช้สายหลายชนิดหลายขนาด รวมทั้งมีการออกแบบการวางตัวของสายตัวนำในระบบจำหน่ายหรือสายส่งที่แตกต่างกันเป็นผลทำให้มีค่า $\frac{X}{R}$ ที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้แล้วผลของเวกเตอร์กรุป (Vector Group) ของหม้อแปลงและการต่อโหลดในระบบ ก็มีผลอย่างมากต่อการเลื่อนของมุมเฟสในขณะเกิดฟอลต์ ดังนั้น ในทุกครั้งที่เกิดฟอลต์แบบไม่สมดุลขึ้นจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสได้และโดยปกติแล้ว การเลื่อนของมุมเฟสสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึง 60 องศาหากโหลดต่อเป็นแบบวายน์ (Wye) และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึง 30 องศาในกรณีที่โหลดต่อแบบเดลต้า (Delta)

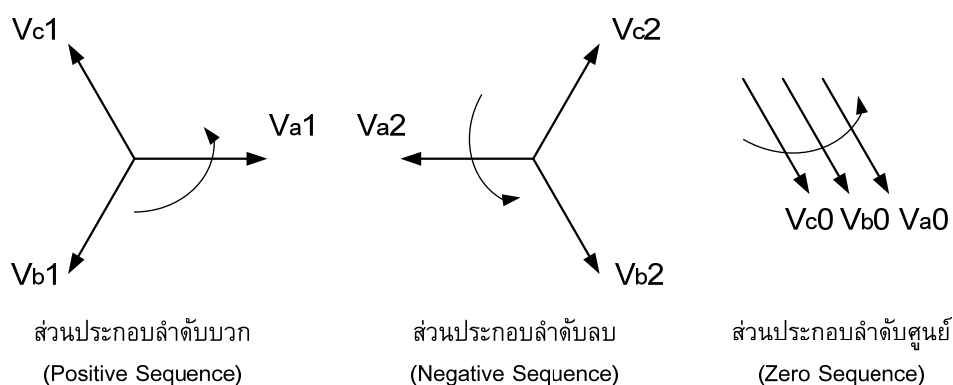
2.2 แรงดันตกชั่วขณะเนื่องจากฟอลต์ (Voltage Sag due to Faults)

ฟอลต์ในระบบไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Faults) และฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Faults) โดยส่วนมากแล้ว ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะเป็นฟอลต์แบบไม่สมมาตรหรือแบบไม่สมดุล ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบและโอกาสของการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 2-1 [9]

ตารางที่ 2-1 แสดงรูปแบบและโอกาสของการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

รูปแบบของการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตร	โอกาสของการเกิดฟอลต์ (%)
1. ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน (Single-Phase Faults)	70
2. ฟอลต์ระหว่างไลน์ (Phase-to-Phase Faults)	15
3. ฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน (Two-Phase-to-Ground Faults)	10
4. ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical faults)	5

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่า ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน (Single Line to Ground Faults) มีโอกาสในการเกิดขึ้นมากที่สุดและเป็นสาเหตุหลักในการเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณค่าแรงดันและกระแสฟอลต์ ที่ส่งผลกระทบในการทำให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะนั้น จำเป็นต้องอาศัยหลักการของส่วนประกอบสมมาตรดังภาพที่ 2-6 [10]



ภาพที่ 2-6 แสดงส่วนประกอบของแรงดันแบบสมมาตร

จากภาพที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบลำดับบวกและส่วนประกอบลำดับลบนั้น จะมีเฟสเซอร์ที่มีเฟสต่างกันอยู่ 120 องศา ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคิดและการแสดงรูปแบบสมการ จึงได้มีการกำหนดตัวดำเนินการ a ขึ้นมาเพื่อใช้แทนการหมุนเฟสไป 120 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยที่ค่า a ได้กำหนดค่าไว้ตามสมการที่ (2-3)

$$a = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \quad (2-3)$$

ดังนั้น สามารถเขียนเฟสเซอร์ใดๆ ให้ประกอบไปด้วยส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ และจากนิยามของตัวดำเนินการ a จะสามารถเขียนเฟสเซอร์ใดๆ ได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-4) และสมการที่ (2-5)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

2.3 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าขณะที่เกิดฟอลต์

2.3.1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน (Single-Phase Faults)

2.3.1.1 ระบบการต่อลงดินโดยตรง (Solidly-Grounded Systems)

ระบบนี้เป็นการต่อจุดนิวตรอลลงดินโดยตรง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ได้ดังสมการที่ (2-6)

$$\begin{aligned} V_a &= -\frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + Z_{S1}} \\ V_b &= a^2 \\ V_c &= a \end{aligned} \quad (2-6)$$

2.3.1.2 ระบบการต่อลงดินแบบมีอิมพีแดนซ์ (Impedance-Grounded Systems)

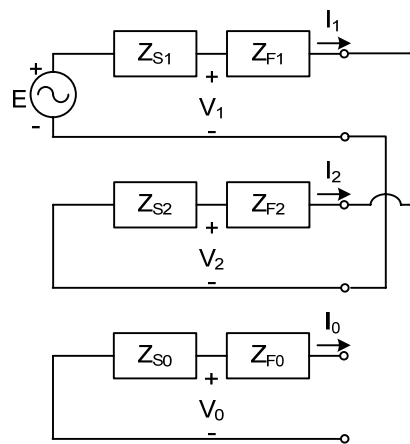
ระบบนี้เป็นการต่อลงดินโดยผ่านรีซิสแตนซ์ (Resistance) หรือค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงดันตกเมื่อเกิดฟอลต์แบบลงดินเฟสเดียวได้ตามสมการที่ (2-7)

$$\begin{aligned}
V_a &= 1 - \frac{Z_{S0} + 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\
V_b &= a^2 - \frac{Z_{S0} - 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\
V_c &= a - \frac{Z_{S0} - 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})}
\end{aligned} \tag{2-7}$$

โดยกำหนดให้ $Z_{S1} = Z_{S2}$ และ $Z_{F1} = Z_{F2}$ ซึ่งจากสมการจะสังเกตได้ว่าส่วนประกอบลำดับศูนย์เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดขนาดของแรงดันตกคร่อมที่เกิดฟอลต์

2.3.1 ฟอลต์ระหว่างไลน์ (Phase-to-Phase Faults)

สำหรับฟอลต์ระหว่างไลน์นั้น สามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 2-7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันและกระแสลำดับศูนย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 2-7 แสดงวงจรสมมูลของฟอลต์ระหว่างไลน์

การคำนวณส่วนประกอบแรงดันของฟอลต์ระหว่างไลน์ สามารถทำได้ดังสมการที่ (2-8)

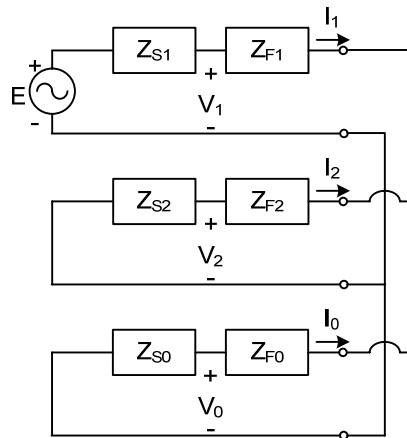
$$\begin{aligned}
V_1 &= E - E \frac{Z_{S1}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\
V_2 &= \frac{Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\
V_0 &= 0
\end{aligned} \tag{2-8}$$

ถ้าสมมติให้ $E=1$ สามารถหาค่าแรงดันที่แต่ละเฟสได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= 1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\ V_b &= a^2 - \frac{a^2 Z_{S1} - a Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\ V_c &= a - \frac{a Z_{S1} - a^2 Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \end{aligned} \quad (2-9)$$

2.3.2 ฟอลต์ระหว่างสองไลน์ลงกราวด์ (Two-Phase-to-Ground Faults)

วงจรสมมูลของฟอลต์ระหว่างสองไลน์ลงกราวด์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แสดงวงจรสมมูลของฟอลต์ระหว่างสองไลน์ลงกราวด์

การคำนวณส่วนประกอบแรงดันของฟอลต์ระหว่างสองไลน์ลงกราวด์ สามารถทำได้ดังสมการที่ (2-10)

$$\begin{aligned} V_1 &= 1 - \frac{Z_{S1}(Z_{S0} + Z_{F0} + Z_{S2} + Z_{F2})}{D} \\ V_2 &= \frac{Z_{S2}(Z_{F0} + Z_{F2})}{D} \\ V_0 &= \frac{Z_{S0}(Z_{S2} + Z_{F2})}{D} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\text{เมื่อ } D = (Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})$$

สามารถหาค่าแรงดันที่แต่ละเฟสได้ดังสมการที่ (2-11)

$$\begin{aligned} V_a &= 1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{S0} + Z_{F0})}{D} + \frac{(Z_{S0} - Z_{S1})(Z_{S2} + Z_{F2})}{D} \\ V_b &= a^2 + \frac{(aZ_{S2} - a^2 Z_{S1})Z_0}{D} + \frac{(Z_{S0} - a^2 Z_{S1})Z_2}{D} \\ V_c &= a + \frac{(a^2 Z_{S2} - aZ_{S1})Z_0}{D} + \frac{(Z_{S0} - aZ_{S1})Z_2}{D} \end{aligned} \quad (2-11)$$

2.4 วิธีการคำนวณขนาดแรงดัน (The Method of Calculating Voltage Magnitude) [8]

ในกระบวนการเฝ้าดูและติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้น รูปคลื่นแรงดันจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) แล้วนำมาวิเคราะห์สัญญาณตามอัลกอริทึมโดยใช้เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล (Data Window) โดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนแรกในการตรวจวัดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าคือ การหาคุณลักษณะของขนาดแรงดันไฟฟ้า ที่ผ่านมามีหลายวิธีที่ถูกนำเสนอ ในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาวิธีที่นิยมที่สุด 3 วิธี ได้แก่ วิธีหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมของวิธีหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน รวมทั้งวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

2.4.1 การหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (The Root Mean Square Method)

ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) หรือแรงดันประสิทธิผล ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการติดตามเฝ้าดู (Monitoring) และวัดค่า (Measurement) ซึ่งค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) ในทางคณิตศาสตร์สามารถนิยามได้ตามสมการที่ (2-12)

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n^2} \quad (2-12)$$

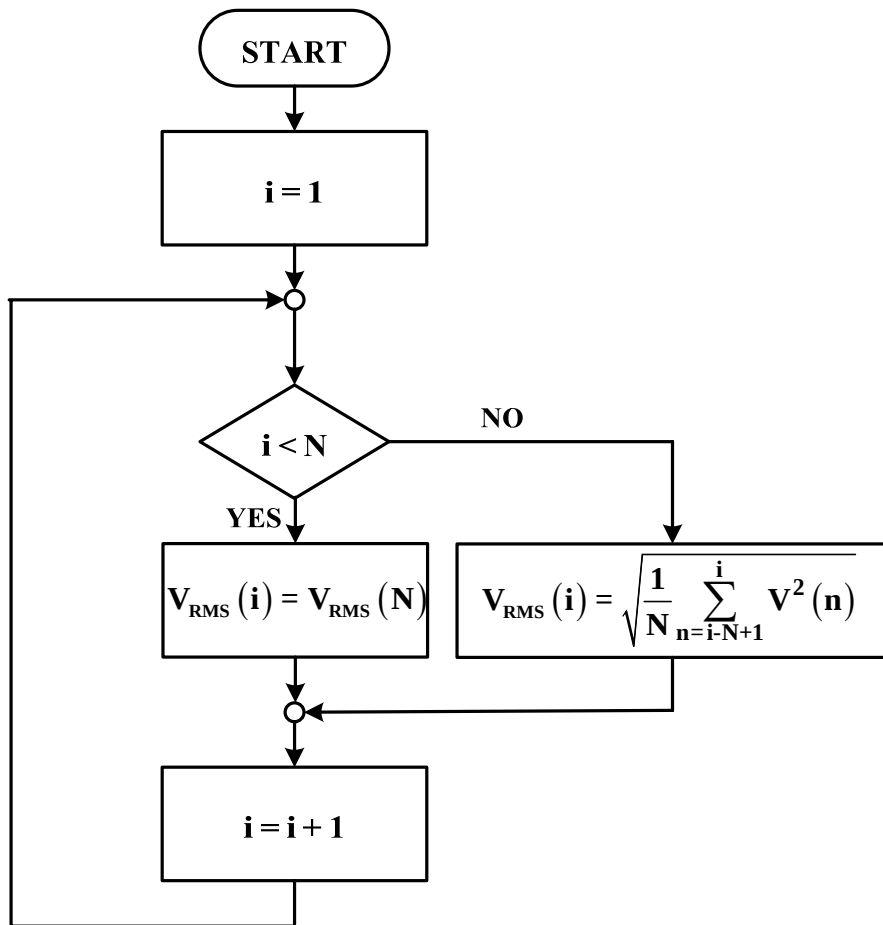
เมื่อ	V_{RMS}	คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square)
	N	คือคาต้าวินโดว์ (Data Window) กำหนดให้มีขนาด 1 คาบ
	v_n	คือค่าแรงดันที่แซมปลิง (Sampling) ลำดับที่ n

ในทางปฏิบัติแล้ว วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสนี้ ค่าแชนเปลิ่งของแรงดันในช่วง 1 ลูกคลื่นแรก จะมีค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสเท่ากันคือมีค่าเท่ากับค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสใน 1 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2-13)

$$V_{\text{RMS}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=i-N+1}^i v_n^2} & i \geq N \\ V_{\text{RMS}}(N) & i < N \text{ and } i \geq 1 \end{cases} \quad (2-13)$$

ข้อดีของวิธีการนี้ประการแรกคือ ง่าย และมีความเร็วในการคำนวณสูง เนื่องจากสมการไม่มีความซับซ้อน ส่วนประการที่สอง ได้แก่ ใช้หน่วยความจำ (Memory) จำนวนน้อย เนื่องจากใช้เก็บค่าแรงดันเพียงหนึ่งคาบและแทนค่าแชนเปลิ่งต่อแชนเปลิ่ง [11]

ข้อเสียของวิธีการนี้คือ วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสยังไม่สามารถใช้แยกความแตกต่างของสัญญาณที่มีค่าฮาร์โมนิก (Harmonic) และสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปน ดังนั้น ค่าความถูกต้องจึงขึ้นอยู่กับปริมาณของฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนอีกด้วย ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่าอาร์เอ็มเอสสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 แสดงขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่าอาร์เอ็มเอส

2.4.2 การแยกองค์ประกอบออร์ทोगอนอลของแรงดัน (Orthogonal Component) [12]

องค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้า สามารถหาได้จากการแยกองค์ประกอบทางออร์ทोगอนอล (Orthogonal Decomposition) ของสัญญาณแรงดันในระบบไฟฟ้า โดยวิธีอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ซึ่งผลที่ได้คือ การแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็น ส่วนจริง (Real Part) หรือ V_x และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) หรือ V_y ดังนี้

$$V_x = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (2-14)$$

$$V_y = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (2-15)$$

จากสมการที่ (2-14) และสมการที่ (2-15) สามารถหาขนาดและมุมเฟสของสัญญาณได้ตามสมการที่ (2-16)

$$m = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad \phi = \arctan\left(-\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (2-16)$$

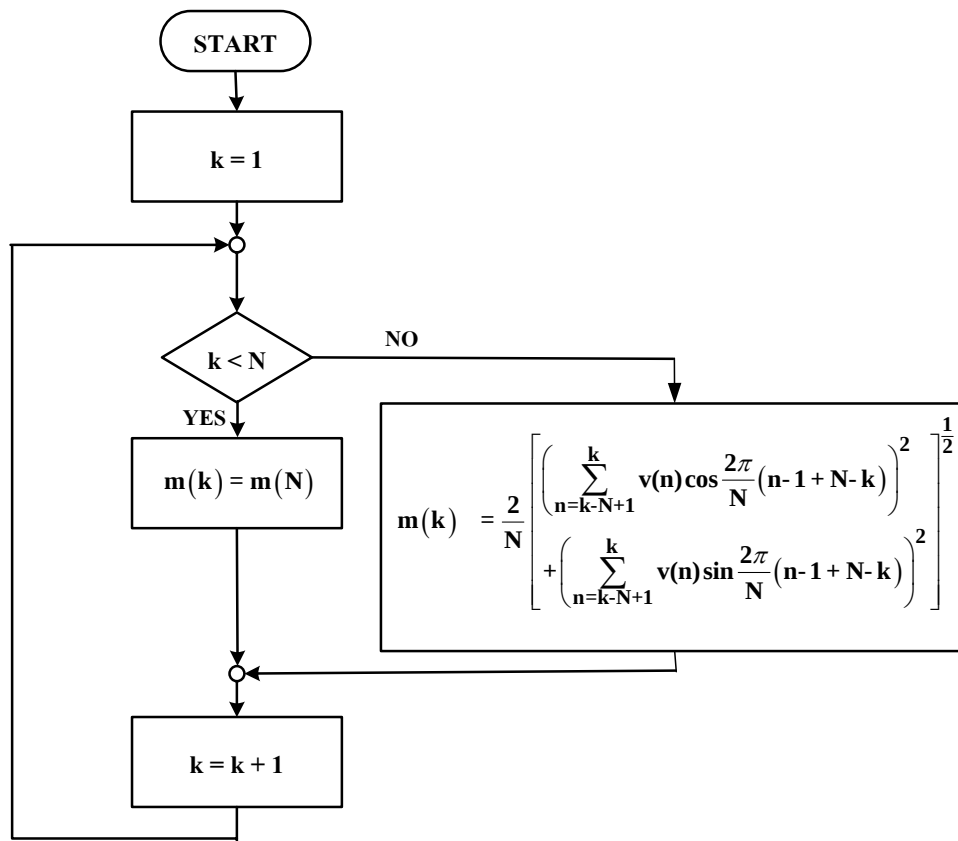
โดยที่ m คือขนาดของสัญญาณและ ϕ คือมุมเฟสของสัญญาณ จากสมการที่ (4) จะเห็นว่าวิธีแยกองค์ประกอบแรงดันไม่มีการนำส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ของสัญญาณเข้ามาทำการคำนวณด้วย ดังนั้น วิธีกรณีนีจึงเหมาะสำหรับสัญญาณที่ไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงปะปนอยู่ด้วย เพื่อให้สามารถทำการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูลสามารถนำมาเขียนใหม่ได้สมการที่ (2-17)

$$m_1(k) = \frac{2}{N} \left[\left(\sum_{n=k-N+1}^k v(n) \cos \frac{2\pi}{N}(n-1+N-k) \right)^2 + \left(\sum_{n=k-N+1}^k v(n) \sin \frac{2\pi}{N}(n-1+N-k) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad k \geq N \quad (2-17)$$

$$m_1(k) = m_1(N) \quad 1 \leq k < N$$

ข้อดีของวิธีการนี้คือ มีความเร็วในการคำนวณสูง และสามารถใช้คำนวณกับสัญญาณที่มีส่วนประกอบของกระแสตรงอยู่ เนื่องจากมีการแยกองค์ประกอบของสัญญาณในระหว่างการคำนวณ [11]

ข้อเสียของวิธีการนี้คือ สำหรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว เช่น สัญญาณทรานเซียน (Transient) ต้องทำการปรับปรุงขนาดคาถ้าวินโดว์ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีแยกองค์ประกอบอโรคอนอล สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 แสดงขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดัน โดยวิธีแยกองค์ประกอบอโรคอนอล

2.4.3 การหาค่ายอดของแรงดัน (Peak Voltage)

ค่ายอดของแรงดันคือ ค่าที่ได้จากการเลือกค่าสมบูรณ์ (Absolute Value) ที่สูงสุดในหนึ่งหน้าต่างรับข้อมูล ซึ่งสามารถแทนวิธีการในฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้ตามสมการที่ (2-18)

$$v_{\text{peak}}(t) = \max_{0 < \tau < T} |v(t - \tau)| \quad (2-18)$$

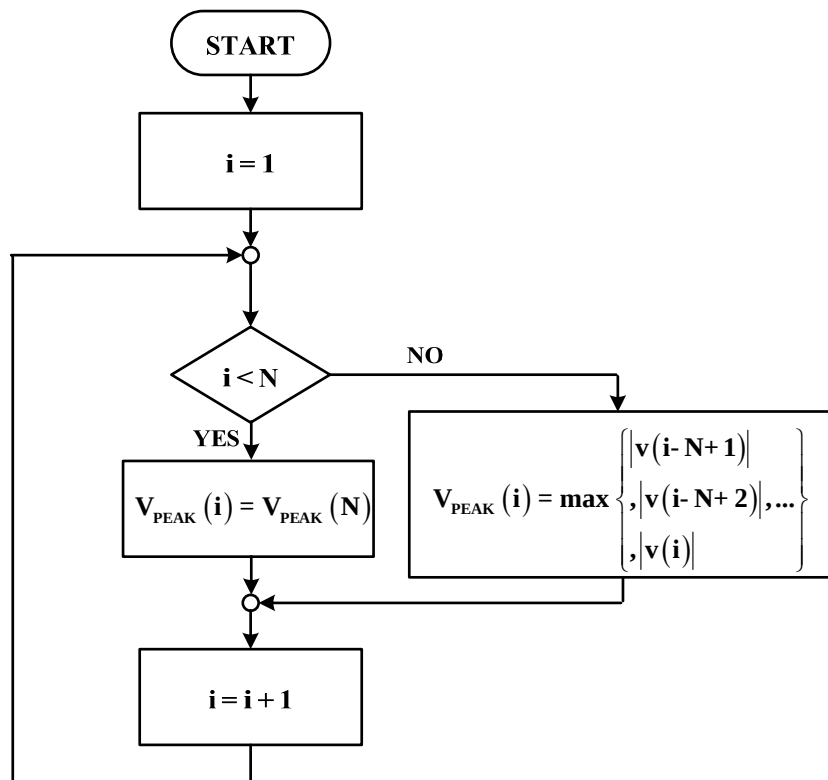
เมื่อ $v(t)$ คือสัญญาณของแรงดันเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา

ในทางปฏิบัติแล้ว สัญญาณแรงดันจะอยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) ดังนั้น สามารถเขียนสมการใหม่ได้ตามสมการที่ (2-19)

$$V_{\text{peak}}(i) = \begin{cases} \max \{ |v(i-N+1)|, |v(i-N+2)|, \dots, |v(i)| \} & i \geq N \\ V_{\text{peak}}(N) & 1 \leq i < N \end{cases} \quad (2-19)$$

- เมื่อ $V_{\text{peak}}(N)$ คือค่าสูงสุดของสัญญาณแรงดันภายในหนึ่งหน้าต่างรับข้อมูล
 $v(n)$ คือสัญญาณของแรงดันแซมปลิงลำดับที่ n
 N คือขนาดของคาต้าวินโดว์ โดยปกติแล้วกำหนดให้ N เป็นครึ่งลูกคลื่น

ข้อดีของวิธีการนี้คือ มีความเร็วในการคำนวณสูง เนื่องจากสมการไม่มีความซับซ้อน นอกจากนี้ยังใช้หน่วยความจำในการคำนวณน้อย เนื่องจากใช้เก็บค่าแรงดันเพียงหนึ่งคาบและแทนค่าแซมปลิงต่อแซมปลิง ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ ความแม่นยำในการหาขนาดของแรงดันไฟฟ้าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสและวิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน ขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่ายอดของแรงดัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 แสดงขั้นตอนการคำนวณขนาดแรงดันโดยวิธีหาค่ายอดของแรงดัน

บทที่ 3

สัญญาณและการวิเคราะห์สัญญาณ

การเฝ้าดูและติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในปัจจุบันนั้น รูปคลื่นแรงดันจะถูกทำให้อยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) เพื่อให้เกิดความรวดเร็วและง่ายต่อการคำนวณ แล้วนำมาวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล (Data Window) [8] ดังนั้นเพื่อเป็นการปูพื้นฐานในเรื่องการวิเคราะห์สัญญาณ ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องของสัญญาณทางไฟฟ้าและประเภทของสัญญาณทางไฟฟ้า ทฤษฎีของกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณเบื้องต้น และการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล

3.1 สัญญาณ (Signal) [13]

สัญญาณ คือปริมาณทางกายภาพใดๆ ที่แปรตามตัวแปรอิสระหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งตัวแปร เนื่องจากสัญญาณส่วนใหญ่เป็นสัญญาณเวลา ซึ่งสามารถแบ่งสัญญาณตามลักษณะจำเพาะของตัวแปร (อิสระ) เวลา และค่าของสัญญาณออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

3.1.1 สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) สัญญาณแอนะล็อก คือฟังก์ชันที่นิยามสำหรับทุกค่าของเวลา และมันสามารถมีค่า (ขนาด) ได้ทุกค่า ในช่วงที่ต่อเนื่อง (a, b) เมื่อ a อาจเป็น $-\infty$ และ b อาจเป็น ∞ ในทางคณิตศาสตร์จะแทนสัญญาณกลุ่มนี้ด้วยฟังก์ชันของตัวแปรที่ตัวแปรตัวอย่างเช่น การแปรของแรงดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ระหว่างการทำงาน

3.1.2 สัญญาณเวลาต่อเนื่อง (Continuous-Time Signal) คือฟังก์ชันที่นิยามสำหรับทุกค่าของเวลา แต่ขนาดของมันอาจมีพิสัยของค่าที่ต่อเนื่อง หรือมีค่าที่เป็นไปได้จำนวนจำกัด จะเห็นได้ว่าสัญญาณแอนะล็อกจะเป็นกรณีพิเศษของสัญญาณเวลาต่อเนื่อง

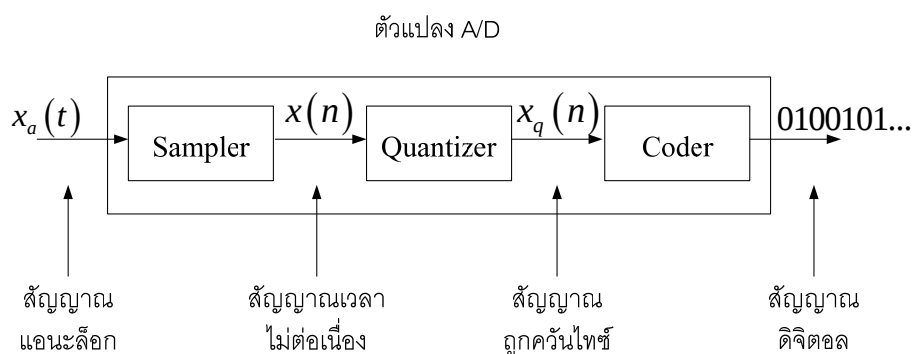
3.1.3 สัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time Signal) คือฟังก์ชันที่นิยามที่ค่าเวลาไม่ต่อเนื่อง จุดของเวลาอาจจะห่างๆ ไม่เท่ากัน ถ้าขนาดของสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องมีพิสัยของค่าที่ต่อเนื่อง จะเรียกมันว่าสัญญาณข้อมูลชัก (Sampled-Data Signal) สัญญาณแบบนี้จะได้มาจากการแซมปลิง (Sampling) สัญญาณแอนะล็อกที่ค่าเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง

3.1.4 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) คือฟังก์ชันที่ทั้งเวลาและขนาดนิยามเฉพาะค่าเพียงบางค่าที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการประมวลสัญญาณโดยใช้เทคนิคดิจิทัล สัญญาณที่เกี่ยวข้องต้องเป็นสัญญาณดิจิทัล ถ้าหากสัญญาณที่ต้องการประมวลผลเป็นสัญญาณแอนะล็อก จะต้องทำการ

แปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยเริ่มด้วยการแซมปลิงสัญญาณที่จุดของเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้กลายเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง จากนั้นทำการควันไทซ์(Quantizing) หรือการแบ่งนับ ค่าของมันจะถูกจำกัดอยู่เพียงไม่กี่ค่า ซึ่งโดยพื้นฐานของกระบวนการแปลงนี้ เป็นการประมาณ ซึ่งทำได้โดยการตัด (Truncate) หรือปัดเศษ (Rounding) ตัวอย่างเช่น ถ้าอนุญาตให้สัญญาณดิจิทัลมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มจาก 0 ถึง 15 จะต้องควันไทซ์สัญญาณ ที่มีขนาดต่อเนื่องให้มีค่าเลขจำนวนเต็มเหล่านี้ ดังนั้นค่าของสัญญาณ เช่น 8.65 โวลต์ จะถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับ 8 ถ้ากระบวนการควันไทซ์ทำโดยการตัด หรือให้มีค่าเท่ากับ 9 ถ้ากระบวนการควันไทซ์ ทำโดยการปัดเศษไปสู่ค่าเลขจำนวนเต็มที่ใกล้ที่สุด

3.2 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Conversion) [14]

สัญญาณที่พบทั่วไปส่วนใหญ่เป็นสัญญาณแบบแอนะล็อก ในการนำมาประยุกต์ใช้ประมวลสัญญาณจำเป็นต้องเปลี่ยนสัญญาณเหล่านี้ให้อยู่ในรูปดิจิทัลคือ แปลงมันให้อยู่ในรูปชี้แควนซ์ของตัวเลขที่มีความละเอียดที่จำกัด ขั้นตอนการดำเนินการนี้เรียกว่า การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Conversion) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวแปลง A/D (A/D Converter) ในทางปฏิบัติ การแปลง A/D จะประกอบด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอนคือ การแซมปลิง (Sampling) การควันไทซ์ (Quantization) การทำเป็นรหัส (Coding) ตามภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แสดงตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

3.2.1 การแซมปลิง (Sampling) เป็นการแปลงสัญญาณเวลาต่อเนื่องเป็นสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยแซมปลิง (Sample) ของสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องที่ช่วงเวลาที่เท่ากัน ถ้า $x_a(t)$ เป็นสัญญาณขาเข้าสู่ Sampler สัญญาณขาออกของมันจะเป็น $x_a(nT) \equiv x(n)$ เมื่อ T คือช่วงการแซมปลิง (Sampling Period)

3.2.2 การคว้นไทซ์ (Quantization) เป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องขนาดต่อเนื่อง ซึ่งจะเรียกว่า สัญญาณแซมปลิง (Sampled Signal) เป็นสัญญาณเวลาต่อเนื่องขนาดไม่ต่อเนื่อง (ดิจิตอล) ค่าของแต่ละตัวอย่างของสัญญาณจะถูกแทน โดยค่าที่เลือกจากเซตของค่าที่เป็นไปได้ที่จำกัด ความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่ยังไม่ถูกคว้นไทซ์ $x(n)$ กับสัญญาณขาออกที่ถูกคว้นไทซ์ แล้ว $x_q(n)$ จะเรียกว่าความผิดพลาดจากการคว้นไทซ์ (Quantization Error)

3.2.3 การทำเป็นรหัส (Coding) แต่ละค่าของ $x_q(n)$ จะถูกแทนโดยซีเควนซ์ของเลขฐานสอง จำนวน n บิต (Bit)

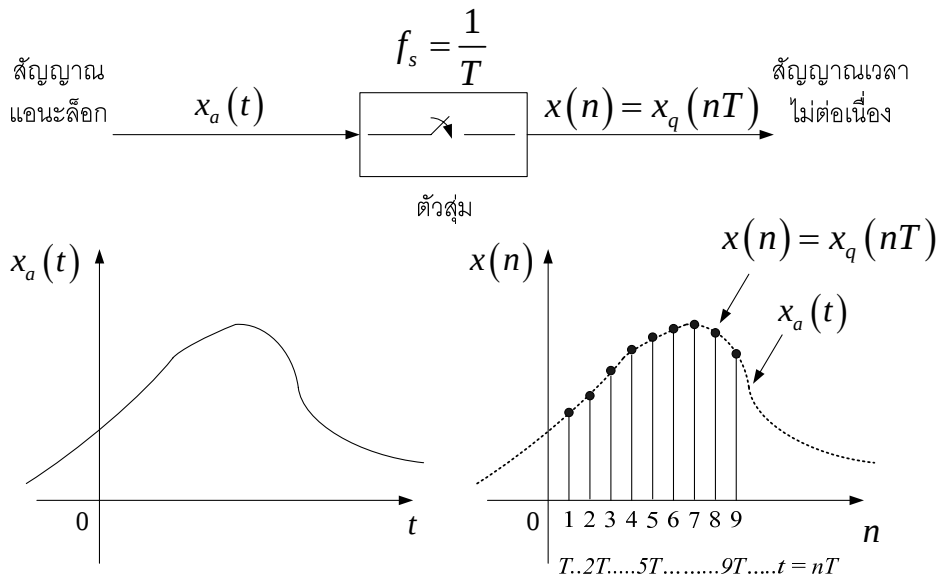
3.3 ทฤษฎีการแซมปลิง (Sampling Theorem)

ในการแซมปลิงจากสัญญาณแอนะล็อกจะมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะจำกัดการพิจารณาเพียง การแซมปลิงในลักษณะซ้ำคาบหรือสม่ำเสมอ (Periodic or Uniform) ซึ่งการแซมปลิงแบบนี้เป็นวิธี ที่ใช้กันมากที่สุดในทางปฏิบัติ ซึ่งการแซมปลิง สามารถอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์

$$x(n) = x_a(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (3-1)$$

เมื่อ	$x(n)$	คือสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องที่ได้จากการแซมปลิง
	$x_a(t)$	คือสัญญาณแอนะล็อกที่นำมาทำการแซมปลิง
	T	คือคาบของการแซมปลิง (Sampling Period or Sample Interval)

การแซมปลิงสัญญาณแอนะล็อกในลักษณะซ้ำคาบแสดงได้ดังภาพที่ 3-2 ส่วนกลับของ ช่วงเวลา T จะเรียกว่า ความถี่การแซมปลิง f_s (Sampling Frequency)



ภาพที่ 3-2 แสดงการแซมปลิงสัญญาณแอนะล็อกในลักษณะซ้ำคาบ

การแซมปลิงด้วยอัตราที่ต่ำเกินไป ทำให้รูปร่างของสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณผิดไป ในลักษณะนี้จะไม่สามารถนำสัญญาณเดิมกลับคืนมาได้ ซึ่งจะเรียกว่าเกิดการแปลความหมายผิด หรือการอะเลียซ (Aliasing) เพื่อป้องกันความผิดพลาดนี้ ความถี่ของการแซมปลิงสัญญาณ จะต้อง มีค่าความถี่อย่างน้อยสองเท่าความถี่สูงสุดที่บรรจุอยู่ในสัญญาณนั้น ตามสมการที่ (3-2)

$$\frac{\pi}{T} > 2\pi f_M \quad \text{หรือ} \quad f_s > 2f_M \quad (3-2)$$

เมื่อ f_M คือองค์ประกอบความถี่สูงสุดในสัญญาณที่นำมาทำการแซมปลิง

อัตราการแซมปลิงที่น้อยที่สุดก่อนที่จะเกิดการแปลความหมายผิด (Aliasing) ตามสมการที่ (3-3) จะเรียกว่าอัตราไนควิสต์ (Nyquist Rate)

$$f_N = 2f_M \quad (3-3)$$

เมื่อ f_N คือความถี่แซมปลิงในอัตราไนควิสต์

3.4 เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล (Sliding Data Window Technique)

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องวัดสัญญาณเมื่อผ่านกระบวนการแซมปลิงแล้ว จะอยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

$$v_n, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-4)$$

เมื่อ $n = 1$ หมายถึงจุดแรกของกระบวนการแซมปลิง (Sample Process)

การคำนวณขนาดของสัญญาณไม่ต่อเนื่องนั้น จำเป็นต้องใช้จำนวนจุดของแซมปลิงปริมาณหนึ่ง ซึ่งปริมาณดังกล่าวนั้นจะถูกเก็บให้อยู่ในหน้าต่างรับข้อมูล และการวิเคราะห์สัญญาณแบบเวลาจริง (Real Time) นี้ จะต้องใช้เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วขนาดของหน้าต่างรับข้อมูลจะมีขนาดเท่ากับหนึ่งหรือครึ่งลูกคลื่น [15] การเลือกขนาดของหน้าต่างรับข้อมูลมีความสำคัญมาก เนื่องจากขนาดหน้าต่างรับข้อมูลที่ไม่เหมาะสมจะทำให้อัลกอริทึมให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องน้อยลง [8]

บทที่ 4

การวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเลต

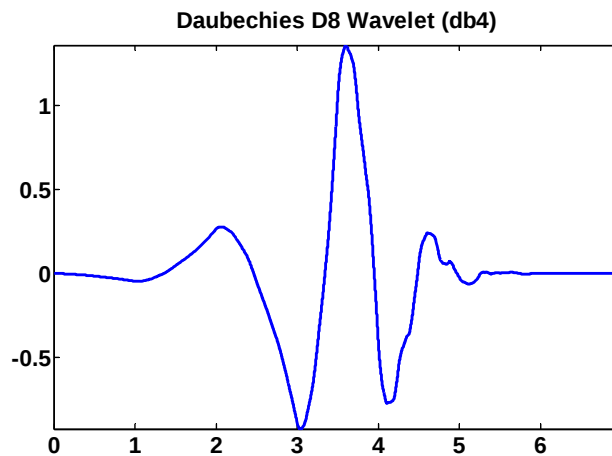
คุณลักษณะที่สำคัญของแรงดันตกชั่วขณะที่สำคัญได้แก่ ขนาด ช่วงระยะเวลาที่เกิดและมุมเฟส การหาจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและขนาดของแรงดันเป็นขั้นตอนแรกและเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งในการเฝ้าดูและติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้น รูปคลื่นแรงดันจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่องแล้วนำมาวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้เทคนิคการเลื่อนหน้าต่างรับข้อมูล อัลกอริทึม (Algorithm) ที่ใช้ในการคำนวณขนาดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดอยู่ 3 วิธี คือ วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส (The Root Mean Square Method) การแยกองค์ประกอบทางออร์โธกอนอล (Orthogonal Component) และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน (Peak Voltage) ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดของแรงดันโดยใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) มาประยุกต์ใช้ โดยในช่วงแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีการแปลงเวฟเลต ฟังก์ชันเวฟเลตแม่ ฟังก์ชันดาบปีชีส์เวฟเลต และวิธีการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้น และในส่วนสุดท้ายจะอธิบายขั้นตอนการคำนวณจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเลตสำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

4.1 การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) [16]

พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของเวฟเลตมีมาตั้งแต่ต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 แล้ว แต่ก็เพิ่งจะเป็นรูปร่างชัดเจนขึ้นในทศวรรษ 1980 ที่ผ่านมา โดยมีจุดเริ่มต้นจากงานของกรอสแมน (Grossman) กับมอเรล (Morlet) ใน ค.ศ. 1984 และมีการพัฒนาต่อไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเมเยอร์ (Meyer) ได้เสนอวิธีการสร้างเวฟเลตเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Wavelet) และดาบปีชีส์ (Daubechies) เสนอวิธีการสร้างเวฟเลตแบบกลุ่มของสัญญาณเฉพาะ (Compactly Supported Wavelet) ต่อมามอลเลท (Mallat) ได้เสนอทฤษฎี การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับ (Multiresolution Analysis) ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของการนำเวฟเลตมาใช้ในการกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ

ทฤษฎีการแปลงเวฟเลต จะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า เวฟเลต ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory)

และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 4-1 เป็นเวฟเลตชนิดหนึ่งที่เรียกกันว่าเวฟเลตแบบ Daubechies D8 หรือในโปรแกรม MATLAB เรียกว่า db4



ภาพที่ 4-1 แสดงรูปคลื่นเวฟเลตชนิดหนึ่ง

การนำเวฟเลตหลายๆ อันมารวมกันเป็นกลุ่มเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใดๆ โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลตต้นกำเนิดที่เรียกว่า เวฟเลตแม่ (Mother Wavelets)

การทำความเข้าใจกับการแปลงเวฟเลตนั้น สามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยการเริ่มจากอธิบายการแปลงฟูเรียร์ เนื่องจากการแปลงฟูเรียร์นั้นนับได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของการแปลงเวฟเลต โดยในทางคณิตศาสตร์ การแปลงฟูเรียร์ สามารถแสดงโดยสมการที่ (4-1)

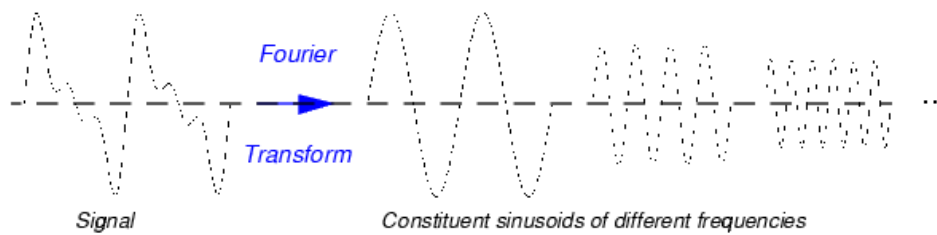
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4-1)$$

เมื่อ $F(\omega)$ คือสัมประสิทธิ์ของฟูเรียร์ (Fourier Coefficients)

$f(t)$ คือสัญญาณที่นำมาแปลงฟูเรียร์

$$e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j\sin(\omega t)$$

ผลของการแปลงฟูริเยร์ทรานฟอร์มคือ $F(\omega)$ หรือสัมประสิทธิ์ของฟูริเยร์ (Fourier Coefficients) ซึ่งเมื่อนำมาคูณกับสัญญาณ จะสามารถแยกเป็นองค์ประกอบของสัญญาณไซน์ (Sine) ซึ่งเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ของสัญญาณเดิม ดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 แสดงการแปลงฟูริเยร์

ในทำนองเดียวกัน การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (The Continuous Wavelet Transform : CWT) มีนิยามว่า ผลรวมสัญญาณของเวลาทั้งหมดที่ถูกคูณด้วยฟังก์ชันเวฟเล็ตที่มีค่าสเกลและเวลาแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการที่ (4-2)

$$W_{\psi} f(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi_{b,a}(t)} dt \quad (4-2)$$

เมื่อ

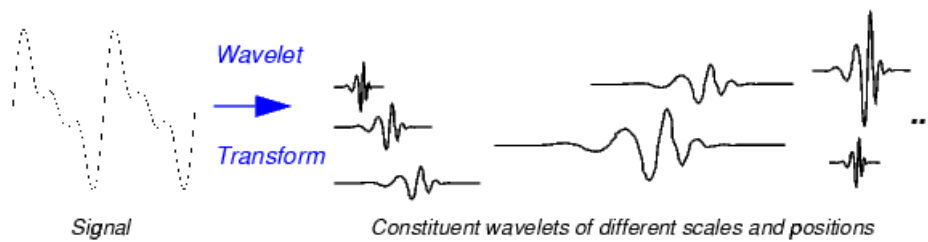
$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0$$

ψ คือฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelets) ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งและถูกสเกลโดยพารามิเตอร์ a และ b ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กันและเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่ จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วย $1/\sqrt{a}$ เสมอ

a คือการสเกล (Scale Factor)

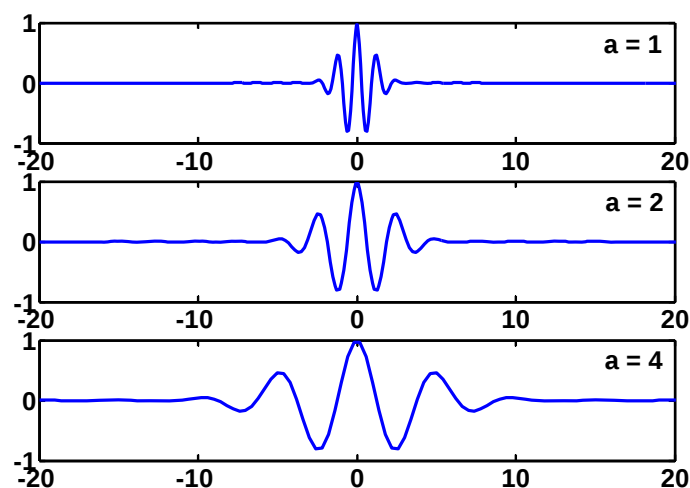
b คือการเลื่อนตำแหน่ง (Translation)

ผลของกระบวนการแปลงเวฟเล็ตคือ สัมประสิทธิ์เวฟเล็ต (Wavelet Coefficients) ซึ่งเมื่อนำมาคูณกับสัญญาณจะสามารถแยกเป็นองค์ประกอบของสัญญาณเวฟเล็ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ของสัญญาณเดิม ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 แสดงการแปลงเวฟเล็ต

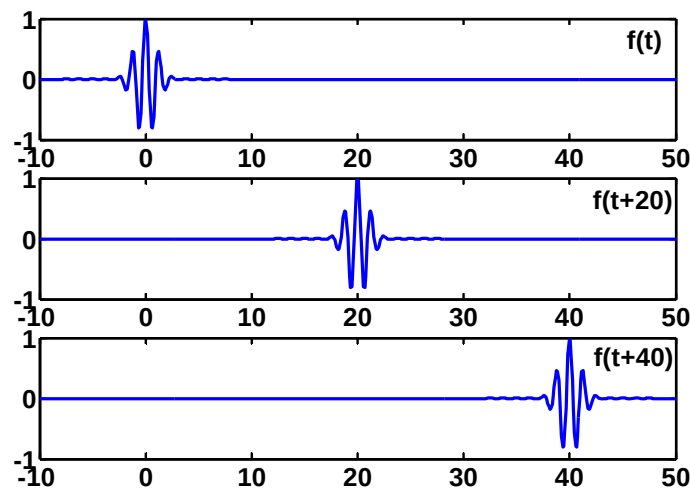
การวิเคราะห์แบบเวฟเล็ต เป็นการพิจารณาสัญญาณในรูปของสเกลและเวลา การสเกลในเวฟเล็ต หมายถึงการบีบอัดหรือการยืดขยายของสัญญาณ ซึ่งขนาดของการบีบอัดหรือขยายสัญญาณถูกกำหนดโดยค่าแฟกเตอร์ของการสเกล (Scale Factor) หรือใช้สัญลักษณ์ a โดยค่า a ยิ่งมีค่าน้อยเท่าไร สัญญาณเวฟเล็ตก็จะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น ถ้าสมมติให้สัญญาณไซน์เป็นสัญญาณเวฟเล็ตสามารถแสดงถึงผลกระทบของค่าแฟกเตอร์ของการสเกล ได้ดังภาพ



ภาพที่ 4-4 แสดงผลกระทบของสัญญาณเวฟเล็ต เมื่อค่าการสเกลเปลี่ยน

จากภาพที่ 4-4 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาถึงสัญญาณ $\sin(\omega t)$ ค่าแฟกเตอร์ของการสเกลจะมี ความสัมพันธ์แบบผกผัน (Inversely) กับค่าความถี่ ω

การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) หมายถึง การดีเลย์ (Delaying) หรือการเร่งขึ้น (Hastening) ของสัญญาณในทางเวลา ในทางคณิตศาสตร์ การดีเลย์เป็นเวลา k ของฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถแทนด้วยฟังก์ชัน $f(t - k)$ แสดงดังภาพที่ 4-5



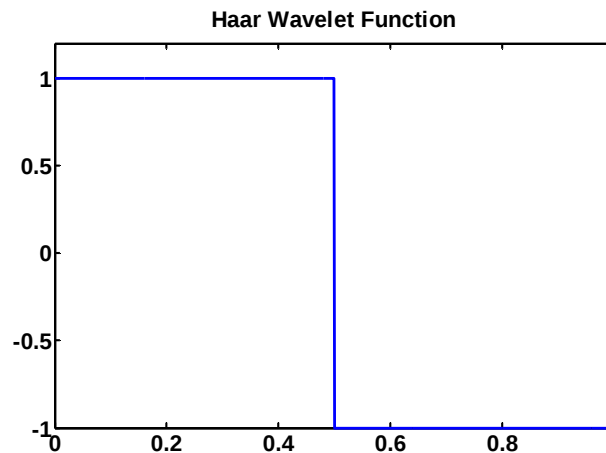
ภาพที่ 4-5 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณเวฟเล็ดแม่

อาจกล่าวได้ว่า ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ด จัดเป็นเทคนิคสำหรับวิเคราะห์สัญญาณไม่นิ่ง (Nonstationary Signal) แบบหนึ่ง ทำนองเดียวกับทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ สัญญาณนิ่ง (Stationary Signal) ซึ่งสัญญาณไม่นิ่งหมายถึง สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ (Aperiodic Waveform) และไม่ได้อยู่ในรูปสัญญาณไซน์ (Nonsinusoidal Waveform)

นอกจากการนำทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ด มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณแล้ว การประยุกต์ใช้งานของเวฟเล็ดในปัจจุบันยังเป็นไปอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ใช้งานวิเคราะห์ในเรื่องของดวงดาว (Astronomy) วิศวกรรมนิวเคลียร์ (Nuclear Engineering) การแยกความแตกต่างของเสียงในวิชาทางดนตรี (Speech Discrimination) การนำไปใช้ในการทำนายการเกิดแผ่นดินไหว (Earthquake Prediction) เรดาร์ (Radar) การมองเห็นของมนุษย์ (Human Vision) การนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาวงคณิตศาสตร์ เป็นต้น

4.2 ฟังก์ชันเวฟเลตแม่ (Mother Wavelet Function)

ฟังก์ชันเวฟเลตแม่ เริ่มมีขึ้นครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1910 ในงานวิจัยของอัลเฟรด ฮาร์ (Alfred Haar) โดยฟังก์ชันฮาร์เวฟเลตมีรูปร่างคล้ายกับฟังก์ชันยูนิตสเตป (Unit Step Function) ดังภาพที่ 4-6



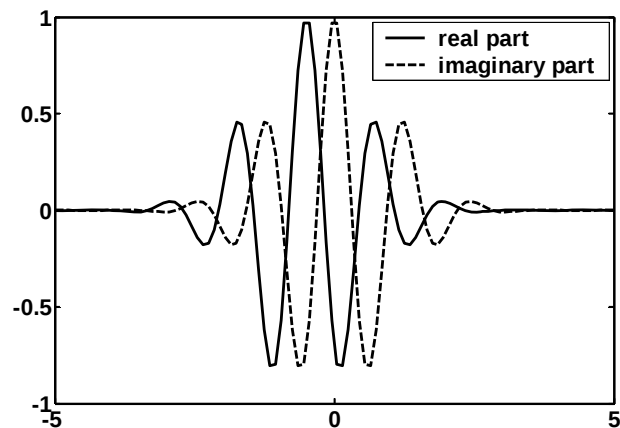
ภาพที่ 4-6 แสดงฟังก์ชันเวฟเลตแม่ของฮาร์เวฟเลต

โดยฟังก์ชันเวฟเลตฮาร์มีนิยามดังนี้

$$\psi_H(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq t < \frac{1}{2}; \\ -1, & \text{if } \frac{1}{2} \leq t < 1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4-3)$$

เมื่อ $\psi_H(t)$ คือฟังก์ชันเวฟเลตแม่ของฮาร์เวฟเลต (Harr Wavelet)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1946 เกเบอร์ (D. Gabor) ได้สร้างฟังก์ชันเวฟเลตขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณด้านการสื่อสาร เรียกว่า เกาส์เซียนฟังก์ชัน (Gaussian Function) แสดงได้ดังภาพที่ 4-7



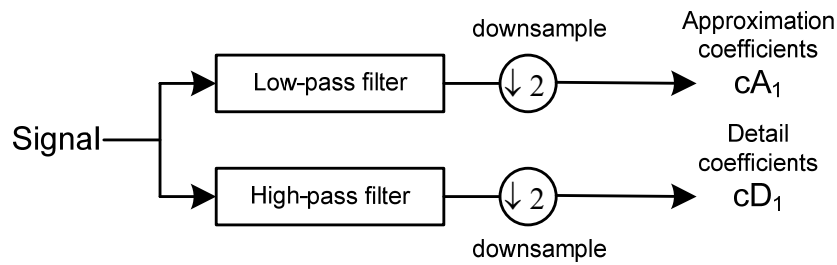
ภาพที่ 4-7 แสดงฟังก์ชันแม่ของเกาส์เซียนเวฟเล็ต

โดยฟังก์ชันเกาส์เซียนเวฟเล็ตมีนิยามดังนี้

$$\psi_G(t) = \frac{1}{2\pi\alpha} e^{\frac{-t^2}{4\alpha}} \quad (4-4)$$

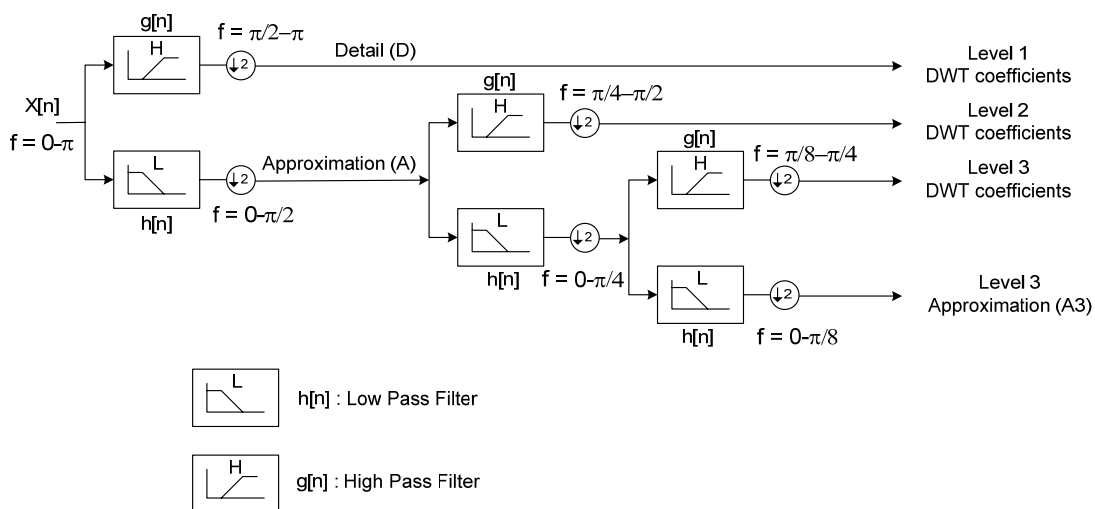
เมื่อ $\psi_H(t)$ คือฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ของเกาส์เซียนเวฟเล็ต
 α คือการสเกลของฟังก์ชันแม่ของเกาส์เซียนเวฟเล็ต

ปี ค.ศ. 1976 คลอยส์เลอร์ (Croisier) เอสเตบัน (Esteban) และการ์แลน (Galand) ได้นำเสนอทฤษฎีการแยกองค์ประกอบ (Decomposition) และการรวมกลับ (Reconstruction) ของสัญญาณ โดยใช้ฟิลเตอร์แบบ FIR (FIR Filter) แสดงได้ดังภาพที่ 4-8 ผลที่ได้จากการแยกองค์ประกอบของสัญญาณโดยใช้ FIR Filter คือส่วนของการประมาณ (Approximation) และส่วนของรายละเอียด (Detail) ซึ่งส่วนของการประมาณเป็นส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณ และส่วนของรายละเอียดเป็นส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณ โดยทำการดาวน์แซมปลิง (Down Sampling) เพื่อลดความถี่แซมปลิงของส่วนประกอบ Approximation และ Detail ให้มีความถี่แซมปลิงเท่ากับสัญญาณเดิม



ภาพที่ 4-8 แสดงการใช้ฟิลเตอร์แบบ FIR เพื่อการแยกองค์ประกอบสัญญาณ

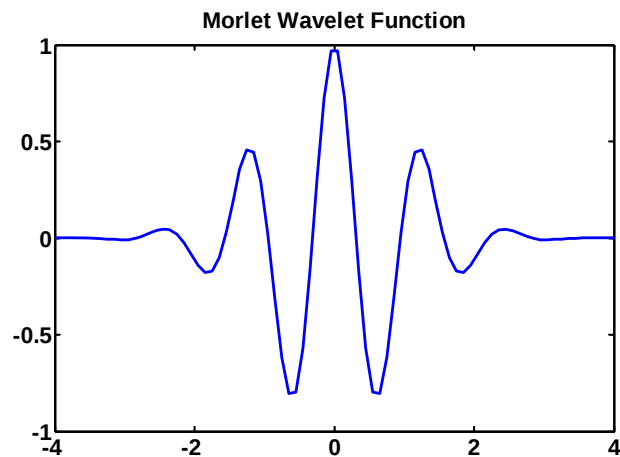
ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1987 – 1993 สตีฟเฟ่น มอลเลท (Stephane Mallat) และยีฟ เมเยอร์ (Yves Meyer) ได้สร้างทฤษฎีเรียกว่า การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับ (Multiresolution Analysis) ซึ่งต่อมาได้นำไปประยุกต์ใช้กับการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต (Discrete Wavelet Transform) ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 แสดงการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับ

ในการวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปนั้น สัญญาณที่สนใจส่วนมากเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่แตกต่างจากส่วนประกอบพื้นฐาน การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับจะทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงออก ที่เรียกว่า รายละเอียด (Detail) หรือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต (DWT Coefficients) ซึ่งในระดับแรกสามารถเรียกย่อๆ ว่า DWT_1 (Level 1 DWT Coefficients)

ปี ค.ศ. 1982 ยีน มอเรต (Jean Morlet) ได้คิดค้นฟังก์ชันมอเรต (Morlet Function) ขึ้น โดยฟังก์ชันมอเรตเวฟเลตนี้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับฟังก์ชันเกาส์เซียนเวฟเลต ดังภาพที่ 4-10



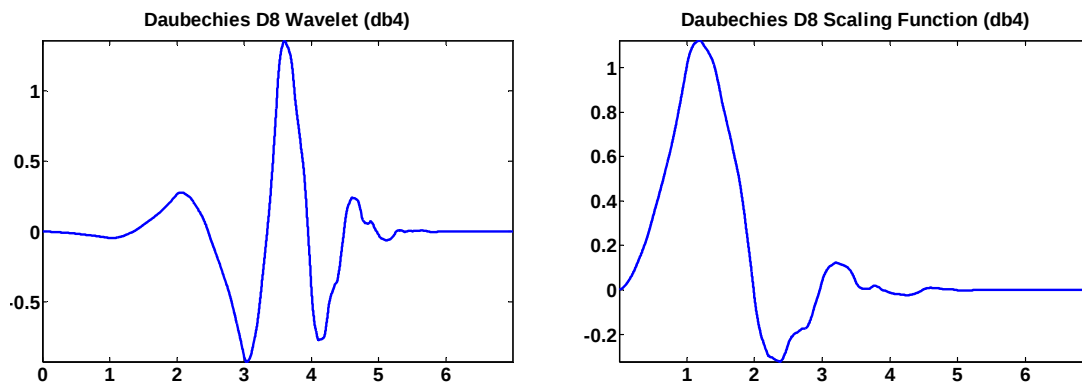
ภาพที่ 4-10 แสดงฟังก์ชันมอเรตเวฟเลต

โดยฟังก์ชันมอเรตเวฟเลตมีนิยามดังนี้

$$\psi_M(t) = \sqrt{2} e^{\frac{-t^2}{\alpha^2}} (e^{j\pi t} - e^{\frac{-\pi^2 \alpha^2}{4}}) \quad (4-5)$$

เมื่อ $\psi_M(t)$ คือฟังก์ชันเวฟเลตแม่ของมอเรตเวฟเลต
 α คือการสเกลของฟังก์ชันแม่ของมอเรตเวฟเลต

ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 อินกริด ดาเบชีส์ (Ingrid Daubechies) ได้พัฒนาฟังก์ชันเวฟเลตซึ่งมีคุณสมบัติแบบกลุ่มของสัญญาณเฉพาะ (Compactly Supported Wavelet) และคุณสมบัติออร์โธกอนอล (Orthogonal) ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันเวฟเลตดาเบชีส์ (Daubechies Wavelet) ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 แสดงฟังก์ชันเวฟเลตดาบปีชีส์

ฟังก์ชันเวฟเลตดาบปีชีส์ ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สัญญาณของระบบไฟฟ้า ในลักษณะทรานเซียน (Transient) ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) และฟอลต์ (Fault) เนื่องจากฟังก์ชันเวฟเลตดาบปีชีส์มีคุณลักษณะของการไม่สมมาตร (Unsymmetry) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณสิ่งรบกวน (Disturbance) มากกว่าฟังก์ชันเวฟเลตชนิดอื่น

4.3 ฟังก์ชันดาบปีชีส์เวฟเลต (Daubechies Wavelets Function) [17]

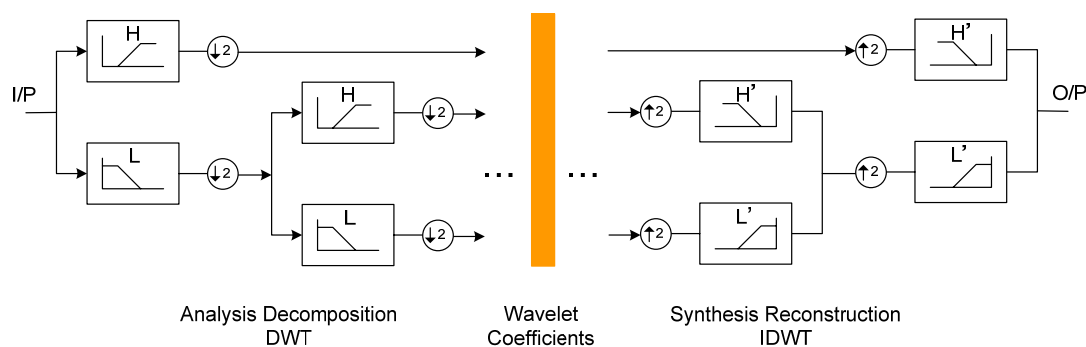
กลุ่มของตระกูล (Family) ฟังก์ชันดาบปีชีส์เวฟเลต มีจำนวนเป็นอนันต์ (Infinite) ทั้งนี้ชื่อเรียกของดาบปีชีส์เวฟเลตแต่ละตัวนั้นจะมีการเรียกตามจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของดาบปีชีส์ (Daubechies Filter Coefficients) ซึ่งจำนวนสัมประสิทธิ์จะมีเป็นจำนวนเต็มเลขคู่ ยกตัวอย่างเช่น Daubechies D2 Wavelet หมายถึงดาบปีชีส์เวฟเลตที่มีจำนวนสัมประสิทธิ์ตัวกรอง 2 ค่า เป็นต้น ในโปรแกรม MATLAB นั้นจะทำการเรียกชื่อดาบปีชีส์เวฟเลต ตามจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของดาบปีชีส์ จากนั้นย่อไปหามาก ตามตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงตัวอย่างการเรียกชื่อของดาบปีชีส์เวฟเลตในโปรแกรม MATLAB

Daubechies Wavelet	Matlab Wavelet Toolbox
D2	db1
D4	db2
D6	db3
D8	db4
D10	db5
D12	db6

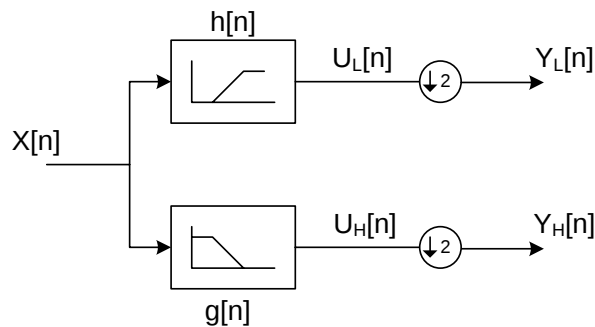
4.4 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเลตแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT) และการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) ข้อเสียของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (CWT) คือมีการคำนวณด้วยข้อมูลจำนวนมาก ส่งผลให้ต้องเสียเวลาในการคำนวณมาก [18] ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการวิเคราะห์สัญญาณต้องการข้อมูลเพียงบางส่วนของสัญญาณเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์สัญญาณในระบบไฟฟ้าต้องการข้อมูลสัญญาณของสิ่งรบกวน(Disturbance) หรือสัญญาณรบกวน (Noise) มากกว่าสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Signal) ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) โดยการแยกองค์ประกอบ (Decomposition) สัญญาณออกเป็นสองส่วนโดยใช้ฟิลเตอร์แบบ FIR ชนิดสองช่องทาง (Two-Channel Filter Bank) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ โดยอัลกอริทึมนี้ นอกจากจะทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกได้แล้วยังสามารถรวมกลับสัญญาณ (Reconstruction) ให้เท่ากับสัญญาณเดิมได้อีกด้วย โดยวิธีการนี้เรียกว่า การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบดิสครีต [19] ดังภาพที่ 4-12



ภาพที่ 4-12 แสดงการแยกองค์ประกอบและรวมกลับโดยวิธีแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการนำสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์ มาผ่านการกรองโดยใช้แท่งตัวกรองเวฟเลตเพื่อแยกองค์ประกอบ (Decomposition) ของสัญญาณ โดยสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนความถี่สูงและส่วนความถี่ต่ำ ในระดับที่ 1 ตามภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 แสดงการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ $X[n]$ โดยการแปลงเวฟเลตระดับที่หนึ่ง

จากภาพที่ 4-13 สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-6) และสมการที่ (4-7)

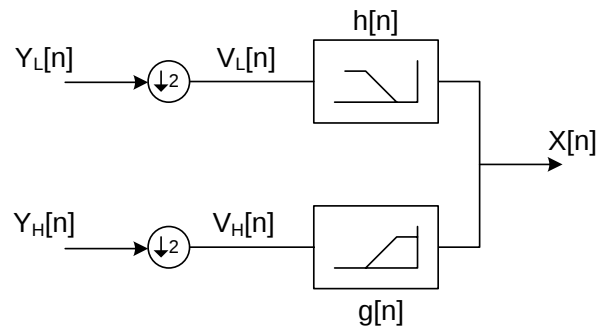
$$\begin{aligned} U_L[n] &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] h[n-k] \\ U_H[n] &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] g[n-k] \end{aligned} \quad (4-6)$$

เมื่อ $X[k]$ คือสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์
 $U_L[n]$ คือสัญญาณในส่วนที่ผ่านแท่งกรอง $h[n]$
 $U_H[n]$ คือสัญญาณในส่วนที่ผ่านแท่งกรอง $g[n]$

$$\begin{aligned} Y_L[n] &= U_L[2n] = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] h[2n-k] \\ Y_H[n] &= U_H[2n] = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] g[2n-k] \end{aligned} \quad (4-7)$$

เมื่อ $Y_L[n]$ คือส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณ $X[n]$ ที่ถูกแยกองค์ประกอบด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต ระดับที่ 1
 $Y_H[n]$ คือส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณ $X[n]$ ที่ถูกแยกองค์ประกอบด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต ระดับที่ 1
 H คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของดาบีชีส์แบบ FIR
 $g[n] = (-1)^n h[N-1-n]$
 N คือจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองของดาบีชีส์ (Coefficients Number)
 $N = 2, 4, 6, 8, \dots$

สัญญาณที่ถูกแยกองค์ประกอบด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถทำการรวมกลับ (Recomposition) ได้ตามภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 แสดงการรวมองค์ประกอบของสัญญาณ $X[n]$ โดยการแปลงเวฟเล็ดระดับที่หนึ่ง

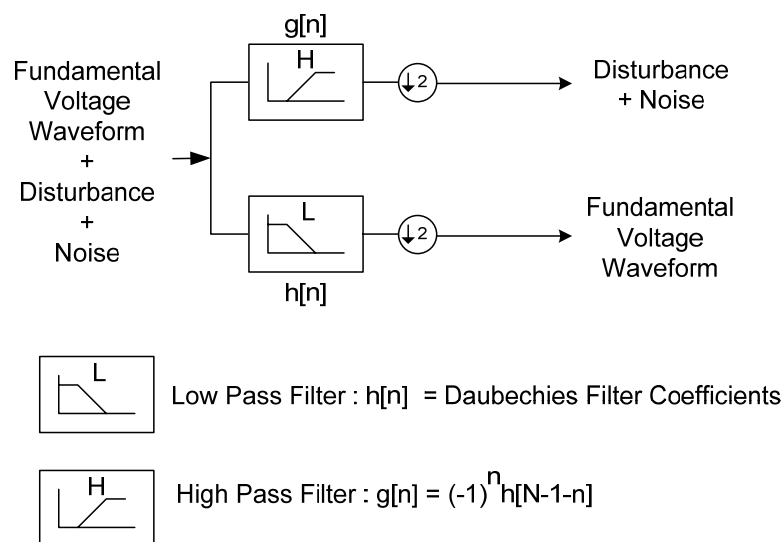
จากภาพที่ 4-14 สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-8) และสมการที่ (4-9)

$$\begin{aligned} V_L[n] &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] h[n-k] \\ V_H[n] &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] g[n-k] \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} Y_L[n] &= V_L[2n] = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] h[2n-k] \\ Y_H[n] &= V_H[2n] = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] g[2n-k] \end{aligned} \quad (4-9)$$

4.5 การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเลต [20]

จากทฤษฎีการแปลงเวฟเลตที่กล่าวมา ทฤษฎีการแปลงเวฟเลต จัดเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมสำหรับสัญญาณไม่นิ่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สัญญาณแรงดันที่มีปัญหาคุณภาพไฟฟ้า หรือสัญญาณในทางไฟฟ้าที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสิ่งรบกวนสูงๆ (Disturbance) เป็นต้น มากกว่าทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์หรือการแยกออกโรคอนอล ซึ่งเป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณนิ่งหรือสัญญาณแรงดันที่ไม่มีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม เนื่องจากการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถแยกสัญญาณรบกวนหรือสิ่งรบกวนออกจากสัญญาณพื้นฐานได้ และเลือกสัญญาณพื้นฐานที่มีความเหมาะสมมาทำการคำนวณได้ ดังภาพที่ 4-15



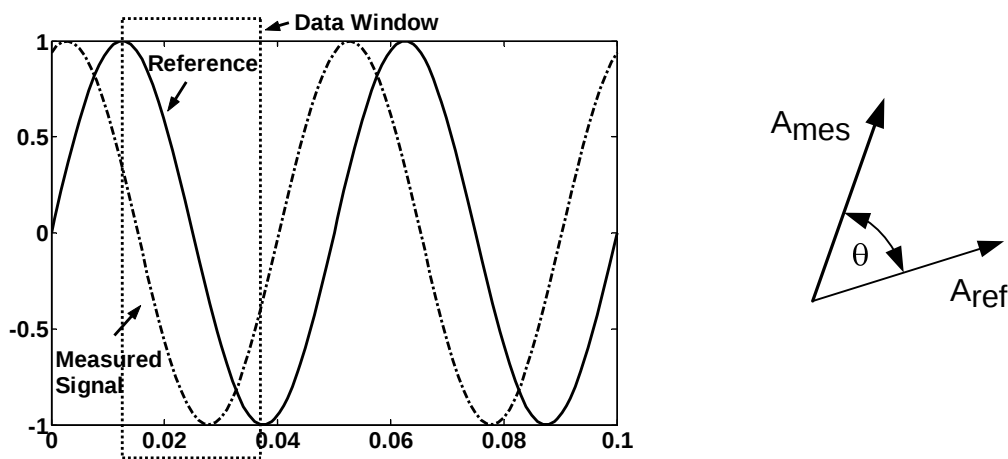
ภาพที่ 4-15 การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องสามารถแยกสัญญาณพื้นฐานจากสัญญาณรบกวน

จากภาพที่ 4-15 จะเห็นได้ว่า สัญญาณที่ทำการวัดประกอบไปด้วย สัญญาณแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน รวมกับสัญญาณรบกวน (Noise) และสิ่งรบกวน (Disturbance) ซึ่งได้แก่ ฮาร์มอนิกส์ อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ เป็นต้น เมื่อนำสัญญาณที่ทำการวัดผ่านการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องแล้ว ผลที่ได้จะทำให้สัญญาณพื้นฐานถูกแยกออกจากสัญญาณรบกวนและสิ่งรบกวน ทำให้สามารถนำผลที่ได้ไปคำนวณหาขนาดได้อย่างแม่นยำขึ้น ซึ่งในการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อคำนวณขนาดของแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะใช้เวฟเลตแบบดาบีชีส์ชนิด Daubechies D8 Wavelet (db4) ซึ่งมีความเหมาะสมและใช้กันอย่างแพร่หลายกับการวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า [21,22,23] วิธีการคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเลต มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.5.1 รับข้อมูลมาหนึ่งหน้าต่างรับข้อมูล ซึ่งอาจจะมีค่าเท่ากับหนึ่งลูกคลื่นหรือครึ่งลูกคลื่นก็ได้ จากนั้นทำการสร้างสัญญาณอ้างอิง (Reference) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่พื้นฐานของระบบและความถี่แซมปลิง (Sampling Frequency) เท่ากับสัญญาณที่วัดได้ (Measured Signal) ตามสมการที่ (4-10)

$$R(t) = \sin(2 \times \pi \times f \times t) \quad \text{p.u.} \quad (4-10)$$

จะได้ดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ทำการวัด

4.5.2 นำสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.5.1 ทั้งสองสัญญาณได้แก่ สัญญาณที่ทำการวัดและสัญญาณที่สร้างขึ้นมาจากสมการที่ (4-10) มาทำการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง ระดับที่ 2 (DWT Level 2) ซึ่งผลที่ได้จากการแปลงเวฟเลตคือ ส่วนรายละเอียด (Detail) และส่วนการประมาณ (Approximation) จากนั้นกำหนดให้ A_{ref} เป็นส่วนการประมาณของสัญญาณอ้างอิงและ A_{mes} เป็นส่วนการประมาณของสัญญาณที่ต้องการวัด

4.5.3 หามุมเฟสระหว่าง A_{ref} และ A_{mes} ตามสมการที่ (4-11)

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\langle A_{ref}, A_{mes} \rangle}{\|A_{ref}\| \|A_{mes}\|} \right) \quad (4-11)$$

เมื่อ θ	คือมุมเฟสระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ทำการวัด
$ A_{ref} $	คือขนาดของสัญญาณอ้างอิง
$ A_{mes} $	คือขนาดของสัญญาณที่ทำการวัด
$\langle A_{ref}, A_{mes} \rangle$	คือ Inner Product ระหว่าง A_{ref} กับ A_{mes}

4.5.4 สร้างสัญญาณเปรียบเทียบกับ $F_1(t)$ ตามสมการที่ (4-12)

$$F_1(t) = \sin(2 \times \pi \times f \times t + \theta / 180^\circ \times \pi) \quad \text{p.u.} \quad (4-12)$$

เมื่อ θ คือมุมที่ได้จากสมการที่ (4-11)

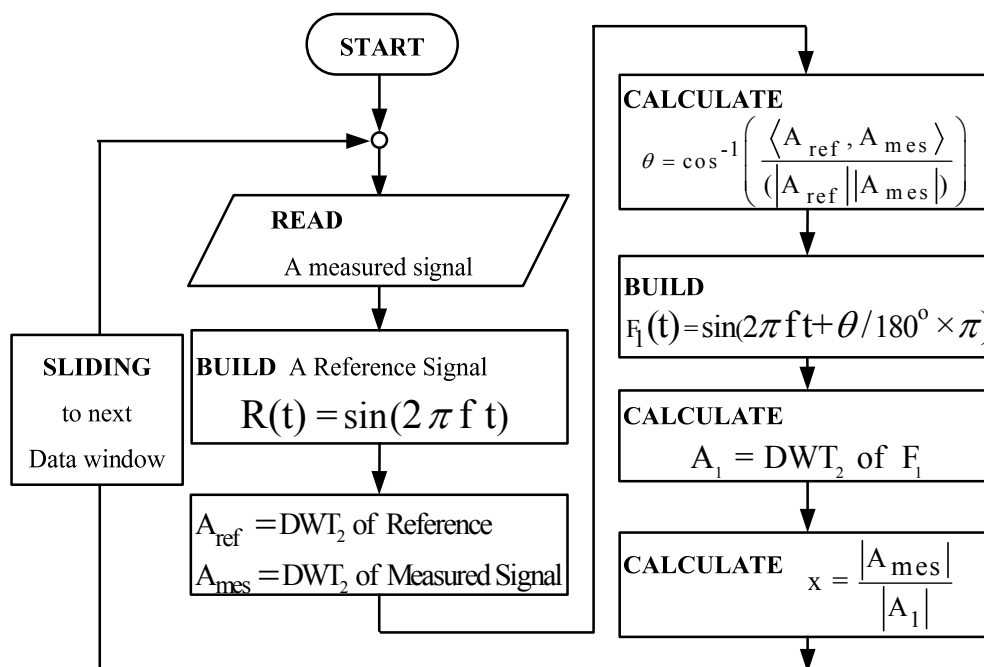
4.5.5 นำ $F_1(t)$ มาแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง ระดับที่ 2 (DWT Level 2) โดยผลที่ได้กำหนดให้เป็น A_1 คือค่าการประมาณระดับที่ 2 (Approximation Level 2) จากนั้นนำมาคำนวณหาขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดจากสมการ

$$|A_1| : 1 \text{ p.u.} = |A_{mes}| : x, \quad x = \frac{|A_{mes}|}{|A_1|} \quad (4-13)$$

เมื่อ x คือ ขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัด

4.5.6 ทำการเลื่อนค่าวินโดวส์ จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 4.5.1 ซ้ำ

วิธีการคำนวณขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเลต สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-17 ขั้นตอนการคำนวณขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเลต

4.6 การหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเลต

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลของการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของค่าความถี่ต่ำของสัญญาณ และส่วนของค่าความถี่สูงของสัญญาณ โดยเรียกว่าค่าการประมาณ (Approximation) และค่ารายละเอียด (Detail) ตามลำดับ ซึ่งค่าการประมาณสามารถนำมาทำการหาขนาดของแรงดันได้ตามขั้นตอนที่แล้ว ในส่วนนี้ค่ารายละเอียดจะถูกนำมาหาจุดเริ่มต้น (Sag Starting Point) และจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะได้ตามภาพที่ 4-18 [24]

ขั้นตอนการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแปลงเวฟเลตพอจะสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

4.6.1 เริ่มต้นจากคำนวณค่าขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเลต เพื่อหาตำแหน่งที่ขนาดของแรงดันมีค่าต่ำกว่า 0.9 เปอรฺยูนิต

4.6.2 คำนวณผลลัพธ์ของการแปลงเวฟเลต รายละเอียดระดับที่ 1

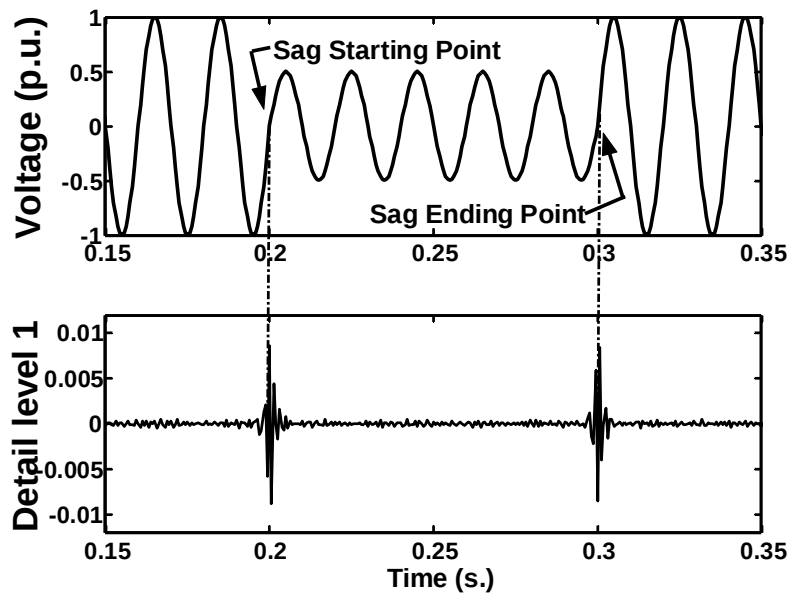
4.6.3 จากตำแหน่งของสัญญาณที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่า 0.9 เปอรฺยูนิต ซึ่งหาได้ในขั้นตอนที่

4.6.1 จุดแรงดันตกจะอยู่ในช่วงหน้าต่างรับข้อมูล ให้ทำการหาค่าสูงสุดของ DWT level 1 ในหน้าต่างรับข้อมูลนั้น ซึ่งตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดของ DWT level 1 จะเป็น จุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะ

4.6.4 คำนวณค่าขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ด เพื่อหาดำแหน่งที่ขนาดของแรงดันมีค่าสูงกว่า 0.9 เปอรฺยูนิต

4.6.5 คำนวณผลลัพธ์ของการแปลงเวฟเล็ด รายละเอียดระดับที่ 1

4.6.6 จากตำแหน่งของสัญญาณที่มีขนาดแรงดันสูงกว่า 0.9 เปอรฺยูนิต ซึ่งหาได้ในขั้นตอนที่ 4.6.4 จุดแรงดันตกจะอยู่ในช่วงหน้าต่างรับข้อมูล ให้ทำการหาค่าสูงสุดของ DWT level 1 ในหน้าต่างรับข้อมูลนั้น ซึ่งตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดของ DWT level 1 จะเป็น จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ



ภาพที่ 4-18 แสดงการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ด

บทที่ 5

การทดสอบและการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงาน

ในบทนี้ วิธีการคำนวณขนาดแรงดัน การหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดที่นำเสนอในบทที่แล้วจะถูกนำมาทำการจำลองการทำงานลงในโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองการทำงานคือ ขนาดของแรงดัน จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาที่เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ ได้แก่ วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบออโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน โดยใช้สัญญาณทดสอบที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC สัญญาณทดสอบของกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE (IEEE 1159.2 Working Group) [24] และสัญญาณจริงในระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณฟอลต์ (Fault Recorder) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [7]

5.1 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันทดสอบขนาด 1 เปอรฺยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม

PSCAD/EMTDC

ในการทดสอบนี้ได้ทำการสร้างสัญญาณแรงดันทดสอบเพื่อใช้ทดสอบอัลกอริธึม โดยทำการจำลองสถานีไฟฟ้าย่อย ขนาด 115/22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าและสายส่งดังตารางที่ 5-1 และ 5-2

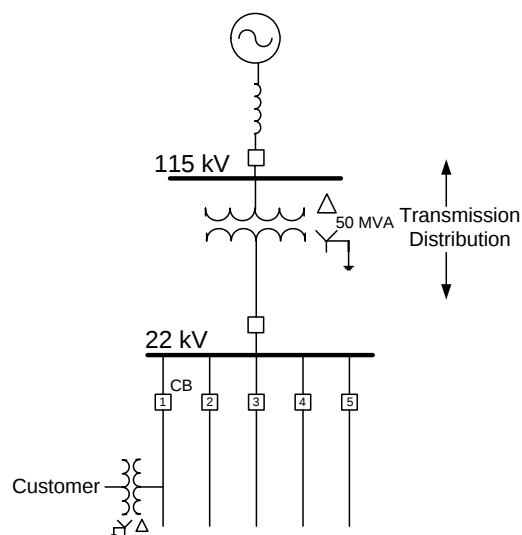
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Bus (kV)	R_1 (p.u.)	X_1 (p.u.)	R_0 (p.u.)	X_0 (p.u.)
	100 MVA base	100 MVA base	100 MVA base	100 MVA base
115	0.00355	0.02204	0.00705	0.05811
22	0.04132	0.31349	7.87847	0.30907

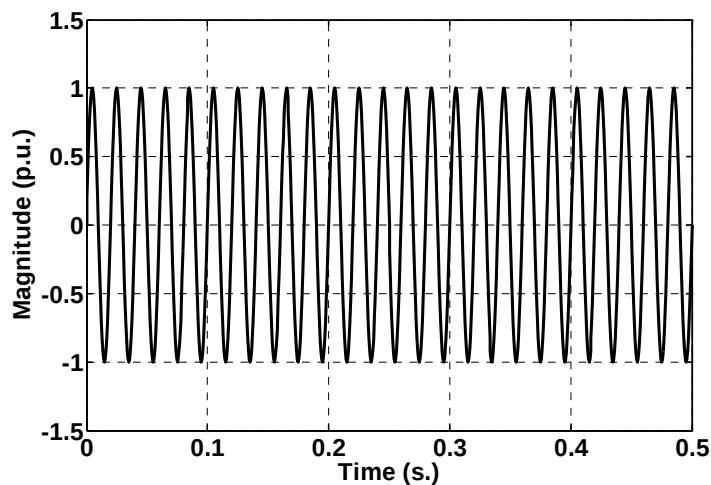
ตารางที่ 5-2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง สถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Cond. (mm ²)	Sequences	Resistance (Ohm/km)	Reactance (mH/km)	Capacitance (μF/km)
185	Positive	0.214	0.713	0.0169
	Zero	0.459	5.591	0.0057

โดยสัญญาณแรงดันทดสอบขนาด 1 เปรอ์ยูนิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากการจำลองสถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบังของการไฟฟ้าส่วนภูมิกาดังในภาพที่ 5-1 และทำการวัดสัญญาณที่ด้านแรงต่ำเฟส A ของสถานีไฟฟ้า



ภาพที่ 5-1 วงจรสถานีไฟฟ้าย่อยแหลมฉบัง ขนาด 115/22 กิโลโวลต์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



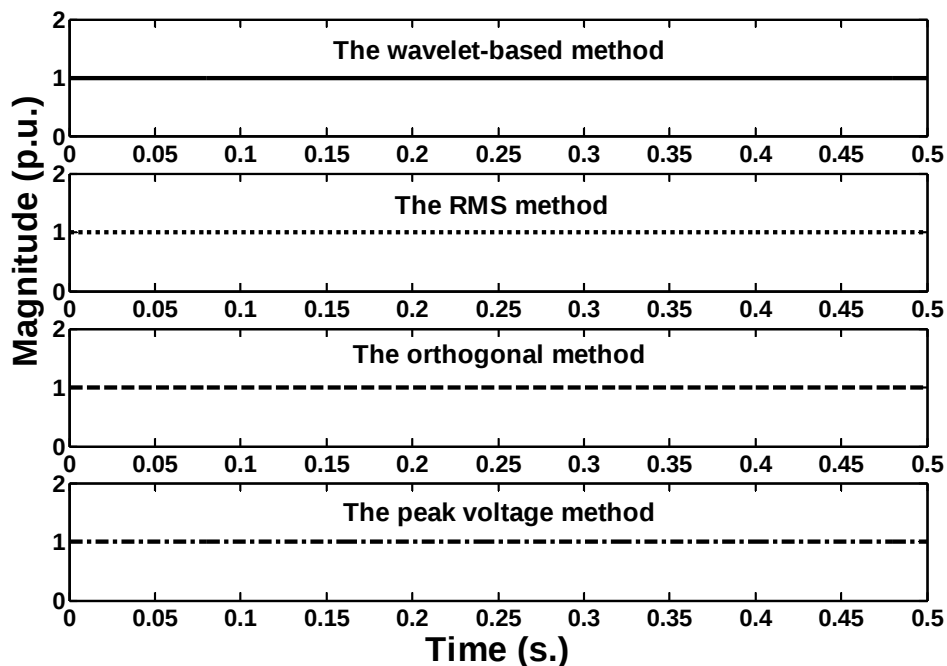
ภาพที่ 5-2 รูปคลื่นสัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

ภาพที่ 5-2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz.) ความยาวของสัญญาณ 0.5 วินาที ความถี่แซมปลิง 1,600 เฮิร์ตซ์ จำนวน 32 แซมปลิงต่อหนึ่งลูกคลื่น ขนาดของสัญญาณอยู่ในหน่วยเพอร์ยูนิต (p.u.) ขนาดของสัญญาณทดสอบมีค่าเท่ากับ 1 เพอร์ยูนิต

โดยทั่วไปแล้ว ความถี่แซมปลิงของ Fault Recorder มีค่าเท่ากับ 6,400 เฮิร์ตซ์ แต่เมื่อทำการแบ่ง Channel ของการวัดสัญญาณแล้วความถี่แซมปลิงจะมีค่าเท่ากับ 3,200 เฮิร์ตซ์หรือ 1,600 เฮิร์ตซ์ ต่อ Channel ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความถี่แซมปลิงของสัญญาณทดสอบเท่ากับ 1,600 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากค่าความถี่แซมปลิงที่ 1,600 เฮิร์ตซ์เพียงพอสำหรับการคำนวณสัญญาณ ที่มีความถี่มูลฐาน 50 เฮิร์ตซ์และทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณรวดเร็วมากขึ้น

5.1.1 การทดสอบที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ในส่วนนี้จะทำการทดสอบอัลกอริทึมทั้ง 4 วิธี ได้แก่ วิธีการแปลงเวฟเล็ด วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น โดยใช้สัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิตตามภาพที่ 5-2

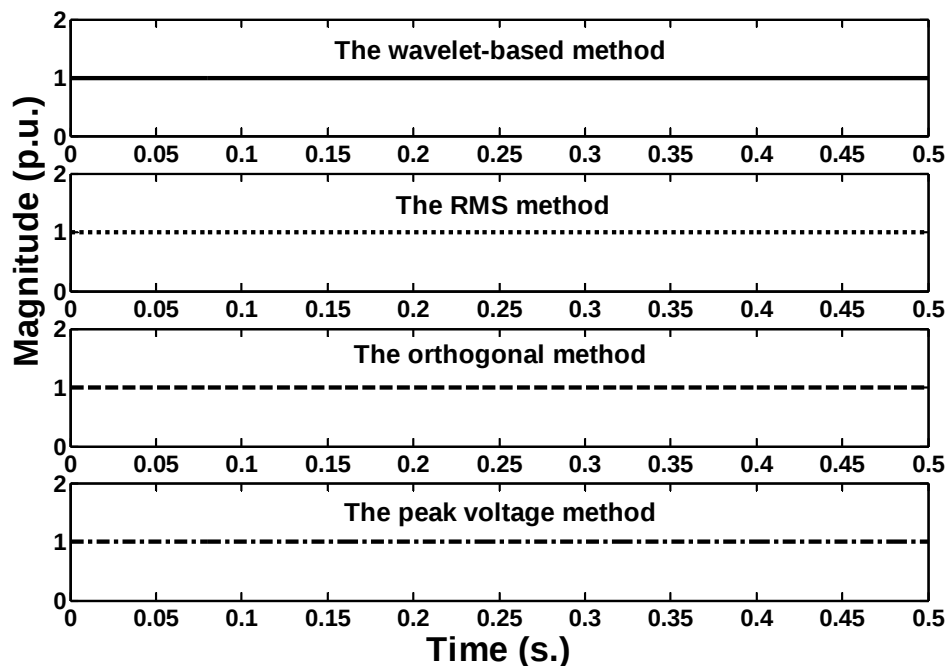


ภาพที่ 5-3 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอรฺยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-3 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบ ขนาด 1 เปอรฺยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งผลปรากฏว่าขนาดของแรงดันที่ได้จากทั้ง 4 วิธีมีขนาดเท่ากันคือ 1 เปอรฺยูนิต

5.1.2 การทดสอบที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ในส่วนนี้จะทำการทดสอบอัลกอริทึมทั้ง 4 วิธีที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น โดยใช้สัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอรฺยูนิตตามภาพที่ 5-2

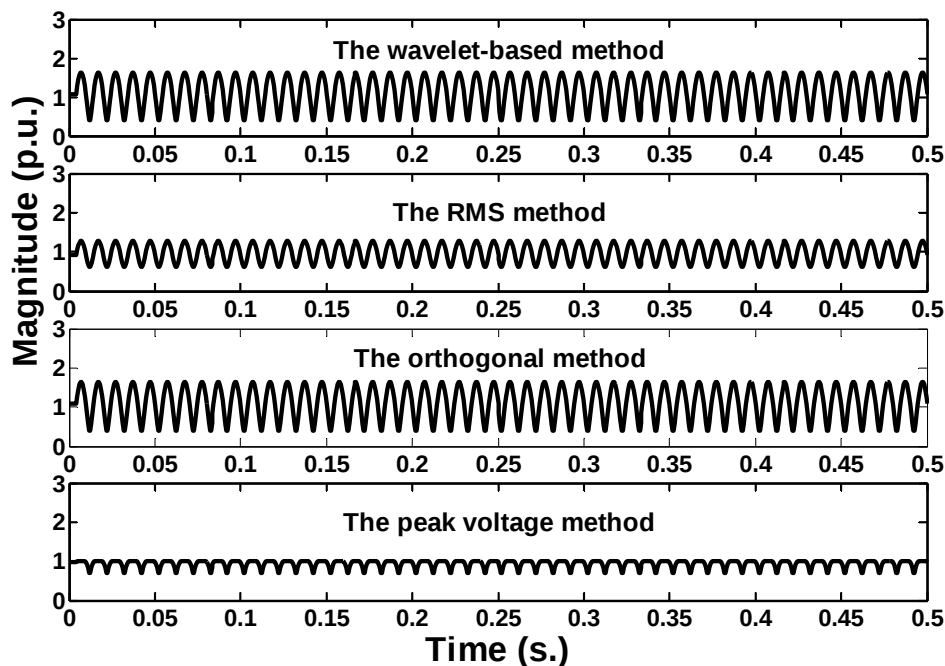


ภาพที่ 5-4 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-4 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบปกติ ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งผลปรากฏว่าขนาดของแรงดันที่ได้จากทั้ง 4 วิธีมีขนาดเท่ากันคือ 1 เพอร์ยูนิต

5.1.3 การทดสอบที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น

ในส่วนนี้จะทำการทดสอบอัลกอริทึมทั้ง 4 วิธีที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น โดยใช้สัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิตตามภาพที่ 5-2



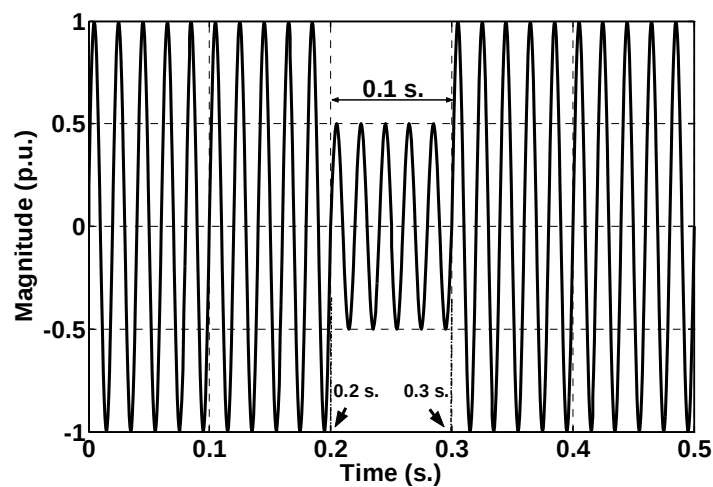
ภาพที่ 5-5 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอรูยูนิต ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-5 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบปกติ ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น ซึ่งผลปรากฏว่าที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเลต วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน ไม่สามารถหาขนาดแรงดันได้ตรงกับค่าจริง (1 p.u.)

จากภาพที่ 5-3 ถึง 5-5 ซึ่งแสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบขนาด 1 เปอรูยูนิตที่หาได้จากวิธีการแปลงเวฟเลต วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น 1/2 ลูกคลื่น และ 1/4 ลูกคลื่น ตามลำดับนั้น สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น 1/2 ลูกคลื่น มีความเหมาะสมกับการใช้คำนวณหาค่าขนาดของแรงดัน เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลที่ตรงกับค่าจริง (1 p.u.) และที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น ไม่เหมาะสมกับการใช้คำนวณหาขนาดของแรงดัน เนื่องจากไม่สามารถให้ข้อมูลที่ตรงกับค่าจริง (1 p.u.)

5.2 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

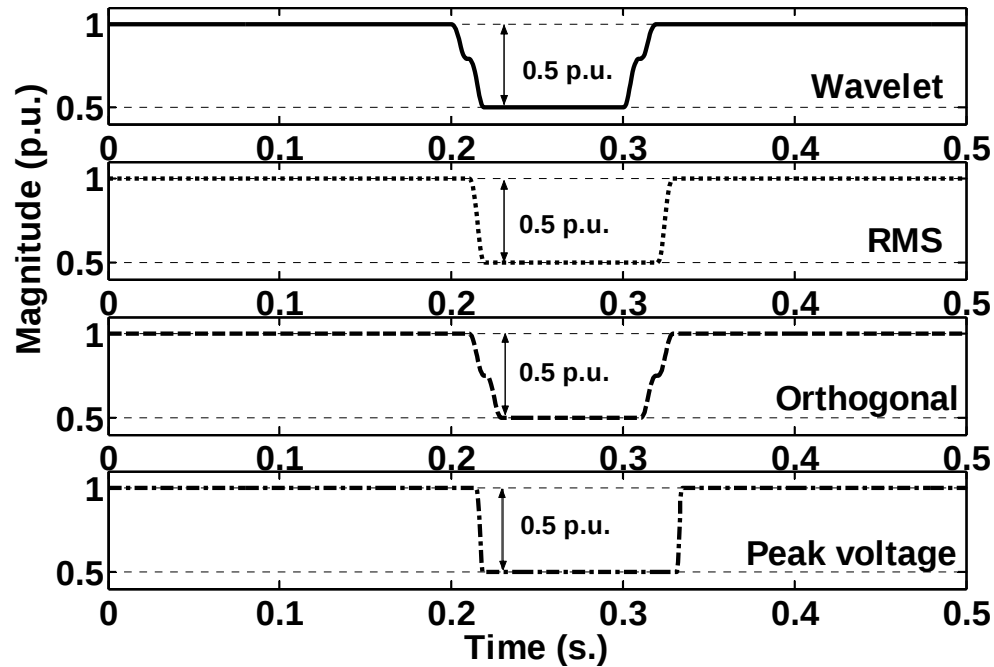
ในการทดสอบนี้ได้ทำการสร้างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อใช้ทดสอบอัลกอริทึมโดยทำการจำลองการเกิดฟอลต์เฟสเดียวลงดินที่เฟส A ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC ตามภาพที่ 5-1 โดยสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ได้มาจากการวัดสัญญาณที่ด้านแรงต่ำเฟส A ของสถานีไฟฟ้า



ภาพที่ 5-6 สัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

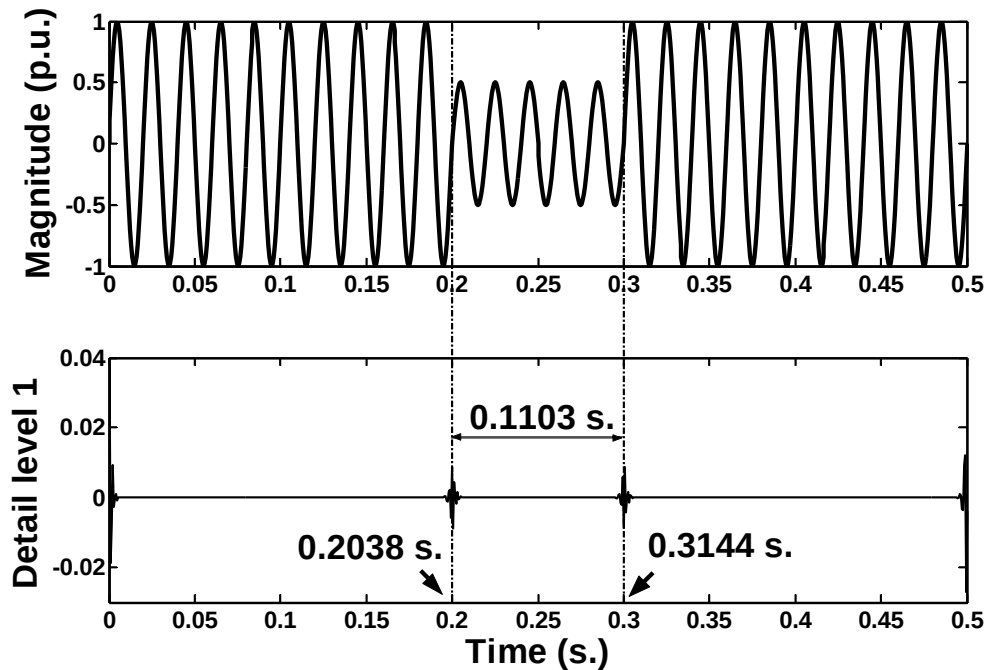
ภาพที่ 5-6 แสดงสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความยาวของสัญญาณ 0.5 วินาที (0–0.5 วินาที) ความถี่แซมปลิง 1,600 เฮิร์ตซ์ จำนวน 32 แซมปลิงต่อหนึ่งลูกคลื่น ขนาดของสัญญาณอยู่ในหน่วยเปอร์ยูนิต ในสภาวะปกติมีขนาดเท่ากับ 1 เปอร์ยูนิต ส่วนช่วงระยะเวลา 0.2 - 0.3 วินาที (0.1 วินาที) เป็นช่วงเวลาที่แรงดันตกซึ่งมีขนาด 0.5 เปอร์ยูนิต

5.2.1 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น



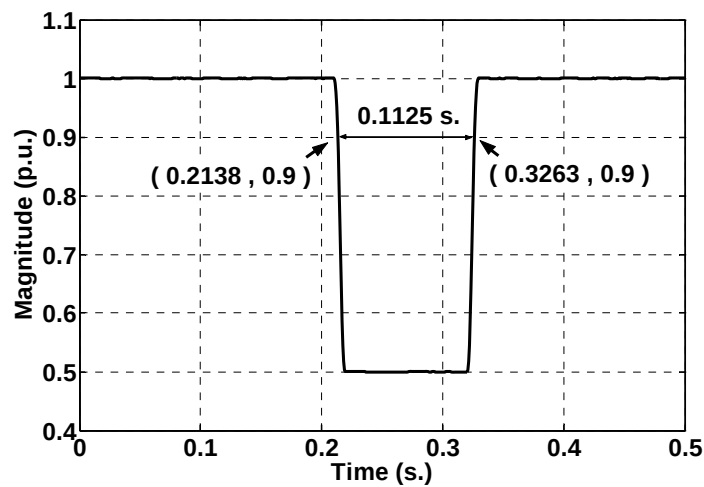
ภาพที่ 5-7 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-7 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งผลปรากฏว่าขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีมีขนาดเท่ากันคือ 0.5 เอร์ยูนิต



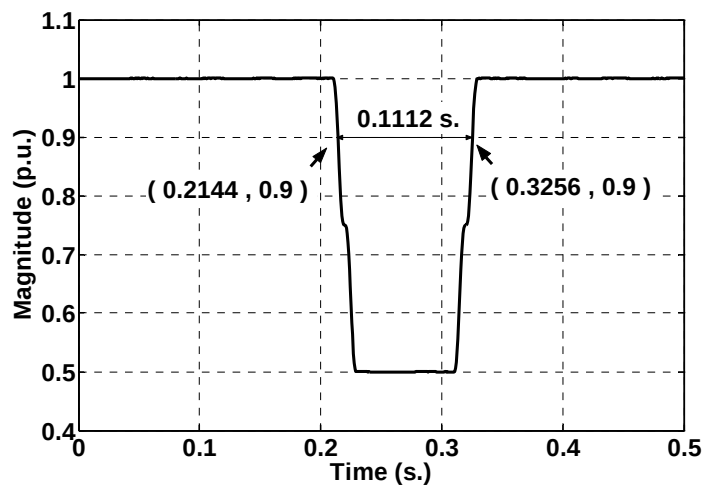
ภาพที่ 5-8 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-8 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3144 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1103 วินาที



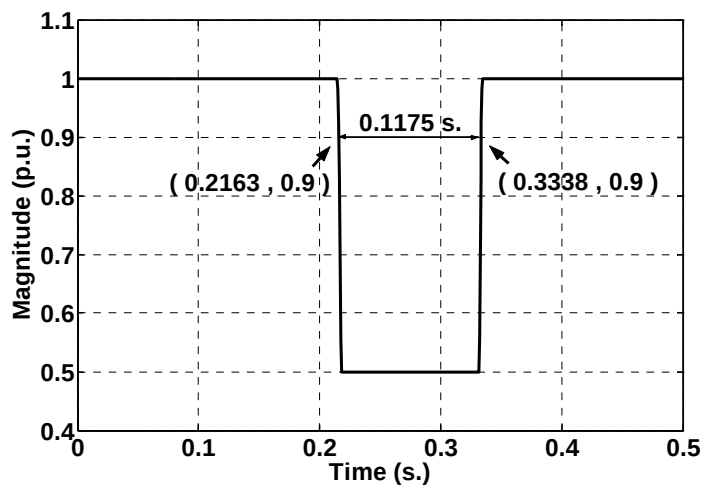
ภาพที่ 5-9 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส
ของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้
หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-9 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่า
อาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC
โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2138 วินาที
จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3263 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่า
เท่ากับ 0.1125 วินาที



ภาพที่ 5-10 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-10 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2144 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3256 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1112 วินาที



ภาพที่ 5-11 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-11 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออโรนอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2163 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3338 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1175 วินาที

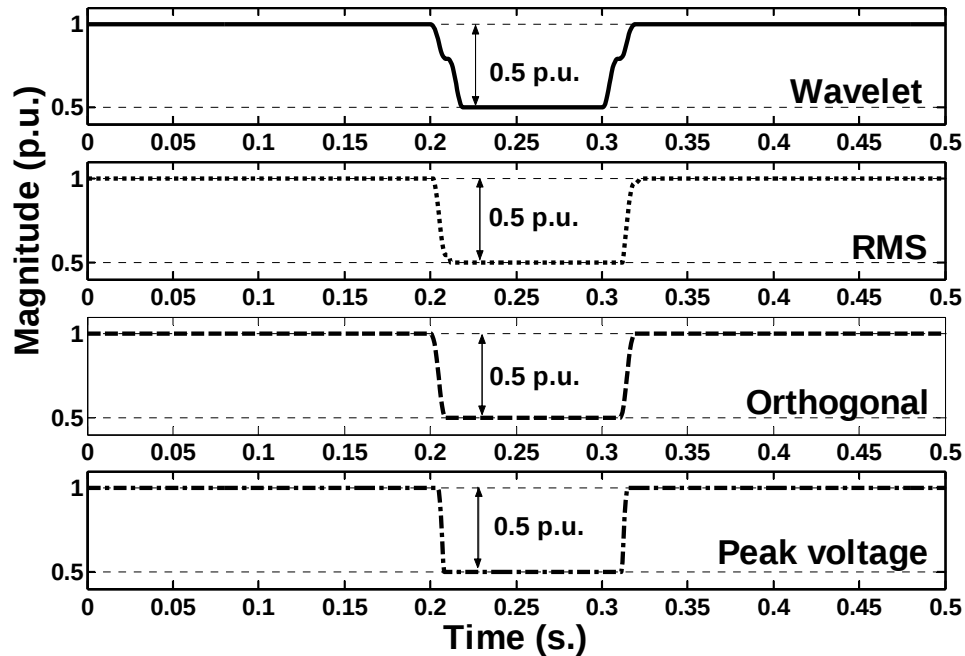
จากข้อมูลตามภาพที่ 5-8 ถึง 5-11 สามารถแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ได้ตามตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ
ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.2038	1.90	0.3144	4.80	0.1103	10.30
RMS value	0.2138	6.90	0.3263	8.77	0.1125	12.50
Orthogonal	0.2144	7.20	0.3256	8.53	0.1112	11.20
Peak voltage	0.2163	8.15	0.3038	11.27	0.0875	17.50

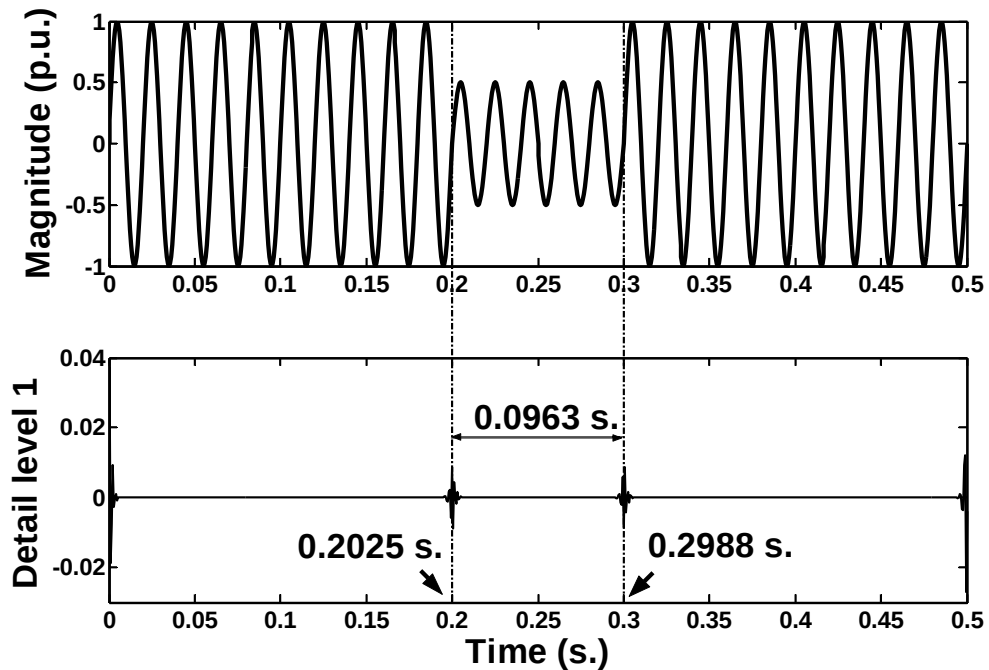
จากตารางที่ 5-3 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบออโรนอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.1 วินาทีคือตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาทีมากที่สุด

5.2.2 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น



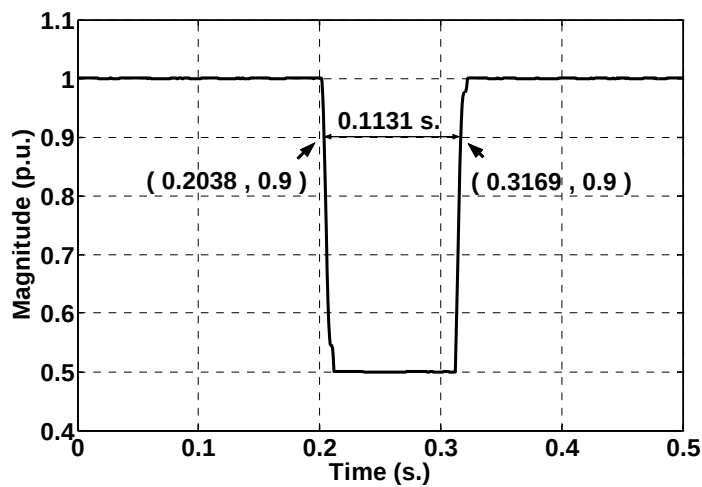
ภาพที่ 5-12 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-12 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งผลปรากฏว่าขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีมีขนาดเท่ากันคือ 0.5 เปอร์ยูนิต



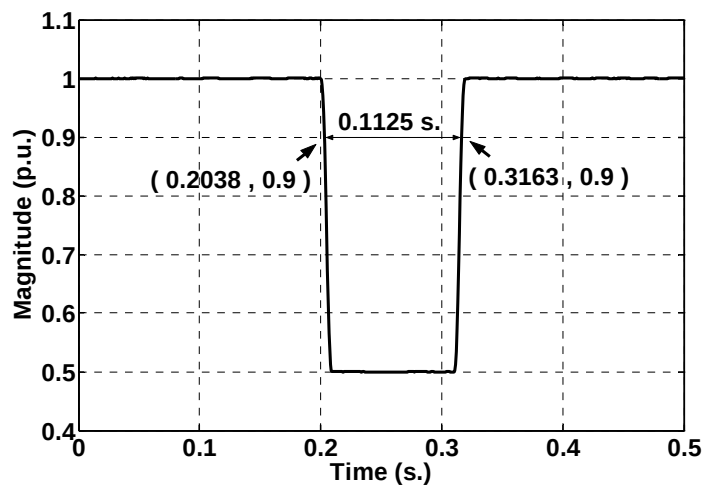
ภาพที่ 5-13 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-13 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2025 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2988 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0963 วินาที



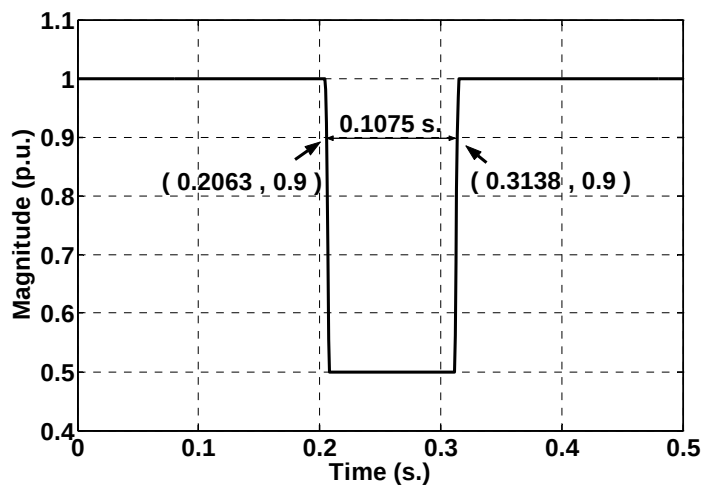
ภาพที่ 5-14 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-14 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3169 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1131 วินาที



ภาพที่ 5-15 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-15 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยก
 องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะ
 อยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3163 วินาที และช่วงเวลาของแรงดัน
 ตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1125 วินาที



ภาพที่ 5-16 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-16 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2063 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3138 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1075 วินาที

จากข้อมูลตามภาพที่ 5-13 ถึง 5-16 สามารถแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ได้ตามตารางที่ 5-4

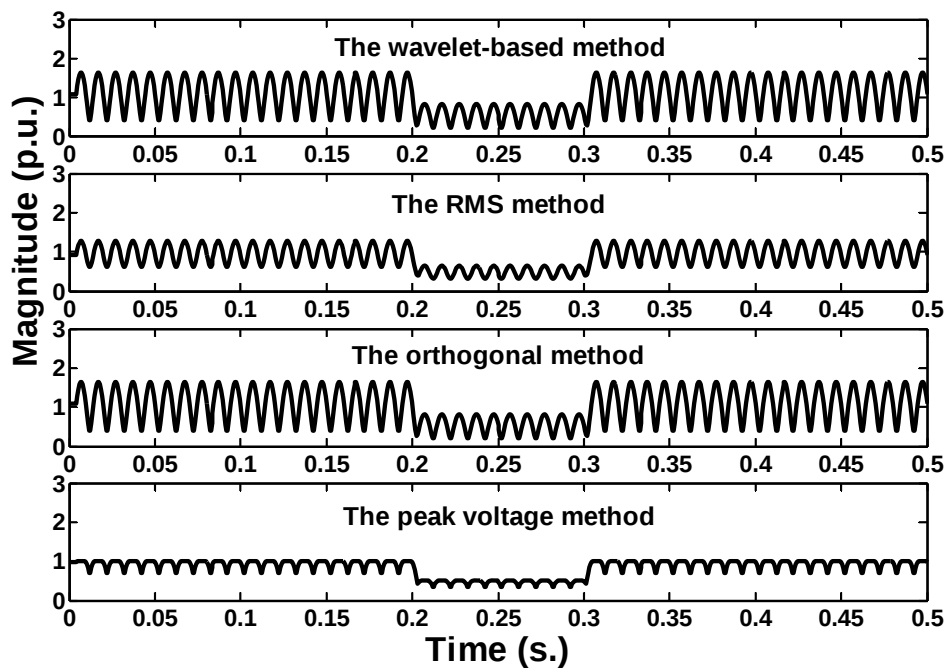
ตารางที่ 5-4 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.2025	1.25	0.2988	0.4	0.0963	3.70
RMS value	0.2038	1.90	0.3169	5.63	0.1131	13.10
Orthogonal	0.2038	1.90	0.3163	5.43	0.1125	12.50
Peak voltage	0.2063	3.15	0.3138	4.50	0.1075	7.50

จากตารางที่ 5-4 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบออโรนอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.1 วินาทีคือตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาทีมากที่สุด

5.2.3 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-17 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่นจะเห็นได้ว่า ไม่สามารถหาขนาด จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะได้ เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้มีการแกว่งตัวของข้อมูลสูง

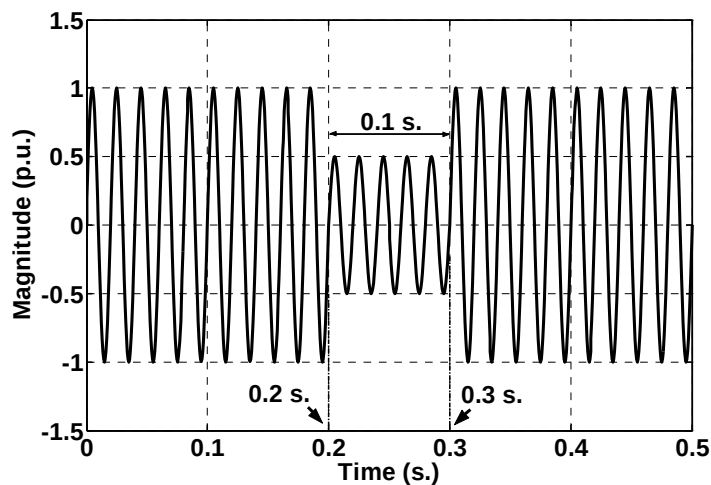


ภาพที่ 5-17 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น

5.3 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม

Noise 0.1 %

ในการทดสอบนี้ได้นำสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC มาเพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงได้ตามภาพที่ 5-18

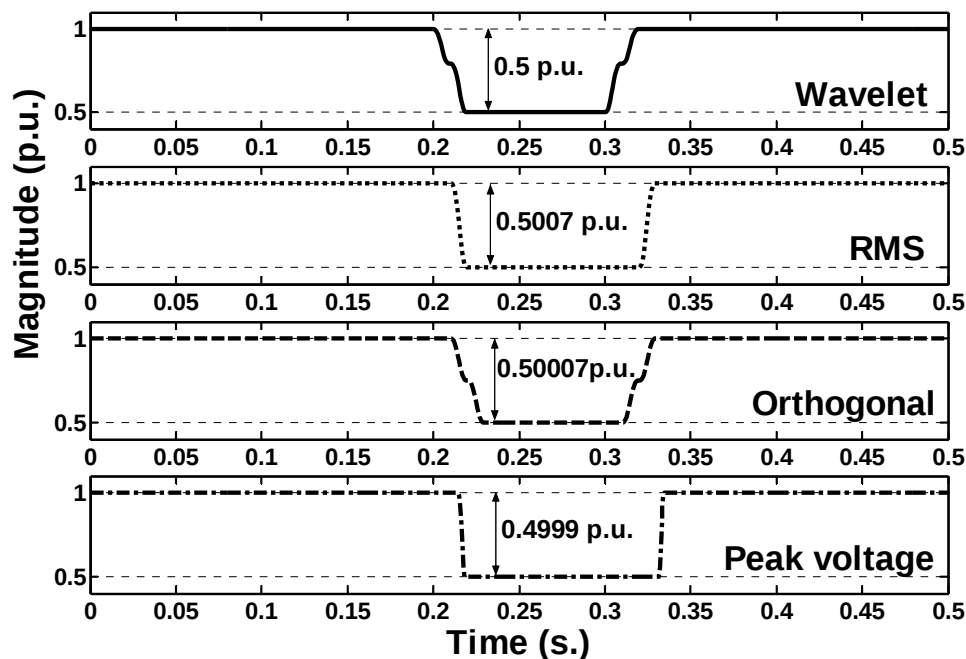


ภาพที่ 5-18 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งสร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์

ภาพที่ 5-18 แสดงรูปคลื่นสัญญาณทดสอบ ซึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความยาวของสัญญาณ 0.5 วินาที (0–0.5 วินาที) ความถี่แซมปลิง 1,600 เฮิร์ตซ์ จำนวน 32 แซมปลิงต่อหนึ่งลูกคลื่น ขนาดของสัญญาณอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ในสภาวะปกติมีขนาดเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนช่วงระยะเวลา 0.2 - 0.3 วินาที (0.1 วินาที) เป็นช่วงเวลาที่ยังคงมีขนาด 0.5 เปอร์เซ็นต์ และสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะมี Noise ปะปนอยู่ 0.1 เปอร์เซ็นต์

5.3.1 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-19 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบปกติที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปขนาดและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะที่หาได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-5

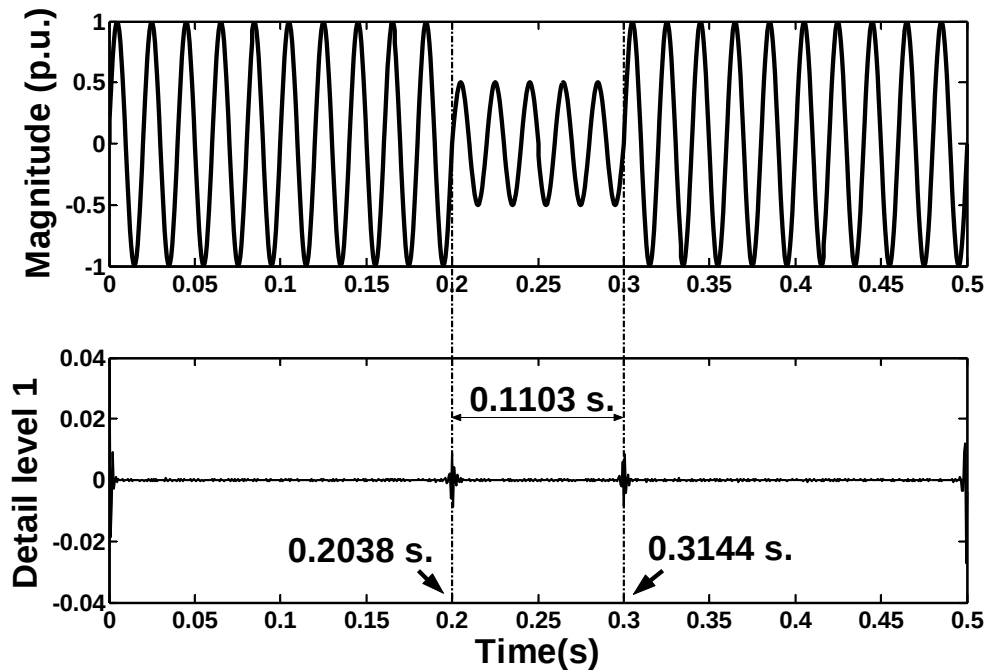


ภาพที่ 5-19 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธีโดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ตารางที่ 5-5 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

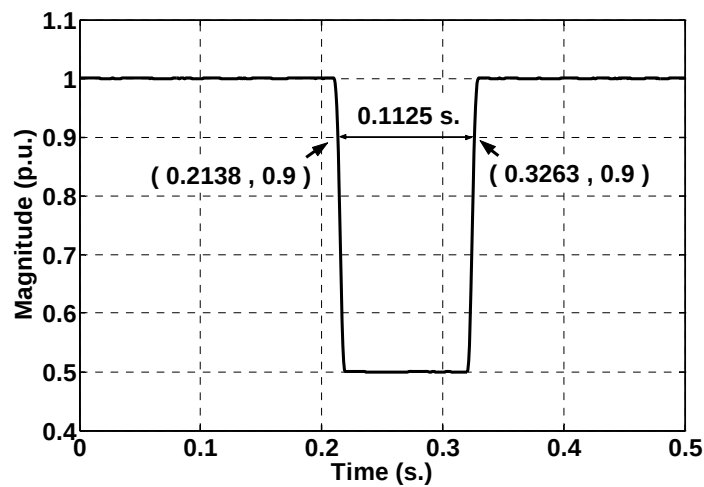
	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.5	0.5007	0.50007	0.4999
Error (%)	0	0.14	0.014	0.02

จากตารางที่ 5-5 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด



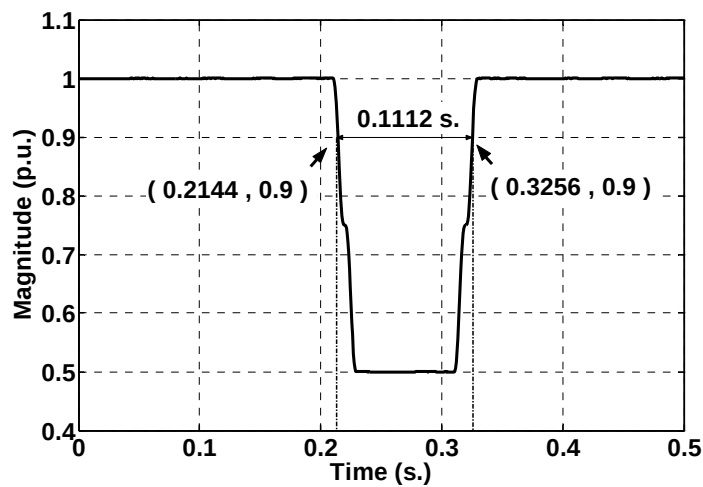
ภาพที่ 5-20 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-20 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3144 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1103 วินาที



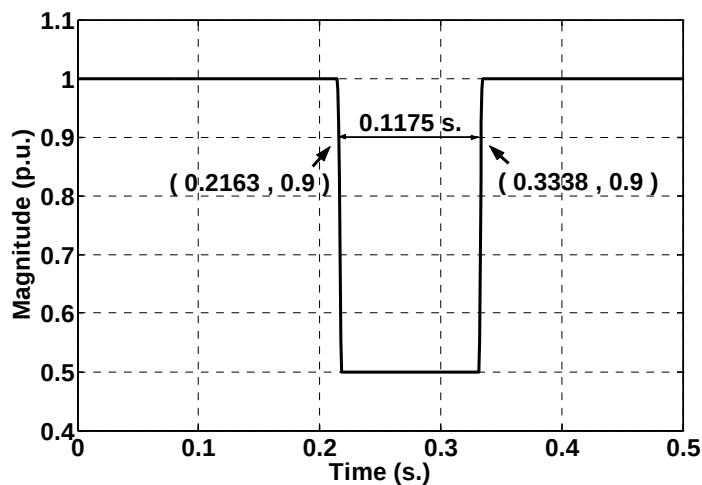
ภาพที่ 5-21 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-21 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2138 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3263 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1125 วินาที



ภาพที่ 5-22 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-22 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยก
 องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่ง
 จุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2144 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3256
 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1112 วินาที



ภาพที่ 5-23 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-23 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออโธกอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2163 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3338 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1175 วินาที

จากข้อมูลตามภาพที่ 5-20 ถึง 5-23 สามารถแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-6

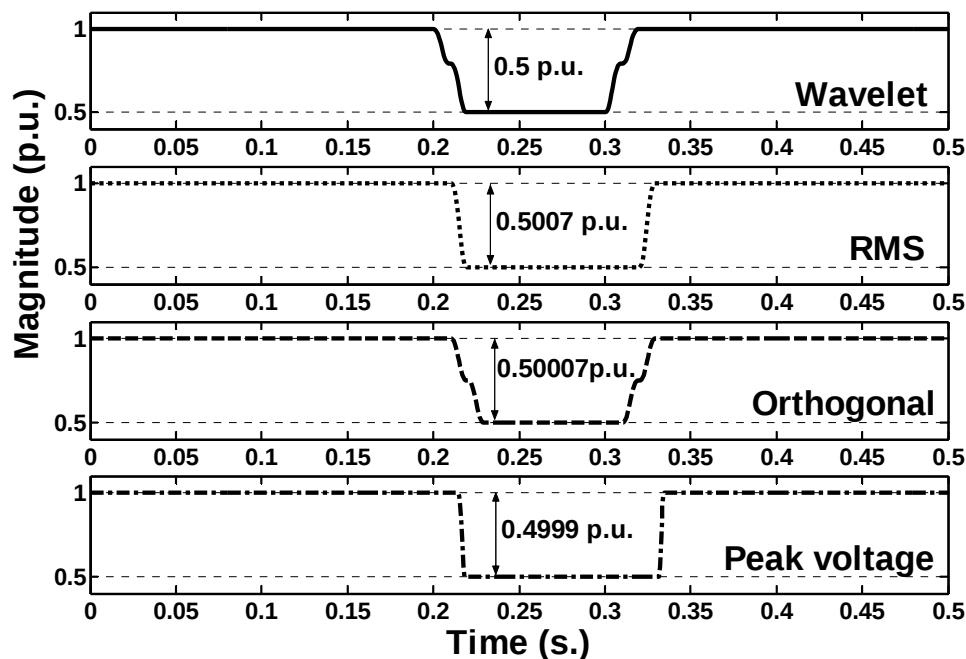
ตารางที่ 5-6 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้หน้าต่างรับ ข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.2038	1.90	0.3144	4.80	0.1103	10.30
RMS value	0.2138	6.90	0.3263	8.77	0.1125	12.50
Orthogonal	0.2144	7.20	0.3256	8.53	0.1112	11.20
Peak voltage	0.2163	8.15	0.3038	11.27	0.0875	17.50

จากตารางที่ 5-6 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบออโธกอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.1 วินาทีคือตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาทีมากที่สุด

5.3.2 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-24 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบปกติ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปขนาดและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-7

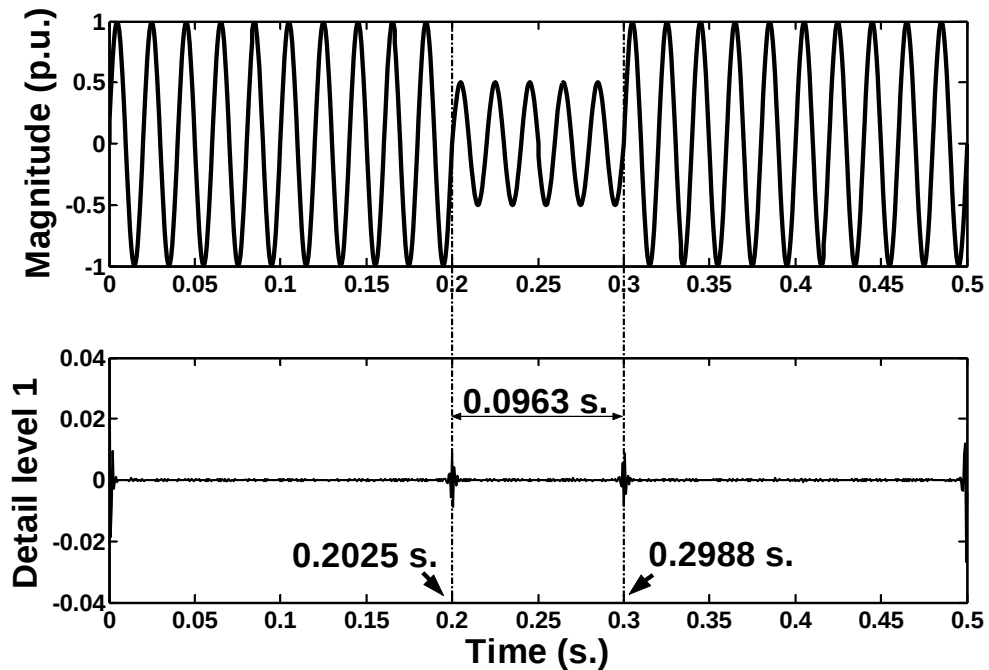


ภาพที่ 5-24 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

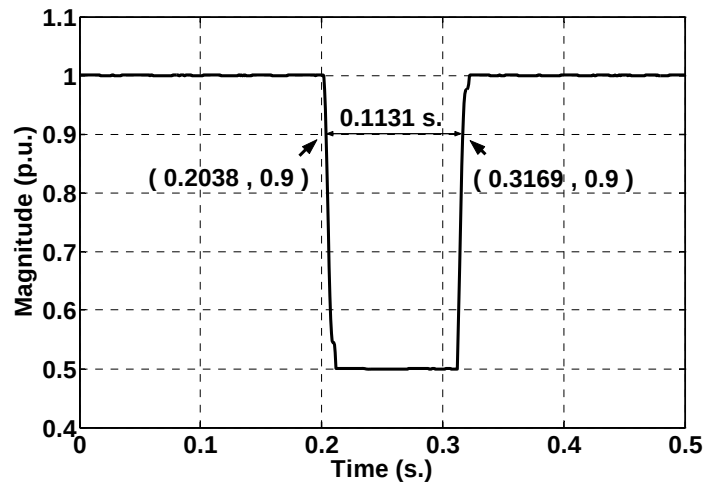
	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.5	0.5007	0.5008	0.5009
Error (%)	0	0.14	0.16	0.18

จากตารางที่ 5-7 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด



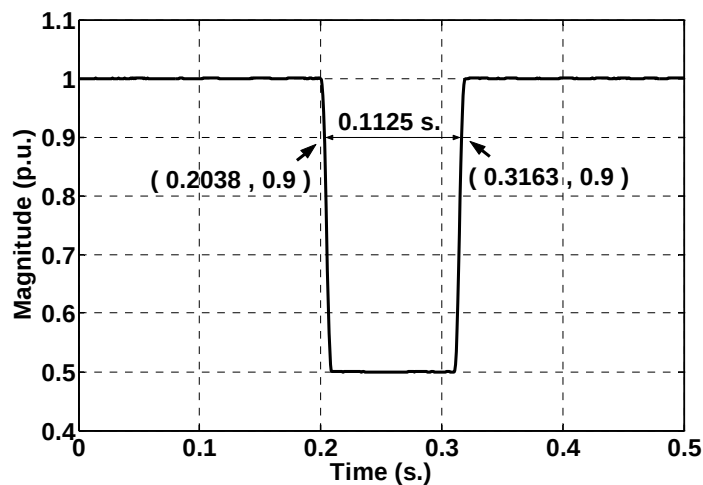
ภาพที่ 5-25 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-25 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2025 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2988 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0963 วินาที



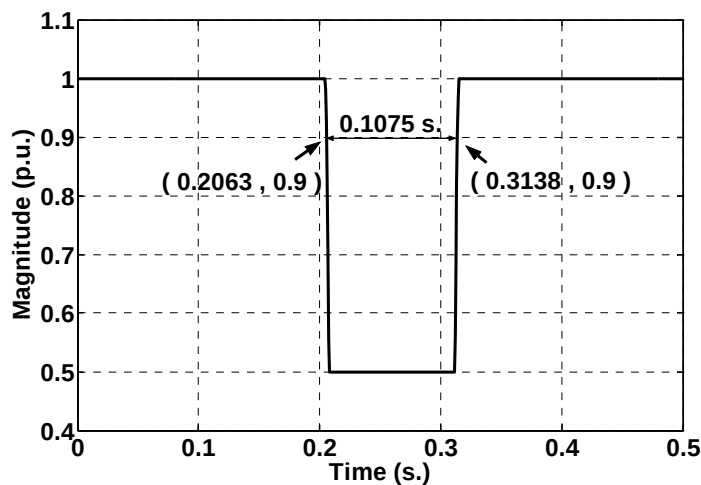
ภาพที่ 5-26 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-26 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3169 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1131 วินาที



ภาพที่ 5-27 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-27 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยก
 องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม
 PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่ง
 จุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2038 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3163
 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1125 วินาที



ภาพที่ 5-28 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-28 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2063 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.3138 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.1075 วินาที

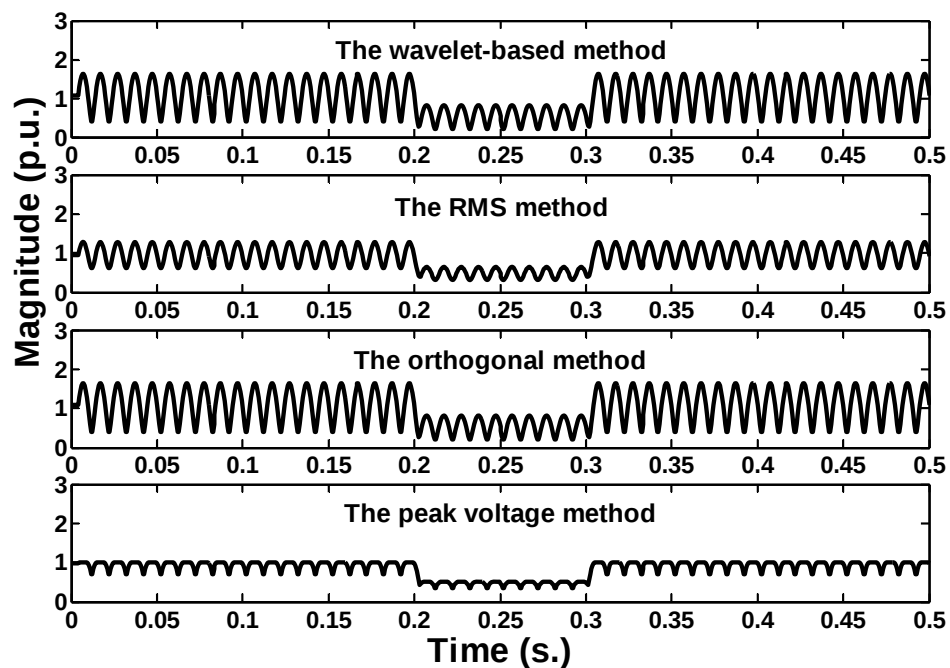
จากข้อมูลตามภาพที่ 5-25 ถึง 5-28 สามารถแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-8

จากตารางที่ 5-8 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบออโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.1 วินาทีคือตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาทีมากที่สุด

ตารางที่ 5-8 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณทดสอบแรงดันตก
ช่วงเวลาที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่าง
รับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.2025	1.25	0.2988	0.4	0.0963	3.70
RMS value	0.2038	1.90	0.3169	5.63	0.1131	13.10
Orthogonal	0.2038	1.90	0.3163	5.43	0.1125	12.50
Peak voltage	0.2063	3.15	0.3138	4.50	0.1075	7.50

5.3.3 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น



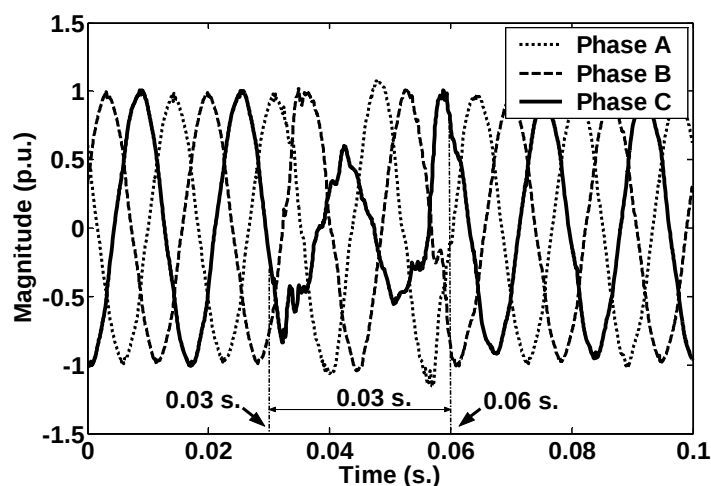
ภาพที่ 5-29 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกช่วงเวลาที่ได้จาก
โปรแกรม PSCAD/EMTDC เพิ่ม Noise 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่หน้าต่างที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี
โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-29 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่นจะเห็นได้ว่า ไม่สามารถหาขนาด จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะได้ เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้มีการแกว่งตัวของข้อมูลสูง

5.4 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ

IEEE1159.2

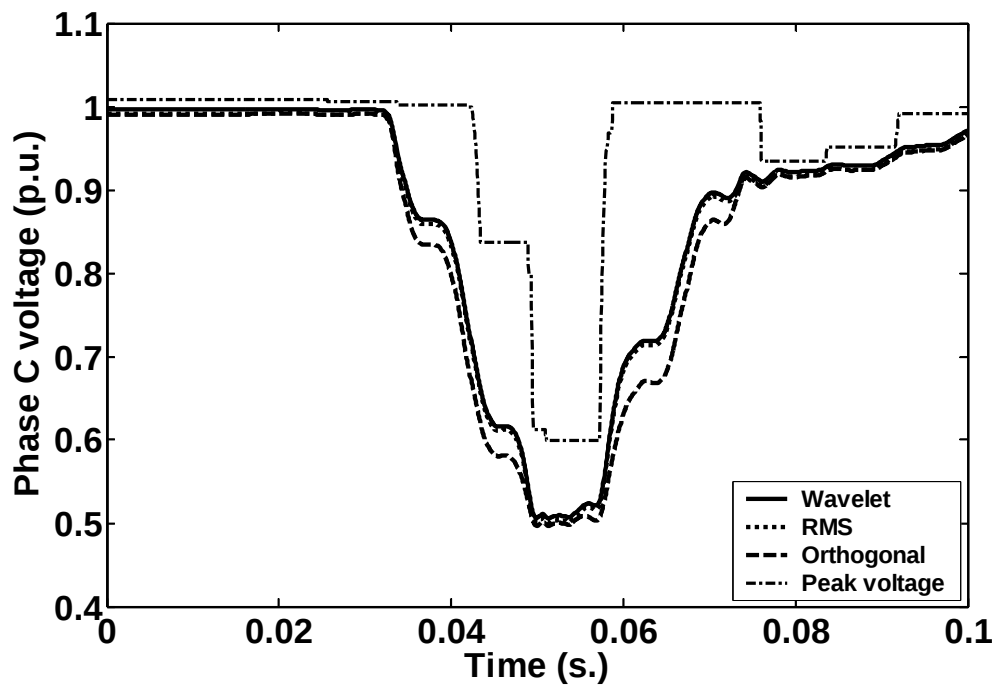
ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE 1159.2 (IEEE 1159.2 Working Group) ซึ่งเป็นสัญญาณที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยสัญญาณมีความถี่ 60 เฮิรตซ์ ความยาวของสัญญาณ 0.1 วินาที จำนวนแซมปลิงทั้งหมด 1,536 แซมปลิง และมีจำนวน 256 แซมปลิงต่อหนึ่งลูกคลื่น ขนาดของสัญญาณอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้จะใช้รูปคลื่นสัญญาณทดสอบดังภาพที่ 5-30



ภาพที่ 5-30 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งได้จาก IEEE 1159.2

จากภาพที่ 5-30 สัญญาณที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นสัญญาณที่ไม่สมมูล (Non Symmetry) กล่าวคือ เฟส A และ B มีลักษณะเป็นแรงดันเกินขนาดเล็กหรือแรงดันเกินชั่วขณะ ส่วนเฟส C มีลักษณะเป็นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาแรงดันตกประมาณ 0.03 วินาทีคือตั้งแต่ 0.03 วินาทีถึง 0.06 วินาที แรงดันตกมีขนาดประมาณ 0.52 เปอร์เซ็นต์

5.4.1 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น



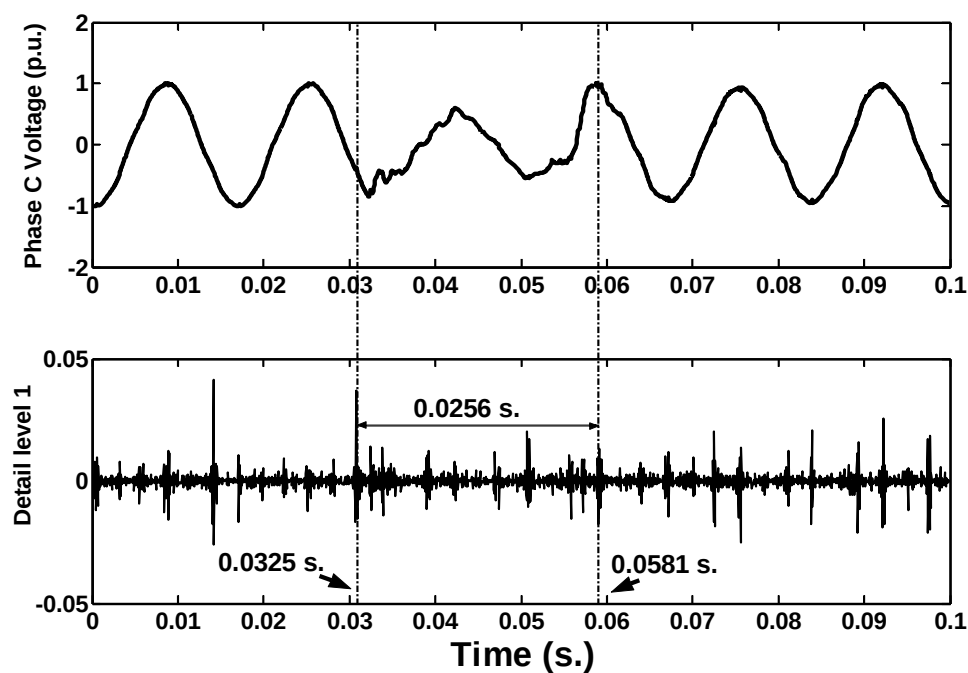
ภาพที่ 5-31 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-31 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปความลึกของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-9

จากตารางที่ 5-9 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิค และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.52 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด

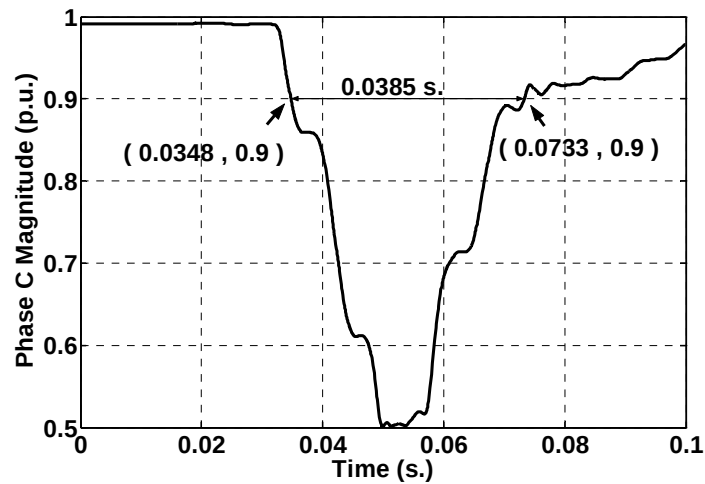
ตารางที่ 5-9 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.5059	0.5010	0.4964	0.5989
Error (%)	2.71	3.65	4.53	15.18



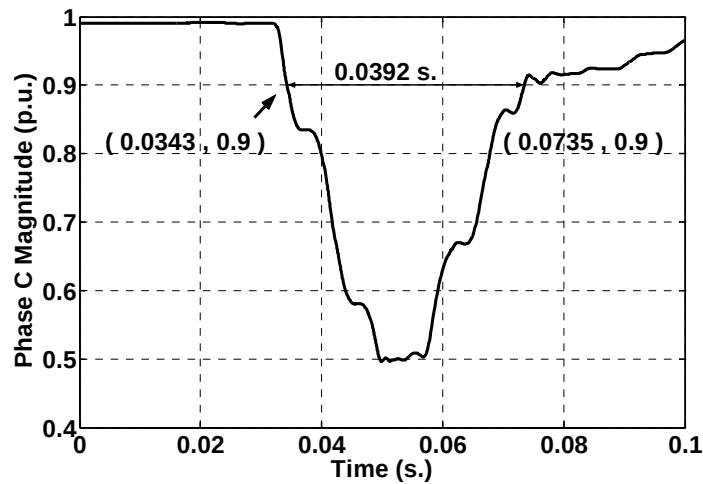
ภาพที่ 5-32 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-32 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0325 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0581 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0256 วินาที



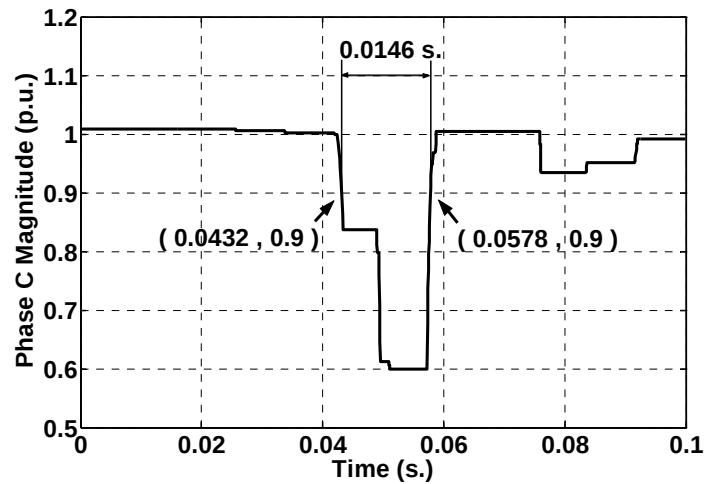
ภาพที่ 5-33 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-33 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0348 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0733 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0385 วินาที



ภาพที่ 5-34 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
ออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า
IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-34 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแยก
องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า
IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0348
วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0733 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมี
ค่าเท่ากับ 0.0385 วินาที



ภาพที่ 5-35 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-35 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0432 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0578 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0146 วินาที

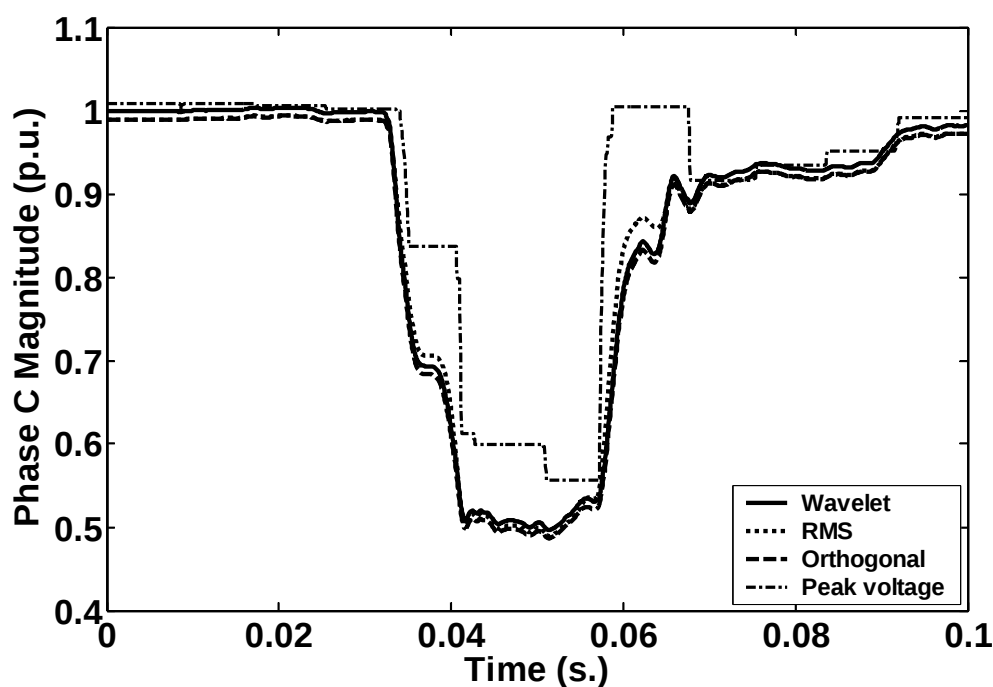
จากข้อมูลตามภาพที่ 5-32 ถึง 5-35 สามารถนำมาเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-10

จากตารางที่ 5-10 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเลตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเลตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.03 วินาทีคือตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.06 วินาทีมากที่สุด

ตารางที่ 5-10 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.0325	8.3	0.0581	3.17	0.0256	14.67
RMS value	0.0348	16	0.0733	22.17	0.0385	28.33
Orthogonal	0.0343	14.33	0.0735	22.50	0.0392	30.67
Peak voltage	0.0432	44	0.0578	3.67	0.0146	51.33

5.4.2 การคำนวณที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น



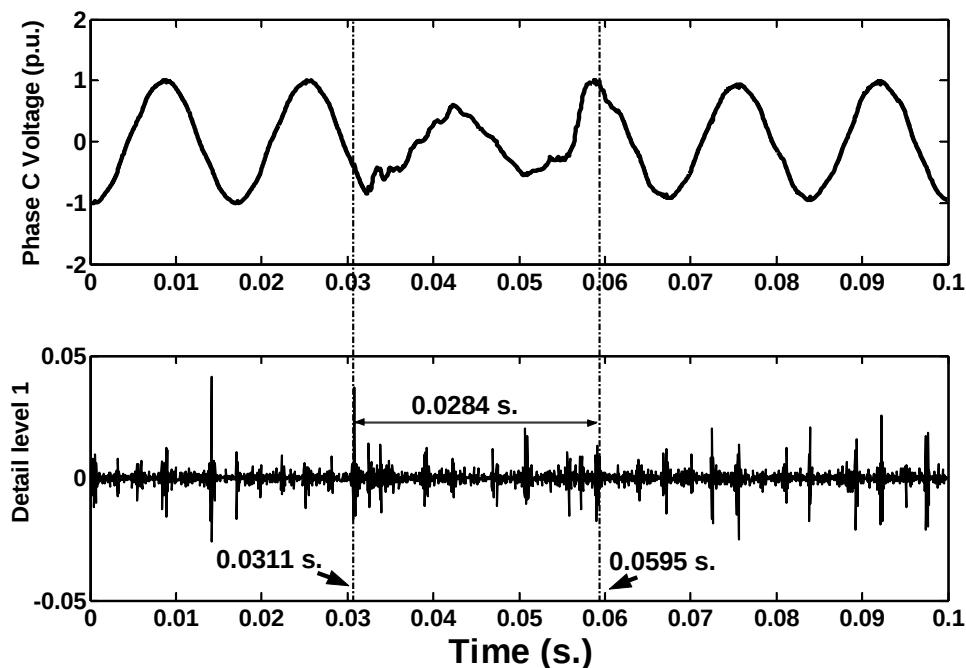
ภาพที่ 5-36 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-36 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปความลึกของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-11

ตารางที่ 5-11 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

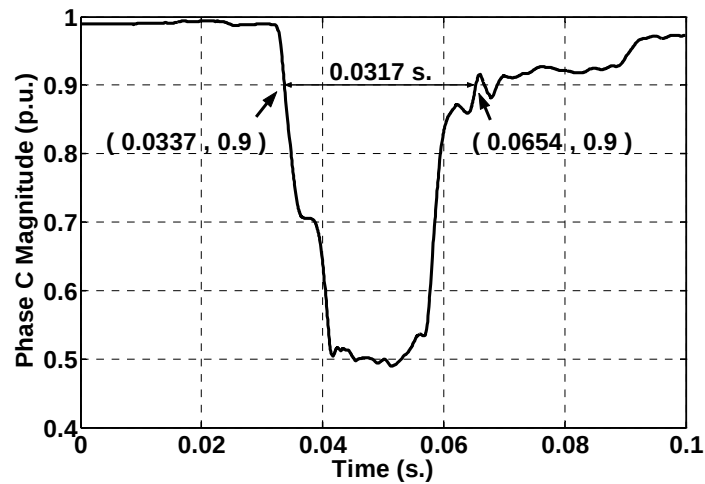
	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.4967	0.4893	0.4867	0.5569
Error (%)	4.47	5.90	6.40	7.09

จากตารางที่ 5-11 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิค และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.52 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด



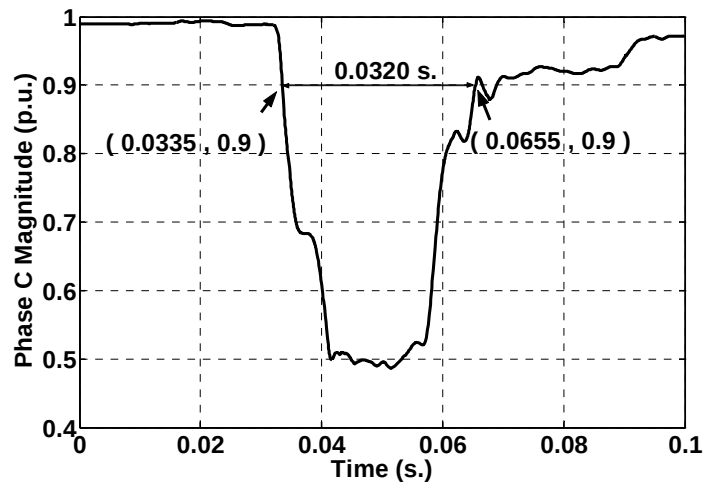
ภาพที่ 5-37 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-37 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0311 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0595 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0284 วินาที



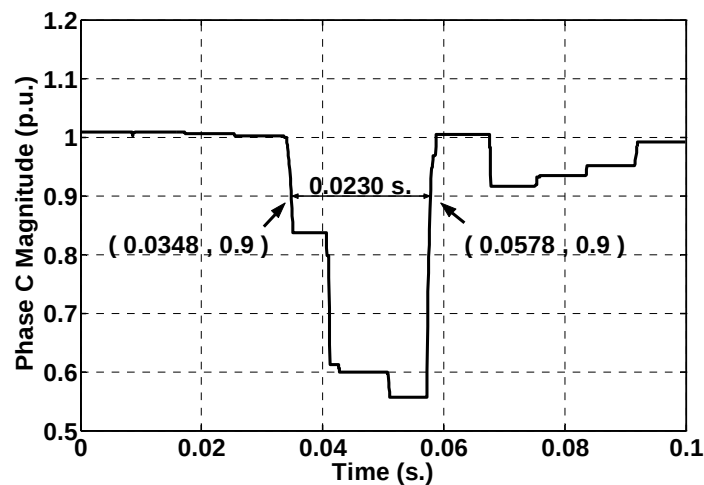
ภาพที่ 5-38 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-38 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0337 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0654 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0317 วินาที



ภาพที่ 5-39 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
ออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า
IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-39 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแยก
องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า
IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่
0.0335 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0655 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตก
ชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0320 วินาที



ภาพที่ 5-40 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-40 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0348 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.0578 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0230 วินาที

จากข้อมูลตามภาพที่ 5-37 ถึง 5-40 สามารถนำมาเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-12

จากตารางที่ 5-12 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเลตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิค และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเลตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.03 วินาทีคือตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.06 วินาทีมากที่สุด

ตารางที่ 5-12 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.0311	3.67	0.0595	0.83	0.0284	5.33
RMS value	0.0337	12.33	0.0654	9	0.0317	5.67
Orthogonal	0.0335	11.67	0.0655	9.17	0.0320	6.67
Peak voltage	0.0348	16	0.0578	3.67	0.0230	23.33

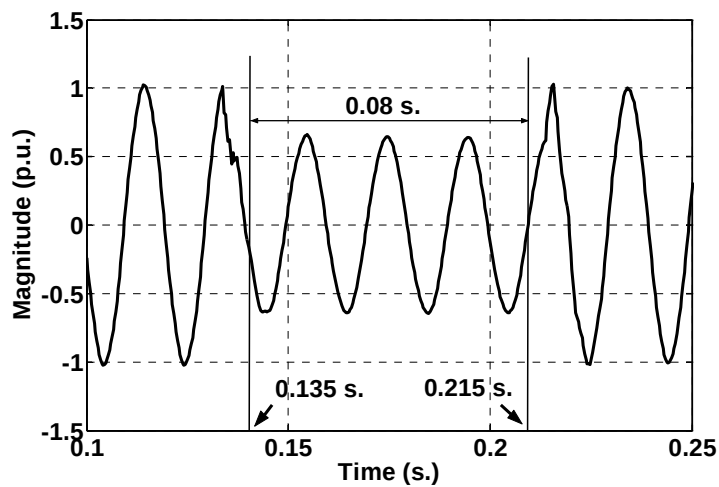
จากข้อมูลตามตารางที่ 5-9 และ 5-11 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น และ 1/2 ลูกคลื่นตามลำดับนั้น สรุปได้ว่า สำหรับการหาความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะวิธีการแปลงเวฟเล็ตเหมาะสมกับหน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น เนื่องจากที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

จากข้อมูลตามตารางที่ 5-10 และ 5-12 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้า IEEE 1159.2 ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นและ 1/2 ลูกคลื่นตามลำดับนั้น สรุปได้ว่า สำหรับการหาช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะวิธีการแปลงเวฟเล็ตเหมาะสมกับหน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น เนื่องจากที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

5.5 การทดสอบโดยใช้สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้า

ส่วนภูมิภาค

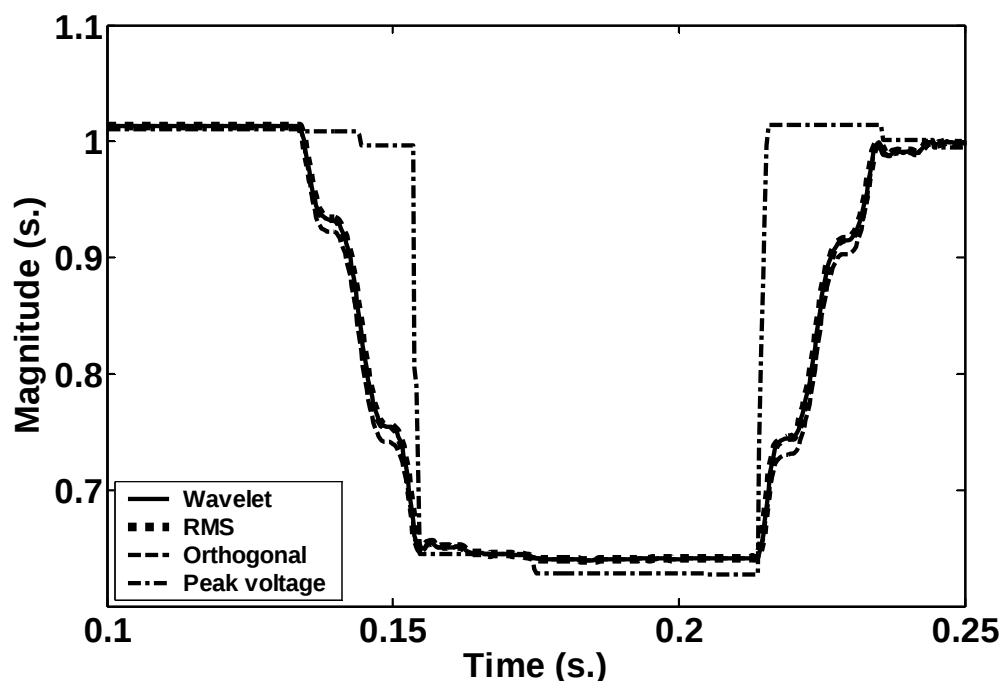
ในการทดสอบนี้ ได้ทำการทดสอบสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในงานวิจัยนี้จะใช้รูปคลื่นสัญญาณทดสอบดังภาพที่ 5-41



ภาพที่ 5-41 รูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบซึ่งได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ภาพที่ 5-41 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ทดสอบ ซึ่งได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความยาวของสัญญาณ 0.08 วินาที (0.135-0.215 วินาที) ความถี่แซมปลิง 3,200 เฮิร์ตซ์ มีจำนวน 64 แซมปลิงต่อหนึ่งลูกคลื่น ขนาดของสัญญาณอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยช่วงระยะเวลาประมาณ 0.135-0.215 วินาที (0.08 วินาที) เป็นช่วงเวลาที่แรงดันตกจะมีขนาดประมาณ 0.65 เปอร์เซ็นต์

5.5.1 การคำนวณที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น



ภาพที่ 5-42 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้ หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

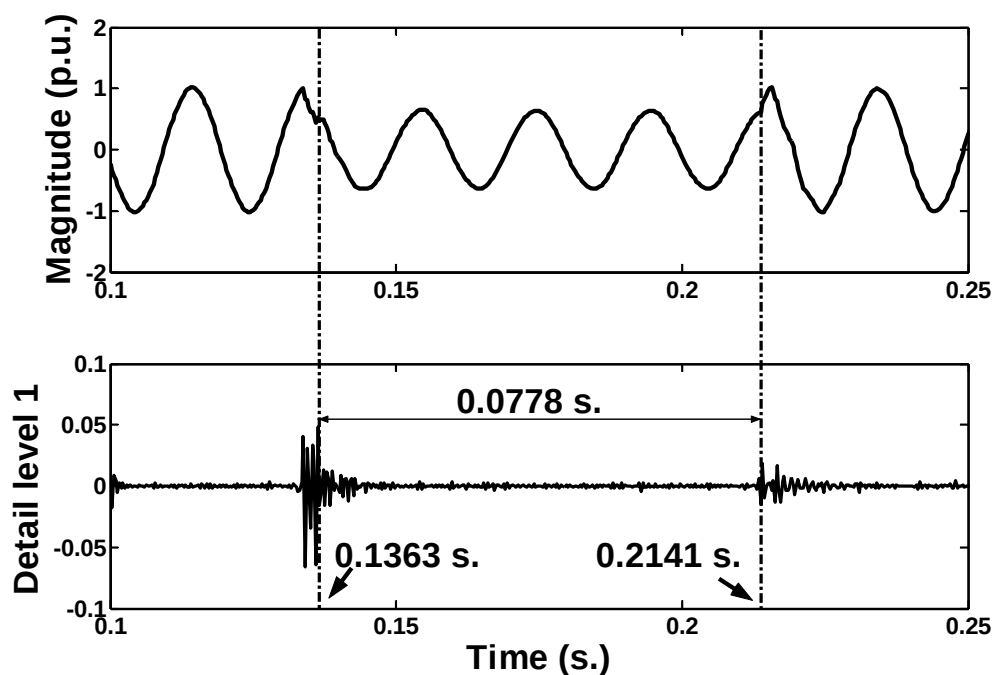
ภาพที่ 5-42 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปความลึกของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-13

จากตารางที่ 5-13 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.65 เพอร์เซ็นต์มากที่สุด

ตารางที่ 5-13 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง

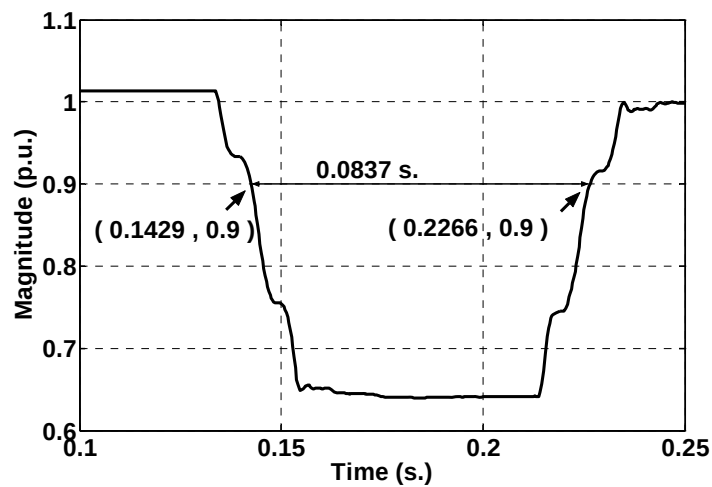
Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าต่างรับข้อมูล
ขนาด 1 ลูกคลื่น

	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.6396	0.6395	0.6394	0.6272
Error (%)	1.60	1.62	1.63	3.51



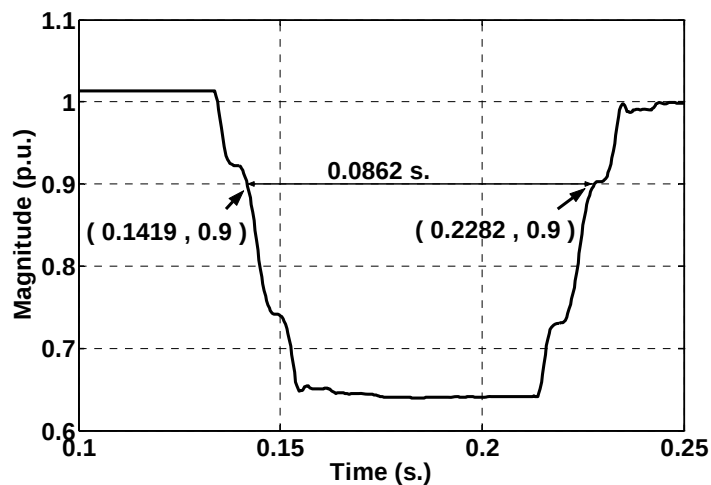
ภาพที่ 5-43 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของ
สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-43 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลง
เวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1363 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่
0.2141 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0778 วินาที



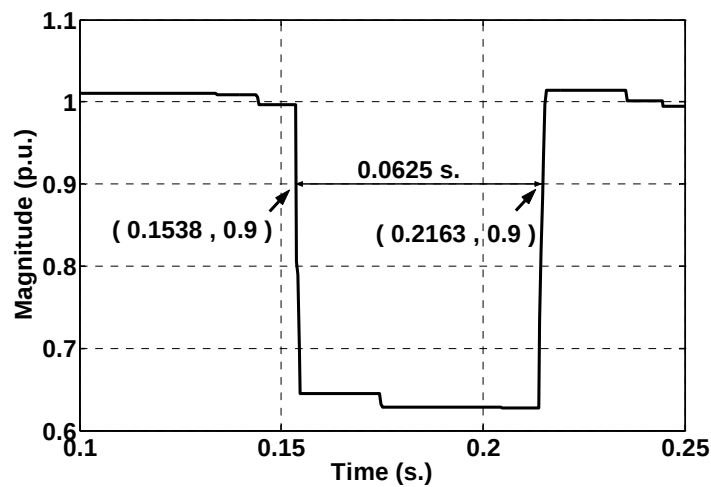
ภาพที่ 5-44 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-44 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1429 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2266 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0837 วินาที



ภาพที่ 5-45 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโธคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของ
 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-45 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีวิธีการแยก
 องค์ประกอบของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วน
 ภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1419
 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2282 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมี
 ค่าเท่ากับ 0.0862 วินาที



ภาพที่ 5-46 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-46 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1538 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2163 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0625 วินาที

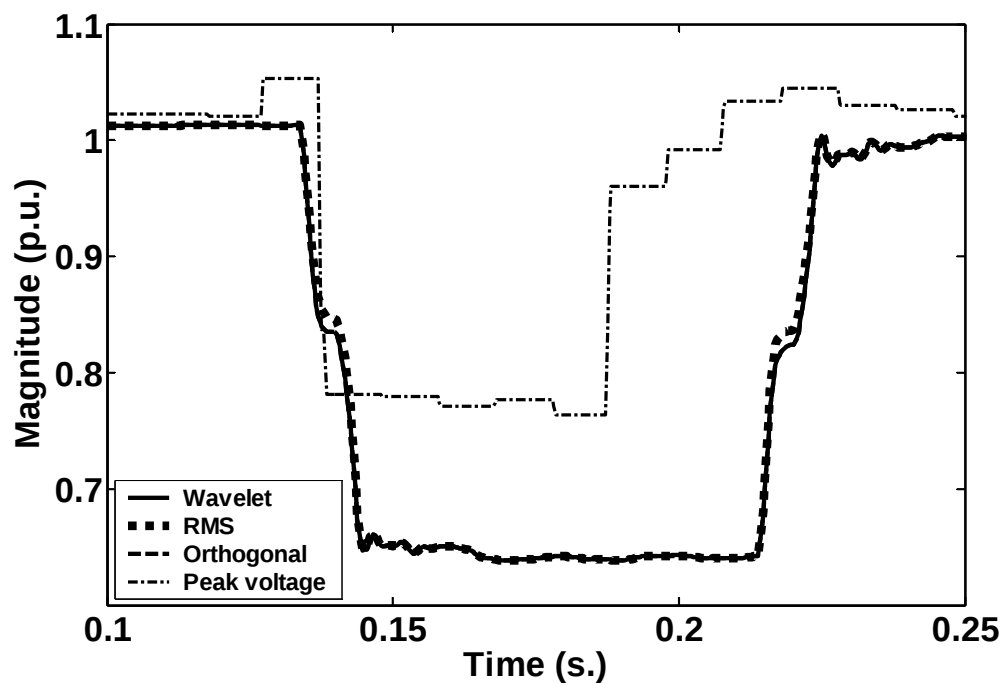
จากข้อมูลตามภาพที่ 5-43 ถึง 5-46 สามารถนำมาเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-14

จากตารางที่ 5-14 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ทสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิค และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ทให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.08 วินาทีคือตั้งแต่ 0.135 ถึง 0.215 วินาทีมากที่สุด

ตารางที่ 5-14 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ
ที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด
1 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.1363	0.96	0.2141	0.42	0.0778	2.75
RMS value	0.1429	5.85	0.2266	5.40	0.0837	4.63
Orthogonal	0.1419	5.11	0.2282	6.14	0.0862	7.75
Peak voltage	0.1538	13.93	0.2163	0.60	0.0625	21.88

5.5.2 การคำนวณที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น



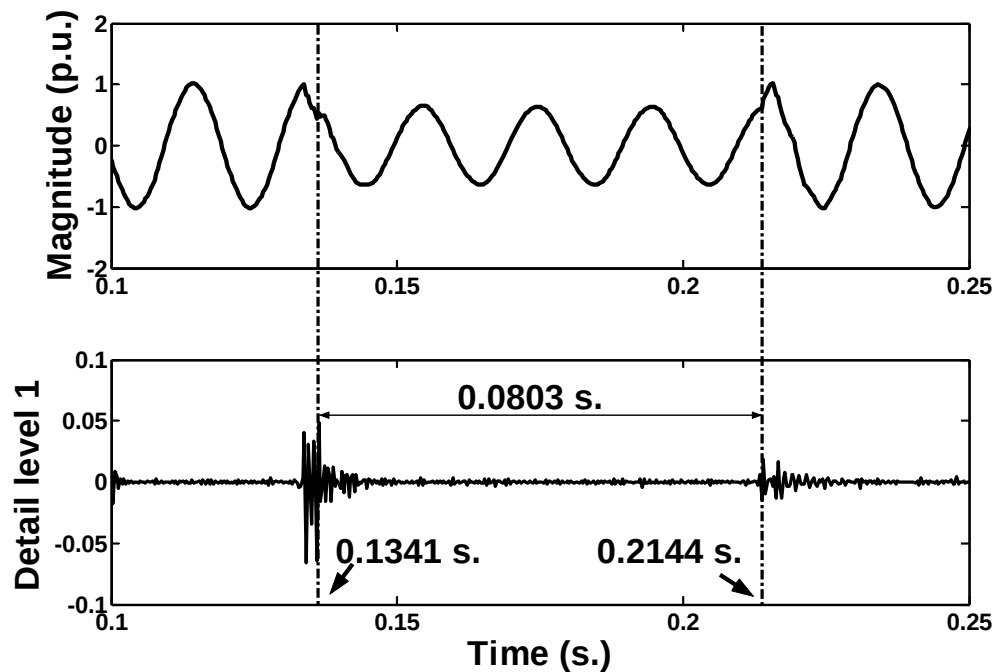
ภาพที่ 5-47 ผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง
Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี โดยใช้
หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-47 แสดงผลการคำนวณขนาดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งสามารถสรุปความลึกของแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากทั้ง 4 วิธีตามตารางที่ 5-15

ตารางที่ 5-15 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หาได้จากทั้ง 4 วิธี ที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

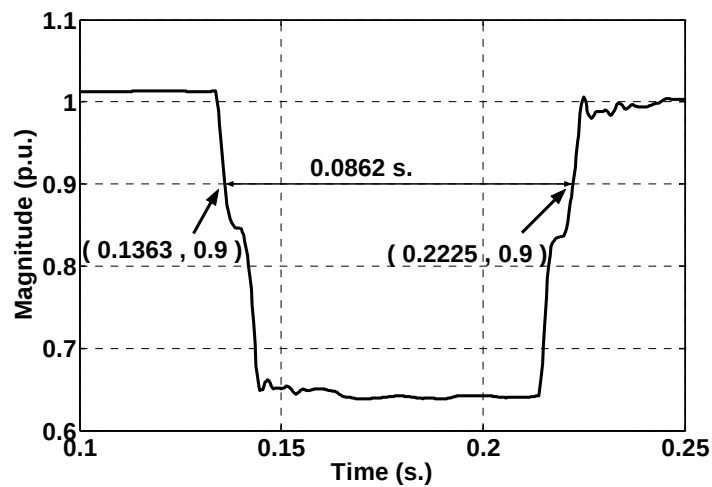
	Wavelet	RMS	Orthogonal	Peak voltage
Magnitude (p.u.)	0.6387	0.6385	0.6386	0.7639
Error (%)	1.74	1.77	1.75	17.52

จากตารางที่ 5-15 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีความลึกของแรงดันตกชั่วขณะเท่ากับ 0.65 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด



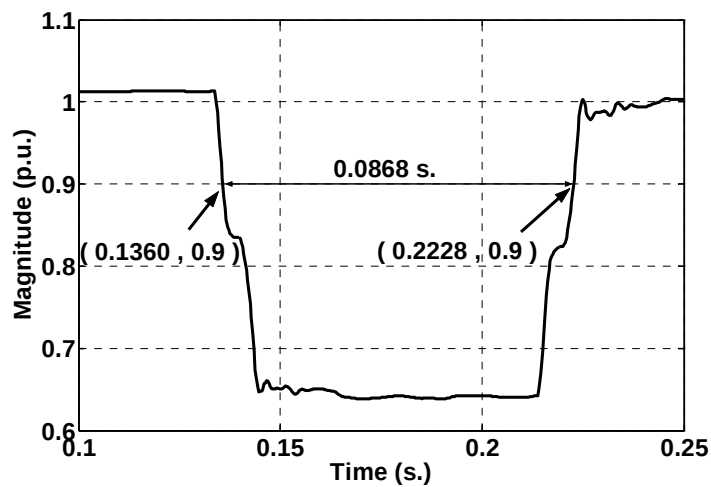
ภาพที่ 5-48 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-48 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1341 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2144 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0803 วินาที



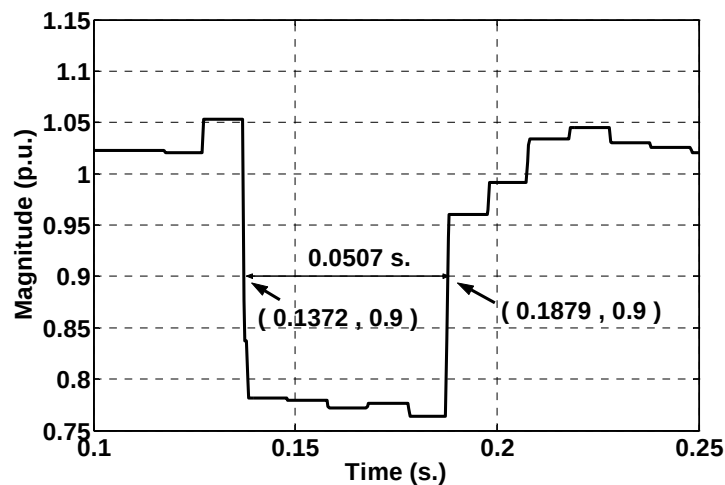
ภาพที่ 5-49 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-49 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่ารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1363 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2225 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0862 วินาที



ภาพที่ 5-50 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการแยกองค์ประกอบ
 ออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของ
 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-50 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการแยก
 องค์ประกอบออโรคอนอลของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของ
 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะ
 อยู่ที่ 0.1360 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.2228 วินาที และช่วงเวลาของแรงดัน
 ตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0868 วินาที



ภาพที่ 5-51 ผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

ภาพที่ 5-51 แสดงผลการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะ โดยวิธีการหาค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ซึ่งจุดเริ่มต้นของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1372 วินาที จุดสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 0.1879 วินาที และช่วงเวลาของแรงดันตกชั่วขณะมีค่าเท่ากับ 0.0507 วินาที

จากข้อมูลตามภาพที่ 5-48 ถึง 5-51 สามารถนำมาเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นได้ตามตารางที่ 5-16

จากตารางที่ 5-16 สามารถสรุปได้ว่า ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเลตสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโรคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเลตให้ข้อมูลใกล้เคียงกับรูปคลื่นสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะที่มีช่วงเวลาของแรงดันตก 0.08 วินาทีคือตั้งแต่ 0.135 ถึง 0.215 วินาทีมากที่สุด

ตารางที่ 5-16 การเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ
ที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้า ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

Method	Start time (s.)	Error (%)	End time (s.)	Error (%)	Duration (s.)	Error (%)
Wavelet	0.1341	0.67	0.2144	0.28	0.0803	0.38
RMS value	0.1363	0.96	0.2225	3.49	0.0862	7.75
Orthogonal	0.1360	0.74	0.2228	3.63	0.0868	8.50
Peak voltage	0.1372	1.63	0.1879	12.60	0.0507	36.63

จากข้อมูลตามตารางที่ 5-13 และ 5-15 การเปรียบเทียบความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น และ 1/2 ลูกคลื่นตามลำดับนั้น สรุปได้ว่า สำหรับการหาความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะวิธีการแปลงเวฟเล็ตเหมาะสมกับหน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น เนื่องจากที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น

จากข้อมูลตามตารางที่ 5-14 และ 5-16 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากเครื่อง Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นและ 1/2 ลูกคลื่นตามลำดับนั้น สรุปได้ว่า สำหรับการหาช่วงเวลาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะวิธีการแปลงเวฟเล็ตเหมาะสมกับหน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น เนื่องจากที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ตมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าที่หน้าต่งรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเป็นประเด็นที่ถูกกล่าวถึงมาก เนื่องจากเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดทำงานและชำรุดเสียหาย ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ได้แก่ ทรานเซียนต์หรือสภาวะชั่วครู่ แรงดันตกชั่วขณะ ไฟฟ้าดับ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันตก แรงดันเกิน การบิดเบี้ยวของรูปคลื่น แรงดันไม่สมดุล แรงดันกระเพื่อม และการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น ซึ่งในบรรดาปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้น แรงดันตกชั่วขณะเป็นปัญหาที่พบมากและก่อให้เกิดความเสียหายได้มากที่สุด การจำแนกประเภทปัญหาแรงดันตกชั่วขณะมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ

งานวิจัยนำเสนอวิธีการคำนวณ จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุดและขนาดของแรงดันตกชั่วขณะโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตและทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ กับวิธีที่นิยมใช้ 3 วิธี ได้แก่ วิธีหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบแรงดัน และวิธีการหาค่ายอดของแรงดัน โดยใช้สัญญาณทดสอบจากแหล่งที่มา 3 ทางคือ การสร้างแรงดันตกชั่วขณะจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC สัญญาณทดสอบที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE1159.2 และสัญญาณทดสอบที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วิธีการที่กล่าวถึงทั้งหมดจะถูกนำมาจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB

6.1 สรุปผลการจำลองการทำงาน

6.1.1 จากการทดสอบอัลกอริทึมกับสัญญาณทดสอบขนาด 1 เพอร์ยูนิตที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1, 1/2 และ 1/4 ลูกคลื่น แสดงให้เห็นว่า วิธีการแปลงเวฟเล็ต วิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโคโนด และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน มีความเหมาะสมกับการใช้คำนวณหาขนาดของแรงดันที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นและ 1/2 ลูกคลื่น เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลที่ตรงกับขนาดของสัญญาณทดสอบคือ 1 เพอร์ยูนิต สำหรับที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาด 1/4 ลูกคลื่น ไม่เหมาะสมกับการใช้คำนวณหาขนาดของแรงดัน เนื่องจากเกิดการแกว่งของข้อมูลอยู่ในช่วงใกล้เคียงค่า 1 เพอร์ยูนิต

6.1.2 จากการทดสอบอัลกอริทึมด้วยสัญญาณทดสอบแรงดันตกชั่วขณะ เพิ่ม Noise 0.1 เพอร์เซ็นต์ที่สร้างจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC พบว่า ที่หน้าต่างรับข้อมูลขนาดเท่ากัน วิธีการ

แปลงเวฟเล็ดสามารถให้ข้อมูลของจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และขนาดแรงดันตกชั่วขณะได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน แสดงว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ดสามารถทนต่อ Noise ได้ดีกว่าวิธีการอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ก่อนนำมาทำการคำนวณจะต้องนำสัญญาณมาผ่านฟิลเตอร์เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกก่อน

6.1.3 จากการทดสอบอัลกอริทึมกับสัญญาณทดสอบที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE1159.2 และสัญญาณทดสอบที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่าที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ดสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และขนาดของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ดให้ข้อมูลที่มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน

6.1.4 จากการทดสอบอัลกอริทึมกับสัญญาณทดสอบที่ได้จากกลุ่มทำงานด้านคุณภาพไฟฟ้าของ IEEE1159.2 และสัญญาณทดสอบที่ได้จาก Fault Recorder ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่าที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น วิธีการแปลงเวฟเล็ดสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และขนาดของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ได้ดีกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน เนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ดให้ข้อมูลที่มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการหาค่าอาร์เอ็มเอส วิธีการแยกองค์ประกอบอโอคอนอล และวิธีการหาค่ายอดแรงดัน

6.1.5 สำหรับการหาความลึกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ วิธีการแปลงเวฟเล็ดเหมาะสมกับหน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น เพราะที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นนั้น มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น เนื่องจากการคำนวณขนาดแรงดันที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น มีข้อมูลในการคำนวณมากกว่าที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ทำให้สามารถคำนวณขนาดแรงดันตกชั่วขณะได้ใกล้เคียงมากกว่า

6.1.6 สำหรับการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ดเหมาะสมกับหน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นมากกว่าหน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น เพราะการคำนวณที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่นมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดแรงดันตกชั่วขณะต่ำกว่าการคำนวณที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่น เนื่องจากการคำนวณหาขนาดแรงดันที่หน้าตารับข้อมูลขนาด 1 ลูกคลื่นมีข้อมูลเท่าที่ใช้ในการคำนวณมากกว่า

การคำนวณขนาดแรงดันที่หน้าตัวรับข้อมูลขนาด 1/2 ลูกคลื่น ทำให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ช้ากว่า

6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยต่อไป

6.2.1 ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับวิธีอื่นๆ เช่น วิธีการตรวจจับแบบ DQ (DQ detection method) เป็นต้น

6.2.2 ศึกษาค้นคว้าหาแนวทางพัฒนาวิธีการที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ทรานเซียนต์ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับ

6.2.3 ศึกษาค้นคว้าหาแนวทางพัฒนาวิธีการที่นำเสนอให้เป็นเครื่องมือสำหรับการประมวลผลของสัญญาณเพื่อแบ่งแยกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Classification) แบบอัตโนมัติ เพื่อนำไปใช้ในการติดตามและบันทึกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในสถานการณ์จริง

เอกสารอ้างอิง

1. Bollen, Math H. J. Understanding Power Quality Problem Voltage Sags and Interruptions. New York : IEEE press, 2000.
2. Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. and Beaty, H. W. Electrical Power Systems Quality. New York : McGraw-Hill, 1996.
3. IEEE : 1159-1995, Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality.
4. J. Stones. and A. Collinson. "Power Quality." Power Engineering Journal. 15 (2001) : 58-64.
5. Kennedy, Barry W. Power Quality Primer. New York : McGraw-Hill, 2000.
6. C. J. Melhorn. and M. F. McGranaghan. "Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements." IEEE Transactions on Industry Applications. 31 (1995) : 1363-1370.
7. ชวรงค์ วัฒนศักดิ์ภูบาล. สัญญาณไฟฟ้าจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง. [เครื่องบันทึกสัญญาณฟอลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค]. 13 เมษายน 2547.
8. วัฒนา ครอบพาณิชย์ และธีรธรรม บุญยะกุล. "วิธีการคำนวณขนาดของแรงดันสำหรับการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้ากำลัง." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. 645-648. รวบรวมและจัดพิมพ์โดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548.
9. โตศักดิ์ ทศนานนตรียะ. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2540.
10. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การป้องกันระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : เอ็มเอนด์อี, 2545.
11. Rafael, A. F. Signal Processing Tools for Power Quality Event Classification. Ph.D. Thesis, School of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, 2003.
12. Z. Q. Wang. and S. Z. ZHU. "Comparative Study on Power Quality Disturbance Magnitude Characterization." IEEE Large Engineering System Conference on Power Engineering. 1(2002) : 106-111.
13. สุศักดิ์ ทองธรรมชาติ. คณิตศาสตร์สำหรับวิศวกรไฟฟ้าสื่อสาร. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539.
14. เอก ไชยสวัสดิ์. สัญญาณและระบบ. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543.

15. A. T. Johns. and S. K. Salman Digital Protection For Power Systems. IEE Power series. No.15. London : Peter Peregrinus Ltd., 1997.
16. Misiti, M., et al. 2001. Wavelet Toolbox User's Guide. Available online at [http:// www.ma.utexas.edu/users/davis/reu/ch3/cwt/manual.pdf](http://www.ma.utexas.edu/users/davis/reu/ch3/cwt/manual.pdf) [2003, July 7].
17. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. New York : Capital City Press, 1992.
18. Sarkar, T. K., et al. 1998. "A tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective. I. Discrete wavelet techniques." IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine. 40 (Oct. 1998) : 49-70.
19. Sarkar, T. K., et al. 1998. "A tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective .2. The continuous case." IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine. 40 (Dec. 1998) : 36-49.
20. วัฒนา ครอบพาณิชย์, อภิวัช ทันทานวัณภู และธีรธรรม บุญยะกุล. "การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเลต สำหรับวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29. 469-472. รวบรวมและจัดพิมพ์โดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549.
21. Wikinson, W. A. and Cox., M. D. 1996. "Discrete wavelet analysis of power system transients." IEEE Transactions on Power systems. 11 (Nov. 1996) : 2038-2044.
22. Gauda, A. M. , et al. 1999. "Power quality detection and classification using wavelet multiresolution signal decomposition." IEEE Transactions on Power Delivery. 14 (Oct. 1999) : 1469-1475.
23. Magnago, F. H and Abur, A. 1998. "Faults location using wavelets." IEEE Transactions on Power Delivery. 13 (Oct. 1998) : 1475-1480.
24. Parsons, A., Grady W. M. and Powers, E. J. "A wavelet-based procedure for the automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags." Proc. Of IEEE PES 1999 Winter Meeting. 1 (1999) : 1310-1315.
25. Morgan, L. 1999. IEEE Power Quality Event Characterization : Fault related Sag Test Waveforms. Available online at <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/> [2004, July 7].

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายวัฒนา ครอบพาณิชย์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ท สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 1075-1077 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการบริหารเทคโนโลยี จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2544

ประวัติการทำงาน เริ่มทำงานเมื่อปี พ.ศ. 2543 ในตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 แผนกบริการอุตสาหกรรม กองบริการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จ.นครราชสีมา ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกรระดับ 6 ช่วยปฏิบัติราชการสำนักงานรองผู้ว่าราชการและบริหาร ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่

ผลงานทางวิชาการ นำเสนอบทความเรื่อง วิธีการคำนวณขนาดของแรงดันสำหรับการติดตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้ากำลัง ที่งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 (EECON-28) เมื่อวันที่ 20-21 ต.ค. 2548 และบทความเรื่อง การคำนวณขนาดของแรงดันโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ท สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ ที่งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON-29) เมื่อวันที่ 9-10 พ.ย. 2549