

การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและ
โครงข่ายประสาทเทียม

POWER QUALITY PROBLEMS CLASSIFICATION USING
WAVELET TRANSFORM AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ชาญณรงค์ หนูอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและ
โครงข่ายประสาทเทียม

ชาญณรงค์ หนูอินทร์

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและ โครงข่ายประสาทเทียม
ชื่อ-นามสกุล	นายชาญณรงค์ หนูอินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

คุณภาพไฟฟ้าเป็นความมั่นคงการจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ต้องไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามี
การทำงานผิดพลาด อายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดการเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ก็อีก เนื่องจากใน
ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น มีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง
แรงดัน กระแส และความถี่ ซึ่งปัญหาคุณภาพไฟฟ้าไม่อาจจะคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาใด
หรือมีความรุนแรงในระดับใด และปัญหาดังกล่าวจะต้องได้รับการแก้ไขและป้องกันได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนการค้นหาและระบุตำแหน่งช่วงเวลาที่เกิดปัญหาคุณภาพ
ไฟฟ้า ประกอบด้วยสัญญาณแรงดัน กระแส และความถี่ รวม 12 รูปแบบ มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลา
จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ และการสกัดจุดเด่นในแต่ละระดับความ
ละเอียดเพื่อการจัดจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ชนิด db4 ที่
อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการ
เปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว และการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้น ใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ ทำการจำลอง
ในโปรแกรม MATLAB

ผลที่ได้จากการนำเสนอ คือ การค้นหาและระบุตำแหน่ง ผลจากการทดสอบได้ค่าความ
คลาดเคลื่อนในการค้นหาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณร้อยละ 0.015625 และผลการจำแนก
ปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามีความถูกต้องร้อยละ 100 โดยไม่ได้พิจารณาคุณภาพไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส
อิมพัลส์ชั่วคราว อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ คลื่นรบกวน สัญญาณรบกวน และแรงดันกระเพื่อม ดังนั้นหากทำ
การค้นหาและระบุตำแหน่ง และจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ สามารถหาวิธีการแก้ไขหรือป้องกันที่
เหมาะสม เพื่อลดความเสียหายอันเกิดจากปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิดได้

คำสำคัญ : คุณภาพไฟฟ้า การแปลงเวฟเล็ต การสกัดจุดเด่น โครงข่ายประสาทเทียม

Thesis Title	Power Quality Problems Classification Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks
Name-Surname	Mr. Channarong Nuin
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Surin Ngaemngam, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Power quality means to a stability of the power distribution in a normal situation. Good power quality may not cause any malfunctions in electrical appliances, the loss of its life-long, and the fatal damage of the appliances. In the present, the electrical equipments with high technology function are actually used. Their sensitive reaction have effect on response in terms of voltage current and frequency. Accordingly, the level of severe conditions and power quality problem could not be predicted correctly on specific time. Then these causes must be solved and be prevented continuously.

This thesis is conducted in order to present the process of detection the type and time duration of the problem of power quality is occurred which are samples of the 12 patterns of voltage current and frequency. All sample patterns are studied to find the starting and ending point of the faulted signal and the extraction at each level to identify the power quality problem through db4 discrete wavelet transform. Through the technique of the multi-resolution analysis, it is possible to emphasize on the affect of the change of the signal in specific situation timely and promptly. The identification of power quality is conducted through the two-layers of the artificial neural network with a back-propagation learning and simulated by MATLAB programme.

The result shows the detection and localization and the deviation rate at the change of the signal at 0.015625 percent and the identification of the power quality has the accuracy rate at 100 percent regardless the power quality of three-phase system oscillatory transient interharmonic notching noise and voltage fluctuation. Consequently, if it is possible to detect, localize and identify the power quality, it shall be possible to find a solution or proper prevention to minimize any damage caused by power quality.

Keywords : power quality, wavelet transform, feature extraction, artificial neural networks

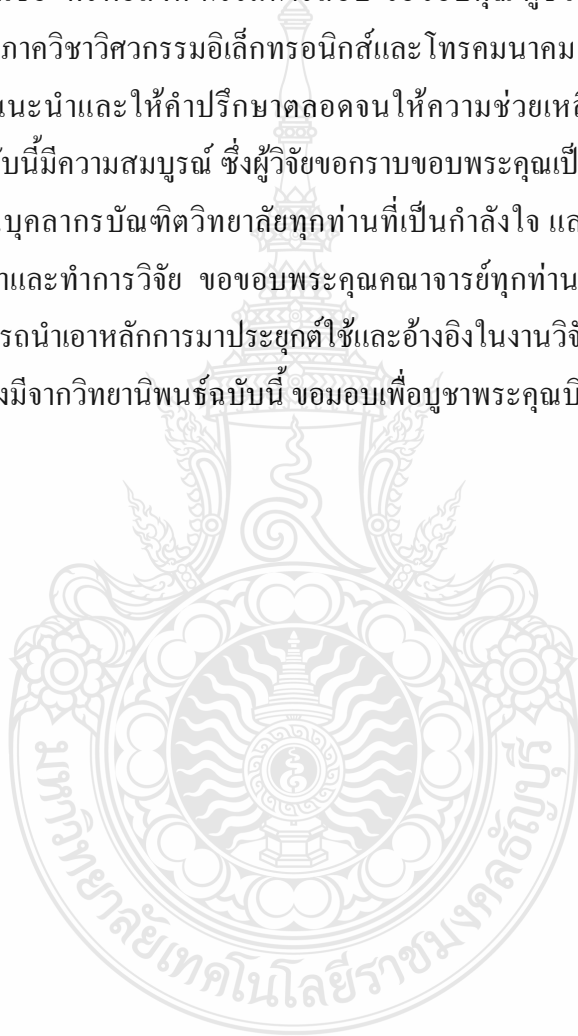
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สุรินทร์ แห่งมงาม และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ ผู้ทรงคุณวุฒิ ขอขอบคุณ ดร. ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์ กรรมการสอบ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพล จิรจรีด อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชาญณรงค์ หนูอินทร์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของวิทยานิพนธ์.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คำจำกัดความของคุณภาพไฟฟ้า.....	5
2.2 การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า.....	7
2.3 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์.....	9
2.4 มาตรฐานและข้อกำหนดทางไฟฟ้า.....	17
2.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality).....	23
2.6 พื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ท.....	35
2.7 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANNs).....	45
2.8 การสำรวจเอกสาร (Literature Reviews).....	61
2.9 สรุปผลการศึกษาทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	64
3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	67
3.1 การออกแบบจำลองปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	67
3.2 การออกแบบจำลองระบบการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้า.....	68

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การออกแบบจำลองสัญญาณความถี่พ่วงของระบบไฟฟ้า.....	77
3.4 การพิจารณาและการกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการจำแนก ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	92
4 ผลการทดลอง.....	96
4.1 ผลการทดลองการตรวจจับสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	96
4.2 ผลการทดลองการจัดจำแนก (Identification) ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	110
4.3 ผลการทดลองการจำแนกปัญหาคุณภาพ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	122
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	136
5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	138
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	144
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	155
ประวัติผู้เขียน.....	179

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อุปกรณ์ควบคุมและภาระทางไฟฟ้าสามารถทำงานได้ปกติ...	7
2.2 ค่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้า (System Voltage) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	18
2.3 ค่ามาตรฐานความถี่ไฟฟ้า (System Frequency) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	18
2.4 ผลของกระแสไฟฟ้าร่างกายที่กระแสไหลผ่าน ตามมาตรฐาน IEC 60479-1.....	21
2.5 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class A.....	22
2.6 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class C.....	23
2.7 ค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้นกับช่วงระยะเวลาการเกิดของอิมพัลส์.....	25
2.8 ขนาดแรงดันและช่วงเวลาตามความถี่ของสวิตช์ตัวรู้.....	25
2.9 ระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงเวลาสั้นๆ.....	27
2.10 สรุปประเภทของลักษณะคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009.....	33
2.11 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class D.....	35
2.12 รูปแบบโครงข่ายประสาทดัดแบบต่างๆ.....	51
2.13 อัลกอริทึมสำหรับการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทดัดแบบแพร่กระจายย้อนกลับ.....	59
2.14 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้.....	65
3.1 ระดับรายละเอียด และย่านความถี่ในแต่ละระดับความละเอียด.....	71
3.2 ชนิดของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ใช้.....	77
3.3 การพิจารณาค่าเป้าหมายของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด.....	94
4.1 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดัน ไซน์ปกติ.....	96
4.2 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ.....	98
4.3 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ.....	99
4.4 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์.....	100
4.5 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์.....	101
4.6 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ.....	102
4.7 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสเกิน.....	103
4.8 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์.....	104
4.9 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน.....	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์...	106
4.11 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณความถี่ต่ำเกิน.....	107
4.12 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณความถี่สูงเกิน.....	108
4.13 จำนวนชุดการเรียนรู้ (Training Set) และชุดการทดสอบ (Testing).....	123
4.14 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรeronเท่ากับ 5.....	127
4.15 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรeronเท่ากับ 6.....	129
4.16 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรeronเท่ากับ 7.....	131
4.17 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรeronเท่ากับ 8.....	133
4.18 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรeronเท่ากับ 9.....	135



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ลักษณะของเวฟเล็ดแม่ชนิด Daubechies 4 (db4).....	2
2.1 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ประกอบด้วยส่วนประกอบความถี่หลักมูลโดยมีฮาร์โมนิกที่ 3 และค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกสร่วม (THD) เท่ากับ 30%.....	11
2.2 จำลองสถานะที่การไฟฟ้าฯ จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดแบบเชิงเส้น.....	13
2.3 จำลองสถานะที่การไฟฟ้าฯ จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดแบบไม่เชิงเส้น.....	14
2.4 ผลกระทบของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่โหลดแบบต่างๆ.....	16
2.5 กราฟแสดงโชนระหว่างเวลาและกระแสไฟฟ้าที่มีผลของกระแสไฟสลับต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อไหลผ่านจากมือซ้ายไปยังเท้า.....	20
2.6 วงจรแสดงการทำงานของเครื่องตัดไฟรั่ว.....	21
2.7 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิด โดยฟ้าผ่า.....	24
2.8 กระแสอสซิมเมตริคชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบ Back-to-Back.....	25
2.9 แรงดันอสซิมเมตริคความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ.....	26
2.10 แรงดันอสซิมเมตริคความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากเฟอโรเรโซแนนซ์ในสถานะหม้อแปลงไม่มีโหลด.....	26
2.11 ไฟฟ้าดับชั่วคราวจากสาเหตุรีโคลสเซอร์มีการทำงาน เนื่องจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า.....	27
2.12 ไฟฟ้าดับชั่วคราวเนื่องจากสาเหตุการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าลงดิน.....	28
2.13 ไฟฟ้าดับชั่วคราวเนื่องจากผลของการสตัดร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่.....	28
2.14 แรงดันเกินชั่วคราวจากสาเหตุการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าลงดิน.....	29
2.15 แรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟให้ที่พักอยู่อาศัย.....	30
2.16 กระแสฮาร์โมนิก.....	31
2.17 คลื่นรบกวนที่เกิดจากคอนเวอเตอร์ชนิด 3 เฟส.....	32
2.18 แรงดันกระเพื่อม.....	33
2.19 ลักษณะของเวฟเล็ดแม่ชนิด Daubechies 4 (db4).....	36
2.20 ลักษณะของเวฟเล็ดแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a, b ต่างๆ กัน.....	37
2.21 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ด.....	37
2.22 ลักษณะการกระจายสัญญาณของสเปซเวคเตอร์.....	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 ลักษณะการกระจายสัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่างๆ.....	41
2.24 การกระจายสัญญาณ โดยใช้ฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ.....	43
2.25 การสร้างกลับสัญญาณ โดยใช้ฟิลเตอร์เบงค์แบบสองช่องสัญญาณ.....	43
2.26 การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างแบบต้นไม้โคอะดิก.....	44
2.27 การสร้างกลับสัญญาณ โดยซินเธอร์ซีสฟิลเตอร์เบงค์แบบสองช่องสัญญาณ.....	44
2.28 การแปลงกลับเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างแบบต้นไม้โคอะดิก.....	45
2.29 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแฉียง.....	48
2.30 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแฉียงสมมาตร.....	48
2.31 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น.....	49
2.32 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอกซิกมอยด์.....	49
2.33 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์.....	49
2.34 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นจำกัด.....	50
2.35 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งเพอร์เซปตรอน.....	53
2.36 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนสองชั้น.....	56
2.37 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนสามชั้น.....	57
2.38 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้นแบบย่อ.....	58
2.39 โครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด.....	60
3.1 บล็อกโคอะแกรมจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	67
3.2 โครงสร้างของเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า...	68
3.3 โครงสร้างของเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียด สัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด.....	69
3.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่อาศัยเทคนิคของ การแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด.....	70
3.5 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ มีขนาดแรงดันเท่ากับ 176 โวลต์อาร์เอ็มเอส.....	71
3.6 บล็อกโคอะแกรมในการหาเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ.....	72
3.7 ส่วนหัวและท้าย จะเกิดความแตกต่างของข้อมูล ทำให้การจำแนกคุณภาพไฟฟ้า ผิดพลาด.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 กลุ่มช่วงเวลาที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่ตัวกรองการกระจาย ความถี่สูง ระดับความละเอียดที่ 1 (d1).....	73
3.9 การหาจุดเริ่มต้น (Starting Point) โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT).....	73
3.10 การหาจุดสิ้นสุด (Ending Point) โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT).....	73
3.11 บล็อกไดอะแกรมการสกัดจุดเด่นในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย.....	76
3.12 ตัวอย่างสัญญาณแรงดัน ไซนัสปกติ ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	79
3.13 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	80
3.14 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	81
3.15 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด เมื่อ $\alpha_3, \alpha_5 = 0.15$	83
3.16 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด เมื่อ $\alpha_3, \alpha_5 = 0.15$	84
3.17 ตัวอย่างสัญญาณไฟดับชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	85
3.18 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเกินที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	86
3.19 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	87
3.20 ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าร่วลงดินที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด.....	88
3.21 ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าร่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลง เวฟเล็ด.....	89
3.22 ตัวอย่างสัญญาณความถี่ต่ำเกิน เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 48 เฮิรท์ซ์.....	91
3.23 ตัวอย่างสัญญาณความถี่สูงเกิน เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 52 เฮิรท์ซ์.....	92
3.24 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า.....	95
4.1 ความผิดพลาดในการค้นหา ตำแหน่งเวลา 0.064 วินาที.....	109
4.2 การค้นหาของสัญญาณความถี่ต่ำ/สูงเกิน ณ ตำแหน่งเวลา 0.16 วินาที.....	110
4.3 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดัน ไซนัสปกติ ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ (100%).....	111
4.4 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80%.....	111
4.5 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	112

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80%.....	112
4.7 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	113
4.8 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ ขนาดแรงดัน 120%, 135%, 150%, 165% และ 180%.....	113
4.9 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	114
4.10 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ขนาดแรงดัน 120%, 135%, 150%, 165% และ 180%.....	114
4.11 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	115
4.12 ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ ขนาดแรงดัน 0%, 1%, 2%, 3% และ 7%.....	115
4.13 ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	116
4.14 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกิน ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A...	116
4.15 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	117
4.16 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A.....	117
4.17 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	118
4.18 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA.....	118
4.19 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	119
4.20 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA.....	119
4.21 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	120
4.22 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่ต่ำเกินขนาด 45Hz, 46Hz, 47Hz, 48Hz และ 49Hz.....	120
4.23 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่ต่ำเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.24 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่สูงเกิน ขนาด 51Hz, 52Hz, 53Hz, 53Hz และ 55Hz....	121
4.25 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่สูงเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล.....	122
4.26 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 2..	124
4.27 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 3..	124
4.28 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 4..	125
4.29 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 471 รอบ.....	126
4.30 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 241 รอบ.....	128
4.31 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 38 รอบ.....	130
4.32 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 48 รอบ.....	132
4.33 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 80 รอบ.....	134



บทที่ 1

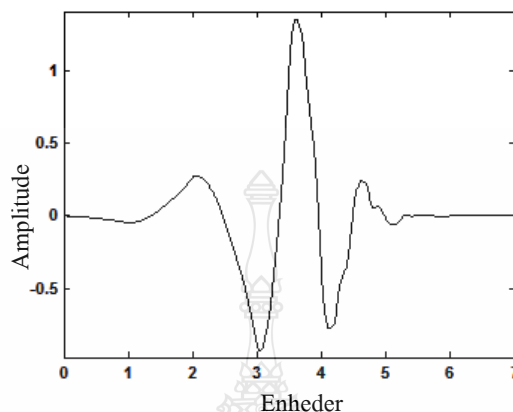
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบ และผลกระทบที่มีต่อภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับประเภทของภาระทางไฟฟ้านั้นๆ ด้วยว่าสามารถทนต่อการรบกวนในแต่ละรูปแบบได้มากน้อยเพียงใด การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า มาตรฐาน IEEE Std. 1159-2009 [1] สามารถพิจารณาได้จากระยะเวลาของการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และวิธีการป้องกัน หรือมาตรการแก้ไข ที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะแรงดันไฟฟ้าปกติได้อย่างรวดเร็วมากน้อยเพียงใด อาทิเช่น การติดอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ที่เหมาะสม การบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเชิงป้องกันและอื่นๆ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนั้น บางครั้งไม่อาจคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใด และการเกิดอาจจะเป็นเพียงการเกิดแรงดันกระพริบ หรือทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง และทำให้ไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลานานอาจเป็นไปได้ การเปลี่ยนแปลงของควมถี่ไฟฟ้าจากค่ามาตรฐานของการไฟฟ้า [2-3] อาจจะมีผลกระทบต่อภาระทางไฟฟ้าบางประเภท อาทิ เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารต่างๆ หรืออื่นๆ ในบางครั้งสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า อาจจะมาจกผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ หรือรูปคลื่นผิดเพี้ยนไป ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะปกติก็ตาม แต่อาจจะพบสิ่งผิดปกติได้ อาทิเช่น เครื่องกำเนิด หรือมอเตอร์เครื่องอื่นผิดปกติ คาปาซิเตอร์เกิดระเบิดโดยไม่ทราบสาเหตุบ่อยครั้ง หรือไม่ระบบสื่อสารและระบบควบคุมต่างทำงานผิดปกติไป เป็นต้น

ระบบไฟฟ้า สิ่งที่ต้องการคือ ให้ระบบสามารถที่จะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะต้องมีพลังงานไฟฟ้าพร้อมที่จะจ่ายให้แก่เครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ตลอดเวลา โดยความเป็นจริงในระบบที่เกิดกระแสที่มีขนาดมากกว่าปกติหรือกระแสเกิน (Over Current) ไหลผ่านแล้วย่อมจะเกิดอันตรายมาก เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลา และความถี่เท่านั้น จะเสียเวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่าน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้น ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว การแปลงนี้เรียกว่า การแปลงเวฟเลต [4] จะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า เวฟเลต ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของ

คลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งเป็นเวฟเลตชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เวฟเลตแบบ Daubechies 4 (db4)



ภาพที่ 1.1 ลักษณะของเวฟเลตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) [5]

ดังนั้นการทําวิจัยเรื่อง “การจําแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้การแปลงเวฟเลตและโครงข่ายประสาทเทียม” โดยมีการตรวจจับสัญญาณ (การค้นหา และระบุตำแหน่ง) ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ (Fault) 12 ชนิด ได้แก่ ประกอบด้วย แรงดันปกติ แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ไฟดับชั่วขณะ กระแสเกิน กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ความถี่ต่ำเกิน และ ความถี่สูงเกิน ใช้วิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) และการจําแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANNs) โดยทํางานจำลองในโปรแกรม MATLAB กำเนิดสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 มาตรฐานระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 และมาตรฐาน IEC 1000-3-2

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาการแปลงเวฟเลตในการค้นหา และระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติบนรูปคลื่นคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิด

1.2.2 เพื่อศึกษาการแปลงเวฟเลต ในการจัดจําแนกคุณภาพไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีความสามารถในการจําแนกคุณภาพไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์เพื่อการตรวจจับสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า ในการหาจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของสัญญาณ โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต

1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์เพื่อจำแนกคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159 - 2009 มาตรฐานระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 และ IEC 1000-3-2 ทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB

1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาพฤติกรรม และผลกระทบจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า
- 1.4.2 ศึกษามาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทางด้านระบบไฟฟ้า
- 1.4.3 ศึกษาและออกแบบจำลองสัญญาณความผิดปกติของระบบไฟฟ้า
- 1.4.4 ศึกษาและออกแบบจำลองระบบการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้า
- 1.4.5 ศึกษาและออกแบบการจำแนกปัญหาคุณภาพ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
- 1.4.6 ทดสอบการทำงานทั้งระบบ และเก็บข้อมูล
- 1.4.7 ปรับปรุงแก้ไขให้ได้ตามข้อกำหนด และรวบรวมข้อมูล
- 1.4.8 สรุปผลการดำเนินงาน และจัดพิมพ์งานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถจัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าที่ถูกต้อง และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมได้

1.5.2 สามารถค้นหา และระบุตำแหน่ง รวมถึงการจําแนกคุณภาพไฟฟ้า ได้อย่างแม่นยำ และถูกต้อง

1.5.3 สามารถจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า จากสภาวะที่เกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเกิน กระแสไฟรั่วลงดิน เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน และเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับความถี่ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ

1.5.4 สามารถนำวิธีการแปลงเวฟเล็ต และ โครงข่ายประสาทเทียม ไปประยุกต์ใช้ในงานระบบไฟฟ้าได้

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

การศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาการจำแนกชนิดของคุณภาพไฟฟ้า ระบบ 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรท์ส กระแสพิกัด 10 แอมแปร์ ดังนี้

- 1.6.1 แรงดันปกติ
- 1.6.2 แรงดันตกชั่วขณะ
- 1.6.3 แรงดันเกินชั่วขณะ
- 1.6.4 แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 1.6.5 แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 1.6.6 ไฟดับชั่วขณะ
- 1.6.7 กระแสเกิน
- 1.6.8 กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 1.6.9 กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน
- 1.6.10 กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 1.6.11 ความถี่ต่ำเกิน
- 1.6.12 ความถี่สูงเกิน

โดยไม่ได้พิจารณาคุณภาพไฟฟ้าระบบ 3 เฟส และชนิดอื่นๆ เช่น อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive Transients) สภาวะชั่วครู่ในลักษณะของการออสซิลเลเตอร์ (Oscillatory Transient) อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ (Interharmonic) คลื่นรอยบาก (Notching) สัญญาณรบกวน (Noise) และ แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการของ โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจสอบและประมวลผลที่มีความสามารถในการพิจารณาและตัดสินใจได้ว่า เกิดสิ่งผิดปกติในระบบไฟฟ้าหรือไม่ จึงต้องทำความเข้าใจกับทฤษฎี และหลักการของส่วนประกอบของระบบไฟฟ้า ลักษณะและผลกระทบของสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้น รวมไปถึงวิธีการและหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ เพื่อจำแนกให้ได้ว่าเกิดสิ่งผิดปกติชนิดใดในระบบไฟฟ้า

2.1 คำจำกัดความของคุณภาพไฟฟ้า

คำจำกัดความของคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE มีความหมายถึงลักษณะของ กระแสและแรงดัน และความถี่ ของแหล่งจ่ายไฟในสถานะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้า มีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย ในปัจจุบันเรื่องของคุณภาพไฟฟ้าเป็นที่สนใจและนำมาพิจารณากันมาก เนื่องจากสาเหตุใหญ่ๆ คือ กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูง มีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ไฟฟ้าในการปรับ/เพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า เช่น การต่อชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้า ในปัจจุบันมีการต่อเชื่อมโยงถึงกัน ถ้าส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบมีปัญหาหรือจ่ายฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ จะทำให้อุปกรณ์หรือระบบข้างเคียงได้รับผลกระทบ

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าเสียไปนั้น อาจแบ่งแยกสาเหตุออกได้หลายรูปแบบ เช่น ปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ไฟฟ้า ความผิดพลาดในระบบส่งกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก การทำงานของอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง (Switching) การทำงานของอุปกรณ์ประเภทไม่เชิงเส้น การต่อกราวด์ (Grounding) ในระบบไม่ถูกต้อง เป็นต้น เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าขึ้น ย่อมจะทำให้ลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน กระแส ตลอดจนความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น เรียกรวมว่าเป็น “มลภาวะทางไฟฟ้า (Electrical Pollution)” คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า แล้วทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าหรือโหลด ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ หรือ อาจเกิดปัญหาให้โหลดเสียหายได้ โดยสามารถแบ่งมลภาวะทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งกำลังแบบ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{RMS}) ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hertz)

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า หมายถึงปัญหาการเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือความถี่ที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่งคือ ไฟฟ้าที่มีคุณภาพที่ดีจะไม่ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ของผู้ใช้งานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายขึ้นอันเนื่องมาจากความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือความถี่ (ที่มา: สมาคมผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน <http://www.appp.or.th/article.php?articlecat=2&articleid=3>)

ตัวอย่างที่ 1 หลอดไฟขนาด 100 วัตต์ ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ถ้าแรงดันไฟฟ้าตกลงถึง 198 โวลต์ (-10%) หลอดไฟจะยังคงทำงานโดยการเปล่งแสง แต่ปริมาณแสงที่ได้จะลดน้อยลงหรือหรี่ลง หากเป็นไฟดับจะทำให้หลอดไฟดับเช่นกัน จะเห็นว่าทั้งแรงดันไฟฟ้าตกหรือไฟดับ หลอดไฟจะไม่เกิดความเสียหายขึ้น ในทางกลับกันหากแรงดันไฟฟ้าเกินเพิ่มขึ้นถึง 242 โวลต์ (+10%) หลอดไฟจะเปล่งแสงออกมาได้มากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ จะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไป และเกิดความเครียดกับเส้นลวดของหลอดไฟ จะทำให้หลอดไฟมีอายุการทำงานสั้นลงหรือหลอดไฟเสียหายขาดได้

ตัวอย่างที่ 2 จอภาพสำหรับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (หลอดรังสีแคโทด CRT) ใช้แรงดันขาเข้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันขนาด 5 โวลต์สำหรับวงจรตรรกะ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในการจ่ายให้กับหลอดหลอดรังสีแคโทด ถ้าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าลดลงถึง 198 โวลต์ (-10%) ซึ่งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของจอภาพ จะถูกออกแบบมาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่จะรักษาแรงดันภายในที่เหมาะสมจำเป็นในการทำงานของจอภาพ ทำให้มีการดึงกระแสไฟฟ้ามามากขึ้น เป็นผลให้อุปกรณ์ภายในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดความเครียด และเกิดความร้อนสูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถสังเกตเห็นปัญหาในทันที แต่ผลในระยะยาวความน่าเชื่อถือจะลดลง และทำให้จอภาพทำงานผิดพลาดสูงขึ้นด้วย และหากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลดลงต่ำกว่า 198 โวลต์ (น้อยกว่า -10%) จะทำให้จอภาพดับได้ หากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้นเป็น 242 โวลต์ (+10%) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะไม่สามารถที่จะควบคุมแรงดันภายในและชิ้นส่วนภายในจะเกิดความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นนี้ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจอภาพคอมพิวเตอร์ต้องการคุณภาพไฟฟ้าสูงกว่าหลอดไฟ ทั้งแรงดันไฟฟ้าตกและเกิน อาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาด มีอายุการทำงานสั้นลง หรือเกิดความเสียหายได้

2.2 การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า [1]

การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบ และผลกระทบที่มีต่อภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดไฟฟ้า (Load) ขึ้นอยู่กับประเภทของภาระทางไฟฟ้านั้นๆ ด้วยว่าสามารถทนต่อการรบกวนในแต่ละรูปแบบได้มากน้อยเพียงใด

การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า สามารถพิจารณาได้จากระยะเวลาของการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และวิธีการป้องกัน หรือมาตรการแก้ไข ที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะแรงดันไฟฟ้าปกติได้รวดเร็วมากน้อยเพียงใด อาทิเช่น การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ที่เหมาะสม การบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเชิงป้องกันและอื่นๆ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนั้น บางครั้งไม่อาจคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใด และการเกิดอาจจะเป็นเพียงการเกิดแรงดันกระพริบ หรือทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง และทำให้ไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลาสั้นอาจเป็นไปได้

การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าจากค่ามาตรฐาน อาจจะมีผลกระทบต่อภาระทางไฟฟ้าบางประเภท อาทิเช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารต่างๆ หรืออื่นๆ ดังตารางที่ 2.1 [1]

ตารางที่ 2.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อุปกรณ์ควบคุมและภาระทางไฟฟ้าสามารถทำงานได้ปกติ

อุปกรณ์ในระบบ	ระดับแรงดัน	ระดับแรงดันผิดเพี้ยน เนื่องจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่	หมายเหตุ
อุปกรณ์เตือนภัยต่างๆ	ตามประเภทอุปกรณ์			
อุปกรณ์สื่อสาร	±5%	ตามประเภทอุปกรณ์		
คาปาซิเตอร์สำหรับแก้ค่า เพาเวอร์แฟกเตอร์	-10% ถึง 10%		-100% ถึง 0%	
คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ ประมวลผลข้อมูล	±10% ที่เวลา 1 ไมโครวินาที	5%	-1.5 ถึง 0.5 Hz	
คอนแทกเตอร์ ตัวสตาร์ทมอเตอร์ คอยล์ AC เสียหาย	-15% ถึง 10%			
คอยล์ AC หยุดทำงาน	-30% ถึง -40% ที่เวลา 2 ไมโครวินาที			

ตารางที่ 2.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อุปกรณ์ควบคุมและภาระทางไฟฟ้า สามารถทำงานได้ปกติ (ต่อ)

อุปกรณ์ในระบบ	ระดับแรงดัน	ระดับแรงดัน ผิดเพี้ยนเนื่องจาก ฮาร์มอนิกส์	ความถี่	หมายเหตุ
คอยล์ DC หยุดทำงาน	-30% ถึง -40% ที่เวลา 5-10 ไมโครวินาที			
อินดักชันมอเตอร์	±10%		±5%	
ระบบแสงสว่าง	-10%			ติดยาก อายุใช้งานสั้น
หลอดฟลูออเรสเซนต์	-25%			หลอดไม่สว่าง
หลอดอินแคนเดสเซนต์	+18%			อายุหลอดสั้นลง 10 %
หลอดไอปรอท	-50% ที่เวลา 2 ไมโครวินาที			หลอดไม่สว่าง
เตาหลอมโลหะ ฮีตเตอร์	ตามประเภทอุปกรณ์			
โซลินอยด์สำหรับเปิด- ปิดวาล์วต่างๆ	-30% ถึง -40% ที่ 0.5 ไมโครวินาที			
หม้อแปลง	+ 5% ของพิกัด kVA +10% ขณะไม่มีภาระ			แรงดันจะ เปลี่ยนแปลง ถ้า ความถี่มีการ เปลี่ยนแปลง
อินเวอร์เตอร์	+5% ที่ภาระเต็มพิกัด +10% ที่ไม่มีภาระ -10% ทรานเซียนซ์	2%	±2 Hz	การจุดฉนวนวงจร เกิดการผิดพลาด
เรกติไฟเออร์ไดโอด อุปกรณ์ควบคุมเฟส	±10% ±5% ที่ภาระเต็มพิกัด +10% ขณะไม่มีภาระ -10% ทรานเซียนซ์	ไวต่อการรบกวน สูง ±2%	±2 Hz	+5% ถึง -10% (NEMA Std.) การจุด ฉนวนวงจรเกิดการ ผิดพลาด

2.3 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ [6]

ในบางครั้งสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า อาจจะมาจกผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ หรือภาพคลื่นผิดเพี้ยนไป ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะปกติก็ตาม แต่อาจจะพบสิ่งผิดปกติได้ อาทิเช่น เครื่องกำเนิดหรือมอเตอร์เกิดร้อนผิดปกติ คาปาซิเตอร์เกิดระเบิดโดยไม่ทราบสาเหตุบ่อยครั้ง ระบบสื่อสารและระบบควบคุมต่างทำงานผิดปกติไป เป็นต้น

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จะวิเคราะห์หว่าเป็นส่วนประกอบอยู่ในรูปคลื่นสัญญาณด้านเข้าเสมอ เช่น แรงดันที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่สัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้างดกล่าว จะมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณสูง และที่สภาวะอยู่ตัว รูปคลื่นสัญญาณดังกล่าวจะเป็นสัญญาณรายคาบที่มีคาบเวลาเท่ากับ T จะมีความถี่เท่ากับ $f (f = \omega / 2\pi = 1/T)$ และความถี่ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)” แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า รูปคลื่นสัญญาณจะประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่หลักมูล และองค์ประกอบความถี่ที่ไม่ต้องการ นิยามว่าหมายถึง “ฮาร์มอนิกส์” เป็นความถี่ที่มีค่าเป็นจำนวนเท่ากับความถี่หลักมูล และองค์ประกอบความถี่ดังกล่าวมาทั้งหมดสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยอาศัยการวิเคราะห์ฟูริเยร์

2.3.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นไฟฟ้า

เนื่องจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไป จะทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้า มีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ (Sine Wave) สูงมาก อย่างไรก็ตามสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนดังกล่าว ได้ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์รูปคลื่นของฟูริเยร์ (Fourier Series)

โดยทั่วไปรูปคลื่นสัญญาณ $f(t)$ ที่ไม่ใช่ไซน์ (Nonsinusoidal Waveform) และเป็นสัญญาณรายคาบโดยมีค่าความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω จะสามารถนิยามอนุกรมฟูริเยร์ได้เท่ากับ

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\} \quad (2.1)$$

โดย

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 \text{ เป็นค่าเฉลี่ย} \quad (2.2)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty \text{ เป็นฟังก์ชันคู่} \quad (2.3)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty \text{ เป็นฟังก์ชันคี่} \quad (2.4)$$

แทนค่าสมการที่ 2.4 ลงในสมการที่ 2.3 จะได้ค่าเฉลี่ย F_0 จะมีค่าเท่ากับ

$$F_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d(t) \quad (2.5)$$

แต่ละองค์ประกอบความถี่ ในสมการที่ 2.1 $[f_h(t) = a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)]$ สามารถเขียนแทนด้วยเฟสเซอร์ (Phasor) ขนาดจะแสดงด้วยค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

$$F_h = \frac{1}{2} F_h e^{j\phi_h} \quad (2.6)$$

โดยที่ขนาดที่เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ

$$F_h = \frac{\sqrt{a_h^2 + b_h^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

มุมเฟส ϕ_h จะมีค่าเท่ากับ

$$\tan(\phi_h) = \frac{(-b_h)}{a_h} \quad (2.8)$$

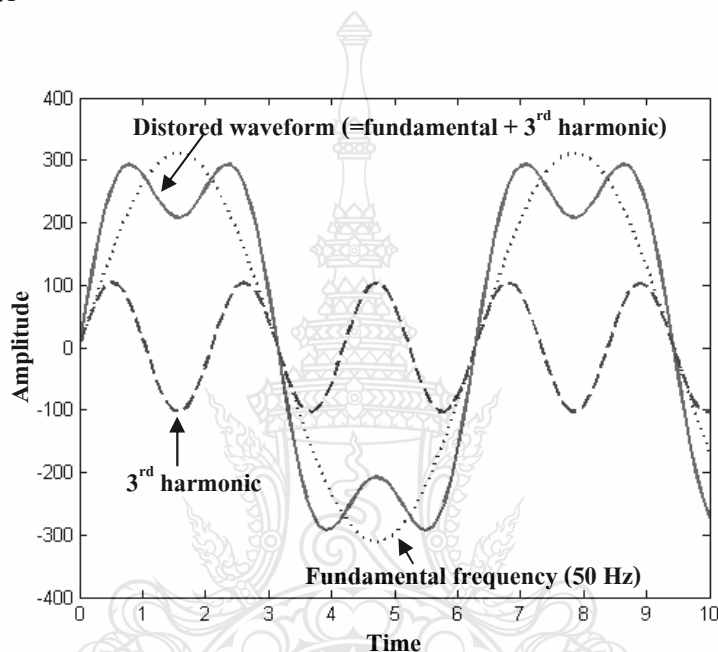
อนุกรมฟูเรียร์สามารถแสดงในเทอมของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยได้เท่ากับ

$$F = \left(F_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

2.3.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้าฯ ได้ออกแบบให้ผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ 50 Hz แต่ผลจากการดึงกำลังไฟฟ้าของโหลดบางชนิด ได้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือ

แรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ความถี่ที่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูลเหล่านี้จะก่อให้เกิดมลภาวะทางไฟฟ้าขึ้น (Electrical Pollution) โดยที่จะเรียกว่า “ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง” (Power System Harmonics) และด้วยผลของฮาร์มอนิกส์เหล่านี้ที่ทำให้ภาพคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและภาพคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้า จะไม่ได้เป็นภาพไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะได้ภาพคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ (Distorted Waveform) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ประกอบด้วยส่วนประกอบความถี่หลักมูลโดยมีฮาร์มอนิกส์ที่ 3 และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (THD) เท่ากับ 30% [6]

ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) จะหมายถึงส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า “ฮาร์มอนิกส์ที่ 2” (Second Harmonic) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ารูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปไซน์โดยสมบูรณ์จะไม่มีฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ด้วย ในขณะที่รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์จะมีฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ด้วย แต่ในการที่จะบอกว่ารูปคลื่นนั้นๆ ผิดเพี้ยนมากหรือน้อยไปจากรูปคลื่นไซน์ จะต้องพิจารณาจากค่า “ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม” (Total Harmonic Distortion; THD) ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม หมายถึงอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์

(Harmonic Component) กับค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

2.3.3 ความหมายของค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor; pf) เกิดขึ้นมาจากความคิดที่อยากทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าของโหลดที่ดึงมาจากการไฟฟ้า (AC Power System) สามารถนิยามได้ดังนี้ “ค่าตัวประกอบกำลังจะเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหารด้วยค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ” หรือเขียนในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 2.10

$$PF = \frac{P_{avg}}{S} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.10)$$

โดยที่ P_{avg} คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Power)

S คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power)

ในทางปฏิบัติ ภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดทางไฟฟ้า (Load) จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองคือ แบบเชิงเส้น (Linear Load) และแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Load) โหลดทั้งสองแบบนี้จะให้ค่าตัวประกอบที่แตกต่างกัน

2.3.4 ผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังของโหลดแบบเชิงเส้น

เนื่องจากเป็นโหลดแบบเชิงเส้น (Linear Load) ดังนั้นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดจะเท่ากับ

$$v(t) = V_{p,1} \sin(\omega_0 t + \delta_1) \quad (2.11)$$

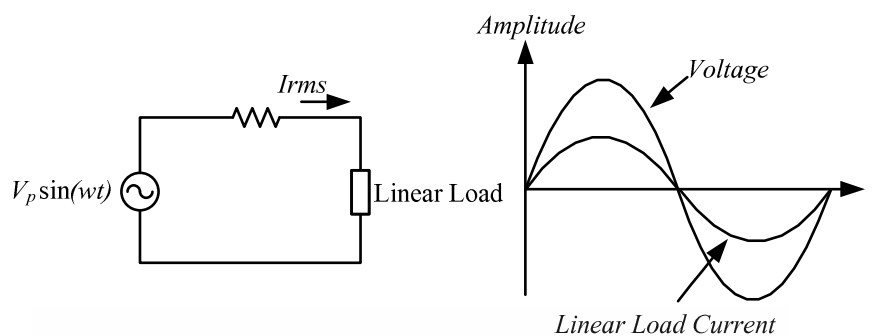
$$i(t) = I_{p,1} \sin(\omega_0 t + \theta_1) \quad (2.12)$$

โดย V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดสูงสุด (Peak Value) ที่ความถี่ 50 เฮิรท์ซ์

I_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดสูงสุด (Peak Value) ที่ความถี่ 50 เฮิรท์ซ์

δ_1 คือ ค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนไปของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด

θ_1 คือ ค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนไปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด



ภาพที่ 2.2 จำลองสภาวะที่การไฟฟ้าฯ จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดแบบเชิงเส้น [6]

แทนค่าหาค่าตัวประกอบกำลังจากสมการที่ 2.10 จะได้

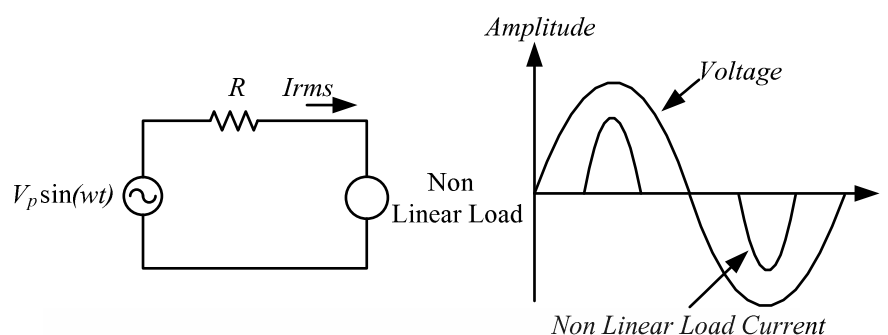
$$PF = PF_{disp} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\frac{V_{P,1} I_{P,1}}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\frac{V_{P,1} I_{P,1}}{\sqrt{2} \sqrt{2}}} = \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (2.13)$$

โดย PF_{disp} คือ ค่าตัวประกอบกำลัง Displacement (Displacement Power Factor)

ในกรณีโหลดที่เป็นเชิงเส้น ค่าตัวประกอบกำลังจะหาได้จากค่าโคไซน์ (COSINE) ของมุมที่แตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.13

2.3.5 ผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังของโหลดแบบไม่เชิงเส้น

โหลดแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Load) จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์โดยตรงและสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกันคือ เกิดจากการอิ่มตัวของอุปกรณ์ (Saturable Devices) และเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Devices) การเกิดฮาร์มอนิกส์จากการอิ่มตัวของอุปกรณ์โดยมากจะเกิดจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Iron Saturation) ในหม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้าและหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ขั้วสลาสต์แบบแกนเหล็ก สาเหตุโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากการที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิต จึงนิยมที่จะออกแบบให้จุดทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้เลยจุดอิ่มตัวของแกนเหล็กมาเล็กน้อย (Knee of The Iron Core Saturation Curve) เป็นผลทำให้กระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) จะมีค่าสูงและมีฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ปนอยู่ด้วยมาก ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของเครื่องกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เมื่อเกิดการอิ่มตัวจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่มีขนาดประมาณ 30% ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 จำลองสถานะที่การไฟฟ้าฯ จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดแบบไม่เชิงเส้น [6]

ส่วนในกรณีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จะควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการดึงกระแสไฟฟ้าเฉพาะเป็นบางช่วงของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิรท์ซ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ดึงโดยโหลดแบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์ แต่จะมีลักษณะขาดเป็นช่วงๆ (Chopped) หรือ แบนราบ (Flattened) ตัวอย่างของโหลดประเภทนี้ได้แก่ สวิตซ์ชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Power Supply) หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ พีดีบีบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ (Pulse-Width-Modulated (PWM) Converter) เป็นต้น

ดังนั้น เมื่อพิจารณากรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะได้ภาพคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไซน์โดยสมบูรณ์ แต่จะมีฮาร์มอนิกส์ปนอยู่ด้วยและฮาร์มอนิกส์ที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมาก จะได้แก่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3rd, 5th, 7th และเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล (50 เฮิรท์ซ) ไปจนกระทั่งถึงความถี่ในย่านที่หูคนได้ยิน (Low-Audible Range) อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ในสถานะคงตัว (Steady-State) ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(k\omega_0 t + \delta_k) \quad (2.14)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2.15)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของค่า RMS จะได้

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{krms}^2} \quad (2.16)$$

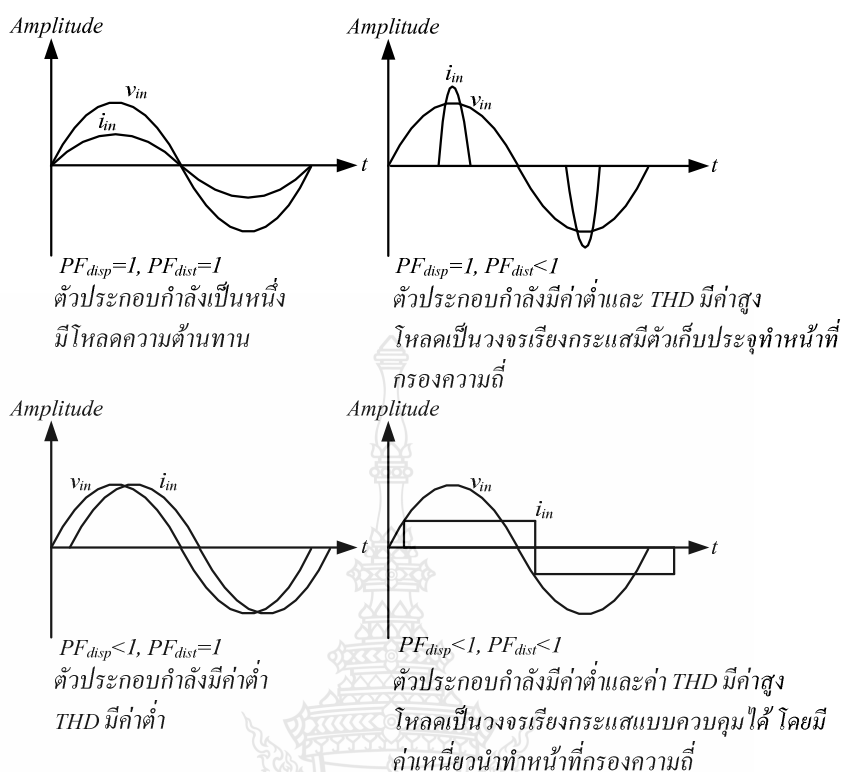
$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{krms}^2} \quad (2.17)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจะได้

$$P_{avg} = \sum_{k=1}^{\infty} V_{rms} I_{rms} \cos(\delta_k - \theta_k) = P_{1avg} \pm P_{2avg} \pm P_{3avg} \pm \dots \quad (2.18)$$

สมการที่ 2.18 เครื่องหมายที่นำหน้ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของฮาร์มอนิกส์ที่แต่ละความถี่อาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิกส์ จะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมเท่ากับศูนย์ จะหมายถึงรูปคลื่นดังกล่าวคือสัญญาณไซน์ (Sinusoidal Waveform) นั่นเอง ในทางปฏิบัติสามารถกำหนดโดย กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์อันดับสูงกว่าหลักมูลจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า $P_{avg} \approx P_{1avg}$ และ $pf \approx pf_{disp} \cdot pf_{dist}$ โดยที่ pf_{dist} = ค่าตัวประกอบกำลัง Distortion (Distortion Power Factor)

ภาพที่ 2.4 เป็นการสรุปผลกระทบของตัวประกอบกำลัง pf_{disp} และ pf_{dist} ที่เกิดจากโหลดแบบต่างๆ ต่อรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าอินพุตในทางอุดมคติ (Ideal Case)



ภาพที่ 2.4 ผลกระทบของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่โพลดแบบต่างๆ [6]

2.3.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้า

ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ต่อการไฟฟ้าฯ สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบระยะสั้น (Short Term) และแบบระยะยาว (Long Term) โดยแบบระยะสั้น ผลกระทบจะสามารถเห็นได้ชัดและโดยมากมักจะอยู่ในรูปของความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Distortion) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนแบบระยะยาวจะตรวจสอบไม่ค่อยพบ และมักจะอยู่ในรูปของความสูญเสียตัวต้านทาน (Resistive Losses) หรือแรงดันเกิน (Voltage Stress)

ผลกระทบแบบระยะสั้นสามารถทำให้โพลดที่มีความไวสูง เกิดการทริป (Tripping) ขึ้นได้ เช่น โพลดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จะไวต่อค่าความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

ในขณะที่ผลของฮาร์มอนิกส์จะทำให้ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดไฟฟ้า (Meter) ลดลงและนอกจากนั้นยังทำให้ฟิวส์ขาด และอาจจะทำให้ตัวเก็บประจุทำงานผิดพลาด เพราะค่าความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์ ประมาณ 5% - 10% อาจจะมีผลทำให้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส เพิ่มขึ้น 10% - 50% และนอกจากนั้นยังอาจจะเกิดค่าแรงดันเกินที่ไดอิเล็กตริก (Dielectrics) ของตัวเก็บประจุ

ฮาร์มอนิกส์ยังอาจทำให้เกิดความร้อนเกิน (Overheating) ที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะพบบ่อยในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก และยังทำให้เกิดกระแสเกินที่สายนิวตรอน (Neutral)

2.3.7 ผลกระทบของอุปกรณ์ที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะ

1) หม้อแปลง

- ความร้อนเนื่องจากความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเกิดจากสกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect)
- ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) และคลื่นแม่เหล็กกระจายเพิ่มขึ้น

2) เซอร์คิตเบรกเกอร์และฟิวส์

- ลดการตัดตอนลง

3) สายเคเบิล

- ความร้อนเนื่องจากความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity Effect)
- กระแสไฟฟ้าในสายกลาง (Neutral) เพิ่มขึ้น

4) รีเลย์ป้องกัน

- ทำงานผิดพลาด

5) หลอดไฟฟ้า

- อายุการทำงานสั้นลง

6) มอเตอร์

- ความสูญเสียเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้น
- อายุการทำงานสั้นลง

7) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

- ทำงานผิดพลาด

2.4 มาตรฐานและข้อกำหนดทางไฟฟ้า

2.4.1 มาตรฐานคุณภาพบริการของการไฟฟ้า

มาตรฐานคุณภาพบริการด้านเทคนิค (Technical Standard) [3]

1) มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายไฟ (จุดที่ซื้อ-ขาย) ของการไฟฟ้านครหลวง ที่ระดับแรงดัน 230 โวลต์ 2 สาย

- ช่วงระดับแรงดันกรณีจ่ายไฟปกติ ต่ำสุด 214 โวลต์ สูงสุด 237 โวลต์
- ช่วงระดับแรงดันกรณีจ่ายไฟฉุกเฉิน ต่ำสุด 209 โวลต์ สูงสุด 240 โวลต์

2) มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายไฟ (จุดที่ซื้อ-ขาย) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ระดับแรงดันแรงดัน 220 โวลต์

- ช่วงระดับแรงดันกรณีจ่ายไฟปกติ ต่ำสุด 200 โวลต์ สูงสุด 240 โวลต์
- ช่วงระดับแรงดันกรณีจ่ายไฟฉุกเฉิน ต่ำสุด 200 โวลต์ สูงสุด 240 โวลต์

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [7] ได้กำหนดมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า (System Voltage) และ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Value of Frequency) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้า (System Voltage) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Type of Customer	Voltage System (kV)	Normal Condition		Emergency Condition	
		Maximum (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Minimum (%)
Large Industrial	69, 115 (Line-line)	+ 5 %	- 5 %	+ 10 %	- 10 %
Medium Industrial	22, 33 (Line-line)	+ 5 %	- 5 %	+ 10 %	- 10 %
Small Industrial	0.38 (Line-line)	+ 10 %	- 10 %	+ 10 %	- 10 %
Residential	0.22 (Line-line)	+ 10 %	- 10 %	+ 10 %	- 10 %

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานความถี่ไฟฟ้า (System Frequency) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

System Frequency	Normal Condition	Varies Range
		50 Hz

2.4.2 มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) [8]

มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ได้ร่วมมือกับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้จัดทำ “มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย” เพื่อให้ทั้งประเทศมีมาตรฐานเรื่องการติดตั้งทางไฟฟ้าเพียงฉบับเดียว เนื้อหาส่วนมากจะแปลและเรียบเรียงจาก National Electric Code (NEC) และมีความพยายามที่จะนำมาตรฐานของ IEC (International Organization for Standardization) มาใช้

โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้จะต้องได้มาตรฐาน IEC 60898 “Circuit Breakers for Overcurrent Protection for Household and Similar Installations” และ IEC 60947-2 “Part 2 Circuit Breaker” เป็นต้น

1) เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในสถานที่อยู่อาศัยหรือสถานที่คล้ายคลึงกัน ขนาดไม่เกิน 125 A มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไม่เกิน 440 โวลต์ ความถี่ 50 หรือ 60 เฮิรตซ์ จำนวนขั้วอาจมีได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว พิกัดกระแสใช้งาน (In) มีขนาดพิกัด ดังนี้ 6 , 8 , 10 , 13 , 16 , 20 , 25, 32 , 40 , 50 , 63, 80 , 100 และ 125 แอมแปร์ และช่วงกระแสไฟฟ้าเกิน จะใช้เวลาตัดวงจรน้อยกว่า 0.1 วินาทีให้เป็นไปตาม IEC 60898

2) เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในสถานที่อื่นๆ ให้เป็นไปตาม IEC 60947-2 นี้ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไม่เกิน 1,000 VAC หรือ 1,500 VDC เหมาะสำหรับการใช้งานโดยผู้มีความรู้ในการติดตั้ง หรือปรับแต่งค่าต่างๆ ของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ หรืออุปกรณ์ประกอบของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น การใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

ในระบบไฟฟ้า สิ่งที่ต้องการคือ ให้ระบบสามารถที่จะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะต้องมีพลังงานไฟฟ้าพร้อมที่จะจ่ายให้แก่เครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ตลอดเวลา โดยความเป็นจริง ในระบบที่เกิดกระแสที่มีขนาดมากกว่าปกติหรือกระแสเกิน (Over Current) ไหลผ่านแล้วย่อมจะเกิดอันตรายมาก ถ้าปล่อยไว้นานจะทำให้เกิดอันตราย โดยอาจจะทำให้เกิดความร้อนในสายตัวนำหรือฉนวนได้ สาเหตุของการเกิดกระแสเกิน นิยมแบ่งเป็น 2 สาเหตุ คือ โหลดเกิน (Overload) และลัดวงจร (Short Circuit) ดังนั้น เมื่อมีกระแสเกินเกิดขึ้นในวงจร ระบบที่ดีจะต้องมีอุปกรณ์ที่จะเปิดวงจรออกเพื่อให้อุปกรณ์อื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสเกินมีพลังงานไฟฟ้าใช้ตลอดเวลา

2.4.3 เครื่องตัดไฟรั่ว (Residual Current Device; RCD)

เครื่องตัดไฟรั่ว หมายถึง อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทางกลที่สามารถต่อวงจร นำกระแส และตัดวงจรภายใต้ภาวะใช้งานปกติ และตัดวงจรเมื่อกระแสเหลือถึงค่าที่กำหนดภายใต้ภาวะที่กำหนด ค่ามาตรฐานของกระแสไฟรั่วลงดินที่ทำงานที่กำหนด (Rate Residual Operating Current, $I_{\Delta n}$) คือ 0.006, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3 และ 0.5 แอมแปร์ [8-9]

สำหรับแรงดันไม่เกิน 440 โวลต์ สำหรับบ้านอยู่อาศัยหรือสถานที่คล้ายคลึงกัน ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60755, IEC 61009, IEC 61543 มีรายละเอียดดังนี้

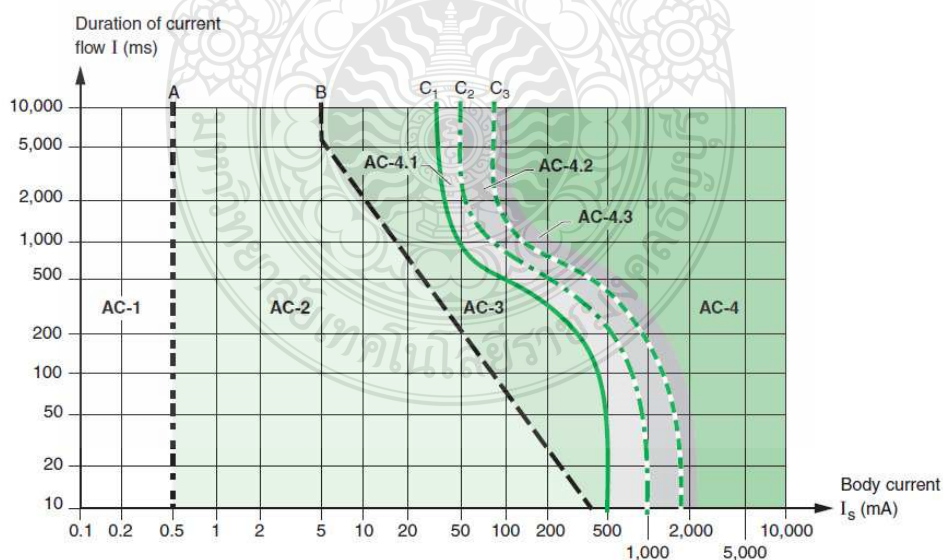
- 1) เครื่องตัดไฟรั่ว ควรมีค่ากระแสรั่วลงดินที่กำหนด ไม่เกิน 30 มิลลิแอมแปร์
- 2) มีช่วงระยะเวลาในการตัด (Break Time หรือ Operating Time)
 - ไม่เกิน 0.3 วินาที เมื่อกระแสรั่วมีค่าเท่ากับ $I_{\Delta n}$

- ไม่เกิน 0.15 วินาที เมื่อกระแสรั่วมีค่า $2 I_{\Delta n}$
- ไม่เกิน 0.04 วินาที เมื่อกระแสรั่วมีค่า $5 I_{\Delta n}$ (อาจใช้ค่า 0.25 แอมแปร์ แทนค่า $5 I_{\Delta n}$ แทนได้) และไม่ทำงานเมื่อกระแสรั่วลงดินมีค่า $0.5 I_{\Delta n}$

ความรุนแรงหรืออันตรายจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย ดังภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.4 ขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของกระแสไฟฟ้า ร่างกายมนุษย์จะทนไฟฟ้ากระแสตรงได้มากกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ
- แรงดันไฟฟ้า และปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก ทำให้เป็นอันตรายมาก
- ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
- ความชื้น อุณหภูมิ พื้นที่สัมผัส แนวเส้นทางที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย

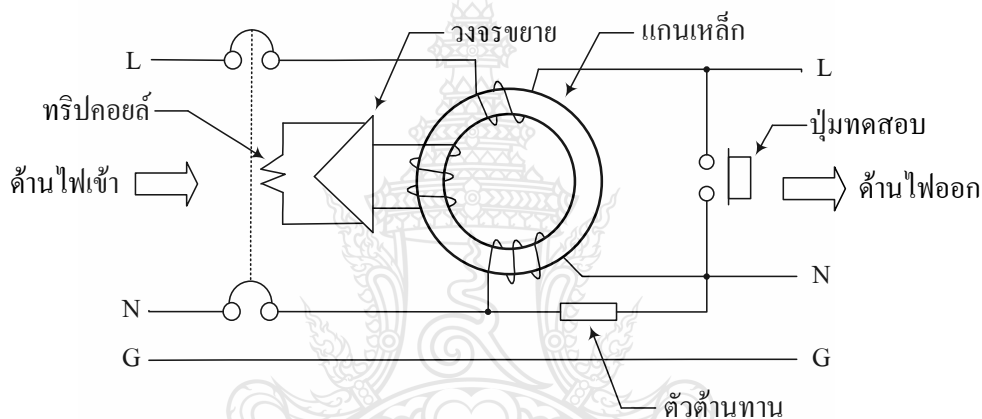
ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการช็อก สำหรับการทำให้เกิดการช็อกของไฟฟ้าขึ้นนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย จะต้องมากถึงระดับหนึ่ง กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าประมาณ 10 มิลลิแอมแปร์ (0.01 แอมแปร์) เมื่อผ่านเข้าไปทั่วร่างกาย โดยผ่านทางผิวหนังจะไม่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการช็อกขึ้น ทั้งนี้ เป็นเพราะว่า กระแสไฟฟ้าจะถูกกระจายผ่านทั่วร่างกาย จนจำนวนของพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านอวัยวะสำคัญ น้อยมาก ภาพที่ 2.6 เป็นวงจรมแสดงการทำงานของเครื่องตัดไฟรั่ว



ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงโซนระหว่างเวลาและกระแสไฟฟ้าที่มีผลของกระแสไฟสลับต่อร่างกายมนุษย์เมื่อไหลผ่านจากมือซ้ายไปยังเท้า [10]

ตารางที่ 2.4 ผลของกระแสไฟฟ้าร่างกายที่กระแสไหลผ่าน ตามมาตรฐาน IEC 60479-1

โซน	ผลของร่างกายที่กระแสไหลผ่าน
AC-1	ไม่มีปฏิกิริยา ถ้ากระแสไม่เกิน 0.5 มิลลิแอมแปร์
AC-2	เริ่มมีความรู้สึก แต่ยังไม่เป็นอันตราย โดยเฉลี่ย แล้วไม่เกิน 10 มิลลิแอมแปร์ ยังสามารถคลายมือออกได้
AC-3	เริ่มมีการหดตัวของกล้ามเนื้อ หรือหายใจลำบากอาจมีผลต่อการทำงานของหัวใจ
AC-4	เป็นย่านอันตรายต่อหัวใจ (หัวใจเต้นผิดปกติ ความดันโลหิตตกลง) และมีแผลไหม้



ภาพที่ 2.6 วงจรแสดงการทำงานของเครื่องตัดไฟรั่ว

2.4.4 มาตรฐาน IEC 1000-3-2 [11]

คณะกรรมการเทคนิคทางไฟฟ้านานาชาติ (International Electro Technical Committee หรือ IEC) ได้นำเสนอมาตรฐาน IEC 1000-3-2 (มาตรฐานแห่งภาคพื้นยุโรป (European Standard) ที่รู้จักในชื่อ EN 61000-3-2) ใช้เพื่อจำกัดการดึงกระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือนหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีพิกัดกระแสไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส อุปกรณ์หรือภาระดังกล่าวถูกต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำชนิด 1 เฟส ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 60 เฮิร์ตซ์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220-240 โวลต์ หรือระบบจำหน่ายที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 380-415 โวลต์ โดยพิจารณาส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 จนกระทั่งถึงอันดับที่ 40

สำหรับประเทศไทย มาตรฐานในการจำกัดส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า จะได้แก่ มอก. 1448-2544 จะเป็นการเปลี่ยนเฉพาะปกนอกให้เป็นภาษาไทยเท่านั้น แต่เนื้อหภายในจะยังคงเหมือนต้นฉบับ IEC 1000-3-2 อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส ต้องผลิตตามมาตรฐาน IEC-1000-3-2

อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีค่าตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 สามารถติดตั้งเข้ากับระบบได้ ถ้าอุปกรณ์ที่เกินขีดจำกัด การไฟฟ้าในประเทศไทยทั้ง 3 แห่ง จะไม่อนุญาตให้ต่อเข้ากับระบบ

สามารถจำแนกประเภทของอุปกรณ์หรือภาระทางไฟฟ้าออกเป็น 4 หมวด (Class) ในการทดสอบจะแบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะแยกแยะในการจำกัดและกำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ในกระแสในสายเส้นไฟ (Line)

- Class A: อุปกรณ์สามเฟสสมดุล (Balanced Three-Phase Equipment) อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสในสายเส้นไฟ (Line) ของแต่ละเฟสต่างกันไม่เกินร้อยละ 20 และอุปกรณ์อื่นๆ ที่นอกเหนือจาก 4 หมวดที่กำหนด
- Class B: เครื่องมือไฟฟ้าที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable Electrical Tools) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถยกหรือจับถือได้ในช่วงเวลาการทำงานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น จะมีค่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์เป็น 1.5 เท่าของ Class A
- Class C: อุปกรณ์ส่องสว่าง (Lighting Equipment)
- Class D: อุปกรณ์ที่มีภาพคลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุตแบบพิเศษ (Special Wave Shape) เช่น วงจรเรียงกระแสและสวิตซ์ชิงเพาเวอร์ซัพพลาย โดยมีกำลังไฟฟ้าอินพุต (Active Input Power) มากกว่า 75 วัตต์ แต่ต้องน้อยกว่า 600 วัตต์ และขีดจำกัดจะระบุเป็น “mA/W”

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกส์ Class A

Harmonic Order (n)	Maximum Permissible Harmonic Current (A)
<i>Odd Harmonics</i>	
3	2.30
5	1.44
7	0.77
9	0.40
11	0.33

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class A (ต่อ)

Harmonic Order (n)	Maximum Permissible Harmonic Current (A)
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times 15/n$
<i>Even Harmonics</i>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times 8/n$

ตารางที่ 2.6 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class C

Harmonic Order (n)	Maximum Permissible Harmonic Current Expressed as A Percent of The Input Current at The Fundamental Frequency (%)
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
(odd harmonics only)	
* λ is the circuit power factor.	

2.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality)

คำว่า คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) [12] เป็นคำที่พูดถึงบ่อยในเรื่องของความมั่นคง การจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าฯ และกรณีเมื่อเกิดปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้า เห็นได้ว่าคำนิยามของคำว่าคุณภาพกำลังไฟฟาระหว่างการไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไป แต่ในความเป็นจริงแล้วมีความหมายเดียวกัน นิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐานสากล IEEE Std. 1159-2009 [2] ให้ความหมายของคุณภาพ

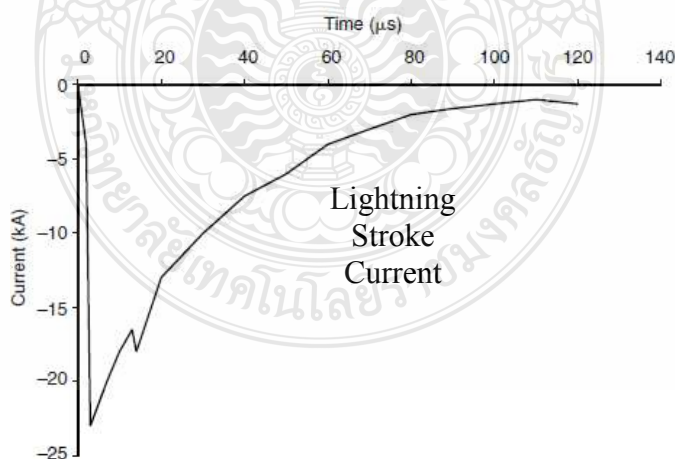
กำลังไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแส (Current) แรงดัน (Voltage) และความถี่ (Power Frequency) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด, อายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดการเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ อีก เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น จะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าในอดีต กลุ่มอุปกรณ์ในบ้านและสำนักงาน เช่น เครื่องเสียง ชุดโฮมเธียเตอร์ เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องส่งเอกสาร (แฟกซ์) เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร ระบบป้องกันความปลอดภัย หรือ เครื่องล้าง-อัด-ขยายภาพอัตโนมัติ เป็นต้น

มาตรฐาน IEEE Std. 1159-2009 นำเสนอเทคนิคและวิธีในการตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลรวมทั้งการวิเคราะห์ผลจากการตรวจวัด

2.5.1 ภาวะชั่วคราว (Transient)

ภาวะชั่วคราวคือ ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (แรงดัน และ กระแส) ในเวลาทันทีทันใดจากสภาพปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transients) และสภาวะชั่วคราวในลักษณะของการออสซิลเลเตอร์ (Oscillatory Transient)

1) อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transients) คือขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นในทันทีทันใดไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลงกำหนดให้มีชั่วทศทางเดียว หรือเรียกว่าเสิร์จ (Surge) ดังภาพที่ 2.7 มีสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่า อาจเกิดได้โดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียง ผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน



ภาพที่ 2.7 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า

มาตรฐาน IEEE std. 1159-2009 มีการกำหนดค่าอิมพัลส์ตามช่วงระยะเวลาที่เกิดกับค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (Rise Time) ดังตารางที่ 2.8

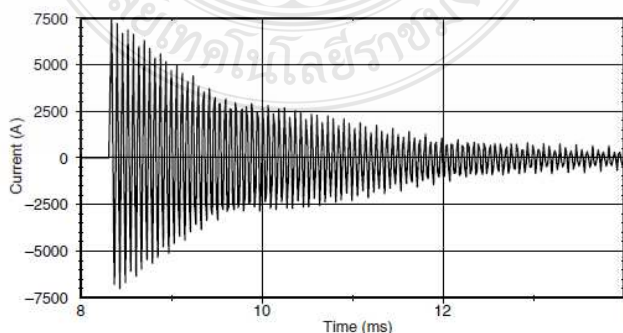
ตารางที่ 2.7 ค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้นกับช่วงระยะเวลาการเกิดของอิมพัลส์

อิมพัลส์ภาวะชั่วคราว	ระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (Rise Time)	ช่วงระยะเวลาการเกิด (Duration)
Nanosecond	5 ns	< 50 ns
Microsecond	1 μ s	50 ns - 1 ms
Millisecond	0.1 ms	> 1 ms

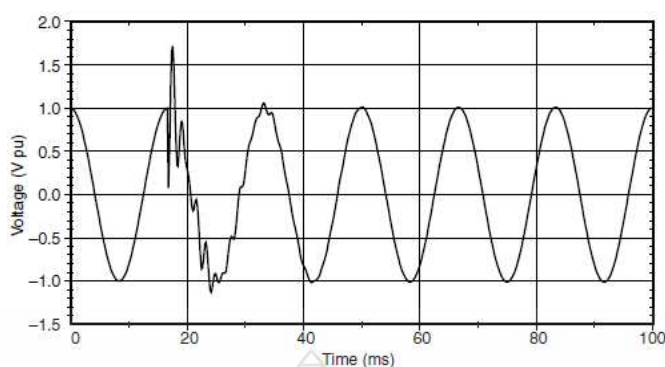
2) สภาวะชั่วคราวในลักษณะของการออสซิลเลเตอร์ (Oscillatory Transient) คือลักษณะของแรงดันหรือกระแสแรงดันมีค่าสูง เกิดขึ้นในทันทีทันใด ไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลง มีการเปลี่ยนแปลงชั่ว (บวกหรือลบ) ของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 มีสาเหตุเกิดจากการสวิตซ์ของอุปกรณ์ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย และฉนวนของอุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพ หรือมีการสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น มาตรฐาน IEEE std. 1159-2009 มีการแบ่งการเกิดออสซิลเลตในภาวะชั่วคราวตามขนาดแรงดัน และช่วงระยะเวลาการเกิดตามความถี่ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 ขนาดแรงดันและช่วงเวลาตามความถี่ออสซิลเลตชั่วคราว

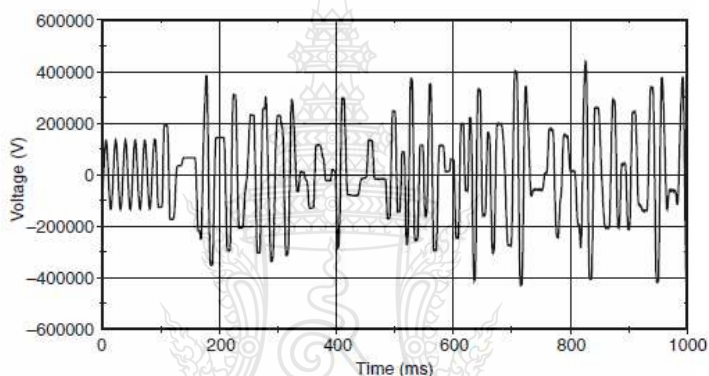
ออสซิลเลตในภาวะชั่วคราว	ความถี่	ช่วง ระยะเวลาการเกิด	ขนาดแรงดัน
Lower Frequency	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu.
Medium Frequency	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu.
High Frequency	0.5-5 MHz	5 μ s	0-4 pu.



ภาพที่ 2.8 กระแสออสซิลเลตชั่วคราวเกิดจากการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบ Back-to-Back



ภาพที่ 2.9 แรงดันออสซิลเลตความถี่ต่ำชั่วคราวที่เกิดจากการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ



ภาพที่ 2.10 แรงดันออสซิลเลตความถี่ต่ำชั่วคราวที่เกิดจากเฟอโรเรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด

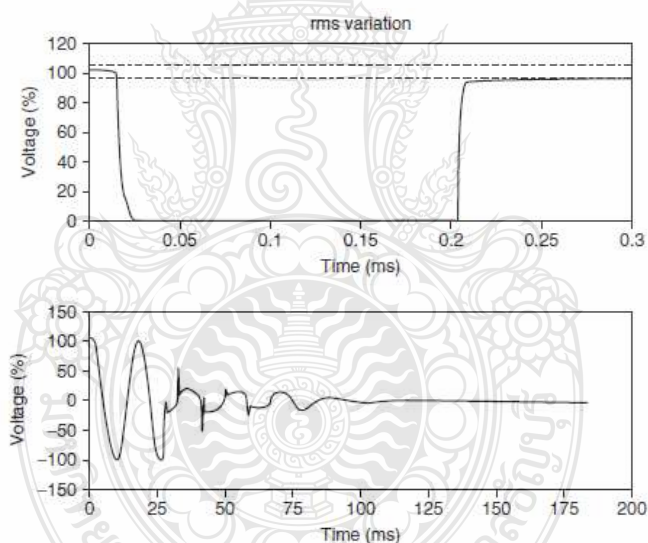
2.5.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วขณะ (Short Duration RMS Variation)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วขณะคือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติของ (Fault) ทางไฟฟ้า ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) และไฟดับชั่วขณะ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std. 1159-2009 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าว ตามระยะเวลาที่เกิด คือ เวลาทันทีทันใด ชั่วขณะ และชั่วคราว ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 ระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงเวลาสั้นๆ

	เวลาที่ทันทีทันใด	ชั่วขณะ	ชั่วครู่
Voltage Sag & Swell	0.5 – 30 cycles	30 cycles - 3 sec	3 sec - 1 min
Interruption	-	0.5 cycles - 3 sec	3 sec - 1 min

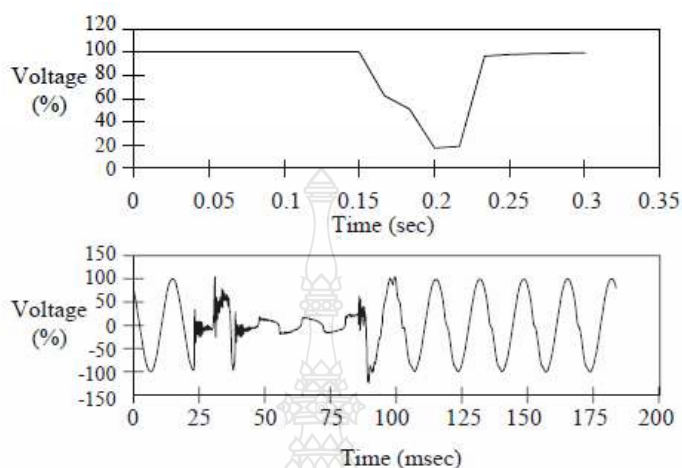
1) ไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 pu. ในช่วงระหว่าง 0.5 - 30 ไซเคิล (Cycles) มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติของทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก ดังภาพที่ 2.11 แสดงการเกิดไฟดับช่วงระยะเวลาสั้นๆ จากการทำงานของรีโกลสเซอร์ที่ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบ ก่อนจะมีการต่อวงจรเข้าไปดั้งเดิมอีก ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน



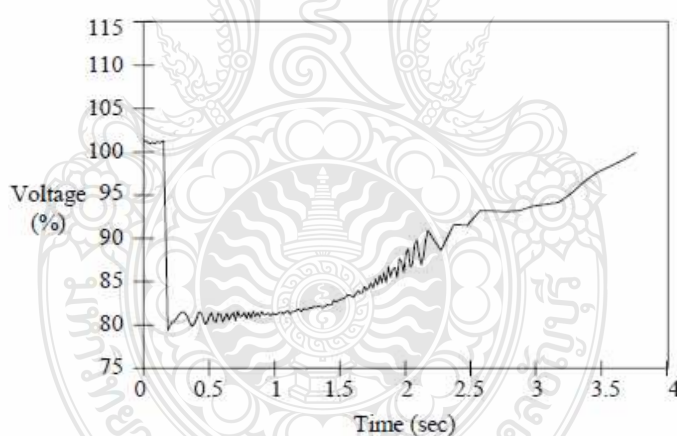
ภาพที่ 2.11 ไฟฟ้าดับชั่วขณะจากสาเหตุรีโกลสเซอร์มีการทำงาน เนื่องจากการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า

2) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag หรือ Voltage Dips) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 0.5 ไซเคิลถึง 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.6 ทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติในช่วงเวลา 3 ไซเคิล และ ภาพที่ 2.12 แรงดันมีค่าลดลงจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่

มอเตอร์อินตักซ์ขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ ผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟ มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



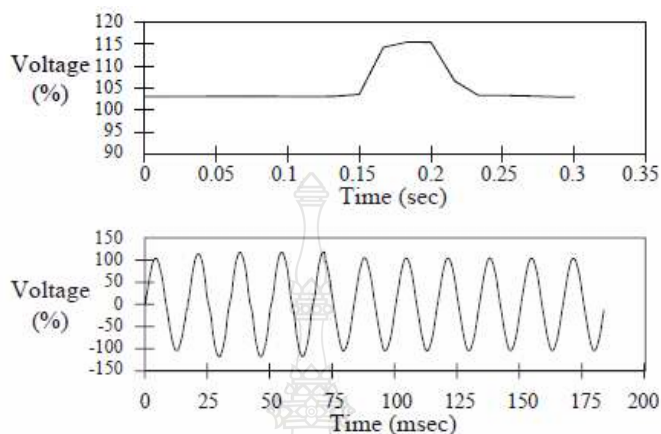
ภาพที่ 2.12 ไฟฟ้าดับชั่วขณะเนื่องจากสาเหตุการเกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าลงดิน



ภาพที่ 2.13 ไฟฟ้าดับชั่วขณะเนื่องจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่

3) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 3 วินาทีถึง 1 นาที ดังภาพที่ 2.14 มีสาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย หรือทำ

ให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟไม่การทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



ภาพที่ 2.14 แรงดันเกินชั่วขณะจากสาเหตุการเกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าลงดิน

2.5.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration RMS Variation)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานโหลดขนาดใหญ่ ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Under Voltage) แรงดันเกิน (Over Voltage) และไฟดับ (Sustained Interruptions)

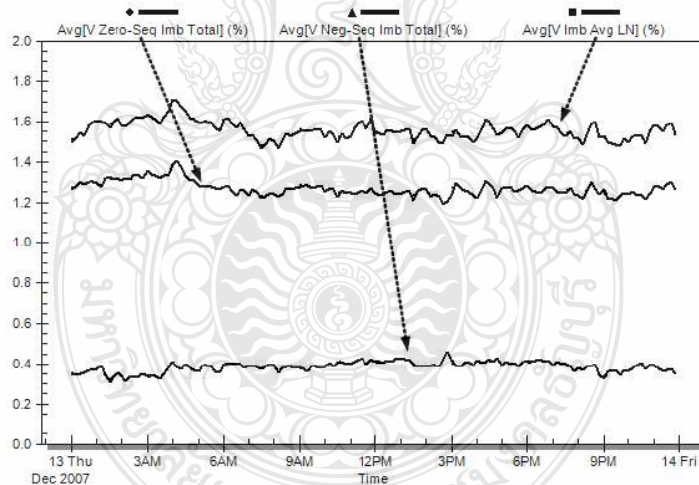
1) แรงดันตก (Under Voltage) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 pu. ในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการสวิตช์ซึ่งโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน (Overload) ผลของแรงดันตกในลักษณะนี้อาจไม่รุนแรงจนทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องปลดวงจรออก แต่จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มีผลทำให้แรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ลดลง เป็นผลทำให้การสตาร์ทใช้เวลานาน และมอเตอร์กินกระแสมากกว่าปกติ

2) แรงดันเกิน (Over Voltage) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 pu. ในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตช์คาปาซิเตอร์เข้าระบบ หรือการปรับแทปหม้อแปลงไม่เหมาะสมกับระบบจะไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุดอย่างทันทีทันใด แต่จะมีผลในระยะยาวมากกว่า คือ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าลดลง

3) ไฟดับ (Voltage Interruption) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีค่าลดลง 0.0 pu. ในช่วงเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติของทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกถาวร การเกิดไฟดับช่วงระยะยาวจากการทำงานของรีโกลสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบถาวร (Lockout) เมื่อสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้ายังอยู่ในระบบ จากปัญหาไฟดับจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ คอมพิวเตอร์ ชุดควบคุมระบบไฟฟ้าส่องสว่าง และคอนเทคเตอร์ หยุดการทำงาน นอกจากนั้นในบางกรณีอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าถึงขั้นชำรุดเสียหาย

2.5.4 แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance)

แรงดันไม่สมดุลคือ แรงดันของระบบ 3 เฟสมีขนาดแตกต่างกัน (0.5-2%) หรือมีมุมเปลี่ยนไปจาก 120 องศา เกิดจากความไม่สมดุลขนาดของโหลดแต่ละเฟส สามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบลำดับลบ V_2 (Negative Sequence) หรือ องค์ประกอบลำดับศูนย์ V_0 (Zero Sequence) ต่่องค์ประกอบลำดับบวก V_1 (Positive Sequence) ดังภาพที่ 2.15 ผลทำให้อุปกรณ์ เช่น มอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า มีอายุการใช้งานน้อยลง เนื่องจากผลความร้อนที่เกิดขึ้น



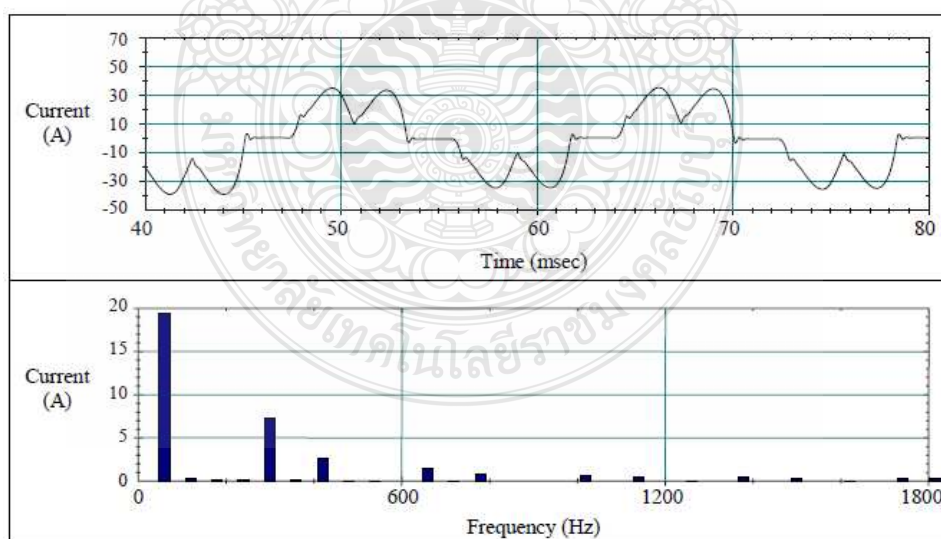
ภาพที่ 2.15 แรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟให้ที่พักรถอู่อาศัย

2.5.5 ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (Waveform Distortion)

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า และสามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดยแยกองค์ประกอบทางความถี่ออกมา การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแบ่งออกได้ 5 ชนิด

1) องค์ประกอบไฟตรง (DC Offset) คือ การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟตรงปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นผลมาจากการใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier) เป็นผลทำให้เกิดความร้อนและค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลง และอาจจะทำให้เกิดการผูกרוןของแท่งกราวด์ได้

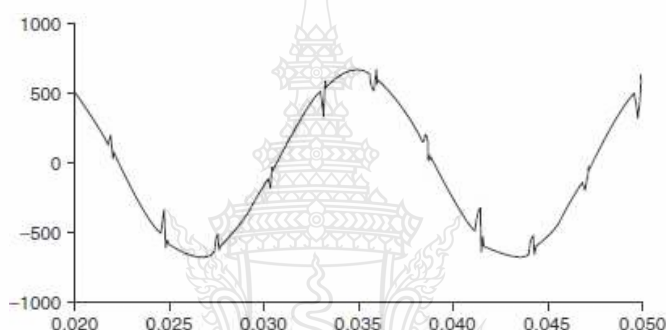
2) ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ในระบบไฟฟ้าในประเทศไทยมีค่า 50 เฮิรท์ซ (เช่น ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 เฮิรท์ซ ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 เฮิรท์ซ ผลของฮาร์มอนิกส์เมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยน (Distortion) ไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น อินเวอร์เตอร์ (Inverter) อุปกรณ์เรียงกระแส (Rectifier) คอนเวอร์เตอร์ (Converter) อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ (Adjustable Speed Drive) คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค (Arc/Spot Welding) เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเป็นผลทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิม ทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด และถ้ามีการขยายของฮาร์มอนิกส์ที่มีขนาดมากพออาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดขึ้นได้



ภาพที่ 2.16 กระแสฮาร์มอนิกส์

3) อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) เช่น มีความถี่ที่ 104 เฮิรท์ซ 117 เฮิรท์ซ 134 เฮิรท์ซ หรือ 147 เฮิรท์ซ ลักษณะการเกิด และผลกระทบจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาร์โมนิกส์

4) คลื่นรอยบาก (Notching) คือ สิ่งรบกวนทางแรงดันไฟฟ้าลักษณะคล้ายกับฮาร์โมนิกส์ และทรานเซียนท์ที่มีลักษณะต่อเนื่อง เป็นผลเกิดจากใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เมื่อกระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ผลทำให้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์มีการทำงานผิดพลาด เนื่องจาก Zero Crossing

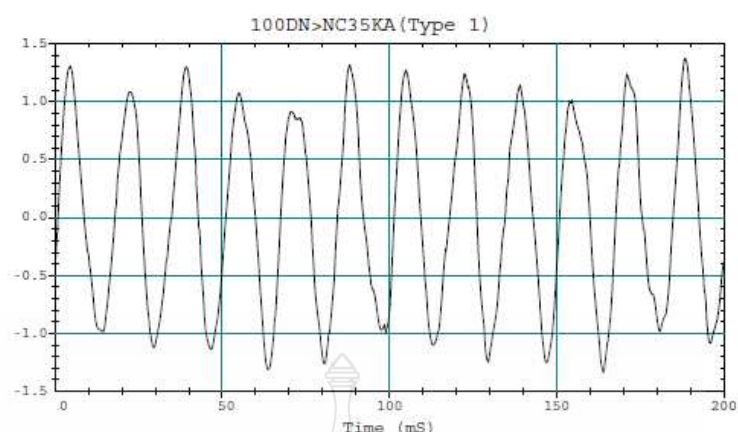


ภาพที่ 2.17 คลื่นรอยบากเกิดจากคอนเวอเตอร์ชนิด 3 เฟส

5) สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ จะมีความถี่ต่ำกว่า 200 กิโลเฮิรท์ซ ปะปนบนสัญญาณแรงดัน หรือกระแสในสายเฟส เป็นผลเกิดจากการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้อง ที่มีการใช้ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ควบคุมอยู่ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีทำงานผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานได้

2.5.6 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

แรงดันกระเพื่อม คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) มีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.1-7% เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภท เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค (Arc/Spot Welding) เครื่องอัดอากาศ (Compressor) และการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่บ่อยๆ เป็นต้น ทำให้เกิดไฟกระพริบ (Flicker) ที่หลอดไฟ ความรุนแรงของปัญหาไฟกระพริบจะสะท้อนออกมาในลักษณะของการรบกวนทางสายตา จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง และอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก



ภาพที่ 2.18 แรงดันกระเพื่อม

2.5.7 การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation)

การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า คือ ปรากฏการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีค่าเปลี่ยนไปจากค่าความถี่ปกติ 50 เฮิรตซ์ เป็นผลเกิดจากการทำงานของผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือมีการหลุดออกจากระบบ ทำให้มีกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์กับความถี่ระบบไฟฟ้า เช่น เครื่องกลไฟฟ้า

ตารางที่ 2.10 สรุปประเภทของลักษณะคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009

No.	Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
1.0	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

ตารางที่ 2.10 สรุปประเภทของลักษณะคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 (ต่อ)

No.	Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
2.0	Short-Duration Root-Mean-Square (rms)			
	2.1 Instantaneous			
	2.1.1 Sag		0.5 - 30 Cycles	0.1 - 0.9 pu
	2.1.2 Swell		0.5 - 30 Cycles	1.1 - 1.8 pu
	2.2 Momentary			
	2.2.1 Interruption		0.5 Cycles - 3 s	< 0.1 pu
	2.2.2 Sag		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		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu
	2.3.3 Swell		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0	Long Duration rms Variations			
	3.1 Interruption, Sustained		> 1 min	0.0 pu
	3.2 Under Voltages		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
	3.3 Over Voltages		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
	3.4 Current Overload		> 1 min	
4.0	Imbalance			
	4.1 Voltage		Steady State	0.5 - 2%
	4.2 Current		Steady State	1.0 - 30%
5.0	Waveform Distortion			
	5.1 DC Offset		Steady State	0 - 0.1%
	5.2 Harmonics	0 - 9 kHz	Steady State	0 - 20%
	5.3 Inter Harmonics	0 - 6 kHz	Steady State	0 - 2%
	5.4 Notching		Steady State	
	5.5 Noise	Broad-Band	Steady State	0 - 1%

ตารางที่ 2.10 สรุปประเภทของลักษณะคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 (ต่อ)

No.	Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
6.0	Voltage Fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.1 - 7%
7.0	Power Frequency Variations		< 10 s	± 0.01 Hz

ตารางที่ 2.11 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ Class D

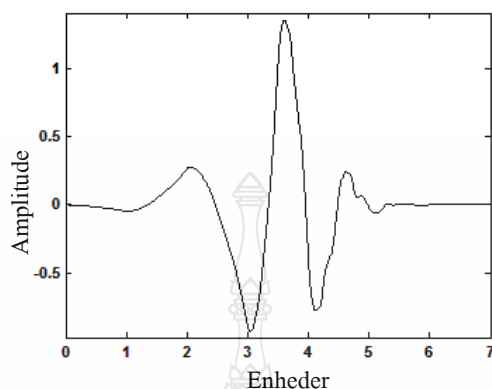
Harmonic Order (n)	75 W < P < 600 W	P > 600 W
	Maximum Permissible Harmonic Current Per Watt [mA (rms) /W]	Maximum Permissible Harmonic Current A (rms)
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
13	0.296	0.21
15 ≤ n ≤ 39 (odd harmonic only)	3.85/n	2.25/n

2.6 พื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ด [4]

เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลา และความถี่ที่เท่ากัน จะเสียเวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่าน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้น ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว การแปลงที่พัฒนาขึ้นนี้เรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ด”

การแปลงเวฟเล็ดจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า เวฟเล็ด ลักษณะของเวฟเล็ดจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และขนาดของคลื่น

จะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 2.19 เป็นเวฟเลตชนิดหนึ่งที่เรียกว่า “เวฟเลตแบบ Daubechies 4 (db4)”

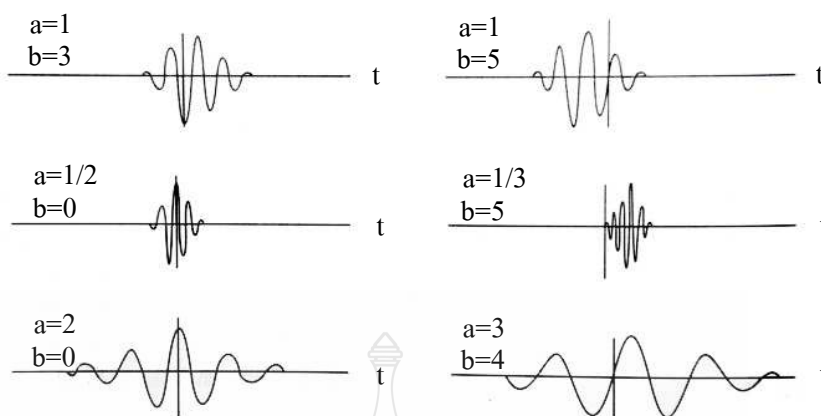


ภาพที่ 2.19 ลักษณะของเวฟเลตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4)

การนำเวฟเลตหลายๆ อันมารวมกันเป็นกลุ่มเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใดๆ โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน ฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลตต้น กำเนิด เรียกว่า “เวฟเลตแม่ (Mother Wavelet)” คลื่นเวฟเลตแต่ละอันจะอยู่ภายในเซตของเวฟเลตนี้ โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล (Scaling) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation) กำหนดให้เป็น a และ b ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของเวฟเลตที่ตำแหน่ง a และ b ใดๆ ที่สัมพันธ์กันได้ดังนี้

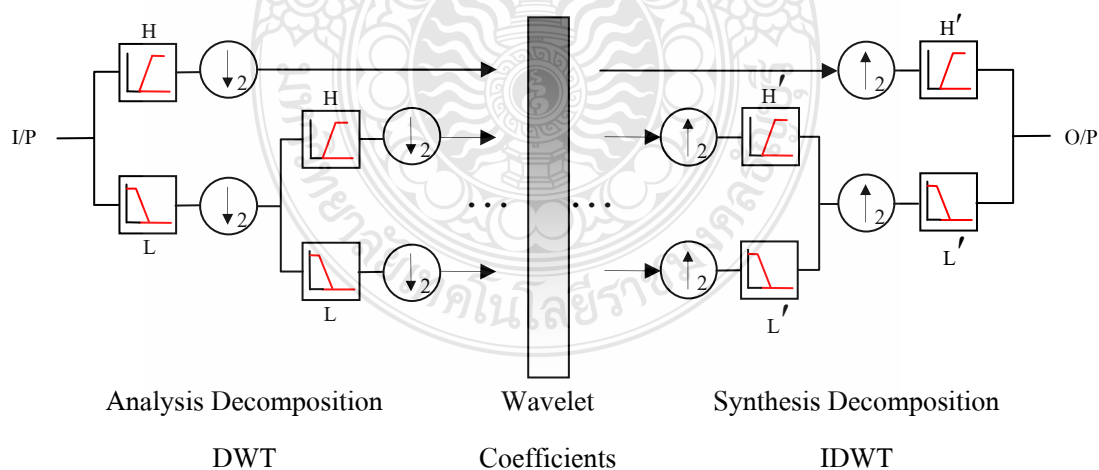
$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.26)$$

$\psi(t)$ จะเป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ที่ถูกเลื่อนและถูกสเกลโดยพารามิเตอร์ a และ b ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กัน และเพื่อให้เวฟเลตที่ถูกสเกลไปแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่ จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ด้วย $1/\sqrt{a}$ เสมอ ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a, b ต่างๆ กัน

ทฤษฎีเวฟเล็ตใช้ในการอธิบายสิ่งใดสิ่งหนึ่งเหมือนการแตกสิ่งนั้น ออกเป็นส่วนประกอบเล็กๆ ที่สัมพันธ์กัน โดยที่ชิ้นส่วนเหล่านี้จะอยู่ในภาพที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่า สัญญาณใดๆ สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยมีฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis Function) และการแตกกระจายเวฟเล็ต คือเป็นการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform; WT) ในทำนองเดียวกัน การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) จะเป็นการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform; IWT) เป็นการนำส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้ มาเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต

2.6.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis; MRA) เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกความละเอียดได้โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a มี b หลายๆ ตำแหน่งมารวมกัน เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันจะเกิดเป็นสัญญาณอินพุตจริง

การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด ต้องเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานของสเปซเวกเตอร์ (Vector Space) เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด ดังนี้

สเปซของเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณคือ สเปซหรือปริภูมิของสัญญาณใดๆ ที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อยๆ ที่เรียกว่า เบซิสฟังก์ชัน (Basis Function; BF) ถ้ากำหนดให้ a และ b เป็นจำนวนจริงใดๆ และ ให้เวกเตอร์ i, j เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในสเปซเวกเตอร์ V เสมอ ดังนั้นถ้าเวกเตอร์ใดประกอบขึ้นจากเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะได้ว่า เวกเตอร์นั้นจะยังคงอยู่ในสเปซเวกเตอร์นี้ ดังนั้น $ai + bj + ck + \dots \in V$ โดยที่เวกเตอร์ i, j จะเป็นลักษณะเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งกันและกัน ถ้าพิจารณาในลักษณะของสัญญาณอาจมองได้ว่า i, j คือเบซิสฟังก์ชัน สัญญาณเล็กๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นสัญญาณใดๆ

สมมติให้ V^j เป็นสเปซเวกเตอร์ที่มี j แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของเบซิสฟังก์ชัน ที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ถ้า j มีค่าสูงขึ้น แสดงว่า ที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นจะมีจำนวนเบซิสฟังก์ชันมากขึ้น ทำให้สัญญาณที่เกิดจากการประกอบกันจากเบซิสฟังก์ชัน มีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า j เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง จากข้อกำหนดเหล่านี้ สามารถสรุปเป็นลักษณะสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) $V^{-\infty} \dots \subset V^{-1} \subset V^1 \dots V^{\infty}$
- 2) $Close_{L^2} \left(\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right) = L^2(\mathbb{R})$; $\mathbb{R} :=$ เซตของจำนวนจริง
- 3) $\left(\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right) = \{0\}$
- 4) $V^j + W^j = V^{j+1}$; $j \in \mathbb{Z}$; $\mathbb{Z} :=$ เซตของจำนวนจริง
- 5) $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$; $j \in \mathbb{Z}$

จากการที่เบซิสฟังก์ชันประกอบกันเป็นสัญญาณ การประมาณที่ระดับความละเอียด j ภายในสเปซ V^j จะเรียกเบซิสฟังก์ชันเหล่านี้ว่า ฟังก์ชันสเกลลิง (Scaling Function; $\phi(t)$) สัญญาณ

เหล่านี้จะเกิดที่ตำแหน่งเวลาต่างๆ กันของสเปซและมีความถี่เท่ากันภายในสเปซเดียวกัน ฟังก์ชันสเกลลิงที่ระดับสเปซสูงหรือระดับความละเอียดสูง จะมีความถี่สูงและที่ระดับต่ำกว่าจะมีความถี่ต่ำกว่า ดังนั้น ความสัมพันธ์กันระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงของแต่ละสเปซจะเป็นดังนี้

$$f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.2 ทำให้สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงภายในสเปซใดๆ ได้ดังนี้

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.28 จะพบว่าระดับความละเอียดต่ำลงมาหนึ่งระดับ เบซิสฟังก์ชันจะมีความถี่ลดลงมาครึ่งละสองเท่า อาศัยลักษณะคุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด จะทำให้สามารถประมวลสัญญาณ $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ไปอยู่ในสเปซที่ระดับความละเอียด j ใดๆ ก็ได้ ดังนี้

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) \quad (2.29)$$

โดยที่ c_k^j เป็นสัมประสิทธิ์หรือนำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิงที่ตำแหน่ง k ใดๆ แล้วประกอบขึ้นเป็น $f(t)$ ที่ระดับความละเอียด j นั้นๆ

จากลักษณะสมบัติข้อ 4) ของการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงมา จะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่ในสเปซอีกอันหนึ่ง จะเรียกว่า สเปซของเวกเตอร์เวฟเล็ต (Wavelet Vector Space; W^j) สเปซชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายกับสเปซของเวกเตอร์ ดังนั้นสัญญาณภายใน W^j จะประกอบไปด้วยเบซิสฟังก์ชันเช่นเดียวกัน เรียกว่า ฟังก์ชันเวฟเล็ต (Wavelet Function; $\psi(t)$) ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ระดับความละเอียดใดๆ ได้ดังนี้

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.30 มีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่อย่างต่อเนื่องจะเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันเวฟเลต $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$ ที่มีการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่แบบเต็มหน่วย โดยที่ $a = 2^{-j}$ และ $b = 2^{-j} k$

กำหนดให้ $g_j(t)$ เป็นสัญญาณที่เกิดจากเบสฟังก์ชัน $\psi_{j,k}(t)$ ภายในสเปซเดียวกันมารวมกันเป็นสัญญาณใดๆ จะได้ว่า

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (2.31)$$

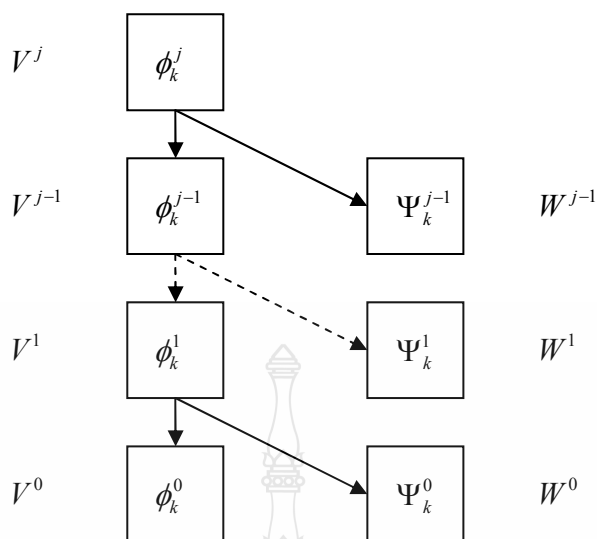
โดยที่ d_k^j เป็นสัมประสิทธิ์หรือค่าน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเลตที่ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ $g_j(t)$ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ $V^j + W^j = V^{j+1}$ และจากสมการ 2.29 และ 2.31 จะได้

$$f_{j+1} = f_j + g_j \quad (2.32)$$

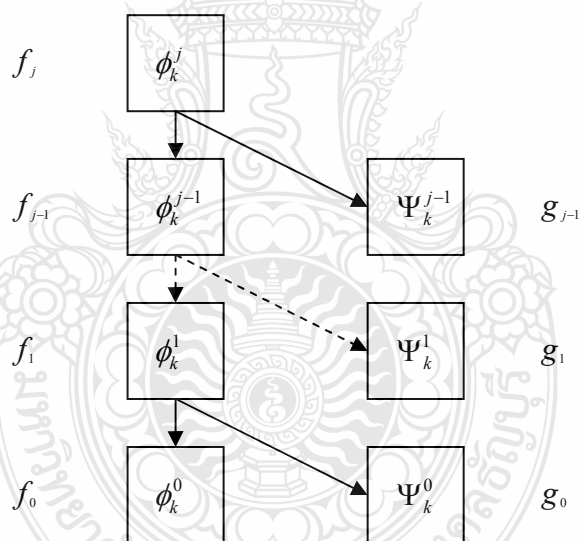
สมมติให้ $f(t) \in V^{j+1}$ จะสามารถแตกกระจายให้ $f(t)$ มีความละเอียดน้อยลงได้จากสมการ $V^j + W^j = V^{j+1}$ ในขณะเดียวกัน V^j สามารถแตกต่อไปได้เรื่อยๆ กระทั่ง $j=0$ ดังนั้น จะมีความสัมพันธ์ว่า

$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 + \dots + W^j \quad (2.33)$$

ในทำนองเดียวกัน f_{j+1} สามารถแตกกระจายเป็น f_j และ g_j สามารถแสดงเป็นรูปการแตกกระจายสเปซและสัญญาณได้ดังภาพที่ 2.22 และภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 ลักษณะการกระจายสัญญาณของสเปซเวกเตอร์



ภาพที่ 2.23 ลักษณะการกระจายสัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่างๆ

f และ g ที่ลดระดับความละเอียดลงมาจะมีความถี่ของเบสซีสฟังก์ชันลดลงมาครึ่งละสองเท่าเสมอ เราสามารถแจกแจงสัญญาณ $f(t)$ ที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเล็ตได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \quad (2.34)$$

$$f(t) = \sum_m c_j(m) \phi_{j,m}(t) + \sum_{i=j}^{\infty} \sum_m d_i(m) \psi_{i,m}(t) \quad (2.35)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์เวฟเล็ตสามารถหาได้จากสมการ โปรเจกชัน ดังสมการที่ 2.36 และ 2.37

$$c_j(m) = \langle f(t), \phi_{j,m}(t) \rangle \quad (2.36)$$

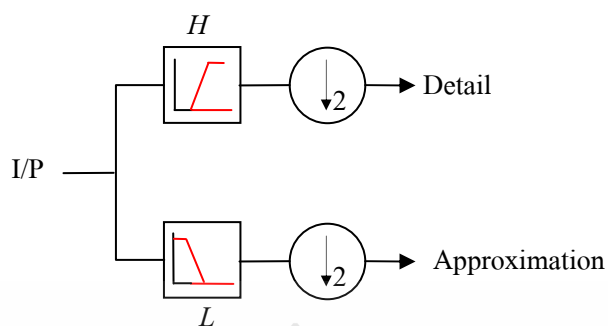
$$d_j(m) = \langle f(t), \psi_{j,m}(t) \rangle \quad (2.37)$$

การแตกกระจายสัญญาณ $f(t)$ ในสเปซ V^0 ไปจนถึงระดับความละเอียด j ดังนั้น สัมประสิทธิ์ $c_0(m)$ จะถูกแตกเป็นสัมประสิทธิ์ในเซตของ $c_j(m)$ ในสเปซ V^j และกลุ่มของ $d_{-1}(m), d_{-2}(m), \dots, d_j(m)$ อยู่ในเวฟเล็ตสเปซที่ระดับความละเอียดต่างๆ กัน จากขบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาจะเป็นลักษณะวิธีการ การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform; DWT)

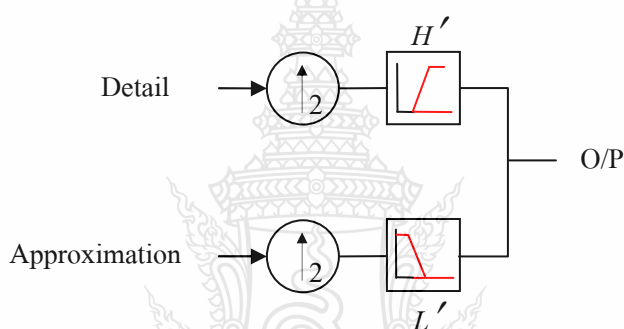
2.6.2 การแปลงเวฟเล็ตโดยอาศัยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ (Analysis Filter Bank)

ขบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Filter Bank) เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Windows Function) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่า เปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบนด์วิธที่มีอัตราการลดลงสองเท่า เหมือนกับแบนด์วิธของฟังก์ชันหน้าต่างในขณะนั้น ดังนั้นจะสามารถนำหลักการของฟิลเตอร์แบงก์มาใช้ในการสร้างเวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้

ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two Channel Filter Bank) เป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองส่วน โดยแบ่งออกเป็นส่วนของความถี่ต่ำและส่วนของความถี่สูง ดังนั้น ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณจึงประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter; L) และตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter; H) ดังภาพที่ 2.24 เป็นลักษณะการวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ และเป็นโครงสร้างที่กลับกันกับการสังเคราะห์การสร้างกลับฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Reconstruction Two Channel Filter Bank) ดังภาพที่ 2.25 โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ L และ H กับตัวกรองการสร้างกลับความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ L' และ H' มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เรียกว่า “ตัวกรองแบบสะท้อนกำลังสอง (Quadrature Mirror Filters)”

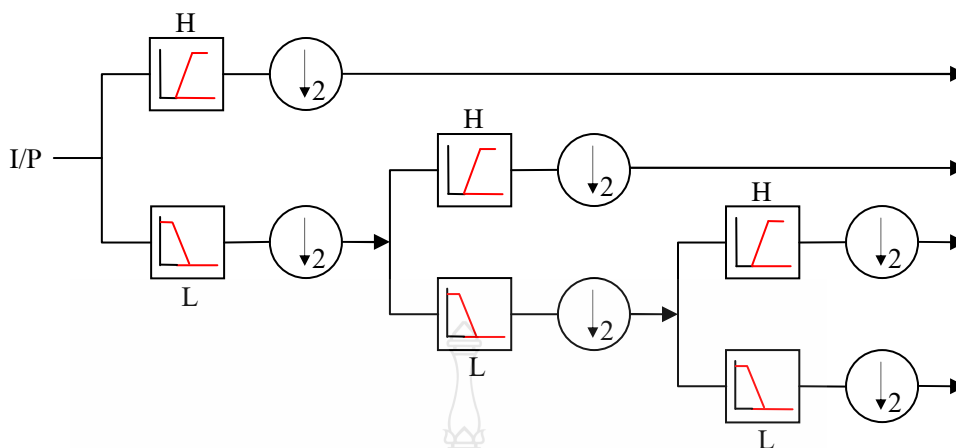


ภาพที่ 2.24 การกระจายสัญญาณ โดยใช้ฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ



ภาพที่ 2.25 การสร้างกลับสัญญาณ โดยใช้ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ

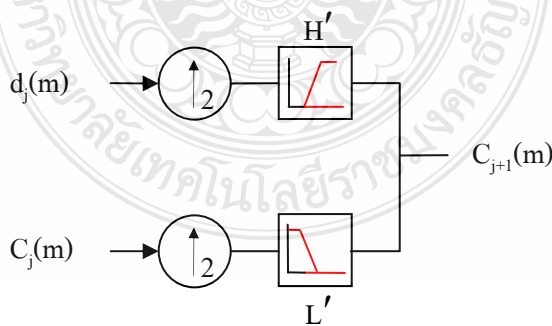
ลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Filter Bank) จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Structure) เป็นการนำฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณมาต่อเรียงกัน โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำ มาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้ง โครงสร้างของการแปลงเวฟเล็ตซ้ำในลักษณะนี้ จะเรียกว่า “โครงสร้างแบบต้นไม้ไดอะดิก (Dyadic Tree Structure)” เป็นโครงสร้างการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างแบบต้นไม้โคอะดิก

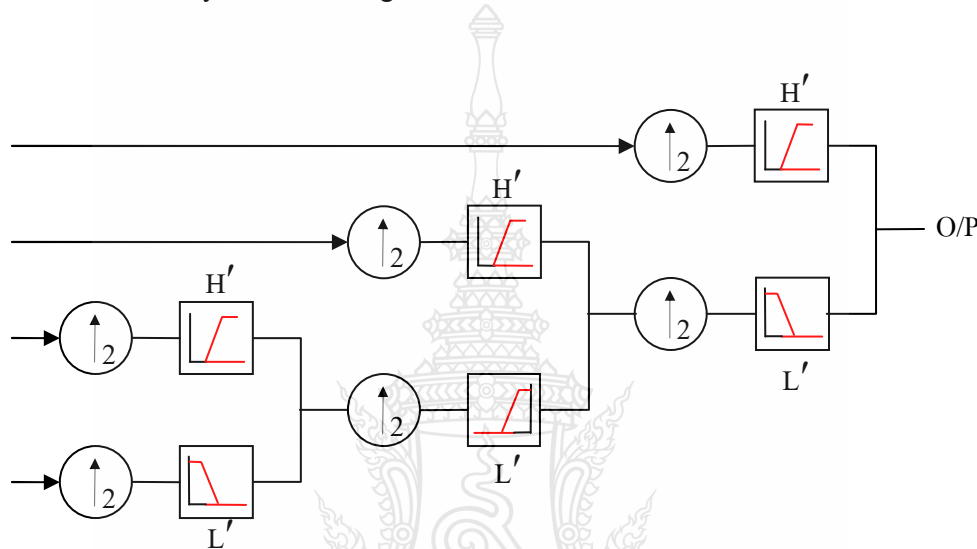
2.6.3 การแปลงกลับเวฟเล็ดโดยใช้หลักการของซินเธอร์ซีสฟิลเตอร์แบงก์ (Synthesis Filter Banks)

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) เป็นการแตกกระจายสัญญาณ (Decomposition) หรือเป็นการโปรเจกต์สัญญาณลงไปบนสเปซ V^j และ W^j ทำให้รายละเอียดของสัญญาณลดลงดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการรวมสัญญาณในสเปซ V^j และ W^j กลับไปเป็น V^{j+1} จึงเป็นการเพิ่มรายละเอียดของสัญญาณ $f(t)$ จากระดับ j ไปเป็นระดับ $j+1$ วิธีการดังกล่าวนี้จะเหมือนกับขบวนการของซินเธอร์ซีสฟิลเตอร์แบงก์ เป็นการหาค่าของ $c_{j+1(m)}$ จากค่า $c_{j(m)}$ และ $d_{j(m)}$ สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 การสร้างกลับสัญญาณโดยซินเธอร์ซีสฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ

ตัวกรองที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ เพื่อทำการรวบรวมสัมประสิทธิ์ $c_{j(m)}$ และ $d_{j(m)j}$ กลับมาเป็น $c_{j+1(n)}$ อีกครั้ง ขบวนการนี้เรียกว่า “การแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform; IWT)” จากกระบวนการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงกลับเวฟเล็ต จะสังเกตได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการแปลงกลับจะมีค่าประมาณเท่ากับค่าสัญญาณอินพุตของการแปลงเวฟเล็ต โดยที่รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) จะเป็นลักษณะการสร้างกลับอย่างสมบูรณ์ของฟิลเตอร์แบงก์ (Perfectly Reconstructing Filter Bank)



ภาพที่ 2.28 การแปลงกลับเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้โครงสร้างแบบต้นไม้โคอะดิก

2.7 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANNs)

คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการประมวลผลข้อมูล และสารสนเทศ คอมพิวเตอร์สามารถที่จะทำงานตามขั้นตอนของคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและเที่ยงตรง อย่างไรก็ตามมนุษย์ก็ยังไม่สามารถทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานบางอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่าสมองของสิ่งมีชีวิต เช่น การเข้าใจ คำพูด การรู้จำใบหน้าของมนุษย์ เป็นต้น สิ่งที่น่าสนใจคือ แต่ละเซลล์ประสาทของสมองของสิ่งมีชีวิตนั้น ทำงานช้ากว่าหน่วยเชิงตรรกะ (Logic Unit) ของดิจิทัลคอมพิวเตอร์เป็นล้านๆ เท่า แต่สิ่งมีชีวิตก็ยังสามารถในการทำงานหลายอย่าง ถือว่าซับซ้อนมากสำหรับคอมพิวเตอร์ ความสามารถที่แตกต่างกันนี้มีรากฐานมาจากความจริงที่ว่า ลักษณะของการประมวลผลในระบบประสาทรุ่นนั้น เป็นคนละรูปแบบกับวิธีการที่ใช้ในดิจิทัลคอมพิวเตอร์ทั่วไปในปัจจุบัน [13]

โครงข่ายประสาทเทียม ได้รับการพัฒนาด้วยแรงบันดาลใจ อย่างน้อย 3 เรื่องด้วยกัน คือ

- 1) การเลียนแบบการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์
- 2) การหาความสัมพันธ์ของเหตุและผลยังหาฟังก์ชันออกมาโดยตรงไม่ได้
- 3) การทำให้คอมพิวเตอร์คิดและตัดสินใจได้ด้วยตัวเอง

2.7.1 คุณสมบัติและความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียม

คุณสมบัติและความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) โครงข่ายประสาทเทียมไม่ใช่คอมพิวเตอร์ แต่โครงข่ายจะเรียนรู้จากตัวอย่าง
- 2) มีความยืดหยุ่นสูงจนสามารถจำลองกระบวนการของปัญหาใดๆ ได้
- 3) มีความสามารถในการจำชุดของค่าอินพุต-เอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถจำลองแบบในเชิงความน่าจะเป็นได้
- 4) มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม
- 5) มีความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลที่ไม่เคยเห็น
- 6) ความรู้กระจายอยู่ทั่วโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

2.7.2 ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียม

ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

- 1) ตัวอย่างของข้อมูลสำหรับการฝึกสอน ประกอบด้วยของค์ประกอบหลายๆ ค่า
- 2) เอาต์พุตที่ต้องการเป็นค่าจำนวนเต็ม หรือจำนวนจริง หรือเป็นเวกเตอร์ของจำนวนเต็ม หรือจำนวนจริงได้
- 3) ตัวอย่างของข้อมูล สามารถมีความผิดพลาดปะปนอยู่ได้
- 4) ไม่มีปัญหากับขั้นตอนการฝึกหัด อาจใช้เวลานานมาก
- 5) ต้องการประเมินผลเอาต์พุตอย่างรวดเร็ว
- 6) ไม่ต้องการเข้าใจวิธีการแก้ปัญหา แต่ต้องการให้ปัญหาได้รับการแก้ไขเท่านั้น

2.7.3 ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [13]

- 1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning)

รูปแบบการเรียนรู้แบบมีผู้สอน เริ่มด้วยการส่งสิ่งเร้าที่ใช้ในการสอนเข้าไปเป็นอินพุต (Input) ในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสร้างผลตอบออกมาเป็นเอาต์พุต (Output) ผลตอบจะเป็นอย่างไร ก็ขึ้นอยู่กับสถานะในตอนที่เราเริ่มเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ผลตอบดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบเป้าหมาย (Target Response) ผู้สอน (Teacher) จะเป็นผู้สร้างขึ้นหากผลตอบทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือมีความคลาดเคลื่อน (Error) เกิดขึ้น

ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณการปรับแต่งค่าน้ำหนักต่างๆ ในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนลงให้เหลือน้อยที่สุด

การปรับแต่งค่าน้ำหนักโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนนี้ จะขึ้นอยู่กับกฎการเรียนรู้ หรือขั้นตอนการคำนวณเรียกว่า "อัลกอริทึม" (Algorithm) ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละอัลกอริทึมจะมี คุณลักษณะและสมรรถนะแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิธีการส่วนใหญ่ของการเรียนรู้แบบมีผู้สอนนี้จะ ดัดแปลงมาจากวิธีการทางคณิตศาสตร์ ในเรื่องของเทคนิคการหาค่าเหมาะสม (Optimization Technique) นั่นเอง

2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนั้น ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป้าหมายของแต่ละข้อมูลตัวอย่างใน ระหว่างการเรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมจะได้รับข้อมูลกระตุ้นในภาพแบบต่างๆ และจะทำการจัด กลุ่มภาพแบบต่างๆ เหล่านั้นเองตามความต้องการผลตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้ แบบไม่มีผู้สอนนี้ จะเป็นการระบุกลุ่มของข้อมูลที่ใส่เข้าไป โดยจะอิงกับวิธีการจัดกลุ่มได้เรียนรู้จาก ข้อมูลที่โครงข่ายเคยพบมา

ขั้นตอนการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนี้จะมีการระบุกลุ่มของข้อมูลตัวอย่างก่อน เมื่อ ตัดสินใจได้แล้วว่าข้อมูลใหม่มีลักษณะที่ควรจัดรวมเข้ากลุ่มใด (หรืออาจถือเป็นกลุ่มใหม่ก็ได้ใน กรณีที่เห็นว่าไม่ควรจัดเข้ากลุ่มใดเลย) หลังจากนั้นจึงมีการปรับคุณลักษณะของกลุ่ม โดยการนำ ลักษณะของข้อมูลใหม่นี้มาช่วยกำหนดแนวทางการจัดด้วย ในการตัดสินใจว่าข้อมูลใหม่นี้ควรจัด รวมเข้ากลุ่มใด ในโครงข่ายประสาทเทียมบางชนิดอาจจะใช้วิธีการแข่งขันกันของกลุ่มต่างๆ ว่ากลุ่ม ใดควรได้ข้อมูลดังกล่าวไป การเรียนรู้ในลักษณะนี้จะถูกเรียกว่า “การเรียนรู้แบบแข่งขันกัน (Competitive Learning)”

ในอีกแง่มุมหนึ่ง นับจากจุดเริ่มต้นของการเรียนรู้ไม่มีการจัดกลุ่มข้อมูลในแบบใดๆ เลย จนถึงเวลาที่การจัดเสร็จสิ้นแล้ว จะพบว่าการจัดกลุ่มข้อมูลเกิดขึ้นตามคุณลักษณะบางอย่างของข้อมูล ตัวอย่าง การจัดกลุ่มนี้เกิดจากการที่โครงข่ายประสาทเทียมประเมินข้อมูลต่างๆ ที่ถูกป้อนเข้าไปใน ระหว่างการเรียนรู้ จนสร้างเป็นวิธีการจัดกลุ่มขึ้นมาได้ ดังนั้นการเรียนรู้ในลักษณะดังกล่าวจึงถูก เรียกว่า การเรียนรู้แบบจัดตัวเอง (Self-organizing)

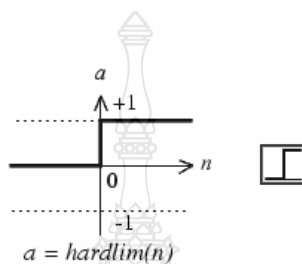
2.7.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) [14]

ฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่มากมายหลายๆ ชนิดด้วยกัน เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแฉ่ง (Hard-limit) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแฉ่งสมมาตร (Symmetric Hard-Limit) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ

เชิงเส้น (Linear) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอจิกมอยด์ (Logarithmic Sigmoid) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเพอร์บอลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์ หรือแทนซิกมอยด์ (Hyperbolic Tangent Sigmoid) และอื่นๆ

1) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแข็ง (Hard-Limit Transfer Function)

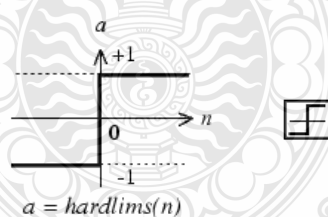
$$f(n) = \begin{cases} 0 & ; n < 0 \\ 1 & ; n \geq 0 \end{cases} \quad (2.26)$$



ภาพที่ 2.29 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแข็ง [15]

2) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแข็งสมมาตร (Symmetric Hard-Limit Transfer Function)

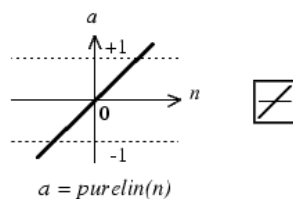
$$f(n) = \begin{cases} -1 & ; n < 0 \\ 1 & ; n \geq 0 \end{cases} \quad (2.27)$$



ภาพที่ 2.30 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดแข็งสมมาตร [15]

3) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear Transfer Function)

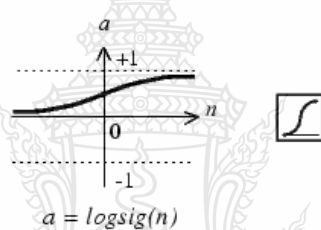
$$f(n) = n \quad (2.28)$$



ภาพที่ 2.31 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น [15]

- 4) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอจิสติกมอยด์ (Logarithmic Sigmoid Transfer Function)

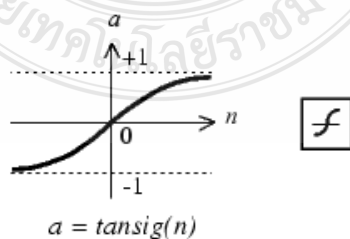
$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{(-n)}} \quad (2.29)$$



ภาพที่ 2.32 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอจิสติกมอยด์ [15]

- 5) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid Transfer Function)

$$f(n) = \frac{2}{1 + e^{(-2n)}} - 1 \quad (2.30)$$

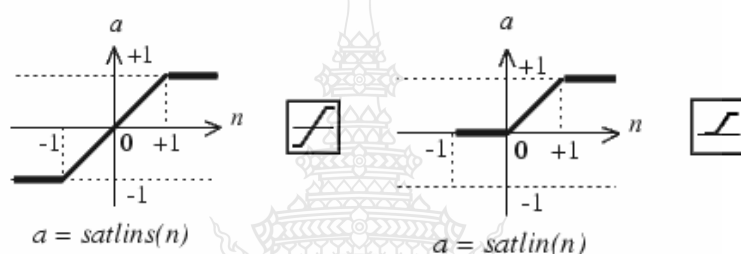


ภาพที่ 2.33 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ [15]

6) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นจำกัด (Satlin Transfer Function)

$$f(n) = \begin{cases} -1 & ; n \leq -1 \\ n & ; -1 < n < 1 \\ 1 & ; n \geq 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$f(n) = \begin{cases} 0 & ; n \leq 0 \\ n & ; 0 < n < 1 \\ 1 & ; n \geq 1 \end{cases} \quad (2.32)$$



ภาพที่ 2.34 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นจำกัด [15]

2.7.5 ภาพแบบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ [14]

นักวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ กัน ปัจจุบันรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชื่อเสียงสามารถแสดงดังตารางที่ 2.12 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ มีสถาปัตยกรรมและลักษณะที่แตกต่างกัน อัลกอริทึมสำหรับการเรียนรู้ก็มีความแตกต่างกัน เช่น บางชนิดเรียนรู้แบบ Supervised Learning บางชนิดเป็น Unsupervised Learning และสำหรับการประยุกต์ใช้งานก็มีความแตกต่างกันไป เช่น Pattern Classification Regression Function Approximation Interpolation Clustering เป็นต้น

ตารางที่ 2.12 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ

รูปแบบ	สถาปัตยกรรม/ ลักษณะเฉพาะของนิวรอน	อัลกอริทึม สำหรับเรียนรู้	การประยุกต์ใช้งาน
Perceptron	Single-Node, Feedforward/ Binary-Threshold	Supervised, Errorcorrection	Pattern Classification
Adaline	Single-Node, Feedforward/ Linear	Supervised, Gradient Descent	Regression
Multilayer Perceptron	Multilayered Feedforward/ Nonlinear Sigmoid	Supervised, Gradient Descent	Function Approximation, Pattern Classification
Reinforcement Learning	Multilayered/ Binary- Threshold	Supervised reward punishment	Robot Control
Support Vector Machines	Multilayered kernel based/ Binary-threshold	Supervised Quadratic Optimization	Classification, Regression
Radial Basis Function	Multilayered Distance based/ Linear	Supervised Gradient Descent	Interpolation, Regression, Classification
Hopfield Network	Single Layer, Feedback/ Binary threshold/ Linear	Outer product correlation	Optimization
Boltzmann Machine	Two layered, feedback/ Binary threshold	Stochastic Gradient Descent	Optimization
Bidirectional Associative Memory	Two layered, feedback/ Binary threshold	Outer product correlation	Associative Memory

ตารางที่ 2.12 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบ	สถาปัตยกรรม/ ลักษณะเฉพาะของนิวรอน	อัลกอริทึม สำหรับเรียนรู้	การประยุกต์ใช้งาน
Adaptive Resonance Theory	Two layered/ Binary, faster-than-linear	Unsupervised competitive	Clustering, Classification
Vector Quantization	Single layered, feedback/ Faster than linear	Supervised- Unsupervised competitive	Quantization, Clustering, Classification
Mexican hat net	Single Layer, Feedback/ Linear Threshold	None, Fixed weights	Activity Clustering
Kohonen Self Organizing Feature Map	Single Layer, Linear Threshold	Unsupervised, Soft-Competitive	Clustering, Topological Mapping, Classification
Pulsed Neuron models	Single/Multilayer, Pulsed/IF Neuron	None	Coincidence detection, Temporal Processing

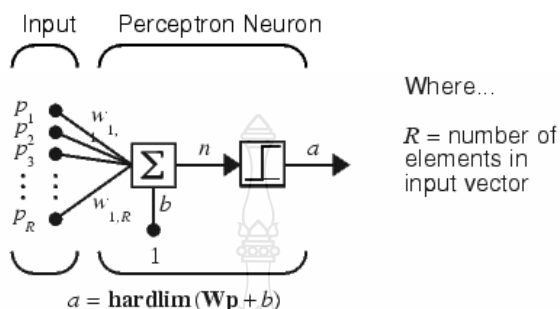
2.7.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอน [14]

มนุษย์มีความสามารถในการจำแนกรูปแบบข้อมูล และการจำแนกรูปแบบข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ การรู้จำรูปแบบข้อมูลเกี่ยวข้องกับความสามารถในจัดข้อมูลเป็นกลุ่มข้อมูลที่ที่ทราบล่วงหน้า ความสามารถในการรู้จำของมนุษย์ก็คือความสามารถในการจำแนก งานประยุกต์จำนวนมากเกี่ยวข้องกับการจำแนกข้อมูลและการรู้จำรูปแบบ อาทิ การรู้จำลายนิ้วมือ การวิเคราะห์โรค การรู้จำเป้าหมาย การตรวจสอบลายเซ็น การพยากรณ์ภูมิอากาศ เป็นต้น

รูปแบบข้อมูลหมายถึงเวกเตอร์ลักษณะพิเศษ (Feature Vector) ตัวอย่างเช่น การพยากรณ์อากาศ ต้องมีตัวอย่างข้อมูลหรือรูปแบบข้อมูลจำนวนมากได้จากการวัดค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เรียกว่าค่าลักษณะพิเศษ (Feature) โดยมีการจัดเก็บตัวอย่างฝนไม่ตก และตัวอย่างฝนตก ตัวอย่าง กลุ่มข้อมูล

เหล่านี้เรียกว่า คลาส (Classes) กลุ่มข้อมูลเป็นเซตของรูปแบบข้อมูลได้มาจากแหล่งเดียวกัน หรือกระบวนการ หรือความน่าจะเป็น มีลักษณะคุณสมบัติเดียวกัน

โครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่งเพอร์เซปตรอน แสดงได้ดังภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งเพอร์เซปตรอน [15]

เอาต์พุต a สามารถคำนวณได้จาก

$$a = f(n) = f(Wx + b) = f(w_1p_1 + w_2p_2 + \dots + w_Rp_R + b) \quad (2.33)$$

- เมื่อ W คือ เวกเตอร์น้ำหนักเชื่อมระหว่างอินพุตกับนิวรอน
 x คือ เวกเตอร์อินพุต $p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]^T$
 b คือ ค่าไบแอสชนิดสเกลาร์
 R คือ จำนวนอินพุต
 f คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดจำกัดแข็ง

$$W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_R]$$

$$f(n) = \begin{cases} 0 & ; n < 0 \\ 1 & ; n \geq 0 \end{cases}$$

2.7.7 การเรียนรู้แบบเพอร์เซปตรอน [14]

ปัญหาของการเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการหาค่าน้ำหนัก (Weight) ที่ทำให้โครงข่ายส่งค่าเอาต์พุต (Network Output) มีตรงตามค่าที่คาดหวัง (Desired Output) หรือค่าเป้าหมาย (Target) ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้รู้จักข้อมูล จะต้องมีตัวอย่างที่จะสอนประกอบด้วย คู่ข้อมูลอินพุตและเป้าหมาย (Input/Output Pairs) เรียกว่าชุดการฝึกฝน (Training Set) ข้อมูลของชุดการฝึกฝนจะถูกป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคำนวณค่าเอาต์พุตของเครือข่าย ค่าเอาต์พุตจะถูกเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายในชุดการฝึกฝน หากค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้ จากโครงข่ายมีค่าไม่ตรงกับค่าเป้าหมาย ค่าน้ำหนักจะถูกปรับแต่งใหม่ การเรียนรู้จะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งค่าเอาต์พุตและค่าเป้าหมายมีค่าเหมือนกัน เมื่อโครงข่ายได้รับการฝึกฝนเสร็จแล้วจะต้องได้รับการทดสอบความสามารถในการตอบปัญหาที่ไม่เคยพบ (Generalize) โดยใช้ข้อมูลทดสอบโครงข่ายที่ดีจะต้องมีค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้ ตรงตามค่าเป้าหมายของข้อมูลทดสอบด้วยการเรียนรู้ในลักษณะนี้ถูกนำเสนอโดย Rosenblatt เป็นการเรียนรู้โดยการลดค่าผิดพลาด

1) การเรียนรู้โดยการลดค่าผิดพลาด (Error Correction Learning Procedure)

การเรียนรู้โดยการลดค่าผิดพลาดมีวิธีการง่ายๆ โดยเฉพาะในโครงข่ายประสาทเทียมที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเพอร์เซปตรอน ขั้นตอนการเรียนรู้มีดังนี้

ในระหว่างการฝึกฝน อินพุตถูกป้อนให้ไหลเข้าไปในโครงข่ายได้เอาต์พุตจากการคำนวณ โดยค่าอินพุตคูณกับค่าน้ำหนักบวกกับค่าไบแอสแล้วส่งต่อไปยังฟังก์ชันถ่ายโอน และจากนั้นค่าเอาต์พุตจริงจะถูกเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย ถ้าค่าเอาต์พุตและค่าเป้าหมายตรงกัน จะไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของโครงข่าย แต่หากค่าเอาต์พุตจริงและค่าเป้าหมายต่างกันจะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของโครงข่ายใหม่โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบเพอร์เซปตรอน

2) ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบเพอร์เซปตรอน

กำหนดให้ข้อมูลชุดฝึกฝนคู่อินพุตเอาต์พุตเป็น $(p_1, t_1), \dots, (p_K, t_K)$ เมื่อ $p_k = [p_{k1}, \dots, p_{kn}]^T$, $t_k = [t_{k1}, \dots, t_{kn}]$, $k = 1, \dots, K$ และ K เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมดในชุดฝึกสอน

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดโครงสร้างโครงข่าย เลือกอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) $\eta > 0$

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มค่าน้ำหนัก W และ b จากค่าเล็กๆ กำหนดค่า $k = 1$ กำหนดค่าผิดพลาดรวม $E = 0$

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มทำการฝึกฝน ใส่ค่า p_k เข้าโครงข่าย $x = p_k$, $y = t_k$ ทำการคำนวณค่าเอาต์พุต a จาก $n = Wp + b$

$$a = f(n) = \begin{cases} 1 & ; n \geq 0 \\ 0 & ; n < 0 \end{cases} \quad \text{หรือ} \quad a = f(n) = \begin{cases} 1 & ; n \geq 0 \\ -1 & ; n < 0 \end{cases}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าน้ำหนักและไบแอสใหม่

$$W = W + \eta(y - a)p^T$$

$$b = b + \eta(y - a)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าผิดพลาดสะสม

$$E = E + \frac{1}{2} \|(y - a)\|^2$$

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $k < K$ ให้ $k = k + 1$ ทำการคำนวณซ้ำจากขั้นตอนที่ 3 ถ้า $k = K$ ทำ

ขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 ถ้าค่าผิดพลาดสะสม $E = 0$ จบการฝึกฝน ถ้า $E > 0$ ให้กำหนด $E = 0, k = 1$ เริ่มรอบการฝึกฝนใหม่จากขั้นตอนที่ 3

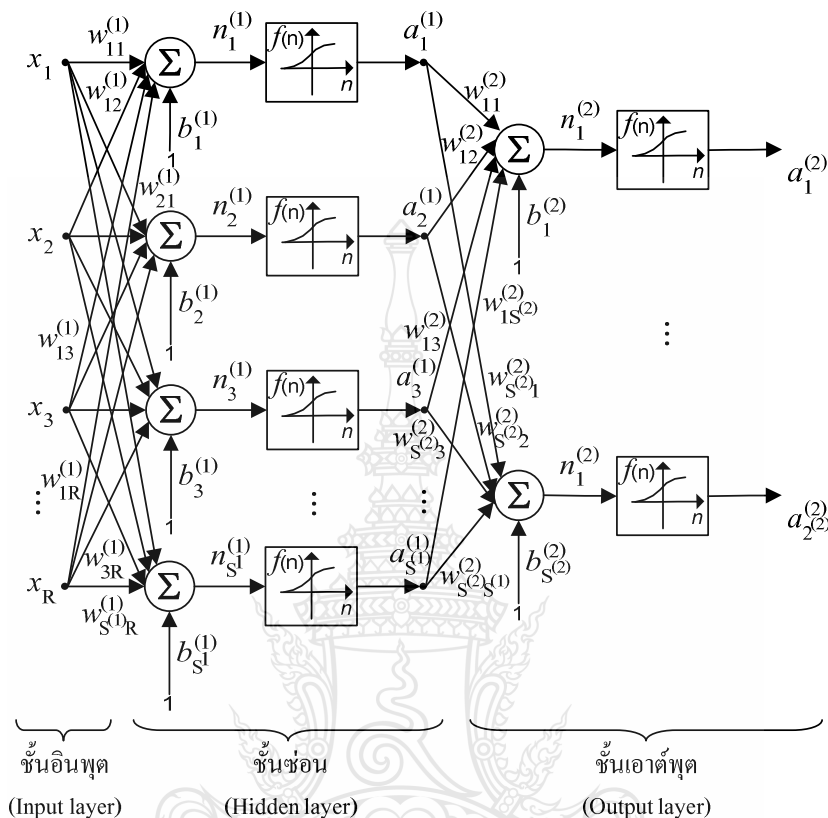
3) ทฤษฎีการลู่เข้า (Convergence Theorem)

ถ้าปัญหาเป็นแบบที่แยกได้ด้วยเส้นตรง (Linearly Separable) แล้วโปรแกรมจะทำการวนรอบที่จำกัด และโครงข่ายที่ถูกสอนด้วยวิธีเพอร์เซปตรอน จะสามารถหาค่าน้ำหนักและไบแอสที่สามารถแยกกลุ่มข้อมูลได้ถูกต้องทั้งหมด

2.7.8 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น [14]

โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนแบบหนึ่งหน่วย สามารถทำตัวเป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรงหนึ่งเส้น และใช้สำหรับการแยกกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก อาทิ ปัญหาข้อมูลมีการทับซ้อน ปัญหาการแยกแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น โครงข่ายเพอร์เซปตรอนแบบหนึ่งชั้นจะไม่สามารถแก้ปัญหาได้ ต้องทำการเพิ่มจำนวนชั้นและจำนวนเซลล์ประสาทของโครงข่ายให้มากขึ้น ดังนั้นการสอนโครงข่ายจะมีความซับซ้อนมากขึ้น สำหรับการสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น จะใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back Propagation Learning)

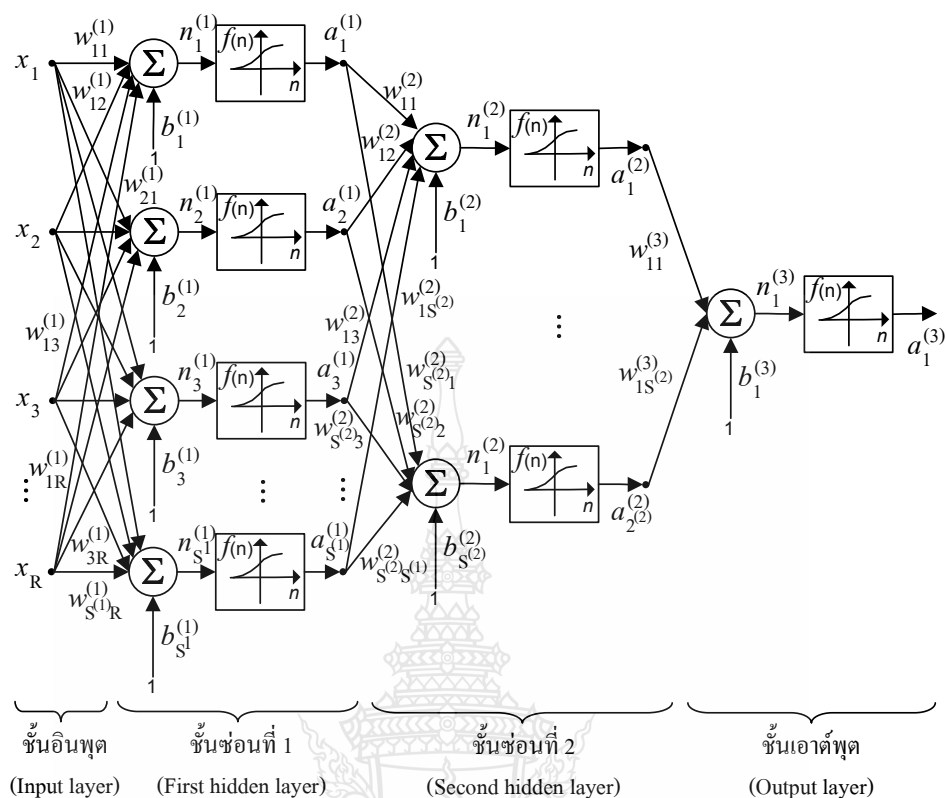
1) การเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-propagation Learning)



ภาพที่ 2.36 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนสองชั้น

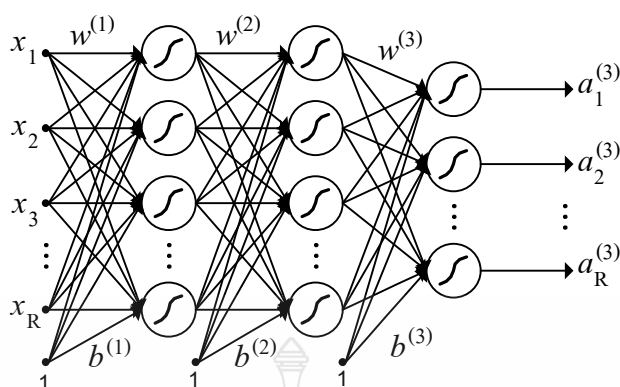
โครงข่ายประสาทเทียม นอกจากจะสามารถทำหน้าที่เป็นตัวแยกข้อมูล (Classification) แล้วยังสามารถใช้ในการประมาณค่า (Function Approximation) โดยการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นชนิดลอจิสติกมอยด์ และกำหนดโครงสร้างเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น ดังภาพที่ 2.36 การคำนวณค่าที่เอาต์พุต โดยการป้อนอินพุตเข้าชั้นที่หนึ่งและคำนวณไปข้างหน้า (Feed Forward) เอาต์พุตของชั้นก่อนจะเป็นอินพุตป้อนเข้าสู่ชั้นถัดไปเรื่อยๆ จนถึงเอาต์พุต และฟังก์ชันถ่ายโอนจะเป็นแบบใดก็ได้ ในแต่ละชั้นสามารถกำหนดให้เป็นต่างชนิดกัน แต่ในชั้นเดียวกันมักกำหนดให้เป็นฟังก์ชันชนิดเดียวกัน

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนที่มีชั้นมากกว่าสองชั้น จะคำนวณเช่นเดียวกัน ภาพที่ 2.37 เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบสามชั้น ภาพที่ 2.38 เป็นการเขียนแบบย่อ



ภาพที่ 2.37 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนสามชั้น

การคำนวณโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนสามชั้น กำหนดให้ x เป็นเวกเตอร์อินพุต $w^{(1)}$ เป็นเมตริกซ์น้ำหนักชั้นซ่อนที่หนึ่ง $b^{(1)}$ เป็นเวกเตอร์ไบแอสของชั้นซ่อนที่หนึ่ง $w^{(2)}$ เป็นเมตริกซ์น้ำหนักชั้นซ่อนที่สอง $b^{(2)}$ เป็นเวกเตอร์ไบแอสของชั้นซ่อนที่สอง $w^{(3)}$ เป็นเมตริกซ์น้ำหนักชั้นเอาต์พุต $b^{(3)}$ เป็นเวกเตอร์ไบแอสของชั้นเอาต์พุต $a^{(1)}$ เป็นเอาต์พุตเวกเตอร์ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง $a^{(2)}$ เป็นเอาต์พุตเวกเตอร์ของชั้นซ่อนที่สอง และ $a^{(3)}$ เป็นเอาต์พุตเวกเตอร์ของชั้นเอาต์พุต



ภาพที่ 2.38 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้นแบบย่อ

2) ตัวชี้ค่าผิดพลาดของการทำให้บรรลุผลสำเร็จ (Error Performance Index)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น จะใช้วิธีการสอนแบบแพร่กระจายย้อนกลับ โดยมีตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้เช่นเดียวกันกับวิธีการสอนแบบค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด คือใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error; MSE) เป็นตัวชี้ โดยอัลกอริทึมจะปรับค่าน้ำหนักและไบแอส เพื่อลดค่าผิดพลาด

$$E(x) = (t_k - a_k)^2 = e_k^2 \quad (2.34)$$

โดยมีกฎการเรียนรู้แบบค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดเป็น

$$w_{ij}^{(1)}(k+1) = w_{ij}^{(1)}(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(1)}} \quad (2.35)$$

$$b_i^{(1)}(k+1) = b_i^{(1)}(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial b_i^{(1)}} \quad (2.36)$$

เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ฟังก์ชันค่าผิดพลาดจะไม่เป็นฟังก์ชันโดยตรงกับค่าน้ำหนักในชั้นซ่อน ดังนั้นการหาค่าอนุพันธ์จะไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง แต่ต้องอาศัยกฎลูกโซ่

3) ชนิดของการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.13 อัลกอริทึมสำหรับการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

อัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียน		คุณลักษณะ
Traingd	Gradient Descent (GD)	เป็นแบบดั้งเดิม ทำงานช้า
Traingdm	GD with Momentum	เร็วกว่า traingd
Traingda	GD with Adaptive α	เร็วกว่า traingd แต่สามารถใช้ได้แต่
Traingdx	Gd with Adaptive α and with Momentum	กับ batch mode เท่านั้น
Trainrp	Resilient Backpropagation	เร็วสำหรับการปรับค่าเข้าหากัน
Traincfp	Fletcher-Reeves Update	อัลกอริทึม Conjugate Gradient เร็ว สำหรับการปรับค่าเข้าหากัน
Traincgp	Polak-Ribiere Update	
Traincgb	Powell-Beale Restart	
Trainscg	Scaled Conjugate Gradient	
Trainoss	One Step Secant Algorithm	อัลกอริทึม Quasi-Newton เร็วสำหรับ การปรับค่าเข้าหากัน
Trainbfg	BFGS Algorithm	
Trainlm	Levenberg-Marquardt	เร็วในการเรียนรู้
Trainbr	Bayesian Regularization	ปรับปรุงความสามารถโดยทั่วไปให้ดีขึ้น

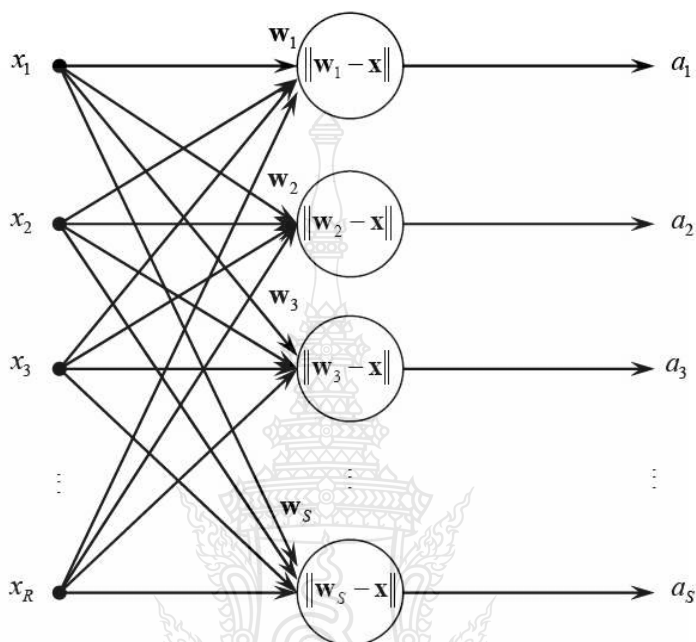
2.7.9 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) [14]

โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้สอน (Supervised Learning) ได้แก่ การเรียนรู้แบบเพอร์เซปตรอน และการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ เป็นการเรียนรู้ที่ต้องมีคู่ข้อมูลอินพุตและเป้าหมาย (Input-Target Pair) สำหรับสอนโครงข่าย โครงข่ายจะเรียนรู้จนกระทั่งสามารถจัดเทียบ (Mapping) คู่ข้อมูลอินพุตและเป้าหมาย จนกระทั่งค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลดลงสู่ใกล้ศูนย์หรือค่าเล็กน้อยที่ยอมรับได้

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบไม่มีผู้สอนจะใช้สำหรับการเรียนรู้ข้อมูลที่มีเฉพาะข้อมูลอินพุต ไม่มีค่าเป้าหมาย โครงข่ายจะเรียนรู้ข้อมูลด้วยการวัดความคล้ายระหว่างชุดข้อมูล และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกัน ข้อมูลที่มีความคล้ายกันจะถูกจัดกลุ่มเข้าด้วยกัน และข้อมูลแตกต่างกัน

จะถูกแยกไว้ต่างกลุ่มกัน ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด (Kohonen Winner Takes All Network) และ โครงข่ายประสาทเทียมก่อตัวด้วยตนเอง (Self Organizing Feature Maps)

1) โครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด (Kohonen Winner Takes All Network)



ภาพที่ 2.39 โครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน จะอยู่บนพื้นฐานของการจัดกลุ่มของข้อมูลอินพุตโดยไม่มีความรู้ก่อน (No A Priori Knowledge) เกี่ยวกับกลุ่มหรือชนิดของข้อมูล โครงข่าย โครงข่ายจะค้นหาลักษณะเฉพาะและประวัติของข้อมูลที่จะถูกใช้เป็นตัวช่วยในการระบุกลุ่มและขอบเขตที่เป็นไปได้ระหว่างกลุ่ม โดยโครงข่ายที่มีแบบไม่มีผู้สอนจะจัดกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะเดียวกันไว้ด้วยกัน และแยกกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะแตกต่างกันไว้ต่างกลุ่มกัน ตัวอย่างหนึ่งของโครงข่ายแบบไม่มีผู้สอนคือโครงข่ายประสาทเทียมของโคโฮเนน (Kohonen's Network) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด จำแนกกลุ่มอินพุตเป็น M กลุ่ม เป็นจำนวนกลุ่มที่ระบุไว้ก่อนล่วงหน้า โครงข่ายประสาทเทียมแบบผู้ชนะได้หมด มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.41 ในการเรียนรู้จะพิจารณาเซตของเวกเตอร์นำหน้า M เวกเตอร์ เป็นตัวแปรเวกเตอร์จะถูกปรับค่า และก่อนเริ่มการเรียนรู้ ค่าเวกเตอร์นำหน้าเริ่มจากการสุ่มต้องได้รับการแปลงให้มีขนาดเป็นหนึ่ง (Normalization)

2) โครงข่ายประสาทเทียมก่อตัวด้วยตนเอง (Kohonen Self-Organizing Feature Maps)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบก่อตัวด้วยตนเองของโคโฮเนน (Kohonen's SOM) เป็นโครงข่ายที่มีลักษณะการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน จุดมุ่งหมายของการเรียนรู้คือการค้นพบโครงสร้างของข้อมูล แต่อย่างไรก็ตามชนิดของโครงสร้างก่อนข้างมีความยุ่งยาก โครงข่ายแบบก่อตัวด้วยตนเองของโคโฮเนน เรียกได้ว่าเป็นแผนที่ที่รักษาไว้ซึ่งทอพอโลยี (Topology) เพราะว่ามีโครงสร้างทอพอโลยีบนประสาทเทียมใน โครงข่าย แผนที่ทอพอโลยีเป็นการจัดเทียบอย่างง่าย ๆ คงไว้ซึ่งความสัมพันธ์ของประสาทเทียมเพื่อนบ้าน

ในโครงข่ายประสาทเทียมแบบก่อตัวด้วยตนเอง มีการจัด โครงสร้างของประสาทเทียมที่เอาต์พุตเป็นแนวเส้นตรง (Line) หรือ โครงสร้างภายนอกแบบพื้นที่ราบ (Planar Configuration) มีลักษณะทางกายภาพที่แต่ละประสาทเทียมจะอยู่ใกล้กันหรือไกลจากกัน ประสาทเทียมที่อยู่ใกล้กันจะทำปฏิกิริยาแตกต่างจากประสาทเทียมที่อยู่ไกลกัน จุดมุ่งหมายการฝึกสอน โครงข่ายเพื่อให้เอาต์พุตที่อยู่ใกล้กันสัมพันธ์กับอินพุตที่อยู่ใกล้กัน

ถ้า x_1 และ x_2 เป็นสองอินพุตเวกเตอร์ และ t_1 และ t_2 เป็นตำแหน่งของประสาทเทียมเอาต์พุตผู้ชนะที่สัมพันธ์กัน ดังนั้น t_1 และ t_2 จะอยู่ใกล้กันถ้า x_1 และ x_2 อยู่ใกล้กัน โครงข่ายที่ทำการจัดเทียบเช่นนี้เรียกว่า แผนที่คุณลักษณะ (Feature Map) ในสมองมนุษย์ โครงข่ายมีแนวโน้มที่จะอยู่เป็นกลุ่ม การเชื่อมต่อของใยประสาทภายในกลุ่มจะแน่นหนากว่าการเชื่อมโยงกับใยประสาทภายนอกกลุ่ม โครงข่ายประสาทเทียมแบบโคโฮเนน พยายามจะจำลองการทำงานในลักษณะเดียวกัน

2.8 การสำรวจเอกสาร (Literature Reviews)

ทำการศึกษาที่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปลงเวฟเล็ท และ โครงข่ายประสาทเทียม ในการอ้างอิง และนำมาประยุกต์ใช้ ดังนี้

Ghanim Putrus และคณะ [16] ได้นำเสนองานวิจัย เรื่อง Overview and Monitoring ได้จัดกลุ่มของคุณภาพไฟฟ้าออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ คุณภาพไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State Events) และคุณภาพไฟฟ้าในสภาวะชั่วขณะ (Transition Events) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-1995 โดยระบุสาเหตุ, ผลกระทบที่เกิดขึ้น และการแก้ปัญหาของคุณภาพไฟฟ้าแต่ละแบบ สภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถตรวจจับ และแสดงผลของคุณภาพไฟฟ้าได้ นำไปสร้างเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคระบบการเรียนรู้ต่างๆ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (ANNs) ฟัซซี่ ลอจิก (Fuzzy Logic) การประยุกต์ใช้พันธุกรรมคอมพิวเตอร์ (Genetic Algorithms; GAs) และอื่นๆ ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ราคาถูก ประสิทธิภาพในการแยกแยะ และการระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติได้ดี

L.C.Saikia, S.M.Borah และ S.Pait [17] ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform, Fuzzy Logic and Neural Network การตรวจจับสัญญาณและการจำแนกคุณภาพไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างการใช้ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) กับ โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ใช้เวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform; DWT) ชนิด Daubechies 4 (db4) ในการสกัดจุดเด่นหาค่าฮาร์โมนิกสักรวม (Total Harmonic Distortion; THD) และระดับค่าพลังงานความละเอียดในลำดับที่ 1 (Level) เพื่อใช้เป็น อินพุตของฟัซซี่ลอจิก และ โครงข่ายประสาทเทียมจะอาศัยเทคนิคการสอนแบบแพร่กลับ (Back Propagation) 2 ชั้นซ่อน (Multi - Layer Perceptron; MLP) จำนวนนิวรอนในชั้นอินพุตประกอบด้วย 2 นิวรอน ชั้นซ่อนจำนวน 6 นิวรอน และชั้นเอาต์พุตจำนวน 4 นิวรอน ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรม Matlab กับคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วย การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ การเกิดไฟดับ แรงดันทรานเซียน โดยวิธีการที่เสนอพบว่าผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทที่ทำ การสอนมีความถูกต้องในการจำแนกประมาณร้อยละ 5 สำหรับฟัซซี่ลอจิกนั้น จะมีความผิดพลาดในการจำแนก หากมีระดับขนาดแรงดันของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ความถูกต้องในการ จำแนกประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทจึงมีประสิทธิภาพดีกว่า แต่ในด้าน ความเร็วจะต้องใช้เวลาในการเรียนรู้เพิ่มขึ้นด้วย

ชูศักดิ์ คิลกรัตนตระกูล [18] ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง การค้นหา - ระบุตำแหน่งจุดเกิด ความผิดพร่องบนภาพคลื่น และการแยกประเภทรูปแบบความผิดพร่องอัตโนมัติที่ครอบคลุมคุณภาพ ระบบไฟฟ้า นำทฤษฎีของไดแอดิก - เซิงตั้งฉากปกติ (Dyadic - Orthonormal) ใช้เทคนิคการแยก รายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (Multiresolution Signal Decomposition; MSD) ของการแปลงเวฟ เล็ต ชนิด Daubechies 4 (db4) จำนวน 5 ระดับ มาใช้ในการค้นหา และระบุตำแหน่งที่เกิดการรบกวน โดยภาพแบบความผิดพร่องต่างๆ ที่ครอบคลุมคุณภาพระบบไฟฟ้ามี 6 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดต่างเฟส ระบบไฟฟ้าบกพร่องเฉพาะที่ ระบบไฟฟ้าเฉพาะที่จ่ายภาระอีกครั้ง สายหรือจุดต่อหลวม การสลับ ระหว่างแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง และกับดักเสิร์จปล่อยประจุในก๊าซ โดยใช้เวฟเล็ต โดยในขั้นตอนการ ค้นหา และระบุตำแหน่งจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ที่อาศัยเทคนิคของการแยก รายละเอียดสัญญาณหลายระดับมาพิจารณา ได้อย่างถูกต้องโดยอัตโนมัติ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 5 % และมากกว่า 5 % สำหรับการแยกประเภทรูปแบบความผิดพร่องชนิดต่างๆ ที่ครอบคลุมคุณภาพระบบ ไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ใช้โครงข่ายประสาทเทียม ที่อาศัยเทคนิคของโครงข่ายการเรียนรู้การควอนไทซ์ เวกเตอร์ (Learning Vector Quantization Network) มาทำการพิจารณาตัดสินใจโดยอาศัยวิธีการโหวต

สามารถสรุปผลการทดลองแยกประเภทภาพแบบความผิดพลาดในเทอมของอัตราความแม่นยำ และการวัดความเหมือน-ความน่าจะเป็น จะมีความแม่นยำที่ยอมรับได้เท่ากับ 84.47%

Chen Chun-ling และคณะ [19] ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง การค้นหา และการระบุตำแหน่งของสัญญาณรบกวนคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้ลิฟต์เวฟเล็ต (Lifting Wavelet) ชนิด Daubechies 3 (db3) และ Daubechies 4 (db4) จำนวน 4 ระดับ หาช่วงเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และจุดสิ้นสุด (Ending Point) กับ 7 ชนิดคุณภาพไฟฟ้า ดังนี้ แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ ไฟดับชั่วขณะ การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า การเกิดฮาร์มอนิกส์ชั่วขณะ การกวัดแกว่งชั่วขณะ และการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะมีค่าความคลาดเคลื่อนในการหาจุดความผิดพลาดของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า ชนิด Daubechies 4 อยู่ระหว่าง 0.1 % ถึง 1.1 % และเมื่อเปรียบเทียบกับชนิด Daubechies 3 จะมีความแม่นยำสูงกว่าค่อนข้างมาก

Worapol Kanitpanyacharoen และ Suttichai Premrudeepreechacharn [20] ได้นำเสนองานวิจัย เรื่อง Power Quality Problem Classification Using Wavelet Transformation and Artificial Neural Networks ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform; DWT) ชนิด Daubechies 4 (db4) จำนวน 12 ระดับ ลักษณะเด่นสำหรับการจำแนกมาจากการหาผลต่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต แล้วนำมาหาผลต่างกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์หลายความละเอียดของสัญญาณ 1 ชั้น ในแต่ละระดับของการจำแนกองค์ประกอบหลายระดับความละเอียด จำนวน 12 ระดับ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปเป็นอินพุต มาทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมแล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ ในโหมดการทดสอบ จะใช้ค่าน้ำหนักที่ได้มาจำแนกว่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมนั้น จัดเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแบบใด จะอาศัยเทคนิคการสอนแบบแพร่กลับ 2 ชั้นซ่อน (Multi - Layer Perceptron; MLP) จำนวนนิวรอนในชั้นอินพุตประกอบด้วย 12 นิวรอน และชั้นเอาต์พุตจำนวน 5 นิวรอน ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรม Matlab กับคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 6 ชนิด ประกอบด้วย การเกิดอิมพัลส์ชั่วขณะ การเกิดไฟดับชั่วขณะ การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ การเกิดสัญญาณนอตช์ และความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ โดยวิธีการที่เสนอพบว่าผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทที่ทำการสอนมีความถูกต้องในการจำแนกร้อยละ 97.9

2.9 สรุปผลการศึกษาศักยภาพหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นที่เกี่ยวข้องและหลักการที่นำมาใช้ในการวิจัย จึงทำให้เกิดแนวคิดในการวิเคราะห์เพื่อจำแนกคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยมีการค้นหา และระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของสัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ของระบบไฟฟ้า ที่ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น ทั้ง 12 ชนิด ประกอบด้วย

- 1) แรงดันปกติ
- 2) แรงดันตกชั่วขณะ
- 3) แรงดันเกินชั่วขณะ
- 4) แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 5) แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 6) ไฟดับชั่วขณะ
- 7) กระแสเกิน
- 8) กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 9) กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน
- 10) กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์
- 11) ความถี่ต่ำเกิน
- 12) ความถี่สูงเกิน

เนื่องจากแรงดัน กระแส และความถี่ หากมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในทันทีทันใด จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า หรือนำความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ อาศัยการแปลงเวฟเล็ดแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT) ชนิด Daubechies 4 (db4) รวมทั้งการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) เพื่อการจัดจำแนก (Identification) ชนิดคุณภาพไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการจำแนก สำหรับใช้เป็นกลุ่มข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Training) และการทดสอบ (Testing) ของโครงข่ายประสาทเทียม กำหนดรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (MLP) ใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back - Propagation Learning)

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้

อ้างอิง	ชนิดของคุณภาพไฟฟ้า	วิธีการที่ใช้			สมรรถนะที่ได้
		WT	FL	ANN	
[17]	1. การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ 2. การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 3. การเกิดไฟดับ 4. แรงดันทรานเซียน	✓	✓		- ANN มีประสิทธิภาพในการจำแนกดีกว่า มีค่าความผิดพลาด 5% ในขณะที่ FL มีค่าความผิดพลาด 12% แต่ด้อยกว่าในด้านความเร็ว
[18]	1. ระบบไฟฟ้าบกพร่องเฉพาะที่ 2. ระบบไฟฟ้าเฉพาะที่จ่ายภาระอีกครั้ง 3. สาย หรือจุดต่อหลวม 4. การสลับระหว่างแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง 5. กั๊บคักเสิร์จปล่อยประจุในก๊าซ	✓		✓	- อัตราความแม่นยำในการแยกประเภทภาพแบบความผิดพลาด 84.47 % - ภาพแบบความผิดพลาด มีจำนวนมากทำให้ใช้เวลาในการเรียนรู้มาก ถึงแม้สมรรถนะในการแยกประเภทจะมีค่าสูงขึ้น
[19]	1. แรงดันตกชั่วขณะ 2. แรงดันเกินชั่วขณะ 3. ไฟดับชั่วขณะ 4. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า 5. การเกิดฮาร์มอนิกชั่วขณะ 6. การกวัดแกว่งชั่วขณะ 7. การเปลี่ยนแปลงแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	✓			- ความคลาดเคลื่อนในการหาจุดความผิดพลาดของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า ชนิด Daubechies 4 อยู่ระหว่าง 0.1 % ถึง 1.1 %
[20]	1. การเกิดอิมพัลส์ชั่วขณะ 2. การเกิดไฟฟาดับชั่วขณะ 3. การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ 4. การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 5. การเกิดสัญญาณนอตซ์ 6. ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากฮาร์มอนิกส์	✓		✓	- มีความถูกต้องในการจำแนกร้อยละ 97.9

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ (ต่อ)

อ้างอิง	ชนิดของคุณภาพไฟฟ้า	วิธีการที่ใช้			สมรรถนะที่ได้
		WT	FL	ANN	
วิทยานิพนธ์นี้	1. แรงดันไซน์ปกติ 2. แรงดันตกชั่วขณะ 3. แรงดันเกินชั่วขณะ 4. แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 5. แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 6. ไฟดับ 7. กระแสเกิน 8. กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ กระแสรั่วลงดิน 10. กระแสรั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 11. ความถี่ต่ำเกิน 12. ความถี่สูงเกิน	✓		✓	- มีความถูกต้องในการจำแนกสูง - การตรวจจับสัญญาณที่แม่นยำมากขึ้น

หมายเหตุ:

- * WT = Wavelet Transform (การแปลงเวฟเล็ต)
- * FL = Fuzzy Logic (ฟัซซี่ลอจิก)
- * ANN = Artificial Neural Networks (โครงข่ายประสาทเทียม)

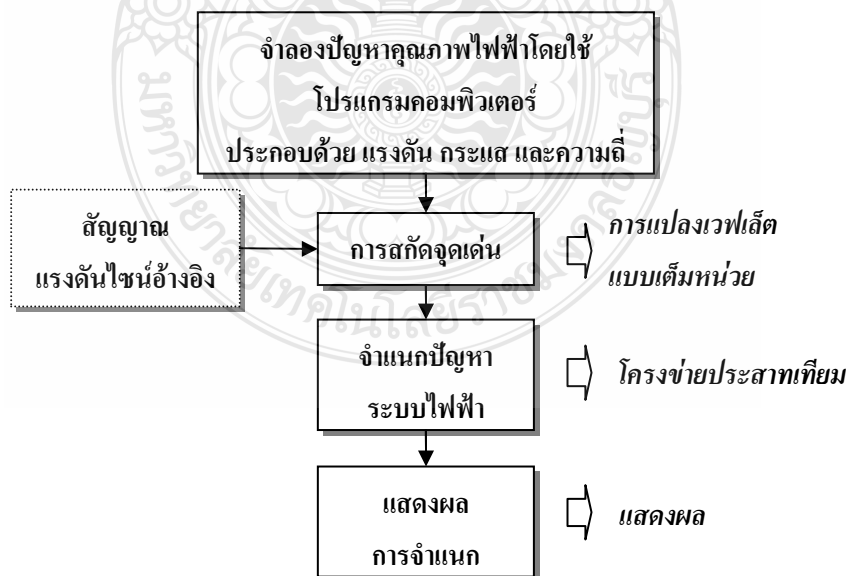
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์

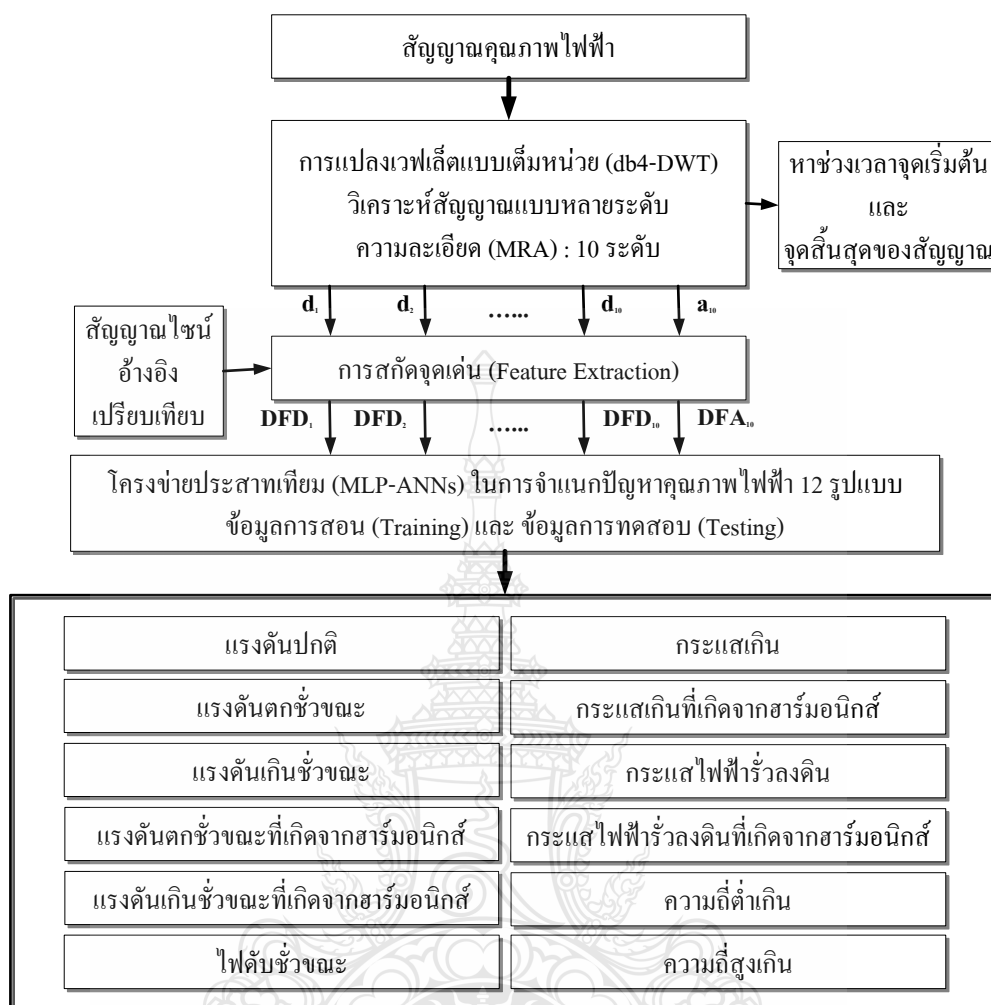
3.1 การออกแบบจำลองปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

ความผิดปกติของระบบไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบ ที่พิจารณาจะประกอบด้วย กระแสแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ภาระทางไฟฟ้า (Load) และผลต่อชีวิตและทรัพย์สินภายในที่พักอาศัย

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่พิจารณานี้ จะใช้วิธีจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ปกติ (Normal Sinusoidal Signals) ดังภาพที่ 3.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และภาพที่ 3.2 โครงสร้างของเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า รูปแบบความผิดปกติของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าสามารถจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.0 (Wavelet Toolbox) สัญญาณแต่ละรูปแบบมีคุณลักษณะของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ส่วนการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-resolution Analysis; MRA) และการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) ใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform; DWT) ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANNs) ในการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Disturbance Classification)



ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของเวฟเลตและโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

3.2 การออกแบบจำลองระบบการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้า

3.2.1 การหาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และจุดสิ้นสุดของสัญญาณ (Ending Point)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis; MRA) เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกความละเอียดได้โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a มี b หลายๆ ตำแหน่งมารวมกัน เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันจะเกิดเป็นสัญญาณอินพุตจริง สามารถแจกแจงสัญญาณ $f(t)$ ที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเลตได้ดังนี้

$$f(t) = \sum_m c_j(m) \phi_{j,m}(t) + \sum_{i=j}^{\infty} \sum_m d_i(m) \psi_{i,m}(t) \quad (3.1)$$

โดย c_j คือ สัมประสิทธิ์เวฟเลตฟังก์ชันสเกลลิ่งที่ความละเอียด j

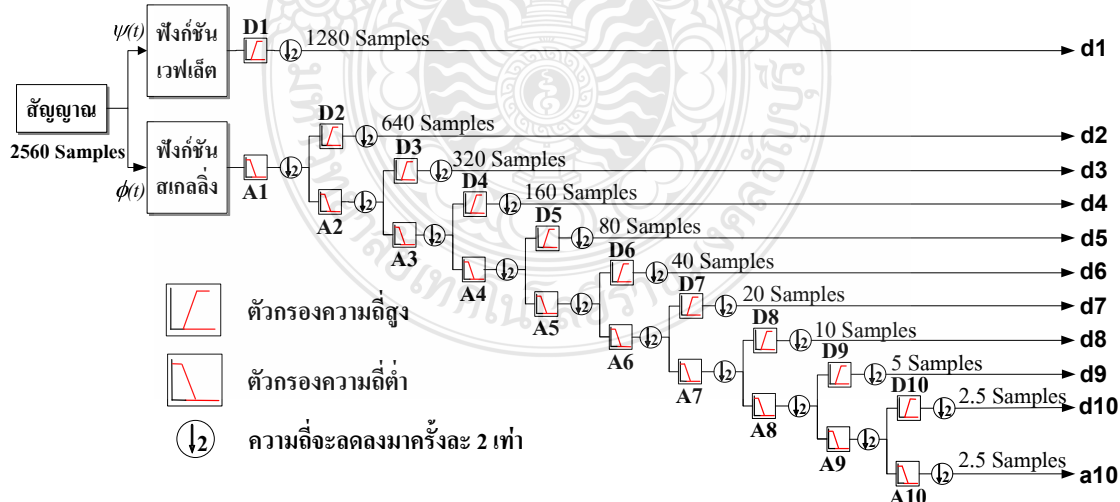
d_i คือ สัมประสิทธิ์เวฟเลตฟังก์ชันเวฟเลตที่ความละเอียด i

ϕ_j คือ ฟังก์ชันสเกลลิ่ง

ψ_i คือ ฟังก์ชันเวฟเลต

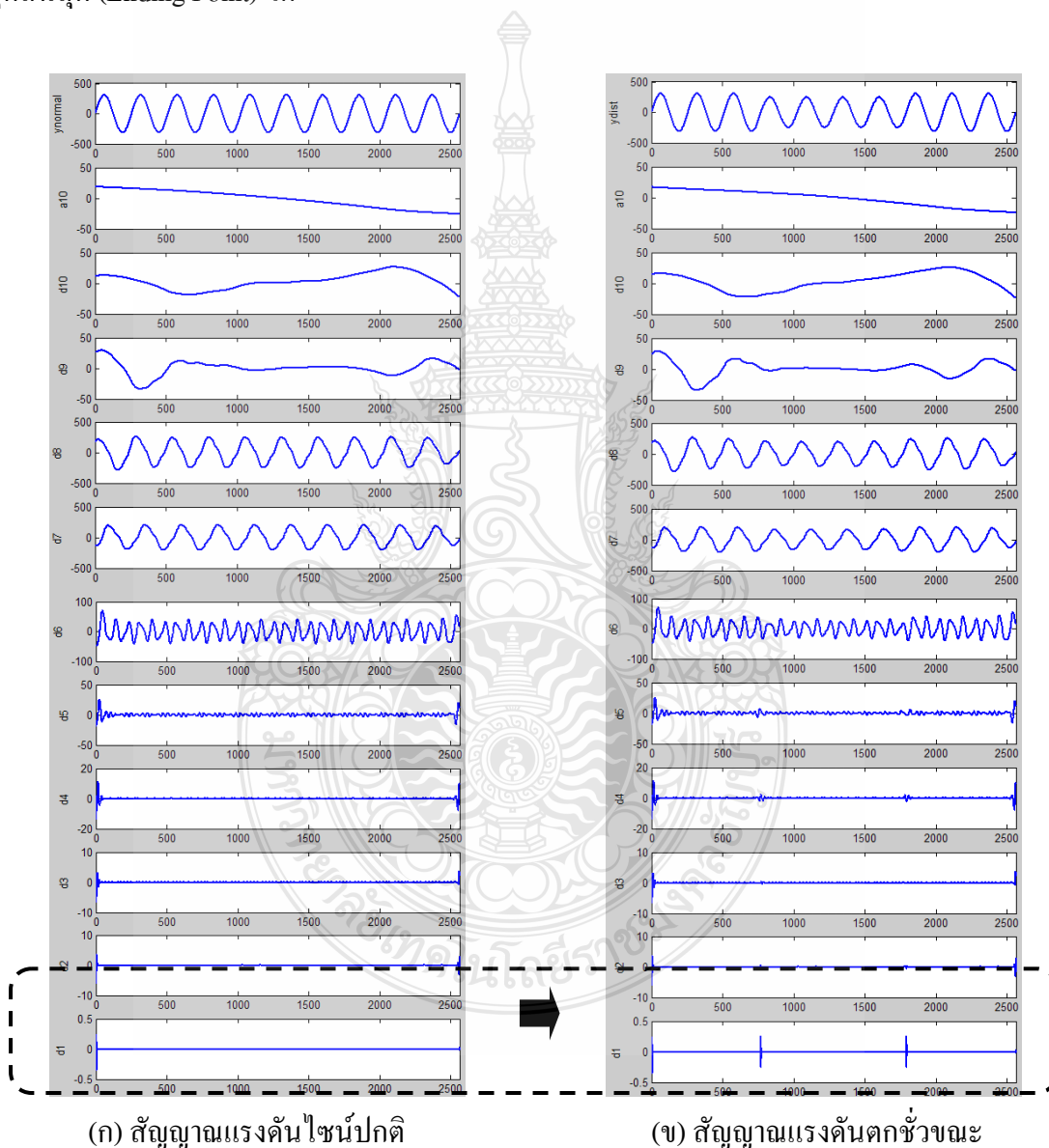
ขบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาจะเป็นลักษณะวิธีการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย หรือ แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform; DWT)

ขั้นตอนวิธีการค้นหา และระบุตำแหน่งสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต ที่อาศัยเทคนิคของการแยกย่อยละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) ที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่สูงในระดับความละเอียดที่ 1 (d1) มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และจุดสิ้นสุด (Ending Point) ของสัญญาณ [21-22] ใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) ชนิด Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคุณภาพไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ หรือชั่วขณะ (Short and Fast Transient Disturbances) โดยใช้ MATLAB Wavelet Toolbox [17, 23-24] จำนวน 10 ระดับความละเอียด (Resolution Level) ดังภาพที่ 3.3



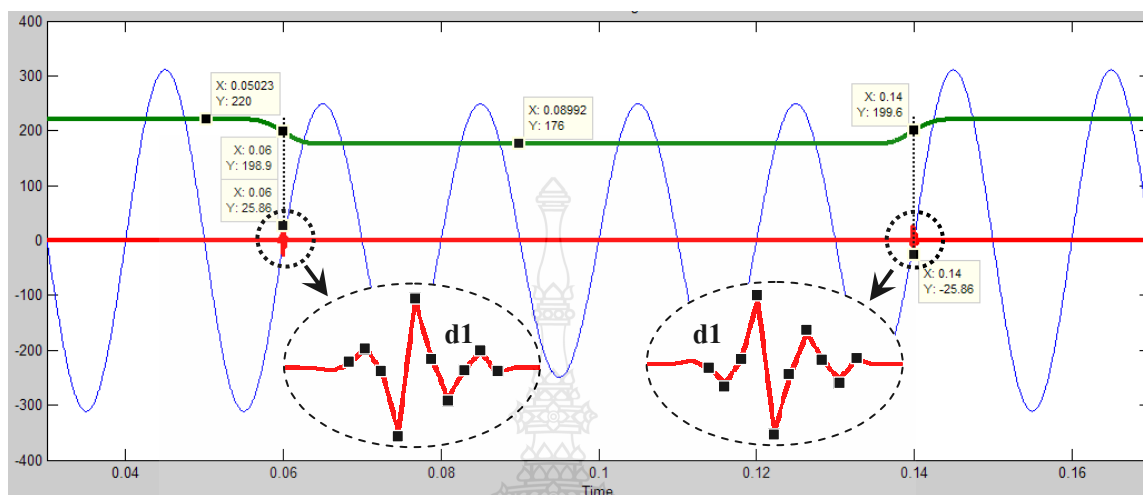
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างของเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่อาศัยเทคนิคของการแยกย่อยละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด

จากภาพที่ 3.4 เป็นตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด โดยภาพที่ 3.4 (ก) เป็นสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ จะไม่มีการตรวจจับ (Detection) ส่วนภาพที่ 3.4 (ข) เป็นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ จะเห็นว่าที่ระดับความละเอียดที่ 1 ($d1$) จะเห็นการตรวจจับจุดที่เกิดความผิดปกติของสัญญาณ จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการหาเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และจุดสิ้นสุด (Ending Point) ได้



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด

เวลาจุดเริ่มต้นที่ทดสอบ เท่ากับ 0.06 วินาที และเวลาจุดสิ้นสุดทดสอบ เท่ากับ 0.14 วินาที ของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ มีขนาดแรงดันลดลงเท่ากับ 176 โวลต์อาร์เอ็มเอสดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ มีขนาดแรงดันเท่ากับ 176 โวลต์อาร์เอ็มเอส

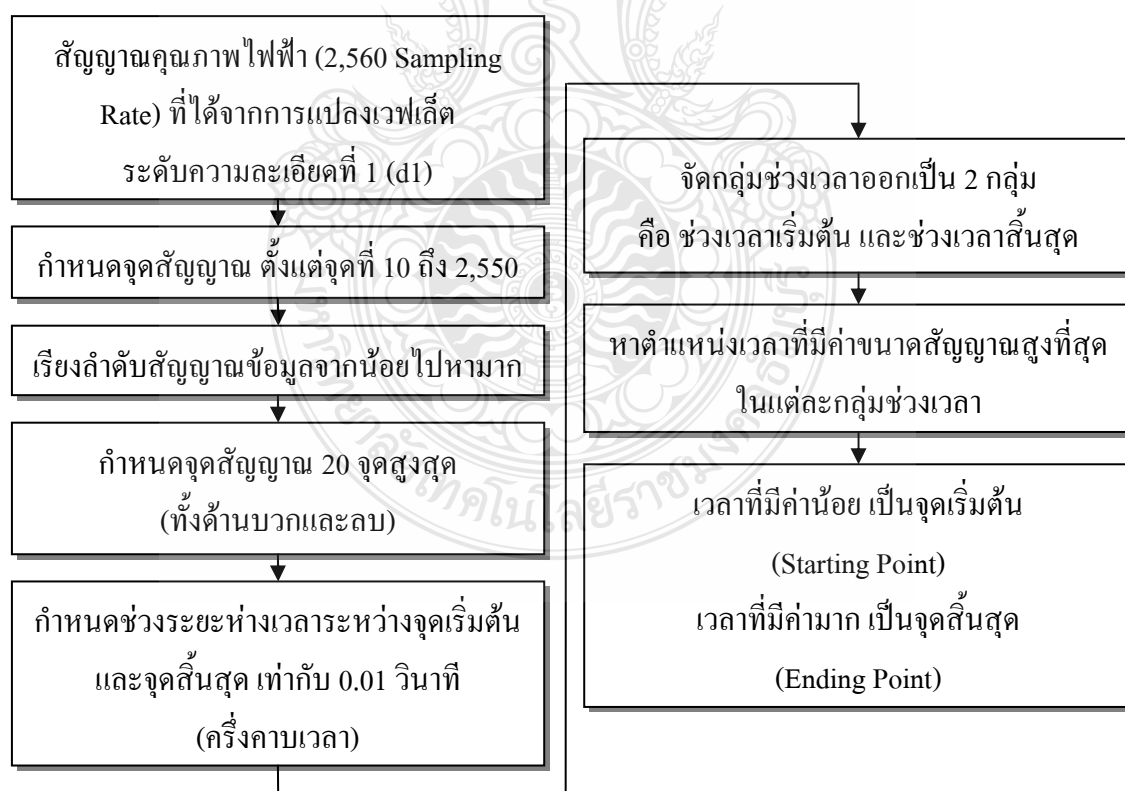
จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าระดับความละเอียดที่ 7 และ 8 เป็นระดับความละเอียดที่สำคัญที่สุด เนื่องด้วยเป็นระดับความละเอียดที่เป็นลักษณะเด่นของความถี่สัญญาณปกติที่ 50 เฮิรท์ซ์ [20, 23] โดยความถี่ในการซัดตัวอย่างเท่ากับ $(256 \text{ Samples} \times 50 \text{ Hz})$ 12.8 กิโลเฮิรท์ซ์ (kHz) จะพบว่าระดับความละเอียดต่ำลงมาหนึ่งระดับ ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis Function) จะมีความถี่ลดลงมาครึ่งละสองเท่า

ตารางที่ 3.1 ระดับรายละเอียด และย่านความถี่ในแต่ละระดับความละเอียด

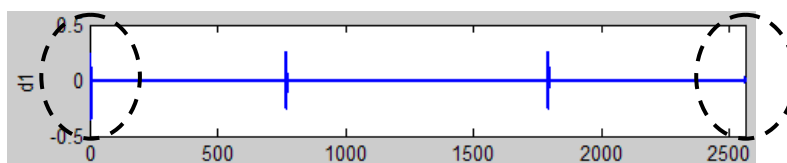
ระดับความละเอียด (Resolution Level)	ย่านความถี่ (Frequency Band, Hz)	ระดับความละเอียด (Resolution Level)	ย่านความถี่ (Frequency Band, Hz)
1	3,200-6,400	6	100-200
2	1,600-3,200	7*	50-100
3	800-1,600	8*	25-50
4	400-800	9	12.5-25
5	200-400	10	6.25-12.5

การพิจารณาหาช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของไดอะแกรมภาพที่ 3.6 โดยนำข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูงระดับความละเอียดที่ 1 (d1) กำหนดช่วงซีกตัวอย่างของข้อมูล ตั้งแต่จุดที่ 10 ถึง 2,550 ทำการตัดข้อมูลส่วนหัวและท้ายของสัญญาณออก เนื่องจากทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูล ทำให้การค้นหาและระบุตำแหน่งความผิดปกติของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้าผิดพลาดได้ [18] ดังภาพที่ 3.7 จากนั้นทำการเรียงลำดับข้อมูลจาก ค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุด แล้วกำหนดจุดสัญญาณที่มีขนาดสูงที่สุด 20 อันดับ

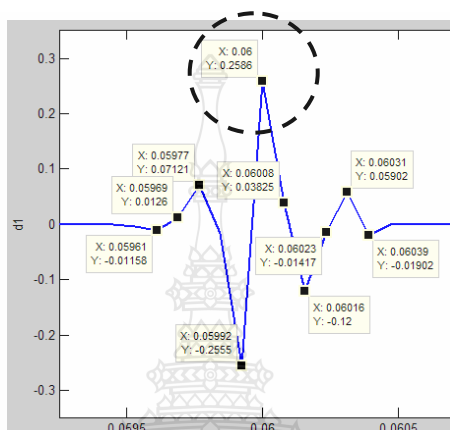
จากนั้น กำหนดช่วงระยะเวลาห่างระหว่างจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุด เท่ากับ 0.01 วินาที (ครึ่งคาบเวลา) ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159-2009 การเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วขณะ (Short Duration rms Variation) ในช่วงระหว่าง 0.5 - 30 ไซเคิล [2] แล้วแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มช่วงเวลาเริ่มต้น และกลุ่มช่วงเวลาสิ้นสุด ขึ้นถัดไปทำการหาตำแหน่งเวลาที่มีค่าขนาดสัญญาณสูงสุดในแต่ละกลุ่มช่วงเวลา เพียงตำแหน่งเดียวดังภาพที่ 3.8 จะ ได้ค่าเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) ของสัญญาณที่ค่อนข้างแม่นยำดังภาพที่ 3.9 สำหรับเวลาจุดสิ้นสุด (Ending Point) สามารถหาได้ในทำนองเดียวกันของกลุ่มช่วงเวลาจุดสิ้นสุดดังภาพที่ 3.10 โดยเวลาที่มีค่าน้อยกว่า จะเป็นเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และเวลาที่มีค่ามากกว่า จะเป็นเวลาจุดสิ้นสุด (Ending Point) [21]



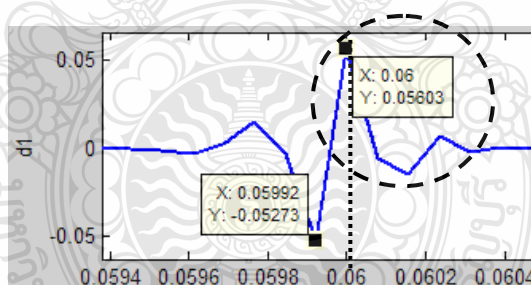
ภาพที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมในการหาเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ



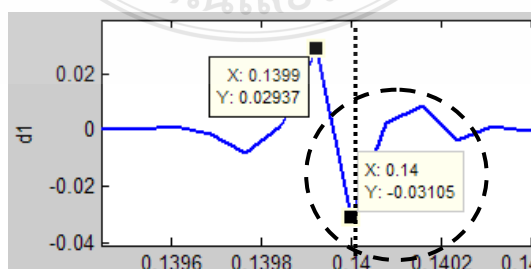
ภาพที่ 3.7 ส่วนหัวและท้าย จะเกิดความแตกต่างของข้อมูล ทำให้การจำแนกคุณภาพไฟฟ้าผิดพลาด



ภาพที่ 3.8 กลุ่มช่วงเวลาที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูง ระดับความละเอียดที่ 1 (d_1)



ภาพที่ 3.9 การหาจุดเริ่มต้น (Starting Point) โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT)



ภาพที่ 3.10 การหาจุดสิ้นสุด (Ending Point) โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT)

3.2.2 การสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

รูปแบบคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิดนั้น ควรทำการลดปริมาณข้อมูลก่อนที่จะนำไปจำแนก โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต เพื่อทำการสกัดจุดเด่น [20, 24]

สัญญาณความผิดพร่อง $S(t)_{signal}$ จะมีสิ่งรบกวน $D(t)_{distortion}$ 1 เพิ่มเข้ามาในสัญญาณไซน์ปกติ $P(t)_{pure}$ ด้วย จะเป็นไปตามสมการที่ 3.2

$$S(t)_{signal} = P(t)_{pure} + D(t)_{distortion} \quad (3.2)$$

สัญญาณ $S(t)_{signal}$ สามารถทำการกระจายสัญญาณ (Decomposition) ออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้โดยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA)

จากหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ (Filter Banks) แบบสองช่องสัญญาณ (Two Channel Filter Banks) เป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองส่วน โดยแบ่งออกเป็นส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation) และส่วนของความถี่สูง (Detail) ดังนั้น จะสามารถนำหลักการของฟิลเตอร์แบงก์มาใช้ในการสร้างเวฟเล็ตได้ [4]

จากสมการที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตหาสามารถหาได้จากตัวกรองการกระจายสัญญาณ (Decomposition Coefficients) ที่ระดับความละเอียดต่างๆ ในส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation) และส่วนของความถี่สูง (Detail) ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$cA_j(m) = \langle f(t), \phi_{j,m}(t) \rangle \quad (3.3)$$

$$cD_j(m) = \langle f(t), \psi_{j,m}(t) \rangle \quad (3.4)$$

โดย cA_j คือ สัมประสิทธิ์ส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation Coefficients) ที่ระดับสูงสุด
 cD_j คือ สัมประสิทธิ์ส่วนของความถี่สูง (Detail Coefficients) ที่ระดับ j

การกระจายสัญญาณสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ จำนวน 10 ระดับความละเอียด สามารถอธิบายได้ดังนี้ [24-25]

$$\begin{aligned}
S(t)_{signal} &\leftrightarrow [cA_1, cD_1] \\
&\leftrightarrow [cA_2, cD_2, cD_1] \\
&\leftrightarrow \dots \\
&\leftrightarrow [cA_{10}, cD_{10}, cD_9, cD_8, cD_7, cD_6, cD_5, cD_4, cD_3, cD_2, cD_1]
\end{aligned} \tag{3.5}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
S(t)_{signal} &= [A_1(t) + D_1(t)] \\
&= [A_1(t) + D_2(t) + D_1(t)] \\
&= \dots \\
&= [A_{10}(t) + D_{10}(t) + D_9(t) + D_8(t) + D_7(t) + D_6(t) + D_5(t) + D_4(t) + D_3(t) \\
&\quad + D_2(t) + D_1(t)]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

หรือ

$$S(t)_{signal} = \left[D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | D_5 | D_6 | D_7 | D_8 | D_9 | D_{10} | A_{10} \right] \tag{3.7}$$

จากสมการที่ 3.7 จะยังไม่ถูกนำไปใช้ในการจำแนกรูปแบบคุณภาพไฟฟ้าโดยตรง เนื่องจากยังมีปริมาณข้อมูลที่มากดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการลดจำนวนข้อมูลลง โดยการคำนวณหาค่าพลังงาน (Energy) ในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย เพื่อให้เป็นบรรทัดฐาน (Norm) ของฐานข้อมูลคุณภาพไฟฟ้า ที่ใช้ในการฝึกสอน (Training) และทดสอบ (Testing) ของโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป การคำนวณหาค่าพลังงานในแต่ละระดับตัวกรองการกระจายได้ดังนี้

$$S(t)_{energy} = \left[ED_1 | ED_2 | ED_3 | ED_4 | ED_5 | ED_6 | ED_7 | ED_8 | ED_9 | ED_{10} | EA_{10} \right] \tag{3.8}$$

โดย ED_i คือ ค่าพลังงานของการกระจายสัญญาณ ในส่วนของความถี่สูง (Detail) ตั้งแต่ระดับตัวกรองการกระจาย ที่ 1 ถึง 10
จะได้

$$ED_i = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N |D_{ij}|^2 \right]}, \quad i=1,2,3,\dots,10 \tag{3.9}$$

และ EA_{10} คือ ค่าพลังงานของการกระจายสัญญาณในส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation) ระดับตัวกรองการกระจายที่ 10

จะได้

$$EA_{10} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N |A_{10j}|^2 \right]} \quad (3.10)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของความถี่สูง (Detail) และความถี่ต่ำ (Approximation) ในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย

ในการทำงานเดียวกัน $P(t)_{energy}$ สามารถหาค่าพลังงานในแต่ละระดับตัวกรองการกระจายได้ ดังนี้

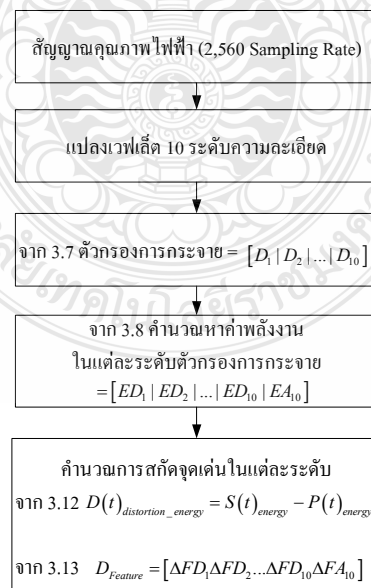
$$P(t)_{energy} = \left[ED_{1p} | ED_{2p} | ED_{3p} | ED_{4p} | ED_{5p} | ED_{6p} | ED_{7p} | ED_{8p} | ED_{9p} | ED_{10p} | EA_{10p} \right] \quad (3.11)$$

ทำการแทนค่า $S(t)_{energy}$ และ $P(t)_{energy}$ ลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$D(t)_{distortion_energy} = S(t)_{energy} - P(t)_{energy} \quad (3.12)$$

จากภาพที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมการสกัดจุดเด่นในแต่ละระดับตัวกรองการกระจายดังนั้น จะได้สมการที่ลักษณะเด่นของสัญญาณในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย การสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) คือ

$$D_{Feature} = [\Delta FD_1 \Delta FD_2 \Delta FD_3 \Delta FD_4 \Delta FD_5 \Delta FD_6 \Delta FD_7 \Delta FD_8 \Delta FD_9 \Delta FD_{10} \Delta FA_{10}] \quad (3.13)$$



ภาพที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมการสกัดจุดเด่นในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย

3.3 การออกแบบจำลองสัญญาณความผิดปกติของระบบไฟฟ้า

3.3.1 ลักษณะคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 และตามมาตรฐาน ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย คือ

1) ระดับแรงดันต่ำปกติ 1 เฟส 220 โวลต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน $\pm 10\%$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การปรับตั้งค่าจะสามารถปรับตามระดับแรงดันที่อุปกรณ์ส่วนใหญ่ยังสามารถทำงานได้ คือ ระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 10\%$ จะมีช่วงระดับแรงดันปกติระหว่าง 198 โวลต์ ถึง 242 โวลต์

2) ระดับความถี่ปกติ 50 Hz. มีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 0.5 เฮิรท์ซ์ ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะมีช่วงระดับความถี่ปกติระหว่าง 49.5 เฮิรท์ซ์ ถึง 50.5 เฮิรท์ซ์

3.3.2 พิกัดกระแสตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545

สำหรับใช้งานในบ้านอยู่อาศัยและอาคารทั่วไปที่ผู้ใช้งานไม่ใช่บุคคลที่มีความรู้ความชำนาญด้านไฟฟ้า พิกัดกระแสใช้งาน (In) มีขนาดพิกัดดังนี้ 6, 8, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100 และ 125 แอมแปร์ และช่วงกระแสไฟฟ้าเกิน จะใช้เวลาตัดวงจรน้อยกว่า 0.1 วินาที

3.3.3 กระแสรั่วลงดิน ตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 และตามมาตรฐาน มอก. 909-2548 [9]

ค่ามาตรฐานของกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current) ที่ทำงานที่กำหนด (Rate residual operating current, $I\Delta n$) คือ 0.006, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3 และ 0.5 แอมแปร์ ดังนั้นการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน คือไม่เกิน 0.01 แอมแปร์ (10 มิลลิแอมแปร์) กระแสไฟฟ้าปริมาณที่มากกว่า 10 มิลลิแอมแปร์ มีความสามารถทำให้เกิดความรู้สึกเจ็บปวดจนถึงการช็อกอย่างรุนแรงได้ มีช่วงระยะเวลาในการตัด (Operating Time) ไม่เกิน 0.04 วินาที

จากตารางที่ 3.2 สรุปชนิดของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด มีค่าระดับที่ใช้ในการจำแนกแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.1, 3.3.2 และ 3.3.3 ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 3.2 ชนิดของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ใช้

ชนิดของคุณภาพไฟฟ้า	ค่าระดับที่ใช้ในการจำแนก
1. แรงดันปกติ (Normal Voltage)	0.9 ถึง 1.1 pu.
2. แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)	0.1 ถึง 0.89 pu.
3. แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Sag with Harmonics)	
4. แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell)	1.11 ถึง 1.80 pu.
5. แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Swell with Harmonics)	
6. ไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption)	0.0 ถึง 0.09 pu.
7. กระแสเกิน (Over Current)	11 ถึง 100 แอมแปร์
8. กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Over Current with Harmonics)	
9. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current)	10 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์
10. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Earth Leakage Current with Harmonics)	
11. ความถี่ต่ำเกิน (Under Power Frequency Variations)	45 - 49.48 เฮิรท์ซ์
12. ความถี่สูงเกิน (Over Power Frequency Variations)	1.52 - 55 เฮิรท์ซ์

3.3.4 การจำลองสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้า และการแปลงเวฟเล็ด

ในการจำลองสัญญาณนี้ กำหนดค่าของระบบสัญญาณไฟฟ้าเป็นระดับแรงดันต่ำ 1 เฟส 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรท์ซ์ จะใช้อัตราการซีกตัวอย่าง (Sampling Rate) ต่อ 1 ไซเคิลเท่ากับ 256 ซีกตัวอย่างในช่วงความถี่ 50 เฮิรท์ซ์ (ความถี่ในการซีกตัวอย่างเท่ากับ $256 \times 50 = 12.8$ kHz) และความต่อเนื่องของสัญญาณ จำนวน 10 ไซเคิล (Cycles)

1) สัญญาณแรงดันไซน์ปกติ (Normal Sinusoidal Signal)

สามารถจำลองสัญญาณแรงดันไซน์ปกติได้ แรงดันมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็ม-เอส (V_{rms}) ระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.9-1.1 pu. หรือไม่เกิน $\pm 10\%$ ความละเอียดขั้นละ 0.0005 pu. ดังนั้น จะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 400 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.14 [23]

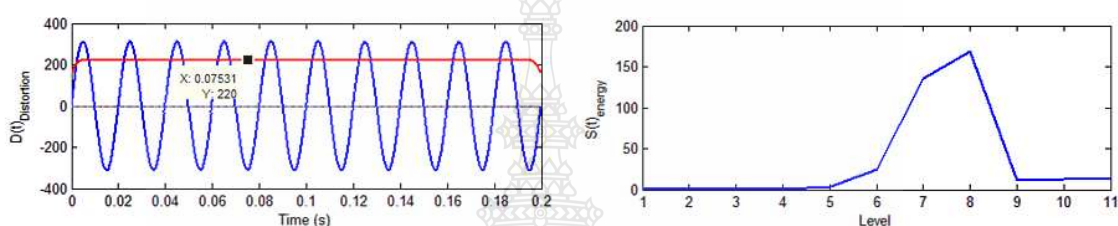
$$v(t) = \alpha * V * \sin(\omega t) \quad (3.14)$$

โดย α คือ ระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.9-1.1 pu.

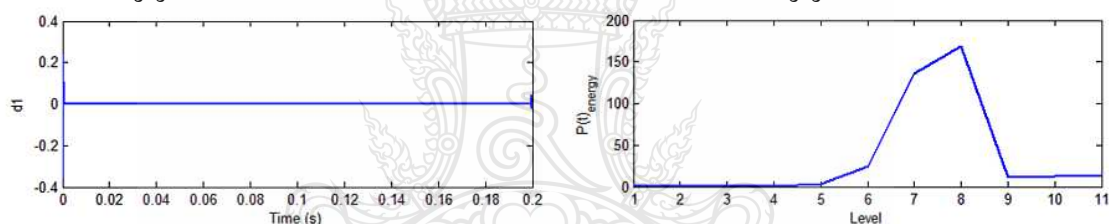
V คือ แรงดัน 220 โวลต์ (V_{rms})

$\omega = (2 \cdot \pi \cdot f)$ คือ ความเร็วเชิงมุมของระบบไฟฟ้า

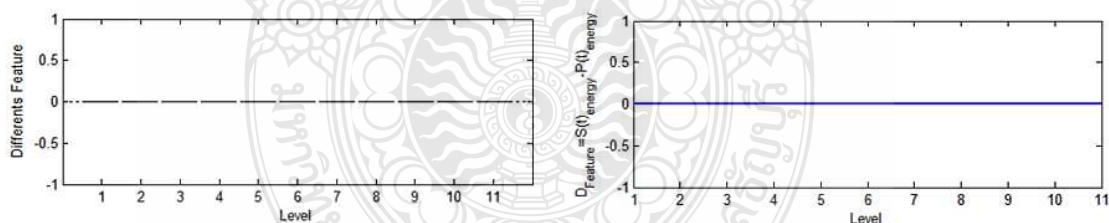
ผลการจำลองสัญญาณแรงดันไซน์ปกติที่ได้ดังภาพที่ 3.12



(ก) สัญญาณแรงดันไซน์ปกติ 220 โวลต์ (ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ (จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$ (ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต

2) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

การจำลองสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (α) มีขนาดระหว่าง 0.1- 0.89 pu. หรือระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงระหว่าง 10%-89% ของแรงดันไซน์ปกติที่

220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms}) ในช่วงเวลาระหว่าง 0.5 ไซเคิลถึง 1 นาฬิ ความละเอียดขั้นละ 0.005 pu. มีสัญญาณรวม 159 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไซเคิล 3 ไซเคิล และ 5 ไซเคิลดั่งนั้น จะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 477 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.15 [23]

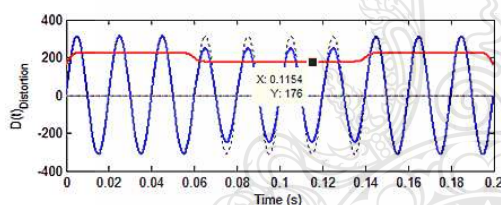
$$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

$$t_1 \leq t_2, u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

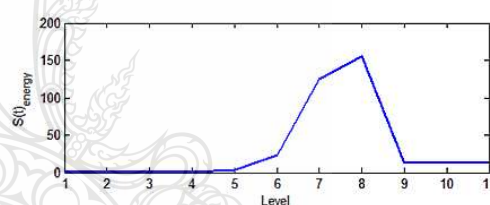
โดย α คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ

$u(t-t_1) - u(t-t_2)$ คือ ฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function) ช่วงเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ

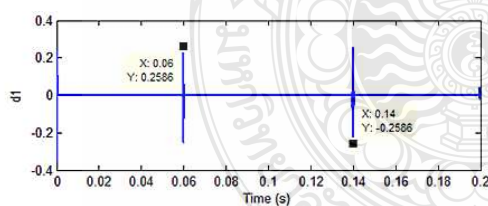
ผลการจำลองสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้ดังภาพที่ 3.13



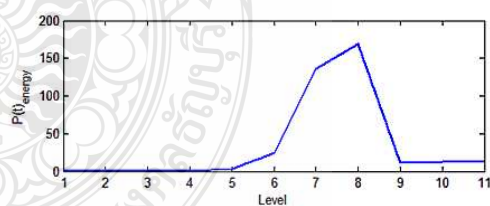
(ก) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 176 โวลต์



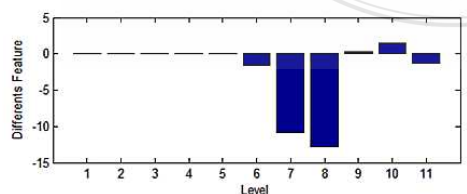
(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ



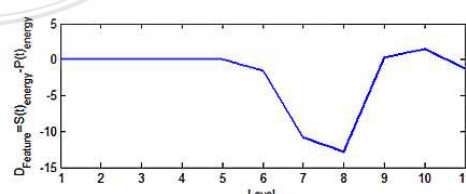
(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



(จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$



(ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต

3) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell)

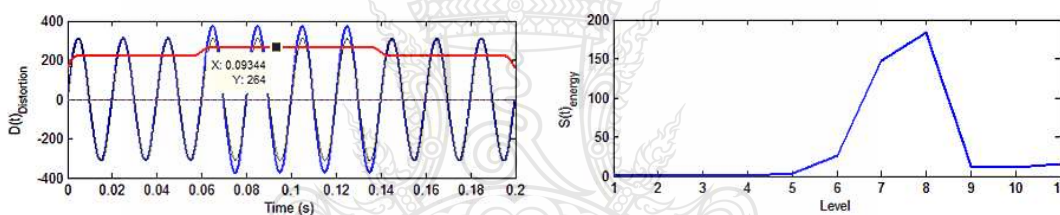
การจำลองสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ ขนาดของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ (α) มีขนาดระหว่าง 1.11-1.80 pu. หรือระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงระหว่าง 111%-180% ของแรงดันไซน์ปกติที่ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms}) ในช่วงเวลาระหว่าง 0.5 ไซเคิลถึง 1 นาฬิกา ความละเอียดขั้นละ 0.005 pu. มีสัญญาณรวม 139 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไซเคิล 3 ไซเคิล และ 5 ไซเคิลดังนั้นมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 417 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.16 [23]

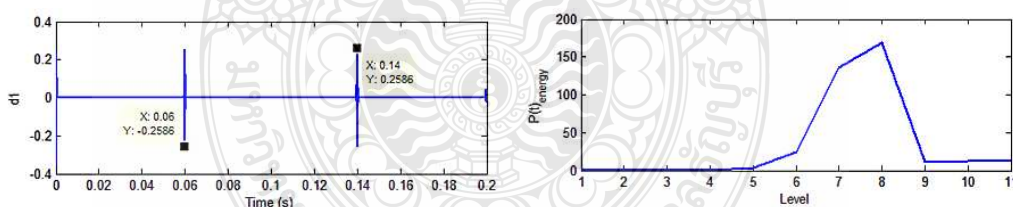
$$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t) \quad (3.16)$$

โดย α คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ

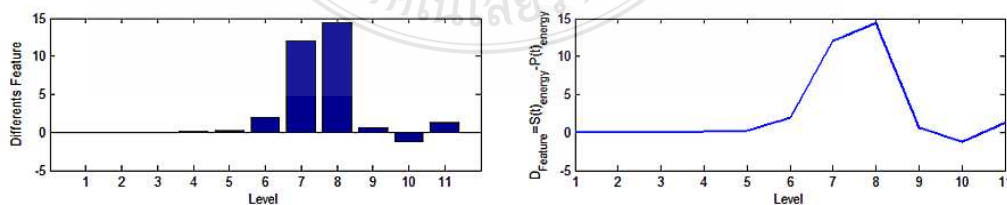
ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่ได้ดังภาพที่ 3.14



(ก) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ 264 โวลต์ (ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ (จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$ (ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.14 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต

4) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Sag with Harmonics)

การจำลองสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะมีสมการที่รูปแบบเดียวกันกับสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ โดยจะรวมฮาร์มอนิกส์อันดับคี่ที่พิจารณา คือ อันดับที่ 1, 3 และ 5 เท่านั้น เนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมาก จะได้แก่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3rd, 5th, 7th [2] ความละเอียดขั้นละ 0.005 pu. มีสัญญาณรวม 477 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไชเคิล 3 ไชเคิล และ 5 ไชเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,431 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.17 [23]

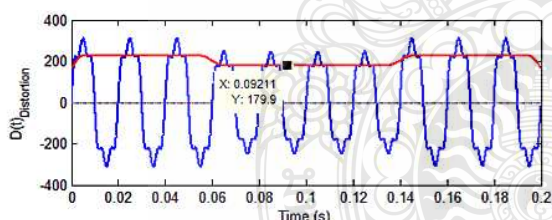
$$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t)) \quad (3.17)$$

โดย α คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

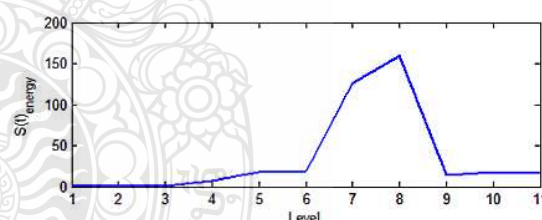
α_1 คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1

α_3, α_5 คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 3 และ 5 มีค่าระหว่าง 0.05 ถึง 0.15 [0.05, 0.05 ... 0.15, 0.15]

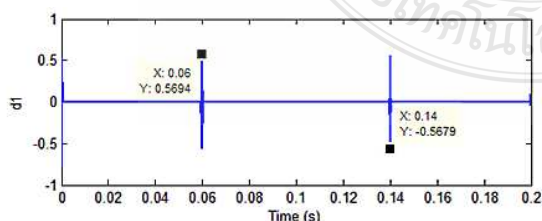
ผลการจำลองสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ดังภาพที่ 3.15



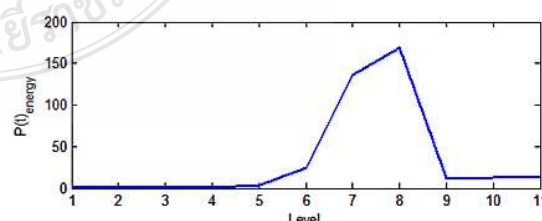
(ก) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ มีขนาด 179.9 โวลต์



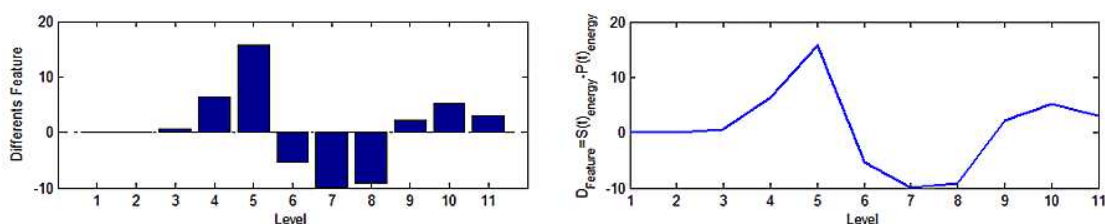
(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด



(จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$ (ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.15 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดเมื่อ $\alpha_3, \alpha_5 = 0.15$

5) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Swell with Harmonics)

การจำลองสัญญาณแรงดันแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะมีสมการที่รูปแบบเดียวกับสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ โดยจะรวมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ที่พิจารณา คือ อันดับ 1, 3 และ 5 เท่านั้น ความละเอียดขั้นละ 0.005 pu. มีสัญญาณรวม 423 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไซเคิล 3 ไซเคิล และ 5 ไซเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,269 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.18 [23]

$$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t)) \quad (3.18)$$

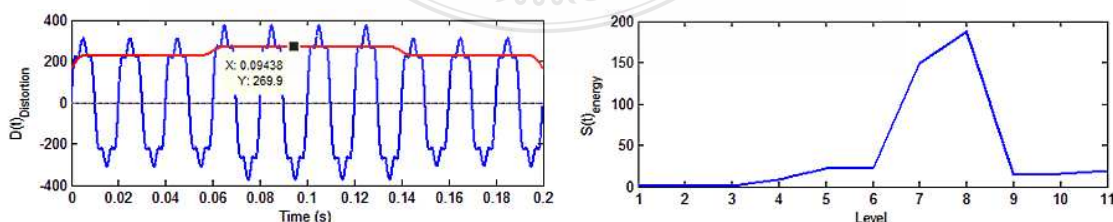
โดย α คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

α_1 คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับ 1 มีค่าเท่ากับ 1

α_3, α_5 คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับ 3 และ 5 มีค่า

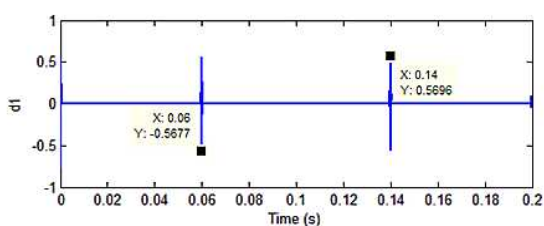
ระหว่าง 0.05 ถึง 0.15 [0.05, 0.05 ... 0.15, 0.15]

ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ดังภาพที่ 3.16

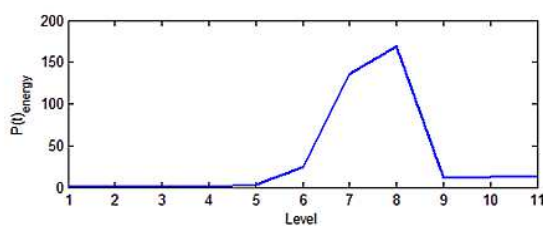


(ก) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ มีขนาด 269.9 โวลต์

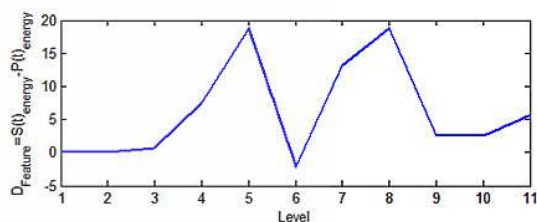
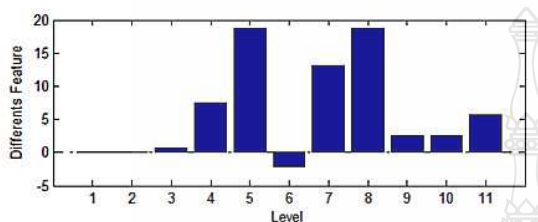
(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



(จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)

(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$ (ง) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.16 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดเมื่อ $\alpha_3, \alpha_5 = 0.15$

6) สัญญาณไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption)

การจำลองสัญญาณไฟดับชั่วขณะ ขนาดของสัญญาณแรงดันไฟดับชั่วขณะ (α) มีขนาดระหว่าง 0-0.09 pu. หรือระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0%-9% ของแรงดันไซน์ปกติที่ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ความละเอียดขั้นละ 0.005 pu. มีสัญญาณรวม 181 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไชเคิล 3 ไชเคิล และ 5 ไชเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 543 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.19 [23]

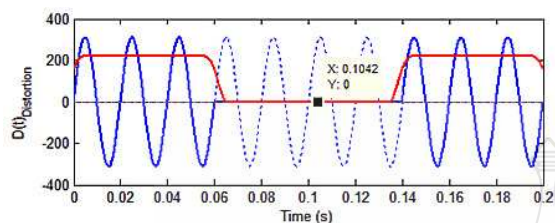
$$v(t) = V \left(1 - \alpha (u(t-t_1) - u(t-t_2)) \right) * \sin(\omega t) \quad (3.19)$$

โดย V คือ ขนาดของสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms})

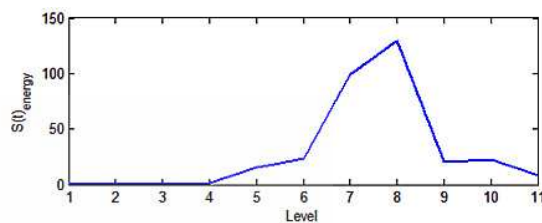
α คือ ขนาดของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ

Worapol Kanitpanyacharoen และ Suttichai Premrudeepreechacharn [20] ได้ระบุว่า ความผิดพลาดในการจำแนกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ จะมีความผิดพลาดในการจำแนกเป็นไฟดับชั่วขณะได้ เมื่อขนาดสัญญาณแรงดันมีค่าใกล้เคียง 0.1 pu ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการ

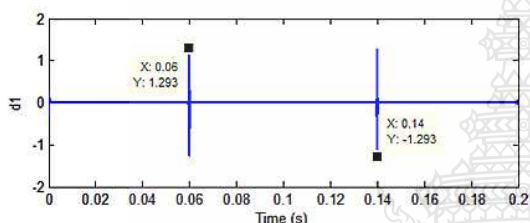
บวกเพิ่มระดับการสกัดจุดเด่นที่ตำแหน่ง d5 อีกเท่ากับ 15 หน่วย หากขนาดแรงดันช่วงที่เกิดความผิดพลาดมีค่าต่ำกว่า 0.1 pu เพื่อให้การจัดการจำแนกให้มีความแตกต่างมากขึ้น จากผลการจำลองสัญญาณไฟดับชั่วขณะดังภาพที่ 3.17



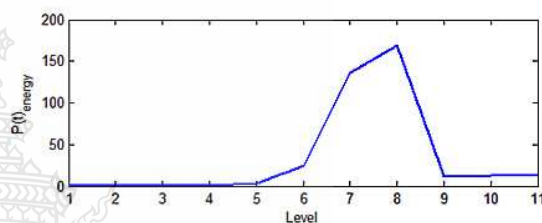
(ก) สัญญาณไฟดับชั่วขณะ 0 โวลต์



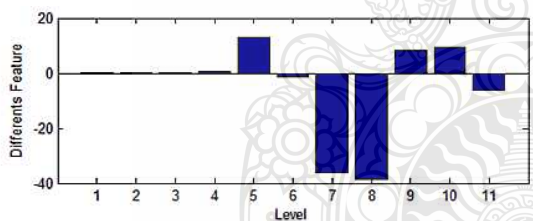
(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ



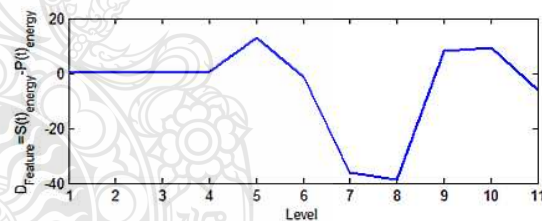
(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด



(จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซส์ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$



(ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.17 ตัวอย่างสัญญาณไฟดับชั่วขณะที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท

7) สัญญาณกระแสเกิน (Over Current)

กระแสเกิน หมายถึง กระแสไฟฟ้าใดๆ ที่มีค่าเกินกระแสไฟฟ้าที่กำหนด การจำลองสัญญาณกระแสเกิน จะไม่นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไซส์ปกติ เนื่องจากมีค่าความต่างกันสูง กำหนดค่ากระแสปกติที่พิจารณาเท่ากับ 10 แอมแปร์ (มาตรฐาน IEC 1000-3-2 กระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือน หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีพิกัดกระแสไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส) ขนาดของสัญญาณกระแสเกิน (α) มีขนาดระหว่าง 0.1-9 หรือระดับกระแสเปลี่ยนแปลงระหว่าง 11-100

แอมแปร์ของกระแสปกติ ความละเอียดขั้นละ 0.1 pu (หรือ 1 แอมแปร์) โดยรวมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor (pf); ϕ) ที่ 0.7, 0.8 และ 0.9 มีสัญญาณรวม 360 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 1 ไมโครวินาที, 1.5 ไมโครวินาที, 2 ไมโครวินาที และ 2.5 ไมโครวินาทีจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,080 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.20 [11]

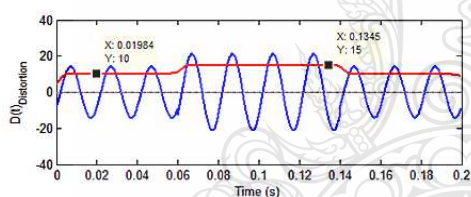
$$i(t) = I(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t + \phi) \quad (3.20)$$

โดย I คือ ขนาดของสัญญาณกระแสปกติที่ไหลผ่านโหลด เท่ากับ 10 แอมแปร์ที่ความถี่หลัก 50 เฮิรตซ์ (แอมแปร์)

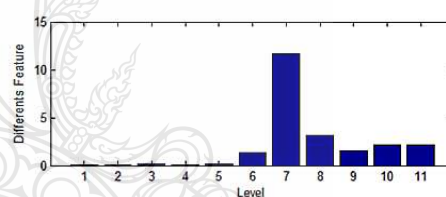
$\omega = (2 \cdot \pi \cdot f)$ คือ ความเร็วเชิงมุมของระบบไฟฟ้า

α คือ ขนาดของสัญญาณกระแสเกิน

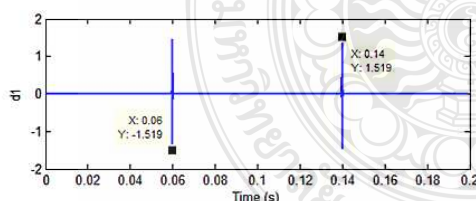
ผลการจำลองสัญญาณกระแสเกินดังภาพที่ 3.18



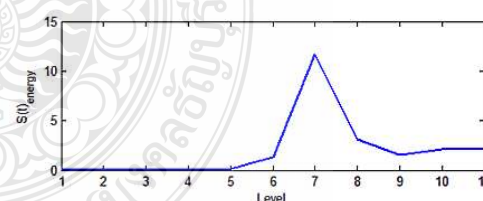
(ก) สัญญาณกระแสเกิน 15 แอมแปร์ $pf = 0.8$



(ค) ค่าระดับพลังงาน



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



(ง) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเกินที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท

8) สัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Over Current with Harmonics)

การจำลองสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ จะพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับสัญญาณกระแสเกิน (Over Current) โดยจะรวมฮาร์โมนิกส์ ตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ถึงอันดับที่

39 ตามประเภทของอุปกรณ์หรือภาระทางไฟฟ้า IEC 1000-3-2 Class D (ดังตารางที่ 2.7) มีสัญญาณรวม 360 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 1 ไซเคิล, 1.5 ไซเคิล, 2 ไซเคิล และ 2.5 ไซเคิล ดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,080 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.21 [11]

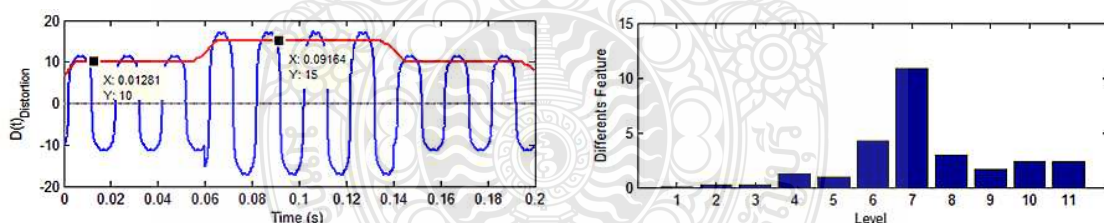
$$i(t) = \left(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))\right) * \left(I_1 \sin(\omega t) + (2.30 * \sin(3\omega t)) + (1.14 * \sin(5\omega t)) + (0.77 * \sin(7\omega t)) + (0.40 * \sin(9\omega t)) + (0.33 * \sin(11\omega t)) + (0.21 * \sin(13\omega t)) + \sum_{n=15,17,19,\dots}^{39} \left(\frac{2.25}{n} * \sin(n\omega t)\right) \right) \quad (3.21)$$

โดย I_1 คือ ขนาดของสัญญาณกระแสปกติที่ไหลผ่านโหลด เท่ากับ 10 แอมแปร์ที่ความถี่หลักมูล 50 เฮิร์ตซ์ (แอมแปร์)

n คือ ฮาร์โมนิกอันดับคี่ ตั้งแต่ 15, 17, 19, ..., 39 ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz

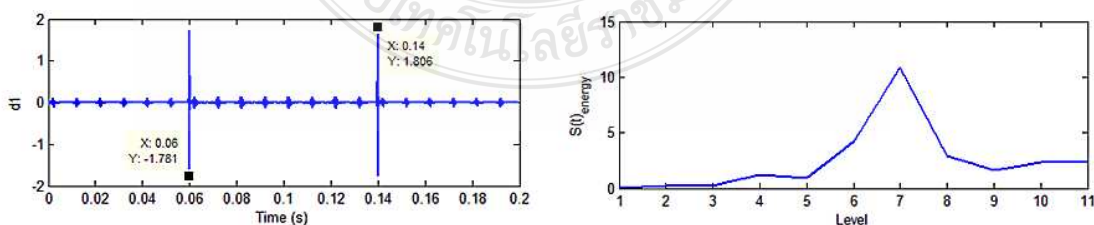
α คือ ขนาดของสัญญาณกระแสเกิน

ผลการจำลองสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกดังภาพที่ 3.19



(ก) สัญญาณกระแสเกิน 15 แอมแปร์ $pf = 0.8$

(ค) ค่าระดับพลังงาน



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ

(ง) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ค

9) สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current)

กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน หมายถึง กระแสไฟฟ้าไหลจากส่วนที่มีไฟฟ้าของการติดตั้งลงดิน โดยไม่มีฉนวนหุ้มหรือค่ากระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน คือ ไม่เกิน 10 มิลลิแอมแปร์

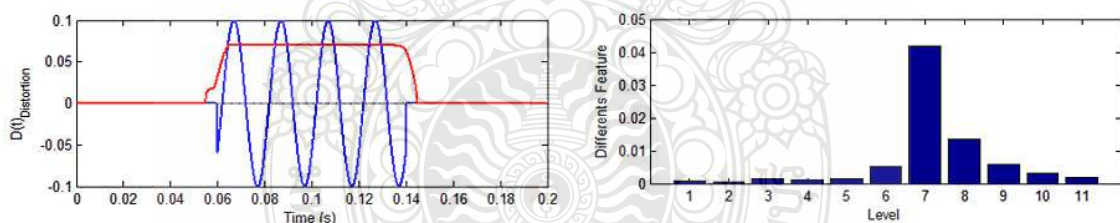
การจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน จะไม่นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ เนื่องจากมีค่าความต่างกันสูงเช่นเดียวกันกับสัญญาณกระแสเกิน มีขนาดระหว่าง 10-100 มิลลิแอมแปร์ ความละเอียดขั้นละ 1 มิลลิแอมแปร์ โดยรวมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor; pf) ที่ 0.7, 0.8 และ 0.9 มีสัญญาณรวม 273 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 1 ไซเคิล 1.5 ไซเคิล 2 ไซเคิล และ 2.5 ไซเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,092 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.22 [10]

$$i(t) = \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)) * \sin(\omega t + \phi) \quad (3.22)$$

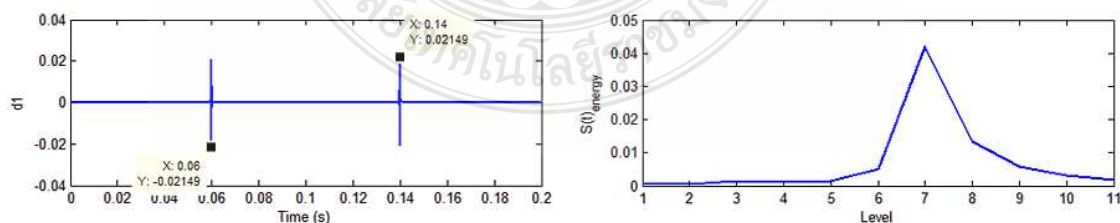
โดย α คือ ขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน

ผลการจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินดังภาพที่ 3.20



(ก) สัญญาณกระแสเกิน 10 มิลลิแอมแปร์ $pf=0.8$

(ค) ค่าระดับพลังงาน



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ

(ง) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท

10) สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Earth Leakage Current with Harmonics)

การจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วลงดินมีขนาดระหว่าง 10-100 มิลลิแอมแปร์ ความละเอียดขั้นละ 1 มิลลิแอมแปร์ มีสัญญาณรวม 364 ตัวอย่างสัญญาณ โดยจะรวมฮาร์มอนิกส์ ตั้งแต่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ถึงอันดับที่ 39 ตามประเภทของอุปกรณ์หรือภาระทางไฟฟ้า IEC 1000-3-2 Class D [10]

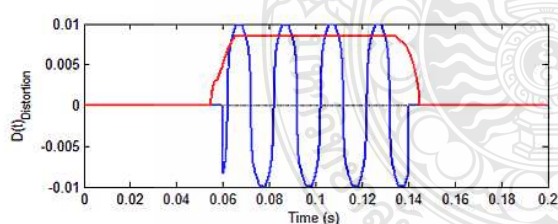
ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 1 ไซเคิล, 1.5 ไซเคิล, 2 ไซเคิล และ 2.5 ไซเคิลคั้งนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1,092 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.23

$$i(t) = \frac{\alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)) * \left(I_1 \sin(\omega t) + (2.30 * \sin(3\omega t)) + (1.14 * \sin(5\omega t)) + (0.77 * \sin(7\omega t)) + (0.40 * \sin(9\omega t)) + (0.33 * \sin(11\omega t)) + (0.21 * \sin(13\omega t)) + \sum_{n=15,17,19,\dots}^{39} \left(\frac{2.25}{n} * \sin(n\omega t) \right) \right)}{1000} \quad (3.23)$$

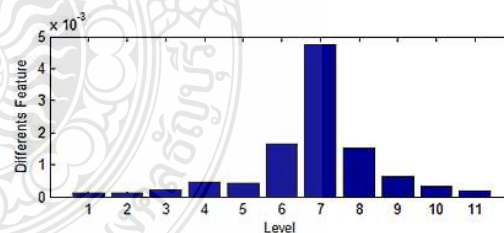
โดย n คือ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ ตั้งแต่ 15, 17, ..., 39 ที่ความถี่หลักมูล 50 เฮิรท์ซ

α คือ ขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน

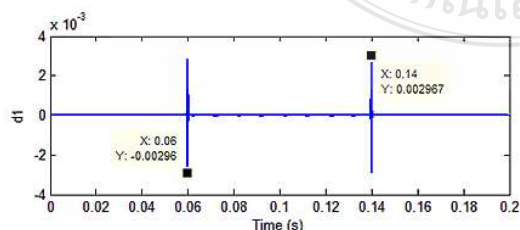
ผลการจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ดังภาพที่ 3.21



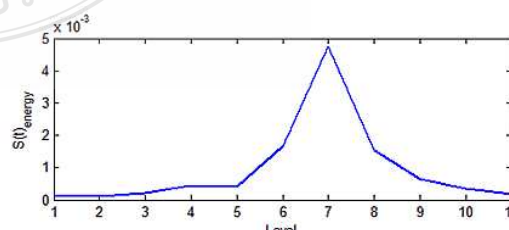
(ก) สัญญาณกระแสเกิน 10 มิลลิแอมแปร์ $pf = 0.8$



(ค) ค่าระดับพลังงาน



(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



(ง) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.21 ตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท

11) สัญญาณความถี่ต่ำเกิน (Under Power Frequency Variations)

การจำลองสัญญาณความถี่ต่ำเกิน ค่าความถี่มีขนาดระหว่าง 45-49.48 เฮิรตซ์ ความถี่เบี่ยงเบนละ 0.02 เฮิรตซ์ มีสัญญาณรวม 225 ตัวอย่างสัญญาณ

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไซเคิล 3 ไซเคิล และ 5 ไซเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 675 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.24 [19]

$$v(t) = V * \sin\left(2 \cdot \pi \cdot t \cdot \left(f - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))\right)\right) \quad (3.24)$$

โดย α คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 0.52

เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณจำลองความถี่ต่ำเกินและสัญญาณความถี่สูงเกินนั้น จะมีรูปแบบลักษณะเด่นที่คล้ายกัน ทำให้การจำแนกของโครงข่ายประสาทเทียมไม่ถูกต้อง จึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขใหม่ เพื่อให้มีลักษณะเด่นที่ต่างกัน จากสมการที่ 3.12 สัญญาณความผิดพร่อง $S(t)_{energy}$ จะมีสิ่งรบกวน $D(t)_{distortion_energy}$ เพิ่มเข้ามาในสัญญาณไซน์ปกติ $P(t)_{energy}$

เงื่อนไขแรก หากค่าความถี่ของสัญญาณ มีค่ามากกว่า 50 เฮิรตซ์ จะได้

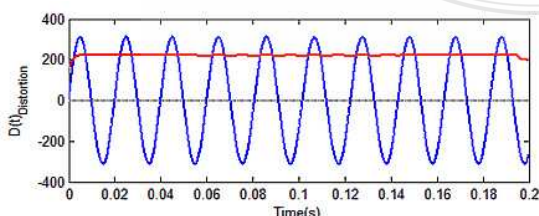
$$D(t)_{distortion_energy} = S(t)_{energy} - P(t)_{energy} \quad (3.25)$$

และเงื่อนไขที่สอง หากค่าความถี่ของสัญญาณ มีค่าน้อยกว่า 50 เฮิรตซ์ จะได้

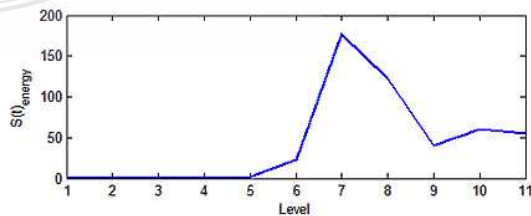
$$D(t)_{distortion_energy} = P(t)_{energy} - S(t)_{energy} \quad (3.26)$$

ในกรณีนี้ จะใช้เงื่อนไขที่สองดังสมการที่ 3.26

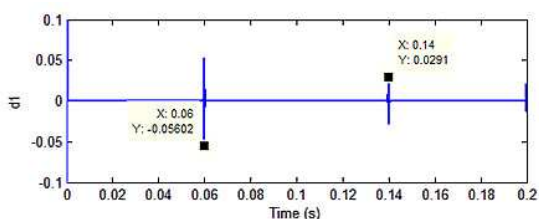
ผลการจำลองสัญญาณความถี่ต่ำเกินดังภาพที่ 3.22



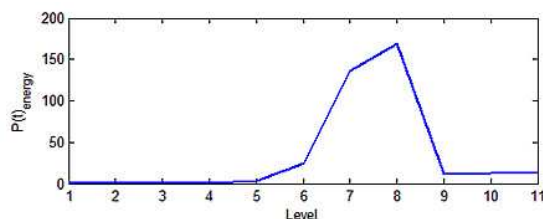
(ก) สัญญาณความถี่ f เท่ากับ 48 เฮิรตซ์



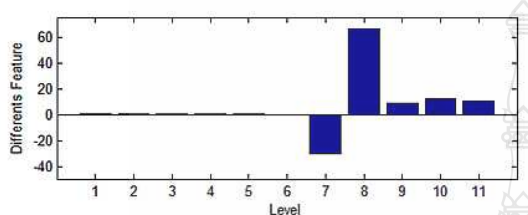
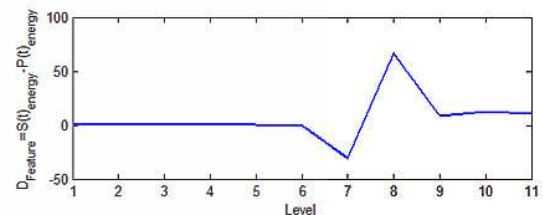
(ข) ค่าพลังงานของสัญญาณความถี่ต่ำเกิน



(ค) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ



(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)

(จ) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$ 

(ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.22 ตัวอย่างสัญญาณความถี่ต่ำเกิน เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 48 เฮิรตซ์

12) สัญญาณความถี่สูงเกิน (Over Power Frequency Variations)

การจำลองสัญญาณความถี่สูงเกิน ค่าความถี่มีขนาดระหว่าง 50.52-55 เฮิรตซ์ ความละเอียดขั้นละ 0.02 เฮิรตซ์ มีสัญญาณรวม 225 ตัวอย่างสัญญาณ ในกรณีนี้ จะใช้เงื่อนไขที่หนึ่งดังสมการที่ 3.25

ความต่อเนื่องของสัญญาณทดสอบในช่วง 2 ไซเคิล 3 ไซเคิล และ 5 ไซเคิลดังนั้นจะมีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 675 ตัวอย่างสัญญาณ โดยใช้สมการที่ 3.27 [19]

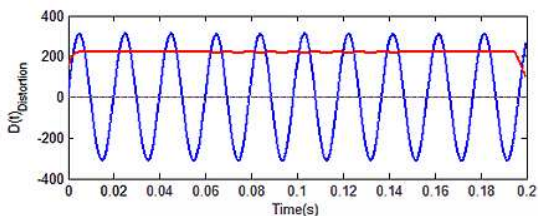
$$v(t) = V * \sin(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)))) \quad (3.27)$$

โดย V คือ ขนาดสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms})

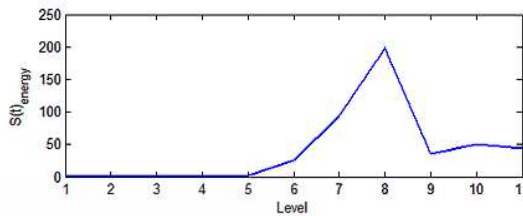
f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์

α คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.52 ถึง 5

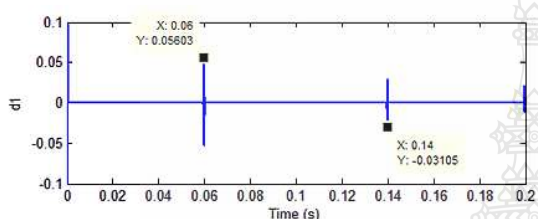
ผลการจำลองสัญญาณความถี่ต่ำเกินดังภาพที่ 3.23



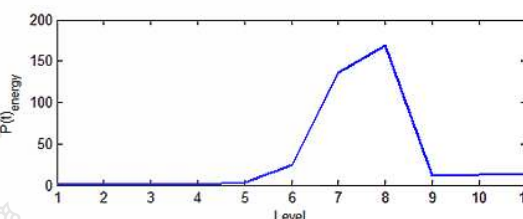
(ก) สัญญาณความถี่ (f) เท่ากับ 52 เฮิรตซ์



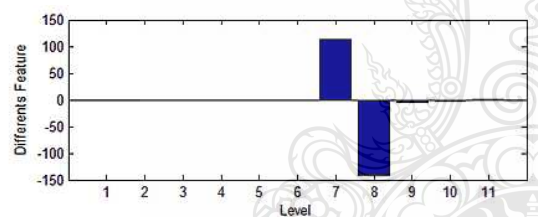
(ง) ค่าพลังงานของสัญญาณความถี่สูงเกิน



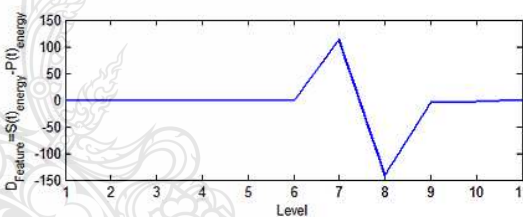
(ข) การตรวจจับช่วงเวลาที่เกิดความผิดพร่อง



(จ) ค่าพลังงานของสัญญาณแรงดันไซน์ (อ้างอิง)



(ค) ค่าแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน $S(t)$ และ $P(t)$



(ฉ) ระดับการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction)

ภาพที่ 3.23 ตัวอย่างสัญญาณความถี่สูงเกิน เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 52 เฮิรตซ์

3.4 การพิจารณาและการกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

สำหรับการฝึกสอน (Training) และการทดสอบ (Testing) กำหนดรูปแบบโครงสร้างเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้น (Two-Layer Neural Network) เนื่องจากเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพียงพอในการนำไปใช้จำแนกชนิดของคุณภาพไฟฟ้าได้ [20] ใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back - Propagation Learning) ทำหน้าที่เป็นตัวแยกข้อมูล (Classification) การคำนวณค่าที่เอาต์พุต โดยการป้อนอินพุตเข้าชั้นที่หนึ่งและคำนวณไปข้างหน้า (Feed Forward) เอาต์พุตของชั้นก่อนจะเป็นอินพุตป้อนเข้าสู่ชั้นถัดไปเรื่อยๆ จนถึงเอาต์พุต

โดยมีตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้เช่นเดียวกันกับวิธีการสอนแบบค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด คือใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error; MSE) เป็นตัวชี้ โดยอัลกอริทึมจะปรับค่าน้ำหนักและไบแอส เพื่อลดค่าผิดพลาด อัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้จะใช้ Trainlm (Levenberg-Marquardt) มีคุณลักษณะ คือ เร็วในการเรียนรู้ ตามตารางที่ 2.13 [14]

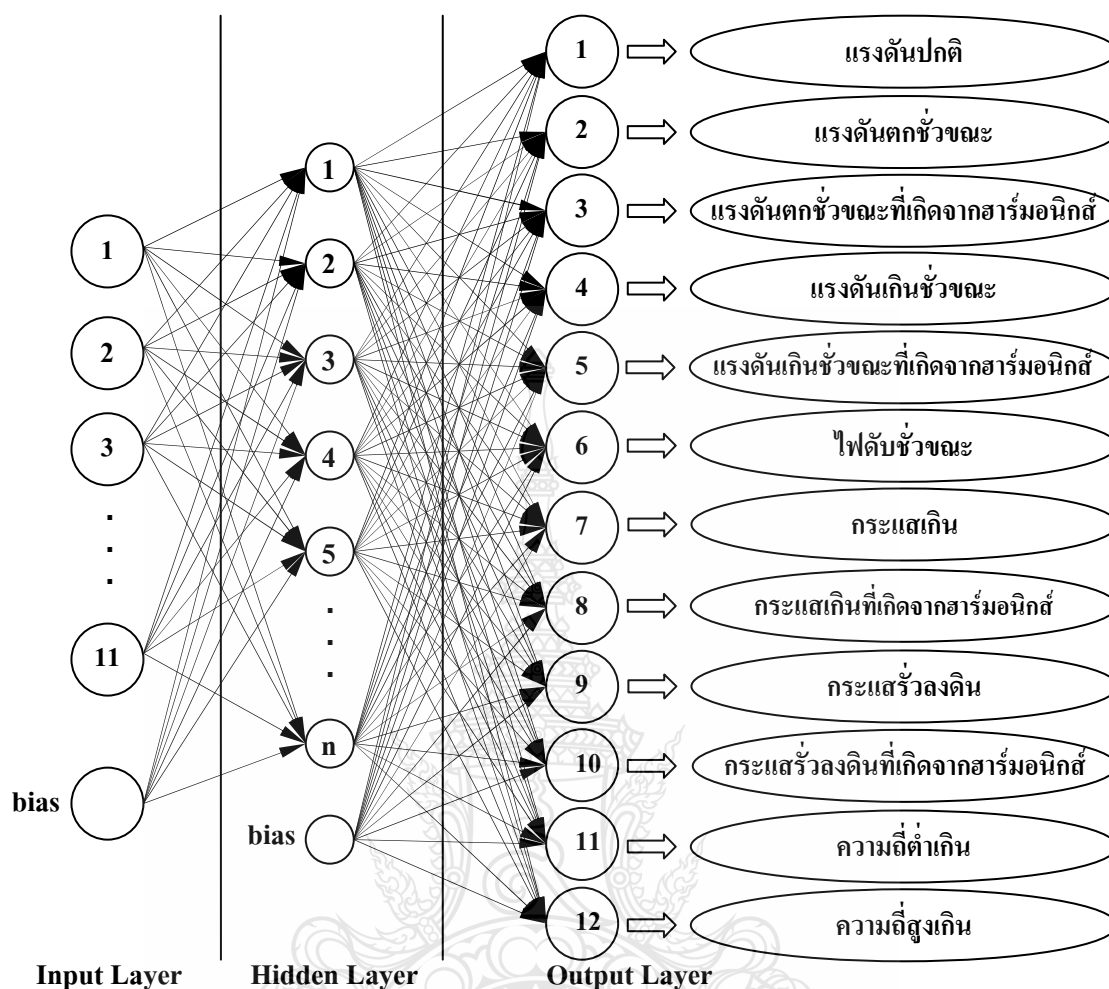
ปัญหาของการเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการหาค่าน้ำหนัก (Weight) ที่ทำให้โครงข่ายส่งค่าเอาต์พุต (Network Output) มีตรงตามค่าที่คาดหวัง (Desired Output) หรือค่าเป้าหมาย (Target) ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้รู้จักข้อมูล จะต้องมิตัวอย่างที่จะสอน ประกอบด้วย คู่ข้อมูลอินพุตและเป้าหมาย (Input/Output Pairs) เรียกว่าชุดการเรียนรู้ (Training Set) ข้อมูลของชุดการฝึกฝนจะถูกป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อกำหนดค่าเอาต์พุตของเครือข่าย ค่าเอาต์พุตจะถูกเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายในชุดการฝึกฝน หากค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้จากโครงข่ายมีค่าไม่ตรงกับค่าเป้าหมาย ค่าน้ำหนักจะถูกปรับแต่งใหม่ การเรียนรู้จะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งค่าเอาต์พุตและค่าเป้าหมายมีค่าเหมือนกัน เมื่อโครงข่ายได้รับการฝึกฝนเสร็จแล้วจะต้องได้รับการทดสอบความสามารถในการตอบปัญหาที่ไม่เคยพบ (Generalize) โดยใช้ข้อมูลทดสอบโครงข่ายที่ดี จะต้องมิตค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้ ตรงตามค่าเป้าหมายของข้อมูลทดสอบด้วยการเรียนรู้

กำหนด โหนด (Node) และ เลเยอร์ (Layer) จะต้องปรับให้เหมาะสมกับแบบจำลองที่กำหนด มิเช่นนั้นจะส่งผลลัพธ์มีค่าความผิดพลาดสูง ออกแบบให้มีจำนวน 3 เลเยอร์ ประกอบด้วย เลเยอร์ที่ 1 เป็นโหนดชั้นอินพุต (Input Layer) มีจำนวน 11 โหนด ที่ได้จากการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) จำนวน 10 ระดับความละเอียด ส่วนเลเยอร์ที่ 2 เป็นชั้นซ่อน (Hidden Layer) ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid Transfer Function) เนื่องจากข้อมูลการแปลงเวฟเล็ทที่พิจารณานั้น มีทั้งช่วงบวกและช่วงลบ จะทำการทดสอบเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสมที่สุดในการเรียนรู้และการทดสอบที่มีความถูกต้องในการจำแนกสูงที่สุด และเลเยอร์ที่ 3 เป็นชั้นเอาต์พุต (Output Layer) มีจำนวน 12 โหนด ตามการจำแนกชนิดของคุณภาพไฟฟ้า ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดลอการิทึมซิกมอยด์ (Logarithmic Sigmoid Transfer Function) เนื่องจากค่าคำตอบตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นมีเพียงสองระดับ คือ 0 กับ 1 โดยกำหนดเอาต์พุต ตามระบุใน Neural Network Toolbox 6 User's Guide [15] ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การพิจารณาค่าเป้าหมายของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด

คุณภาพไฟฟ้า	เป้าหมาย
1. แรงดันปกติ	T1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]
2. แรงดันตกชั่วขณะ	T2 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0]
3. แรงดันเกินชั่วขณะ	T3 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0]
4. แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	T4 = [0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0]
5. แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	T5 = [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0]
6. ไฟดับชั่วขณะ	T6 = [0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0]
7. กระแสเกิน	T7 = [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
8. กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	T8 = [0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0]
9. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	T9 = [0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0]
10. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	T10 = [0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
11. ความถี่ต่ำเกิน	T11 = [0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
12. ความถี่สูงเกิน	T12 = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]

กำหนดรอบสูงสุดในการฝึกสอน [net.trainParam.epochs] เท่ากับ 10,000 รอบ กำหนดค่าผิดพลาดเป้าหมาย [net.trainParam.goal] เท่ากับ 0.001 และ อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เท่ากับ 0.01 ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบอัส (Bias) สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม และค่าผิดพลาดเป้าหมาย เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดการฝึกสอน โดยในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสแต่ละรอบ กำหนดค่าผิดพลาดเป้าหมายจะเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการฝึกสอน (Epoch) การเรียนรู้จะสิ้นสุดลงเมื่อค่าผิดพลาดเป้าหมายมีค่าน้อยกว่า 0.001 หรือจำนวนรอบการฝึกสอนมากกว่า 10,000 รอบ สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ได้พิจารณากำหนดเพื่อใช้จำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

เป้าหมายในการฝึกสอนเพื่อทดสอบการเรียนรู้ โดยใช้การเรียนรู้แต่ละแบบที่ได้ทำการจำลองปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างและเงื่อนไขในการฝึกสอนเดียวกัน เช่น กลุ่มข้อมูลของอินพุต กลุ่มข้อมูลของเอาต์พุต จำนวนชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวนรอบสูงสุดของการฝึกสอน จำนวนนิรอนในชั้นซ่อน เป็นต้น เพื่อเลือกรูปแบบในการเรียนรู้ได้เร็ว โดยพิจารณาความสำเร็จของการฝึกสอนจากจำนวนรอบในการฝึกสอนที่น้อยและมีความถูกต้องในการจำแนกสูงที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการตรวจจับสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้า และระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ เพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) และจุดสิ้นสุดของสัญญาณ (Ending Point) ที่เกิดความผิดปกติ [21, 25] และการจัดจำแนก (Identification) ของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) แบบเต็มหน่วย ชนิด Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคุณภาพไฟฟ้าในสภาวะชั่วขณะ [17-20, 23] ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (Multi-resolution Analysis; MRA) ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว จำลองรูปแบบสัญญาณในโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.0 (Wavelet Toolbox) [17, 23-24]

กำหนดเวลาจุดเริ่มต้นทดสอบของสัญญาณแรงดันและกระแสดังนี้

- เวลาจุดเริ่มต้นทดสอบ (Starting Time) เท่ากับ 0.06, 0.064 วินาที ตามลำดับ
- เวลาจุดสิ้นสุดทดสอบ (Ending Time) เท่ากับ 0.14, 0.149 วินาที ตามลำดับ

กำหนดเวลาจุดเริ่มต้นทดสอบของความถี่ ดังนี้

- เวลาจุดเริ่มต้นทดสอบ (Starting Time) เท่ากับ 0.06, 0.14 วินาที ตามลำดับ
- เวลาจุดสิ้นสุดทดสอบ (Ending Time) เท่ากับ 0.02, 0.16 วินาที ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดัน ไซนัสปกติ

ข้อมูลทดสอบ อันดับที่	เวลาดทดสอบ		ความคลาดเคลื่อน (%)
	Starting Time :	Ending Time :	
	-	-	
1	0	0.1999	0.00
2	0	0.1999	0.00
3	0	0.1999	0.00
4	0	0.1999	0.00

ตารางที่ 4.1 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ อันดับที่	เวลาทดสอบ		ความคลาดเคลื่อน (%)
	Starting Time :	Ending Time :	
	-	-	
5	0	0.1999	0.00
6	0	0.1999	0.00
7	0	0.1999	0.00
8	0	0.1999	0.00
9	0	0.1999	0.00
10	0	0.1999	0.00
11	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
50	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
100	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
150	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
200	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
250	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
300	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
350	0	0.1999	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
400	0	0.1999	0.00

ตารางที่ 4.2 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
7	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
8	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
9	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
11	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
12	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
13	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
14	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
15	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
16	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
159	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.3 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
7	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
8	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
9	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
11	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
12	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
13	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
14	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
15	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
16	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
139	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.4 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
7	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
8	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
9	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
11	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
12	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
13	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
14	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
15	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
16	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
53	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.5 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
7	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
8	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
9	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
11	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
12	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
13	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
14	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
15	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
16	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
47	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.6 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณไฟดับชั่วคราว

ข้อมูลทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาดเคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาดเคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
7	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
8	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
9	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
11	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
12	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
150	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
181	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.7 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสเกิน

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.8 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.9 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
6	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.10 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.064 วินาที	0.149 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
2	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
3	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
4	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
5	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91	0.06	0.14	0.0000	0.0640625	0.1490625	0.00625

ตารางที่ 4.11 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณความถี่ต่ำเกิน

ข้อมูลทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาดเคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาดเคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.02 วินาที	0.16 วินาที	
1	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
2	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
92	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
93	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
94	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
95	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
96	0.06	0.1401562	0.01562	0.02	0.16	0.00
97	0.06	0.1401562	0.01562	0.02	0.16	0.00
98	0.06	0.1401562	0.01562	0.02	0.16	0.00
99	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
159	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
160	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.15992187	0.007813
161	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.15992187	0.007813
162	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16015625	0.015625
163	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16015625	0.015625
164	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
165	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
225	0.06	0.14	0.0000	0.02	0.16	0.00

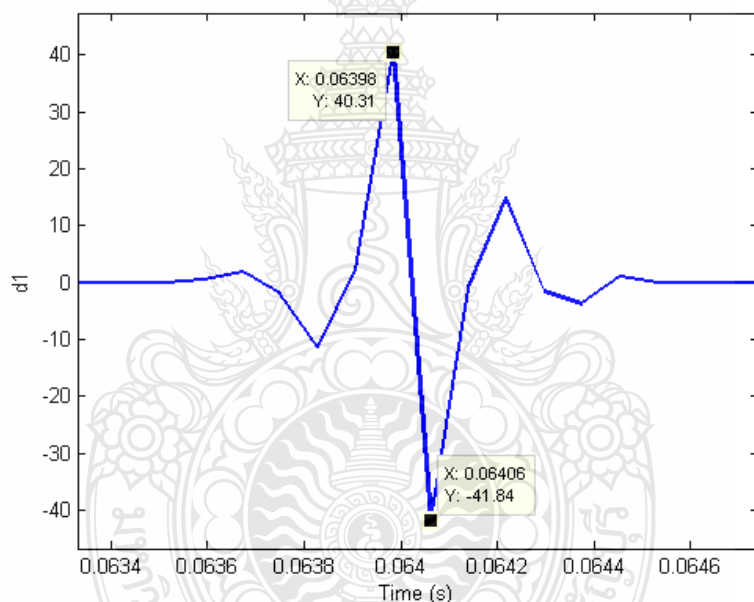
ตารางที่ 4.12 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณความถี่สูงเกิน

ข้อมูล ทดสอบ อันดับที่	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)	เวลาที่ทดสอบได้		ความคลาด เคลื่อน (%)
	Starting Time	Ending Time		Starting Time	Ending Time	
	0.06 วินาที	0.14 วินาที		0.02 วินาที	0.16 วินาที	
1	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
2	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
62	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
63	0.06	0.14	0.00	0.02	0.15992187	0.007813
64	0.06	0.14	0.00	0.02	0.15992187	0.007813
65	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16015625	0.015625
66	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16007812	0.007812
67	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
68	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
127	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
128	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
129	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
130	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
131	0.06	0.1399218	0.00782	0.02	0.16	0.00
132	0.06	0.1401562	0.01562	0.02	0.16	0.00
133	0.06	0.1401562	0.01562	0.02	0.16	0.00
134	0.06	0.1400781	0.00781	0.02	0.16	0.00
135	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
225	0.06	0.14	0.00	0.02	0.16	0.00

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 - 4.12 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

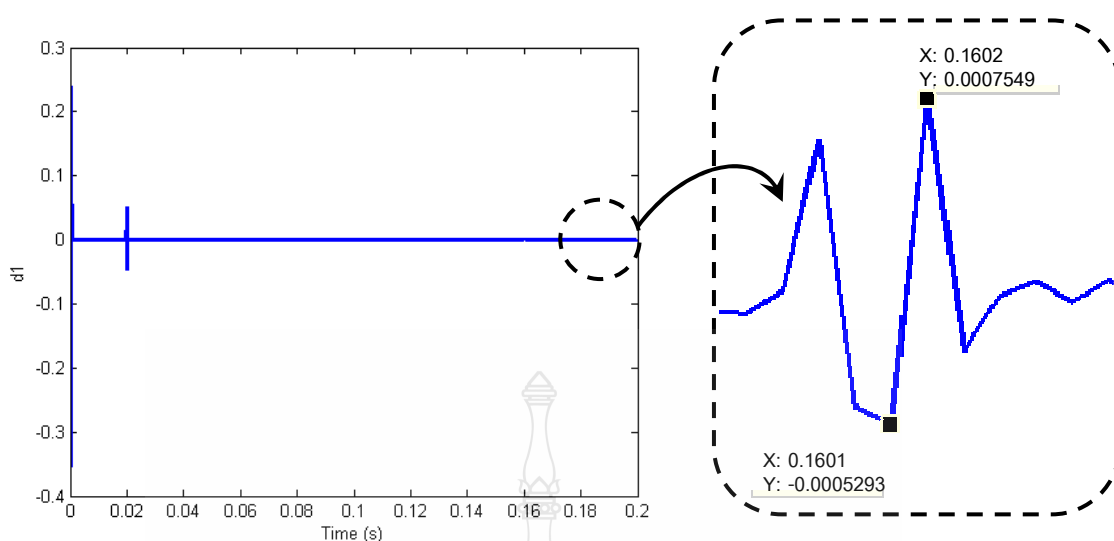
1) จากตารางที่ 4.1 การค้นหาและระบุตำแหน่งของสัญญาณ จะไม่สามารถค้นหาได้ เนื่องจากเป็นสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ

2) จากตารางที่ 4.2 ถึง 4.10 การค้นหาโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูงในระดับที่ 1 (d1) มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดัน กระแส และความถี่ ที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.00625 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ไม่ได้พิจารณาทดสอบกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เช่น คลื่นรบกวน หรือ สัญญาณรบกวน ดังภาพที่ 4.1 เป็นความผิดพลาดในการค้นหา ตำแหน่งเวลา 0.064 วินาที



ภาพที่ 4.1 ความผิดพลาดในการค้นหา ตำแหน่งเวลา 0.064 วินาที

3) จากตารางที่ 4.11 ถึง 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.015625 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.2 เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการค้นหา ณ ตำแหน่งเวลา 0.16 วินาที



ภาพที่ 4.2 การค้นหาของสัญญาณความถี่ต่ำ/สูงเกิน ณ ตำแหน่งเวลา 0.16 วินาที

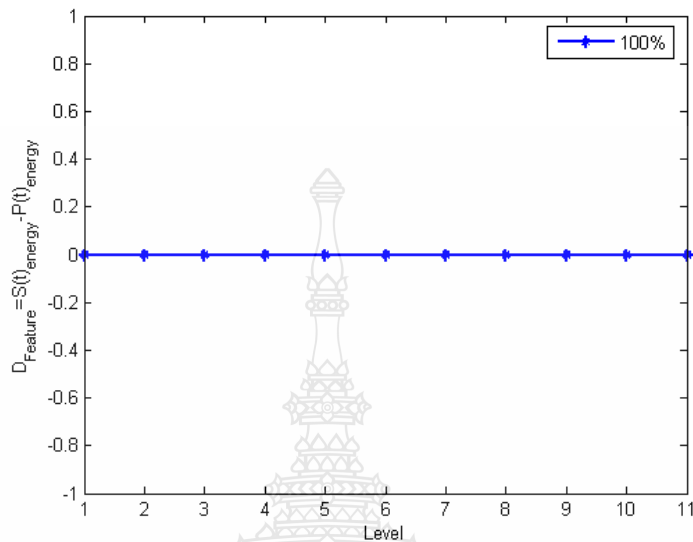
4.2 ผลการทดลองการจับจำแนก (Identification) ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

ในการจับจำแนกจะใช้ลักษณะเด่นของสัญญาณ ที่ได้จากการสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) คำนวณค่าพลังงาน (Energy) ของการกระจายสัญญาณในแต่ละระดับตัวกรองการกระจายจำนวน 10 ระดับความละเอียด ดังนั้น จะได้ลักษณะเด่นทั้งสิ้น 11 จุด (ค่าพลังงานของการกระจายสัญญาณในส่วนของความถี่สูง (Detail) ตั้งแต่ระดับตัวกรองการกระจาย ที่ 1 ถึง 10 และค่าพลังงานของการกระจายสัญญาณ ในส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation) ระดับตัวกรองการกระจาย ที่ 10)

ในส่วนของสัญญาณแรงดัน และความถี่ จะทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง ระดับสัญญาณ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ความถี่ 50 เฮิรท์ซ์ ทำให้เกิดลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถทำการจำแนกได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

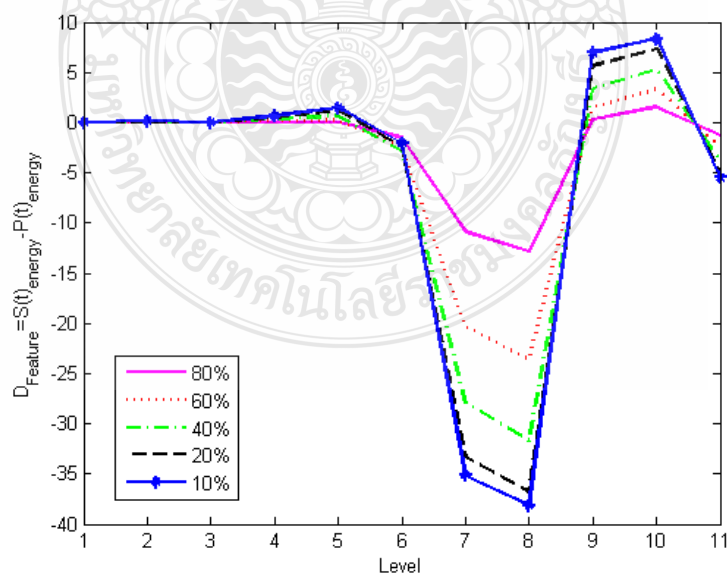
สำหรับสัญญาณกระแสเกิน, กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน และกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะไม่มีการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง เนื่องจากระดับสัญญาณแตกต่างกันมาก และกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน และกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะทำการคูณด้วย 1,000 ก่อนทำการป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากระดับสัญญาณมีขนาดน้อยมาก เช่น 0.001 หากทำการจำแนกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม จะทำให้เกิดความผิดพลาดสูงในการจำแนก เพราะค่าผิดพลาดเป้าหมาย (Target) มีค่าเท่ากับ 0.001 เช่นกัน ผลการทดลองที่ได้ดังนี้

1) สัญญาณแรงดันไซน์ปกติ (Normal Sinusoidal Signal) ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง ที่ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.3



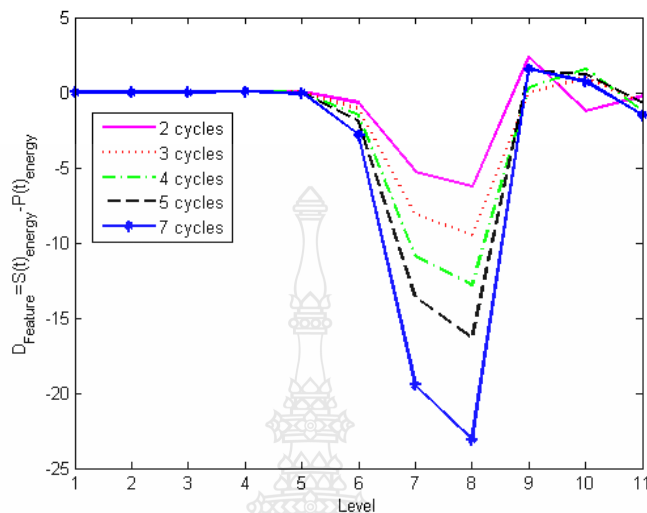
ภาพที่ 4.3 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันไซน์ปกติ ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ (100%)

2) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80% ของ 220 โวลต์ โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.4



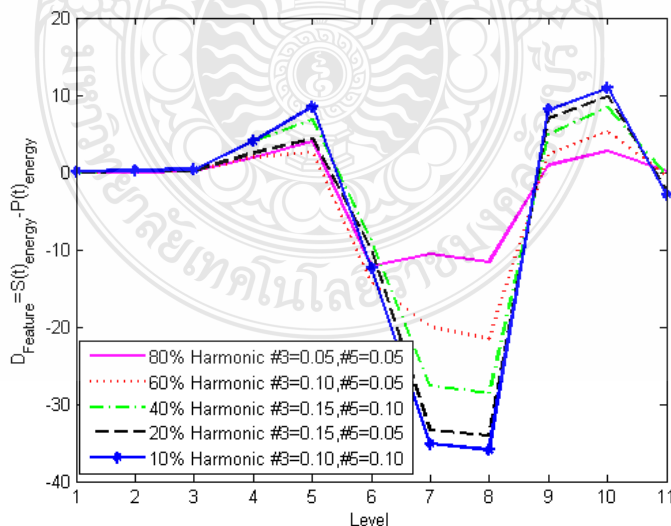
ภาพที่ 4.4 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80%

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 80% ของ 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.5



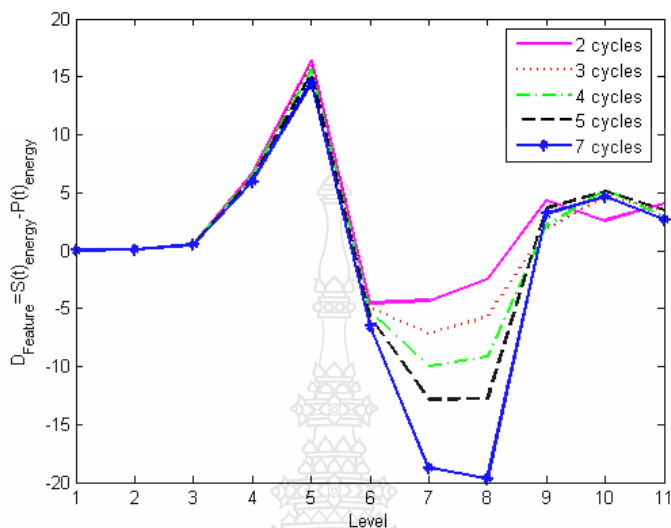
ภาพที่ 4.5 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

3) สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Voltage Sag with Harmonics) ขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80% ของ 220 โวลต์ โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล เมื่อระดับฮาร์โมนิกส์แตกต่างกัน ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.6



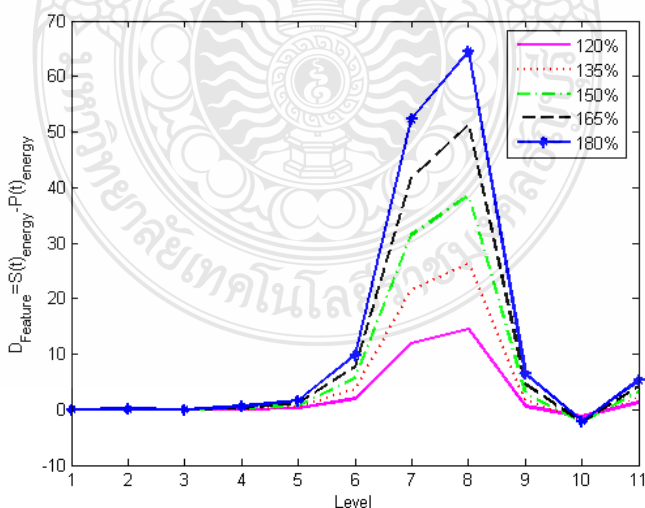
ภาพที่ 4.6 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ขนาดแรงดัน 10%, 20%, 40%, 60% และ 80%

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 80% ของ 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.7



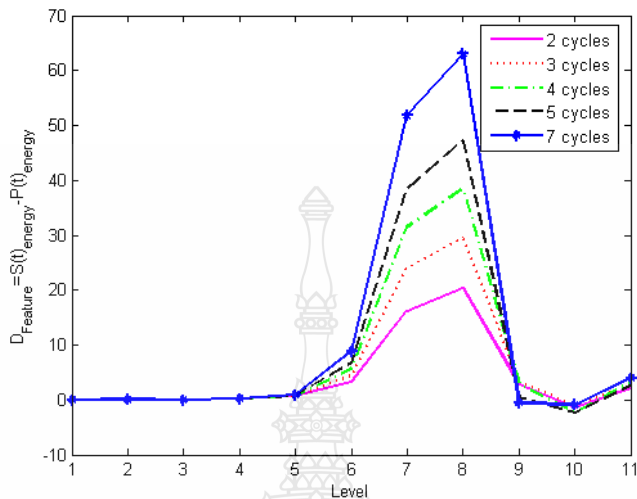
ภาพที่ 4.7 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

4) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขนาดแรงดัน 120%, 130%, 150%, 165% และ 180% ของ 220 โวลต์ โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.8



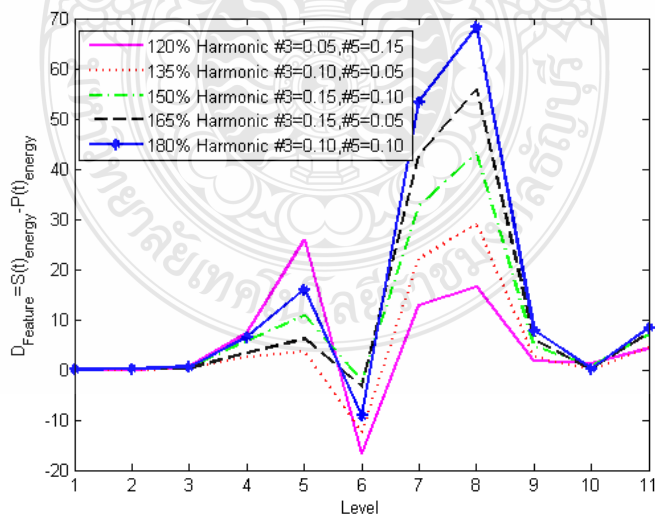
ภาพที่ 4.8 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ ขนาดแรงดัน 120%, 135%, 150%, 165% และ 180%

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 80% ของ 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.9



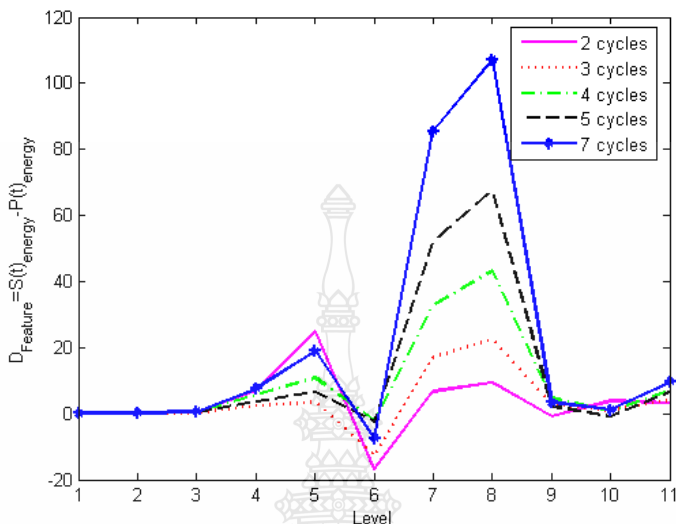
ภาพที่ 4.9 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

5) สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Voltage Swell with Harmonics) ขนาดแรงดัน 120%, 135%, 150%, 165% และ 180% ของ 220 โวลต์ โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล เมื่อระดับฮาร์โมนิกส์แตกต่างกัน ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.10



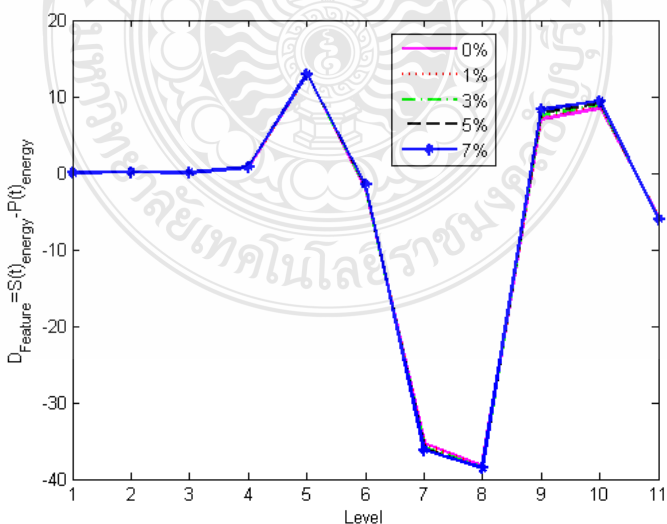
ภาพที่ 4.10 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ขนาดแรงดัน 120%, 135%, 150%, 165% และ 180%

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 80% ของ 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.11



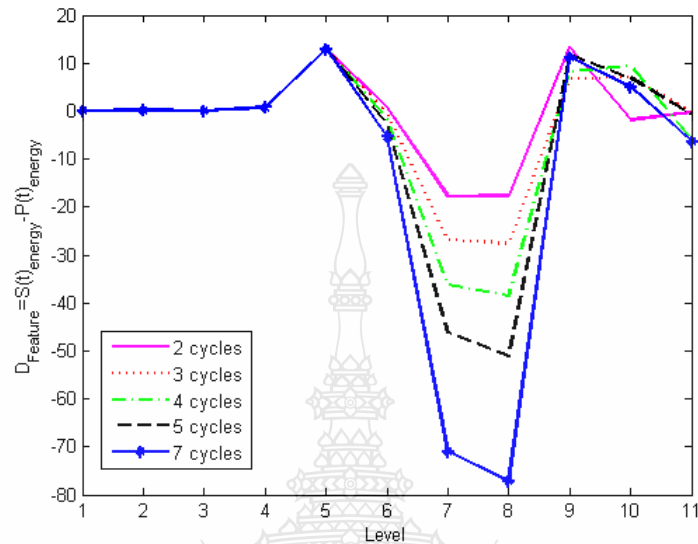
ภาพที่ 4.11 ลักษณะเด่นของสัญญาณแรงดันเกินช่วงเวลาที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

6) สัญญาณไฟดับช่วง (Voltage Interruption) ขนาดแรงดัน 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% ของ 220 โวลต์ โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.12



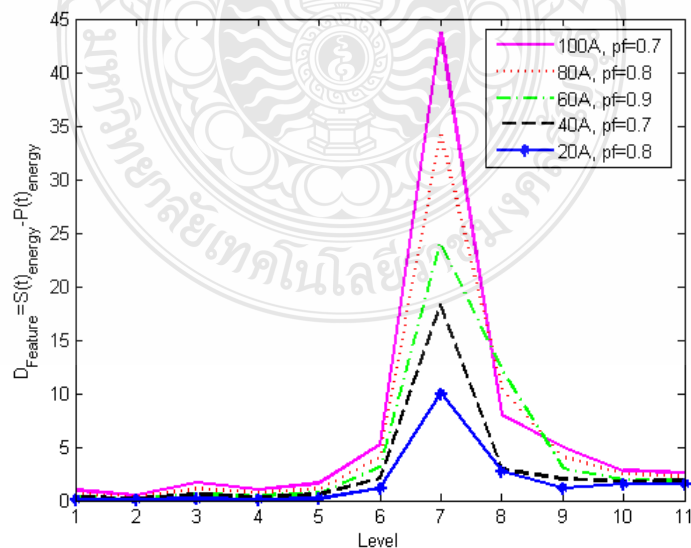
ภาพที่ 4.12 ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟดับช่วง ขนาดแรงดัน 0%, 1%, 2%, 3% และ 7%

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 80% ของ 220 โวลต์ ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.13



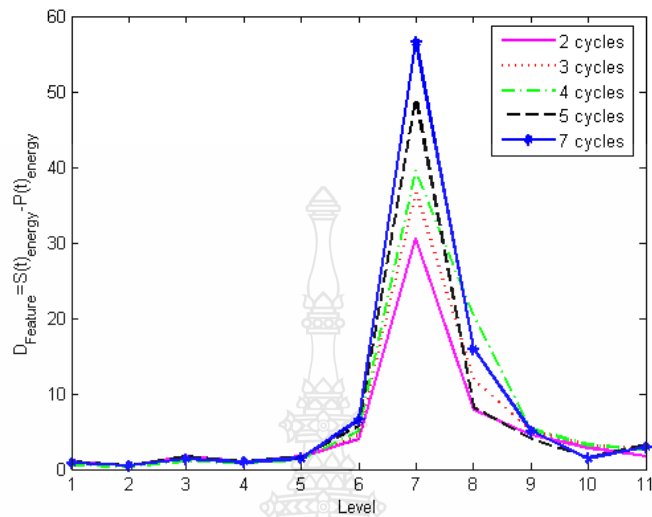
ภาพที่ 4.13 ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟดับชั่วคราว 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

7) สัญญาณกระแสเกิน (Over Current) ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.14



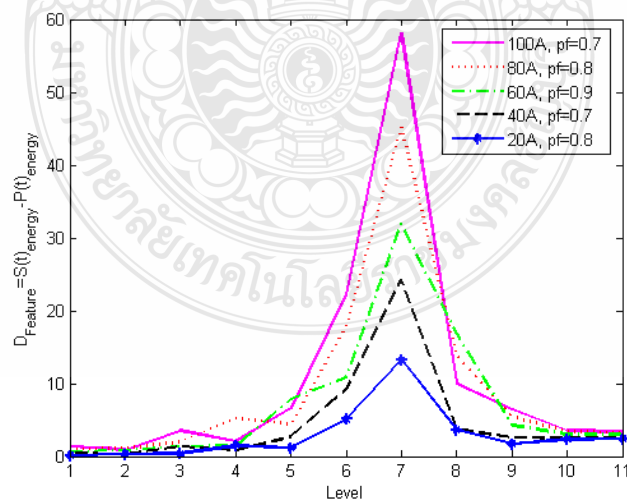
ภาพที่ 4.14 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกิน ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 100 แอมแปร์ (A) ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.15



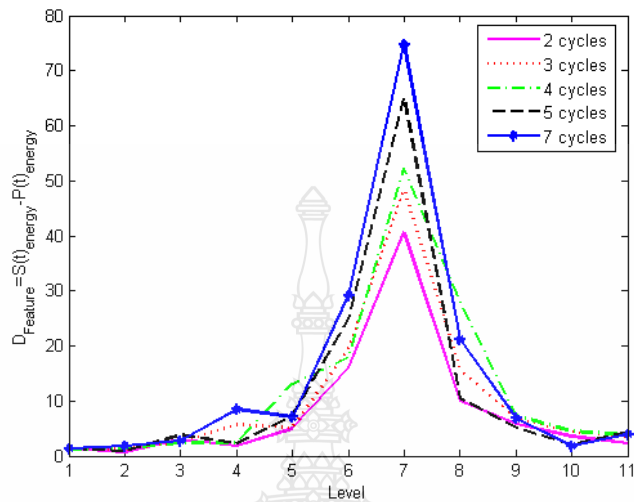
ภาพที่ 4.15 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

8) สัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Over Current with Harmonics) ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล เมื่อค่าประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor; pf) แตกต่างกัน ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.16



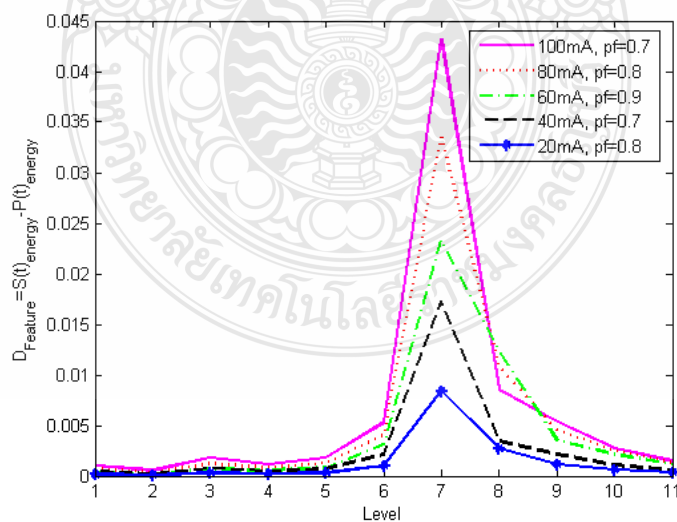
ภาพที่ 4.16 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ขนาดกระแส 20A, 40A, 60A, 80A และ 100A

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 100 แอมแปร์ (A) ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.17



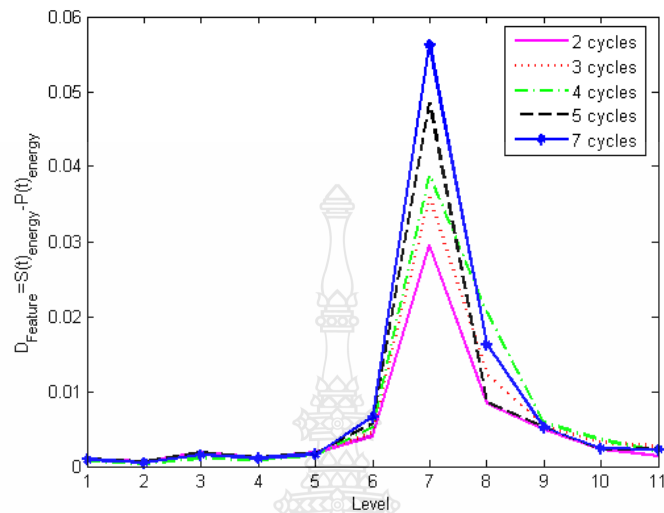
ภาพที่ 4.17 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

9) สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current) ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล เมื่อค่าประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor; pf) แตกต่างกัน ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.18



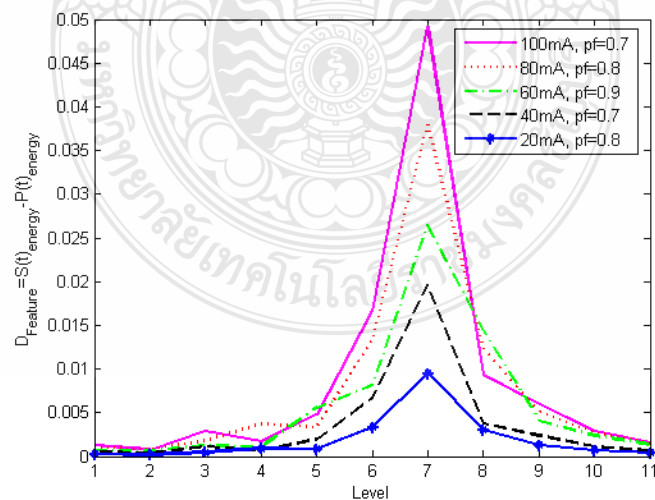
ภาพที่ 4.18 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 100 มิลลิแอมแปร์ (mA) ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.19



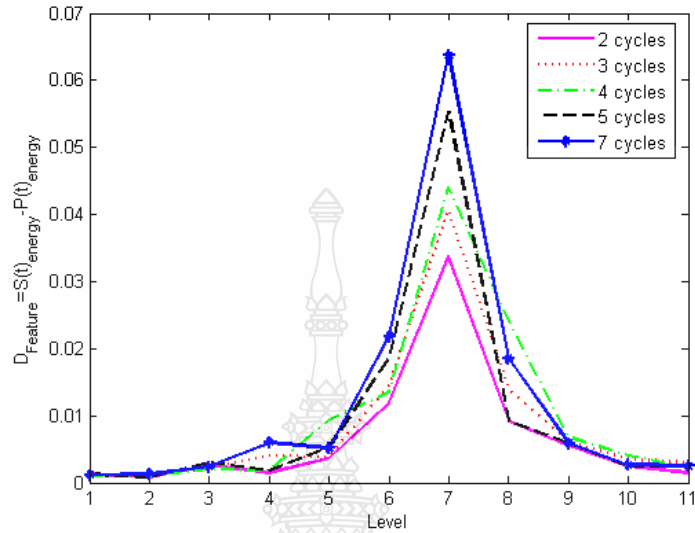
ภาพที่ 4.19 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

10) สัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Earth Leakage Current with Harmonics) ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ไซเคิล เมื่อค่าประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor; pf) แตกต่างกัน ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.20



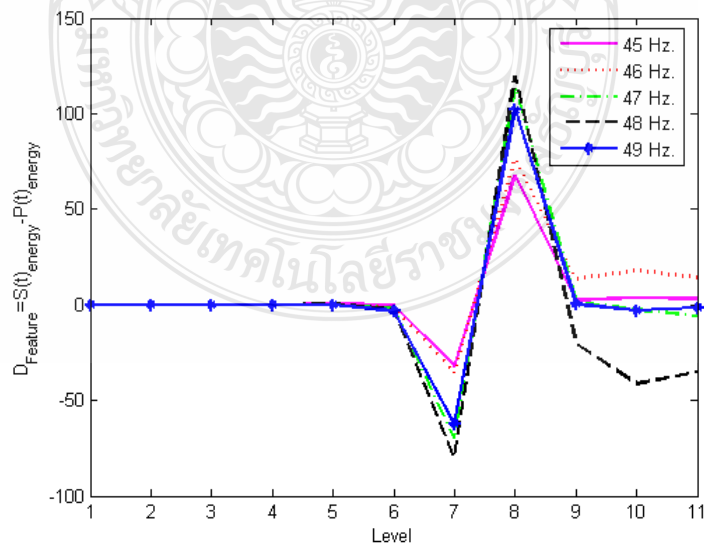
ภาพที่ 4.20 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ขนาดกระแส 20mA, 40mA, 60mA, 80mA และ 100mA

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล โดยขนาดสัญญาณเท่ากับ 100 มิลลิแอมแปร์ (mA) ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ลักษณะเด่นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

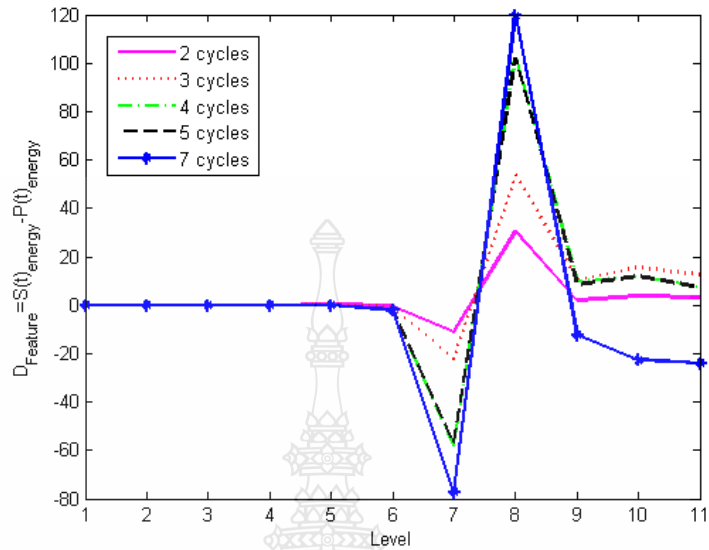
11) สัญญาณความถี่ต่ำเกิน (Under Power Frequency Variations) ขนาดความถี่ 45Hz, 46Hz, 47Hz, 48Hz และ 49Hz โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่ต่ำเกินขนาด 45Hz, 46Hz, 47Hz, 48Hz และ 49Hz

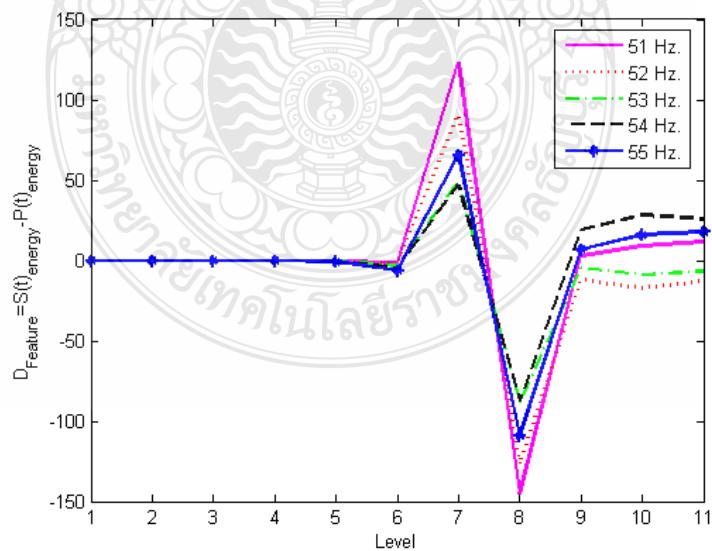
และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ ดังภาพที่

4.23



ภาพที่ 4.23 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่ต่ำเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

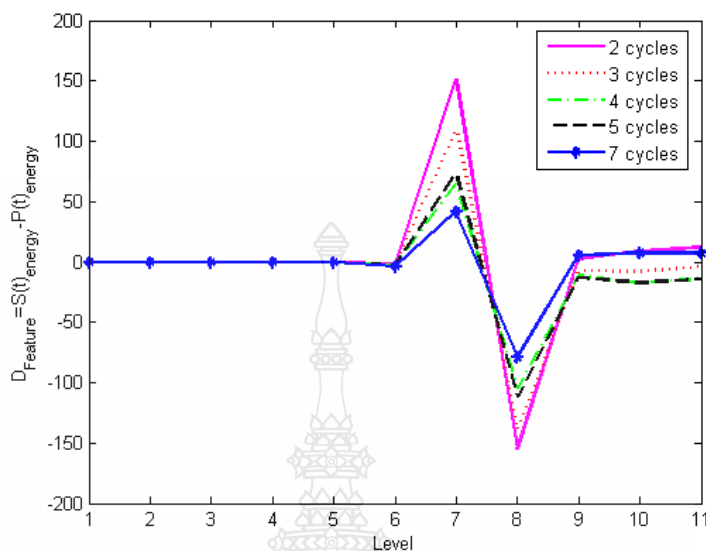
12) สัญญาณความถี่สูงเกิน (Over Power Frequency Variations) ขนาดความถี่ 51Hz, 52Hz, 53Hz, 54Hz และ 55Hz โดยจำนวนไซเคิลเท่ากับ 4 ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่สูงเกิน ขนาด 51Hz, 52Hz, 53Hz, 53Hz และ 55Hz

และเมื่อทำการเปลี่ยนจำนวนไซเคิลเป็น 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล ลักษณะเด่นที่ได้ดังภาพที่

4.25



ภาพที่ 4.25 ลักษณะเด่นของสัญญาณความถี่สูงเกิน 2, 3, 4, 5 และ 7 ไซเคิล

การจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้าที่ได้ จากการแปลงเวฟเล็ต้นั้น มีความสามารถในการจัดจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิดได้ดี สามารถจำแนกชนิดของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น แม้ว่าจะทำการเปลี่ยนช่วงระดับ หรือ เปลี่ยนช่วงระยะเวลา โดยเห็นความแตกต่างของกราฟในแต่ละระดับการสกัดจุดเด่นของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด

4.3 ผลการทดลองการจำแนกปัญหาคุณภาพ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

สำหรับการวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม จะใช้วัดค่าความถูกต้องของอัตราส่วนระหว่างจำนวนปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทดสอบได้จากโครงข่ายประสาทเทียมต่อจำนวนตัวอย่างทดสอบของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิด จำนวนชุดการเรียนรู้ (Training Set) และชุดการทดสอบ (Testing) ได้จัดไว้ ตามตารางที่ 4.13 จากจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 10,231 ชุด ที่ได้ทำการจำลองในบทที่ 3 กำหนดชุดที่ใช้ในการฝึกสอน จำนวน 7,831 ชุด และกำหนดชุดที่ใช้ในการทดสอบการจำแนกแต่ละคุณภาพไฟฟ้าที่ยังไม่เคยผ่านการฝึกสอนมาก่อน จำนวน 2,400 ชุด โดยการสุ่มเลือกจากระดับของสัญญาณ และจำนวนไซเคิลของสัญญาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.13 จำนวนชุดการเรียนรู้ (Training Set) และชุดการทดสอบ (Testing)

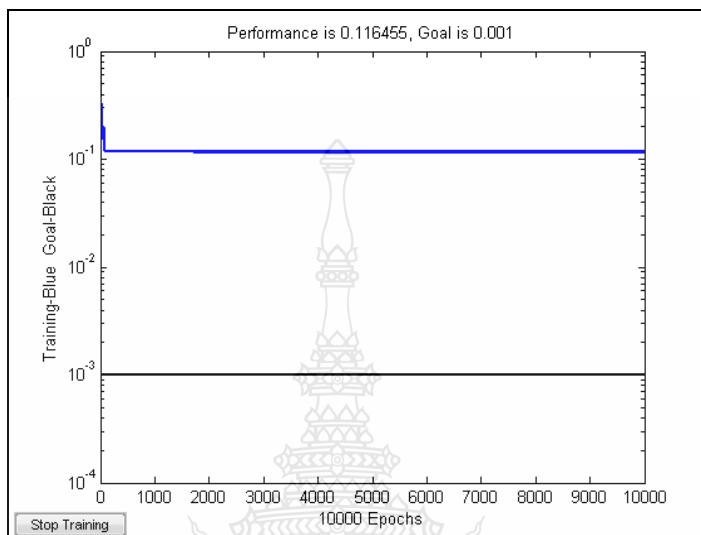
คุณภาพไฟฟ้า	จำนวนตัวอย่าง สัญญาณทั้งสิ้น	ชุดการเรียนรู้ (Training Set)	ชุดการทดสอบ (Testing Set)
1. แรงดันปกติ	400	200	200
2. แรงดันตกชั่วขณะ	477	277	200
3. แรงดันเกินชั่วขณะ	417	217	200
4. แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	1,431	1,231	200
5. แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	1,269	1,069	200
6. ไฟดับชั่วขณะ	543	343	200
7. กระแสเกิน	1,080	880	200
8. กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	1,080	880	200
9. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	1,092	892	200
10. กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน ที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	1,092	892	200
11. ความถี่ต่ำเกิน	675	475	200
12. ความถี่สูงเกิน	675	475	200
รวม	10,231	7,831	2,400

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ในการฝึกสอนจากบทที่ 3 แล้ว จึงทำการทดสอบโดยการปรับจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนตั้งแต่ 2 ถึง 9 นิวรอน เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 นิวรอน หากทำการฝึกสอนไม่สำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมาย (Target) สูงกว่าที่กำหนด คือ 0.001 หรือจำนวนรอบการฝึกสอนมากกว่า 10,000 รอบ จะมีผลให้การจำแนกมีความผิดพลาด ในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่นำผลการจำแนกแสดงให้เห็น หากการฝึกสอนสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมาย ต่ำกว่าที่กำหนด และจำนวนรอบการฝึกสอนน้อยกว่าที่กำหนด จะทำให้ผลการจำแนกมีความถูกต้องสูง

เอาต์พุตหลังการทดสอบจากโครงข่ายประสาทเทียม ในแต่ละชุดจะกำหนดให้ค่าที่สูงที่สุดมีค่าเป็น 1 เพียงค่าเดียว ส่วนค่าที่เหลือจะกำหนดให้มีค่าเป็น 0 แล้วจึงนำมาทำการจำแนก [10] โดยเปรียบเทียบตามค่าเป้าหมายของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด ตามตารางที่ 3.3 โดยผลการทดสอบจะวัดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง เท่ากับ จำนวนการจำแนกที่ถูกต้องหารด้วยจำนวนชุดทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบผลที่ได้ดังแสดงตามตารางที่ 4.14 - 4.18

4.3.1 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 2

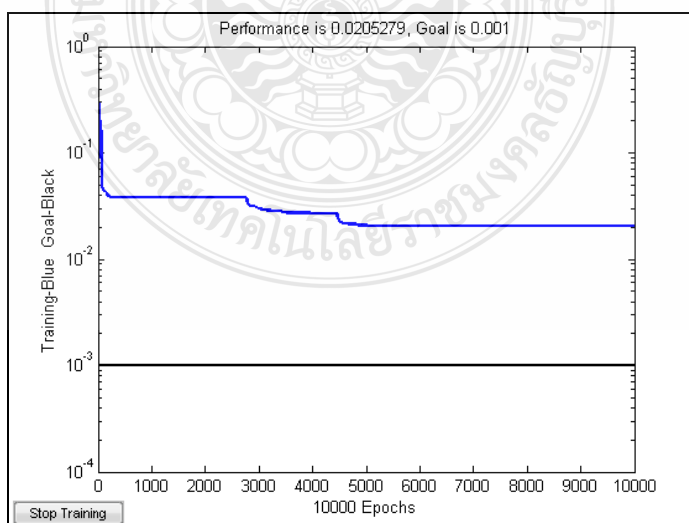
ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายสูงกว่า 0.001 และจำนวนรอบมากกว่า 10,000 รอบ ดังภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 2

4.3.2 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 3

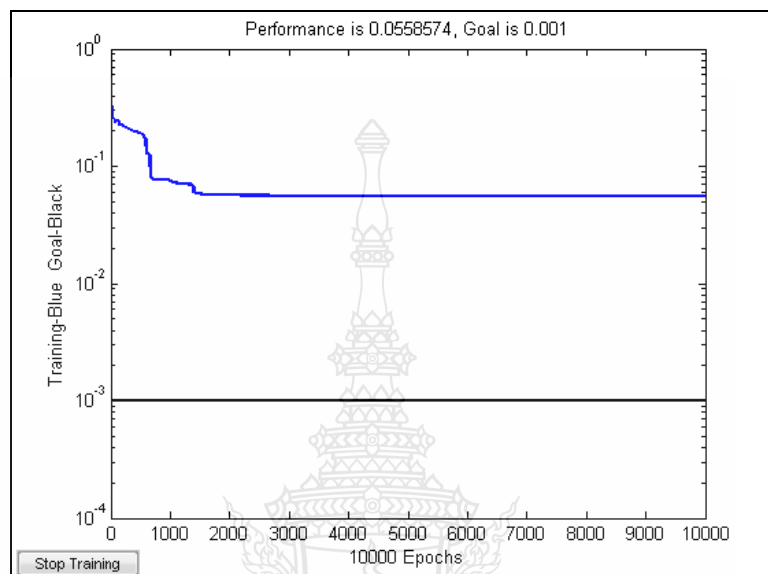
ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายสูงกว่า 0.001 และจำนวนรอบมากกว่า 10,000 รอบ ดังภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.27 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ ที่จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 3

4.3.3 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 4

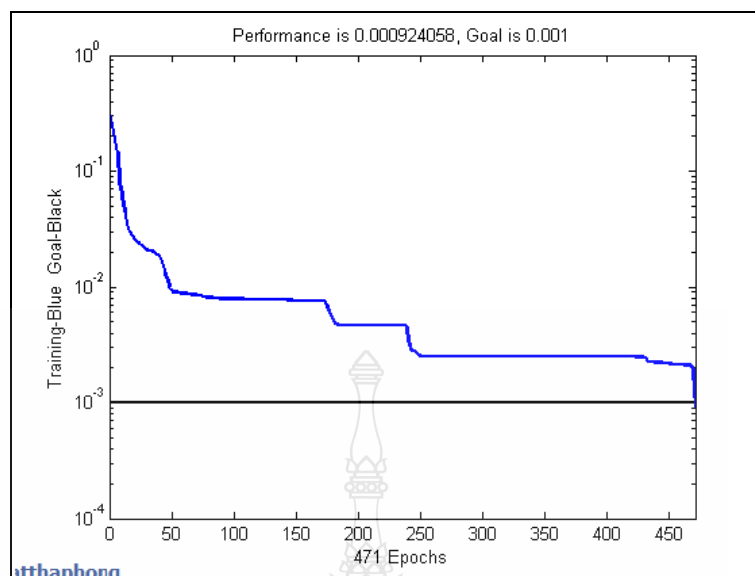
ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายสูงกว่า 0.001 และจำนวนรอบมากกว่า 10,000 รอบ ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมไม่สำเร็จ จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีค่าเท่ากับ 4

4.3.4 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 5

ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายต่ำกว่า 0.001 คือ 0.000924058 และจำนวนรอบต่ำกว่า 10,000 รอบ คือ 471 รอบ ดังภาพที่ 4.29 ผลการจำแนกปรากฏว่ามีการจำแนกที่ถูกต้องทั้งสิ้น รวมจำนวน 2,391 ชุด การจำแนกที่ผิดพลาดมีจำนวน 9 ชุด ความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $(2,391/2,400)*100 = 99.625\%$ ดังตารางที่ 4.14



ภาพที่ 4.29 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ จำนวนรอบ 471 รอบ

ผลการฝึกสอนที่ได้ของโครงข่ายประสาทเทียม

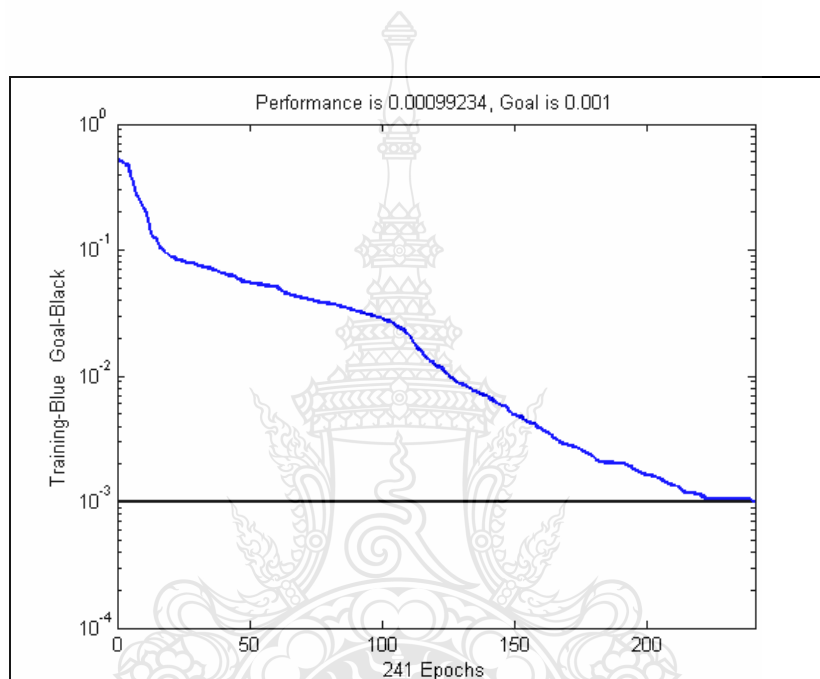
TRAINLM, Epoch 0/10000, MSE 0.323177/0.001, Gradient 66245.1/1e-010
 TRAINLM, Epoch 50/10000, MSE 0.00928363/0.001, Gradient 12329.7/1e-010
 TRAINLM, Epoch 100/10000, MSE 0.00788069/0.001, Gradient 37.5407/1e-010
 TRAINLM, Epoch 150/10000, MSE 0.00763084/0.001, Gradient 35.7031/1e-010
 TRAINLM, Epoch 200/10000, MSE 0.00466511/0.001, Gradient 8.06343/1e-010
 TRAINLM, Epoch 250/10000, MSE 0.00254315/0.001, Gradient 419.64/1e-010
 TRAINLM, Epoch 300/10000, MSE 0.00252272/0.001, Gradient 1.46758/1e-010
 TRAINLM, Epoch 350/10000, MSE 0.00252256/0.001, Gradient 1.43286/1e-010
 TRAINLM, Epoch 400/10000, MSE 0.00252226/0.001, Gradient 4.1652/1e-010
 TRAINLM, Epoch 450/10000, MSE 0.00218007/0.001, Gradient 57.514/1e-010
 TRAINLM, Epoch 471/10000, MSE 0.000924058/0.001, Gradient 230.334/1e-010
 TRAINLM, Performance goal met.

ตารางที่ 4.14 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรอนเท่ากับ 5

ชนิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	ผลการจำแนกที่ได้											
	แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ไฟดับชั่วขณะ	กระแสวิก	กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่ต่ำเกิน	ความถี่สูงเกิน
แรงดันปกติ	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะ	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะ	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	199	0	0	0	1	0	0	0
ไฟดับชั่วขณะ	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0
กระแสวิก	0	0	0	0	0	0	193	0	7	0	0	0
กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	199	0	1	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0
ความถี่ต่ำเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0
ความถี่สูงเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
ความถูกต้องในการจำแนก (%)	100	100	100	100	99.5	100	96.5	99.5	100	100	100	100
จำนวนการจำแนกที่ถูกต้อง	2,391 ชุด			ความถูกต้องโดยรวม (%)					99.625			

4.3.5 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 6

ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายต่ำกว่า 0.001 คือ 0.00099234 และจำนวนรอบต่ำกว่า 10,000 รอบ คือ 241 รอบ ดังภาพที่ 4.30 ผลการจำแนกปรากฏว่ามีการจำแนกที่ถูกต้องทั้งสิ้น รวมจำนวน 2,387 ชุด การจำแนกที่ผิดพลาดมีจำนวน 13 ชุด ความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $(2,387/2,400)*100 = 99.458\%$ ดังตารางที่ 4.15



ภาพที่ 4.30 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 241 รอบ

ผลการฝึกสอนที่ได้ของโครงข่ายประสาทเทียม

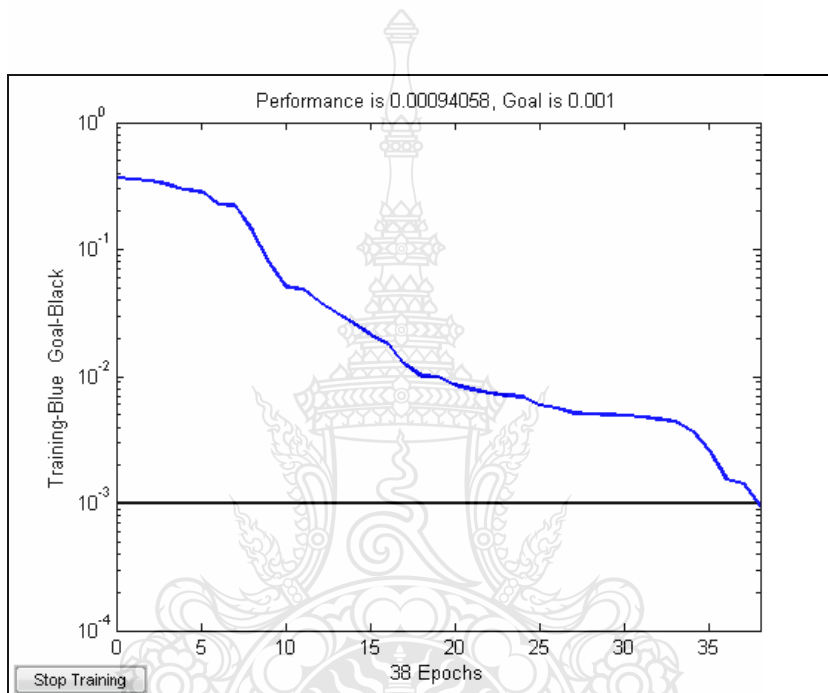
TRAINLM, Epoch 0/10000, MSE 0.542241/0.001, Gradient 33271.1/1e-010
 TRAINLM, Epoch 50/10000, MSE 0.0550904/0.001, Gradient 8264.84/1e-010
 TRAINLM, Epoch 100/10000, MSE 0.0282608/0.001, Gradient 16275.4/1e-010
 TRAINLM, Epoch 150/10000, MSE 0.0049384/0.001, Gradient 5507.36/1e-010
 TRAINLM, Epoch 200/10000, MSE 0.00163074/0.001, Gradient 1368.4/1e-010
 TRAINLM, Epoch 241/10000, MSE 0.00099234/0.001, Gradient 1418.03/1e-010
 TRAINLM, Performance goal met.

ตารางที่ 4.15 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรอนเท่ากับ 6

ชนิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	ผลการจำแนกที่ได้											
	แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ไฟดับชั่วขณะ	กระแสเกิน	กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่ต่ำเกิน	ความถี่สูงเกิน
แรงดันปกติ	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะ	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะ	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0
ไฟดับชั่วขณะ	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0
กระแสเกิน	0	0	0	0	0	0	190	0	0	0	10	3
กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0
ความถี่ต่ำเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0
ความถี่สูงเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	197
ความถูกต้องในการจำแนก (%)	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	98.5
จำนวนการจำแนกที่ถูกต้อง	2,387 ชุด				ความถูกต้องโดยรวม (%)				99.458			

4.3.6 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 7

ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายต่ำกว่า 0.001 คือ 0.00094058 และจำนวนรอบต่ำกว่า 10,000 รอบ คือ 38 รอบ ดังภาพที่ 4.31 ผลการจำแนกปรากฏว่ามีการจำแนกที่ถูกต้องทั้งสิ้น รวมจำนวน 2,381 ชุด การจำแนกที่ผิดพลาดมีจำนวน 19 ชุด ความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $(2,381/2,400)*100 = 99.208\%$ ดังตารางที่ 4.16



ภาพที่ 4.31 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 38 รอบ

ผลการฝึกสอนที่ได้ของโครงข่ายประสาทเทียม

TRAINLM, Epoch 0/10000, MSE 0.368552/0.001, Gradient 45487.9/1e-010

TRAINLM, Epoch 38/10000, MSE 0.00094058/0.001, Gradient 1176.22/1e-010

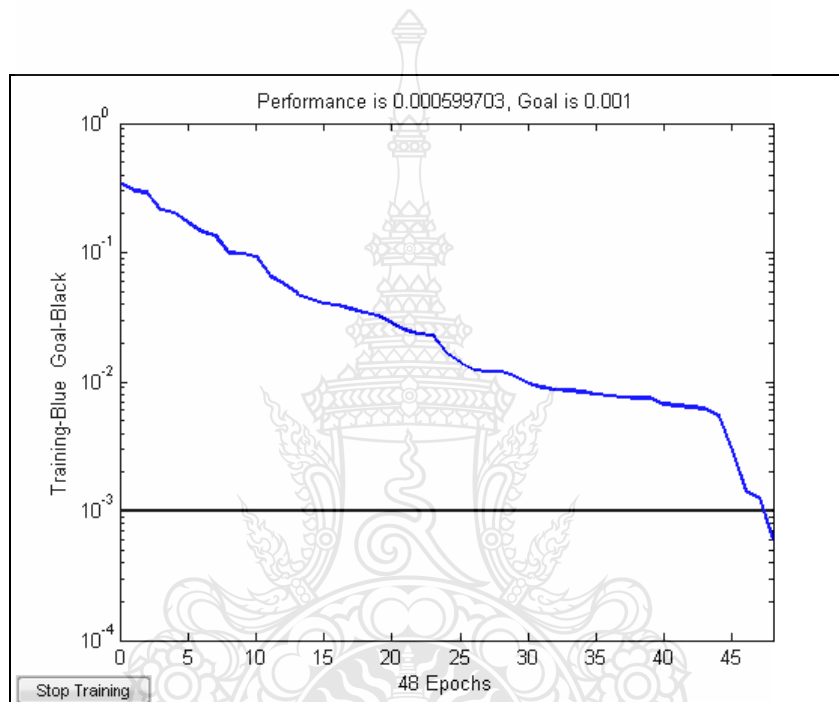
TRAINLM, Performance goal met.

ตารางที่ 4.16 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรอนเท่ากับ 7

ชนิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	ผลการจำแนกที่ได้											
	แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ไฟดับชั่วขณะ	กระแสวิก	กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่ต่ำเกิน	ความถี่สูงเกิน
แรงดันปกติ	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะ	7	185	0	0	0	0	7	0	0	0	0	1
แรงดันเกินชั่วขณะ	0	1	199	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0
ไฟดับชั่วขณะ	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0
กระแสวิก	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0
กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0
ความถี่ต่ำเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0
ความถี่สูงเกิน	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	197
ความถูกต้องในการจำแนก (%)	100	92.5	99.5	100	100	100	100	100	100	100	100	98.5
จำนวนการจำแนกที่ถูกต้อง	2,381 ชุด				ความถูกต้องโดยรวม (%)				99.208			

4.3.7 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 8

ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายต่ำกว่า 0.001 คือ 0.000599703 และจำนวนรอบต่ำกว่า 10,000 รอบ คือ 48 รอบ ดังภาพที่ 4.32 ผลการจำแนกปรากฏว่ามีการจำแนกที่ถูกต้องทั้งสิ้น รวมจำนวน 2,394 ชุด การจำแนกที่ผิดพลาดมีจำนวน 6 ชุด ความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $(2,394/2,400)*100 = 99.75\%$ ดังตารางที่ 4.17



ภาพที่ 4.32 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 48 รอบ

ผลการฝึกสอนที่ได้ของโครงข่ายประสาทเทียม

TRAINLM, Epoch 0/10000, MSE 0.346893/0.001, Gradient 50818.5/1e-010

TRAINLM, Epoch 48/10000, MSE 0.000599703/0.001, Gradient 1754.93/1e-010

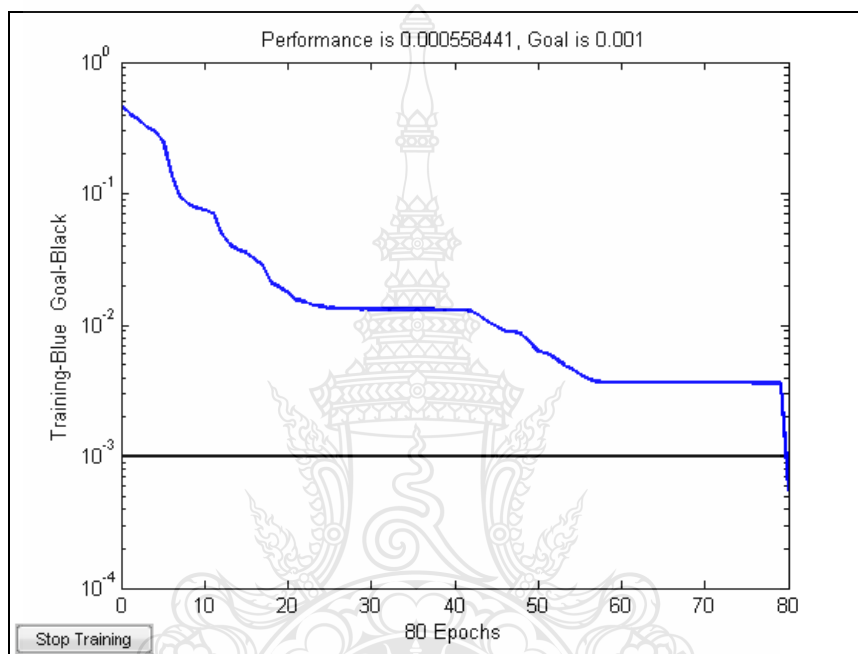
TRAINLM, Performance goal met.

ตารางที่ 4.17 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิเวรอนเท่ากับ 8

ชนิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	ผลการจำแนกที่ได้											
	แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ไฟดับชั่วขณะ	กระแสวิก	กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่ต่ำเกิน	ความถี่สูงเกิน
แรงดันปกติ	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะ	0	185	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะ	0	0	199	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0
ไฟดับชั่วขณะ	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0
กระแสวิก	0	0	0	0	0	0	194	0	6	0	0	0
กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0
ความถี่ต่ำเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0
ความถี่สูงเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
ความถูกต้องในการจำแนก (%)	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100
จำนวนการจำแนกที่ถูกต้อง	2,394 ชุด				ความถูกต้องโดยรวม (%)				99.75			

4.3.8 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีค่าเท่ากับ 9

ผลการทดสอบที่ได้ คือ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ โดยค่าผิดพลาดเป้าหมายต่ำกว่า 0.001 คือ 0.000558441 และจำนวนรอบต่ำกว่า 10,000 รอบ คือ 80 รอบ ดังภาพที่ 4.33 ผลการจำแนกปรากฏว่ามีการจำแนกที่ถูกต้องทั้งสิ้น รวมจำนวน 2,400 ชุด การจำแนกที่ผิดพลาด มีจำนวน 0 ชุด ความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $(2,400/2,400)*100 = 100.00\%$ ดังตารางที่ 4.18



ภาพที่ 4.33 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ ที่จำนวนรอบ 80 รอบ

ผลการฝึกสอนที่ได้ของโครงข่ายประสาทเทียม

TRAINLM, Epoch 0/10000, MSE 0.467421/0.001, Gradient 49784.1/1e-010

TRAINLM, Epoch 50/10000, MSE 0.00628214/0.001, Gradient 5208.68/1e-010

TRAINLM, Epoch 80/10000, MSE 0.000558441/0.001, Gradient 622.927/1e-010

TRAINLM, Performance goal met.

ตารางที่ 4.18 ผลการจำแนกคุณภาพไฟฟ้าปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เมื่อจำนวนนิรอนเท่ากับ 9

ชนิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	ผลการจำแนกที่ได้											
	แรงดันปกติ	แรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ไฟดับชั่วขณะ	กระแสวิก	กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	ความถี่ต่ำเกิน	ความถี่สูงเกิน
แรงดันปกติ	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะ	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะ	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0
แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0
ไฟดับชั่วขณะ	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0
กระแสวิก	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0
กระแสวิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0
ความถี่ต่ำเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0
ความถี่สูงเกิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
ความถูกต้องในการจำแนก (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
จำนวนการจำแนกที่ถูกต้อง	2,400 ชุด				ความถูกต้องโดยรวม (%)				100.00			

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการค้นหาและระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า ที่ความถูกต้องแม่นยำที่สุด โดยระยะเวลาเริ่มต้น (Starting Point) และเวลาสิ้นสุด (Ending Point) เพื่อทำการทดสอบการค้นหาและระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ รวมถึงการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform; DWT) และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANNs) ทำการจำลองปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ในโปรแกรม MATLAB สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

5.1.1 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนี้ กำหนดค่าของระบบสัญญาณไฟฟ้าเป็น 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ อัตราการชั่งตัวอย่าง (Sampling Rate) เท่ากับ 256 ชั่งตัวอย่าง ความถี่ในการชั่งตัวอย่างเท่ากับ 12.8 กิโลเฮิรตซ์ และความต่อเนื่องของสัญญาณ จำนวน 10 ไซเคิล (Cycles)

5.1.2 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ที่พิจารณามีทั้งหมด 12 ชนิด ประกอบด้วย แรงดันปกติ แรงดันตก ชั่วขณะ แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ไฟดับชั่วขณะ กระแสเกิน กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ กระแสไฟรั่วลงดิน กระแสไฟรั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ความถี่ต่ำเกิน และ ความถี่สูงเกิน โดยทำการจำลองในโปรแกรม Matlab ตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2009 มาตรฐานระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 และมาตรฐาน IEC 1000-3-2

5.1.3 การค้นหาและระบุตำแหน่งของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (Multi-Resolution Analysis; MRA) ชนิด Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคุณภาพไฟฟ้าในสถานะชั่วขณะ ที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่สูง ในระดับที่ 1 (d1) จะเห็นว่าสามารถตรวจจับจุดที่เกิดความผิดปกติของสัญญาณได้ จึงเหมาะสมที่จะนำมาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ

5.1.4 การค้นหา และระบุตำแหน่งนั้น จะทำการกำหนดช่วงชั่งตัวอย่างของข้อมูล ตั้งแต่จุดที่ 10 ถึง 2,550 ทำการตัดข้อมูลส่วนหัวและท้ายของสัญญาณออก เนื่องจากทำให้เกิดความแตกต่างของ

ข้อมูล ทำให้การค้นหาและระบุตำแหน่งความผิดปกติของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้าผิดพลาดได้ ผลจากการทดสอบในการค้นหา และระบุตำแหน่งนั้น จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการค้นหา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ที่ค่อนข้างแม่นยำ คือ อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.015625 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ไม่ได้พิจารณาทดสอบกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น คลื่นรบกวน หรือ สัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการค้นหา และระบุตำแหน่งได้

5.1.5 การสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) ของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด ใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) ในระดับความละเอียดที่ 7 และ 8 เป็นระดับความละเอียด (Level) ที่สำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นระดับความละเอียดที่เป็นลักษณะเด่นของความถี่สัญญาณปกติที่ 50 เฮิรตซ์ เพื่อให้ครอบคลุมจึงทำการพิจารณาที่ 10 ระดับความละเอียด

5.1.6 การจัดจำแนก (Identification) คุณภาพไฟฟ้า จะใช้ลักษณะเด่นของสัญญาณ ที่ได้จากการสกัดจุดเด่น คำนวณค่าพลังงาน (Energy) ของการกระจายสัญญาณในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย ดังนั้น จะได้ลักษณะเด่นทั้งสิ้น 11 จุด เป็นการลดจำนวนข้อมูลลงก่อนเข้าโครงข่ายประสาท-เทียม

5.1.7 ความผิดพลาดในการจำแนกของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ จะมีความผิดพลาดในการจำแนกเป็นไฟดับชั่วขณะได้ เมื่อขนาดสัญญาณแรงดันมีค่าใกล้เคียง 0.1 pu ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงทำการบวกเพิ่มระดับการสกัดจุดเด่นที่ตำแหน่ง d5 อีกเท่ากับ 15 หน่วย หากขนาดแรงดันช่วงที่เกิดความผิดพลาดมีค่าต่ำกว่า 0.1 pu เพื่อให้การจัดการจำแนกให้มีความแตกต่างมากขึ้น

5.1.8 สัญญาณปัญหาคุณภาพในกลุ่มแรงดัน และความถี่ จะใช้ลักษณะเด่นทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง ทำให้เกิดลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน เพื่อให้โครงข่ายประสาท-เทียม สามารถทำการจำแนกได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

5.1.9 สัญญาณปัญหาคุณภาพในกลุ่มกระแสไฟฟ้า จะไม่มีการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง เนื่องจากระดับสัญญาณแตกต่างกันมาก และกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน, กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ จะทำการคูณด้วย 1,000 ก่อนทำการป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากระดับสัญญาณมีขนาดน้อยมาก หากทำการจำแนกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม จะทำให้เกิดความผิดพลาดสูงในการจำแนก

5.1.10 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้น ใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back - Propagation Learning) ในการเรียนรู้รูปแบบ (Pattern) ของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด อัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้จะใช้ Trainlm (Levenberg-Marquardt) มี

คุณลักษณะ คือ เร็วในการเรียนรู้ และคุณลักษณะในการลดการใช้งานหน่วยความจำ แล้วทำการจำแนก (Classification) ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้ลักษณะเด่นที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต

5.1.11 ข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กำหนดชุดที่ใช้ในการฝึกสอน จำนวน 7,831 ชุด และกำหนดชุดที่ใช้ในการทดสอบการจำแนกแต่ละคุณภาพไฟฟ้าที่ยังไม่เคยผ่านการฝึกสอนมาก่อน ชนิดละ 200 ชุด รวมจำนวน 2,400 ชุด โดยการสุ่มเลือกจากระดับของสัญญาณ และจำนวนไซเคิลของสัญญาณที่แตกต่างกัน

5.1.12 ผลการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า มีความถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ความสำเร็จของการฝึกสอนจำนวน 80 รอบ และมีจำนวนนิรวลในชั้นซ่อนเท่ากับ 9 โหนด ทั้งนี้เป็นการจำแนกกับสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทำการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไม่ได้พิจารณาทดสอบกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงๆ รวมถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น คลื่นรอยบาก หรือสัญญาณรบกวน

5.1.13 ประโยชน์ที่ได้รับจากการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เพื่อการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า จากสถานะที่เกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเกิน กระแสไฟรั่วลงดิน เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน และเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับความถี่ ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ สามารถที่จะหาวิธีการแก้ไข หรือการป้องกันต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิด เพื่อลดความเสียหายอันเกิดจากปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เช่น การติดตั้งอุปกรณ์แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากโหลด หรือติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันโหลดที่สำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การจำลองสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะมีความแตกต่างกับสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เป็นจริง ดังนั้น จึงควรพิจารณาในส่วนของสัญญาณรบกวนต่างๆ เข้ามามีด้วย เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถเรียนรู้และจำแนกได้

5.2.2 การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่ได้พิจารณาทดสอบกับคุณภาพไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส อิมพัลส์ชั่วคราว อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ คลื่นรอยบาก สัญญาณรบกวน และแรงดันกระเพื่อม ดังนั้น จึงควรพิจารณานำปัญหาคุณภาพดังกล่าวมาทำการทดสอบ เพื่อให้มีความสามารถในการค้นหาและระบุตำแหน่ง และจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ดีมากยิ่งขึ้น

5.2.3 สัญญาณอินพุตจากการแปลงเวฟเล็ต หากสามารถลดจำนวนลงได้อีก จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถประมวลผลได้เร็วขึ้น แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการจำแนกเช่นเดิม

5.2.4 มีการประยุกต์การตรวจจับสัญญาณปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยการหาจุดที่เกิดความผิดปกติจากการแปลงเวฟเล็ต หรือการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าของโครงข่ายประสาทดัดเทียม ในเวลาจริง (Real Time) ได้



รายการอ้างอิง

- [1] ยุทธพงศ์ ทัพผดุง. “สิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าที่มีผลต่อภาระทางไฟฟ้า,” วารสาร อินดัสเทรียล เทคโนโลยี รีวิว. ปีที่ 8, ฉบับที่ 96, พ.ศ. 2545. หน้า 104-106.
- [2] IEEE Standards Board., “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” **IEEE Standards Coordinating Committee on Power Quality**, 2009. pp. 1159-2009.
- [3] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. **มาตรฐานคุณภาพบริการของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย** (Online), 2553. Available: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS46-04-Standard.html>.
- [4] มนัส สัจวารศิลป์ และวรรธน์ ภัทรอมรกุล, **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อินโฟเพรส, 2543.
- [5] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. Poggi. “Wavelet Toolbox™ 4 User’s Guide,” **The Math Works, Inc.**, March 2010.
- [6] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงินและวุฒิพล ชาราธิ์เรศษุ. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินติ้ง, 2550.
- [7] กองประชาสัมพันธ์, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า** (Online), 2553. Available: [http://peane2.pea.co.th/ne/ED_DC_07\(1\).html](http://peane2.pea.co.th/ne/ED_DC_07(1).html).
- [8] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย พ.ศ.2545 แก้ไขครั้งที่ 3**. กรุงเทพมหานคร, 2545.
- [9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มอก. 909-2548 เครื่องตัดวงจรกระแสเหลือแบบมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินสำหรับใช้ในที่อยู่อาศัยและใช้ในลักษณะที่คล้ายกัน**. กรุงเทพมหานคร, 2548.
- [10] IEC/TS 60479-1 Ed 4.0, **Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects.aspects**, 2005.
- [11] IEC 1000-3-2, **Limit for harmonic current emission (equipment input current 16 A per phase) Basic EMC publication**, 1995.
- [12] ศักดิ์ชัย นรสิงห์, **คุณภาพกำลังไฟฟ้า (POWER QUALITY)** (Online), 2553. Available: http://www.9engineer.com/ee_main/Article/PQ.htm
- [13] โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. “โครงข่ายประสาทเทียม,” **สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน**. เล่มที่ 25.. กรุงเทพมหานคร (2004).

- [14] ผศ. ดร.พยุ่ง มีสัจจิม, เอกสารประกอบการสอนรายวิชาระบบฟิชชีและโครงข่ายประสาทเทียม (Online), 2553. Available : <http://suanpalm3.kmutnb.ac.th/teacher/phayung/>.
- [15] Demuth, H. Beale, M. and Hagan, M., “Neural Network Toolbox 6 User's Guide,” **The Math Works, Inc.**, March 2008.
- [16] Ghanim Putrus, Janaka Wijayakulasooriya, Peter Minns., “Power Quality: Overview and Monitoring,” **Industrial and Information Systems**, 2007. ICIS 2007. 9-11 Aug. 2007. pp.551-558.
- [17] L.C.Saikia, S.M.Borah and S.PaitIndia., “Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform, Fuzzy Logic and Neural Network,”. **Conference (INDICON)**, 2010 Annual IEEE, 17-19 Dec. 2010. pp.1-5.
- [18] ชูศักดิ์ ดิลกรัตนตระกูล, การค้นหา - ระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของรูปคลื่นและการแยกประเภทรูปแบบความผิดปกติอัตโนมัติที่รับทวนคุณภาพระบบไฟฟ้า โดยใช้เวฟเล็ต และโครงข่ายประสาทเทียม, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.
- [19] Chen Chun-ling, Xu Tong-yu, Yuan Ye, Jiang Fengli., “Detection and Location of Power Quality Transient Disturbance Based on Lifting Wavelet,” **Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, 2010 Asia-Pacific, 2010. pp.1-4.
- [20] Worapol Kanitpanyacharoen and Suttichai Premrudeepreechacharn., “Power quality problem classification using wavelet transformation and artificial neural networks,” **TENCON 2004**, IEEE Region 10 Conference 2004. Vol.3. pp.252-255.
- [21] Seung-Bock Jung, Jae-Chul Kim, Hyun-Kyung Cho, Seung-Chul Shin, Myung-Hee Lee. “A Voltage Sag Detection using Difference of Wavelet Detection Characteristics,” **ICEE2006**. July 9~13, 2006.
- [22] Tse Norman, Zhou Long. 2009. “Detection of Voltage Variations Due to Distributed Energy Resources,” **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2009**, Calgary. Alberta. Canada. 26-30 July 2009. pp.1-5.
- [23] Nermeen Talaat and Marija Ilic. “ANNs Based on Subtractive Cluster Feature for Classifying Power Quality,” **Power Symposium**, 2008. NAPS '08. 40th North American. pp.1-7.

- [24] Murat Uyara, Selcuk Yildirima and Muhsin Tunay Gencoglub. “An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals,” **Electric Power Systems Research** **78**, 2008. pp.1747-1755.
- [25] Haibo He and Janusz A. Starzyk. “A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform,” **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, VOL. 21, NO. 1, JANUARY 2006. pp. 286-295.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองการจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า



ก.1 สัญญาณแรงดันไซน์ปกติ (Normal Sinusoidal Signal)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000; % 2560 Sampling Rates
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 9000:5:9995;
    ysignal = (n1/10000)*220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*f);
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.2 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000; % 2560 Sampling Rates
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 900:-5:110;
    ysignal = (1-((n1/1000)*220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*f)));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.3 สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50;
t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 110:5:800;
    ysignal = (1+((n1/1000)*220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*f)));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.4 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Sag with Harmonics)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14;

%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 900:-15:110;
    alfa1 = 1; alfa3 = 0.15; alfa5 = 0.15; % ตัวประกอบ harmonics ลำดับที่ 3,5
    Vh1 = alfa1.*sin(1*2*pi*t*f); % First harmonic
    Vh3 = alfa3.*sin(3*2*pi*t*f); % Third harmonic
    Vh5 = alfa5.*sin(5*2*pi*t*f); % Fifth harmonic
    ysignal = (Vh1+Vh3+Vh5)*220*sqrt(2)*(1-((n2/1000)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.5 สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Swell with Harmonics)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14;

%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 900:-15:110;
    alfa1 = 1; alfa3 = 0.15; alfa5 = 0.15; % ตัวประกอบ harmonics ลำดับที่ 3,5
    Vh1 = alfa1.*sin(1*2*pi*t*f); % First harmonic
    Vh3 = alfa3.*sin(3*2*pi*t*f); % Third harmonic
    Vh5 = alfa5.*sin(5*2*pi*t*f); % Fifth harmonic
    ysignal = (Vh1+Vh3+Vh5)*220*sqrt(2)*(1+((n2/1000)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```


ก.6 สัญญาณไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14;
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 10000:-5:9100;
    ysignal = (1-((n2/10000)*(u(t-t1)-u(t-t2))))*220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*f);
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.7 สัญญาณกระแสเกิน (Over Current)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50;
pf = 0.7; % กำหนดค่า power factor
fee = -acos(pf); % กำหนดมุมเลื่อนเฟส เป็นค่าเรเดียน
t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 1:1:90;
    ysignal = 10*sin(2*pi*t*f+fee)*(1+((n2/10)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('I.wk1', ysignal);
end

```

ก.8 สัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Over Current with Harmonics)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50;
pf = 0.7; % กำหนดค่า power factor
fee = -acos(pf); % กำหนดมุมเลื่อนเฟส เป็นค่าเรเดียน
t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 1:1:90;
    I1_D = 9.615*sin(2*pi*t*f+fee); % Fundamental
    Iodd_D = (2.30*sin(3*(2*pi*t*f+fee)) + 1.14*sin(5*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        0.77*sin(7*(2*pi*t*f+fee)) + 0.40*sin(9*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        0.33*sin(11*(2*pi*t*f+fee)) + 0.21*sin(13*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/15)*sin(15*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/17)*sin(17*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/19)*sin(19*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/21)*sin(21*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/23)*sin(23*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/25)*sin(25*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/27)*sin(27*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/29)*sin(29*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/31)*sin(31*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/33)*sin(33*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/35)*sin(35*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/37)*sin(37*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/39)*sin(39*(2*pi*t*f+fee)));
    ysignal = sqrt(2).*(I1_D + Iodd_D).*(1+((n2/10)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('I.wk1', ysignal);
end

```

ก.9 สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50;
pf = 0.7; % กำหนดค่า power factor
fee = -acos(pf); % กำหนดมุมเลื่อนเฟส เป็นค่าเรเดียน
t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 10:50:100;
    ysignal = 10*sin(2*pi*t*f+fee)*(1+((n2/1000)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('I.wk1', ysignal);
end

```

ก.10 สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Earth Leakage Current with Harmonics)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50;
pf = 0.7; % กำหนดค่า power factor
fee = -acos(pf); % กำหนดมุมเลื่อนเฟส เป็นค่าเรเดียน
t = (0:78125:199921875)/1000000000;
t1 = 0.06; t2 = 0.14; % กำหนดช่วงเวลา t1 และ t2
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 10:50:100;
    I1_D = 11.6*sin(2*pi*t*f+fee); % Fundamental
    Iodd_D = (2.30*sin(3*(2*pi*t*f+fee)) + 1.14*sin(5*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        0.77*sin(7*(2*pi*t*f+fee)) + 0.40*sin(9*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        0.33*sin(11*(2*pi*t*f+fee)) + 0.21*sin(13*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/15)*sin(15*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/17)*sin(17*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/19)*sin(19*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/21)*sin(21*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/23)*sin(23*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/25)*sin(25*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/27)*sin(27*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/29)*sin(29*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/31)*sin(31*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/33)*sin(33*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/35)*sin(35*(2*pi*t*f+fee)) + (2.25/37)*sin(37*(2*pi*t*f+fee)) + ...
        (2.25/39)*sin(39*(2*pi*t*f+fee)));
    ysignal = sqrt(2).*(I1_D + Iodd_D).*(1+((n2/10)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('I.wk1', ysignal);
end

```

ก.11 สัญญาณความถี่ต่ำเกิน (Under Power Frequency Variations)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000; % 2560 Sampling Rates
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 500:-2:52;
    ysignal = 220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*(f-(n1/100)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.12 สัญญาณความถี่สูงเกิน (Over Power Frequency Variations)

```

%% กำหนดค่าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 Hz.
f = 50; t = (0:78125:199921875)/1000000000; % 2560 Sampling Rates
%% สร้างสัญญาณ
for n1 = 52:2:500;
    ysignal = 220*sqrt(2)*sin(2*pi*t*(f+((n1/100)*(u(t-t1)-u(t-t2))));
    WK1WRITE('V.wk1', ysignal);
end

```

ก.13 การคำนวณจากการแปลงเวฟเล็ต 10 ระดับความละเอียด

```

%% Compute the wavelet decomposition 10 level
w = 'db4'; % กำหนดชนิดของเวฟเล็ต เป็น DB4
[C1,L1] = wavedec(ynormal,10,w); % กำหนดในการแปลงเท่ากับ 10 ระดับ
% Extract the coefficients of Normal Signal
cA101 = appcoef(C1,L1,w,10);
[cD11, cD21, cD31, cD41, cD51, cD61, cD71, cD81, cD91, cD101] =
    detcoef(C1,L1,[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]);
% Compute the reconstructed coefficients of Normal Signal
a101 = wrcoef('a',C1,L1,w,10); EcA101 = sqrt(sum(abs(a101(10:2550).^sub1))/2550);
d101 = wrcoef('d',C1,L1,w,10); EcD101 = sqrt(sum(abs(d101(10:2550).^sub1))/2550);
d91 = wrcoef('d',C1,L1,w,9); EcD91 = sqrt(sum(abs(d91(10:2550).^sub1))/2550);
d81 = wrcoef('d',C1,L1,w,8); EcD81 = sqrt(sum(abs(d81(10:2550).^sub1))/2550);

```

ก.13 การคำนวณจากการแปลงเวฟเล็ต 10 ระดับความละเอียด (ต่อ)

```

d71 = wrcoef('d',C1,L1,w,7); EcD71 = sqrt(sum(abs(d71(10:2550).^sub1))/2550);
d61 = wrcoef('d',C1,L1,w,6); EcD61 = sqrt(sum(abs(d61(10:2550).^sub1))/2550);
d51 = wrcoef('d',C1,L1,w,5); EcD51 = sqrt(sum(abs(d51(10:2550).^sub1))/2550);
d41 = wrcoef('d',C1,L1,w,4); EcD41 = sqrt(sum(abs(d41(10:2550).^sub1))/2550);
d31 = wrcoef('d',C1,L1,w,3); EcD31 = sqrt(sum(abs(d31(10:2550).^sub1))/2550);
d21 = wrcoef('d',C1,L1,w,2); EcD21 = sqrt(sum(abs(d21(10:2550).^sub1))/2550);
d11 = wrcoef('d',C1,L1,w,1); EcD11 = sqrt(sum(abs(d11(10:2550).^sub1))/2550);
Epure = [EcD11, EcD21, EcD31, EcD41, EcD51, EcD61, EcD71, EcD81, EcD91,
         EcD101, EcA101];

%% Extract the coefficients of Disturbance Signal
[C2,L2] = wavedec(ysignal,10,w);
cA102 = appcoef(C2,L2,w,10);
[cD12, cD22, cD32, cD42, cD52, cD62, cD72, cD82, cD92, cD102] =
    detcoef(C2,L2,[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]);

%% Compute the reconstructed coefficients of Disturbance Signal
a102 = wrcoef('a',C2,L2,w,10); EcA102 = sqrt(sum(abs(a102(10:2550).^sub1))/2550);
d102 = wrcoef('d',C2,L2,w,10); EcD102 = sqrt(sum(abs(d102(10:2550).^sub1))/2550);
d92 = wrcoef('d',C2,L2,w,9); EcD92 = sqrt(sum(abs(d92(10:2550).^sub1))/2550);
d82 = wrcoef('d',C2,L2,w,8); EcD82 = sqrt(sum(abs(d82(10:2550).^sub1))/2550);
d72 = wrcoef('d',C2,L2,w,7); EcD72 = sqrt(sum(abs(d72(10:2550).^sub1))/2550);
d62 = wrcoef('d',C2,L2,w,6); EcD62 = sqrt(sum(abs(d62(10:2550).^sub1))/2550);
d52 = wrcoef('d',C2,L2,w,5); EcD52 = sqrt(sum(abs(d52(10:2550).^sub1))/2550);
d42 = wrcoef('d',C2,L2,w,4); EcD42 = sqrt(sum(abs(d42(10:2550).^sub1))/2550);
d32 = wrcoef('d',C2,L2,w,3); EcD32 = sqrt(sum(abs(d32(10:2550).^sub1))/2550);
d22 = wrcoef('d',C2,L2,w,2); EcD22 = sqrt(sum(abs(d22(10:2550).^sub1))/2550);
d12 = wrcoef('d',C2,L2,w,1); EcD12 = sqrt(sum(abs(d12(10:2550).^sub1))/2550);

Esignal = [EcD12, EcD22, EcD32, EcD42, EcD52, EcD62, EcD72, EcD82, EcD92,
          EcD102, EcA102];

F = [Esignal-Epure];
WK1WRITE('F.wk1', F);
figure(4); plot(F);

```

ก.14 หาจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของสัญญาณ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

```

signal = d12(10:2550);
T12 = sort(signal);
% จัดกลุ่มช่วงเวลาการเกิด Disturbance กำหนดทั้งหมด 10 จุดสูงสุด
for z1 = 0:1:10;
Max11(z1+1) = (T12(2541-z1));
Min11(z1+1) = (T12(1+z1));
Tmax11(z1+1) = t(find(d12(:)==Max11(z1+1)));
Tmin11(z1+1) = t(find(d12(:)==Min11(z1+1)));
end

Max22 = [Max11 Min11];
Tmax22 = [Tmax11 Tmin11];
Tmax23 = max([Tmax11 Tmin11]);
Tperiod = 0.01; % กำหนดให้ระยะห่างของสัญญาณ = 0.01 วินาที
% จัดกลุ่มเวลาเริ่มต้นการเกิดของสัญญาณ Disturbance
for z2 = 1:1:10;
if ((Tmax23-Tmax22(z2)) < Tperiod);
Tmax33(z2) = 0; Max33(z2) = 0;
else ((Tmax23-Tmax22(z2)) > Tperiod);
Tmax33(z2) = Tmax22(z2); Max33(z2) = Max22(z2);
end
end

T44 = [Tmax33]; M33 = [Max33];
M34 = max(M33); M35 = min(M33); % หาค่า Amplitude ที่สูงที่สุด
if (abs(M34) > abs(M35)); % เปรียบเทียบหาค่าสูงสุดเพียงจุดเดียว
M3 = M34;
else (abs(M34) < abs(M35));
M3 = M35;
end
end

```

ก.14 หาจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของสัญญาณ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต (ต่อ)

```

Time1 = t((find(d12(:)==max(M3)))); % จะได้ช่วงเวลาเริ่มต้น

% จัดกลุ่มเวลาสิ้นสุดการเกิดของสัญญาณ Disturbance
Tmin23 = min([Tmax11 Tmin11]);
for z3 = 1:1:10;
    if ((Tmax22(z3)-Tmin23) < Tperiod);
        Tmax44(z3) = 0; Max44(z3) = 0;
    else ((Tmax23-Tmax22(z2)) > Tperiod);
        Tmax44(z3) = Tmax22(z3); Max44(z3) = Max22(z3);
    end
end
T45 = [Tmax44];
M36 = [Max44]; % ผลที่ได้จากการจัดกลุ่ม
M37 = max(M36); M38 = min(M36); % หาค่า Amplitude ที่สูงที่สุด
if (abs(M37) > abs(M38)); % เปรียบเทียบหาค่าสูงสุดเพียงจุดเดียว
    M4 = M37;
else (abs(M37) < abs(M38));
    M4 = M38;
end
Time2 = t((find(d12(:)==max(M4))));

if (Time1 > Time2);
    Time_Starting = Time2 % หากเวลาน้อยกว่า จะเป็นเวลาเริ่มต้น
    Time_Ending = Time1
elseif (Time1 < Time2);
    Time_Starting = Time1
    Time_Ending = Time2
end

disp('Total Time Duration of the signal (Second)= ') % ทำการแสดงผล
disp(abs(Time_Ending-Time_Starting))

```

ก.15 การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

```

%==== Target [PQ 12 Pattern]=====

ta1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1];      tg1 = [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0];
tb1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0];      th1 = [0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0];
tc1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];      ti1 = [0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0];
td1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0];      tj1 = [0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
te1 = [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0];      tk1 = [0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
tf1 = [0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0];      tl1 = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
t = [T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10 T11 T12];

%==== Training =====
net01=newff(minmax(p),[9, 12],{'tansig','logsig'},'trainlm');
net01.trainParam.show = 50;
net01.trainParam.lr = 0.01;
net01.trainParam.epochs = 10000;
net01.trainParam.goal = 0.001;
[net01,tr]=train(net01,p,t);

%==== Testing =====
Net02 = sim(net01,P);

```




ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- ข.1 “การค้นหาและการระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของบนรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต” การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 4 (4th RMUTCON) วันที่ 13-16 ธันวาคม 2554 ณ โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี
- ข.2 “การค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ และการจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 ประจำปี 2555 (EENET 2012) วันที่ 3-5 เมษายน 2555 ณ แกรนด์ พาราไดซ์ จังหวัดหนองคาย



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

PROCEEDING OF 4th RAJAMANGALA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY CONFERENCE 2011



ณ โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จ.ชลบุรี
13-16 ธันวาคม 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 0-3835-8137 โทรสาร 0-3834-1808-9
<http://www.rmulo.ac.th>

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การทบทวนแบบกระจายสำหรับมอดูเลตผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ชนิด 3 เฟส.....	200
โดย คุณศุภชนา กันทะพะเยา	
สายอากาศโมโนโพลแถบความถี่กว้าง แบบวงกลมที่จำกัดแถบความถี่โดยใช้ตัวหนอน.....	208
โดย คุณนิพนธ์ ทางทอง และ คุณจิโรจน์ เฝือกเนนชัย	
การสร้างแบบจำลองของระบบผสมไฟฟ้าเครื่องกลแบบไดนามิก โดยใช้ภาษา Modelica สำหรับวิศวกรไฟฟ้ากำลัง.....	217
โดย คุณปรีชา สาหะรังห์	
การศึกษานิดของผลไม่โดยคุณลักษณะของตัวเก็บประจุ.....	222
โดย คุณอภัยศักดิ์ ประทุมทิพย์	
การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร แบบหล่อด้วยเรซินในเชิงการใช้งานเป็นกังหันผลิตไฟฟ้า.....	227
โดย คุณเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และ คุณไชยันต์ ทองสองยอด	
วงจรแปลงผันสำหรับการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส.....	233
โดย คุณเฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	
การค้นหาและการระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติบนรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต.....	241
โดย คุณชาญณรงค์ หนูอินทร์	
เครื่องบินบังคับวิทยุ FPV.....	250
โดย คุณณัฐกานต์ นนทพุทท คุณปิยะ ประสงค์จันทร์ คุณวิชาญ เพชรมณี และ คุณสนอ สะอาด	
สายอากาศเพชฌัญชูปดอกบัวย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม.....	257
โดย คุณสุทธิ ทับทองดี	
การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูงที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์แบบที่ดับบลิ้วเชื่อมกับแบบที่ดับบลิ้วเชื่อมที่มีการเดินเฟส.....	267
โดย คุณประสพโชค ให้อ่องคำ และ คุณณรงค์ชัย ทศพร	
การเปลี่ยนแปลงความเร็วของรถยนต์บริเวณพื้นที่ก่อสร้างบนทางหลวง.....	277
โดย คุณสุรชัย อัมภวาสุวรรณ์ และ คุณสุพรชัย อุทัยนฤมล	
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมกะลาปาล์มน้ำมัน.....	285
โดย คุณนันทชัย ชูศิลป์ คุณพรนารายณ์ บุญราศรี และ คุณอัมพร หมัดแสลง	
การศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าขังเก้าอี้รวมผสมปูนซีเมนต์.....	291
โดย คุณสำเนียง อองสุพันธ์กุล และ คุณจิรัชิตี บรรจงศิริ	
การเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของคอนกรีตบล็อก โดยการเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน.....	298
โดย คุณสนธยา ทองอรุณศรี	
แผ่นผนังมอร์ต้าผสมฟางข้าว.....	308
โดย คุณจรัญญู เจริญเนตรกุล	
การศึกษารูปแบบสถาปัตยกรรมไทยทรงดำ (ลาวโซ่ง) เพื่อพัฒนาศักยภาพ การจัดการการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์	
อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี.....	316
โดย คุณพรจิต พิระพัฒน์กุล และ คุณปวีญา มรรคศิริสุข	



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิการประชุมสัมมนาทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

ศ.ดร. สีน	พันธุ์พินิจ	ศ.ดร. สมศักดิ์	พันธุ์วัฒนา
ศ.ดร. อุทัยรัตน์	ณ นคร	ศ.ดร. พันธุ์ทิพย์	รามสูต
ศ.ดร. ปทีป	เมธาคณวุฒิ	รศ.ดร. สมเกียรติ	อุดมทรรษากุล
รศ.ดร. กิตติมา	มันทรานนท์	รศ.ดร. วิกร	ต้นทวฑูไธ
รศ.ดร. วินัย	กล้าจริง	รศ.ดร. เสาวคนธ์	สุดสวาสดี
รศ.ดร. สุวัจน์	ธัญรส	รศ.ดร. วนิดา	สังข์พันธุ์
รศ. นภัทร	วิจนะเทพินทร์	รศ. ชนิษฐา	เจริญลาภ
รศ. อรวรรณ	เคหสุขเจริญ	ผศ.ดร. อมรรัตน์	อนันต์วราพงษ์
ผศ.ดร. ปราโมทย์ พรสุริยา		ผศ.ดร. ชงโค	แสงตั้ง
ผศ.ดร. บวร	อิศรางกูร ณ อยุธยา	ผศ.ดร. วีระพล	แจ่มส่วสดี
ผศ.ดร. ประมุข	อุณหเลขกะ	ผศ.ดร. ปรีชา	สาครรงค์
ดร. บัณฑิต	กฤตาคม	ดร. วิทยา	เจียรพันธุ์
ดร. ปรีชา	ขันติโกมล	ดร. สำเร็จ	รักซ้อน
ดร. จตุพร	อรุณกมลศรี	ดร. ชัยวัฒน์	มครเทศ
ดร. วทีญญู	รอดประพัฒน์	ดร. มานิตย์	มณีธรรม
ดร. ภาณุวัฒน์	ทรัพย์ปรุง	ดร. สำเนียง	องศ์พันธุ์กุล
ดร. ณัฐโชติ	รักไทยเจริญชีพ	ดร. วสันต์	ศรีเมือง

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)

**การค้นหาและการระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า
โดยใช้การแปลงเวฟเลต**

Detection and Localization Fault Point on Electrical Waveform Using Wavelet

ชาญณรงค์ หนูอินทร์¹, สุรินทร์ แหงมงาม² และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภคิตพิชญ์²

Channarong Nuin, Surin Ngaemngam and Krischonme Bhumkittipich

¹ นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหกธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหกธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: chnuin@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการค้นหา และการระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของรูปคลื่นสัญญาณของระบบไฟฟ้า ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของระบบไฟฟ้า วิธีการอาศัยการแปลงเวฟเลต จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับมาพิจารณา เพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณที่เกิดความผิดปกติของรูปแบบสัญญาณความผิดปกติของชนิดต่าง ๆ ทั้งหมด 8 รูปแบบ

คำสำคัญ: การแปลงเวฟเลต การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย การแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ การแปลงกลับเวฟเลต

1. บทนำ

การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบ และผลกระทบต่อภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดไฟฟ้า ก็ขึ้นอยู่กับประเภทของภาระทางไฟฟ้านั้นๆ ตัวอย่างสามารถทนต่อการรบกวนในแต่ละรูปแบบได้มากน้อยเพียงใด (ยุทธพงศ์, 2545)

การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159-2009 (IEEE Std. 1159-2009) สามารถพิจารณาได้จากระยะเวลาของการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และวิธีการป้องกัน หรือมาตรการแก้ไขที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่ภาวะแรงดันไฟฟ้าปกติได้รวดเร็วมากน้อยเพียงใด โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนั้น บางครั้งไม่อาจคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใด และการเกิดอาจจะเป็นเพียงการเกิดแรงดันกระพริบ หรือทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง และทำให้ไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลาสั้นๆก็อาจเป็นไปได้

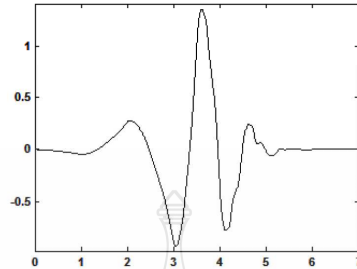
การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าจากค่ามาตรฐานของการไฟฟ้า (ยุทธพงศ์, 2545) อาจจะมีผลกระทบต่อภาระทางไฟฟ้าบางประเภท อาทิ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือ อุปกรณ์สื่อสารต่างๆ ในบางครั้งสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า อาจจะมาจากผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ หรือรูปคลื่นผิดเพี้ยนไป ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะปกติก็ตาม โดยความเป็นจริง ในระบบที่เกิดกระแสที่มีขนาดมากกว่าปกติหรือกระแสเกิน (Over Current) โหลดผ่านแล้วย่อมจะเกิดอันตรายมาก โดย Chen Chun-ling และคณะ (2008) ได้วิจัยการค้นหาและการระบุตำแหน่งของสัญญาณรบกวนคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้ลิฟต์เวฟเลต (Lifting Wavelet) กับ 7 ชนิดคุณภาพไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption) การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variations) การเกิดฮาร์มอนิกส์ชั่วขณะ (Transient Harmonics) การกวัดแกว่งชั่วขณะ (Transient Oscillation) และการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Transient Impulse) ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.1 % ถึง 1.1 %

ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงนำเสนอขั้นตอนการค้นหา และการระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต (Wavelet) ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (Multi-resolution Analysis, MRA) มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณที่เกิดความผิดปกติได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

1.1 การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform, WT) (มนัส, 2543)

การแปลงเวฟเลตจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า เวฟเลต ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดน้อยลงอย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 1 เป็นเวฟเลตชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า เวฟเลตแบบ Daubechies 4 (db4)

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)



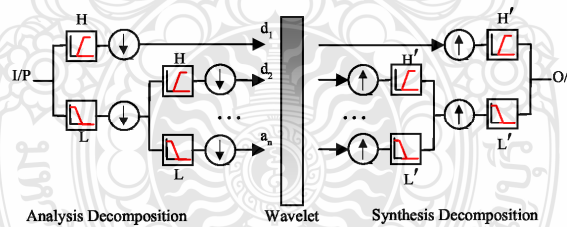
ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของเวฟเลตแม่ชนิด Daubechies 4 (M. Misiti, 2010)

การนำเวฟเลตหลายๆ อันมารวมกันเป็นกลุ่มเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใดๆ โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน ฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลตต้นกำเนิดเรียกว่า เวฟเลตแม่ (Mother wavelet) คลื่นเวฟเลตแต่ละอันจะอยู่ภายในเขตของเวฟเลตนี้โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล (Scaling) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation) กำหนด ให้เป็น a และ b ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของเวฟเลตที่ตำแหน่ง a และ b ใดๆ ที่สัมพันธ์กันได้ดังนี้

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

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ที่ถูกเลื่อนและถูกสเกลโดยพารามิเตอร์ a และ b ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กัน และเพื่อให้เวฟเลตที่ถูกสเกลไปแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่ จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ด้วย $1/\sqrt{a}$

ทฤษฎีเวฟเลตจะใช้ในการอธิบายสิ่งใดสิ่งหนึ่งเหมือนการแตกสิ่งนั้นออกเป็นส่วนประกอบเล็กๆ ที่สัมพันธ์กัน โดยที่ชิ้นส่วนเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่า สัญญาณใดๆ สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยมีฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) และการแตกกระจายเวฟเลต ก็คือเป็นการแปลงเวฟเลต ในทำนองเดียวกัน การรวมกลับเวฟเลต (Wavelet Reconstruction) จะเป็นการแปลงกลับเวฟเลต (Inverse Wavelet Transform, IWT) เป็นการนำส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้ มาเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเลต (มนัส, 2543)

1.2 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Signal Analysis with Multi-resolution)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-resolution Analysis, MRA) เป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกความละเอียดได้โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a ซึ่งมี b หลายๆ ตำแหน่งมารวมกัน เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันจะเกิดเป็นสัญญาณอินพุตจริง

สามารถแจกแจงสัญญาณ $f(t)$ ที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสเกลลิ่งและฟังก์ชันเวฟเลต ได้ ดังนี้

$$f(t) = \sum_m c_j(m) \phi_{j,m}(t) + \sum_{i=j}^{\infty} \sum_m d_i(m) \psi_{i,m}(t) \tag{2}$$

โดย c_j คือ สัมประสิทธิ์เวฟเลตฟังก์ชันสเกลลิ่ง ที่ความละเอียด j

d_i คือ สัมประสิทธิ์เวฟเลตฟังก์ชันเวฟเลต ที่ความละเอียด i

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)

ϕ , คือ ฟังก์ชันสเกลลิ่ง

ψ , คือ ฟังก์ชันเวฟเลต

ขบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาจะเป็นลักษณะวิธีการการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform, DWT)

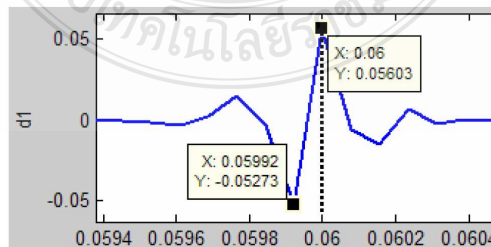
2. วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้มีขั้นตอนวิธีการค้นหา และระบุตำแหน่งสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (MRA) ที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่สูง ในระดับที่ 1 (d1) มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ โดยการจำลองรูปแบบสัญญาณที่เกิดความผิดปกติในรูปแบบต่างๆ มีคุณลักษณะของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ในโปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 7.0 (Wavelet Toolbox) (Murat Uyar, 2008) ใช้การการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) ชนิด Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคุณภาพไฟฟ้า (Nermeen Talaat, 2008 , Tse Norman, 2009) 10 ระดับ (Level) กำหนดค่าของระบบสัญญาณไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต อัตราการซิกตัวอย่าง (Sampling Rate) เท่ากับ 256 ซีกตัวอย่าง ความถี่ในการซิกตัวอย่างเท่ากับ 12.8 kHz และความต่อเนื่องของสัญญาณ จำนวน 10 ไซเคิล เวลาจุดเริ่มต้นทดสอบ (t1) เท่ากับ 0.06 วินาที และเวลาจุดสิ้นสุดทดสอบ (t2) เท่ากับ 0.14 วินาที



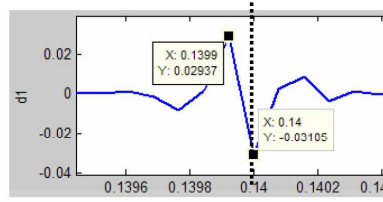
ภาพที่ 3 บล็อกโคอะแกรมในการหาเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ

การพิจารณาหาช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ดังภาพที่ 3 โดยนำข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเลต ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูงระดับความละเอียดที่ 1 (d1) กำหนดช่วงข้อมูลจุดสัญญาณ ตั้งแต่จุดที่ 10 ถึง 2,550 ทำการตัดข้อมูลส่วนหัวและท้ายของสัญญาณออก เนื่องจากทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูล ทำให้การงานบนคุณภาพไฟฟ้าผิดพลาดได้ (ชูศักดิ์, 2545) ทำการเรียงลำดับข้อมูลจากค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุด แล้วกำหนดจุดสัญญาณที่มีขนาดสูงที่สุด 20 อันดับ จากนั้น กำหนดช่วงระยะเวลาห่างจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุด เท่ากับ 0.01 วินาที (หรือครึ่งคาบเวลา) แล้วแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มช่วงเวลาเริ่มต้น และกลุ่มช่วงเวลาสิ้นสุด ขึ้นถัดไปทำการหาด้านหนึ่งเวลาที่มีค่าขนาดสัญญาณสูงที่สุดในแต่ละกลุ่มช่วงเวลา โดยเวลาที่มี ค่าน้อยกว่า จะเป็นเวลาจุดเริ่มต้น (Starting Point) ดังภาพที่ 4 และเวลาที่มีค่ามากกว่า จะเป็นเวลาจุดสิ้นสุด (Ending Point) ดังภาพที่ 5 (Seung-Bock Jung, 2006)



ภาพที่ 4 แสดงการหาจุดเริ่มต้นโดยวิธีการแปลงเวฟเลต

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)



ภาพที่ 5 แสดงการหาจุดสิ้นสุดโดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

3. ผลการทดลอง

3.1 ออกแบบจำลองสัญญาณความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า

ความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า ที่พิจารณาจะประกอบด้วย แรงดัน, กระแส และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

3.1.1 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

$$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t) \quad , \quad t_1 \leq t_2, u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

โดย α = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ เท่ากับ 0.2

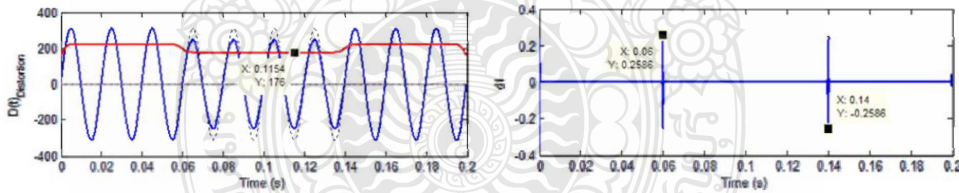
$u(t-t_1) - u(t-t_2)$ = ฟังก์ชันขั้นบันได

V = ขนาดสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms})

ω = ความเร็วเชิงมุมของระบบไฟฟ้า ($2 \cdot \pi \cdot f$)

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ต

ทำการพิจารณาหาจุดสัญญาณที่เกิดความผิดพร่องที่ตัวกรองกรกระบาย ความถี่สูง ระดับที่ 1 (d1) ที่ค่าตำแหน่งสูงที่สุดของช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและช่วงเวลาจุดสิ้นสุด



ภาพที่ 6 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ

ตารางที่ 1 แสดงช่วงเวลาที่ค้นหาของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะได้จากการแปลงเวฟเล็ต

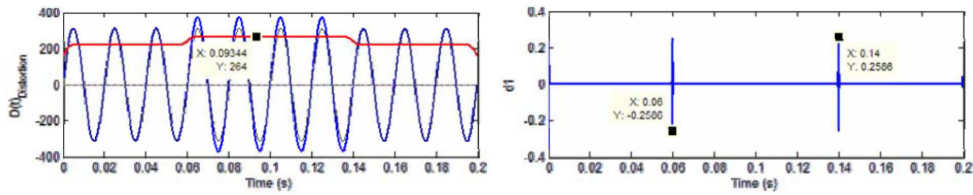
เวลาดทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

3.1.2 สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell)

$$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t) \quad (5)$$

โดย α = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ เท่ากับ 0.2

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)



ภาพที่ 7 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ

ตารางที่ 2 แสดงช่วงเวลาที่ยาวของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะได้จากการแปลงเวฟเล็ต

เวลาทดสอบ	เวลายืนยัน	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

3.1.3 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Sag with Harmonics)

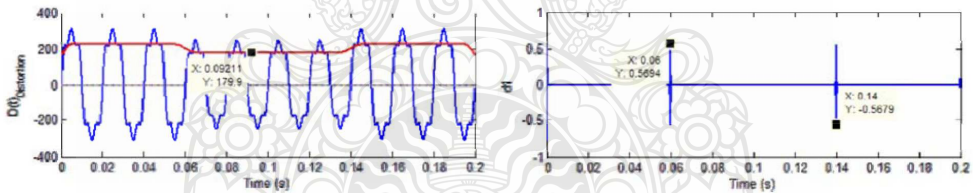
การจำลองสัญญาณ จะมีสมการรูปแบบเดียวกับสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ โดยจะรวมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ที่พิจารณา คือ อันดับที่ 1, 3 และ 5 เนื่องจากเป็นอันดับฮาร์มอนิกส์ที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมาก

$$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t)) \quad (6)$$

โดย α = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ เท่ากับ 0.2

α_1 = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับที่ 1 มีค่าเป็น 1

α_3, α_5 = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ อันดับ ที่ 3 และ 5 เท่ากับ 0.15



ภาพที่ 8 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ตารางที่ 3 แสดงช่วงเวลาที่ยาวของสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ได้จากการแปลงเวฟเล็ต

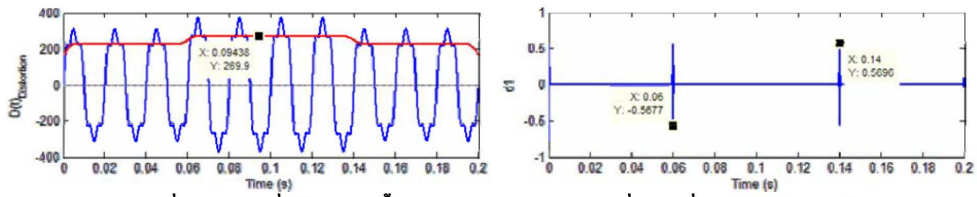
เวลาทดสอบ	เวลายืนยัน	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

3.1.4 สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ (Voltage Swell with Harmonics)

$$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t)) \quad (7)$$

โดย α = ขนาดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ เท่ากับ 0.2, $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_3, \alpha_5 = 0.15$

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (4th RMUTCON)



ภาพที่ 9 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

ตารางที่ 4 แสดงช่วงเวลาที่ยาวของสัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ได้จากการแปลงเวฟเฟส

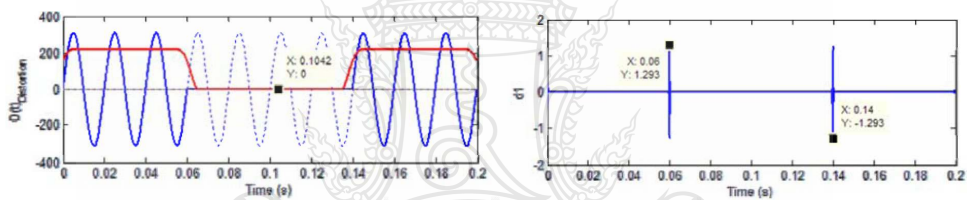
เวลาทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

3.1.5 สัญญาณไฟดับชั่วขณะ (Voltage Interruption)

$$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t) \tag{8}$$

โดย V = ขนาดของสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms})

α = ขนาดสัญญาณไฟดับชั่วขณะ เท่ากับ 1.0



ภาพที่ 10 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณไฟดับชั่วขณะ

ตารางที่ 5 แสดงช่วงเวลาที่ยาวของสัญญาณไฟดับชั่วขณะได้จากการแปลงเวฟเฟส

เวลาทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

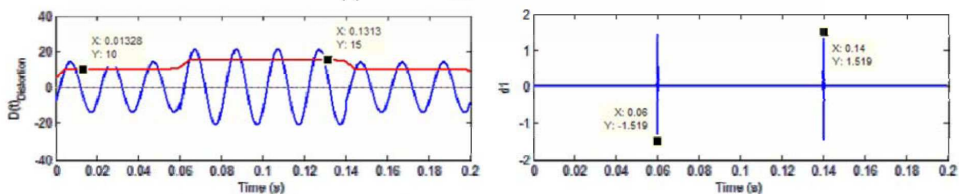
3.1.6 สัญญาณกระแสเกิน (Over Current)

กำหนดค่ากระแสปกติที่พิจารณาเท่ากับ 10 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง (Power Factor; ϕ) ที่ 0.85

$$i(t) = I(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) * \sin(\omega t + \phi) \tag{8}$$

โดย I = ขนาดของสัญญาณกระแสปกติ เท่ากับ 10 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส (I_{rms})

α = ขนาดของสัญญาณกระแสเกิน เท่ากับ 1.50



ภาพที่ 11 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณกระแสเกินโดยวิธีการแปลงเวฟเฟส

ตารางที่ 6 แสดงช่วงเวลาที่ยืนยันของสัญญาณกระแสเกินได้จากการแปลงเวฟเฟิร์ม

เวลาดทดสอบ	เวลายืนยัน	ความคลาดเคลื่อน (%)
t1 = 0.06	t1 = 0.06	0.00
t2 = 0.14	t2 = 0.14	0.00

3.1.7 สัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Over Current with Harmonics)

จะพิจารณาได้เช่นเดียวกับสัญญาณกระแสเกิน (Over Current) โดยจะรวมฮาร์โมนิกส์ ตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ถึงอันดับที่ 39 ตามมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ประเภทของอุปกรณ์ Class D

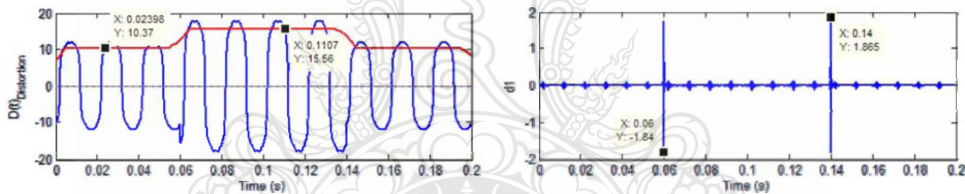
$$i(t) = \left(\begin{aligned} &I_1 \sin(\omega t) + \\ &(2.30 * \sin(3\omega t)) + (1.14 * \sin(5\omega t)) + \\ &(0.77 * \sin(7\omega t)) + (0.40 * \sin(9\omega t)) + \\ &(0.33 * \sin(11\omega t)) + (0.21 * \sin(13\omega t)) + \\ &\sum_{n=15,17,19,\dots}^{39} \left(\frac{2.25}{n} * \sin(n\omega t) \right) \end{aligned} \right) * (1 + \alpha (u(t-t_1) - u(t-t_2))) \tag{9}$$

โดย I_1 = ขนาดของสัญญาณกระแสปกติ เท่ากับ 10 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส (I_{rms})

α = ขนาดของสัญญาณกระแสเกิน เท่ากับ 1.50

ϕ = ค่าตัวประกอบกำลัง เท่ากับ 0.85

n = ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ ตั้งแต่ 15,17,19,...,39



ภาพที่ 12 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์

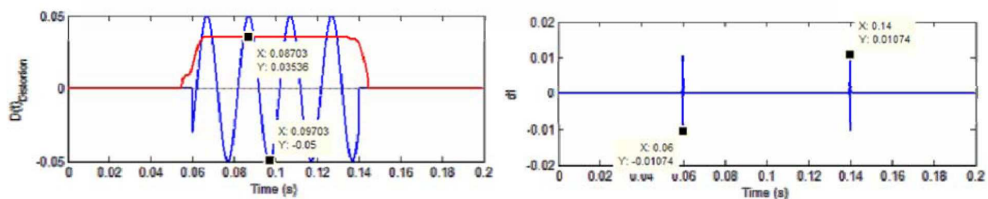
ตารางที่ 7 แสดงช่วงเวลาที่ยืนยันของสัญญาณกระแสเกินที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ได้จากการแปลงเวฟเฟิร์ม

เวลาดทดสอบ	เวลายืนยัน	ความคลาดเคลื่อน (%)
t1 = 0.06	t1 = 0.06	0.00
t2 = 0.14	t2 = 0.14	0.00

3.1.7 สัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Earth Leakage Current)

$$i(t) = \alpha (u(t-t_1) - u(t-t_2)) * \sin(\omega t + \phi) \tag{10}$$

โดย α = ขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน



ภาพที่ 13 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน

ตารางที่ 8 แสดงช่วงเวลาที่ยืนยันของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินได้จากการแปลงเวฟเล็ต

เวลาดทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

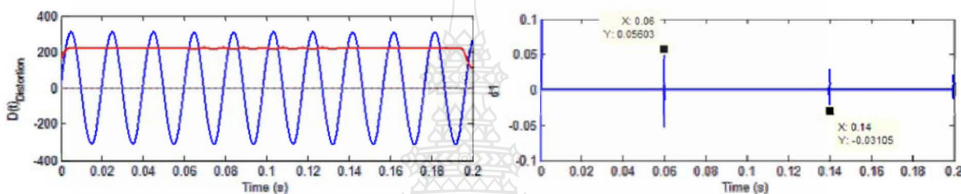
3.1.8 สัญญาณการแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation)

$$v(t) = V * \sin(2 * \pi * t * (f \pm \alpha (u(t-t_1) - u(t-t_2)))) \tag{11}$$

โดย V = ขนาดสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (V_{rms})

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ต

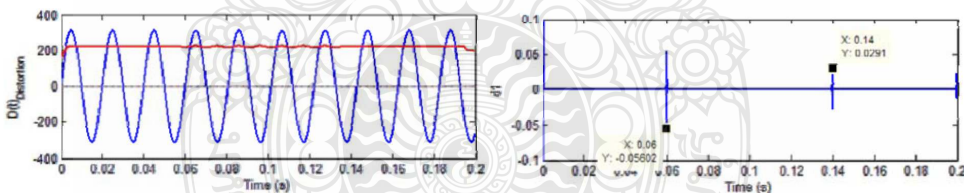
α = มีค่าเท่ากับ 2



ภาพที่ 14 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 48 เฮิร์ต

ตารางที่ 9 แสดงช่วงเวลาที่ยืนยันของสัญญาณการแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้าได้จากการแปลงเวฟเล็ต

เวลาดทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00



ภาพที่ 15 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด เมื่อความถี่ (f) เท่ากับ 52 เฮิร์ต

ตารางที่ 10 แสดงช่วงเวลาที่ยืนยันของสัญญาณการแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้าได้จากการแปลงเวฟเล็ต

เวลาดทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06$	$t1 = 0.06$	0.00
$t2 = 0.14$	$t2 = 0.14$	0.00

3.2 ผลการศึกษา

การค้นหาค้นหา โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตที่อาศัยเทคนิคของการแยกแยะเชิงขั้วสัญญาณหลายระดับ ที่ตัวกรองการกระจาย ความถี่สูง ในระดับที่ 1 มาพิจารณาเพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ ที่ค่าตำแหน่งสูงที่สุดของช่วงเวลาจุดเริ่มต้น และช่วงเวลาจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดัน กระแส และความถี่ที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีความแม่นยำสูง โดยจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการค้นหา และระบุตำแหน่งของสัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟ เล็ต db4 นั้น มีความถูกต้อง และแม่นยำสูงในการตรวจจับความผิดปกติของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ในการตรวจจับความผิดปกติ (Fault) ร่วมกับการใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ หรือ รีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า

5. เอกสารอ้างอิง

- ชูศักดิ์ คิลกรัตนตระกูล. 2545. การค้นหา - ระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติบนรูปคลื่นและการแยกประเภทรูปแบบความผิดปกติชนิดโนมีตีที่รบกวนคุณภาพระบบไฟฟ้าโดยใช้เวฟเล็ต และโครงข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มนัส สังวรศิลป์ และวรัศนี ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์อินโฟเพรส.
- ยุทธพงศ์ ทัฬหผดุง. 2545. สิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าที่มีผลต่อภาระทางไฟฟ้า. วารสาร อินคัสเทรียลเทคโนโลยี วิวปีที่ 8 ฉบับที่ 96 : 104-106.
- Chen Chun-ling, Xu Tong-yu, Yuan Ye and Jiang Fengli. 2008. **Detection and Location of Power Quality Transient Disturbance Based on Lifting Wavelet.** Intelligent Control and Automation, 7th. : 6011-6016.
- IEEE Std. 1159-2009. 2009. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** New York. IEEE Press.
- M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. Poggi. 2010. **Wavelet Toolbox™ 4 User's Guide.** The Math Works. Inc., March.
- Murat Uyara, Selcuk Yildirim and Muhsin Tunay Gencoglub. 2008. **An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals.** Electric Power Systems Research 78 : 1747-1755.
- Nermeen Talaat and Marija Ilic. 2008. **ANNs Based on Subtractive Cluster Feature for Classifying Power Quality.** In: 40th North American Power Symposium. : 1-7.
- Seung-Bock Jung, Jae-Chul Kim, Hyun-Kyung Cho, Seung-Chul Shin and Myung-Hee Lee. 2006. **A Voltage Sag Detection using Difference of Wavelet Detection Characteristics.** ICEE2006. July 9-13
- Tse Norman and Zhou Long. 2009. **Detection of voltage variations due to distributed energy resources.** Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2009. Calgary. Alberta. Canada.

Electrical Engineering Network 2012

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



GRAND PARADISE HOTEL

Nong Khai, THAILAND

April 3-5, 2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร.วิระเชษฐ์ ชันเงิน

รศ. ดร.วิจิตร กิมเรศ

รศ. ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

รศ. ดร.เวทิน ปิยะรัตน์

รศ. ดร.เดชา พวงควาเรือง

รศ. ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก

รศ. ดร.เสถียร ธัญญศรีรัตน์

ผศ. ดร.เนนบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร.อภิรักษ์ อูร์โสภณ

ผศ. ดร.วราวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

ผศ. ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม

ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ

ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์

ดร.ยุทธนา ข้าสุวรรณ

ดร.นิวัตร อังควิสิษฐพันธ์

รศ.ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์

ดร.อุเทน คำนำน

นายณรงค์ นันทกุล

ผศ.กฤษดา ชิงชัย

นายเอกพันธ์ พฤษวรรณ

ดร.จิตตฤทธิ ทองปรีออน

ผศ.ชาญชัย เดชธรรมรงค์

ดร.จักรกฤษณ์ เกลือบัวง

นายสมนึก เครือสอน

นายทัศนัย ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ พิมพ์แก้ว

ผศ.อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ศส.สุรสิทธิ์ แสนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายเอกสิทธิ์ สุมนพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายวิรัช มาใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายก่อเกียรติ อ็อคทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รศ.ดร.วิรัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.ประเสริฐ เตือนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.พันธ์พงศ์ อภิชาตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.สุทธินันท์ คั่นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.ศิริรัช ภาสวระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ศส.วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายกิตติวุฒิ จีนนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายรุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายเอกจิต คุ้มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นางอุษา คงเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายจิตติสรรค์ วิจิโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายบุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชูศักดิ์ กมลขันธ์ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวินัย เมธาวีทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายประหยัด กองสูง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉันทบุรี
นายภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉันทบุรี
นายสมพล โคศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉันทบุรี
นายทัศนพันธ์ สุวรรณทัต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉันทบุรี
นายจตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายอนุสรณ์ วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ
 นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ
 นายชนารัตน์ คันมณีประเสริฐ
 นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว
 นายทง ลานธาทอง
 นายสมเกียรติ ทองแก้ว
 ผศ.พิชญ์ คาราวงษ์
 นายมนัส บุญเกียรติทอง
 นายพนา คูสิศากร
 ผศ.กัจจา ลักษณ์อำนวยกุล
 ผศ.โกศล นิธิโสภาก
 ผศ.จรินทร์ จุลวานิช
 นายนิลमित นิลาศ
 นายเกรียงไกร เหลืองอำพล
 นายวัฒนศัพท์ วัชวุฒิ
 นายณัฐวัชรินทร์ ทองรักษ์
 ผศ.ศรีศักดิ์ น้อยไร่ภูมิ
 ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ
 นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร
 ผศ.สราวุธ ทองกุลภัทร์
 ผศ.วารุณี ศรีสงคราม
 ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา
 ผศ.เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์
 ผศ.กระจ่าง พิทักษ์วงศ์วิทยา
 ดร.ศรีสุดา ไชยทองสุข
 รศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์
 รศ.สมพันธ์ อำพวัน
 ดร.ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล
 ผศ.วิสุทธ์ พงศ์พฤกษ์ชาติ
 ดร.สุริยา แก้วอาษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.เมฆา ทศกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายเอกวิทย์ หายแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวีระ รัตนภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายรัก สกุดพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณกรรินทร์ ศรีบุญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายกฤตยา สมชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายจงเจริญ คู่บุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายกฤษฏา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายจีระพงษ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวีระชัย จรุงรัมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ศส.ดร.ปรีชา สาละรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ดร.ภักต์วัฒน์ จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
รศ.พันธ์ พิริยะวรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ประวิฬ เป็ริชหมื่นอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุระ ตันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณรงค์ สีหาอ่อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ณัฐวุฒิ โสมะเกษมรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์วัฒน์	ภูมิภักดีพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจรัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เปี่ยมสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	อภิศิริกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฐพล	หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ปราชญ์	คาบมิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฉกริ	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	พิราจเนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อังกา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบนอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กิตติวัฒน์	น้อมเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.อิฐอรัญญา	ปิติมิล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฏฐ์พงษ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

CP04	การเพิ่มประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทยืด LVO โดยการปรับการเรียนรู้	684
CP05	ระบบควบคุมเตาเผาขยะผ่านอินเทอร์เน็ต	688
CP06	ระบบแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวจังหวัดเชียงใหม่ผ่าน Twitter	692
GN01	การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดประลองการขยายย่านวัดมัลลิกมิตเตอร์	697
GN02	ตู้เลี้ยงปลาควบคุมอุณหภูมิโดยแผ่นเพลทฮีตเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์	701
GN04	การนำเสนอข้อมูลสมรรถนะของโคมไพลงนเชิงเปรียบเทียบ	705
GN05	เครื่องมือคำนวณพลังงานไฟฟ้าเชิงเวลาจริง	709
GN06	การสร้างและหาประสิทธิภาพสื่อการสอน การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า	713
GN07	การวัดสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงด้วยเครื่องมือวัดเสมือนและวิธีการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน	718
GN08	เครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยใช้รังสีโคโรนา สำหรับบำบัดกลิ่นเหม็นอับ	722
GN10	การสร้างและหาประสิทธิภาพสื่อเคลื่อนไหวประกอบการสอนการพันมอเตอร์สปลิทเฟส	726
GN11	การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	730
GN12	ระบบรากสายดินที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันฟ้าผ่าของสถานีโทรคมนาคมแบบเคลื่อนที่	734
GN13	สร้างและหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส	738
GN14	การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถีเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังน้ำร่วมกับพลังความร้อน	742
GN15	การลดความสูญเสียในการผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยใช้ระบบบาร์โค้ด	747
GN16	การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเสมือนจริงสำหรับการศึกษาวงจรกรองความถี่พาสซีฟ	751
GN17	แบบจำลองการทำงานของช่องสัญญาณและผลกระทบจากความขรุขระเชิงความร้อนในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก	755
GN18	การค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ และการจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต	759

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

การค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ และการจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลต Fault Point Detection-Localization and Identification of Power Quality Using the Wavelet Transform

ชาอุณรงค์ หนูอินทร์¹, สุรินทร์ แหงมงาม² และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์³

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต. คลองหกธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 081-7350255 E-mail: chnuin@gmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต. คลองหกธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร : 086-0704287 E-mail: ngsurin@gmail.com

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต. คลองหกธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร : 084-1119051 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความ นี้ นำเสนอการค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ และการจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลต ที่อาศัยเทคนิคของการแยกรายละเอียดสัญญาณหลายระดับมาพิจารณา เพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ ที่เกิดความผิดปกติ และการสกัดจุดเด่นในแต่ละระดับความละเอียด เพื่อ การจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้า ทั้ง 12 ชนิด ประกอบด้วย แรงดันปกติ แรงดันตก ชั่วขณะ แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ไฟดับชั่วขณะ กระแสเกิน กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ความถี่ต่ำเกิน และความถี่สูงเกิน คำสำคัญ: การแปลงเวฟเลต, การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย, การแยก รายละเอียดสัญญาณหลายระดับ, การสกัดจุดเด่น

Abstract

This paper presents the fault point detection-localization and identification of power quality using the wavelet transform. The multi-resolution analysis (MRA) technique is utilized for the detection-localization and identification to calculate the starting and final point of fault-point and capture signals. The identification to twenty common types of Power Quality problem, i.e. normal voltage, voltage sag, voltage sag with harmonics, voltage swell, voltage swell with harmonics, voltage interruption, over current, over current with harmonics, earth leakage current, earth leakage current with harmonics, under power frequency variations and over power frequency variations.

Keyword: Wavelet Transform, Discrete Wavelet Transform,

Multi-resolution Analysis, Feature Extraction

1. บทนำ

คำว่า คุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) [1] เป็นคำที่พูดถึงบ่อย ในเรื่องของความมั่นคงการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าฯ นิยามของคุณภาพไฟฟ้า ตามมาตรฐานสากล IEEE Std. 1159-2009 [2] ให้ความหมายของคุณภาพไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแส (Current), แรงดัน (Voltage) และความถี่ (Power Frequency) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด , อายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดการเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า ที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น ซึ่งมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าในอดีต

ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงนำเสนอ ขั้นตอนการค้นหาและระบุตำแหน่ง ของ สัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ มาพิจารณา เพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ ที่เกิดความผิดปกติ [3-4] และการจัดจำแนก (Identification) ของคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิด ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ที่อาศัยเทคนิคของการแยก รายละเอียดสัญญาณหลายระดับ (Multi-resolution Analysis, MRA) [5-6]

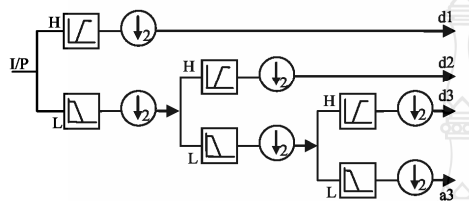
2. การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform, WT) [7]

เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลา และความถี่เท่านั้น จะเสียเวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่าน ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้น ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว เรียกว่า การแปลงเวฟเลต

ขบวนการแปลงเวฟเลต สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตรา การครึ่งละสองเท่า เปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบนด์วิธที่มีอัตราการลดสองเท่า การแยกสัญญาณ อินพุตออกเป็นสองส่วน โดยแบ่งออกเป็นส่วนของตัวกรองการกระจาย

~ 1 ~

(Decomposition) ความถี่ต่ำ (Low Pass Filter, L) และตัวกรองการกระจายความถี่สูง (High Pass Filter, H) จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำทำการแยกความถี่ออกอีกครั้ง โครงสร้างของการแปลงเวฟเล็ตซ้ำในลักษณะนี้ จะเรียกว่า โครงสร้างแบบต้นไม้ไดอะดิก (Dyadic Tree Structure) เป็นโครงสร้างการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform, DWT)



รูปที่ 2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โครงสร้างแบบต้นไม้ไดอะดิก

สามารถแจกแจงสัญญาณ $f(t)$ ที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสเกลลิ่ง และฟังก์ชันเวฟเล็ต ได้ ดังนี้

$$f(t) = \sum_m c_j(m)\phi_{j,m}(t) + \sum_{i=j}^{\infty} d_i(m)\psi_{i,m}(t) \quad (1)$$

โดย c_j คือ สัมประสิทธิ์เวฟเล็ตฟังก์ชันสเกลลิ่ง ที่ความละเอียด j
 d_i คือ สัมประสิทธิ์เวฟเล็ตฟังก์ชันเวฟเล็ต ที่ความละเอียด i
 ϕ_j คือ ฟังก์ชันสเกลลิ่ง
 ψ_i คือ ฟังก์ชันเวฟเล็ต

เมื่อทำการรวบรวมสัมประสิทธิ์ $c_j(m)$ และ $d_j(m)$ กลับอีกครั้ง ขบวนการนี้เรียกว่า การแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform, IWT)

3. การทดลอง

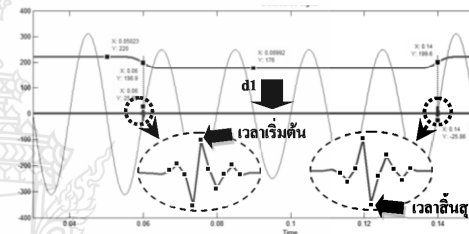
3.1 การค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ

การทดลองโดยการจำลองรูปแบบสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ ในโปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 7.0 (Wavelet Toolbox) [6] ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ชนิด Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคุณภาพไฟฟ้าในสภาวะชั่วขณะ [4-5] 10 ระดับ (Level) กำหนดค่าของระบบสัญญาณไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ อัตราการซีกตัวอย่าง (Sampling Rate) เท่ากับ 256 และความต่อเนื่องของสัญญาณ จำนวน 10 ไซเคิล เวลาจุดเริ่มต้นทดสอบ (t1) เท่ากับ 0.06 วินาที และเวลาจุดสิ้นสุดทดสอบ (t2) เท่ากับ 0.14 วินาที

การหาจุดสัญญาณที่เกิดความผิดปกติ ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูง ระดับที่ 1 (d1) ที่ค่าตำแหน่งสูงสุดของช่วงเวลาจุดเริ่มต้นเพียงตำแหน่งเดียว จะได้ค่าที่แม่นยำและถูกต้อง สำหรับช่วงเวลาจุดสิ้นสุด สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 โค้ดแกรมการหาเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ



รูปที่ 4 การตรวจจับสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ ขนาดแรงดัน 176 โวลต์

3.2 การสกัดจุดเด่น (Feature Extraction) [5]

สัญญาณความคิดพ้อง $S(t)_{signal}$ จะมีสิ่งรบกวน $D(t)_{distortion}$ เข้ามาในสัญญาณไซน์ปกติ $P(t)_{pure}$ ด้วย ดังสมการ

$$S(t)_{signal} = P(t)_{pure} + D(t)_{distortion} \quad (2)$$

ดังนั้น $S(t)_{signal} = [D_1|D_2|D_3|\dots|D_{10}|A_{10}] \quad (3)$

การคำนวณหาค่าพลังงานในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย

$$S(t)_{energy} = [ED_1|ED_2|ED_3|\dots|ED_{10}|EA_{10}] \quad (4)$$

โดย ED_i คือ ค่าพลังงานของ การกระจาย สัญญาณ ในส่วนของความถี่สูง (Detail) ตั้งแต่ระดับตัวกรองการกระจาย ที่ 1 ถึง 10 จะได้

$$ED_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |Dy_j|^2} \quad , i=1,2,3,\dots,10 \quad (5)$$

และ EA_{10} คือ ค่าพลังงานของ การกระจาย สัญญาณ ในส่วนของความถี่ต่ำ (Approximation) ระดับตัวกรองการกระจาย ที่ 10

จะได้ $EA_{10} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |A_{10j}|^2} \quad (6)$

เมื่อ N คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของ ความถี่สูง (Detail) และความถี่ต่ำ (Approximation) ในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย ในทำนองเดียวกัน $P(t)_{energy}$ สามารถหาค่าพลังงานในแต่ละระดับตัวกรองการกระจาย ได้ ดังนี้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

$$P(t)_{energy} = [ED_{1p} | ED_{2p} | ED_{3p} | \dots | ED_{10p} | EA_{0p}] \quad (7)$$

ทำการแทนค่า $S(t)_{energy}$ และ $P(t)_{energy}$ ลงในสมการ (2) จะได้

$$D(t)_{distortion_energy} = S(t)_{energy} - P(t)_{energy} \quad (8)$$

รูปแบบการจำลองสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า ดังตารางที่ 2

4. ผลการทดลอง

4.1 การค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติ

ตารางที่ 1 ผลช่วงเวลาการค้นหาได้ของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า 12 ชนิด

เวลาทดสอบ	เวลาค้นหา	ความคลาดเคลื่อน (%)
$t1 = 0.06 \text{ s}$	$t1 = 0.0600 \text{ s}$	0.0000 %
$t2 = 0.14 \text{ s}$	$t2 = 0.1400 \text{ s}$	0.0000 %

การค้นหา โดยวิธีการแปลงเวฟเลตที่อาศัยเทคนิคของการแยก รายละเอียดสัญญาณหลายระดับ ที่ตัวกรองการกระจายความถี่สูง ในระดับที่ 1 มาพิจารณา เพื่อหาช่วงเวลาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณ ที่ค่าตำแหน่งสูงที่สุดของช่วงเวลาจุดเริ่มต้น และช่วงเวลาจุดสิ้นสุดของสัญญาณแรงดัน กระแส และความถี่ที่ใช้ในการทดสอบนั้น

ชนิดคุณภาพไฟฟ้า	รูปแบบจำลอง	ตัวแปร
1. แรงดันปกติ	$v(t) = V \cdot \sin(\omega t)$	$f = 50 \text{ Hz}$
2. แรงดันตกชั่วขณะ	$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot \sin(\omega t)$	$\alpha = 200, u(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t \leq 0 \end{cases}$
3. แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_2 \sin(3\omega t) - \alpha_3 \sin(5\omega t))$	$\alpha = 200, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.15$
4. แรงดันเกินชั่วขณะ	$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot \sin(\omega t)$	$\alpha = 200$
5. แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	$v(t) = V(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_2 \sin(3\omega t) - \alpha_3 \sin(5\omega t))$	$\alpha = 200, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.15$
6. ไฟดับชั่วขณะ	$v(t) = V(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot \sin(\omega t)$	$\alpha = 1$
7. กระแสเกิน	$i(t) = I(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot \sin(\omega t - \phi)$	$I = 10.4, \alpha = 0.5$
8. กระแสเกินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	$i(t) = (1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \cdot \left(I_1 \sin(\omega t) - (2.30 \cdot \sin(3\omega t)) + (1.14 \cdot \sin(5\omega t)) - (0.77 \cdot \sin(7\omega t)) + (0.40 \cdot \sin(9\omega t)) + (0.33 \cdot \sin(11\omega t)) - (0.21 \cdot \sin(13\omega t)) + \sum_{n=15,17,19,\dots}^{39} \left(\frac{2.25}{n} \cdot \sin(n\omega t) \right) \right)$	$I_1 = 9.6154, \alpha = 0.5$
9. กระแสไฟที่รั่วลงดิน	$i(t) = \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)) \cdot \sin(\omega t - \phi) \cdot 1000$	$\alpha = 10$
10. กระแสไฟที่รั่วลงดินที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์	$i(t) = \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)) \cdot \left(\sin(\omega t) - (2.30 \cdot \sin(3\omega t)) + (1.14 \cdot \sin(5\omega t)) - (0.77 \cdot \sin(7\omega t)) + (0.40 \cdot \sin(9\omega t)) + (0.33 \cdot \sin(11\omega t)) - (0.21 \cdot \sin(13\omega t)) + \sum_{n=15,17,19,\dots}^{39} \left(\frac{2.25}{n} \cdot \sin(n\omega t) \right) \right) \cdot 1000$	$\alpha = 11.6$
11. ความถี่ต่ำเกิน	$v(t) = V \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (f - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))))$	$\alpha = 2$
12. ความถี่สูงเกิน	$v(t) = V \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (f + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))))$	$\alpha = 2$

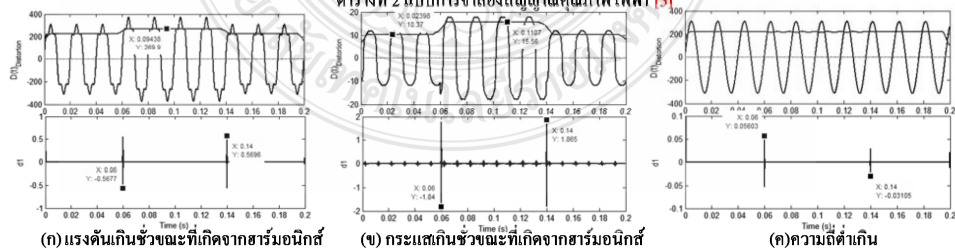
มีความแม่นยำสูง โดยจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0.0000 เปอร์เซนต์ ดังรูปที่ 5

4.2 การจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้า

การจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้าที่ได้ เวฟเลตมีความสามารถในการจัดจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิดได้ดี สามารถจำแนกชนิดของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น โดยเห็นความแตกต่างของกราฟในแต่ละระดับการสกัดจุดเด่นของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด ดังรูปที่ 6

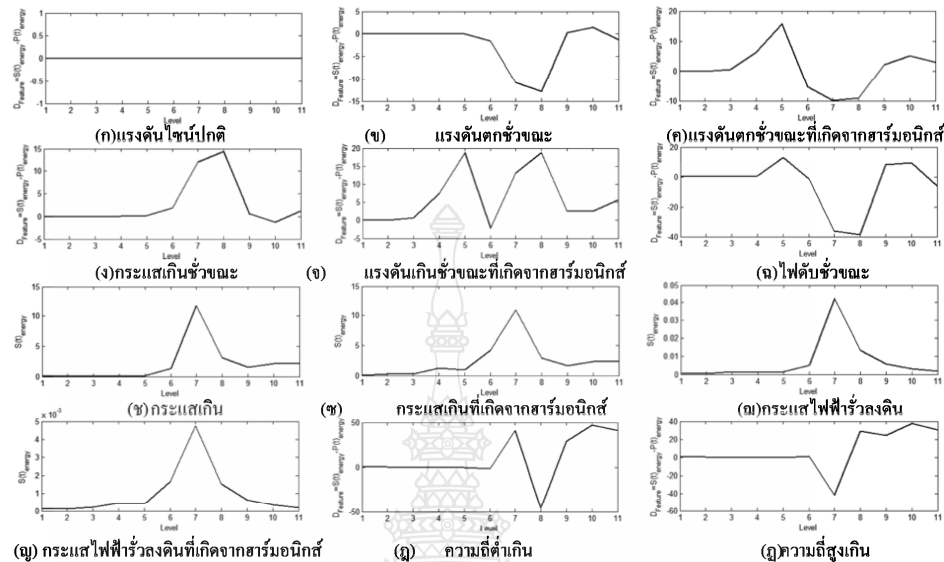
5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าในการตรวจจับความผิดปกติของสัญญาณคุณภาพไฟฟ้า โดยการค้นหา และระบุ ตำแหน่งของสัญญาณกระแส แรงดัน และความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลต db4 นั้น มีความถูกต้อง และแม่นยำสูง และสามารถจัดจำแนกคุณภาพไฟฟ้าได้ เพื่อนำไปแยกแยะปัญหาคุณภาพไฟฟ้า สามารถที่จะหาวิธีการแก้ไข หรือป้องกัน ให้มีความเหมาะสมกับคุณภาพไฟฟ้าแต่ละชนิด เพื่อลดความเสียหายอันเกิดจากปัญหาคุณภาพไฟฟ้า



รูปที่ 5 ตัวอย่างการค้นหา-การระบุตำแหน่งจุดที่เกิดความผิดปกติของคุณภาพไฟฟ้า

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555



รูปที่ 6 การจัดจำแนก (Identification) ของคุณภาพไฟฟ้าทั้ง 12 ชนิด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศักดิ์ชัย นรสิงห์ . “คุณภาพกำลังไฟฟ้า (POWER QUALITY)”, [Online]. Available www.9engineer.com/ee_main/Article/PQ.htm
- [2] IEEE Std. 1159-2009. “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. New York. IEEE Press. 2009.
- [3] Seung-Bock Jung, Jae-Chul Kim, Hyun-Kyung Cho, Seung-Chul Shin, Myung-Hee Lee. 2006. A Voltage Sag Detection using Difference of Wavelet Detection Characteristics. ICCE2006. July 9-13
- [4] Tse Norman, Zhou Long. 2009. Detection of Voltage Variations Due to Distributed Energy Resources. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2009. Calgary. Alberta. Canada.
- [5] Nermeen Talaat and Marija Ilic. 2008. ANNs Based on Subtractive Cluster Feature for Classifying Power Quality. In: 40th North American Power Symposium. : 1-7.
- [6] Murat Uyara, Selcuk Yildirima and Muhsin Tunay Gencoglu. 2008. An Effective Wavelet-based Feature Extraction Method for Classification of Power Quality Disturbance Signals. Electric Power Systems Research 78 : 1747-1755.

- [7] มนัส สังวรศิลป์ และวรวรัตน์ ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์อินโฟเพรส.



ชาญณรงค์ หนูอินทร์
เกิดที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จบการศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปี 2538



สุรินทร์ แห่มงาม
จบการศึกษา Ph.D. (Energy Science: Energy Economics) Kyoto University, Japan.
งานวิจัยที่สนใจ: Energy Economics และ Image Processing



กฤษณชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
จบการศึกษา Ph.D. (Energy-Electric Power System) ,AIT.
งานวิจัยที่สนใจ: Power system stability and dynamics. Power System Interconnection

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายชาญณรงค์ หนูอินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	7 พฤศจิกายน 2515
ที่อยู่	151 หมู่ 7 ต.ธรรมเสน อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 70120
การศึกษา	
พ.ศ. 2538	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (ศรม.)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2539 – พ.ศ. 2551	อาจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์
พ.ศ. 2552 - ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์वासักกรี

