

การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

DETECTION OF PARTIAL DISCHARGE SIGNAL IN GENERATORS  
USING WAVELET TRANSFORMS

เริงฤทธิ กิจไพบูลทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

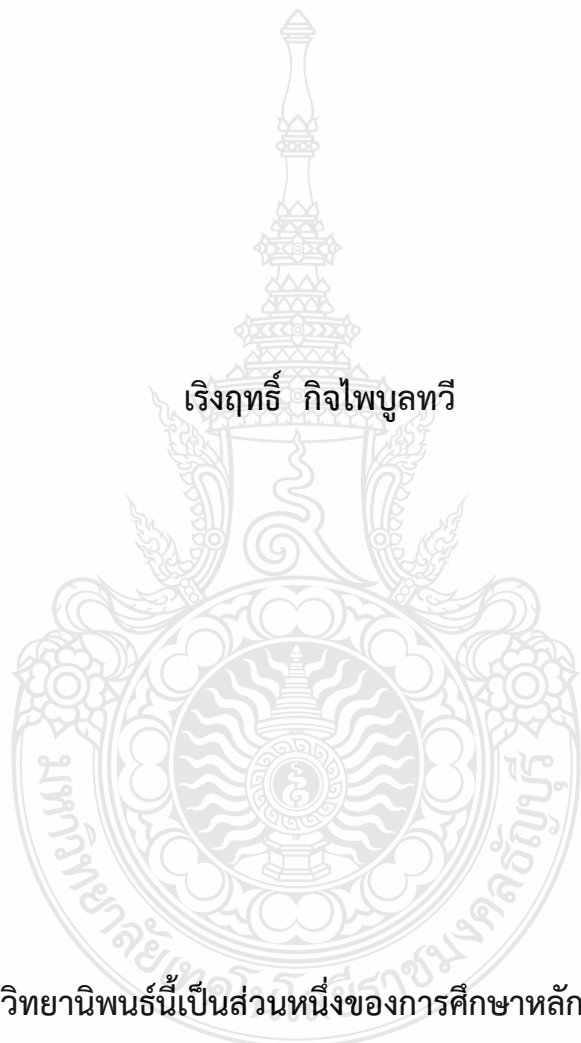
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การตรวจจับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ด้วยการแปลงเวฟเล็ต



เริงฤทธิ์ กิจไพบลทวิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ต

Detection of Partial Discharge Signal in Generators using Wavelet Transforms

ชื่อ - นามสกุล

นายเริงฤทธิ์ กิจไพบูลทวี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.

ปีการศึกษา

2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ธนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 14 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลง เวฟเล็ต
ชื่อ-นามสกุล	นายเริงฤทธิ์ กิจไพบูลทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.
ปีการศึกษา	2563

## บทคัดย่อ

การเกิดดิซซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีสาเหตุมาจากความล้มเหลวของระบบฉนวนในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หากไม่มีการซ่อมบำรุงจะทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจวัดและวิเคราะห์การเกิดดิซซาร์จบางส่วนเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับวางแผนบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เสนออัลกอริทึมของการตรวจวัดและระบุตำแหน่งการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21kV ด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ต สัญญาณดิซซาร์จบางส่วนจะถูกนำมากรองสัญญาณรบกวนออกด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง จากนั้นจะส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องที่แสดงผลในโดเมนเวลา – ความถี่ โดยสัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ และเปรียบเทียบตามมาตรฐานคุณลักษณะสมบัติการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากผลการทดลองกับสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนที่จำลองขึ้น พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถลดสัญญาณรบกวนจากสัญญาณต้นแบบที่สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถระบุตำแหน่งและให้ค่าความถี่ของสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำไปทดลองใช้กับสัญญาณที่วัดจากโรงไฟฟ้าและทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

**คำสำคัญ :** ดิซซาร์จบางส่วน การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

<b>Thesis Title</b>	Detection of Partial Discharge Signal in Generators Using Wavelet Transforms
<b>Name- Surname</b>	Mr. Roengrit Kitpaiboontawee
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Chatchai Suppitaksakul, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2020

## ABSTRACT

Partial discharge in the generator is caused by a failure of the insulation system in different parts of the generator. Without maintenance, it will eventually cause a severe damage to the generator. Therefore, it is necessary to perform partial discharge measurements and analyze in order to use as information in making a maintenance plan for the generator to work with stability.

This thesis proposes algorithms for measuring and locating Partial Discharge signals (PD) in a generator rated 21kV by wavelet transform techniques. The signal was filtered to decrease noise with Discrete Wavelet Transform (DWT). It is then located with Continuous Wavelet Transform (CWT) in the time-frequency domain. The obtained signal from CWT was analyzed for determining frequency in order to compare results according to the characteristics of partial discharges in generators.

The experiment results of the simulated signal indicated that the proposed algorithm could efficiently decrease noise and locate the signal. The PD frequency was also indicated correctly. After testing with the signal obtained from the power plant and comparing with the standard TGA-B instrument, the result was shown to be in the same direction.

**Keywords:** partial discharge signals, discrete wavelet transform, continuous wavelet transform

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ กราบขอพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐภัทร พันธุ์คง และรองศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาตรวจสอบ ชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างสูงในการจัดทำ วิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความ สมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณพ่อ แม่และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยให้การสนับสนุนทั้งเวลา กำลังใจ และค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านจากชั้นเริ่มต้นในการศึกษาถึงระดับปริญญาโท ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการทางวิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้และ อ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เริงฤทธิ์ กิจไพบุลหวี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ .....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญรูป.....	(9)
สารบัญตาราง.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	16
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
2.2 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) .....	19
2.2.1 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน.....	20
2.3 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	21
2.4 คุณลักษณะของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน.....	22
2.5 ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	26
2.5.1 ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding) .....	27
2.5.2 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge.....	28
2.5.3 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ.....	28
2.5.4 ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings) .....	29
2.5.5 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing).....	30
2.5.6 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections).....	30

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.7 ปัญหาจาก Surges.....	31
2.5.8 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration)....	31
2.5.9 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) .....	32
2.5.10 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination) .....	33
2.5.11 ปัญหาจากการสั้นสะท้อนบริเวณช่วงปลายของขดลวด.....	33
2.6 ฐานข้อมูลของผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2015.....	34
2.7 การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน.....	35
2.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต.....	35
2.7.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT).....	38
2.7.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform )..	40
2.7.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform).....	42
2.7.5 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) .....	49
2.8 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	55
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	55
3.2 การจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน.....	56
3.3 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	60
3.4 ข้อมูลจริงที่ใช้ในการทำงานวิจัย.....	64
3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	65
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	66
4.1 ผลการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้.....	66
4.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B.....	70
4.3 สรุปผลการวิเคราะห์.....	74
บทที่ 5 ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต.....	76



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	94



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การแปลงเวฟเล็ต.....	15
รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิซาร์จบางส่วน (PD) .....	20
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิซาร์จบางส่วนภายในข้อั้วบวก.....	20
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลเมื่อมีโพรงอากาศในเนื้อฉนวน.....	22
รูปที่ 2.4 Pulse Width และ Rise Time ของสัญญาณดิซาร์จบางส่วน.....	22
รูปที่ 2.5 ย่านความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณดิซาร์จบางส่วน.....	22
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของสัญญาณดิซาร์จบางส่วนที่เกิด และ ปริมาณ +PD และ -PD.....	23
รูปที่ 2.7 ตำแหน่งของ PD ว่าเกิดขึ้นที่บริเวณใด .....	23
รูปที่ 2.8 สัญญาณ -PD < +PD.....	23
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD < +PD.....	24
รูปที่ 2.10 สัญญาณ +PD $\approx$ -PD.....	24
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ +PD $\approx$ -PD .....	24
รูปที่ 2.12 สัญญาณ -PD > +PD .....	25
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD > +PD .....	25
รูปที่ 2.14 แสดงการแปลงฟูเรียร์ (FFT).....	36
รูปที่ 2.15 แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (STFT) .....	38
รูปที่ 2.16 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies20.....	39
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a,b ต่าง ๆ กัน.....	39
รูปที่ 2.18 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต.....	40
รูปที่ 2.19 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต.....	41
รูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต.....	41
รูปที่ 2.21 แสดงขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล.....	41
รูปที่ 2.22 การแสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT) .....	42
รูปที่ 2.23 ลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของสเปซของเวกเตอร์.....	45
รูปที่ 2.24 ลักษณะการกระจาย (Decomposition) สัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 2.25 แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ.....	47
รูปที่ 2.26 แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ.....	47

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงค์.....	48
รูปที่ 2.28 แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ในสเกลที่ 1-4.....	49
รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของ Haar Wavelet.....	50
รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะของ Daubechies Wavelet.....	50
รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะของ Biorthogonal Wavelet.....	51
รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของ Coiflets Wavelet.....	52
รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของ Symlets Wavelet.....	52
รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะของ Morlet Wavelet.....	53
รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของ Mexican Hat Wavelet.....	53
รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะของ Meyer Wavelet.....	53
รูปที่ 3.1 รูปแบบสัญญาณ Damped exponential pulse (DEP).....	59
รูปที่ 3.2 รูปแบบสัญญาณ Damped oscillatory pulse (DOP).....	59
รูปที่ 3.3 สัญญาณ DEP ร่วมกับ white Gaussian noise (WGN) at SNR -5 dB.....	59
รูปที่ 3.4 สัญญาณ DOP ร่วมกับ white Gaussian noise (WGN) at SNR -5 dB.....	60
รูปที่ 3.5 DWT coefficients (d1-d12, a12) of DEP type signal decomposed up to... level 12 using db4 mother wavelet.....	61
รูปที่ 3.6 De-noised DEP type signal ระดับ 12.....	61
รูปที่ 3.7 DWT coefficients (d1-d12, a12) of DOP type signal decomposed up to... level 12 using db4 mother wavelet.....	62
รูปที่ 3.8 De-noised DOP type signal ระดับ 12.....	63
รูปที่ 3.9 หาค่า Time Frequency Domain (DEP) ด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง CWT.....	63
รูปที่ 3.10 หาค่า Time Frequency Domain (DOP) ด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง CWT.....	64
รูปที่ 3.11 ทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s ,Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A.....	64
รูปที่ 4.1 สัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม 0°ค่า Sample rate 100 M/s ,Sample to read 5M... decomposed up to level 6 using db4 mother wavelet.....	66
รูปที่ 4.2	67
รูปที่ 4.3 ผลของการลดสัญญาณด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องระดับ 6.....	68
รูปที่ 4.4 Time - Frequency Domain signal .....	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 รูปร่างของสัญญาณสัญญาณที่เฟส A Sample rate 100 MS/s..... และ Sample to read 5M ในช่วงเวลา $x = 6.22 \times 10^4$ .....	69
รูปที่ 4.6 ความถี่จากการแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่อง CWT.....	69
รูปที่ 4.7 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน.....	70
รูปที่ 4.8 สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A มุม $90^\circ$ และ $270^\circ$ .....	71
รูปที่ 4.9 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A.....	71
รูปที่ 4.10 จุดที่พบสาเหตุของการเกิดสัญญาณผิดปกติที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A.....	72
รูปที่ 4.11 จุดที่เกิดความเสียหายของรู Isolated Phase Bus ที่ทำการการตัดาปเกลียวไม่ดี.....	72
รูปที่ 4.12 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017.....	73



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะรูปแบบของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	26
ตารางที่ 2.2 ปัญหาจากการขึ้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding).....	27
ตารางที่ 2.3 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge.....	28
ตารางที่ 2.4 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface).....	29
ตารางที่ 2.5 ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings).....	29
ตารางที่ 2.6 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing) .....	30
ตารางที่ 2.7 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections).....	31
ตารางที่ 2.8 ปัญหาจาก Surges.....	31
ตารางที่ 2.9 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration).....	32
ตารางที่ 2.10 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling).....	32
ตารางที่ 2.11 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination).....	33
ตารางที่ 2.12 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิด PD พิกัด 21 kV.....	34
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้การจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน.....	58
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของ DSI ที่ใช้ในการจำลองสัญญาณ.....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฉนวนในระบบไฟฟ้าเป็นส่วนหลักของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ถึงแม้จะมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตฉนวนที่สมบูรณ์แบบ แต่ในความเป็นจริงแล้วฉนวนนั้นยังคงมีความผิดพลาด และปนเปื้อนไปกับ สิ่งสกปรกชนิดต่าง ๆ และนั่นเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของ ความล้มเหลวในระบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมิน ที่อาจเกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและอาจนำไปสู่ความเสียหายในระบบต่อไป ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ถ้าหากความเครียดสนาม ไฟฟ้าที่จุดใด เกิดมีค่าสูงกว่าค่า ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนจะทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวนเป็นเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่า “ดิสชาร์จบางส่วน” [1] พัลส์ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชกกระทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิดพลาดขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ได้ ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โคโรนาดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวและดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในรอยต่อ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากข้อมูลที่มีการเก็บรวบรวมบันทึกไว้ทางสถิติ [2] พบว่ารูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้น จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของข้อบกพร่อง ในขดลวดสเตเตอร์และเทคนิคการตรวจวัด ดังนั้นการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์อย่างมากในตรวจจับและการบำรุงรักษาตามประเภทของข้อบกพร่องในเครื่องกำเนิด

การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยการประมวลผลการกระจายข้อมูลดิสชาร์จบางส่วนด้วยขนาดของพัลส์ และเฟสที่เกิดขึ้นโดยอ้างอิงกับฐานเวลารูปคลื่นไซน์ 50 Hz จากคุณสมบัติของดิสชาร์จบางส่วนกล่าวคือ เป็นสัญญาณที่ไม่แน่นอน ไม่เป็นรายคาบ เกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นและมีความถี่สูง ประมาณ 50 – 250 MHz [3] ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าว จึงไม่สามารถประมวลผลข้อมูลภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ เนื่องจากสัญญาณรบกวนสูง การวิเคราะห์ด้วย FFT นั้นดีสำหรับรูปคลื่นที่เป็นรายคาบ มีเวลาการเกิดที่แน่นอน ดังนั้นที่เวลาใดๆ ถ้าทราบความถี่ที่เกิดขึ้น ณ เวลานั้นจะทำให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณที่เวลาต่างๆ ดียิ่งขึ้นมีผลทำให้การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนมีความถูกต้องเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องแสดงสัญญาณในโดเมนเวลาและ

ความถี่ (time-frequency domain) พร้อมกัน ซึ่งเป็นการแสดงกราฟความถี่บนแกน x , เวลาบนแกน y และแอมพลิจูดบนแกน z นั่นคือ ทำให้ทราบที่เวลาใดๆ มีความถี่อะไรเกิดขึ้นและความถี่นั้นๆ มีมากน้อยเพียงใด การแปลงเวฟเลต [4] จึงเป็นเครื่องมือที่ดีในการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ เนื่องจากมันสามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและแสดงค่าทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ได้ ทำให้ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะสร้างอัลกอริทึม เพื่อประเมินสภาพนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากโรงไฟฟ้าบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด มาวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยการแปลงเวฟเลต โดยการจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ร่วมกับสัญญาณรบกวน และแยกสัญญาณรบกวนด้วย การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT) แสดงส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณที่ต้องสงสัย และระบุตำแหน่งที่เกิดด้วยเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT) นำผลการทดลอง ไปใช้กับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จริง เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบเชิงป้องกันต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

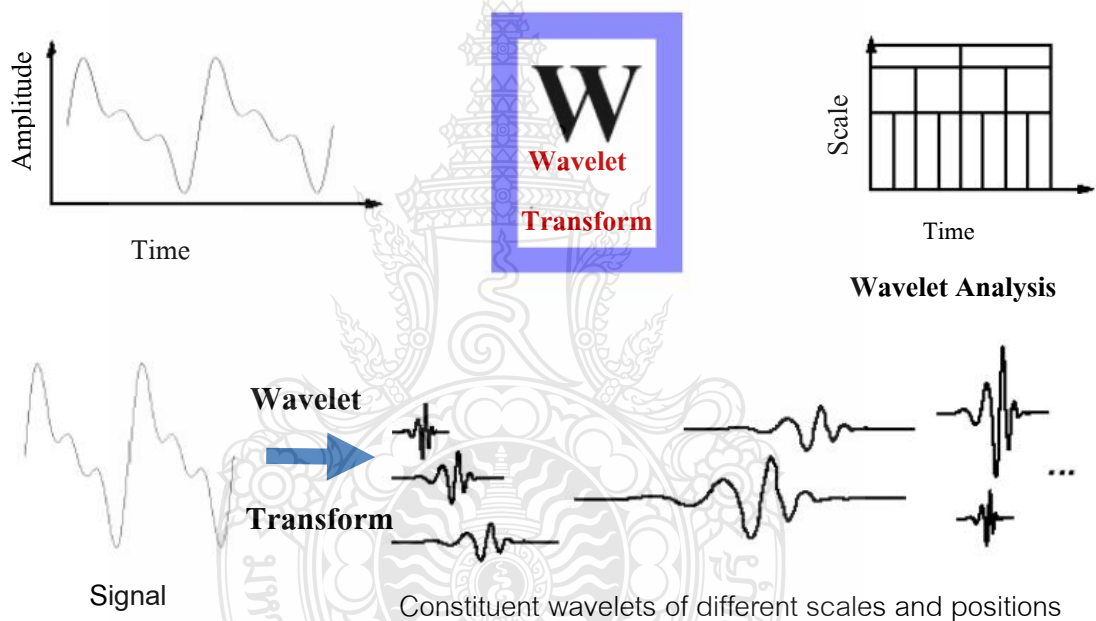
- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด ไม่เกิน 21 kV
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคและการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเลต
- 1.2.3 เพื่อสร้างอัลกอริทึมจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.2.4 เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์ที่ฉนวนของขดลวดบางส่วน มีสภาพนำไฟฟ้า แต่ฉนวนโดยรวมยังสามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ แต่จะทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไม่ใช่ปรากฏการณ์ที่จะก่อให้เกิดอันตรายอย่างเฉียบพลัน แต่เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นแล้วจะเร่งให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และ จะมีผลให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนมากขึ้นเช่นกัน ถ้าไม่ได้รับการตรวจสอบหาสาเหตุของดิสชาร์จบางส่วน ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ แก้ไขในช่วงเวลาที่เหมาะสม ดิสชาร์จบางส่วนอาจกลายเป็นสาเหตุโดยตรงของการลัมเหลว

(Breakdown) ของฉนวนอย่างถาวร ทั้งนี้การตรวจพบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทำให้ทราบถึงปัญหา เพื่อนำมากำหนดแนวทางแก้ไขให้ถูกต้อง จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับการพัฒนามาจากการแปลงฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาอันสั้น โดยมีการปรับช่วงเวลาและความถี่ให้เหมาะสมตามความต้องการผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ต การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตจะสามารถขยายช่วงเวลาในส่วนของวินโดว์ให้ยาวขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลช่วงความถี่ต่ำ ที่เที่ยงตรงขึ้นและยอมให้ลดช่วงเวลาในส่วนของวินโดว์ลงเพื่อให้ได้ข้อมูลช่วงความถี่สูงที่เที่ยงตรงขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นการแปลงเวฟเล็ต



รูปที่ 1.1 การแปลงเวฟเล็ต [4]

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตจะไม่แสดงข้อมูลเชิงเวลากับความถี่แต่จะแสดงข้อมูลเชิงเวลากับสเกล (scale) แทน ข้อดีของการใช้การแปลงเวฟเล็ต คือ ความสามารถในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะที่ นอกจากนี้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีเวฟเล็ตจะแสดงให้เห็นข้อมูลที่ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์สัญญาณแบบอื่นๆ เช่นข้อมูล ของสัญญาณจุดแตกหัก (Breakdown) จุดแตกหักในอนุพันธ์ลำดับที่สูงขึ้นไปของสัญญาณ (Breakdown at Higher Derivatives) และ Self-Similarity นอกจากนี้การวิเคราะห์เวฟเล็ต ยังสามารถบีบอัดสัญญาณ และ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ด้วย



ลดทอนคุณภาพของสัญญาณลงจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฟังก์ชันเวฟเล็ตมีลักษณะพิเศษที่สำคัญคือสมาชิกของฟังก์ชันเวฟเล็ตจะเป็นสัญญาณที่เกิด จากต้นแบบอันเดียวกัน โดยที่ต้นแบบของสัญญาณเวฟเล็ตดังกล่าวจะเรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelet) ฟังก์ชันเวฟเล็ตจะมีการสั่นตามแนวแกนนอนซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในช่วงระยะเวลาอันสั้น ก่อนจะเข้าสู่ศูนย์ทั้งด้านบวกและด้านลบซึ่งต่างจากฟังก์ชันไซน์ที่แผ่ไปตามแนวแกนนอน โดยที่ขนาดสัญญาณไม่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงทำให้สามารถนำฟังก์ชันเวฟเล็ตไปใช้ในการ วิเคราะห์สัญญาณที่ไม่คงที่โดยเลือกช่วงเวลาและความถี่ที่ต้องการได้

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV
- 1.4.2 สร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน
- 1.4.3 วิเคราะห์แบบจำลองสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต
- 1.4.4 นำอัลกอริทึมที่ได้ใช้วิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จริงจากโรงไฟฟ้าบริษัทราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด

#### 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.5.2 ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ต
- 1.5.3 สร้างแบบจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนและสัญญาณรบกวน
- 1.5.4 วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลจริงจากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ใช้เป็นต้นแบบ ในการตรวจวัดหาดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.6.2 ใช้เป็นข้อมูลการประกอบการตัดสินใจในการวางแผนบำรุงรักษาในระบบ Condition Base Maintenance (CBM) เพื่อลดระยะเวลาในการบำรุงรักษา
- 1.6.3 ลดต้นทุนในการซื้อเครื่องมือวัดดีสชาร์จบางส่วนแบบมาตรฐาน Turbine Generator Analyzer (TGA-B)
- 1.6.4 ลดค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้เชี่ยวชาญมาดำเนินการตรวจสอบดีสชาร์จบางส่วน

## 1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.7.1 Partial Discharge ดิสชาร์จบางส่วน
- 1.7.2 Steam Turbine Generator เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ
- 1.7.3 Signal processing การประมวลผลสัญญาณ
- 1.7.4 Wavelet Transform การแปลงเวฟเล็ต
- 1.7.5 Fourier Transform ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม
- 1.7.6 Mother Wavelet เวฟเล็ตแม่
- 1.7.7 Electrical Test การทดสอบทางไฟฟ้า
- 1.7.8 Condition Base Maintenance การบำรุงรักษาตามสภาพ
- 1.7.9 Wavelet Reconstruction การรวมกลับเวฟเล็ต
- 1.7.10 Inverse Wavelet Transform การแปลงกลับเวฟเล็ต
- 1.7.11 Continuous Wavelet Transform: CWT การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง
- 1.7.12 Discrete Wavelet Transform : DWT การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของฉนวนสามารถเกิดได้ระหว่างผิวฉนวนของขดลวดแบบ Stator Core ระหว่างฉนวนกับตัวนำ ภายในเนื้อฉนวนบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่มีศักย์สูงกับส่วนที่ Ground บริเวณ Jumper และ Coil End พลังงานของดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะแปรผันตรงกับค่า Capacitance ของโพรงอากาศ ในขณะที่อากาศเกิดการแตกตัว จะแปรผันเป็นกำลังสองกับขนาดแรงดันระหว่างโพรงอากาศนั้น ดังนั้นโพรงอากาศที่มีลักษณะกว้างและยาวจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีพลังงานสูง และในสภาวะปกติขณะเดินเครื่องฉนวนต้องรับทั้งความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดเชิงกล และ ความเครียดทางความร้อน ทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพตามเวลาการใช้งาน แต่เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นก็จะยิ่งเร่งให้ฉนวนเสื่อมสภาพมากขึ้น เมื่อฉนวนเสื่อมสภาพก็จะเกิดดิสชาร์จบางส่วนมากขึ้น ฉนวนจะยิ่งเสื่อมสภาพเร็วขึ้นไปอีก ดิสชาร์จบางส่วนจะเป็นสาเหตุหลักโดยตรงของการล้มเหลวของฉนวน ดังนั้นสิ่งสำคัญในการแก้ไข การตรวจสอบให้พบแต่เนิ่นๆ และทำการแก้ไข การตรวจสอบสามารถตรวจสอบโดยวิธีวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่าน Coupling ซึ่งเป็นคาปาซิเตอร์และนับอัตราการเกิดสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนจากการวิเคราะห์สัญญาณในช่วงเวลาอันสั้น โดยมีการปรับช่วงเวลาและความถี่ให้เหมาะสม ตามความต้องการผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ต

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตจะสามารถขยายช่วงเวลาในส่วนของวินโดว์ให้ยาวขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลช่วงความถี่ต่ำ ที่เที่ยงตรงขึ้นและยอมให้ลดช่วงเวลาในส่วนของวินโดว์ลงเพื่อให้ได้ข้อมูลช่วงความถี่สูงที่เที่ยงตรงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การวิเคราะห์เวฟเล็ตยังสามารถบีบอัดสัญญาณและ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ โดยลดทอนคุณภาพของสัญญาณลงไปจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และนำผลการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนมาระบุตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อกำหนดแนวทางการแก้ไข และในอนาคตจะมีการติดตั้งอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในระบบ Condition Base Maintenance (CBM) เพื่อลดระยะเวลาในการบำรุงรักษา และช่วยประเมินอายุการทำงานของเครื่องกำเนิดด้วย

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงบนฐานรูปคลื่นไซน์ และนำไปสู่การวิเคราะห์หาสาเหตุ ซึ่งพบว่ารูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วบกกพร่องในขดลวดสเตเตอร์ และเทคนิคการตรวจวัด ดังนั้นการวิเคราะห์

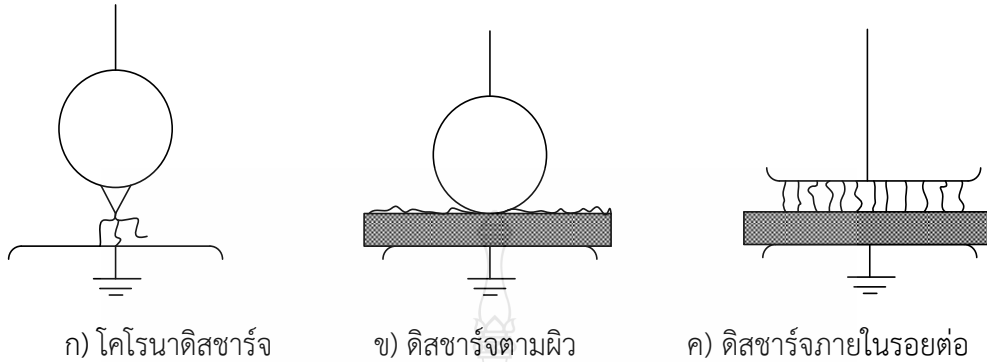
รูปแบบ PD ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์ในการควบคุมและบำรุงรักษาตามประเภทของข้อบกพร่อง [5] และการวิเคราะห์ยังสามารถแบ่งออกเป็นหลากหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การวิเคราะห์รูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge Pattern (PRPDP) ในรูปแบบสองมิติ และสามารถปรับความหมายโดยผู้ที่มีประสบการณ์ [6,7] เทคนิคตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในโดเมนเวลาบนพื้นฐาน pulse-by-pulse และแยกสัญญาณการรบกวนโดยการประมวลผลสัญญาณและการใช้เทคนิคตัวกรองแบนด์วิดท์แคบแบบปรับได้ narrow-bandwidth filter ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ [8] การแยกสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นมีการประเมินวิธี denoising หลายวิธี โดยใช้ข้อมูลดิสชาร์จบางส่วนที่จำลอง และข้อมูลจริงพบว่าการ denoising แบบเวฟเล็ตทำได้ดีทั้งข้อมูลจำลองและข้อมูลจริงของสัญญาณ [9,10] การแยกสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อลดสัญญาณรบกวน และใช้เทคนิค Time-Of-Arrival ใช้เพื่อระบุว่าเป็นสัญญาณดิสชาร์จแบบภายใน หรือภายนอก [11] นอกจากนี้การวิเคราะห์โดเมนความถี่-เวลาของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน สามารถทำได้โดยใช้ S-transform แปลงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์นี้ [12] มีการนำเสนอแนวทางใหม่ในการกำหนดค่าเวฟเล็ตสำหรับการลดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน แบบออนไลน์และผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน threshold ใหม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดยใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ ที่มีอยู่ใน ลดสัญญาณรบกวน [13] การแปลงเวฟเล็ต ได้รับการสรุปในงานวิจัยที่ได้ศึกษาว่ามีข้อดี เมื่อเทียบกับวิธีก่อนหน้านี้เช่น FT และ STFT และสรุปว่าเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [14,15]

## 2.2 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) [1]

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งจ่ายหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก็ตาม ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดเกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนจะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวน์เป็นเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่า “ดิสชาร์จบางส่วน”

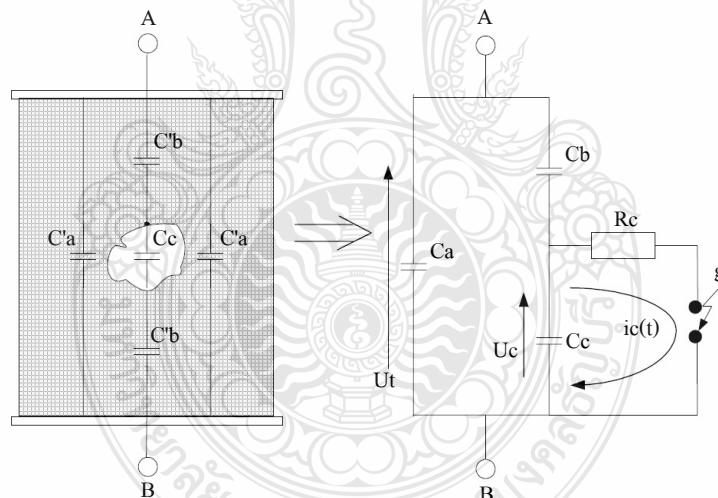
ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุด ในฉนวนมีค่าสูงกว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้นพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ ทำให้ฉนวนเสียหาย

อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลงถ้ามีสิ่งสกปรกบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โครนาดีสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวและ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในรอยต่อ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน [1]

### 2.2.1 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวน [1]

วัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B แสดงในรูปที่ 2.2 โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C_c$  ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ  $C_c$  เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C'_b$  ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ  $C_c$  นี้จะรวมกันได้เป็น  $C'_b$  ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ  $C_c$  จะให้ค่าเป็น  $C'_a$  และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น  $C'_a$  ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งค่าความจุ

ไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ  $C_t$  จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $C'_a$  ซึ่งมีค่ามากกว่า  $C'_b$  มากๆ นั่นคือ  
 ชั่วบวก

$$C_t \approx C'_a \gg C_c \triangleright C'_b \quad (2.1)$$

ถ้าแรงดันที่ป้อนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของโพรงก๊าซที่  
 แทนด้วย  $C_c$  จะเกิดเบรกดาวนในโพรงก๊าซ ซึ่งแทนด้วยช่องว่างอากาศ (g) โดยมีความต้านทาน  $R_c$  ต่อ  
 อนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดิซชาร์จ  $i_c(t)$  ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์กว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิด  
 แรงดันตก  $\delta U_c$  ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุตั้งสมการที่ 2.2

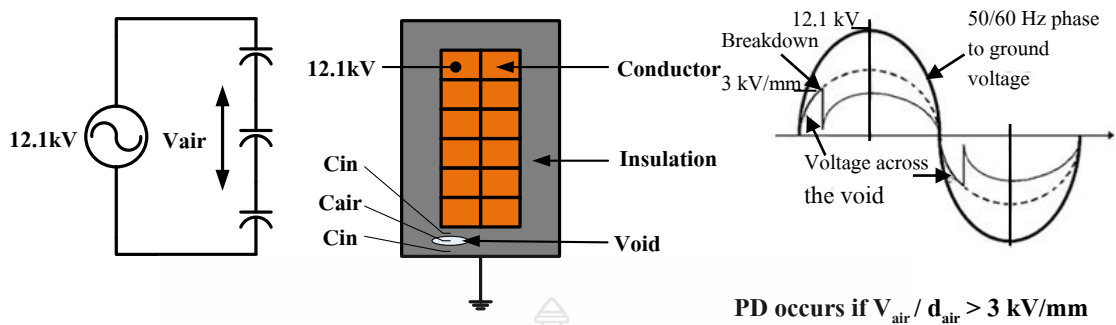
$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.2)$$

กระแส  $i_c(t)$  นี้ไหลอยู่ภายในซึ่งไม่สามารถวัดได้ แต่การดิซชาร์จของ  $C_c$  ทำให้เกิดการถ่ายเท  
 ประจุของ  $C_b$  และ  $C_a$  ของวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ  $\delta U_t$  ซึ่งหาได้จาก  
 ประจุใน  $C_c$  ตั้งสมการที่ 2.3

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.3)$$

### 2.3 การเกิดดิซชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1]

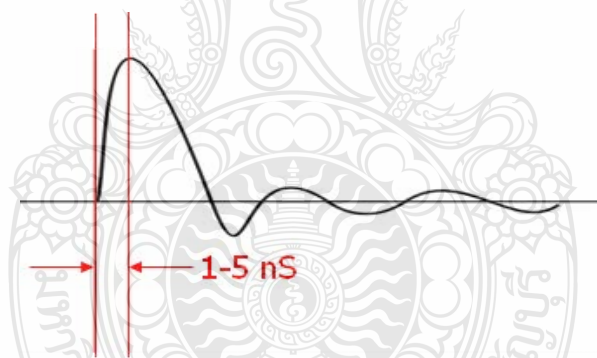
โดยปกติแล้วในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ จะมีโพรงของอากาศปะปนอยู่ถึงแม้ว่าจะเป็น  
 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใหม่ก็ตาม ถ้าโพรงอากาศนั้นมีขนาด 1 มิลลิเมตร แรงดันของเครื่องกำเนิด  
 ไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าสูงกว่า 3 kV/mm (Vair/Dair) จะเกิดการเบรกดาวนขึ้นภายในโพรง  
 อากาศ ดังรูปที่ 2.3 และในทุกๆ 1 ไมโครวินาทีจะเกิดการเบรกดาวน 2 ครั้ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิด  
 สัญญาณดิซชาร์จบางส่วนคือการมีฉนวนบางส่วนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าแต่ไม่ทำให้ฉนวนโดยรวม  
 ล้มเหลวในการเป็นฉนวน โดยขณะที่มีแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศเรียกว่า “ภาวะการชาร์จ” และ  
 ขณะที่โพรงอากาศเกิดการเบรกดาวน เรียกว่า “ภาวะการดิซชาร์จ” ซึ่งจะทำให้เกิดทั้งลูกคลื่นบวก และ  
 ลูกคลื่นลบ ของแรงดันรูปคลื่น Sine Wave และจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดจนกว่าจะได้รับการแก้ไข หรือ  
 จนกว่าฉนวนนั้นจะเกิดการล้มเหลว



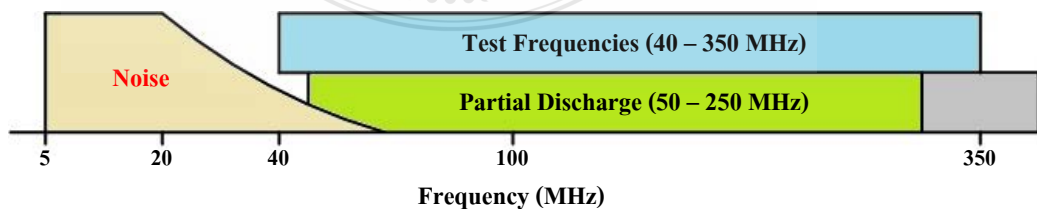
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลเมื่อมีโพรงอากาศในฉนวน [1]

## 2.4 คุณลักษณะของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [3]

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มี Pulse Width แคบ และมี Rise Time น้อย ประมาณ 1-5 nS ดังรูปที่ 2.4 และความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง  $1/(4 \times \text{Rise Time})$  ประมาณ 50 - 250 MHz ดังรูปที่ 2.5

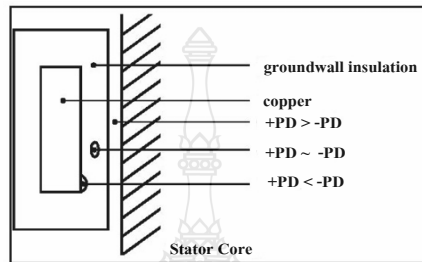


รูปที่ 2.4 Pulse Width และ Rise Time ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน



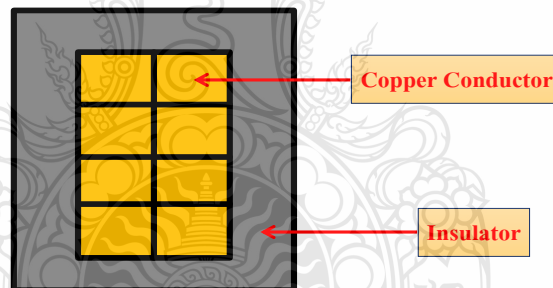
รูปที่ 2.5 ย่านความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [3]

ดิสชาร์จบางส่วนนั้นเกิดขึ้นหลายจุดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเฉพาะภายใน Slot Portion นั้นจะเกิดได้ง่าย การแก้ไขทำได้ยาก ปัญหาการเกิด Breakdown ของฉนวนจะเกิดใน Slot Portion เป็นส่วนใหญ่ เราจึงให้ความสำคัญกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ตำแหน่งนี้มากที่สุด สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นมีทั้ง +PD และ -PD ปริมาณของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนใน Slot Portion สามารถจำแนกได้ 3 ตำแหน่งดังรูปที่ 2.6



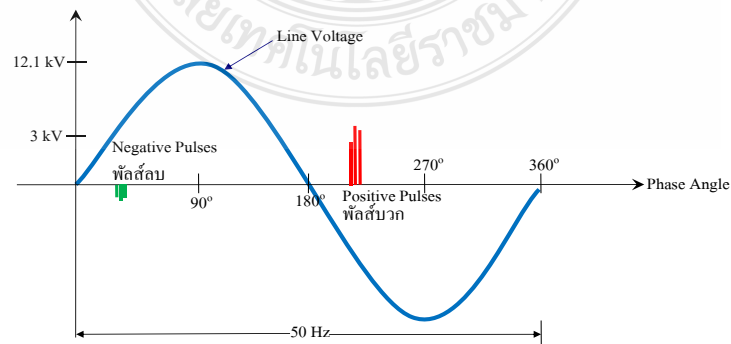
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิด และ ปริมาณ +PD และ -PD [3]

เพื่อความเข้าใจในการอธิบายข้อของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ว่าสามารถบอกตำแหน่งว่าเกิดขึ้นที่ใด



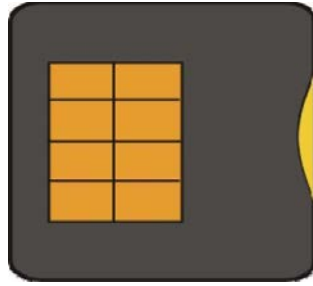
รูปที่ 2.7 ตำแหน่งของ PD ว่าเกิดขึ้นที่บริเวณใด [3]

#### 2.4.1 สัญญาณ +PD > -PD



รูปที่ 2.8 สัญญาณ+PD > -PD [3]

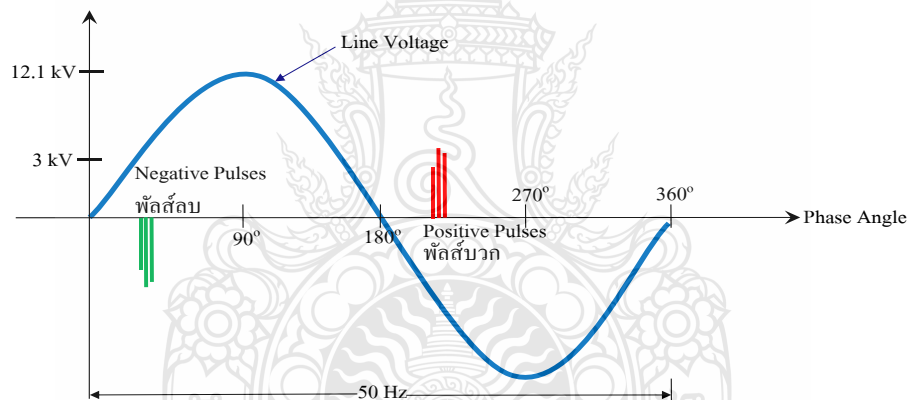




รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ +PD > -PD [3]

จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า +PD เด่นชัดกว่าหรือมากกว่า -PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่งบนผิวของขดลวด สาเหตุเกิดจากการคลายตัวของขดลวด หรือ การเสื่อมของสารเคลือบผิว

2.4.2 สัญญาณ +PD  $\approx$  -PD



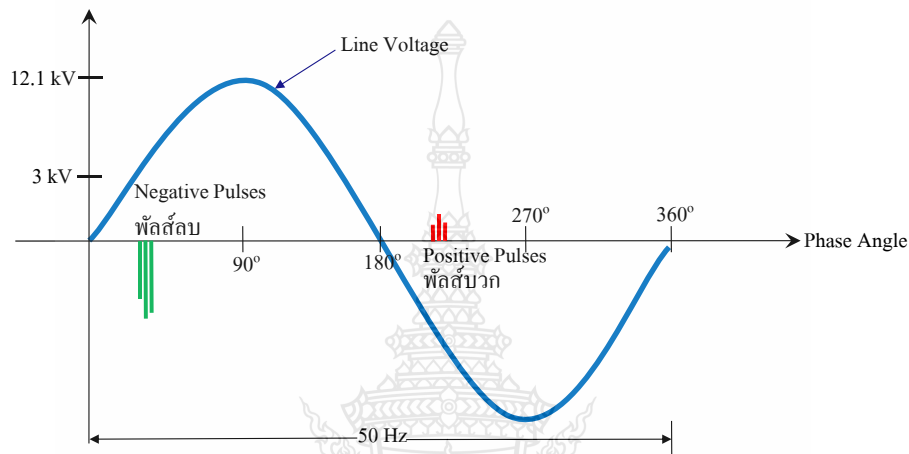
รูปที่ 2.10 สัญญาณ +PD  $\approx$  -PD [3]



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ +PD  $\approx$  -PD [3]

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า +PD มีปริมาณใกล้เคียงกับ -PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่ง ภายในเนื้อฉนวน เรียกว่า Internal Discharge สาเหตุเกิดจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน หรือ การเคลือบฉนวนไม่ดี

#### 2.4.3 สัญญาณ -PD > +PD



รูปที่ 2.12 สัญญาณ -PD > +PD [3]



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD > +PD [3]

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า -PD เด่นชัดกว่าหรือมากกว่า +PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่งใกล้กับสวดทองแดงตัวนำ สาเหตุเกิดจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) หรือ เกิดความร้อนสูงทำให้เกิดฟองอากาศใกล้ขดสวดทองแดง

## 2.5 ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [3]

ปัญหาที่เกิดขึ้นในหลายสาเหตุนี้จะมีรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นลักษณะเฉพาะ ดังนั้นการตรวจสอบลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ จะช่วยในการระบุสาเหตุของการเกิดปัญหาในระบบได้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด
การผลิตที่ไม่เหมาะสม	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°
Slot Discharge	ค่าด้านบวกจะมากกว่าค่าด้านลบ ( $\approx 1.5$ เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°
สารเคลือบผิวต่างๆ	ค่าด้านบวกจะมากกว่าค่าด้านลบ ( $\approx 1.5$ เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°
การคลายตัวของขดลวด	ค่าด้านบวกจะมากกว่าค่าด้านลบ ( $\approx 1.5$ เท่า)	สัญญาณด้านบวกแปรผันตามโหลด	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°
ช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	45°, 75°, 195° และ 225°
การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	0° และ 180°
Surge	ค่าด้านลบจะมากกว่าค่าด้านบวก ( $\approx 1.5$ เท่า)	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	0° และ 180°

**ตารางที่ 2.1** ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโพลต	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด
การเสื่อมสภาพจากความร้อน	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°
การปรับเปลี่ยนโพลต	ค่าด้านลบจะมากกว่าค่าด้านบวก ( $\approx 1.5$ เท่า)	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45°
ความสกปรก	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	15°, 75°, 195° และ 225°

**2.5.1** ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding)

ในระหว่างกระบวนการผลิตขดลวดนั้น เมื่อมีการใช้ส่วนประกอบจำพวกเรซิน หรือเทปต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการ VPI และปัจจัยอื่น อาจส่งผลให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นภายในขดลวดได้ ตัวอย่างเช่น การเสื่อมของฉนวนอันเนื่องมาจากความร้อนนั้น จะทำให้เกิดโพรงของอากาศกระจายไปทั่วฉนวน โดยไม่กระจุกตัวอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่ง (ไม่ว่าจะเป็นด้านทองแดง หรือด้านของ Core) ทำให้ไม่สามารถระบุขั้วของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนซึ่งจะเกิดขึ้นที่มุม 45° และมุม 225° ได้ นอกจากนี้ การเสื่อมของฉนวนอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ จะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโพลต

**ตารางที่ 2.2** ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโพลต	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การผลิตที่ไม่เหมาะสม	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°

### 2.5.2 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge

Slot Discharge คือ ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของขดลวด กับแกนเหล็กสเตเตอร์ ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่า สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings) สามารถก่อให้เกิด Slot Discharge ได้ แต่การเกิด Slot Discharge ไม่จำเป็นต้องมีสาเหตุมาจากการคลายตัวของขดลวดเท่านั้น บางครั้งยังอาจมีสาเหตุมาจากปัญหาอื่น เช่น สารเคลือบที่เป็นแบบกึ่งตัวนำ (Semi-Conductive Coating) เป็นต้น โดยรูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จที่เกิดจาก Slot Discharge นี้ จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการคลายตัวของขดลวด นั่นคือ จะเป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวก เกิดขึ้นที่มุม  $225^\circ$  และแปรผกผันกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่เนื่องจาก Slot Discharge สามารถเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะเกิดการคลายตัวของขดลวด ดังนั้น มันจึงไม่มีผลกระทบใด ๆ จากการเปลี่ยนแปลงของโพลด อนึ่ง การเกิด Slot Discharge นี้ ยังเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

### ตารางที่ 2.3 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโพลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
Slot Discharge	ค่าด้านบวกจะมากกว่าค่าด้านลบ ( $\approx 1.5$ เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	$225^\circ$

### 2.5.3 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นบริเวณสารเคลือบผิวต่าง ๆ จะเป็นแบบ Surface-Type นั่นคือ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Ground Voltage โดยจะเป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวก และเกิดขึ้นที่มุม  $225^\circ$  อย่างไรก็ตาม สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้จะแตกต่างจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการคลายตัวของขดลวด กล่าวคือ จะไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโพลด และเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในสารเคลือบผิวเหล่านี้ได้ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเป็นสื่อไฟฟ้า (ความนำไฟฟ้าจะแปรผันตามอุณหภูมิ) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นั่นคือ อาจกล่าวได้ว่า ในกรณีที่รูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่พบนั้น อยู่ทางด้านขั้วบวก เกิดขึ้นที่มุม  $225^\circ$  และมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิแล้ว จะมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดจากความเสื่อมสภาพของสารเคลือบผิวต่าง ๆ และในกรณีที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงนั้น อาจเกิดพัลส์ขึ้นที่มุม  $0^\circ$  และมุม  $180^\circ$  ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของการเกิดอาร์ค

**ตารางที่ 2.4** ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโพลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
สารเคลือบผิวต่าง ๆ	ค่าด้านบวกจะมากกว่าค่าด้านล่าง ( $\approx 1.5$ เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°

**2.5.4** ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings)

เมื่อเกิดการคลายตัวของขดลวดขึ้นใน Slot ปัญหาที่จะเกิดขึ้นทันที (ในกรณีที่ไม่ได้รับการแก้ไข) ก็คือ การคลายตัวนี้จะทำให้ชั้นผิวของแกนสเตเตอร์ไปทำลายสารเคลือบผิวของขดลวดอย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณนี้ หรือระหว่างบริเวณนี้กับแกนของสเตเตอร์โดยในกรณีที่แรงดันตกคร่อมนี้มีค่าสูงกว่าค่าแรงดัน Breakdown ของ Gas จะทำให้เกิดดิสชาร์จขึ้น นั่นคือ พัลส์ที่เกิดขึ้นจากการคลายตัวของขดลวด จะมีลักษณะเป็นแบบ Surface-Type ในบริเวณ Slot โดยจะเป็นสัญญาณทางด้านขั้วบวก และเกิดขึ้นที่มุม 225° ทั้งนี้ ข้อสังเกตที่เด่นชัดสำหรับกรณีการคลายตัวของขดลวดนี้จะได้แก่การเพิ่มขึ้นของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนอย่างรวดเร็ว (โดยเฉพาะสัญญาณทางด้านขั้วบวก) เมื่อโพลดมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อกระแสโพลด มีค่าเพิ่มขึ้น ขดลวดจะมีการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น การสั่นสะเทือนนี้จะทำให้โพรงของอากาศระหว่างบริเวณด้านข้างของขดลวดกับ Ground Core เพิ่มมากขึ้น และ โพรงของอากาศที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้จะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

**ตารางที่ 2.5** ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโพลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การคลายตัวของขดลวด	ค่าทางด้านบวกจะมากกว่าค่าทางด้านลบ ( $\approx 1.5$ เท่า)	สัญญาณทางด้านบวกแปรผันตามโพลด	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°

อย่างไรก็ตาม การที่กระแสโพลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนี้ จะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (ซึ่งแปรผกผันกับอุณหภูมิ) มีค่าลดลง ดังนั้น เมื่อต้องการ

ตรวจสอบกรณี การคลายตัวของขดลวดนี้ ให้ทำการทดสอบด้วยการเดินเครื่องที่โหลดต่าง ๆ กัน แต่ควบคุมให้ค่าแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ และค่าความดันของไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกัน อนึ่ง สำหรับขดลวดที่มีเฉพาะปัญหาจากการคลายตัวนั้น จะมีเฉพาะสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวกที่จะเปลี่ยนแปลงตามโหลดในขณะที่สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับกรณีที่สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบมีการเปลี่ยนแปลงตาม โหลดนั้น อาจเป็นการแสดงถึงการสั้นสะพานของตัวนำ เนื่องจากผลของโพรงของอากาศที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้ กับตัวนำ

#### 2.5.5 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing)

สาเหตุของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ (ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากความสกปรก) จะมีขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Phase Voltage นั่นคือ ค่าของมุมจะเปลี่ยนไป  $30^\circ$  จากสัญญาณปกติ และเนื่องจากการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากสาเหตุนี้มักจะแตกต่างจากกรณีอื่น รูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในบางครั้ง จะสามารถระบุเฟสที่เกี่ยวข้องได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสที่เกี่ยวข้องทั้งสองเฟสนั้น มีความสามารถในการตรวจสอบปัญหาจากช่วงปลายของขดลวด และลักษณะของการเกิด  $30^\circ$  Phase Shift นั้น จะเป็นไปตามลักษณะของ Rotation ของเครื่องจักรนั้น ๆ นอกจากนี้ เนื่องจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างขดลวดบนสุด กับ ขดลวดล่างสุดใน Slot ดังนั้น การตรวจสอบด้วยสายตาอาจทำได้ค่อนข้างลำบาก

#### ตารางที่ 2.6 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
ช่องว่างที่ไม่เพียงพอ	ค่าทางด้านบวก จะใกล้เคียงกับค่า ทางด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	$45^\circ$ , $75^\circ$ , $195^\circ$ และ $225^\circ$

#### 2.5.6 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากบริเวณจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ จะปรากฏอยู่ในรูปของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ขึ้นอยู่กัระบบทางกล โดยจะเกิดขึ้นที่มุม  $0^\circ$  และมุม  $180^\circ$  และเนื่องจากการเชื่อมต่อที่ไม่ดีนี้อาจถูกผลกระทบได้จากการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงไม่สามารถคาดคะเนแนวทางการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้

**ตารางที่ 2.7** ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การเชื่อมต่อที่ไม่ดี	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	0° และ 180°

**2.5.7 ปัญหาจาก Surges**

ความเครียดจาก Surge ที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันบนจุดเชื่อมต่อทางระหว่าง Groundwall กับ Strand หรือกับฉนวนของ Turn จะส่งผลให้จุดเชื่อมต่อที่เสื่อมสภาพลง และเสียหายได้ และจะก่อให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในฉนวนทางด้านของแกนทองแดง สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้ จะเกิดขึ้นทางด้านขั้วลบ เกิดขึ้นที่มุม 45° และมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีการเกิดโพรงของอากาศขึ้นภายในฉนวนทั่วไป กล่าวคือ จะมีลักษณะของการแปรผกผันกับอุณหภูมิ ทั้งนี้ ในกรณีที่โพรงของอากาศนั้นมีขนาดใหญ่มาก จะมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเพิ่มขึ้นตามโหลดเนื่องจากผลของการสั่นสะเทือนของตัวนำที่เพิ่มมากขึ้นตามแรงทางกลที่เพิ่มสูงขึ้น และในกรณีของเครื่องจักรแบบ Multi-Turn Coil เช่น มอเตอร์นั้น จะมีลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดปัญหาจาก Turn-to-Turn Fail

**ตารางที่ 2.8** ปัญหาจาก Surges [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
Surge	ค่าทางด้านลบมากกว่าค่าด้านบวก (~1.5 เท่า)	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45°

**2.5.8 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration)**

การเสื่อมสภาพด้วยความร้อนเป็นผลมาจากการเดินเครื่องที่ค่าสูงสุดติดต่อกันเป็นเวลานาน หรือจากการเดินเครื่องที่ค่าสูงกว่าค่าพิกัด (แม้จะเป็นเวลาสั้น ๆ ก็ตาม) ซึ่งจะให้ผลเช่นเดียวกับระบบฉนวนทั่วไป กล่าวคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้จะสะสมมากขึ้นจนไม่สามารถทำให้กลับสู่สภาพเดิมได้ และส่งผลให้ความสามารถในการจับตัวกันของเรซิน(หรือ Epoxy หรือ Polyester) ลดลง การสูญเสีย



ความสามารถในการจับตัวกันนี้ จะทำให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในชั้นของเทป ซึ่งเป็นส่วนประกอบของฉนวนโพรงของอากาศเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วฉนวน และอาจเกิดการดิสชาร์จขึ้นแบบไม่มีทิศทาง ซึ่งผลของมันจะทำให้โพรงของอากาศเหล่านี้ไม่แสดงขั้วของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนตามที่ควรจะเป็น และยังสามารถส่งผลให้เกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่มุม 45° และมุม 225° นั่นคือ การเกิดดิสชาร์จทางขั้วบวกและขั้วลบเท่า ๆ กัน (ไม่ว่ามากหรือน้อย) ที่ค่ามุมปกติ จะเป็นการแสดงถึงการเกิด Thermal Deterioration หรือเป็นการแสดงอายุของฉนวนนั่นเอง

**ตารางที่ 2.9** ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การเสื่อมสภาพจากความร้อน	ค่าด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าด้านลบ	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°

### 2.5.9 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling)

การปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) จะเป็นรูปแบบเฉพาะของ Thermal Deterioration ซึ่งแสดงถึงความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากการจับตัวกันระหว่างฉนวนของ Ground wall กับฉนวนของ Turn (ในระบบ Multi-Turn Coil) หรือระหว่างฉนวนของ Groundwall กับฉนวนของ Strand (ในระบบ Roebel Bars) โดยความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดขึ้นซ้ำกัน จะส่งผลให้จุดเชื่อมต่อระหว่าง Groundwall กับ Strand หรือกับฉนวนของ Turn เสื่อมสภาพลง และเสียหายได้ ได้ และจะก่อให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในฉนวนทางด้านของแกนทองแดง

**ตารางที่ 2.10** ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การปรับเปลี่ยน Load	ค่าทางด้านลบจะมากกว่าค่าทางด้านบวก ( $\approx 1.5$ เท่า)	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45°

สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้ จะเกิดขึ้นทางด้านขั้วลบ เกิดขึ้นที่มุม  $45^\circ$  และมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีการเกิด Thermal Deterioration กล่าวคือ จะมีลักษณะของการแปรผกผันกับอุณหภูมิ ทั้งนี้ ในกรณีที่โพรงของอากาศนั้นมีขนาดใหญ่มาก จะมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเพิ่มขึ้นตามโหลด เนื่องจากผลของการสั่นสะเทือนของตัวนำที่เพิ่มมากขึ้นตามแรงทางกลที่เพิ่มสูงขึ้น

#### 2.5.10 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination)

เนื่องจากบริเวณช่วงปลายของขดลวดจะถูกออกแบบให้แยกห่างออกจาก Ground Planes ดังนั้น สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสกปรกในช่วงปลายของขดลวดนี้ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Phase Voltage โดยค่าของมุมจะเปลี่ยนไป  $30^\circ$  จากสัญญาณปกติ (ที่  $45^\circ$  และ  $225^\circ$ ) ซึ่งทิศทางของมุมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดความสกปรก และค่าแรงดันของ ขดลวดนั้น ๆ ซึ่งไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน การตรวจสอบหรือการกำหนดตำแหน่งอาจทำได้ลำบาก เนื่องจากระยะการมองเห็นที่ค่อนข้างจำกัด และถึงแม้ว่าสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด แต่ก็ไม่สามารถคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นได้อย่างแน่นอนเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อาจมีผลกระทบค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ความสกปรกเหล่านั้นจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เมื่อมีความชื้นเกิดขึ้น

#### ตารางที่ 2.11 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination) [16]

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
ความสกปรก	ค่าทางด้านบวก จะใกล้เคียงกับค่า ทางด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	$15^\circ$ , $75^\circ$ , $195^\circ$ และ $225^\circ$

#### 2.5.11 ปัญหาจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด (Endwinding Vibration)

สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนจะไม่ใช่อากาศที่เกิดจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด (Endwinding Vibration) อย่างไรก็ตาม ผลอย่างหนึ่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนบริเวณนี้ ก็คือการเกิดรอยร้าวในฉนวน (ขนาดหลายเซนติเมตร) จากด้านปลายของ Slot ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ารอยร้าวเหล่านี้จะถูกพัฒนาไปถึงขั้นที่สามารถตรวจสอบสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนได้ (จัดเป็นผลข้างเคียงจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด)

## 2.6 ฐานข้อมูลของผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2015 [2]

ทางบริษัท IRIS ได้ทำการเก็บข้อมูล Data base ของผลการวัดดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้อมูลล่าสุดของปี 2015 อยู่ที่ 550,000 ข้อมูลซึ่งผู้ใช้งานสามารถใช้ข้อมูลนี้มาเปรียบเทียบได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีระดับความรุนแรงของดิสชาร์จบางส่วนสูงหรือต่ำเพียงใด ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัด 21 kV และใช้ไฮโดรเจนในการระบายความร้อนที่ 3bar.g เมื่อนำมาแปลงเป็น Psig จะมีค่าอยู่ที่ 43.51 Psig จึงเลือกใช้ค่าของตาราง H<sub>2</sub> อยู่ที่ 31 – 50 Psig

### ตารางที่ 2.12 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิด PD พิกัด 21 kV [16]

Rated (V)	>19 kV		
H <sub>2</sub> (Psig)	21 – 30	31 – 50	≥51
Negilible (ต่ำมาก)	43	22	10
Low (ต่ำ)	94	49	27
Typical (ปกติ)	172	90	60
Moderate (สูงปานกลาง)	217	154	398
High (สูงเกินมาตรฐาน)	246	224	987

จากตารางถ้าค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้มีค่า

- 1) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดต่ำกว่า 22 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนต่ำมาก (Negligible) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีเลิศ
- 2) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 23-49 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนต่ำ (Low) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีมาก
- 3) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 50-90 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนปกติ (Typical) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดี
- 4) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 91-154 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนสูงปานกลาง (Moderate) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพปกติ
- 5) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 155-224 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนสูง (High) หรือ สูงเกินมาตรฐานที่ควรจะเป็น

## 2.7 การวิเคราะห์สัญญาณดิสครีตบางส่วน [4]

การแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) เป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ ลักษณะของสัญญาณซึ่งมีประโยชน์มากในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ทฤษฎีเวฟเลตสามารถ นำมาประยุกต์เพื่ออธิบายลักษณะ ของสิ่งต่างๆหรือระบบใดได้เช่นอธิบายปัญหา สมการดิฟเฟอเรนเชียลที่จำลองระบบใดระบบหนึ่ง การลดขนาดข้อมูล (ภาพ สัญญาณ)

### 2.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเลต

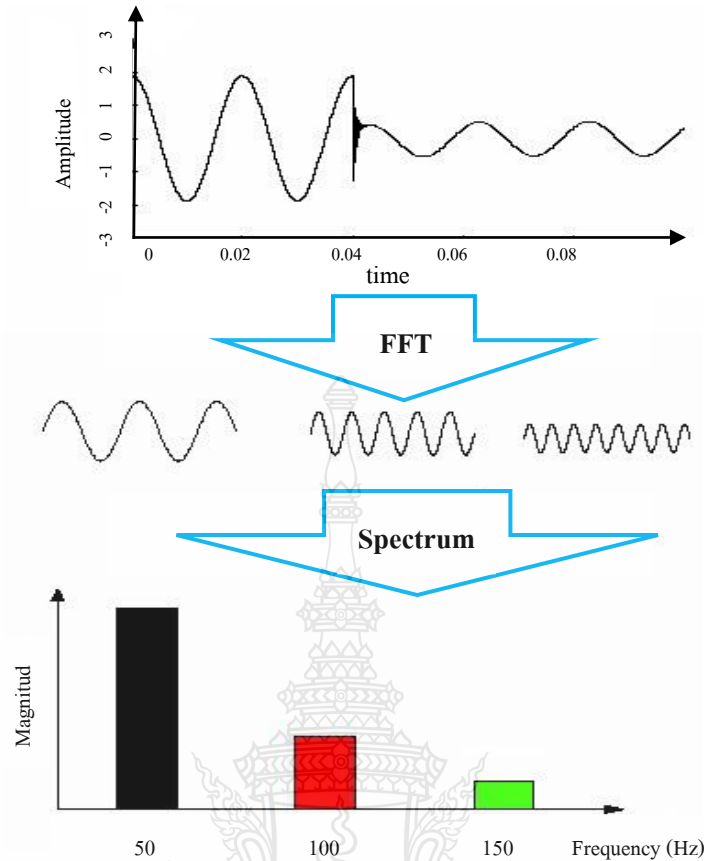
เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลาและความถี่ที่แน่นอนจะ เสียเวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่านดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถ วิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้น ทำให้สามารถพิจารณาผล กระทบของ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว การแปลงที่พัฒนาขึ้นนี้เรียกว่า “การแปลงเวฟเลต”

การแปลงเวฟเลตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณที่ได้มีการพัฒนามา จากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม แต่ได้พิจารณารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะ ทางมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายความหมายและความแตกต่างของการแปลงเวฟเลตกับการ แปลงสัญญาณในแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจและนำไปใช้งานต่อไป

#### 2.7.1.1 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform: FT)

การแปลงฟูเรียร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์ สัญญาณในโดเมนความถี่ ในสาขา การประมวลผลสัญญาณจึงนิยมการแปลงฟูเรียร์มาใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งนี้เพราะการแปลงฟูเรียร์ จะมีสัญญาณไซน์และโคไซน์เป็นองค์ประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วสัญญาณทั้งสองจะมีความสำคัญมาก เพราะเป็นสัญญาณพื้นฐานสำหรับพิจารณาสัญญาณอื่น ๆ โดยจะทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time-domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency-domain) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นการหา สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณนั่นเอง บางครั้งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการวิเคราะห์สัญญาณโดย อาศัยฟังก์ชันพื้นฐาน (basic function) ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ผลการวิเคราะห์จะออกมา ในรูปของการแตกองค์ประกอบของสัญญาณใด ๆ ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ที่มีขนาดและความถี่ที่ แตกต่างกันตลอดย่านความถี่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$F(n) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(k) \cdot e^{\left[ \frac{j2\pi kn}{N} \right]} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.14 แสดงการแปลงฟูเรียร์ (FFT) [4]

ซึ่งมีสมการในเทอมของการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสุ่ม (sampling data) ที่เรียกว่า ฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) ดังสมการที่ 2.4

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, \dots, N$

ผลการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.14 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีแม่นยำด้านความถี่ และเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary signal) แต่ข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์คือ ในกรณีที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non - stationary signal) เช่น สัญญาณทรานเซียนต์รูปแบบต่าง ๆ การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป ซึ่งข้อมูลทางด้านเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์

### 2.7.1.2 การแปลงกาเบอร์ (Gabor Transform : GT)

เป็นการแปลงสัญญาณที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นแบบแรกเพื่อแก้ปัญหาของการแปลงฟูรีเยร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงฟูรีเยร์เฉพาะช่วงเวลาและช่วงความถี่ที่กำหนดผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Windows function) ซึ่งจะเป็นลักษณะของฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian function) ซึ่งอยู่ในสมการที่ 2.5

$$g_a(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} e^{-\frac{t^2}{4a}} \quad (2.5)$$

ซึ่งมีสมการการแปลงกาเบอร์ดังนี้

$$(G_b^a f)(w) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) g_a(t-b) dt \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 เป็นสมการของการแปลงกาเบอร์จะเห็นได้ว่าการแปลงในรูปแบบนี้สามารถเลือกตำแหน่งในวิเคราะห์ที่ได้โดยการกำหนดพารามิเตอร์  $b$  ซึ่งจะให้ผลของข้อมูลทางเวลา และเลือกช่วงความถี่ด้วยพารามิเตอร์  $a$  แต่เนื่องจากการแปลงกาเบอร์ให้ฟังก์ชันหน้าต่างแบบเดียว จึงอาจไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์สัญญาณในทุกรูปแบบได้

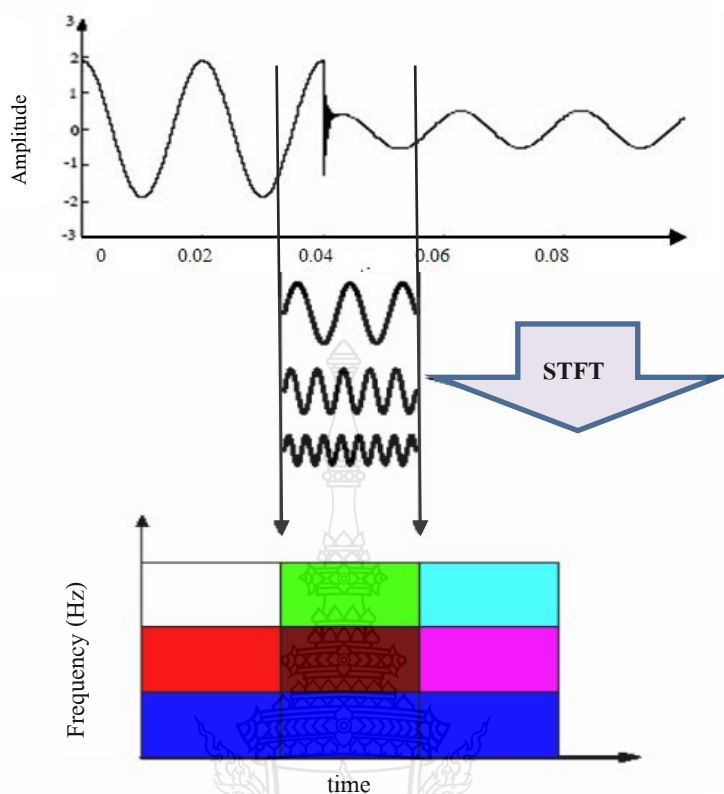
### 2.7.1.3 การแปลงฟูรีเยร์ช่วงเวลาสั้น (Short-Time Fourier Transform : STFT)

จากข้อจำกัดการแปลงฟูรีเยร์และการแปลงกาเบอร์ จึงมีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณมาสู่การแปลงฟูรีเยร์ช่วงเวลาสั้น ซึ่งเป็นกรวิเคราะห์ที่ใช้ฟังก์ชันหน้าต่างเหมือนการแปลงกาเบอร์ แต่สามารถเลือกฟังก์ชันหน้าต่าง ที่ใช้ได้จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์สัญญาณมากยิ่งขึ้น สมการการแปลงฟูรีเยร์ช่วงเวลาสั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7

$$STFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t-\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.7)$$

เมื่อ  $w(t-\tau)$  = Window function ที่ใช้ในการวิเคราะห์

โดยที่ตำแหน่งเวลาในการวิเคราะห์ถูกกำหนดโดยค่า  $\tau$  และช่วงความถี่การวิเคราะห์ กำหนดด้วยความถี่หรือความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่างนั้น ๆ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของการแตกองค์ประกอบสัญญาณในลักษณะการแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.16

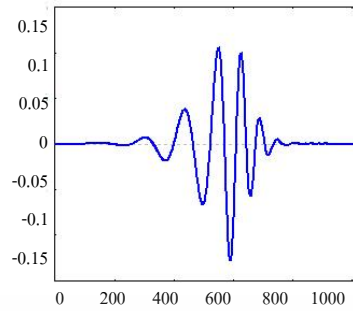


รูปที่ 2.15 แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (STFT) [4]

สังเกตได้ว่าทั้งการแปลงกaborและการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น มีลักษณะของช่วงเวลาการวิเคราะห์ที่คงที่ (Fixed resolution transform) ดังนั้นการใช้ช่วงการวิเคราะห์สัญญาณที่คงที่ในการวิเคราะห์สัญญาณทุก ๆ ช่วงความถี่จึงอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่า จึงควรจะใช้ช่วงเวลาแคบในการวิเคราะห์ ในขณะที่ความถี่ต่ำกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าจึงควรใช้ช่วงเวลาที่กว้างกว่าในการวิเคราะห์ จากเหตุผลนี้ จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ต”

### 2.7.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT)

การแปลงเวฟเล็ตจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้น ๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็ก ๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และ ขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นเวฟเล็ตชนิดหนึ่งที่เรียกว่าเวฟเล็ตแบบ Daubechies 20

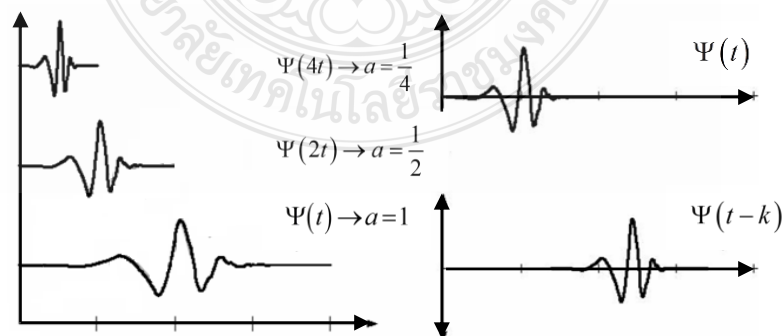


รูปที่ 2.16 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 20 [4]

การนำเวฟเล็ตหลาย ๆ อันมารวมกันเป็นกลุ่มเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใด ๆ โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันจะอยู่ในเซตของเวฟเล็ตนี้โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล (Scaling : “a”) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation : “b”) ดังนั้นถ้าให้  $\Psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของเวฟเล็ตที่ตำแหน่ง “a” , “b” ใด ๆ ที่สัมพันธ์ได้ดังนี้

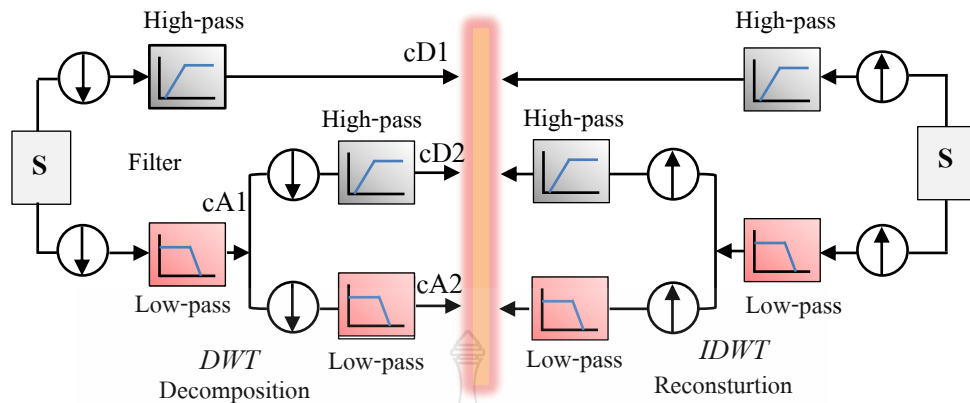
$$\Psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad (2.8)$$

$\Psi(t)$  จะเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งและถูกสเกลโดยพารามิเตอร์ “a” และ “b” ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กันและเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่จึงต้องทำการนอร์มไลซ์ด้วย  $1/\sqrt{a}$  เสมอ



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a,b ต่าง ๆ กัน [4]





รูปที่ 2.18 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต

ทฤษฎีเวฟเล็ตจะใช้อธิบายสิ่งใดสิ่งหนึ่งเหมือนการแตกสิ่งนั้นออกเป็นส่วนประกอบเล็ก ๆ ที่สัมพันธ์กันโดยชิ้นส่วนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่าสัญญาณใด ๆ สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยมีฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) การแตกกระจายเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) ก็คือการทำการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT) นั่นเอง ในทำนองเดียวกันการรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) จะเป็นการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform: IWT) ซึ่งเป็นการนำส่วนประกอบย่อย ๆ เหล่านี้มารวมกันเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังในรูปที่ 2.18

### 2.7.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT)

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้นมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่สูง และช่วงในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งสามารถแสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left[ \frac{t-b}{a} \right] dt \quad (2.9)$$

เมื่อ  $f(t)$  = สัญญาณที่ทำการแปลง

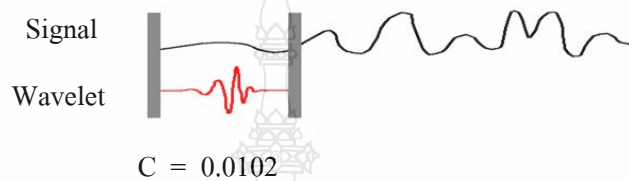
$\Psi(t)$  = เวฟเล็ตแม่

$a$  = แพลคเตอร์สเกล (scale)

$b$  = แพลคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (shifting)

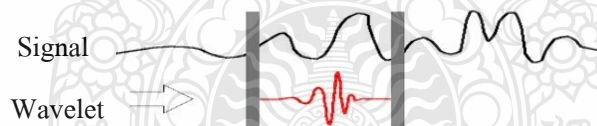
จากการสมการที่ 2.9 เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\Psi(t)$  ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\Psi(t)$  จะมีการเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

- 1) นำเวฟเล็ตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก
- 2) คำนวณสัมประสิทธิ์ (C) ซึ่งผลวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเล็ตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับการใช้รูปร่างของเวฟเล็ตแม่ด้วย



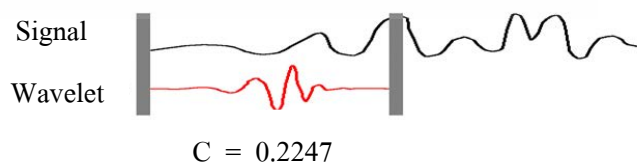
รูปที่ 2.19 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต [4]

- 3) เลื่อนตำแหน่งการวิเคราะห์ไปทางขวาและทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนกระทั่งครอบคลุมช่วงสัญญาณทั้งหมด ซึ่งจากขั้นตอนที่ 1 - 3 นี้เป็นการแปลงเวฟเล็ตตลอดช่วงสัญญาณในสเกลแรก



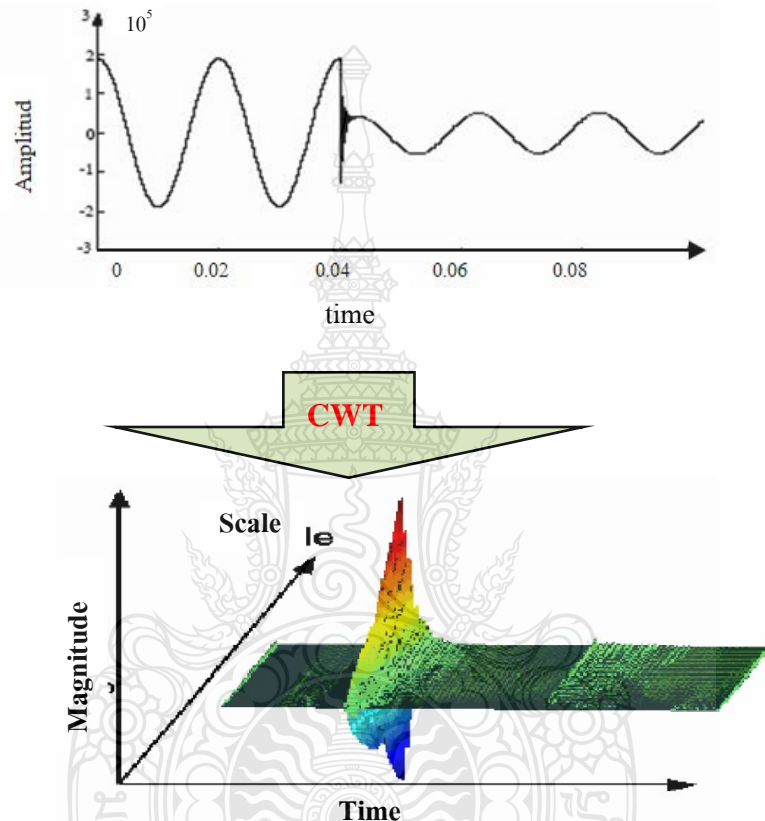
รูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต [4]

- 4) เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่ 1 - 3 ใหม่



รูปที่ 2.21 แสดงขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล [4]

5) ทำตามขั้นตอนที่ 1 - 4 จนกระทั่งครบทุกสเกลจากขั้นตอนทั้งหมดผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบประสิทธิที่ได้การวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณ และเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง เมื่อนำผลมาวิเคราะห์ทั้งหมดมาแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ (Time - Scale) ได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การแสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT) [4]

จากรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะออกมาในรูปแบบของพื้นผิวที่ต่อเนื่องกันซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดีแต่จะมีข้อเสียคือ ในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

#### 2.7.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT)

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งใน

ลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายก่อน

2.7.4.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis : MRA) จะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $b$  หลาย ๆ ตำแหน่งมารวมกันเกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันจะเกิดเป็นสัญญาณอินพุทจริง

ก่อนที่จะศึกษาถึงการวิเคราะห์สัญญาณแบบ MRA จะขออธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของสเปซเวกเตอร์ (Vector space) ก่อนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบ MRA

สเปซของเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณคือ สเปซหรือปริภูมิของสัญญาณใด ๆ ที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อย ๆ ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันพื้นฐาน” Basis function (b.f) ถ้ากำหนดให้  $a, b$  เป็นจำนวนจริงใด ๆ และ  $\hat{i}, \hat{j}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในสเปซเวกเตอร์  $V$  เสมอ ดังนั้นถ้าเวกเตอร์ใดประกอบขึ้นจากหลายเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะได้เวกเตอร์นั้นคงอยู่ในสเปซเวกเตอร์นี้ ดังนั้น  $a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k} + \dots \in V$  โดยที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{i}, \hat{j}$  จะเป็นลักษณะเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งกันและกัน ถ้าพิจารณาในลักษณะของสัญญาณอาจมองได้ว่า  $\hat{i}, \hat{j}$  คือฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นสัญญาณเล็ก ๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นสัญญาณใด ๆ

สมมติให้  $V^j$  เป็นสเปซเวกเตอร์ที่มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ถ้า  $j$  มีค่าสูงขึ้นก็แสดงว่าที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นไปจะมีจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานมากขึ้นทำให้สัญญาณที่เกิดจากการประกอบกันจากฟังก์ชันพื้นฐานมีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $j$  เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง จากข้อกำหนดเหล่านี้สามารถสรุปเป็นลักษณะสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1)  $V^{-\infty} \dots \subset V^{-1} \subset V^0 \subset V^1 \dots V^{\infty}$
- 2)  $\text{Close}_{L^2} \left[ \bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right] = L^2(\mathbb{R}) ; \mathbb{R} = \text{เซตของจำนวนเต็ม}$
- 3)  $\left[ \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right] = \{0\}$
- 4)  $V^j + V^j = V^{j+1} ; j \in \mathbb{Z}; \mathbb{Z} := \text{เซตของจำนวนเต็ม}$
- 5)  $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1} ; j \in \mathbb{Z}$

จากการที่ฟังก์ชันพื้นฐานประกอบกันเป็นสัญญาณการประมาณที่ระดับความละเอียด  $j$  ภายใน  $V^j$  จะเรียก ฟังก์ชันพื้นฐานเหล่านี้ว่า ฟังก์ชันสเกลลิง (Scaling function:  $\phi(t)$ ) สัญญาณเหล่านี้ จะเกิดที่ตำแหน่งเวลาต่าง ๆ กันของสเปซและมีความถี่เท่ากันภายในสเปซเดียวกันฟังก์ชันสเกลลิงที่ ระดับสเปซสูง (ระดับความละเอียดสูง) จะมีความถี่สูงและที่ระดับต่ำกว่าจะมีความถี่ต่ำกว่า ดังนั้น ความสัมพันธ์กันระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงของแต่ละสเปซจะเป็นดังนี้

$$f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}; j \in \mathbb{Z} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 ทำให้สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงภายใน สเปซใด ๆ ได้ดังนี้

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k); j, k \in \mathbb{Z} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 จะพบว่าระดับความละเอียดต่ำลงมาหนึ่งระดับ ฟังก์ชันพื้นฐานจะมีความถี่ ลดลงมาครึ่งละสองเท่า อาศัยลักษณะคุณสมบัติ MRA จะทำให้สามารถทำการประมาณสัญญาณ  $f_j(t) \in L^2(\mathbb{R})$  ไปอยู่ในสเปซที่ระดับความละเอียด  $j$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) \quad (2.12)$$

โดยที่  $c_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิงที่ตำแหน่ง  $k$  ใด ๆ แล้ว ประกอบขึ้นเป็น  $f(t)$  ที่ระดับความละเอียด  $j$  นั้น ๆ

จากคุณสมบัติข้อ 4 ของ MRA การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงมาจะทำให้ พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่ในสเปซอีกอันหนึ่งซึ่งจะเรียกว่า “สเปซของเวกเตอร์เวฟเล็ต” (Wavelet vector space:  $W^j$ ) จะประกอบด้วย ฟังก์ชันพื้นฐานเช่นเดียวกันจะเรียกว่า “ฟังก์ชันเวฟ เล็ต” (Wavelet function  $\psi(t)$ ) ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเล็ต ที่ระดับความละเอียด ใด ๆ ได้ดังนี้

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k); j, k \in \mathbb{Z} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่อย่าง ต่อเนื่องจะเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ต  $\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k)$  ที่มีการเลื่อนตำแหน่งและ เปลี่ยนความถี่แบบไม่ต่อเนื่องโดยที่  $a = 2^{-j}, b = 2^{-j} k$

ถ้ากำหนดให้  $g_i(t)$  เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐานและ  $\Psi_{j,k}(t)$  ภายในสเปซเดียวกันมารวมกันเป็นสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า

$$g_i(t) = \sum_k d_k^j \Psi_{j,k}(t) \quad (2.14)$$

โดยที่  $d_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือค่าน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ตำแหน่งนั้น ๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g_i(t)$  ดังนั้นความสัมพันธ์  $V^j + W^j = V^{j+1}$  และจากสมการที่ 2.12 และ 2.14 จะได้

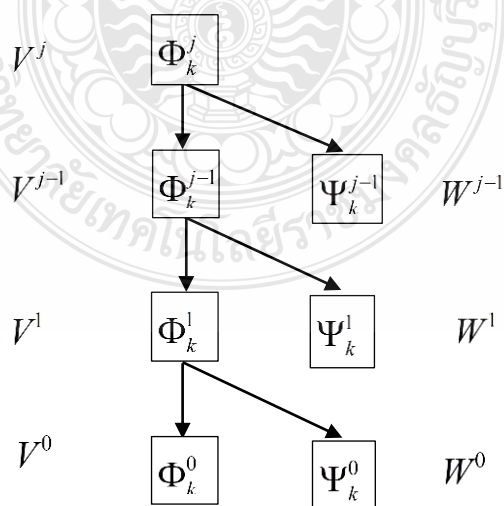
$$f_{j+1} = f_i + g_i \quad (2.15)$$

สมมติให้  $f(t) \in V^{j+1}$  จะสามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  ให้มีความละเอียดน้อยลงได้จากที่สมการ  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ซึ่งในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปได้เรื่อยจนกระทั่ง  $j = 0$  ดังนั้นจะได้เป็นความสัมพันธ์ว่า

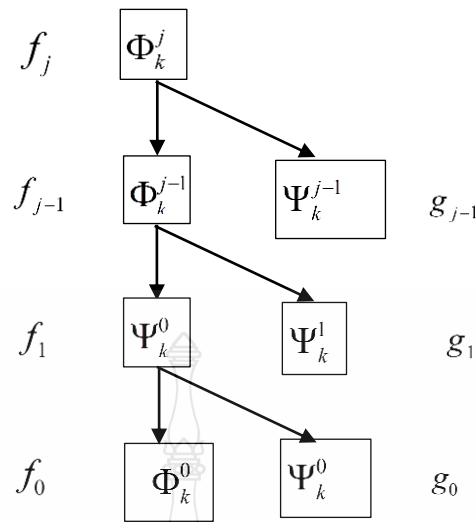
$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 \dots + W^j \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกัน  $f_{j+1}$  ก็สามารถแตกกระจายเป็น  $f_j$  และ  $g_j$  ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพการแตกกระจายสเปซและสัญญาณได้ดังรูปที่ 2.23 และ 2.24  $f$  และ  $g$  ที่ลดระดับความละเอียดลงมาจะมีความถี่ของฟังก์ชันพื้นฐานลดลงครึ่งละสองเท่าเสมอและเราสามารถแจกแจงสัญญาณ  $f(t)$  อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเล็ตได้ดังนี้

$$f(t) = f_i + g_i + g_{i+1} + g_{i+2} \dots + g_\infty \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.23 ลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของสเปซของเวกเตอร์



รูปที่ 2.24 ลักษณะการกระจาย (Decomposition) สัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่าง ๆ

รูปแบบการแตกกระจายสัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ในสเปซ  $V^0$  ไปจนถึงระดับความละเอียดที่  $j$  ในรูปของสัมประสิทธิ์  $C_j(m)$  และ  $d_j(m)$  นี้เรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform: DWT)” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left[ \frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right] dt \quad (2.18)$$

โดยที่  $a_0^m$  คือ สเกล  
 $nb_0 a_0^m$  คือ การเลื่อนตำแหน่ง  
 $m, n$  คือ เลขจำนวนเต็ม

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้น สมการที่ (2.18) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (2.19)

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \Psi \left[ \frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m} \right] \quad (2.19)$$

เมื่อ  $m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูล  
 $m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล  
 $k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง



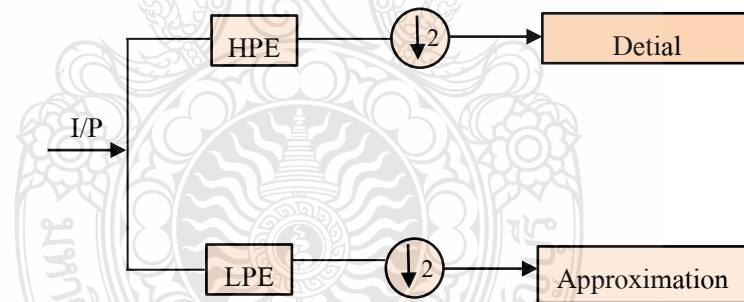
เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ที่ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ( $a_0 = 2; b_0 = 1$ ) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ต แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีชื่อเรียกว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \Psi \left[ \frac{n - k2^m}{2^m} \right] \quad (2.20)$$

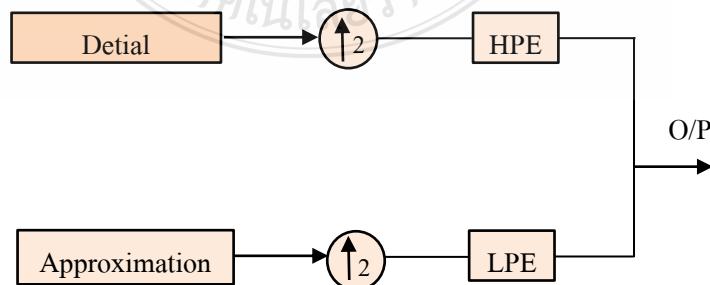
ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงค์ดังนี้

#### 2.7.4.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

ขบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการออกเทฟฟิลเตอร์แบงค์ (Octave filter banks) เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่าซึ่งเปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบบวิธีที่มีอัตราการลดลงเท่าเหมือนกับแบนวิธของฟังก์ชันหน้าต่างในขณะนั้นนั่นเอง ดังนั้นจะสามารถนำเอาหลักการของฟิลเตอร์แบงค์มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้ ก่อนที่จะอธิบายการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในลักษณะฟิลเตอร์แบงค์จะขออธิบายหลักการพื้นฐานของฟิลเตอร์แบงค์ก่อน



รูปที่ 2.25 แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ

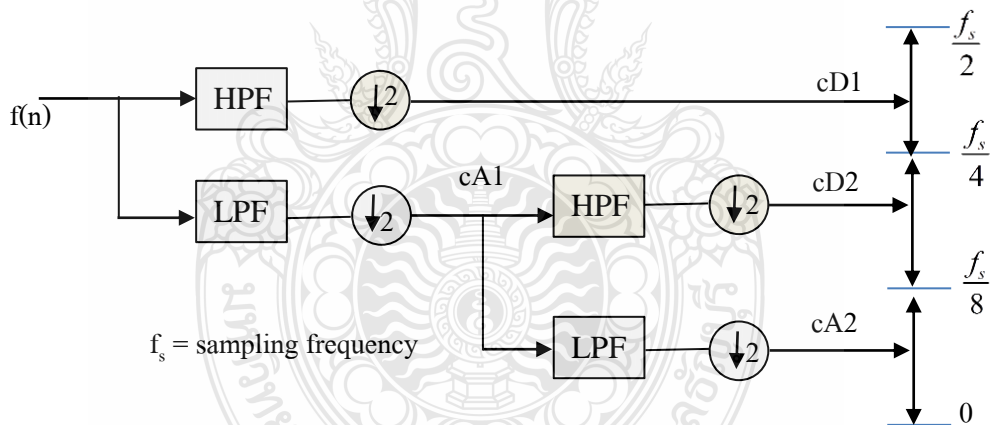


รูปที่ 2.26 แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ



ฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ (two filter banks) เป็นการแยกสัญญาณอินพุต ออกเป็นสองส่วนโดยแบ่งเป็นส่วนของความถี่ต่ำและส่วนของความถี่สูง ดังนั้นฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณจึงประกอบด้วยส่วนที่เป็น ตัวกรองความถี่ต่ำ (low pass filter:L) และตัวกรองความถี่สูง (high pass filter : H) ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์ ฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณ (two – channel analysis filter banks) และเป็นโครงสร้างที่กลับกันกับการสังเคราะห์การสร้างกลับฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ (reconstruction two – channel synthesis filter banks) ดังรูป 2.26 โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่ต่ำและความถี่สูง คือ L และ H กับตัวกรองการสร้างกลับ (Reconstruction) ความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ L',H' มีความสัมพันธ์กันในลักษณะที่เรียกว่า “Quadrature mirror filters”

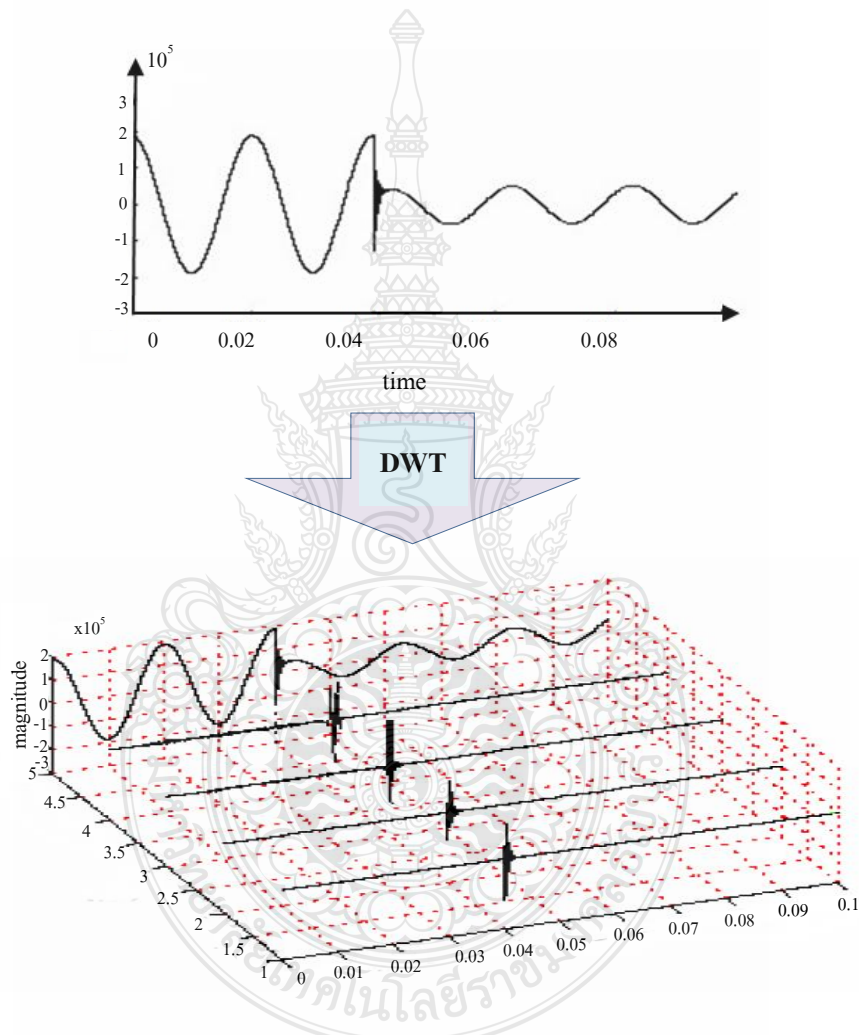
ลักษณะของการวิเคราะห์ออกเทพฟิลเตอร์แบงค์ (Octave analysis filter banks) จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Structure) ซึ่งเป็นการสร้างเอาฟิลเตอร์แบงค์แบบสองช่องสัญญาณมาต่อเรียงกัน โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ในกรณีที่ทำการแปลงเวฟเล็ตซ้ำในแนวของส่วนความถี่ต่ำเป็นลักษณะของ Dyadic tree structure ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งโครงสร้างในรูปนี้จะเป็นการแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform : DWT)



รูปที่ 2.27 ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทพฟิลเตอร์แบงค์

จากรูปที่ 2.27 เป็นลักษณะซึ่งเป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องในลักษณะของ dyadic tree structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่การสุ่ม =  $f_s$  (sampling rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ 2 ช่องสัญญาณในสเกลที่  $1(2^1)$  ซึ่งสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ ส่วนความถี่สูงหรือ detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4} \text{ Hz}$  และความถี่ต่ำ หรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - 0 \text{ Hz}$  และในการวิเคราะห์ในสเกลที่  $2(2^2)$  ก็ทำ

ได้โดยการคูณกรองชุดเดิมมาวิเคราะห์ต่อจาก Approximation 1 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็นส่วน ความถี่สูงสเกลที่ 2 หรือ detail 2 ซึ่งมีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{8} Hz$  และส่วนความถี่ต่ำสเกลที่ 2 หรือ Approximation 2 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{8} - 0Hz$  ถ้าทำการวิเคราะห์ต่อในสเกลที่ 3 ก็ยังสามารถทำซ้ำ ในลักษณะเดิม ในทางกลับกันก็สามารถที่จะรวมสัญญาณที่ทำการกระจายในหลาย ๆ ช่วงความถี่ให้ กลับมาเป็นสัญญาณเดิมได้ ซึ่งผลการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องได้แสดงอยู่ในรูป 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT) ในสเกลที่ 1-4 [4]

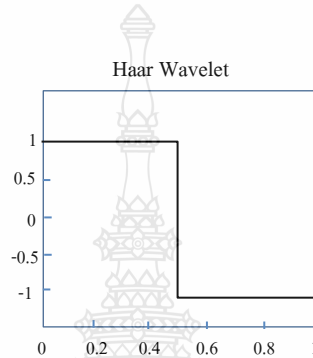
### 2.7.5 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet)

ในการวิเคราะห์สัญญาณใด ๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสม แล้วยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองนั้น ๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเล็ต นั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเล็ตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิด

ย่อย ๆ ลงไปอีกและเนื่องจากรูปแบบของเวฟเล็ตแม่ที่หลากหลายนี้เองจึงทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเลือกเวฟเล็ตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงเวฟเล็ตแม่ดังต่อไปนี้

### 2.7.5.1 Haar Wavelet

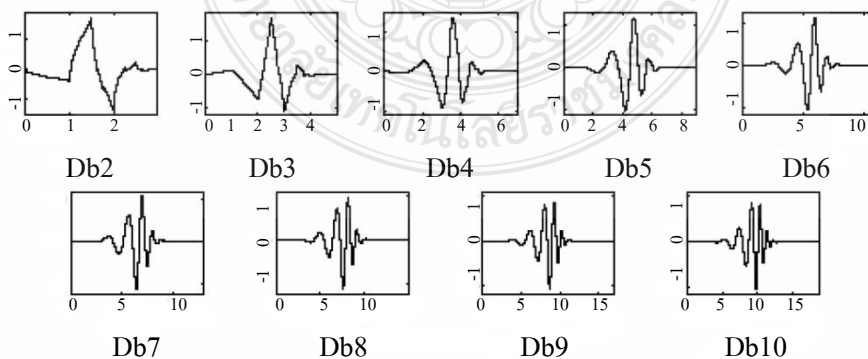
เวฟเล็ต Haar เป็นเวฟเล็ตเป็นเวฟเล็ตชนิดแรกที่เริ่มต้นใช้กันและง่ายที่สุด เวฟเล็ตชนิดนี้เป็นชนิดที่ไม่ต่อเนื่องกันและมีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของ Haar Wavelet [4]

### 2.7.5.2 Daubechies Wavelet

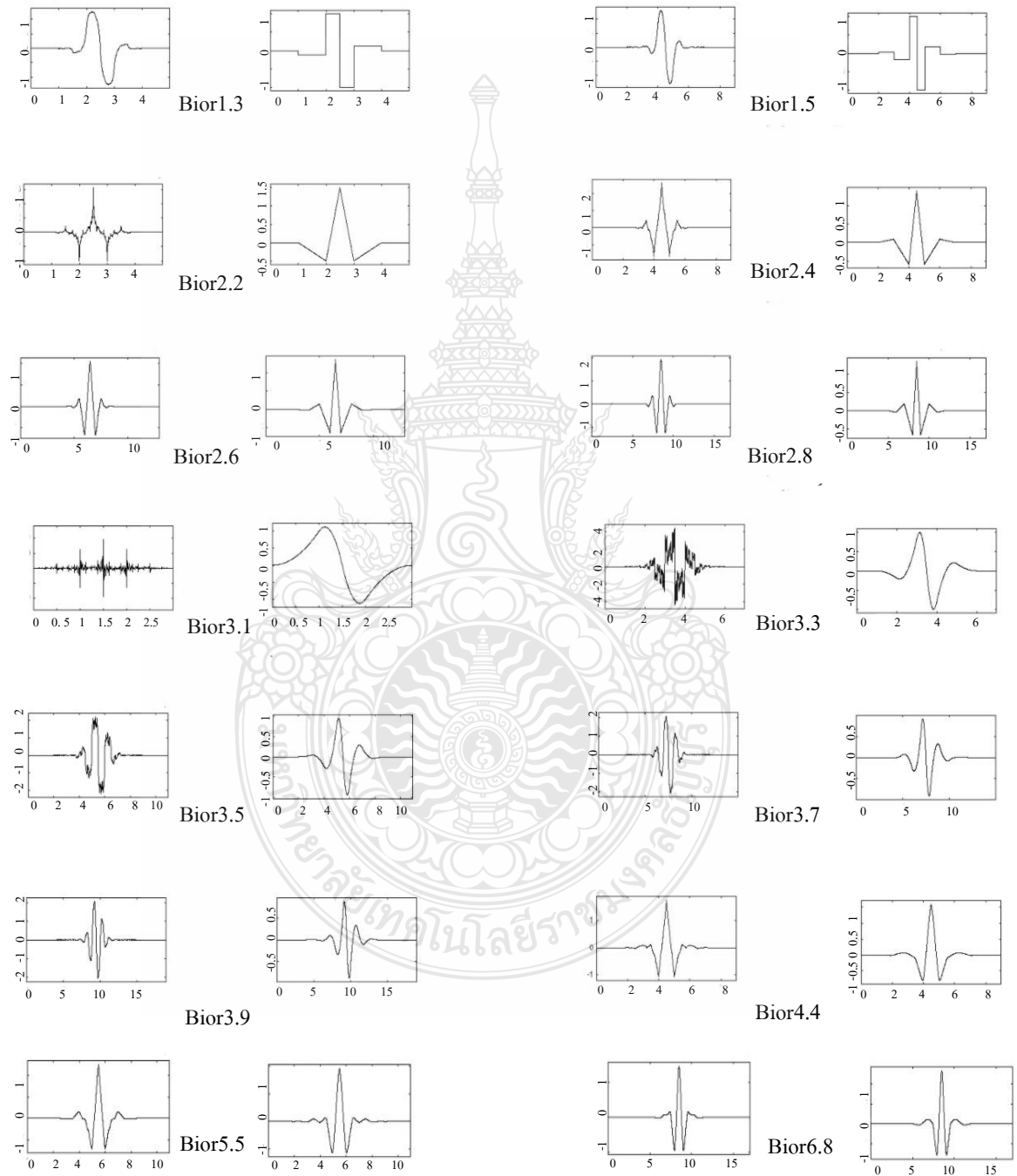
Ingrit Daubechies เป็นนักวิจัยทางด้านเวฟเล็ตหนึ่งคน คนสำคัญของโลกที่ได้ค้นพบสิ่งที่เรียกว่า “ ขอบเขตที่แน่นอนของเวฟเล็ตเชิงเส้นตั้งฉากปกติ ” (compactly - supported orthonormal wavelet) เป็นการสร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์เวฟเล็ตที่ไม่ต่อเนื่องในทางปฏิบัติ โดยใช้ชื่อเวฟเล็ตตระกูลนี้ว่า “Daubechies” ซึ่งเขียนในรูป dbN โดยที่ N คือ การแสดงถึงลำดับ (order) หรือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะของ Daubechies Wavelet [4]

### 2.7.5.3 Biorthogonal Wavelet

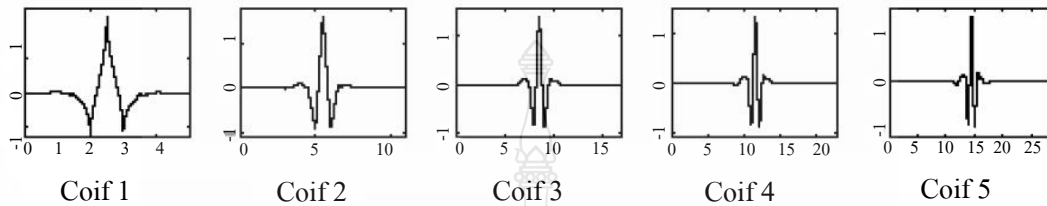
เวฟเล็ตตระกูลนี้แสดงคุณสมบัติของเฟสเชิงเส้น ซึ่งใช้ในการฟื้นฟูสัญญาณและภาพ โดยใช้เวฟเล็ต 2 ตัว ตัวหนึ่งสำหรับแยกตัวประกอบ และอีกตัวหนึ่งสำหรับการสร้างใหม่แทนที่อีกตัวหนึ่งที่เหมือนกัน ที่ได้รับความสนใจในคุณสมบัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะของ Biorthogonal Wavelet [4]

#### 2.7.5.4 Coiflets Wavelet

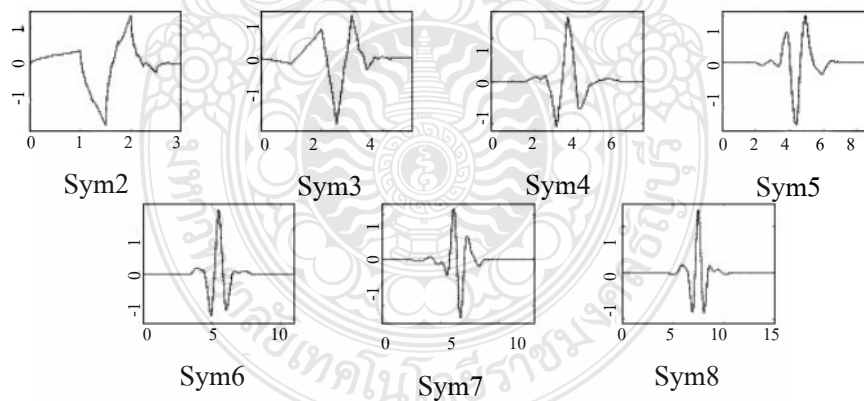
เวฟเลตชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นโดย L. Daubechies โดยความต้องการของ R.Coifman เวฟเลตชนิดนี้จะมีฟังก์ชันพื้นฐานในลักษณะเกือบไม่สมมาตร (Nearly Asymmetric) ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของ Coiflets Wavelet [4]

#### 2.7.5.5 Symlets Wavelet

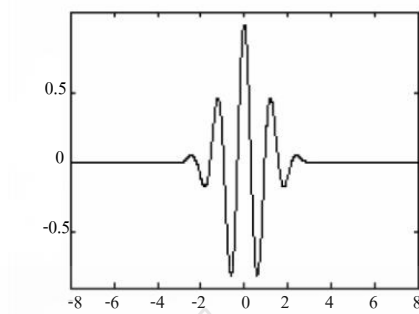
เวฟเลตชนิด Symlets จะมีสัดส่วนที่สมมาตรเกือบทั้งหมด ซึ่งเวฟเลต นี้ถูกนำเสนอ โดย L.Daubechies ได้ปรับปรุงมาจากเวฟเลตตระกูล db ซึ่งคุณสมบัติของเวฟเลตทั้งสองตระกูลนี้มีความคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของ Symlets Wavelet [4]

#### 2.7.5.6 Morlet Wavelet

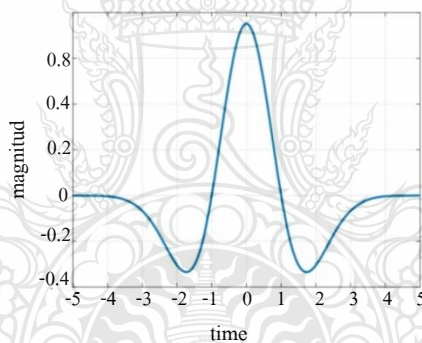
เวฟเลตชนิดนี้จะไม่มีการสเกลลิง (scaling function) แต่จะมีความแน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะของ Morlet Wavelet [4]

#### 2.7.5.7 Mexican Hat Wavelet

เวฟเล็ตนี้ไม่มีฟังก์ชันการสเกลลิง (scaling function) และมีที่มาจากฟังก์ชันอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น เกาส์เซียน (the second derivative function of the Gaussian probability density function) ดังแสดงในรูปที่ 2.35

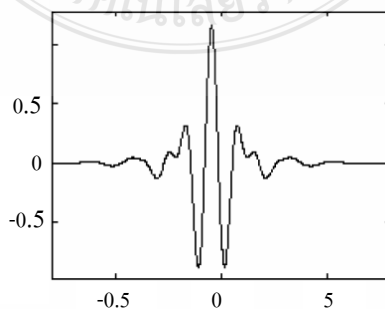


รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของ Mexican Hat Wavelet [4]

#### 2.7.5.8 Meyer Wavelet

เวฟเล็ตชนิด Meyer และฟังก์ชันการสเกลลิงถูกกำหนดด้วยโดเมนความถี่ ดังแสดงใน

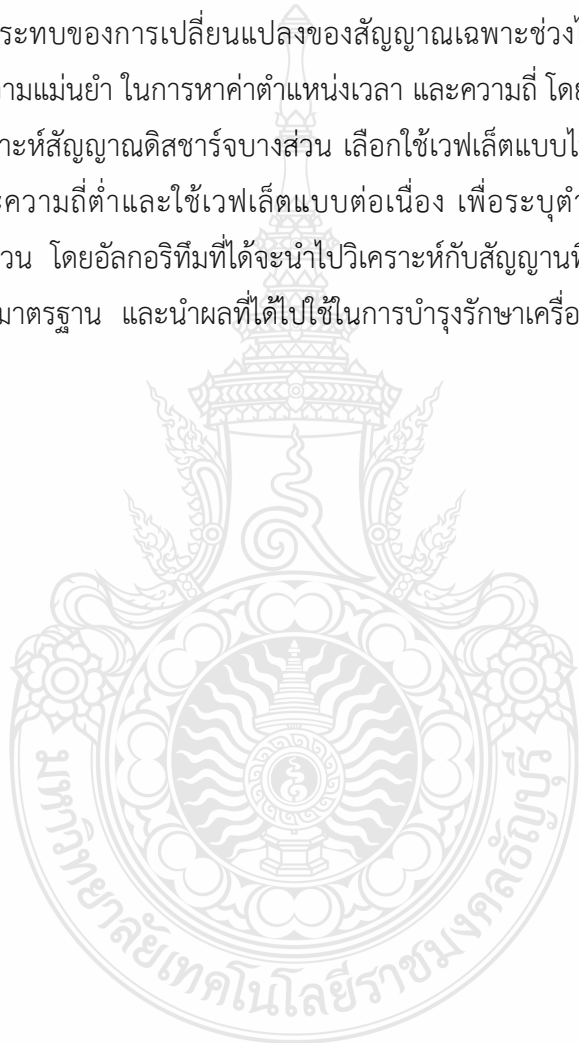
รูปที่ 3.36



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะของ Meyer Wavelet [4]

## 2.8 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารูปแบบและวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัด 21 kV พบว่าสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนมีรูปแบบของสัญญาณที่เป็นลักษณะเฉพาะ รูปร่างและขนาดของสัญญาณขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด การวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนด้วยการแปลงเวฟเล็ต เป็นการวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถเลือกช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจไปวิเคราะห์ได้ ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ทำให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำ ในการหาค่าตำแหน่งเวลา และความถี่ โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สร้างอัลกอริทึม เพื่อใช้วิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วน เลือกใช้เวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงและความถี่ต่ำและใช้เวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง เพื่อระบุตำแหน่งเวลา-ความถี่ ที่เกิดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน โดยอัลกอริทึมที่ได้จะนำไปวิเคราะห์กับสัญญาณที่วัดได้จริง เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน และนำผลที่ได้ไปใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป



## บทที่ 3

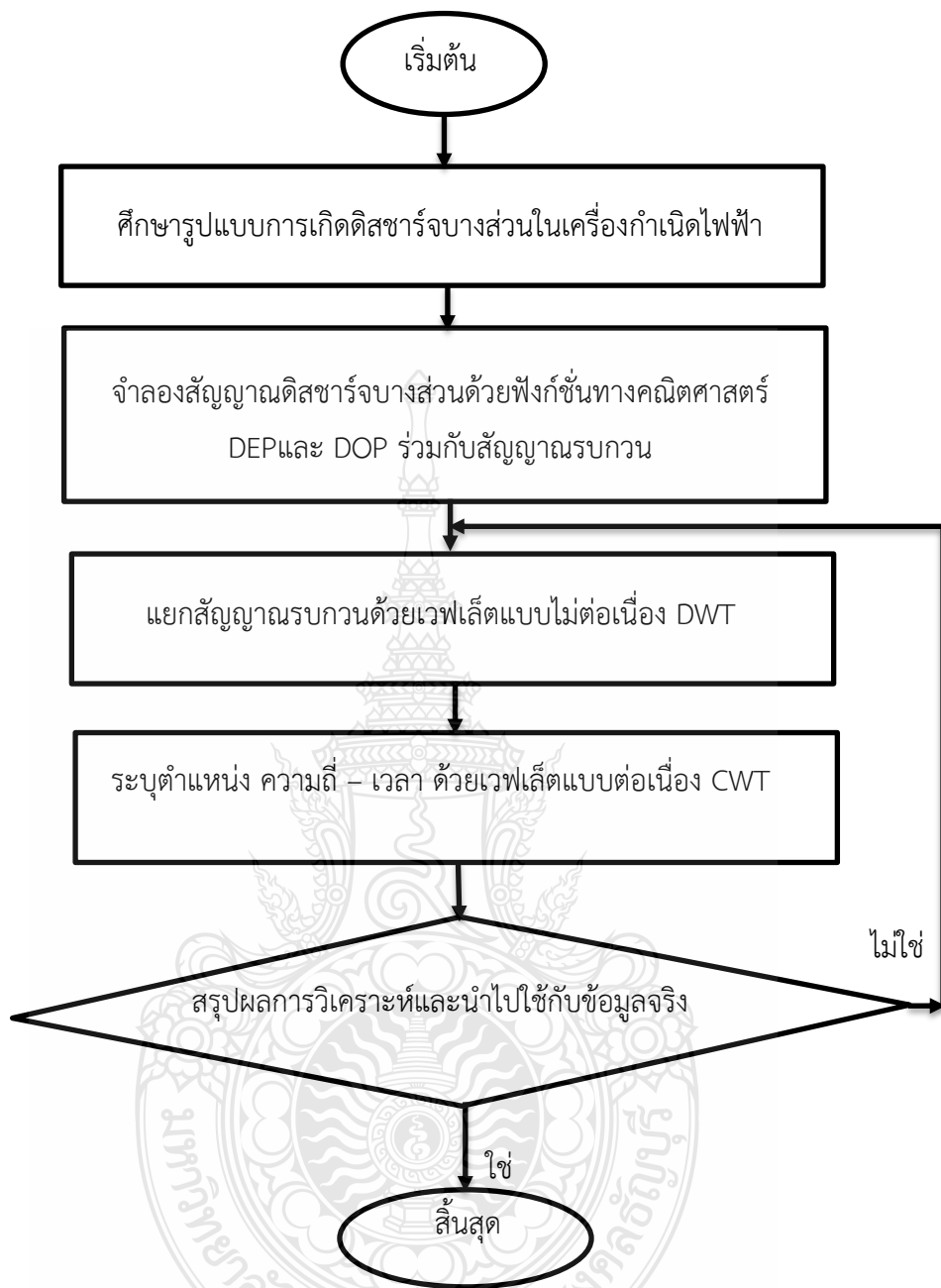
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ออกแบบสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณ นำผลและข้อมูลวิเคราะห์หาสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ได้สร้างแบบจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน 4 รูปแบบและอีก 1 สัญญาณจริงจากโรงไฟฟ้า เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง แยกสัญญาณรบกวนความถี่สูง และความถี่ต่ำ ออกจากสัญญาณจำลอง นำผลที่ได้ของสัญญาณมาวิเคราะห์หาค่าความถี่-เวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง เพื่อระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำอัลกอริทึมที่ได้ไปทดลองใช้กับสัญญาณจริงที่วัดได้ เปรียบเทียบผลกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ณ บริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัดซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน มีขนาดกำลังผลิตรวมทั้งสิ้น 1,400 เมกะวัตต์

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาแบบดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 3.1.2 จำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์
  - 3.1.2.1 สัญญาณ DOP
  - 3.1.2.2 สัญญาณ DEP
- 3.1.3 วิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยการแปลงเวฟเล็ต
  - 3.1.3.1 ลดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง DWT
  - 3.1.3.2 หาค่าความถี่-เวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง CWT
- 3.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์
- 3.1.5 นำอัลกอริทึมที่ได้ไปใช้กับข้อมูลจริงที่ได้จากโรงไฟฟ้า
- 3.1.6 เปรียบเทียบผลที่ได้กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B





### 3.2 การจำลองสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [12]

ปัญหาหลักในการวิเคราะห์สัญญาณ ดิสชาร์จบางส่วน คือ การหาขนาดรูปร่างของสัญญาณ ดิสชาร์จบางส่วนในความถี่ที่มีสัญญาณรบกวนสูง สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีทั้งสัญญาณรบกวนแบบภายใน และสัญญาณรบกวนแบบภายนอก ในการลดสัญญาณรบกวน วิธีการแปลงเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณรบกวน การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการลดสัญญาณรบกวน ได้ทำการจำลองสัญญาณดิสชาร์จ

บางส่วนที่เกิดขึ้น และหาผลทดสอบเทียบกับผลอ้างอิง และนำผลทดสอบไปใช้กับข้อมูลที่วัดได้จริง ในงานวิจัยนี้ ทำการจำลองสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน 4 สัญญาณ และอีก 1 สัญญาณเป็นค่าที่วัดได้จริง จากโรงไฟฟ้าราชบุรี [16]

ในการตรวจวัดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน รูปร่างและขนาดของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับ วงจรการตรวจจับจะใช้วงจรอิมพีแดนซ์ของ RC หรือ RLC Circuit โดยพัลส์แรงดันขาออกในวงจรอิมพีแดนซ์ RC จะแสดงเป็นพัลส์เอ็กซ์โปเนนเชียลที่หัดตัว damped exponential pulse (DEP) ดังสมการที่ 3.1 และพัลส์แรงดันขาออกในวงจรอิมพีแดนซ์ RLC จะแสดงเป็นพัลส์แอมพลิจูดที่มีการสั่นสะเทือน damped oscillatory pulse (DOP) ดังสมการที่ 3.2

$$DEP(t) = A \left( e^{-\frac{(t-t_0)}{t_1}} - e^{-\frac{(t-t_0)}{t_2}} \right) \quad (3.1)$$

$$DOP(t) = A \sin(2\pi f_c (t-t_0)) \left( e^{-\frac{(t-t_0)}{t_1}} - e^{-\frac{(t-t_0)}{t_2}} \right) \quad (3.2)$$

โดยกำหนดให้

A = ค่าสูงสุดของสัญญาณพัลส์

$t_1, t_2$  = ค่าสัมประสิทธิ์ Damping

$t_0$  = เวลาที่เกิดขึ้น

$f_c$  = ความถี่ของการสั่นของสัญญาณ DOP

รูปแบบของสัญญาณ DEP แสดงดังรูปที่ 3.1 และสัญญาณ DOP แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยการจำลองสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.1 โดยกำหนดให้ A และ  $f_c$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 5 mV. และ 500 kHz ตามลำดับ Sampling rate ที่ 1 MHz. ทำการจำลองสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน ตามรูปแบบ DEP และ DOP โดยมีสัญญาณรบกวนแบบ white Gaussian noise (WGN) ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน (SNR) -5dB. รูปร่างของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 จำลองสัญญาณ DEP และ DOP ที่มีการรบกวนระดับ WGN at -10 dB and discrete spectral interference (DSI). ดังสมการที่ 3.3

$$e(t) = \sum_{i=1}^5 (c + m \times \sin(2\pi f_m t)) \times \sin(2\pi f_i t) \quad (3.3)$$

โดยกำหนดให้

c คือ Amplitude carrier wave

$m$  คือ ค่า amplitude modulating signal

$f_m$  คือ ความถี่ modulating signal

$f_c$  คือ ความถี่ carrier wave

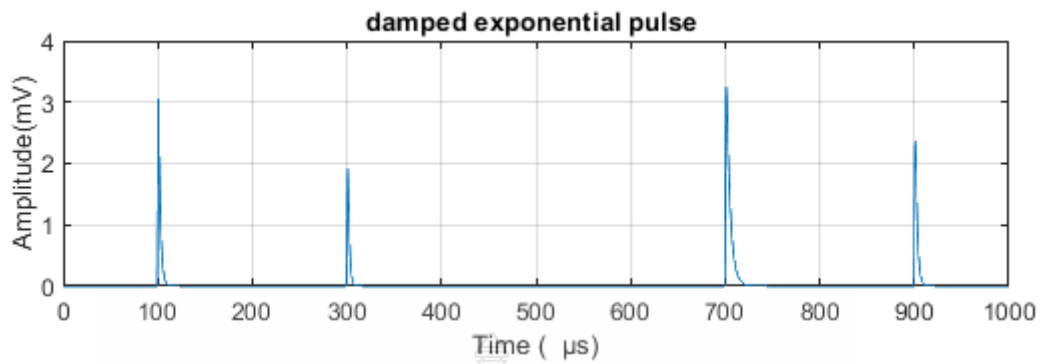
โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ มีค่า  $c = 1$ ,  $m=0.4$ ,  $f_m = 1$  kHz,  $f_c = 400$  kHz, 500 kHz, 600 kHz, 700 kHz และ 800 kHz, ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้การจำลองสัญญาณดิจิตอลบางส่วน

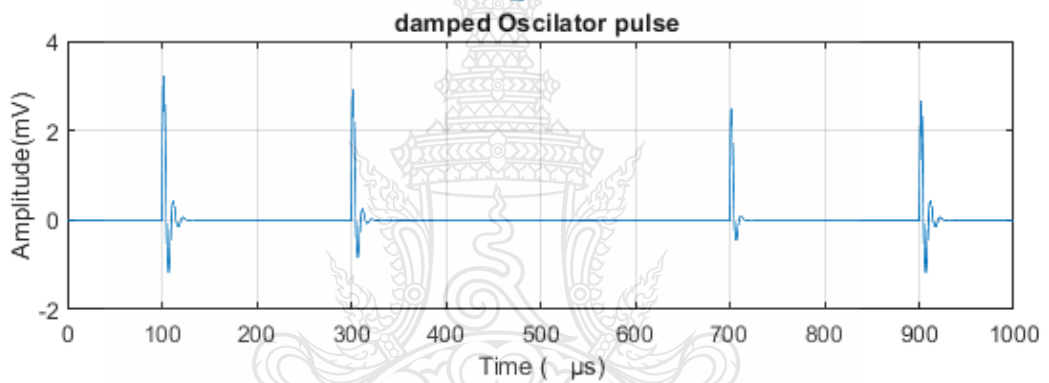
ชนิดสัญญาณ	จำนวนพัลส์	$t_0$ ( $\mu$ s)	$t_1$ ( $\mu$ s)	$t_2$ ( $\mu$ s)
DEP	1	100	2	0.3
	2	300	1.5	0.5
	3	700	4	0.5
	4	900	2	0.5
DOP	1	100	5	0.1
	2	300	4	0.1
	3	700	3	0.2
	4	900	5	1

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะสมบัติของ DSI ที่ใช้ในการจำลองสัญญาณ

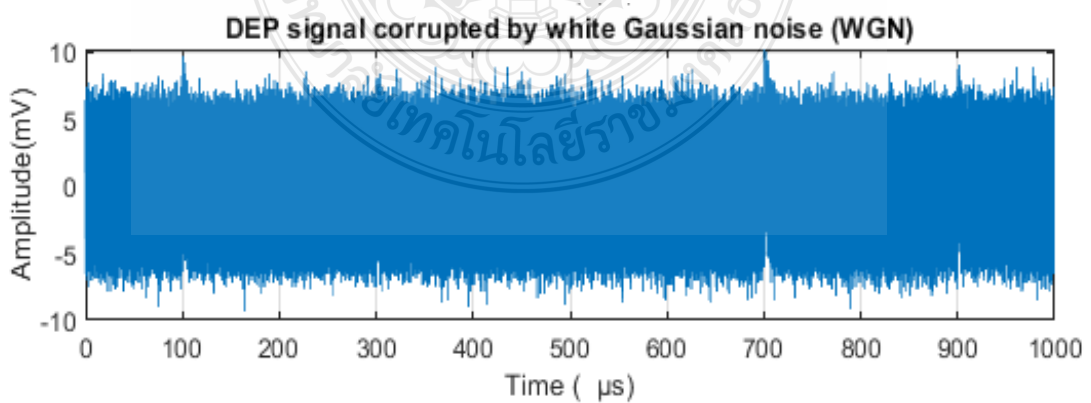
F(kHz)	400	500	600	700	800
INR(dB)	-1.78	4.24	-7.8	1.74	6.18
(DEP)					
INR(dB)	7.29	8.58	0.91	-14.6	-2.6
(DOP)					



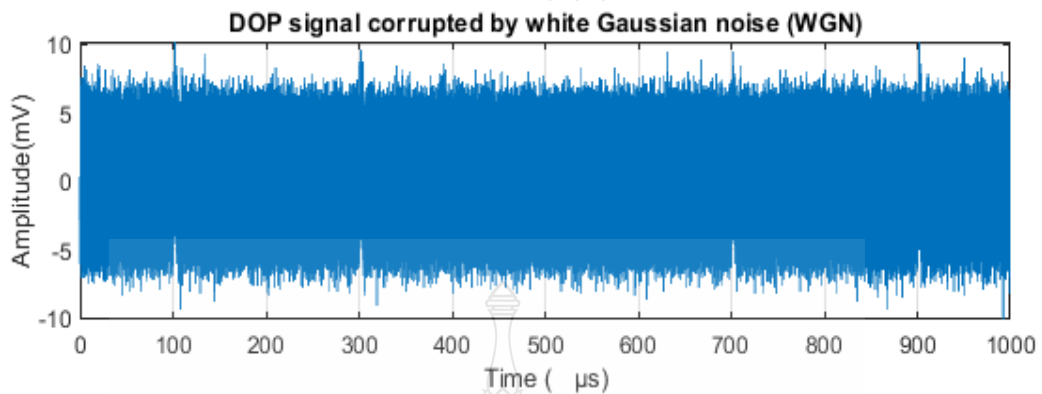
รูปที่ 3.1 รูปแบบสัญญาณ Damped exponential pulse (DEP)



รูปที่ 3.2 รูปแบบสัญญาณ Damped oscillatory pulse (DOP)



รูปที่ 3.3 สัญญาณ DEP ร่วมกับ white Gaussian noise (WGN) at SNR -5 Db



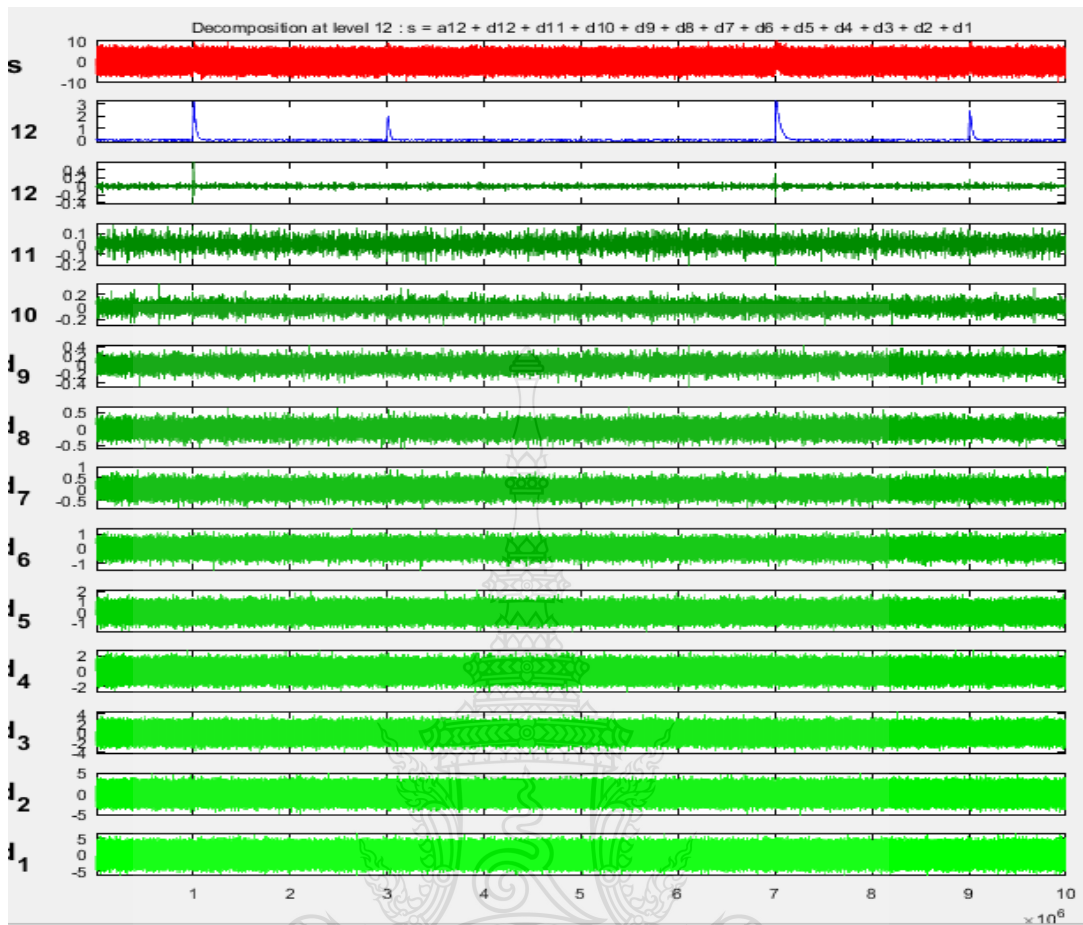
รูปที่ 3.4 สัญญาณ DOP ร่วมกับ white Gaussian noise (WGN) at SNR -5 dB

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 สามารถจำลองสัญญาณ DEP และสัญญาณ DOP ได้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และสัญญาณ DEP และสัญญาณ DOP ร่วมกับ white Gaussian noise แสดงดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 สัญญาณทั้งสองดังกล่าวจะนำไปวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตในขั้นตอนต่อไป

### 3.3 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

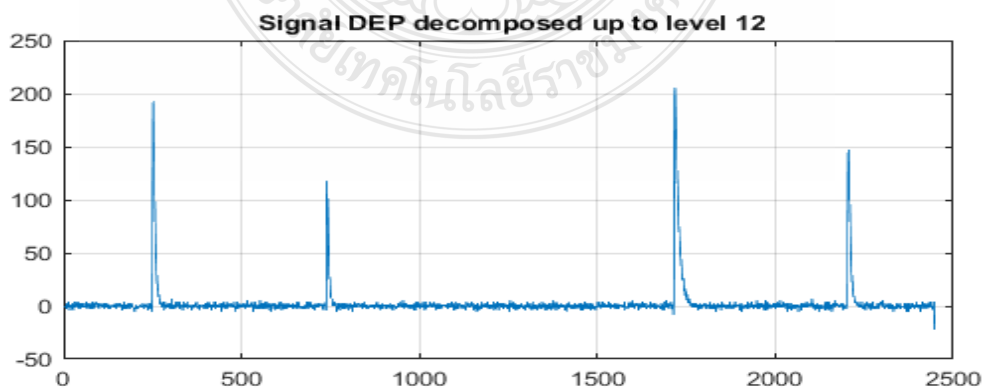
3.3.1 ผลการแยกสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง

เลือก Daubechies4 เป็นเวฟเล็ตแม่ ใช้เพื่อลดสัญญาณ DEP และ สัญญาณ DOP [6] โดยลดสัญญาณลงในระดับ 12 ผลลัพธ์การขจัดสัญญาณรบกวนตามเวฟเล็ตแม่ แสดงในรูปที่ 3.5-3.9



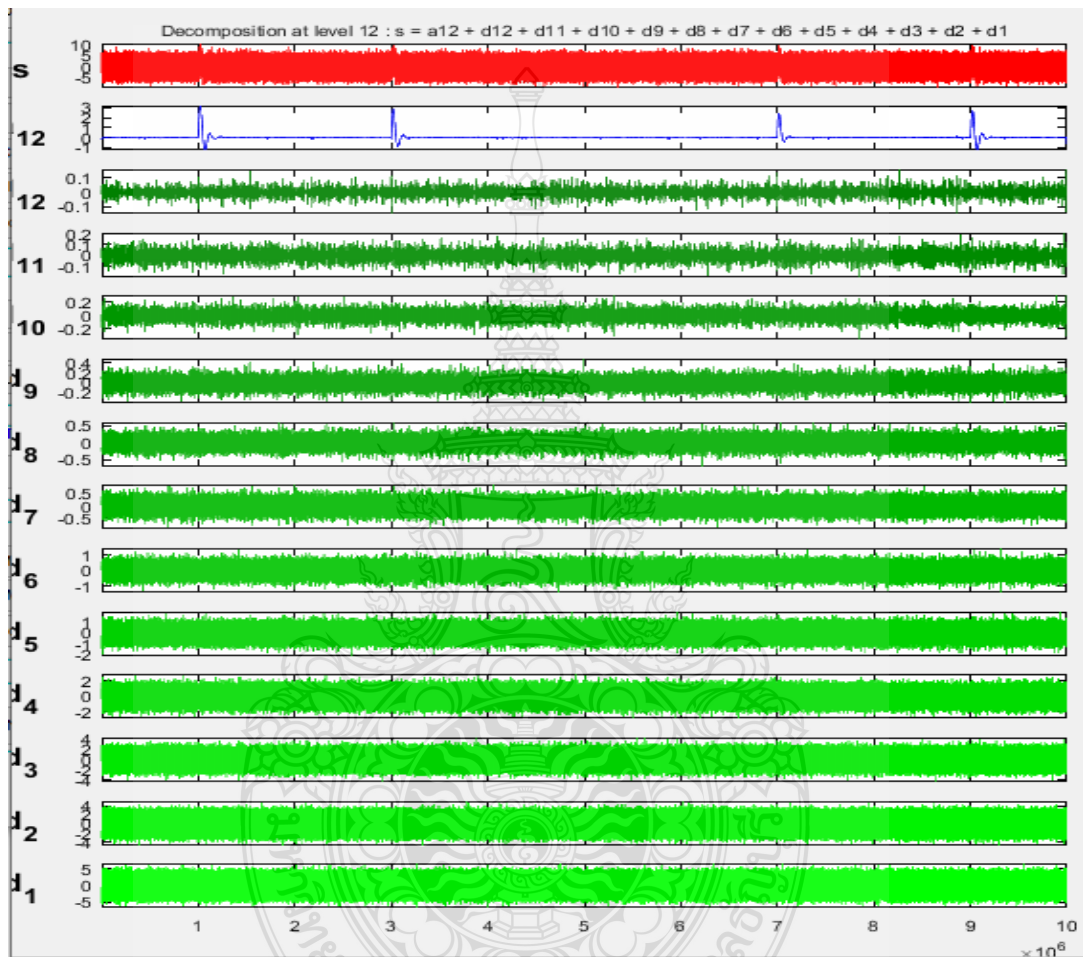
รูปที่ 3.5 DWT coefficients (d1-d12, a12) of DEP type signal decomposed up to level 12 using db4 mother wavelet

เลือก Daubechies 4 เป็นเวฟเล็ตแม่ ในระดับการแปลงเวฟเล็ตเท่ากับ 12 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ของสัญญาณ DEP แสดงดังรูปที่ 3.5



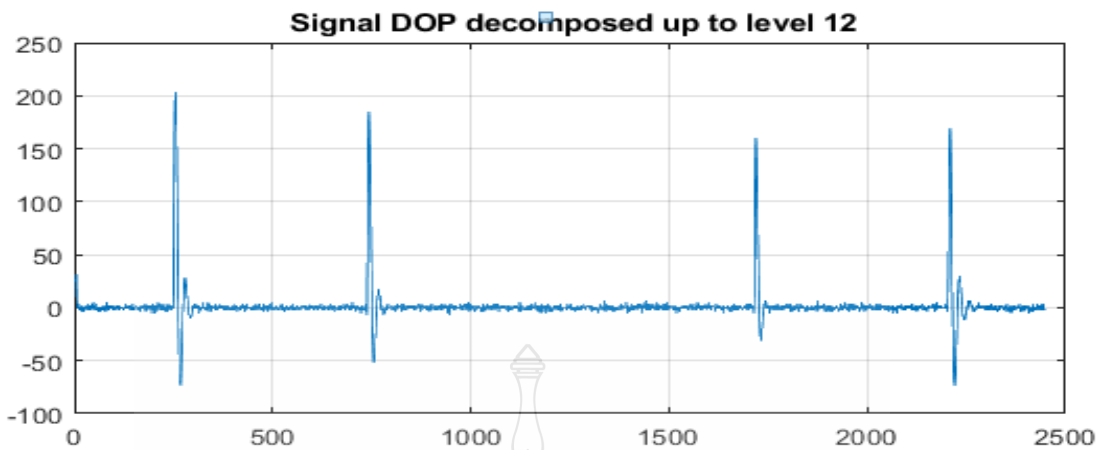
รูปที่ 3.6 De-noised DEP type signal ระดับ 12

จากรูปที่ 3.6 ผลของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องในระดับ 12 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนในระดับ 12 ลดลงเป็นอย่างมากและยังคงรักษารูปร่าง ตำแหน่งของสัญญาณต้นแบบเดิมอยู่อย่างครบถ้วน โดยสัญญาณที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ระบุตำแหน่งค่าเวลา-ความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง ต่อไป



รูปที่ 3.7 DWT coefficients (d1-d12, a12) of DOP type signal decomposed up to level 12 using db4 mother wavelet.

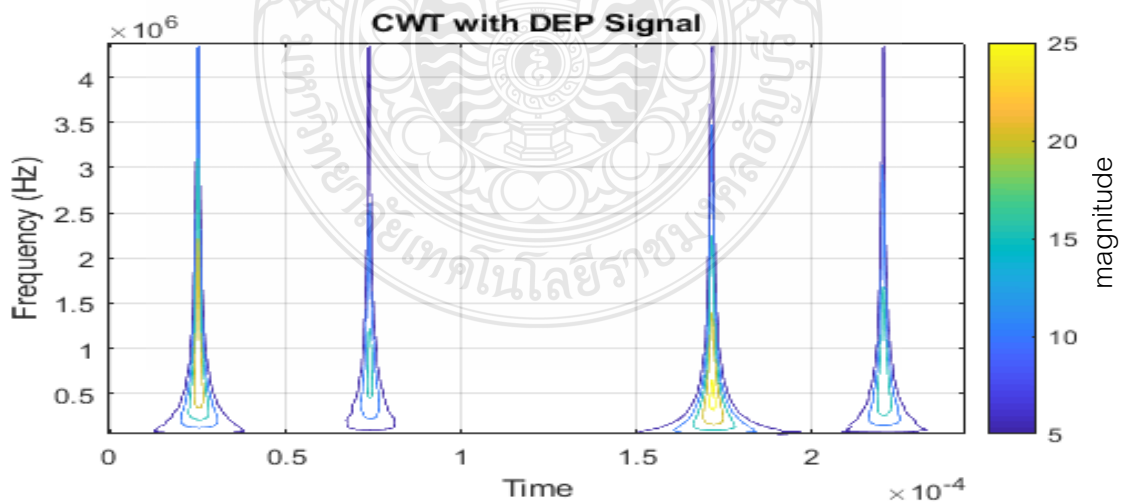
เลือก Daubechies 4 เป็นเวฟเล็ตแม่ ในระดับการแปลงเวฟเล็ตเท่ากับ 12 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ของสัญญาณ DOP แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 De-noised DOP type signal ระดับ 12

รูปที่ 3.8 เป็นการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ DOP โดยแยกสัญญาณรบกวนความถี่สูง และความถี่ต่ำ ในระดับ 12 ผลของการแยกสัญญาณรบกวนในระดับ 12 ดังรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นว่า สัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวนน้อยมาก และยังคงมีรูปร่างของสัญญาณต้นแบบเดิม DOP อยู่อย่างครบถ้วน โดยสัญญาณที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าเวลา-ความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง ต่อไป

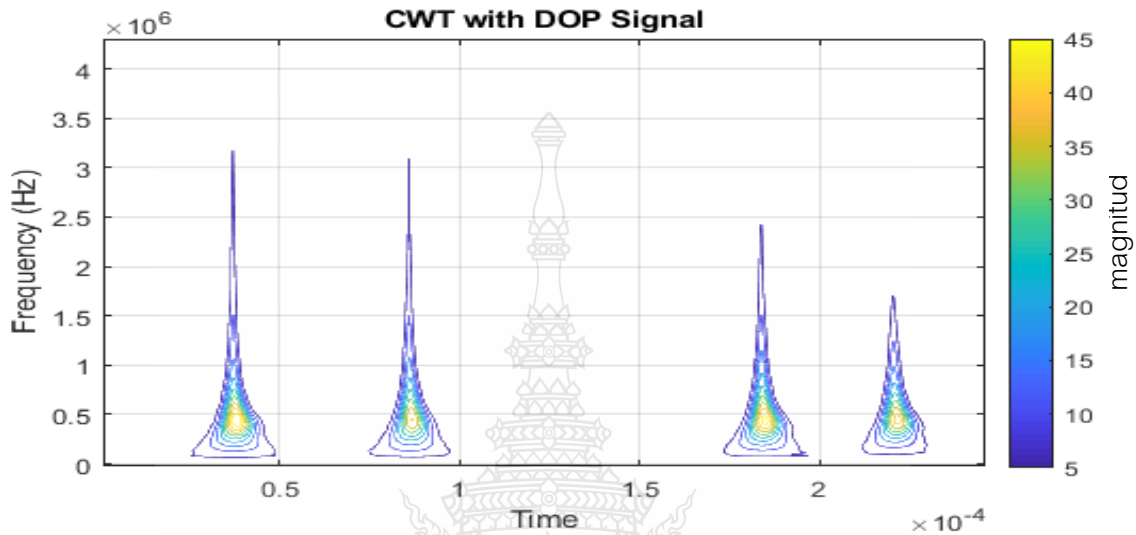
### 3.3.2 หาค่าเวลา-ความถี่ (Time-Frequency Domain) ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.9 หาค่า Time Frequency Domain ด้วยเวฟเลตแบบต่อเนื่อง CWT



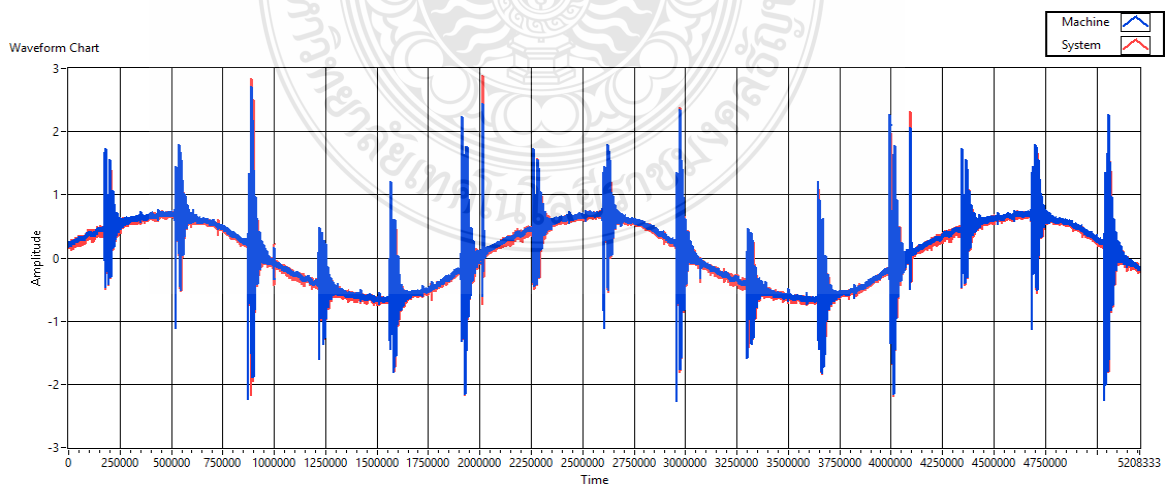
จากรูปที่ 3.9 เป็นการระบุตำแหน่ง เวลา ที่เกิดความถี่ของสัญญาณ DEP ด้วยเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง ที่ตำแหน่งเวลา  $t = 100, 300, 700$  และ  $900 \mu s$  เมื่อเทียบกับสัญญาณจริงที่จำลองค่าความถี่ เท่ากับ  $0.5 \times 10^6$  Hz ซึ่งตรงกับช่วงเวลาและความถี่ที่ได้จำลองไว้



รูปที่ 3.10 ทหาค่า Time Frequency Domain ด้วยเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง CWT

จากรูปที่ 3.10 เป็นการระบุตำแหน่ง เวลา ที่เกิดความถี่ของสัญญาณ DOP ด้วยเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง ที่ตำแหน่งเวลา  $t = 100, 300, 700$  และ  $900 \mu s$  เมื่อเทียบกับสัญญาณจริงที่จำลองอ่านค่าความถี่ ได้เท่ากับ  $0.5 \times 10^6$  Hz ซึ่งตรงกับช่วงเวลาและความถี่ที่ได้จำลองไว้

### 3.4 ข้อมูลจริงที่ใช้ในการงานวิจัย ทดสอบด้วยตัวออสซิลโลสโคปความเร็วสูง



รูปที่ 3.11 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A[16]

### 3.5 สรุปการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต เป็นเทคนิคการจัดสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถบีบอัดสัญญาณ และสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ โดยลดทอนคุณภาพของสัญญาณลงจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้สร้างอัลกอริทึม โดยการจำลองสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ คือ สัญญาณ DEP และ DOP ร่วมกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น white Gaussian noise (WGN) เลือกเวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies 4 และใช้เทคนิคการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องลดสัญญาณรบกวน ในระดับ 12 พบว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถลดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังคงรักษารูปร่างของสัญญาณต้นแบบ DEP และ DOP ที่ได้จำลองไว้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสัญญาณที่ได้นำไประบุตำแหน่งความถี่-เวลาที่เกิดดิสซาร์จบางส่วนด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง เทียบกับความถี่สัญญาณไซน์ 50 Hz เพื่อวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว มีความถี่ตามคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนคือ ประมาณ 50 – 250 MHz [2] หรือไม่ ซึ่งผลการทดลองจะนำเสนอในบทต่อไป



## บทที่ 4

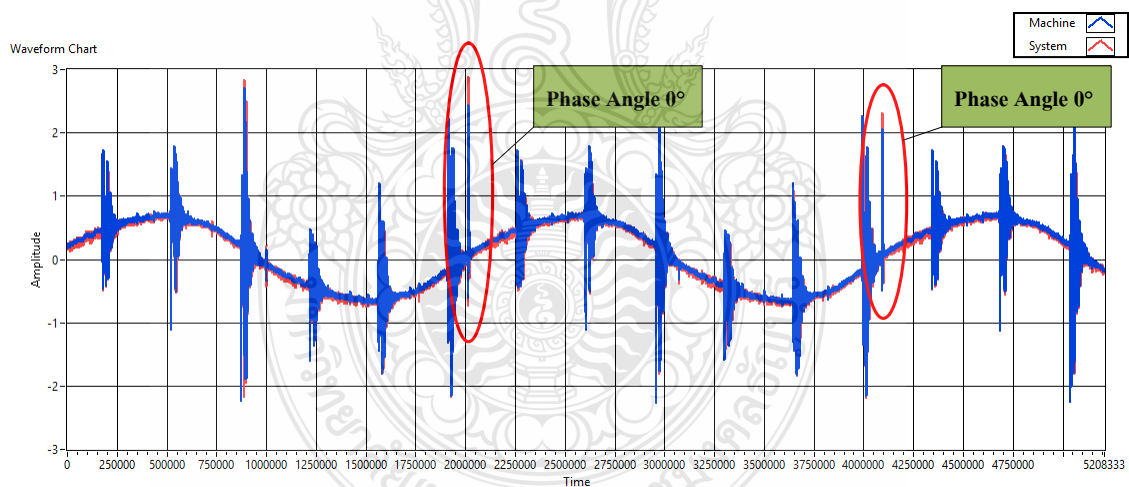
### ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การเกิดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) ผลการวิเคราะห์ดิสซาร์จบางส่วนจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้
- 2) ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ดิสซาร์จบางส่วนจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้

จากอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบ นำไปใช้กับสัญญาณการวัดจากออสซิลโลสโคปความเร็วสูง โดยตั้งค่าอัตราการเก็บตัวอย่างสัญญาณ (Sampling rate) ที่ 100 MS/s และตั้งการอ่านค่าตัวอย่างสัญญาณ (Sample to read) ที่ 5M พบสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม  $0^\circ$  ของเฟส A และเกิดขึ้นซ้ำกันทุก 1 ไซเคิล



รูปที่ 4.1 สัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม  $0^\circ$  Sample rate 100 M/s และ Sample to read 5M [16]

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเกิดความผิดปกติที่มุม  $0^\circ$  ในทุก 1 cycle จึงทำการวิเคราะห์ค่าของสัญญาณที่ตรวจจับได้ เทียบกับสัญญาณไซน์ความถี่ 50 Hz

จากสูตร

$$f = \frac{1}{T}$$

ที่ความถี่ 50 Hz ค่าเวลา  $T = \frac{1}{50\text{Hz}}$

$$T = 20\text{ms}$$

เพราะฉะนั้นใน 1 cycle จะมีช่วงค่าเวลาเท่ากับ 20 ms และเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B อ่านค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ได้

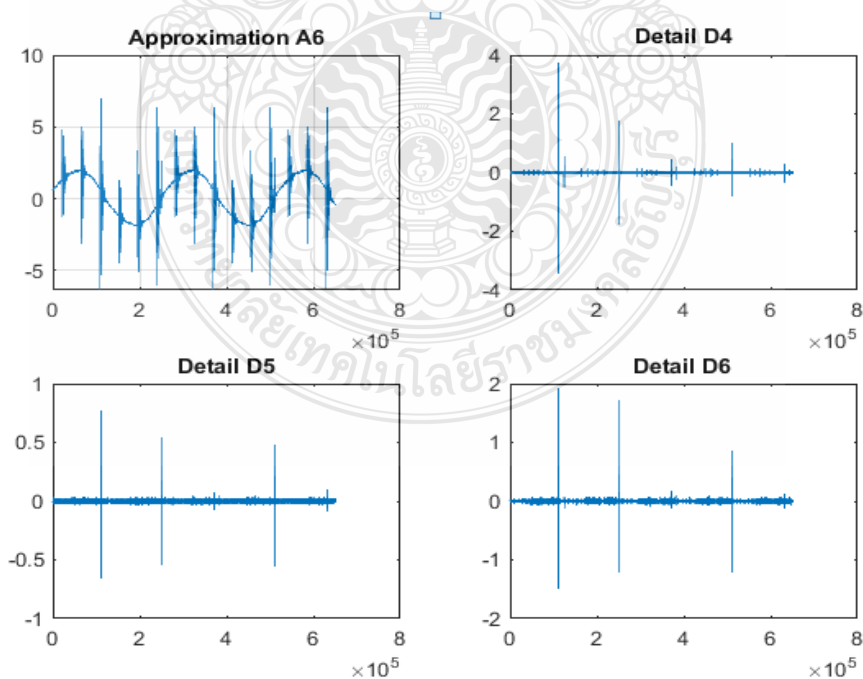
$$T = \frac{5M}{100M \text{ S/s}}$$

$$T = 50\text{ms}$$

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าการตั้งค่าของเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ช่วงของเวลา 50ms เมื่อเทียบกับค่าความถี่ที่ 50 Hz อ่านค่าได้  $2\frac{1}{2}$  cycle ซึ่งจัดว่าเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วงของความถี่เดียวกัน ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่มีค่าความถี่สูงจำเป็นต้องลด ค่าความถี่ Sample frequency และ จำนวนของข้อมูลลง เพื่อให้มีผลในการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ

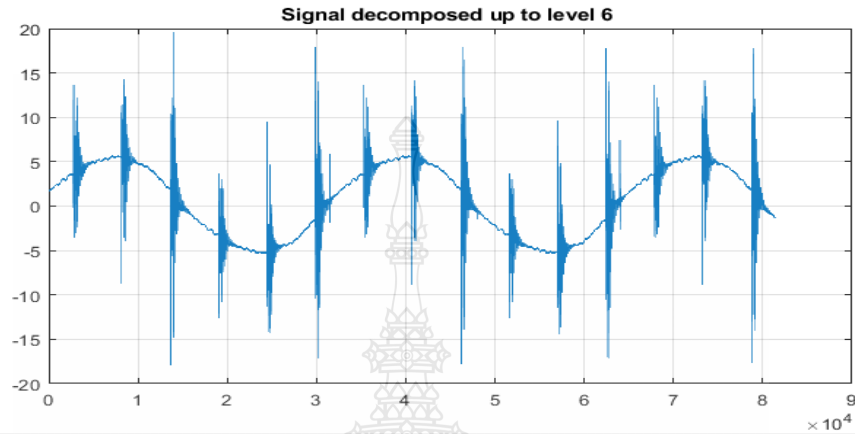
จากอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ นำมาใช้กับสัญญาณที่วัดได้จริง โดยการใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ลดระดับของสัญญาณในระดับสเกล 6 เลือเวฟเล็ตแม่ Daubechies4 ดังรูปที่ 4.2

#### 4.1.1 ลดสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.2 decomposed up to level 6 using db4 mother wavelet

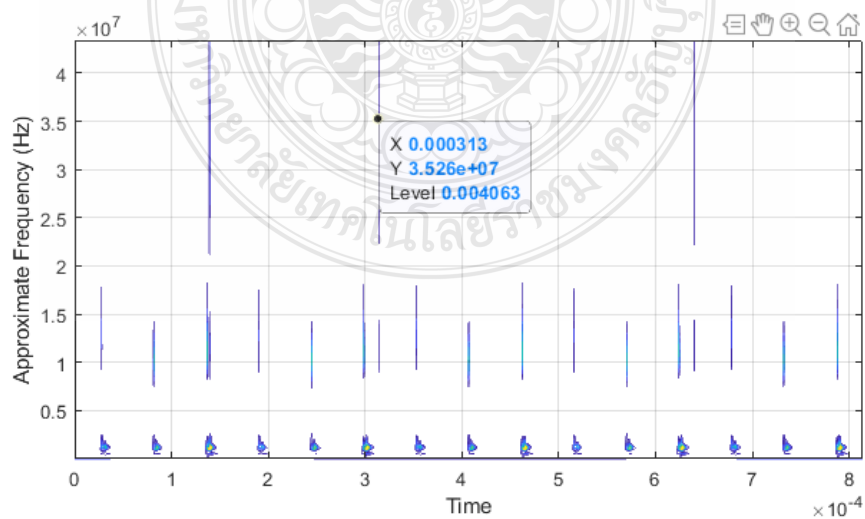
รูปที่ 4.2 เป็นการลดสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้เวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies 4 ลดระดับสัญญาณรบกวนลงในระดับ 6 ผลของการลดสัญญาณรบกวนลงในระดับ 6 แสดงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.3 ผลของการลดสัญญาณด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องระดับ 6

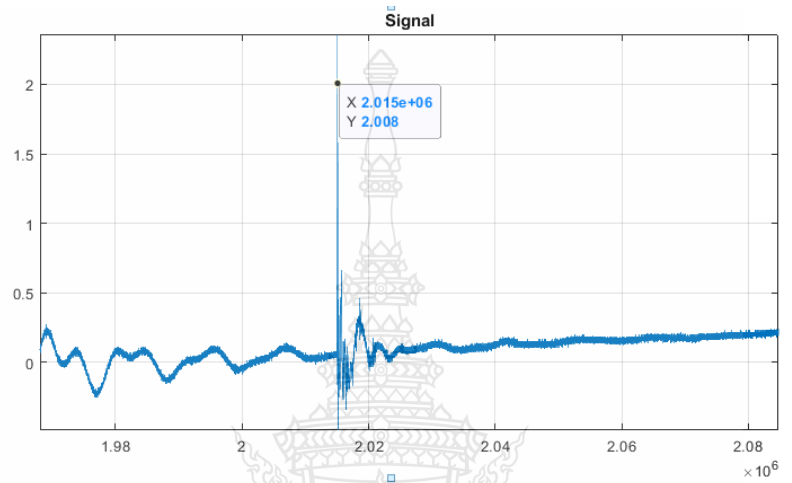
จากรูปที่ 4.3 เป็นผลของการลดสัญญาณด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง ในระดับ 6 ซึ่งจำนวนของข้อมูลจาก 5,208,334 ข้อมูล ลดลงเหลือ 81,314 ข้อมูล และความถี่ Sample frequency ลดลงในระดับ 6 โดยที่รูปร่างของสัญญาณที่ได้ ยังคงรักษาตำแหน่ง เวลา ของสัญญาณเดิมอยู่ตลอดช่วงสัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้นำไปประมวลค่าความถี่ - เวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องต่อไป

#### 4.1.2 หาค่าเวลา ความถี่ ด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง



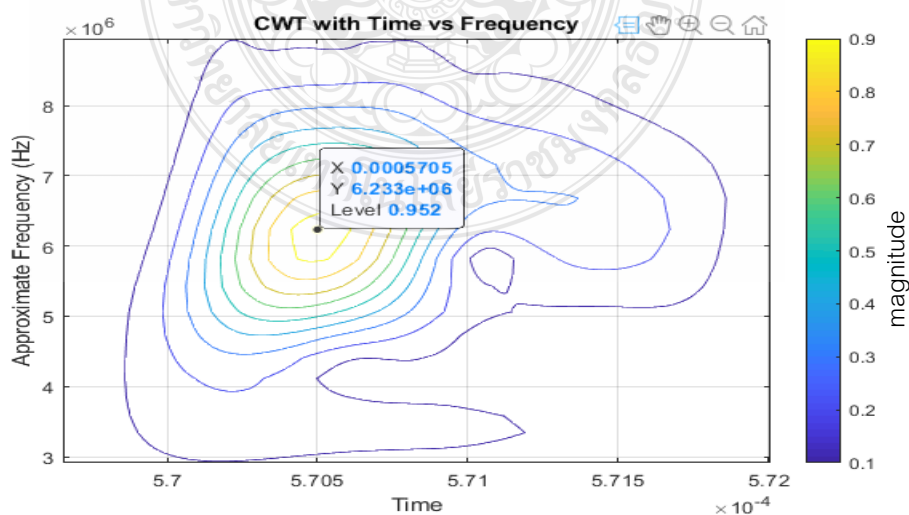
รูปที่ 4.4 Time - Frequency Domain signal

จากรูปที่ 4.4 เป็นการหาค่าเวลา-ความถี่ ที่เกิดดิสซาร์จบางส่วนด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ความถี่ที่ต้องสงสัยที่ตำแหน่งเวลาแกน  $x = 3.13 \times 10^{-4}$  s เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เฟส A Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ซึ่งตรงกับช่วงเวลาแกน  $x = 2.015 \times 10^6$  แสดงดังรูปที่ 4.5 และนำสัญญาณช่วงเวลาดังกล่าวที่ได้ ไประบุเวลา-ความถี่อีกครั้ง ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 รูปร่างของสัญญาณสัญญาณที่เฟส A Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ในช่วงเวลา  $x = 2.015 \times 10^6$

จากกราฟในรูปที่ 4.5 เป็นการนำตำแหน่งเวลาที่สงสัยว่าเกิดดิสซาร์จบางส่วน จากรูปที่ 4.4 ที่ช่วงเวลา  $3.13 \times 10^{-4}$  s มาเปรียบเทียบกับสัญญาณจริงที่เฟส A Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ซึ่งพบว่าตรงกับช่วงเวลา  $2.015 \times 10^6$  ในสัญญาณที่เฟส A โดยจะนำสัญญาณที่ได้ ในช่วงเวลาดังกล่าวไประบุความถี่ ต่อไป



รูปที่ 4.6 ความถี่จากการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง CWT

จากค่าที่อ่านได้ 6.233 MHz นำไปคำนวณหาค่าความถี่ของดิสชาร์จบางส่วน จากความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง  $1/(4 \times \text{Rise Time})$

$$f_{PD} = \frac{1}{T} = \frac{1}{(4 \times \text{rise time})}$$

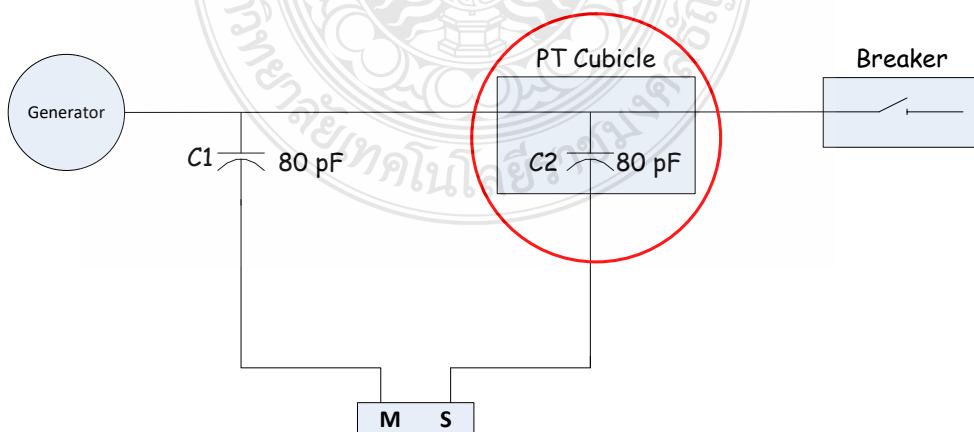
เพราะฉะนั้นจะได้ค่าสัญญาณความถี่ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นคือ

$$f = \frac{1}{1/6.233 \times 10^6 / 4}$$

$$= 24.932 \text{ MHz}$$

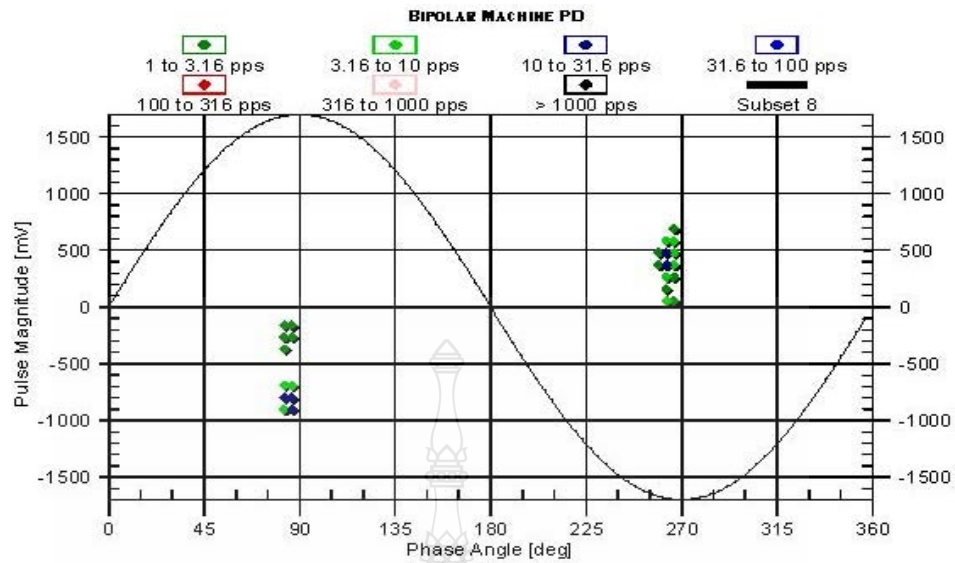
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B

ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและฝ้าติดตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์คัปเปอร์ ดังรูปที่ 4.7 สามารถตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้ที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า มีค่าสูงผิดปกติที่เฟส A และเฟส B แต่ค่าที่ผิดปกติของเฟส B เกิดจากการอินดิวของกระแสจากเฟส A ไปยังเฟส B จึงทำการวิเคราะห์เฉพาะเฟส A เท่านั้น



รูปที่ 4.7 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน





รูปที่ 4.8 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่สตรัมเทอร์โบไนน์ 10 เฟส A มุม 90° และ 270° [16]

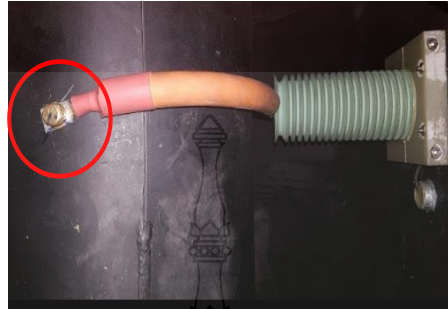
จากตารางฐานข้อมูลความผิดปกติรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนปี 2016 พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าต่ำมากหรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีเลิศ และทำการวัดเก็บข้อมูลอีกครั้งปี 2017 พบว่าค่าที่วัดได้นั้นมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบค่าจากตารางฐานข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 224 ซึ่งเป็นค่าที่มีความผิดปกติอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่ามุมเฟสของสัญญาณการเกิดดิสชาร์จนั้น เกิดขึ้นที่มุม 90° และ 270°ของเฟส A ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งมุมเฟสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC.ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่าเป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona แล้วจะมีการตรวจสอบงานจริงวันที่ 1 พฤศจิกายน 2017



รูปที่ 4.9 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่สตรัมเทอร์โบไนน์ 10 เฟส A [16]



จากรูปที่ 4.9 เป็นการตรวจสอบหาสาเหตุการเกิดดิซาร์จบางส่วนที่สตรัมเทอร์โบ 10 เฟส A และสามารถตรวจพบที่มาของสาเหตุของการเกิดสัญญาณดิซาร์จบางส่วนสตรัมเทอร์โบ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.11



รูปที่ 4.10 จุดที่พบสาเหตุของการเกิดสัญญาณผิดปกติที่สตรัมเทอร์โบ 10 เฟส A [16]



รูปที่ 4.11 จุดที่เกิดความเสียหายของรู Isolated Phase Bus ที่ทำการตีปเกลียวไม่ดี [16]

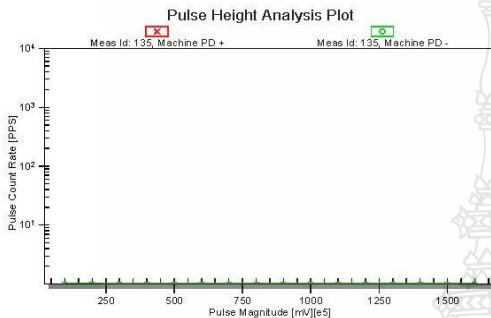
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้จากการตรวจสอบหาสาเหตุที่พบว่ามีสาเหตุที่มาจากสัญญาณผิดปกติที่เกิดจากการเจาะรูแล้วทำการตีปเกลียวไม่ดี เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่ทำงานหรือใช้งานไปนานๆ จะมีทั้งความร้อนและ การสั่นสะเทือน(Vibration) ตลอดเวลา จึงทำให้เกิดความเสียหายขึ้น หลังจากทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มขนาดของน็อตตัวผู้ให้ใหญ่ขึ้น พร้อมทั้งทำการขยายรู Isolated Phase Bus เพื่อทำการตีปเกลียวใหม่จากนั้นก็ทำการติดตั้งใหม่เพื่อเตรียมความพร้อมของการใช้งานของชุดตรวจวัดสัญญาณก่อน Start up เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภายหลังจากการตรวจสอบหาสาเหตุและทำการแก้ไขสามารถสรุปได้ว่า สาเหตุดังกล่าวเกิดจากความผิดพลาดในการติดตั้ง และได้มีการกำหนดการตรวจสอบในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 ด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐานอีกครั้ง

# Pulse Height and Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only

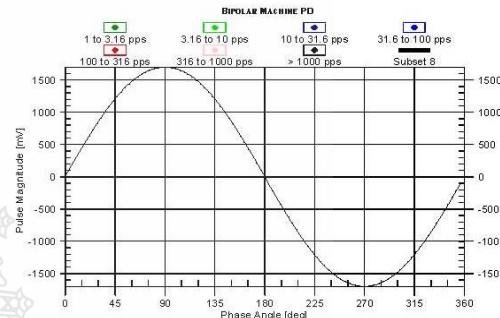
Asset Name: STG10

Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Hydro Generator

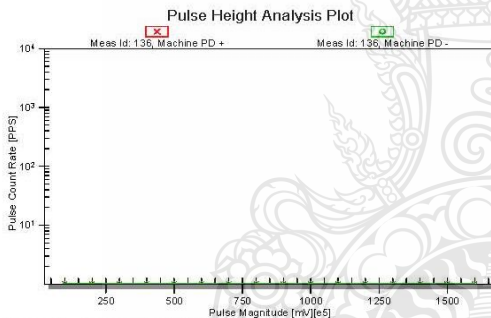
Operating Load: N/A, Reactive Load: N/A, Operating Asset Temp: N/A, Operating Voltage: N/A  
Ambient Temp: 30 deg C, Ambient Humidity: 66.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (5 sec.)



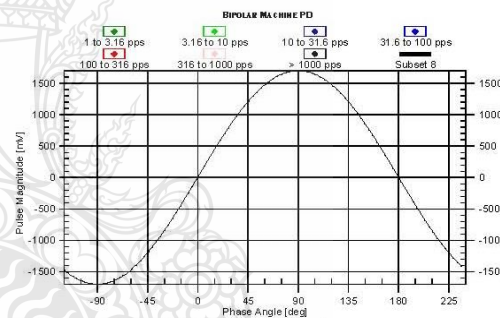
Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns]  
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A



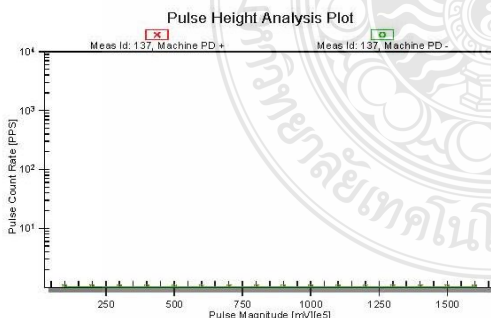
Start Time: 11/24/2017 11:55:28, Status: UND



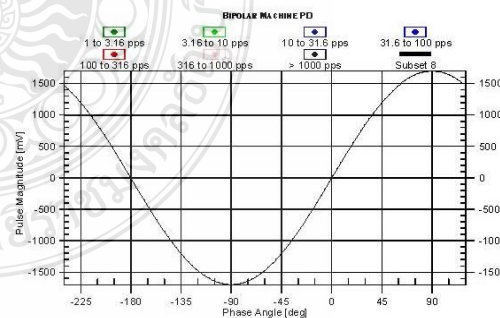
Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns]  
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A



Start Time: 11/24/2017 11:57:22, Status: Good



Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns]  
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A



Start Time: 11/24/2017 11:59:16, Status: Good

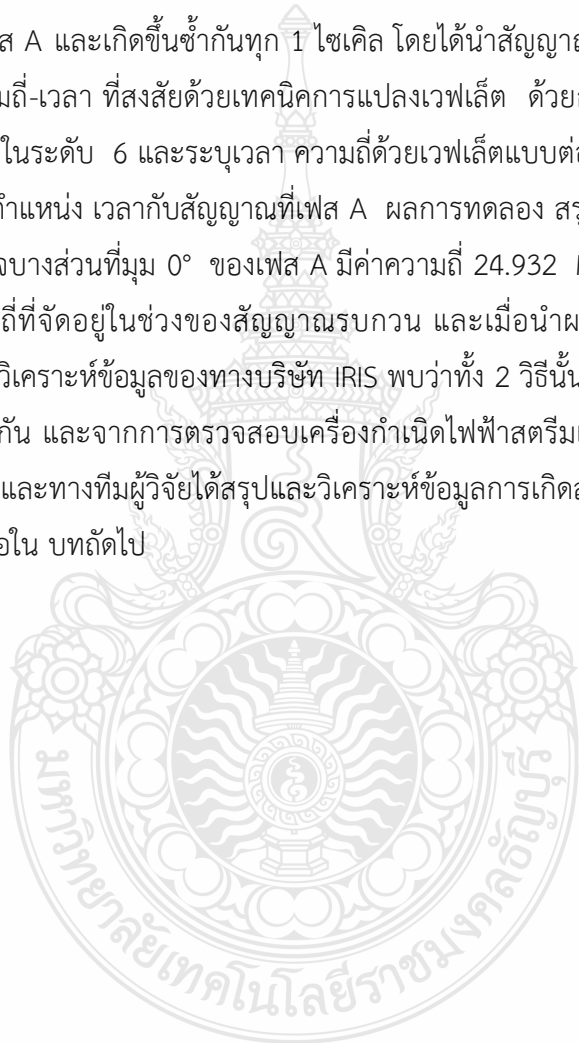
Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

รูปที่ 4.12 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 [16]

หลังจากการแก้ไขแล้ว ได้มีการตรวจวัดเพื่อหาสัญญาณความผิดปกติอีกครั้ง จาก Data Report ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 บริษัท IRIS ดังรูปที่ 4.12 แสดงผลในรูปของ Phase Angle ไม่พบสัญญาณความผิดปกติแต่อย่างใด

### 4.3 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยอัลกอริทึมที่ออกแบบ พบสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม  $0^\circ$  ของเฟส A และเกิดขึ้นซ้ำกันทุก 1 ไมโครวินาที โดยได้นำสัญญาณจากเฟส A ดังกล่าว มาวิเคราะห์หาความถี่-เวลา ที่สงสัยด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ต ด้วยการลดสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องในระดับ 6 และระบุเวลา ความถี่ด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง โดยนำสัญญาณที่ลดระดับลงแล้ว ไปเทียบตำแหน่ง เวลา กับสัญญาณที่เฟส A ผลการทดลอง สรุปได้ว่า สัญญาณช่วงเวลา ที่สงสัยว่าจะเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มุม  $0^\circ$  ของเฟส A มีค่าความถี่ 24.932 MHz ซึ่งความถี่ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน และเมื่อนำผลของการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ข้อมูลของทางบริษัท IRIS พบว่าทั้ง 2 วิธีนั้น มีผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และจากการตรวจสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสตรึมเทอร์โบ 10 นั้นก็เป็นไปตามที่ทางบริษัท IRIS และทางทีมผู้วิจัยได้สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดสัญญาณดังกล่าว ซึ่งจะสรุปผลการวิจัยและนำเสนอใน บทถัดไป



## บทที่ 5

### ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สัญญาณจริงที่วัดได้จากโรงไฟฟ้า ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV ด้วยวิธีการติดตั้งแบบ Directional 2 PD Sensor/Phase ที่แก๊สเทอร์ไบน์ และสตริมเทอร์ไบน์ พบว่าผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่สตริมเทอร์ไบน์ 10 จากเครื่องมือวัดแบบมาตรฐาน TGA-B นั้นตรวจพบสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่มุม 90° และ 270° ซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC. ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่าเป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona

จากอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบและนำไปวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปความเร็วสูง เมื่อนำสัญญาณมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตหาค่าดิสชาร์จบางส่วน โดยกรองสัญญาณรบกวนในระดับ 6 ด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง และนำสัญญาณที่กรองแล้วไประบุตำแหน่งเวลา-ความถี่ ด้วยเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง พบว่าสัญญาณที่วัดได้เกิดขึ้นที่มุม 0° และเกิดขึ้นซ้ำกันทุก 1 ไมโครวินาที อันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของ Capacitor load กล่าวคือกระแสไฟจะนำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90° จาก EMC Reference ได้มีข้อเสนอแนะให้ทำการเลื่อนมุมเฟสไป 90° ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มุมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วิเคราะห์จากอัลกอริทึมที่ออกแบบด้วยการแปลงเวฟเล็ต เป็นมุมเดียวกันกับผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน คือมุม 90° และ 270° และสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 24.93 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน และจากการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติพบว่า สาเหตุดังกล่าวอยู่ในส่วนของด้าน System ที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการติดตั้ง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ต ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 การลดสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องในหลายระดับ อาจนำไปสู่การลดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณที่วิเคราะห์

5.2.2 ในการหาค่าเวลา-ความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้น ควรนำสัญญาณที่วิเคราะห์ที่ได้ไปเทียบกับสัญญาณจริง ในการหาค่าเวลา-ความถี่ โดยเทียบตำแหน่งเวลาของข้อมูลจริงกับ

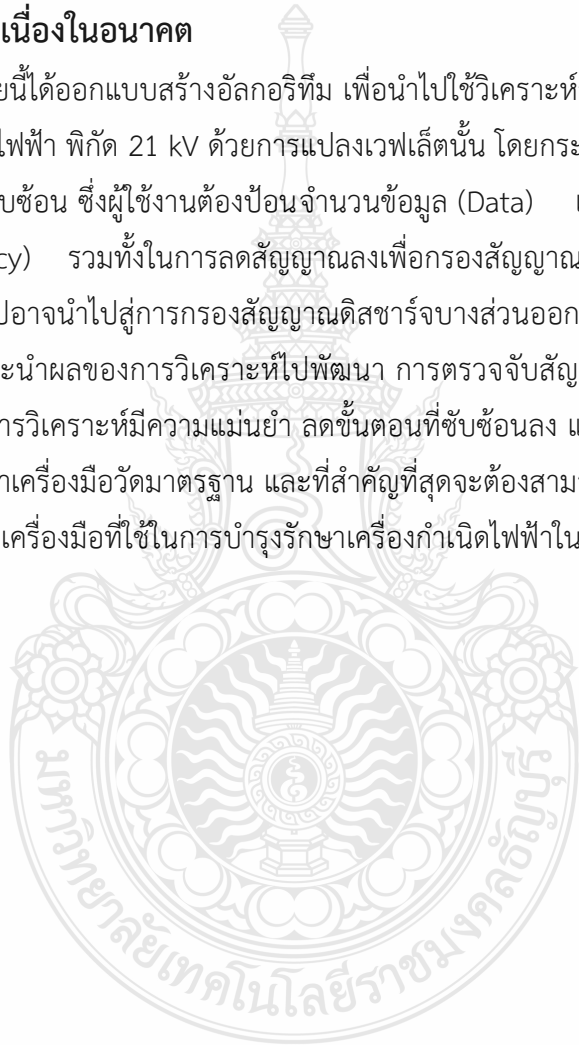
## สัญญาณที่วิเคราะห์

5.2.3 เพื่อความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ออกแบบ ควรนำไปใช้กับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่ตรวจพบรูปแบบต่าง ๆ กัน

5.2.4 อัลกอริทึมที่ออกแบบ สามารถลดจำนวนครั้งในการใช้เครื่องมือมาตรฐาน ลดค่าใช้จ่าย และ ลดเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลได้

## 5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

จากงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสร้างอัลกอริทึม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัด 21 kV ด้วยการแปลงเวฟเล็ต้นั้น โดยกระบวนการในการวิเคราะห์ มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน ซึ่งผู้ใช้งานต้องป้อนจำนวนข้อมูล (Data) และจำนวนความถี่สัญญาณ (Sampling frequency) รวมทั้งในการลดสัญญาณลงเพื่อกรองสัญญาณรบกวนถ้าการลดระดับของสัญญาณรบกวนมากไปอาจนำไปสู่การกรองสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณจริงก็ได้ ซึ่งในงานวิจัยต่อไป ควรที่จะนำผลของการวิเคราะห์ไปพัฒนา การตรวจจับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนด้วยระบบ AI เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ ลดขั้นตอนที่ซับซ้อนลง และออกแบบสร้างเครื่องมือตรวจวัดที่มีราคาถูกกว่าเครื่องมือวัดมาตรฐาน และที่สำคัญที่สุดจะต้องสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นได้เป็นอย่างดี เพื่อเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบเชิงป้องกันในอนาคตต่อไป



## บรรณานุกรม

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ 2549
- [2] V. Warren and H. Sedding, Qualitrol - Iris Power, “ Partail Discharge Testing : A Progress Report” IRMC 2017
- [3] IRIS POWER. PD Seminar – Module 1: Basic PD Theory, Detection and characteristics, November 2017
- [4] รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ , วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, “การแปลงเวฟเลต,” ใน คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. ธนรัช การพิมพ์. : สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, 2543, หน้า.307-331
- [5] Tae-Sik Kong, Hee-Dong Kim, Tae-Sung Park, Kyeong-Yeol Kim, Ho-Yol Kim “Analysis of Partial Discharge Patterns for Generator Stator Windings” American Journal of Electrical Power and Energy Systems , 2015 , pp.17-22
- [6] Takahiro Joyo, Tatsuya Okuda, Naoya Kadota, Ryoji Miyatake, Shinichi Okada “Phase Resolved Partial Discharge Patterns for Various Damage of Winding Insulation Detected with Different Measuring Devices” Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA , June 2017, pp.344-347
- [7] Yuanlin Luo, ID , Zhaohui Li and Hong Wang “A Review of Online Partial Discharge Measurement of Large Generators” Energies 2017
- [8] Pemen, A. J. M. (2000).“Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators”, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100 / IR530786
- [9] S. Sriram, S. Nitin, K. M. M. Prabhu, and M. J. Bastiaans “Signal Denoising Techniques for Partial Discharge Measurements” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical InsulationVol. 12, No. 6 , December 2005, pp. 182-1191
- [10] B. Vigneshwaran , Dr. P.Subburaj “An Improved Threshold Estimation Technique for Partial Discharge Signal Denoising Using Wavelet Transform” International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2013 ] , 2013 , pp.300-305

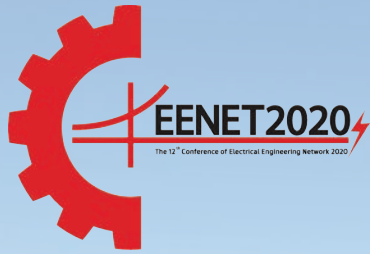
## บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] Mohammad Amin Kashiha, Diman Zad Tootaghaj and Dolat Djamshidi “Partial Discharge Source Classification and Denoising in Rotating Machines Using Discrete Wavelet Transform and Directional Coupling Capacitors” IEEE T&D Asia 2009
- [12] ALOK KUMAR PRADHAN “Analysis of Partial Discharge Signals using Digital Signal Processing Techniques” Roll No. 210EE2107 , May 2012
- [13] Partha Ray,Ashok Kumar Maitraand Arijit Basuray “Extract Partial Discharge Signal using Wavelet for On-line Measurement” International conference on Communication and Signal Processing, April 2013 , pp.888-892
- [14] Umar Khayam, Tria Kasnalestari “System of Wavelet Transform on Partial Discharge Signal Denoising ” International Conference of Industrial, Mechanical 2016
- [15] X. Ma, C. Zhou and I. J. Kemp, “Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection,” IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, no. 3, June 2002, pp.446-457
- [16] วรัญญ บุษย์เพ็ญ “การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV : กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ” 2018









# การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 The 12<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2020

26 - 28 สิงหาคม 2563 ณ โรงแรมรอยัล ฮิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

## หนังสือรวมบทความวิจัย

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

ระบบควบคุมและการวัด (CT)

พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)

นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (SS)



AUTO DIDACTIC CO.,LTD



สถาบันเครือข่ายของการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
เจ้าภาพ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลลำานนา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลสุวรรณภูมิ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลอิสาน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลรัตนโกสินทร์



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลพระนคร



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลกรุงเทพ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลตะวันออก



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลศรีวิชัย



สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลชัยบุรี



## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

การประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Network: EENET) เป็นการประชุมวิชาการเพื่อส่งเสริมและพัฒนาให้มีการเผยแพร่ผลงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาขาวิชาที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศชาติเป็นอย่างมาก การประชุมวิชาการนี้เป็นการประชุมที่ตอบสนองต่อยุทธศาสตร์การพัฒนาศักยภาพความเข้มแข็งทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการและนักวิจัย โดยในปัจจุบันมีสถาบันที่เป็นสมาชิกเครือข่ายจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 9 แห่ง สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน และมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปี พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพจัด "การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ( The 12<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2020: EENET2020) "

ครั้งที่	สถาบันเจ้าภาพ	ปี พ.ศ. ที่จัดงาน
1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2551
2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	2553
3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2554
4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	2555
5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2556
6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2557
7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	2558
8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	2559
9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2560
10	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2561
11	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2562
12	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	2563



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร.มงคล มีคุณ	กรมสอบสวนคดีพิเศษ (DSI)
อาจารย์ ดร.อรุณ พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยากร อัครวิเศษ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง	บริษัท พีอีเอ เอ็นคอม อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาคยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุณย์พิเชษฐ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชิต เจริญ	มหาวิทยาลัยเกษตรมบัณฑิต
รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์สุรัชย์ สุขสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อาจารย์ ดร.คริสฐา แจ็งสามลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์ วิสุทธีเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิบาล พุกยานุบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.คณูชา ประเสริฐสม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์สัมพันธ์ พรหมพิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ราชู พันธุ์ฉลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพร เลิศวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ กษสาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์เกียรติ์ เสวตเมธิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย แดงएम	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถ อาจ แสดใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วิเชียร อุปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ทง ดานธาทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ สุกคณีง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

รองศาสตราจารย์พิชิต กิตติสุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เขยชื่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค ให้อทองคำ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎาพร สถานทรัพย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิชัย บุญปัทสน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิศักดิ์ แจ่งสาริกิจ

อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นุกุลเจริญลาภ

อาจารย์ ดร.ปรัชญา มงคลไวย

อาจารย์ ดร.นิติกรณ์ ศิบบีศิริวานิชย์

อาจารย์ ดร.คมกฤษ บุญยั้ง

อาจารย์ ดร.บัญชา เหลือแดง

อาจารย์ ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ปงดังกา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิบูรณ์ ศิริพรอัครชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิติพงษ์ สมไชยวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารณพร ทีเก้ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเศษฐ ทิพย์ประเสริฐ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑูรย์ พรหมมี

อาจารย์ ดร.อนนท์ นำอิน

อาจารย์ ดร.พลกฤษณ์ ทุนคำ

อาจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ สมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต แก้วดวงคา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เดชธรรมรงค์

อาจารย์ ดร.นพดล มณีเทียร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ เมตไตรพันธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำแสน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ สากุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ อุดมพรสากุล

รองศาสตราจารย์ปรีชา สาละรังค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณพล คำปัญญา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.พีรพล จันทร์หอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.สมพร ศรีวิวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.มาลียา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.เฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ วสุนทรจาริณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย สว่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่น คอกพิมาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัสรีร์ วงศ์ศรีใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธินันท์ ต้นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์ ดร.มงคล ด้านบำรุงตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์ ดร.ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรพิน ชานูนาสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรวิวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์ ดร.ไพวรรณ เกิดตรวจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์ ดร.กัญญา ชัยอมฤต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกวิทย์ หายกวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตสกลนคร
อาจารย์ ดร.เสกสรร พลสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตสกลนคร
รองศาสตราจารย์ชาญชัย ทองโสภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ร่วมพูนตาล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศักดิ์ดา สมกุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เวียงมูล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิชารีย์ ธนารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรระ วงศ์ปัญญา	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์โยษาศรีรัตต ธรรมบุญดี	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัสณี เพ็ชรตระกูล	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

อาจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ลาวัฒน์วิสุทธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐทิ ถึงสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ รักผกาวงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
อาจารย์ ดร.สุชาลีณี คุปตะบุตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยอด สุขะมงคล	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐ์ มาตรา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยณรงค์ กล้ายมณี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรชัย วิริยะสุทธิวงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.ศรีศุภางค์ ทิวสุวรรณ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์อากม ม่วงเขาแดง	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ธานินทร์ ดวงจันทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์สุทธิพันธ์ อักษรเนียม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ธิดิพร ประมวล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเริง อินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อาจารย์ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิภาวัลย์ นาคทรัพย์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขงยุทธ นารายณ์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พกิจ สุวัฒน์	มหาวิทยาลัยสยาม
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สี่เอเชย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง วัชชีลาบัตร	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพนพานโต	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นางทิน	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ศาสตราจารย์ ดร.วงพงษ์ ตั้งศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ งามวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## สารบัญ (ต่อ)

ไฟฟ้ากำลัง (PW)		หน้า
PW-15	การตรวจจับสัญญาณคิซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ต เริงฤทธิ์ กิจไพบุลทวิ และฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล	57
PW-16	การศึกษาอิทธิพลของน้ำที่ถูกระดมด้วยพลาสมา ณ สภาวะบรรยากาศ ต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช ยศชน ธนการัญย์ มงคล ลิ้มอวชันนาการ ประทีป บุญนอง พิชิตชัย สุวรรณเพชร และคณิศร์ มาตรา	61
PW-17	การกำจัดเชื้อเอสเซอร์เรียโคไล (อี โคไล) ด้วยคิซาร์จแบบข้ามฉนวน ภาณุวัฒน์ ทับอินทร์ ชัยฉูพงษ์ ปฤกษา สุภณัฐ นุ่มบัว วีระวัฒน์ เต็มผลทรัพย์ ภัทธร บุษพันธ์ และคณิศร์ มาตรา	66
PW-18	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม. สมชาย ไกรปราบ ฤทธิชัย ราชแป้น ยุทธนา คงจีน ชานนท์ ชูพงษ์ และบุญยัง ปลั่งกลาง	70
PW-19	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดินในท่ออีพ็อกซีเรซินเสริมใยแก้วที่จัดเรียงด้วยหีเหล็ก และหีฉนวน ภายในท่อใต้ดินแบบไปร์แฉดกึ่ง ปริษา มงคลสวัสดิ์ ฤทธิชัย ราชแป้น ยุทธนา คงจีน ณัชดิพงษ์ อุทอง และบุญยัง ปลั่งกลาง	74
PW-20	กระทบจากฤดูกาลที่มีต่อค่าความต้านทานการต่อลงดินในลักษณะเนื้อดินต่างกัน นฤเบศร์ เพ็ชรศรี ชัยฎาพร จริงจิตร และชาญณรงค์ พงศ์ภักขรรณ	78
PW-21	<b>Community Peer-to-Peer Energy Trading Analysis among Commercial Consumers in Korat</b> Ashok Paudel Terapong Boonraksa and Boonruang Marungsri	82
PW-22	การจำแนกสาเหตุความผิดปกติในระบบจำหน่าย 33 kV ของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 2 ภาคใต้ โดยใช้การ เรียนรู้ของเครื่อง วิษณุ พรหมรัตน์ และวาทีต เบนจพลกุล	86
PW-23	การพัฒนาอุปกรณ์ต่อร่วมมิเตอร์เอเอ็มอาร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ สาธิต เพ็ชรรอด และวาทีต เบนจพลกุล	91
PW-24	การศึกษาการติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานภายใต้การประจุโพลิตายานยนต์ไฟฟ้า ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง ยุทธนา คงจีน สุทธิพันธ์ ดันโพธิ์ กฤติเดช บัวใหญ่ และภาณท์ เกิดชื่น	95
<b>อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)</b>		
EC-01	การตรวจนับระดับแรงดันไฟฟ้าเกินของวงจรไฟตอนด้วยตัวเปรียบเทียบวินโดว์แบบอนุกรมในระบบอัตโนมัติ สัญญาณรถไฟ อุกฤษฏ์ กรกนก แสนศักดิ์ คีอ่อน วีรพงษ์ อรุณ และศักดิ์ทงนงค์ วงศ์เจริญ	99
EC-02	วงจรคูณค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์โดยใช้ไอซีเบอร์ LT1228 หนึ่งตัว นันทนัย รุ่งเหมือนฟ้า เจษฎาพร สदानทรัพย์ และวรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์	103
EC-03	วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบไม่มีการสูญเสียที่ปรับค่าได้โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 พิชญานิน มูลเมือง ทศยา ปุคละนนท์ และวรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์	108
EC-04	วงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ VDTA หนึ่งตัว อภิวัฒน์ ดันทอง กรันท์ อังกูร ปวิข ช้อยขุนทด และกมล ศิลาพันธ์	112
EC-05	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบโอเอทีเอ็มร่วมกับเส้าใยแก้วเรตติงชนิดแบร์ก ภูเบศ แสงมะสะหมัด วิสิทธิ์ สือธรรมจักร พุทธิพร เทียมสินสังวร และศุภเศรษฐ์ จันทร์อ่อน	116

## การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเลต

### Detection of partial discharge signal in generators using wavelet transforms

เริงฤทธิ์ กิจใหญ่ลทวิ<sup>1</sup> และ ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกหลวง จังหวัดปทุมธานี E-mail: roregrit\_k@mail.mutt, chatchai.s@en.mutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับและระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง 21kV ด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลต สัญญาณจำลองดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาลดสัญญาณรบกวน ด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง โดยการแยกส่วนประกอบของสัญญาณรบกวนความถี่สูงและความถี่ต่ำออกจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่จำลอง สัญญาณที่กรองแล้วนำมาผ่านกระบวนการระบุตำแหน่ง ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องที่แสดงผลในโดเมนเวลา-ความถี่ โดยสัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ และเปรียบเทียบตามมาตรฐานคุณลักษณะสมบัติการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผลการทดลองกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่จำลองขึ้นพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถแยกสัญญาณรบกวนจากสัญญาณต้นแบบที่สร้างขึ้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เวฟเลตแม่ข่ายชนิด Daubechies 4 (Db4) และลดความละเอียดของสัญญาณตัวอย่างลง 12 ระดับ จากนั้นทำการระบุตำแหน่งและหาค่าความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องได้อย่างถูกต้อง

**คำสำคัญ :** ดิสชาร์จบางส่วน, การแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง, การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง, โดเมนเวลา-ความถี่

#### Abstract

The purpose of this article was to present a method for detecting and locating partial discharges in generators 21 kV using wavelet transform technique. The signal from the sensor installed on the generator was used to decrease the noise with a discrete wavelet transform technique. This could be conducted by separating components of high and low frequency noise out of simulated partial discharge signals meanwhile filtered signals were taken through the locating process with continuous wavelet transform whose display was shown in the time-frequency domain. The signal obtained from that position would be analyzed for determining frequency in order to

compare results according to the characteristics of partial discharges in generators. The experimental results indicated that the proposed algorithm could efficiently decrease noise with a condition of selected Daubechies 4 (Db4) as a mother wavelet and lowering the signal to level 12. The results showed that this condition could lead to accurate performance of locating the position and determining the frequency of partial discharge signal generated by continuous wavelet transform.

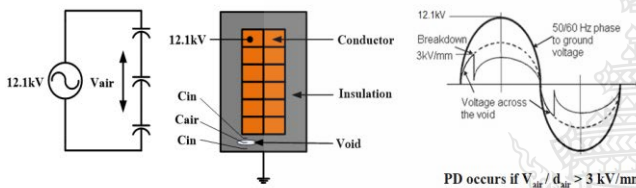
**Keywords:** Partial discharge, Wavelet transform, Discrete wavelet transform, Continuous wavelet transform, Time-frequency Domain

#### 1. บทนำ

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดเกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนจะทำให้เกิดเบรคดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเบรคดาวน์เป็นเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่า “ดิสชาร์จบางส่วน” พัลส์ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ฉนวนเสียหายเป็นจุดๆ และเกิดผิวดำขุยตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โคโรนา ดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวและ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในรอยต่อ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากข้อมูลที่มีการเก็บรวบรวมบันทึกไว้ทางสถิติ [1] พบว่ารูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้น จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วบกร่องในขดลวดสเตเตอร์และเทคนิคการตรวจวัด [2] ดังนั้นการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์อย่างมากในตรวจจับและการบำรุงรักษาตามประเภทของขั้วบกร่องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การวิเคราะห์ สามารถแบ่งออกเป็นหลากหลายรูปแบบด้วยกัน เช่นการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge Pattern (PRPDP) ในรูปแบบสองและสามมิติ [3] การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

การวิเคราะห์รูปร่างดิซซาร์จบางส่วนและความหนาแน่นสเปกตรัมพลังงานดิซซาร์จบางส่วน เทคนิคการตรวจวัดดิซซาร์จบางส่วนในโดเมนเวลา และแยกสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเลต การแยกสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณรบกวน มีการประเมินวิธีลดสัญญาณรบกวนหลายวิธี โดยใช้ทั้งข้อมูลดิซซาร์จบางส่วนที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ และข้อมูลที่วัดจริง พบว่าการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete wavelet transform ; DWT) สามารถแยกสัญญาณรบกวนได้ดีเมื่อเทียบกับ FFT และSTFT[4] นอกจากนี้การวิเคราะห์สัญญาณดิซซาร์จบางส่วนในโดเมนเวลา-ความถี่สามารถทำได้โดยใช้ S – transform และการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform ; CWT ) [5]

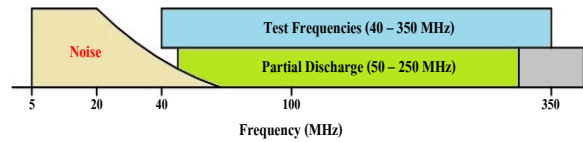
2. ดิซซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [6]



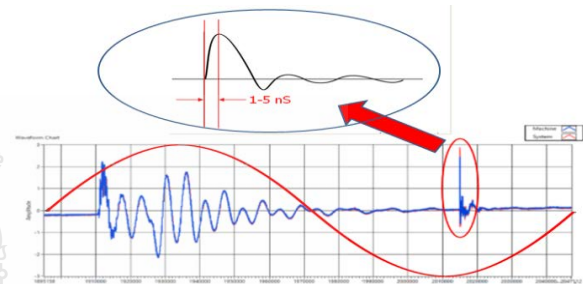
รูปที่ 1 วงจรสมมูลเมื่อมีโพรงอากาศในเนื้องาน [6]

โดยปกติแล้วใน ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ จะมีโพรงของอากาศปะปนอยู่ถึงแม้ว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใหม่ก็ตามและถ้าโพรงอากาศนั้นมีขนาด 1 มิลลิเมตร แรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคคร่อมโพรงอากาศมีค่าสูงกว่า 3kV/mm (Vair/Dair) จะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศและในทุก 1 ไซเคิล จะเกิดการเบรกดาวน์ 2 ครั้ง ดังรูปที่ 1 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดสัญญาณดิซซาร์จบางส่วน คือการมีฉนวนบางส่วนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าแต่ไม่ทำให้ฉนวนโดยรวมล้มเหลวในการเป็นฉนวน โดยขณะที่มีแรงดันคคร่อมโพรงอากาศเรียกว่า “ภาวะการชาร์จ” และขณะที่โพรงอากาศเกิดการเบรกดาวน์เรียกว่า “ภาวะการดิซซาร์จ” ซึ่งจะเกิดทั้งลูกคลื่นบวก และลูกคลื่นลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) และจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดจนกว่าจะได้รับการแก้ไข หรือจนกว่าฉนวนล้มเหลว

การเกิดดิซซาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงประมาณ 50-250 MHz และมีสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 5 - 49 MHz ดังรูปที่ 2 มี Pulse Width แคบและมี RiseTime น้อยประมาณ 1-5 nS โดยความถี่ของสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง 1/(4xRise Time) รูปที่ 3



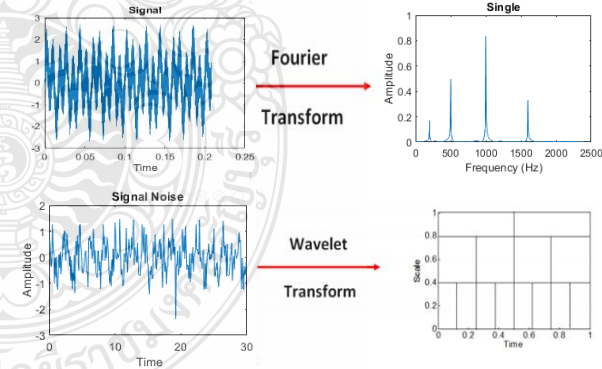
รูปที่ 2 ช่วงความถี่ที่เกิดดิซซาร์จบางส่วน [6]



รูปที่ 3 ลักษณะสัญญาณดิซซาร์จบางส่วน

3. การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลต [4]

การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform: FT) จะมีแม่นยำด้านความถี่ และเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary signal) แต่ข้อจำกัดของการแปลงฟูริเยร์คือในกรณีที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non-stationary signal) การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์ จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป



รูปที่ 4 การแปลงฟูริเยร์ และการแปลงเวฟเลต

การใช้ช่วงการวิเคราะห์สัญญาณที่คงที่ ในการวิเคราะห์สัญญาณทุกช่วงความถี่ จึงอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติเนื่องจากสัญญาณดิซซาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ดังนั้นจึงควรใช้ช่วงเวลาที่แคบในการวิเคราะห์ ในขณะที่ความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้า จึงควรใช้ช่วงเวลาที่กว้างกว่าในการวิเคราะห์ จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงได้มีการพัฒนา รูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเลต” (Wavelet Transform) ดังรูปที่ 4

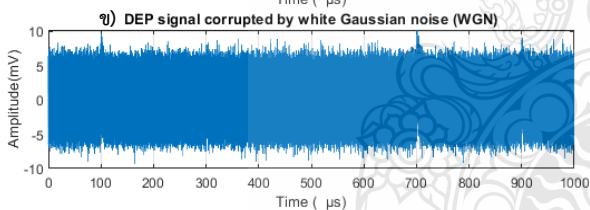
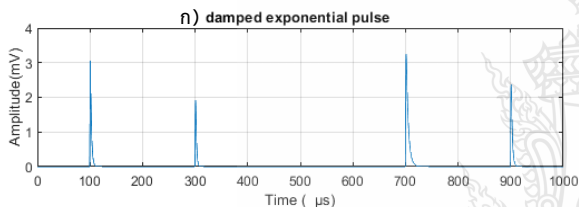
#### 4. ขั้นตอนการวิจัย

##### 4.1 การจำลองสัญญาณคิซาร์บางส่วน [5]

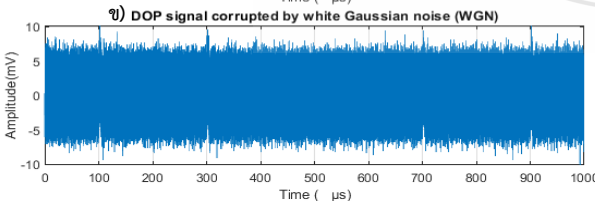
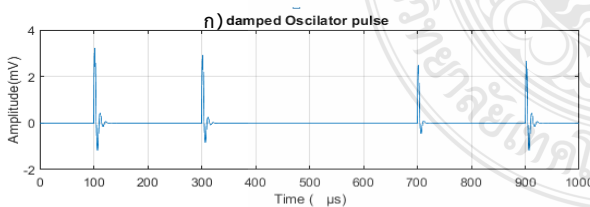
ในการตรวจวัดสัญญาณคิซาร์บางส่วน รูปร่างและขนาดของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับ วงจรการสร้างสัญญาณตรวจจับจะใช้วงจรอิมพีแดนซ์ของ RC หรือ RLC โดยพัลส์แรงดันขาออกในวงจรอิมพีแดนซ์ RC จะแสดงเป็นพัลส์เอ็กซ์โปเนนเชียลที่หัดตัว damped exponential pulse (DEP) และพัลส์แรงดันขาออกในวงจรอิมพีแดนซ์ RLC จะแสดงเป็นพัลส์แอมพลิจูดที่มีการแกว่ง Damped oscillatory pulse (DOP) โดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์สร้างสัญญาณ DEP และ DOP ตามสมการที่ 2 และ 3

$$DEP(t) = A \left( e^{-\frac{(t-t_0)}{t_1}} - e^{-\frac{(t-t_0)}{t_2}} \right) \quad (2)$$

$$DOP(t) = A \sin(2\pi f_c (t-t_0)) \left( e^{-\frac{(t-t_0)}{t_1}} - e^{-\frac{(t-t_0)}{t_2}} \right) \quad (3)$$



รูปที่ 5 ก). สัญญาณ DEP และ ข). สัญญาณ DEP ร่วมกับ WGN



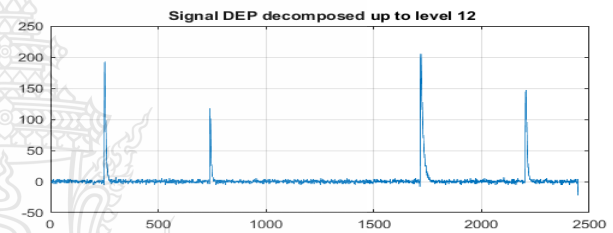
รูปที่ 6 ก) สัญญาณ DOP และ ข) สัญญาณ DOP ร่วมกับ WGN

โดยกำหนดให้ A คือค่าสูงสุดของสัญญาณพัลส์  $t_1$ ,  $t_2$  คือค่าสัมประสิทธิ์ Damping,  $t_0$  คือ เวลาที่เกิด,  $f_c$  คือ ความถี่ของการสั่น

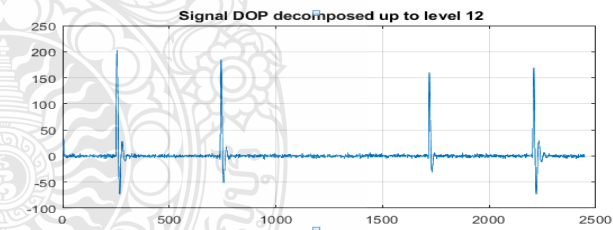
สัญญาณ DOP, A และ  $f_c$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 5 mV และ 500 kHz ตามลำดับ Sampling rate ที่ 10 MHz ทำการจำลองสัญญาณคิซาร์บางส่วนตามรูปแบบ DEP และ DOP ตามสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับสัญญาณทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5 และ 6

##### 4.2 แยกสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

จากการทดลอง สัญญาณ DEP จากรูปที่ 5 ข) และสัญญาณ DOP รูปที่ 6 ข) นำมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูง เพื่อแยกองค์ประกอบสัญญาณ ออกเป็นส่วนที่มีความถี่ต่ำและส่วนที่มีความถี่สูงในระดับ 12 โดยเลือก db4 เป็นเวฟเลิตแม่ผลลัพท์การลดสัญญาณตามเวฟเลิตแม่ ดังรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งค่าที่ได้สัญญาณรบกวนลดลงเป็นอย่างมาก และยังคงมีสัญญาณต้นแบบเดิม DEP และ DOP อยู่โดยผลลัพท์ ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าเวลา-ความถี่ ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 7 สัญญาณ DEP ระดับ 12 เวฟเลิตแม่ Db4



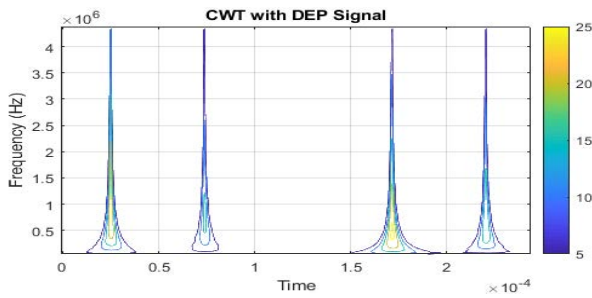
รูปที่ 8 สัญญาณ DOP ระดับ 12 เวฟเลิตแม่ Db4

##### 4.3 หาค่า Time-Frequency Domain ด้วยการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง

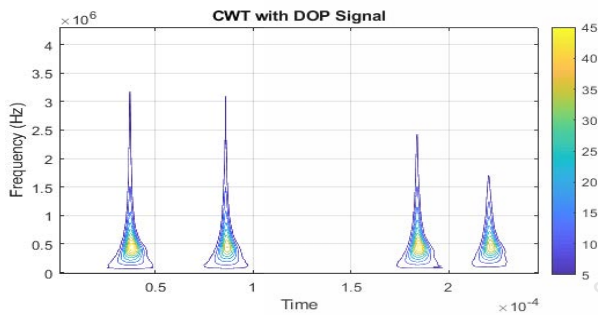
เมื่อลดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ได้ในระดับที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปนำสัญญาณที่ได้มาระบุตำแหน่ง Time-Frequency Domain ด้วยการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องเพื่อระบุ เวลา-ความถี่ ที่ต้องสงสัยในช่วงเวลาที่เกิดคิซาร์บางส่วน

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงผลที่ได้ของการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง เพื่อหาค่าเวลา-ความถี่ของสัญญาณ DEP จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 3.7 mS, 8.7 mS 18.4 mS และช่วงเวลา 22 mS ตามลำดับอ่านค่าความถี่ได้โดยประมาณ 500 kHz ซึ่งทุกช่วงเวลาของสัญญาณ DEP ตรงกับสัญญาณคิซาร์บางส่วนต้นแบบที่ได้จำลองขึ้น





รูปที่ 9 Time - Frequency Domain สัญญาณ DEP



รูปที่ 10 Time-Frequency Domain สัญญาณ DOP

จากรูปที่ 10 แสดงถึงการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องของสัญญาณ DOP เพื่อหาค่าเวลา-ความถี่ จากกราฟจะเห็นได้ว่าทุกช่วงเวลาของสัญญาณ DOP ตรงกับสัญญาณคิซซาร์จบางส่วนของสัญญาณต้นแบบที่ได้จำลองขึ้น

**9. สรุปผลการทดลอง**

คิซซาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลตให้ผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดี โดยการแยกสัญญาณรบกวนความถี่สูงและความถี่ต่ำด้วยการแปลงเวฟเลตแบบไม่ต่อเนื่อง เลือก Db4 เป็นเวฟเลตแม่ เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณลักษณะ ทรานเซียนต์ เช่น ฟอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดีโดยลดระดับสัญญาณในระดับ 12 พบว่าสามารถกรองสัญญาณรบกวนลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังรักษารูปร่าง เวลาของสัญญาณต้นแบบเดิมที่ได้จำลองไว้คือ DEP และ DOP เมื่อนำสัญญาณที่ได้ไประบุตำแหน่ง ด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์หาค่าเวลา-ความถี่ ที่เกิดคิซซาร์จบางส่วน พบว่าสามารถระบุค่าเวลา-ความถี่ ได้ตรงตามสัญญาณที่ได้จำลองไว้ ซึ่งอัลกอริทึมที่นำเสนอจะนำไปทดสอบตรวจวัดหาคิซซาร์จบางส่วนที่วัดจากโรงไฟฟ้า เพื่อนำผลที่ได้ใช้ในการบำรุงรักษาระบบเชิงป้องกันต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

[1] V.Warren and H. Sedding, Qualitrol Iris Power, “ Partail Discharge Testing : A Progress Report,” Iris Rotating Machine Conference (IRMC) , June 2017

[2] C.V. Maughan, “Partial Discharge On-Line Testing of Turbine - Driven Generator Stator Windings”, A Guide for the use of Partial Discharge in Assessing the Condition of Generator Stator Windings, EPRI Interim Report, December 2000

[3] Takahiro Joyo, Tatsuya Okuda, Ryoji Miyatake, Shinichi Okada , “Phase Resolved Partial Discharge Patterns for Various Damage of Winding Insulation Detected with Different Measuring Devices,” Electrical Insulation Conference (EIC), June 2017, pp. 344-347

[4] Mohammad Amin Kashiha, Dolat Djamshidi, “Partial Discharge Source Classification and Denoising In Rotating Machines Using Discrete Wavelet Transform and Directional Coupling Capacitors,” IEEE T&D Asia , 2009

[5] Gang Zhao, Dongxiang Jiang, “APPLICATION OF WAVELET TIME - FREQUENCY ANALYSIS ON FAULT DIAGNOSIS FOR STEAM TURBINE,” SURVEILLANCE 5 CETIM Senlis, october 2004 pp.11-13

[6] IRIS POWER, “PD Seminar – Module 1: Basic PD Theory, Detection and Characteristics,”



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12  
The 12<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET2020)

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

เรืองฤทธิ์ กิจไพบลุทธิ์

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

การตรวจข้อบัญญัติสหประชาชาติบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ด

ระหว่างวันที่ 26-28 สิงหาคม พ.ศ. 2563

ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข ชูณนเสถาะ  
ประธานกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ อาคม ม่วงเขาแดง  
ประธานกรรมการดำเนินงาน

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเริงฤทธิ์ กิจไพบูลทวี
วัน เดือน ปี	20 มีนาคม 2514
ที่อยู่ปัจจุบัน	276 ม.8 ต.บ้านครัว อ.บ้านหมอ จ.สระบุรี 18270
การศึกษา	ปริญญาตรี ค.อ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	ครูชำนาญการพิเศษ วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซิเมนต์ไทยอนุสรณ์ สังกัด คณะกรรมการการอาชีวศึกษา สระบุรี
งานวิจัยที่สนใจ	Partial discharge detection in Power Generator , Signal analysis with wavelet transform

