

การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องและ  
เวฟเล็ดแพ็คเก็ตฟิลเตอร์แบงก์ที่ได้รับการแก้ไข

ANALYSIS OF POWER QUALITY USING CONTINUOUS WAVELET  
TRANSFORM AND MODIFIED WAVELET PACKET FILTER BANK



ทิวา แก้วจันทร์านนท์  
THIVA KAECHANTRANOND

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

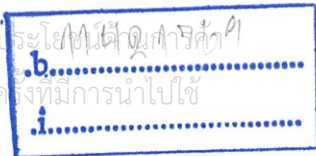
จพ.  
ท 492 ก  
2547

2547

ISBN 974-15-1147-7

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 52459  
วัน,เดือน,ปี 14 ก.ย. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง



ANALYSIS OF POWER QUALITY USING CONTINUOUS WAVELET  
TRANSFORM AND MODIFIED WAVELET PACKET FILTER BANK



THIVA KAECHANTRONOND

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1147-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องและเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิวดเตอร์เบงก์ที่ได้รับการแก้ไข
นักศึกษา	นาย ทิวา แก้วจันทร์านนท์
รหัสประจำตัว	44061051
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มความสำคัญขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ อย่างมากมาย อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ได้ผลิตเฉพาะฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น แต่ยังสร้างฮาร์โมนิกส์ย่อยและอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้นมาอีกด้วย การวิเคราะห์สัญญาณโดยวิธีการแบบเดิม โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ส่งผลต่อความถูกต้องของสเปกตรัมที่คำนวณได้เนื่องจากผลกระทบจากสเปกตรัมรั่วไหล ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของคาบของข้อมูลตัวอย่าง ผลกระทบจากสเปกตรัมรั่วไหลจะมีค่าความผิดพลาดมาก เมื่อสัญญาณมีอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ปนอยู่ด้วย ค่าความผิดพลาดที่ปรากฏจะมีความสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะในระบบขนาดใหญ่ (MVA) วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องและเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิวดเตอร์เบงก์มาใช้ ในการทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์โมนิกส์ย่อย และอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งทางด้านเวลาและความถี่แทนการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ ซึ่งสามารถลดผลกระทบเนื่องจาก สเปกตรัมรั่วไหลและผลกระทบจากสเปกตรัมเทียมทำให้สามารถระบุขนาดยอด, ตำแหน่งทางความถี่ และมุมเฟสได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถแยกแยะฮาร์โมนิกส์ที่เกิดใกล้ชิดกันได้ดีอีกด้วย เวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิวดเตอร์เบงก์ที่ได้รับการแก้ไขได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่ขึ้นกับเวลา เพื่อใช้ในการศึกษาถึงตำแหน่งและลักษณะการเกิดของฮาร์โมนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัญญาณที่นำมาใช้ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย สัญญาณ 6 พัลส์, แรงดันตกชั่วขณะ, ทรานเซียนต์, แรงดันเกินชั่วขณะ, Arc Furnace และสัญญาณ อินทิกรัลคอนโทรล ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาช่วยให้สามารถปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analysis of Power Quality using Continuous Wavelet Transform and Modified Wavelet Packet Filter Bank
Student	Mr. Thiva Kaeochantranond
Student ID.	44061051
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Chongrug Boonseng

## ABSTRACT

At present, power qualities are increasing an importance because the growing application of power electronic in complex equipment. These equipment can produce not only integer but also sub- and inter-harmonic. Fourier transform analysis can't give accurate result due to spectral leakage. The spectral leakage is appeared due to limited window. For a signal containing inter-harmonics, the leakage is the main error and may be large. The differential error will be importance especially the large system (MVA). This thesis presents continuous wavelet transform and modified wavelet packet filter bank to analyze integer harmonic, sub-harmonic and inter-harmonic of power signal instead of traditional Fourier transform. The applied continuous wavelet transform can effectively eliminate spectrum leakage and spurious component. The accurate results of amplitude, frequency and phase angle of harmonics can receive. The nearest spectrum of harmonic are clearly separated due to no spurious component. The modified wavelet packet filter bank are applied to non-stationary signal. The starting and the ending of harmonics can notice from sub-band signal of modified wavelet packet filter bank. The case study signal is 6-pulse, voltage sag, transient, voltage swell, arc furnace and integral control. The advantage of study can improve the high power quality.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ และ ดร. สมภพ ผลไม้ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ พี่ๆ กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณสยาม แก้วจันทร์านนท์ ผู้เป็นอาของข้าพเจ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ทิวา แก้วจันทร์านนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญภาพ .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 วิธีการวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	4
บทที่ 2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน .....	5
2.1 บทนำ .....	5
2.2 คุณภาพไฟฟ้าคืออะไร .....	6
2.3 สาเหตุของการพิจารณาคุณภาพกำลังไฟฟ้า .....	6
2.4 ความผิดปกติของรูปคลื่นสัญญาณ .....	8
2.4.1 ภาวะชั่วคราว .....	8
2.4.2 แรงดันตกชั่วขณะ .....	8
2.4.3 แรงดันเกินชั่วขณะ .....	8
2.4.4 แรงดันตก .....	9
2.4.5 แรงดันเกิน .....	9
2.4.6 ไฟดับ .....	9
2.4.7 ฮาร์โมนิกส์ .....	9
2.4.8 อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ .....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.9 คลื่นรอยบาก .....	10
2.4.10 แรงดันกระเพื่อม .....	10
2.5 มาตรฐานฮาร์โมนิกส์ในประเทศไทย .....	11
2.6 สรุป .....	12
<b>บทที่ 3 การแปลงเวฟเล็ต .....</b>	<b>13</b>
3.1 บทนำ .....	13
3.2 การแปลงฟูเรียร์ .....	14
3.3 การแปลงเวฟเล็ต .....	16
3.3.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....	16
3.3.2 การเลือกเวฟเล็ตแม่ .....	20
3.3.3 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด .....	21
3.3.4 การคำนวณอิมเมจคอมโพเนนท์ .....	23
3.3.5 ชุดตัวกรอง DWPT ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ .....	26
3.4 สรุป .....	28
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....</b>	<b>29</b>
4.1 บทนำ .....	29
4.2 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....	30
4.3 การนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ .....	33
4.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น .....	33
4.3.2 การวิเคราะห์สัญญาณ 6 พัลส์ .....	37
4.3.2.1 สัญญาณ 6 พัลส์ในกรณีปกติ .....	38
4.3.2.2 สัญญาณ 6 พัลส์ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	41
4.3.3 การวิเคราะห์สัญญาณ impulsive transient .....	44
4.3.3.1 กรณีศึกษาที่ 1 .....	45
4.3.3.1 กรณีศึกษาที่ 2 .....	47
4.3.4 การวิเคราะห์สัญญาณเตาหลอมเหนียวนำ .....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 สรุป .....	53
บทที่ 5 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่มีลักษณะแบบ Time-Varying โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแพ็คเก็ต .....	54
5.1 บทนำ .....	54
5.2 การวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป .....	55
5.3 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น .....	58
5.4 การวิเคราะห์สัญญาณอินทิกรัลคอนโวลูชัน .....	68
5.4.1 กรณีศึกษาที่ 1 .....	70
5.4.2 กรณีศึกษาที่ 2 .....	76
5.4.3 กรณีศึกษาที่ 3 .....	82
5.5 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ .....	88
5.6 สรุป .....	91
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	92
6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง .....	92
6.2 สรุป .....	93
6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป .....	94
6.3.1 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....	94
6.3.2 การพัฒนาส่วนของโปรแกรมเพื่อใช้ตรวจจับฮาร์โมนิกส์ .....	95
เอกสารอ้างอิง .....	97
ภาคผนวก ก .....	102
ภาคผนวก ข .....	104
ภาคผนวก ค .....	107
ภาคผนวก ง .....	113
ประวัติผู้เขียน .....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะของกระบวนภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ ..... 7
2.2	ปัญหาทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเครื่องมือที่ใช้แก้ปัญหา ..... 10
4.1	ผลการวิเคราะห์หีสเป็คตรัมของสัญญาณในรูป 4.2 โดยวิธีการแปลงฟูรีเยร์ ..... 35
4.2	ผลการวิเคราะห์หีสเป็คตรัมของสัญญาณในรูป 4.2 ที่ได้โดยวิธี - การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง ..... 35
4.3	ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดัน - ขณะเกิดทรานเซียนต์ ณ เฟส C ..... 47
4.4	ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดัน - ขณะเกิดทรานเซียนต์ ณ เฟส C ..... 49
4.5	ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณกระแสเฟส A ของเตาหลอมเหนียวนำ ..... 52
5.1	องค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 5.1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ - โดยใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบรวดเร็ว ..... 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กราฟ CBEMA สำหรับศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน rms - ต่อช่วงเวลาที่มืผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ .....	7
2.2 ลักษณะของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณที่สำคัญ .....	10
3.1 การวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดการรบกวนชั่วคราวโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ .....	13
3.2 สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz. ....	15
3.3 สเปกตรัมของสัญญาณในอุดมคติเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ได้จาก - การแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง .....	16
3.4 เวฟเล็ตซึ่งถูกสเกล ( $a = 1/100$ , $a = 1/200$ และ $a = 1/300$ ) และ เลื่อนทางตำแหน่ง ( $b = -50\text{ms}$ , $b = 0\text{ms}$ และ $b = 40\text{ms}$ ) .....	17
3.5 การนำเวฟเล็ตมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ โดยการปรับ - ค่าการเลื่อนทางตำแหน่งและค่าสเกล .....	18
3.6 เวฟเล็ตถูกเลื่อนตำแหน่งทางเวลาเพื่อวิเคราะห์ตลอดทั้งสัญญาณ .....	18
3.7 เวฟเล็ตแม่ถูกปรับค่าสเกลเพื่อขยายช่วงเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ .....	19
3.8 ตัวอย่างเวฟเล็ตแม่แบบ shanon และ Haar .....	20
3.9 ตัวกรองเวฟเล็ตแบบไม่สมมาตรมีแถบสัญญาณแบบ - Constant Relative Bandwidth .....	22
3.10 ตัวกรองเวฟเล็ตแบบสมมาตรมีแถบสัญญาณแบบ Constant Bandwidth .....	22
3.11 ชุดตัวกรองเวฟเล็ตเพ็คเก็ตแบบ 1 ระดับ .....	23
3.12 เส้นทางกำนวนผลของอิมเมจสำหรับผลลัพธ์ของสัญญาณ - ซึ่งผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (LP) .....	25
3.13 ชุดตัวกรองเวฟเล็ตเพ็คเก็ตที่ได้รับการแก้ไข [18] .....	26
3.14 ผลการตอบสนองของชุดกรองเวฟเล็ตแบบ LP และ HP เมื่อใช้เวฟเล็ตแบบ Db40 .....	27
3.15 สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น เพื่อทดสอบการทำงานของชุดตัวกรอง - เวฟเล็ตเพ็คเก็ตฟิลเตอร์เบงกัในรูปแบบที่ 3.13 .....	27
3.16 องค์ประกอบของสัญญาณและสเปกตรัมของสัญญาณแรงดัน - ที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น .....	28
4.1 เวฟเล็ตแม่ modulated Gaussian wavelet ที่ $f_0 = 1$ และ $a = 1$ .....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 รูปคลื่นที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบการวิเคราะห์ – หาสเปกตรัมของสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง .....	33
4.3 สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นในรูปที่ 4.2 .....	34
4.4 แผนผังแสดงกระบวนการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต .....	36
4.5 แผนภาพระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการตรวจวัดสัญญาณเพื่อทำ- การศึกษาในกรณีของสัญญาณ 6 พัลส์ในกรณีปกติและกรณีของการเบรกโดย- การคายพลังงาน .....	37
4.6 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติ ณ เฟส A .....	38
4.7 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติ ณ เฟส B .....	38
4.8 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติ ณ เฟส C .....	38
4.9 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ในกรณีปกติ ณ เฟส A .....	39
4.10 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ในกรณีปกติ ณ เฟส B .....	39
4.11 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ในกรณีปกติ ณ เฟส C .....	39
4.12 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.6 – 4.11 – ที่ได้จากเครื่องมือวัด RPM .....	40
4.13 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ ณ เฟส A ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	41
4.14 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ ณ เฟส B ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	41
4.15 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ ณ เฟส C ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	41
4.16 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ณ เฟส A ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	42
4.17 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ณ เฟส B ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	42
4.18 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ ณ เฟส C ขณะ - มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน .....	42
4.19 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.13 – 4.18 - เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ที่ได้จากเครื่องมีอวัต RPM .....	43
4.20 แผนภาพเชิงเส้นของโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษาในกรณีของการเกิด- ทรานเซียนต์แบบ impulsive .....	44
4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ขณะเกิดทรานเซียนต์แบบ impulsive สำหรับ- กรณีศึกษาที่ 1 .....	45
4.22 องค์ประกอบของสัญญาณ 4 องค์ประกอบแรกของสัญญาณในรูปที่ 4.21 .....	46
4.23 สเปกตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 4.22 .....	46
4.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ขณะเกิดทรานเซียนต์แบบ impulsive – สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 .....	47
4.25 องค์ประกอบของสัญญาณ 4 องค์ประกอบแรกของสัญญาณในรูปที่ 4.24 .....	48
4.26 สเปกตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 4.25 .....	48
4.27 สัญญาณกระแสของเตาหลอมเหนี่ยวนำเฟส A, B และ C .....	50
4.28 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส A ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ .....	51
4.29 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส B ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ .....	51
4.30 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส C ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ .....	52
5.1 รูปคลื่น 50 Hz. โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามเวลา – ที่เปลี่ยนไป (time-varying) .....	56
5.2 สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5.1 เมื่อใช้การคำนวณ FFT แบบ 32 จุด .....	56
5.3 สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5.1 เมื่อใช้การคำนวณ FFT แบบ 64 จุด .....	57
5.4 สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นจากสมการที่ (5.3) .....	59
5.5 สเปกตรัมความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	60
5.6 สเปกตรัมความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ท .....	60
5.7 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	61
5.8 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ท .....	61
5.9 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	62
5.10 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ท .....	62
5.11 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	63
5.12 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ท .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.13 มุมเฟสความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	64
5.14 มุมเฟสความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	64
5.15 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	65
5.16 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	65
5.17 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	66
5.18 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	66
5.19 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	67
5.20 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	67
5.21 แผนผังระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษา .....	68
5.22 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 1 ที่ทำการตรวจจับได้ .....	70
5.23 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.22 ที่นำมาทำการวิเคราะห์ .....	70
5.24 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	71
5.25 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	71
5.26 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยใช้ FFT .....	72
5.27 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยใช้เวฟเล็ิต .....	72
5.28 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	73
5.29 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	73
5.30 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	74
5.31 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	74
5.32 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 2 ที่ทำการตรวจจับได้ .....	76
5.33 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.32 ที่นำมาทำการวิเคราะห์ .....	76
5.34 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	77
5.35 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	77
5.36 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	78
5.37 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	78
5.38 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	79
5.39 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ิต .....	79
5.40 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT .....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.41	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 80
5.42	สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 2 ที่ทำการตรวจจับได้ ..... 82
5.43	สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.42 ที่นำมาทำการวิเคราะห์ ..... 82
5.44	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 83
5.45	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 83
5.46	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 84
5.47	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 84
5.48	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 85
5.49	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 85
5.50	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 86
5.51	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 86
5.52	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จาก digital relay ..... 88
5.53	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะในรูป 5.52 เมื่อทำการปรับอัตราส่วนตัวคูณ ..... 88
5.54	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 89
5.55	สเป็คตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ..... 89
5.56	มุมเฟสของฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดย FFT ..... 90
5.57	มุมเฟสของฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด ... 90
6.1	การนำการแปลงเวฟเล็ดไปประยุกต์ใช้กับระบบ resonant grounded - ของระบบจ่ายไฟ [38] ..... 94
6.2	ลักษณะของการพัฒนาโปรแกรมในขนาดคตในส่วนของการป้องกันผลของ - ฮาร์โมนิกส์ที่จะเข้าสู่หม้อแปลงที่สถานีจ่ายไฟย่อย ..... 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และในระบบควบคุมการจ่ายไฟ อุปกรณ์เหล่านี้มีลักษณะของภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear load) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเหล่านี้มีความไวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าอย่างยิ่ง นอกจากนี้อุปกรณ์เหล่านี้ยังสร้างฮาร์มอนิกส์ไม่เฉพาะที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น แต่ยังสร้างฮาร์มอนิกส์ย่อย และอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ขึ้นมาอีกด้วย การจะรักษาสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ให้สามารถทำงานได้ตามปกติ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรักษาแรงดันที่ป้อนให้อุปกรณ์อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ให้มากที่สุด ซึ่งตัวที่ใช้วัดความมีเสถียรภาพของการทำงานของอุปกรณ์ในโรงงานไฟฟ้าก็คือคุณภาพกำลังไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบกำลังไฟฟ้าสามารถถูกรบกวนได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากผลของทรานเซียนต์

ในปัจจุบันการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดยอด, ตำแหน่งทางความถี่และมุมเฟสของฮาร์มอนิกส์ การวิเคราะห์สัญญาณโดยวิธีการแบบเดิมโดยการแปลงฟูเรียร์ส่งผลต่อความถูกต้องของสเปกตรัมที่คำนวณได้เนื่องจากผลกระทบจากสเปกตรัมรั่วไหล ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของคาบของข้อมูลตัวอย่าง ผลกระทบจากสเปกตรัมรั่วไหลจะมีค่าผิดพลาดมาก เมื่อสัญญาณมีอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ปนอยู่ด้วย สำหรับกรณีที่สเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดในบริเวณใกล้เคียงกัน การแยกแยะสเปกตรัมของสัญญาณแทบจะทำได้ไม่ได้เนื่องจากผลของสเปกตรัมเทียม ยิ่งไปกว่านั้นการวิเคราะห์สัญญาณยังต้องทราบคาบของสัญญาณก่อนจึงสามารถทำการวิเคราะห์ได้ ทำให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถวิเคราะห์ได้หรือวิเคราะห์ได้ไม่ถูกต้อง ทำให้การแก้ปัญหากระทำไม่ได้ถูกต้องเท่าที่ควร ซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง และเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิวดเจอร์แบงก์มาใช้ในการทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์มอนิกส์ย่อย และอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งทางด้านเวลา และความถี่แทนการวิเคราะห์โดยใช้การฟูเรียร์ ซึ่งสามารถลดผลกระทบเนื่องจากสเปกตรัมรั่วไหลและผลกระทบจากสเปกตรัมเทียมทำให้สามารถระบุขนาดยอด, ตำแหน่งทางความถี่ และมุมเฟสได้อย่างถูกต้องอีกทั้งยังสามารถแยกแยะฮาร์มอนิกส์ที่เกิดใกล้เคียงกันได้ดีอีกด้วย เวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิวดเจอร์แบงก์ที่ได้รับการแก้ไขได้ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อใช้ศึกษาถึงลักษณะการเริ่มเกิดและลักษณะการสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบให้สูงขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำการแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง และชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. นำสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มาทำการวิเคราะห์เพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม
3. ทำการพัฒนาการวิเคราะห์สัญญาณ เพื่อนำไปใช้ในการจัดการปัญหาผลกระทบที่เกิดจากอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ของอุปกรณ์

## 1.3 วิธีการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ และตำราที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง และชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิลเตอร์เบงกในการประยุกต์ใช้งานทางด้านเทคนิคต่างๆ
2. ศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยผลของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ ทรานเซียนต์ และผลของฮาร์โมนิกส์ที่ส่งรบกวนต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าอันนำมาซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ที่ผิดพลาด หรือสูญเสียการทำงาน
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ Matlab และ Microsoft Visual Studio .NET เพื่อนำมาใช้เขียนโปรแกรมศึกษาผลของคุณภาพกำลังไฟฟ้า
4. ทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้ Matlab เพื่อทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณได้
5. นำโปรแกรมที่ได้รับการทดสอบมาทำการเขียนโปรแกรมสำเร็จรูป โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio .NET และทำการออกแบบหน้าจอที่ทำการติดต่อการทำงานกับผู้ใช้ให้มีรูปแบบที่สะดวก
6. ทำการเก็บข้อมูลสัญญาณแรงดัน และกระแสที่เกิดขึ้นจริงภายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และตามระบบจ่ายไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะของความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่างๆ จากโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้น
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จะต้องวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการนำการแปลงฟูเรียร์ไปประยุกต์ใช้งาน ในการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงเพื่อขีดความสามารถในการวิเคราะห์สัญญาณให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น
2. ทำการนำสัญญาณที่ตรวจจับได้จริงจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทำการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น
3. ทำการเขียนโปรแกรมสำเร็จรูปด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio .NET และ ออกแบบส่วนของหน้าจอที่ทำการติดต่อกับผู้ใช้ให้สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวก

#### 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนในการวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ ผลของการนำการแปลงฟูเรียร์ไปประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม และได้้นำการแปลงเวฟเล็ตมาประยุกต์ใช้งานเพื่อนำมาใช้ในงานในส่วนของการตรวจจับตำแหน่งของการเกิดสัญญาณรบกวน แยกแยะผลของการรบกวน และ นำชุดตัวกรองเวฟเล็ตเพื่อเกิดฟิลเตอร์เบงก์มาใช้ในการตรวจจับฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับ การแปลงฟูเรียร์ ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา วิธีการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 ลักษณะของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า การแก้ไขปัญหโดยวิธีการต่างๆ และปัญหาในการแก้ไข

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง และชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตที่เป็นแบบดั้งเดิม และการพัฒนาชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิลเตอร์ที่ได้รับการแก้ไขเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น

บทที่ 4 การนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมาทำการประยุกต์ใช้ เพื่อวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น เพื่อเปรียบเทียบถึงความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปประยุกต์ใช้งานของการวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจจับได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มความถูกต้องและขีดความสามารถในการวิเคราะห์ให้เพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้การแปลงฟูเรียร์

บทที่ 5 ทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Varying) โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินงานมา และวิจารณ์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

ภาคผนวก ก. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ข. ภาพโดยรวมของงานวิจัย

ภาคผนวก ค. โปรแกรมประยุกต์ที่ได้รับการพัฒนา

ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรม

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. มีความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของปัญหา และความสำคัญของคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในระบบจ่ายไฟ และภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่เผชิญอยู่ในปัจจุบัน ในด้านของการวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้ในปัจจุบัน

2. รู้จักและเข้าใจลักษณะของการทำงานของอุปกรณ์และระบบจ่ายไฟรวมถึงรูปแบบของการทำงานของระบบต่างๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรม และระบบจ่ายไฟ

3. รู้จักการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม Matlab และ Microsoft Visual Studio .NET เพื่อพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ขึ้นมาใช้งาน ทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าขึ้นมาใช้งานด้วยความสะดวกยิ่งขึ้น

4. รู้จักการนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องไปทำการประยุกต์ใช้งาน ในการวิเคราะห์สัญญาณที่เป็นแบบ stationary และ non-stationary ทั้งในส่วนของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบและสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# คุณภาพกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน

### 2.1 บทนำ

ในช่วงระยะเวลาเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการให้ความสำคัญกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) เป็นอย่างมากจนถือได้ว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นหัวใจสำคัญของระบบไฟฟ้า เนื่องจากคุณภาพกำลังไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อระบบ คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามความหมายของ IEC และ IEEE มีความหมายถึงลักษณะของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า ปัญหาที่ก่อให้เกิดคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่ดีสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (voltage sag), แรงดันเกินชั่วขณะ (voltage swell), การเกิดไฟดับ, การเกิดสัญญาณคลื่นรบกวน (Notching) การเกิดทรานเซียนต์ (transient), frequency deviation และความผิดปกติเนื่องจากรีโมติกส์ เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนคุณภาพกำลังไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์จำพวกกรีเลียงบางชนิดทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด ทำให้อุปกรณ์จำพวก Adjustable Speed Drive (ASD) หยุดการทำงาน หรือทำให้อุปกรณ์ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ทำงานผิดพลาด เป็นต้น ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสายการผลิตทำให้กระบวนการผลิตขาดความต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้รับความเสียหายอันนำมาซึ่งความเสียหายทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบหลายอย่างประกอบกัน เช่น ลักษณะและความสำคัญของภาระไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบ, ความรุนแรงของปัญหา และวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบกันไป เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ได้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำไปสู่การหาทางออกสำหรับปัญหา ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงลักษณะของปัญหา และความสำคัญของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าว่ามีความสำคัญอย่างไรจึงต้องมาทำการวิเคราะห์ วิธีการพิจารณาภาระที่มีความสำคัญภายในโรงงานอุตสาหกรรม ลักษณะของความผิดปกติที่สำคัญที่พบในระบบกำลังไฟฟ้า เครื่องมือในปัจจุบันที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา รวมไปถึงข้อจำกัดที่ทำให้ปัญหาไม่อาจจะถูกกำจัดได้ ซึ่งนำไปสู่การป้องกันและบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากความผิดเพี้ยน นอกจากนี้ยังได้มีการกล่าวถึงมาตรฐานฮาร์โมนิกส์ของประเทศไทย เนื่องจากเรื่องของฮาร์โมนิกส์กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งการกำหนดมาตรฐานของระดับของฮาร์โมนิกส์นั้นจะกำหนดโดยการไฟฟ้า ว่ามีลักษณะหรือข้อกำหนดเป็นอย่างไร เพื่อกำหนดระดับของฮาร์โมนิกส์ที่เหมาะสมต่อการทำงานภายในโรงงาน โดยระดับของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์หรือทำให้อุปกรณ์หยุดทำงานซึ่งรายละเอียดจะได้ทำการกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าคืออะไร

ก่อนที่จะกล่าวถึงการนำการแปลงเวฟเลิตมาใช้ในการวิเคราะห์ หรือแก้ปัญหาทางคุณภาพกำลังไฟฟ้า สิ่งแรกที่จะต้องทำความเข้าใจก่อนก็คือความหมายของคำว่า "คุณภาพกำลังไฟฟ้า" เนื่องจากคำว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นคำที่มักมีการพูดถึงบ่อยครั้ง คำว่า "คุณภาพกำลังไฟฟ้า" ตามความหมายแล้วมักจะใช้เพื่อบ่งบอกถึงควมมีเสถียรภาพ หรือความมั่นคงทางการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจะต้องมีความต่อเนื่อง โดยตามคำจำกัดความของ IEC และ IEEE ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่าเป็นคุณลักษณะของสัญญาณกระแส, แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในสภาวะปกติมีการทำงานผิดพลาด, หยุดการทำงาน หรือได้รับความเสียหาย

## 2.3 สาเหตุของการพิจารณาคุณภาพกำลังไฟฟ้า

สาเหตุที่ทำให้ต้องมีการพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้านั้น มีอยู่หลายกรณีด้วยกันสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 เกิดจากการนำอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาประยุกต์ใช้ ในการผลิตอุปกรณ์ควบคุมการทำงานต่างๆภายในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์เหล่านี้มีความไวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแส อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ Programable Logic Controller (PLC), ASD และรีเลย์บางชนิด เป็นต้น

2.3.2 ผลของรบกวนการทำงานเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเกิดจากการนำเอาอุปกรณ์จำพวก อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ อุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นแหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิกส์ที่สำคัญไม่เฉพาะฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงฮาร์โมนิกส์ย่อย และอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์อีกด้วย

2.3.3 เกิดจากผู้บริโภคหรือผู้ใช้ไฟมีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับความสำคัญของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้ามากขึ้นกว่าอดีต ทำให้ทราบผลกระทบที่จะเกิดกับกระบวนการผลิต ทำให้มีความต้องการในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น

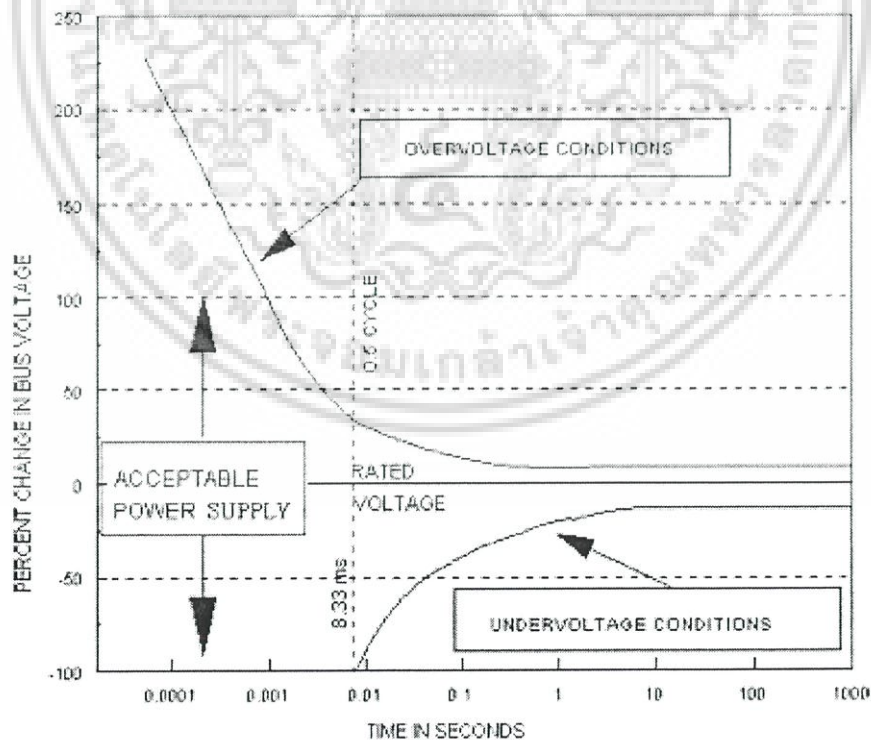
2.3.4 เกิดจากการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าเป็นแบบโครงข่าย จากลักษณะดังกล่าวทำให้ถ้าเกิดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบ ระบบที่อยู่ใกล้เคียงก็จะได้รับปัญหาตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาของการไหลของฮาร์โมนิกส์จากระบบ หรือโรงงานข้างเคียง

เพื่อให้สาเหตุของปัญหาได้รับการบรรเทา การพิจารณาถึงความสำคัญของกระบวนการทำงาน หรือความสำคัญของกระบวนการผลิตจึงมีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการพิจารณาหาแนวทางในการวางแผนเพื่อแก้ปัญหา ลักษณะของกระบวนการที่มีความสำคัญสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของกระบวนการภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ

ลักษณะของงาน	ตัวอย่างของกระบวนการทำงาน
กระบวนการที่มีความต่อเนื่อง	การทำกระดาษ การทำพลาสติกหรือการขึ้นรูป การอบเซรามิก
กระบวนการทำงานของเครื่องจักรที่ต้องการความถูกต้องสูง	การประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ด้วยเครื่องจักร
กระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และการวิจัย	การผลิตอุปกรณ์จำพวกเซมิคอนดักเตอร์
งานที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่มีความสำคัญ	ธนาคาร การติดต่อสื่อสาร การออกอากาศรายการวิทยุ หรือโทรทัศน์
งานด้านความปลอดภัย หรือที่เกี่ยวข้อง	กระบวนการทางเคมี โรงพยาบาล การทหาร



รูปที่ 2.1 กราฟ CBEMA สำหรับศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน rms ต่อช่วงเวลาที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ความผิดปกติของรูปคลื่นสัญญาณ

ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่ดีเกิดจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความรุนแรง และระยะเวลาของการเกิด ซึ่งสามารถพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณได้จากกราฟ CBEMA ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยลักษณะของความผิดปกติที่สำคัญตามที่ IEEE Standards Coordinating Committee 22 (Power Quality) ได้ให้คำแนะนำไว้ [2]

### 2.4.1 ภาวะชั่วคราว (Transient)

ภาวะชั่วคราวหรือทรานเซียนต์ คือ ปรากฏการณ์ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าแบบทันทีทันใดจากสภาวะปกติ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ impulsive transient และ oscillatory transient ตัวอย่างของการเกิด impulsive transient ได้แก่ การเกิดฟ้าผ่า สำหรับกรณีของการเกิดทรานเซียนต์แบบ oscillatory ได้แก่ การต่อคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบแบบ back-to-back เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่งผลให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน และอาจทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้

### 2.4.2 แรงดันตกชั่วคราว

สัญญาณแรงดันตกชั่วคราว (Voltage sags or voltage dips) อาจกล่าวได้ว่าเป็นการลดลงชั่วคราวของขนาด rms ซึ่งมีขนาดลดลงในช่วง 0.1 pu. – 0.9 pu. ของขนาดสัญญาณแรงดันขนาดปกติ โดยช่วงระยะเวลาของการเกิดจะอยู่ในช่วง 10 msec. ถึง 1 min. (0.5-50 ลูกคลื่น) แรงดันตกชั่วคราวมีสาเหตุมาจากหลายกรณี เช่น เกิดจากฟ้าผ่า, single-line-to-ground fault (SLGF) และ two or three phase faults เป็นต้น การเกิดแรงดันตกชั่วคราวส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวต่อการตอบสนอง ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เสื่อมสภาพและเสียหายได้ [3] นอกจากนี้ยังทำลายสายการผลิตส่งผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์

### 2.4.3 แรงดันเกินชั่วคราว

แรงดันเกินชั่วคราว (Voltage swells) คือ ค่าแรงดัน rms ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 – 1.8 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 msec. ถึง 1 min. สาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจจะเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือเกิดจากการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เสียหาย หรือทำให้อุปกรณ์ที่มีความไวต่อการตอบสนองมีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 แรงดันตก

แรงดันตก (Undervoltage) คือ ค่าแรงดัน rms ที่มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8 – 0.9 pu. ในช่วงระยะเวลา นานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากผลของการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เนื่องจากเกิดการรับภาระที่มากเกินไป (overload)

#### 2.4.5 แรงดันเกิน

แรงดันเกิน (Overvoltage) คือ ค่าแรงดัน rms ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 - 1.2 pu. ในช่วงเวลา นานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ ส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

#### 2.4.6 ไฟดับ

ไฟดับ (Voltage interruption) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ภายในช่วงระยะเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ส่งผลกระทบอย่างมากต่อสายการผลิต ทำให้การผลิตหยุดชะงัก

#### 2.4.7 ฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ผลของฮาร์โมนิกส์เมื่อรวมกับสัญญาณความถี่หลักมูลฐานด้วยทางขนาด (amplitude) และมุมเฟส (phase angle) จะส่งผลให้สัญญาณที่ได้มีลักษณะผิดเพี้ยนไป (distortion) จากคลื่นสัญญาณไซน์ ส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการตอบสนองของงานผิดพลาด ก่อให้เกิดความร้อนต่อหม้อแปลง และในกรณีที่มีการขยายหรือมีปริมาณฮาร์โมนิกส์มากพออาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

#### 2.4.8 อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์

อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter-harmonics) ส่วนประกอบของรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ซึ่งมีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นกับอุปกรณ์จำพวก [4] frequency converters, cycloconverters, มอเตอร์เหนี่ยวนำ และอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแบบอาร์ค มีผลทำให้เกิดการกระพริบของหลอดฟลูออโรเรสเซนต์ หรืออุปกรณ์แสดงผลอื่นๆ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับหม้อแปลง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

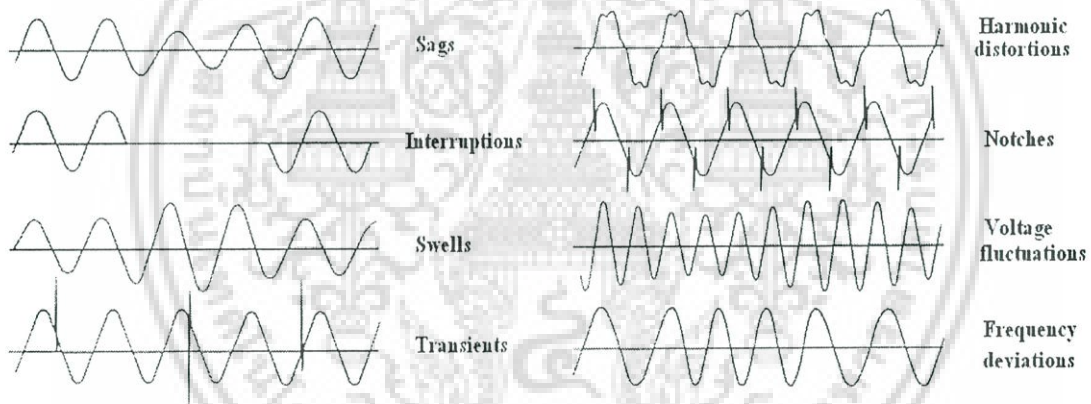
### 2.4.9 คลื่นรอยบาก

คลื่นรอยบาก (Notching) คือ สัญญาณรบกวนแรงดันซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาน้อยกว่า 0.5 ลูกคลื่น มีลักษณะคล้ายคลึงกับทรานเซียนต์ สาเหตุของการเกิดคลื่นรอยบากส่วนใหญ่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อกระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด

### 2.4.10 แรงดันกระเพื่อม

แรงดันกระเพื่อม (voltage fluctuations) คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดัน rms มีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.95 – 1.05 pu. เกิดจากอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแบบอาร์ค ส่งผลทำให้เกิดการกระพริบ (flicker) ของหลอดไฟ

ลักษณะความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ที่ก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่ดีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณที่สำคัญ

ตารางที่ 2.2 ปัญหาทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเครื่องมือที่ใช้แก้ปัญหา

Mitigation Devices	Sags	Interruptions	Swells	Transients	Overtoltage	Undervoltage	Harmonics	Notches	Voltage fluctuations
SA				✓					
BESS	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
DSTATCOM				✓	✓	✓			✓
DSC						✓			✓
DVR	✓		✓	✓			✓		✓
PFCC					✓	✓			
SMES	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

SETC	✓		✓		✓	✓			
SSTS	✓	✓	✓						
SSCB		✓							
SVC	✓		✓		✓	✓			✓
TSC				✓		✓			
UPS	✓	✓	✓		✓	✓			
APF(TF)				✓			✓	✓	

APF(TF) = Active power filter or tuned filter

SMES = Superconducting magnetic energy storage system

BESS = Battery energy storage system

SETC = Static electronic tap changer

DSTATCOM = Distribution static synchronous compensator

SSTS = Solid-state transfer switch

DSC = Distribution series capacitor

SSCB = Solid-state circuit-breaker

DVR = Dynamic voltage restorer

SVC = Static var compensator

PFCC = Power factor correction capacitor

TSC = Thyristor switched capacitor

SA = Surge arrester

UPS = Uninterruptible power supply

จากปัญหาความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดขึ้นทำให้มีการประดิษฐ์เครื่องมือ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวขึ้นมา โดยลักษณะของปัญหาที่เกิดกับเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาก็สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 [5] เครื่องมือเหล่านี้สามารถกำจัดหรือบรรเทาผลของความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นได้ แต่ราคาของเครื่องมือเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้โรงงานที่สามารถนำเครื่องมือที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 มาใช้ในการแก้ปัญหาก็จะต้องเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่มากๆ เท่านั้น การลงทุนจึงจะคุ้มค่า สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดไม่ใหญ่มากแนวทางในการแก้ปัญหาก็ทำได้โดยการป้องกันหรือบรรเทาผลของการเกิด

## 2.5 มาตรฐานฮาร์โมนิกส์ในประเทศไทย

เนื่องจากปัจจุบันฮาร์โมนิกส์กำลังเป็นที่สนใจของผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้อง เนื่องจากผลของฮาร์โมนิกส์ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแส และอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์รวมไปถึงผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องทางด้านนี้ โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้าได้มีการจำกัดระดับของฮาร์โมนิกส์ไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งถ้าระดับฮาร์โมนิกส์อยู่ในระดับมาตรฐานที่กำหนดก็จะไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่ออุปกรณ์ที่ทำงานอยู่ ในการกำหนดมาตรฐานของฮาร์โมนิกส์ในประเทศไทยนั้น ปัจจุบันการไฟฟ้าได้นำ PRC-PQG-01-1998 ซึ่งเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม[6] ซึ่งจัดทำโดยคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการไฟฟ้า มาบังคับใช้กับผู้ใช้ไฟประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ที่ทำสัญญาซื้อขายกับการไฟฟ้าแล้ว โดยอ้างอิงจากมาตรฐานต่างๆดังนี้

1. Engineering Recommendation G.5/3 September 1976 The Electricity Council Chief Engineer Conference "Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System"
2. The State Energy Commission of Western Australia (SECWA) Part 2 : Technical Requirement
3. IEC 1000 : Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4 : Testing and Measurement Techniques Section 7 : General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected thereto

## 2.6 สรุป

ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่พบในระบบไฟฟ้ากำลัง มีสาเหตุเกิดจากลักษณะของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปที่สำคัญพบได้หลายลักษณะดังนี้ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ, ไฟดับ, แรงดันเกินชั่วขณะ, แรงดันเกินชั่วคราว, ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์, สัญญาณรบกวน, การกระเพื่อมของแรงดัน และการเปลี่ยนแปลงความถี่ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักเกิดจากเหตุการณ์ธรรมชาติ สัญญาณเหล่านี้ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อการตอบสนองทำให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานผิดพลาด, หยุดทำงาน หรืออุปกรณ์ได้รับความเสียหาย การแก้ไขปัญหาอันดับแรกต้องพิจารณาถึง ลักษณะความสำคัญของภาระไฟฟ้าว่าเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญยิ่งยวดหรือไม่ถ้าเป็นลักษณะของปัญหาที่พบบ่อยจะถูกประเมินเพื่อนำเครื่องมือในตารางที่ 2.2 มาใช้ในการแก้ปัญหา แต่เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหามีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการป้องกันหรือการหาวิธีการอื่นใดมาบรรเทาความรุนแรงที่เกิดขึ้นจึงควรที่จะเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า

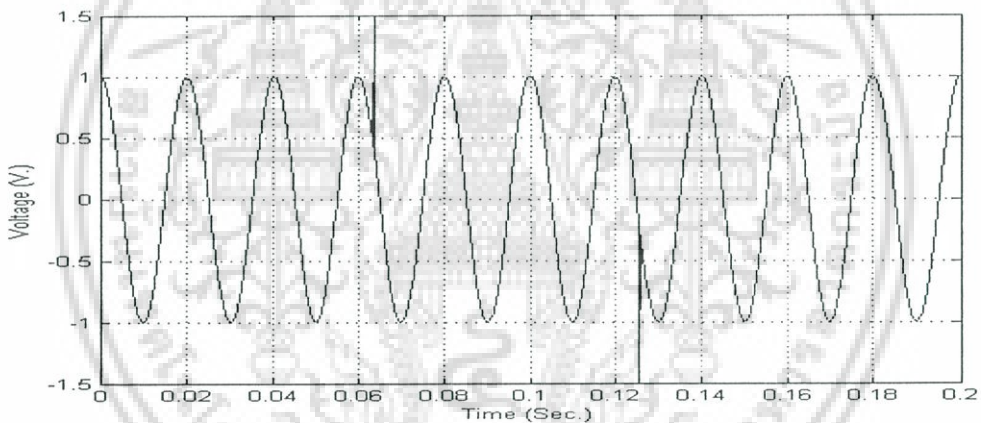
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

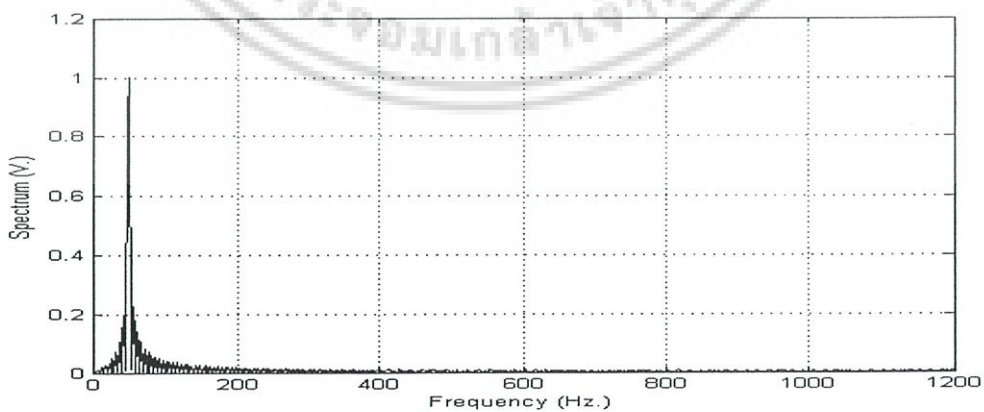
## การแปลงเวฟเล็ต

### 3.1 บทนำ

การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้าวิศวกรรมไฟฟ้าจะทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (classical Fourier analysis) ถ้าทำการพิจารณาการแปลงจากแกนเวลาไปสู่แกนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ จะพบว่าจำเป็นต้องทำการอินทิเกรตสัญญาณตลอดช่วงของสัญญาณ หรือตั้งแต่  $-\infty$  จนถึง  $\infty$  ทั้งนี้เพราะฟังก์ชัน  $e^{j\omega t}$  (หรือ  $\cos(\omega t)$  และ  $\sin(\omega t)$ ) ทำหน้าที่ครอบคลุมการวิเคราะห์ตลอดช่วงของสัญญาณ ซึ่งหมายความว่ากรรบกวนเพียงเล็กน้อยใดๆ ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ ในแกนเวลา ส่งผลกระทบต่อทุกๆ ตำแหน่งบนแกนความถี่ นั่นคือการรบกวนที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบไปทุกความถี่ เช่น ถ้านำสัญญาณไซน์บริสุทธิ์



(ก) สัญญาณไซน์ที่ถูกรบกวนที่เวลา  $t = 0.064$ sec. และ  $t = 0.126$ sec. ตามลำดับ



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลา 0 – 0.2sec.

รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดการรบกวนชั่วคราวโดยใช้การแปลงฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ถูกรบกวนที่เวลา เวลา  $t = 0.064\text{sec}$ . และ  $t = 0.126\text{sec}$ . ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) มาทำการวิเคราะห์หาสเปกตรัมโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 (ข) จะพบเพียงความถี่มูลฐาน ในขณะที่ความถี่อื่นๆ จะถูกกระจายออกไปตามแกนความถี่ นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์ไม่ได้ชี้ให้เห็นผลที่เกิดขึ้นในทางเวลาแต่อย่างใด ดังนั้นจึงมีความพยายามในการคิดค้นวิธีการใหม่ๆ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณซึ่งสามารถบ่งบอกถึงลักษณะของความผิดปกติที่เกิดขึ้นไม่เฉพาะในแกนความถี่ แต่ยังรวมถึงแกนเวลาอีกด้วย วิธีการเหล่านี้ ได้แก่ การวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform: STFT) และ Garbor transform ซึ่งผลที่ได้ก็ยังไม่ดีเท่าที่ควร จนกระทั่งการแปลงเวฟเล็ตได้ถูกคิดค้นขึ้นทำให้การวิเคราะห์สัญญาณสามารถกระทำได้อย่างดีเยี่ยมทั้งในแกนเวลาและแกนความถี่ [7] การวิเคราะห์สัญญาณโดยการแปลงเวฟเล็ตจะทำการปรับค่าสเกลเพื่อให้มีความเหมาะสมกับความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์และปรับค่าตำแหน่งทางเวลาเพื่อเลือกตำแหน่งทางเวลาที่ต้องการวิเคราะห์

### 3.2 การแปลงฟูเรียร์

การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform: FT) [8] เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time-domain) ไปสู่โดเมนความถี่ (Frequency-domain) การนำไปวิเคราะห์สัญญาณจะนำไปวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะซ้ำกันเป็นช่วงๆ หรือมีลักษณะเป็นคาบ โดยทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกในรูปของ  $\cos(\omega t)$  และ  $\sin(\omega t)$  (หรือ  $e^{-j\omega t}$ ) ค่าจำกัดความของการแปลงฟูเรียร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

สเปกตรัมของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3.1) สามารถนำมาคำนวณหาสัญญาณตั้งต้นได้โดยการใช้สมการการแปลงฟูเรียร์แบบผกผันกลับดังที่ได้นิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} dt \quad (3.2)$$

เมื่อนำการแปลงฟูเรียร์มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณซึ่งมีจำนวนจำกัด (1 คาบ มีขนาดข้อมูลเท่ากับ 512, 1024 หรือ 2048 เป็นต้น) สัญญาณที่นำมาทำการวิเคราะห์ ( $x_s$ ) จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเสมือนสัญญาณนั้นถูกคูณด้วยวินโดวส์ฟังก์ชัน ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถเขียนแสดงให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

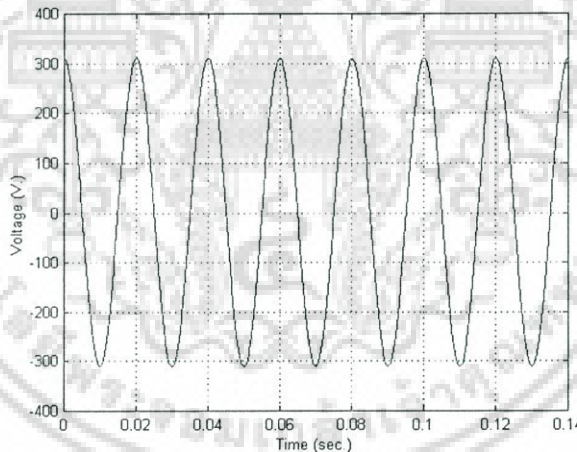
$$x_s(t) = x(t) \bullet w(t) \quad (3.3)$$

หรือสามารถเขียนในรูปของโดเมนความถี่ได้ว่า

$$x_s(f) = x(f) \otimes w(f) \quad (3.4)$$

ถ้าให้  $x(t)$  และ  $w(t)$  คือ สัญญาณไซน์และวินโดวส์ฟังก์ชันแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าสเปกตรัมของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้จะมีลักษณะแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

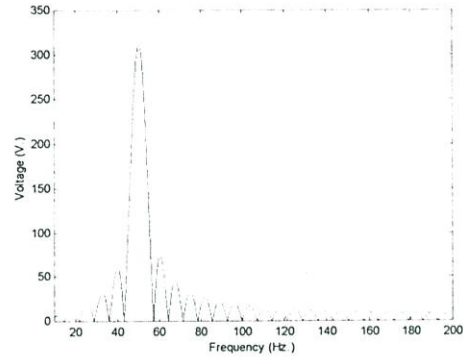
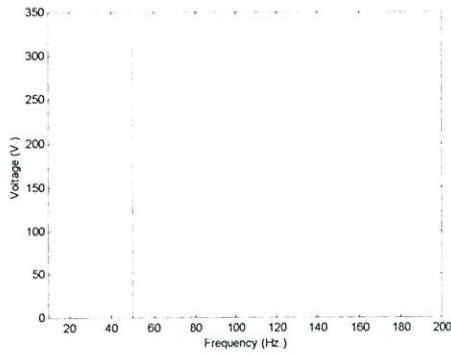
$$x_s(f) = \frac{\sin[\pi T f]}{\pi f} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.2 สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz.

สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในรูปที่ 3.2 สามารถนำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปของสเปกตรัมได้ดังรูปที่ 3.3 สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 มีค่าสเปกตรัมในอุดมคติซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 (ก) ในขณะที่สเปกตรัมซึ่งวิเคราะห์ได้จริงโดยวิธีการแปลงฟูเรียร์จะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งจะมีผลกระทบของสเปกตรัมรั่วไหล และสเปกตรัมเทียมเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์ที่ได้ไม่ได้บ่งบอกถึงเหตุการณ์ที่เกิดทางเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สเปกตรัมของสัญญาณในอุดมคติ (ข) สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์

รูปที่ 3.3 สเปกตรัมของสัญญาณในอุดมคติเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง

### 3.3 การแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ได้ถูกแนะนำขึ้นครั้งแรกโดย A. Gross Man และ J. Morlet ในปี ค.ศ. 1980 เพื่อแก้ปัญหาคำอธิบายสัญญาณที่มีลักษณะแบบ non-stationary โดยลักษณะของการแปลงเวฟเลตมีความคล้ายคลึงกับวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบสั้น (short-time Fourier transform) หรือการแปลงกาบอร์ (Gabor transform) นับตั้งแต่การแปลงเวฟเลตได้ถูกแนะนำขึ้นเป็นครั้งแรก การแปลงเวฟเลตก็ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันการแปลงเวฟเลตมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [9-10] ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

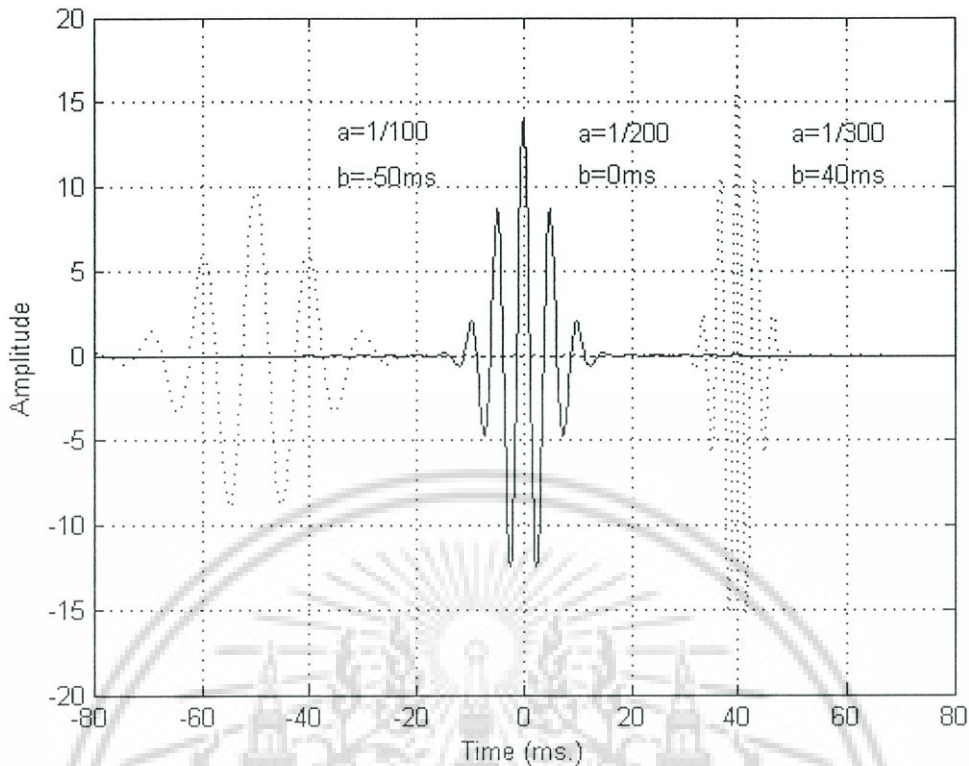
#### 3.3.1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) [11-12] ของสัญญาณใดๆที่ขึ้นกับเวลา  $x(t)$  คือ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต  $CWT(a,b)$  ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตเป็นการวัดค่าความเหมือนระหว่างสัญญาณ  $x(t)$  กับกลุ่มของเวฟเลตฟังก์ชัน  $\psi_{a,b}(t)$  โดยที่  $\psi_{a,b}(t)$  ได้มีการนิยามได้ดังนี้

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\psi(t)$  คือ เวฟเลตแม่ (mother wavelet) ซึ่งเป็นฟังก์ชันคลื่นที่มีลักษณะการสั่นโดยที่ปลายทั้งสองข้างลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองข้าง แต่ละเวฟเลต  $\psi_{a,b}(t)$  จะถูกปรับขนาดเท่ากับ  $a$  และเลื่อนทางเวลาไปเท่ากับ  $b$  แฟคเตอร์  $1/\sqrt{a}$  คือ นอร์มอลไรซ์เซชันแฟคเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาพลังงานของเวฟเลต  $\psi_{a,b}(t)$  ที่ถูกปรับขนาดไปให้มีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่  $\psi(t)$  ลักษณะของการปรับค่าสเกล  $a$  และการเลื่อนทางเวลา  $b$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เวก์เล็ตที่ถูกสเกล ( $a = 1/100$ ,  $a = 1/200$  และ  $a = 1/300$ ) และ เลื่อนทางตำแหน่ง ( $b = -50\text{ms}$ ,  $b = 0\text{ms}$  และ  $b = 40\text{ms}$ )

การนำเวก์เล็ตมาทำการวิเคราะห์สัญญาณสามารถทำได้ โดยการเลื่อนเวก์เล็ตที่ถูกสเกลไปยังตำแหน่งของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวก์เล็ต ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวก์เล็ตจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเวก์เล็ตแม่ที่เลือกมาทำการวิเคราะห์ และลักษณะของส่วนของสัญญาณที่ถูกวิเคราะห์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวก์เล็ตสามารถคำนวณหาได้จาก สมการการแปลงเวก์เล็ตแบบต่อเนื่องตามที่ได้นิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \tag{3.7}$$

เมื่อ  $x(t)$  คือ สัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์

$a$  คือ แพลคเตอร์ของการสเกล

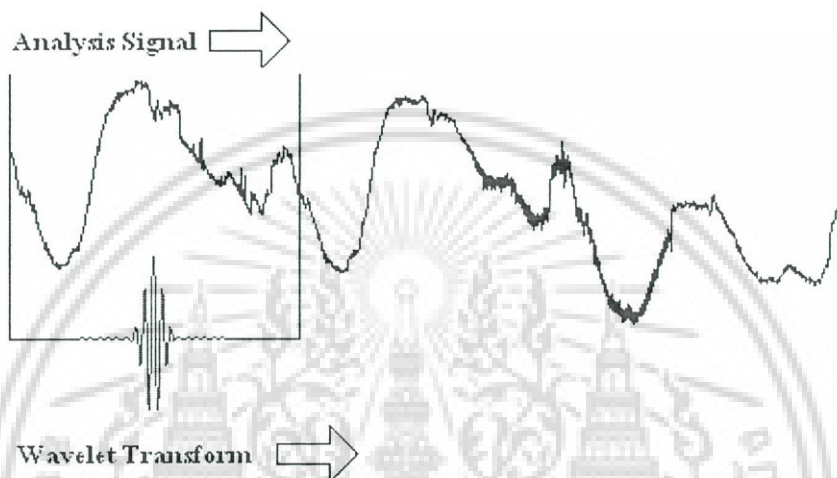
$b$  คือ แพลคเตอร์ของการเลื่อนทางเวลา

$\psi_{a,b}(t)$  คือ เวก์เล็ตแม่

เครื่องหมาย — บน  $\psi_{a,b}(t)$  แทนค่าคอนจูเกซ

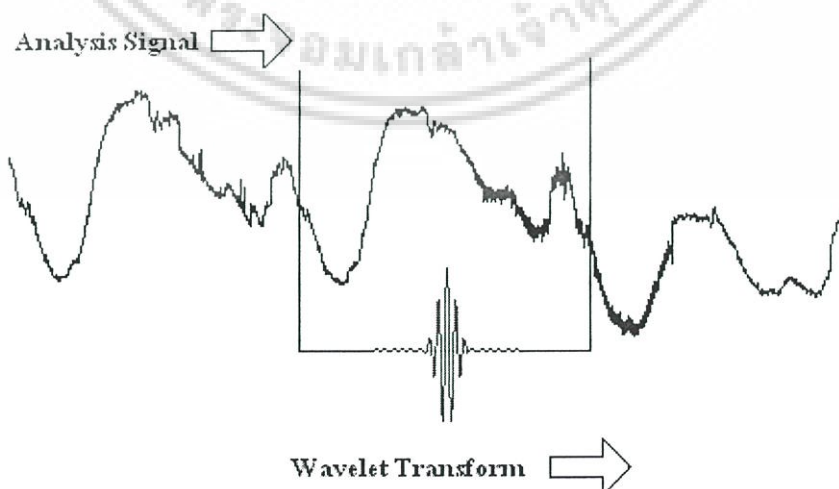
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.7) ทำให้ทราบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจำเป็นต้องเลือกเวฟเล็ตแม่ เวฟเล็ตแม่ที่เลือกจะถูกนำมาปรับสเกลและเลื่อนตำแหน่งทางเวลาให้เวฟเล็ตแม่ครอบคลุมสัญญาณในส่วนที่ต้องการทำการวิเคราะห์ต่อจากนั้นให้นำเวฟเล็ตแม่ไปทำการคูณกับสัญญาณ สัญญาณผลลัพธ์ที่ได้เมื่อนำมาทำการอินทิเกรตตลอดช่วงสัญญาณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งเกิดจากการนำเวฟเล็ตมาทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบความเหมือนกับสัญญาณในส่วนที่ถูกทำการวิเคราะห์ [13]



รูปที่ 3.5 การนำเวฟเล็ตมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ โดยการปรับค่าการเลื่อนทางตำแหน่งและสเกล

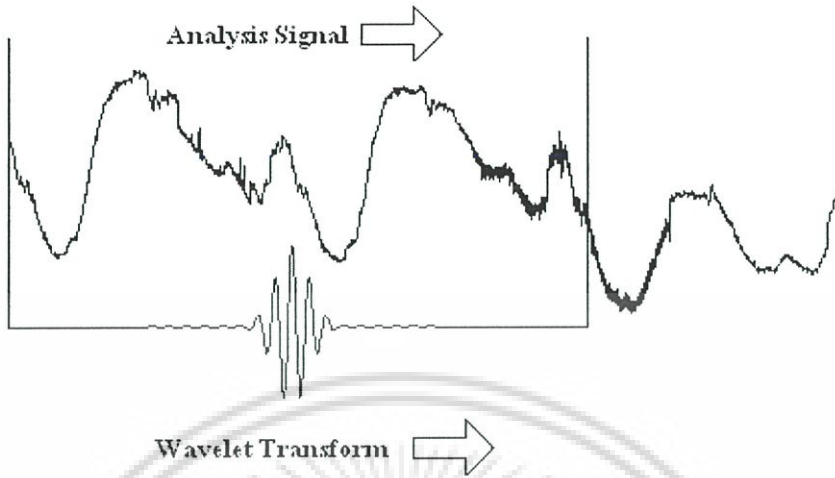
ภายหลังจากได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเรียบร้อยแล้ว เวฟเล็ตแม่ที่สเกลเดียวกันจะถูกเลือกตำแหน่งทางเวลาเพื่อนำเวฟเล็ตไปวิเคราะห์สัญญาณในส่วนต่อไป ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เวฟเล็ตถูกเลื่อนตำแหน่งทางเวลาเพื่อวิเคราะห์ตลอดทั้งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเวฟเล็ตถูกเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์สัญญาณครอบคลุมทั่วทั้งสัญญาณแล้ว เวฟเล็ตแม่ที่ถูกเลือกจะถูกปรับค่าสเกลเพื่อขยายช่วงของการวิเคราะห์ให้เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เวฟเล็ตแม่ถูกปรับค่าสเกลเพื่อขยายช่วงเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ

เวฟเล็ตจะถูกปรับค่าสเกล และเลื่อนช่วงเวลาไปจนกระทั่งค่าสเกลที่เลือกจะทำให้เวฟเล็ตแม่ที่ถูกปรับขนาดครอบคลุมตลอดทั้งสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ ในการทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องใน (3.7) จำเป็นต้องมีการเลือกเวฟเล็ตแม่เพื่อนำมาใช้เป็นตัววัดความเหมือน การเลือกเวฟเล็ตแม่ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตทำให้ค่าที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเวฟเล็ตแม่ให้มีความเหมาะสมนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เวฟเล็ตที่สามารถนำมาใช้เป็นเวฟเล็ตแม่ นอกจากจะต้องมีคุณสมบัติของฟังก์ชันคลื่นแล้วยังต้องมีพลังงานที่จำกัด นั่นคือต้องมีคุณสมบัติ admissible condition ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$C_\psi = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{\omega} d\omega \quad (3.8)$$

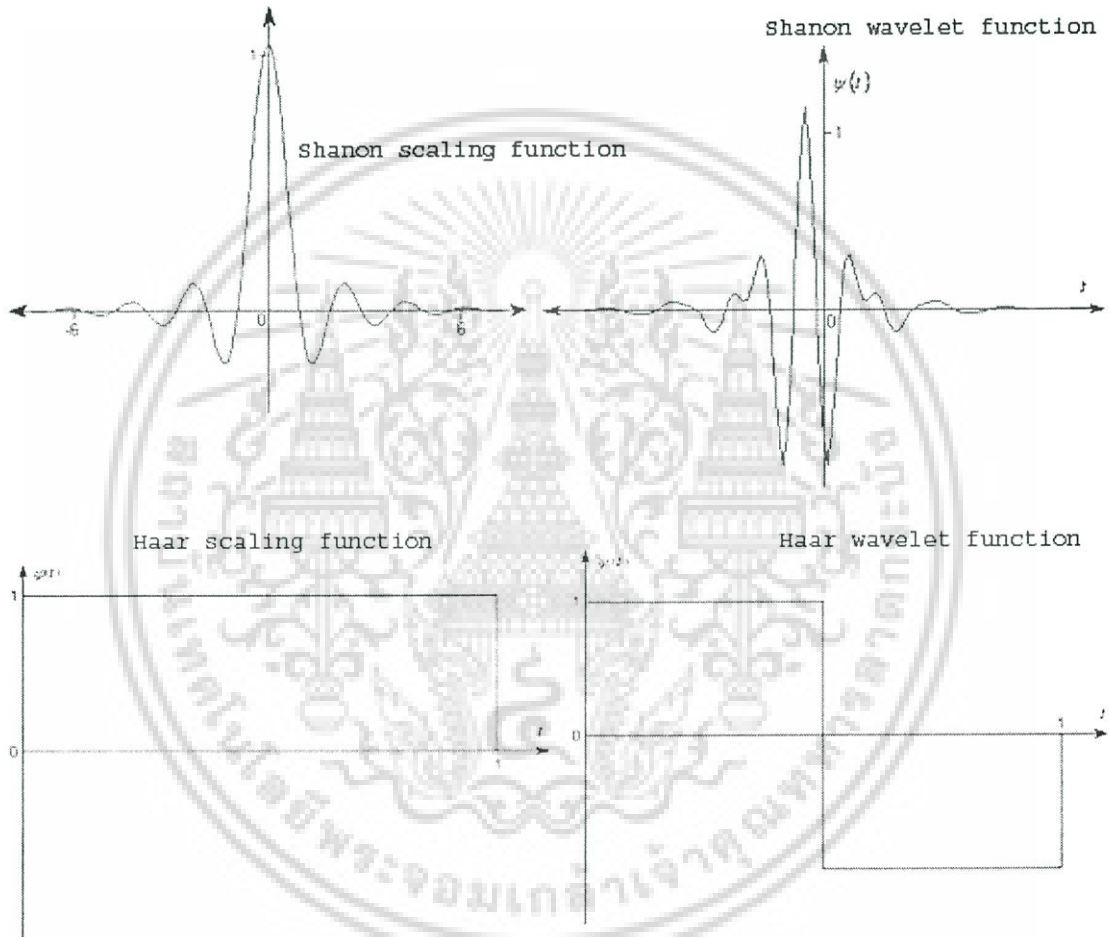
เมื่อ  $\psi(\omega)$  คือ การแปลงฟูเรียร์ของเวฟเล็ตแม่  $\psi(t)$  ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องใน (3.7) สามารถนำมาใช้แปลงกลับเพื่อคำนวณหาสัญญาณตั้งต้นที่ทำการวิเคราะห์ โดยการใช้สมการแปลงเวฟเล็ตแบบผกผันกลับ (Inverse Continuous Wavelet Transform: ICWT) ตามที่ได้มีการนิยามไว้ดังนี้

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^2} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $C_\psi$  คือ ค่าคงที่สำหรับการนอร์มอลไรซ์เซชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเลือกเวฟเล็ตแม่

จากหัวข้อการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณใดๆ จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเวฟเล็ตแม่ที่ทำการเลือก [14] เวฟเล็ตแม่ที่ได้รับการสร้างขึ้นมามีอยู่หลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแต่ละชนิดก็ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณที่ต้องการจะนำมาทำการวิเคราะห์ ดังนั้นการเลือกเวฟเล็ตให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการนำไปใช้จึงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างเวฟเล็ตแม่แบบ shanon และ Haar

เวฟเล็ตแม่ที่มีใช้มีอยู่หลายชนิดด้วยกันได้แก่ Meyer wavelet, Mexican hat wavelet, Morlet wavelet, Shannon wavelet และ Haar wavelet เป็นต้น ตัวอย่างของเวฟเล็ตแม่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 จากการศึกษาจะพบว่าเวฟเล็ตแบบ Daubechies wavelet จะเหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์สัญญาณรบกวน ขณะที่เวฟเล็ตแบบ Gaussian wavelet จะเหมาะสมกับการนำมา

ทำการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์ ส่วน Haar wavelet สามารถนำมาใช้ได้ดีในการวิเคราะห์สัญญาณในเวลาจริงและกรณีของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบทรานเซียนต์

### 3.3.3 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

ในการวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด [15-16] (Multiresolution Analysis: MRA) เป็นการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้เวฟเล็ตฟังก์ชัน และสเกลลิงฟังก์ชันมาใช้ในการสร้างบล็อกเพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณ และสร้างสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่แตกต่างกัน เวฟเล็ตฟังก์ชันมีหน้าที่ในการสร้างส่วนที่เรียกว่าส่วนของรายละเอียด (detail version) ของสัญญาณที่ถูกนำมาแยกองค์ประกอบ ในขณะที่สเกลลิงฟังก์ชันมีหน้าที่สร้างส่วนที่เรียกว่า ส่วนของการประมาณ (approximated version) ของสัญญาณที่ถูกนำมาแยกองค์ประกอบซึ่งสามารถเขียนแทนในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$x(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3.10)$$

สัญญาณในสมการที่ (3.10) สามารถเขียนเพื่อแยกองค์ประกอบได้ดังสมการที่ (3.11)

$$x(t) = \sum_k a_j(k) 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j t - k) + \sum_k d_j(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (3.11)$$

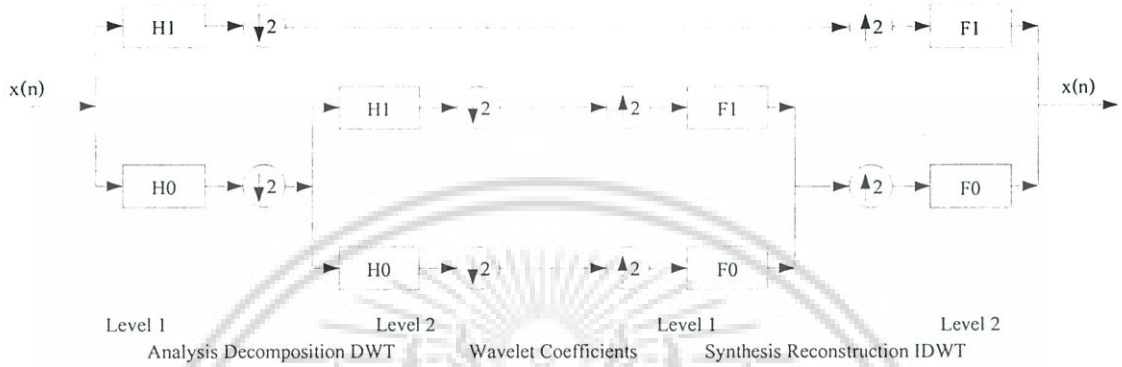
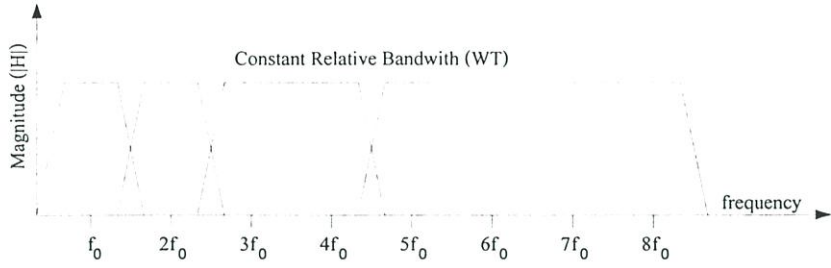
โดยส่วนของการประมาณค่า คือ

$$a_j(k) = \sum_m h_0(m - 2k) a_{j+1}(m) \quad (3.12)$$

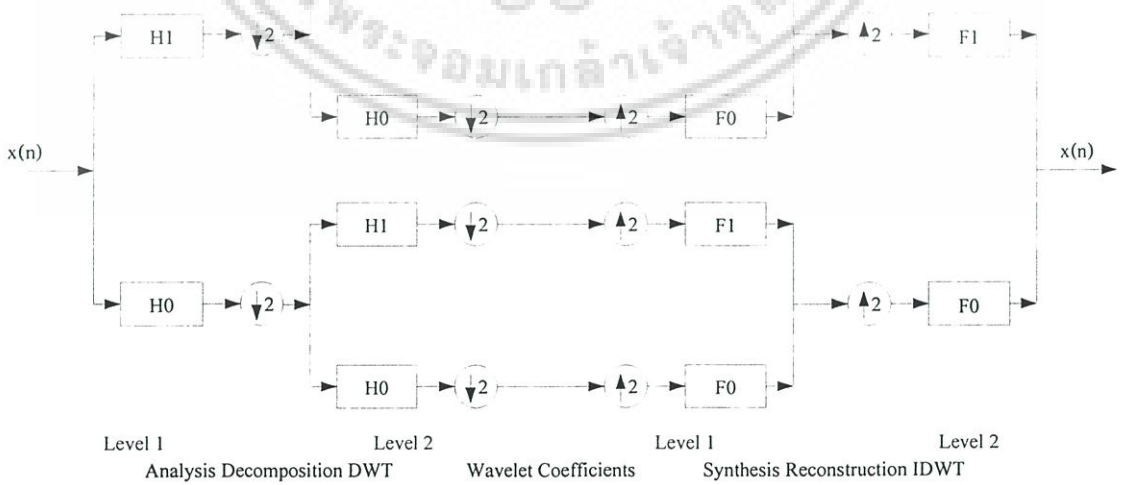
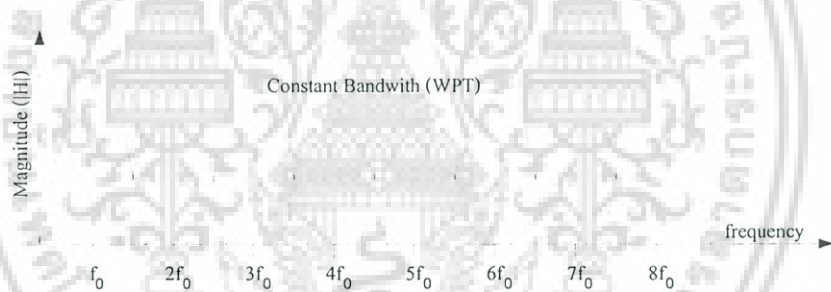
ส่วนของรายละเอียดของสัญญาณ คือ

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m - 2k) a_{j+1}(m) \quad (3.13)$$

ทั้ง  $a_j(k)$  และ  $d_j(k)$  สามารถหาได้จาก  $a_{j+1}(k)$  โดยที่ฟังก์ชัน  $h_0(m - 2k)$  คือ ตัวกรองความถี่ต่ำ (low-pass filter) ในขณะที่ฟังก์ชัน  $h_1(m - 2k)$  คือ ตัวกรองความถี่สูง



รูปที่ 3.9 ตัวกรองเวฟเล็ตแบบไม่สมมาตรมีแถบสัญญาณแบบ Constant Relative Bandwidth



รูปที่ 3.10 ตัวกรองเวฟเล็ตแบบสมมาตรมีแถบสัญญาณแบบ Constant Bandwidth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัว  $H_0$  คือ  $H_0(z)X(z)$  ภายหลังจากกระบวนการ down-sampling จะได้สัญญาณขาออกดังแสดงในสมการที่ (3.14)

$$0.5[H_0(z^{1/2})X(z^{1/2}) + H_0(-z^{1/2})X(-z^{1/2})] \quad (3.14)$$

สัญญาณขาออกที่ได้ในสมการที่ (3.14) เมื่อถูกนำไปผ่านกระบวนการ up-sampling จะได้สัญญาณขาออกดังแสดงในสมการที่ (3.15)

$$0.5[H_0(z)X(z) + H_0(-z)X(-z)] \quad (3.15)$$

ส่วนประกอบ  $H_0(-z)X(-z)$  คือ ส่วนประกอบอิมเมจของ  $H_0(z)X(z)$  สัญญาณขาออกจาก up-sampling เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ  $F_0$  สัญญาณขาออกที่ได้แสดงได้ดังสมการที่ (3.16)

$$0.5F_0(z)[H_0(z)X(z) + H_0(-z)X(-z)] \quad (3.16)$$

ด้วยวิธีการเดียวกันสัญญาณขาออกจากชุดตัวกรองความถี่สูงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.17)

$$0.5F_1(z)[H_1(z)X(z) + H_1(-z)X(-z)] \quad (3.17)$$

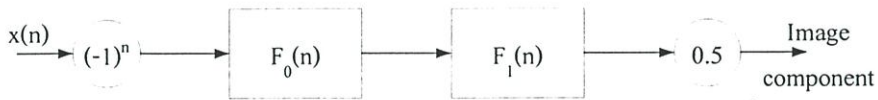
สัญญาณขาออกที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณขาออกจากชุดตัวกรองความถี่สูง และความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.18)

$$X'(z) = 0.5[F_0(z)H_0(z) + F_1(z)H_1(z)]X(z) + 0.5[F_0(z)H_0(-z) + F_1(z)H_1(-z)]X(-z) \quad (3.18)$$

เพื่อให้การสร้างกลับสัญญาณมีความสมบูรณ์ (perfect reconstruction)  $F_0$  และ  $F_1$  สามารถคำนวณหาได้จากการให้สัญญาณขาออก  $x'(n)$  มีค่าเท่ากับสัญญาณขาเข้า  $x(n)$  โดยมีการหน่วงมีค่าเท่ากับ  $l$

$$F_0(z)H_0(z) + F_1(z)H_1(z) = 2z^{-l} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เส้นทางกรคำนวณผลของอิมเมจสำหรับผลลัพธ์ของสัญญาณ ซึ่งผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (LP)

$$F_0(z)H_0(-z) + F_1(z)H_1(-z) = 0 \quad (3.20)$$

การแก้ปัญหาอิมเมจที่เกิดจากตัวกรองที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ สามารถกระทำได้โดยการคำนวณหาส่วนประกอบของอิมเมจ และนำมาลบออกจากสัญญาณที่ได้รับด้านขาออกของตัวกรอง สัญญาณขาออกทางด้านตัวกรองความถี่ต่ำ (LP Filter) จะถูกหักลบออกด้วยส่วนประกอบของอิมเมจซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.5[F_1(z)F_1(-z)X(-z)]$  และสัญญาณขาออกทางด้านตัวกรองความถี่สูง (HP Filter) จะถูกหักลบออกด้วยส่วนประกอบของอิมเมจ  $0.5[F_0(z)H_0(-z)X(-z)]$  เพื่อให้สัญญาณที่ได้ปราศจากผลกระทบของอิมเมจ เนื่องจากต้องการให้ตัวกรองสามารถสร้างสัญญาณกลับได้อย่างสมบูรณ์ (perfect reconstruction filter) ในสมการที่ (3.19) - (3.20) สามารถกระทำได้โดยการกำหนดให้

$$H_1(-z) = F_0(z) \quad (3.21)$$

$$H_0(-z) = -F_1(z) \quad (3.22)$$

ดังนั้นส่วนประกอบของอิมเมจที่เกิดจากตัวกรองความถี่ต่ำ และตัวกรองความถี่สูงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $0.5[F_1(z)F_0(z)X(-z)]$  และ  $0.5[F_0(z)(-F_1(z))X(-z)]$  ตามลำดับ เมื่อใช้สมการการแปลงแบบ Z มาพิจารณาจะพบว่าสามารถเขียนแสดงได้ว่า

$$X(-z) = \sum_n x(n)(-1)^n z^{-n} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $n=1,2,3\dots$

รูปที่ 3.12 แสดงถึงเส้นทางของส่วนประกอบอิมเมจที่ถูกคำนวณเพื่อใช้ในการนำมาหักล้างกับสัญญาณขาออกที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ สำหรับเส้นทางกรคำนวณส่วนประกอบของอิมเมจที่จะถูกนำมาใช้เพื่อหักล้างกับสัญญาณขาออกที่ผ่านตัวกรองความถี่สูง มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับแบบของชุดตัวกรองความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 ชุดตัวกรอง DWPT ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์

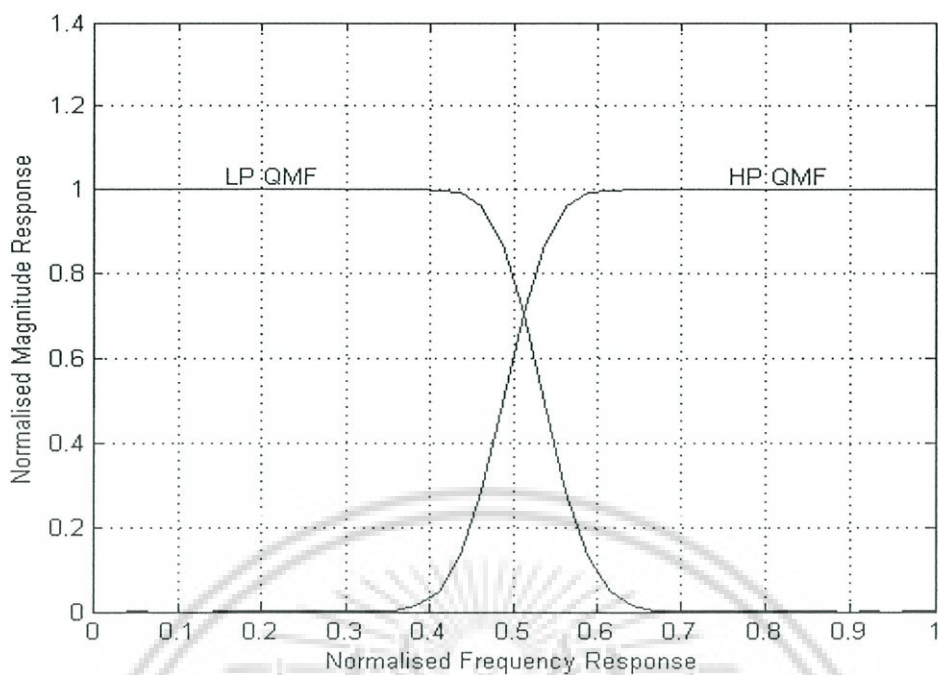
ชุดตัวกรอง DWPT ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ หรือ Modified DWPT filter bank สามารถแสดงโครงสร้างของชุดตัวกรองได้ดังรูปที่ 3.13 จากรูปจะพบว่าลักษณะโครงสร้างของชุดตัวกรองมีความคล้ายคลึงกับชุดตัวกรองแบบสมมาตรในรูปที่ 3.10 ชุดตัวกรองเวฟเล็ตที่แสดงในรูปที่ 3.13 เป็นชุดตัวกรองแบบ 2 ระดับประกอบด้วยส่วนของการแปลงไปข้างหน้า (forward transform) และการแปลงกลับ (inverse transform) ถ้าสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยชุดตัวกรอง DWPT คือ  $x(n)$  มีความในการสุ่มสัญญาณเท่ากับ  $f_s$  ช่วงกว้างของแถบความถี่ในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยมีค่าเท่ากับ  $f_s/2N$  เมื่อ  $N$  คือ จำนวนชั้นแบนด์ย่อยทั้งหมด



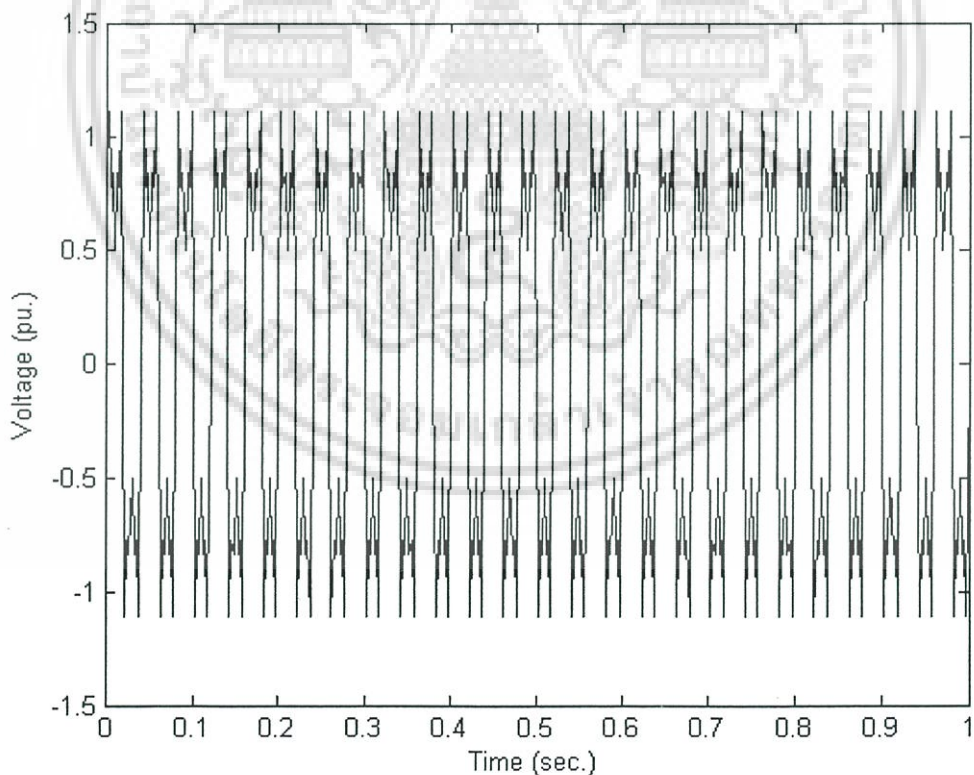
รูปที่ 3.13 ชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตที่ได้รับการแก้ไข [18]

รูปที่ 3.13 ชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตที่ได้รับการแก้ไขเมื่อทำการบิอนสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ด้วยชุดตัวกรองซึ่งมีความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 200 Hz ถ้าใช้ชุดตัวกรองแบบ 2 ระดับจะทำให้มีจำนวนชั้นแบนด์ย่อยเท่ากับ 4 ชั้นแบนด์ย่อย ดังนั้นช่วงกว้างของแถบความถี่ (bandwidth) มีค่าเท่ากับ  $200/(2 \times 4) = 25$  Hz. ช่วงแถบความถี่ในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยมีลักษณะดังรูปที่ 3.13  $H_0$ ,  $H_1$ ,  $F_0$  และ  $F_1$  ถูกสร้างโดยการใช้เวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies แบบ 40 อันดับเนื่องจากเวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies สามารถสร้างตัวกรองให้มีผลการตอบสนองที่ดี ลักษณะของชุดตัวกรอง  $H_0$  และ  $H_1$  ที่ได้จาก Daubechies แบบ 40 อันดับมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

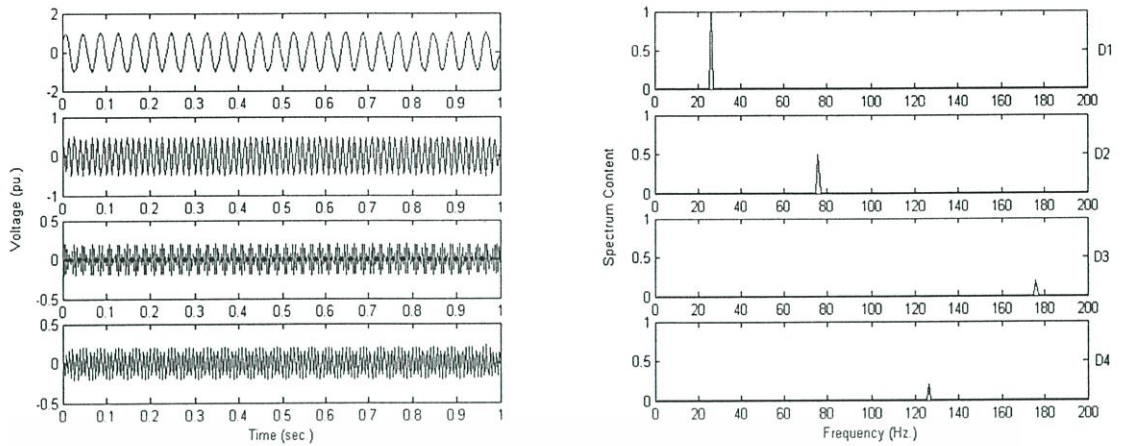


รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของชุดกรองเวฟเล็ตแบบ LP และ HP เมื่อใช้เวฟเล็ตแบบ Db40



รูปที่ 3.15 สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น เพื่อทดสอบการทำงานของชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตเกิดฟัลเตอร์เบงกั้ในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) องค์ประกอบของสัญญาณแรงดัน (ข) สเปกตรัมของแรงดันในแต่ละองค์ประกอบ  
รูปที่ 3.16 องค์ประกอบของสัญญาณและสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น

เพื่อทดสอบชุดตัวกรอง modified DWPT filter bank ในรูปที่ 3.13 สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกสังเคราะห์จึงได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงาน สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.15 เมื่อนำสัญญาณที่สังเคราะห์ขึ้นไปผ่านชุดตัวกรอง modified DWPT filter bank สัญญาณขาออกในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 (ก) สัญญาณในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยได้ถูกนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณโดยการแปลงเวฟเลิต สเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความถี่ของสัญญาณที่ทำการป้อน

### 3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงข้อจำกัดของการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ non-stationary โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ทำให้ต้องมีการพัฒนาวิธีการในการทำการวิเคราะห์ใหม่ซึ่งก็คือการแปลงเวฟเลิตที่ได้นำเสนอไว้ในบทนี้ ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถรับการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับเหตุการณ์ คือ สามารถวิเคราะห์ได้ดีทั้งแกนความถี่และแกนเวลา เพื่อให้ทราบผลของการแปลงของสัญญาณในแกนเวลาชุดตัวกรองเวฟเลิตแพ็คเก็ตจึงได้ถูกพัฒนาขึ้น แต่ชุดตัวกรองเวฟเลิตแพ็คเก็ตแบบเก่าให้ความหมายเฉพาะในส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเท่านั้น ไม่ได้ให้ความหมายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงชุดตัวกรองเวฟเลิตแพ็คเก็ตที่ได้รับการแก้ไข ได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาลักษณะของการเกิดของสัญญาณแทนชุดตัวกรองเวฟเลิตแพ็คเก็ตแบบเก่า จากข้อดีในส่วนของ การติดตามการเกิดการเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิกส์ได้ทางด้านเวลา และข้อดีในส่วนของ การปรับสเกลและการเลื่อนทางเวลาของเวฟเลิตแม่ทำให้เวฟเลิตมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ที่เกิดขึ้นดังที่จะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง

## 4.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์สัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน วิศวกรไฟฟ้านิยมใช้การแปลงฟูเรียร์มาทำการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสัญญาณ วิธีการดังกล่าวนับได้ว่ามีประโยชน์อย่างมากในทางวิศวกรรม เนื่องจากช่วงให้สามารถหาตำแหน่งทางความถี่และขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อกำจัดผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นช่วยให้อุปกรณ์กำลังไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมดีขึ้น ลักษณะของสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์จะต้องมีลักษณะของการซ้ำกันเป็นคาบๆ (periodic signal) ลักษณะของสัญญาณส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นคาบๆ (non-periodic signal) สัญญาณเหล่านี้ได้แก่ สัญญาณทรานเซียนต์ทั้งแบบ expulsive และแบบ oscillatory สัญญาณเหล่านี้จะก่อให้เกิดขนาดของแรงดันหรือกระแสที่สูง (โดยทั่วไปมากกว่า 1.5-2.0 เท่า) และช่วงเวลาของการเกิดที่สั้น ( $\mu s$  สำหรับทรานเซียนต์แบบ expulsive) ด้วยขนาดที่สูงและช่วงเวลาเกิดที่สั้น สัญญาณเหล่านี้จึงส่งผลกระทบต่อดูบกรณ์อย่างมาก การแก้ไขจำเป็นต้องทราบถึงความถี่ของสัญญาณที่เกิด ซึ่งโชคไม่ดีนักที่ การแปลงฟูเรียร์ไม่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบได้ ด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องมีการพัฒนาวิธีการใหม่ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาของการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบได้ วิธีการใหม่ๆ จึงได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นแต่วิธีการต่างๆ เหล่านี้ก็ยังคงอยู่บนพื้นฐานของการแปลงฟูเรียร์ วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบนี้ก็คือ วิธีการของ Prony [19] ซึ่งวิธีการนี้ก็ยังคงอยู่บนพื้นฐานของการแปลงฟูเรียร์เช่นกัน และยังคงค่อนข้างมีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานและการทำความเข้าใจ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ทำการนำเสนอการแปลงเวฟเล็ดมาใช้วิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบแทน เพื่อลดผลของความผิดพลาดจากการแปลงฟูเรียร์ ซึ่งการแปลงเวฟเล็ดนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา โดยใช้คุณสมบัติของเวฟเล็ดแม่ที่สามารถปรับค่าสเกล (ทำการขยายความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์) และการเลื่อนตำแหน่งทางเวลา (เพื่อเลือกส่วนของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์) จากคุณสมบัติทั้งสองอย่างที่มีในเวฟเล็ดแม่ ทำให้การแปลงเวฟเล็ดมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่ที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ โดยวิธีการวิเคราะห์นั้นอาศัยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณแบบ stationary เป็นตัวอ้างอิงและทดสอบผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งกระบวนการในการนำเวฟเล็ดมาทำการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นจะได้อธิบายถึงในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไฟฟ้า โดยในที่นี้จะใช้ชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิลเตอร์เบงก์ที่ได้รับการแก้ไขมาใช้ในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็นช่วงแบนด์ย่อย เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นช่วงระยะเวลาของการเริ่มเกิดและช่วงเวลาของการสิ้นสุดของการเกิดฮาร์โมนิกส์ การวิเคราะห์หาขนาดของฮาร์โมนิกส์โดยกระบวนการแปลงเวฟเล็ต [20-21] จะใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องสามารถเขียนแสดงในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a, b) = \int_{t_1}^{t_2} x(n) \overline{\psi_{a,b}(n)} dt \quad (4.1)$$

เมื่อ

$x(n)$  คือ สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่ทำการตรวจจับได้

$\psi_{a,b}(n)$  คือ เวฟเล็ตแม่ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

$t_1$  คือ เวลาเริ่มต้นของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์

$t_2$  คือ เวลาสิ้นสุดของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องในสมการที่ (4.1) จำเป็นต้องมีการเลือกเวฟเล็ตแม่เพื่อนำมาใช้ทำการเปรียบเทียบความเหมือนกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ เวฟเล็ตแม่ที่สามารถนำมาใช้ได้มีอยู่หลายตัว แต่ในที่นี้เลือก modulated Gaussian wavelet มาใช้เป็นเวฟเล็ตแม่เนื่องจากรูปคลื่นมีลักษณะสมมาตร และมีความคล้ายคลึงกับสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการทำการศึกษา เวฟเล็ตแม่แบบ modulated Gaussian wavelet ได้ถูกนิยามไว้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\psi(t) = e^{(j2f_0(t-b)/a - 0.5((t-b)/a)^2)} \quad (4.2)$$

เมื่อ

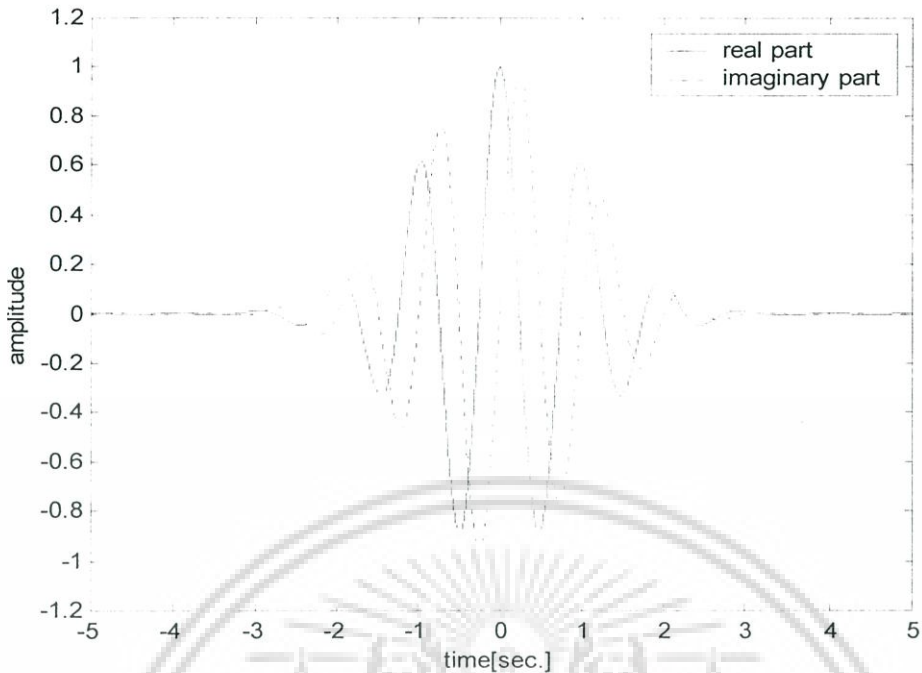
$f_0$  คือ ความถี่ของเวฟเล็ตแม่

$a$  คือ ค่าสเกลทำหน้าที่ปรับความถี่ของเวฟเล็ตแม่

$b$  คือ ค่าการปรับตำแหน่งการเลื่อนทางเวลา

เวฟเล็ตแม่แบบ modulated Gaussian wavelet ในสมการที่ (4.2) มีลักษณะของสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 เวฟเล็ตแม่ modulated Gaussian wavelet ที่  $f_0 = 1$  และ  $a = 1$

สัญญาณเวฟเล็ตแม่แบบ modulated Gaussian wavelet ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเวฟเล็ตแม่ดังกล่าวจะใช้ช่วงเวลาในการทำการวิเคราะห์สัญญาณ ( $T_w$ ) มีช่วงเวลาเท่ากับ 6 sec. ค่าสเกล ( $a$ ) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ  $T_s / T_w$  เมื่อกำหนดให้ค่า  $T_s$  คือ ช่วงเวลาของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องสามารถทำได้โดยการปรับขนาดความถี่  $f_0$  ของเวฟเล็ตแม่ไปที่  $f_h a$  ถ้าที่ตำแหน่งนั้นมีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่ที่กำหนดอยู่ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าบริเวณรอบๆ ช่วง ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจากการทดลองจะพบว่ามีความคงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่  $f_h$  ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องสามารถคำนวณหาได้ดังสมการ [22]

$$A(f_h) = C |CWT(a, b)| \quad (4.3)$$

เมื่อ

$A(f_h)$  คือ ขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่ฮาร์โมนิกส์เท่ากับ  $f_h$

$C$  คือ ค่าคงที่ซึ่งสามารถทำการคำนวณหาได้จากการแปลงสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น

$CWT(a, b)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่เกิดจากการทำการสเกลเท่ากับ  $a$  และเลื่อนตำแหน่งทางเวลาเท่ากับ  $b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามุมเฟสของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากการนำเวฟเล็ตมาทำการวิเคราะห์ สามารถทำการคำนวณหาได้ดังสมการที่ (4.4) ดังต่อไปนี้

$$\theta(f_h) = \arctan(\text{Im}(CWT(a,b)) / \text{Re}(CWT(a,b))) - \theta_b \quad (4.4)$$

เมื่อ

$\text{Im}(CWT(a,b))$  คือ ค่าจำนวนจินตภาพของสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต

$\text{Re}(CWT(a,b))$  คือ ค่าจำนวนจริงของสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต

$\theta_b$  คือ มุมเฟสเริ่มต้นที่เลื่อนไป (initial phase shift) เนื่องจากการเลื่อนค่า  $b$

การวิเคราะห์หาสเปกตรัมด้วยการแปลงเวฟเล็ต ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ซึ่งสอดคล้องกับการแปลงเวฟเล็ตสามารถคำนวณหาได้จาก  $f_0/a$  เมื่อ  $f_0$  คือ ความถี่เวฟเล็ตแม่  $\psi_{a,b}(t)$  ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าการปรับสเกล  $a$  กำหนดได้ดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) ดังต่อไปนี้

$$a_{\max} = T_s / T \quad (4.5)$$

$$a_{\min} = f_0 / f_h \quad (4.6)$$

เมื่อ

$a_{\max}$  คือ ค่าสเกลสูงสุดที่ทำการปรับ

$a_{\min}$  คือ ค่าสเกลต่ำสุดที่ทำการปรับ

$T$  คือ ช่วงเวลาของเวฟเล็ตแม่ที่ทำการวิเคราะห์ในที่นี้ใช้ modulated Gaussian wavelet มาทำการวิเคราะห์ซึ่งมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์  $T$  เท่ากับ 6 sec.

$T_s$  คือ ช่วงเวลาของสัญญาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์

$f_h$  คือ ความถี่สูงสุดของฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $f_s/2$  เมื่อ  $f_s$  คือ อัตราการสุ่มสัญญาณ

เพื่อให้การวิเคราะห์สัญญาณ สามารถทำการแยกสเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ใกล้ชิดกันออกได้อย่างชัดเจนจึงทำการกำหนดให้อัตราการเพิ่มของความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์  $\Delta f$  มีค่าเท่ากับ 0.01 และกำหนดให้ความถี่ต่ำสุด  $f_l$  ที่ต้องการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 20 Hz. สำหรับกรณีที่น่าชุดตัวกรองเวฟเล็ตเพ็คเกิดมาช่วงในการวิเคราะห์ค่าความถี่ต่ำสุด  $f_l$  และค่าความถี่สูงสุด  $f_h$  จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดสำหรับซึบแบนด์ย่อยตามลำดับ

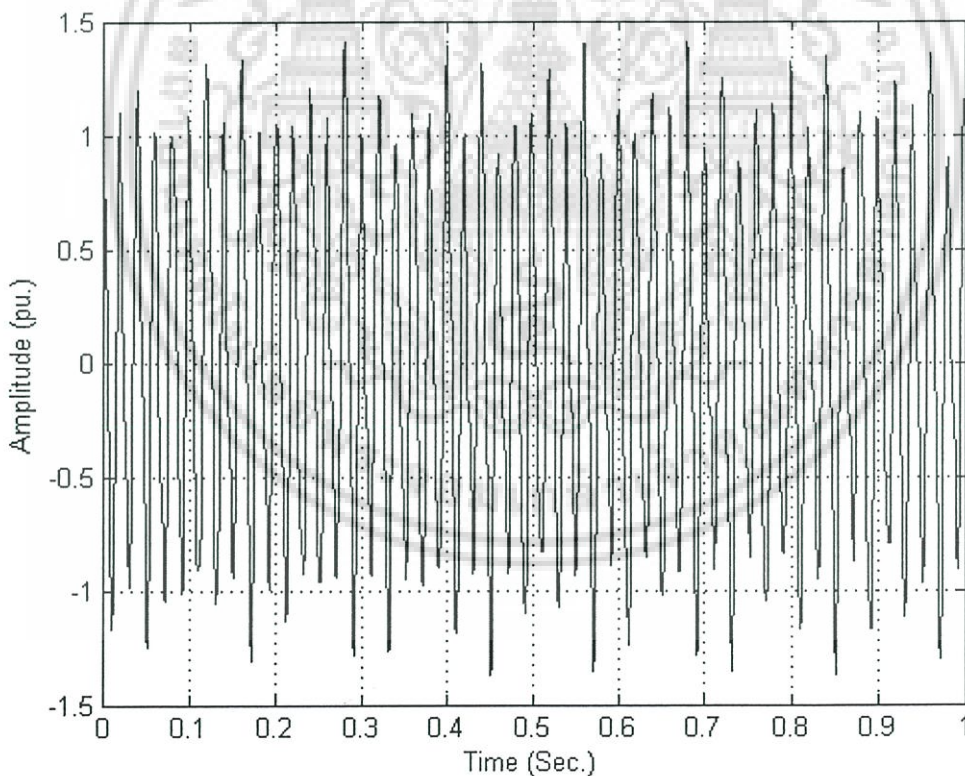
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การนำเวฟเลิตแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

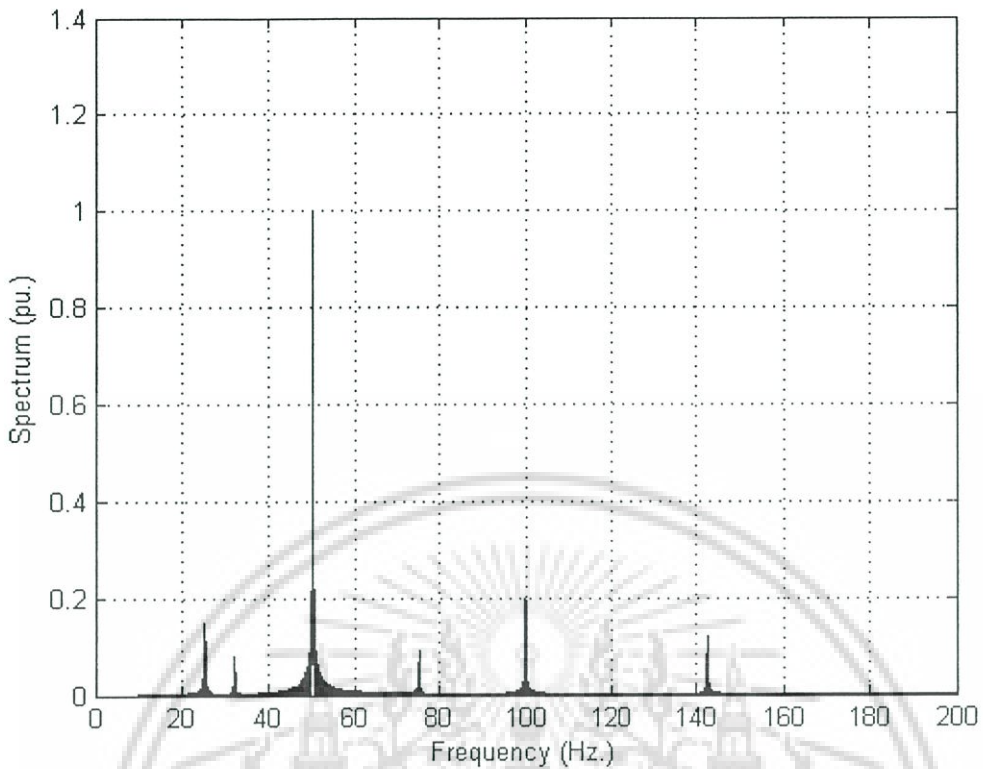
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำการวิเคราะห์สัญญาณ โดยการใช้การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องในหัวข้อ 4.2 มาทำการทดสอบเพื่อให้เห็นผลลัพธ์จากการนำการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ โดยจะทำการทดสอบกับสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อทดสอบถึงความถูกต้อง ก่อนนำไปทำการประยุกต์ใช้งาน

#### 4.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น

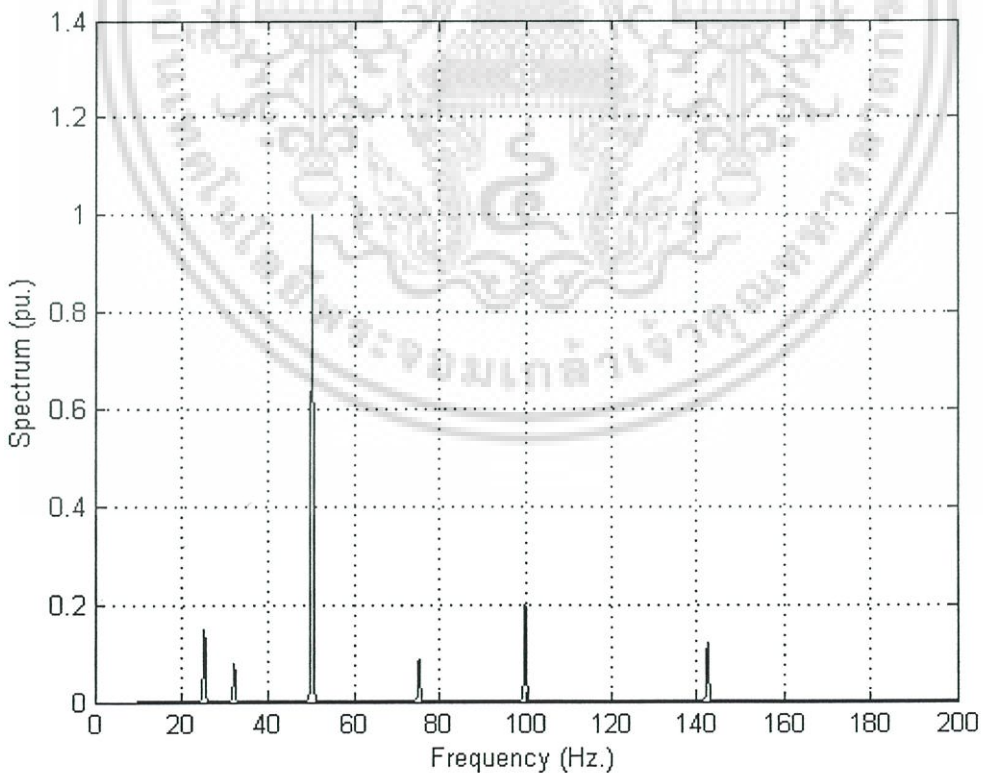
การนำการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2 สามารถนำไปทดสอบผลลัพธ์กับสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นซึ่งทราบทั้งตำแหน่งทางความถี่ ขนาดของสเปกตรัมและมุมเฟสเพื่อให้เห็นสามารถเข้าใจถึงความถูกต้องที่ได้รับโดยผลที่ได้สามารถนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลการแปลงฟูเรียร์ที่ได้ สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง



(ก) สเปกตรัมของสัญญาณเมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

#### รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

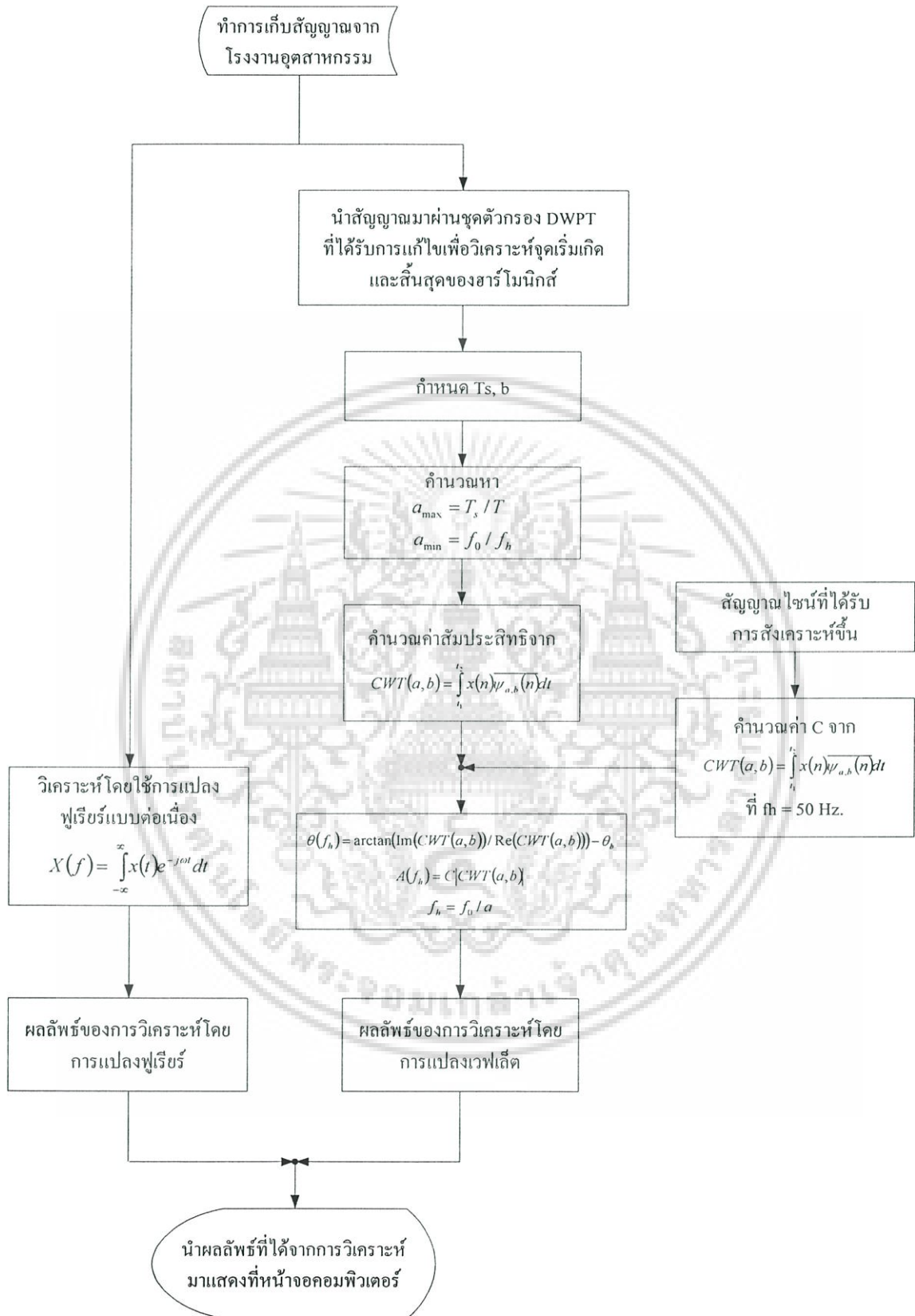
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณในรูป 4.2 โดยวิธีการแปลงฟูเรียร์

สเปกตรัม (pu.)		ความถี่ (Hz.)		มุมเฟส (degree)	
ค่าจริง	ค่านวณ	ค่าจริง	ค่านวณ	ค่าจริง	ค่านวณ
0.15	0.1495	25.25	25.2500	-20.25 <sup>0</sup>	-20.0029 <sup>0</sup>
0.08	0.0797	32.13	32.1300	15.10 <sup>0</sup>	16.4091 <sup>0</sup>
1.00	1.0002	50.00	50.00	0.00 <sup>0</sup>	-0.0205 <sup>0</sup>
0.09	0.0911	75.22	75.2100	-120.75 <sup>0</sup>	-114.3785 <sup>0</sup>
0.20	0.1998	100.00	100.00	75.23 <sup>0</sup>	75.2310 <sup>0</sup>
0.12	0.1199	142.50	142.5000	60.25 <sup>0</sup>	60.2283 <sup>0</sup>

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณในรูป 4.2 ที่ได้โดยวิธีการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง

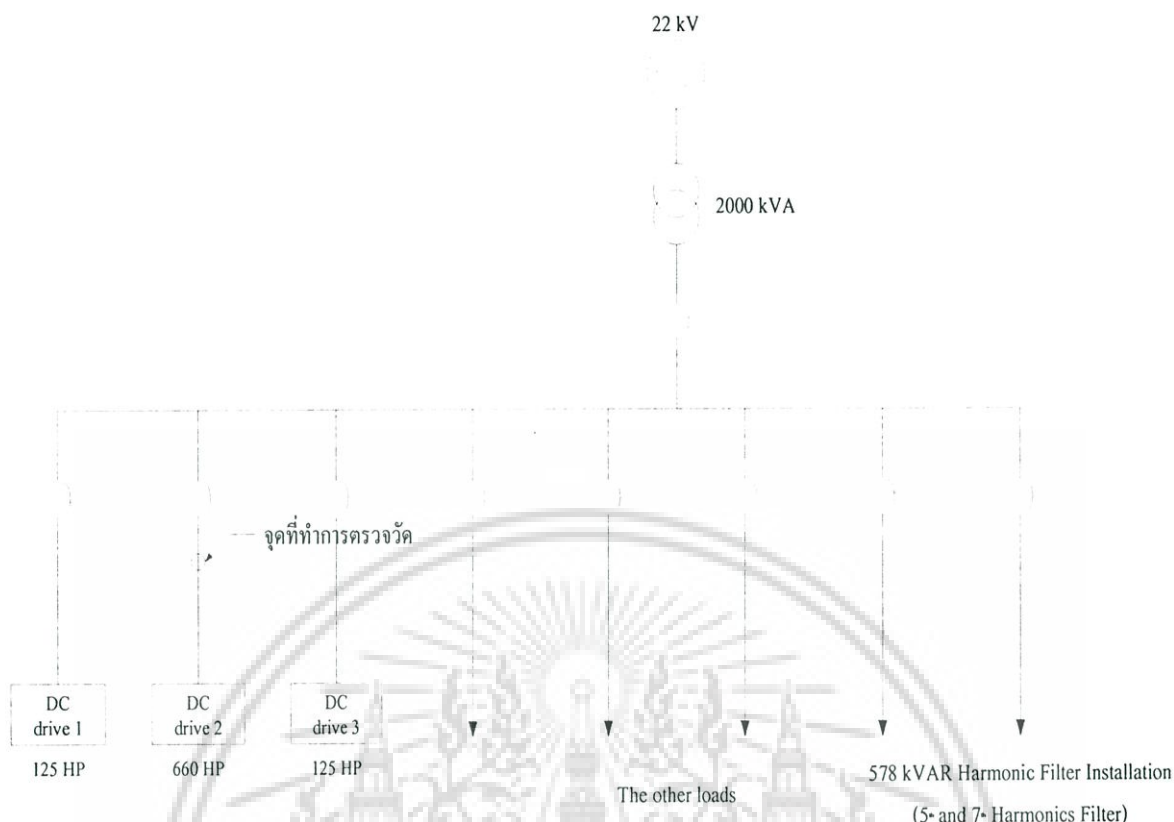
สเปกตรัม (pu.)		ความถี่ (Hz.)		มุมเฟส (degree)	
ค่าจริง	ค่านวณ	ค่าจริง	ค่านวณ	ค่าจริง	ค่านวณ
0.15	0.1500	25.25	25.2550	-20.25 <sup>0</sup>	-20.2444 <sup>0</sup>
0.08	0.0800	32.13	32.1250	15.10 <sup>0</sup>	15.1350 <sup>0</sup>
1.00	1.0000	50.00	50.0050	0.00 <sup>0</sup>	0.00 <sup>0</sup>
0.09	0.0900	75.22	75.2200	-120.75 <sup>0</sup>	-120.7670 <sup>0</sup>
0.20	0.2000	100.00	100.0000	75.23 <sup>0</sup>	75.2302 <sup>0</sup>
0.12	0.1200	142.50	142.4950	60.25 <sup>0</sup>	60.2504 <sup>0</sup>

สัญญาณในรูปที่ 4.2 มีอัตราการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 1.6 kHz. หรือ 32 จุดต่อหนึ่งลูกคลื่น เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสัญญาณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.3 (ก) ในขณะที่ถ้านำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.3 (ข) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมที่ได้สามารถนำมาแสดงในรูปของตารางที่ตั้งตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 สำหรับกรณีการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องตามลำดับ จากกระบวนการในการนำการแปลงเวฟเลิตมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าแทนการแปลงฟูเรียร์สามารถนำมาเขียนแผนภาพกระบวนการในการวิเคราะห์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 วิธีการในการวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การวิเคราะห์สัญญาณโดยกระบวนการแปลงฟูเรียร์ และการวิเคราะห์สัญญาณโดยกระบวนการแปลงเวฟเลิต ผลที่ได้ทั้งสองถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการ และผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทั้งสองวิธีก่อนที่จะนำไปทำการประยุกต์ใช้กับสัญญาณจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แผนผังแสดงกระบวนการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แผนภาพระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการตรวจวัดสัญญาณเพื่อทำการศึกษา  
ในกรณีของสัญญาณ 6 พัลส์ในกรณีปกติและกรณีของการเบรกโดยการคายพลังงาน

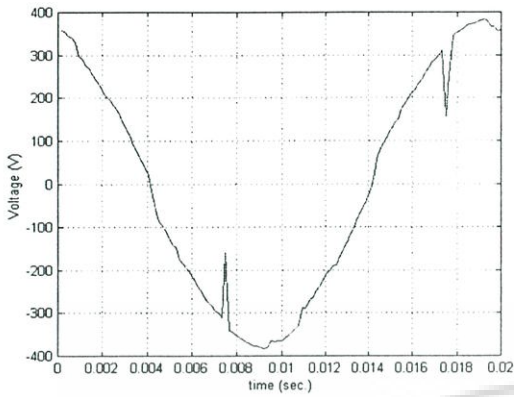
ในการนำการแปลงเวฟเล็ดมาทำการประยุกต์ใช้งานกับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม  
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจจับสัญญาณ 6 พัลส์ในกรณีปกติ และกรณีของการเบรกโดยการคาย  
พลังงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง ซึ่งมีแผนภาพระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมดัง  
แสดงดังรูปที่ 4.5 จุดที่ได้ทำการตรวจวัดคือ DC drive 2 ซึ่งมีขนาดของภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 660 HP  
การตรวจวัดสัญญาณได้ใช้อุปกรณ์ RPM ในการทำการตรวจจับซึ่งมีอัตราการสุ่มในการตรวจจับ  
เท่ากับ 6.40 kHz. สัญญาณที่ได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ดโดยนำผลที่ได้ไปทำ  
การเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว ซึ่งวิเคราะห์ได้  
จากเครื่องมือวัดโดยตรง ผลที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด  
แบบต่อเนื่อง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์สัญญาณ 6 พัลส์

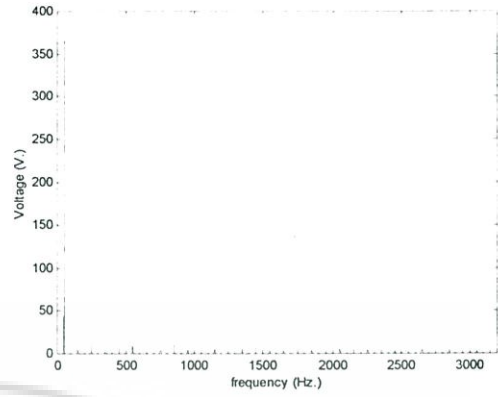
วิธีการที่ได้นำเสนอและทำการทดสอบได้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณ 6 พัลส์ที่ตรวจจับได้  
ภายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยในการทำการศึกษานี้ได้แบ่งมีการแบ่งกรณีของการศึกษาออกเป็น 2  
กรณีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.1 สัญญาณ 6 พัลส์ในกรณีปกติ

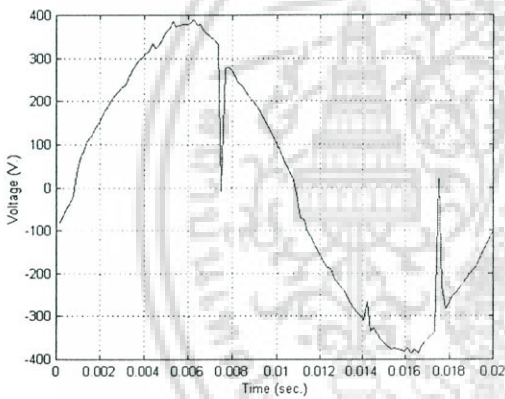


(ก) รูปคลื่นแรงดัน

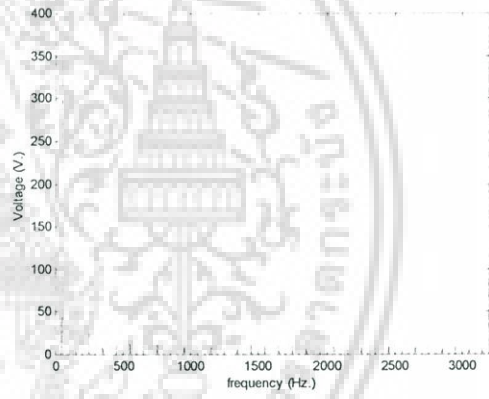


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 4.6 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส A

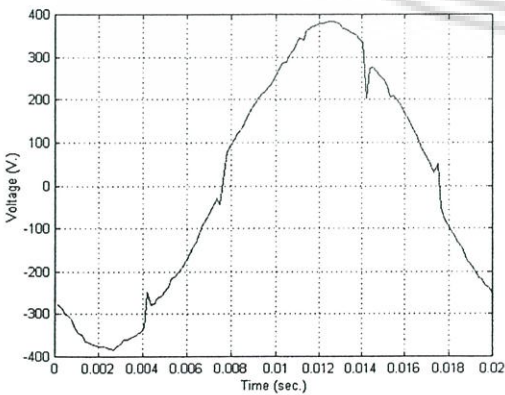


(ก) รูปคลื่นแรงดัน

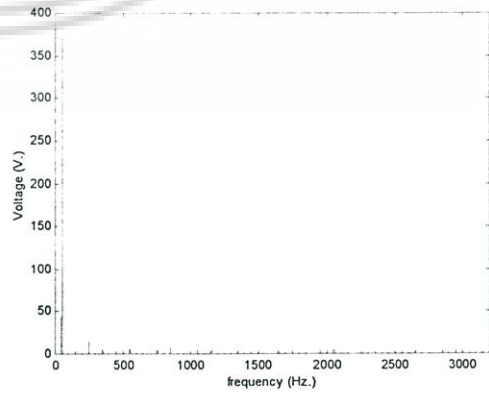


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส B



(ก) รูปคลื่นแรงดัน

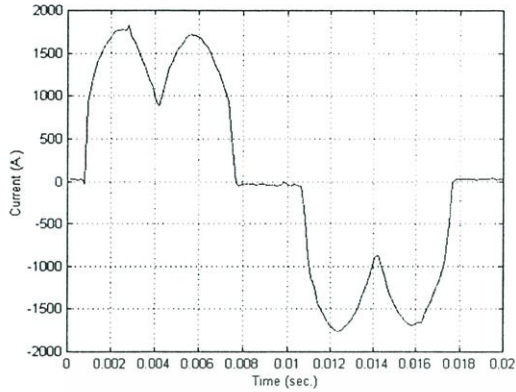


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

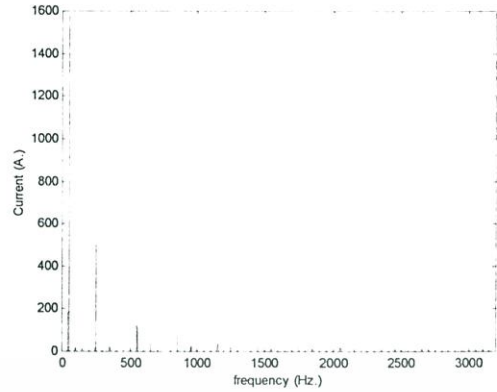
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

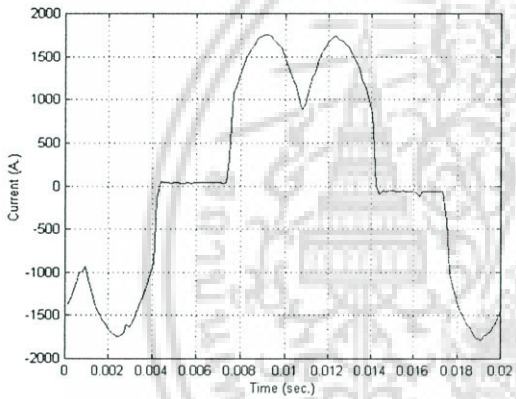


(ก) รูปคลื่นกระแส

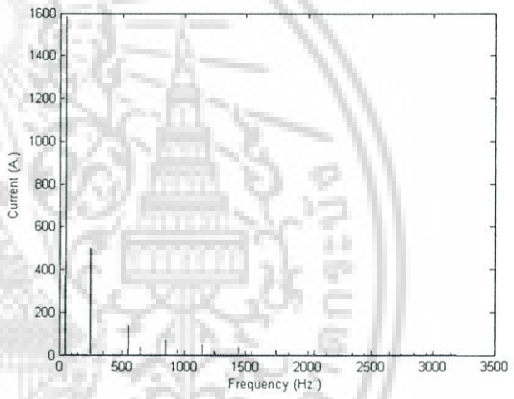


(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 4.9 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส A

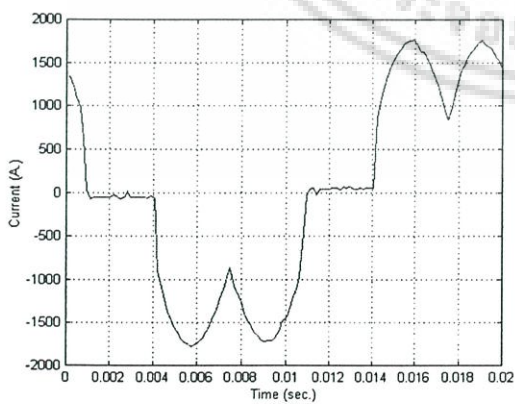


(ก) รูปคลื่นกระแส

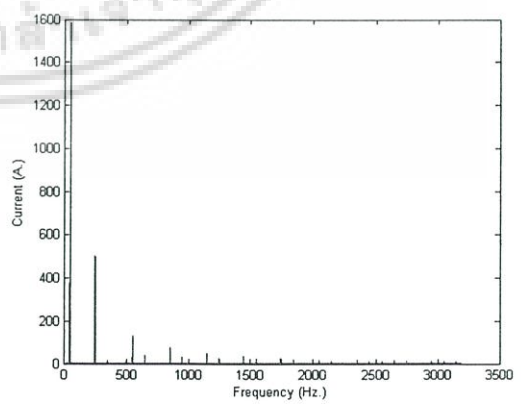


(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส B



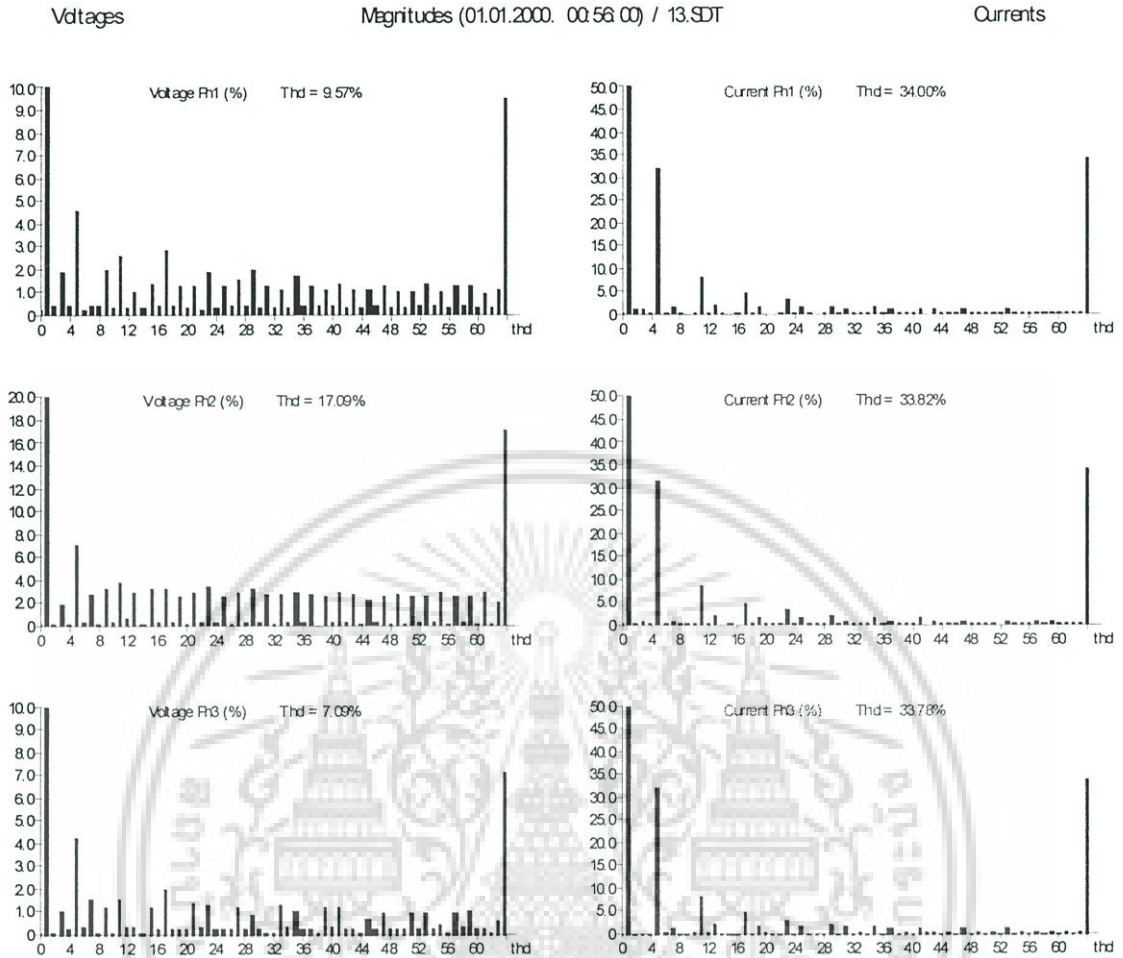
(ก) รูปคลื่นกระแส



(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์ในกรณีปกติเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

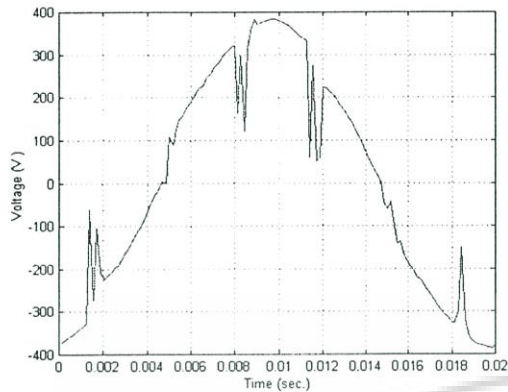


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.6 – 4.11 ที่ได้จากเครื่องมือวัด RPM

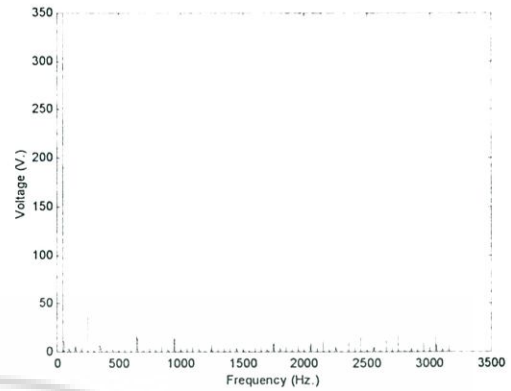
จากผลการนำการแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสัญญาณแรงดัน 6 พัลส์ ในสภาวะปกติดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.8 และสเปกตรัมของสัญญาณกระแส 6 พัลส์ในสภาวะปกติดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.11 ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากเครื่องมือวัด (Reliable Power Meter:RPM) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันของสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้ โดยค่าอันดับฮาร์โมนิกที่มีความสำคัญได้แก่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 โดยภายในสเปกตรัมจะสังเกตเห็นการกระจายของสเปกตรัมทั้งหมดอย่างความถี่ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือ non-stationary เข้ามารบกวนการวิเคราะห์ ซึ่งถ้าต้องการให้ผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องตรงกับลักษณะของสัญญาณที่เกิด จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ทางเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งในส่วนี้จะได้กล่าวถึงในกรณีของการนำชุดตัวกรองเวฟเลิตแพ็คเก็ตฟิลเตอร์ที่ได้รับการแก้ไข มาทำการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.2 สัญญาณ 6 พัลส์ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน

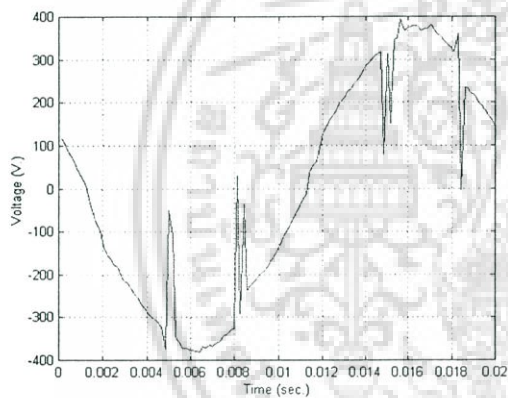


(ก) รูปคลื่นแรงดัน

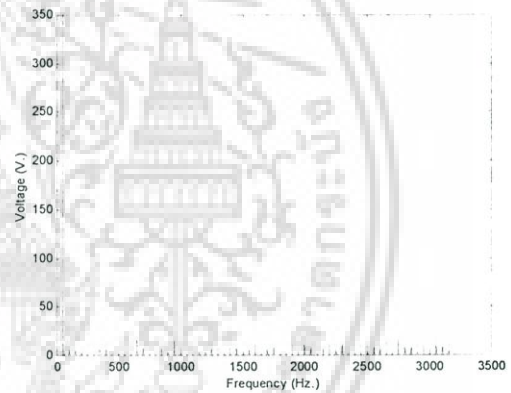


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 4.13 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์เฟส A ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน

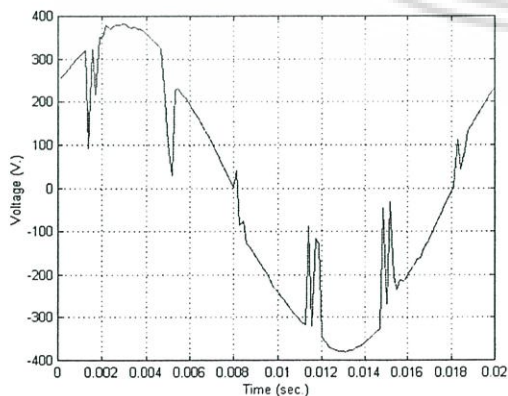


(ก) รูปคลื่นแรงดัน

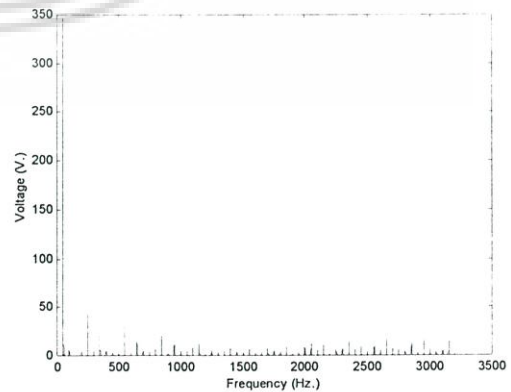


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 4.14 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์เฟส B ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน



(ก) รูปคลื่นแรงดัน

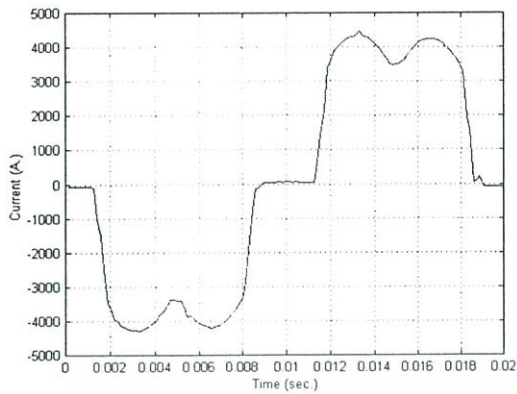


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

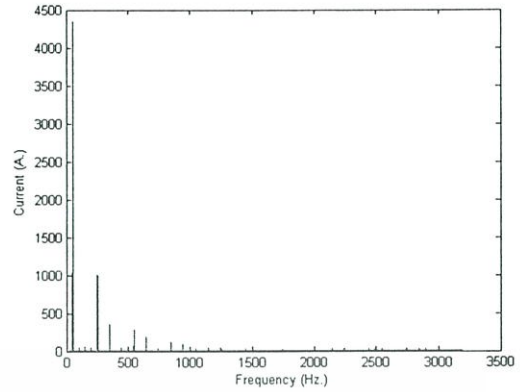
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดัน 6 พัลส์เฟส C ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

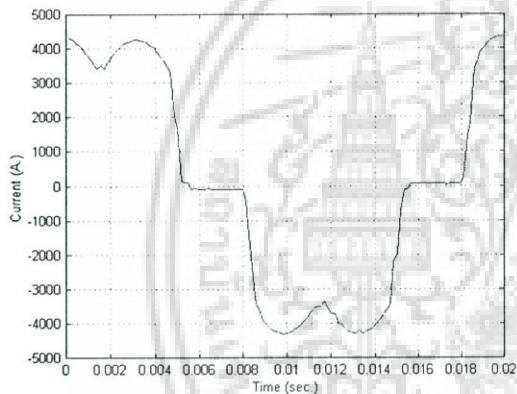


(ก) รูปคลื่นกระแส

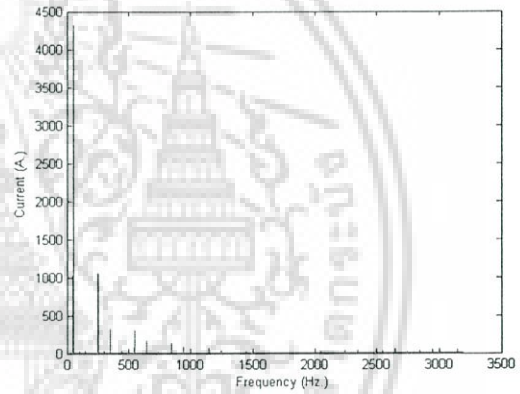


(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์เฟส A ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน

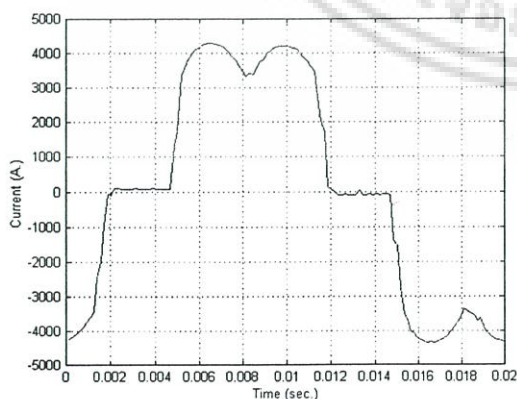


(ก) รูปคลื่นกระแส

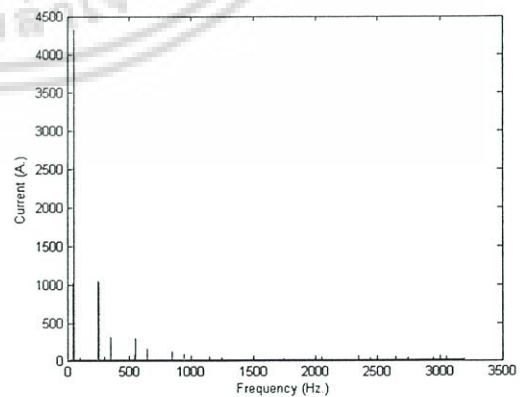


(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์เฟส B ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน



(ก) รูปคลื่นกระแส



(ข) สเปกตรัมของกระแส

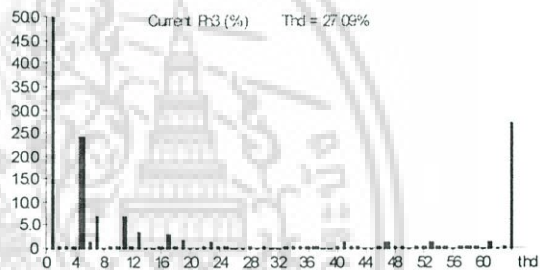
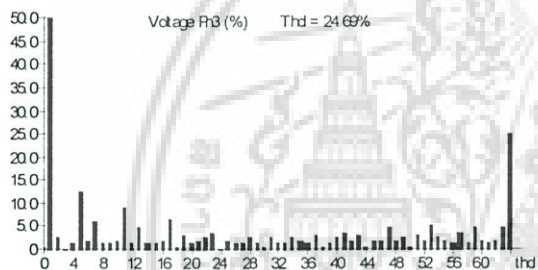
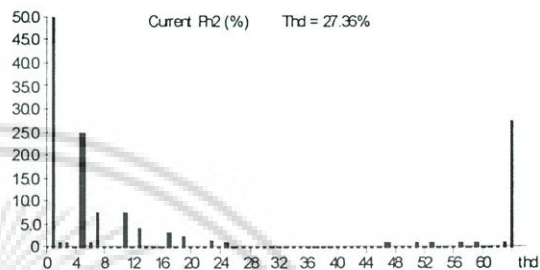
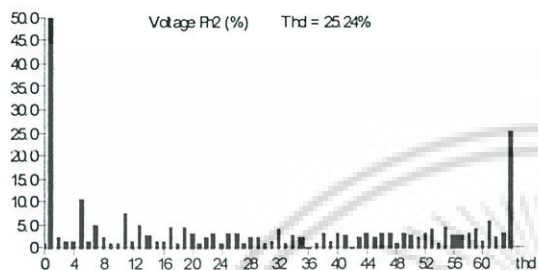
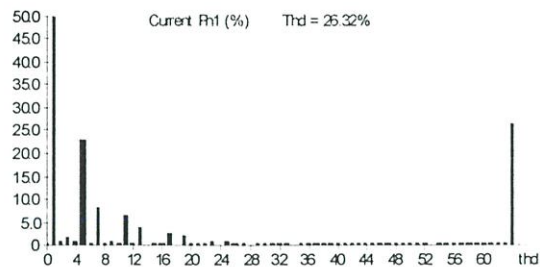
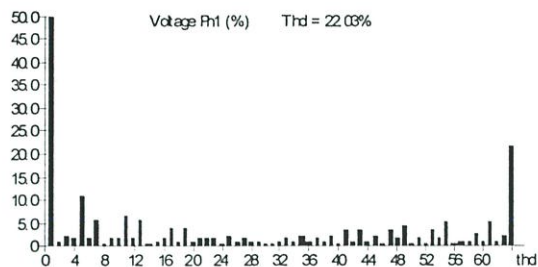
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแส 6 พัลส์เฟส C ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltages

Magnitudes (01.01.2000. 01: 12: 10) / REGEN.SDT

Currents



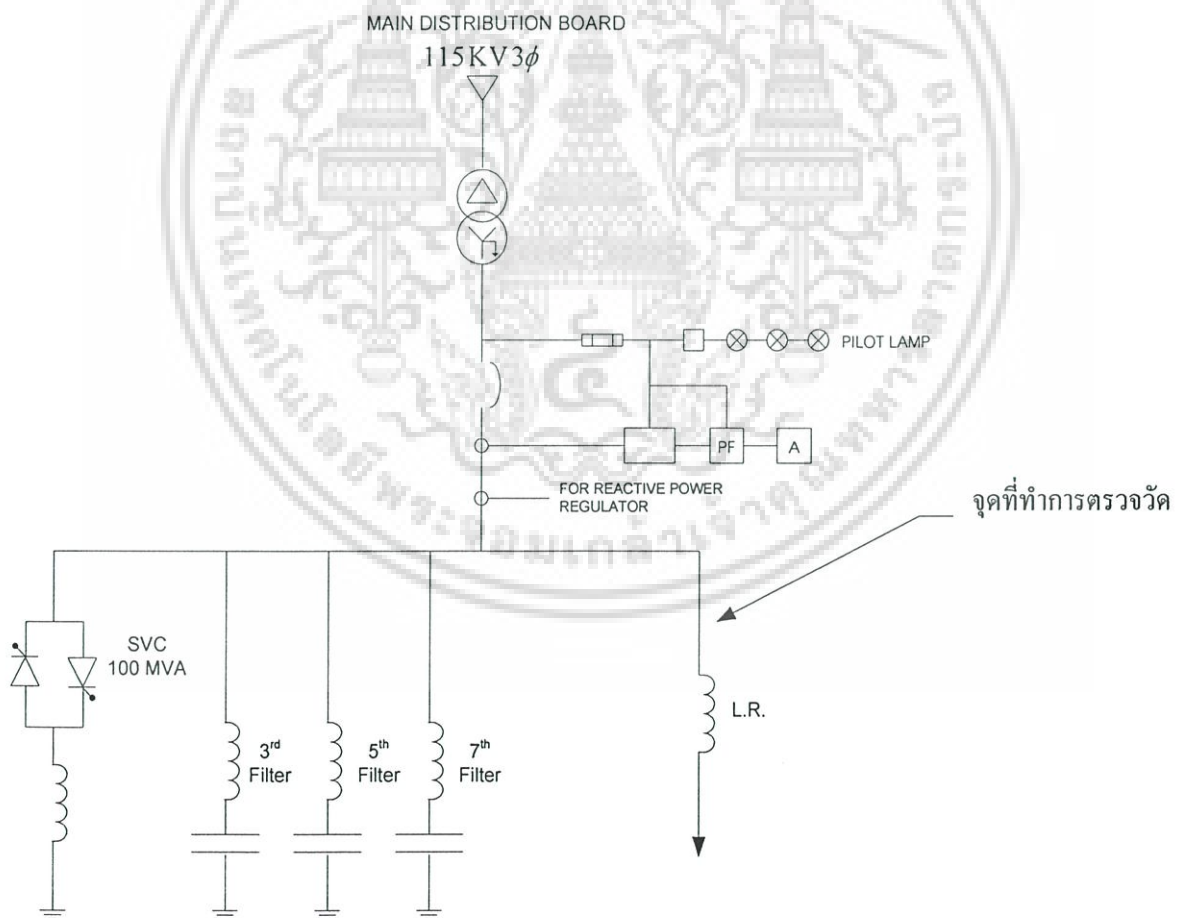
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.13 – 4.18 ที่ได้จากเครื่องมือวัด RPM

จากผลของการนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสในสถานะที่มอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน ลักษณะของสัญญาณและผลของการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.15 สำหรับกรณีของแรงดัน และรูปที่ 4.16 – 4.18 สำหรับกรณีของกระแส ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากเครื่องมือวัด RPM ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยทำการพิจารณาผลของแรงดันและกระแสในสถานะปกติประกอบกันไปจะพบว่าสเปกตรัมที่ได้ทั้งในกรณีของแรงดัน และกระแสยังคงมีการกระจายไปตลอดทั่วตลอดทั้งความถี่ โดยมีฮาร์โมนิกอันดับ 3, 5 และ 7 เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด สำหรับในกรณีของกระแสจะพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะปกติฮาร์โมนิกอันดับที่ 5, 11 และ 17 จะสูง แต่ในขณะที่มอเตอร์ทำการเบรกโดยการคายพลังงานฮาร์โมนิกอันดับ 5, 7 และ 11 เท่านั้นที่มีค่าสูงส่วนฮาร์โมนิกอันดับ 17 ลดลงจนแทบไม่เหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การวิเคราะห์สัญญาณ Impulsive Transient

สัญญาณทรานเซียนต์แบบ impulsive ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง [22] ในการศึกษาได้ทำการตรวจจับสัญญาณภายในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งซึ่งมีแผนภาพเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.20 ในการตรวจจับได้ทำการตรวจวัดที่ด้านหลัง static var compensator (svc) ในการตรวจวัดได้ใช้เครื่อง RPM อัตราการสุ่มสัญญาณที่ใช้มีค่าเท่ากับ 32 kHz. หรือ 64 จุดต่อหนึ่งลูกคลื่น ในการทำการตรวจจับลักษณะของทรานเซียนต์ที่ตรวจจับได้ถูกแบ่งออกเป็นกรณีศึกษาได้ 2 กรณีตามลักษณะของทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้น ในกรณีศึกษาที่ 1 ลักษณะของทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบ impulsive ที่มีการเสริมทางด้านลบดังแสดงในรูปที่ 4.21 ในขณะที่กรณีศึกษาที่ 2 ลักษณะของทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบ impulsive เช่นกันแต่มีการหักล้างทางด้านบวกดังแสดงในรูปที่ 4.24 กรณีศึกษาทั้งสองถูกนำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตเพื่อศึกษาลักษณะของสเปกตรัมของสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการแปลงฟูเรียร์



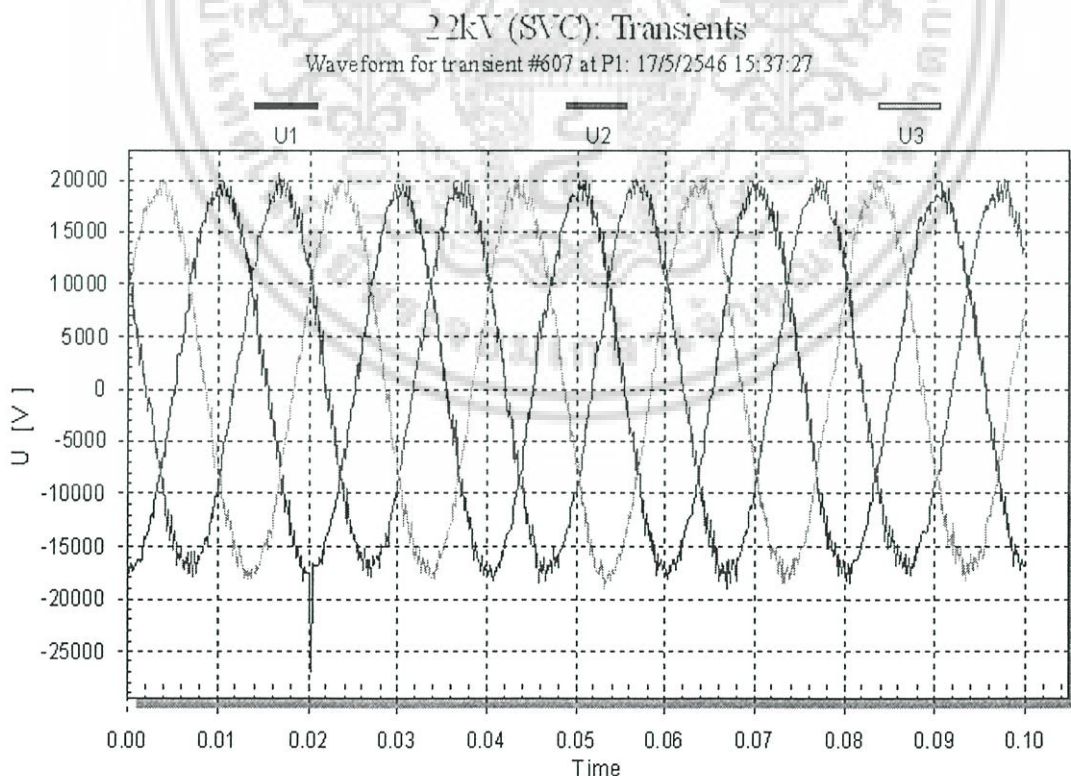
รูปที่ 4.20 แผนภาพเชิงเส้นของโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษาในกรณีของการเกิดทรานเซียนต์

แบบ impulsive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีศึกษาที่ 1 สัญญาณที่ตรวจจับได้ในรูปที่ 4.21 ถูกนำมาทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณด้วยชุดตัวกรอง DWPT ที่ได้รับการแก้ไขเพื่อพิจารณาลักษณะของการเกิดและสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นโดยชุดตัวกรองที่ใช้มีระดับของการแยกสัญญาณเท่ากับ 5 ระดับ ช่วงกว้างของแถบความถี่ของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยมีค่าเท่ากับ 800 Hz. องค์ประกอบของสัญญาณในชั้นแบนด์ย่อย 4 องค์ประกอบแรกถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 จากรูปสัญญาณที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ  $s(t)$  สัญญาณในส่วนของ การประมาณ D1 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 0-800 Hz. สัญญาณในส่วนของรายละเอียด D2 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 800-1600 Hz. สัญญาณในส่วนของรายละเอียด D3 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 1.60-2.40 kHz. และสัญญาณในส่วนของรายละเอียด D4 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 2.40-3.20 kHz. ช่วงเวลาของการเริ่มเกิดฮาร์โมนิกส์ที่วิเคราะห์ได้จากองค์ประกอบของสัญญาณอยู่ที่เวลาประมาณ 0.018 sec. และช่วงเวลาของการสิ้นสุดของการเกิดฮาร์โมนิกส์อยู่ที่เวลาประมาณ 0.022 sec. สัญญาณในส่วนของ การประมาณและในส่วนของรายละเอียด (D1-D4) ถูกนำไปวิเคราะห์หาความถี่และขนาดของสเปคตรัมที่เกิดขึ้น สเปคตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปของตารางดังตารางที่ 4.3

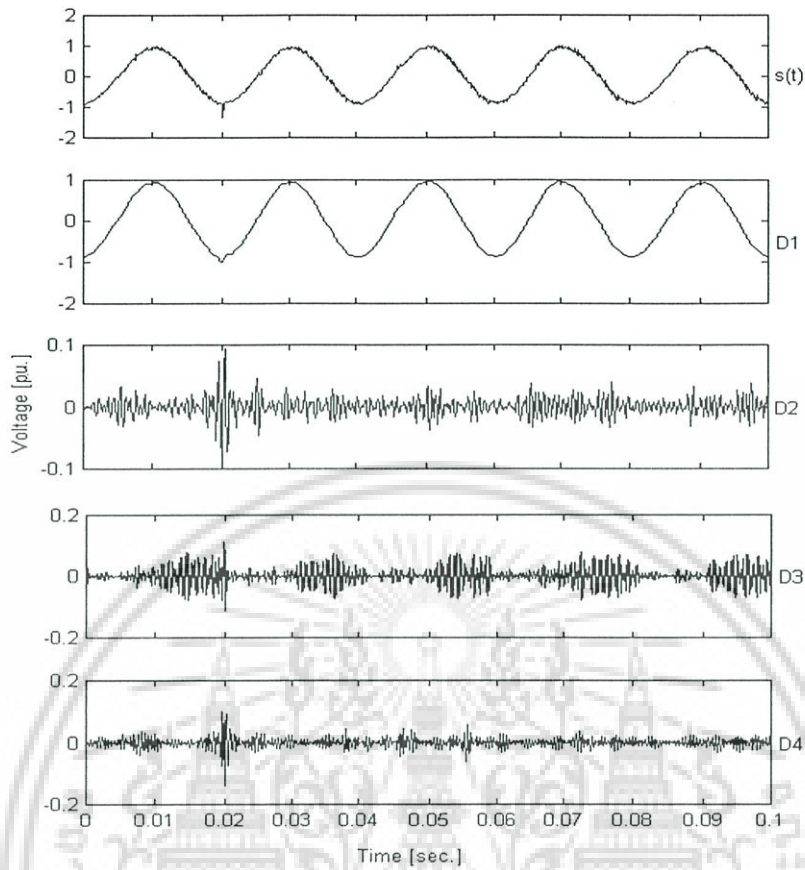
#### 4.3.3.1 กรณีศึกษาที่ 1



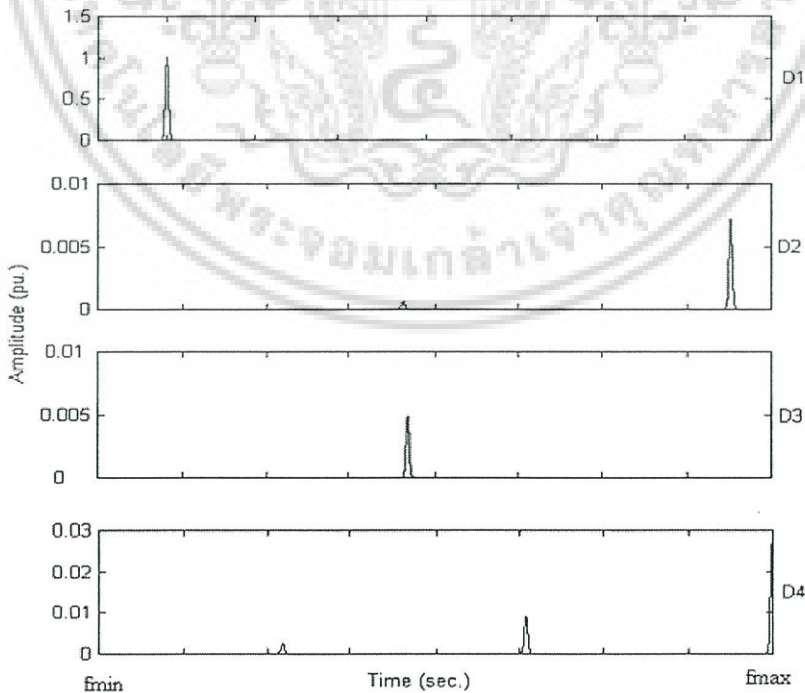
รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ขณะเกิดทรานเซียนต์แบบ impulsive สำหรับ

#### กรณีศึกษาที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 องค์ประกอบของสัญญาณ 4 องค์ประกอบแรกของสัญญาณในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 4.22

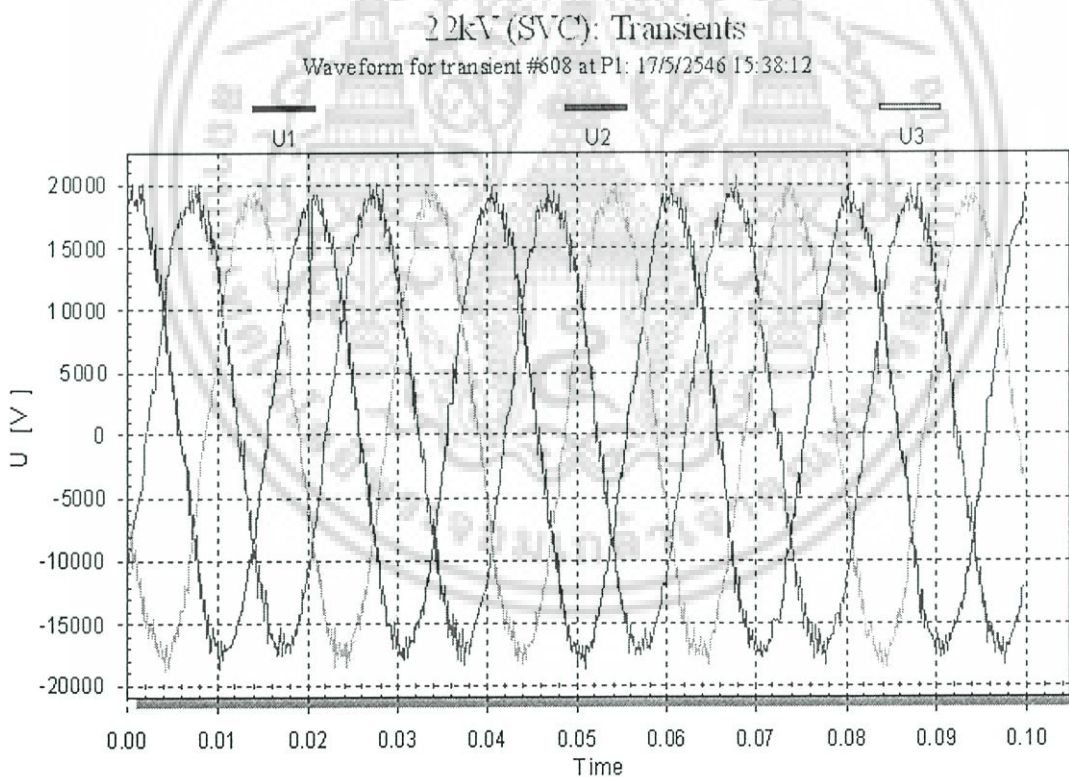
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดัน ขณะเกิดทรานเซียนต์ ณ เฟส C

Subband (d)	frequency (Hz.)	Harmonic (order)	Amplitude (pu.)	Phase Angle (degree)
1	49.6	0.99	0.98	8.297
2	775.64	15.51	0.0066	-176.35
3	984.46	19.69	0.0044	33.33
4	1454.3	29.09	0.008	134.47
	1599.7	31.99	0.025	-63.511

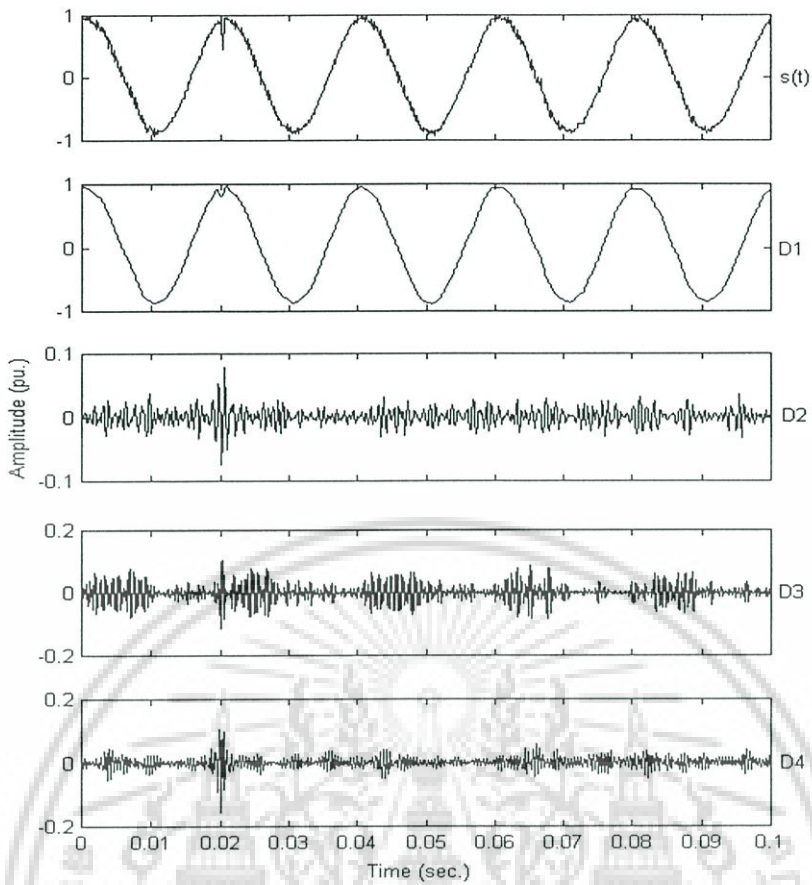
\*หมายเหตุข้อมูลที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลฮาร์โมนิกส์ตัวอย่าง

#### 4.3.3.2 กรณีศึกษาที่ 2

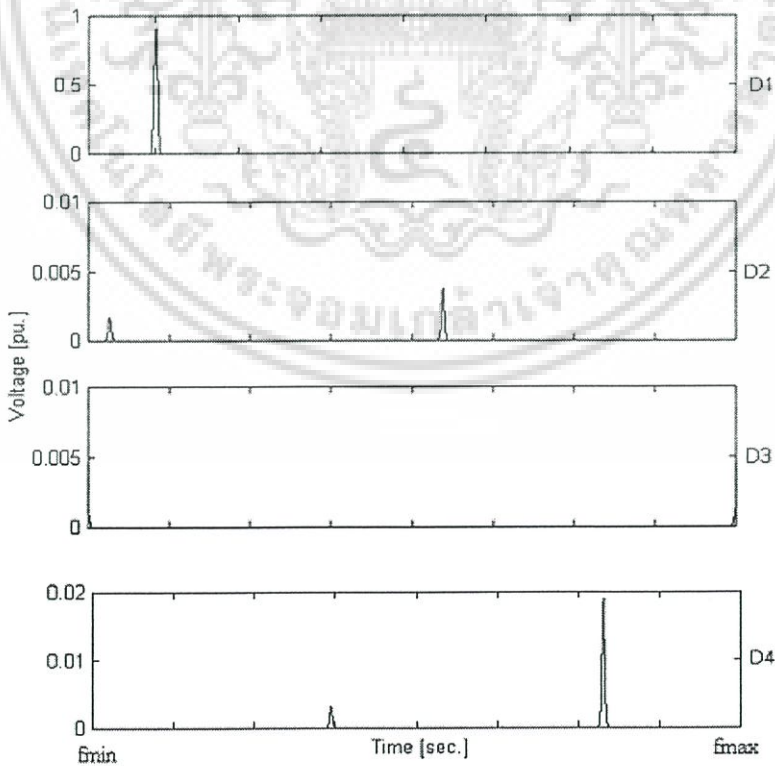


รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ขณะเกิดทรานเซียนต์แบบ impulsive สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 องค์ประกอบของสัญญาณ 4 องค์ประกอบแรกของสัญญาณในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดัน ขณะเกิดทรานเซียนต์ ณ เฟส C

Subband (d)	frequency (Hz.)	Harmonic (order)	Amplitude (pu.)	Phase Angle (degree)
1	49.99	1.00	0.9100	0.88
2	412.84	8.26	0.0017	-173.02
3	619.26	12.39	0.0038	177.44
4	1347.2	26.94	0.0032	44.85
	1515.6	30.31	0.0188	-80.22

\*หมายเหตุข้อมูลที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลฮาร์โมนิกส์ตัวอย่าง

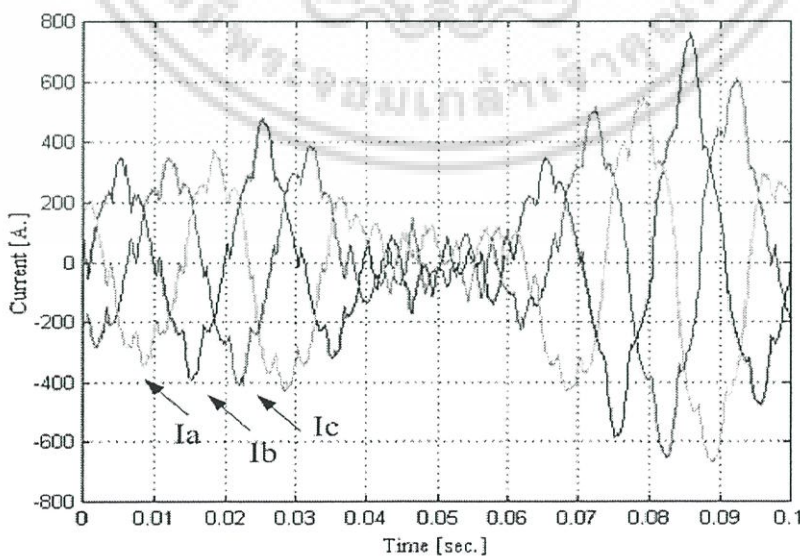
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 สัญญาณ impulsive ทรานเซียนต์แบบหักล้างด้านบวกที่ตรวจจับได้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ถูกนำมาทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณด้วยชุดตัวกรอง DWPT ที่ได้รับการแก้ไขเพื่อพิจารณาลักษณะของการเกิดและสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ชุดตัวกรองที่นำมาใช้ในการศึกษามีระดับของการแยกสัญญาณเท่ากับ 5 ระดับ ช่วงกว้างของแถบความถี่ของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยมีค่าเท่ากับ 800 Hz. ทั้งนี้เพื่อให้ผลที่ได้สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาที่ 1 องค์ประกอบของสัญญาณในชั้นแบนด์ย่อย 4 องค์ประกอบแรกถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.25 จากรูปสัญญาณที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ  $s(t)$  สัญญาณในส่วนของการประมาณ D1 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 0-800 Hz. สัญญาณในส่วนของการประมาณ D2 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 800-1600 Hz. สัญญาณในส่วนของการประมาณ D3 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 1.60-2.40 kHz. และสัญญาณในส่วนของการประมาณ D4 มีช่วงกว้างของแถบความถี่อยู่ที่ 2.40-3.20 kHz. ช่วงเวลาของการเริ่มเกิดฮาร์โมนิกส์ที่วิเคราะห์ได้จากองค์ประกอบของสัญญาณอยู่ที่เวลาประมาณ 0.018 sec. และช่วงเวลาของการสิ้นสุดของการเกิดฮาร์โมนิกส์อยู่ที่เวลาประมาณ 0.022 sec. ถ้านำรูปองค์ประกอบของสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบของแต่ละชั้นแบนด์ย่อยในรูปที่ 4.22 มาทำการเปรียบเทียบกับรูปขององค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยในรูปที่ 4.25 จะพบว่าที่ตำแหน่งของการเกิดทรานเซียนต์ที่ตำแหน่งเดียวกันตำแหน่งของการเกิดและสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์ในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยมีขนาด และตำแหน่งของการเกิดและสิ้นสุดใกล้เคียงกัน สัญญาณในส่วนของการประมาณและในส่วนของการประมาณ (D1-D4) ถูกนำไปวิเคราะห์หาความถี่และขนาดของสเปคตรัมที่เกิดขึ้น สเปคตรัมขององค์ประกอบของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.26 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปของตารางดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณทรานเซียนต์แบบหักล้างด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 4.23 เมื่อนำมาทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลของสเปกตรัมของสัญญาณทรานเซียนต์แบบเสริมด้านลบในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 4.26 จะพบว่าในส่วนของการประมาณ D1 สเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้มีค่าตรงกันกับของความถี่มูลฐานของสัญญาณทั้งขนาดและตำแหน่งที่พบ สำหรับสเปกตรัมของ D2 เป็นสเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากทรานเซียนต์จะพบว่าในกรณีที่ 1 จะพบที่ความถี่และขนาดที่สูงกว่ากรณีที่ 2 สเปกตรัมที่พบในชั้นแบนด์ย่อย D3 จะพบเฉพาะในกรณีศึกษาที่ 1 เท่านั้นไม่พบในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งในกรณีนี้อาจเกิดจากผลของฮาร์โมนิกส์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 1 ซึ่งเกิดก่อนการเกิดทรานเซียนต์ในช่วงเวลาประมาณ 0.01-0.02 sec. สำหรับสเปกตรัมของ D4 สเปกตรัมที่สำคัญจะพบว่ามีความถี่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 กรณี แต่มีตำแหน่งของความถี่ที่เกิดต่างกัน ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปขององค์ประกอบของสัญญาณประกอบกันก็จะพบว่าสัญญาณที่ได้มีความคล้ายคลึงกันมากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นส่งผลให้ความถี่ที่หาได้มีค่าแตกต่างกันแต่ขนาดที่ได้ใกล้เคียงกัน

#### 4.3.4 การวิเคราะห์สัญญาณเตาหลอมเหนียวนำ

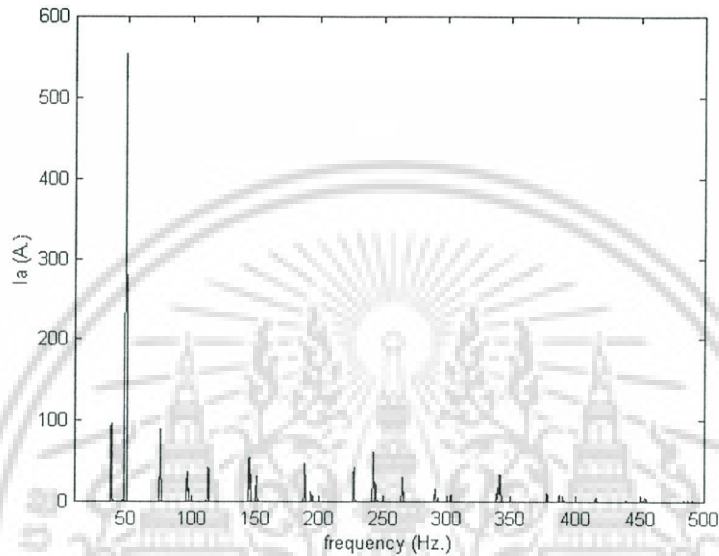
สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการนำสัญญาณกระแสที่เกิดจากเตาหลอมเหนียวนำ [24] มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น สัญญาณกระแสที่เกิดจากเตาหลอมเหนียวนำส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าอย่างมาก ตามที่ได้มีการศึกษาไว้ใน [25-26] สัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ย่อย, ฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็ม และอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ ผลที่เกิดขึ้นไม่ได้ส่งผลเสียต่อระบบควบคุมภายในโรงงานที่กำเนิดสัญญาณเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อโรงงานใกล้เคียงอีกด้วย ด้วย สัญญาณกระแสที่เกิดจากเตาหลอมเหนียวนำซึ่งสามารถตรวจจับได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.27



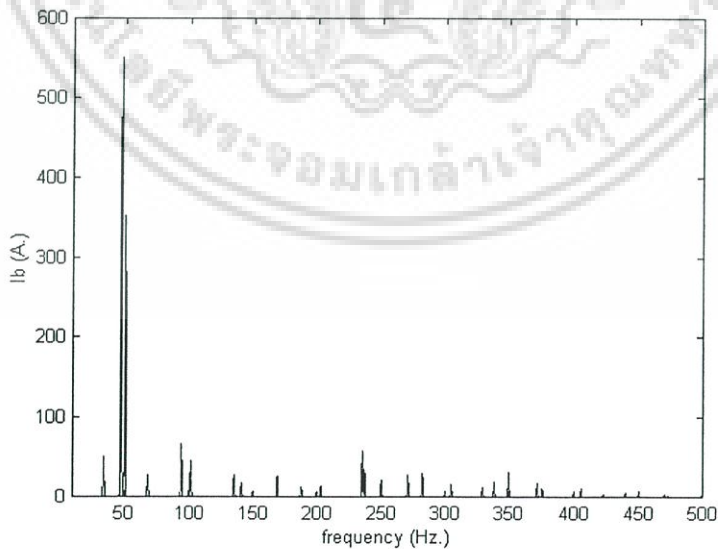
รูปที่ 4.27 สัญญาณกระแสของเตาหลอมเหนียวนำเฟส A, B และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณกระแสของเตาหลอมเหนี่ยวนำเฟส A, B และ C ในรูปที่ 1 มีอัตราการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 6.4 kHz. หรือ 64 จุดต่อหนึ่งลูกคลื่น นั่นคือ ความถี่ฮาร์โมนิกส์สูงสุดที่สามารถทำการตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 3.2 kHz. เมื่อนำสัญญาณกระแสของเตาหลอมเหนี่ยวนำที่ตรวจจับได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องสเปกตรัมผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.28-4.30

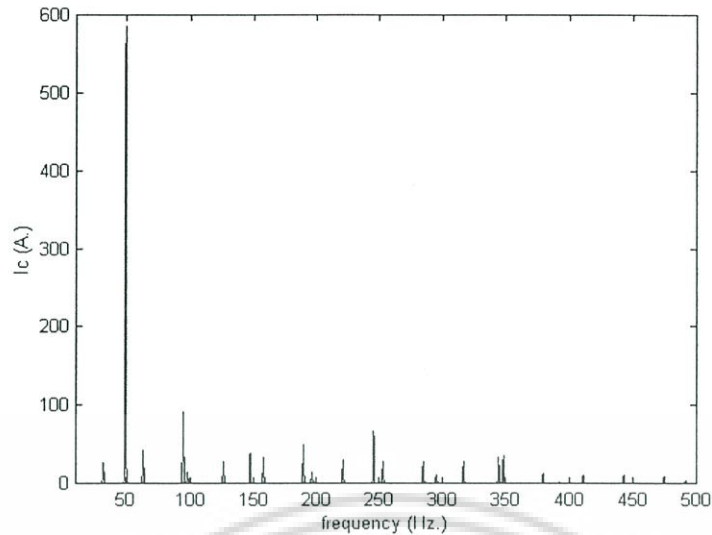


รูปที่ 4.28 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส A ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส B ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส C ของเตาหลอมเหนียวนำ

สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ของเตาหลอมเหนียวนำในรูปที่ 4.29-4.30 คือ สเปกตรัมสูงสุดในตลอดช่วงระยะเวลาของการวิเคราะห์ ในการทำการวิเคราะห์ได้ทำการแบ่งสัญญาณในรูปที่ 1 ออกเป็นช่วงๆ ในที่นี้แบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 1. ช่วงเวลาปกติ (0.00-0.36 sec.) 2. ช่วงเปลี่ยนสถานะการทำงาน (0.036-0.066 sec.) และ 3. ช่วงเวลาสิ้นสุดการทำงาน (0.077-0.098 sec.) สำหรับเฟส A ในกรณีของเฟสอื่นสามารถทำได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ที่ได้โดยการแปลงเวฟเล็ตถูกนำมาแสดงในรูปของตารางได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณกระแสเฟส A ของเตาหลอมเหนียวนำ

ช่วงเวลาวิเคราะห์ (Sec.)	ความถี่ (Hz.)	อันดับฮาร์มอนิกส์ (Order)	ขนาดยอด (pu.)	มุมเฟส (Degree)
0.017-0.036	49.92	1.00	351.06	-88.14
	249.61	5.00	21.49	-134.74
	349.45	6.99	32.07	51.87
0.036-0.066	33.81	0.68	50.54	20.33
	67.62	1.35	27.87	-166.48
	101.43	2.03	45.34	71.03
	135.24	2.70	28.65	-109.06
	169.05	3.38	25.77	28.74
	236.67	4.73	35.91	-157.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

	270.48	5.41	28.79	45.26
0.077-0.098	46.99	0.94	550.65	102.04
	93.97	1.88	66.49	-58.12
	234.93	4.70	58.73	113.74
	281.91	5.64	29.46	-21.92

\*หมายเหตุข้อมูลที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลฮาร์โมนิกส์ตัวอย่าง

#### 4.4 สรุป

การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณใด ๆ ได้แทนการแปลงฟูเรียร์ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบคาบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องจะมีค่าคล้ายคลึงกับการแปลงฟูเรียร์ แต่ความกว้างของฐานของสเปกตรัมจะมีค่าน้อยกว่า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสามารถช่วงลดผลของการสูญเสียของสเปกตรัมได้ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้การแปลงเวฟเล็ดยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ (non-periodic) ได้ดีในขณะที่การแปลงฟูเรียร์ไม่สามารถทำได้ ผลลัพธ์ของความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ ช่วยให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถตั้งค่าความถี่ของอุปกรณ์ป้องกันเพื่อใช้กำจัดผลของทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการวิเคราะห์สัญญาณจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและให้ค่าความละเอียดทางแกนความถี่ที่สูงแต่ไม่ได้สื่อความหมายของลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงแต่ประการใด เพื่อที่จะสามารถพิจารณาผลของสเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาที่สนใจการวิเคราะห์สเปกตรัมกับแกนเวลาจึงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน วิธีการดังกล่าวนี้จะได้นำเสนอในเรื่องของการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดยอดตามเวลาที่เปลี่ยนไป (time-varying)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณแบบ Time-Varying โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแพ็คเก็ต

### 5.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้กันอย่างกว้างขวาง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากฮาร์มอนิกของทั้งแรงดันและกระแส อุปกรณ์จำพวก semiconductor เหล่านี้จะทำการเปิดและปิดสวิตช์ที่ตำแหน่งที่แตกต่างกันของแรงดัน ส่งผลให้เกิดสัญญาณทรานเซียนต์ที่มีความถี่สูง ถ้าสัญญาณทรานเซียนต์ที่พบเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันของแต่ละลูกคลื่น สัญญาณทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัญญาณแบบคาบสัญญาณทรานเซียนต์นี้จัดเป็นสัญญาณแบบ non-stationary ซึ่งความถี่ที่เกิดไม่เป็นจำนวนเต็มของผลคูณของความถี่มูลฐาน [27-28] ดังนั้นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสจึงไม่ใช่สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ แต่อาจประกอบไปด้วยผลรวมของความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกและทรานเซียนต์ที่มีความถี่สูงยิ่งไปกว่านั้นลักษณะของภาระทางไฟฟ้าในระบบกำลังไฟฟ้าจำนวนมาก โดยเฉพาะภาระไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีลักษณะทางธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (dynamic) ส่งผลให้เกิดสัญญาณของกระแสที่มีลักษณะของขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time-varying current amplitude) ตัวอย่างเช่น ภาระทางไฟฟ้าที่มีการเริ่มต้นและการเบรกสภาวะการทำงานจะก่อให้เกิดกระแสที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา อัตราของการเปลี่ยนแปลงของขนาดของกระแสขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของภาระ ความถูกต้องของการวัดของฮาร์มอนิกในระบบกำลังไฟฟ้ามีความจำเป็นในการประมาณความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งรูปคลื่นแรงดันกระแสและแรงดัน การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยทั่วไปมีพื้นฐานมาจาก [29-30] การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT) หรือ การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว (FFT) การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องและการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วมีความง่าย และสะดวกต่อการนำไปใช้งาน และนอกจากนี้ยังมีความถูกต้องสูงสำหรับการนำไปวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบคาบ แต่อย่างไรก็ตามการนำ DFT และ FFT ไปประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีลักษณะของสัญญาณแบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะไม่ถูกต้องเนื่องจากขนาดยอดของฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการนำแปลงฟูเรียร์ไปประยุกต์ใช้งานจึงยังมีข้อจำกัดเพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์สัญญาณดังต่อไปนี้ [31-32]

1. สัญญาณที่นำมาทำการวิเคราะห์ต้องมีลักษณะเป็นแบบ stationary คือ สัญญาณที่นำมาทำการวิเคราะห์ต้องมีขนาดยอดคงที่ (constant magnitude)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการสุ่มต้องมีค่าเท่ากับจำนวนข้อมูลคุณกับความถี่มูลฐาน
3. อัตราการสุ่มต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุด ที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่นำมาทำการวิเคราะห์
4. ความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มคูณกับความถี่มูลฐาน หากสามารถทำตามข้อกำหนดข้างต้นได้อย่างสมบูรณ์ ผลของการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะถูกต้อง นอกจากผลของความถูกต้องของการนำการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องและการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วที่ได้กล่าวไปแล้ว จากการศึกษายังพบอีกว่าสิ่งที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องของการนำการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วไปใช้งานยังมีอีก 3 ประเด็นใหญ่ คือ 1. การเกิด aliasing 2. การเกิดการรั่วไหลของสเปกตรัม (spectrum leakage) และ 3. การเกิดผลของ picket-fence effect การเกิด aliasing สามารถทำการบรรเทาได้โดยการเพิ่มความถี่ของการสุ่มข้อมูลตัวอย่าง ( $f_s$ ) แต่อย่างไรก็ตาม การเกิด pseudoaliasing ยังคงสามารถพบได้แม้ที่ส่วนประกอบของความถี่ที่สูงมากกว่า ( $f_s/2$ ) ผลของ picket-fence effect จะพบถ้ารูปคลื่นสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์มีความถี่ที่ไม่ได้เป็นจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน สำหรับการเกิดการรั่วไหลของสเปกตรัมจะเกิดจากการกระจายพลังงานจากความถี่หนึ่งไปสู่ความถี่ที่อยู่ใกล้เคียง การแก้ปัญหาจำเป็นต้องทำการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ผลลัพธ์ให้ได้ถูกต้อง

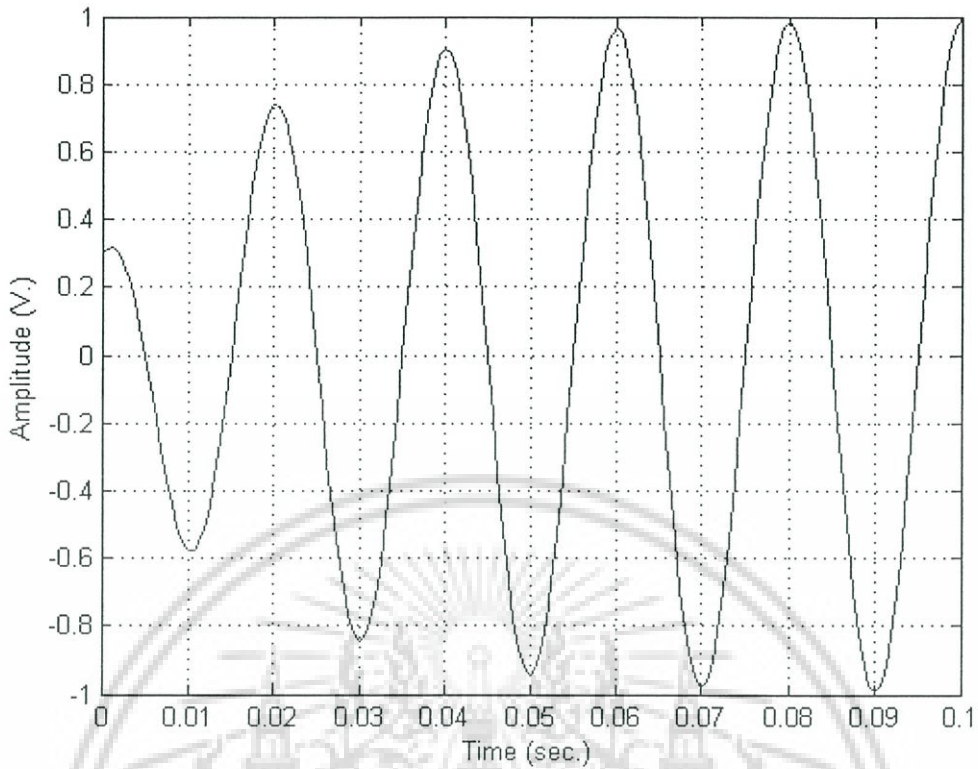
## 5.2 การวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป

พิจารณาสัญญาณซึ่งมีส่วนประกอบของสัญญาณเป็น 50 Hz (ไม่มีฮาร์โมนิกส์) โดยลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป (time-varying) สัญญาณนี้ได้ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (5.2) ดังต่อไปนี้ [33]

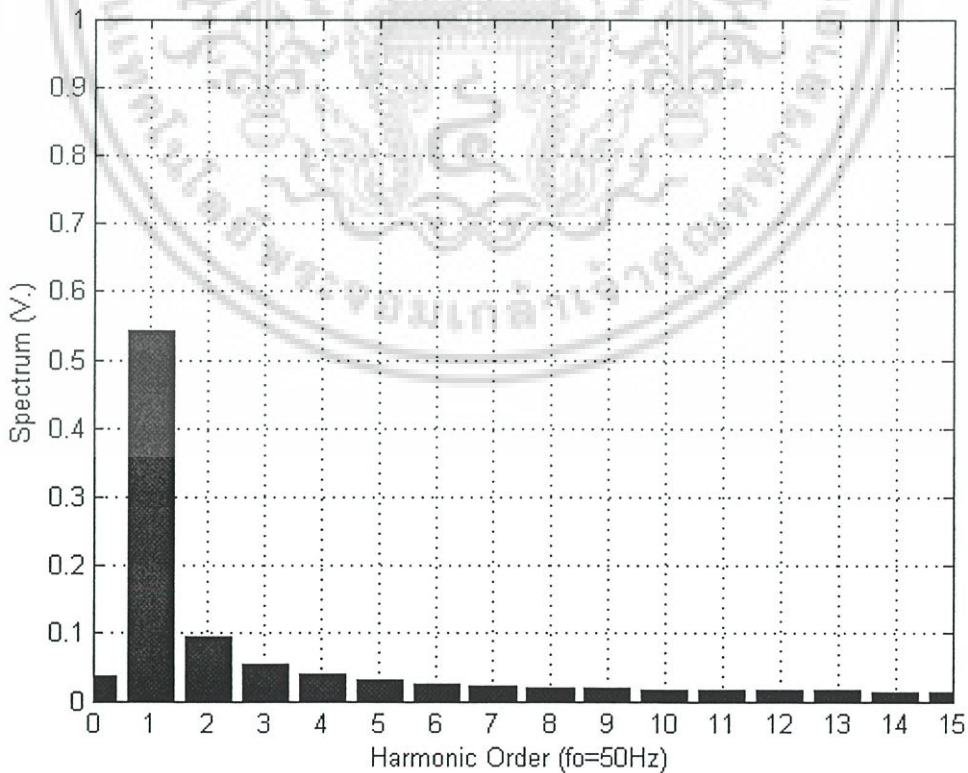
$$s(t) = (A_1 - A_2 e^{-at}) \cos(\omega_0 t) \quad (5.2)$$

เมื่อ  $A_1 = 1.0$ ,  $A_2 = 0.7$ ,  $a = 50$ ,  $\omega_0 = 2\pi 50$  radians/second สัญญาณได้ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 สมการ FFT ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับจำนวนข้อมูลตัวอย่างของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้อธิบายไว้ในสมการที่ (5.2) โดยใช้อัตราการสุ่มข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 32x50 Hz ผลลัพธ์ของสมการ FFT แบบ 32 จุดบ่งชี้ว่ารูปคลื่นสัญญาณประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์ของความถี่มูลฐาน 50 Hz. และมีผลรวมของความผิดเพี้ยนอยู่ที่ 23.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสมการการแปลง FFT แบบ 64 จุดมาประยุกต์ใช้ผลลัพธ์บ่งบอกว่าความถี่ซึ่งเป็นผลคูณของ 25 Hz. โดยมีความถี่ซึ่งมีความสำคัญ คือ ความถี่ที่ 75 Hz. ความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์โดยรวมไม่ถูกต้องบ่งบอกว่ามีความผิดเพี้ยน 8.80 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์ของการแปลง FFT ได้ทำการแสดงถึงความถี่ 350 Hz ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

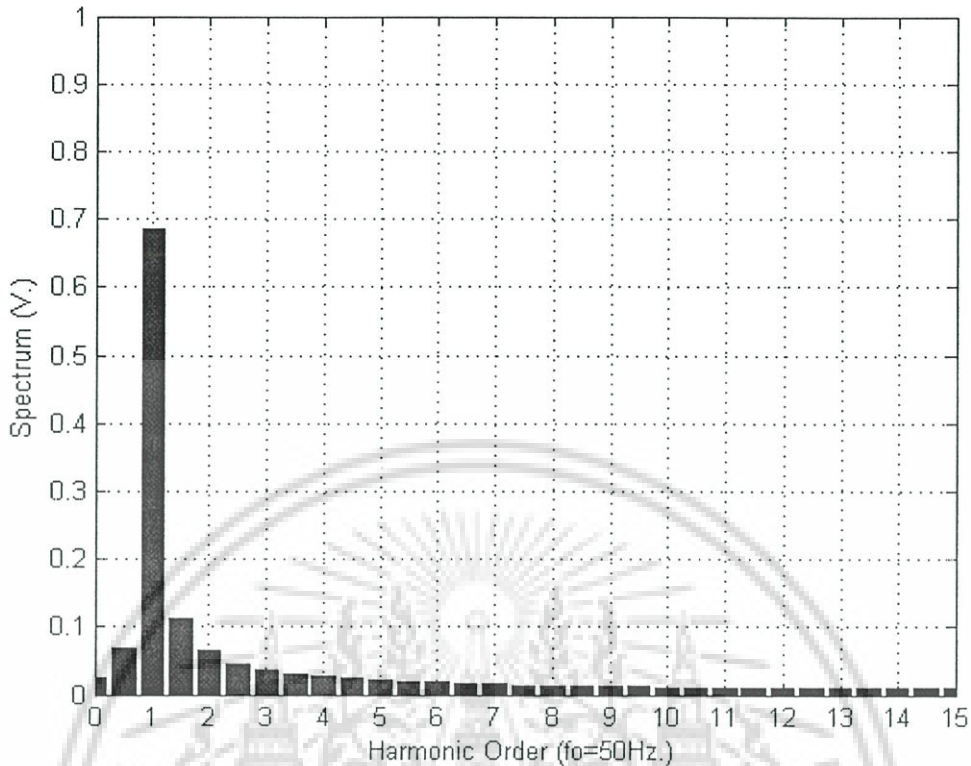


รูปที่ 5.1 รูปคลื่น 50 Hz. โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (time-varying)



รูปที่ 5.2 สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5.1 เมื่อใช้การคำนวณ FFT แบบ 32 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5.1 เมื่อใช้การคำนวณ FFT แบบ 64 จุด

ผลจากการนำการแปลงฟูรีเยร์แบบรวดเร็วมาใช้ เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงขนาดยอดตลอดเวลาตามที่แสดงในรูปที่ 5.1 จะพบว่าเมื่อกำหนดจำนวนจุดที่จะนำมาทำการวิเคราะห์แต่ต่างกันผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ก็จะแตกต่างกันไป นอกจากนี้ถ้าสังเกตผลการวิเคราะห์ที่ได้จากรูปสเปกตรัมทั้งในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 โดยขนาดของสเปกตรัมและมุมเฟสได้ทำการแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้การแปลงฟูรีเยร์จะพบว่ามีการกระจายของสเปกตรัมไปยังอันดับต่างๆ ทุกอันดับซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงข้อจำกัด ในการนำการแปลงฟูรีเยร์ไปประยุกต์ใช้งานกับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ลักษณะสัญญาณดังกล่าวสามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะปรากฏมากขึ้นเมื่อขนาดยอดมีการเปลี่ยนแปลงมากและรวดเร็วอย่างต่อเนื่อง สำหรับความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้น เมื่อทำการนำการแปลงกลับไปสู่ค่าจริง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าอย่างมากเนื่องจากขนาดของสัญญาณ (แรงดันหรือกระแส) มีค่าสูง จากข้อเสียที่เกิดขึ้นทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหาวิธีการใหม่ๆ มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งในบทนี้จะได้นำเสนอถึงการนำการแปลงเวฟเล็ตแพ็คเก็ต มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบของสัญญาณในรูปที่ 5.1 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว

Frequency (Hz)	32-point FFT		64-point FFT	
	Magnitude	Phase Angle	Magnitude	Phase Angle
0	-0.0358	-	-0.0245	-
25	-	-	0.0691	-126.08
50	0.5419	3.65	0.6864	1.97
75	-	-	0.1130	109.96
100	0.0948	105.96	0.0649	105.96
125	-	-	0.0467	106.80
150	0.0541	108.75	0.0370	108.75
175	-	-	0.0309	111.10
200	0.0389	113.6	0.0266	113.62
225	-	-	0.0235	116.24
250	0.0308	118.91	0.0211	118.91
275	-	-	0.0192	121.62
300	0.0258	124.34	0.0177	124.34
325	-	-	0.0164	127.09
350	0.0225	129.84	0.0154	129.84
375	-	-	0.0145	132.61
400	0.0201	135.37	0.0137	135.37
425	-	-	0.0131	138.15
450	0.0183	140.93	0.0125	140.93
475	-	-	0.0120	143.71
THD (%)	23.55	-	8.80	-

\*หมายเหตุข้อมูลในตารางเป็นข้อมูลฮาร์โมนิกส์ตัวอย่าง

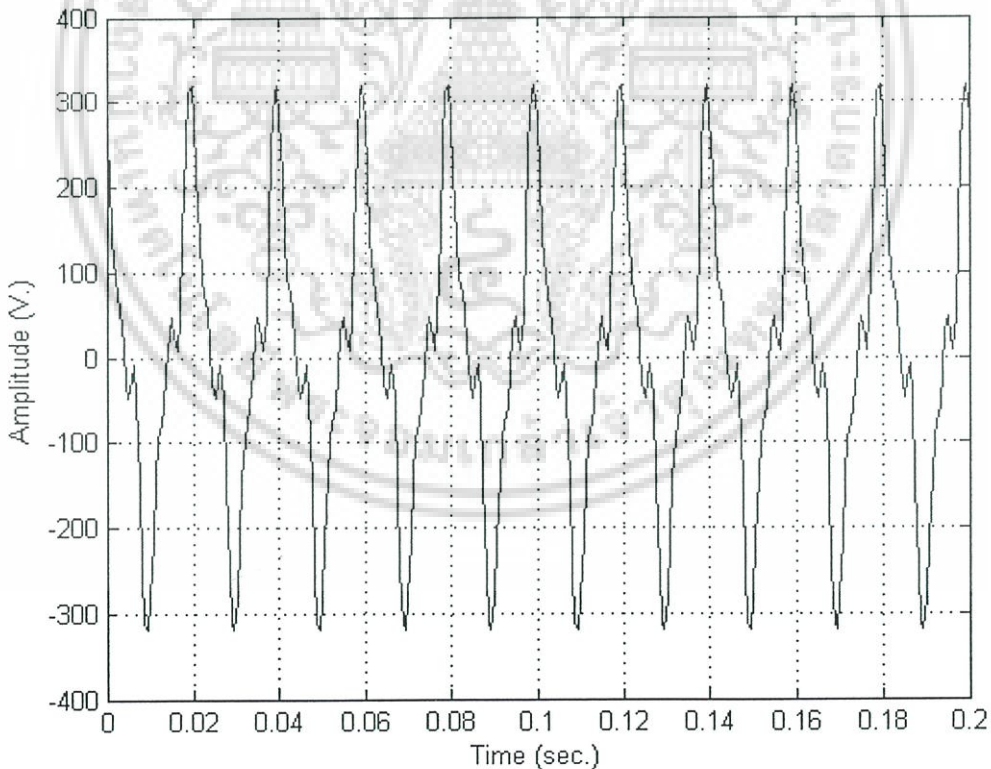
### 5.3 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น

สำหรับการตรวจจับฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแพ็คเก็ตที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง [34-37] มีความจำเป็นต้องนำไปทดสอบกับสัญญาณที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นก่อน และทดสอบผลลัพธ์ที่ได้กับการแปลงฟูเรียร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกรูปแบบต่อเนื่อง เพื่อให้มั่นใจได้ถึงความต้องการของวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในระดับหนึ่ง สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ (5.3)

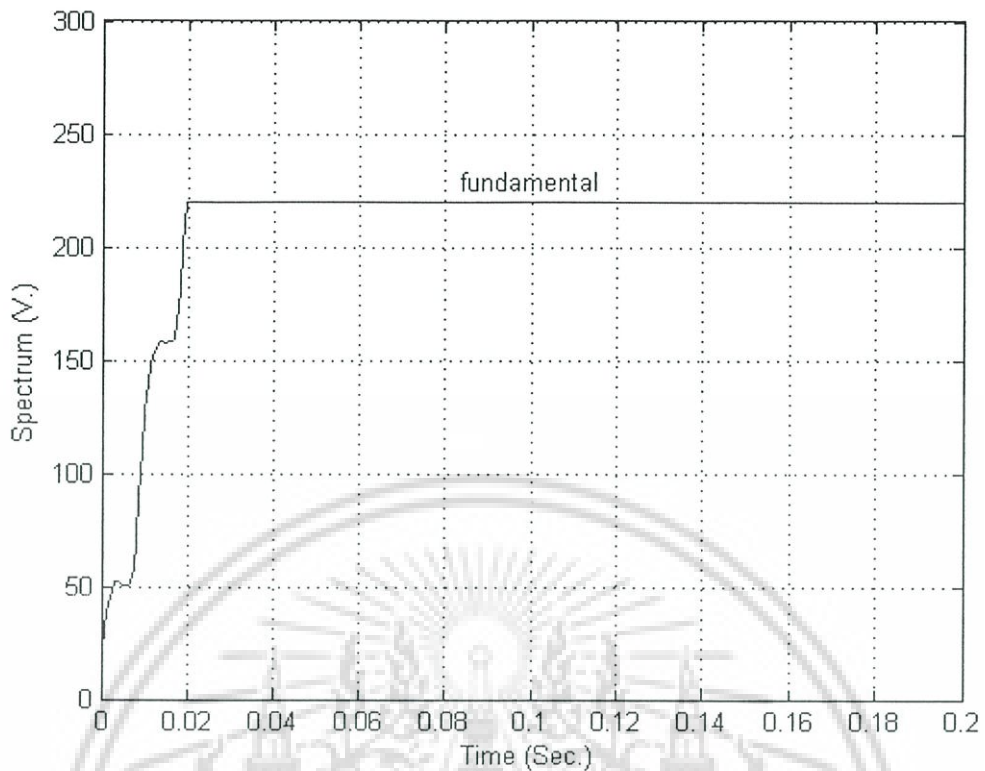
$$S(t) = 220 \cos(\omega t + 10^\circ) + 80 \cos(3\omega t + 30^\circ) + 40 \cos(5\omega t + 100^\circ) + 10 \cos(5\omega t - 75^\circ) \quad (5.3)$$

โดยที่  $\omega = 314 \text{ Rad/s}$  ช่วงเวลาของการวิเคราะห์สัญญาณ คือ ที่เวลา  $t = 0$  ถึงเวลา  $t = 0.2$  ความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณมีค่าเท่ากับ 6.4 kHz. หรือ 128 จุดต่อหนึ่งลูกคลื่น ลักษณะของสัญญาณที่ได้สามารถแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยการทำการวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการแปลง FFT ตลอดช่วงระยะเวลาที่สนใจ เทียบกับการแปลงเวฟเล็ท เพื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ทว่าสัญญาณแบบ stationary โปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สามารถให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องเทียบเท่ากับการแปลง FFT หรือไม่ ก่อนที่จะนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นจริงที่ได้ทำการตรวจจับ

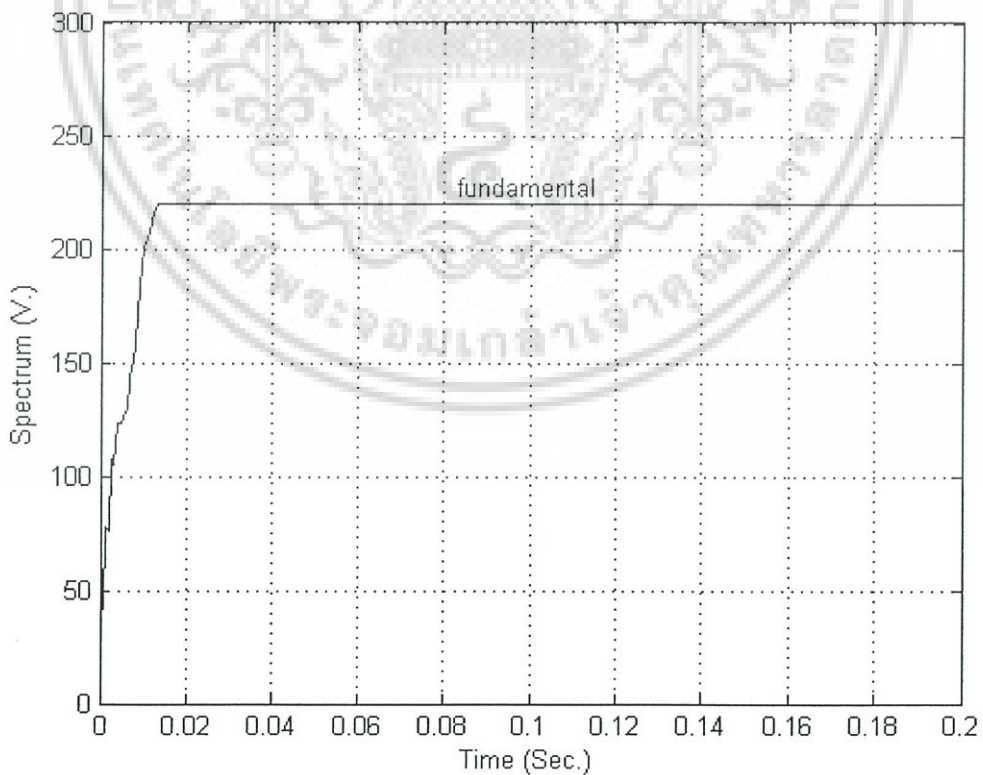


รูปที่ 5.4 สัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นจากสมการที่ (5.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

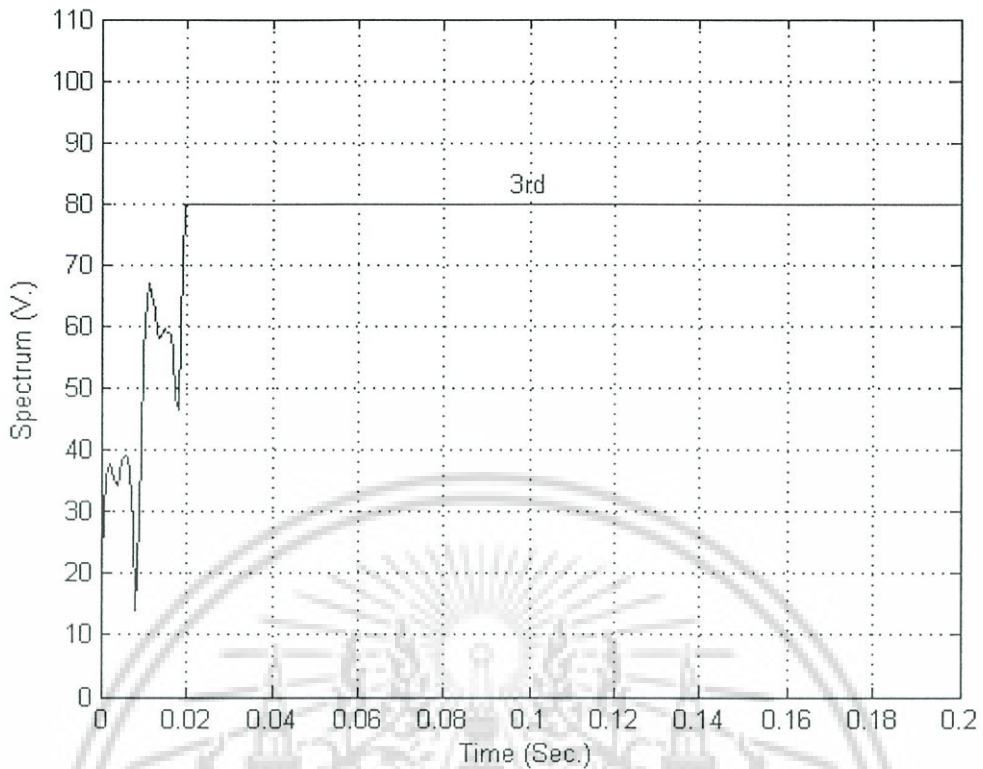


รูปที่ 5.5 สเปกตรัมความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

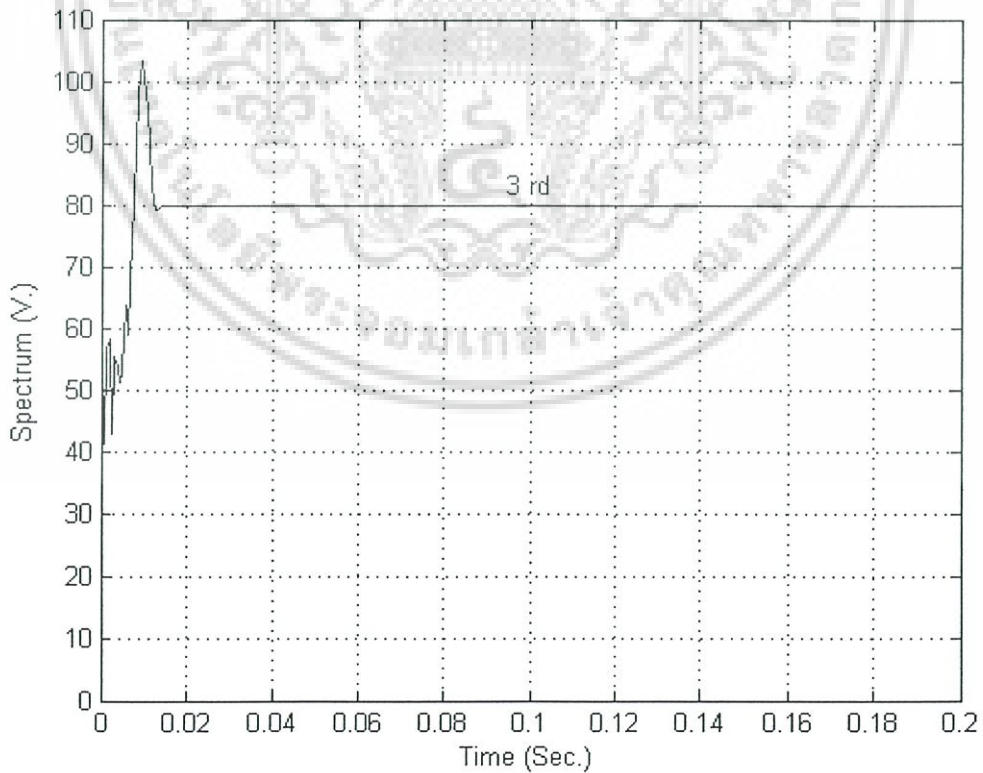


รูปที่ 5.6 สเปกตรัมความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

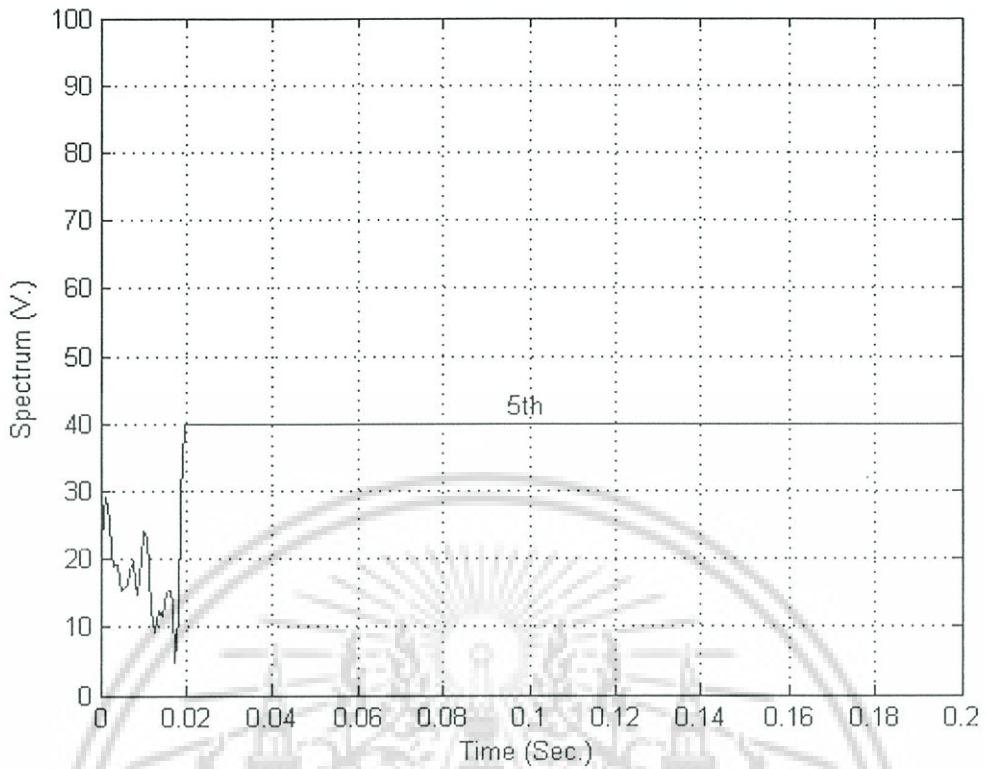


รูปที่ 5.7 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

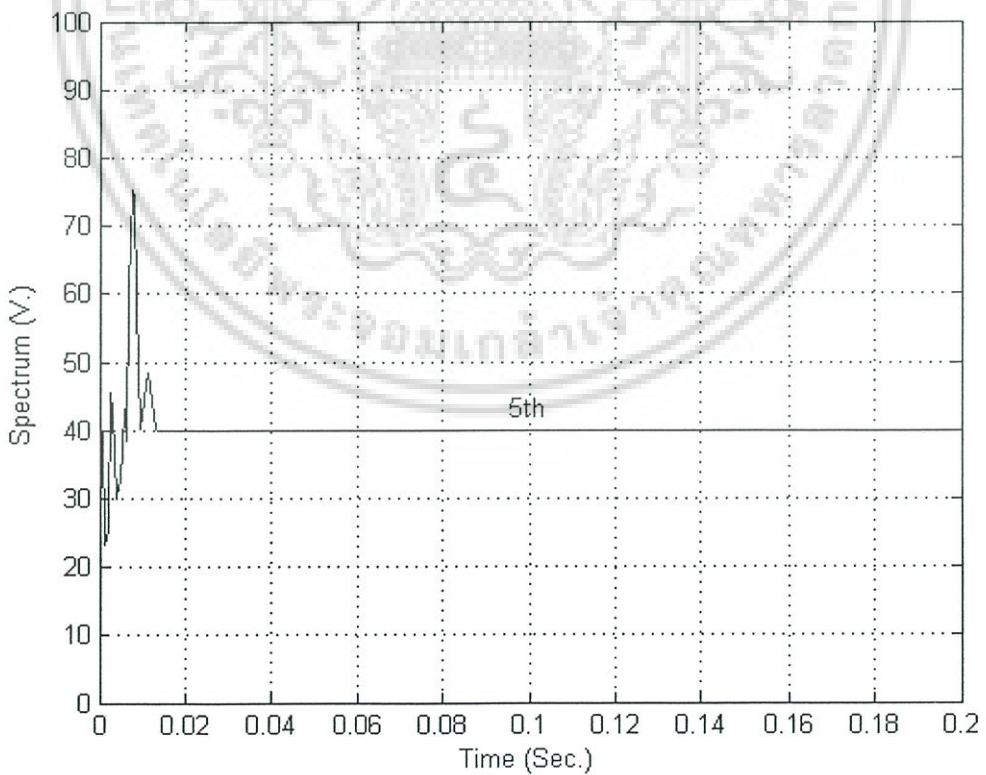


รูปที่ 5.8 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

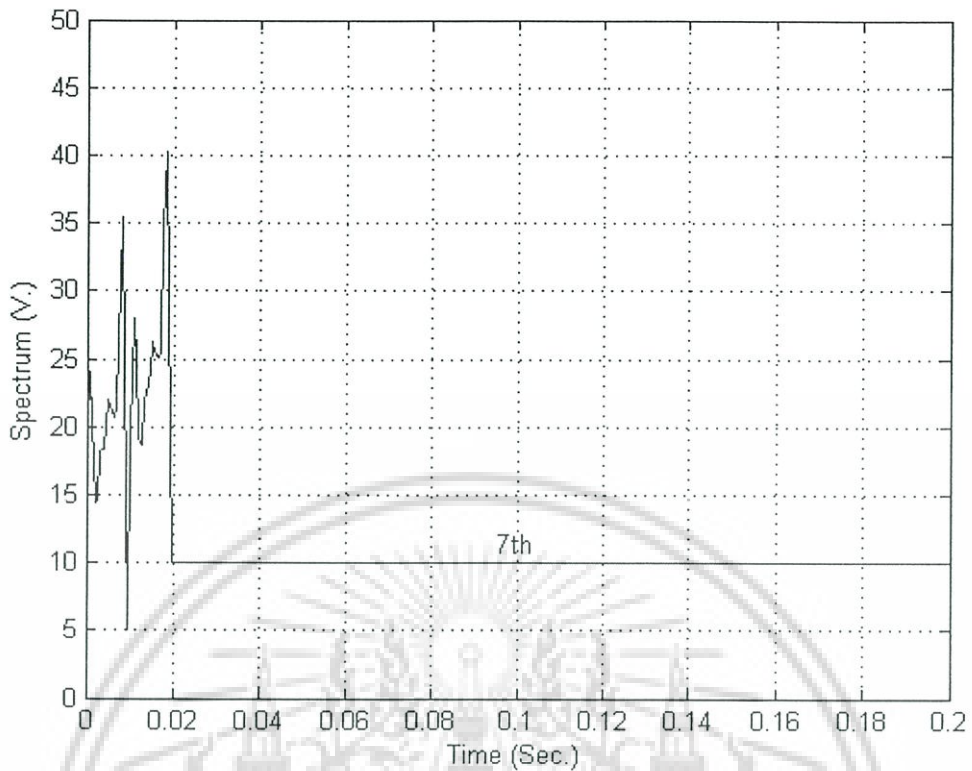


รูปที่ 5.9 สเปกตรัมฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

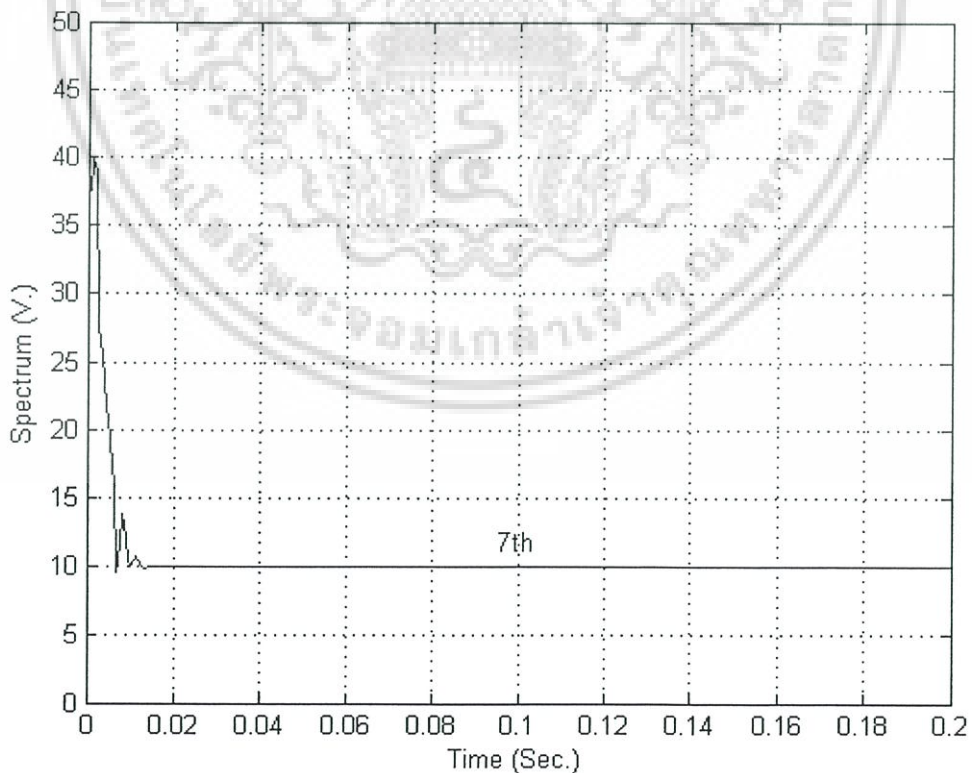


รูปที่ 5.10 สเปกตรัมฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

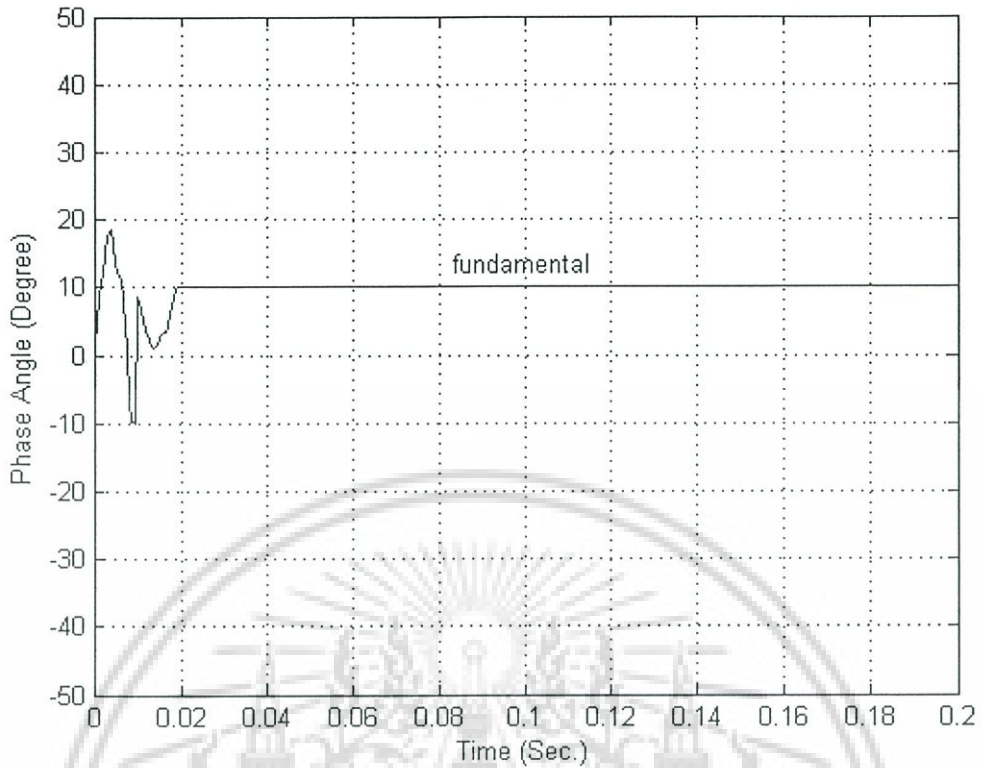


รูปที่ 5.11 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

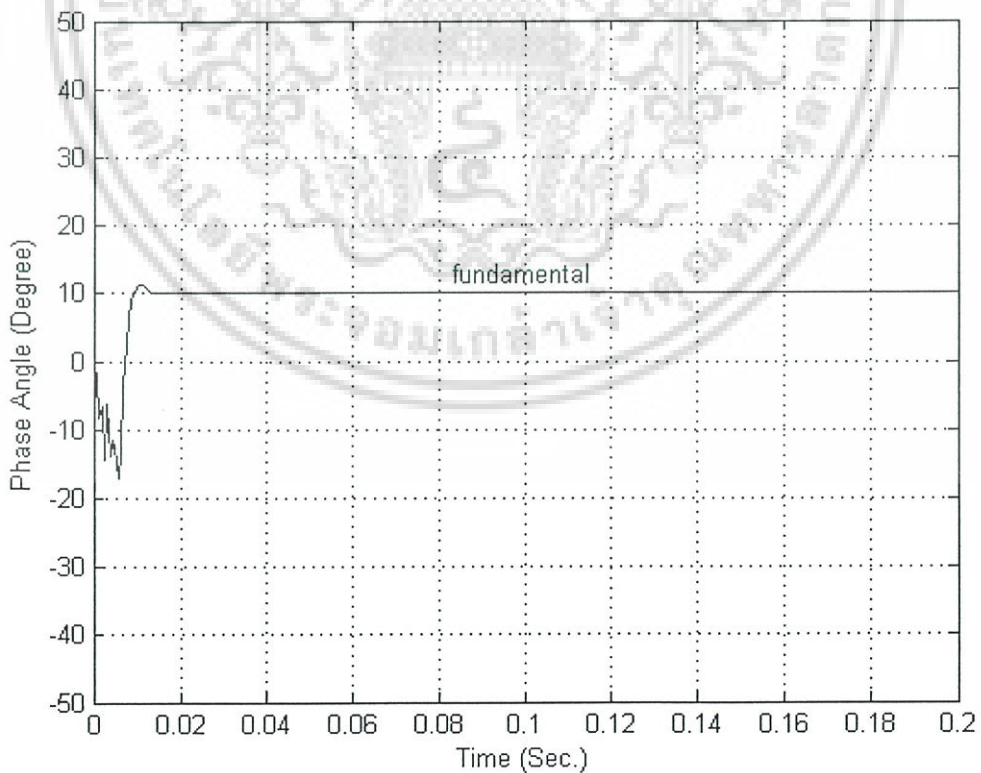


รูปที่ 5.12 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

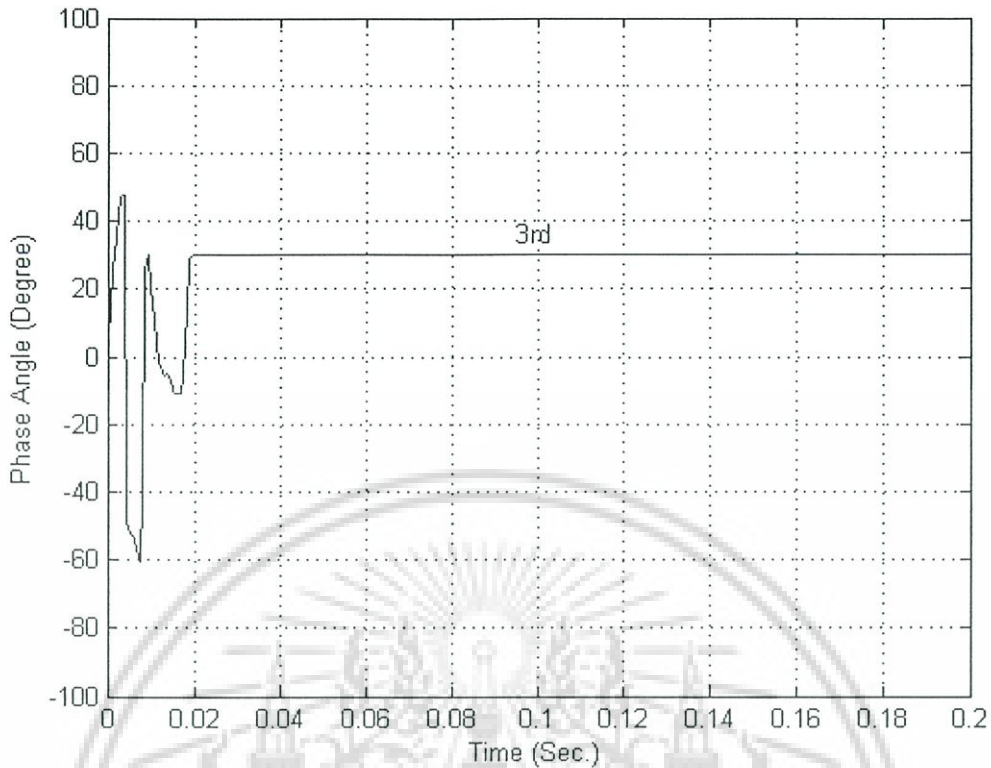


รูปที่ 5.13 มุมเฟสความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

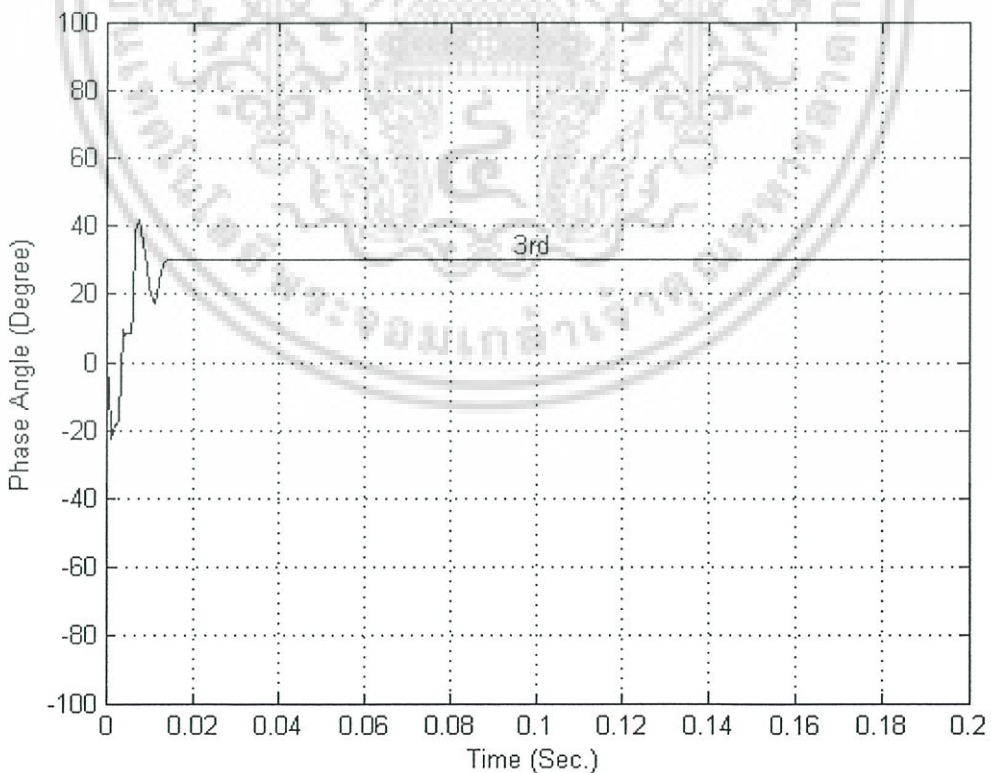


รูปที่ 5.14 มุมเฟสความถี่มูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

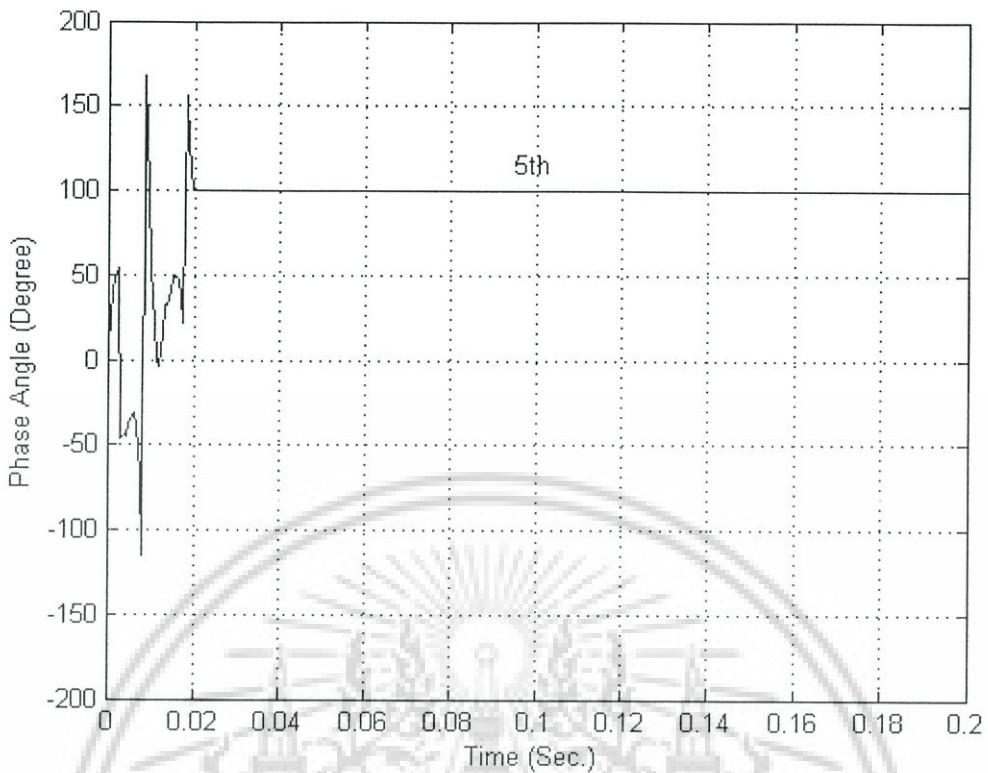


รูปที่ 5.15 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

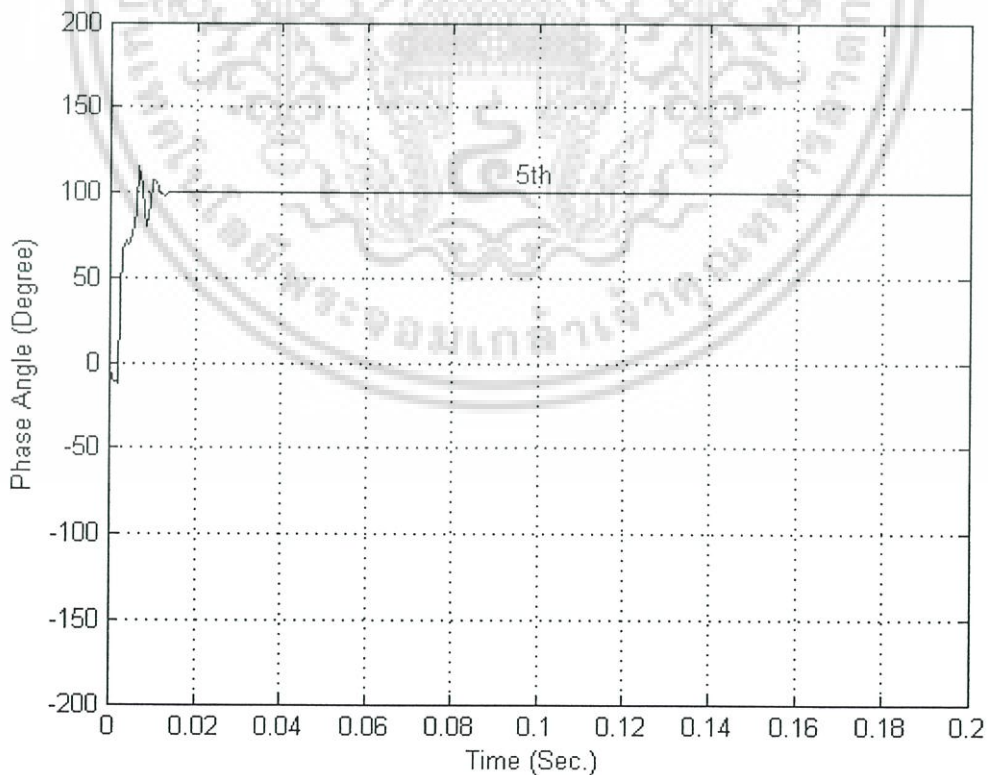


รูปที่ 5.16 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

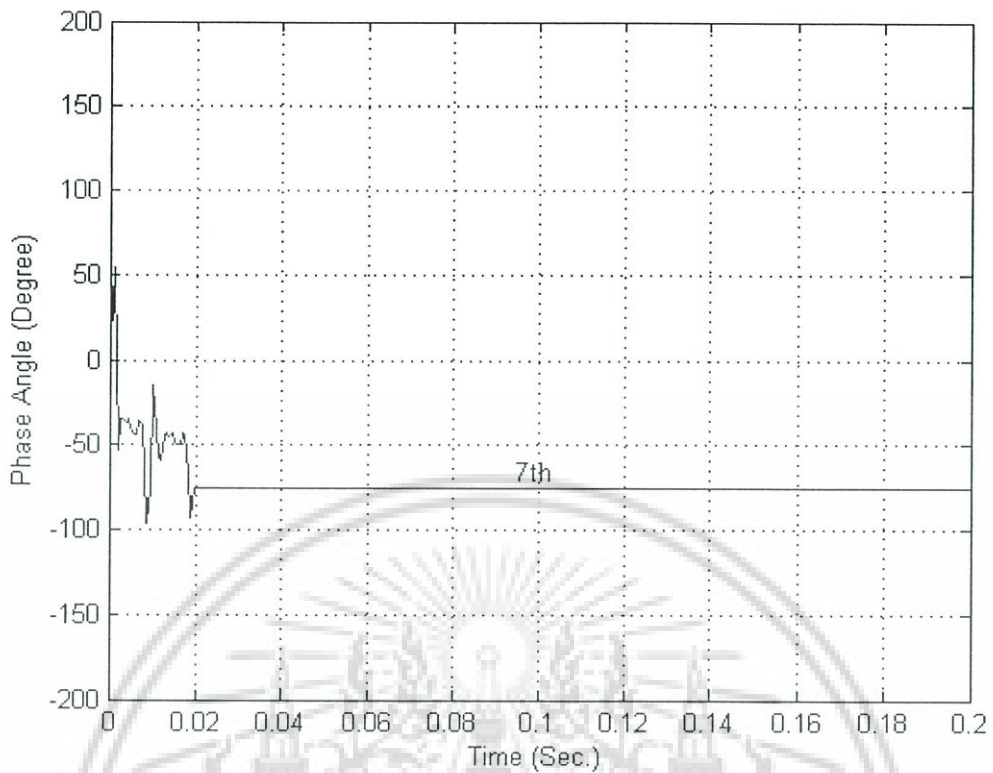


รูปที่ 5.17 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

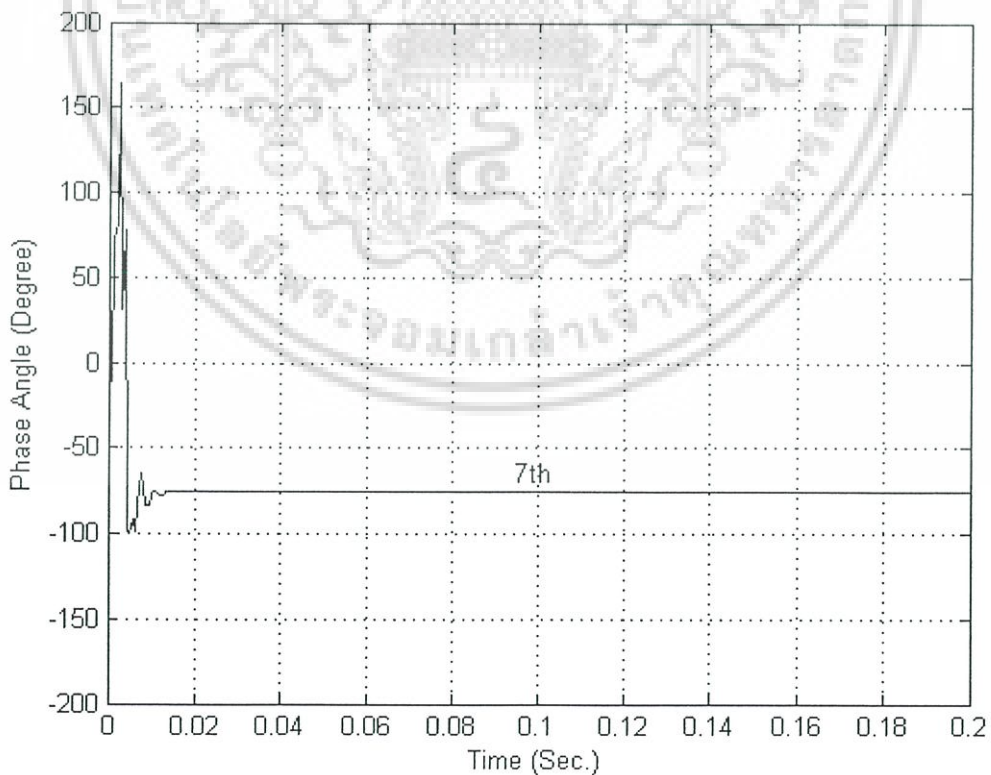


รูปที่ 5.18 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดย FFT

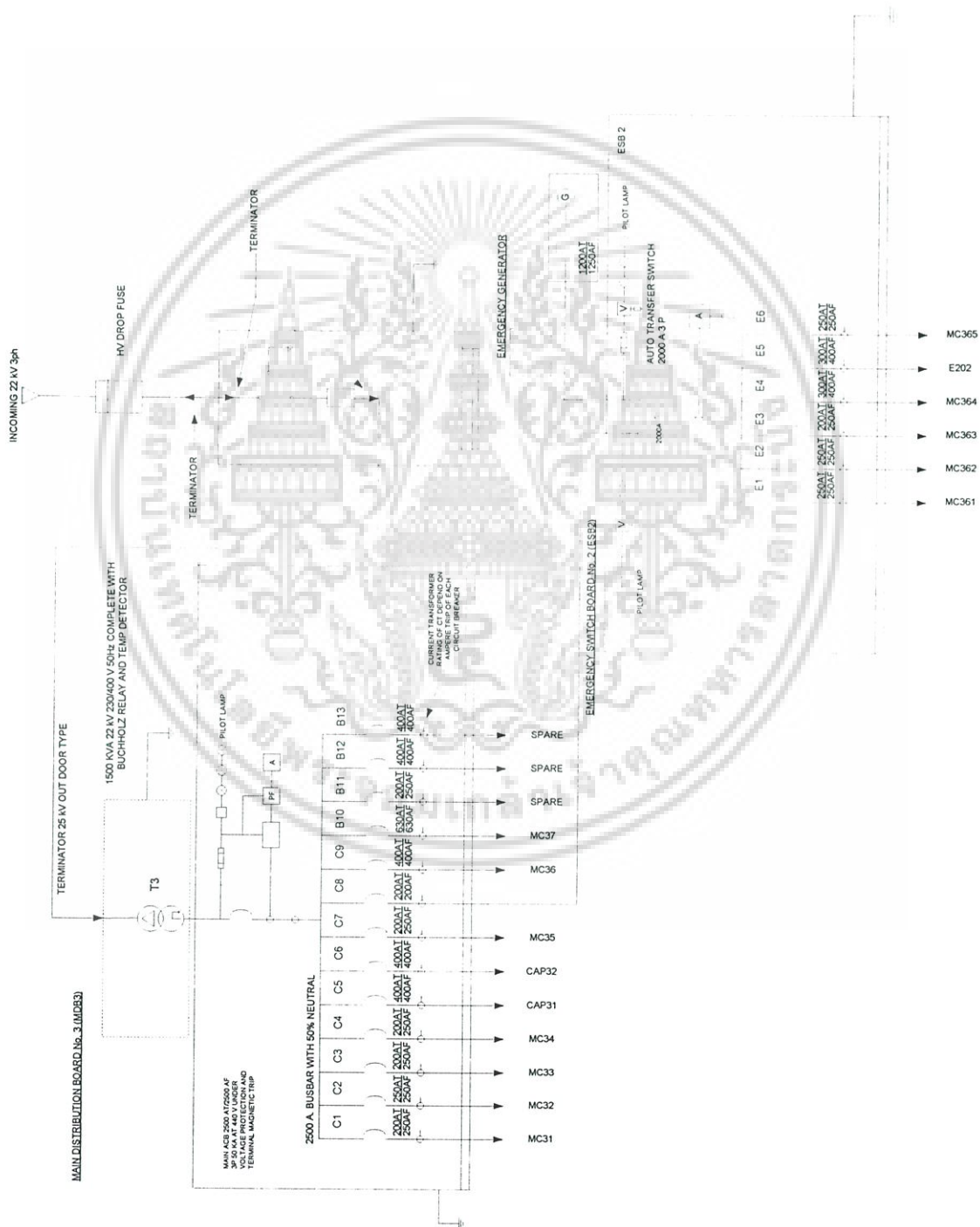


รูปที่ 5.20 มุมเฟสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.4 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

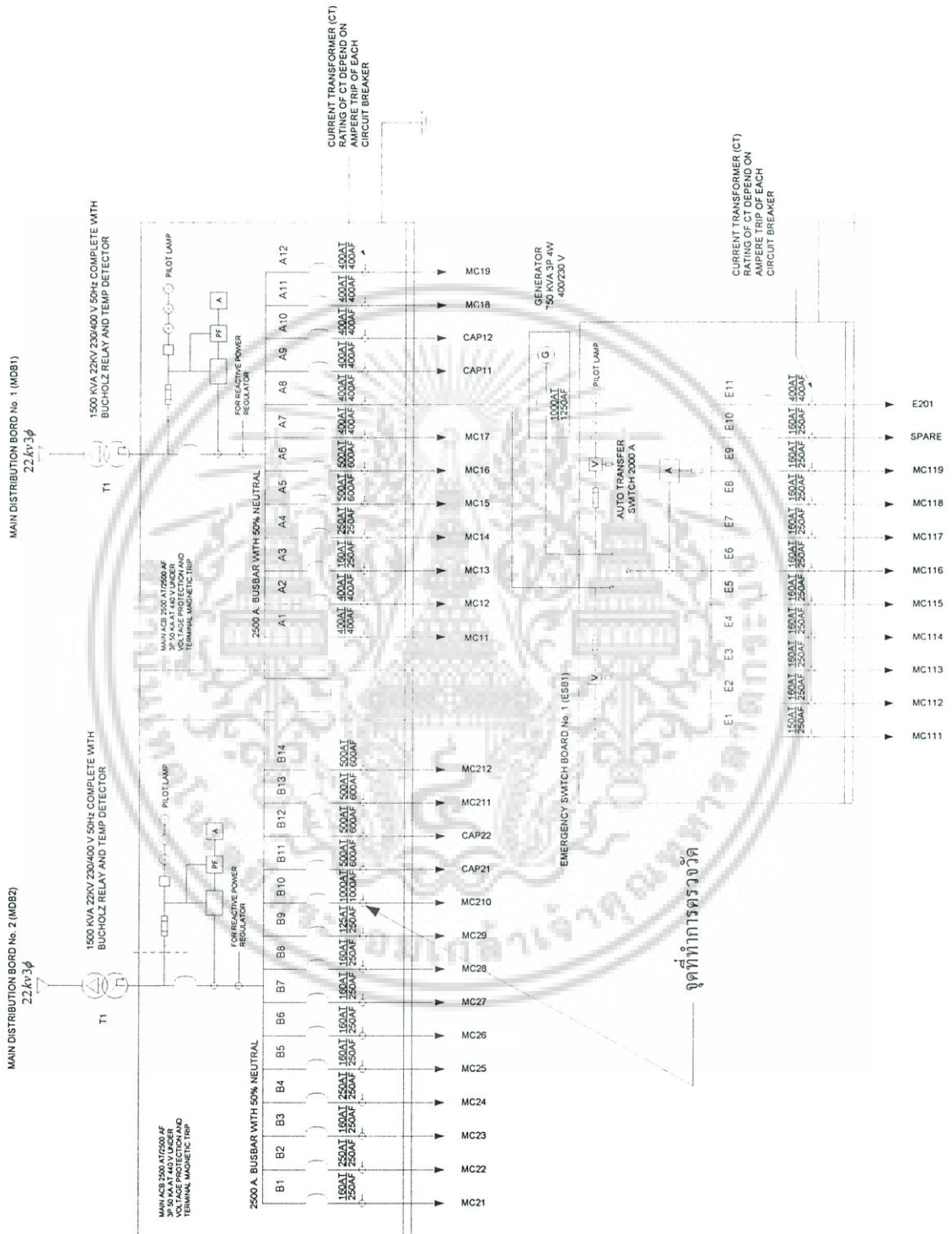
### 5.4 การวิเคราะห์สัญญาณอินทิกรัลคอนโทรล

โปรแกรมที่ได้รับทดสอบก่อนหน้านี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณอินทิกรัลคอนโทรล ที่ตรวจจับภายในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง เพื่อทดสอบดุลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสเป็คตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้น ภายในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งนี้มีแผนผังระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยอัตราการสุ่มสัญญาณที่ใช้เท่ากับ 50 kHz. โดยการวิเคราะห์ได้แบ่งกรณีของการศึกษาออกเป็น 3 กรณีตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของขนาดยอดของสัญญาณที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.21 แผนผังระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษา

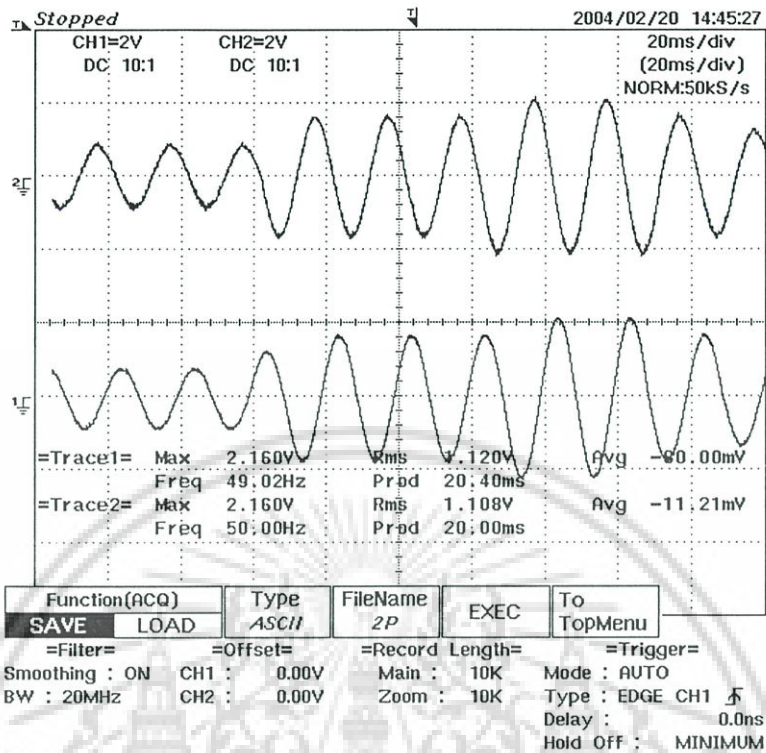
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



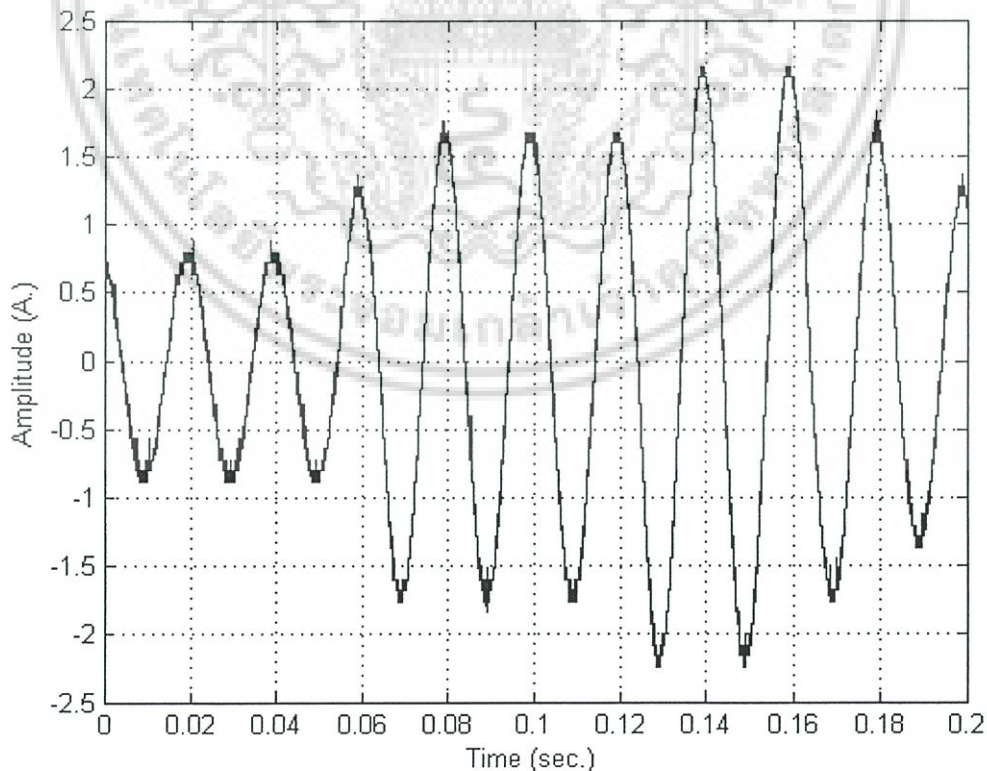
รูปที่ 5.21 แผนผังระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4.1 กรณีที่ศึกษาที่ 1

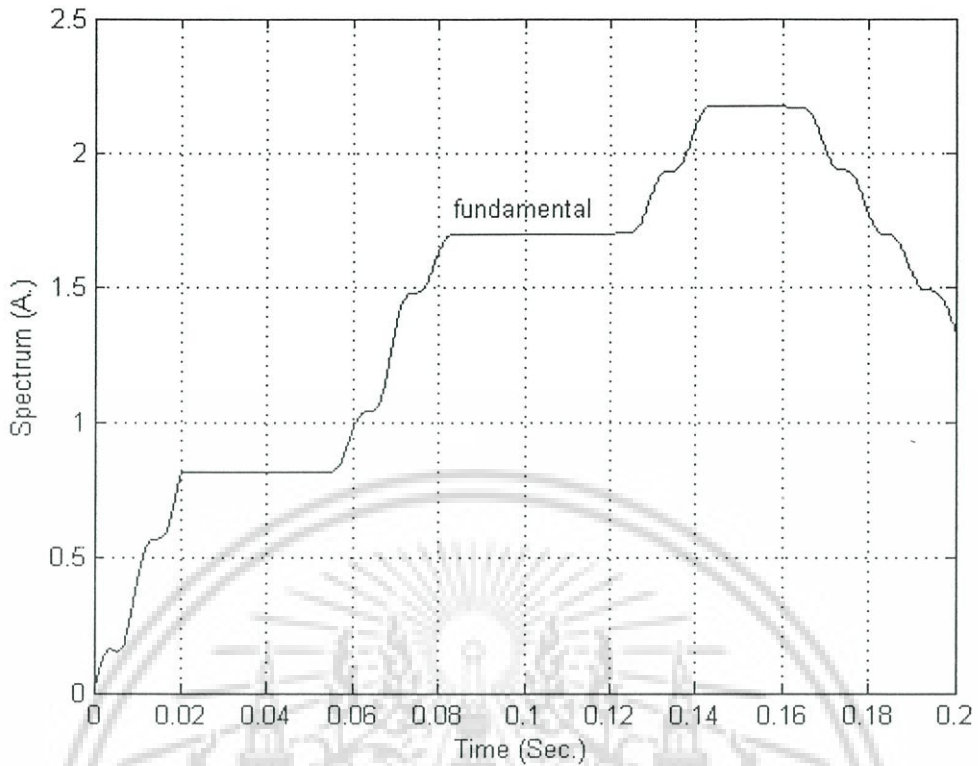


รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 1 ที่ทำการตรวจจับได้

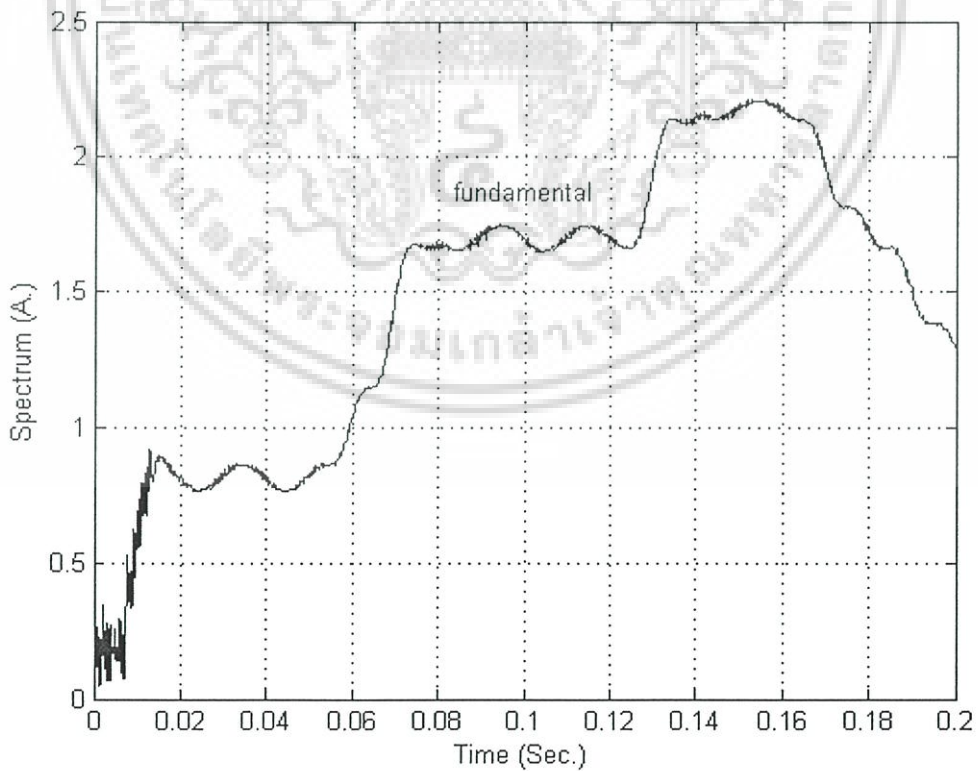


รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.22 ที่นำมาทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

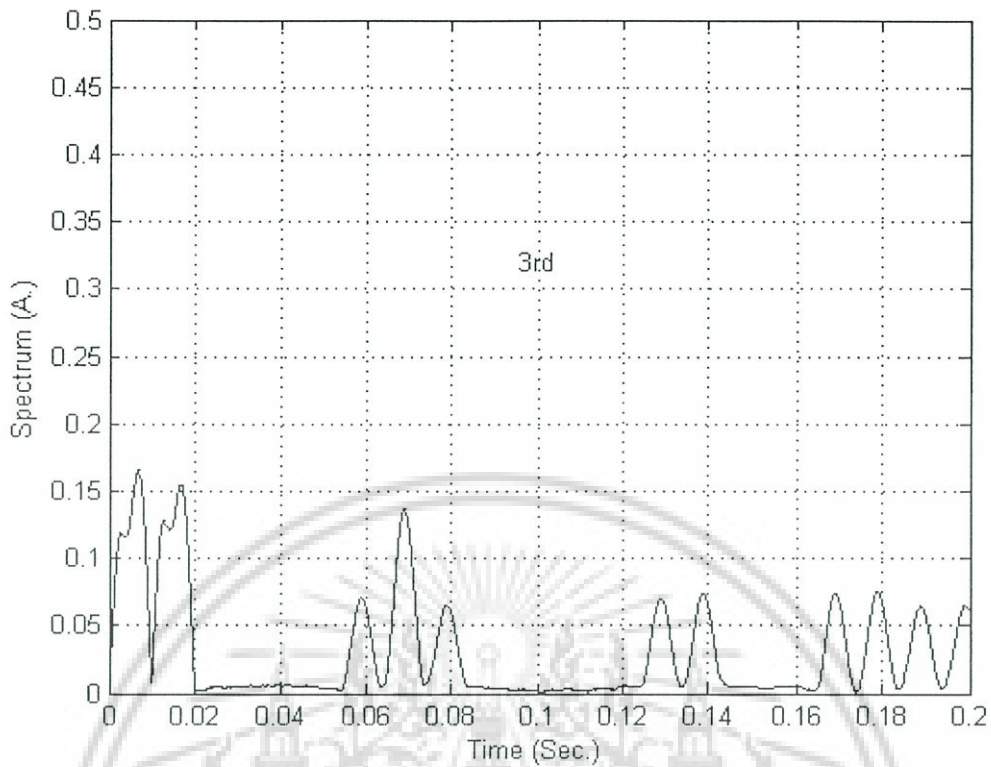


รูปที่ 5.24 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT

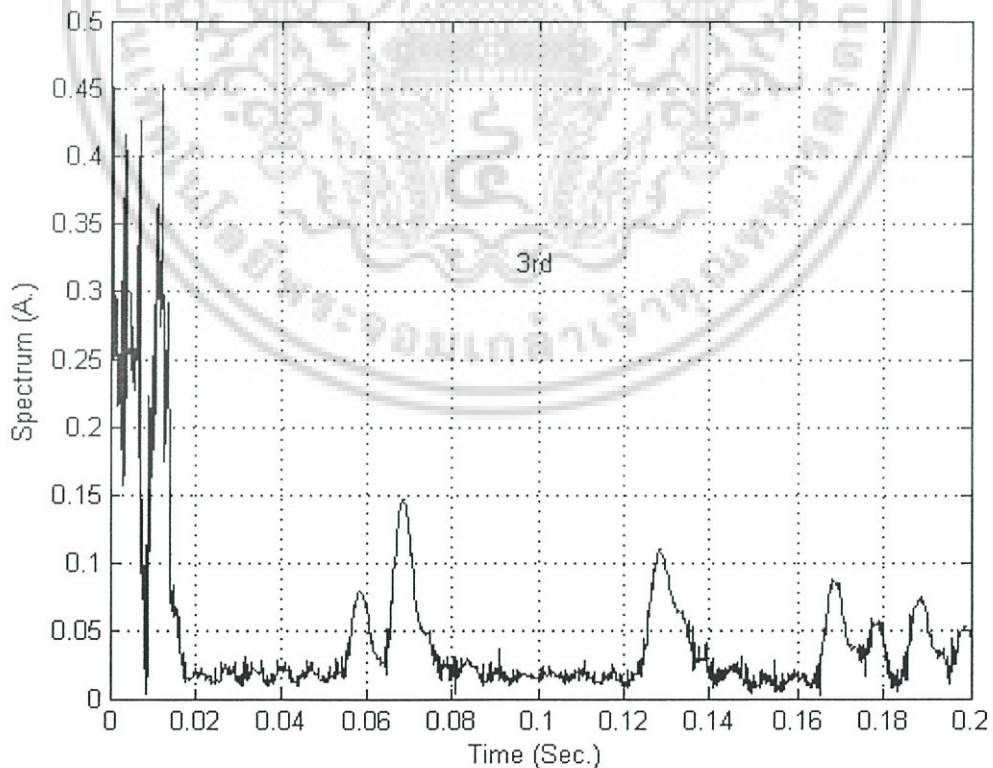


รูปที่ 5.25 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

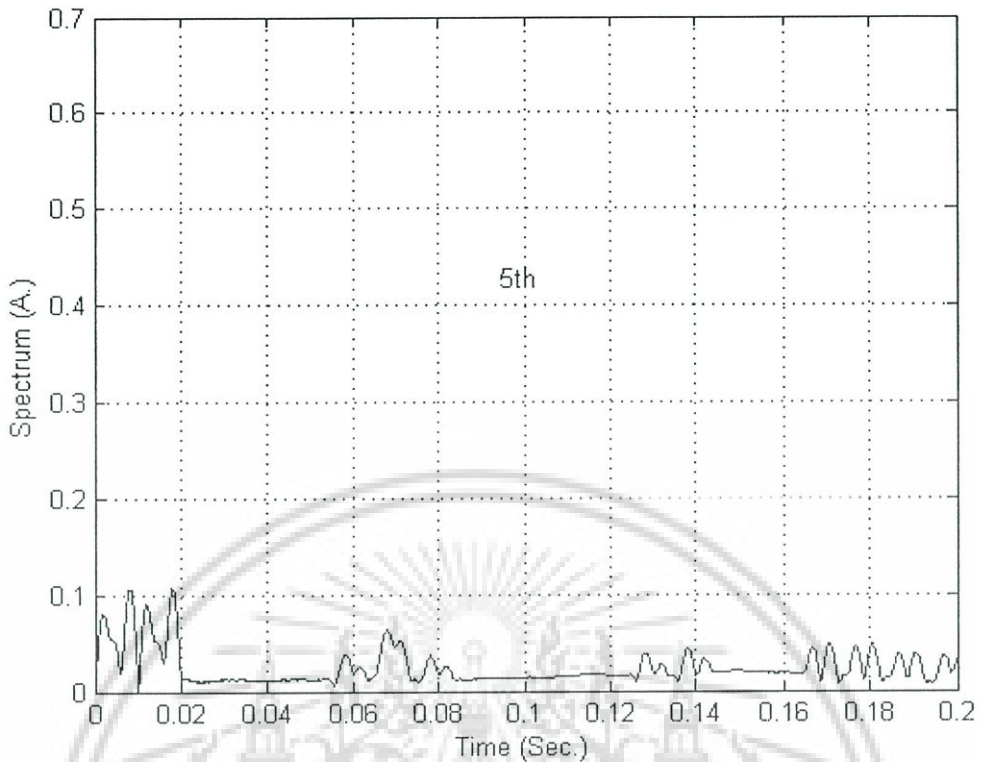


รูปที่ 5.26 สเปกตรัมฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยใช้ FFT

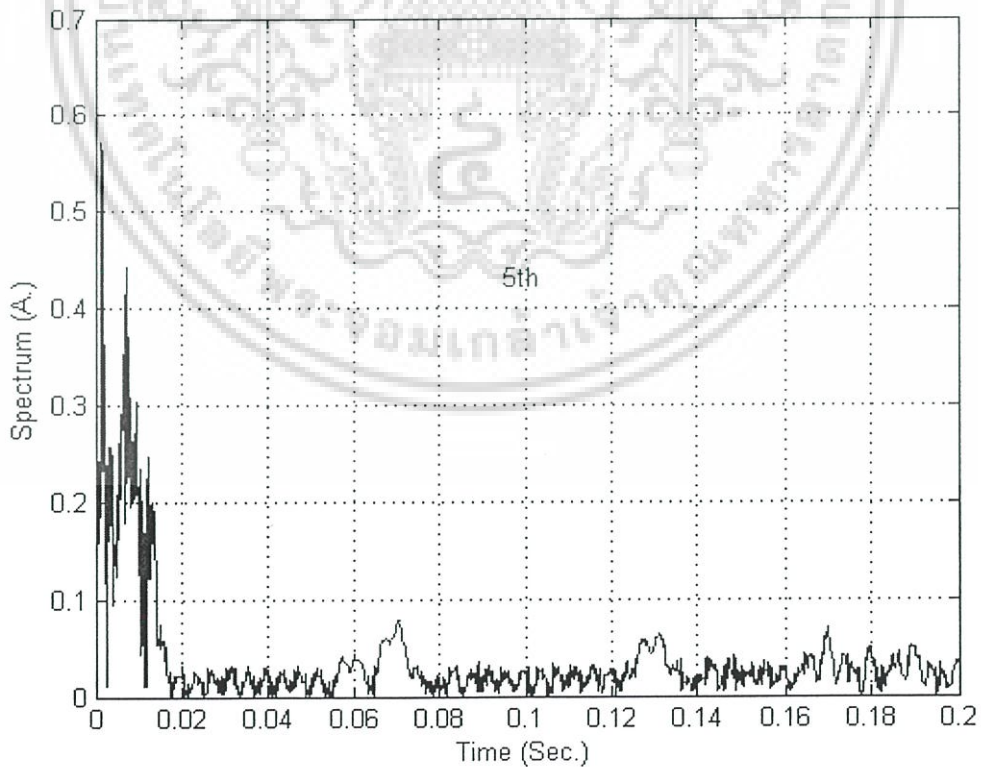


รูปที่ 5.27 สเปกตรัมฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยใช้เวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

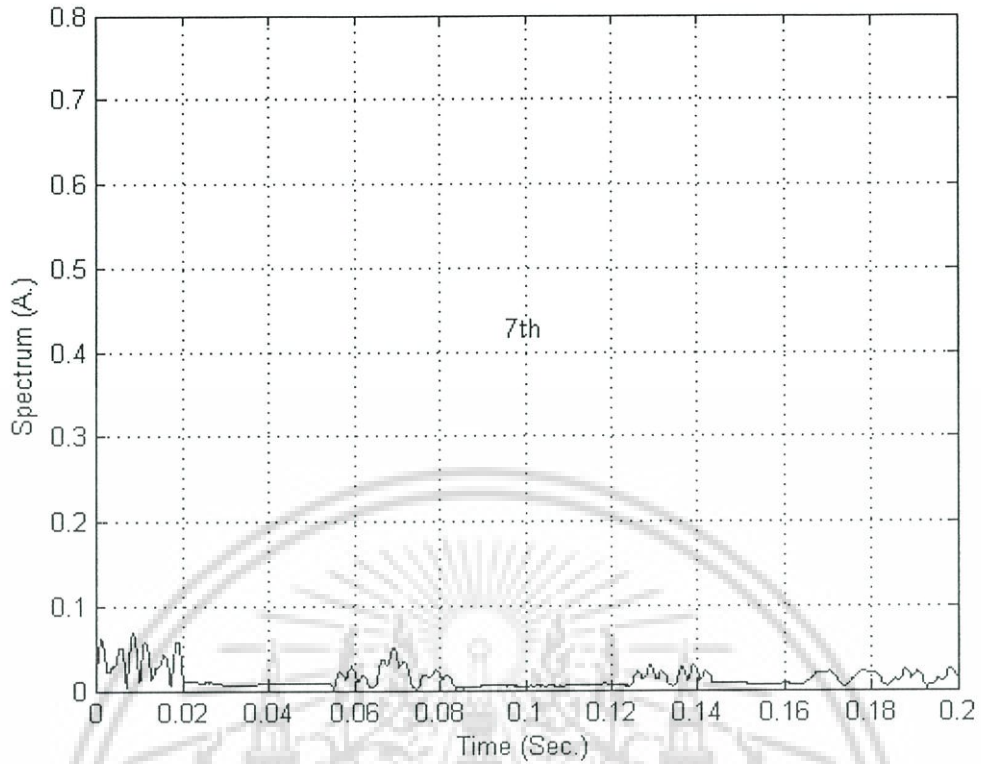


รูปที่ 5.28 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT

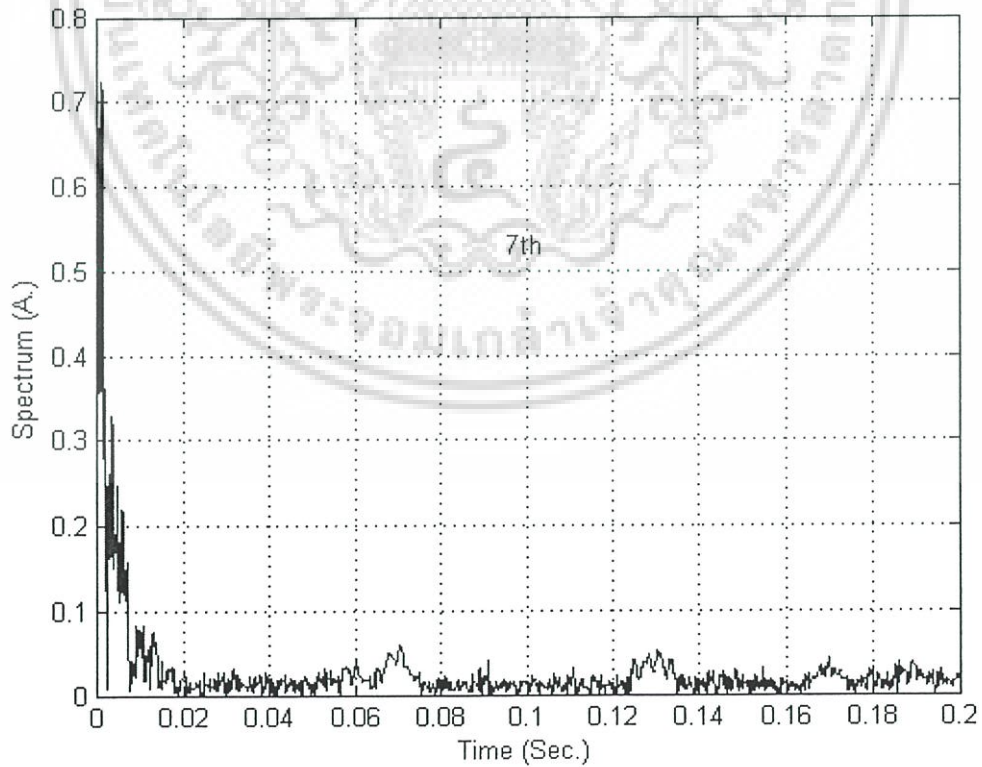


รูปที่ 5.29 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดย FFT



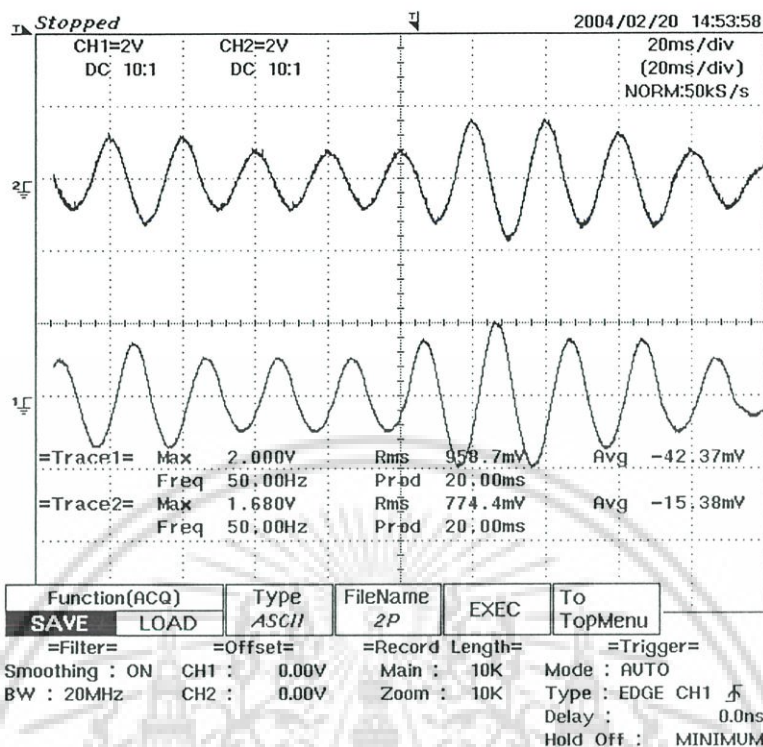
รูปที่ 5.31 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.23 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

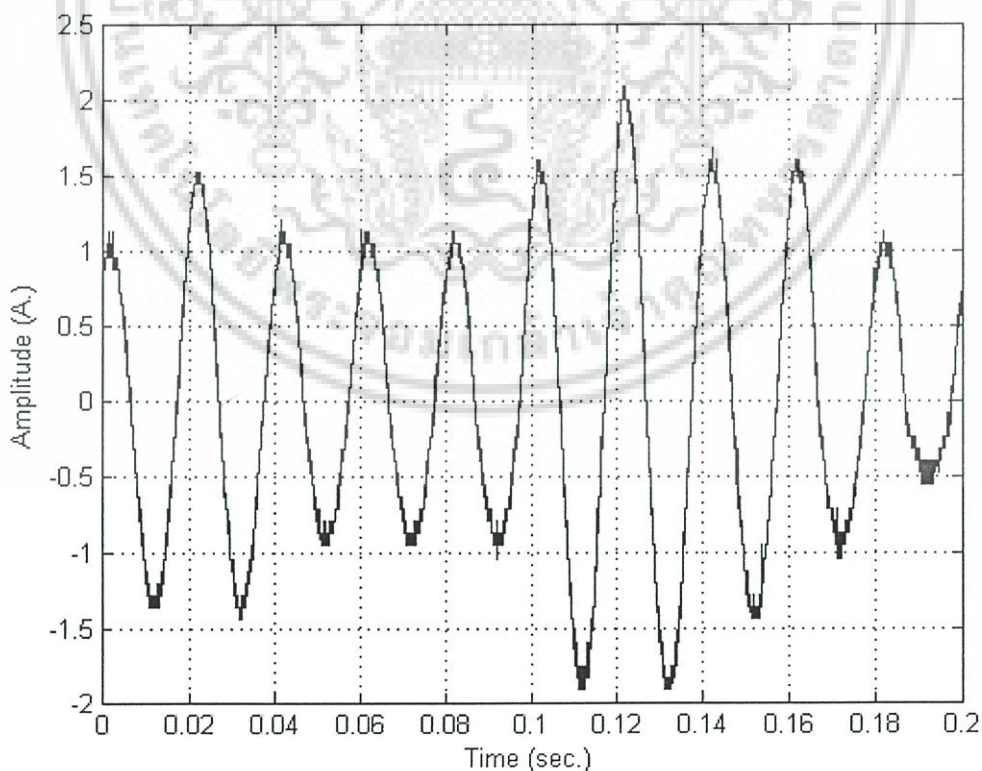
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลที่ทำการตรวจจับได้ตามที่แสดงในรูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.22 ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 5.23 สัญญาณที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 1 นี้จะพบว่าในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.00 – 0.05 sec. ขนาดของสเปคตรัมที่ความถี่มูลฐานควรมีค่าประมาณ 0.8 A. โดยตัวคูณที่ใช้คือ 50 A. ภายหลังจากเวลา 0.05 sec. ขนาดของสเปคตรัมจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับจนกระทั่งที่เวลา 0.07 sec. ขนาดของสเปคตรัมจะมีค่าประมาณ 1.7 A. และคงที่ไปจนกระทั่งถึงที่เวลา 0.12 sec. ตั้งแต่เวลาที่ 0.12 – 0.13 sec. ขนาดของสเปคตรัมจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนไปอยู่ที่ประมาณ 2.2 A. ตั้งแต่เวลา 0.13 sec. ถึงเวลาประมาณ 0.16 sec. ก่อนที่ขนาดของสเปคตรัมจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนมาอยู่ที่ 1.2 A. ที่เวลา 0.2 sec. เพื่อที่จะตรวจจับสเปคตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วและการแปลงเวฟเลตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยขนาดของสเปคตรัมที่ความถี่มูลฐานที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ สเปคตรัมตัวอย่างของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ ฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 ตามลำดับ และฮาร์โมนิกส์อันดับ 7 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.30 และ 5.31 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว และการแปลงเวฟเลตจะพบว่าวิธีการแปลงเวฟเลตสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสเปคตรัมของสัญญาณได้ดีกว่าวิธีการแปลงฟูเรียร์ สังเกตได้จากในรูปที่ 5.25 ที่เวลาประมาณ 0.06-0.07 sec. สเปคตรัมที่ได้จากการแปลงเวฟเลตจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและพบขนาดสเปคตรัมที่ประมาณ 1.7 A. ซึ่งถ้าใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วต้องรอจนกระทั่งถึงเวลาประมาณ 0.08 sec. จึงจะพบขนาดสเปคตรัมที่ประมาณ 1.7 A. เท่ากับที่พบโดยการแปลงเวฟเลต ในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสำหรับช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่เวลาประมาณ 0.12 – 0.13 sec. ที่สเปคตรัมที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมีค่าเพิ่มมากขึ้นและพบสเปคตรัมขนาด 2.2 A. ในขณะที่การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วพบสเปคตรัมขนาด 2.2 A. เมื่อเวลา 0.14 sec. ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องที่เวลาประมาณ 0.17-0.2 sec. ถ้านำขนาดของสเปคตรัมของทั้งสองวิธีที่คำนวณได้ไปเทียบกับขนาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะพบว่าสเปคตรัมที่ได้จากการแปลงเวฟเลตจะมีความสอดคล้องกับขนาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นมากกว่าการแปลงฟูเรียร์ ในส่วนของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3, 5 และ 7 ที่ทำการตรวจจับได้จากทั้งสองวิธี วิธีการที่ตรวจจับโดยใช้เวฟเลตสามารถแสดงความสอดคล้องของการเกิดของฮาร์โมนิกส์ได้ดี เมื่อนำฮาร์โมนิกส์ที่ตรวจจับได้ไปเทียบกับช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเช่นที่เวลา 0.06 -0.07 sec. ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงพบฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4.2 กรณีศึกษาที่ 2

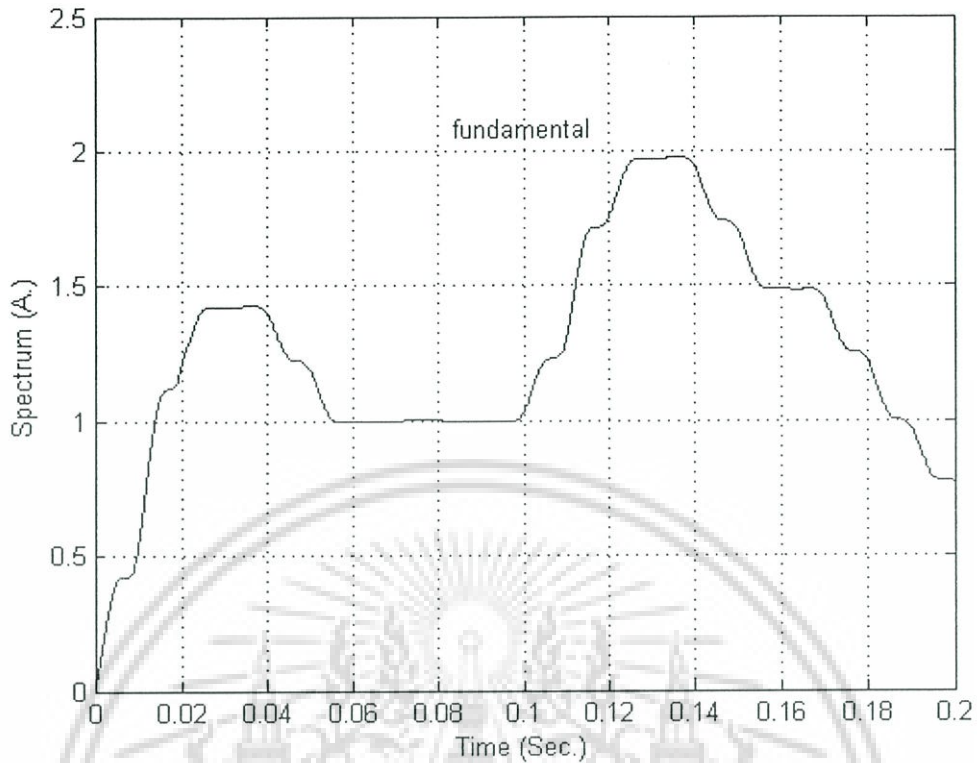


รูปที่ 5.32 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 2 ที่ทำการตรวจจับได้

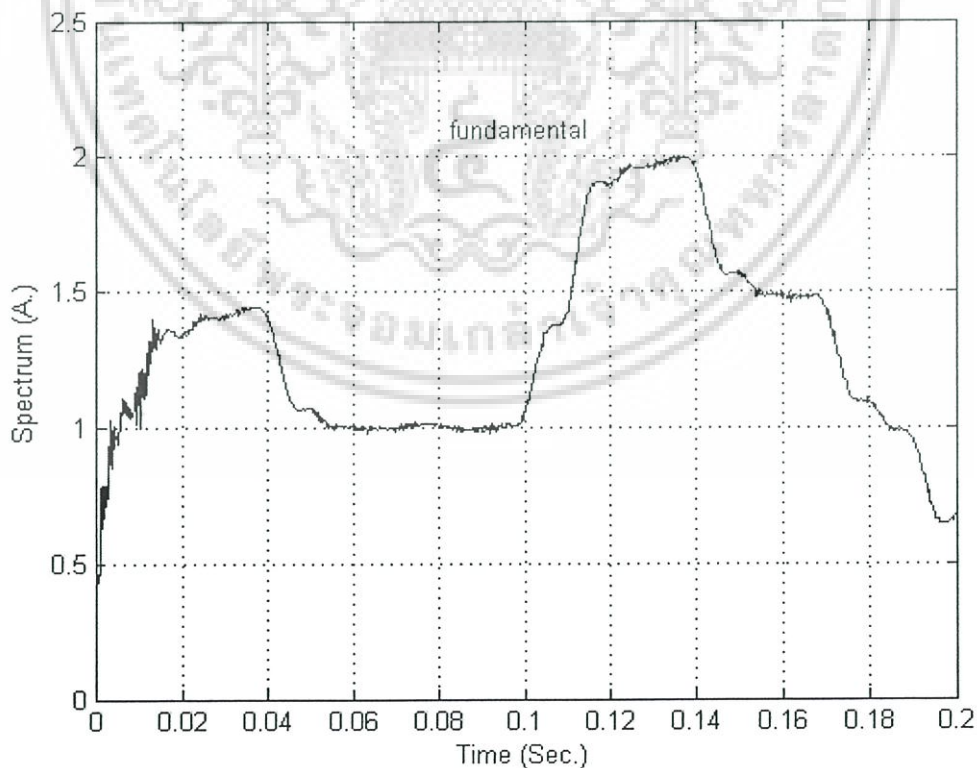


รูปที่ 5.33 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.32 ที่นำมาทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

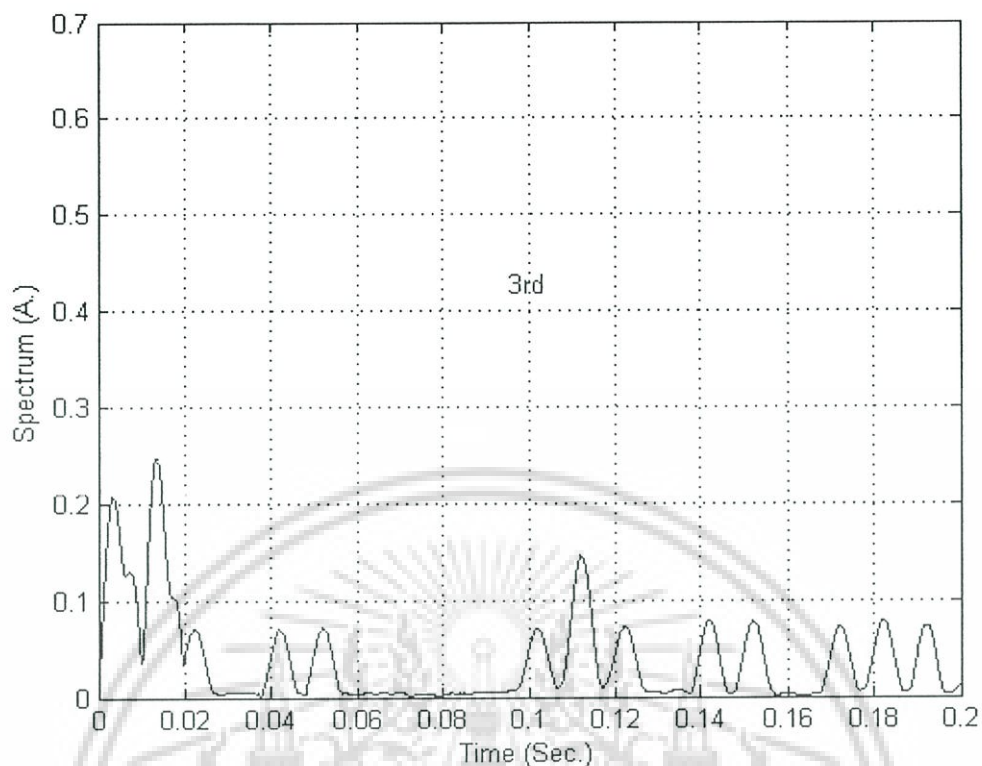


รูปที่ 5.34 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT

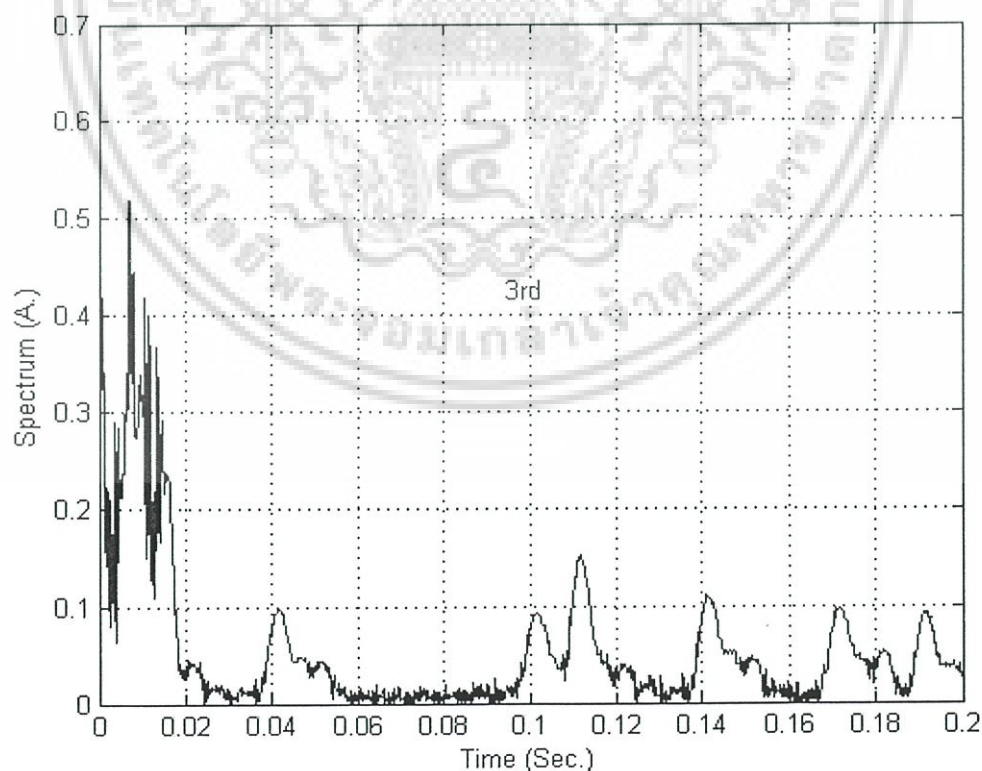


รูปที่ 5.35 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

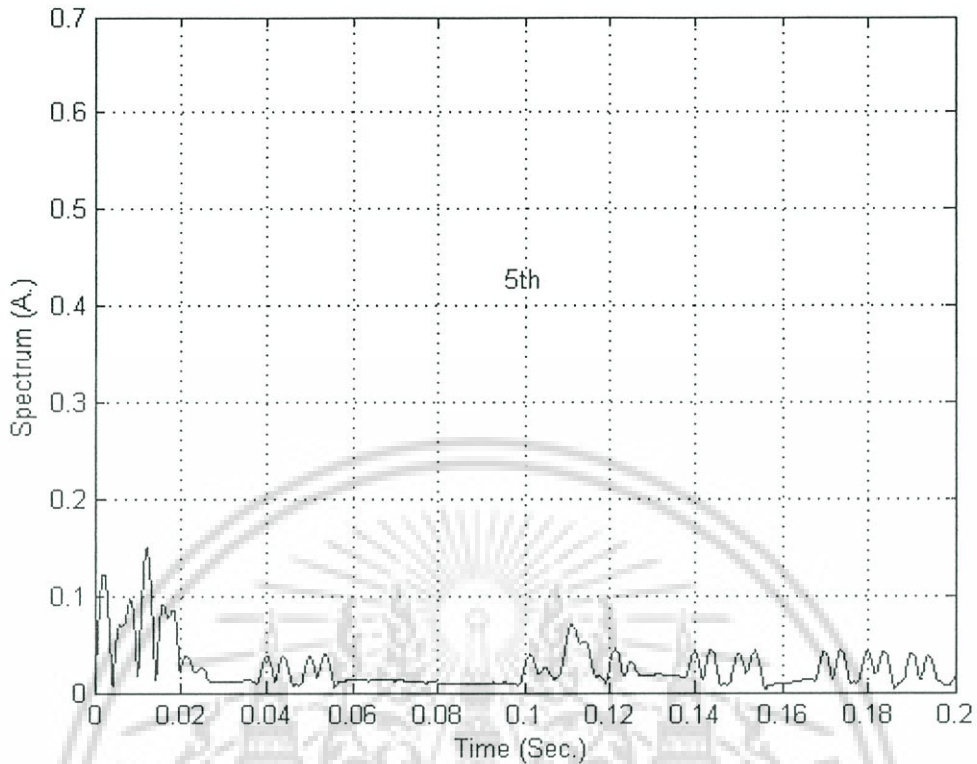


รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT

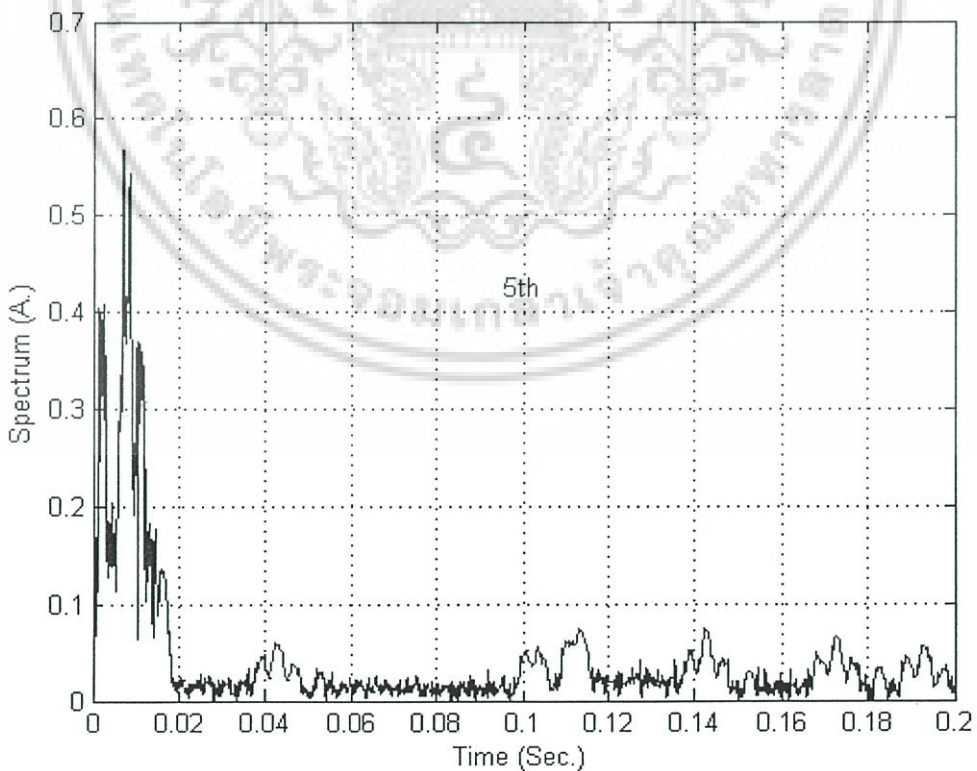


รูปที่ 5.37 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

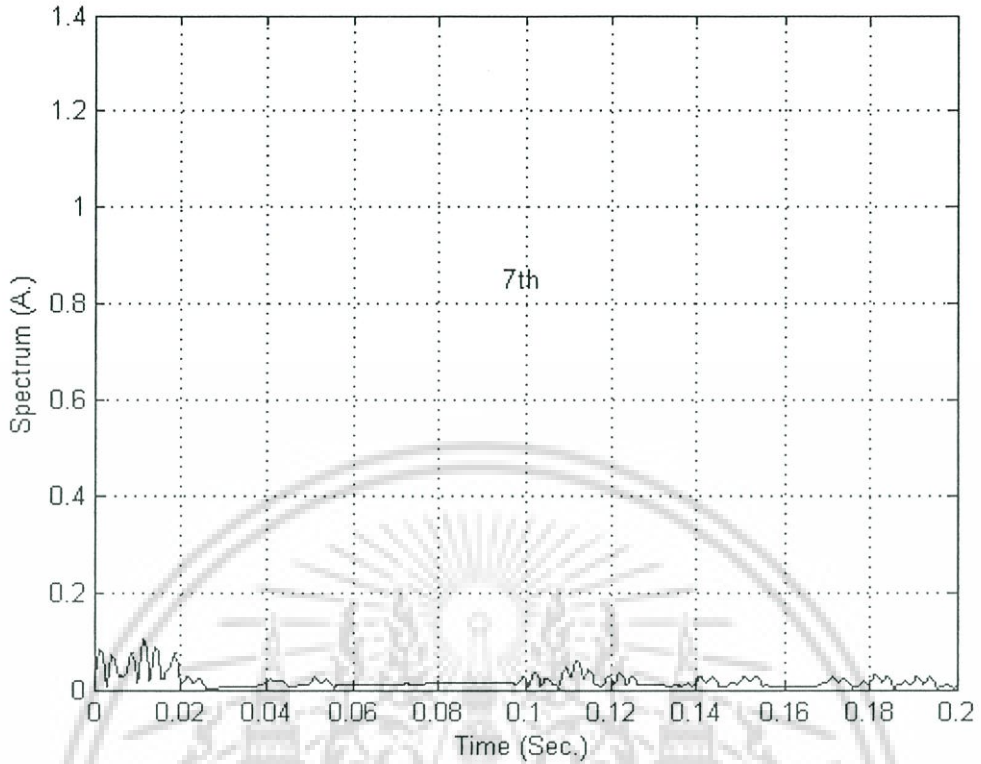


รูปที่ 5.38 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT

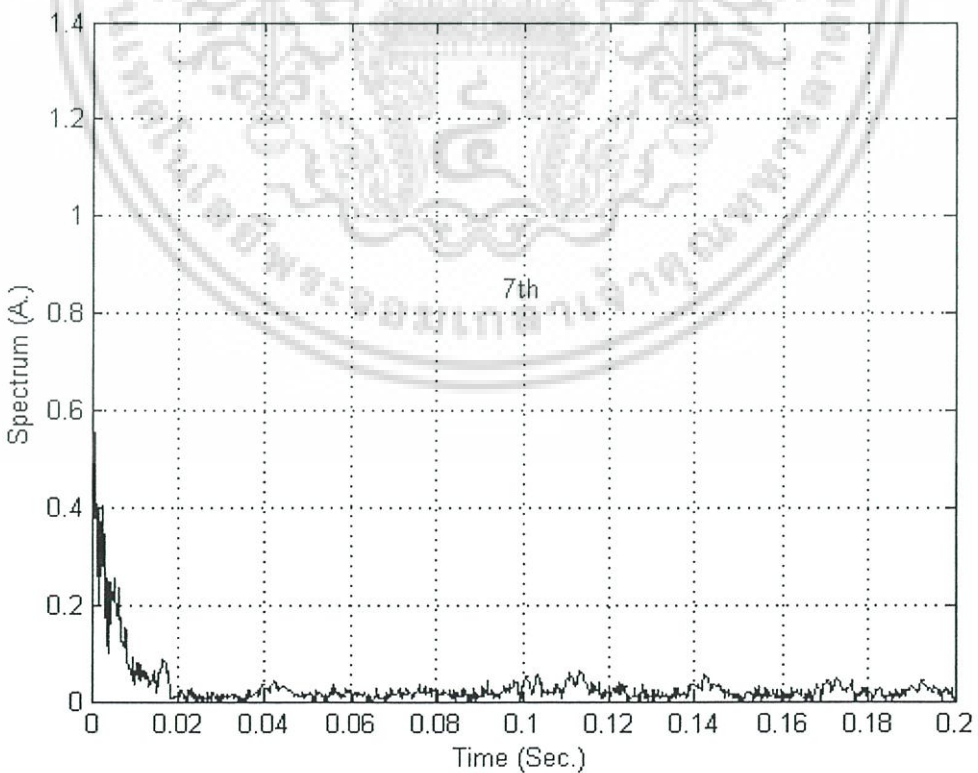


รูปที่ 5.39 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.40 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดย FFT



รูปที่ 5.41 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.33 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

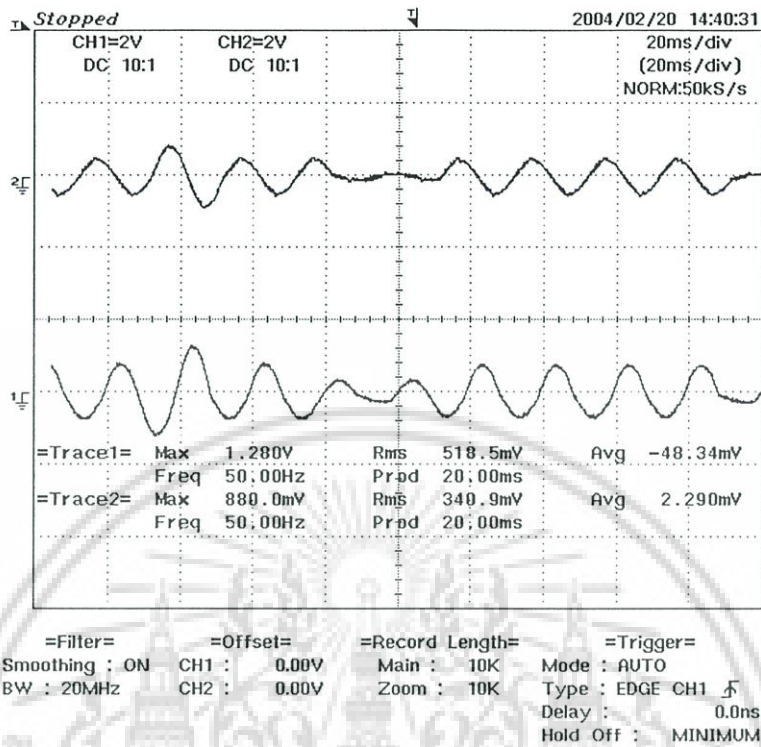
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลที่ทำการตรวจจับได้ตามที่แสดงในรูปที่ 5.32 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.32 ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 5.33 สัญญาณที่ตรวจจับได้ในกรณีนี้จะพบว่าสเป็คตรัมความถี่มูลฐานที่เวลาประมาณ 0.01-0.03 sec. มีค่าคงที่ประมาณ 1.4 A. โดยมีตัวคูณปรับขนาดคือ 50 A. ภายหลังจากเวลา 0.03 sec. สเป็คตรัมมีแนวโน้มลดลงก่อนจะคงที่อีกครั้งที่เวลาประมาณ 0.04 – 0.09 sec. โดยขนาดของสเป็คตรัมมีค่าประมาณ 1 A. ในช่วงเวลาประมาณ 0.09 – 0.11 sec. ขนาดของสเป็คตรัมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นโดยที่ช่วงเวลาประมาณ 0.11 – 0.13 sec. สเป็คตรัมจะมีค่าคงที่ที่ประมาณ 1.95 A. ที่ช่วงเวลาประมาณ 0.13-0.14 sec. ขนาดของสเป็คตรัมมีแนวโน้มลดลงก่อนที่จะเริ่มคงที่อีกครั้งที่เวลา 0.14-0.16 sec. ก่อนที่จะเริ่มปรับตัวลดลงเป็นลำดับตั้งแต่วันที่เวลา 0.16-0.2 sec. เพื่อที่จะตรวจจับสเป็คตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยขนาดของสเป็คตรัมที่ความถี่มูลฐานที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.34 และ 5.35 ตามลำดับ สเป็คตรัมตัวอย่างของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.36 และ 5.37 ตามลำดับ ฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.38 และ 5.39 ตามลำดับ และฮาร์โมนิกส์อันดับ 7 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.40 และ 5.41 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว และการแปลงเวฟเล็ตจะพบว่าที่เวลาประมาณ 0.1-0.12 sec. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ขนาดของสเป็คตรัมของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 1 A. ไปสู่ขนาดประมาณ 1.95 A. เมื่อพิจารณาที่เวลาตัวอย่างที่ 0.12 จะพบว่าขนาดที่แท้จริงของสเป็คตรัมควรจะอยู่ที่ประมาณ 1.95 A. ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์จะพบอยู่ที่ประมาณ 1.7 A. แต่เมื่อใช้เวฟเล็ตมาทำการตรวจจับจะได้ค่าสเป็คตรัมประมาณ 1.9 A. ซึ่งค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของสเป็คตรัมที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าการใช้ฟูเรียร์ในการทำการวิเคราะห์ ซึ่งกว่าที่การแปลงฟูเรียร์จะสามารถพบสเป็คตรัมขนาด 1.95 ได้ก็ต้องใช้เวลาถึงที่เวลาประมาณ 0.13 sec. จึงจะตรวจพบ ในกรณีของฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 โดยเมื่อนำสเป็คตรัมที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีมาทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่าที่เวลาประมาณ 0.1 – 0.12 sec. ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนขนาดของสเป็คตรัม ในช่วงนี้จะปรากฏสเป็คตรัมของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 สเป็คตรัมที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความคล้ายคลึงกันแต่ที่เวลาประมาณ 0.11 – 0.13 sec. ขนาดสเป็คตรัมที่วิเคราะห์ได้โดยการแปลงเวฟเล็ตเริ่มมีขนาดลดลงก่อนเข้าสู่ภาวะคงที่ตามแนวโน้มของสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะที่เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์มาทำการวิเคราะห์จะพบการเพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 ที่เวลา 0.12 sec. ก่อนจะลดลงและไม่พบที่เวลา 0.13 sec. ซึ่งไม่สอดคล้องกับขนาดสัญญาณที่เกิดขึ้น

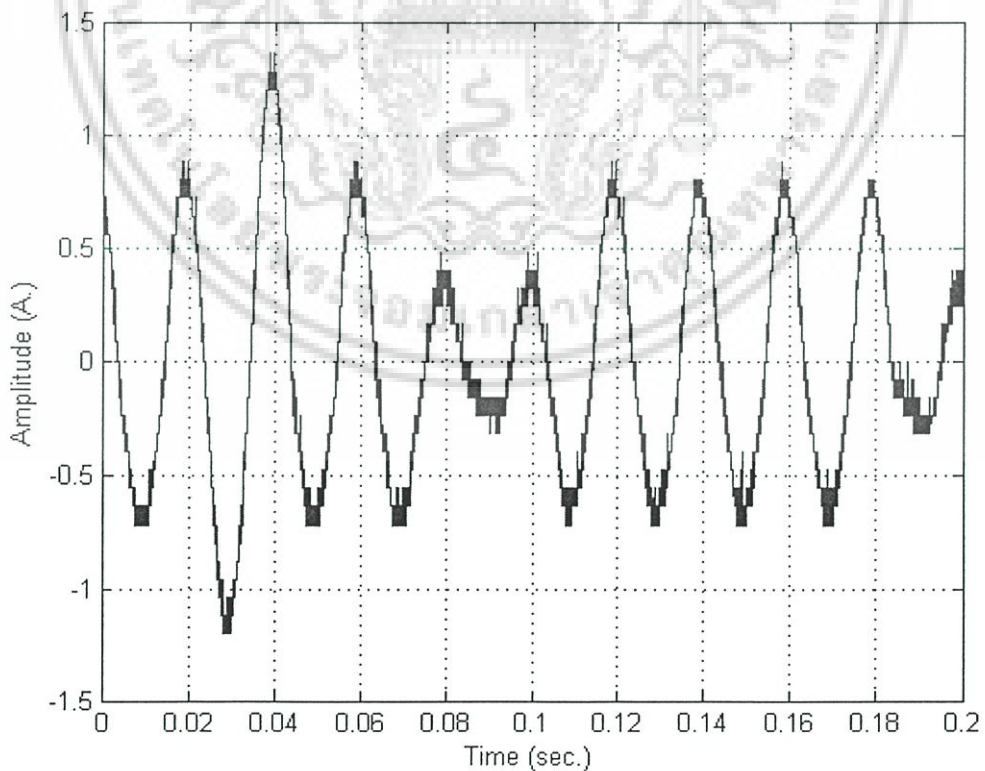
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4.3 กรณีศึกษาที่ 3

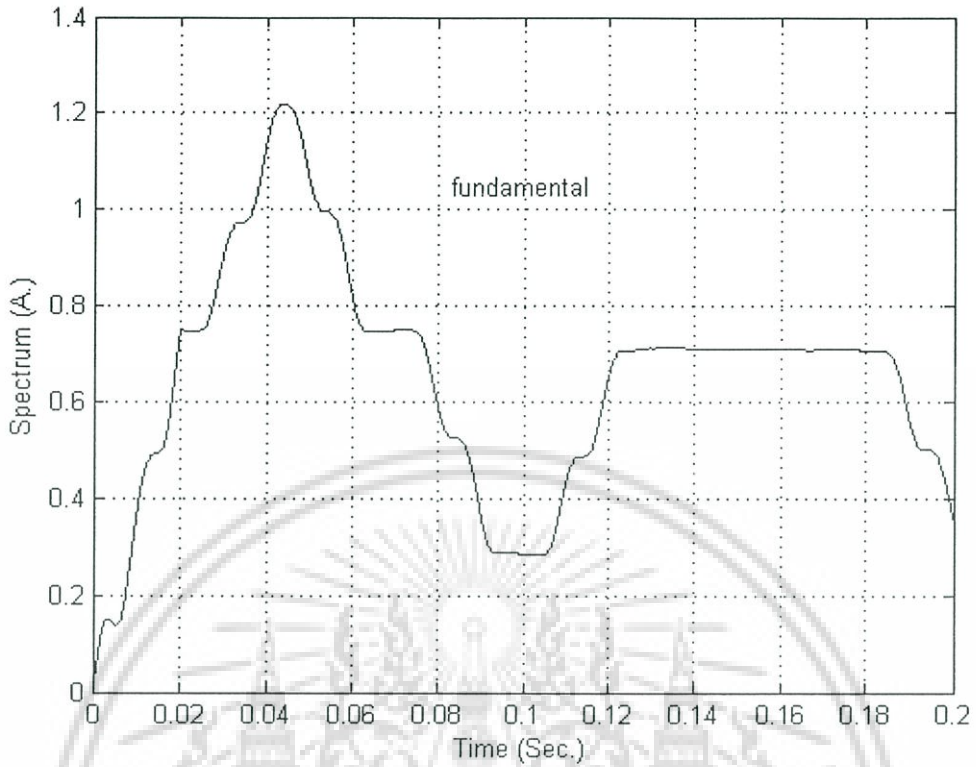


รูปที่ 5.42 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลกรณีศึกษาที่ 3 ที่ทำการตรวจจับได้

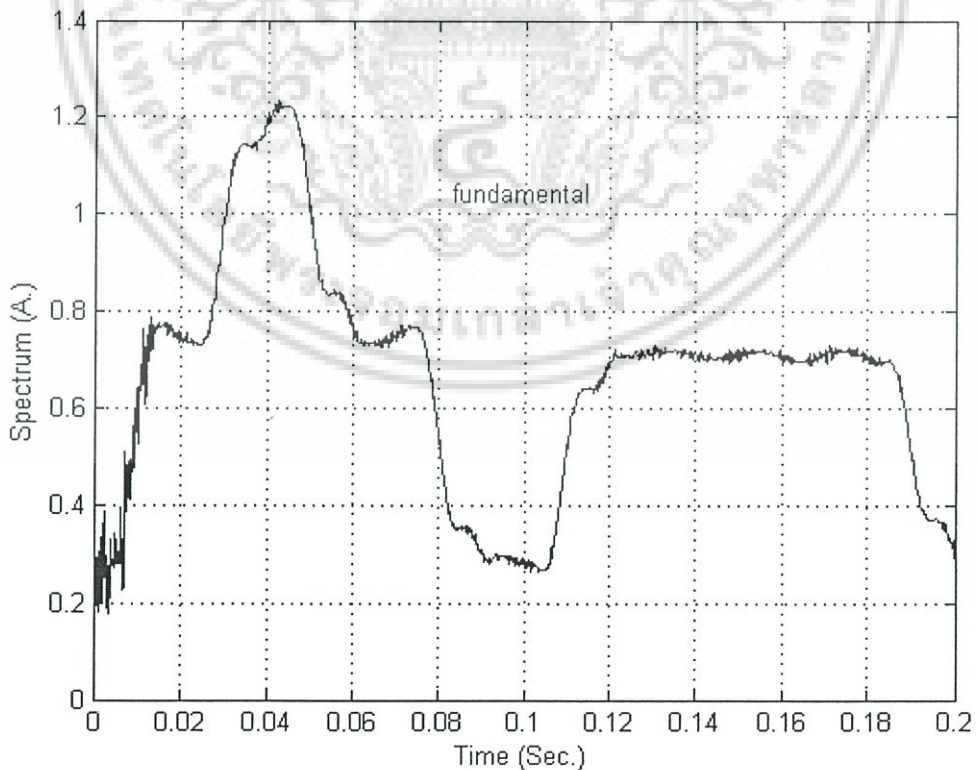


รูปที่ 5.43 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.42 ที่นำมาทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

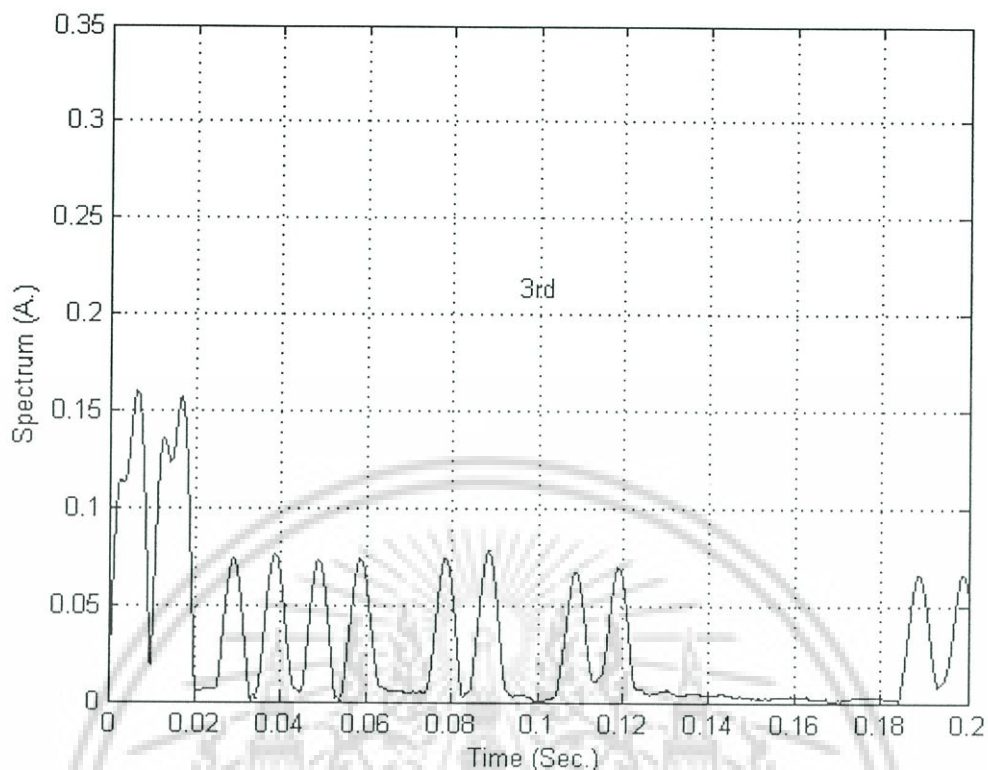


รูปที่ 5.44 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT

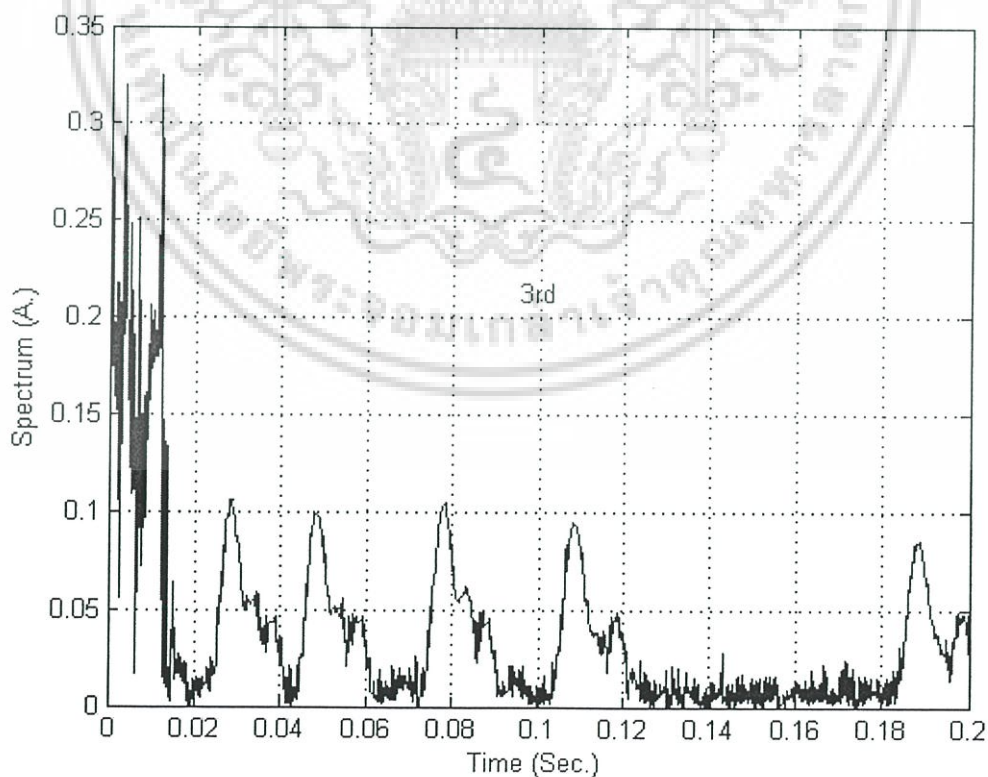


รูปที่ 5.45 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

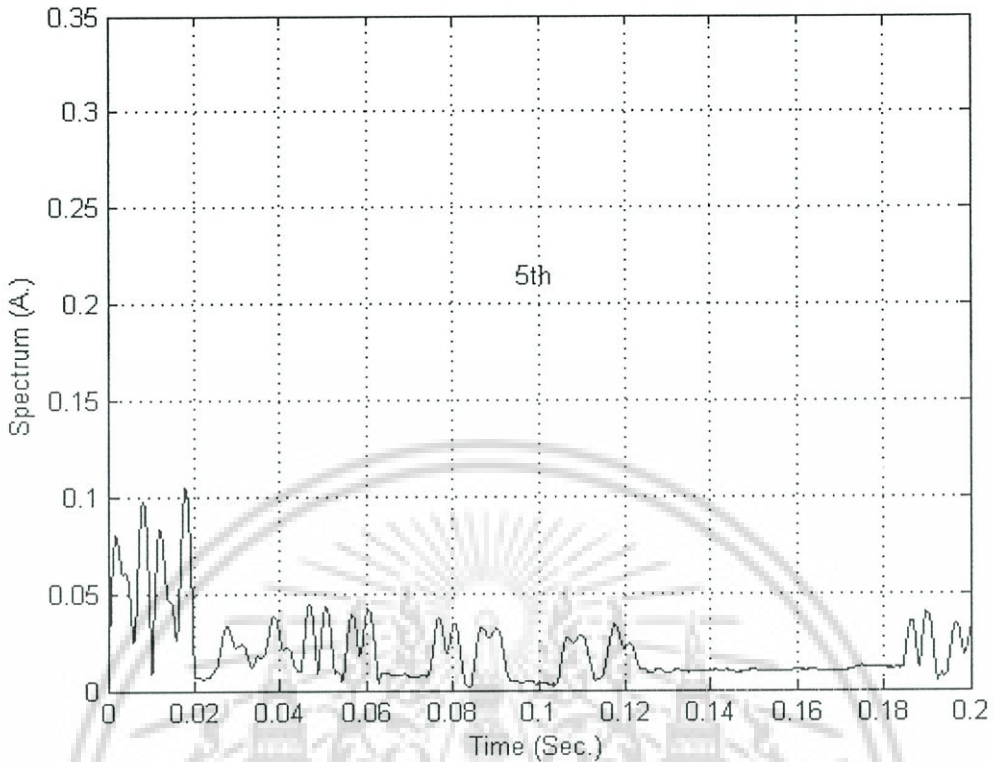


รูปที่ 5.46 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT

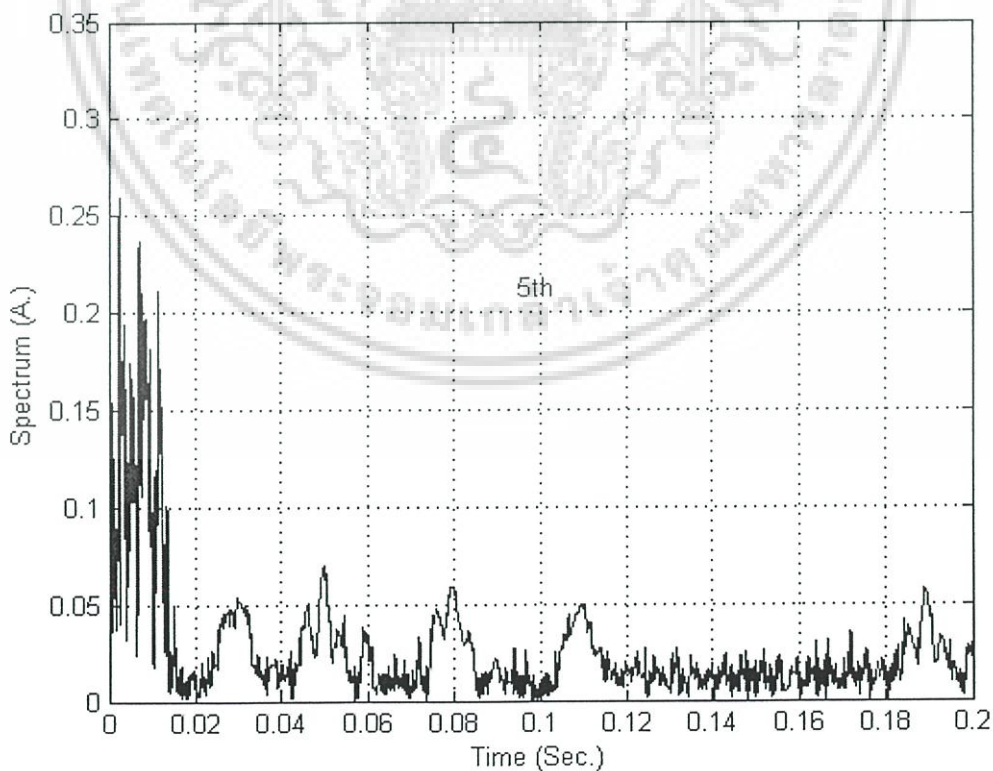


รูปที่ 5.47 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

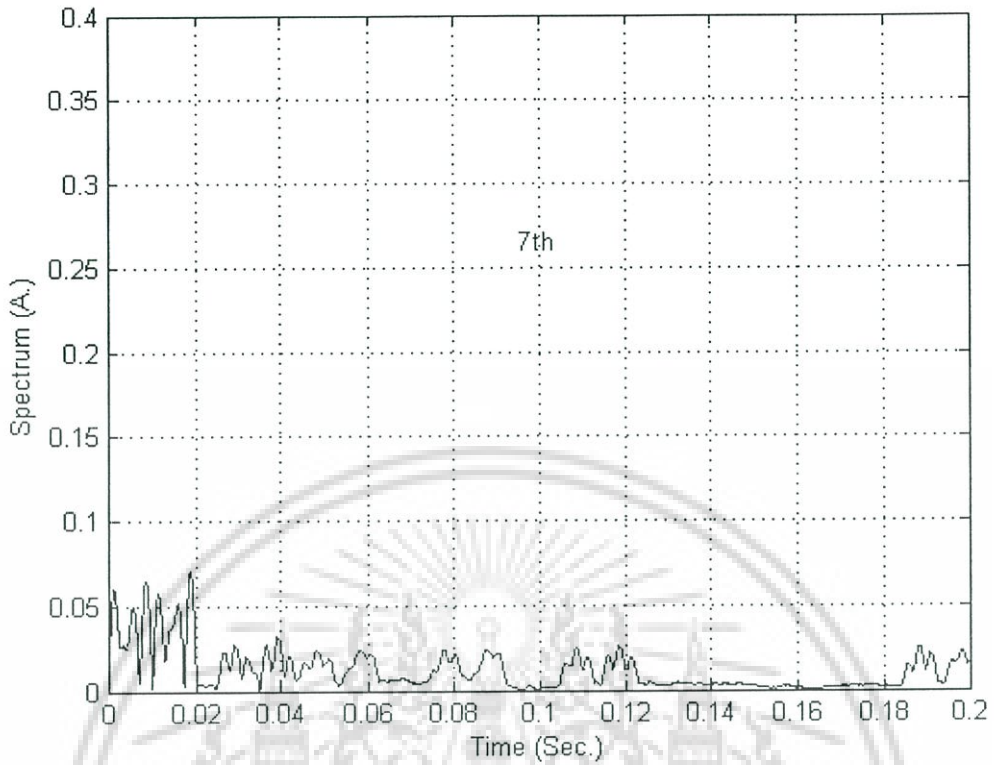


รูปที่ 5.48 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT

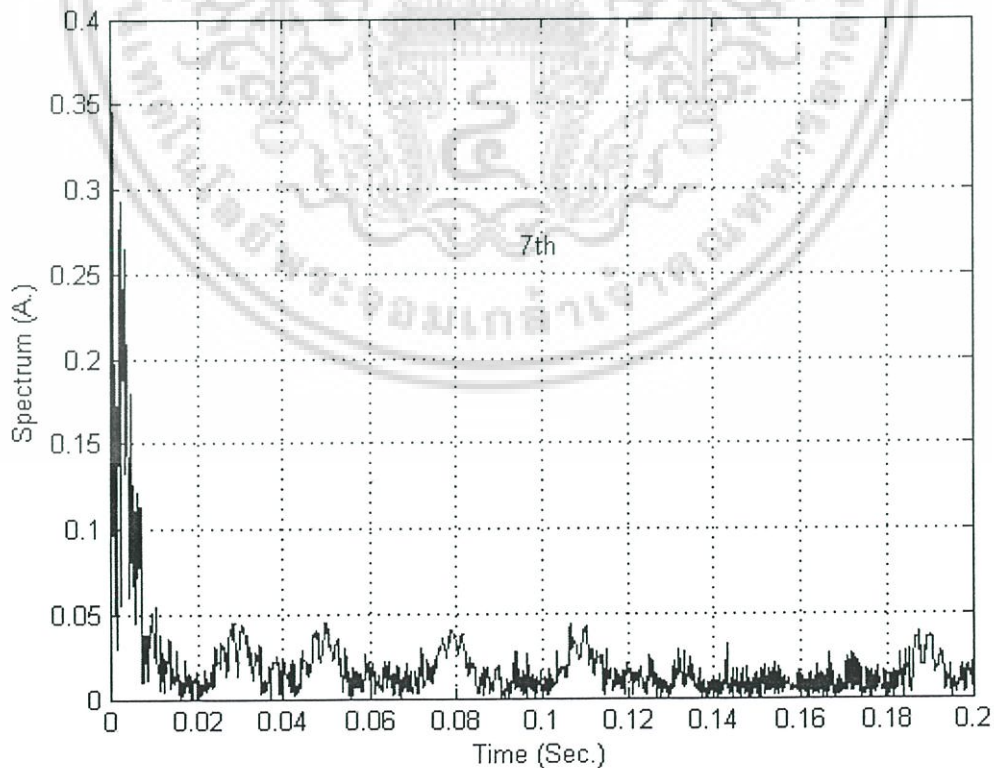


รูปที่ 5.49 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.50 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดย FFT



รูปที่ 5.51 สเปกตรัมฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ของสัญญาณรูปที่ 5.43 ที่ตรวจจับโดยเวฟเลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

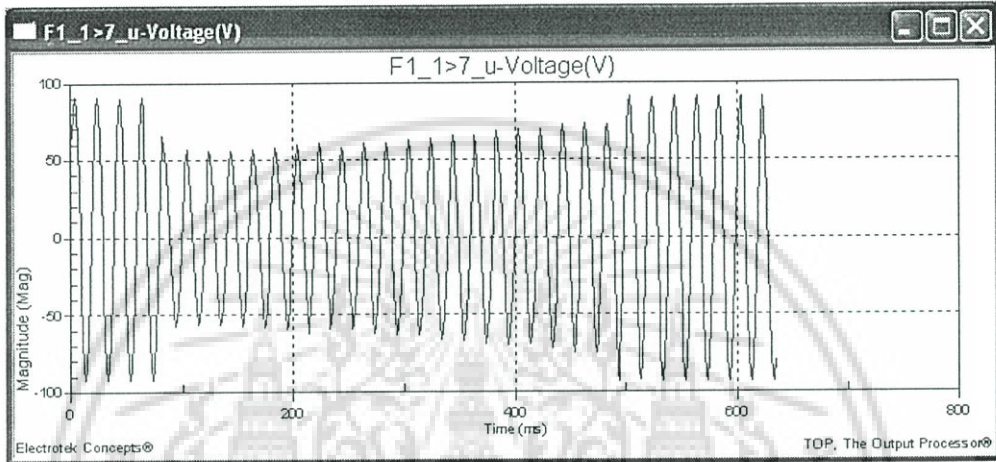
สำหรับกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณกระแสของวงจรอินทิกรัลคอนโทรลที่ทำการตรวจจับได้ตามที่แสดงในรูปที่ 5.42 สัญญาณกระแสของ CH1 จากรูปที่ 5.42 ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 5.43 สัญญาณที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 นี้จะพบว่าในช่วงเวลาที่ขนาดของสเป็คตรัมมีการเปลี่ยนแปลงช่วงแรกอยู่ที่เวลาประมาณ 0.02 – 0.13 sec. โดยเปลี่ยนขนาดจากประมาณ 0.75 A ไปเป็นประมาณ 1.20 A. เมื่อขนาดตัวคูณที่ใช้เท่ากับ 50 A. ขนาดของสเป็คตรัมที่ได้จะเริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงในช่วงเวลา 0.05 – 0.06 sec. ก่อนเข้าสู่ภาวะคงที่ที่ขนาดประมาณ 0.7 A. ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอีกครั้งที่เวลา 0.07 – 0.08 sec. ก่อนจะมีขนาดคงที่ 0.4 A. ในช่วงเวลา 0.1 – 0.11 sec. เป็นช่วงที่สเป็คตรัมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นโดยจะไปคงที่ที่ขนาดประมาณ 0.7 A. จนกระทั่งที่เวลา 0.18 sec. สเป็คตรัมมีแนวโน้มลดลงไปที่ 0.4 A. จนถึงเวลาที่ 0.2 sec. เพื่อที่จะตรวจจับสเป็คตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยขนาดของสเป็คตรัมที่ความถี่มูลฐานที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.44 และ 5.45 ตามลำดับ สเป็คตรัมตัวอย่างของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.46 และ 5.47 ตามลำดับ ฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.48 และ 5.49 ตามลำดับ และฮาร์โมนิกส์อันดับ 7 ที่วิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์รวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.50 และ 5.51 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว และการแปลงเวฟเล็ตจะพบว่าแนวโน้มของสเป็คตรัมโดยทั่วไปมีขนาดคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่เวลาที่ 0.03 sec. จะพบว่าขนาดของสเป็คตรัมที่วิเคราะห์ได้จากกระบวนการแปลงฟูเรียร์มีค่าประมาณ 0.98 A. ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตขนาดของสเป็คตรัมที่วิเคราะห์ได้มีค่าประมาณ 1.15 A. เมื่อขนาดยอดของสัญญาณมาทำการพิจารณาจะพบว่าขนาดที่แท้จริงของสเป็คตรัมควรจะอยู่ที่ประมาณ 1.2 A. จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของสเป็คตรัมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้การวิเคราะห์โดยการแปลงเวฟเล็ตในส่วนของฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ที่ทำการตรวจจับด้วยวิธีการทั้งสอง ในที่นี้ขอยกตัวอย่างกรณีของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 เมื่อนำผลที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าในกรณีของการแปลงฟูเรียร์จะพบกลุ่มของสเป็คตรัมเกิดขึ้น 2 กลุ่มเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ เช่น ที่เวลาประมาณ 0.03-0.04 sec. โดยกลุ่มสเป็คตรัมกลุ่มแรกพิจารณาว่าเป็นผลของการพิศมิตปกติของสัญญาณ ในขณะที่สเป็คตรัมกลุ่มที่ 2 พิจารณาว่าเป็นผลของข้อมูลเก่าที่ถูกนำมาประมวลผลโดยขนาดยอดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเท่ากันและสมมาตรกัน ขณะที่กลุ่มสเป็คตรัมที่วิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตจะพบขนาดยอดสูงสุดตำแหน่งเดียว ก่อนที่ขนาดสเป็คตรัมจะลดลงซึ่งหมายถึงการลดลงของความพิศมิตปกติของสัญญาณที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

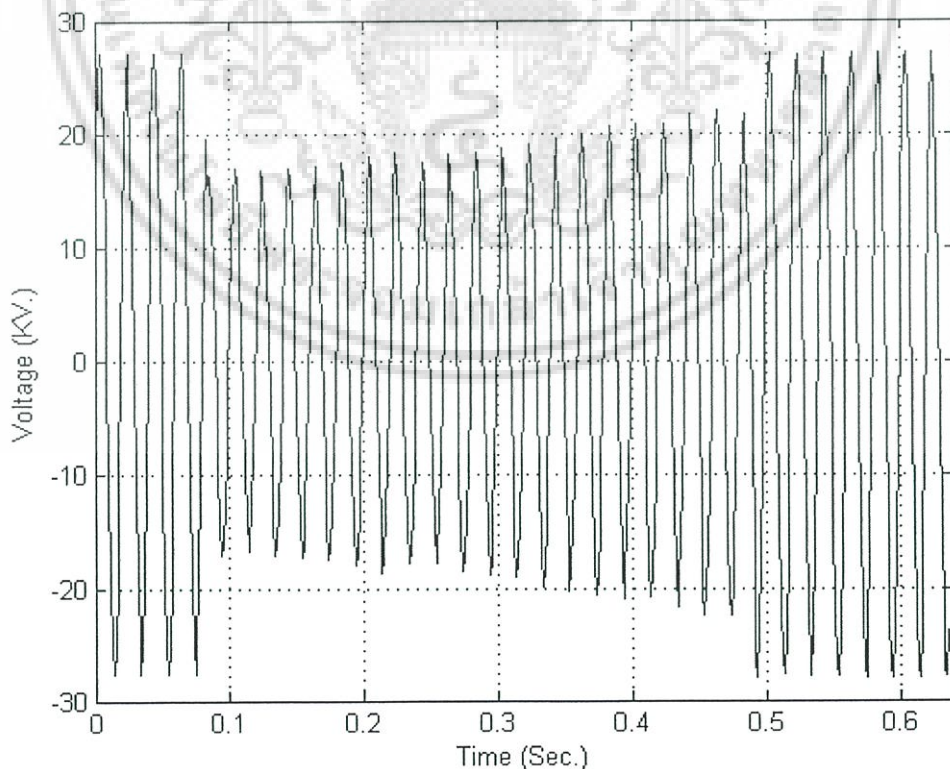
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ

สำหรับการประยุกต์ใช้ในกรณีของแรงดันตกชั่วขณะ วิธีการวิเคราะห์สามารถทำได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยในกรณีของแรงดันตกชั่วขณะจะให้ความสนใจกับขนาดของสเปคตรัมและมุมเฟสที่มีความถี่มูลฐานเป็นสำคัญ โดยในกรณีศึกษานี้ได้ทำการศึกษาการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ตรวจจับได้จาก digital relay ที่เป็นแบบ overcurrent relay ซึ่งมีอัตราการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 16 จุดต่อหนึ่งลูกคลื่น หรือ 800 Hz.

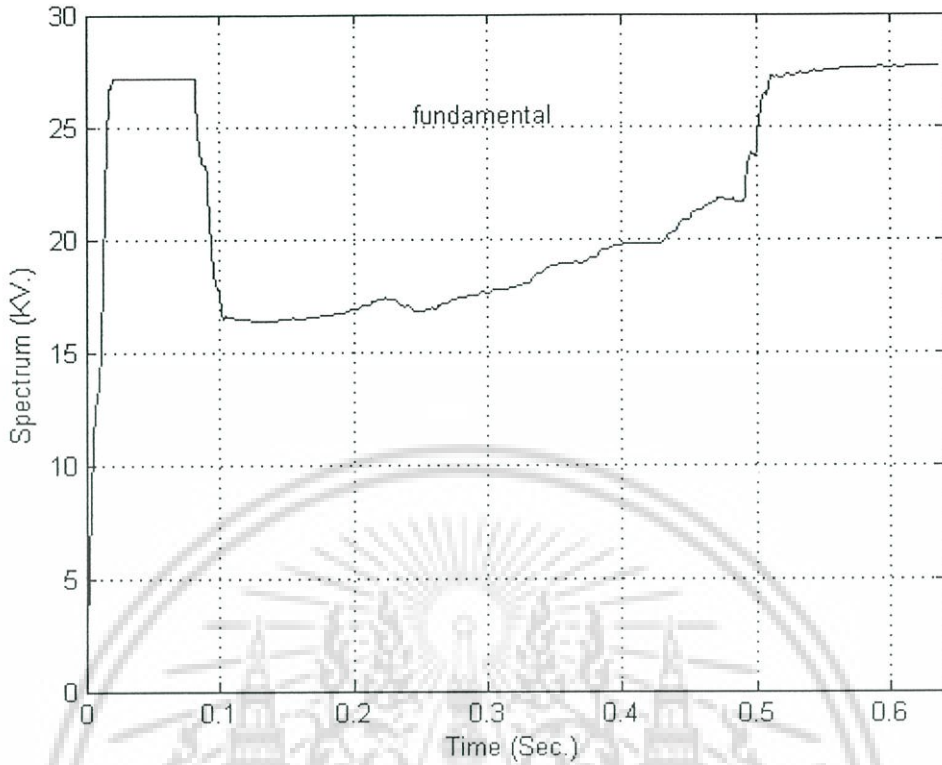


รูปที่ 5.52 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ได้จากดิจิทัลรีเลย์

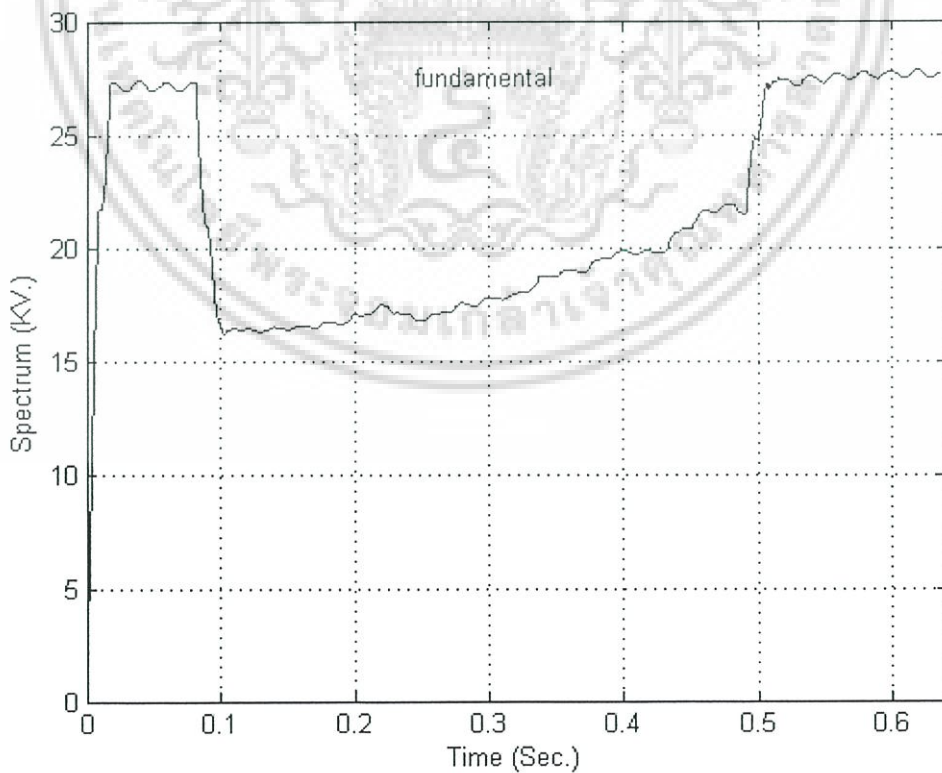


รูปที่ 5.53 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะในรูป 5.52 เมื่อทำการปรับอัตราส่วนตัวคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

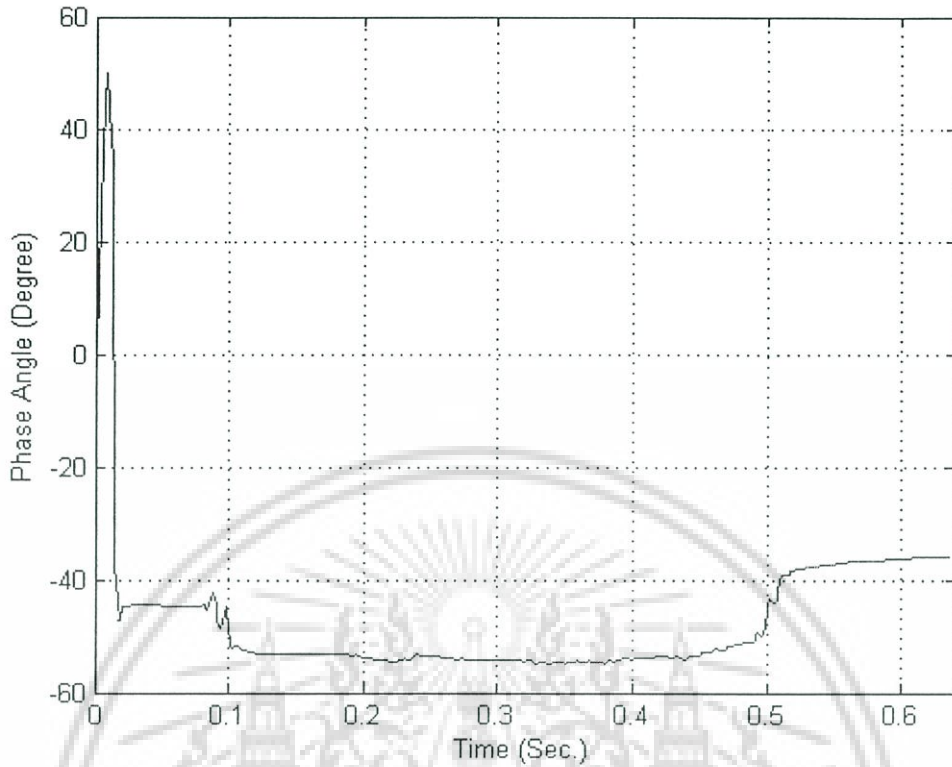


รูปที่ 5.54 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดย FFT

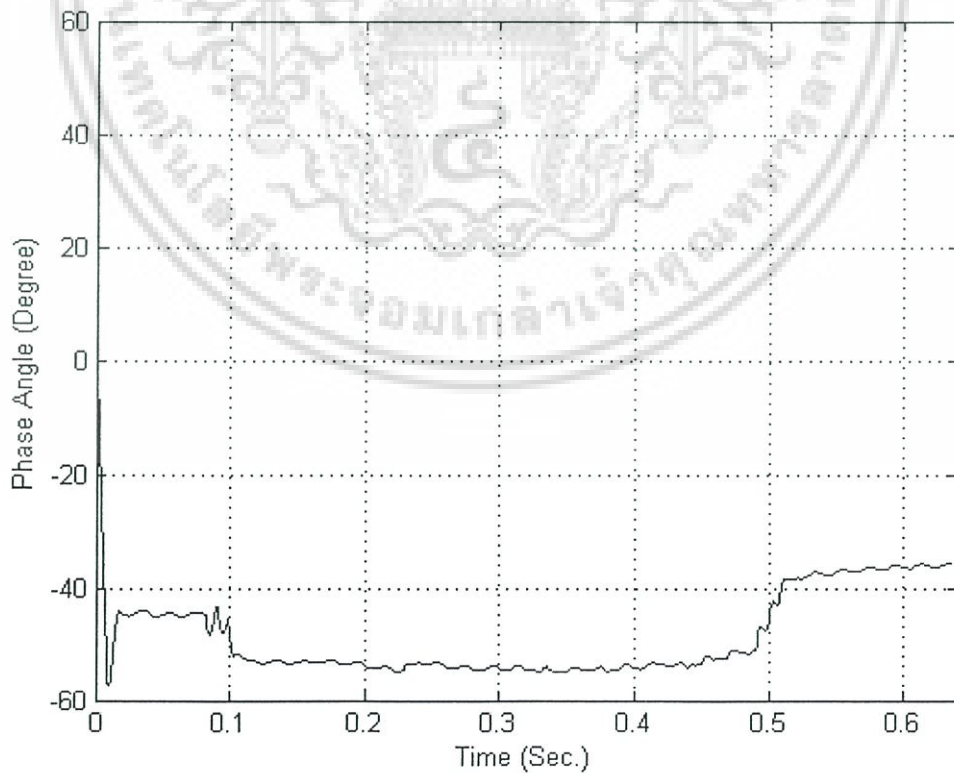


รูปที่ 5.55 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.56 มุมเฟสของฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดย FFT



รูปที่ 5.57 มุมเฟสของฮาร์โมนิกอันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 ที่ตรวจจับโดยเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ตรวจจับได้ถูกนำมาทำการแปลงไฟล์สัญญาณด้วยโปรแกรม TOP จากไฟล์แบบ comtrade ไปเป็นไฟล์แบบข้อความ (Text file) ดังแสดงในรูปที่ 5.52 เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมและมมเฟสที่เกิดขึ้น รูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 5.52 ที่ถูกทำการปรับอัตราส่วนตัวคูณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.53 ผลของการนำสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว และการแปลงเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.54 และ 5.55 ตามลำดับ ในส่วนนี้แสดงการนำไปใช้ในการตรวจสอบช่วงเวลาและความรุนแรงของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบป้องกันได้ สำหรับกรณีของมมเฟสของฮาร์โมนิกส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ 5.53 เมื่อทำการตรวจจับโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว และการแปลงเวฟเล็ตผลที่ได้แสดงถึงช่วงเวลาของการเกิดและสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงของมมเฟสขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งสามารถนำไปใช้ป้องกันผลกระทบที่เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงมมเฟสได้

## 5.6 สรุป

จากผลการศึกษาฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (time-varying amplitude) วิธีการแปลงเวฟเล็ตที่นำมาประยุกต์ใช้ถูกนำไปทำการทดสอบกับสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีลักษณะสัญญาณเป็นแบบ stationary ผลของการวิเคราะห์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วซึ่งจะพบว่าให้ขนาด และมมเฟสของสเปกตรัมมีขนาดเท่ากัน แต่การแปลงเวฟเล็ตใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่สั้นกว่าโดยที่ช่วงเวลาจาก 0.00 – 0.02 sec. ถูกตีความว่าเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยเวฟเล็ตจะใช้เวลาประมาณ 1/2-3/4 ลูกคลื่น วิธีการที่ได้รับการทดสอบแล้วถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณอินทิกรัลคอนโทรลเพื่อทดสอบความสามารถ ในการตรวจจับสเปกตรัมของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดยอดของฮาร์โมนิกส์ซึ่งในกรณีตัวอย่างทั้ง 3 กรณีจะพบว่าขนาดของสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้โดยการแปลงเวฟเล็ตมีขนาดที่สอดคล้องกับตำแหน่งทางเวลาของขนาดยอดของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วจะติดตามขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ช้ากว่าเนื่องจากต้องรอให้สัญญาณครบ 1 คาบของการวิเคราะห์ ในกรณีของฮาร์โมนิกส์ตัวอย่างที่ 3, 5 และ 7 จะพบว่าฮาร์โมนิกส์ที่พบจะพบในช่วงของการเปลี่ยนแปลงขนาดยอดของสัญญาณซึ่งจะพบว่ากลุ่มของฮาร์โมนิกส์ที่พบ โดยการแปลงเวฟเล็ตจะน้อยกว่าการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว เนื่องจากการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วต้องนำข้อมูลเก่ามาทำการคำนวณด้วย ทำให้แม้ช่วงที่ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นได้หมดไปแล้ว ผลของการวิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์ก็ยังคงพบฮาร์โมนิกส์นั้นปรากฏอยู่ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยืนยันถึงความสามารถในการติดตามฮาร์โมนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตเป็นวิธีการที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือสัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ หรืออาจกล่าวได้ว่าช่วยให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ non-stationary ได้ แทนการใช้การแปลงฟูเรียร์ซึ่งให้ความสำคัญเฉพาะแกนความถี่เท่านั้น ทำให้การวิเคราะห์สัญญาณสามารถกระทำได้ไม่เฉพาะสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ stationary เท่านั้น การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้แทนการแปลงฟูเรียร์ โดยในการทำการวิเคราะห์ที่ได้ให้ความสนใจทั้งทางด้านความถี่ของสัญญาณที่เกิด และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางด้านเวลา โดยในการทำการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อหาขนาดยอด, มุมเฟส และความถี่โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้นสามารถนำมาใช้แทนการแปลงฟูเรียร์ได้ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมีคุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณได้ในทิศทางเดียวกับการแปลงฟูเรียร์สำหรับการให้ความสำคัญเฉพาะแกนความถี่ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าดีกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์อีกด้วย การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการวิเคราะห์สัญญาณที่ค่อนข้างนาน แต่เนื่องจากการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีนี้กระทำโดยการเลือกส่วนของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้มีข้อดีตรงนี้สัญญาณที่นำมาทำการวิเคราะห์ ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเป็นคาบก็สามารถนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ได้จึงเหมาะกับการวิเคราะห์ส่วนของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ non-stationary โดยการให้ความสำคัญทางด้านเวลาของการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยนั้น ได้มีการนำชุดตัวกรองเวฟเล็ตที่เกิดขึ้นที่ได้รับการแก้ไขมาทำการประยุกต์ใช้ ชุดตัวกรองนี้เมื่อนำสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ stationary ซึ่งทราบขนาดยอด, มุมเฟส และความถี่มาทำการป้อนผ่านชุดตัวกรอง สัญญาณขาออกที่ได้จากชุดตัวกรองในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดยอด, มุมเฟส และความถี่ ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องหรือการแปลงฟูเรียร์ผลที่ได้จะมีค่าตรงตามค่าของสัญญาณที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้น เมื่อนำสัญญาณที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือ non-stationary signal มาทำการป้อนผ่านชุดตัวกรองในที่นี้ใช้สัญญาณการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ สัญญาณแรงดันเกินชั่วขณะ และสัญญาณทรานเซียนต์เป็นต้นมาทดสอบป้อนผ่านชุดตัวกรอง องค์ประกอบของสัญญาณที่ได้ในแต่ละชั้นแบนด์ย่อยจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างชัดเจนซึ่งในส่วนี้แสดงถึงความสามารถในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ non-stationary ได้ ชุดตัวกรองที่ได้รับการแก้ไขนี้ถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลา (time-varying amplitude) โดยได้ทำการทดสอบกับกรณีของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ stationary signal ผลลัพธ์ที่ได้ในส่วนของสภาวะคงตัวมีค่าเท่ากับที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะคงตัวผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการดังกล่าวมีความถูกต้องไม่แตกต่างจากการใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว วิธีการที่ได้ทำการทดสอบได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณอิทธิกรัลคอนโทรลที่ทำการตรวจจับได้จริงจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นในความเป็นจริง ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างที่ได้จากการใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วในการศึกษาได้ทำการกำหนดกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีเพื่อให้ครอบคลุมกระบวนการทำงานทั้งหมด ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความสามารถ ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดสเปกตรัมของสัญญาณตามเวลาที่ผ่านไป ในขณะที่การวิเคราะห์ที่ใช้การแปลงฟูเรียร์นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงตามสเปกตรัมของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาได้ช้ากว่าอย่างชัดเจน ซึ่งในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงในกรณีที่เมื่อสัญญาณมีลักษณะไม่เป็นแบบ stationary ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าที่ดีกว่าการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์

## 6.2 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงถึงการนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง และเวฟเล็ตแพ็คเก็ตมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลของคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในระบบกำลังไฟฟ้า และโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้แสดงถึงคุณสมบัติของการนำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้ตรวจจับหาตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติของสัญญาณ การนำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องมาทำการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์แทนการแปลงฟูเรียร์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถช่วยลดผลความผิดพลาดเนื่องจากสเปกตรัมรั่วไหลได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะไม่เป็นคาบ เพื่อใช้ตรวจสอบหาความถี่ของสัญญาณที่เกิดซึ่งไม่สามารถทำได้โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ วิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณของการเกิดทรานเซียนต์ และสัญญาณกระแสของเตาเหนี่ยวนำเพื่อหาขนาดยอด, ความถี่ และมุมเฟสของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น โดยในการวิเคราะห์สัญญาณจำเป็นต้องมีการตรวจสอบลักษณะของการเกิดสัญญาณ โดยใช้ชุดตัวกรองเวฟเล็ตแพ็คเก็ตที่ได้รับการแก้ไขมาทำการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ตำแหน่งของการเกิด และสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์จะสามารถสังเกตเห็นได้จากสัญญาณขาออกในแต่ละแถบความถี่ย่อย ผลของการวิเคราะห์โดยชุดตัวกรองที่ได้นำไปสู่ การนำชุดตัวกรองไปใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบ time-varying ซึ่งวิธีการนี้แสดงให้เห็นการตรวจจับฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้ดีกว่าการใช้การแปลงฟูเรียร์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นทนายการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

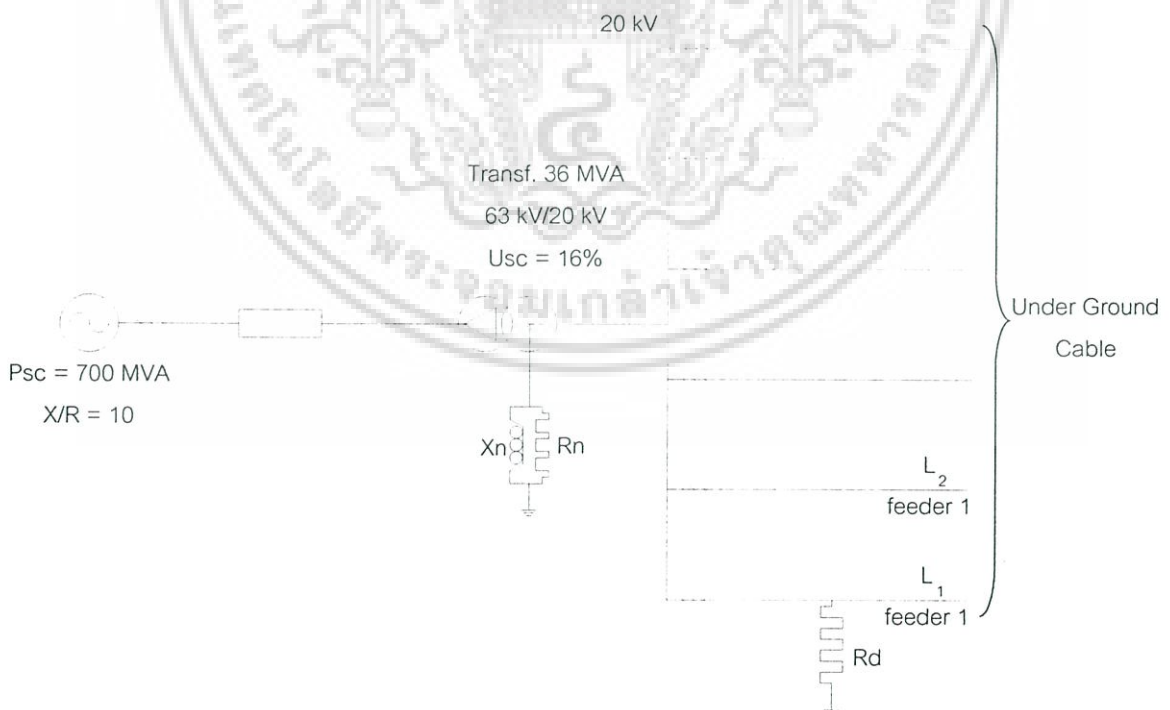
รวดเร็ว วิธีการดังกล่าวจะลดขนาดของความผิดพลาดที่เกิดจากการรั่วไหลของสเป็คตรัมช่วยให้ผลของการวิเคราะห์ที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถสังเกตเห็นเหตุการณ์ของการเกิดสเป็คตรัมตามช่วงเวลาที่ผ่านมา ช่วยให้เข้าใจกระบวนการเกิดและสิ้นสุดของฮาร์โมนิกส์ได้เป็นอย่างดี ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้าให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

### 6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

วิธีการนำการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง และเวฟเล็ดแพ็คเก็ตที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปทำการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในระบบกำลังไฟฟ้าได้ โดยการนำไปประยุกต์ใช้ในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อดังต่อไปนี้

#### 6.3.1 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการนำการแปลงเวฟเล็ดไปประยุกต์ใช้ในการหาขนาดของสเป็คตรัม และความถี่ของสัญญาณเพื่อแก้ปัญหาผลกระทบเนื่องจากสัญญาณทรานเซียนต์ได้ [38] ตัวอย่างเช่น ถ้ามีระบบจ่ายไฟดังแสดงในรูปที่ 1



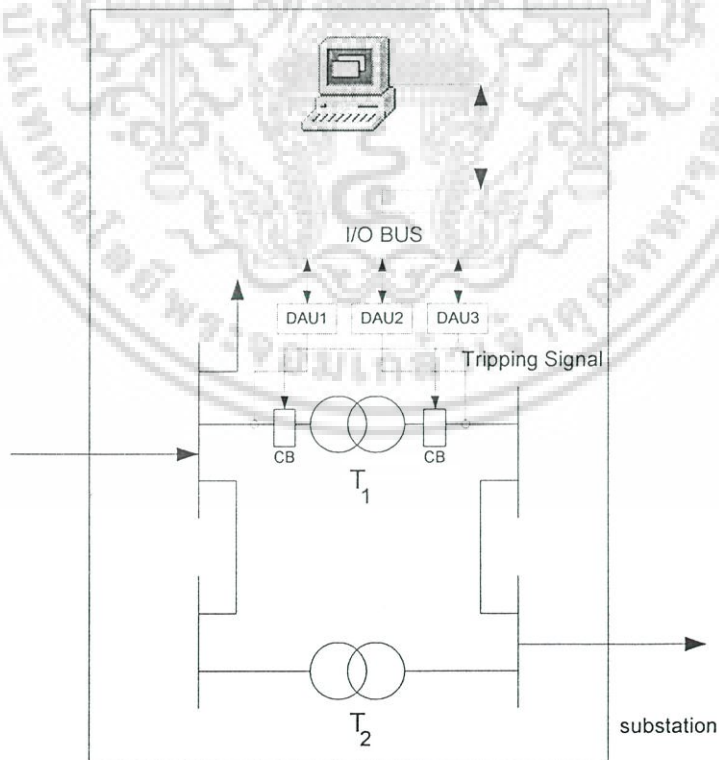
รูปที่ 6.1 การนำการแปลงเวฟเล็ดไปประยุกต์ใช้กับระบบกราวด์ที่ใช้หลักการของเรโซแนนซ์ของระบบจ่ายไฟ [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากกำหนดให้มีการเกิด single phase fault ในส่วนของ  $L_1$  ผลกระทบที่เกิดจาก earth faults ขึ้นอยู่กับวิธีการ neutral grounding ซึ่งมีอยู่หลายวิธีในการต่อจุดสตาร์ทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่จ่ายแรงดันขนาด 20 kV ให้กับเน็ตเวิร์ก เมื่อใช้คาร์แอกซ์แทนขั้วระหว่างจุดสตาร์และกราวด์ที่เหมาะสม กระแสขณะเกิด earth fault จะมีขนาดไม่สูงมากพอที่จะก่อให้เกิดกระแสอาร์ค คาร์แอกซ์แทนซ์ที่กำหนดจะต้องกำหนดให้สอดคล้องกับความถี่มูลฐานของระบบ ชนิดของการต่อกราวด์ในที่นี้จะใช้แบบที่เรียกว่า resonant หรือ Petersen coil grounding ค่าความถี่ของสัญญาณที่หาได้จากวิธีการการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องจะนำมาตั้งค่าการเกิดเรโซแนนซ์

### 6.3.2 การพัฒนาส่วนของโปรแกรมเพื่อใช้ตรวจจับฮาร์โมนิกส์

การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งได้ทำการนำการแปลงเวฟเล็ดแพ็คเก็ตไปประยุกต์ใช้ในการหาขนาดของสเปกตรัมของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแบบ time-varying ในส่วนของโปรแกรมประยุกต์ ที่ได้รับการพัฒนายังสามารถทำการพัฒนาส่วนของการอินเตอร์เฟสกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อนำค่าแรงดัน (หรือกระแส) มาทำการประมวลผลเพื่อใช้วัดปริมาณของฮาร์โมนิกส์ไม่ให้มีปริมาณหาฮาร์โมนิกส์ที่เข้าสู่ระบบมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงได้ ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ลักษณะของการพัฒนาโปรแกรมในขนาดในส่วนของการป้องกันผลของฮาร์โมนิกส์ที่จะเข้าสู่หม้อแปลงที่สถานีจ่ายไฟย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งภายในรูปได้แสดงถึงส่วนของการพัฒนาโปรแกรมในอนาคต ในการนำโปรแกรมที่ได้มาใช้ป้องกัน หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่ได้ถ้ามีปริมาณของฮาร์โมนิกส์สูงเกินกว่ากำหนดโปรแกรม จะทำการส่งสัญญาณไปที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อทำการตัดวงจร หรือในกรณีที่ต้องการให้เครื่องมือที่ใช้ ป้องกันมีลักษณะของการทำงานโดยไม่ต้องพึ่งพาคอมพิวเตอร์ก็สามารถนำซอร์สโค้ดที่พัฒนาขึ้นไป ประยุกต์ใช้กับดิจิทัลรีเลย์เพื่อป้องกันระบบได้เช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Geun-Joon Lee, Mihaela M. Albu and Gerald Thomas Heydt, "A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost, and Network Vulnerability", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, July 2004, pp. 1504 – 1510.
- [2] "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality" IEEE Std 1159-1995 , 2 Nov. 1995
- [3] Christopher J. Melhorn, Timothy D. Davis and George E. Beam, "Voltage Sags: Their Impact on the Utility and Industrial Customers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 3, May/June 1998, pp.549-558.
- [4] R. Yacamini, "Power System Harmonics IV. Interharmonics", Power Engineering Journal, August 1996.
- [5] Arun Arora, Kevin Chan, Thomas Jauch, Alexander Kara and Ernst Wirth, "Innovative System Solutions for Power Quality Enhancement", ABB High Voltage Technologies Ltd., ABB Review 3/1998.
- [6] PRC-PQG-01-1998 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจ และอุตสาหกรรม " คณะทำงานศึกษา และกำหนดค่าที่เหมาะสมของ Power Quality "
- [7] James C. Anderson, "A Wavelet Magnitude Analysis Theorem", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 12, December, 1993, pp. 3541-3543.
- [8] Don Morgan, "Practical DSP Modeling, Techniques, and Programming in C", John Wiley & Sons, Inc., first edition, 1994.
- [9] Jaideva C. Goswami and Andrew K. Chan, " Fundamental of Wavelets: Theory, Algorithms, and Application", John Wiley and sons, Inc., first edition, 1999
- [10] Stephane Mallat, "Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press., second edition, 1999.
- [11] T.K. Sarkar, C. Su, R. Adve, M. Salazar-Palma, L. Garcia – Castillo and Rafael R. Boix, "A Tutorial on Wavelets from an Electrical Engineering Perspective, Part 1: Discrete Wavelet Techniques", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 40, No. 5, October 1998,pp. 49-70.
- [12] T.K. Sarkar, C. Su, R. Adve, M. Salazar-Palma, L. Garcia – Castillo and Rafael R. Boix, เอกสารนี้เป็นเอกสาร "A Tutorial on Wavelets from an Electrical Engineering Perspective, Part 2: ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Discrete Wavelet Techniques”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 40, No. 5, October 1998,pp. 36-49.
- [13] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi, “Wavelet Toolbox for Use with Matlab: User’s Guide Version 1”, [Online]. Available : <http://www.mathworks.com>
- [14] Surya Santoso, Edward J. Powers, W. Mack Grady and Peter Hofmann, “Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 924-930.
- [15] Stephane G. Mallal, “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, July 1989, pp. 674-693.
- [16] Olivier Rioul, “A Discrete-Time Multiresolution Theory”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 8, August 1993, pp. 2591-2606.
- [17] Levent Eren and Michael J. Devaney, “Calculation of Power System Harmonics via Wavelet Packet Decomposition in Real Time Metering”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Anchorage, AK, USA, 21-23 May 2002, pp. 1643-1647
- [18] V.L. Pham and K.P. Wong, “Antidistortion method for wavelet transform Filter Bank and Nonstationary Power System Waveform Harmonic Analysis,” IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 2 March 2001.
- [19] T. Lobos, Z. Leonowicz, J. Rezmer and H-J Koglin, “Advanced Signal Processing Methods of Harmonics and Interharmonics Estimation”, IEE Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, 2001,pp. 315-318.
- [20] Oinis Chaari and Francoise, “Wavelets: A New Tool for The Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [21] V.L. Pham and K.P. Wong, “Wavelet-transform-based algorithm for harmonic Analysis of Power System Waveforms,” IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [22] Wang Jianze, Ji Yanchao, Wang Fei and Ran Qiwen, " New Method for Transient Harmonics Measurement Based on Wavelet Transform", IEEE Transaction, 1998.
- [23] ทิวา แก้วจันทรานนท์ และจรงค์ บัญเส็ง, "การประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องและเวฟเล็ตฟิวเตอร์เบงก์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณทรานเซียนซ์ที่เกิดจากคาปาซิเตอร์สวิตชิง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พฤศจิกายน 2546
- [24] ทิวา แก้วจันทรานนท์ และจรงค์ บัญเส็ง, "การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของเตาหลอมเหนียวนำ 3 เฟสในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พฤศจิกายน 2546
- [25] S. R. Mendis and D. A. Gonzalez, "Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems," IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 28, No. 2, March/April 1992.
- [26] D. Andrews, T. Bishop and J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility", IEEE Transaction on Industry, Vol. 32, No. 3, May/July 1996.
- [27] A. A. Girgis, M. C. Clapp, E. B. Makram, J. Qiu, J.G. Dalton, and R. C. Catoe, Jr., "Measurement and Characterization of Harmonic and High Frequency Distortion for a Large Industrial Load", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-5, No. 1, January 1990, pp. 427-434.
- [28] A. A. Girgis and J. Qiu, "Measurement of the Parameters of a Slowly Time-Varying High-Frequency Transient", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Vol. IM-38, No. 6, December 1989, pp. 1057-1063.
- [29] J.S. Thorp, A. G. Phadke, and K. J. Karimi, "Real-Time Voltage Phasor Measurements for Static-State Estimate", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, November 1985, pp. 3099-3106.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [30] G. T. Heydt, "A New Method for the Calculation of Subtransmission and Distribution System Transients Based on the FFT", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1869-1875.
- [31] A. A. Girgis and F. Ham, "A Qualitative Study of Pitfalls in FFT", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES 16, No. 4 pp. 434-439, July 1980.
- [32] F.M. Ham and A. A. Girgis, "Measurement of Power Frequency Fluctuations Using FFT", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-32, No. 8, August 1985, pp. 199-204.
- [33] Fuller, J.F., Fuchs, E.F. and Roesler, D.J., "Influence of Harmonics on Power Distribution System Protection", Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol. 3 , Issue: 2 , April 1988, pp.549 - 557
- [34] D. E. Newland , "An introduction to Random vibrations, spectral and wavelet analysis", Longman Singapore Publishers Pte Ltd., third edition, 1993
- [35] Attallah, S. and Najim, M. "A Fast Wavelet Transform-Domain LMS Algorithm" Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on , Vol. 3 , 7-10 May 1996, pp. 1343 – 1346.
- [36] Konezny, M.D. and Rao, S.S., "Improving the DWT-LMS algorithm: boundary filter DWT matrix construction", Signals, Systems and Computers, 1995. 1995 Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference on , Vol. 1 , 30 Oct.-2 Nov. 1995, pp. 75 – 81.
- [37] Doroslovacki, M.I. and Fan, H., "Wavelet-based Linear System Modeling and Adaptive Filtering", Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on] , Vol. 44 , Issue: 5 , May 1996, pp.1156 – 1167
- [38] O. Chaari, and P. Bastard, and M. Meunier, "Prony's method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks," IEEE PES Winter Meeting, New York, Jan/Feb, 1995, paper no. 95WM031-5PWRD.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

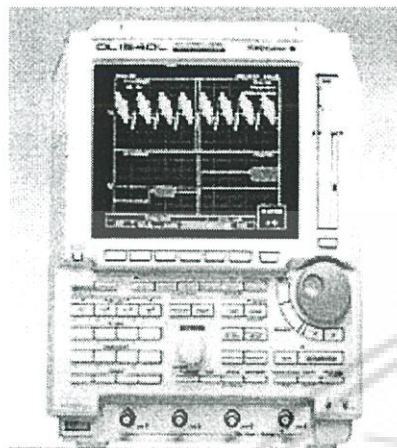
- [39] O. Chaari, and M. Meunier, "A Recursive Wavelet Transform Analysis of Earth Fault Currents in Petersen-coil-protected Power Distribution Networks," Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 25-28, 1994, pp. 162-165.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



ผลิตภัณฑ์	Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)
รุ่น	DL1520/L (4 Channel)
รายละเอียด	150 MHz bandwidth 200 MS/s sampling rate on one channel or 100 MS/s on two channels (DL1520/L) 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850 V (DC + AC peak) 2% DC accuracy, Internal low pass filter

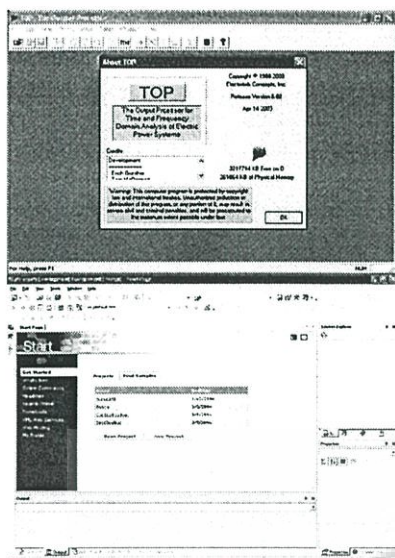


ผลิตภัณฑ์	Current Probe (CHAUVIN ARNOUX)
รุ่น	E3N
รายละเอียด	Current Probe 10–100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz. (@ 3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III



ผลิตภัณฑ์	Unbalance Protection Current Relay
รุ่น	NUR-36
รายละเอียด	over-current relay type, Input Current: -Rated current $I_N$ 5A and 1A 50/60Hz. Output Contact Ratings: DC breaking capacity when the trip circuit constant $L/R \leq 40$ ms. - at 220 $V_{dc}$ 1A - at 110 $V_{dc}$ 3A - at 48 $V_{dc}$ 5A

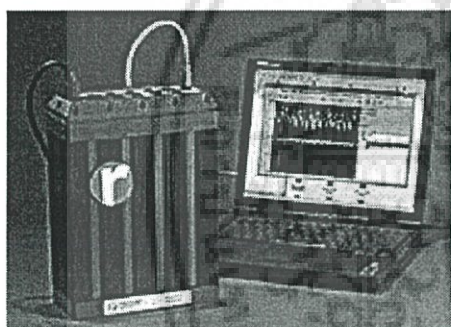
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลิตภัณฑ์ TOP Program  
 รุ่น Release version 6.02  
 รายละเอียด Electrotek Concepts, Inc. Copyright ©  
 1988 – 2000



ผลิตภัณฑ์ Microsoft Visual Studio  
 รุ่น Professional Edition 6.0  
 รายละเอียด Window 98 or higher



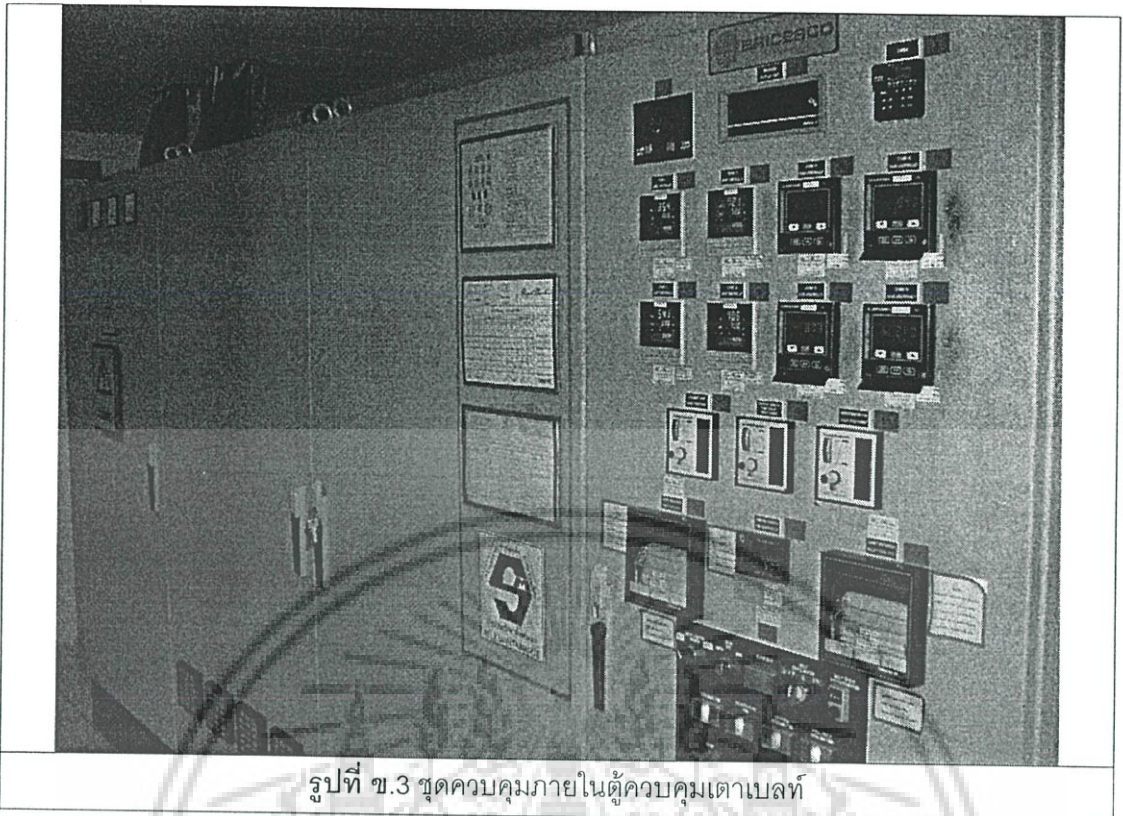
ผลิตภัณฑ์ Reliable Power Meter (RPM)  
 รุ่น Release version 1.0  
 รายละเอียด - 4 voltage channels – three phases  
 plus neutral-to-ground. Measure up to  
 600 Vrms, 1000 Vpeak  
 - 5 current channels allow you to  
 monitor neutral and ground current in  
 addition to phases.  
 -128 samples per cycle-on every cycle.  
 -Optional 2 MS/s sampling system for  
 capturing and viewing high-speed  
 transients.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

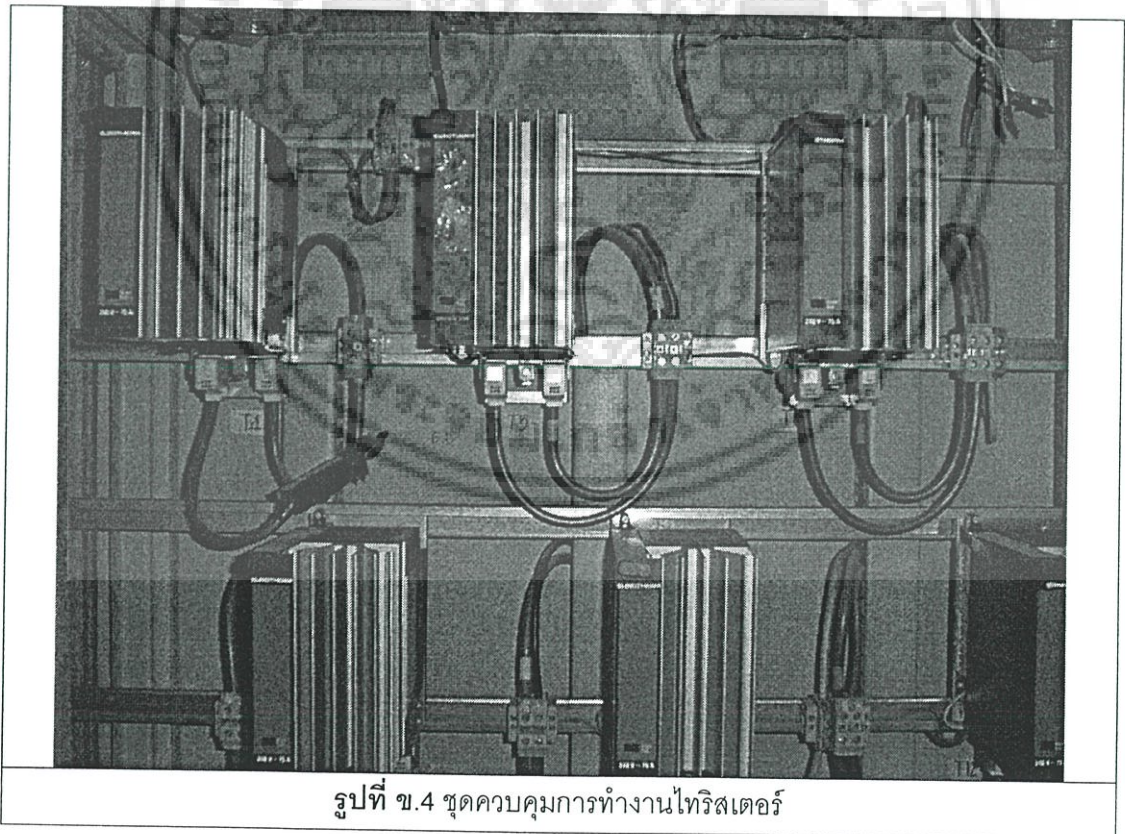
ภาคผนวก ข.  
ภาพโดยรวมของงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

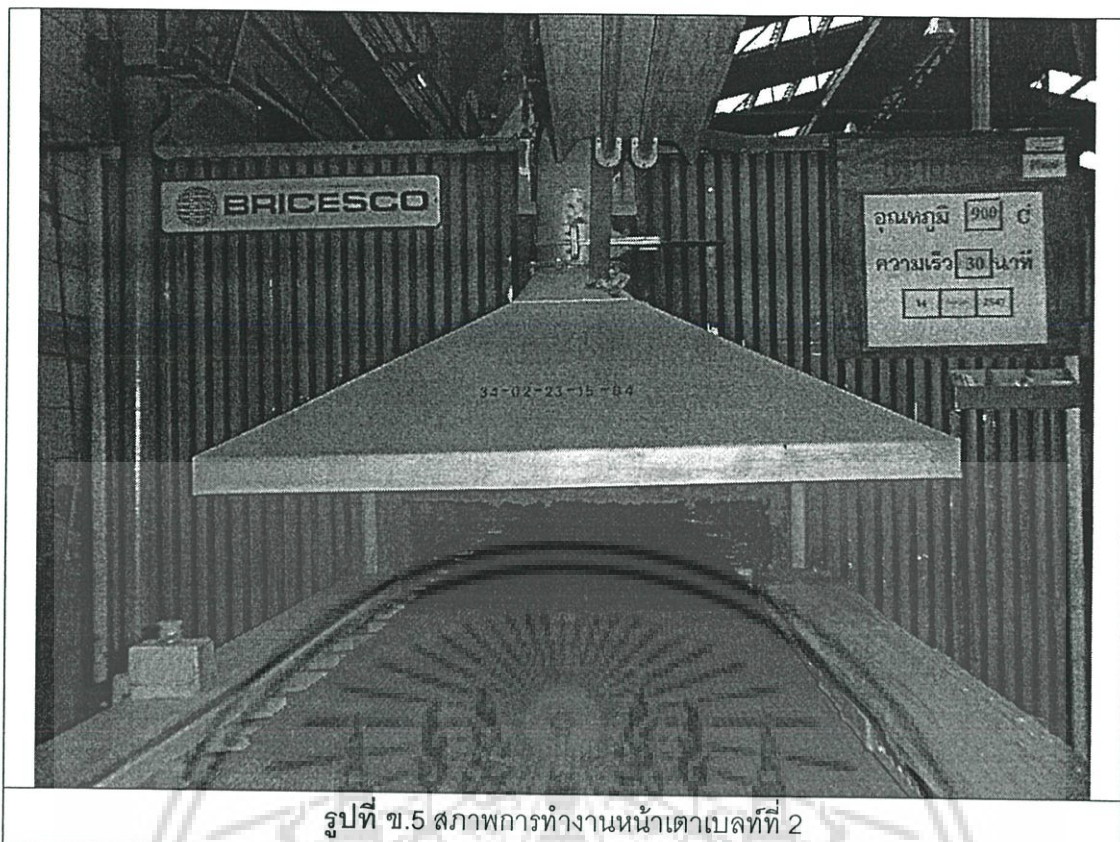


รูปที่ ข.3 ชุดควบคุมภายในตู้ควบคุมเตาเบลดท์

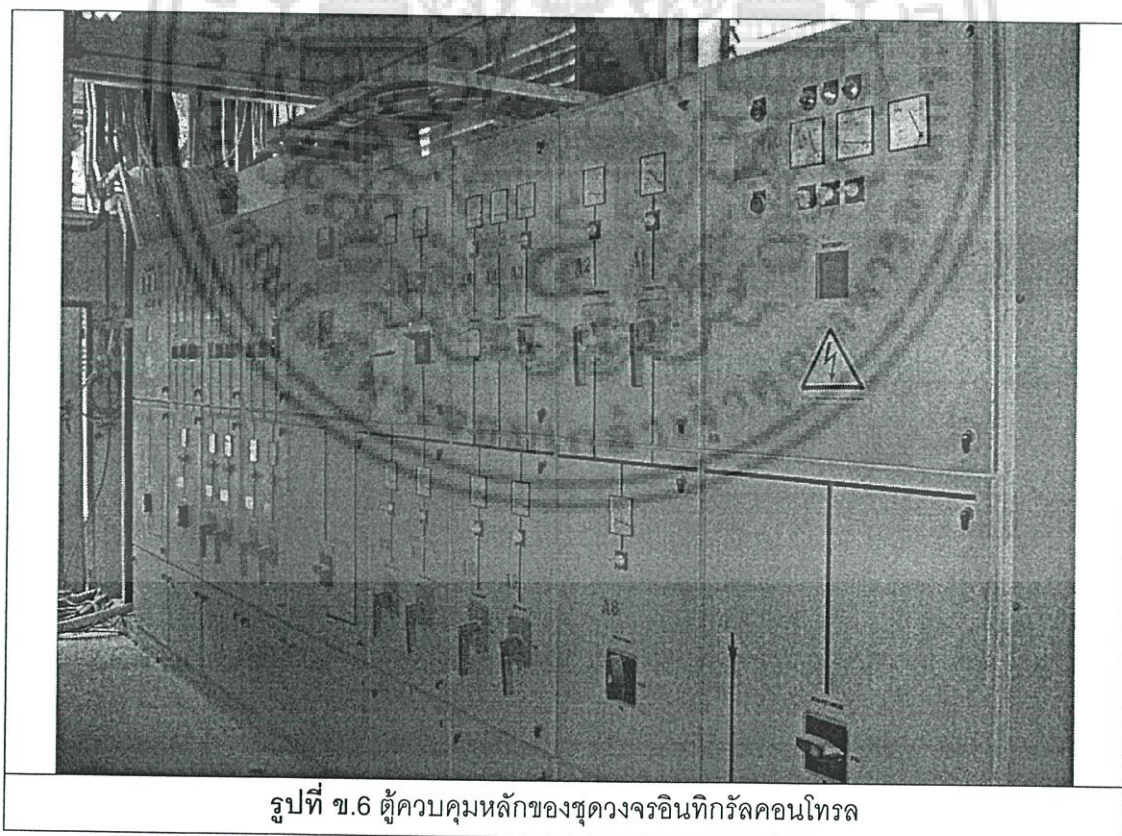


รูปที่ ข.4 ชุดควบคุมการทำงานไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



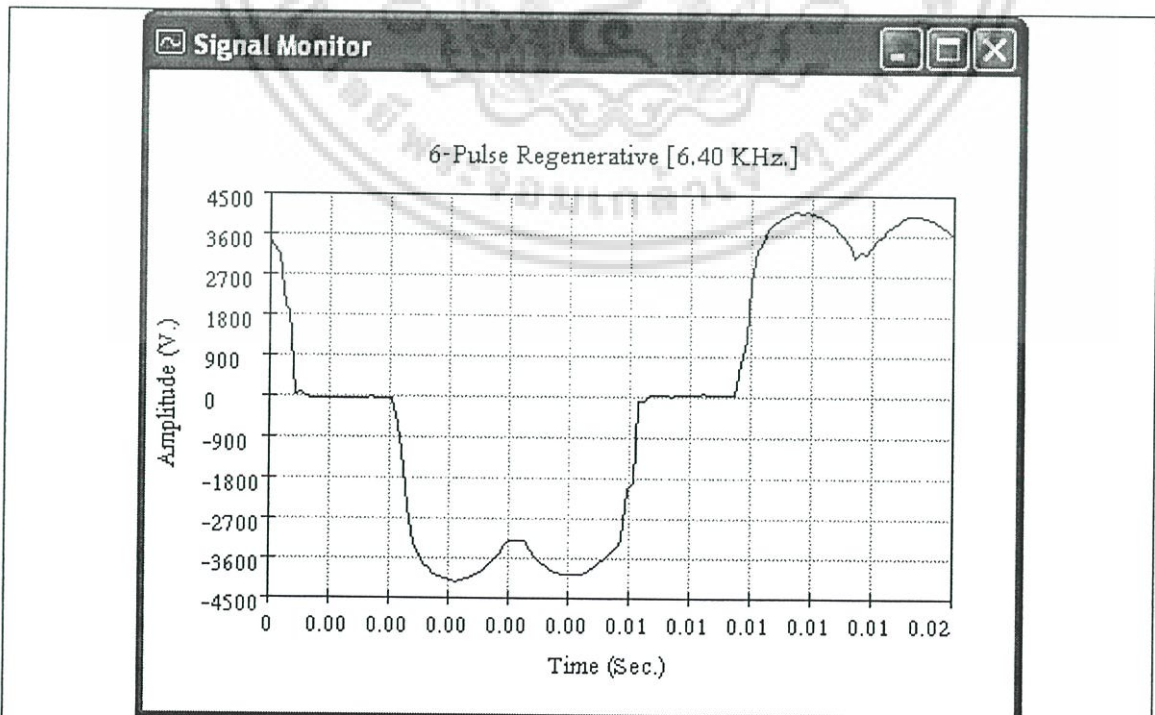
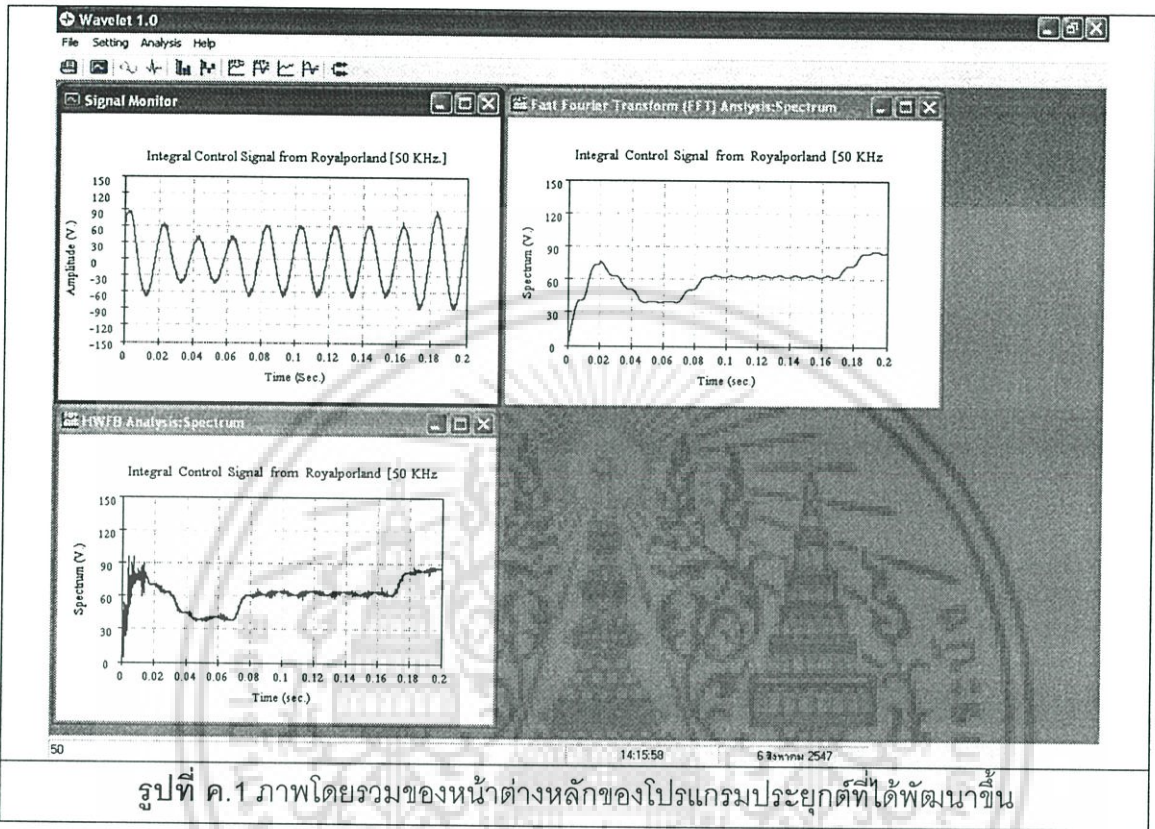
รูปที่ ข.5 สภาพการทำงานหน้าเตาเบลดที่ 2



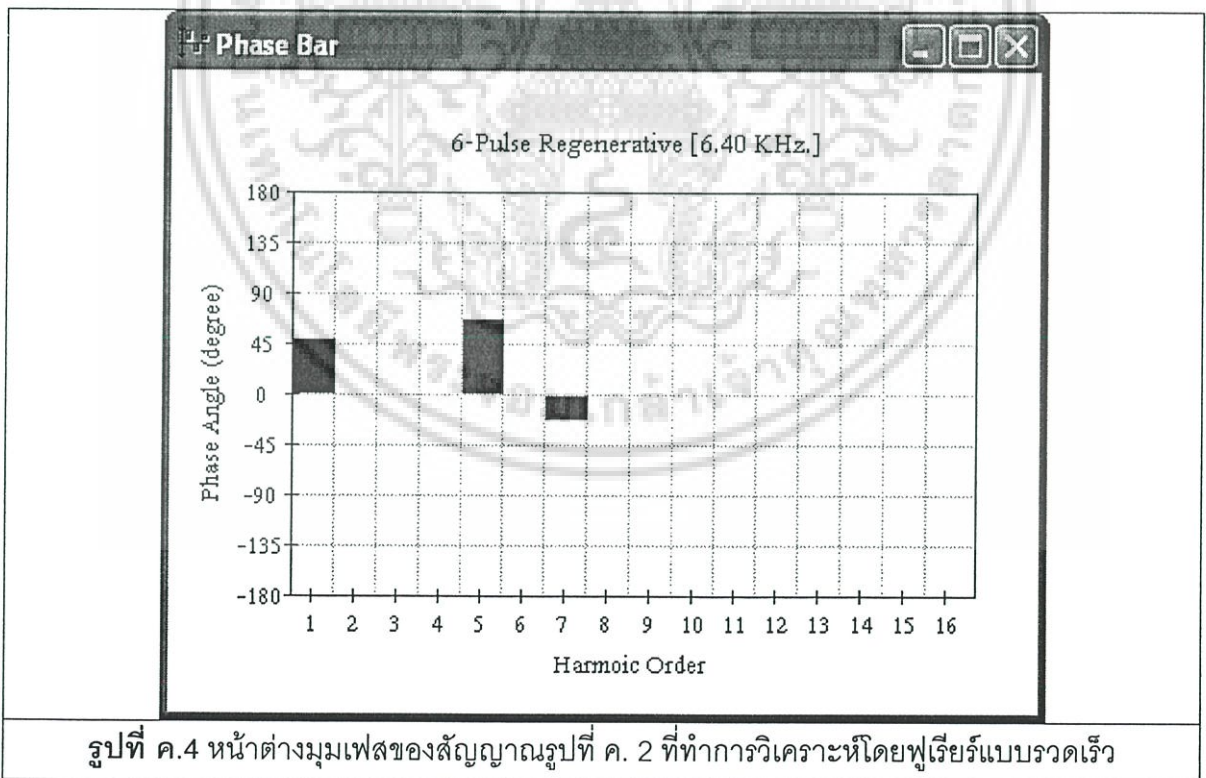
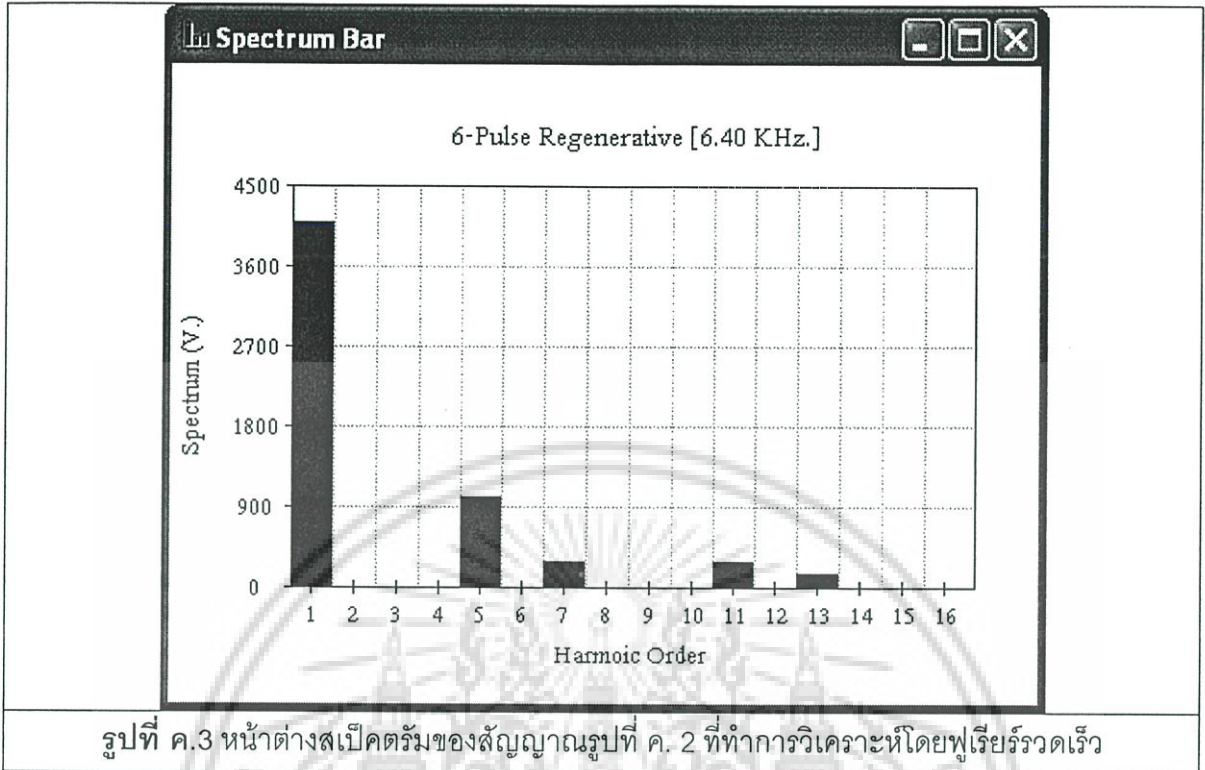
รูปที่ ข.6 ตู้ควบคุมหลักของชุดวงจรรินทิกร์ลดคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

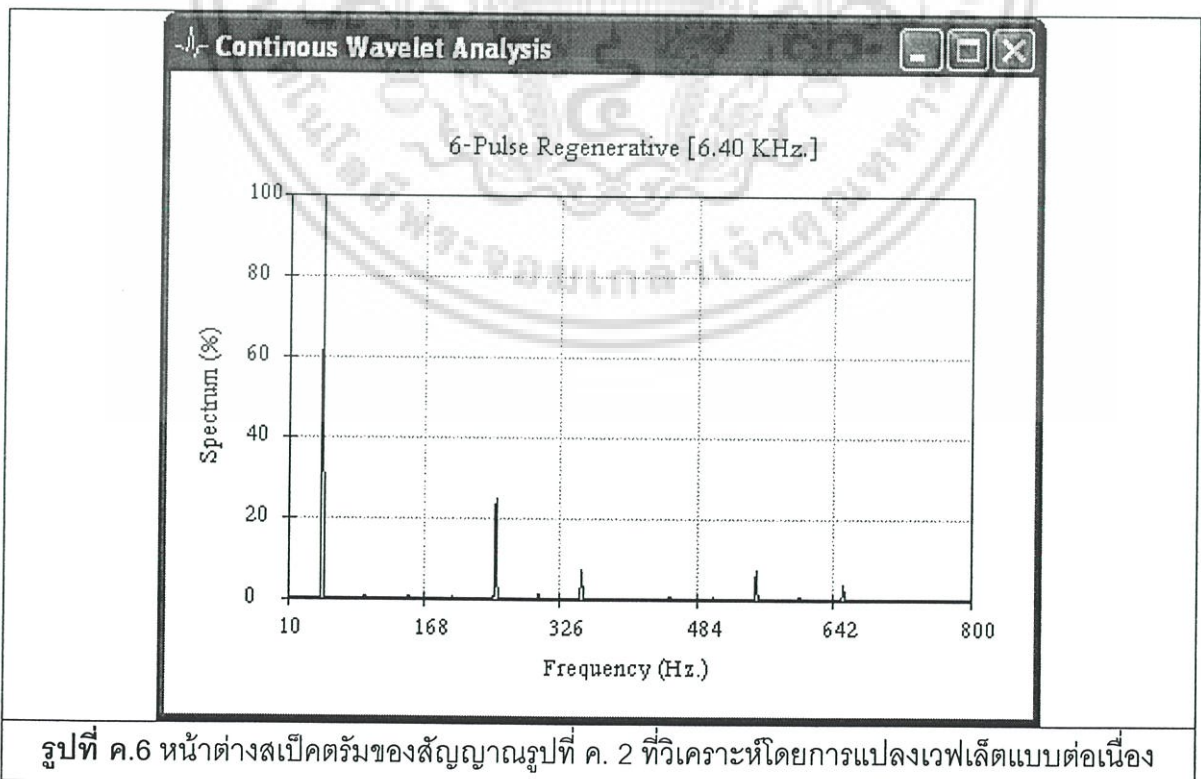
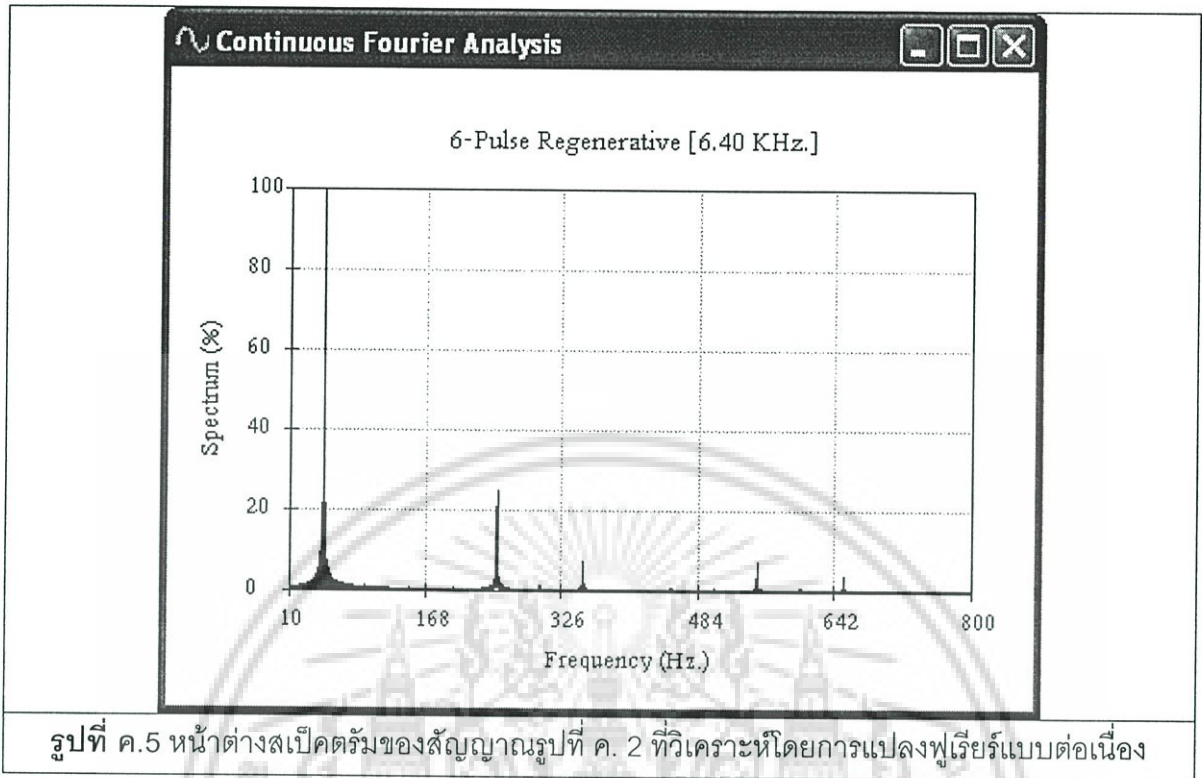
ภาคผนวก ค.  
โปรแกรมประยุกต์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น



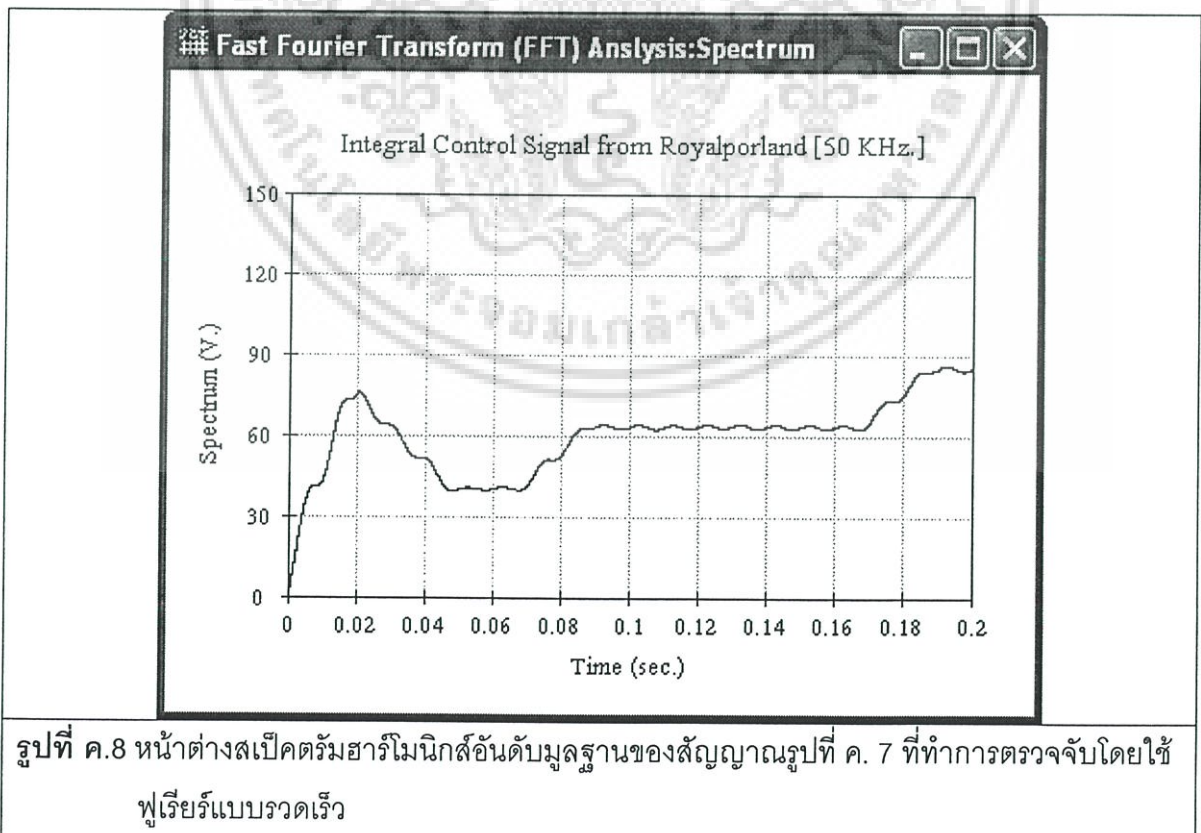
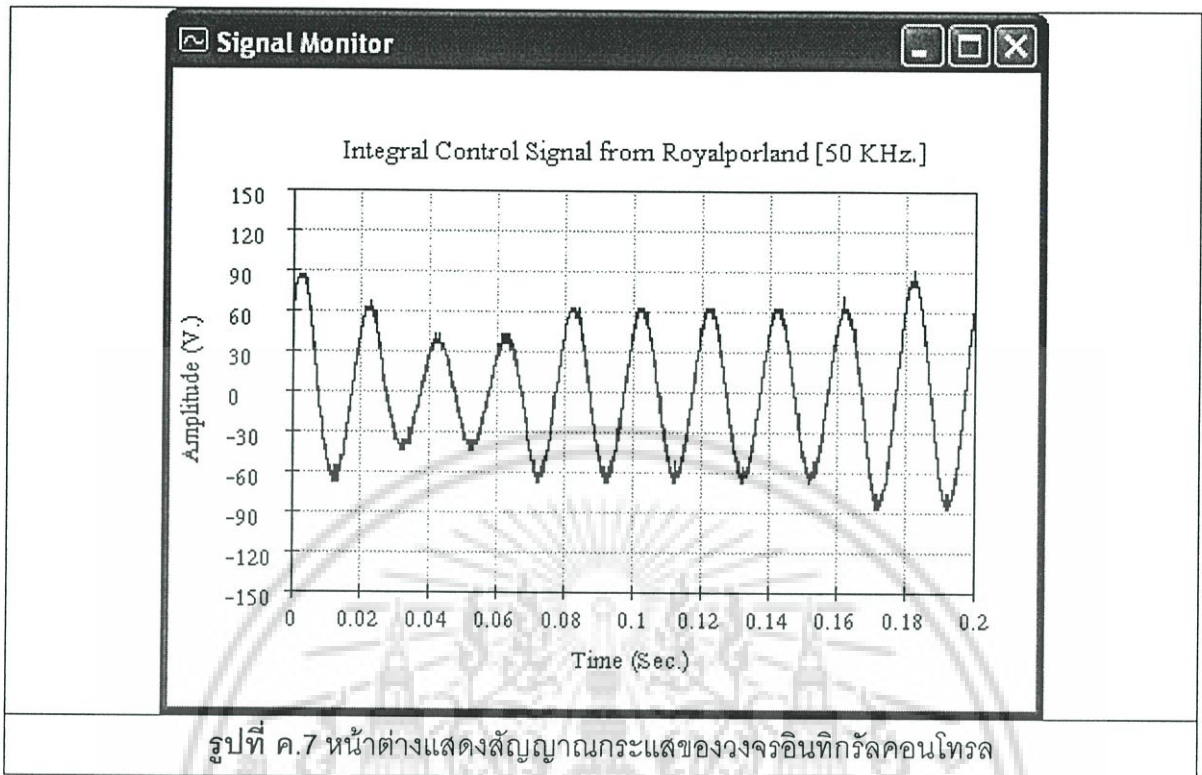
รูปที่ ค.2 หน้าต่างแสดงสัญญาณกระแส 6 พัลส์เฟส A ขณะมอเตอร์เบรกโดยการคายพลังงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



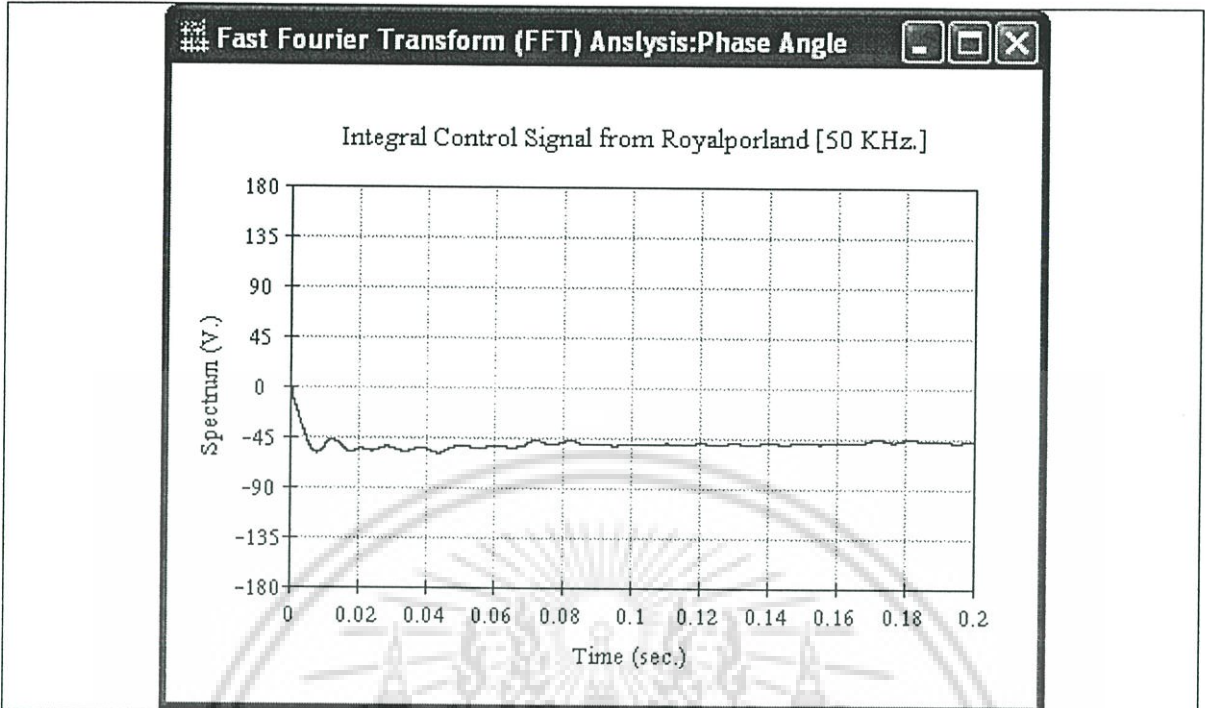
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



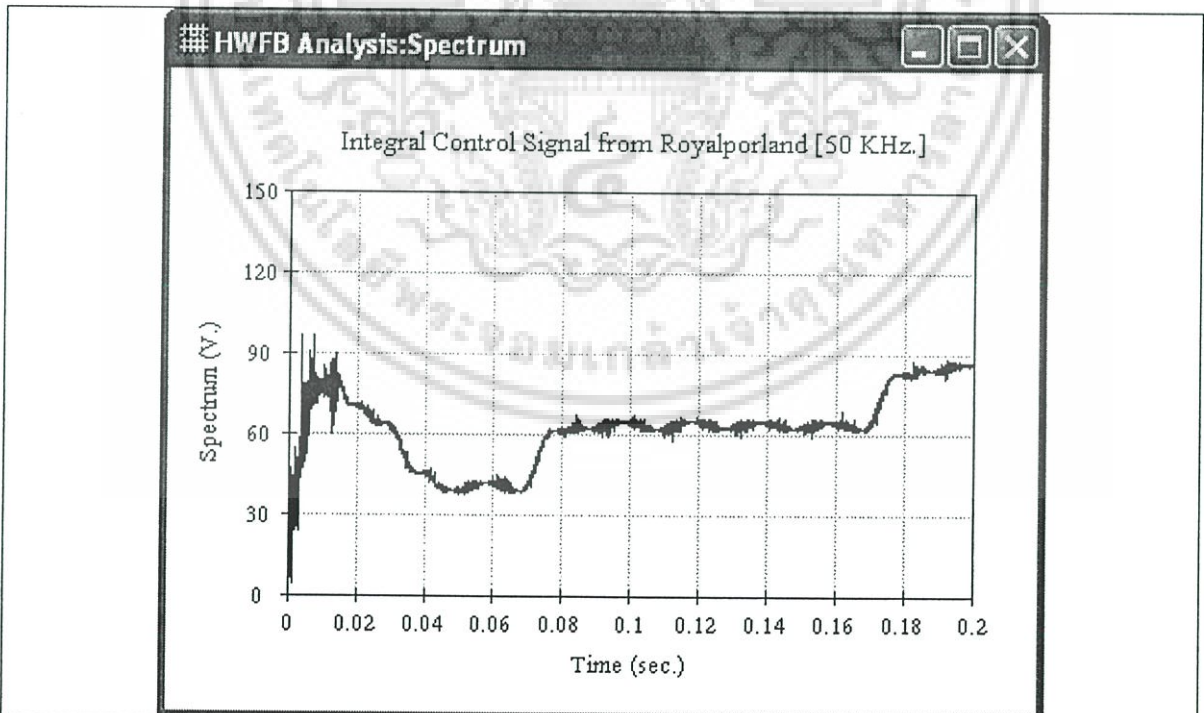
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

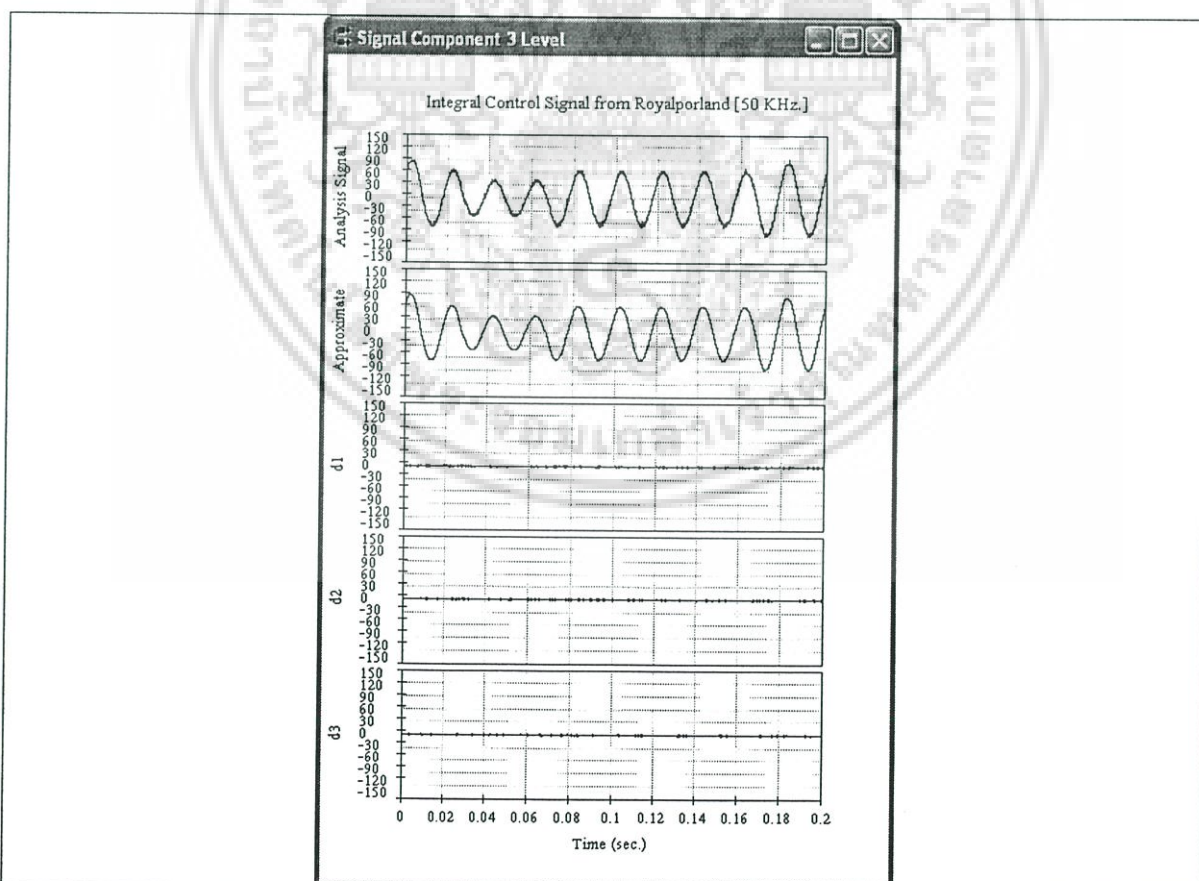
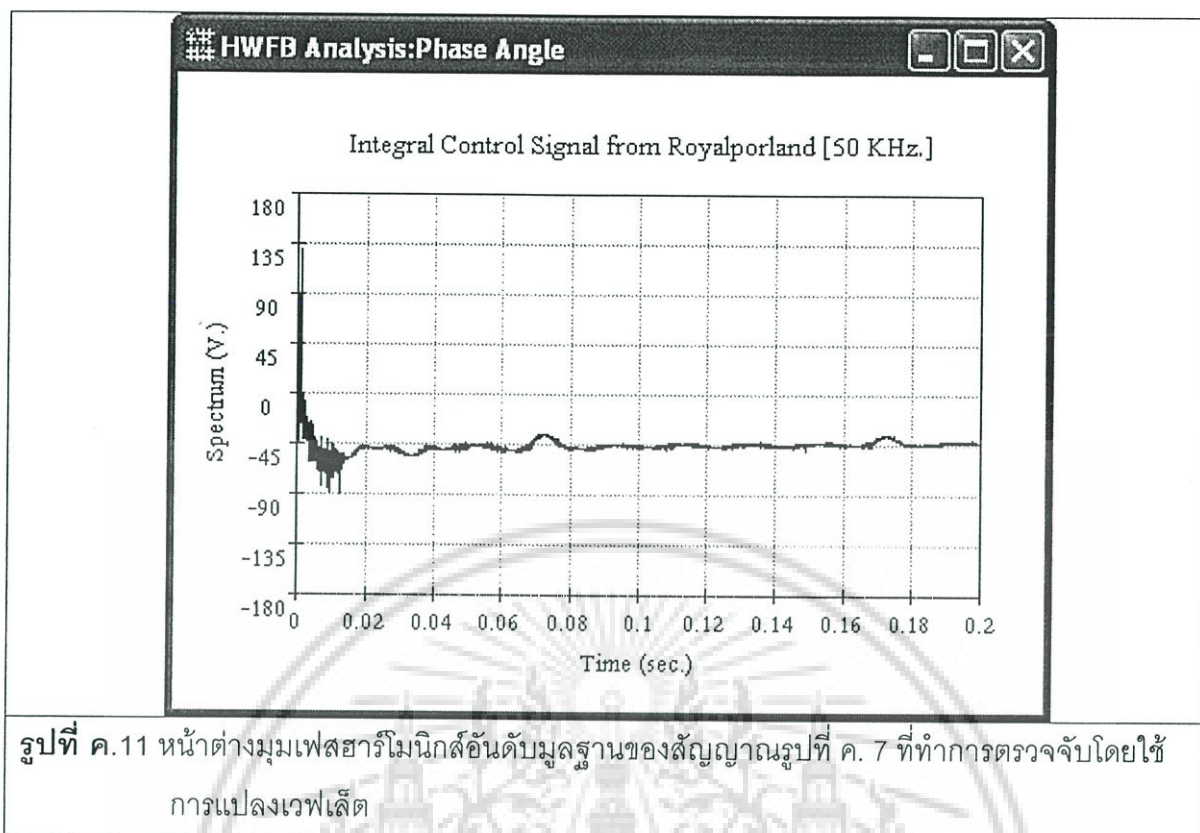


รูปที่ ค.9 หน้าต่างมุมมองเฟสอาร์โมนิคส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ ค. 7 ที่ทำการตรวจจับโดยใช้ฟูเรียร์แบบรวดเร็ว



รูปที่ ค.10 หน้าต่างสเปกตรัมอาร์โมนิคส์อันดับมูลฐานของสัญญาณรูปที่ ค. 7 ที่ทำการตรวจจับโดยใช้การแปลงเวฟเล็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.12 หน้าต่างองค์ประกอบของสัญญาณ 4 องค์ประกอบแรกทำการแยก โดยใช้ชุดตัวกรอง

เวฟเล็ตเพื่อเกิดฟิลเตอร์แบงก์ที่ได้รับการแก้ไขแบบ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ

1. ทิวา แก้วจันทร์พานนท์ และจรงค์ษ์ บุญเส็ง, “การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของเตาหลอมเหนียวนำ 3 เฟส ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เล่ม 1, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 57-62
2. ทิวา แก้วจันทร์พานนท์ และจรงค์ษ์ บุญเส็ง, “การประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง และเวฟเล็ดฟิลเตอร์แบบกึ่งเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณทรานเซียนซ์ที่เกิดจากคาปาซิเตอร์ สวิตชิง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เล่ม 1, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 357-362



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเตาหลอมเหนียวนำ 3 เฟสในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

## Harmonic Analysis of Three Phase Induction Furnace in Power System by Continuous Wavelet Transform

ทิวา แก้วจันทร์ทรานท์ และ จงรักษ์ บุญเสียง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร/โทรสาร: (02)737-3000E-mail: tiwakmitl@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอวิธีการใหม่ ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้า โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์ขนาดขด, ความถี่ และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์มอนิกย่อยและอินเตอร์ฮาร์มอนิก เพื่อทดสอบวิธีการที่นำเสนอสัญญาณที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นได้ถูกนำมาทำการทดสอบ โดยทำการเปรียบเทียบกับกรแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่องเพื่อให้เห็นข้อดีของวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยวิธีการใหม่ วิธีการที่ได้ทำการทดสอบได้ถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณความคิดพิชชี่ที่เกิดจากเตาหลอมเหนียวนำ 3 เฟสในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสัญญาณที่ผลิตโดยเตาหลอมเหนียวนำมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ ส่งผลต่อความถูกต้องที่วิเคราะห์ได้จากวิธีการแปลงฟูเรียร์

**คำสำคัญ:** ฮาร์มอนิกจำนวนเต็ม, ฮาร์มอนิกย่อย, อินเตอร์ฮาร์มอนิก การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง และเตาหลอมเหนียวนำ

### Abstract

This paper presents a new method using continuous wavelet transform for harmonic analysis of power electrical signals. The new method can identify the frequencies, amplitudes and phases of integer-harmonic, sub-harmonic and inter-harmonic. The strength testing of a method has been done using synthesis waveform to verify its accuracy compare with the continuous Fourier transform. The verify method is applied to the induction arc furnace in a large industry. The three phase induction furnace generate steady state and fast transient phenomena. The accuracy harmonic spectrums are not achieved by the continuous Fourier transform.

**Keywords:** continuous wavelet transform, induction furnace integer-harmonic, sub-harmonic and inter-harmonic

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มความสำคัญขึ้นอย่างมากเนื่องจากความซับซ้อนของการทำงานของเครื่องมือ ซึ่งไวต่อการตอบสนอง และจำนวนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้เป็นแหล่งผลิตฮาร์มอนิกที่สำคัญ โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นตัวผลิตไม่เฉพาะฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม (integer harmonic) เท่านั้น แต่ยังสร้างฮาร์มอนิกย่อย (sub-harmonic) และฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม (non-integer harmonic or inter-harmonic) ขึ้นมาอีกด้วย แหล่งของฮาร์มอนิก, ฮาร์มอนิกย่อยและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่สำคัญได้แก่ cycloconverter, Kramer drive และ arc furnace เป็นต้น [1-2] ฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์มอนิกย่อยและอินเตอร์ฮาร์มอนิกส่งผลเสียหลายประการได้แก่ ทำให้การออกแบบตัวกรองทำได้ยาก, ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุม, สามารถกระตุ้นให้เกิดการสั้นที่ความถี่ต่ำในระบบเชิงกล และแรงดันกระเพื่อม เป็นต้น ในทางปฏิบัติวิศวกรไฟฟ้าจะทำการวิเคราะห์ขนาดขดตำแหน่ง และมุมเฟสของสเปกตรัมสัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้า โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวจะมีปัญหาในเรื่องการสูญเสียสเปกตรัม และส่วนประกอบเทียม (spurious component) ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะส่งผลให้การวิเคราะห์ขนาดและตำแหน่งเกิดความผิดพลาด, ยากต่อการระบุตำแหน่งที่เกิด โดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่เกิด ณ ตำแหน่งที่ใกล้กันมากๆ จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้

บทความนี้จึงได้นำเสนอกรนำกรแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณแทนกรแปลงฟูเรียร์ซึ่งจะช่วยขจัดปัญหาของการสูญเสียสเปกตรัม และส่วนประกอบเทียมที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปลงฟูเรียร์ ส่งผลให้สามารถระบุขนาดและตำแหน่งของฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์มอนิกย่อย และฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นจำนวนเต็มได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้กรเลือกสัญญาณเพื่อมาทำการวิเคราะห์ยังไม่มีกรจำเป็นต้องสนใจคาบของสัญญาณที่ต้องเลือกมา เพื่อทำการวิเคราะห์เหมือนกับวิธีการของฟูเรียร์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Morlet และ A. Grossman และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธีการในการแปลงเวฟเลตที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี [3-4] สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform:CWT) ของสัญญาณใดๆ  $(x(t))$  คือ การวัดความเหมือนของสัญญาณในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต  $CWT(a,b)$  โดยนำสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์ มาทำการเปรียบเทียบกับเวฟเลตฟังก์ชัน  $\psi_{a,b}(t)$  โดยที่  $\psi_{a,b}(t)$  ได้ถูกนิยามไว้ดังนี้

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

เมื่อ  $\psi(t)$  คือ เวฟเลตแม่ (mother wavelet) ซึ่งเป็นฟังก์ชันคลื่นที่มีลักษณะการสั่น โดยที่ปลายทั้งสองข้างลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว การทำการเปรียบเทียบเวฟเลตฟังก์ชัน  $\psi_{a,b}(t)$  จะถูกปรับขนาดเท่ากับ  $a$  และเลื่อนทางเวลาไปเท่ากับ  $b$  แฟกเตอร์  $1/\sqrt{a}$  คือ นอร์มอลไรซ์ชัน แฟกเตอร์ทำหน้าที่รักษาลงานของเวฟเลตฟังก์ชัน  $\psi_{a,b}(t)$  ที่ถูกปรับขนาดไปให้มีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่  $\psi(t)$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องได้ถูกนิยามไว้ดังสมการ ต่อไปนี้

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \tag{2}$$

เมื่อ เครื่องหมาย — บน  $\psi_{a,b}(t)$  แทนค่าคอนจูเกทของสัญญาณ

การวิเคราะห์สัญญาณ โดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องในสมการที่ (2) จำเป็นต้องมีการเลือกเวฟเลตแม่เพื่อนำมาใช้เป็นตัววัดความเหมือน การเลือกเวฟเลตแม่ที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเวฟเลตแม่ให้เหมาะสมนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เวฟเลตที่สามารถนำมาใช้เป็นเวฟเลตแม่นอกจากจะต้องมีคุณสมบัติของฟังก์ชันคลื่นแล้วยังต้องมีพลังงานที่จำกัด นั่นคือต้องมีคุณสมบัติ admissible condition ตามที่ได้แสดงดังนี้

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \tag{3}$$

เมื่อ  $\psi(\omega)$  คือ การแปลงฟูเรียร์ของเวฟเลตแม่  $\psi(t)$

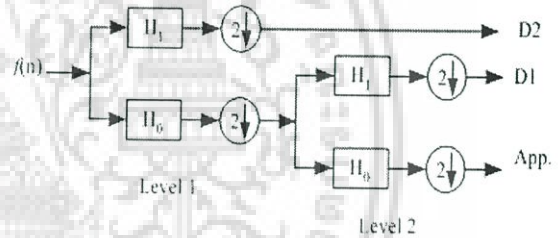
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตสามารถนำมาใช้แปลงกลับเพื่อคำนวณหาสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ได้โดยการใช้สมการแปลงเวฟเลตต่อเนื่องผกผันกลับ (inverse continuous wavelet transform:ICWT) ตามที่ได้มีการนิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2} \tag{4}$$

เมื่อ  $C_{\psi}$  คือ ค่าคงที่สำหรับการนอร์มอร์ไรซ์ชัน

2.2 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (multi-resolution analysis) เป็นการนำสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์มาผ่านการกรอง โดยใช้น้ทั้งตัวกรองเวฟเลตเพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณเข้าสูงแถบความถี่ย่อย ตัวกรองที่ถูกนำมาใช้เพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณมีโครงสร้างตามที่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดตัวกรองเวฟเลตแบบ 2 ระดับความละเอียด

ในรูปที่ 1 สัญญาณจะถูกนำมาผ่านตัวกรอง  $H_0$  และ  $H_1$  ซึ่งเป็นตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงตามลำดับ จากรูปที่ 1 สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ (5) และ (6)

$$\psi_{2n}(t) = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} H_0(k) \psi_n(2t-k) \tag{5}$$

$$\psi_{2n+1}(t) = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} H_1(k) \psi_n(2t-k) \tag{6}$$

เมื่อ  $\psi_n$  คือ เวฟเลตแม่ที่เกิดซึ่งเกิดจากการปรับขนาดและเลื่อนแกนทางเวลาของเวฟเลตแม่  $\psi_1(t)$

$H_0$  และ  $H_1$  คือ ตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

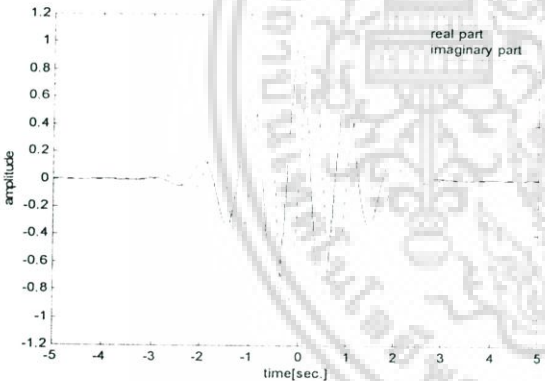
3. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง  
การวิเคราะห์หาขนาดของฮาร์มอนิกส์โดยกระบวนการแปลง  
เวฟเลตจะใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องตามที่ได้นิยามไว้ดังนี้

$$CWT(a,b) = \int_{t_1}^{t_2} x(n) \overline{\psi_{a,b}(n)} dt \tag{7}$$

เมื่อ  $x(n)$  และ  $\psi_{a,b}(n)$  คือ สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่ต้องการนำมา  
ทำการวิเคราะห์และเวฟเลตแม่ตามลำดับ

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องในสมการ (8) จำเป็นต้องมีการ  
การเลือกเวฟเลตแม่เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ เวฟเลตแม่ที่สามารถ  
นำมาใช้ได้มีอยู่หลายตัว แต่ในที่นี้เลือก modulated Gaussian wavelet มา  
ใช้เป็นเวฟเลตแม่ เนื่องจากรูปคลื่นมีลักษณะสมมาตรและมีความ  
คล้ายคลึงกับสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการทำการศึกษา modulated  
Gaussian wavelet ได้ถูกนิยามไว้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\psi(t) = e^{(j2\pi f_0(t-b)/a - 0.5((t-b)/a)^2)} \tag{8}$$



รูปที่ 2 เวฟเลตแม่ modulated Gaussian wavelet ที่  $f_0 = 1$  และ  $a = 1$

จากสมการที่ (8) สามารถนำมาพล็อตตามแกนเวลาได้  
ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2 ซึ่งจะพบว่าเวลาที่เวฟเลตแม่ใช้ช่วงเวลาในการ  
วิเคราะห์สัญญาณ ( $T_s$ ) มีค่าเท่ากับ 6 sec. ค่าของตัวแปร  $a$  จะถูก  
กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $T_s / T_w$  เมื่อ  $T_s$  คือ ช่วงเวลาของสัญญาณที่  
ต้องการวิเคราะห์

ในกระบวนการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องจะพบว่าเมื่อทำการ  
ปรับขนาดของความถี่  $f_0$  ของเวฟเลตแม่ไปที่  $f_h$  จะพบว่าขนาดของ  
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ณ ตำแหน่งซึ่ง  
สเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  เกิดขึ้น ดังนั้นขนาดของ ฮาร์

มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  ที่ได้จากกระบวนการในการแปลงเวฟเลตสามารถ  
คำนวณหาได้จาก [5-6]

$$A(f_h) = C|CWT(a,b)| \tag{9}$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าคงที่ สามารถคำนวณหาได้จากขนาดของสเปกตรัมของ  
สัญญาณ ไซน์บริสุทธิ์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น  
มุมเฟสของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  สามารถคำนวณหาได้  
จากสมการดังต่อไปนี้

$$\theta(f_h) = \arctan(\text{Im}(CWT(a,b)) / \text{Re}(CWT(a,b))) - \theta_b \tag{10}$$

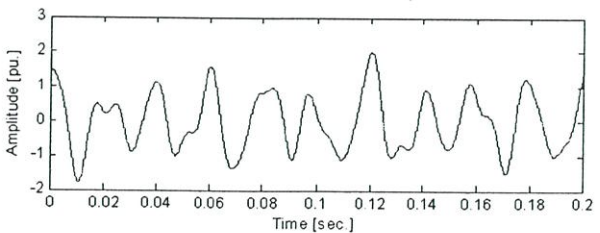
เมื่อ  $CWT$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องที่  
ความถี่  $f_h$  และ  $\theta_b$  คือ ค่ามุมเฟสเริ่มต้นที่เลื่อนไป (initial phase shift)  
เนื่องจากการเลื่อนค่า  $b$

4. การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดจากการสังเคราะห์

วิธีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง  
ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2 ได้ถูกนำมาทดสอบกับรูปคลื่นสัญญาณที่  
ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อทดสอบความถูกต้อง โดยทำการกำหนดให้  
รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดจากการสังเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่ง  
สามารถแทนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (11)

$$x(t) = \sum_{k=1}^6 am_k \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \tag{11}$$

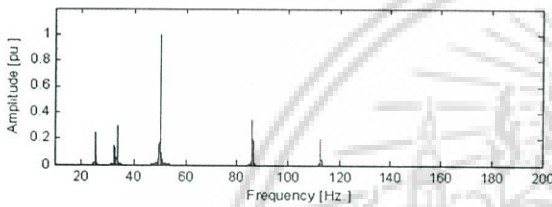
สัญญาณที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาถูกกำหนดให้ความถี่  $f_1, f_2, f_3, f_4,$   
 $f_5$  และ  $f_6$  มีค่าเท่ากับ 25.25, 32.33, 33.33, 50.00, 86.12 และ 112.75  
Hz ตามลำดับ ขนาดของ  $am_1, am_2, am_3, am_4, am_5$  และ  $am_6$   
มีค่าเท่ากับ 0.25, 0.15, 0.30, 1.00, 0.35 และ 0.20 ตามลำดับ และมุมเฟส  $\theta_1,$   
 $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  และ  $\theta_6$  ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $-20.25^\circ, 15.10^\circ,$   
 $30.15^\circ, 0.00^\circ, -120.75^\circ$  และ  $75.23^\circ$  ตามลำดับ สัญญาณที่ถูกสังเคราะห์  
ขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



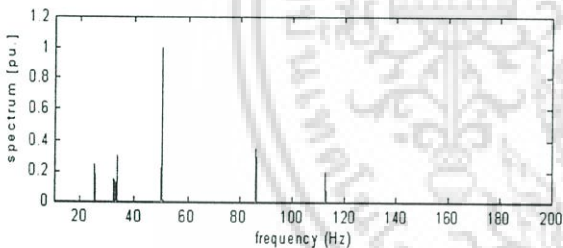
รูปที่ 3 สัญญาณที่เกิดจากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ถูกสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3 ถูกกำหนดให้มีอัตราการ sampling สัญญาณเท่ากับ 2.5 msec. ความถี่สูงสุดที่สามารถทำการตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 200 Hz ช่วงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์  $t_1$  ถึง  $t_2$  มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 2.5 sec. ค่าความถี่ต่ำสุด ( $f_1$ ) ที่ต้องการทำการพิจารณากำหนดให้มีความถี่เท่ากับ 10 Hz ค่าสเกลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.1467 ( $a_{max} = T_s/T_w$ ) ความถี่ของเวฟเลตแม่กำหนดให้มีความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 1.467 ( $f_o = f_1 a_{max}$ ) ช่วงกว้างของความถี่ที่ต้องการแยกกำหนดให้มีความถี่เท่ากับ 0.01 Hz สัญญาณที่ได้จากการสังเคราะห์ในรูปที่ 3 สามารถนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดสเปกตรัมของสัญญาณ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง (Continuous Fourier Transform:CFT) ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกทำการสังเคราะห์ขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 5 สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกทำการสังเคราะห์ขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

เมื่อทำการพิจารณาสเปกตรัมที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง (รูปที่ 4) เทียบกับการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 5) จะสังเกตเห็นได้ว่าฐานของสเปกตรัมที่เกิดจากการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่องจะมีค่ากว้างกว่าสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการเกิดปรากฏการณ์สเปกตรัมรั่วไหลและที่ตำแหน่งนั้นจะเกิดส่วนที่เรียกว่าส่วนประกอบเทียม (spurious component) ปรากฏขึ้นมาทำให้การวิเคราะห์ตำแหน่งความถี่ของฮาร์มอนิกทำได้ยาก ปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างสามารถถูกกำจัดได้โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องนอกจากนี้การวิเคราะห์โดยการแปลงเวฟเลตยังไม่ขึ้นกับคาบเวลาของสัญญาณ ทำให้สามารถนำเวฟเลตไปใช้วิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะได้ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณโดยการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง

สเปกตรัม (pu.)		ความถี่ (Hz.)		มุมเฟส (degree)	
ค่าจริง	จำนวน	ค่าจริง	จำนวน	ค่าจริง	จำนวน
0.25	0.2487	25.25	25.2500	-20.25°	-20.0936°
0.15	0.1490	32.33	32.3200	15.10°	33.6626°
0.30	0.2992	33.33	33.3300	30.15°	30.4159°
1.00	0.9997	50.00	50	0.00°	-0.0740°
0.35	0.3503	86.12	86.1200	-120.75°	-120.6908°
0.20	0.1994	112.75	112.7500	75.23°	75.2620°

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณโดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

สเปกตรัม (pu.)		ความถี่ (Hz)		มุมเฟส (degree)	
ค่าจริง	จำนวน	ค่าจริง	จำนวน	ค่าจริง	จำนวน
0.25	0.2500	25.25	25.2500	-20.25°	-20.2459
0.15	0.1499	32.33	32.3300	15.10°	15.1039
0.30	0.3000	33.33	33.3300	30.15°	30.1589
1.00	1.0001	50.00	50	0.00°	-0.0020
0.35	0.3500	86.12	86.1200	-120.75°	-120.7484
0.20	0.2000	112.75	112.7500	75.23°	75.2308

ตารางที่ 3 ค่าความผิดพลาดในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

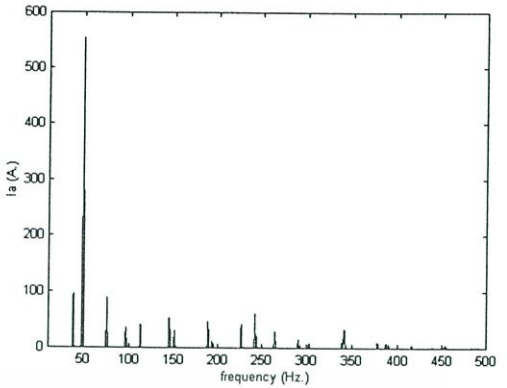
สเปกตรัม (pu.)		ความถี่ (Hz)		มุมเฟส (degree)	
CFT	CWT	CFT	CWT	CFT	CWT
1.3e-3	0.00	0.00	0.00	-0.1564	-4.1e-3
1.0e-3	0.01	0.00	0.00	-18.5626	-3.9e-3
8.0e-4	0.00	0.00	0.00	-0.2659	-8.9e-3
3.0e-4	1e-4	0.00	0.00	-0.0740	2e-3
-3.0e-4	0	0.00	0.00	-0.0592	-1.6e-3
6.0e-4	0	0.00	0.00	-0.032	-8.0e-4

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในตารางที่ 1 และ 2 มาทำการหาขนาดความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณสามารถนำมาเขียนเป็นตารางเพื่อแสดงความผิดพลาดที่เกิดจากการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวิเคราะห์โดยการแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่องให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบต่อเนื่อง โดยความผิดพลาดในการวิเคราะห์โดยเวฟเลตมีค่าประมาณศูนย์ในทุกๆ ความถี่ ในขณะที่การวิเคราะห์โดยฮาร์มอนิกส์

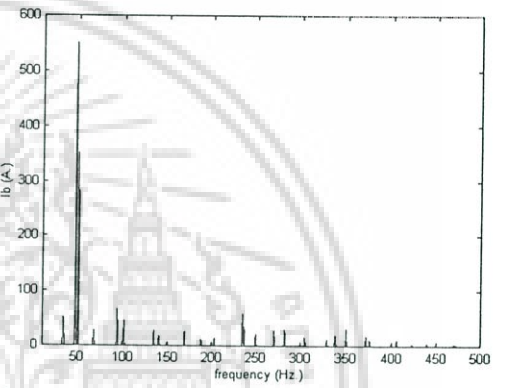
แปลงฟูเรียร์จะให้ ผลลัพธ์ที่อินฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่สูง ที่เป็นเช่นนี้ ก็เพราะว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าสูง (1 sec.) ทำให้หน้าต่างฟูเรียร์มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความถี่สูงมากกว่าความถี่ต่ำ ส่วน การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ทจะมีการปรับหน้าต่างให้เหมาะสมใน ทุกๆ ความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องในทุกความถี่ นอกจากนี้ในกรณีที่มีความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน มากๆ (เช่น ความถี่ที่ 32.33 และ 33.33) การพิจารณาฮาร์โมนิกส์ใน ตำแหน่งดังกล่าวเป็นไปได้ยาก เนื่องจากผลของการสูญเสียเนื่องมาจาก สเปคตรัมและส่วนประกอบที่เข้มที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์

5. การวิเคราะห์สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ

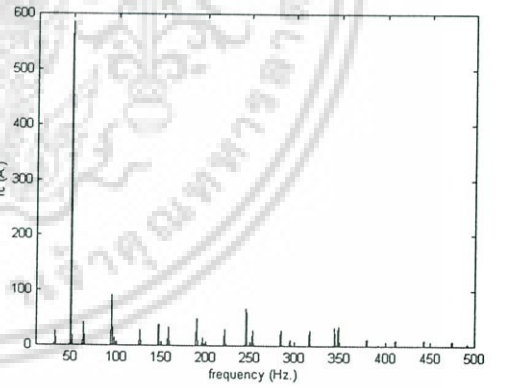
การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์โดยการแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่องที่ ได้แนะนำในหัวข้อก่อนหน้านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ สัญญาณในระบบกำลังไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวาง ในบทความนี้ได้นำเสนอ ตัวอย่างการนำการแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์ มอนิกส์ซึ่งเกิดจากเตาหลอมเหนี่ยวนำ (induction furnace) เตาหลอม เหนี่ยวนำเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็ม, ฮาร์โมนิกส์ ข้อยและอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังตามที่ได้มี การศึกษาไว้วัน [7-8] สัญญาณกระแสที่เกิดจากเตาหลอมเหนี่ยวนำที่ได้ นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6



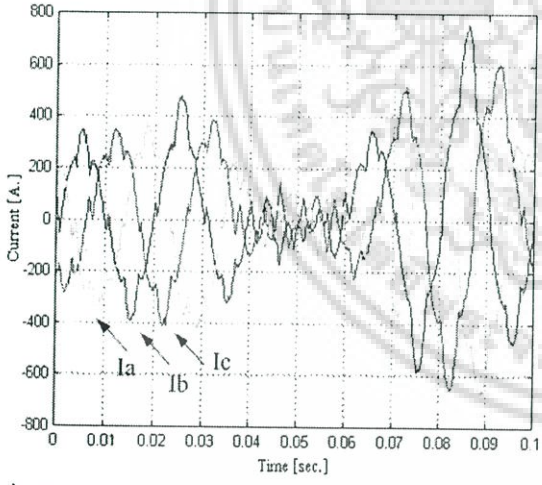
รูปที่ 7 ผลสเปคตรัมสัญญาณกระแสเฟส a ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ



รูปที่ 8 ผลสเปคตรัมสัญญาณกระแสเฟส b ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ



รูปที่ 9 ผลสเปคตรัมสัญญาณกระแสเฟส c ของเตาหลอมเหนี่ยวนำ



รูปที่ 6 สัญญาณกระแสของเตาหลอมเหนี่ยวนำเฟส a b และ c ตามลำดับ

ความถี่ที่ใช้ในการจับสัญญาณมีค่าเท่ากับ 2.5 kHz หรือมี ช่วงเวลาในการจับสัญญาณเท่ากับ 20 msec. ความถี่สูงสุดที่สามารถทำ การตรวจจับได้ คือ 1.25 kHz แต่ช่วงความถี่ที่สนใจในที่นี้อยู่ที่ 10-500 Hz หรือ ฮาร์โมนิกส์อันดับที่  $0.2^{\text{th}}$  -  $10^{\text{th}}$  ที่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่สูงกว่านี้ ขนาดของฮาร์โมนิกส์จะน้อยมากจนสามารถละเลยได้ สัญญาณกระแสของ เตาหลอมเหนี่ยวนำเฟส a b และ c จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์โดยการ แปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงในรูปของ สเปคตรัมดังแสดงในรูปที่ 7, 8 และ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปคตรัมของสัญญาณกระแสเฟส a, b และ c ของเตาหลอม เหนี่ยวนำที่แสดงในรูปที่ 7, 8 และ 9 คือ ค่าสเปคตรัมสูงสุดในช่วงเวลาที่ ที่ทำการวิเคราะห์ โดยได้ทำการแบ่งช่วงเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ ของกระแสดังแสดงในรูปที่ 6 ได้ทำการแบ่งช่วงในการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 1 ช่วงเวลาการทำงานในสภาวะปกติ (0.017-0.036 sec.) 2 ช่วงเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (0.036-0.066 sec.) และ 3 ช่วงเวลาสิ้นสุด สภาวะการทำงาน (0.077-0.098 sec.) สำหรับเฟส a สำหรับเฟสอื่น ลักษณะการวิเคราะห์จะคล้ายกับเฟส a ผลการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่ได้ ถูกนำมาแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณกระแสเฟส a ของเตาหลอมเหนียว

ช่วงเวลาวิเคราะห์ (sec.)	ความถี่ (Hz.)	อันดับฮาร์มอนิกส์ (Order)	ขนาดยอด (pu.)	มุมเฟส (Degree)
0.017-0.036	49.92	1.00	351.06	-88.14
	249.61	5.00	21.49	-134.74
	349.45	6.99	32.07	51.87
0.036-0.066	33.81	0.68	50.54	20.33
	67.62	1.35	27.87	-166.48
	101.43	2.03	45.34	71.03
	135.24	2.70	28.65	-109.06
	169.05	3.38	25.77	28.74
	236.67	4.73	35.91	-157.11
0.077-0.098	270.48	5.41	28.79	45.26
	46.99	0.94	550.65	102.04
	93.97	1.88	66.49	-58.12
	234.93	4.70	58.73	113.74
281.91	5.64	29.46	-21.92	

หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลฮาร์มอนิกส์ตัวอย่าง

ในกรณีที่ได้ทำการศึกษา ได้มีการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นในรูปที่ 6 ในช่วงเวลาการทำงานตั้งแต่ 0-0.036 sec. ดังนั้นลักษณะของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ จะเกิดที่อันดับ 5<sup>th</sup> และ 7<sup>th</sup> ตามผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4 ในช่วงเวลา 0.017-0.036 ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานในช่วงปกติ ในช่วงเวลา 0.036-0.066 ตามที่แสดงในรูปที่ 6 ช่วงนี้จะเป็นช่วงสภาวะการทำงาน เนื่องจาก การตรวจจับได้กระทำที่หน้าเตาหลอมเหนียวเมื่อนำรูปคลื่นสัญญาณที่ ตรวจจับได้มาทำการวิเคราะห์จะพบว่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะเป็น จำนวนเท่าของ 2 เนื่องจากผลกระทบจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดัง แสดงในตารางที่ 4 ในช่วงเวลา 0.077-0.098 เป็นช่วงเวลาสิ้นสุดหลัง สภาวะการทำงานระบบพยามเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งผลของฮาร์มอนิกส์ ที่วิเคราะห์ได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

## 6. สรุป

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ด แบบต่อเนื่องมีข้อดี คือ สามารถลดการสูญเสียเนื่องจากสเปคตรัมและ กำจัดผลกระทบของสเปคตรัมเทียมซึ่งสังเกตได้จากฐานของสเปคตรัมที่ แคบกว่าดังรูปที่ 4 เทียบกับรูปที่ 5 ช่วยให้การวิเคราะห์ขนาดยอด, ความถี่และมุมเฟสทำได้ถูกต้อง วิธีการวิเคราะห์สัญญาณโดยวิธีการ แปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องที่ได้นำเสนอได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ สัญญาณเตาหลอมเหนียวซึ่งพบว่าสามารถนำไปใช้แทนการแปลงฟู เรียร์โดยได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ติดังรูปที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Yacamini, "Power System Harmonics IV. Interharmonics," Power Engineering Journal, August 1996
- [2] E.W. Gunther, "Interharmonics in Power Systems," IEEE Power Eng. Vol. 2, pp. 813-817, 15-19 July 2001.
- [3] B.K. Hous nd H. C. Graber, "Analysis of Non-Stationary Vector Field using Wavelet Transforms," IEEE Oceans Conf., Vol. 3, pp. 1521-1527, 11-14 Sept. 2000.
- [4] O. Poisson, P. Rioual and M. Meunier, "Detection and Measurement of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, pp. 1039-1044, 3, July 2000.
- [5] V.L. Pham and K.P. Wong , "Antidistortion method for wavelet transform filter banks and nonstationary power system waveform harmonic analysis", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 2, March 2001.
- [6] V.L. Pham and K.P. Wong, "Wavelet-transform- base Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Waveforms" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 3, May 1999.
- [7] S. R. Mendis and D. A. Gonzalez, "Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems," IEEE Trans. on Industry Appl. Vol. 28, No. 2, March/April 1992.
- [8] D. Andrews, T. Bishop and J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility," IEEE Trans. Vol. 32, No. 3, May/J 1996.



ทิวา แก้วจันทร์านนท์ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นนักศึกษา ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย คณะ วิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุนทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัย เกี่ยวกับการตรวจจับและวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า จงรักษ์ บุญแสง การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุนทหารลาดกระบัง ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุนทหาร ลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยสาขาวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบระบบด้านคุณภาพ ไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26  
26th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)

- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



Seagate

We turn on ideas



ABB



6-7 พฤศจิกายน 2546

โรงแรมโกลเด้นแลนด์ ชะอำ จ.เพชรบุรี

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม

ENGINEERING



# การประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องและเวฟเลตฟิลเตอร์แบงก์ เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณทรานเซียนซึ่งเกิดจากคาปาซิเตอร์สวิตชิง

## Application of Continuous Wavelet Transform and Wavelet Filter Bank for Harmonic Analysis of Transient Signal of Capacitor Switching

ทิวา แก้วจันทร์พานนท์ และ จงรักษ์ บุญเส็ง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร/โทรสาร: (02)737-3000E-mail: tiwakmitl@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณทรานเซียนซึ่งเกิดจากสัญญาณคาปาซิเตอร์สวิตชิง สัญญาณที่เกิดขึ้นมีลักษณะแปรเปลี่ยนตามเวลา ทำให้การวิเคราะห์ไม่อาจจะกระทำได้โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์ การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องและเวฟเลตฟิลเตอร์แบงก์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณที่เกิดขึ้น โดยนำสัญญาณมาผ่านกระบวนการแยกองค์ประกอบทางฮาร์มอนิกเพื่อวิเคราะห์และตั้งเกตุกลุ่มของฮาร์มอนิกเพื่อกำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ ต่อจากนั้นสัญญาณที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ของแต่ละแถบความถี่จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์โดยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์หาความถี่ ขนาดยอด และ มุมเฟสของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ช่วยให้วิศวกรสามารถกำหนดขนาดของระบบการป้องกันได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง, ชุดตัวกรองเวฟเลตที่ได้รับการแก้ไข, ฮาร์มอนิก และคาปาซิเตอร์สวิตชิง

### Abstract

This paper presents the harmonic analysis of transient event due to capacitor switching signal. Harmonic analysis isn't applied by Fourier transform. Continuous wavelet transform and wavelet filter bank is applied to power signal waveform analysis. The capacitor switching signal are passed into wavelet filter bank to decompose harmonic component. The fast transient events are easily occurred. The sections of analysis are clearly to select. Non-zero harmonic component is analyzed by continuous wavelet transform. Frequencies, amplitudes and phases of harmonic are identified accurately. The results of analysis help electrical engineering to set system protection.

Keyword: continuous wavelet transform, modified discrete wavelet packet filter bank, harmonic and capacitor switching

### 1. บทนำ

คุณภาพกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นหัวใจของระบบการทำงานภายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่ดีอาจส่งผลให้การทำงานหยุดชะงัก นำมาซึ่งความเสียหายทางด้านเศรษฐศาสตร์อย่างมาก คุณภาพกำลังไฟฟ้าสามารถถูกรบกวนได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ ฮาร์มอนิก, แรงดันตกชั่วขณะ (voltage sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (voltage swell) การเกิดฟอลต์ที่สายส่ง (transmission line fault) และสัญญาณรบกวนจากการสวิตคาปาซิเตอร์ (capacitor switching) เป็นต้น รูปคลื่นสัญญาณคาปาซิเตอร์สวิตชิงเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในระบบไฟฟ้า จุดประสงค์ก็เพื่อควบคุมแรงดันในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือปรับตัวประกอบกำลัง การติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงก์เข้าสู่ระบบโดยทั่วไปกระทำได้โดยการต่อขนานเข้าไปในระบบ เมื่อทำการต่อคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ ระบบจะอยู่ในสถานะที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก, แหล่งจ่ายและคาปาซิเตอร์แบงก์ต่อขนานซึ่งกันและกัน อาจส่งผลกระทบต่อฮาร์มอนิกเกิดโชนแนซขึ้นมาซึ่งความถี่ของแรงดันขนาดของกระแสที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมาก และทำให้เกิดความร้อนที่คาปาซิเตอร์แบงก์ ทำให้คาปาซิเตอร์แบงก์เสียหายได้ [1-2]

ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณทรานเซียนซึ่งเกิดจากการสวิตคาปาซิเตอร์ สัญญาณที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบแปรเปลี่ยนตามเวลา ทำให้การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณไม่สามารถกระทำได้โดยการแปลงฟูเรียร์ การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องและเวฟเลตฟิลเตอร์แบงก์ที่ได้รับการแก้ไขได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณที่เกิดขึ้น โดยการนำสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์มาผ่านกระบวนการแยกองค์ประกอบทางฮาร์มอนิก กลุ่มของฮาร์มอนิกที่ปรากฏจากกระบวนการวิเคราะห์ในแถบความถี่ที่ไม่เป็นศูนย์จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องเพื่อระบุความถี่ ขนาดยอด และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง วิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมต่อการกำหนดขนาดการป้องกันของอุปกรณ์ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการตัดวงจรจากผลของอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์หรือซันฮาร์โมนิกส์

## 2. ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงเวฟเลต

การแปลงเวฟเลตได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Morlet และ A. Grossman และได้รับพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง วิธีการในการแปลงเวฟเลตที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี [3-4] สามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.1 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet transform: CWT) ของสัญญาณใดๆ ที่ขึ้นกับเวลา  $x(t)$  คือ การคำนวณค่าความสัมพันธ์ของการแปลงเวฟเลต  $CWT(a,b)$  ค่าสัมพันธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตเป็นการวัดค่าความเหมือนระหว่างสัญญาณ  $x(t)$  กับกลุ่มของฟังก์ชัน  $\psi_{a,b}(t)$  โดยที่  $\psi_{a,b}(t)$  ได้มีการนิยามไว้ดังนี้

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

เมื่อ  $\psi(t)$  คือ เวฟเลตแม่ (mother wavelet) ซึ่งเป็นฟังก์ชันคลื่นที่มีลักษณะการสั้นโดยที่ปลายทั้งสองข้างลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองข้าง แต่ละเวฟเลต  $\psi_{a,b}(t)$  จะถูกปรับขนาดเท่ากับ  $a$  และเลื่อนทางเวลาไปเท่ากับ  $b$  แฟคเตอร์  $1/\sqrt{a}$  คือ นอร์มอลไรซ์เซชันแฟคเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาพลังงานของเวฟเลต  $\psi_{a,b}(t)$  ที่ถูกปรับขนาดไปให้มีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่  $\psi(t)$

ค่าสัมพันธ์ของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องได้ถูกนิยามไว้ดังแสดงในสมการ

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (2)$$

เมื่อ เครื่องหมาย — บน  $\psi_{a,b}(t)$  แทนค่าคอนจูเกต

ในการทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องใน (2) จำเป็นต้องมีการเลือกเวฟเลตแม่เพื่อนำมาใช้เป็นตัววัดความเหมือน การเลือกเวฟเลตแม่ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าสัมพันธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเวฟเลตแม่ให้มีความเหมาะสมนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เวฟเลตที่สามารถนำมาใช้เป็นเวฟเลตแม่นอกจากจะต้องมีคุณสมบัติของฟังก์ชันคลื่นแล้ว ยังต้องมีพลังงานที่จำกัด นั่นคือต้องมีคุณสมบัติ admissible condition ตามที่ได้แสดงดังนี้

$$C_{\psi} = 2\pi \int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (3)$$

เมื่อ  $\psi(\omega)$  คือ การแปลงฟูรีเยร์ของเวฟเลตแม่  $\psi(t)$

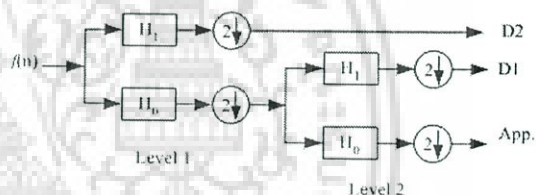
ค่าสัมพันธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตสามารถนำมาใช้แปลงกลับเพื่อคำนวณหาสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ได้โดยการใช้สมการแปลงเวฟเลตแบบผกผันกลับ (inverse continuous wavelet transform: ICWT) ตามที่ได้มีการนิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (4)$$

เมื่อ  $C_{\psi}$  คือ ค่าคงที่สำหรับการนอร์มไรซ์เซชัน

### 2.2 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (multi-resolution analysis) เป็นการนำสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์มาผ่านการกรองโดยใช้แท่งตัวกรองเวฟเลตเพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณเข้าสูงชันแบนค้อย ตัวกรองที่ถูกนำมาใช้เพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณมีโครงสร้างตามที่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดตัวกรองเวฟเลตแบบ 2 ระดับความละเอียด

ในรูปที่ 1 สัญญาณจะถูกนำมาผ่านตัวกรอง  $H_0$  และ  $H_1$  ซึ่งเป็นตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงตามลำดับ จากรูปที่ 1 สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ (5) และ (6)

$$\psi_{2n}(t) = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} H_0(k) \psi_n(2t-k) \quad (5)$$

$$\psi_{2n+1}(t) = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} H_1(k) \psi_n(2t-k) \quad (6)$$

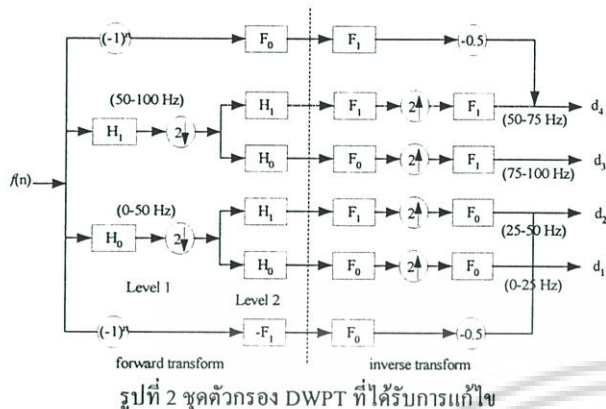
เมื่อ  $\psi_n$  คือ เวฟเลตแม่ที่เกิดซึ่งเกิดจากการปรับขนาดและเลื่อนแกนทางเวลาของเวฟเลตแม่  $\psi_1(t)$

$H_0$  และ  $H_1$  คือ ตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูงตามลำดับ

### 3. แท่งตัวกรอง DWPT ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก

ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของสัญญาณใดๆ ในรูปของสเปกตรัมจะให้ข้อมูลทางด้านขนาดของสเปกตรัมเท่านั้น ไม่ได้สื่อความหมายของลักษณะและตำแหน่งที่เกิด ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอา DWPT ที่เอกสารถนี้เป็นเอกสารถีที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารถีทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับการแก้ไข [5] ให้มีความเหมาะสมเพื่อที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์สามาแสดงลักษณะของชุดตัวกรองดังรูปที่ 2



เมื่อนำสัญญาณที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์ มาทำการวิเคราะห์โดยแบ่งตัวกรอง DWPT ที่ได้รับการแก้ไขตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 สัญญาณจะถูกแยกองค์ประกอบทางสัญญาณฮาร์มอนิกส์โดยการนำสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์มาผ่านตัวกรอง  $H_0$  และ  $H_1$  ซึ่งเป็นตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงตามลำดับ การนำสัญญาณมาทำการวิเคราะห์ผ่านชุดตัวกรองเวฟเล็ตที่แก้ที่ได้รับการแก้ไข แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์หรือออกได้เป็นสองขั้นตอน คือ 1. การแปลงสัญญาณไปข้างหน้า (forward transform) และ 2. การแปลงสัญญาณย้อนกลับ (inverse transform)

สัญลักษณ์  $\uparrow 2$  และ  $\downarrow 2$  แทนกระบวนการ Down- และ Up-sampling สัญญาณตามลำดับ สัญญาณในแง่ตัวกรองจะก่อให้เกิดผลของอิมเมจสำหรับกรณีในตัวกรองไม่ได้เป็นแบบกรองสมบูรณ์แบบ ดังนั้น เพื่อที่จะทำให้ตัวกรอง DWPT ที่ได้รับการแก้ไขมีลักษณะการแปลงกลับที่สมบูรณ์ ดังนั้นจะกำหนดให้  $H_1(-Z)$  มีค่าเท่ากับ  $F_0(-Z)$  และ  $H_0(-Z)$  มีค่าเท่ากับ  $-F_1(Z)$

4. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

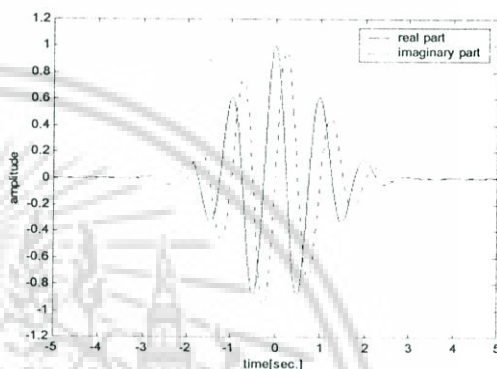
การระบุขนาดสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์มอนิกส์โดยกระบวนการแปลงเวฟเล็ตจะอาศัยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องตามที่ได้นิยามในสมการที่ (7)

$$CWT(a,b) = \int_{t_1}^{t_2} x(n) \overline{\psi_{a,b}(n \cdot \lambda t)} dt \quad (7)$$

เมื่อ  $x(n)$  และ  $\psi_{a,b}(n)$  คือ สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์และเวฟเล็ตแม่ตามลำดับ

การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องในสมการ (8) จำเป็นต้องมีการเลือกเวฟเล็ตแม่เพื่อนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบกับ เวฟเล็ตแม่ที่สามารถนำมาใช้ได้อีกมีอยู่หลายตัว แต่ในที่นี้เลือก modulated Gaussian wavelet มาใช้เป็นเวฟเล็ตแม่ เนื่องจากรูปคลื่นมีลักษณะสมมาตรและมีความคล้ายคลึงกับสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการทำการศึกษา modulated Gaussian wavelet ได้ถูกนิยามไว้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\psi(t) = e^{(j2\pi f_c(t-b)/a - 0.5((t-b)/a)^2)} \quad (8)$$



รูปที่ 3 Modulated Gaussian Wavelet เมื่อกำหนดให้  $b$  มีค่าเท่ากับ 0 และ  $a$  มีค่าเท่ากับ 1

จากรูปที่ 3 จะพบว่าเวลาที่เวฟเล็ตแม่ใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณ  $(T_w)$  มีค่าเท่ากับ 6 sec. ค่าของตัวแปร  $a$  จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ  $T_s / T_w$  เมื่อ  $T_s$  คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์

ในกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจะพบว่าเมื่อทำการปรับขนาดของความถี่  $f_0$  ของเวฟเล็ตแม่ไปที่  $f_h a$  จะพบว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมีค่าคง  $\omega$  ตำแหน่งซึ่งสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  เกิดขึ้น ดังนั้นขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  ที่ได้จากกระบวนการในการแปลงเวฟเล็ตสามารถคำนวณได้จาก [5]

$$A(f_h) = C |CWT(a,b)| \quad (9)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากแปลงสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ มุมเฟสของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่  $f_h$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [6]

$$\theta(f_h) = \arctan(Im(CWT(a,b)) / Re(CWT(a,b))) - \theta_b \quad (10)$$

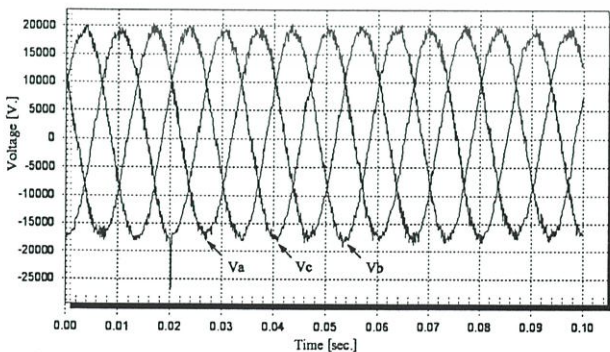
เมื่อ  $CWT$  คือ ค่าสมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องที่ ความถี่  $f_h$  และ  $\theta_b$  คือ ค่ามุมเฟสเริ่มต้นที่เลื่อนไป (initial phase shift) ที่เกิดจากการเลื่อน  $b$  ไปยังตำแหน่งที่ต้องการทำการวิเคราะห์

### 5. การนำเวฟเล็ดมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

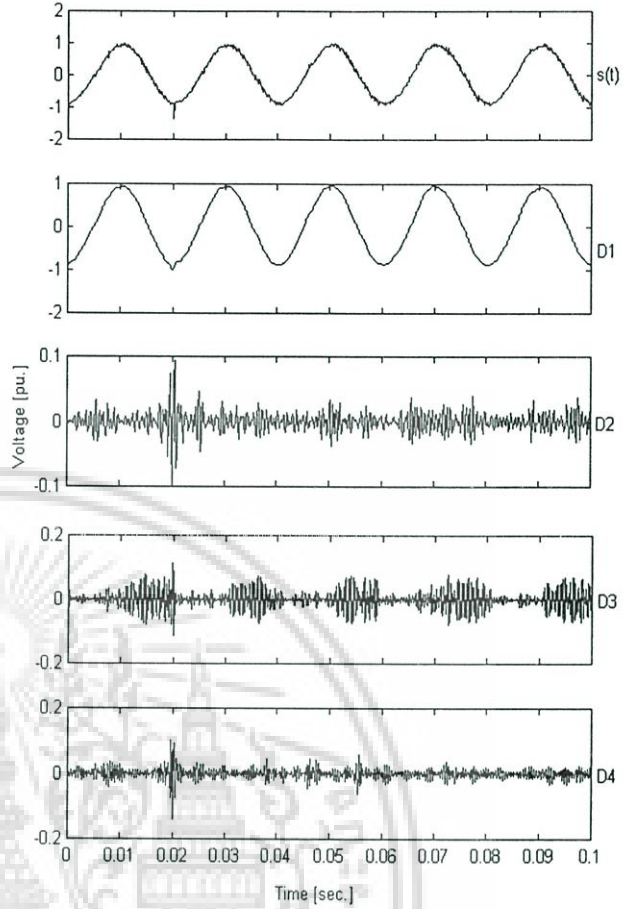
สัญญาณรบกวนของรูปคลื่นคาบไซเคิลสวิตซ์ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันการทำงาน เนื่องจากสัญญาณคาบไซเคิลสวิตซ์ซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงส่งผลให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานผิดพลาดได้ บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นสัญญาณคาบไซเคิลสวิตซ์ สัญญาณที่นำมาใช้ทำการวิเคราะห์ได้ทำการวัดจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง การศึกษาได้ทำการนำสัญญาณคาบไซเคิลสวิตซ์ที่ตรวจจับได้มาวิเคราะห์ โดยทำการแบ่งกรณีศึกษาแบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1. ทรานเซียนแบบเสริมด้านลบ และ 2. ทรานเซียนแบบหักล้างด้านลบ

#### 5.1 ทรานเซียนแบบเสริมด้านลบ

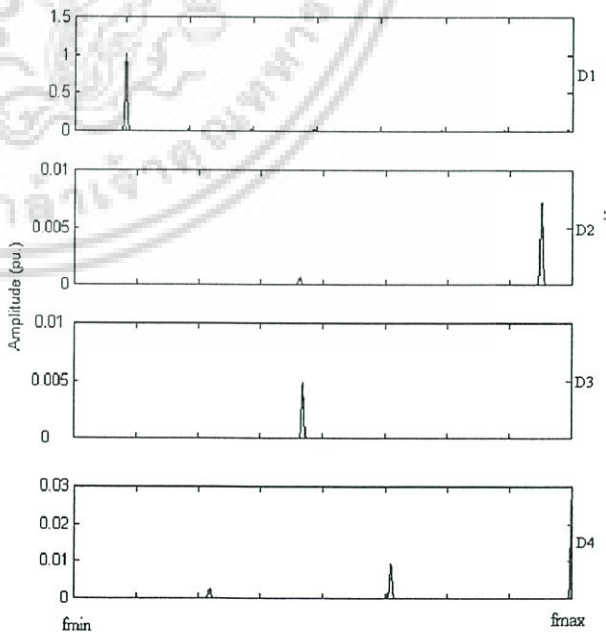
สัญญาณทรานเซียนแบบเสริมด้านลบซึ่งเกิดจากการสับคาบไซเคิลสวิตซ์เข้าสู่ระบบขณะที่แรงดันตกลงต่ำสุดในกรณีแรก สัญญาณที่ทำการตรวจจับได้ ณ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่แห่งหนึ่งมีลักษณะของสัญญาณทรานเซียนดังแสดงในรูปที่ 4 ลักษณะของการเกิดทรานเซียนในลักษณะนี้มีผลทำให้ค่ายอดของแรงดันมีขนาดเพิ่มสูงมากกว่าปกติมาก (ในที่นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นมาประมาณ 0.4 เท่าของแรงดันปกติ หรือประมาณ 8000 โวลต์) สัญญาณทรานเซียนแบบเสริมด้านลบได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์เพื่อศึกษาลักษณะของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น โดยการนำสัญญาณมาผ่านกระบวนการแยกองค์ประกอบของสัญญาณโดยใช้ตัวกรองเวฟเล็ดที่ได้รับการแก้ไขในรูปที่ 2 โดยใช้ระดับของการแยกสัญญาณเท่ากับ 5 ระดับ ความถี่ในการจับสัญญาณอยู่ที่ 3.2 kHz ดังนั้นแถบความถี่ขององค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละแถบความถี่ย่อยมีค่าเท่ากับ 800 Hz องค์ประกอบของสัญญาณที่ได้ในแต่ละแถบความถี่ย่อยสามารถแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส a b และ c ขณะเกิดการสวิตซ์คาบไซเคิลสวิตซ์แบบกึ่งเข้าไปในระบบขณะแรงดันอยู่ที่ค่าต่ำสุด (0.02 sec.)



รูปที่ 5 องค์ประกอบของสัญญาณทรานเซียนซึ่งเกิดจากการสวิตซ์คาบไซเคิลสวิตซ์เข้าไปในระบบขณะแรงดันอยู่ที่ค่าต่ำสุด ณ เฟส C



รูปที่ 6 สเปกตรัมของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันขณะเกิดทรานเซียนที่จุดต่ำสุด ณ เฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

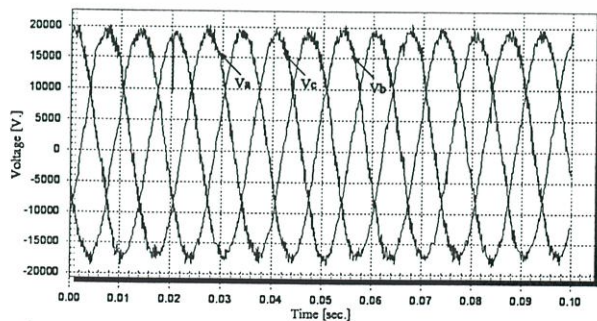
ตารางที่ 1 ฮาร์มอนิกของสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันขณะเกิดทรานเซียนท์ที่จุดต่ำสุด ณ เฟส C

Subband d	Frequency (Hz)	Harmonic (order)	Amplitude (pu)	Phase (degree)
1	49.6	0.99	0.98	8.297
2	775.64	15.51	0.0066	-176.35
3	984.46	19.69	0.0044	33.33
4	1454.3	29.09	0.008	134.47
	1599.7	31.99	0.025	-63.511

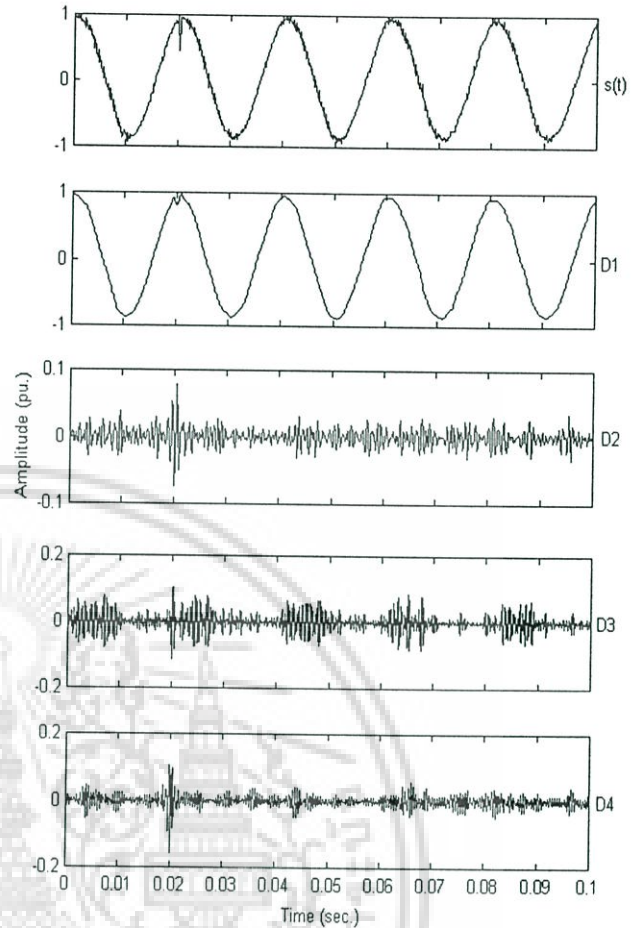
จากผลการใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณทรานเซียนท์ที่เกิดขึ้นที่จุดต่ำสุด ณ เฟส C ลักษณะของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แถบความถี่ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นตารางเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางที่ 1 จะพบว่าค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ฮาร์มอนิกอันดับที่สูงมากทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่ำ

5.2 สัญญาณทรานเซียนท์แบบหักล้างด้านบวก

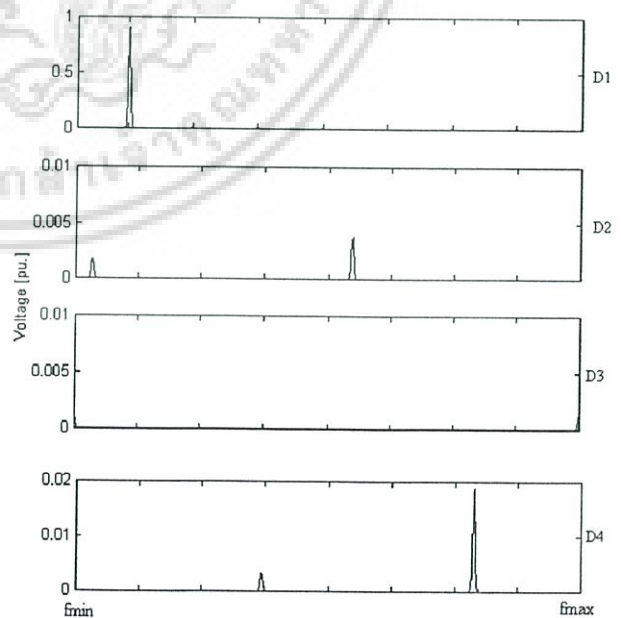
สัญญาณทรานเซียนท์แบบหักล้างด้านบวกเกิดจากการสับคาปาซิเตอร์แบบกึ่งเข้าสู่ระบบขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสูงสุดของสัญญาณที่ทำการตรวจจับได้แสดงได้ดังรูปที่ 7 ลักษณะของการเกิดทรานเซียนท์ในลักษณะนี้มีผลทำให้ค่าของแรงดันที่ค่าสูงสุดมีขนาดลดลงอย่างฉับพลันชั่วขณะในขนาดที่มาก (ในที่นี้มีขนาดลดลงมาประมาณ 0.4 เท่าของแรงดันปกติ หรือมาจ 8000 โวลต์) สัญญาณทรานเซียนท์แบบเสริมด้านบวกได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพื่อศึกษาลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยการนำสัญญาณมาผ่านกระบวนการแยกองค์ประกอบของสัญญาณโดยใช้ตัวกรองเวฟเล็ดที่ได้รับการแก้ไขในรูปที่ 2 โดยใช้ระดับของการแยกสัญญาณเท่ากับ 2 ระดับ ความถี่ในการจับสัญญาณอยู่ที่ 3.2 kHz ดังนั้นแถบความถี่ขององค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละแถบความถี่ย่อยมีค่าเท่ากับ 800 Hz องค์ประกอบของสัญญาณที่ได้ในแต่ละแถบความถี่ย่อยสามารถแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส a b และ c ขณะเกิดการสวิตคาปาซิเตอร์แบบกึ่งเข้าไปในระบบขณะแรงดันอยู่ที่ค่าต่ำสุด (0.02 sec.)



รูปที่ 8 องค์ประกอบของสัญญาณทรานเซียนท์ซึ่งเกิดจากการสวิตคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบขณะแรงดันอยู่ที่ค่าต่ำสุด ณ เฟส c



รูปที่ 9 สเปกตรัมของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันขณะเกิดทรานเซียนท์จุดสูงสุด ณ เฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ฮาร์มอนิกของสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันขณะเกิดทรานเซียนท์ที่จุดสูงสุด ณ เฟส C

Subband	Frequency (Hz)	Harmonic (order)	Amplitude (pu)	Phase (degree)
1	49.99	1.00	0.9100	0.88
2	412.84	8.26	0.0017	-173.02
3	619.26	12.39	0.0038	177.44
4	1347.2	26.94	0.0032	44.85
	1515.6	30.31	0.0188	-80.22

จากผลการใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณทรานเซียนท์ที่เกิดขึ้นที่จุดสูงสุด ณ เฟส C ลักษณะของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แถบความถี่ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งสามารถนำมาสรุปไว้ในตารางเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากตารางที่ 2 จะพบว่าสเปกตรัมของสัญญาณมีตำแหน่งการเกิดและมีค่าของขนาดยอดต่ำกว่าการสับสวิตที่กระทำที่ตำแหน่งต่ำสุด สเปกตรัมของแรงดันที่แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ถึงแม้ว่าขนาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สูงมากนักแต่ช่วงเวลาที่เกิดขึ้นมากและแรงดันฐานก็มีขนาดที่สูง (20 kV) เมื่อนำค่าแรงดันฐานคูณกลับเข้าไปจะพบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากซึ่งสามารถก่อความทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถทำงานได้

## 6. สรุป

การแปลงเวฟเลตที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณคาบซิงเกิลเฟสซึ่งจะนำสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์มาทำการแยกองค์ประกอบของสัญญาณฮาร์มอนิกโดยใช้ชุดตัวกรองเวฟเลตที่ได้รับการแก้ไข องค์ประกอบของสัญญาณฮาร์มอนิกในแถบความถี่ที่ไม่เป็นศูนย์จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ความถี่, ขนาดยอด และมุมเฟส โดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง สัญญาณตัวอย่างทรานเซียนท์ได้ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาโดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ ทรานเซียนท์แบบเสริม และทรานเซียนท์แบบหักล้างด้านบวก ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นปริมาณฮาร์มอนิกอันดับสูงที่มีขนาดสูงกว่าสภาวะปกติ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Larry, "A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Applications to Calculating, Limiting, and Reducing the Effects of Transient Currents," IEEE Industry App., Vol.31, pp. 721-724, 4, July-Aug. 1995.
- [2] D. Mader, S. Kolluri, M. Chaturedi and A. Kumar, "Planning and Implementation of Large Synchronously Switched Surt Capacitor Banks in The Entergy System," IEEE Power Eng., Vol. 4, pp. 2045-2050, 16-20 July 2000.
- [3] B.K. Hous nd H. C. Graber, "Analysis of Non-Stationary Vector Field using Wavelet Transforms," IEEE Oceans Conf., Vol. 3, pp. 1521-1527, 11-14 Sept. 2000.
- [4] O. Poisson, P. Rioual and M. Meunier, "Detection and Measurement of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, pp. 1039-1044, 3, July 2000.
- [5] V.L. Pham and K.P. Wong , "Antidistortion method for wavelet transform filter banks and nonstationary power system waveform harmonic analysis", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 2, March 2001.
- [6] V.L. Pham and K.P. Wong, "Wavelet-transform-base algorithm for harmonic analysis of power system waveforms" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 3, May 1999.



ทิวา แก้วจันทร์นนท์ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง



จรงค์ นุญเส็ง การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบระบบด้านคุณภาพไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ทิวา แก้วจันทร์นันทน์
วัน เดือน ปีเกิด	22 พฤษภาคม 2519 ที่จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	ปีพ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีสุรนารี เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2544 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท 2 บทความ ซึ่งได้ทำการตีพิมพ์ลงในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26 จำนวน 2 เรื่อง

### ผลงานทางวิชาการ

1. ทิวา แก้วจันทร์นันทน์ และจรงค์ บัญเส็ง, "การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของเดาหลอมเหนี่ยวนำ 3 เฟสในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เล่ม 1, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 57-62
2. ทิวา แก้วจันทร์นันทน์ และจรงค์ บัญเส็ง, "การประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่องและเวฟเล็ดฟิลเตอร์เบงก์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณทรานเซียนต์ซึ่งเกิดจากคาปาซิเตอร์สวิตชิง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เล่ม 1, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 357-362

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้