

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การวัดค่าฮาร์โมนิกส์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้า  
(Harmonics Measurement by Using Neural Networks in Power Systems)**



โดย

นายปวิธ วงศ์สว่างรัมย์

รพ.  
ร/495 17  
2550

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....81804  
วัน,เดือน,ปี.....24 ส.ย. 2551

b.....119 36 381  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การวัดค่าฮาร์โมนิกส์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้า  
(Harmonics Measurement by Using Neural Networks in Power Systems)**

โดย

นายปวิธ วงศ์สว่างรัมย์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวิภากร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวัดค่าฮาร์โมนิกส์โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

นายปวิธ วงศ์สว่างรัมย์ รหัส 47012042

สมชาติ

จิรวิน

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวินากร )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวัดค่าฮาร์โมนิกส์โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้า

นายปวิธ วงศ์สว่างรัศมี รหัส 47012042

รศ.ดร.สมชาติ จิรวិภากร อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเสนอวิธีการหาคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่าง ๆ โดยวิธีการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับวิธีการหาคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยวิธีการของฟูเรียทรานส์ฟอร์มซึ่งเป็นวิธีการแบบทั่วไปโดยวิธีฟูเรียร์นั้นต้องใช้สัญญาณ 1 ลูกคลื่นสำหรับหาค่าขนาดฮาร์โมนิกส์และใช้เวลาอีก 1 ลูกคลื่นเพื่อใช้ในการประมวลผล แต่วิธีการใหม่ที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้สัญญาณเพียงครึ่งคาบเพื่อหาค่าของคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์ซึ่งทำให้การหาค่าฮาร์โมนิกส์แบบใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีความเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม โดยในการทดลองนี้ได้ทำการใช้ค่าสัญญาณฮาร์โมนิกส์จากแหล่งกำเนิดจริง เพื่อนำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบชุดโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อที่จะหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดและนำโครงสร้างดังกล่าวมาทดสอบหาค่าสัญญาณฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไฟฟ้าต่าง ๆ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการหาคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์โดยวิธีการของฟูเรียทรานส์ฟอร์ม จากผลที่ได้เราสามารถสรุปได้ว่าการหาค่าฮาร์โมนิกส์ ด้วยวิธีการใหม่นี้มีความถูกต้องสูงและสามารถนำไปใช้สำหรับวัดค่าฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณทางไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Harmonics Measurement by Using Neural Networks in Power Systems

Mr. Pavit Wongsavangrussamee ID 47012042

Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn Advisor

Educational Year 2007

### ABSTRACT

This paper presents a new method for harmonics detection by using neural networks and comparing with harmonics detection by conventional fourier transformation method. The fourier transformation method need 1 cycle signal for harmonics detection at each orders and need 1 cycle for processing but new method that using neural networks need only half cycle for calculating the component of harmonics ,that means the new method is faster than conventional method. This paper use real harmonics signal at any order for training and testing artificial neural networks to find the best structure of neural networks. The obtained results from neural networks are compared with the result of fourier transformation method. we conclude that this new method is high precision and available to be used for harmonic detection.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำสั่งสอนและความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมชาติ จิรวินาการ ตลอดจนการชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของการดำเนินงาน อีกทั้งการดูแลและเอาใจใส่ที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ ที่ให้ลูกได้มีโอกาสกำเนิดมาบนโลกใบนี้ ขอคุณที่เลี้ยงดูและให้โอกาสทางการศึกษาอย่างไม่มีข้อแม้ ขอคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ จนทำให้มีวันนี้

ขอขอบคุณพี่กิตติ อัจฉริยะภากร สำหรับแนวคิด ความรู้ ประสบการณ์ ที่ถ่ายทอดให้รวมไปถึงตัวอย่างโปรแกรมที่ทดลองใช้ และคำแนะนำดีๆ ที่มีให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และอยู่เคียงข้างกันเสมอมา

ผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ชื่อโครงการ (Project Title)	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objectives)	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Project Outcomes)	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ (Scope of the Project)	2
1.6 การจัดโครงสร้างเนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์ (Thesis structure)	2
1.7 เอกสารอ้างอิง (References)	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	5
2.1 ส่วนนำ	5
2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	10
2.2.1 เครื่องแปลงผันแบบสถิต (The Static Converters)	10
2.2.2 เตาหลอมโลหะ (Arc furnace)	16
2.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	16
2.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์	16
2.3.1 คุณลักษณะของการเกิดเรโซแนนซ์	17
2.3.2 ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า	19
2.3.3 ผลกระทบต่อการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้า	21
2.4 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์และอุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกส์	24
2.4.1 วิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์	24
2.4.2 อุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกส์	25
2.5 หลักการของอนุกรมฟูเรียร์สำหรับหาค่าฮาร์โมนิกส์	35
2.5.1 อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series)	35
2.5.2 ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier transform)	36
2.5.3 การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (DFT)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เครื่องมือวัดและวิธีการวัดปริมาณฮาร์โมนิกส์	39
2.6.1 เครื่องมือวัดพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์	39
2.6.2 ความต้องการของการตอบสนองความถี่	41
2.6.3 การแสดงผลการวัดฮาร์โมนิกส์	42
2.6.4 ทรานสดิวเซอร์สำหรับการวัดฮาร์โมนิกส์	43
2.7 ค่าดัชนีความผิดเพี้ยนของสัญญาณ	44
2.7.1 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion factor : DF)	44
2.7.2 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (Distortion Power : D)	45
2.7.3 ค่า Root Mean Square	45
2.7.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (THD)	45
2.8 มาตรฐานและข้อกำหนดกฎเกณฑ์ของฮาร์โมนิกส์	46
2.9 หลักการของการสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	51
<b>บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง</b>	
3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ	56
3.2 การหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	63
3.2.1 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)	63
3.2.2 ขั้นตอนหาจำนวนโหนดในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	63
3.3 ทำการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของชุดโครงข่ายประสาทเทียมกับ เครื่องมือวัด	65
3.3.1 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub เดียวกัน	65
3.3.2 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจากคนละ Sub	66
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและบทสรุป</b>	
4.1 การหาโครงสร้างที่เหมาะสมของชุดโครงข่ายประสาทเทียม	69
4.2 การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกส์ของโครงข่าย กับเครื่องมือวัด	70

บรรณานุกรม  
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 การรวมตัวของคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน	5
รูปที่ 2-2 ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ	6
รูปที่ 2-3 ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 และ 5 ที่ทำให้สัญญาณเพี้ยน	7
รูปที่ 2-4 ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 $f(x)=\sin(x)+(1/3)\sin(3x)$	7
รูปที่ 2-5 สัญญาณความถี่มูลฐานกับฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่เฟสตรงข้ามกันทำให้สัญญาณเพี้ยน	8
รูปที่ 2-6 ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 และ 5 ที่ทำให้สัญญาณเพี้ยน	8
รูปที่ 2-7 สัญญาณความถี่มูลฐานกับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่เฟสตรงกันทำให้สัญญาณเพี้ยน	10
รูปที่ 2-8 วงจรไดโอดบริจด์เรกติไฟร์ 1 เฟส	10
รูปที่ 2-9 รูปคลื่นที่จุดต่างๆ และสเปกตรัมของกระแสด้านเข้า เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุ	11
รูปที่ 2-10 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมของกระแส	12
รูปที่ 2-11 รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าเมื่อความนำ $L_d$ ต่างกัน	12
รูปที่ 2-12 วงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์	13
รูปที่ 2-13 กระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมเมื่อ $i_{L_d}$ อยู่ที่ขอบ	13
รูปที่ 2-14 กระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมเมื่อ $i_{L_d}$ มีค่าเกือบคงที่	14
รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นของกระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมของกระแสมีมุม Overlap	14
รูปที่ 2-16 ผลกระทบอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายที่มีผลต่อตัวประกอบกำลังและแรงดันด้านออก	15
รูปที่ 2-17 วงจรแบบ 3 เฟส 12 พัลส์	15
รูปที่ 2-18 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและกราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่	17
รูปที่ 2-19 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและกราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่	19
รูปที่ 2-20 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	20
รูปที่ 2-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Distribution factor กับลำดับฮาร์มอนิกส์ $n$	21
รูปที่ 2-22 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า	25
รูปที่ 2-23 การต่อแอกทีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกส์ในระบบ	26
รูปที่ 2-24 แสดงไดอะแกรมของการต่ออุปกรณ์แอกทีฟฟิลเตอร์ในแบบขนานกับการ หักล้างฮาร์มอนิกส์ออกจากระบบโดยพิจารณาจากรูป	26
รูปที่ 2-25 แสดงรูปเปรียบเทียบของแอกทีฟฟิลเตอร์ต่อโหลด	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-26 ผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกส์ จากแอกทีฟฟิลเตอร์รวมกันจะได้ไปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์มอนิกส์	29
รูปที่ 2-27 โครงสร้างภายในแอกทีฟฟิลเตอร์	30
รูปที่ 2-28 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานสำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์	31
รูปที่ 2-29 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานสำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์	32
รูปที่ 2-30 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์	33
รูปที่ 2-31 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์	33
รูปที่ 2-32 Discrete Time and Frequency Domain Function	37
รูปที่ 2-33 เครื่องวิเคราะห์ความผิดเพี้ยน	40
รูปที่ 2-34 เครื่องวิเคราะห์กำลัง หรือเครื่องวัดฮาร์มอนิกส์แบบดิจิทัล	40
รูปที่ 2-35 การแสดงผลการวัดสัญญาณของแรงดันหรือกระแส	42
รูปที่ 2-36 การแสดงผลด้วยตัวอักษรและตัวเลขเพื่อแสดงปริมาณต่างๆ	42
รูปที่ 2-37 โครงสร้างและตัวอย่างของเครื่องมือวัดแบบ Rogowski	43
รูปที่ 2-38 หม้อแปลงแรงดันแบบแม่เหล็กแบบต่างๆ	44
รูปที่ 2-39 แสดงการเชื่อมโยงของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ แบบมัลติเลเยอร์	51
รูปที่ 2-40 แสดงเมตริก W และ V ที่มีชั้นซ่อนอินพุท และเอาต์พุทอย่างละ 5 โหนด	52
รูปที่ 2-41 ตัวอย่างฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) รูปแบบต่าง ๆ	53
รูปที่ 3-1 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33MDB1 ที่นำมาใช้ในการทดลอง	56
รูปที่ 3-2 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33DB11 ที่นำมาใช้ในการทดลอง	57
รูปที่ 3-3 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33DB12 ที่นำมาใช้ในการทดลอง	57
รูปที่ 3-4 Sub station ที่ทำการวัดค่า	58
รูปที่ 3-5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณ	58
รูปที่ 3-6 แสดงการวัดค่าสัญญาณ	59
รูปที่ 3-7 แสดงการวัดค่าสัญญาณกระแส	59
รูปที่ 3-8 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของค่าที่วัดได้	61
รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดและ % Error	64
รูปที่ 3-10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณระหว่าง 31MDB1 กับ 33MDB1	67
รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดและ % Error	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพาสซีฟฟิลเตอร์กับแอคทีฟฟิลเตอร์	27
ตารางที่ 2-2 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของIEEE std 519-1992 โดยพิจารณาแรงดัน ตั้งแต่ 120 โวลต์ ถึง 69 กิโลโวลต์	47
ตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 โดยพิจารณาที่แรงดันที่สูงกว่า 69 กิโลโวลต์ ถึง 161 กิโลโวลต์	48
ตารางที่ 2-4 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 โดยพิจารณาที่แรงดันที่สูงกว่า 161 กิโลโวลต์	48
ตารางที่ 2-5 การกำหนดค่า Total Harmonics Distortion ของแรงดันโดยขึ้นกับการ จำกัดแรงดันของระบบ	50
ตารางที่ 3-1 ค่าที่ได้จากการ Sampling รูปคลื่นสัญญาณ 1 ลูกคลื่น 128 ค่า	60
ตารางที่ 3-2 ค่าของชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ	62
ตารางที่ 3-3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายประสาทเทียม	63
ตารางที่ 3-4 แสดงผลการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม	64
ตารางที่ 3-5 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด	66
ตารางที่ 3-6 ชุดทดสอบใหม่ 5 ค่าที่ได้จาก 31MDB1	66
ตารางที่ 3-7 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด	68
ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด	70
ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด โดยใช้ชุดทดสอบอีก Sub หนึ่ง	72

## บทที่ 1

### บทนำ (Introduction)

#### 1.1 ชื่อโครงการ (Project Title)

การวัดค่าฮาร์โมนิกส์โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้า

( Harmonics Measurement by Using Neural Networks in Power System )

#### 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ปัญหาเนื่องจากฮาร์โมนิกส์เริ่มมีมากขึ้นเนื่องจากการใช้โหลดที่ไม่เชิงเส้นอย่างแพร่หลายทำให้ปัญหาและผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆจึงเป็นเรื่องที่ต้องมีการวัดและตรวจสอบเพื่อหาทางป้องกันและแก้ไขต่อไปโดยทฤษฎีปัจจุบันที่ใช้ในการวัดค่าและวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์ปัจจุบันจะใช้วิธีการของการแปลงอนุกรมทางฟูเรียร์หรือ Fourier Transform ในการเปลี่ยนสัญญาณทางคาบเวลาไปเป็นสัญญาณทางคาบความถี่ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวยังมีขีดจำกัดในการวัดอยู่กล่าวคือยังมีขีดจำกัดในเรื่องการสุ่มสัญญาณข้อมูลอย่างน้อย 1 ลูกคลื่นในการวัดและต้องใช้ในการคูณกันของสมการเชิงซ้อน  $N^2$  ครั้งสำหรับการสุ่มสัญญาณจำนวน  $N$  ค่าในการประมวลผลอีกทั้งปัญหาที่ก่อให้เกิดการผิดพลาดต่อการวัดตัวอย่างเช่น การเกิดการ Aliasing หรือการเลือกสัญญาณข้อมูลต่ำเกินไป หรือแม้กระทั่งความผิดพลาดที่เกิดจากการสุ่มสัญญาณที่คาบในการสุ่มไม่ตรงกับคาบเวลาของสัญญาณข้อมูลหรือ Unynchronous Sampling การแก้ไขปัญหาลดปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการวัดและประมวลผลของสัญญาณฮาร์โมนิกส์

เนื่องจากปัญหาของการเกิดการ Aliasing ของสัญญาณข้อมูลรวมทั้งข้อจำกัดของทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณทางเวลาไปเป็นสัญญาณทางความถี่ส่งผลให้ข้อมูลที่เราวัดได้มีความผิดพลาดและอาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์และการแก้ไขปัญหาของฮาร์โมนิกส์ ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการหาทางลดปัญหาดังกล่าวและเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณข้อมูลที่มีความรวดเร็วและมีความถูกต้องมากขึ้น

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objectives)

เพื่อศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าฮาร์โมนิกส์และการพัฒนาโปรแกรมโดยการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดของการตรวจจับ วัดค่าของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Project Outcomes)

แบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เข้าใจถึงทฤษฎี ลักษณะ รูปแบบ แหล่งกำเนิด และผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมไปถึงการวิจัย วิเคราะห์ ประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ในการหาค่าฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีการแปลงสัญญาณทางฟูเรียร์

ส่วนที่ 2 สามารถนำระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดในการตรวจจับวัดค่าฮาร์โมนิกส์ได้

### 1.5 ขอบเขตของโครงการ (Scope of the Project)

ทำการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดของการตรวจจับวัดค่าฮาร์โมนิกส์

### 1.6 การจัดโครงสร้างเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ (Thesis structure)

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ชื่อโครงการ (Project Title)

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objectives)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Project Outcomes)

1.5 ขอบเขตของโครงการ (Scope of the Project)

1.6 การจัดโครงสร้างเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ (Thesis structure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 เอกสารอ้างอิง (References)

### บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 2.1 ทฤษฎีฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.1 ส่วนนำ

##### 2.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.4 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์และอุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.5 หลักการของอนุกรมฟูเรียร์สำหรับหาค่าฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.6 เครื่องมือวัดและวิธีการวัดปริมาณฮาร์โมนิกส์

##### 2.1.7 ค่าดัชนีความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

##### 2.1.8 มาตรฐานและข้อกำหนดกฎเกณฑ์ของฮาร์โมนิกส์

#### 2.2 หลักการของการสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

### บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง

#### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ

#### 3.2 การหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

##### 3.2.1 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

##### 3.2.2 ขั้นตอนหาจำนวนโหนดในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

#### 3.3 ทำการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของชุดโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด

##### 3.3.1 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub เดียวกัน

##### 3.3.2 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจากคนละ Sub

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการทดลองและบทสรุป

4.1 การหาโครงสร้างที่เหมาะสมของชุดโครงข่ายประสาทเทียม

4.2 การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกซ์ของโครงข่าย

กับเครื่องมือวัด

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

### 1.7 เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Jos Arrillaga , Bruce C Smith , Neville R Watson and Alan R Wood , “Power system harmonic analysis” , John Wiley & Sons, c1997 , pp 7-31
- [2] Neural Network Toolbox, User’s Guide, The Mathworks Inc., January 1998.
- [3] Pecharanin N., Sone, M., Mitsui H, “An application of neural network for harmonic detection in activefilter” ,WCCI-ICNN’94,Vol.6 ,NO.684,P.3756 (1994)
- [4] A Report by Schneider Electric “Power Logic Solution” Schneider Electric Newsletter Vol . 33, January-March 2007
- [5] เตชา ชุมพาลี “เครื่องปล่อยของเหลวควบคุมโดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก” วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [6] รศ.ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก “ฮาร์โมนิกซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Harmonics)” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พิมพ์ครั้งที่ 2, 2549
- [7] เอกสารประกอบการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

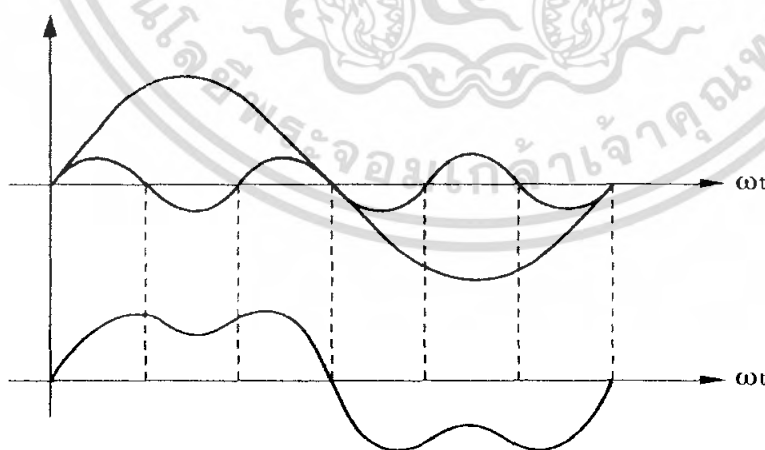
## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 2.1 ส่วนนำ

#### ฮาร์โมนิกส์ คือ อะไร

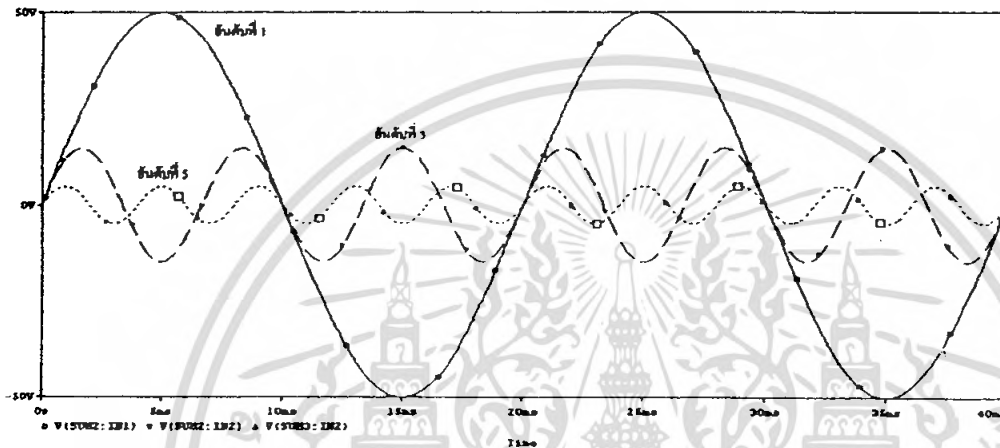
ฮาร์โมนิกส์ก็คือสัญญาณรูปไซน์ ที่มีความถี่นอกเหนือไปจากความถี่ของระบบ แต่เมื่อสัญญาณเหล่านี้เข้ามาพร้อมกับสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ตามปกติก็จะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ แต่มีครบและความถี่เท่ากับคาบและความถี่ของสัญญาณปกติ ตัวอย่างเช่น ถ้าความถี่ของระบบ คือ 50 Hz ซึ่งมีความคาบของสัญญาณเท่ากับ 20 ms รวมกับสัญญาณที่มีความถี่ถึง 150 Hz ซึ่งมีความคาบเท่ากับ  $20/3$  ms ก็จะได้รูปคลื่นใหญ่ที่ไม่ใช่คลื่นรูปไซน์ แต่ยังมีความถี่ 50 Hz และคาบ 20 ms เหมือนเดิม กรณีเช่นนี้เราจะถือว่าระบบมีฮาร์โมนิกส์ที่สาม ในโลกแห่งความเป็นจริง ระบบเพียงระบบเดียวอาจมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ยิ่งฮาร์โมนิกส์มากเท่าใดรูปคลื่นรวมก็จะมีรูปร่างแปลกไปจากคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเท่านั้นนอกจากนี้ขนาดของ ฮาร์โมนิกส์ต่างๆที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้รูปคลื่นรวมมีหน้าตาแตกต่างกันไป แล้วแต่ว่ามีฮาร์โมนิกส์ใดมากน้อยเท่าใด



รูปที่ 2-1 การรวมตัวของคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

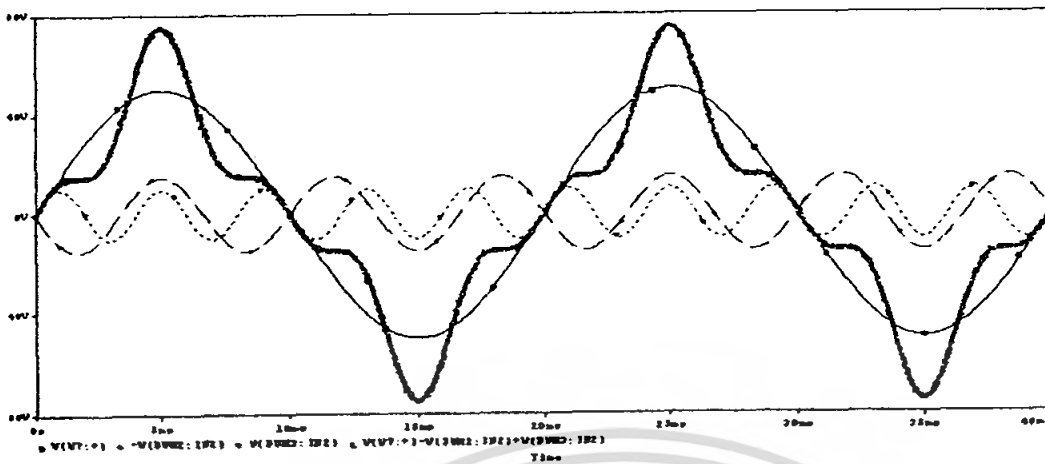
ฮาร์มอนิกส์คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ในระบบไฟฟ้าเรามีค่าเท่ากับ 50 Hz เช่น ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz และฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz แสดงดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ

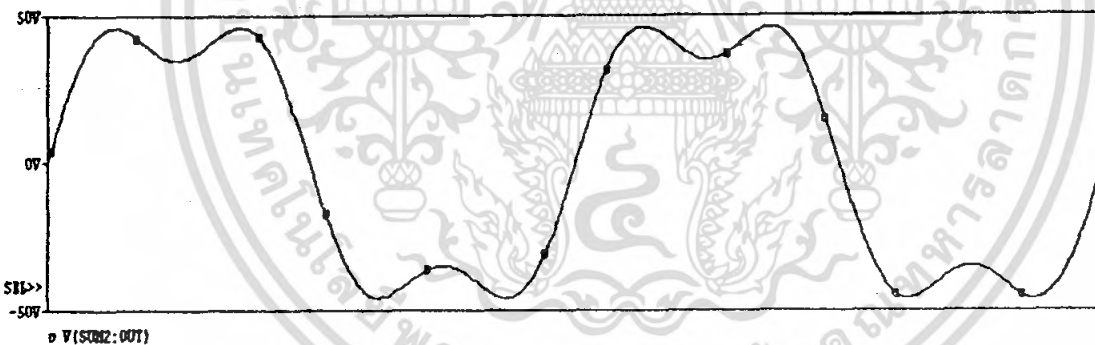
และผลของฮาร์มอนิกส์เมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาดและมุมเฟสทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีไปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ดัง รูปที่ 2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



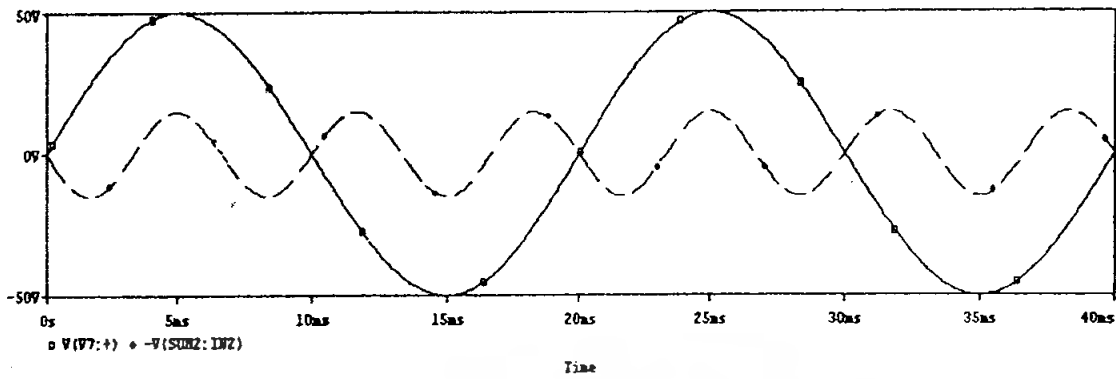
รูปที่ 2-3 ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 และ 5 ที่ทำให้สัญญาณเพี้ยน

ในกรณีที่  $n = 0$  จะเป็นความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือกรณีที่  $n$  มีค่ามากกว่าศูนย์เราเรียกความถี่นี้ว่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่  $n$  ซึ่งเป็นได้ทั้งลำดับคู่และคี่ แสดงถึงความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากการรวมสัญญาณคลื่นไซน์ที่ ความถี่หลักมูลกับคลื่นไซน์ที่เป็นฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ดังรูปที่ 2-4 และรูป 2-5 ตามลำดับ

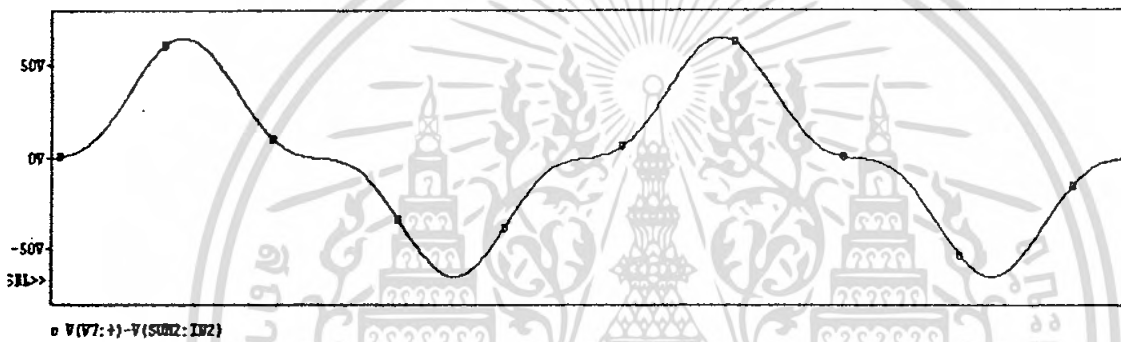


รูปที่ 2-4 ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3  $f(x) = \sin(x) + (1/3)\sin(3x)$

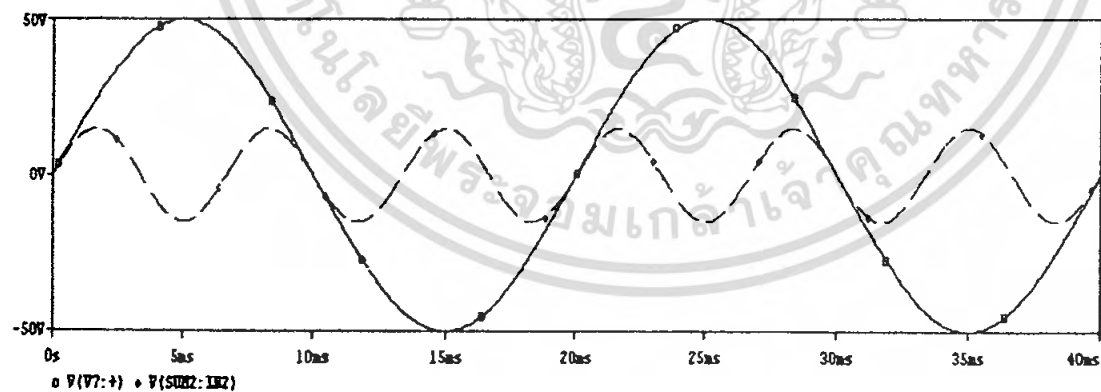
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-5 สัญญาณความถี่มูลฐานกับฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่เฟสตรงข้ามกันทำให้สัญญาณเพี้ยน



รูปที่ 2-6 ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 และ 5 ที่ทำให้สัญญาณเพี้ยน



รูปที่ 2-7 สัญญาณความถี่มูลฐานกับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่เฟสตรงกันทำให้สัญญาณเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โหลดของระบบไฟฟ้า

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งทั่วไปแล้วจะแสดงอยู่ในเทอมของฮาร์โมนิกส์ โดยที่สาเหตุหลักความผิดเพี้ยนนั้นมาจากโหลดทางไฟฟ้าที่อยู่ในระบบไฟฟ้า เราสามารถจำแนกโหลดได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ

โหลดที่มีคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้น (linear load)

โหลดที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear load)

โดยโหลดที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเป็นสาเหตุหลักที่สร้างฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าหรือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

เมื่อโหลดดึงกระแส  $i_s$  จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และทำให้แรงดันที่จุดต่อรวมที่  $v_1$  มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากแรงดันแหล่งจ่าย ดังสมการ

$$v_1 = v_s - L_s di_s / dt \quad 2.1$$

และเมื่อกระแส  $i_s$  เปลี่ยนแปลงไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ แรงดันที่  $V_1$  ก็จะมีค่าผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ซึ่งแรงดันนี้จะประกอบไปด้วยแรงดันที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ รวมอยู่ด้วย

## ความสำคัญของการศึกษาฮาร์โมนิกส์

กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ดังนั้นเราจึงต้องตระหนักถึงผลกระทบของฮาร์โมนิกส์เพื่อที่จะพยายามสร้างสมดุลระหว่างการทำงานในสภาวะที่ แรงดันหรือกระแสเกิดความผิดเพี้ยน และการควบคุมแรงดันหรือกระแสไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยน รวมไปถึงการป้องกันระบบและอุปกรณ์ต่างๆด้วย

## 2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

### แนวคิด

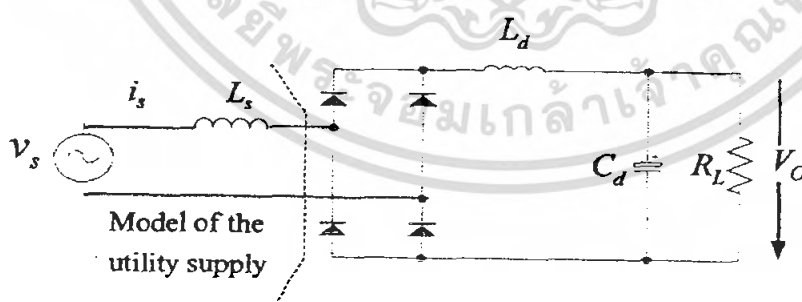
ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ โดยที่กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักมาจากคุณลักษณะของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้กระแสแปรผันไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน ส่งผลให้เกิดค่ากระแสที่มีความผิดเพี้ยนขึ้นมา

### 2.2.1 เครื่องแปลงผันแบบสถิต (The Static Converters)

#### 1.1 คอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำ (Small Power converters)

โหลดทางไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดกำลังต่ำ ส่วนมากจะต่อกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส เช่น เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เครื่องประจุแบตเตอรี่ เป็นต้น โดยปกติอุปกรณ์เพียงตัวเดียวมีผลต่อการเกิดฮาร์โมนิกส์เท่าใดนัก แต่ถ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้หลาย ๆ เครื่องทำงานพร้อมกันก็จะส่งผลให้เกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบกำลังไฟฟ้าสูงมากขึ้นได้

วงจรพื้นฐานที่นิยมใช้เป็นวงจรไดโอดบริจด์เรกติไฟร์ 1 เฟส



รูปที่ 2-8 วงจรไดโอดบริจด์เรกติไฟร์ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $L_s$  เป็นอินดักแตนซ์ ทางด้าน AC (ขาเข้า)

$L_d$  เป็นอินดักแตนซ์ ทางด้าน DC (ขาออก)

$C_d$  เป็นตัวเก็บประจุทางด้าน DC (ขาออก)

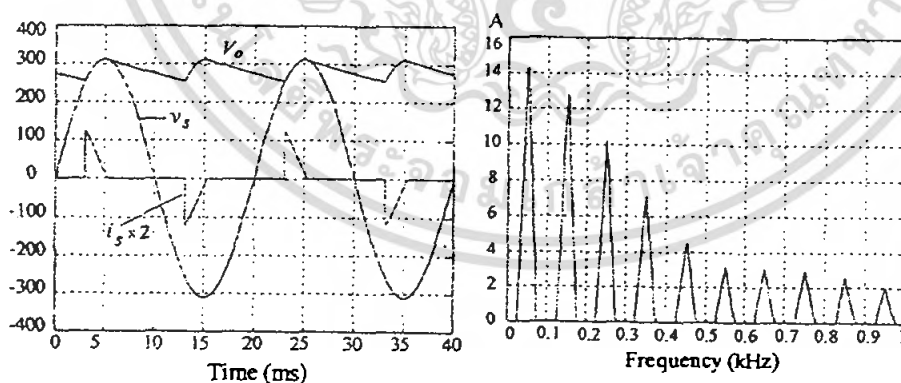
$V_s$  เป็นแรงดันทางด้าน AC (ขาเข้า)

$V_o$  เป็นแรงดันทางด้าน DC (ขาออก)

$I_s$  กระแสทางด้าน AC (ขาเข้า)

$R_L$  โหลด

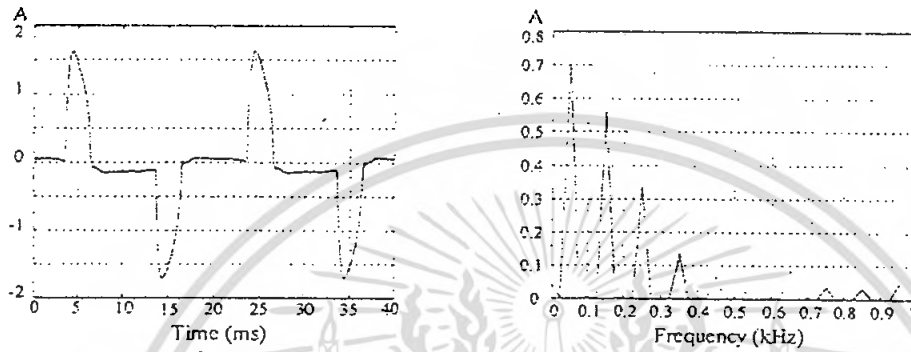
ผลกระทบของ  $C_d$  ส่งผลให้แรงดันด้านขาออกเรียบ ลดการกระเพื่อมให้น้อยลง ยิ่งค่าตัวเก็บประจุสูงก็จะทำให้แรงดันขาออกยิ่งเรียบขึ้น แต่จะมีผลต่อกระแสด้านขาเข้า มีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีค่ายอดสูงกว่าค่า rms มากและมีกระแสฮาร์โมนิกส์ปะปนมาสูงมาก ยิ่งแรงดันด้านขาออกกระเพื่อมน้อยลงก็จะมีผลให้ค่ายอดของกระแสด้านเข้ามีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2-9 รูปคลื่นที่จุดต่างๆ และสเปกตรัมของกระแสด้านเข้า เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุ

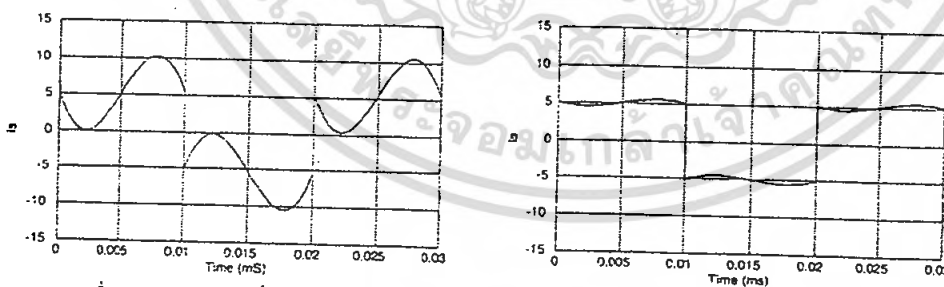
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของ  $L_s$  ทำให้กระแสด้านขาเข้ามีความเป็นรูปคลื่นไซน์มากขึ้นกระแสฮาร์โมนิกส์ลดน้อยลงแต่จะส่งผลให้ค่ามุดต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสมากขึ้น ทำให้ตัวประกอบกำลังลดลงแรงดันด้านขาออกลดลงเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2-10 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมของกระแส

ผลกระทบของ  $L_d$  ถ้า  $L_d$  มีค่าสูงมากจะทำให้กระแสทางด้านขาเข้าจะมีความต่อเนื่อง กระแสด้านขาเข้าที่ดีที่สุดจะมีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีค่าตัวประกอบกำลังสูงสุด



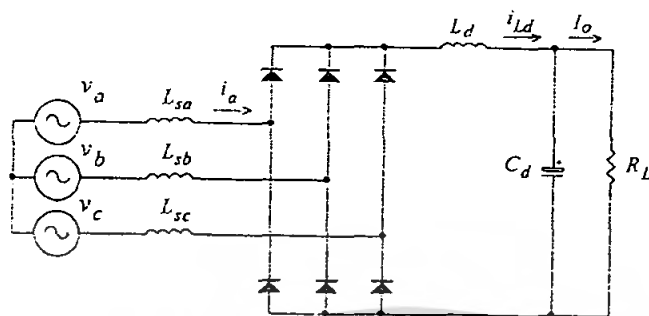
(ก) เมื่อกระแส  $i_{Ld}$  อยู่ที่ Boundary

(ข) เมื่อกระแส  $i_{Ld}$  มีความต่อเนื่องสูง

รูปที่ 2-11 รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าเมื่อความนำ  $L_d$  ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

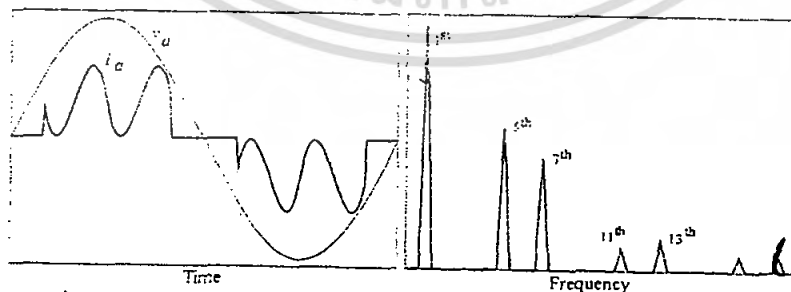
## 1.2 คอนเวอร์เตอร์กำลังปานกลาง (Medium Power converters)



รูปที่ 2-12 วงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์

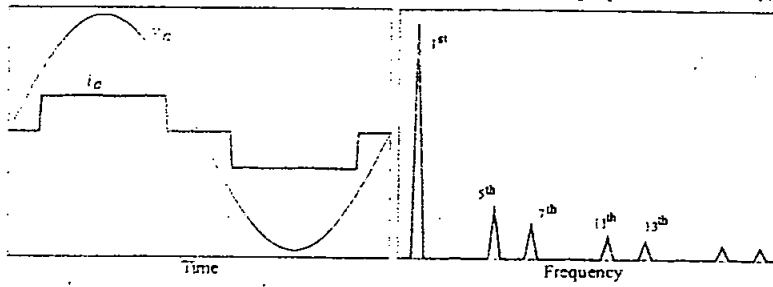
วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังปานกลางในย่าน 10-100 kW วงจรที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางคือ วงจรเรกติไฟเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์เนื่องจากแรงดัน DC ด้านขาออกมีการกระเพื่อมต่ำ ผลกระทบของ  $L_d$

แรงดัน DC ด้านออกสามารถทำให้เรียบขึ้นได้โดยทำการต่อวงจรกรอง L-C ดังรูป ในกรณีที่ค่า  $L_d$  ต่ำทำให้กระแส  $i_{Ld}$  มีความไม่ต่อเนื่องแล้ว กระแสด้านเข้าจะเป็นพัลส์ที่มีค่ายอดสูง ผลคือทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสโดยรวมสูง และค่าตัวประกอบกำลังของวงจรต่ำ แต่ถ้าเราเพิ่มค่า  $L_d$  ให้มากขึ้นจนทำให้กระแสด้านเข้ามีความต่อเนื่องคือเป็นรูปคลื่น quasi-square จะส่งผลให้มีความผิดเพี้ยนน้อยลง ค่าตัวประกอบกำลังมากขึ้น แต่แรงดันขาออกก็จะมีผลกระทบมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2-13 กระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมเมื่อ  $i_{Ld}$  อยู่ที่ขอบ

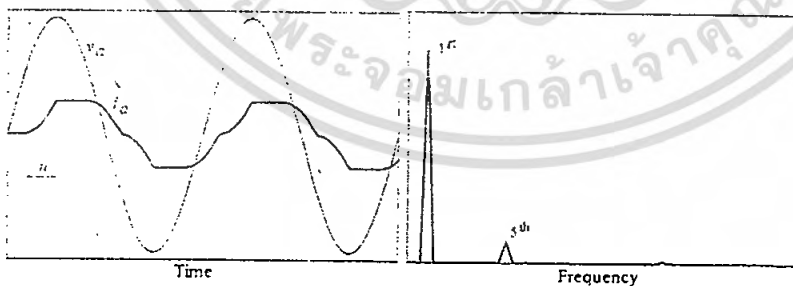
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



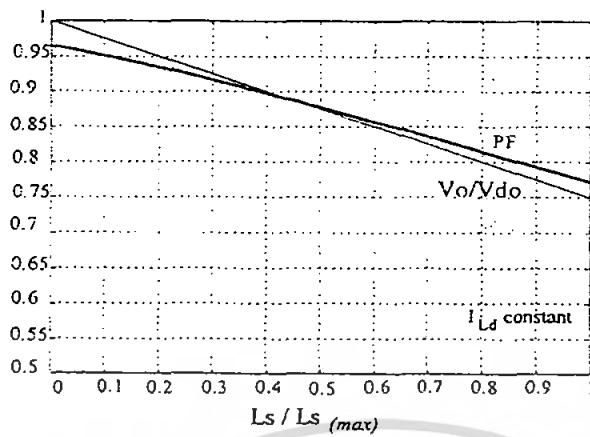
รูปที่ 2-14 กระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมเมื่อ  $i_{L_D}$  มีค่าเกือบคงที่

### ผลกระทบของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ( $L_{Sa}, L_{Sb}, L_{Sc}$ )

อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะมีผลอย่างมากต่อแรงดัน DC ด้านออก รูปคลื่นกระแสด้านเข้าและรวมไปถึงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรด้วย ถ้าให้  $i_{L_D}$  มีค่าคงที่ ถ้าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงขึ้นมันจะมีผลต่อการทำงานของวงจรในช่วงการเปลี่ยนสถานะการทำงานของไดโอด และมีแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะช้าลงและเกิดมุมล้ำหลังของกระแสขึ้น (Overlap angle,  $\mu$ ) จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้นรูปคลื่นจะเข้าใกล้ไซน์ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนลดลงแต่เนื่องจากเกิดมุม overlap เลื่อนเฟสของกระแสล้ำหลังออกไปจึงทำให้มุมต่างเฟสเมื่อเทียบกับแรงดันมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าลดลงและในขณะเดียวกันแรงดัน DC ด้านออกก็มีค่าลดลงเช่นกัน



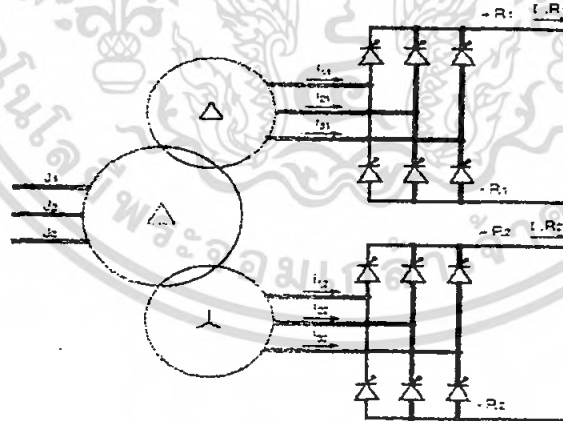
รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นของกระแสเทียบกับแรงดันและสเปกตรัมของกระแสมีมุม Overlap



รูปที่ 2-16 ผลกระทบอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายที่มีผลต่อตัวประกอบกำลังและแรงดันด้านออก

### 1.3 คอนเวอร์เตอร์กำลังสูง (High Power converters)

โดยทั่วไปแล้ววงจรทางด้าน DC จะมีความเหนี่ยวนำสูงกว่าทางด้าน AC ดังนั้นกระแส DC จะมีค่าคงที่วงจรที่นิยมใช้จะเป็นวงจร 3 เฟส 12 พัลส์



รูป 2-17 วงจรแบบ 3 เฟส 12 พัลส์

กระแสด้านเข้าจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์จึงทำให้มีความผิดเพี้ยนต่ำและค่าตัวประกอบกำลัง

มีค่าเข้าใกล้ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 เตาหลอมโลหะ (Arc furnace)

จะแบ่งเป็นออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบ AC และแบบ DC

แบบ AC เป็นโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่สมมาตรและไม่เสถียร โดยที่วงจรกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่มีทั้งลำดับคู่และลำดับคี่และยังมีสเปกตรัมต่อเนื่อง สเปกตรัมจะที่เกิดขึ้นอยู่กับชนิดของเตาหลอม อัตรากำลัง สถานะการทำงาน

แบบ DC การอาร์คจะผ่านวงจรเรกติไฟเออร์ จะมีความเสถียรมากกว่า AC กระแสที่ติงมาจะมีลักษณะคล้ายกับที่กล่าวมาแล้ว

## 2.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แกนเหล็กในอุดมคติถ้าแรงดันด้านเข้าเป็นไซน์กระแสด้านเข้าก็ต้องเป็นไซน์ด้วย แต่ในความเป็นจริงจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซิส ดังนั้นกระแสจึงไม่เป็นไซน์ตามแรงดันจึงเกิดความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น

## 2.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

### แนวคิด

กระแสฮาร์โมนิกส์และแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า อุปกรณ์รวมไปถึงการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ อาจก่อให้เกิดความสูญเสียความเสียหาย หรือลดประสิทธิภาพการทำงานของระบบไฟฟ้า เช่น

- เกิดการขยายระดับปริมาณฮาร์โมนิกส์เนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ของระบบ ทั้งแบบเรโซแนนซ์อนุกรมหรือเรโซแนนซ์แบบขนาน
- ประสิทธิภาพของการผลิต การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลง ระบบป้องกันการวัดปริมาณไฟฟ้าเกิดความผิดพลาด
- อายุการใช้งานของฉนวนไฟฟ้าลดลงส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าสั้นลงด้วย
- การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตำหนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

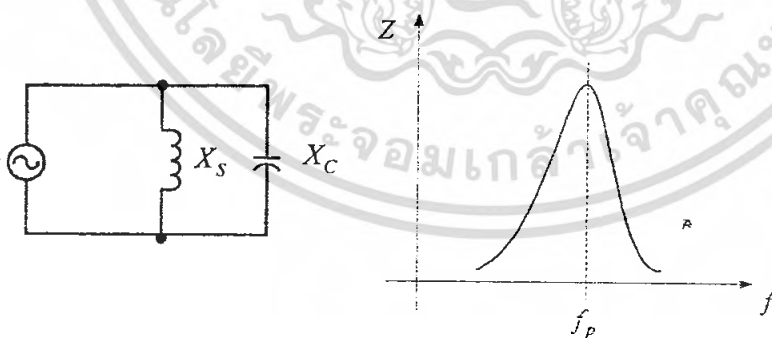
ปัญหาต่างๆจะมีผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะคุณสมบัติของ วงจรไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า และระดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นด้วย

### 2.3.1 คุณลักษณะของการเกิดเรโซแนนซ์

การเกิดเรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ และคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์มีค่าเท่ากันที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลเกิน (เกิดเรโซแนนซ์อนุกรม) หรือทำให้เกิดแรงดันสูงเกิน (เกิดเรโซแนนซ์ขนาน) การเกิดเรโซแนนซ์อนุกรม เกิดเรโซแนนซ์ขนาน จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะการต่อวงจรของระบบไฟฟ้า

#### เรโซแนนซ์ขนาน

คุณสมบัติของเรโซแนนซ์ขนานจะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ ของระบบมีค่าสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะส่งผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าสูงตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งอาจจะสามารถทำให้ตัวเก็บประจุระเบิดได้ ในกรณีที่ค่าแรงดันนั้นสูงกว่าค่าพิคคของตัวเก็บประจุ ดังนั้นที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ และคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์มีค่าเท่ากัน ซึ่งความถี่นี้คือความถี่เรโซแนนซ์นั่นเอง



(ก) วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

(ข) คุณลักษณะสมบัติของวงจร

รูปที่ 2-18 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและกราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่

ดังนั้นที่ความถี่ใดๆ

$$\text{อินดักตีฟรีแอคแตนซ์} = nX_s$$

$$\text{คาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์} = \frac{X_c}{n}$$

เมื่อ  $X_s$  และ  $X_c$  เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นเมื่อเกิดเรโซแนนซ์จึงทำให้

$n$  เป็นลำดับฮาร์โมนิกส์

$f_p$  เป็นความถี่เรโซแนนซ์ขนาน

$f_i$  เป็นความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้า

$$Xn_s = \frac{X_c}{n}$$

2.2

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}}$$

2.3

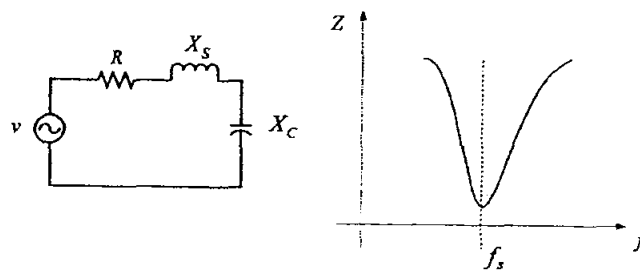
หรือความถี่เรโซแนนซ์ขนานคือ

$$f_p = f_i \sqrt{\frac{X_c}{X_s}}$$

2.4

### เรโซแนนซ์อนุกรม

เรโซแนนซ์อนุกรมเป็นผลมาจากการอนุกรมกันของตัวเก็บประจุและสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ ถ้าค่าความถี่อินดักตีฟรีแอคแตนซ์และคาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์มีค่าเท่ากันที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากันคือเท่ากับ 0 แต่มีเฟสตรงกันข้ามเป็นผลทำให้อิมพีแดนซ์ในส่วนของวงจรมีค่าต่ำ จึงเกิดกระแสไหลเกินในระบบ ความถี่ที่จุดนี้คือความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม



รูปที่ 2-19 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและกราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่

ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดเรโซแนนซ์อนุกรม คือ

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{Z_C} - G^2 X_C^2}$$

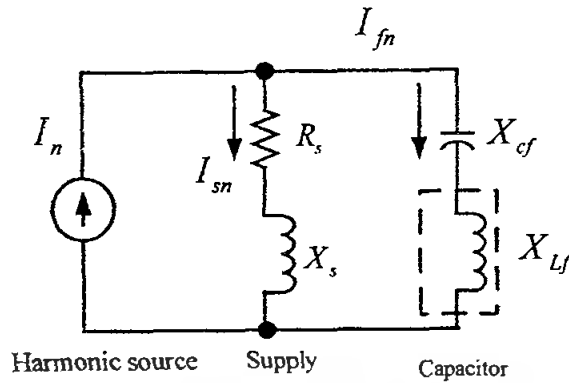
2.5

เมื่อ  $Z_C$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่มีเป็นค่าของ  $X_L$  โดยที่ละเลยความต้านทานของ L

G เป็นค่าความเหนี่ยวนำของโหลด (  $1/R$  )

### 2.3.2 ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า

ถ้าในระบบไฟฟ้าเกิดมีกระแสหรือแรงดันที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใดฮาร์โมนิกส์หนึ่งหรือหลายๆฮาร์โมนิกส์รวมกันอยู่ ก็จะมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ เช่นเกิดการขยายระดับกระแสฮาร์โมนิกส์ (harmonic amplification) ดังตัวอย่างใน รูปที่ 2-14 เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้าและแยกไหลตามสาขาต่างๆดังรูป



รูปที่ 2-20 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

กระแสที่แยกไหลสามารถหาได้ดังนี้

$$I_n = I_{sn} + I_{fn} \quad 2.6$$

$$I_{fn} = \frac{Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \cdot I_n = \rho_{fn} \cdot I_n \quad 2.7$$

$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \cdot I_n = \rho_{sn} \cdot I_n \quad 2.8$$

$$\rho_{fn} = \frac{R_s + jX_{sn}}{R_s + jX_{sn} - jX_{cn}} \quad 2.9$$

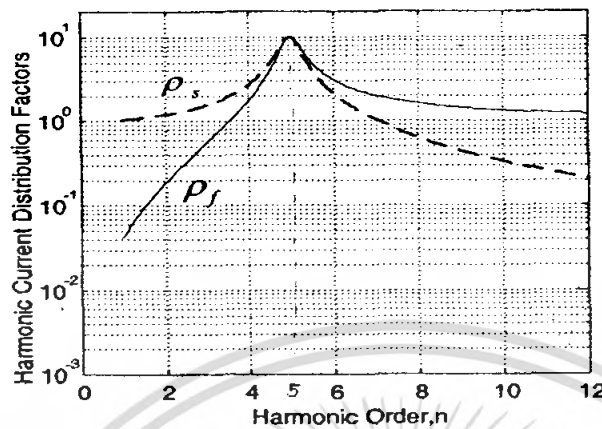
$$\rho_{sn} = \frac{-jX_{cn}}{R_s + jX_{sn} - jX_{cn}} \quad 2.10$$

โดยที่  $\rho$  คือ Distribution factor

จากสมการถ้า  $\rho_{sn}$  และ  $\rho_{fn}$  มีค่าสูงที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใด จะเกิดการขยายของกระแสฮาร์โมนิกส์ โดยมีผลทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลสูงขึ้น ส่งผลให้มีแรงดันฮาร์โมนิกส์สูงขึ้น เป็นผลทำให้ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ได้รับแรงดันที่สูงมากเกินพิกัดและก่อให้เกิดความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Distribution factor กับลำดับฮาร์โมนิกส์  $n$



รูปที่ 2-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Distribution factor กับลำดับฮาร์โมนิกส์  $n$

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ประมาณลำดับที่ 5 ค่า  $p_{sm}$  และ  $p_s$  มีค่าสูงประมาณ 10 กระแสที่ความถี่นี้จะขยายตัวอัตราประมาณ 10 เท่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าสูง เกิดความผิดเพี้ยนสูง (THD<sub>v</sub> มีค่าสูง) อาจส่งผลให้ตัวเก็บประจุระเบิดได้

### 2.3.3 ผลกระทบต่อการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้า

#### 1. ระบบสายส่ง

ประการแรก ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบสายส่งเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแส rms ของกระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่เพิ่มขึ้นมีค่าคือ

$$P = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n$$

2.11

เมื่อ  $I_n$  และ  $R_n$  คือกระแสและความต้านทานที่ความถี่ลำดับฮาร์โมนิกส์  $n$

ประการที่สอง ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของระบบ ยิ่งอิมพีแดนซ์ของระบบมากแสดงว่าระบบไฟฟ้าอ่อนแอความต้านทานสูงค่าความนำต่ำ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก จะมีผลกระทบดังเช่น ในกรณีที่สายส่งเป็นสายเคเบิลผลกระทบเนื่องจากแรงดันฮาร์โมนิกส์จะเพิ่มความเครียดให้กับ Dielectric จะส่งผลให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลลดลง

## 2. หม้อแปลงไฟฟ้า

การเกิดขึ้นของแรงดันฮาร์โมนิกส์จะเป็นการเพิ่มความสูญเสียในฮิสเตอร์ซิสและกระแสไหลวน (Eddy current losses) และทำให้เกิดความเครียดบนฉนวนด้วย การไหลของกระแสฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดความสูญเสียในขดลวด (Copper loss) เพิ่มขึ้น

## 3. ชุดตัวเก็บประจุ

เมื่อมีแรงดันฮาร์โมนิกส์ขึ้นในระบบจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุมากขึ้น ดังสมการ

$$P = \frac{V_{R_s}^2}{R_s} = I^2 R_s \quad 2.12$$

ให้  $V_{R_s} = V_{cc} R_s \omega C$  แทนลงในสมการด้านบน จะได้

$$P = V_{cc}^2 \omega C \tan \delta \quad 2.13$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดจากทุกฮาร์โมนิกส์ได้เป็น

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} C \tan \delta \omega_n V_n^2 \quad 2.14$$

เมื่อให้  $R_s$  คือ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ

$$\tan \delta \text{ คือ ค่า loss factor ของตัวเก็บประจุ } \tan \delta = \frac{R}{X_C} = R\omega C$$

และเมื่อพิจารณาผลรวมกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟของตัวเก็บประจุ จะได้

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$$

2.15

ต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟของตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่

นอกจากนั้น การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมหรือขนาน ร่วมกับกระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าก็จะก่อให้เกิดกระแสหรือแรงดันที่สูงขึ้น ทำให้เกิดความสูญเสียมากขึ้น เกิดความร้อนสูง จนทำให้เกิดความเสียหายของตัวเก็บประจุ

#### 4. ผลกระทบต่อระบบป้องกันทางไฟฟ้า

ฮาร์โมนิกส์สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดหรือลดความสามารถของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective relay) จากการศึกษพบว่าเวลาในการทริปของรีเลย์จะใช้เวลานานขึ้นเมื่อมีปริมาณฮาร์โมนิกส์ในกระแสที่กำลังตรวจจับสาเหตุเกิดจาก CT ที่ใช้ตรวจจับกระแส ไม่สามารถทำงานได้ดีทุกย่านความถี่ กระแสกระชากและการอิ่มตัวของ CT จึงทำให้การทำงานเกิดความผิดพลาด

#### 5. ผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

##### ผลกระทบต่อมอเตอร์

ผลกระทบหลักของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกที่มีต่อมอเตอร์คือ ความร้อนเนื่องจากการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวด เกิดการสั่นทางกล ทอร์คลดลง รวมไปถึงการทำให้ในขณะทำงานเกิดเสียงรบกวนมากขึ้น

##### ผลกระทบต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

- ระบบควบคุมที่ใช้วงจรทรานซิสเตอร์อาจถูกจุดจนวนผิดพลาดเนื่องจากการทำงานจะตรวจจับสัญญาณแรงดันแหล่งจ่ายถ้าสัญญาณมีความผิดเพี้ยนก็จะทำให้เกิดความผิดพลาด

- คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงและอุปกรณ์ต่างๆที่มีอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ควบคุมอยู่ส่วนมากแล้วจะถูกออกแบบให้ทนต่อแรงดันมีความผิดพลาดไม่เกิน 5% ถ้ามีฮาร์โมนิกส์สูงมากเกินไปจะทำให้การทำงานไม่เป็นไปตามที่กำหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้
- เครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ ขนาดของภาพอาจเปลี่ยนแปลง หรือเกิดเสียงรบกวน

## 2.4 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์และอุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกส์

### 2.4.1 วิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์

ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์โมนิกเมื่อใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบอาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์กระแสสูงในระบบซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายประการดังนี้

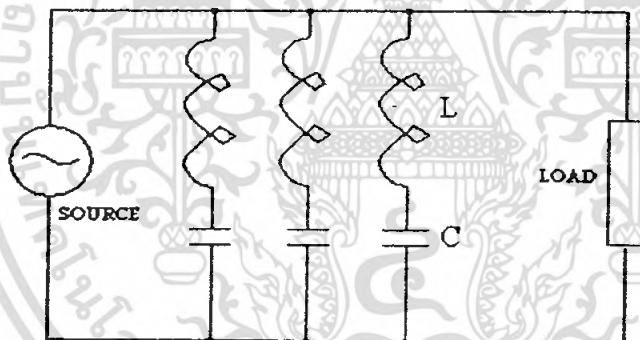
- 1) เปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิก
- 2) ใส่ LC ฟิวเจอร์ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์และปรับ (tune) ให้เข้ากับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดปัญหา LC ฟิวเจอร์ตัวดังกล่าวจะทำให้อิมพีแดนซ์ต่ำที่ฮาร์โมนิกส์ที่มีปัญหา ในกรณี que ใส่ฟิวเจอร์เข้าไปแล้ว นั้นก็ต้องทำการตรวจเช็คต่อไปอีกว่า อาจเกิดเรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์โมนิกส์ตัวอื่นหรือไม่ ถ้าเป็นอย่างนั้นก็ต้องใส่ LC ฟิวเจอร์ กรองฮาร์โมนิกที่มีปัญหาตัวต่อไปอีก
- 3) ใส่ L เข้าไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ไม่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์หรือใส่ L เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นฟิวเจอร์เลย

อีกนัยหนึ่งในการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าคือการใช้อุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกส์เข้ามาช่วยกรองฮาร์โมนิกส์ออกไปจากระบบไฟฟ้า

## 2.4.2 อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกส์

ชนิดของอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกส์

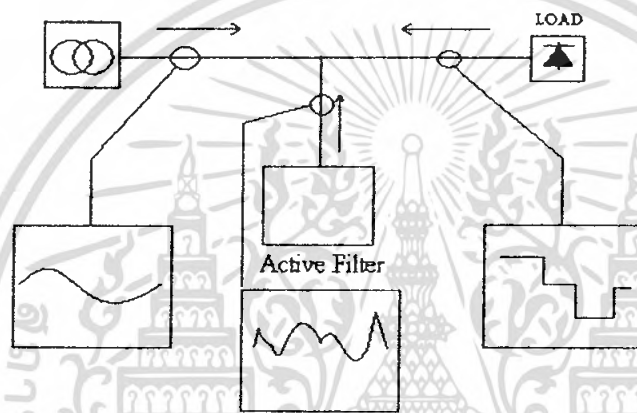
1. **พาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)** หมายถึง อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกส์ที่ประกอบด้วย อุปกรณ์หลักคือ ตัวต้านทาน (R) รีแอคเตอร์ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ที่ได้รับการออกแบบที่มี ค่า R L และ C ที่สัมพันธ์กันจนประพุดติตัวเสมือนลัดวงจร (Low Impedance) สำหรับฮาร์มอนิกส์แต่เป็นเพียงโหลดธรรมดาตัวหนึ่งสำหรับไฟฟ้า 50 Hz ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ จะเห็นพาสซีฟฟิลเตอร์เป็นเสมือนลัดวงจร และกระแสที่ไหลผ่านพาสซีฟฟิลเตอร์นั้นแทบจะไม่ กระทบต่อระบบไฟฟ้าเลย ซึ่งพาสซีฟฟิลเตอร์ เป็นวงจรไฟฟ้าง่ายๆ แต่ต้องทำการออกแบบ และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนรวมถึงการผลิตตัว R L และ C ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำจึงจะ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย พาสซีฟฟิลเตอร์มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ไม่ยืดหยุ่น



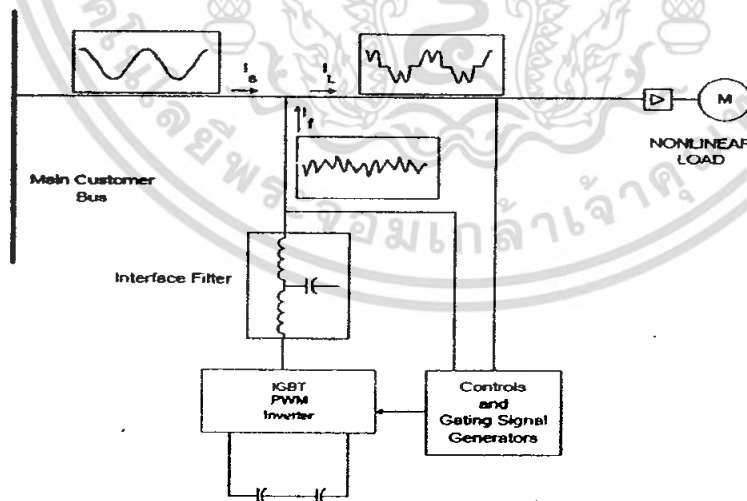
รูปที่ 2-22 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2. แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter)** แอคทีฟฟิลเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ใช้กำลังของ IGBT ประกอบกับระบบควบคุมการทำงานแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์แล้วคำนวณ แล้วจึงทำการฉีดกระแสฮาร์มอนิกในเฟสที่ตรงข้ามกับฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบไฟฟ้า ผลที่ได้คือฮาร์มอนิกจะหักล้างออกไปจนเหลือแต่ความถี่ 50 Hz ดังรูปที่ 2-23 แอคทีฟฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีแต่จะมีราคาสูง

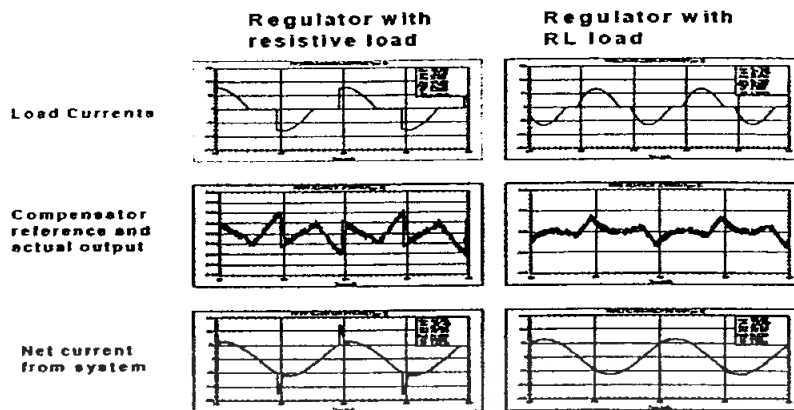


รูปที่ 2-23 การต่อแอคทีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกในระบบ



รูปที่ 2-24 แสดงไดอะแกรมของการต่ออุปกรณ์แอคทีฟฟิลเตอร์ในแบบขนานกับการหักล้างฮาร์มอนิกออกจากระบบโดยพิจารณาจากรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-25 แสดงรูปเปรียบเทียบของแอกทีฟฟิลเตอร์ต่อโหลด

ความสามารถ	แอกทีฟฟิลเตอร์	พาสซีฟฟิลเตอร์
สามารถกรองฮาร์มอนิกจากระบบไฟฟ้าได้ทั้งหมด	ได้	ได้
สามารถกรองได้หลายฮาร์มอนิกในเวลาเดียวกัน	ได้	ได้
ต้องการการวิเคราะห์ระบบอย่างละเอียด	ไม่ต้องการ	ต้องการอย่างยิ่ง
ไม่เกิดโอเวอร์โหลดแม้ฮาร์มอนิกจะมาก	ไม่โอเวอร์โหลด	เกิดได้ง่าย
มีขนาดเล็กและเบา	ใช่	ใหญ่และหนัก
สามารถกรองฮาร์มอนิกได้แม้ในระบบที่มี PF ใกล้ 1.0	ได้	ไม่ได้เพราะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมากเป็นส่วนประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

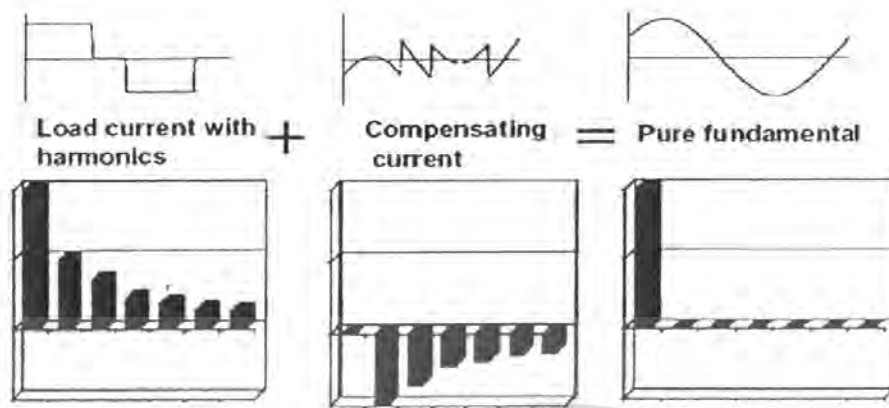
ความสามารถ	แอดทีฟฟิลเตอร์	พาสซีฟฟิลเตอร์
สามารถเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกได้	ได้	ไม่ได้
ต้องเรียงลำดับจากภายหลังได้		
สามารถต่อเพิ่มขนาดได้หากโหลดเพิ่มขึ้น	ได้	อาจเกิดโอเวอร์โหลด ได้
สามารถเลือกฮาร์มอนิกแบบไม่ต่อเนื่อง	ได้	ต้องเรียงลำดับมาก ไป น้อย
สามารถโปรแกรมการทำงานโดยผู้ใช้งาน	ได้	โปรแกรมไม่ได้
สามารถกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่ ต้องการได้	ได้	ไม่ได้,กรองทั้งหมด
ออกแบบเป็นโมดูลสามารถเพิ่มหรือลดได้	ใช่	แก้ไขไม่ได้

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพาสซีฟฟิลเตอร์กับแอดทีฟฟิลเตอร์

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าแอดทีฟฟิลเตอร์นั้นมีข้อดีมากกว่าวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นแอดทีฟฟิลเตอร์จึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 2-26 คือผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกจากแอดทีฟฟิลเตอร์เมื่อพิจารณาในรูปของสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-26 ผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกส์จากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์โมนิกส์จาก

แอดคทีฟฟิลเตอร์รวมกันจะได้ไปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์โมนิกส์

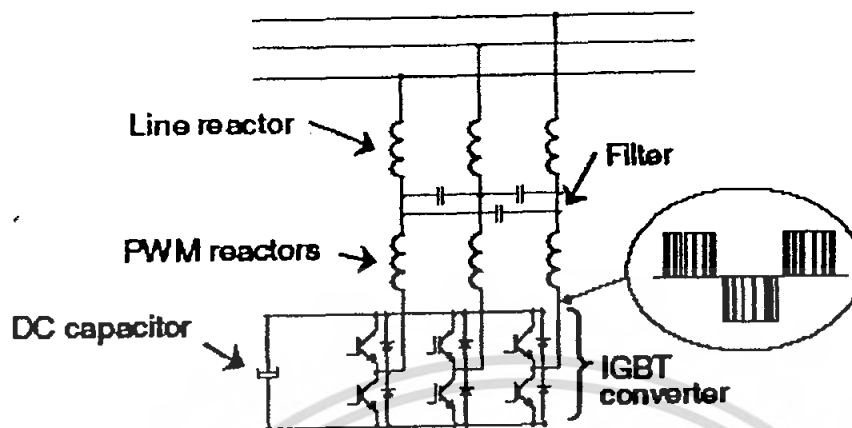
### โครงสร้างภายในแอดคทีฟฟิลเตอร์

1. DC คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็น DC bus เพื่อสร้างระดับไฟตรงอย่างอิง
2. IGBTทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า DC จาก DC bus ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า AC ความถี่สูงโดย DC คาปาซิเตอร์ และ IGBT รวมกันเป็นเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถ โปรแกรมให้จ่ายแรงดัน AC ที่มีความถี่ ขนาด และมุมเฟสตรงตามต้องการได้ แรงดัน AC ความถี่สูงที่ได้จะเป็นผลรวมของแรงดันฮาร์โมนิกส์หลายๆ ฮาร์โมนิกส์รวมกัน
3. รีแอกเตอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อชุด DC คาปาซิเตอร์ และ IGBT กับระบบไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นตัวแปลงแหล่งจ่ายแรงดันให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสตนเอง โดยกระแสที่ได้จะเป็นกระแสฮาร์โมนิกส์หลายๆ ฮาร์โมนิกส์รวมกันเมื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ แล้วจะหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Power Stage

Hardware



รูปที่ 2-27 โครงสร้างภายในแอคทีฟฟิลเตอร์

แอคทีฟฟิลเตอร์นั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการต่อวงจร คือ

1. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน
2. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

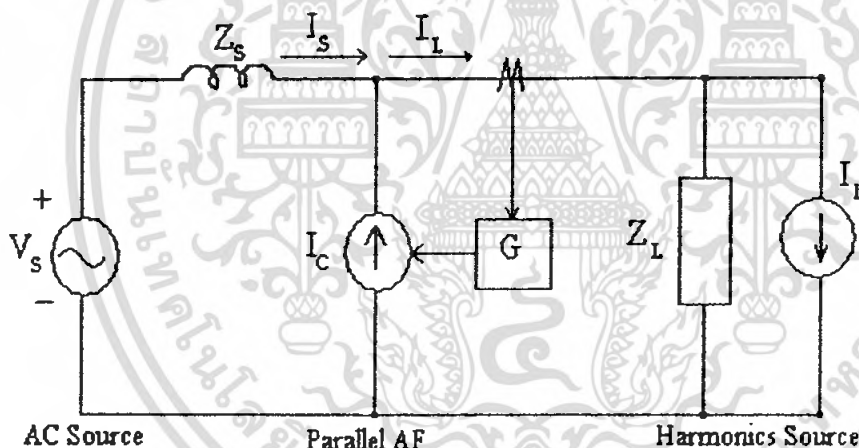
## แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน

แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการ พัลส์บวีสวเอม(pwm) ที่ต่อขนานกับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์เพื่อจี้กระแสชดเชยฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเป็นกระแสที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสตรงข้ามกับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนั้นกลไกสำคัญของการทำงานจะอยู่ที่ความสามารถในการตรวจจیبและคำนวณกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะทำการชดเชยให้ถูกต้อง ซึ่งเป็นส่วนของวงจรควบคุมแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนานวงจรกรองชนิดนี้จะติดตั้งขนานกับโหลดที่สร้างฮาร์โมนิกส์ และวงจรกรองแอคทีฟที่มีใช้งานจริงส่วนใหญ่ก็จะเป็นชนิดนี้

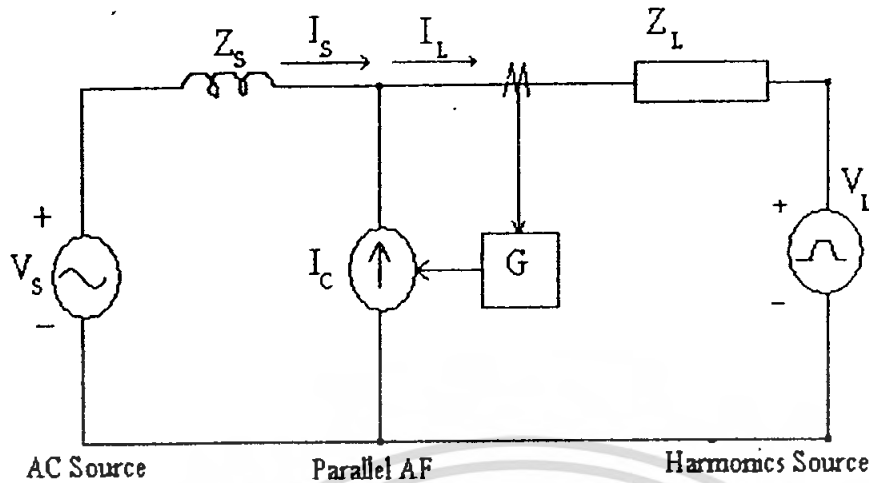
หลักการทํางานของวงจรกรองชนิดนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

1. วงจรกรองแอกทีฟจะประพฤติตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส ที่จ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์โมนิกส์จากโหลดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วงจรกรองแอกทีฟจะจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ให้กับโหลดแทนแหล่งจ่าย หรือใช้สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 2-28

2. วงจรกรองจะประพฤติตัวเป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำหรือความต้านทาน (อิมพีแดนซ์ เสมือน) ค่าต่ำเฉพาะที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลลงในวงจรกรองแอกทีฟ การทํางานจึงคล้ายๆกับกรณีที่ใช้วงจรพาสซีฟ แต่มีข้อดีคือไม่มีการดึงกระแสแอกทีฟที่ความถี่ 50 Hz และสามารถกำหนดค่าอิมพีแดนซ์เสมือนให้มีค่าต่ำกว่าในกรณีวงจรกรองพาสซีฟมาก จึงมีคุณสมบัติการกรองที่ดีกว่าใช้สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 2-29



รูปที่ 2-28 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานสำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์



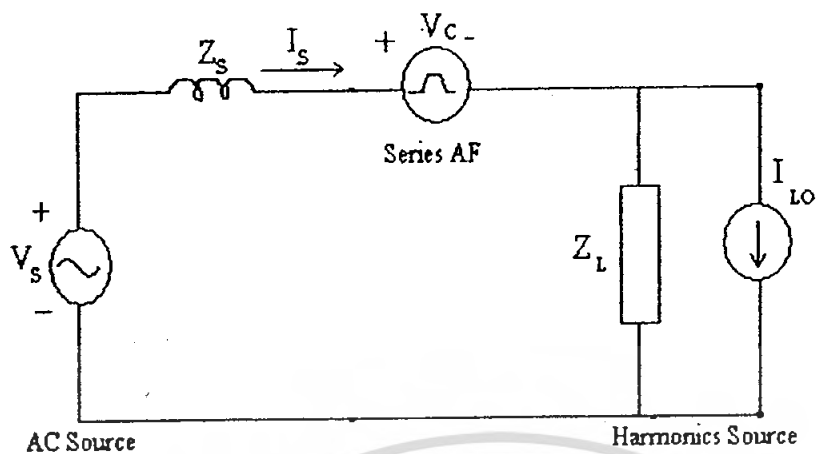
รูปที่ 2-29 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานสำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์

### แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

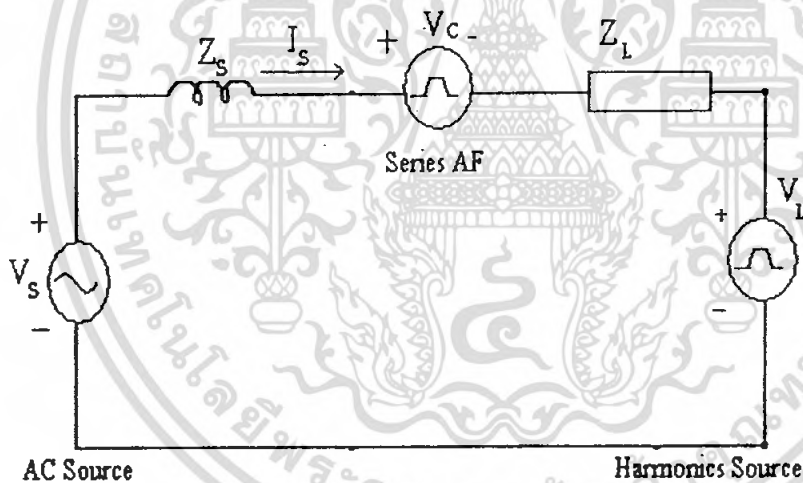
แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม จะเป็นการต่อวงจรอนุกรมระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ กับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่เป็นโหลด เพื่อทำการบังคับกระแสแหล่งจ่ายให้มีความเป็นไซน์ โดยที่แอกทีฟฟิลเตอร์อนุกรมนี้จะทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์สูงกับกระแสฮาร์มอนิกส์เพื่อกั้นขวางไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกส์ไหลจากโหลดไปสู่แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับไปสู่โหลดได้

แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรมสามารถแบ่งตามประเภทการทำงานได้อีก 2 ประเภทคือ

1. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ดังรูปที่ 2-30
2. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังรูปที่ 2-31



รูปที่ 2-30 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 2-31 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างภายในแอกทีฟฟิลเตอร์

การควบคุมการทำงานของแอกทีฟฟิลเตอร์ มีหลักการดังนี้

1. แอกทีฟฟิลเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณกระแส analog จาก CT เป็นสัญญาณดิจิทัล
2. DSP (Digital signal processor) จะทำหน้าที่วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยใช้ FFT เพื่อตรวจอันดับของฮาร์มอนิกส์และปริมาณ จากนั้นวงจรจะคำนวณปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการเพื่อใช้หักล้างทุก ๆ ฮาร์มอนิกส์ให้ผ่านเกณฑ์ที่ต้องการแล้วส่งสัญญาณต่อไปกับชุดควบคุม IGBT
3. Microcontroller ทำหน้าที่เชื่อมต่อการทำงานระหว่างผู้ใช้งานกับแอกทีฟฟิลเตอร์โดยผู้ใช้งานสามารถสั่งงานและโปรแกรมแอกทีฟฟิลเตอร์ผ่านแป้นพิมพ์ และจอภาพของแอกทีฟฟิลเตอร์ได้ นอกจากนี้จอภาพยังใช้แสดงสถานะการทำงานแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกส์ ทั้งในรูปของตัวเลข ตาราง และรูปภาพ

## ข้อควรระวังในการใช้วงจรกรองแบบแอกทีฟ

วงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน เหมาะสำหรับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์สูงเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย มิฉะนั้นแล้วกระแสที่จ่ายจากวงจรกรองแอกทีฟจะไหลย้อนกลับไปที่ทางด้านโหลดและทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบได้ในกรณีที่จะนำไปใช้กับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำเช่น วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุ (ซึ่งจะพบได้ทั่วไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอินเวอร์เตอร์ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์) เราอาจทำการเพิ่ม AC/DC reactor อนุกรมกับโหลดได้ซึ่งจะช่วยลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านโหลดได้พร้อมๆ กัน

วงจรกรองแอกทีฟที่ผลิตในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ใช้ FFT ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกส์เฉพาะอันดับที่กำหนด จึงไม่สามารถนำไปใช้กับ โหลดที่มีกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของ 50 Hz (Interharmonics) ได้ เช่น โหลดที่เป็นวงจรแปลงผันกำลัง ac-ac

## 2.5 หลักการของอนุกรมฟูเรียร์สำหรับหาค่าฮาร์โมนิกส์

### แนวคิด

รูปคลื่นของกระแสที่เกิดจากโหลดชนิดต่างๆ สามารถถูกวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ได้โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ หรือในทางปฏิบัติสามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่มีความสามารถในการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกส์

โดยทั่วไปการวัดค่าฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณทางไฟฟ้าจะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณทางความถี่ (Frequency Domain Analysis) ด้วยวิธีของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series Analysis) การหาคู่ลำดับด้วยวิธีการนี้จะทำการ สุ่มสัญญาณจำนวน  $N$  ค่าของสัญญาณ 1 ลูกคลื่นจากนั้นจะนำสัญญาณที่สุ่มได้มาทำการประมวลผลซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของฟูเรียร์จะต้องใช้เวลาอย่างน้อยสองลูกคลื่นในการประมวลผลทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดมาได้ ถ้าหากสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณขึ้นๆ ลงๆ (fluctuate signal)

### 2.5.1 อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series)

อนุกรมฟูเรียร์เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณรายคาบ(Periodic Signal) เวลาเป็นคู่อนุกรมกันของสัญญาณทางความถี่หรือการเปลี่ยนสัญญาณทางเวลาเป็นคู่ลำดับอนุกรมกันของสัญญาณทางความถี่โดยมีสมการดังนี้

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad 2.16$$

โดย  $a_0$  เป็นค่าเฉลี่ยของ function  $x(t)$  ในหนึ่งคาบ และ  $a_n$ ,  $b_n$  เป็นสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ตามลำดับโดยค่าของ  $a_n$ ,  $b_n$  หาได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ

$$a_0 = \int_{T/2}^{T/2} x(t) dt = \int_{T/2}^{T/2} \left[ a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \right] dt \quad 2.17$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{for } n=1 \rightarrow \infty \quad 2.18$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{for } n=1 \rightarrow \infty \quad 2.19$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นเราสามารถเขียนในรูปของ Complex Form ของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$x(t) = \sum c_n e^{jn\omega t} \quad 2.20$$

โดย

$$c_n = \frac{1}{2} (a_n - jb_n) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) e^{-jn\omega t} d(\omega t) \quad 2.21$$

และ

$$c_0 = a_0 \quad 2.22$$

### 2.5.2 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform)

เป็นการประยุกต์ใช้ฟูเรียร์กับสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ โดยการขยายขอบเขตการอินทิเกรตจากคาบเป็น  $-\infty, \infty$  ทำให้สมการที่ 2.19 กลายมาเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง continuous signal ดังสมการ

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{-j2\pi ft} df \quad 2.23$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad 2.24$$

ถ้าสัญญาณเป็นแบบสุ่ม (Sample Time Function) ค่า  $X(f)$  และค่า  $x(t)$  จะได้ว่า

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nt_1) e^{-j2\pi fnt_1} \quad 2.25$$

และมีผลการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับคือ

$$x(t) = \frac{1}{f_s} \int_{-\frac{f_s}{2}}^{\frac{f_s}{2}} X(f) e^{j2\pi fnt_1} df \quad 2.26$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform)

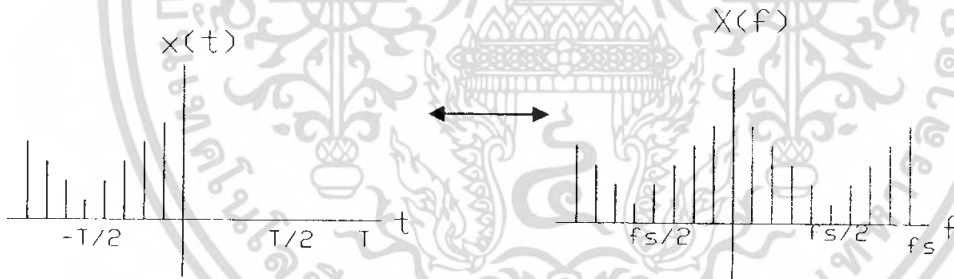
ในกรณีสัญญาณแบบสุ่ม (Sampling Function) ความสัมพันธ์ของสเปกตรัมทางเวลาและทางความถี่แสดงดังสมการที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \quad 2.27$$

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad 2.28$$

ให้  $W = e^{\frac{-j2\pi}{N}}$  เพราะฉะนั้น

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn} \quad 2.29$$



รูปที่ 2-32 Discrete Time and Frequency Domain Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.29 เราสามารถเขียนในรูปของเมตริกได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} X(f_0) \\ X(f_1) \\ \vdots \\ X(f_k) \\ \vdots \\ X(f_{N-1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & \dots & \dots & W^k & \dots & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^k & & & W^{k^2} & & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & \dots & W^{(N-1)k} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_k) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{bmatrix} \quad 2.30$$

$$[X(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)] \quad 2.31$$

จากสมการที่ 2.31 เราจะเห็นได้ว่าหากเราต้องการหาค่าส่วนประกอบทางความถี่  $N$  ค่า และทำการสุ่มสัญญาณจำนวน  $N$  ครั้งจากสัญญาณหนึ่งลูกคลื่นเราจะต้องทำการคูณสมการ complex ถึง  $N^2$  ครั้งเพื่อหาค่าตอบและเพื่อให้ข้อมูลไม่ผิดพลาดเราจะต้องทำการสุ่มสัญญาณอย่างน้อยมากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดของข้อมูล  $f_s > 2f$  (Nyquist frequency) เพื่อป้องกันการเกิด aliasing และใส่ตัวกรองความถี่สูงหรือ low pass filter ที่ cutoff frequency หรือ  $f_c = 2f$  (cutoff frequency = Nyquist frequency) เพื่อป้องกันการผิดพลาดจากข้อมูลที่มีความถี่สูง

## 2.6 เครื่องมือวัดและวิธีการวัดปริมาณฮาร์โมนิกส์

### แนวคิด

การวัดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์มีความสำคัญมาก เนื่องจากเราจะได้ทราบถึงปริมาณฮาร์โมนิกส์ในระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆเนื่องจากฮาร์โมนิกส์

การวัดฮาร์โมนิกส์จะแตกต่างกับการวัดในระบบไฟฟ้ากำลังปกติ เนื่องจากย่านความถี่ของการวัดระบบที่อยู่ในสภาวะปกติสามารถใช้เครื่องมือวัดในย่านความถี่แคบๆใกล้ความถี่ของระบบได้ แต่ในการศึกษาถึงฮาร์โมนิกส์ย่านความถี่ของเครื่องมือวัดต้องครอบคลุมความถี่สูงถึง 3 kHz หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับระดับฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการวิเคราะห์

### 2.6.1 เครื่องมือวัดพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง โดยสังเขปเท่านั้น ส่วนรายละเอียดของเครื่องมือวัดแบบต่างๆ สามารถหาได้จากเอกสารของผู้ผลิตและผู้จำหน่ายอุปกรณ์นั้นๆ

#### 1. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้แสดงรูปคลื่นของสัญญาณแรงดัน หรือกระแสที่ได้จากการวัดผ่านทรานสดิวเซอร์ที่แปลงมาเป็นแรงดันข้อมูลรูปคลื่นที่แสดงบนออสซิลโลสโคปจะแสดงลักษณะความผิดเพี้ยนได้ทันที แต่ออสซิลโลสโคปบางรุ่นก็สามารถทำการวิเคราะห์สเปกตรัม หรือแยกฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่างๆได้ โดยจะเป็นออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล

#### 2. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzers)

จะแสดงค่าของการกระจายกำลังของฟังก์ชันของความถี่ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ในย่านความถี่ขนาดหนึ่ง และจะแสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณที่ถูกวิเคราะห์ รูปแบบของการแสดงจะแสดงผลบนจอ CRT หรือเป็นแบบ Chart recorder ระดับของสัญญาณที่วัดมีหน่วยเป็น dBm (Decibel milliwatt)

### 3. เครื่องวิเคราะห์ความผิดเพี้ยน (Distortion Analyzers)

เครื่องมือนี้จะใช้วัดสัญญาณฮาร์โมนิกส์และแสดงออกมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน และแสดงความผิดเพี้ยนโดยรวมออกมาได้โดยตรงโดยที่ย่านความถี่ที่วัดได้จะอยู่ในย่านต่างๆขึ้นอยู่กับรุ่นและชนิดของเครื่องมือ



รูปที่ 2-33 เครื่องวิเคราะห์ความผิดเพี้ยน

### 4. เครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์แบบดิจิทัล (Digital Harmonics Measuring Equipment)

ใช้เทคนิคพื้นฐาน สองอย่าง โดยวิธีการกรองโดยดิจิทัลและโดยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งมีความสามารถในการทำงานที่เร็วและสามารถทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในลำดับที่สูงๆได้



รูปที่ 2-34 เครื่องวิเคราะห์กำลัง หรือเครื่องวัดฮาร์โมนิกส์แบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ความต้องการของการตอบสนองความถี่ (Requirements for Instrument Responses)

เพื่อความเที่ยงตรงของการวัดฮาร์โมนิกส์จำเป็นต้องมี

### ความเที่ยงตรง (Accuracy)

เครื่องมือวัดจะต้องวัดค่าฮาร์โมนิกส์ที่คงที่ (Steady state) โดยมีค่าความผิดพลาดในระดับที่ยอมรับได้ โดยค่าความไม่แน่นอน หรือไม่คงที่ ในเครื่องมือวัดไม่ควรมากกว่า 5% ของค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

### การจำแนก (Selectivity)

การจำแนกของเครื่องมือวัดจะขึ้นถึงความสามารถในการแยกปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่างๆ

### ค่าเฉลี่ย (Averaging)

ถ้าทำการวัดฮาร์โมนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะมีสองแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญในกรณีนี้คือ dynamic response และ bandwidth

#### - dynamic response

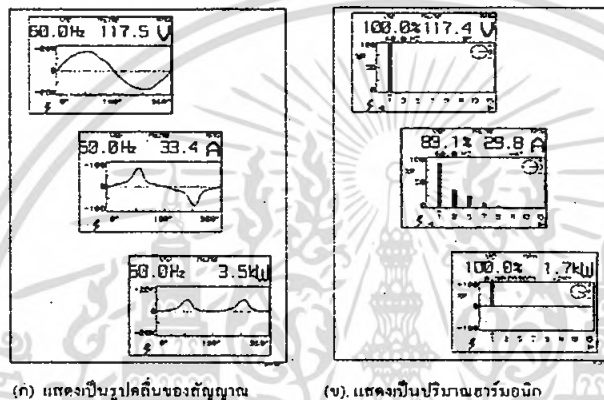
ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการทำการเฉลี่ยค่า 3 วินาทีในหนึ่งคาบเวลา ดังนั้นความสามารถในการตอบสนองของเครื่องมือวัดต้องเทียบเท่ากับวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่งมีค่าคงที่ของเวลา ที่  $1.5 \pm 0.15$  วินาที

#### - bandwidth

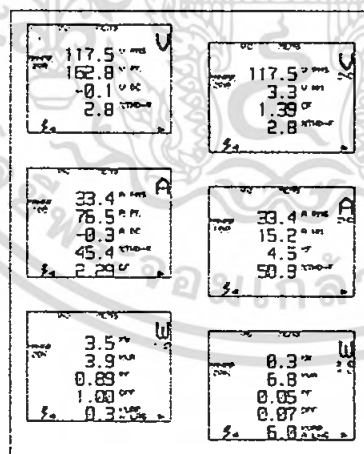
จะมีผลต่อการอ่านค่า โดยเมื่อฮาร์โมนิกส์มีการเปลี่ยนแปลง เครื่องมือวัดที่ดีควรมีแบนวิดท์กว้าง และครอบคลุมได้ทุกย่านความถี่ที่ทำการวัด

### 2.6.3 การแสดงผลการวัดฮาร์โมนิกส์

สามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการและชนิดของเครื่องมือั้นๆ เช่น แสดงค่าตัวเลขที่บ่งบอกถึงปริมาณเทียบกับความถี่ แสดงเป็นรูปคลื่น แสดงเป็นสเปกตรัมของปริมาณ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาวิธีการใช้เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์และค่าที่วัดได้มีความถูกต้อง



รูปที่ 2-35 การแสดงผลการวัดสัญญาณของแรงดันหรือกระแส



รูปที่ 2-36 การแสดงผลด้วยตัวอักษรและตัวเลขเพื่อแสดงปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

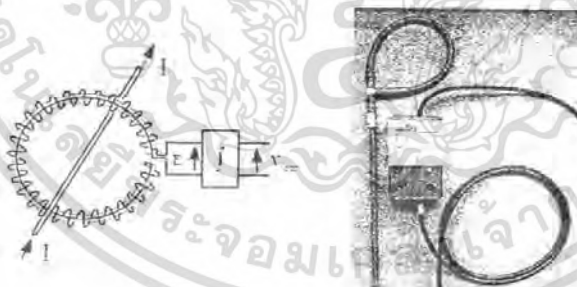
## 2.6.4 ทรานสดิวเซอร์สำหรับการวัดฮาร์โมนิกส์

ในการวัดปริมาณของแรงดันที่ประกอบด้วยแรงดันที่มีความถี่มูลฐานและปริมาณฮาร์โมนิกส์หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง ถ้าปริมาณที่ต้องการวัดมีขนาดสูงจำเป็นต้องปรับขนาดของปริมาณที่วัดให้เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ เช่นเดียวกับปริมาณของกระแส จำเป็นต้องเปลี่ยนปริมาณของกระแสให้เป็นแรงดันที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการวัดเหมือนกัน การแปลงกระแสที่สูงให้เป็นกระแสที่ต่ำและทำให้เป็นแรงดันหรือแปลงจากแรงดันที่มีขนาดสูงให้มีขนาดที่เหมาะสม จำเป็นต้องใช้ทรานสดิวเซอร์ในการทำหน้าที่ดังกล่าว

### การวัดกระแส (Current Measurements)

ตัวอย่างของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้แปลงปริมาณของกระแส

- หม้อแปลงกระแส (Current transformer, CT)
- คอลล์ยทรอดแทรก (Search Coils)
- Rogowski coils หรือ Maxwell's Worms



รูปที่ 2-37 โครงสร้างและตัวอย่างของเครื่องมือวัดแบบ Rogowski

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวัดแรงดัน (Voltage measurements)

ตัวอย่างของเครื่องลดทอนแรงดัน เช่น

- หม้อแปลงแรงดันแบบแม่เหล็ก (magnetic Voltage Transformer)



รูปที่ 2-38 หม้อแปลงแรงดันแบบแม่เหล็กแบบต่างๆ

- ตัวแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitive Voltage divider)

## 2.7 ค่าดัชนีความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

### 2.7.1 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion factor : DF)

คือค่าดัชนีที่ใช้บอกความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพของสัญญาณเฉพาะที่ความถี่มูลฐานและค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผลรวมของสัญญาณ

$$DF = \frac{I_{s,1}}{I_{s,rms}}$$

2.32

โดยที่  $I_{s,1}$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพของสัญญาณเฉพาะที่ความถี่มูลฐาน

$I_{s,rms}$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผลรวมของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{s,rms} = \sqrt{I_{s,1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{s,n}^2} \quad 2.33$$

จะเห็นได้ว่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผลรวมของสัญญาณ ประกอบได้ด้วย 2 เทอมคือเทอมที่มีค่าความถี่มูลฐานและเทอมที่มีค่าความถี่ฮาร์โมนิกส์เป็น ค่ากระแสผิดเพี้ยน (Distortion current :  $I_{dis}$ )

$$I_{dis} = \sqrt{I_{s,rms}^2 - I_{s,1}^2} \quad 2.34$$

### 2.7.2 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (Distortion Power : D)

คือค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกส์ โดยที่กระแสฮาร์โมนิกส์นั้นจะไม่ก่อให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าจริงจ่ายให้กับระบบ แสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์โมนิกส์นั้นไม่ก่อให้เกิดประโยชน์กับระบบไฟฟ้าเลย

$$D = I_{dis} V_{rms} \quad 2.35$$

### 2.7.3 ค่า Root Mean Square

ค่า rms ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับคือ การบอกปริมาณทางด้านไฟฟ้า AC ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในช่วงลบช่วงบวก

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1,rms}^2 + V_{2,rms}^2 + V_{3,rms}^2 + \dots} \quad 2.36$$

### 2.7.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion : THD)

ค่า THD คือค่าที่บอกให้รู้ว่ารูปคลื่นสัญญาณใดๆ นั้นเกิดความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกคุณภาพของรูปคลื่น

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} V_{n,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100 \quad 2.37$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_{2,rms}^2 + V_{3,rms}^2 + V_{4,rms}^2 + \dots}}{V_{1,rms}} \quad 2.38$$

ถ้า %THD สูง หมายถึงรูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยนไปจากองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานมาก (ปริมาณฮาร์โมนิกส์สูง)

ถ้า %THD ต่ำ หมายถึงรูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยนไปจากองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานน้อย (ปริมาณฮาร์โมนิกส์น้อย)

ถ้า %THD = 0 หมายถึงไม่มีความผิดเพี้ยน (ไม่มีฮาร์โมนิกส์)

## 2.8 มาตรฐานและข้อกำหนดกฎเกณฑ์ของฮาร์โมนิกส์

มาตรฐาน IEEE std.519-1992 และ ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการตรวจวัดฮาร์โมนิกส์ขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าจำกัดในมาตรฐานต่าง ๆ หรือ เพื่อใช้ในการพิจารณาปัญหาและสาเหตุที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ดังนั้นระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันจะต้องมีการกำจัดฮาร์โมนิกส์ออกไปเพื่อที่จะรักษาระดับฮาร์โมนิกส์ให้มีพิกัดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงแหล่งที่มีอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ประเภทขุมสายโทรศัพท์ก็เช่นกัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดมาตรฐานขึ้นเพื่อให้ผู้บริโภคได้ใช้ไฟฟ้าอย่างมีคุณภาพ

## มาตรฐาน IEEE std.519-1992 Recommended practices and Requirements for

### Harmonic control in Electrical system.

ในการกำหนดเกณฑ์การกำหนดค่าเพื่อเป็นข้อกำหนด จำกัดทางด้านฮาร์โมนิกส์ของ มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 ได้กำหนดไว้ดังนี้ คือ

ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับสามารถกำหนดค่าจำกัดได้ ขึ้นกับขนาดของ ระบบไฟฟ้าในเทอมของ  $I_{sc}/I_c$  และ ระดับแรงดันที่ใช้ในระบบไฟฟ้า โดยจะจำกัดค่าของกระแส ฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับจะมีขนาดลดลงเมื่ออันดับของฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้น Total demand distortion (TDD) ของกระแสฮาร์โมนิกส์จะกำหนดค่าขึ้นกับขนาดของระบบไฟฟ้าในเทอมของ  $I_{sc}/I_c$  และระดับแรงดันที่ใช้ในระบบไฟฟ้า ดังตารางที่ 2 ถึง 4

Maximum Harmonic Current Distortion in % of Fundamental						
Harmonic Order ( Odd Harmonics )						
ISC/IL	h < 11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Even harmonics are limited to 25% of the harmonic limits above.

ตารางที่ 2-2 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของ IEEE std 519-1992

โดยพิจารณาแรงดัน ตั้งแต่ 120 โวลต์ ถึง 69 กิโลโวลต์

Maximum Harmonic Current Distortion in % of Fundamental						
Harmonic Order ( Odd Harmonics )						
ISC/IL	h < 11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Even harmonics are limited to 25% of the harmonic limits above.

ตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 โดยพิจารณาที่แรงดันที่สูงกว่า 69 กิโลโวลต์ ถึง 161 กิโลโวลต์

Maximum Harmonic Current Distortion in % of Fundamental						
Harmonic Order (Odd Harmonics)						
Isc/I <sub>L</sub>	h<11	11 ≤ h<17	17 ≤ h<23	23 ≤ h<35	35 ≤ h	TDD
<50	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
≥50	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25 % of the harmonic limits above

ตารางที่ 2-4 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่จำกัดค่าตามมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 โดยพิจารณาที่แรงดันที่สูงกว่า 161 กิโลโวลต์

โดยกำหนดให้  $I_{sc}$  คือ ค่าของกระแสลัดวงจรสูงสุดที่ต่อรวมใดๆ (pcc) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_{sc} = \frac{MVA_{sc} \times 1000}{\sqrt{3} \times kv} \quad 2.39$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$MVA_{sc}$  คือ ค่าพิกัดของการลัดวงจร (shotcircuitcapaci ) ที่จุดต่อร่วม (pcc)

$k_v$  คือ แรงดันระหว่างสาย

$I_L$  คือ ค่ากระแสโหลดที่ได้จากการเฉลี่ยค่าของกระแสโหลดสูงสุดแต่ละเดือนในรอบ 12 เดือน

ฉะนั้นจะสามารถหาค่าของอัตราส่วนการลัดวงจร (short circuit ratio) ที่สามารถคำนวณได้จาก  $I_{sc}/ I_L$  ของแต่ละสายป้อน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับและค่า Total Demand distortion (TDD) กับค่าจำกัดตามมาตรฐานโดยค่า TDD สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\max} I_n^2}}{I_h} \times 100 \quad 2.40$$

โดยที่  $I_h$  คือกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับส่วนเกณฑ์การพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน IEEE std 519-1992 จะพิจารณา ดังนี้

กำหนดค่าจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับโดยขึ้นกับระดับแรงดันของระบบ และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอันดับของฮาร์โมนิกส์

กำหนดค่า Total Harmonics Distortion ของแรงดันโดยขึ้นกับระดับแรงดันของระบบ ดังตารางด้านล่าง

Bus Voltage at PCC	Individual voltage Distortion (%)	Total voltage Distortion (%)
Below 69 kV	3.0	5.0
69kV 69 kV	1.5	2.5
138 kV and above	1.0	1.5

**ตารางที่ 2-5** การกำหนดค่า Total Harmonics Distortion ของแรงดันโดยขึ้นกับการจำกัดแรงดันของระบบ

### ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

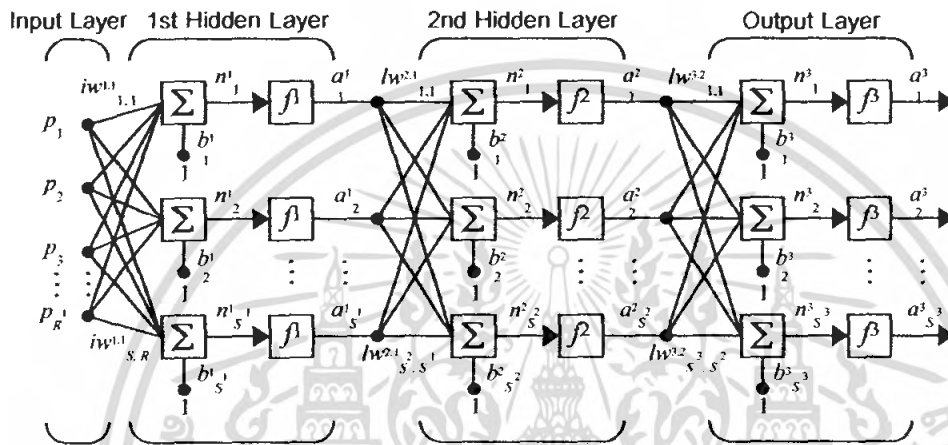
ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมจัดทำโดยคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งอ้างอิงจาก Engineering Recommendation G.5/3-1976 Limits for harmonics in the United Kingdom Electricity Supply system, ประเทศอังกฤษ มีขอบเขตดังนี้

1. เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัด และวิธีการตรวจสอบฮาร์โมนิกส์สำหรับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
2. เพื่อกำหนดมาตรการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
3. เพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งชนิดเฟสเดียวและสามเฟสมีวัตถุประสงค์ เพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 หลักการของการสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

ในบทความนี้เราจะนำระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back propagation) ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบ Multilayer Perceptron โดยมีแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายแบบเป็นชั้น ๆ



รูปที่ 2-39 แสดงการเชื่อมโยงของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับแบบมัลติเลเยอร์

จากรูปที่ 2-39 โครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้นี้มีการเชื่อมโยงกัน 3 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นของอินพุตซึ่งมีเซลล์ประสาทอยู่  $N$  โหนด (จำนวนของการสุ่มสัญญาณข้อมูล  $N$  ค่าในครั้งลูกคลื่นสัญญาณ) ถัดมาเป็นชั้นของชั้นซ่อนหรือชั้นภายใน (Hidden Layer) ซึ่งประกอบด้วยโหนดต่างๆ โดยจำนวนโหนดที่เหมาะสมจะได้มาจากการทดลองหาจำนวนโหนดที่ให้ค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงที่เรายอมรับได้และสุดท้ายคือชั้นของเอาต์พุตซึ่งในบทความนี้จะเป็นค่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2, 3, 5, 7 และ 9 หรือลำดับต่าง ๆ ที่เราสนใจในที่นี้มีอยู่ 5 โหนดสำหรับ 5 ลำดับฮาร์โมนิกส์และแต่ละโหนดในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อกันการเชื่อมโยงกันจะมีเฉพาะระหว่างชั้นเท่านั้นและการเชื่อมโยงนี้จะต่อถึงกันทุกโหนด

การฝึกสอนโครงข่าย Multilayer Perceptron ด้วยการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation) เป็นการแพร่ย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชั้นเอาต์พุตที่ต้องการ กับเอาต์พุตที่คำนวณได้ โดยคำนวณย้อนกลับจากชั้นเอาต์พุตผ่านชั้นซ่อนตลอดมาจนถึงชั้นอินพุต เพื่อทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ในขั้นตอนการฝึกสอนจะป้อนเซตของข้อมูลที่จะสอนซึ่งประกอบด้วยเซตของอินพุตและเซตของเอาต์พุตที่ต้องการ

กำหนดให้  $P$  เป็นจำนวนเซตทั้งหมดที่ใช้ในการฝึกสอนหรือชุดสำหรับฝึกสอน (Training Set)

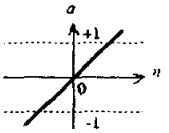
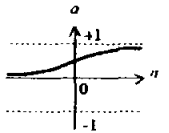
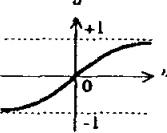
$W$  = เป็นเมตริกค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นของอินพุตกับชั้นของชั้นซ่อนซึ่ง  $W$  มีขนาด  $M \times N$  คอลัมน์

$V$  = เป็นเมตริกของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นซ่อนไปยังชั้นเอาต์พุตซึ่งมีขนาด  $L$  และ  $M$  คอลัมน์กรณีของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ซึ่งมีอินพุต 64 อินพุต ชั้นซ่อน 5 โหนด และ เอาต์พุต 5 เอาต์พุตจะได้เมตริก  $W$  และเมตริก  $V$  ดังรูปที่ 2-40

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{145} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{51} & \dots & \dots & \dots & w_{545} \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{145} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{51} & \dots & \dots & \dots & v_{545} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2-40 แสดงเมตริก  $W$  และ  $V$  ที่มีชั้นซ่อนอินพุต และเอาต์พุตอย่างละ 5 โหนด

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการสอนระบบโครงข่ายประสาทเทียมหรือ  $f(\text{net})$  ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-41

 <p><math>a = \text{purdinin}</math> Linear Transfer Function</p>	 <p><math>a = \text{logsgin}</math> Log-Sigmoid Transfer Function</p>	 <p><math>a = \text{tansign}</math> Tan-Sigmoid Transfer Function</p>
$a(n) = n$	$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	$a(n) = \frac{1 - e^{-n}}{1 + e^{-n}}$

รูปที่ 2-41 ตัวอย่างฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) รูปแบบต่าง ๆ

หลังจากกำหนดค่าฟังก์ชันถ่ายโอนให้ระบบแล้วข้อมูลที่ใส่สอนเข้าสู่โครงข่ายสามารถคำนวณโหนดของชั้นซ่อนได้จากสมการ

$$\text{net}_{pm}^h = \sum_{n=1}^N w_{mn} x_{pn} + \theta_m^h \quad \text{โดยที่ } m = 1, \dots, M \quad 2.41$$

$$h_{pm} = f(\text{net}_{pm}^h) \quad 2.42$$

โดยที่  $x_n = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  เป็นเซตของชุดอินพุต และ  $\theta_m$  เป็นค่าไบแอสของแต่ละโหนดในชั้นซ่อนดังนั้นจะได้ net input ของชั้นเอาต์พุตเป็น

$$\text{net}_{pl}^o = \sum_{m=1}^M v_{lm} h_{pm} + \theta_l^o \quad 2.43$$

$$o_{pl} = f(\text{net}_{pl}^o) \quad 2.44$$

โดยที่  $l = 1, 2, \dots, L$  และ  $\theta_l$  เป็นค่าไบแอสของชั้นเอาต์พุตเมื่อคำนวณชั้นของเอาต์พุตครบทุกโหนดแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการหาค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (mean square error: MSE) ระหว่างค่าของผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการของแพทเทิร์นที่  $p$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (o_{pl} - d_{pl})^2 \quad (2.45)$$

โดยที่  $o_{pl}$  เป็นเอาต์พุตที่ต้องการและ  $d_{pl}$  เป็นเอาต์พุตที่แท้จริงและ  $p$  คือจำนวนรอบของการสอนตั้งแต่ 1,2,3,...,p ขั้นตอนการปรับค่าตัวน้ำหนักและไบอัสนั้นมีวิธีการอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น Lavenberg-Marquardt Algorithm , Resilient Back Propagation , Conjugate Gradient เป็นต้น โดยในบทความฉบับนี้ได้ใช้ขั้นตอนการปรับค่าตัวน้ำหนักและค่าไบอัสด้วยวิธีการของ Lavenberg-Marquardt Algorithm เนื่องจากเป็นขั้นตอนการปรับค่าตัวน้ำหนักและไบอัสที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีขั้นตอนการปรับค่าตัวน้ำหนักและค่าไบอัสดังนี้

$$x_{(new)} = x_{(old)} + \Delta x = x_{(old)} - [J^T \cdot J + \mu I]^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (2.46)$$

$$g = 2J^T \cdot e \quad (2.47)$$

โดยที่  $x$  คือ ค่าตัวน้ำหนัก ( $w$ ) และค่าไบอัส ( $b$ )

$J$  คือ จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian matrix) ของอนุพันธ์ของค่าผิดพลาด (แต่ละค่า) ต่อค่า  $x$  (แต่ละค่า)

$J^T$  คือ Transpose matrix ของ  $J$

$g$  คือ Gradient Factor

$e$  คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target ,  $t$ ) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer ,  $a$ )

$I$  คือ Identity matrix

$\mu$  คือ Mu factor หรือ Learning factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาโคเบียนเมตริกซ์ของ (w)  $J(w) =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,M}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,M}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_L}{\partial w_{L,1}} & \frac{\partial e_L}{\partial w_{L,2}} & \dots & \frac{\partial e_L}{\partial w_{L,M}} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า (b)  $J(b) =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_L}{\partial b_L} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 - a_1 \\ t_2 - a_2 \\ \vdots \\ t_L - a_L \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

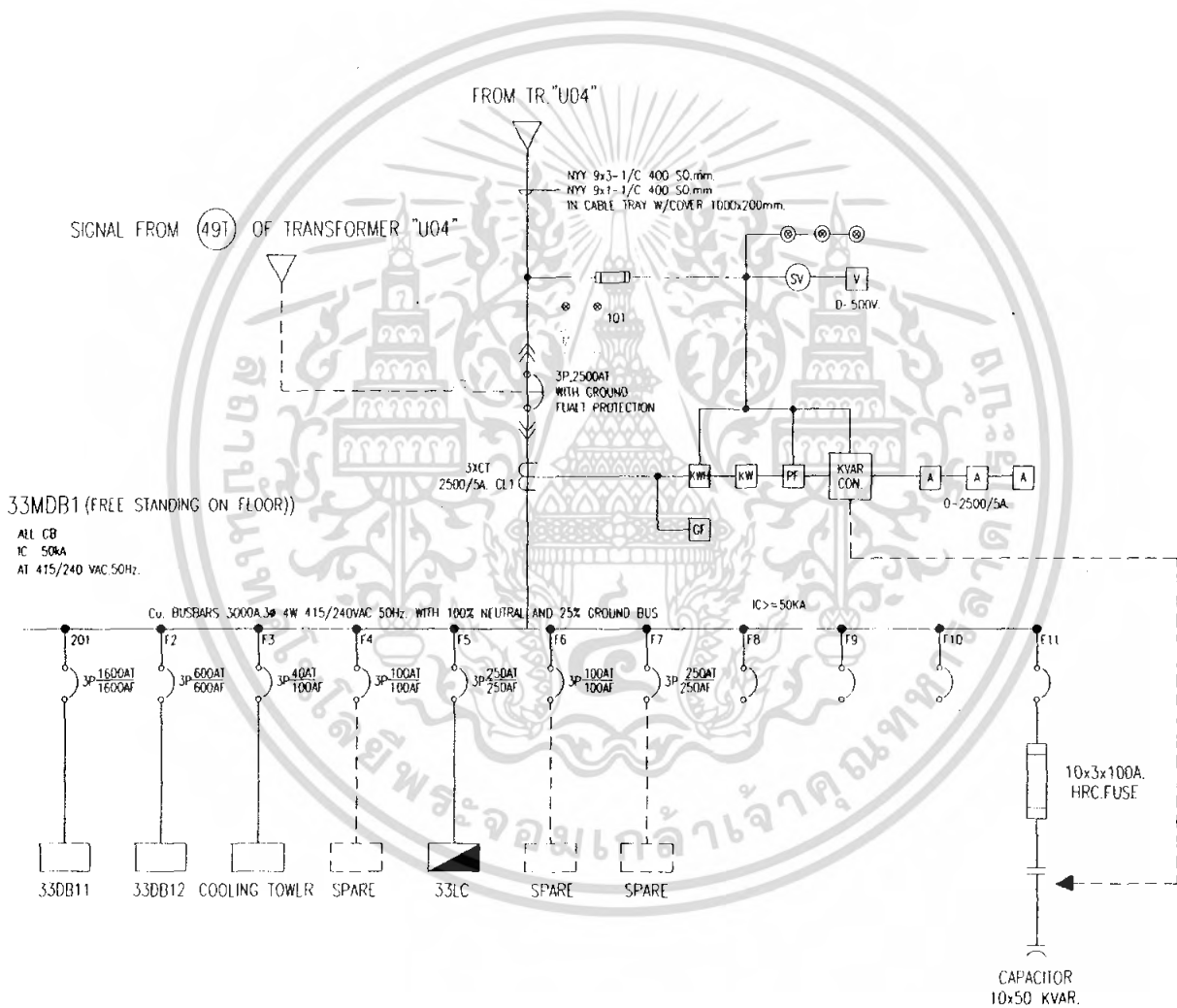
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลอง

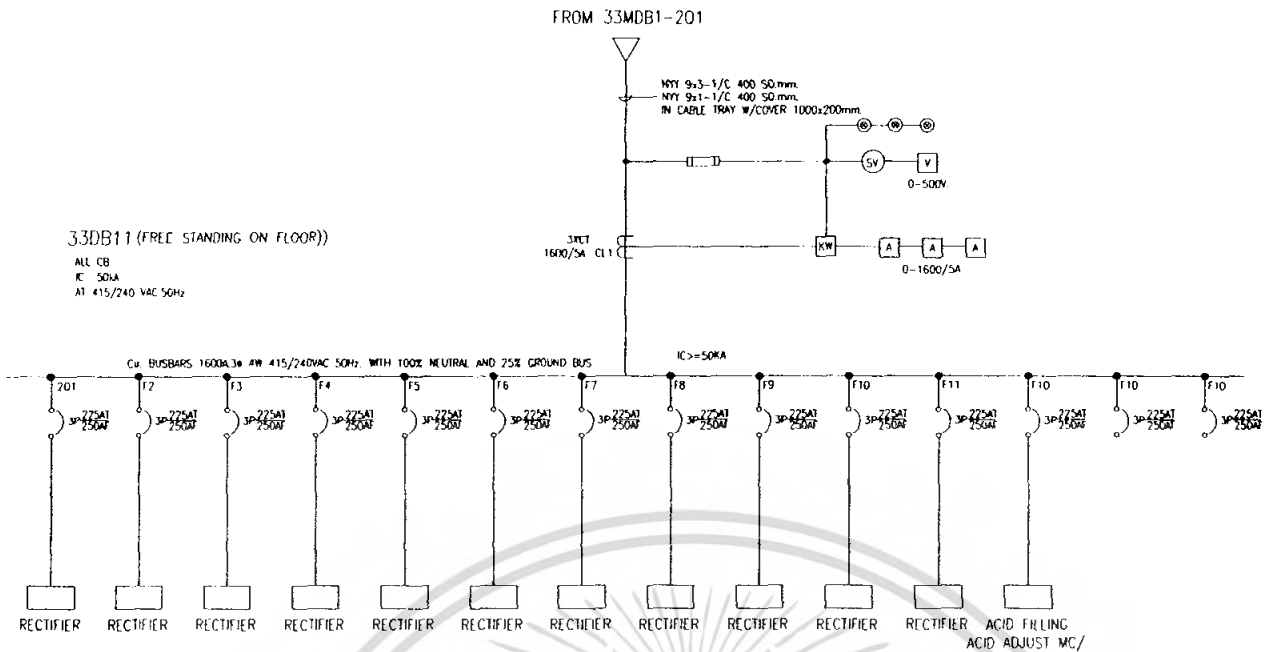
#### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ

ในส่วนของโครงการนี้ ได้ทำการเก็บข้อมูลของชุดฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ จากโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี โดยมีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ ดังแสดงใน Single line diagram

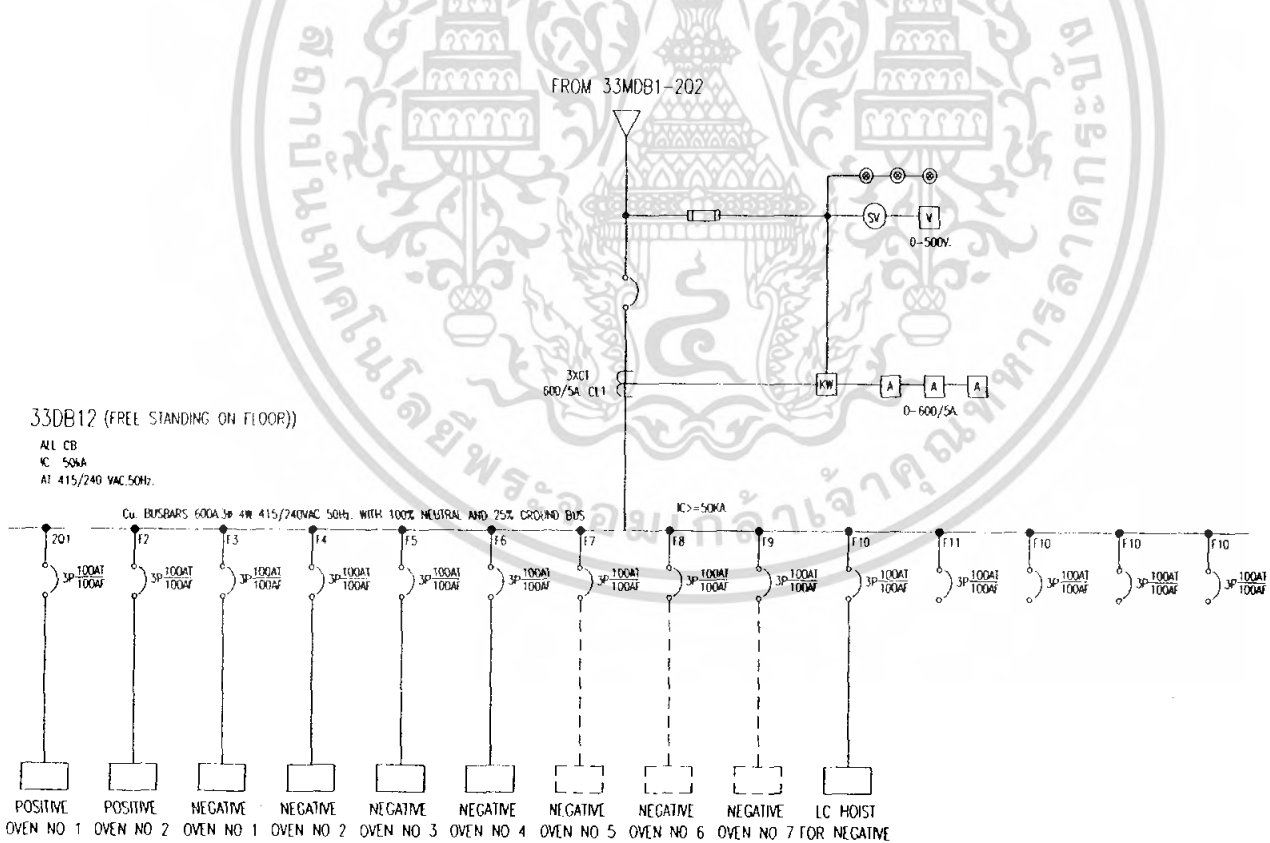


รูป 3-1 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33MDB1 ที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

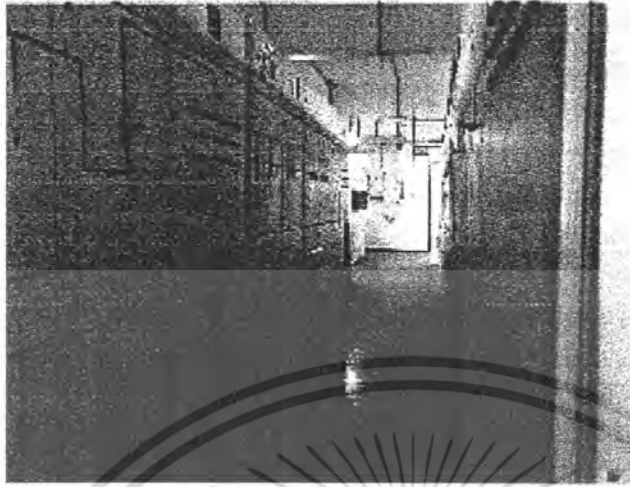


รูปที่ 3-2 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33DB11 ที่นำมาใช้ในการทดลอง

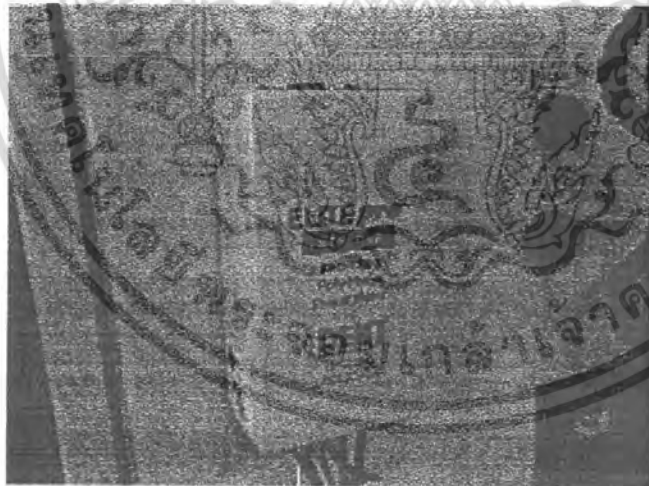


รูปที่ 3-3 Single Line Diagram ตู้โหลดที่ 33DB12 ที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

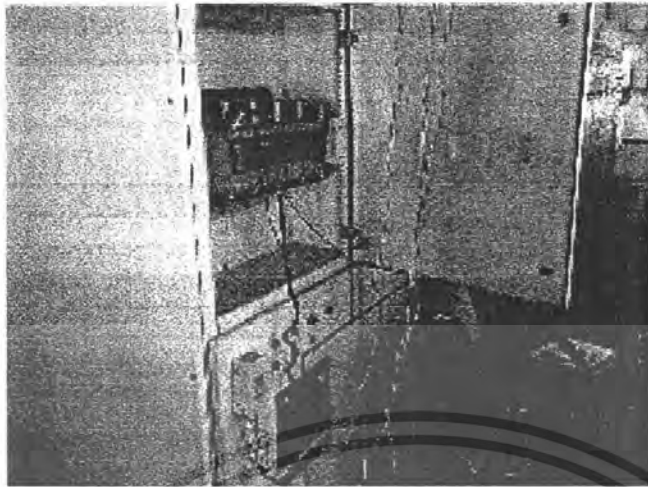


รูปที่ 3-4 Sub station ที่ทำการวัด

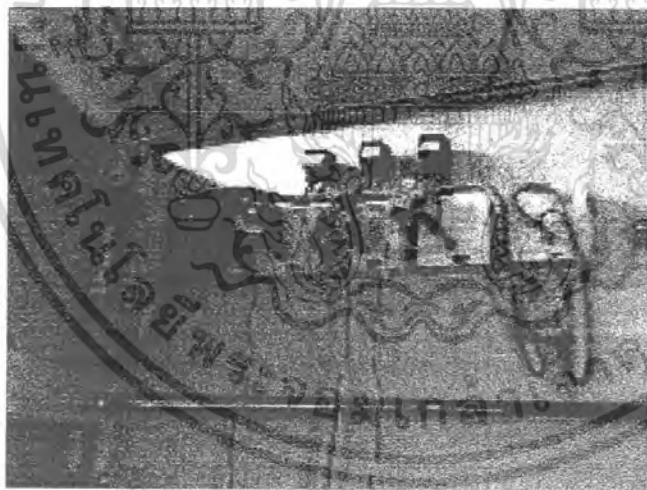


รูปที่ 3-5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 แสดงการวัดค่าสัญญาณ



รูปที่ 3-7 แสดงการวัดค่าสัญญาณกระแส

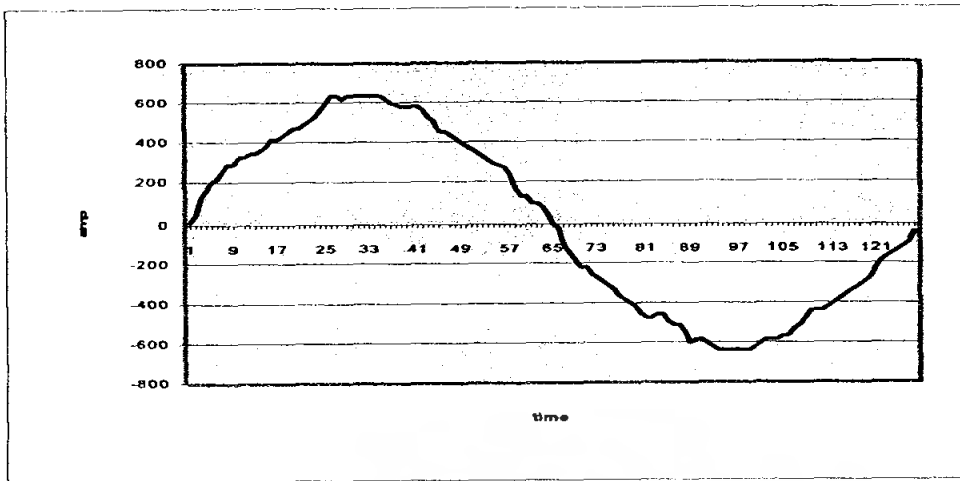
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราได้ทำการเก็บค่าของรูปคลื่นสัญญาณกระแสใน Sub Station 33MDB1 และได้ทำการ Sampling ค่าสัญญาณจำนวน 1 ลูกคลื่นคือ 128 ค่า ดังตารางที่ 3-1 จนได้ค่าฮาร์โมนิกส์ออกมาดังแสดงในตารางที่ 3-1 จำนวน 70 ชุดข้อมูล โดย 65 ชุดแรกจะเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน และ 5 ชุดหลังจะเป็นชุดข้อมูลทดสอบ ดังตารางที่ 3-2

0	4.581878	32	641.4629	64	-9.16376	96	-641.463
1	41.2369	33	639.1719	65	-22.9094	97	-639.172
2	135.1654	34	634.5901	66	-109.965	98	-634.59
3	178.6932	35	618.5535	67	-155.784	99	-618.263
4	208.4754	36	600.226	68	-180.994	100	-600.226
5	222.2211	37	588.7713	69	-226.803	101	-584.189
6	261.167	38	588.7713	70	-231.385	102	-581.898
7	288.6583	39	586.4803	71	-254.294	103	-579.608
8	304.6949	40	577.3166	72	-281.785	104	-572.735
9	325.3133	41	561.28	73	-306.986	105	-565.862
10	332.1661	42	526.916	74	-332.166	106	-531.498
11	345.9318	43	510.8794	75	-359.677	107	-515.461
12	355.0955	44	460.4787	76	-378.005	108	-471.933
13	368.5502	45	451.3149	77	-400.914	109	-442.151
14	394.0415	46	439.8603	78	-428.406	110	-435.278
15	416.9509	47	419.2418	79	-451.315	111	-419.242
16	416.9509	48	400.9143	80	-474.224	112	-398.623
17	442.1512	49	382.5868	81	-471.933	113	-382.587
18	483.3881	50	364.2593	82	-458.188	114	-366.55
19	481.0972	51	345.9318	83	-462.77	115	-350.514
20	487.97	52	329.8952	84	-494.843	116	-329.895
21	513.1703	53	311.5677	85	-515.461	117	-311.568
22	533.7888	54	293.2402	86	-515.461	118	-297.822
23	563.571	55	274.9127	87	-549.825	119	-274.913
24	593.3531	56	235.9667	88	-600.226	120	-233.676
25	630.0082	57	169.5295	89	-586.48	121	-192.439
26	639.1719	58	137.4563	90	-591.062	122	-162.657
27	625.4263	59	126.0016	91	-625.426	123	-153.493
28	634.5901	60	105.3832	92	-630.008	124	-137.456
29	639.1719	61	100.8013	93	-641.463	125	-123.711
30	646.0447	62	87.05568	94	-643.754	126	-91.6376
31	643.7538	63	36.65502	95	-643.754	127	-48.1097

ตารางที่ 3-1 ค่าที่ได้จากการ Sampling รูปคลื่นสัญญาณ 1 ลูกคลื่น 128 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของค่าที่วัดได้

ชุดที่	order 2	order 3	order 5	order 7	order 9
1	1.925	2.3125	28.17969	9.639063	1.039063
2	2.139063	2.684375	25.21875	8.740625	1.784375
3	2.464063	2.390625	30.0375	14.78281	0.78125
4	0.856186	1.795847	15.26958	5.193447	1.631858
5	2.613503	1.53105	9.085614	4.441813	0.994881
6	3.159375	2.107813	18.53438	0.81875	2.195313
7	2.432813	3.33125	19.46406	4.95625	2.875
8	1.873438	0.859375	19.09688	3.95625	1.13125
9	2.125	1.89375	23.47656	4.99375	1.434375
10	2.339063	2.457813	20.71406	1.58125	1.578125
11	1.779688	6.78125	28.11094	6.523438	2.2625
12	2.207813	7.092188	28.3375	8.042188	3.140625
13	1.654688	7.878125	27.48906	10.09531	1.259375
14	4.3875	8.228125	31.70625	7.896875	1.709375
15	1.85	6.821875	27.08594	6.639063	1.496875
16	1.701563	7.715625	26.01875	8.415625	1.507813
17	1.904688	6.384375	33.275	9.432813	0.95
18	1.875	4.973438	33.34531	10.1125	2.657813
19	2.589063	4.439063	28.46094	12.30781	1.4875
20	0.653125	5.515625	34.33281	12.43906	0.65625
21	3.221875	4.659375	34.05313	12.33906	1.64375
22	3.901563	4.378125	33.25	15.62969	1.278125
23	2.465625	9.664063	35.48438	18.95469	2.498438
24	3.159375	8.232813	36.04375	19.99063	1.5
25	1.964063	7.090625	36.28125	16.51719	2.257813
26	1.985938	6.834375	41.19688	15.06406	1.773438
27	1.79375	4.303125	38.38125	17.71406	2.773438

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	3.982813	6.654688	38.42813	18.21406	2.079688
29	2.714063	7.375	37.78594	19.41094	1.629688
30	0.526563	6.28125	38.56563	21.71875	1.139063
31	2.2375	5.525	43.71094	21.73438	2.509375
32	3.24375	5.467188	40.86875	21.99844	2.109375
33	2.720313	6.73125	42.92344	21.90156	1.151563
34	3.626563	5.379688	42.32031	22.29063	3.379688
35	2.615625	5.50625	42.74844	24.24063	1.148438
36	2.90625	5.632813	42.30781	25.12031	1.839063
37	3.595313	5.029688	42.62344	25.29688	2.3125
38	2.801563	4.532813	43.47344	23.91875	1.534375
39	3.50625	6.489063	39.80625	25.00625	1.223438
40	0.382813	4.2	37.26563	24.42813	2.001563
41	0.565625	4.940625	37.73125	25.24844	1.2125
42	0.382813	4.176563	37.875	25.34063	1.804688
43	0.951563	3.448438	39.58438	23.31094	1.364063
44	1.895313	2.725	40.79219	26.82188	2.457813
45	1.623438	4.482813	41.5375	24.17031	1.698438
46	0.5125	5.045313	39.85625	26.88906	1.270313
47	1.025	4.9	37.00938	24.67344	1.64375
48	2.720313	3.65	39.56094	25.13281	1.260938
49	2.3	7.532813	37.18906	23.41719	2.248438
50	0.5125	5.045313	39.85625	26.88906	1.270313
51	1.953125	7.128125	36.10625	24.95938	2.334375
52	0.389063	4.385938	38.90781	24.07031	0.526563
53	4.482813	2.192188	38.31719	26.38438	3.203125
54	0.878125	4.95625	38.675	22.4875	1.314063
55	0.398438	5.690625	39.39844	23.50313	0.482813
56	3.04375	3.265625	41.60938	22.04375	2.776563
57	0.210938	1.995313	41.325	25.31719	2.689063
58	2.982813	8.465625	37.99219	24.9875	3.326563
59	1.4375	4.532813	39.87344	18.14531	1.64375
60	2.459375	2.75	38.01406	18.46094	4.35625
61	2.714063	3.4289	39.0397	18.09688	1.723438
62	1.321875	4.767188	40.26406	14.29531	0.714063
63	4.35	4.94375	55.41719	34.53125	4.221875
64	3.535938	3.103125	60.21406	32.64219	4.16875
65	3.901563	5.728125	58.56406	41.00469	3.140625
66	1.945313	2.798438	40.79688	26.81719	2.410938
67	1.796875	4.920313	33.37969	10.14375	2.717188
68	1.920313	0.892188	19.1375	3.935938	1.067188
69	1.767188	7.6875	26.07656	8.489063	1.585938
70	3.63125	4.98125	42.64219	25.30313	2.354688

### ตารางที่ 3-2 ค่าของชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

การหาค่าฮาร์โมนิกส์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะใช้สัญญาณเพียงครั้งคาบ หรือ 64 ค่าในการคำนวณ ดังนั้นในการทดลองนี้ จำนวนค่า Input ของโครงสร้างคือ 64 ค่า และจำนวน Output ก็คือจำนวนอันดับฮาร์โมนิกส์ที่เราสนใจ อันได้แก่ฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 2,3,5,7,9 หรือ 5 Output นั้นเอง

#### 3.2.1 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

จากข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบที่นำมาทดลองเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมและให้ความผิดพลาดน้อยที่สุดมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-2

Transfer Function ที่ใช้ในโครงข่าย		จำนวนโหนดที่ต่ำสุดในชั้นซ่อน	ค่า percentage error ของชุดทดสอบ		
Hidden Layer	Output Layer		min(%)	mean(%)	max(%)
purelin	purelin	5	0.2450	1.2838	2.2006
logsig	purelin	5	0.4471	1.5913	2.2793
tansig	purelin	5	0.0144	2.2301	2.8966
purelin	logsig	5	0.0127	17.9218	74.4450
logsig	logsig	5	1.1776	20.5328	74.4451
tansig	logsig	5	0.5085	20.0082	74.4450
purelin	tansig	5	0.0144	1.3390	2.9818
logsig	tansig	5	0.6503	1.6977	3.0887
tansig	tansig	5	0.5046	1.4994	2.7351

ตารางที่ 3-3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

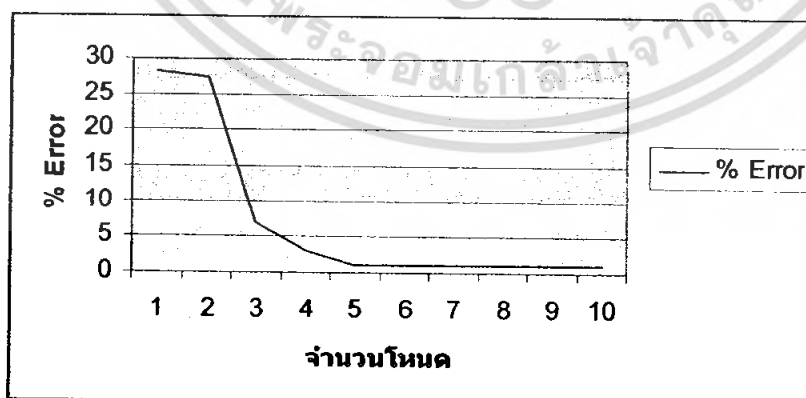
จากผลการทดลองเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนให้กับชุดโครงข่าย เราจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ purelin ในชั้นซ่อนและ purelin ในชั้นเอาต์พุตให้ค่าความผิดพลาดของชุดโครงข่ายน้อยที่สุด

### 3.2.2 ขั้นตอนหาจำนวนโหนดในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ ทำการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่าย โดยเราจะทำการทดลองเพิ่มจำนวนโหนดทีละโหนด จนได้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3-3

จำนวนโหนด	% Error		
	% min	% mean	% max
1	0.0589	28.2831	92.8561
2	4.8774	27.5495	58.5270
3	2.8058	7.1694	13.6238
4	0.8320	2.9836	4.2869
5	0.1126	1.2312	3.1952
6	0.0938	1.2280	3.1954
7	0.1135	1.2145	3.2042
8	0.2209	1.2199	3.2192
9	0.2109	1.2634	3.2429
10	0.0351	1.2017	3.1963

ตาราง 3-4 แสดงผลการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม



รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดและ % Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-6 จำนวนโหนดที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง คือ 5 โหนด จะเห็นได้ว่าจำนวนโหนดที่มากกว่า 5 โหนดขึ้นไปค่า % Error นั้นไม่ต่างกันเท่าไร เพราะฉะนั้นถ้าเลือกจำนวนโหนดที่มากกว่า 5 โหนดขึ้นไป จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นแต่ผลของ % Error แทบจะไม่ลดลงเลย

### 3.3 ทำการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของชุดโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด

#### 3.3.1 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub station เดียวกัน

order 2			
ชุด	เครื่องมือวัด	FFT	Neural
1	1.945313	1.945313	1.883
2	1.796875	1.796875	1.863
3	1.920313	1.920313	1.8617
4	1.767188	1.767188	1.69
5	3.63125	3.63125	3.5832
order 3			
ชุด	เครื่องมือวัด	FFT	Neural
1	2.798438	2.798438	2.7696
2	4.920313	4.920313	5.018
3	0.892188	0.892188	0.8992
4	7.6875	7.6875	7.7608
5	4.98125	4.98125	5.0739
order 5			
ชุด	เครื่องมือวัด	FFT	Neural
1	40.79688	40.79688	40.7446
2	33.37969	33.37969	33.3184
3	19.1375	19.1375	19.1841
4	26.07656	26.07656	26.0354
5	42.64219	42.64219	42.5825
order 7			
ชุด	เครื่องมือวัด	FFT	Neural
1	26.81719	26.81719	26.9989
2	10.14375	10.14375	10.2926
3	3.935938	3.935938	4.0838
4	8.489063	8.489063	8.5574
5	25.30313	25.30313	25.4831

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

order 9			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	2.410938	2.410938	2.4373
2	2.717188	2.717188	2.6366
3	1.067188	1.067188	1.107
4	1.585938	1.585938	1.4854
5	2.354688	2.354688	2.2918

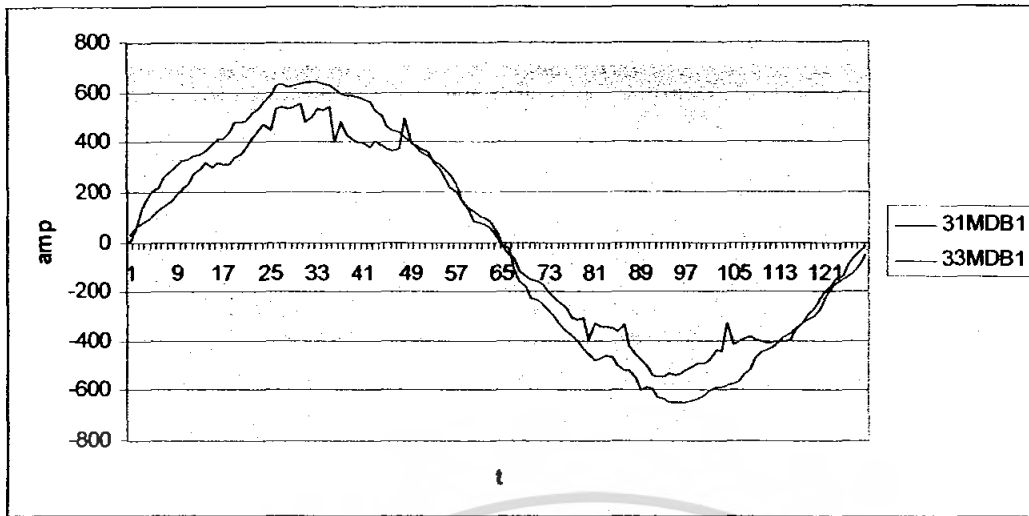
ตารางที่ 3-5 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียบกับเครื่องมือวัด

### 3.3.2 ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub station คนละ Sub

จากเดิมชุดฝึกสอนกับชุดทดสอบจะมาจาก Sub station เดียวกัน แต่ในการทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนชุดทดสอบ โดยนำค่าที่ได้จากการ Sampling ของอีก Sub หนึ่งคือ 31MDB1 มาใช้ทดสอบว่า โครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีรูปแบบของคลื่นและฮาร์โมนิกส์ที่ต่างกันได้หรือไม่ โดยมีค่าฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-5

ชุดที่	order 2	order 3	order 5	order 7	order 9
1	3.628125	9.729688	38.02188	27.61719	13.47344
2	10.58281	4.1875	37.36406	23.50156	21.8375
3	0.598438	4.86875	42.34688	25.45938	32.56094
4	7.484375	2.28125	38.35313	29.16875	28.86719
5	3.85625	3.325	44.17188	23.14688	23.31563

ตารางที่ 3-6 ชุดทดสอบใหม่ 5 ค่าที่ได้จาก 31MDB1



รูปที่ 3-10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณระหว่าง 31MDB1 กับ 33MDB1

เมื่อทำการเปลี่ยนชุดทดสอบจะได้ผลของโครงข่ายเปรียบเทียบกับเครื่องวัด ออกมาดังตารางที่ 3-6

order 2			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	3.6281	3.6281	1.7769
2	10.5828	10.5828	2.0979
3	0.5984	0.5984	1.8832
4	7.4844	7.4844	1.9208
5	3.8563	3.8563	1.9234
order 3			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	9.7297	9.7297	7.0402
2	4.1875	4.1875	4.9390
3	0 4.8688	0 4.8688	6.3445
4	2.2813	2.2813	6.0983
5	3.3250	3.3250	6.0818
order 5			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	38.0219	38.0219	23.8498
2	37.3641	37.3641	34.1327
3	42.3469	42.3469	27.2546
4	38.3531	38.3531	28.4592
5	44.1719	44.1719	28.5399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

order 7			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	27.6172	27.6172	25.5075
2	23.5016	23.5016	17.1787
3	25.4594	25.4594	22.7497
4	29.1687	29.1687	21.7740
5	23.1469	23.1469	21.7087
order 9			
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural
1	0.5766	0.5766	0.5565
2	3.8625	3.8625	1.8275
3	2.0766	2.0766	0.9773
4	2.2656	2.2656	1.1262
5	1.9531	1.9531	1.1362

ตารางที่ 3-7 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและบทสรุป

ผลของการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

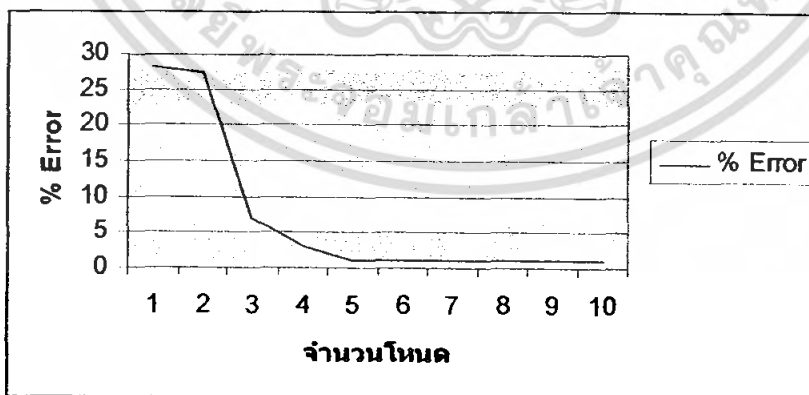
1. การหาโครงสร้างที่เหมาะสมของชุดโครงข่ายประสาทเทียม
2. การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกส์ของโครงข่ายกับเครื่องมือวัด

#### 4.1 การหาโครงสร้างที่เหมาะสมของชุดโครงข่ายประสาทเทียม

เนื่องจากโครงสร้างของโครงข่ายของเรานั้น มีจำนวน Input 64 ค่า หรือครึ่งคาบของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการ sampling มา 128 ค่า และ จำนวน Output 5 ค่า หรืออันดับของฮาร์โมนิกส์ที่เราสนใจนั้นคือ 2,3,5,7,9

ดังนั้นจากผลการทดลองเราจะเห็นได้ว่าค่า Transfer function ที่เหมาะสมที่สุดคือฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ purelin ในชั้นซ่อนและ purelin ในชั้น Output ให้ค่าความผิดพลาดของชุดโครงข่ายน้อยที่สุด โดยค่าเฉลี่ยของ percentage error อยู่ที่ 1.2838 %

จำนวนโหนดที่เหมาะสมกับโครงข่ายคือ 5 โหนดเพราะจำนวนโหนดที่มากกว่า 5 โหนดขึ้นไปค่า % Error นั้นไม่ต่างกันเท่าไร เพราะฉะนั้นถ้าเลือกจำนวนโหนดที่มากกว่า 5 โหนดขึ้นไป จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นแต่ผลของ % Error แทบจะไม่ลดลงเลย



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดและ % Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกส์ของโครงข่ายกับเครื่องมือวัด

ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub station เดียวกัน

order 2				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	1.945313	1.945313	1.883	2.2054
2	1.796875	1.796875	1.863	2.682
3	1.920313	1.920313	1.8617	2.0503
4	1.767188	1.767188	1.69	2.366
5	3.63125	3.63125	3.5832	1.3227
order 3				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	2.798438	2.798438	2.7696	1.0309
2	4.920313	4.920313	5.018	1.9845
3	0.892188	0.892188	0.8992	0.7832
4	7.6875	7.6875	7.7608	0.9536
5	4.98125	4.98125	5.0739	1.8595
order 5				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	40.79688	40.79688	40.7446	0.1282
2	33.37969	33.37969	33.3184	0.1837
3	19.1375	19.1375	19.1841	0.2434
4	26.07656	26.07656	26.0354	0.158
5	42.64219	42.64219	42.5825	0.1411
order 7				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	26.81719	26.81719	26.9989	0.6774
2	10.14375	10.14375	10.2926	1.4669
3	3.935938	3.935938	4.0838	2.7564
4	8.489063	8.489063	8.5574	0.8049
5	25.30313	25.30313	25.4831	0.7112
order 9				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	2.410938	2.410938	2.4373	1.0918
2	2.717188	2.717188	2.6366	1.9641
3	1.067188	1.067188	1.107	2.7283
4	1.585938	1.585938	1.4854	0.0346
5	2.354688	2.354688	2.2918	1.6717

ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้เราสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าฮาร์โมนิกส์ทั้ง 5 คู่ลำดับด้วย  
 โครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง คือมีค่าเปอร์เซ็นต์ความ  
 ผิดพลาดไม่เกิน 3 % ในการตรวจวัดอีกทั้งยังมีความรวดเร็วในการประมวลผลของข้อมูลอีก  
 ด้วยเนื่องจากการหาค่าคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีนี้จะใช้สัญญาณเพียงครึ่งคาบในการ  
 ประมวลผลเพื่อหาค่าคู่ลำดับฮาร์โมนิกส์ในแต่ละลูกคลื่นสัญญาณและมีความเหมาะสมต่อการ  
 นำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์วัดหรืออุปกรณ์พวกตัวกรองฮาร์โมนิกส์ใน  
 ลำดับต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบมาจาก Sub station คนละ Sub

order 2				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	3.6281	3.6281	1.7769	51.0229
2	10.5828	10.5828	2.0979	80.1760
3	0.5984	0.5984	1.8832	214.6919
4	7.4844	7.4844	1.9208	74.3354
5	3.8563	3.8563	1.9234	50.1237
order 3				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	9.7297	9.7297	7.0402	27.6416
2	4.1875	4.1875	4.9390	17.9453
3	0 4.8688	0 4.8688	6.3445	30.3101
4	2.2813	2.2813	6.0983	167.3234
5	3.3250	3.3250	6.0818	82.9124
order 5				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	38.0219	38.0219	23.8498	37.2735
2	37.3641	37.3641	34.1327	8.6484
3	42.3469	42.3469	27.2546	35.6396
4	38.3531	38.3531	28.4592	25.7968
5	44.1719	44.1719	28.5399	35.3891
order 7				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	27.6172	27.6172	25.5075	7.6391
2	23.5016	23.5016	17.1787	26.9039
3	25.4594	25.4594	22.7497	10.6432
4	29.1687	29.1687	21.7740	25.3516
5	23.1469	23.1469	21.7087	6.2133
order 9				
ชุด	เครื่องวัด	FFT	Neural	% Error
1	0.5766	0.5766	0.5565	3.4856
2	3.8625	3.8625	1.8275	52.6854
3	2.0766	2.0766	0.9773	52.9349
4	2.2656	2.2656	1.1262	50.2902
5	1.9531	1.9531	1.1362	41.8264

**ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบผลของโครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องมือวัด โดยใช้ชุดทดสอบอีก Sub หนึ่ง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ ชุดฝึกสอนและชุดทดสอบมาจาก Sub station เดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น มีขีดจำกัดความซับซ้อนของข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีรูปแบบที่แตกต่างไปจากข้อมูลที่ให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการเรียนรู้ จะส่งผลให้ค่า Output ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมีความแตกต่างกันสูงมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Jos Arrillaga , Bruce C Smith , Neville R Watson and Alan R Wood , “Power system harmonic analysis” , John Wiley & Sons, c1997 , pp 7-31
- [2] Neural Network Toolbox, User’s Guide, The Mathworks Inc., January 1998.
- [3] Pecharanin N., Sone, M., Mitsui H, “An application of neural network for harmonic detection in activefilter” ,WCCI-ICNN’94,Vol.6 ,NO.684,P.3756 (1994)
- [4] A Report by Schneider Electric “Power Logic Solution” Schneider Electric Newsletter Vol . 33, January-March 2007
- [5] เตชา ชุมพาลี “เครื่องปล่อยของเหลวควบคุมโดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก” วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [6] รศ.ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก “ฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Harmonics)” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พิมพ์ครั้งที่ 2, 2549
- [7] เอกสารประกอบการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Code Neural Network For MATLAB

```
clear all;
DATA = [ ];
tr = 65;
ts = 5;
sstr = 1;
sstr1 = sstr;
sstr2 = sstr+1;
sstr3 = sstr+2;
entr = sstr+tr-1;
stts = 66;
ents = stts+ts-1;
stts1 = tr+1;
ents1 = stts1+ts-1;
stnode = 1;
noderange = 1;
structure = 5;
roundperstructure = 5;
INPUT1 = DATA(sstr:entr , 2:65);
OUTPUT1 = DATA(sstr:entr , 66:70);
INPUT2 = DATA(stts:ents , 2:65);
OUTPUT2 = DATA(stts:ents , 66:70);
INPUT = [ INPUT1 ; INPUT2];
OUTPUT = [ OUTPUT1 ; OUTPUT2];
OUT = OUTPUT';
[pn,meanp,stdp,tn,meant,stdt] = prestd(INPUT',OUTPUT');
iitr = [sstr1:3:entr sstr2:3:entr sstr3:3:entr];
%iiv = [ sstr3:3:entr];
ptr = pn(:,iitr);
ttr = tn(:,iitr);
Br = OUT(:,iitr);
%pv = pn(:,iiv);
%tv = tn(:,iiv);
%Bv = OUT(:,iiv);
pts = pn(:,stts1:ents1);
tts = tn(:,stts1:ents1);
Bs = OUT(:,stts1:ents1);
v.P = pts;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

v.T = tts;
for n = 1 : structure
    start = clock;
    w = stnode+noderange*(n - 1);
    %u = w-1;
    net=newff(minmax(ptr),[w,5],[purelin','purelin'],'trainlm');
    net.trainParam.show=50;
    net.trainParam.epochs=1000;
    %net.trainParam.goal =0.01;
    net.trainParam.max_fail=inf;
    for q = 1: roundperstructure
        [i,j] = size(ptr);
        %net.iw{1,1} = 0.5*ones(w,i);
        %net.lw{2,1} = 0.5*ones(u,w);
        %net.lw{3,2} = 0.5*ones(2,u);
        %net.b{1} = 0.5*ones(w,1);
        %net.b{2} = 0.5*ones(u,1);
        %net.b{3} = 0.5*ones(2,1);
        %net.layers{1}.initFcn = 'initwb';
        %net.inputWeights{1,1}.initFcn = 'rands';
        %net.biases{1}.initFcn = 'rands';
        %net.layers{2}.initFcn = 'initwb';
        %net.layerWeights{2,1}.initFcn = 'rands';
        %net.biases{2}.initFcn = 'rands';
        %net.layers{3}.initFcn = 'initwb';
        %net.layerWeights{3,2}.initFcn = 'rands';
        %net.biases{3}.initFcn = 'rands';
        net = init(net);
        [net,tr] = train(net,ptr,ttr,[ ],[ ],v);
        Sn = sim(net,ptr);
        S = poststd(Sn,meant,stdt);
        SSn = sim(net,pts);
        SS = poststd(SSn,meant,stdt);
        CC1 = [Br - S];
        EE1 = abs(CC1);
        for aa1=1:length (S)
            GG1(aa1) = abs(100*[EE1(1,aa1)/Br(1,aa1)]);
            GG12(aa1) = abs(100*[EE1(2,aa1)/Br(2,aa1)]);
            GG13(aa1) = abs(100*[EE1(3,aa1)/Br(3,aa1)]);
        end
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
GG14(aa1) = abs(100*[EE1(4,aa1)/Br(4,aa1)]);
```

```
GG15(aa1) = abs(100*[EE1(5,aa1)/Br(5,aa1)]);
```

```
end
```

```
Rr(q,n) = mean(GG1);
```

```
Rrg(q,n) = mean(GG12);
```

```
Rrg3(q,n) = mean(GG13);
```

```
Rrg4(q,n) = mean(GG14);
```

```
Rrg5(q,n) = mean(GG15);
```

```
CC2 = [Bs - SS];
```

```
EE2 = abs(CC2);
```

```
for aa2=1:length (SS)
```

```
GG2(aa2) = abs(100*[EE2(1,aa2)/Bs(1,aa2)]);
```

```
GGM22(aa2) = abs(100*[EE2(2,aa2)/Bs(2,aa2)]);
```

```
GGM23(aa2) = abs(100*[EE2(3,aa2)/Bs(3,aa2)]);
```

```
GGM24(aa2) = abs(100*[EE2(4,aa2)/Bs(4,aa2)]);
```

```
GGM25(aa2) = abs(100*[EE2(5,aa2)/Bs(5,aa2)]);
```

```
end
```

```
%GGME22 = 100*[Nqq22/Is];
```

```
R(q,n) = mean(GG2);
```

```
Rg(q,n) = mean(GGM22);
```

```
Rg3(q,n) = mean(GGM23);
```

```
Rg4(q,n) = mean(GGM24);
```

```
Rg5(q,n) = mean(GGM25);
```

```
Rg6(q,n) =[R(q,n)+Rg(q,n)+Rg3(q,n)+Rg4(q,n)+Rg5(q,n)]/5
```

```
%SME=sum mean error
```

```
%SME(q,n)=mean(GG2 GGM22 GGM23 GGM 24 GGM25)
```

```
if q == 1
```

```
q1l = 1;
```

```
n1r = S;
```

```
n1 = SS;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x1 = net.lw{1,1};x2 = net.lw{2,1};%x3 = net.lw{3,2};

y1 = net.b{1};y2 = net.b{2};%y3 = net.b{3};

zr = Rr(q,n)

z1 = R(q,n)

zr1 = Rrg(q,n)

z11 = Rg(q,n)

zr3 = Rrg3(q,n)

z13 = Rg3(q,n)

zr4 = Rrg4(q,n)

z14 = Rg4(q,n)

zr5 = Rrg5(q,n)

z15 = Rg5(q,n)

else

if Rg6(q,n) < min(Rg6(1:q-1,n))

q1l = q;

n1r = S;

n1 = SS;

x1 = net.lw{1,1};x2 = net.lw{2,1};%x3 = net.lw{3,2};

y1 = net.b{1};y2 = net.b{2};%y3 = net.b{3};

zr = Rr(q,n)

z1 = R(q,n)

zr1 = Rrg(q,n)

z11 = Rg(q,n)

zr3 = Rrg3(q,n)

z13 = Rg3(q,n)

zr4 = Rrg4(q,n)

z14 = Rg4(q,n)

zr5 = Rrg5(q,n)

z15 = Rg5(q,n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
end
q
n

end
%nlr(:,n) = nlr';
%nl(:,n) = nl';
CCC1 = [Br - nlr];
%Nqqq22 = 0;
EEE1 = abs(CCC1);
    for aaa1=1:length (nlr)
        GGG1(aaa1) = abs(100*[EEE1(1,aaa1)/Br(1,aaa1)]);
        GGG12(aaa1) = abs(100*[EEE1(2,aaa1)/Br(2,aaa1)]);
        GGG13(aaa1) = abs(100*[EEE1(3,aaa1)/Br(3,aaa1)]);
        GGG14(aaa1) = abs(100*[EEE1(4,aaa1)/Br(4,aaa1)]);
        GGG15(aaa1) = abs(100*[EEE1(5,aaa1)/Br(5,aaa1)]);
    end
Rlrg(n) = mean(GGG1);
Rlrg2(n) = mean(GGG12);
Rlrg3(n) = mean(GGG13);
Rlrg4(n) = mean(GGG14);
Rlrg5(n) = mean(GGG15);

CCC2 = [Bs - nl];
EEE2 = abs(CCC2);
    for aaa2=1:length (nl)
        GGG2(aaa2) = abs(100*[EEE2(1,aaa2)/Bs(1,aaa2)]);
        GGGM22(aaa2) = abs(100*[EEE2(2,aaa2)/Bs(2,aaa2)]);
        GGGM23(aaa2) = abs(100*[EEE2(3,aaa2)/Bs(3,aaa2)]);
        GGGM24(aaa2) = abs(100*[EEE2(4,aaa2)/Bs(4,aaa2)]);

GGGM25(aaa2) = abs(100*[EEE2(5,aaa2)/Bs(5,aaa2)]);

    end
%GGGME22 = 100*[Nqqq22/ts];
RI(n) = mean(GGG2);
RI2(n) = mean(GGGM22);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

RI3(n) = mean(GGGM23);
RI4(n)=mean(GGGM24)
RI5(n)=mean(GGGM25)
RI6(n)=RI4(n)+RI5(n)+RI(n)+RI2(n)+RI3(n)
RI7(n)=RI6(n)/5
%RIg6(n) =((RI(n))+(RIg(n))+(RIg3(n))+(RIg4(n))+(RIg5(n)))/5

%SMEI(n)=mean(GGG2 GGGM22 GGGM23 GGGM24 GGGM25)

```

```
if n == 1
```

```

n_best = stnode;
x1_best = x1 ;x2_best = x2 ;%x3_best = x3 ;
y1_best = y1 ;y2_best = y2 ;%y3_best = y3 ;
zr_best = zr;
z1_best = z1;
zr1_best = zr1;
z11_best = z11;
zr3_best = zr3;
z13_best = z13;
zr4_best = zr4;
z14_best = z14;
zr5_best = zr5;
z15_best = z15;

```

```
else
```

```

if RI7(n) < min(RI7(1:n-1))
n_best = w ;
x1_best = x1 ;x2_best = x2 ;%x3_best = x3 ;
y1_best = y1 ;y2_best = y2 ;%y3_best = y3 ;
zr_best = zr;
z1_best = z1;
zr1_best = zr1;
z11_best = z11;
zr3_best = zr3;
z13_best = z13;
zr4_best = zr4;
z14_best = z14;

zr5_best = zr5;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
z15_best = z15;
```

```
end
```

```
zr_best = zr
```

```
zr1_best = zr1
```

```
zr3_best = zr3
```

```
zr4_best = zr4
```

```
zr5_best = zr5
```

```
z1_best = z1
```

```
z11_best = z11
```

```
z13_best = z13
```

```
z14_best = z14
```

```
z15_best = z15
```

```
end
```

```
mape_r(n) = zr
```

```
mape_rg(n) = zr1
```

```
mape_rg3(n) = zr3
```

```
mape_rg4(n) = zr4
```

```
mape_rg5(n) = zr5
```

```
mape_s(n) = z1
```

```
mape_sg(n) = z11
```

```
mape_sg3(n) = z13
```

```
mape_sg4(n) = z14
```

```
mape_sg5(n) = z15
```

```
Timetaken(n) = etime(clock,start)/60
```

```
end
```

```
net=newff(minmax(ptr),[n_best,5],{'purelin','purelin'},'trainlm');
```

```
net.lw{1,1} = x1_best; net.lw{2,1} = x2_best; %net.lw{3,2} = x3_best;
```

```
net.b{1} = y1_best; net.b{2} = y2_best; %net.b{3} = y3_best;
```

```
Sn = sim(net,ptr);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

S = poststd(Sn,meant,stdt);
SSn = sim(net,pts);
SS = poststd(SSn,meant,stdt);
M = [Br ; S];
C1 = [Br - S];
E1 = abs(C1);
F1 = Br;
for a1=1:length (E1)
    G1(a1) = abs(100*[E1(1,a1)/F1(1,a1)]);
    G12(a1) = abs(100*[E1(2,a1)/F1(2,a1)]);
    G13(a1) = abs(100*[E1(3,a1)/F1(3,a1)]);
    G14(a1) = abs(100*[E1(4,a1)/F1(4,a1)]);

    G15(a1) = abs(100*[E1(5,a1)/F1(5,a1)]);

```

```

end
H = sum(C1.^2);
N = [Bs ; SS];
C2 = [Bs - SS];
E2 = abs(C2);
F2 = Bs;
G2 = abs(100*[E2./F2]);

```

```
%GME22 = 100*[Nq22/ts];
```

```
Timetaken
```

```

min1 = min(G1)
ming1 = min(G12)
ming3 = min(G13)
ming4 = min(G14)
ming5 = min(G15)

```

```

mean1 = mean(G1)
meang1 = mean(G12)
meang3 = mean(G13)
meang4 = mean(G14)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
meang5 = mean(G15)
```

```
max1 = max(G1)
```

```
maxg1 = max(G12)
```

```
maxg3 = max(G13)
```

```
maxg4 = max(G14)
```

```
maxg5 = max(G15)
```

```
compare2 = N
```

```
percenterror2 = G2
```

```
min2 = min(G2)
```

```
%ming2 = min(G22)
```

```
mean2 = mean(G2)
```

```
%meang2 = mean(G22)
```

```
max2 = max(G2)
```

```
%maxg2 = max(G22)
```

```
%Gerror = GME22
```

```
node1 = n_best
```

```
%node2 = n_best-1
```

```
x1_best
```

```
x2_best
```

```
%x3_best
```

```
y1_best
```

```
y2_best
```

```
%y3_best
```

```
MeanAbsoluteErrorTest = [mape_s,mape_sg,mape_sg3,mape_sg4,mape_sg5]
```

```
MeanAbsoluteErrorTrain = mape_r
```

```
mape_rg
```

```
mape_rg3
```

```
mape_rg
```

4

```
mape_rg
```

5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Code FFT For MATLAB

```
clear all;  
y=[ Data ];  
b=abs(fft(y));  
c=[b(3);b(4);b(6);b(8);b(10)]
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELITE***pro*<sup>TM</sup>

&

**DATA***pro*<sup>TM</sup>

**User's Manual**

**ELOG 2004**<sup>TM</sup> Software

Including **AutoHost**<sup>TM</sup> 5.3

And **AutoPoll**<sup>TM</sup> 5.1

Software Release Date: February 11, 2004

Manual Revision Date: February 11, 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SETTING UP AND USING THE ELITE<sub>pro</sub><sup>TM</sup> and DATA<sub>pro</sub><sup>TM</sup> LOGGERS

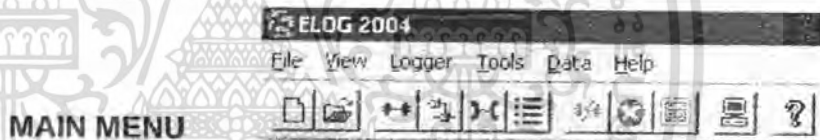
## Introduction

The ELITE<sub>pro</sub> and DATA<sub>pro</sub> instruments are interval data recorders that can be used to measure and record a wide variety of physical parameters (volts, watts, temperature, 4-20 mA and more). Despite their small size and relatively low-cost, these instruments are very sophisticated, accurate and versatile.

The measurements are stored in on-board memory in a time series format, or time bins, at an interval selected by the user. The time bins can be as short as every 3 seconds or as long as every 24 hours. Regardless of the storage interval selected, the logger is sampling its sensors every three seconds when on external power from the included wall transformer or every minute when using its internal battery. These readings are then used to determine the average (or maximum or minimum) value that is stored in each time bin.

The Loggers require a computer (PC) and special software (ELOG) for initial setup and later data retrieval and analysis. To use the ELOG software it must first be installed on your computer. Do this by putting the CD into the appropriate drive (or Disk 1 if using floppies). The CD is auto-loading so simply follow the directions on the screen.

When the ELOG software is run, the MAIN MENU will appear which consists of one line of standard Windows menus structures and a lower line of "hot buttons" that can access many of the most commonly used software functions with just one click of the mouse.



## Step 1: Communicating with the Logger — Direct Serial Connection

Since the ELITE<sub>pro</sub> and DATA<sub>pro</sub> Loggers have no direct user interface on them, all communication must happen through a PC using either the serial port on the logger or through the internal modem, if equipped. If desired, a USB port on your PC may also be used. See the **Application Notes** for a description.

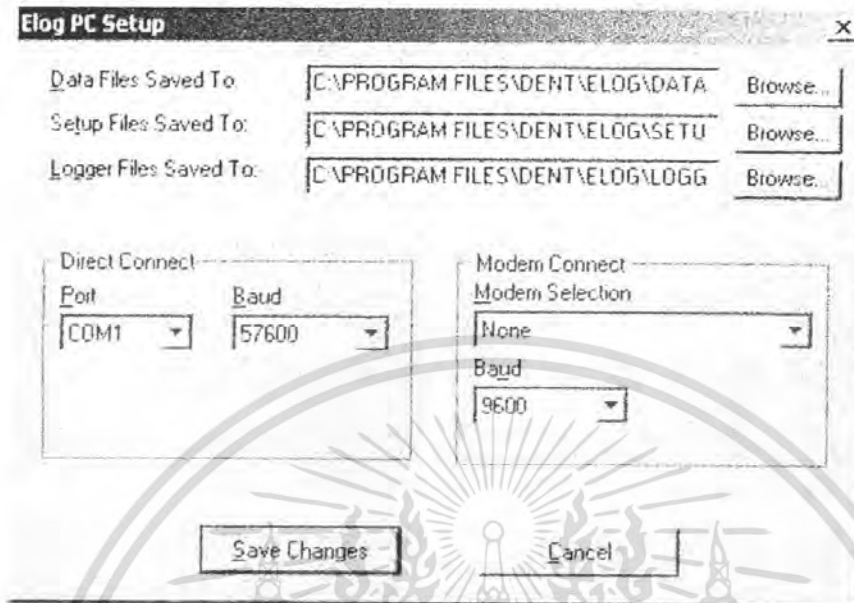
If equipped with a modem, see the section *Remote Communication Via Telephone* at the end of this chapter for more details on using modems.

If communication is over an Ethernet LAN, see the section *Communication Via Local Area Network (Ethernet)* also at the end of this chapter.

To make a direct connection from the PC to the logger, use the supplied *null modem cable* to connect from the logger's serial port (a DB-9 connector) to the serial port on the PC. If necessary, use a 9 to 25 pin adapter on the PC.


**TECH TIP:** Most communication problems are a result of ELOG trying to communicate with the logger at the wrong speed or from the wrong computer port. Use Tools, PC Setup to change these values.

Start the ELOG software and select **T**ools; **P**C Setup... from the menu. A screen similar to the one below will appear:



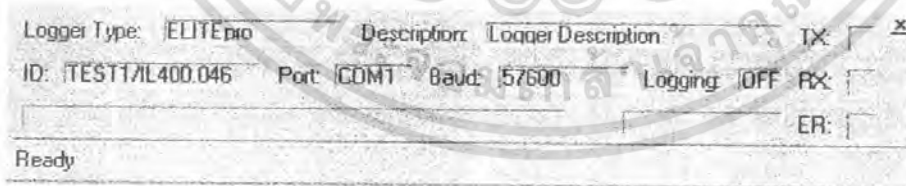
In the lower left-hand box, **Direct Connect**, configure the computer serial connection. Verify that the com port corresponding to where the serial cable is connected on the PC is selected (COM 1, 2, 3 or 4) and that the baud rate is set to that of the logger (1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800 or 57600).

The default baud rate for the loggers is 57,600. ELOG does have an automatic baud search feature, which it will use if the first connection attempt does not succeed.

**TECH TIP:** Quickly set up the PC by clicking on the  **PC Setup** button on the screen.

After configuring the PC, use **L**ogger; **C**ommunication; **D**irect Connect (Null Modem Cable) to connect the PC to the logger.

A connect message similar to the one below will appear on the bottom of the screen:



Use **L**ogger; **C**onnection; **T**erminate Connection to end the communication with the logger.

**TECH TIP:** To quickly connect, use the **\*\* Direct Connect** hot button on the screen and use the **\*\* Disconnect** hot button to disconnect from the logger.

## Step 2: Setting Up The Logger For A Metering Session

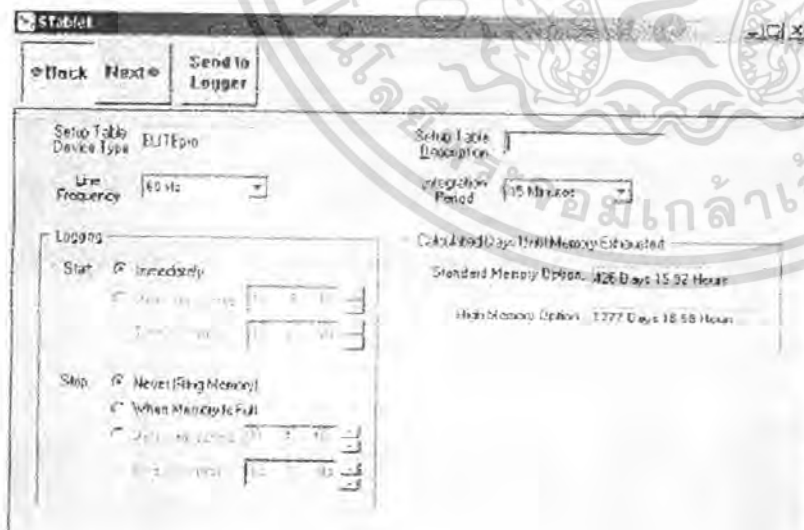
"Setup Table" is the name given to the file that is used to configure the Logger for a monitoring session. The **ELITE<sub>pro</sub>** and **DATA<sub>pro</sub>** Loggers are very flexible meters that can monitor a wide variety of parameters using a large number of different sensors {**DATA<sub>pro</sub>**} and over a wide range of currents, voltages and service types {**ELITE<sub>pro</sub>**}. A meter that is this flexible must be "told" how the operator wants it to be used, what it is to record, and at what intervals. The file that contains this information is called a Setup Table.

Setup Tables are created on the PC and then stored on the hard disk (or floppy disk) with a .sut file name extension. From there they may be stored in the Logger immediately or at a later time (but prior to beginning the monitoring session). Once created, a Setup Table may be stored on the PC hard disk and sent into any number of loggers. Setup Tables may also be retrieved from a Logger, modified if desired, saved or resent to the logger.

New and saved (on the PC) Setup Tables are accessed through the **File; New** or **File; Open** commands respectively. To access a Setup Table in a logger, first connect the PC to the logger as described above and then use the menu command **Logger; Retrieve Logger Setup Table** to view, edit, save to disk or resend to the logger after modifying.

When using **File; New** or **File; Open** the first window asks what kind of file you want to open or create. Choose **Setup Table File**, then OK.

**Creating a New Setup Table:** The ELOG software works with a variety of DENT Instruments products (including **ELITE<sub>pro</sub>** and **DATA<sub>pro</sub>** Loggers). When creating a new Setup Table, the software first asks for what device. If the logger type you wish to configure is not shown in the window, use the arrow key to open the drop-down box and select the correct logger type. If you are currently connected to a logger, the software will assume that you want to create a Setup Table for that device and will not prompt you for a logger type. Selecting New will bring a Setup Table with default parameters as described below.



**TECH TIP:** It is usually best to communicate at the highest baud rate possible. For a direct or network connection that is 57,600 baud. If the logger is not already set to 57600, use the menu item **Logger; Logger Baud Rate...** to change the logger to 57,600. You will then be prompted to update the PC baud rate as well. Click **Match Baud Rates**. Maximum modem communication speed is 14400 baud.

**Opening an Existing Setup Table:** After clicking on **File; Open** and selecting **Setup Table File**, a folder window will appear from which you may navigate to find the Setup Table you desire. The default folder is set from the **Tools; PC Setup** menu.

The Setup Table consists of two "pages" that are accessed by clicking on the **Back** or **Next** buttons located in the "hot button" line at the top of the screen or by using **Ctrl + Page Up** or **Ctrl + Page Down**.

**Page 1, LOGGER SETUP:** This page allows you to define generic Logger attributes:

**Setup Table File Name:** (Stable1 in this example) The Table name is not editable from this menu but may be changed when the Table is saved to the hard disk using either the **Save** (first time) or **Save As** buttons.

**Setup Table Device Type:** This shows what type of Logger for which the table was configured (ELITEpro, DATApro 1T/3P, etc.). It is also not editable and is determined when the setup table type is selected.

**Setup Table Description:** (Optional) User-defined description of the Setup Table (20 character limit). This is helpful for the user to identify different Setup Tables.

**Line Frequency:** 60 Hz or 50/400 Hz. Default is 60 Hz. (Note: this field does not appear with all logger types)

**Integration Period:** This tells the logger at what time intervals data is to be stored in the memory. For example, if the integration period is set for 30 minutes and average watts is being monitored, then every 30 minutes the logger will record in its memory the average power use (watts) for that channel over the preceding 30 minute interval, based on about 600 measurements of the monitored power draw. If Maximum (and/or Minimum) values are being recorded the highest (and/or lowest) of those 600 readings will also be saved.

The default integration period is fifteen minutes. The choices are 3, 15, 30 seconds, 1, 2, 5, 10, 15, 20 and 30 minutes, 1, 12 and 24 hours.

#### LOGGING

This feature controls when the logger will begin collecting data and when it will stop. The default values are start logging immediately (as soon as the setup table is sent to the logger) and to stop logging never.

**Logging Stop: Never (Ring Memory)** means the memory is set in a "Ring" or continuous loop. When the memory fills, the oldest records will be replaced with the newest records. This is also called circular memory. It is most useful for long term metering projects.

**Logging Stop: When Memory Is Full** may also be set to stop logging when the logger memory fills, this is "Linear" memory and is also known as "stop when full."

**Delayed Logging Start/Stop:** Another option is to set the recorder to start and/or stop logging at a future date and time. Simply click the button next to the delayed start or stop and enter the date and time desired. Times should be set in a 24 hour format, e.g., 2:30 pm should be entered as 14:30.


#### CALCULATED DAYS UNTIL MEMORY EXHAUSTED

ELOG provides a convenient feature that calculates the length of time required to fill the memory for any setup table. The feature is dynamic so that any time any parameter in setup table affecting the memory duration is changed, then the Calculated Days Until Memory Exhausted is updated. This allows the operator to know in advance how long the memory will last.

Select **Next** with your mouse or use the Page Down key to go to the next screen.

**Page 2, CHANNEL SETUP:** The *ELITEpro* and *DATApro* Loggers have four configurable hardware channels corresponding to the current transformers {*ELITEpro*} or other sensors {*DATApro*}. The second page is different for the two kinds of loggers and described separately below.


**ELITEpro CHANNEL SETUP:** Any combination of volts (V), amps (A), power (kW), volt-amps (kVA), volt-amps-reactive (kVAR), and power factor can be recorded for each power channel. See the specific sections of *CONNECTING SENSORS AND CONFIGURING CHANNELS: Power Measurements* for how to properly configure the Setup Table for single-phase, 3-phase 3-wire, 3-phase 4-wire services.

Click on the  by each channel and then click **Power** to turn on each channel as desired. These channels refer to the current transformer inputs {*ELITEpro*} or sensor inputs {*DATApro*}. It is usually helpful to click on the maximize button in the upper right hand corner of the Setup Table window.



### Configuring a Power Channel

When configuring the power channel, the following options can be set:

- Name:** (Optional) Name the channel so it best describes the location or item being monitored, such as "Water Heater" or "Pump L1 Phase" (20 characters maximum).
- VHi:** High-side voltage. This is the "high" voltage that will be measured with respect to the reference "low" voltage (VLo). Choices are: L1, L2, L3, Neutral.
- VLo:** Low-side voltage; reference for AC voltage. Choices are: L1, L2, L3, Neutral.
- PT:** Potential Transformer turns ratio. This is used when a step-down transformer is needed to measure AC voltages greater than 600V. The default is 1.000. See *Monitoring Voltages Greater Than 600V* for use of this parameter.
- CT:** The primary current rating of the current transformer. The default is 100 amps. The value to be used is printed on the CT.
- Volts, Amps, KW, KVA, PF, and KVAR:** To record any or all of these values, use the mouse to select the Average, Minimum, Maximum, integrated hourly value and/or Instantaneous recording flags. To access KW, PF, KVAR and the Notes, if not shown on the screen, use the mouse to click on the right arrow of the scroll bar at the bottom of the screen.
- Notes:** (Optional) 80 characters for notes.
-  (Optional) Sets high and low alarm conditions. See also, the section on Alarms

**Power Summation Channels:** Channels 5 and 6 are called *Power Summation Channels*. They combine the data from 2 or more power channels (also called "hardware" or "physical channels") and are used primarily for calculating *total system* volts, amps, kW, kVA, power factor, and kVar in polyphase or multiple single phase systems. Channel 5 *automatically* appears when 2 power channels are turned "on." When 3 or 4 power channels are turned "on," Channel 6 will also *automatically* appear in the setup table.


**TECH TIP:** If only 1 power channel is turned on, then Channels 5 and 6 will not appear on the computer screen. If 2 power channels are turned on, then only Channel 5 will appear.

and combine the data from 2 or more channels.

The Power Summation Channels are most often used to record total system power parameters on three phase loads. They may also be used to optimize the memory of the Logger. Instead of collecting data from two (or more) separate channels, the Power Summation Channel(s) can be configured to collect


To combine channels and maximize memory use, turn off all of the recording flags for the individual hardware channels (Volts, Amps, kW, kVA, PF, and kVAR). Default recording flags are Average Watts. At the Power Summation Channel, select the channels to be added in the **Combine Channels** box and then set the recording flags as desired.

**Example Setup Table for a 3-phase 4-wire (Wye) connected load using Power Summation Channels to optimize Logger Memory.**


Use the speed button  on the second page of the Setup Table to quickly create the 3-phase 4-wire setup. At the prompt, enter the size (primary current rating) of the three CTs that will be used. The following setup table will be created:

Channel	Name	VHi	VLo	PT	CT	Volts	Amps	KW	KVA
Channel 1	Power	L1	N	1.0000	100.000				
Channel 2	Power	L2	N	1.0000	100.000				
Channel 3	Power	L3	N	1.0000	100.000				
Channel 4	Oil								
Channel 5	Power Sum	Combine Channels							
		1,2,3						A	


**NOTE:** To view PF, kVAR, and Channel Notes to the right of the screen, use the scroll bar at the bottom.

When finished with the channel definition page of the Setup Table, use the  button to send the Setup Table to the logger and make it the active table. You may also use **File; Save** (to disk), or **Save As** (to disk with a different name or folder) if you also desire to keep the Setup Table on the PC. Once sent to the logger, it may also be retrieved, edited or saved using **Logger; Retrieve Logger Setup Tables**.

**TECH TIP:** If a standard setup table is created using one of the speed buttons, then a new speed

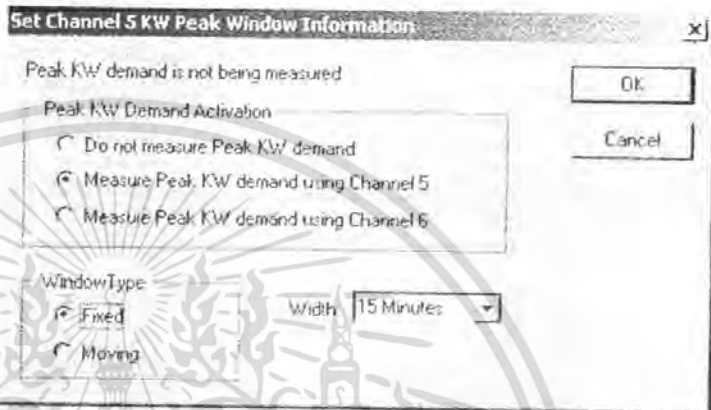
button appears . This button, when clicked will produce a schematic image of how to connect the ELITEpro to a load. It can be printed and carried into the field for easy reference during installation.

**KWh, kVAh, and kVARh Totalizer Registers {ELITEpro only}**: Whenever any recording flag (Average, Minimum, Maximum, or Total) for any parameter (kW, kVA, or kVAR) is turned on for channels 5 or 6 then the totalizer (cumulative kWh, kVAh, and kVARh) for that channel and that parameter is also active. The Peak kW Demand and Totalizer registers apply only to summation channels 5 and 6. The values are shown in the Data File Summary which is generated from a downloaded data file. See also the description of Data File Summary in the Data section.

**Peak kW Demand Register**: The Peak kW Demand Register is set by clicking on the "peak" symbol, , shown in the Channel 5 & 6 kW recording flag area. A new window then opens to set the desired Peak kW options.

Only one channel of Peak kW Demand can be set at a time. Either Channel 5 or Channel 6 but not both.

**TECH TIP:** For single phase loads set channel 5 to be the "sum" of channel 1 only (or other single channel) to get Peak kW Demand.



The Peak kW offers two types of "Windows," Fixed and Moving. A fixed demand window means that the window occurs at the same place within the hour. For example, a 15 minute demand window would always have a time stamp of xx:00, or xx:15, or xx:30, or xx:45.

A Moving demand window, in contrast, could be any rolling 15 minute (for example) period in the hour. So, the Moving window can have a time stamp of xx:00, xx:01, xx:02, xx:03, ...xx:59.

What is the difference? The Moving window is more accurate than the fixed. For example, a peak 15 minute demand may actually occur over a period that spans 6 minutes before the hour to 9 minutes after the hour. A fixed window would "split" that demand over the xx:45 and the xx:00 periods and report whichever is highest. The moving window would accurately capture the true 15 minute peak. The moving window Peak kW Demand is almost always larger than the Fixed window Peak kW.

**Note:** The time stamp associated with a Peak kW Demand in the Data File Summary is the beginning time of the peak period.

Why use one type over the other? The Moving window is more accurate than the Fixed window and also better replicates the kW Peak as indicated by older style thermal demand meters. However, many modern electronic meters do not have the capability to measure Peak kW Demand with a moving window. If it is desired that the ELITEpro data be compared to a utility meter, the ELITEpro can be set to match whichever method the utility meter uses.

The width of the Peak kW Demand window is also selectable. There are 12 choices available from 1 minute to 60 minutes. The most common demand interval is 15 minutes and that is the ELOG default setting.

**Note:** The width of the Peak kW Demand window is independent of the Integration interval. For example, the ELITEpro could be set to a 1 hour integration interval but still record the highest 15 minute demand.


**DATA<sub>pro</sub> CHANNEL SETUP:** All DATA<sub>pros</sub> have 4 input channels and come in a variety of dedicated "flavors." Currently available models include the:

- 1T/3P (1 temperature measurement channel and 3 pulse counters)
- 2T/2P (2 temperature and 2 pulse counters)
- 4T (4, Temperature Channels)
- 4C (4, AC current measurements)
- 4M (4, 0-25 ma or 4-20 ma inputs)
- 4V (4, 0-10Vdc inputs)
- 4P (4, pulse counters)

Consult with DENT Instruments for availability of other types of DATA<sub>pros</sub>.

A variety of parameters can be monitored with the DATA<sub>pros</sub> including pulse counting from pulse initiating meters (gas, electric, water, steam), temperature, AC current, and process signals such as 4-20 mA and 0-5 or 0-10 Vdc. See also the section DATA<sub>pro</sub>: CONNECTING SENSORS AND CONFIGURING CHANNELS.

**TECH TIP:** It is usually helpful to click on the maximize button in the upper right hand corner of the Setup Table window.

Click on the  by each channel in the Setup Table and then the sensor type (Temperature, 4-20mA and so on) to turn on each channel as desired.

Examples of the "Page 2" of the DATA<sub>pro</sub> Setup Tables are shown below:

For Temperature and Pulse Loggers (Models 1T/3P, 2T/3P, 4T, and 4P)

Channel 1	Name	Slope	Offset	Units	Record	Channel 1 Notes
Temperature	Sample Temperature	1.0000	0.0000	Fahrenheit	A	
Channel 2	Name	Sensor	Scale	Units	Record	Channel 2 Notes
Contact/Pulse	Sample Pulse Counter		1.0000		C	

For 4-20 and 0-25 mA Loggers (Model 4M)

Channel 1	Name	Sensor	Slope	Offset	Units	Record	Channel 1 Notes
4 - 20mA	4-20 mA Sensor		1.0000	0.0000	Units	A	
Channel 2	Name	Sensor	Slope	Offset	Units	Record	Channel 2 Notes
0 - 25mA	0-25 mA Sensor		1.0000	0.0000	Units	A	

For AC Current Loggers (Model 4C)


Channel 1	Name	CT	Record	Channel 1 Notes
Current	AC Current	100.00	A	

For DC Voltage Loggers (Model 4V)

Channel 1	Name	Sensor	Slope	Offset	Units	Record	Channel 1 Notes
0 - 10Vdc	0-10Vdc Sensor	Any	1.0000	0.0000	VoltsDC	A	

## Configuring a DATA<sub>pro</sub>™ Channel

When configuring the power channel, the following options can be set:

- Name:** (Optional) Name the channel so it best describes the location or item being monitored, such as "Water Temperature" or "Pump L1 Phase" (20 characters maximum).
- Slope:** When scaling is required to convert raw sensor output (such as millivolts) into engineering units (such as pressure) slope and offset may be used. [Not on Pulse or CT channels]
- Offset:** Used with Slope to scale the raw sensor output into engineering units. [Not on Pulse or CT channels]
- Scale:** Scale factor for pulse channels to convert raw pulses into engineering units. [Pulse channels only]
- Units:** (Optional) Use this field to specify the engineering units that will appear as a column heading with the data.
- CT:** The primary current rating of the current transformer. The default is 100 amps. The value to be used is printed on the CT. {DATA<sub>pro</sub> 4C only}
- Record:** To record any or all of these values, use the mouse to select the Average, Minimum, Maximum, Integrated hourly value {4C} or Instantaneous recording flags.
- Notes:** (Optional) 80 characters for notes.
-  Sets high and low alarm conditions. See also, the section on Alarms

See also Section 4, DATA<sub>pro</sub> CONNECTING SENSORS AND CONFIGURING CHANNELS for more information on using the DATA<sub>pro</sub>.

## Step 3: Connecting The ELITE<sub>pro</sub>™ To A Load

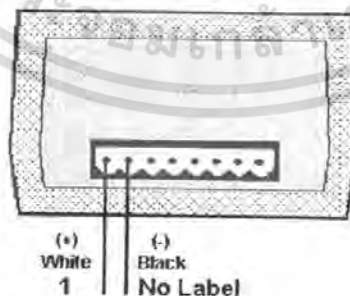
This section is intended to provide a brief overview. See also Section 3, ELITE<sub>pro</sub>: CONNECTING SENSORS AND CONFIGURING CHANNELS for a more detailed treatment.

---

**CAUTION:** THIS LOGGER MAY CONTAIN LIFE THREATENING VOLTAGES. QUALIFIED PERSONNEL MUST DISCONNECT ALL HIGH VOLTAGE WIRING BEFORE USING OR SERVICING THE LOGGER. OBSERVE ALL CAUTION AND WARNINGS DESCRIBED IN THE SAFETY SECTION AT THE BEGINNING OF THIS MANUAL.

---

After storing a Setup Table into the logger it may be connected to a load for measurement. First connect the Current Transformers (CTs) to the appropriate channels on the Logger. ELITE<sub>pro</sub>s use CTs with stripped and tinned, bare terminated wires. The CT leads need to be connected to the green Phoenix termination block as shown in the diagram below using a small screwdriver:



Each channel consists of two terminals or pins. For each channel, the left connector pin is the positive or high-side wire and the right pin is the negative or low-side. When using DENT Instrument

supplied current transformers, connect them as follows:

Split-core CTs (removable leg)—The white CT wire is (+) and the black wire is (-).

Clamp-on CTs (clothes-pin type)—The banded wire with a number one (1) is the (+) wire and the unbanded wire is (-).

**NOTE:** Correct polarity is required to insure proper phasing of the CT.

Next connect the CTs to the phases being monitored. Be careful to observe proper CT orientation. If an arrow is shown on the CT label, it should be pointed towards the load. Otherwise, use the instructions printed on the CT.

If equipped with an external wall transformer, connect it next.

Lastly, connect the voltage leads to the different phases. Connect the White, Neutral wire, first then the remaining voltage sense (phase) wires.

## ELITE<sub>pro</sub><sup>TM</sup> and DATA<sub>pro</sub><sup>TM</sup>

**Turning Logging (data collection) On and Off:** When a Setup Table is stored in a logger, data logging automatically begins unless canceled by the user or the delayed logging start feature is used. At any other time, logging may be turned on or off by use of the Logger; Logging ON/OFF... menu command. When logging is on, the green LED on the logger end-panel should flash every 5 seconds.

**TECH TIP:** When not in use, Logging should be turned off to extend the battery life.

**Clearing Logger Memory:** Use the menu command Logger; Clear Logger Memory... to reset the logger memory before a monitoring session.

**Setting the Logger's Real Time Clock:** The ELITE<sub>pro</sub> logger has an internal, crystal-controlled real-time clock. To set the clock's date and time, use the menu command Logger; Logger Clock. You may set the clock manually or have it automatically synchronized to the PC's internal clock.

**NOTE:** The logger clock can only be set using a MM/DD/YY HH:MM:SS format and uses a 24 hour (military) format. For example, 6 pm should be represented as 18:00. Entering 6 for the hour is interpreted as 06:00 or 6 am.

**Editing The Logger Description Line:** The logger has the provision for an optional 20 character description that stays in the logger. The description line is often used to identify a logger, the logger location or the load the logger is monitoring. Use Logger; Edit Logger Description Line to change the description.

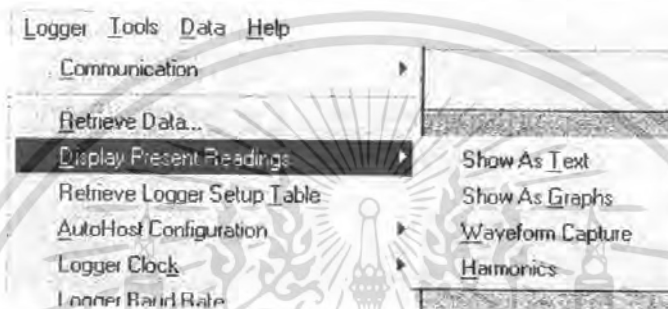
## Step 4: Verifying Installation and Viewing Data In Real Time

Viewing Data In Real Time includes viewing the parameters that may be recorded such as Temperature, volts, amps, kW, kVAR, kVA, and power factor. With the ELITE<sub>pro</sub> it is also possible to view the actual voltage, current and power waveforms as well as the harmonic values out to the 63<sup>rd</sup> order and Total harmonic Distortion (THD), Crest Factor, and Peak Value.

## Viewing Recorded Parameters

The recorded parameters may be viewed in either a graphical or text format. Graphical is most useful for watching long-term trends of a single parameter. The graphical format can be thought of as a electronic, paperless chart recorder. The text format is most useful for viewing all parameters measured by the logger (even those not being recorded) and is often used for verifying proper installation of the logger.

After connecting the logger to a load, it is often useful to look at the parameters the logger is measuring. Connect a PC to the logger serial port and establish a direct connection. Then, using Logger, Display Present Readings, the current values on the logger inputs can be seen through one of four choices.



**Show As Text:** When this option is selected, a screen similar to the one below is shown {ELITEpro}. All of the channels that are turned on are displayed simultaneously. If the parameter is being recorded by the logger, it will be shaded (green in color screens); as are the kW values shown below. For a Power Channel, that means you will be able to see all six power parameters (V, A, kW, kVA, PF, and kVAR) even if only one of the parameters is being recorded. For a DATApro channel there is only one column of data displayed and up to four rows (one for each channel).

This feature is very useful for verifying correct installation of the Logger.

**Instantaneous Channel Values** [Window Title]

Serial Number: 00106      Description: EENT ELITE pro      EPR01 Ver: IL100.047

CH	Channel Type	Channel Values					
1	POWER	111.6 V	10.07 A	1.346 kW	1.348 kVA	1.00 PF	-0.004 VAR
2	POWER	111.6 V	12.21 A	1.350 kW	1.362 kVA	1.00 PF	-0.050 VAR
3	Off						
4	Off						
5	POWER SUM	111.6 V	24.28 A	2.705 kW	2.710 kVA	1.00 PF	-0.054 VAR

Line Frequency: 60.00 Hz       = Parameter Logged       = Parameter Alarm      Display Update:

Memory Remaining: 1.07 Days      Battery State: Est Power: 02/21/97      Logging: On

Memory Used: 0.2%      Battery Volt:      Logger Time: 22:59:58      Memory Type: Linear      Integration Period: 15 Seconds      Exit

This screen provides information about:

- The real-time data (which can be paused for cross-channel comparisons);
- The Line Frequency as measured from Channel 1 on L1;
- How many days the memory has remaining before filling;
- The logger battery condition (and if equipped, internal modem battery);
- The logger clock's current date and time;
- Whether or not the data logging is turned on;
- How much memory has been used;
- Type of memory: Linear (Stop When Full) or Ring (Continuous);
- The integration period, and;
- If a measurement is an alarm condition.

**TECH TIP:** {ELITE pro or DATApro 4C} If no current transformer is connected to a channel that is turned "on," nonzero readings will be displayed. You can use this feature to verify a current transformer connection. If the CT is connected but shows a "0" for a value, then the CT is probably connected but the monitored load is turned off. On the other hand if a constant (usually unreasonably high) value for current is displayed, a CT wire may have come off of the logger.

## Use Display Present Readings To Verify Correct Installation

The Display Present Readings feature may also be use to verify the proper installation of the logger. This is particularly important for the **ELITEpros** where the number of CT and voltage connections increases the chance of an incorrect connection. Using the **Display Present Readings | Show As Text** command. All measured parameters, whether being recorded or not, are displayed. Look for wattages (including sign) and power factor that makes sense.

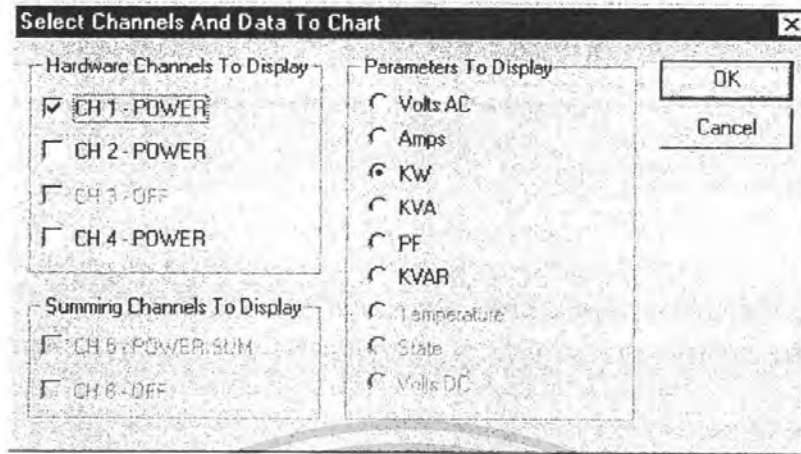
For example, In a single phase 2- or 3-wire or three phase 4-wire installation, the kW reading for each channel and any Power Sum channels should be positive. A negative kW reading usually implies that a CT is placed backward on the wire. It may also mean that the load being measured is actually *supplying* electricity, as from a generator. This is often seen in solar and wind generator systems or where there are backup generators when they are tested.

**TECH TIP:** For three phase 3-wire systems when using the two watt-element monitoring approach, a negative kW on any phase may not be a problem. If the three phase system's average power factor is less than 0.66, then the kW on one of the phases will be negative. This is normal. In this case, the combined channel (5 or 6) total kW should still be positive.

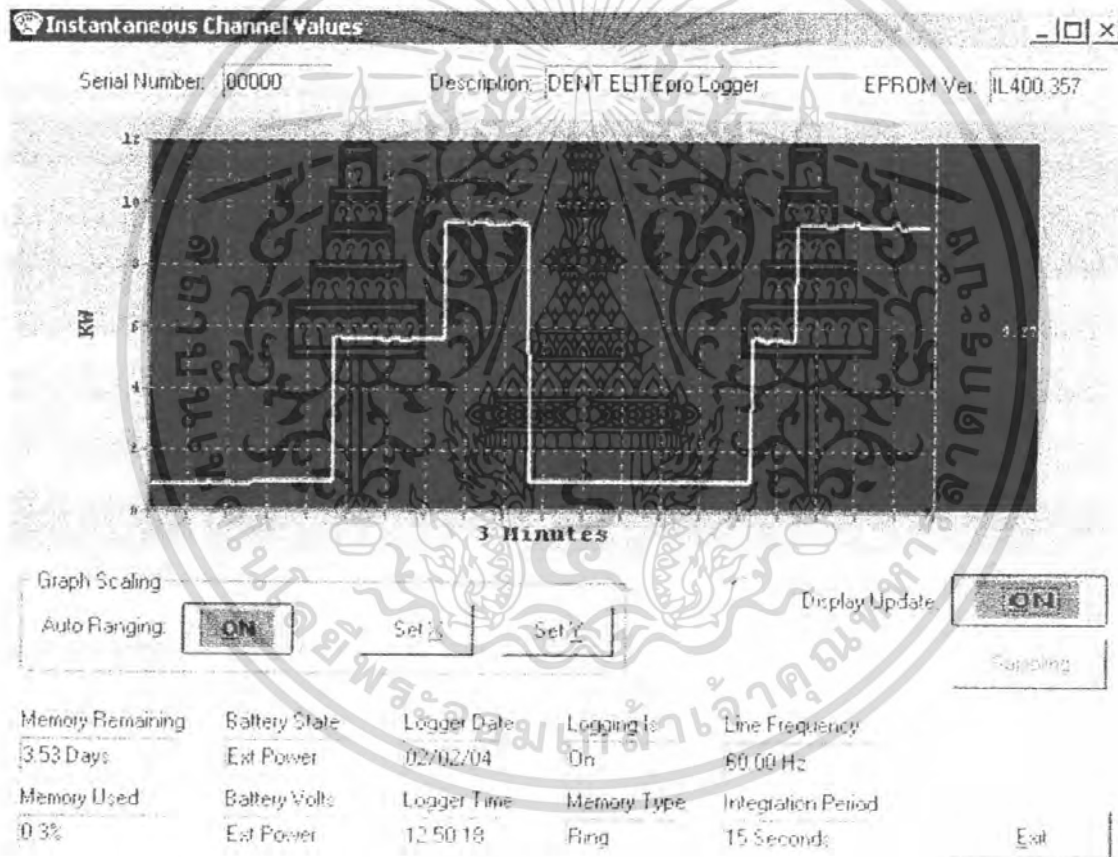
Also look at the power factor readings. These numbers phase and total for 2 and 3-wire single phase systems and all 4-wire systems) should be a reasonable number. Reasonable depends on the load being monitored but typically .8 – 1.0 is seen. For 3 phase 3-wire systems the channel 5 or 6 total power factor should also be a reasonable number.

Discerning a problem through power factor measurement alone is difficult as a load that is dominated by unloaded motors can have power factors below 0.6. Usually, power factor readings below 0.4 indicate the voltage lead is not connected to the same phase that the CT is connected to.

**Show As Graphs:** This feature is similar to the text version described above but shows the data in a graphical format. After selecting this option, a screen such as the one on the next page appears. Among the hardware channels to display will be all of the channels that are currently turned on in the logger. Selecting one or more Hardware Channels makes the **Parameters To Display** panel active and you may choose one variable to graph. You can only choose one variable at a time unlike the text option where you will see all parameters displayed simultaneously. This is because of differences in scaling and to reduce clutter on the graph. For example, you could display kW from 4 channels simultaneously but not kW and KVAR even if from the same channel.



After selecting OK, a graph similar to the following appears:

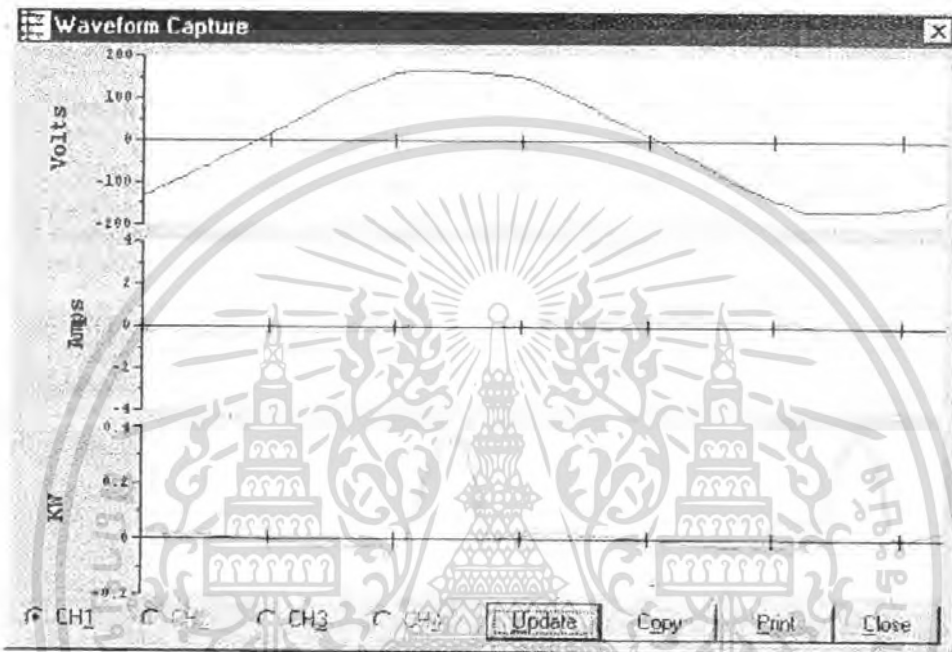


This graphical presentation is very similar to paper strip chart recorders. The graph begins on the left edge and moves to the right. Upon reaching the right edge, the whole graph scrolls to the left with each new reading so that the most current data values are always shown and the older points slide off the left edge. By using the **Set X** feature, the amount of data shown can be varied from 1 second to more than 18 hours (65 000 seconds). Keep in mind that the X-axis scaling is only approximate.

The **Set X** and **Set Y** features can be used to set the scaling, colors, and line type (e.g., linear or logarithmic) and the number of grid lines that overlay the graph.

### Viewing Voltage and Current Waveforms {ELITE<sub>pro</sub> only}

Use the software command **Logger**; **Display Present Readings**; **Waveform Capture** to see the actual current, voltage and power waveform. A typical (highly distorted) display is shown below:

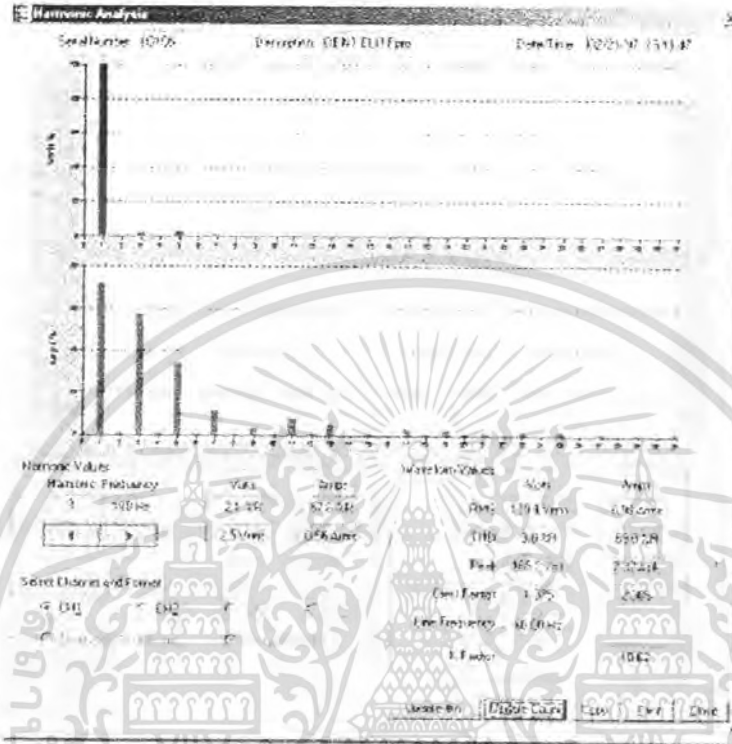


The buttons along the lower left side of the window select the Channel to be displayed. Only one channel may be viewed at a time. The image presented is a single snapshot in time. Use the **Update** button for additional views. Copy will capture the image onto the clipboard for pasting into other programs.

**Note:** The waveform image displayed shows a highly distorted (current) waveform from a computer power supply. These waveforms are typical for switching power supplies and are a major cause of line harmonics. See also the graph on the next page.

## Viewing Harmonics {ELITE<sub>pro</sub> only}

Use the software command **Logger**; **Display Present Readings**; **Harmonics** to see the actual current, voltage and power waveform. A typical (highly distorted) display is shown below:



The buttons along the lower left side of the window select the Channel to be displayed. Only one channel may be viewed at a time. This screen includes a good deal of information. The voltage and current harmonics are presented graphically in the upper part of the window. The ordinate (y-axis) is scaled in percent of the fundamental. The abscissa (x-axis) is the harmonic. Both even and odd harmonics are shown.

The actual value of the voltage and current for each harmonic may be found in the Harmonic Values box. By clicking on the buttons, higher or lower order harmonics may be selected. The Waveform Values box provides summary statistics for the overall current and voltage waveforms. This includes the RMS value, Total Harmonic Distortion (THD), Peak values, Crest Factor and K Factor.

**Note:** The individual harmonic values and THD can be shown as a percentage of the fundamental (IEEE Standard 1035-1989) or as a percentage of the total RMS value (CSA and IEC standard).

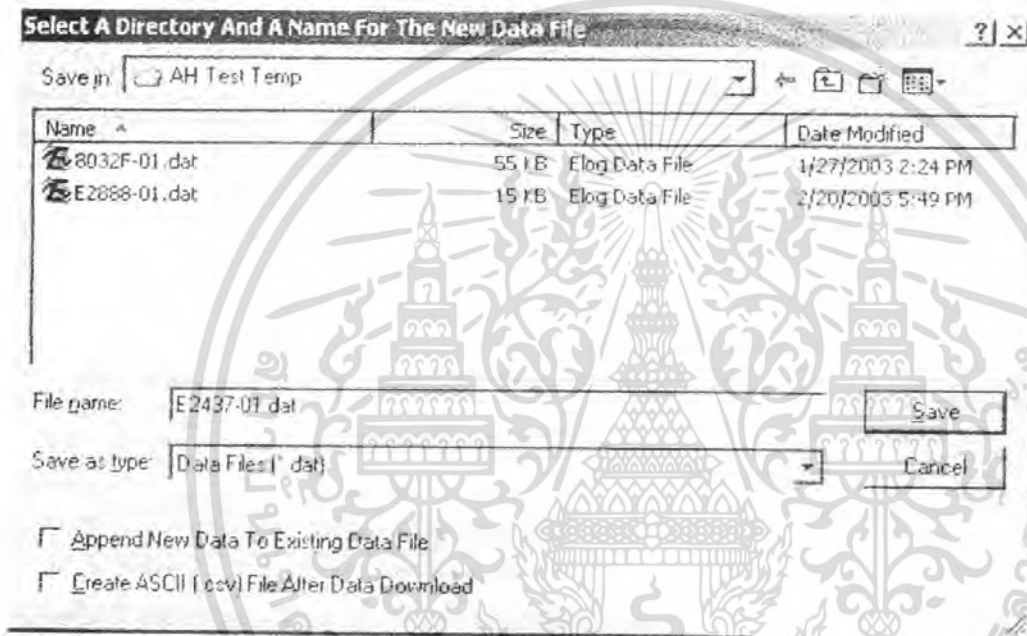
The image presented is a single waveform snapshot. Use the **Update** button for additional views. **Copy** will capture the image on the clipboard for pasting into other programs.

**TECH TIP:** The default number of harmonics shown is 31 plus the DC component. To view additional harmonics (up to the 63<sup>rd</sup>) place the cursor on the horizontal axis of either (or both) the voltage or current bar graph then double click. In the Horizontal Axis dialog box, change the "To" field to the number of the highest harmonic desired then click **OK**.

## Step 5: Retrieving Data From The Logger

After connecting the logger and a PC, the data in the logger can be retrieved by using the **Logger; Retrieve Data** command.

This command retrieves data from the logger and saves it as a binary file with a .dat extension on the file name on the computer hard disk. Before retrieving the data, you will be prompted for a data file name as shown below. The default will be the Logger serial number plus 2 digits that correspond to the number of times data has been retrieved from the Logger and stored in the target folder on the PC. The data will be saved to the folder as specified in **Tools; PC Setup; Data Files Saved To:** or as specified when the data is retrieved. The default data folder is C:\Program Files\IDENT\ELOG\Data



Note the two additional check boxes at the lower left of the screen. The **Append New Data To Existing Data File** box, when checked, then anytime a logger is read and the data retrieved, it will be appended to a previously existing data file from that logger. You will need to select which data file to append to. Data will only be appended to a data file if the setup table of the logger has not been changed from when the earlier data file was downloaded. The "Append" feature is very useful for long term metering projects where automatic, periodic data downloads are made.

**Create ASCII (.csv) File After Data Download**, if checked, will automatically create a second file in addition to the .dat file that is in a comma separated variable (.csv) format. A .csv file can then be opened in a variety of third party programs such as Microsoft Excel.

To view a data file, use **Data; Open Data File** and then choose the file desired.

**TECH TIP:** When retrieving data from a Logger that is connected to external DC power, the sampling rate is reduced from one read every three seconds to one read every 15 seconds during the data retrieval. For Loggers that are operating on the internal battery the sampling rate remains at once per minute.

## Step 6: Viewing the Data; Analyzing, Graphing And Exporting

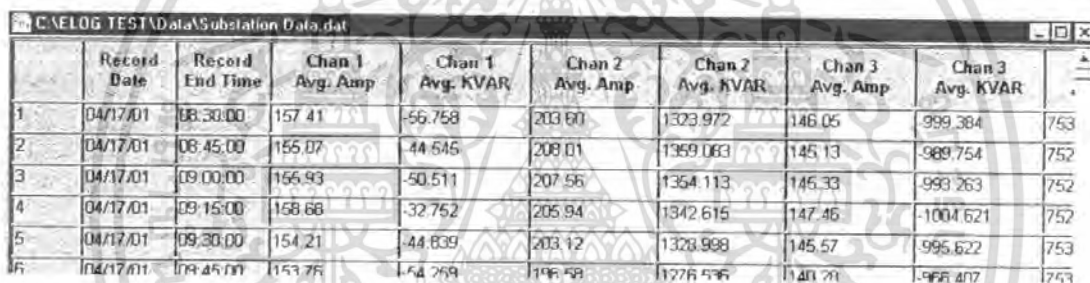
Once the data stored in the Logger has been retrieved to a PC, there are three options available:

1. The data may be opened and viewed (but not edited) using **Data; Open Data File** and then choose the file desired (or also, **File; Open**; select **Data File; Ok**).
2. You may create graphs using **Data; Create New Graph...** and perform various analysis functions Using **Data; Analyze a Selected Data Range** or create a quick summary of the data using **Data; Data File Summary**. The data file can also be clipped using the **Extract a Range of Data**
3. The data can be **Exported** as a comma separated variable file (.CSV) for viewing or further analysis in other applications such as spreadsheets.

Additional analysis and graphing features are continuously being added to ELOG. Consult with DENT Instruments for availability.

### VIEWING A DATA FILE

Stored data files can be viewed (but not edited, editing must be done in another application) by selecting **Data; Open Data File**. To view a data file it must first be downloaded from the Logger by using the **Logger; Retrieve Data...** command. After selecting a data file, a screen similar to the one below will appear.



Record	Record Date	Record End Time	Chan 1 Avg. Amp	Chan 1 Avg. KVAR	Chan 2 Avg. Amp	Chan 2 Avg. KVAR	Chan 3 Avg. Amp	Chan 3 Avg. KVAR	
1	04/17/01	08:30:00	157.41	-56.758	203.60	1323.972	146.05	-999.384	753
2	04/17/01	08:45:00	155.07	-44.645	208.01	1359.063	145.13	-989.754	752
3	04/17/01	09:00:00	155.93	-50.511	207.56	1354.113	145.33	-993.263	752
4	04/17/01	09:15:00	158.68	-32.752	205.94	1342.615	147.46	-1004.621	752
5	04/17/01	09:30:00	154.21	-44.639	203.12	1328.998	145.57	-995.622	753
6	04/17/01	09:45:00	153.75	-44.269	196.58	1276.536	146.71	-966.407	753

The data is always shown in the same way. The left-most column is the record number. It begins with 1 and continues sequentially through all of the data records in the file. The second column is the date of the record and the third column is the time of the record.

**TECH TIP:** To change the format for the date and time stamps use **Start, Settings, Control Panel, Regional Settings (Win 95, 98, 2000) or Regional and Language Options (Win XP)**.

**NOTE:** To view all the data when it does not fit on one screen, use the up/down, left/right scroll bars to move through the data.

The fourth and remaining columns are the data recorded for each parameter that had been logged. If minimum or maximum values were recorded, then the time (to the second) that the minimum or maximum occurred will also be recorded.

## GRAPHING AND ANALYZING THE DATA

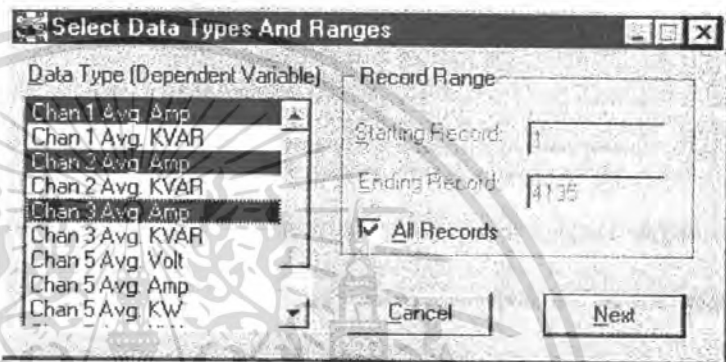
Use Data; Create New Graph... to make a graph from a saved (on the PC) data file.



If a data file is not already open, clicking on this menu item will first bring up a folder from which to select a data file to be used as a source to create a graph. If a data file is already open, selecting this menu item will again open the file folder but will default to the file that is already open.

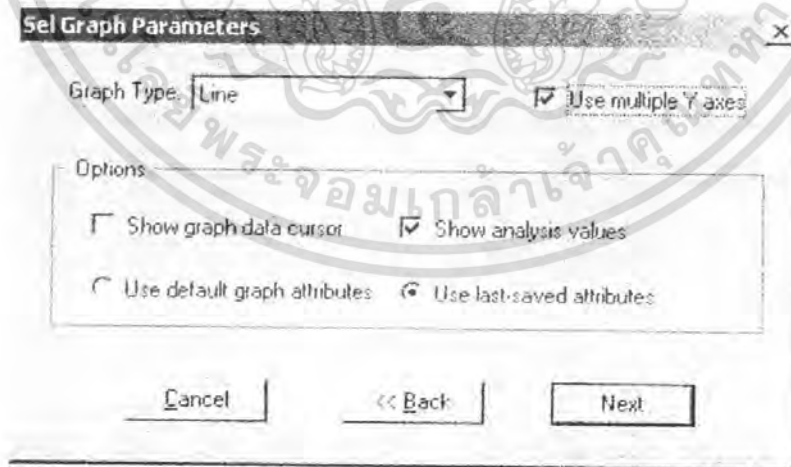
After selecting a data file, a screen similar to the example below will appear:

Use the mouse to select which parameters you wish to graph. Use standard Microsoft Windows functions to select parameters such as: Tag multiple parameters simultaneously by clicking on the first one and then hold down the Control (Ctrl) key and click on any other desired parameters; to select a continuous group of parameters, click on the first one and then hold down the Shift key and click on the last parameter in the group.

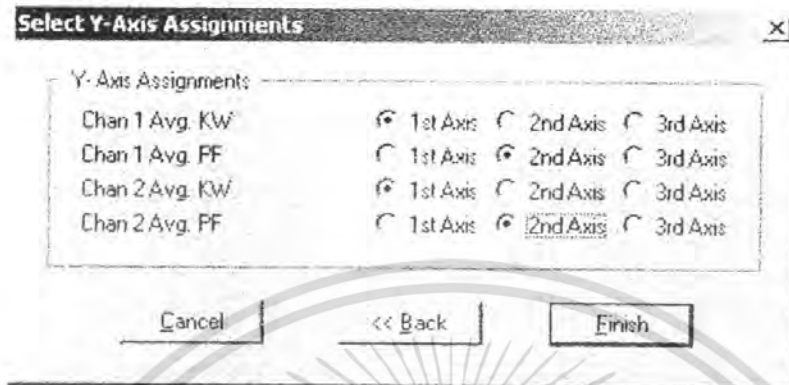


This will select all parameters within the group including the first and last ones.

After selecting the parameters to graph, click Next to define the type of graph to make. Click on the down arrow to reveal the graph type options. Click the data cursor check box to have the data cursor appear when the graph is created (you can also toggle the data cursor on and off with the right mouse button). Use the radio buttons to choose between using the default graph parameters (colors, fonts, etc.) and those used in the last graph created. You can also choose to show summary statistics (minimum, maximum, average) on the graph by checking the Show analysis values box.

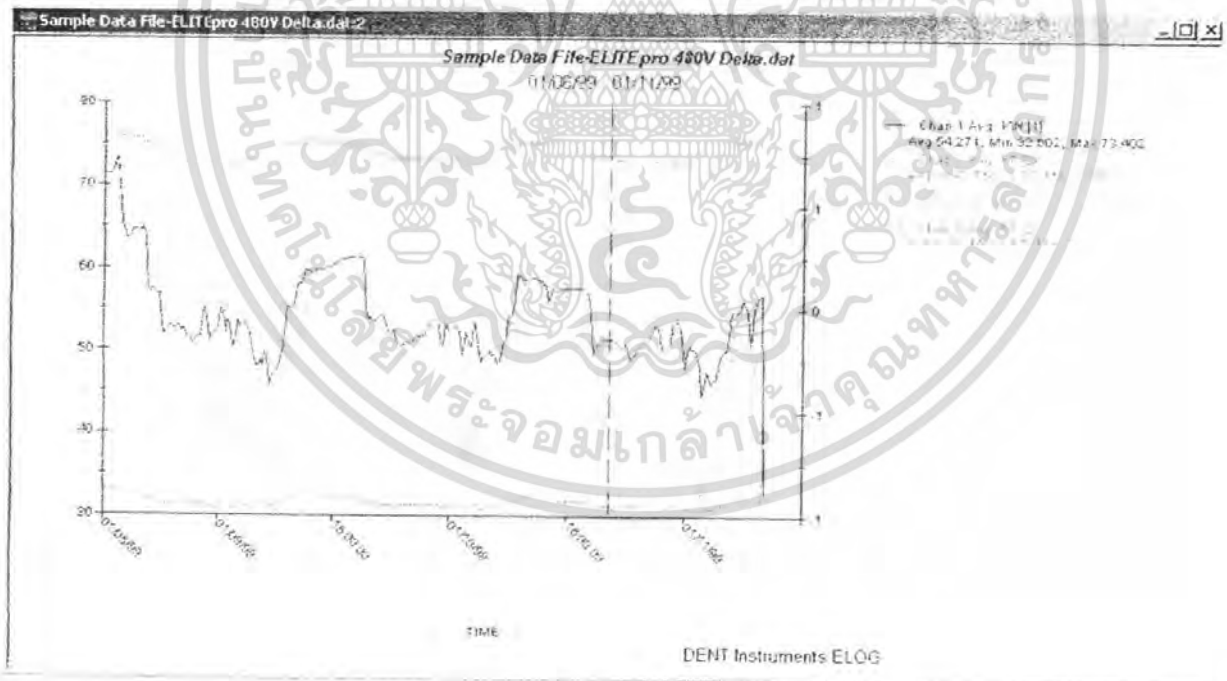


If you have selected more than one parameter to plot the Use multiple Y axes box will appear. If checked, you will get a third window that allows you to assign which parameters are assigned to which Y axes.



Click **Finish** and the graph you have defined will appear similar to the example shown below. Though difficult to see, the parameter names to the right of the graph have a number (1, 2, or 3) in parentheses that indicates which Y – axis they are referenced to. Notice the vertical dashed red line data cursor.

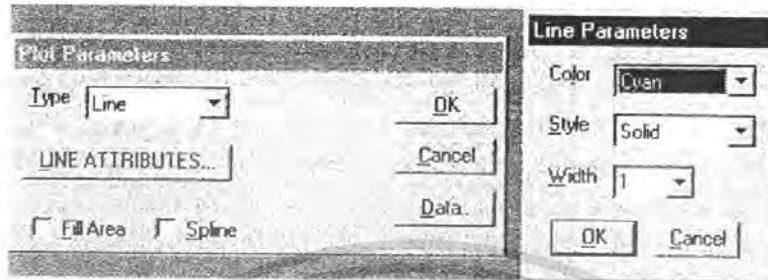
The graph values that are intersected by the Data Cursor are shown in the lower left hand corner of the screen. Values for 01/10/99 20:15:00: 51.415, -0.95, 40.830, 0.74



**TECH TIP:** Quickly create a graph from an open data file by clicking on the **Create Graph** hot button.

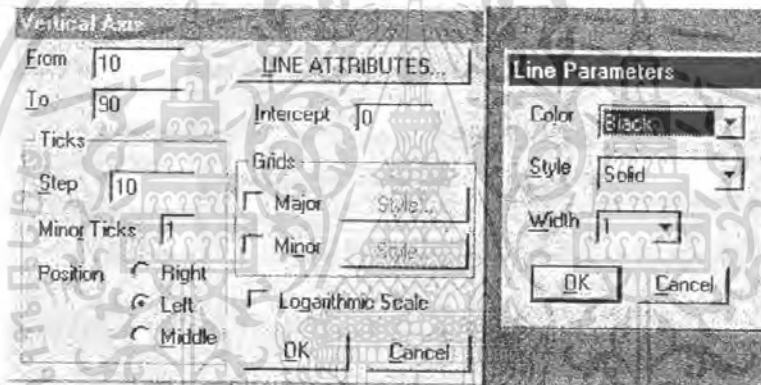
Once created, the graph may be edited in a number of ways. In general, any editable feature may be changed by double-clicking on the feature and making changes in the dialog box that appears. A few examples follow:

By double-clicking on a data point of one of the variables that are in the graph, the following screen appears from which the graph type, color and other parameters may be changed:



**NOTE:** The Line Parameters box is found by clicking on the box Line Attributes...

Double-clicking on the vertical axis produces the dialog box below that can be used to change scale, add grid lines and tick marks.



Double clicking on the axes text (near the axis) will allow you to change the font and size of the labels.

**TECH TIP: Zoom** To zoom in on any portion of the graph, position the mouse pointer near the area to be enlarged. Hold the Control (Ctrl) key and left mouse button down together then drag the pointer to make a rectangle that covers the area to be zoomed. Let go of the mouse and Control key and the graph will redraw an enlarged portion of the graph.

The graph may be zoomed as many times as desired. Use the View; UnZoom, Ctrl U, or the hot button to unzoom in reverse order of the zoom.

Graphs as well as other file types (Data, Setup Tables, Logger Lists) may be printed using the File; Print... command (or Ctrl + P).

ELOG now incorporates a number of data analysis features. Use the menu command:

**TECH TIP: Data Value** To determine the actual value (X and Y coordinates) of any data point in a graph, place the mouse pointer over the point in question and push the right mouse button. The X (time) and Y (value) of the point will be shown in the lower left corner of the screen.

**Analyze A Selected Data Range** to access all the features. To use this command, first select a range of data in the file. Do this by placing the mouse over the first record to be included in the analysis and, with the left mouse button held down, drag the pointer to the end of the range of data desired. To select an entire column, place the mouse pointer over the column header (title) and left click.

There are two things to be aware of: a selection must include at least two records in the same column and only one column may be selected at a time.

Once the data records of interest have been selected (highlighted) use the **Data; Analyze a Selected Data Range** command to choose the desired analysis function.

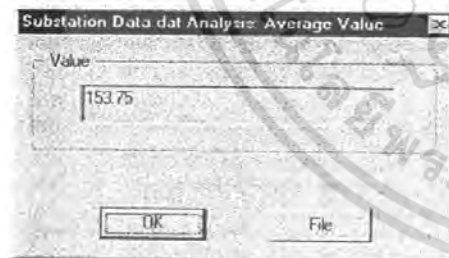
A faster way is to simply use the mouse to select a column or range of data to analyze and then right click the mouse while the pointer is over the highlighted section.

	Record Date	Record End Time	Chan 1 Avg. Volt	Chan 1 Avg. Amp	Chan 1 Avg. KW	Chan 2 Avg. Am
1	06/14/99	10:15:00	227.9	198.75	11.196	221.58
2	06/14/99	10:30:00	228.1	191.74	11.310	224.87
3	06/14/99	10:45:00	230.4	216.91		
4	06/14/99	11:00:00	225.7	217.90		
5	06/14/99	11:15:00	226.4	218.89		
6	06/14/99	11:30:00	231.3	218.62		
7	06/14/99	11:45:00	221.6	226.65		
8	06/14/99	12:00:00	230.1	223.47		
9	06/14/99	12:15:00	229.4	228.90		
10	06/14/99	12:30:00	228.5	241.45		
11	06/14/99	12:45:00	231.9	238.75	14.645	1248.94

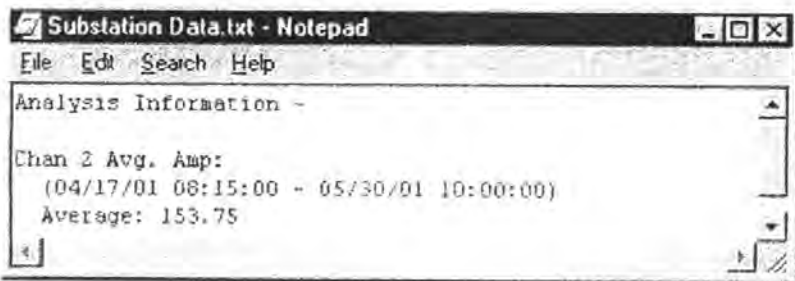
**Analysis Functions**

- Average
- Load Factor
- Maximum
- Minimum
- Total
- Graph
- Daily Profile Graph
- Daily Profile Data Points
- Extract a Range of Data

Selecting Average, Load Factor, Maximum, Minimum or Total brings up a display such as:



Selecting OK closes the pop-up window and returns you to the data file. Selecting File opens the Microsoft Notepad and creates a file such as the one below.



From this point the Notepad file may be edited, saved or printed. In addition, if further analysis is done on this data and the "File" selection is made, the new analysis is also added the current Notepad document.

**Load Factor** is the ratio of the peak (maximum) value to the average value. A horizontal line would have a load factor of 1.0.

**Graph** creates a line graph of the selected data range.

**Daily Profile Graph** and **Daily Profile Data Points** are two powerful new functions that create a 24 hour or 7 day profile graph (sometimes called Load Profile) of the data. A daily profile graph always has as the X-axis the time of day from 0-24 hours or 0-7 days. The Y-axis is the average value at each hour of the day. Think of it as taking all the days of data laid one on top of the other to create an average day. The X-axis resolution of the DP graph and data points is the same as the integration interval of the original data.



An example Daily Profile Graph and Data Points are shown here.

Within the Daily Profile graph there are a number of other functions available including changing to an average Weekly Profile and several choices in the day types used in the graph: All Days, Week Days Only, Weekend Days Only.

Both the DP graph and data points may be saved using the File; Save As command. The graph becomes a Windows meta file (.wmf) and the data points are saved as a comma separated variable (.csv) ASCII file.

**Data File Summary** is a new feature that provides a quick summary of the data and the data file. The Data File Summary opens Notepad and creates a new file that provides a quick snapshot of the data file, the measured parameters, the setup table and the logger itself. This is where the Peak kW Demand and kWh, kVARh, and kVAh totalizer values are found. This document may be edited or saved with Notepad or copy and pasted into a word processor such as MS Word.

Data Summary

Data File Name: 00000-01.dat

First Data Record End Time: 02/02/04 12:55:15  
 Last Data Record End Time: 02/02/04 12:58:30  
 Monitoring Period Duration: 0.00 days

Peak Demand: 277.002kW on Monday 02/02/04 at 12:55:00

Total Usage (Channel 5): 11kWh, 15kVAh, 0kVARh  
 Total Usage (Channel 6): 0kWh

	Average	Maximum (Date Time)	Minimum (Date Time)	Total
Chan 1 Avg. KW	112.373	151.521 (02/02/04 12:55:30)	98.160 (02/02/04 12:58:15)	1573.228
Chan 1 Avg. PF	0.75	0.76 (02/02/04 12:58:15)	0.73 (02/02/04 12:55:30)	10.52
Chan 2 Avg. KW	113.959	153.113 (02/02/04 12:55:15)	99.800 (02/02/04 12:56:30)	1595.427
Chan 2 Avg. PF	0.75	0.77 (02/02/04 12:57:45)	0.73 (02/02/04 12:55:30)	10.53
Chan 5 KW Hours	0.943	1.269 (02/02/04 12:55:30)	0.825 (02/02/04 12:58:15)	13.204
Chan 5 Avg. KVA	301.104	416.661 (02/02/04 12:55:30)	259.440 (02/02/04 12:58:15)	4215.459
Chan 5 KVAR Hours	0.068	0.075 (02/02/04 12:56:45)	0.053 (02/02/04 12:55:30)	0.958

Setup Summary

Setup Table Description:

Channel 1 - Power: VHi: L1, VLo: N; PT = 100.000; CT = 150.000  
 Channel 2 - Power: VHi: L1, VLo: N; PT = 100.000; CT = 100.000  
 Channel 5 - Power Sum: 1,2

Memory Type: Ring  
 Line Frequency: 60 Hz  
 Integration Period: 15 Seconds

Channel 5 Peak kW Demand Window: Moving, Width = 1 minutes

Logger Summary

Logger Description Line: DENT ELITEpro Logger  
 Logger Serial Number: 00000  
 Logger type: ELITEpro  
 Firmware Version: IL400.057

**Extract a Range of Data** is used to trim undesired data off of the ends of the data file. Sometimes data collection occurs before the logger is connected to the load and produces "0" for the first few data records. This can also occur at the end of the data file. By using the Extract command, the ends of the data can be removed.

This feature can also be used to select a set of data out of the middle of a larger data set. For example, perhaps there is a data file that spans the months of April through June but it is desired to have only May data. The Extract command can be used to obtain only the May data.

## EXPORTING A DATA FILE FOR USE IN ANOTHER PROGRAM

Data files may also be exported in an ASCII format for further analysis in other programs. The menu command Data; Export Data File... converts the raw, binary .DAT file to a .CSV format (comma separated variable) which can be brought into a spreadsheet or database program.

To view the data from a spreadsheet program such as Excel follow these steps:

1. Use Data; Export Data File... Then select the desired data file to export
2. Click on Open; a new file with the same name but .csv instead of .dat will be created

or

1. Retrieve the data from the Logger or open an existing file
2. Use File; Save As and under Save as type select Comma Separated Files and then Save

then

3. Start the spreadsheet program
4. From the spreadsheet, use File; Open and find the .CSV data file from the folder you specified, for example, C:\Program Files\IDENT\LOG\Data\name of file.csv
5. Follow the instructions for importing the file.

